

美国工程索引 (EI Compendex) 核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 来源期刊  
日本《科学技术文献速报》(JST) 来源期刊  
美国《剑桥科学文摘》(CSA) 来源期刊  
中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
中文核心期刊要目总览 (第四版) 核心期刊  
中国核心期刊 (遴选) 数据库来源期刊

ISSN 1004-0595  
CODEN MAXUE7

# 摩擦学学报

## TRIBOLOGY

第39卷 第6期

Volume 39 Number 6

# 2019

# 摩 擦 学 学 报

(Mocaxue Xuebao)

第 39 卷 第 6 期 (总第 194 期) 2019 年 11 月

## 目 次

### · 研究论文

- 节流孔截面形状对静压干气密封稳态性能和压力波动特性影响 ..... 车 健, 江锦波, 李纪云, 彭旭东, 王玉明 (669)
- 玻璃表面全氟聚醚衍生物润滑膜的自组装及性能研究 ..... 陈海杰, 乔 旦, 巴召文, 冯大鹏, 张 坚, 宋增红 (680)
- 基于舌 / 上颚微间隙下流体流动行为研究 ..... 陈汝斯, 钱善华, 浦广益, 倪自丰, 俞经虎 (692)
- 马氏体钢干滑动磨损纳米梯度结构的形成机理研究 ..... 高清远, 李淑欣, 苏云帅 (698)
- 不同润滑条件下 PA66 的摩擦学性能研究 ..... 李云凯, 王优强, 谢奕浓, 龙慎文 (706)
- 水轮发电机碳刷 / 集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究 .....  
..... 秦红玲, 付 阳, 喻 叶, 刘云帆, 杨 昌, 赵新泽, 张小龙 (713)
- 氧化铝 / 石墨 - 硫酸钡层状复合材料的摩擦学性能及润滑机理 ..... 宋俊杰, 樊恒中, 苏云峰, 张永胜, 胡丽天 (723)
- 燃油稀释对柴油机油性能影响规律研究 ..... 苏国庆, 郭灵燕, 王晓波, 李维民, 李现明, 王 静 (730)
- 机械密封在干摩擦状态下的摩擦界面热力耦合分析 ..... 王计辉, 陈 志, 顾灿鸿, 邱海涛, 吉 华 (737)
- 六氟乙酰丙酮离子液体的合成及摩擦学性能研究 ..... 杨得锁, 李文倩, 马 琳, 韩云燕, 王冬梅, 凡明锦 (746)
- 原位合成 Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> 纳米复合润滑剂对 YSZ 涂层摩擦学性能的影响 .....  
..... 杨晶晶, 陕 钰, 付英英, 乔竹辉, 贾均红, 易戈文, 王文珍 (756)
- 攻角对聚醚醚酮 / 泡沫镍双连续复合材料浆料冲蚀行为的影响 .....  
..... 杨晓光, 姜胜利, 张 雪, 段德莉, 李 曙, 张会臣 (766)
- 载荷和纳米 MoS<sub>2</sub> 添加剂含量对圆形锤头 - 棒料的摩擦磨损特性及其机理分析 .....  
..... 张立军, 韩 琳, 张德潇, 李增辉, 张军伟, 金永山, 王早祥 (777)

### · 评述与进展

- 第 22 届材料磨损国际会议的简要评述 ..... 郭智威, 白秀琴, 周新聪, 袁成清 (786)
- 涉海装备用机械密封技术研究现状及发展趋势研究 ..... 赵文静, 金 杰, 孟祥锐, 彭旭东 (792)

责任编辑 周金芳

# Tribology

Vol 39, No 6, November 2019

## Contents

- Effect of Orifice Cross-Section Shape on Steady Performance and Pressure Fluctuation Characteristics of Hydrostatic Dry Gas Seal .....*CHE Jian, JIANG Jinbo, LI Jiyun, PENG Xudong, WANG Yuming* (669)
- Self-Assembly and Property of Perfluoropolyether Derivatives Lubricating Films on Glass Surface .....  
..... *CHEN Haijie, QIAO Dan, BA Zhaowen, FENG Dapeng, ZHANG Jian, SONG Zenghong* (680)
- Fluid Flow Behavior Based on Tongue/Upper Palate Micro-gap .....  
..... *CHEN Rusi, QIAN Shanhua, PU Guangyi, NI Zifeng, YU Jinghu* (692)
- Investigation on Formation Mechanism of Nano-Gradient Structure in Dry Sliding Wear of Martensite Steel .....  
..... *GAO Qingyuan, LI Shuxin, SU Yunshuai* (698)
- Tribological Properties of Polyamide 66 in Multiple Lubrication Conditions .....  
..... *LI Yunkai, WANG Youqiang, XIE Yinong, LONG Shenwen* (706)
- Tribological Performance of Carbon Brush/Collector Ring for Hydroelectric Generator under Dry Sliding Condition with Current-Carrying and without Current-Carrying .....  
..... *QIN Hongling, FU Yang, YU Ye, LIU Yunfan, YANG Chang, ZHAO Xinze, ZHANG Xiaolong* (713)
- Tribological Properties and Lubrication Mechanism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite–BaSO<sub>4</sub> Laminated Composites .....  
..... *SONG Junjie, FAN Hengzhong, SU Yunfeng, ZHANG Yongsheng, HU Litian* (723)
- Influence of Fuel Dilution on the Performance of Diesel Engine Oil .....  
..... *SU Guoqing, GUO Lingyan, WANG Xiaobo, LI Weimin, LI Xianming, WANG Jing* (730)
- Thermo-Mechanical Coupling Analysis of Friction Interface of Mechanical Seals under Dry Friction .....  
..... *WANG Jihui, CHEN Zhi, GU Canhong, QIU Haitao, JI Hua* (737)
- The Synthesis and Tribological Properties of Hexafluoroacetylacetone Ionic Liquid Lubricants .....  
..... *YANG Desuo, LI Wenqian, MA lin, HAN Yunyan, WANG Dongmei, FAN Mingjin* (746)
- Effects of In-Situ Synthesis Nanoscale Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> Composite Lubricants on Tribological Properties of YSZ Coatings .....  
.....*YANG Jingjing, SHAN Yu, FU Yingying, QIAO Zhuhui, JIA Junhong, YI Gewen, WANG Wenzhen* (756)
- The Influence of Impact Angle on Erosion Behavior of PEEK/Ni Foam Co-continuous Composite .....  
..... *YANG Xiaoguang, JIANG Shengli, ZHANG Xue, DUAN Deli, LI Shu, ZHANG Huichen* (766)
- Friction and Wear Characteristics and Mechanism Analysis of Load and Nano MoS<sub>2</sub> Additive on Circular Hammerhead-Bar .....  
..... *ZHANG Lijun, HAN Lin, ZHANG Dexiao, LI Zenghui, ZHANG Junwei, JIN Yongshan, WANG Hanxiang* (777)
- Review of Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials .....  
.....*GUO Zhiwei, BAI Xiuqin, ZHOU Xincong, YUAN Chengqing* (786)
- State of the Art and Development Trend of Mechanical Seal for Marine Equipment .....  
..... *ZHAO Wenjing, JIN Jie, MENG Xiangkai, PENG Xudong* (792)

# 《摩擦学学报》第七届编委会名单

(按姓氏拼音排序)

顾 问	高万振(研究员)	李诗卓(教授)	刘家浚(教授)	齐毓霖(教授)
	温诗铸(院士)	徐滨士(院士)	谢友柏(院士)	严东生(院士)
	张嗣伟(教授)	赵 源(研究员)		
主 编	薛群基(院士)			
常务副主编	刘维民(院士)			
副 主 编	李 健(研究员)	雒建斌(院士)	周仲荣(教授)	
委 员	蔡振兵(研究员)	陈国需(教授)	陈华辉(教授)	陈建敏(研究员)
	程先华(教授)	戴振东(教授)	邓建新(教授)	丁传贤(院士)
	方 亮(教授)	冯大鹏(研究员)	葛世荣(教授)	郭东明(院士)
	郭 强(教授)	郭志光(研究员)	韩志武(教授)	胡丽天(研究员)
	胡元中(教授)	黄 平(教授)	黄伟九(教授)	贾均红(研究员)
	寇宏超(教授)	雷明凯(教授)	黎 明(教授)	李红轩(研究员)
	李 俊(院士)	李 曙(研究员)	刘 焜(教授)	刘 阳(高工)
	刘勇兵(教授)	路新春(教授)	彭旭东(教授)	钱林茂(教授)
	任露泉(教授)	任天辉(教授)	水 琳(教授级高工)	佟 金(教授)
	王成焘(教授)	王国彪(教授)	王海斗(教授)	王华明(教授)
	王黎钦(教授)	王立平(研究员)	王齐华(研究员)	王文中(教授)
	王晓雷(教授)	翁立军(研究员)	乌学东(研究员)	邢建东(教授)
	严新平(教授)	阎逢元(研究员)	杨 军(研究员)	杨沛然(教授)
	虞 烈(教授)	张建荣(教授)	张俊彦(研究员)	张绪虎(教授)
	张招柱(研究员)	张治军(教授)	周 峰(研究员)	周惠娣(研究员)
	朱旻昊(教授)	Robert JK Wood(教授)	Nikolai Myshkin(教授)	Stephen M Hsu(教授)

## 摩擦学学报 (Mocaxue Xuebao)

双月刊

第39卷 第6期(总第194期) 2019年11月

(1981年创刊)

## Tribology

Bimonthly

Vol 39 No 6, (Sum No 194) November 2019

(Started in 1981)

主 管 中国科学院  
 主 办 中国科学院兰州化学物理研究所  
 主 编 薛群基  
 编 辑 《摩擦学学报》编辑部  
 地 址 甘肃省兰州市天水中路18号  
 邮政编码 730000, 电话 0931-4968238  
 电子信箱 tribology@licp.cas.cn  
 出 版 科 学 出 版 社  
 (北京市东黄城根北街16号 100717)  
 印刷装订 兰州万易印务有限责任公司  
 总发行处 兰州市邮政局  
 国外总发行 中国国际图书贸易总公司  
 (中国国际书店 北京399信箱 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences  
 Sponsored by Lanzhou Institute of Chemical Physics,  
 Chinese Academy of Sciences  
 Editor-in-Chief XUE Qunji  
 Edited by Editorial Office of Tribology  
 Address 18 Tianshui Road, Lanzhou, 730000, China,  
 Tel: 86-931-4968238, E-mail: tribology@licp.cas.cn  
 Published by Science Press, Beijing, China  
 (16 Donghuangchenggen, North Street, Beijing 100717)  
 Printed by Wanyi Printing House of Lanzhou  
 Distributed by Post Office of Lanzhou  
 Distributed by China International Book Trading Corporation  
 (P.O.B. 399, Beijing, China)

标准刊号: ISSN 1004-0595  
CN 62-1095/O4

国内外公开发行代号: 国内邮发 54-42  
国外发行 4504BM

国内定价: 本期 38 元  
全年 228 元



(购买本刊请扫左侧二维码)



11 >

9 771004 059196

DOI: 10.16078/j.tribology.2019027

# 节流孔截面形状对静压干气密封稳态性能和压力波动特性影响

车健, 江锦波\*, 李纪云, 彭旭东, 王玉明

(浙江工业大学 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 建立了不同形状节流孔出口截面静压干气密封的几何模型, 采用湍流大涡模拟方法数值求解了小孔节流静压干气密封的瞬态流场和压力场, 对比了节流孔出口开设圆角、倒角与经典小孔节流静压干气密封的开启力、泄漏率等稳态性能参数和节流孔出口附近的压力波动特性, 以较大密封开启力和较小压力波动为目标, 获得了节流孔出口倒角和圆角的优选值范围. 结果表明: 相较于经典小孔节流静压干气密封, 节流孔出口开设倒角或圆角能提高静压干气密封的开启力, 显著降低节流孔出口压力波动, 且当倒角为0.3~0.4 mm, 圆角为0.1~0.3 mm时具有最佳效果.

**关键词:** 静压干气密封; 节流孔; 压力波动; 稳态性能; 大涡模拟

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0669-11

## Effect of Orifice Cross-Section Shape on Steady Performance and Pressure Fluctuation Characteristics of Hydrostatic Dry Gas Seal

CHE Jian, JIANG Jinbo\*, LI Jiyun, PENG Xudong, WANG Yuming

(Engineering Research Center of Process Equipment and Its Remanufacturing of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Zhejiang Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Geometrical model of hydrostatic dry gas seal with different orifice cross-section shape was established. The transient flow field and pressure field of hydrostatic dry gas seals with orifice-type restrictor were solved numerically by large eddy simulation method. The steady-state performance, such as opening force and leakage rate, and pressure fluctuation characteristics adjacent to the outlet of orifice of hydrostatic dry gas seal with filleted or chamfered orifices and typical orifice-type restrictor were compared and analyzed. For the purpose of obtaining large opening force and small pressure fluctuation, the preferred values of chamfer and fillet were obtained. The results show that the fillet and chamfer on the outlet of orifice can enhance opening force and reduce pressure fluctuation of hydrostatic dry gas seal significantly compared to that with typical orifice-type restrictor. The preferred chamfer was from 0.3 to 0.4 mm, and the preferred fillet was from 0.1 to 0.3 mm.

**Key words:** hydrostatic dry gas seal; orifice-type restrictor; pressure fluctuation; steady-state performance; large eddy simulation

Received 24 February 2019, revised 26 April 2019, accepted 12 May 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: jinbo\_110@163.com, Tel: +86-13819450477.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51705458, 51575490), Zhejiang Provincial Natural Science Fund Project (LQ17E050008, LY18E050026) and Zhejiang College Students Science and Technology Innovation Plan and Xinmiao Talent Project (G1808102058901).

国家自然科学基金项目(51705458, 51575490), 浙江省自然科学基金(LQ17E050008, LY18E050026)和浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(G1808102058901)资助.

静压干气密封(Dry Gas Seal, 简称为DGS)是在气体静压轴承基础上发展而来的一种新型干气密封, 其通过一定的节流器使外部带压气体产生节流效果, 进而形成具有一定承载力和刚度的气膜, 其中以小孔节流应用最广. 相较于常规动压型DGS, 静压DGS具有不受转速和方向限制, 静压或低速时气膜承载力和刚度大等特点, 故在制药釜、搅拌器等低速旋转机械中逐渐得到应用<sup>[1-2]</sup>. 如何通过节流器结构的合理设计以实现较高气膜承载和较小压力波动是静压DGS设计的关键问题.

相较于静压气体轴承, 静压DGS的研究较少, 且主要集中于典型小孔节流静压DGS的稳态特性求解方面. Cheng等<sup>[3]</sup>最早提出了小孔节流自加压式静压DGS, 并与雷列台阶静压DGS和螺旋槽DGS进行对比分析, Stolarski等<sup>[4]</sup>则进一步研究了均压槽位置与气膜特性的交互影响规律. Fujiwara等<sup>[5]</sup>研究指出静压DGS在轻载条件下具有较大的气膜刚度. 赵艳凤等<sup>[6-7]</sup>研究了均压槽形状对小孔节流静压DGS稳态性能的影响, 指出环形均压槽具有最大的开启力和气膜刚度. 上述的研究工作均是基于经典的小孔节流, 而对于如何通过节流孔形状的合理设计以实现静压DGS的高承载和高气膜稳定性还未见报道.

节流孔出口附近的涡流和压力波动对气膜承载能力和稳定性的影响不容忽视. 针对静压气体轴承的研究发现, 均压槽的增设在显著提高轴承承载力的同时也增强了气体在轴承内的不稳定性, 进而可能诱发气膜的微幅自振或气锤自振. 气体从节流孔进入均压槽后, 会在节流孔出口附近出现压降和压力回升现象<sup>[8]</sup>, 这种压降比基于层流假设预期的数值要低很多<sup>[9-10]</sup>. 为更好地描述节流孔出口气膜压力及气体流动状态, Haruyama等<sup>[11]</sup>采用包括超音速区、过渡区和亚音速区在内的三区域模型描述静压气体轴承流体流动, Li等<sup>[12-13]</sup>采用湍流大涡模拟方法清晰地捕捉到静压气体轴承气腔内的气旋瞬时变化.

近年来, 很多国内外学者通过节流孔和均压槽的优化设计以探索抑制气流涡动和提高气膜承载的方法. Canbulut等<sup>[14]</sup>分析了节流孔和均压槽形状对静压气体轴承刚度的影响, Cui等<sup>[15]</sup>则对比分析了单个小孔、带均压槽小孔和多孔质节流结构静压气体轴承的稳定性. Yoshimoto等<sup>[16]</sup>提出通过在轴承端面开设T型槽可有效抑制气膜微振动. 节流孔出口形状及其对气体轴承稳态特性的影响引起了很多学者的重视. Aoyama等<sup>[17]</sup>指出节流孔出口圆角处理可有效抑制微

振动产生; Belforte等<sup>[18]</sup>通过理论和试验研究了节流孔边界形状对气膜压力分布的影响; 张君安等<sup>[19]</sup>提出了可变均压槽结构, 该结构可有效提升静压轴承的气膜刚度; 郭良斌等<sup>[20-21]</sup>通过有限元计算和试验测试方法, 分别求得了闭式静压气体球轴承气膜压力分布; 陈学东等<sup>[22-23]</sup>利用Fluent软件对比分析了无气腔、矩形气腔和球形气腔三种气体轴承的压力分布, 指出带气腔的气体轴承节流孔出口附近存在气旋, 并深入探讨了不同节流气腔的气旋与微振动特性. 值得注意的是, 干气密封与气体轴承存在诸多差异, 如干气密封的内外径具有一定的压差, 且需同时兼顾密封性、气膜承载能力和稳定性, 这些差异使得气体轴承中的一些结论在干气密封中是否适用仍未可知, 如何合理设计静压DGS节流孔出口形状还有待进一步探索.

本文作者采用湍流大涡模拟方法数值求解了不同截面形状节流孔静压DGS的瞬态流场和压力场, 对比分析了倒角、圆角出口节流孔与经典小孔节流静压DGS的开启力、泄漏率等稳态性能参数及流场、压力场等瞬态场量, 揭示了圆角和倒角出口节流孔增载抑振的作用机制, 并获得了圆角和倒角的参数优选值范围.

## 1 分析模型

### 1.1 几何模型

图1所示为一种典型的外加压式静压干气密封及其流体域截面示意图. 经典的静压DGS结构包括动环、静环及其支承结构, 其中静环上开设有均压槽和数量为 $N_g$ 的节流孔, 压力为 $p_s$ 的节流气通过节流孔进入密封间隙中, 产生静压开启力以平衡闭合力, 进而在密封端面之间形成1层厚度为 $h_0$ 的微米级气膜而实现非接触运行. 为使干气密封具有较大的开启力和气膜刚度, 本文中均压槽结构选用环形均压槽<sup>[6]</sup>; 以经典的小孔节流结构作为对比基准, 探讨节流孔出口截面形状对静压干气密封稳态性能和压力波动特性的影响.

密封端面的内径、外径和节流孔中心处半径分别为 $r_i$ 、 $r_o$ 和 $r_c$ , 密封端面环形均压槽的外半径和内半径分别为 $r_a$ 和 $r_b$ . 未开槽区气膜间隙、均压槽深度和节流孔轴向长度分别为 $h_0$ 、 $h_1$ 和 $h$ , 节流孔直径和均压槽径向宽度分别为 $d$ 和 $w_d$ . 节流孔出口可作圆角或倒角处理, 其中圆角半径为 $R$ , 倒角为 $C$ . 为分析方便起见, 将圆角半径和倒角统一用出口形状参数 $CR$ 来表示, 当 $CR=0$ 时即为经典小孔节流结构. 为表征均压槽的径向开槽宽度比例, 引入无量纲参数径向开槽比 $W_d$ 为

$$W_d = \frac{r_a - r_b}{r_o - r_i} = \frac{w_d}{r_o - r_i} \quad (1)$$

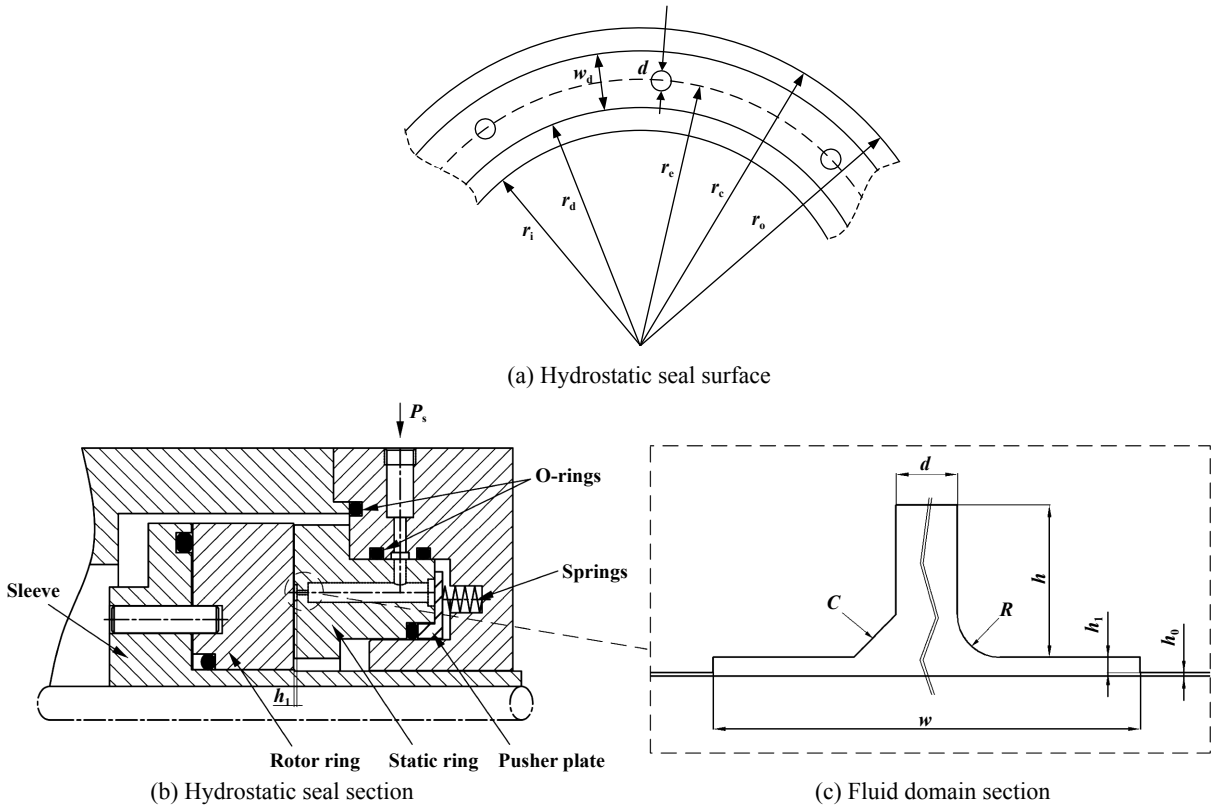


Fig. 1 Hydrostatic dry gas seal and radial geometrical model of orifice-type restrictor

图 1 静压干气密封结构及节流孔径向截面几何模型

### 1.2 大涡模拟控制方程

目前, 模拟湍流流场的常用数值方法主要包括雷诺平均N-S方法(RANS)和湍流大涡模拟(LES). 雷诺平均法采用时均N-S方程来求解瞬态N-S方程, 其计算量较小, 但是湍流瞬态波动被反映在时均化方程中, 因此无法详细描述湍流状态的细节, 准确性较差. 相比而言, 大涡模拟(LES)是通过湍流运动的过滤将湍流分解为大尺度脉动和小尺度脉动, 大尺度脉动利用可见尺度的N-S方程直接求解, 小尺度的脉动质量、动量和能量运输对大尺度运动的作用采用建立亚格子模型的方法. 由于大尺度脉动是直接数值求解, 而边界条件又对小尺度脉动影响较小, 故大涡模拟方法可适用于复杂湍流流动的模拟. 利用密度加权滤波器(Favre方法)对可压缩N-S方程进行滤波, 得到以下连续性方程、动量方程和能量方程.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \\ \frac{\partial [\bar{\rho} (\bar{u}_i \bar{u}_j - u_i u_j)]}{\partial x_j} &+ \frac{\partial (\bar{\sigma}_{ij} - \hat{\sigma}_{ij})}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{e} + \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j / 2)}{\partial t} + \frac{\partial [(\bar{\rho} \bar{e} + \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j / 2 + \bar{p}) \bar{u}_j]}{\partial x_j} &= \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij} \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{q}_j}{\partial x_j} + \hat{A} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = \bar{\rho} (\bar{u}_i \bar{u}_j - u_i u_j) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_{ij} = \mu(\bar{\theta}) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$\hat{q}_j = -\lambda(\bar{\theta}) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:  $\rho$ 表示密度,  $u_i(u_j)$ 表示速度,  $e$ 为总能, “-”, “~”上标, 分别是空间滤波和Favre滤波,  $\bar{\tau}_{ij}$ 表示为亚格子应力,  $\hat{\sigma}_{ij}$ 表示以过滤的速度和温度为参数的分子黏性力,  $\bar{\theta}$ 表示热力学温度,  $\mu(\bar{\theta})$ 表示黏度,  $\hat{q}_j$ 表示为可解尺度导热项,  $\lambda(\bar{\theta})$ 热导率.

通过求解微分方程不能得到 $\bar{\tau}_{ij}$ . 有必要建立亚格子网格尺度模型, 即亚格子网格尺度应力表达式, 使方程能够封闭求解<sup>[13]</sup>. 此时采用Smagorinsky-Lilly亚格子雷诺应力模型<sup>[24]</sup>.

$$\tau_{ij} = 2L_s^2 |\bar{S}_{ij}| \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

$$L_s = \min(\kappa s, C_s V^{1/3}) \quad (9)$$

$$|\bar{S}_{ij}| = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

式中： $L_s$ 表示亚格子尺寸混合长度； $\kappa$ 表示卡门常数； $s$ 表示单元与壁面的最小距离； $V$ 表示单元体积； $C_s$ 表示Smagorinsky常数，一般为0.1。

### 1.3 网格划分和边界条件设置

图2所示为带环形均压槽的小孔节流静压干气密封的计算网格划分与边界条件设置。由于密封端面节流结构是周期性对称分布，故取1个包括单个节流孔的扇形流体域作为几何分析模型。图中计算域的周向两侧为周期性压力边界条件，内径压力 $p_i$ 和外径压力 $p_o$ 为强制性压力边界条件， $p_s$ 为节流气进口压力。采用高精度的非结构化网格，利用ICEM软件对静压干气密封计算域进行网格划分，并对节流孔和均压槽相接

的局部区域进行网格加密，其中膜厚方向有4层网格，均压槽深度方向有7层网格，总网格数为729 950。在采用LES方法模拟时，压力速度耦合算法采用Simple算法，模型选择瞬时大涡模拟模型。根据收敛条件，调整松弛因子，迭代时间步长为0.01 ms，单步长度为200次，介质为理想空气，其余参数默认设置。

## 2 结果分析与讨论

对比分析了圆角和倒角节流孔出口截面形状参数对静压干气密封开启力、泄漏率和压力波动特性的影响，获得了具有较大气膜承载力和较小压力扰动的节流孔出口倒角或圆角参数值。表1列出了本文数值模拟时所采用的密封环几何参数、工况条件和密封介质物性参数。

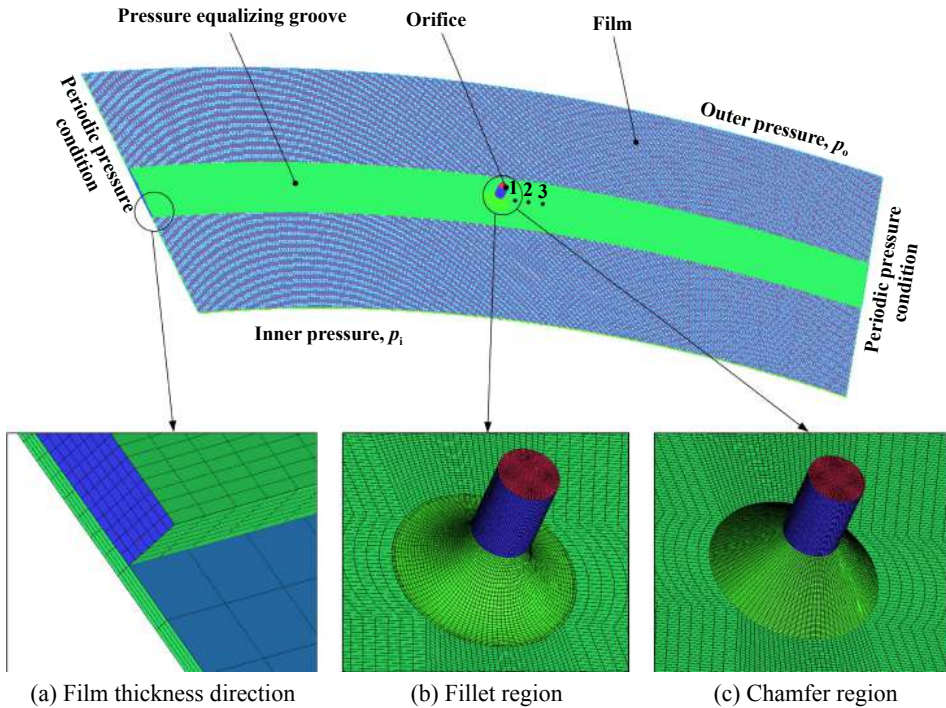


Fig. 2 Grid meshing of solution domain and boundary condition

图2 求解域网格划分及边界条件设置

表1 静压干气密封初始计算参数

Table 1 Initial calculation parameters of hydrostatic dry gas seal

Parameters	Specification	Parameters	Specification
Inner radius, $r_i$ /mm	29.5	Pressure at the outer radius, $p_o$ /MPa	0.3
Outer radius, $r_o$ /mm	36.5	Pressure at the inner radius, $p_i$ /MPa	0.1
Radius of orifice, $r_d$ /mm	33	Supply gas pressure, $p_s$ /MPa	0.5
Orifice diameter, $d$ /mm	0.2	Number of orifice, $N_g$	12
Orifice length, $h$ /mm	0.5	Film thickness, $h_o$ /μm	12
Equalizing groove width, $w_d$ /mm	1.4	Shape parameter, $CR$ /mm	0~0.5
Pressure equalizing groove depth, $h_d$ /mm	0.05		



### 2.1 计算方法验证

图3所示为采用大涡模拟方法和经典雷诺方程所获得的静压气体推力轴承径向膜压分布与试验测试值的对比结果<sup>[16]</sup>。从膜压的试验测试值可看出, 气膜压力从节流孔中心向四周的变化经历了先迅速减小后回升, 再逐渐减小等3个阶段, 在节流孔出口附近压力的突降和回升主要是发生涡流和压力波动所致。大涡模拟方法所获得的气膜压力与试验测试值吻合程度良好, 能很好地描述出气膜压力的三区域变化规律; 采用基于层流假设的经典雷诺方程计算所得压力分布在节流孔影响区的压力分布与试验值差异较大, 无法准确描述出节流孔出口附近的压力突降与回升现象, 导致计算出的气膜压力偏高, 而在远离节流孔出口区域则与试验值吻合良好, 这说明节流孔出口附近的气体流动不满足层流假设, 而在远离节流孔出口区域仍可按层流处理。

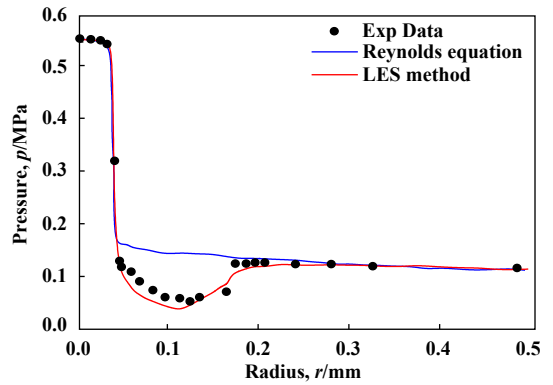


Fig. 3 Film pressure obtained by different numerical simulation methods and measured values  
图 3 不同数值模拟方法所得气膜压力分布与实测值对比

### 2.2 对稳态性能的影响

对于静压DGS而言, 首先需要在给定膜厚下有较大的气膜承载力, 从而避免运行过程中两密封端面发生碰磨; 其次要求较低的泄漏率, 以减少密封气泄漏或节流气消耗。图4所示为不同倒角小孔节流静压DGS开启力的时变曲线。随着时间的推移, 静压DGS开启力先迅速增大, 当 $t > 0.2$  ms后逐渐趋于稳定。与未开设倒角的经典小孔节流静压DGS相比, 节流孔出口有倒角的小孔节流静压DGS开启力有一定程度的提高, 且开启力增幅随倒角的增大而单调递增。

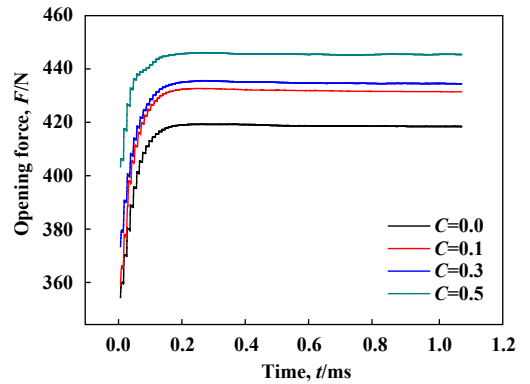


Fig. 4 Opening force of hydrostatic dry gas seal with different chamfered orifice-type restrictors  
图 4 不同倒角节流孔静压干气密封开启力时变曲线

图5所示为出口形状参数(倒角或圆角)对小孔节流静压DGS开启力 $F$ 、标准大气压下的内泄漏率 $Q_i$ 和外泄漏率 $Q_o$ 的影响规律。从图5中可以看出, 静压DGS的开启力和泄漏率随倒角和圆角的增大呈现出

不同的变化规律, 其中随倒角的增大而单调递增, 而随圆角的增大呈现出先增后减的变化趋势, 当 $R=0.2$  mm时达到最大值。值得注意的是, 相较于经典小孔节流静压DGS, 开设倒角或圆角后的DGS开启力和泄漏率均有提高, 增幅分别达到4%和9%, 不过不同倒角或圆

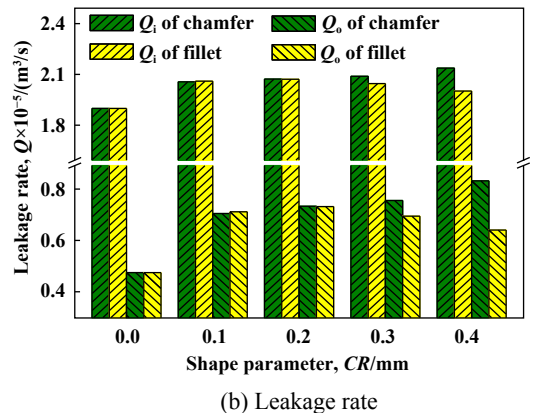
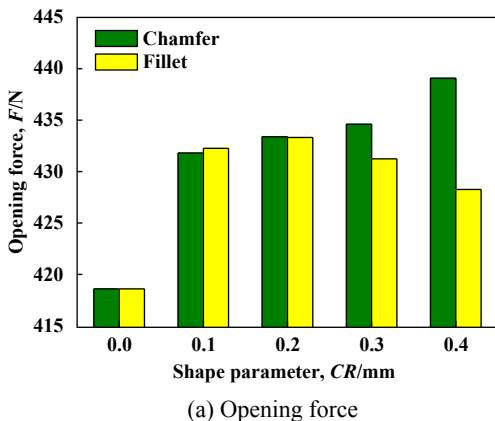


Fig. 5 Effect of orifice shape parameter on opening force and leakage rate of hydrostatic dry gas seal

图 5 节流孔出口形状参数对静压干气密封开启力和泄漏率的影响

角节流孔静压DGS的开启力和泄漏率之间的差异较小. 在不同倒角或圆角下, 外泄漏率 $Q_o$ 始终较内泄漏率 $Q_i$ 要小得多, 这是因为密封环外径侧为具有一定压力的介质, 而内径侧为大气压, 故均压槽内气体与外径侧介质的压差要小于均压槽内气体与内径侧介质的压差, 由压差流驱动所引起的泄漏率也显著更小. 在保证泄漏率不超标的前提下, 为获得较大的密封开启力, 节流孔出口倒角应取较大值, 而圆角优选值则为 $R=0.1\sim 0.3$  mm; 然而, 在一些对介质泄漏控制要求较高的场合, 节流孔出口则不宜加工圆角或倒角.

通过不同倒角或圆角节流孔静压DGS的径向和周向膜压分布分析以揭示节流孔出口形状参数对密封开启力的影响机理. 图6和图7所示分别为不同倒角和圆角节流孔静压DGS中经过节流孔中心的径向和周向压力分布. 从图6~7中可以看出, 静压DGS在节流孔中心处具有膜压最大值, 随后沿周向和径向迅速下降, 并在均压槽内的某处达到最小值后逐渐回升, 在

均压槽边界附近达到局部膜压峰值后分别向内径和外径侧逐渐降低. 可以发现, 节流孔在径向的影响区主要限于均压槽宽度范围, 而在均压槽以外区域的影响较小, 不过由于节流孔开设倒角或圆角后的静压DGS膜压在均压槽内显著提高, 其在均压槽以外区域的压力也随之提高. 无论从周向还是径向压力分布来看, 不开设倒角或圆角的经典小孔节流静压DGS的膜压始终最小, 其具有最小的压力峰值和压力谷值.

从图6可看出, 随着倒角 $C$ 的增大, 静压干气密封的周向压力和径向压力分布均呈现单调递增的趋势, 当 $C=0.5$  mm时, 其不但在节流孔中心处具有最大的压力峰值, 而且在节流孔出口附近的压力谷值也最大, 故其具有最高的气膜承载能力. 从图7可以看出, 随着圆角 $R$ 的增大, 静压干气密封的周向压力和径向压力分布均呈现先增后减的变化规律, 当 $R=0.1\sim 0.2$  mm时达到最大值, 进而使得该圆角下的静压干气密封气膜承载力也最大.

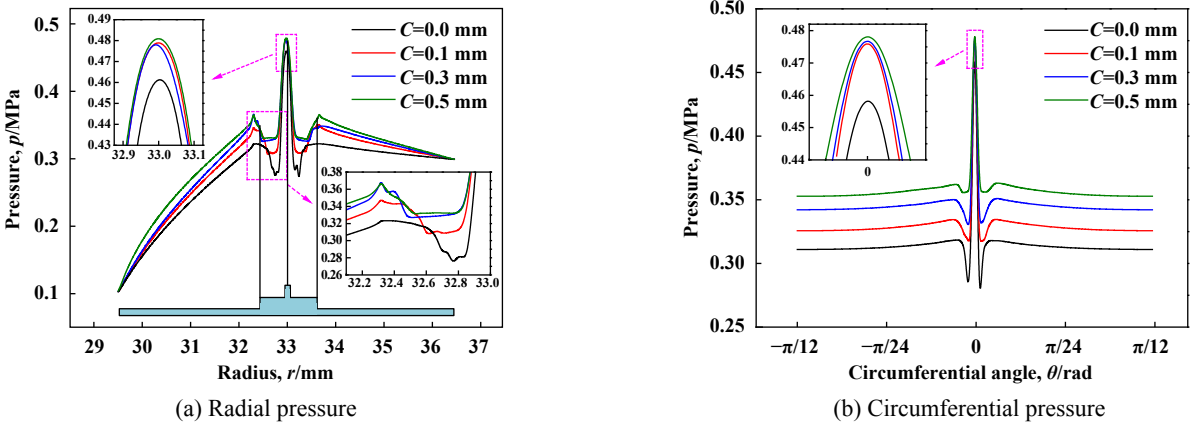


Fig. 6 Radial and circumferential pressure distribution of hydrostatic dry gas seal with different chamfered orifice-type restrictors  
图6 不同倒角节流孔静压干气密封径向和周向压力分布

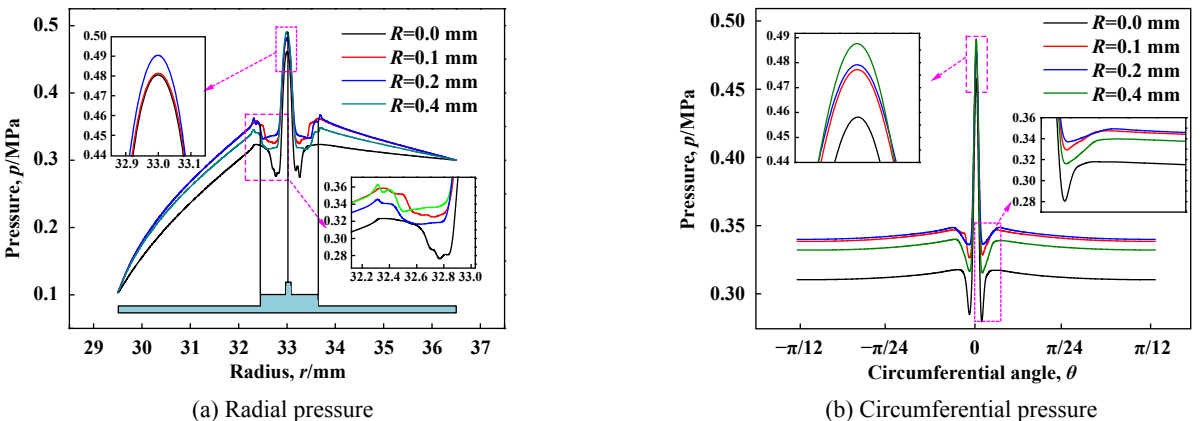


Fig. 7 Radial and circumferential pressure distribution of hydrostatic dry gas seal with different filleted orifice-type restrictors  
图7 不同圆角节流孔静压干气密封径向和周向压力分布

结合静压DGS端面的速度场和压力场以探究节流孔出口形状对密封泄漏率的影响机制. 图8所示为不同倒角节流孔静压DGS的端面速度场. 从图8中可以看出, 从节流孔中流入均压槽内的节流气一部分直接沿径向流动, 并分别向内径侧和外径侧泄漏; 另一部分则顺着环形均压槽沿周向流动, 并逐渐从均压槽边界区域向内径和外径侧泄漏. 节流孔附近出现气体流速的最大值, 这是因为在节流孔附近具有最大的压差所致; 由于压力峰值与谷值之间的差值随节流孔出口倒角的增大而逐渐减小, 故对应的最大速度值也逐渐减小. 在径向方向上, 以均压槽为界, 靠近外径侧的气体流速显著低于靠近内径侧的气体流速, 进而引起节流气向外径侧的泄漏率小于向内径侧的泄漏率. 结合图6的径向压力分布来看, 从节流孔出口附近的局部压力峰值至内径侧或外径侧的压差均随倒角的增大而增大, 进而引起泄漏率随倒角的增大而增加.

### 2.3 对气膜压力波动特性影响

小孔节流静压气体轴承的研究表明, 从节流孔中进入轴承间隙内的气体会在节流出口附近形成涡旋, 引起气膜压力和气流速度波动, 这一方面会引起膜厚的微振动, 影响精密加工与传输的精度, 另一方面对

于含有较大节流气腔的端面结构则容易诱发气锤自振. 对于小孔节流静压DGS而言, 振动幅值只有 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 的气膜微振动对密封运行状态的影响不大, 但是由节流孔出口处气体涡旋和压力波动所可能诱发的气锤自振是需要尽量避免的, 否则会给密封运行造成破坏性影响. 在保证较大气膜承载力的基础上, 应使节流孔出口附近的压力波动尽量小和气流涡旋尽量弱, 从而减小气膜微振动和避免发生气锤自振.

为探究节流孔出口截面形状对静压DGS气膜压力波动特性的影响, 对比分析了不同倒角或圆角节流孔静压DGS在节流孔出口附近的压力波动和瞬态流场. 图9所示为经典小孔节流静压DGS的速度场和压力场分布. 从图9中可看出, 节流气从节流孔中进入均压槽后, 在靠近节流孔中心处形成压力峰值, 由于节流孔出口处的流道结构突变, 节流气脱离均压槽底面, 进而在均压槽内形成涡旋, 伴随着涡旋的生成与破灭, 均压槽内的气体压力发生波动.

分别定义压力平均值 $p_{av}$ 和压力标准差 $\sigma_p$ 以表征任意点气膜压力的平均值和波动程度:

$$p_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P \tag{12}$$

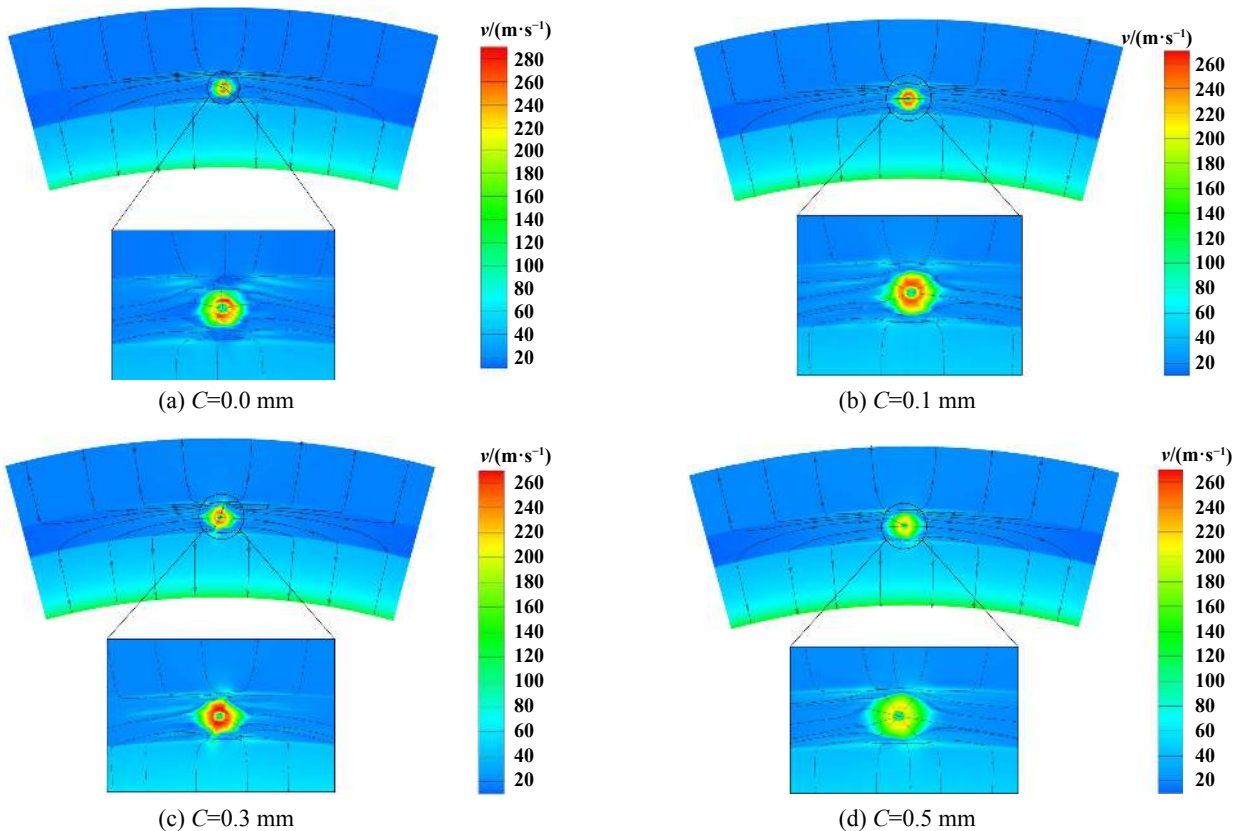


Fig. 8 Flow field of hydrostatic dry gas seal with different chamfered orifice-type restrictors

图 8 不同倒角节流孔静压干气密封流场示意图

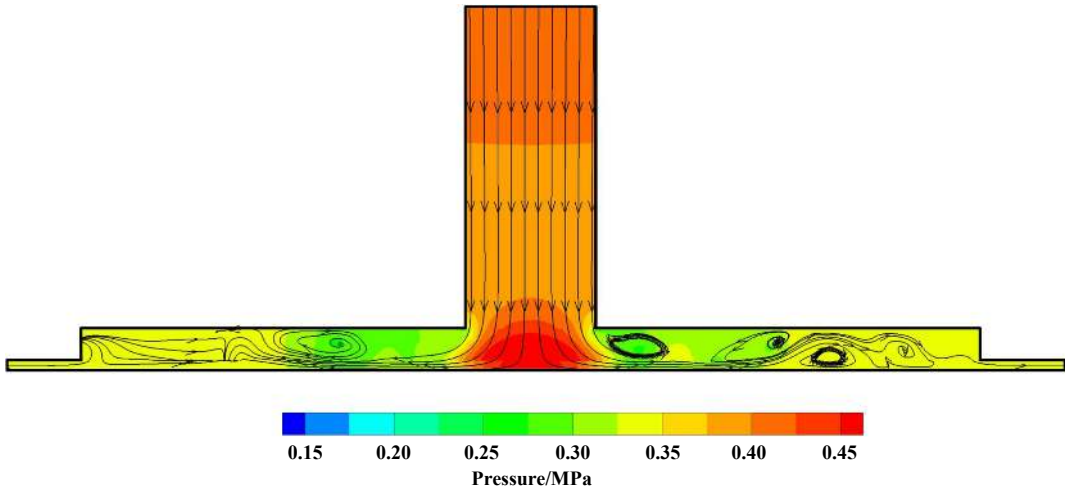


Fig. 9 Transient flow field of hydrostatic dry gas seal with typical orifice-type restrictor

图9 经典小孔节流静压干气密封瞬态流场

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - p_{av})^2} \quad (13)$$

为定量分析均压槽内不同位置处的压力波动特性,获得了以节流孔中心为圆心,半径 $R_r$ 分别为0.2、0.4和0.6 mm处的气膜压力随时间的变化规律,如图10所示.气膜瞬时压力随时间呈现出随机变化规律,且压力波动幅值随半径 $R_r$ 的增大而迅速减小,如当 $R_r$ 为0.2和0.6 mm时,压力标准差 $\sigma_p$ 分别为8.38和1.38 kPa,这说明越靠近节流孔中心处,压力波动越明显,而在远离节流孔中心处压力波动迅速变弱.

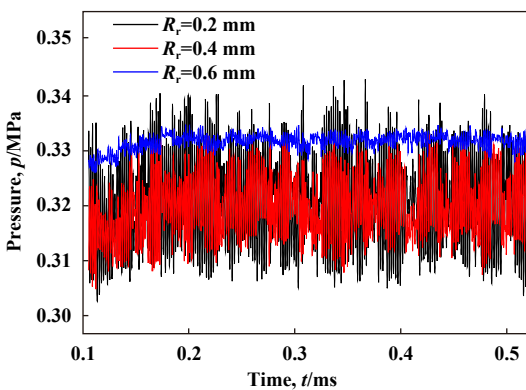


Fig. 10 Pressure fluctuation of hydrostatic dry gas seal with orifice-type restrictor at different radius

图10 不同半径位置小孔节流静压干气密封压力波动

图11和图12所示分别为不同圆角和倒角节流孔静压DGS的瞬态流场.从图11可以看出,节流孔出口倒角对均压槽内的旋涡强度、位置和气膜压力影响均较大.随着倒角的增大,均压槽内涡旋生成位置向均压槽边界移动,且强度逐渐变弱;值得注意的是,当倒

角过大时,节流孔出口处所形成的锥形气腔容易生成新的涡旋,进而引起压力波动.从膜压分布来看,当倒角较小时,节流孔出口附近出现仍会出现明显的压力谷值,而随着倒角的增大,均压槽和节流孔内的气膜压力逐渐趋于均匀.从图12可以看出,节流孔出口圆角也主要是影响均压槽内的涡旋位置、强度和气膜压力.与倒角节流孔不同的是,当圆角 $R=0.2$  mm时均压槽和节流孔内的气膜压力最为均匀,而过大或过小的圆角均会使得均压槽内的压力分布均匀性变差.

图13所示为倒角对静压DGS在 $R_r=0.2$  mm处压力波动的影响.与不开设倒角的经典小孔节流静压DGS相比,倒角的开设使得气膜平均压力显著提高,压力波动幅值则显著降低,如当倒角从0增大至0.2 mm时,平均压力 $p_{av}$ 从0.32 MPa增至0.34 MPa,而压力波动幅值从8.34 kPa将至0.93 kPa.

以时间 $t$ 为0.2~0.5 ms,  $R_r$ 为0.2、0.4和0.6 mm时的瞬态压力为基础,获得了不同节流孔倒角或圆角下静压DGS的压力波动幅值.为定量表征膜压波动幅值,定义膜压波动幅值平均值和方差值分别为

$$\sigma_{pav} = \frac{1}{3} (\sigma_p|_{R_r=0.2} + \sigma_p|_{R_r=0.4} + \sigma_p|_{R_r=0.6}) \quad (14)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\sigma_p - \sigma_{pav})^2} \quad (15)$$

图14所示为节流孔出口形状参数对节流孔出口附近膜压波动幅值的影响规律.从膜压波动幅值平均值来看,其随着倒角的增大先迅速减小,后趋于稳定;而随着圆角的增大呈现出先减小后增大的变化趋势,当 $R=0.2$  mm时具有最小值.从膜压波动幅值方差值来看,其随着倒角或圆角的增大都呈现出先减小后增大

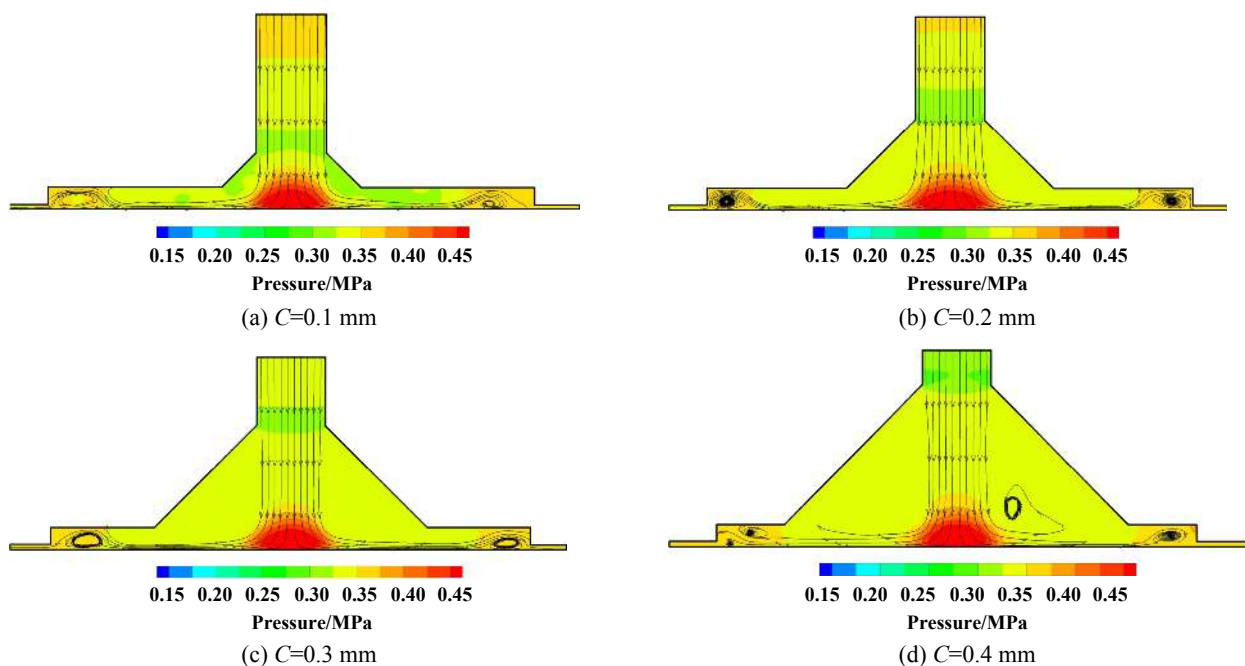


Fig. 11 Transient flow field of hydrostatic dry gas seal with different chamfered orifices

图 11 不同倒角小孔节流静压干气密封瞬态流场

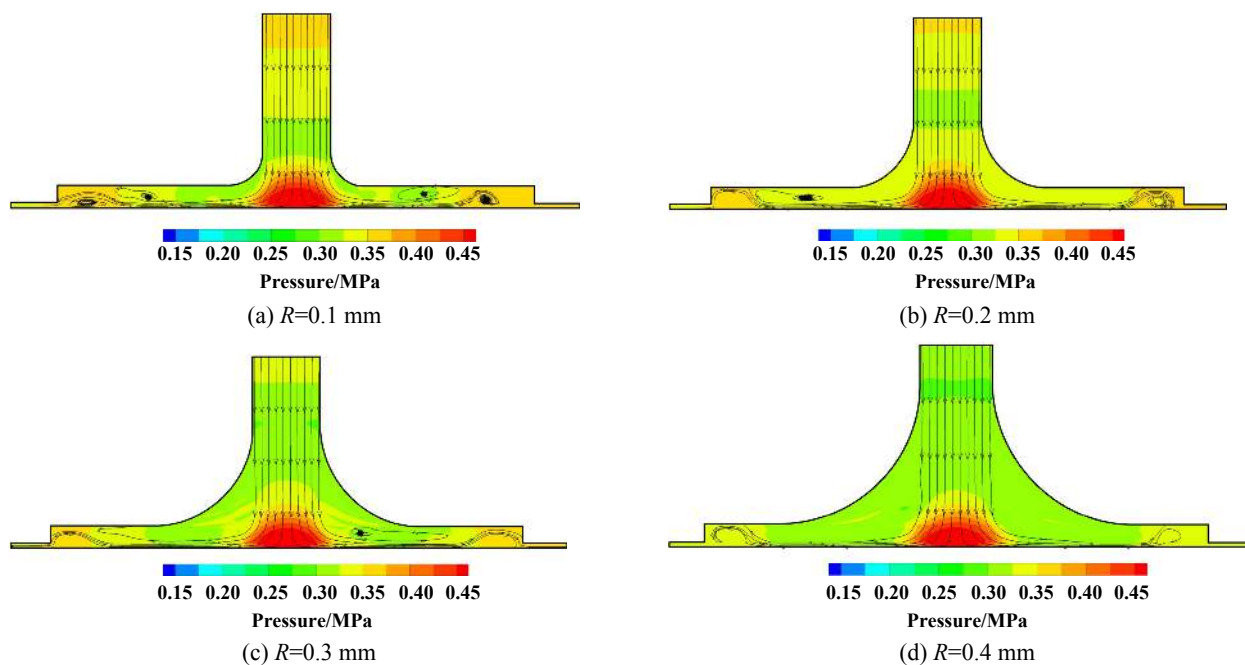


Fig. 12 Transient flow field of hydrostatic dry gas seal with different filleted orifices

图 12 不同圆角小孔节流静压干气密封瞬态流场

的变化趋势, 当  $CR=0.2$  mm 时, 不同位置处的膜压波动幅值基本保持一致. 较小的膜压波动幅值平均值和方差值意味着较小的压力波动和膜厚扰动, 建议取倒角  $C=0.2\sim 0.4$  mm, 圆角  $R=0.1\sim 0.3$  mm.

### 3 结论

a. 带环形均压槽的经典小孔节流静压干气密封

在节流孔出口附近的均压槽内会形成明显的气流涡旋和压力突降及回升现象, 进而引起明显的气膜压力波动, 容易诱发干气密封气膜的气锤自振.

b. 与经典小孔节流静压干气密封相比, 节流孔出口开设倒角或圆角都能提高干气密封的开启力, 且显著降低节流孔出口附近的压力波动.

c. 在介质泄漏率不超标的前提下, 为获得较大的

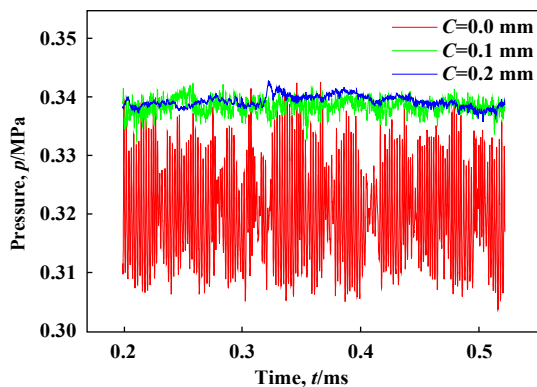


Fig. 13 Effect of chamfer on pressure fluctuation of hydrostatic dry gas seal with orifice-type restrictor ( $R_r=0.2$  mm)

图 13 倒角对小孔节流静压干气密封压力波动影响 ( $R_r=0.2$  mm)

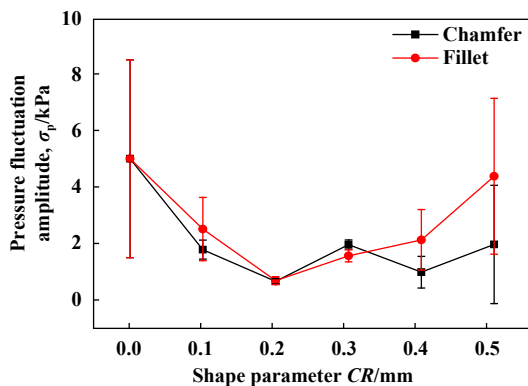


Fig. 14 Pressure fluctuation amplitude of gas film under different values of orifice shape parameters

图 14 不同节流孔出口形状下的膜压波动幅值

密封开启力和较小的气膜压力波动, 节流孔出口倒角宜取为0.2~0.4 mm, 圆角宜取为0.1~0.3 mm, 而对于介质泄漏控制要求的场合则不宜在静压密封节流孔出口开设倒角或圆角。

## 参考文献

[1] Li S X, Liang Z, Cai J N, et al. Study on hydrostatic gas lubricated non-contacting mechanical seal[J]. High Technology Letters, 2012, 18(4): 433-440.

[2] Li Shuangxi, Zhang Shuqiang, Cai Jining, et al. Performance study of dynamic-hydrostatic hybrid gas seal[J]. Tribology, 2011, 31(5): 457-466 (in Chinese) [李双喜, 张树强, 蔡纪宁, 等. 动静压混合式气体密封的特性分析[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5): 457-466]. doi: 10.16078/j.tribology.2011.05.008.

[3] Cheng H S, Chow C Y, Wilcock D F. Behavior of hydrostatic and hydrodynamic noncontacting face seals[J]. Asme Journal of Tribology, 1967, 90(2): 521-519.

[4] Stolarski T A, Xue Y. Performance study of a back-depression mechanical dry gas seal[J]. Proceedings of the ImechE, Part J Journal

of Engineering Tribology, 1998, 212(4): 279-290. doi: 10.1243/1350650981542092.

[5] Fujiwara S, Fuse T. Advanced aerostatic dry gas seal[C]. 16th International conference on fluid sealing[J]. Bhr Group 2000 Fluid Sealing, 2000: 486-499.

[6] Zhao Yanfeng, Peng Xudong, Jiang Jinbo, et al. Influence of the pressure-equalizing groove on the seal performance of hydrostatic dry gas seal[J]. Tribology, 2017, 37(5): 677-685 (in Chinese) [赵艳凤, 彭旭东, 江锦波, 等. 均压槽结构形状对静压干气密封性能影响分析[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 677-685]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.05.016.

[7] Zhao Yanfeng. Pressure equalizing groove structure optimization and gas pressure fluctuation characteristics analysis of hydrostatic dry gas seal[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017(in Chinese) [赵艳凤. 静压干气密封均压槽结构优化与气体压力波动特性分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017].

[8] Mori H. A theoretical investigation of pressure depression in externally pressurized gas-lubricated circular thrust bearings[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1961, 83(2): 201.

[9] Zhu J, Chen H, Chen X. Large eddy simulation of vortex shedding and pressure fluctuation in aerostatic bearings[J]. Journal of Fluids & Structures, 2013, 40(7): 42-51.

[10] Chang S H, Chan C W, Jeng Y R. Numerical analysis of discharge coefficients in aerostatic bearings with orifice-type restrictors[J]. Tribology International, 2015, 90: 157-163. doi: 10.1016/j.triboint.2015.04.030.

[11] Haruyama Y, Mori A, Mori H, et al. Effects of gas inertia forces on dynamic characteristics of externally pressurized gas-lubricated thrust bearings[J]. JSME International Journal, Series C, Dynamic Control Robotics Design & Manufacturing, 1989, 32(2): 303-307.

[12] Li Y T, Lin Y X, Zhu H X, et al. Research on the gas pressure fluctuation characteristics inside an aerostatic thrust bearing with a pocketed orifice-type restrictor[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(1): 28-35. doi: 10.1080/10402004.2013.840406.

[13] Li Yuntang, Lin Yingxiao, Zhu Hongxia, et al. Analysis of the micro self-vibration of aerostatic thrust bearing based on large eddy simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 56-62 (in Chinese) [李运堂, 蔺应晓, 朱红霞, 等. 基于大涡模拟静压气体推力轴承微幅自激振动特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 56-62].

[14] Canbulut F, Sinanoglu C, Sahin Yildirim. Analysis of effects of sizes of orifice and pockets on the rigidity of hydrostatic bearing using neural network predictor system[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2004, 18(3): 432-442.

[15] Cui H L, Wang Y, Wang B R, et al. Numerical simulation and experimental verification of the stiffness and stability of thrust pad aerostatic bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 23. doi: 10.1186/s10033-018-0228-3.

- [16] Yoshimoto S, Sukanuma N, Yagi K, et al. Numerical calculations of pressure distribution in the bearing clearance of circular aerostatic thrust bearings with a single air supply inlet[J]. *Asme Journal of Tribology*, 2007, 179(2): 384–390.
- [17] Aoyama T, Kakinuma Y, Kobayashi Y. Numerical and experimental analysis for the small vibration of aerostatic guideways[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2006, 55(1): 419–422. doi: [10.1016/S0007-8506\(07\)60449-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60449-1).
- [18] Belforte G, Raparelli T, Trivella A, et al. CFD analysis of a simple orifice-type feeding system for aerostatic bearings[J]. *Tribology Letters*, 2015, 58(2): 1–8.
- [19] Zhang Junan, Zhang Wenhao, Liao Bo, et al. A study on characteristics of air static pressure thrust bearing with variable-section pressure equalizing groove[J]. *Tribology*, 2009, 29(4): 329–334 (in Chinese) [张君安, 张文豪, 廖波, 等. 具有可变均压槽的气体静压推力轴承性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(4): 329–334]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2009.04.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2009.04.007).
- [20] Guo Liangbin, Wang Zuwen, Bao Gang, et al. Pressurized spherical gas bearings with inherent compensation[J]. *Tribology*, 2004, 24(6): 531–535 (in Chinese) [郭良斌, 王祖温, 包钢, 等. 新型环面节流静压气体球轴承压力分布的有限元计算[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(6): 531–535]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2004.06.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2004.06.011).
- [21] Guo Liangbin, Wang Zuwen, Bao Gang, et al. Experimental study on the pressure distribution of externally pressurized spherical gas bearings with inherent compensation and integrated ball socket[J]. *Tribology*, 2005, 25(4): 364–368 (in Chinese) [郭良斌, 王祖温, 包钢, 等. 新型环面节流静压气体球轴承压力分布的试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(4): 364–368]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2005.04.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2005.04.016).
- [22] Chen X D, He X M. The effect of the recess shape on performance analysis of the gas-lubricated bearing in optical lithography[J]. *Tribology International*, 2006, 39: 1336–1341. doi: [10.1016/j.triboint.2005.10.005](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.005).
- [23] Chen X D, Chen H, Luo X, et al. Air vortices and nano-vibration of aerostatic bearings[J]. *Tribology Letters*, 2011, 42: 179–183. doi: [10.1007/s11249-011-9761-2](https://doi.org/10.1007/s11249-011-9761-2).
- [24] Hao Peng, Li Guodong, Yang Lan, et al. Large eddy simulation of the circular cylinder flow in different regimes[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(4): 437–443 (in Chinese) [郝鹏, 李国栋, 杨兰, 等. 圆柱绕流场结构的大涡模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2012, 29(4): 437–443]. doi: [10.11776/cjam.29.04.A013](https://doi.org/10.11776/cjam.29.04.A013).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019018

# 玻璃表面全氟聚醚衍生物润滑膜的自组装及性能研究

陈海杰<sup>1,2</sup>, 乔旦<sup>1\*</sup>, 巴召文<sup>1,2</sup>, 冯大鹏<sup>1\*</sup>, 张坚<sup>3</sup>, 宋增红<sup>3</sup>

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 山东东岳高分子材料有限公司 含氟功能膜材料国家重点实验室, 山东 淄博 256401)

**摘要:** 利用自组装技术将两种不同分子量的全氟聚醚衍生物分别组装在玻璃表面, 然后采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、接触角测量仪、原子力显微镜(AFM)、椭圆偏振测厚仪对自组装润滑膜的化学结构、润湿性能、微观形貌和膜厚进行了表征, 并用TRB摩擦试验机考察了自组装和非自组装两种全氟聚醚衍生物润滑膜的摩擦学性能。结果表明: 全氟聚醚衍生物在玻璃表面的自组装明显降低了玻璃基底的摩擦系数, 分子量的大小、自组装溶液的浓度对润滑薄膜的润湿性和耐磨性均有重要影响; 而且自组装的分子与玻璃基底的化学键合力更强, 热处理后的自组装润滑膜更为致密, 因此摩擦学性能更优。利用三维轮廓仪、扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)及X射线光电子能谱仪(XPS)分析润滑膜磨痕的形貌及对偶钢球表面的磨斑形貌、元素组成及化学状态, 显示润滑膜与对偶钢球摩擦的过程中发生分解, 形成了含有有机氟氧化物和有机氟碳化物等的碎片, 并发生了转移, 进而导致摩擦失效。

**关键词:** 自组装; 全氟聚醚; 玻璃; 摩擦性能; 分子量

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0680-12

## Self-Assembly and Property of Perfluoropolyether Derivatives Lubricating Films on Glass Surface

CHEN Haijie<sup>1,2</sup>, QIAO Dan<sup>1\*</sup>, BA Zhaowen<sup>1,2</sup>, FENG Dapeng<sup>1\*</sup>, ZHANG Jian<sup>3</sup>, SONG Zenghong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Fluorinated Functional Membrane Materials, Shandong Dongyue Polymer Materials Co, Ltd, Shandong Zibo 256401, China)

**Abstract:** Two perfluoropolyether derivatives of different molecular weights were assembled on the glass surface using self-assembly technique. The chemical structure, wettability, microstructure and film thickness of the self-assembled lubricating film were measured by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), contact angle measuring instrument, atomic force microscopy (AFM) and ellipsometry. Furthermore, the friction properties of self-assembled and non-self-assembled two-perfluoropolyether derivative lubricating films were characterized by a TRB friction tester. Results show that the friction coefficient of the glass substrate was significantly reduced when perfluoropolyether derivatives were self-assembled on the glass surface. The molecular weight and the concentration of the self-assembled solution had an obvious influence on the wettability and wear resistance of the lubricating film. In addition, the self-assembled molecules had strong chemical bonding force with the glass substrate. The dense self-assembled lubricating film was

Received 29 January 2019, revised 25 April 2019, accepted 15 May 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: ddqiao@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968170; E-mail: dpfeng@lzb.ac.cn, Tel: +86-931-4968075.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51705506).

国家自然科学基金项目(51705506)资助。



obtained after heat treatment, resulting in better tribological property. The morphology of wear scar on the glass surface and the surface morphology, elemental composition and chemical state of the worn surface for the steel balls were analyzed by the 3D profiler, scanning electron microscope (SEM), X-ray energy spectrometer (EDS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results indicate that the perfluoropolyether derivatives film was decomposed during the friction process and the organic oxyfluoride and organic fluorocarbon was formed, transferring to the steel ball and inducing friction failure.

**Key words:** self-assemble; perfluoropolyether; glasses; friction properties; molecular weight

微/纳机电系统(M/NEMS)在机电一体化、医疗和传感器等领域的应用中发挥着巨大的作用,如微型机器人、微型飞行器、微生化分析仪和加速度传感器等微型化设备.然而随着设备的进一步微型化发展,大的比表面积体积比产生了严重的黏着、摩擦与磨损等问题,从而影响了微机电系统的性能、使用寿命和稳定性<sup>[1]</sup>.其中表面力和表面黏着能是使MEMS构件产生黏着和变形的主要原因<sup>[2]</sup>.如数字微镜中的每个像素点是由1个三维的驱动系统控制,由于驱动系统的运动频率高达7 000 Hz,故在其铰链等部位存在严重的黏着和磨损问题<sup>[3]</sup>.另外微马达在静动接触模式下,其制动循环次数超过四千万次,所以产生严重的启动摩擦和静摩擦<sup>[4]</sup>.传统的液体润滑剂甚至物理沉积的薄膜由于其较大的厚度,在微机电系统中并不适用,所以选择合适的润滑剂和润滑技术是解决当前微/纳机电系统摩擦问题的关键<sup>[5]</sup>.

自组装是实现纳米材料实际应用的极其重要的途径,旨在制造具有一定取向和功能特性的产品<sup>[6]</sup>,实际上它已在相分离<sup>[7]</sup>、光电器件<sup>[8-9]</sup>和化学生物传感器<sup>[10]</sup>等领域得到了广泛的应用.而自组装润滑技术是继传统润滑油、润滑脂和固体润滑剂等发展起来的新型润滑技术之一<sup>[11]</sup>,并具有稳定性好、与基底结合力强和制备方法简单等特点<sup>[12]</sup>,同时自组装单分子膜(SAMs)可以减少任意形状表面上的摩擦,调节表面机械行为和化学性质,释放相关静摩擦,因此成为微/纳米级器件中润滑和保护涂层的潜在手段<sup>[13-16]</sup>.有研究者报道当自组装的分子(硅烷偶联剂<sup>[17]</sup>、硫醇<sup>[18]</sup>、脂肪酸<sup>[19-20]</sup>、富勒烯<sup>[21]</sup>和氧化石墨烯<sup>[22]</sup>等)以物理吸附或化学键合的形式自发在固-液或固-气界面形成取向一定、排列紧密的有序分子膜<sup>[23]</sup>时,可以明显改善基底的摩擦学性能,因此自组装润滑技术是目前解决微机电系统中摩擦学问题的一种有前景的选择. R等<sup>[24]</sup>报道了各种SAMs包括二甲基辛基氯硅烷、二甲基十二烷基氯硅烷、二甲基十八烷基氯硅烷、二甲基十三烷基氯硅烷和OTS等,在0.15 N的载荷和旋转速度为1 m/s下的摩擦学性能,发现OTS显示出最长的耐摩寿命,这一

结果归因于OTS的分子结构中碳链最长的事实. Srinivasan等<sup>[25]</sup>使用悬臂梁阵列(CBA)比较OTS和全氟癸基三氯硅烷(FDTS)之间的粘附特性,通过观察悬臂表面的释放行为评估SAMs的粘附性能,研究发现化合物的极性大小对SAMs的粘附性产生影响. Tian等<sup>[26]</sup>使用AFM探究了N-十八烷基三乙氧基硅烷(OTE)的摩擦学行为,通过改变载荷、相对湿度和温度,以评估它们对摩擦学行为的影响.结果表明湿度的变化对疏水性的SAMs依然造成影响.当相对湿度足够低(RH5%)时,摩擦力随着温度的升高而增加;当湿度高时,摩擦力在低温下是独立的,而它依赖于高温.由此可见,由于SAMs本身存在分子链柔性大以及流动性较差等缺陷<sup>[27-29]</sup>,加上SAMs的摩擦学性能对试验环境的依赖性,现有SAMs的润滑效果和耐磨性仍难以满足使用要求.

全氟聚醚(PFPE)作为一种高性能润滑剂具有十分突出的性能优势,如化学惰性、良好的润滑性能及很低的表面能等<sup>[30-31]</sup>,不仅在军事、航空、航天等领域有着广泛的应用,还可作为计算机、录像、自动记录装置等仪器上硬盘、磁带及其他磁记录介质上的润滑剂<sup>[32-34]</sup>,通过与硬盘表面之间的氢键作用进而克服磁盘高速旋转时产生的离心力.然而自组装单分子润滑膜最重要的一点是分子与基底表面之间的键合特性(膜的黏着强度),由于氢键作用是分子间力,属弱化学键力,远小于化学键力,采用端基为酰氟基的全氟聚醚衍生物化学键合在羟基化的玻璃基底上,以此提高润滑膜的黏着强度,从而提高润滑膜的摩擦学性能.

基于上述自组装润滑技术的阐述和单分子膜优异的性能,本文作者利用分子自组装的方法,将两种不同分子量且端基为酰氟基的全氟聚醚衍生物化学键合在羟基化的玻璃基底上,探究自组装状态与非自组装状态润滑膜的摩擦学性能差异,以及分子量和润湿性等对摩擦学性能的影响,并通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)和X射线光电子能谱仪(XPS)等进一步对摩擦学机理进行解释.

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

试验中所用两种不同分子量的全氟聚醚衍生物分别为①小分子量的全氟聚醚衍生物试剂为K型全氟聚醚酰氟(记作A),为山东东岳高分子材料有限公司产品,分子量在1 000到2 000之间,②大分子量全氟聚醚衍生物为自制的全氟聚醚酰氟(记作B),制备方法参考文献[35],分子量在8 000左右.所用的溶剂三氟三氯乙烷购自上海科丰实业有限公司,其他试剂乙醇、丙酮均为分析纯,购于百灵威试剂有限公司.试验中所用水均为去离子水(电阻率 $>18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ ).

### 1.2 基底的处理及润滑膜的制备

(1)自组装溶液的配制:采用三氟三氯乙烷为溶

剂,配制质量分数分别为1%、2%和5%的A和B的溶液.

(2)玻璃表面处理:将玻璃裁成 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 大小,分别用去离子水、乙醇、丙酮超声清洗10 min,并用高纯 $\text{N}_2$ 将玻璃片吹干,然后浸入新鲜的Piranha溶液中(体积比为7:3的98%的 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的混合溶液),微沸保持1~2 h.冷却至室温,用去离子水清洗后用高纯 $\text{N}_2$ 吹干,玻璃片表面羟基化处理完毕.

(3)自组装润滑薄膜的制备:将羟基化处理的玻璃片垂直浸入不同质量分数的A、B溶液中,常温浸泡2 min,之后以 $0.4 \text{ mm/s}$ 的速度匀速拉出,待表面溶剂挥发后,玻璃表面形成了1层光亮的膜,随后用溶剂冲洗掉表面未发生键合的全氟聚醚化合物.图1给出了该自组装反应过程的示意图.

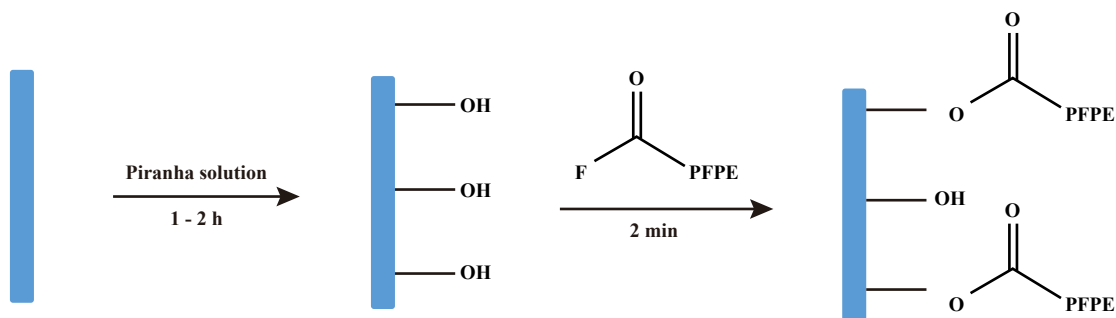


Fig. 1 Schematic diagram of the reaction process for preparing self-assembled lubricating film A on the glass surface

图1 玻璃表面制备自组装润滑薄膜A(B)的反应过程示意图

(4)自组装润滑薄膜的热处理:将在质量分数为2%和5%的A和B溶液中制备的自组装润滑膜放入 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中,保持1 h.

(5)非自组装润滑薄膜的制备:将未羟基化的玻璃片垂直浸入质量分数为1%的A、B溶液中,常温浸泡2 min,然后以 $0.4 \text{ mm/s}$ 的速度匀速拉出,待表面溶剂挥发后,玻璃表面形成了1层润滑膜.全文中对所制备的不同类型的润滑薄膜统一命名,名称列于表1中.

### 1.3 润滑膜的表面表征

采用 Nicolet IS 10型傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Fisher Scientific公司)测试制备薄膜的红外光谱(FTIR),利用ZnSe衰减全反射附件表征自组装润滑膜和非自组装润滑膜的结构变化,将玻璃块紧贴于半球形ZnSe晶体的平面上,以未放样片时的附件为背景,波数扫描范围为 $500\sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次,分辨率为 $4 \text{ cm}^{-1}$ ;利用Atom Force Microscope (AFM) (Agilent 5500)观察玻璃表面自组装全氟聚醚衍生物分子润滑膜的表面形貌,扫描模式为Tapping

表1 不同类型的润滑薄膜的编号

Table 1 Number of different types of lubricating film

Film type	Referred as
1% self-assembled A	1% A
1% self-assembled B	1% B
1% non-self-assembling A	1% A'
1% non-self-assembling B	1% B'
2% self-assembled A	2% A
2% self-assembled B	2% A
5% self-assembled A	5% A
5% self-assembled B	5% B
2% self-assembled A after heated	2% A'
2% self-assembled B after heated	2% B'
5% self-assembled A after heated	5% A'
5% self-assembled B after heated	5% B'

模式,扫描面积为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ ,扫描速率为2 Hz,每个样片至少选取3个不同区域采集图像;用椭圆偏振测厚仪测量自组装润滑膜的厚度,以羟基化的玻璃基底作为参比,每个样品测量5个位置,厚度取其平均值;水在润滑膜表面的接触角采用JC20001接触角测量仪

(上海中晨数字技术设备有限公司)进行测试, 其数值为测试样品表面5个不同位置接触角的平均值, 测试液滴体积为5  $\mu\text{L}$ .

### 1.4 摩擦学性能测试

利用TRB摩擦机(Anton Paar公司)考察不同组装状态下薄膜样品的摩擦学性能. 摩擦试验以 $\Phi 6\text{ mm}$ 的GCr15钢球作为对偶件, 采用点接触、直线往复单行程5.0 mm, 室温下相对湿度为30%~40%的条件下, 将自组装与非自组装润滑膜分别在不同载荷(0.2、0.4、0.5、1和2 N)及1 Hz的频率下进行测试, 每组试验在样品的不同区域重复测量3次. 当摩擦系数突然急剧上升时, 认为润滑膜被磨穿, 可判定为润滑失效. 对偶钢球表面磨斑形貌采用JSM-5600LV型扫描电子显微镜(日本电子光学公司)进行观察, 并利用特征X射线能谱仪(EDS)对磨斑表面含有的元素及其分布进行分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同润滑薄膜的红外光谱分析

为了验证全氟聚醚衍生物是否自组装在羟基化的玻璃表面上, 利用FT-IR的衰减全反射模式表征A、

B主要官能团的变化, 结果如图2所示, 由图2(a)可以看出: 1%A、2%A、5%A及热处理后的A与1%A'相比, 1745  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰偏移至1660  $\text{cm}^{-1}$ 处, 即发生了明显的蓝移, 这是由于1%A'中含有酰氟键, 酰氟键中的氟原子为吸电子基, 从而使得电子云向碳原子偏移, 使羰基的双键性增强, 羰基伸缩振动向高频方向移动, 故在高波数区出现. 而1660  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为酯羰基的特征吸收峰, 因此说明A成功地化学键合在了玻璃基底上. 图2(b)中自组装状态B的红外测试结果与自组装状态中的A相似, 羰基峰发生了蓝移, 由1760  $\text{cm}^{-1}$ 蓝移至1665  $\text{cm}^{-1}$ 附近处, 同样证实了B也成功地自组装在了羟基化的玻璃基底上.

### 2.2 润滑膜的形貌表征

采用原子力显微镜(AFM)观察空白玻璃基底和1%A及1%B表面的形貌, 如图3所示, 扫描范围为2  $\mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ , 可以看出羟基化的空白玻璃基底表面[见图3(a)]凹凸不平, 表面均方根粗糙度 $R_q$ 为1.40 nm. 从图3(b)可以看出, A分子膜均匀地组装在玻璃表面上, 表面有细小的点状凸起, 由于分子链较短有序度较高, 将玻璃表面的坑洼处填充, 使得表面粗糙度减小,

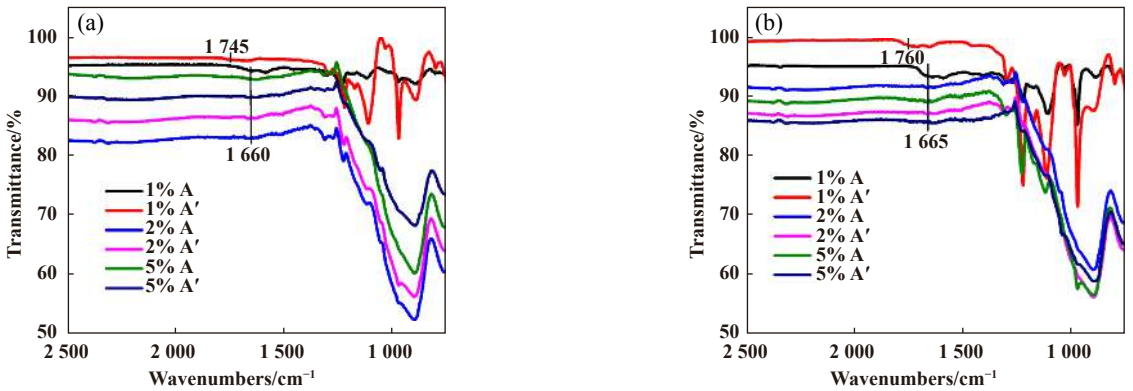


Fig. 2 Characterization of the assembled state for two kinds of perfluoropolyether derivatives on the glass surface

图 2 两种全氟聚醚衍生物在玻璃表面组装状态的表征

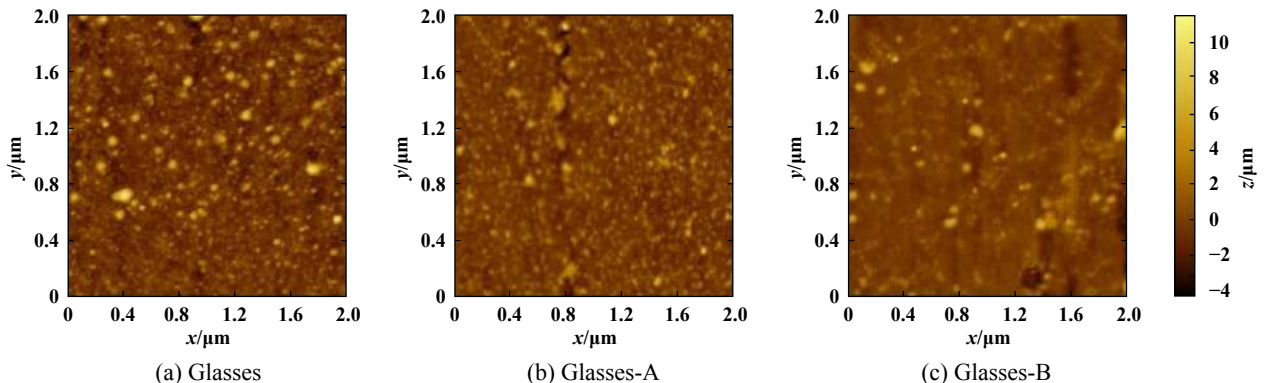


Fig. 3 AFM images of the various surfaces

图 3 空白玻璃基底及1%A和1%B表面的AFM形貌图

$R_q$ 为0.976 nm. 图3(c)是1% B的形貌图, 可以看到点状凸起明显减少且表面变得更为光滑,  $R_q$ 相应减少到0.947 nm, 说明B自组装在玻璃基底上后分子链交联并填充在玻璃表面的坑洼处, 形成了较为平滑的表面, 从而使得薄膜的密度得到提高.

### 2.3 润滑膜厚度测试

采用椭圆偏振测厚仪对不同浓度下自组装润滑膜的厚度进行了测量, 每个样品测量5个位置, 厚度取其平均值, 结果列于表2中, 可以看出1%A的平均厚度为290.6 nm, 1%B的平均厚度为299.7 nm, 5%B的厚度依然大于5%A的厚度, 这可能与分子量的大小有关, 高分子量的润滑膜分子之间相互交联折叠, 使得薄膜的致密性和厚度有所提高. 另外, 相同制备浓度下, 同种自组装润滑膜热处理后的厚度小于热处理前润滑膜的厚度, 这主要是由于热处理工艺加速了表面分子的运动, 使得润滑膜变得更加致密, 从而使得厚度表现出减小的趋势.

表2 不同自组装润滑膜A和B的平均厚度

Table 2 The thickness of self-assembled lubricating film A and B

Film type	Thickness/nm					Average thickness/nm
	1	2	3	4	5	
1% A	289.0	289.5	292.0	289.0	293.6	290.6
1% B	300.2	300.3	300.0	298.8	299.1	299.7
2% A	1 559.3	1 560.5	1 560.1	1 560.7	1 557.7	1 559.7
2% B	1 551.3	1 553.8	1 555.5	1 559.3	1 545.2	1 553.0
5% A	1 892.6	1 909.2	1 901.6	1 908.6	1 893.7	1 901.1
5% B	2 042.4	2 022.3	2 026.5	2 042.4	2 064.2	2 039.6
2% A'	1 560.5	1 561.5	1 561.4	1 560.4	1 560.3	1 560.8
2% B'	1 018.9	1 015.3	1 016.9	1 017.8	1 018.3	1 017.4
5% A'	1 561.0	1 546.0	1 533.5	1 560.6	1 566.2	1 553.4
5% B'	1 995.7	1 995.3	2 005.1	1 999.8	1 998.4	1 998.9

### 2.4 润滑膜表面润湿性能分析

将制备的不同自组装润滑薄膜进行了润湿性能分析, 结果如图4所示, 可以看出图4(BL)玻璃表面羟基化处理后暴露出大量具有活性的羟基基团, 显示出很强的亲水性, 接触角接近0°. A自组装在玻璃基底后接触角测量结果如图4(a)所示, 水滴在其表面的接触角增大到34°, 这是由于A分子是含氟的具有一定长度分子链的化合物, 端基的酰氟键与基底的羟基键合后使得活泼的羟基基团消失, 表面能减小, 从而水在表面的接触角增大. 当B与玻璃表面的羟基发生键合时, 其接触角测量结果如图4(b)所示, 接触角增大到47°, 一方面由于B分子链中氟的含量高于A的氟含量, 使得表面能进一步降低; 另一方面由于B润滑膜的厚度

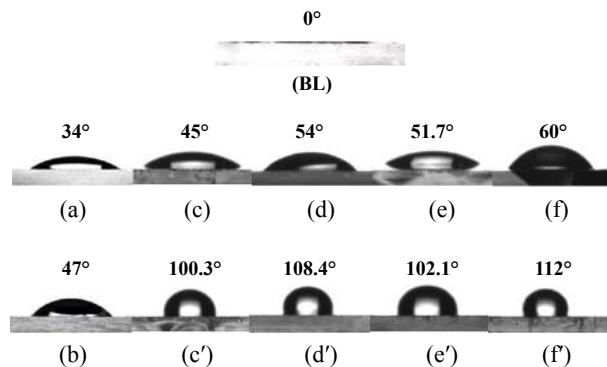


Fig. 4 Contact angle images of the various surfaces: BL is contact angle of glass surface, a, b are contact angles of 1% of self-assembled lubricating film A and B, (c, c') and (d, d') are contact angles of 2% A, 2% A', 5% A, 5% A', respectively. (e, e') and (f, f') are contact angles of 2% B, 2% B', 5% B, 5% B', respectively.

图4 水在玻璃及不同自组装润滑膜表面的接触角示意图: BL为水在玻璃表面的接触角, a, b分别为水在1% A和1% B表面的接触角, (c, c')和(d, d')分别为2% A、2% A'和5% A、5% A'表面的接触角, (e, e')和(f, f')分别为2% B、2% B'和5% B、5% B'表面的接触角

略大于A润滑膜的厚度, 酰氟键与基底羟基的大量键合使得基底表面暴露的亲水性羟基减少, 有文献<sup>[36-37]</sup>报道表面聚合物键合密度的增加使得水在表面的接触角增大. 因此, B的润滑膜表现出更大的接触角.

随着溶液质量分数的增加, 在玻璃表面形成的润滑膜的接触角逐渐增大, 2%A和5%A的接触角分别为45°和54°, 2%B和5%B的接触角分别为51.7°、60°, 即溶液质量分数为5%时制备的自组装润滑膜的接触角略大于2%时自组装润滑膜的接触角, 这是由于溶液浓度增大时, 全氟聚醚衍生物与玻璃表面羟基键合的数量更多, 使得表面暴露的亲水性羟基减少. 同时将2%A、2%B、5%A、和5%B在100 °C的烘箱中放置1 h进行加热处理, 然后表征自组装润滑膜热处理前后的接触角变化, 可以看出无论是A还是B均由热处理前的亲水性变为热处理后的疏水性表面, 具体表现为2%A'和5%A'接触角分别增至100.3°和108.4°, 而2%B'和5%B'接触角分别增至102.1°和112°, 这主要是由于热处理工艺可显著地增加基底表面分子的运动, 使得表面键合的密度增加, 减少了基底表面亲水性羟基的数量, 从而使得表面的疏水性增加<sup>[37]</sup>.

### 2.5 宏观摩擦学性能分析

#### 2.5.1 载荷对摩擦学性能的影响

利用TRB摩擦试验机考察了制备溶液质量分数为1%时各组装状态下薄膜在不同载荷下的摩擦学性

能, 结果如图5所示, 可以看出自组装或非自组装全氟聚醚衍生物润滑膜在玻璃表面的存在明显降低其摩擦系数, 具体分析1% A、1% A'、1% B、1% B'薄膜的摩擦系数的平均值分别为0.145 1、0.164 0、0.178 5、0.158 9, 而羟基化玻璃表面在不同载荷下的平均摩擦系数为0.826 2, 此外润滑膜磨穿后的摩擦系数(0.800 7)略低于羟基化玻璃表面的摩擦系数(0.826 2), 这可能是由于钢球在与玻璃对磨的过程中一部分润滑膜转移到了钢球表面, 进而使得摩擦系数降低<sup>[38]</sup>. 另外, 无论是自组装还是非自组装条件下获得的润滑膜, 随着载荷的增大(0.4~2 N), 润滑膜被磨穿的时间逐渐变短, 由图5的(b)和(c)可以看出, 2 N载荷下1%B经过350 s后磨穿, 而1%A约50 s即失效; 1 N载荷下1%B在运行至750 s后润滑失效, 1%A经过60 s后失效; 而在0.4和0.5 N载荷下1%B经过1 000 s后润滑仍有效, 1%A分别在210和165 s后润滑失效, 以上数据均证实了B的润滑膜的耐磨寿命优于A的润滑膜.

而分子的有序度和堆积密度是影响基底表面润滑膜摩擦学性能的关键因素<sup>[31]</sup>. 一般认为, 分子量较小的短链分子之间的范德华作用力小, 使得自组装单

分子层的有序性和堆积密度小, 耗能模式增多(链的弯曲、倾斜、扭转及扭曲等), 并且较短的分子链限制了薄膜的致密性, 这一点也可由图4接触角的变化得到证明, 当载荷超过薄膜可承受的临界值时易发生剧烈的塑性变形进而导致薄膜失效, 故分子链较短的A的润滑膜, 其耐磨寿命较短<sup>[39-42]</sup>, 相反, 具有较长分子链的B的润滑膜则表现出良好的耐磨性能.

此外由图5(d)可以看出相同载荷下自组装润滑膜的耐磨性优于非自组装润滑膜的耐磨性, 这是因为自组装单层膜属于典型的类固体薄膜<sup>[39]</sup>, 全氟聚醚衍生物分子通过化学键牢牢固定在玻璃基底上, 其结合力远大于非自组装表面物理吸附的作用力.

### 2.5.2 溶液浓度对自组装润滑膜摩擦学性能的影响

为了进一步研究不同质量分数下润滑薄膜的耐磨寿命, 将2%、5%条件下的润滑薄膜在2 N载荷下的摩擦学性能进行考察, 结果如图6所示. 可以看出随着质量分数的增加A和B的自组装润滑薄膜耐磨寿命均呈现不同程度的增加, A的自组装润滑膜磨损时间由1% A的50 s增至2% A的350 s, 5% A的磨损时间增至428 s, 如图6(a)所示; B的自组装润滑膜磨损时间由

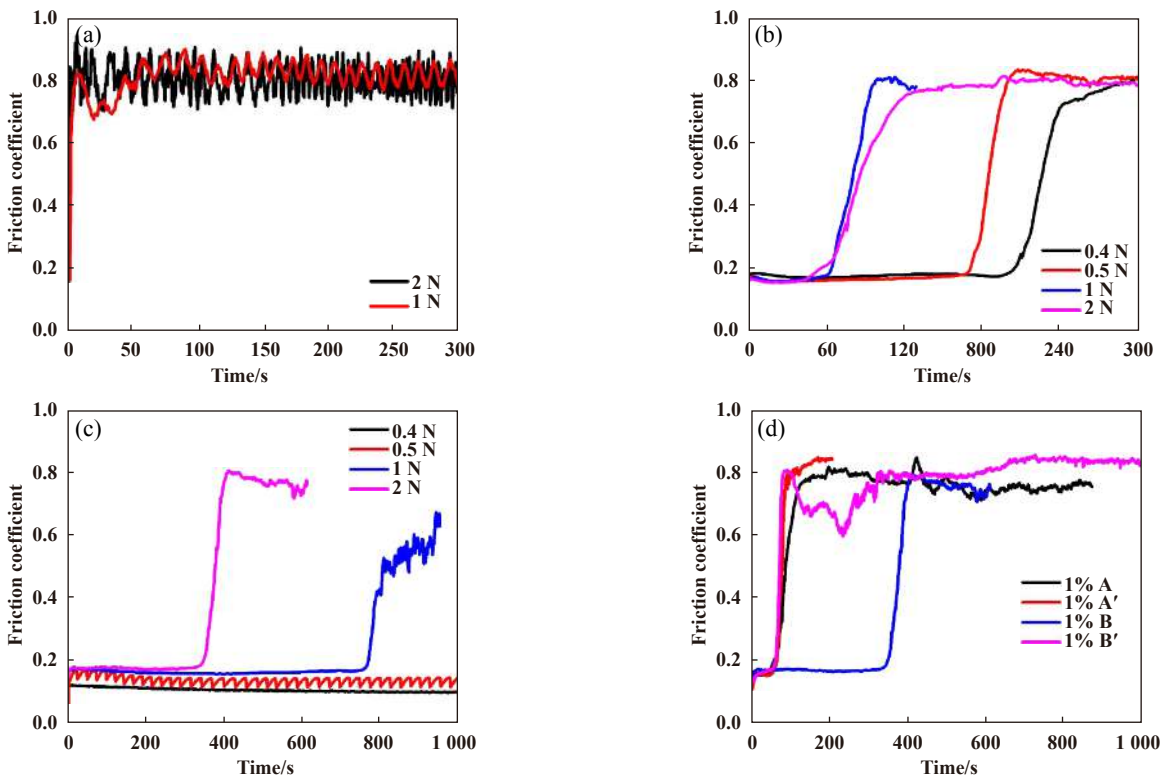


Fig. 5 Curve of friction coefficient and wear time of clean glass surface (a), 1% A(b), 1% B(c), and the relationship between the friction coefficient and time of four films under 2 N(d)

图 5 干净的玻璃表面(a)、1%A(b)和1%B(c)的摩擦系数与时间的曲线以及在2 N载荷下四种薄膜的摩擦系数与时间的关系曲线(d)

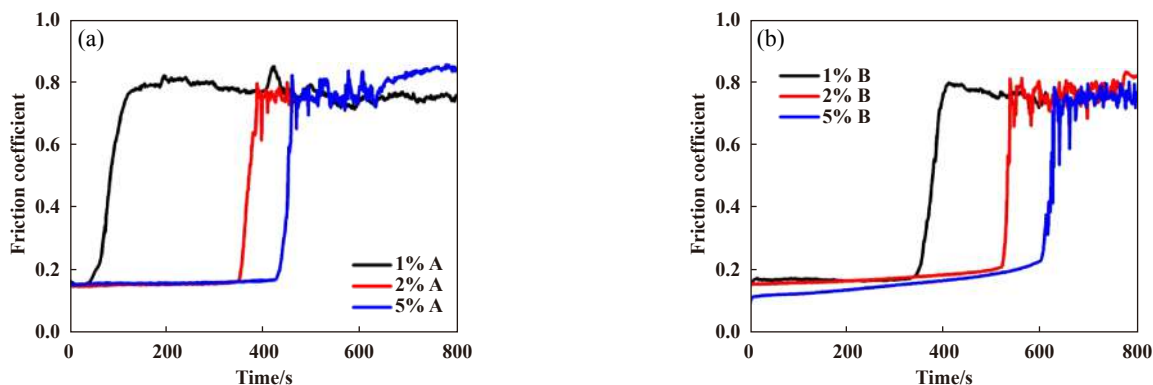


Fig. 6 Friction curves of self-assembled lubricating films A(a) and B(b) at different concentrations under 2 N load

图6 (a)、(b)分别为2 N载荷下不同质量分数下A、B各自组装润滑膜的摩擦曲线

1% B的350 s增至2% B的520 s, 5% B磨损时间达到600 s, 如图6(b)所示. 这是由于溶液浓度对自组装润滑膜摩擦学性能的影响主要是通过改变全氟聚醚衍生物分子与基底表面羟基键合的数目发挥作用, 一定浓度范围内, 浓度越大, 表面键合的润滑膜分子数量越多, 表面耐磨损的时间就越长.

### 2.5.3 润滑膜表面润湿性对摩擦学性能的影响

由图4可以看出, 润滑薄膜的高温处理增强了其疏水性, 而薄膜表面润湿性发生变化时, 将会对其摩擦学性能进一步造成影响, 因此图7给出了热处理前后的A、B在2 N载荷及频率1 Hz条件下的摩擦学试验结果. 可以看出, 热处理后润滑膜的耐磨性明显优于未经过热处理的润滑膜, 2% A热处理后接触角由 $45^\circ$ 增至2% A'的 $100.3^\circ$ , 相应的磨损时间由350 s增至605 s, 5% A热处理后的磨损时间由428 s增至5% A'的3 600 s后仍未磨穿; 2% B热处理后接触角由 $51.7^\circ$ 增至2% B'的 $102.1^\circ$ , 磨损时间由520 s增至763 s, 5% B热处理后磨损时间由600 s增至5% B'的3 600 s后仍未磨穿. 由此可见, 摩擦表面的亲、疏水性明显的影响了自

组装润滑膜的摩擦学性能, 由于亲水表面易吸附空气中的水, 形成液膜, 增大表面的摩擦, 而疏水性表面有一定的抗黏着功能, 使之减少了水与表面的接触, 从而减少了表面的摩擦.

### 2.6 润滑机理分析

为了探究自组装全氟聚醚衍生物润滑膜的摩擦磨损机理, 对1% B在载荷0.4和2 N, 频率1 Hz条件下摩擦后的表面磨痕进行了表征, 同时对5% B在热处理前后2 N载荷下摩擦后的三维轮廓图进行了考察, 结果分别如图8的(a)、(b)、(c)和(d)所示. 由图8(a)、(b)可以看出, 与0.4 N载荷下摩擦后的磨痕相比, 2 N载荷下摩擦后的1% B表面的磨痕较深, 磨斑较宽, 并且碎屑相互交联. 进一步比较图8(b)、(c)可知, 不同质量分数的B在相同载荷下试验时, 由于B浓度大时在表面形成的膜厚度较大, 黏度也大, 在摩擦过程中形成的磨痕较宽, 同时磨痕表面有1层被刮起的润滑膜; 然而, 将5% B热处理后, 其表面变得更为致密, 与基底的结合力更强, 因此与钢球对摩后形成的磨痕较为细小. 图9为摩擦试验后对偶钢球表面的磨痕形貌图, 可以看出1% B在2 N载荷下与钢球对摩后形成了规则的磨斑,

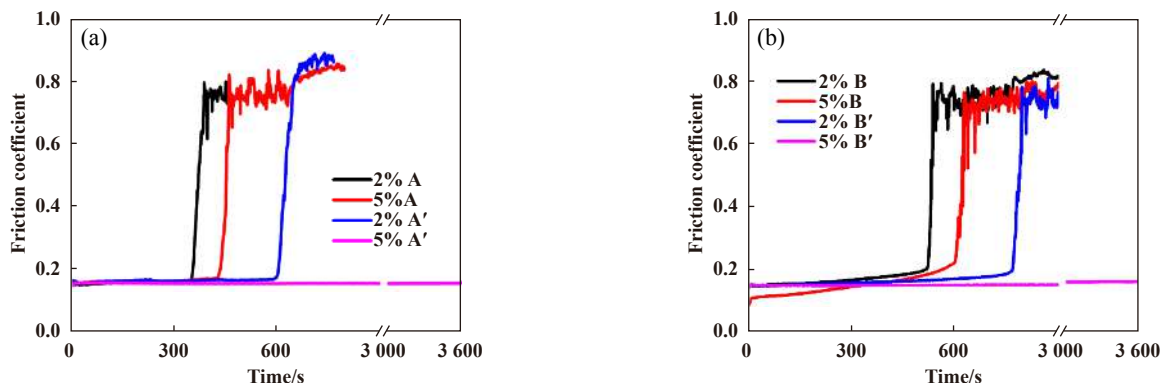


Fig. 7 Friction curves of self-assembled lubricating films A(a) and B(b) before and after heat treatment under 2 N load

图7 载荷2 N时自组装润滑膜A(a)和B(b)在热处理前后的摩擦曲线

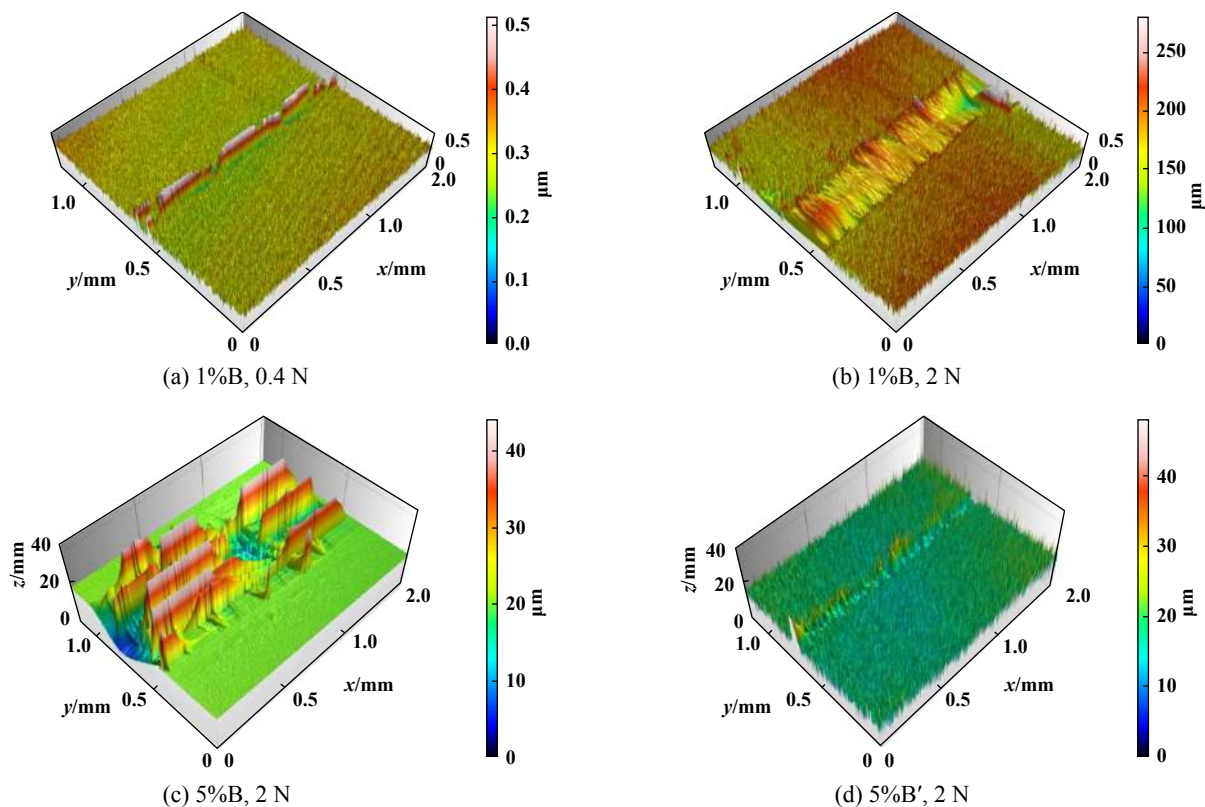
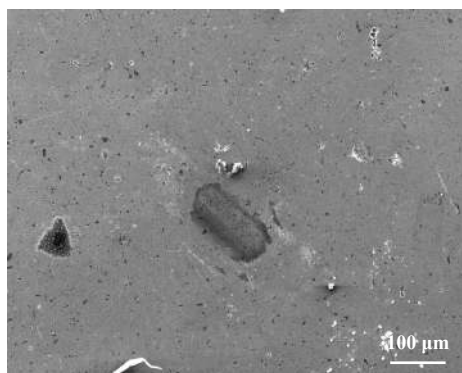
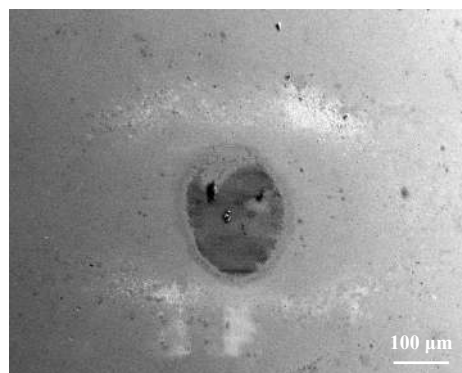


Fig. 8 Three-dimensional profiles of %1B under 0.4 N and 2 N, and 5%B, 5%B' under 2 N load

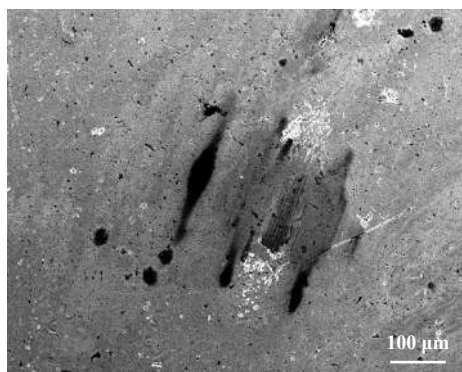
图 8 1%B在0.4和2 N载荷下以及5%B、5%B' 在2 N载荷下的三维轮廓图



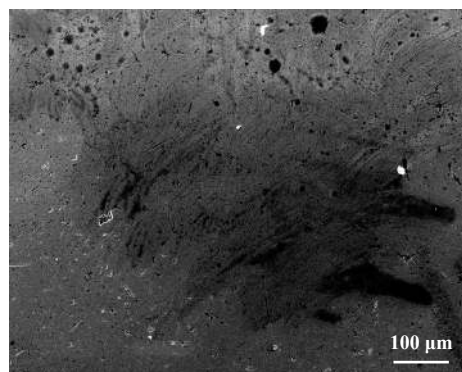
(a) Steel ball against 1%B, 0.4 N



(b) Steel ball against 1%B, 2 N



(c) Steel ball against 5%B, 2 N



(d) Steel ball against 5%B', 2 N

Fig. 9 Microscope micrographs of the worn surfaces of the steel ball against the 1%B under 0.4 N and 2 N and against 5%B and 5%B' under 2 N

图 9 钢球与1%B在0.4和2 N载荷下以及钢球与5%B、5%B'在2 N载荷下对摩后钢球表面磨痕形貌的显微照片

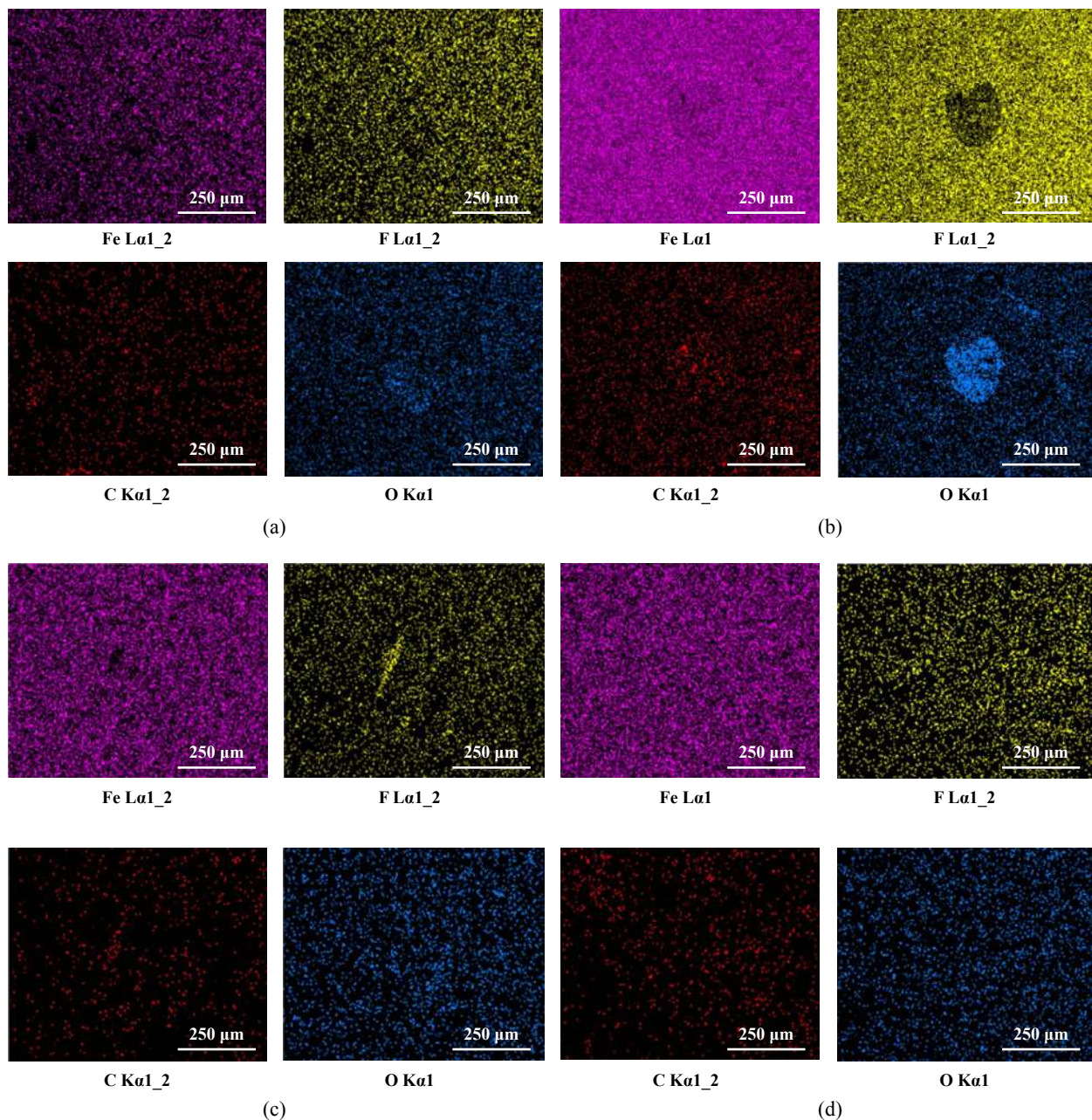


Fig. 10 Element distribution of the steel ball against 1%B under 0.4 N and 2 N, and against the 5%B and 5%B' under 2 N  
图 10 与1%B在0.4和2 N载荷下以及与5%B、5%B' 在2 N载荷下对磨后钢球表面的元素分布

如图9(b)所示,并形成了1层均匀的转移膜,其膜表面特征元素面分布如图10(b)所示,而0.4 N载荷下钢球表面的磨斑较小,如图9(a)所示,此外钢球表面没有转移膜的形成,图10(a)的元素面分布图证明了这一点;而5%A和5%B由于厚度较大,导致其在热处理前后与钢球对磨后均形成不规则磨斑,如图9(c)、(d)所示.另外,从图10(c)、(d)氟元素含量分布图分析可知,与5%B对磨后的钢球表面含有氟元素,而与热处理后的5%B'对磨后的钢球表面不含有氟元素,进一步证实了热处理后的自组装润滑膜变得更加致密而不易被磨

穿,从而表现出良好的耐磨寿命.

为了进一步揭示自组装全氟聚醚衍生物润滑膜的抗磨损机理,利用X光电子能谱(XPS)对1%B及对偶钢球磨斑表面的氟元素进行了表征,如图11所示.图11(a)中,1%B的氟元素在689.5、690.7和691.3 eV等处出现特征峰,这与B中氟元素的种类有关.与1%B在2 N载荷下对磨后钢球表面的F1s特征峰的结合能出现在689.6 eV处,如图11(b)所示,与标准谱峰对照,显示与有机氟氧化物和有机氟碳化物一致<sup>[43]</sup>,表明在与对偶钢球摩擦的过程中,全氟聚醚衍生物链发生了断裂,



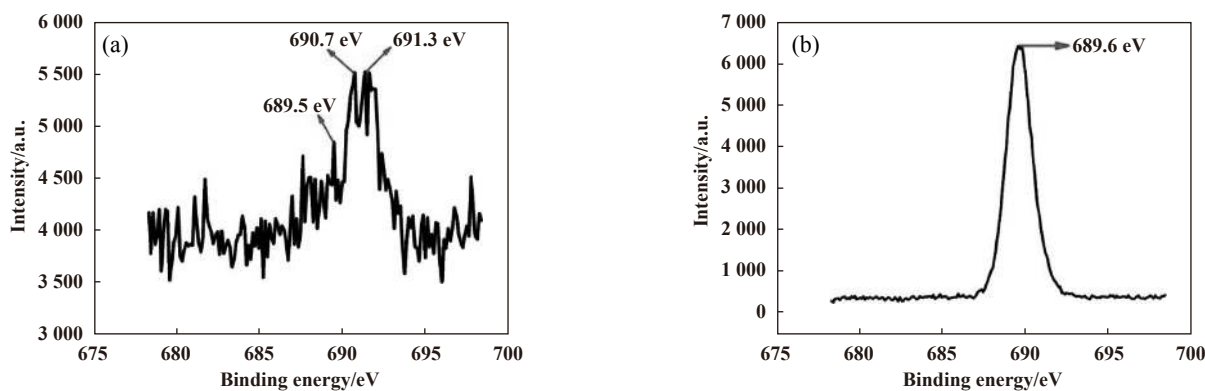


Fig. 11 XPS spectrum of F1s of 1% B and the steel ball against 1%B under 2 N load

图 11 1%B 以及 1% B 在 2 N 载荷下对摩后钢球表面的 F1s 的 XPS 谱图

形成了含有  $\text{CF}_2\text{O}$ 、 $\text{CFO}$ 、 $\text{CF}_2\text{CF}_3$  和  $\text{CF}$  等碎片的化合物, 并转移至钢球表面, 进而导致摩擦失效。

### 3 结论

a. 通过分子自组装的方法, 将不同质量分数(1%、2%、5%)的两种不同分子量的全氟聚醚衍生物自组装在羟基化的玻璃表面, 显示在质量分数为 5% 时制备的润滑薄膜厚度最大, 疏水性最强; 同时润滑薄膜的热处理使其由亲水性变为疏水性表面。

b. 摩擦学试验结果显示, 分子量较大的化合物 B 在质量分数为 5% 时制备的润滑薄膜具有优异的摩擦学性能; 而润滑薄膜的热处理进一步提升了其摩擦学性能, 质量分数为 5% 时制备的 A 和 B 的润滑薄膜均表现出超长的耐磨寿命。

c. 润滑机理分析显示在较高的载荷下(2 N)对摩时发生了润滑膜的转移, 且随着对摩时间的延长, 自组装薄膜发生了断裂和转移, 形成了含有有机氟氧化物和有机氟碳化物的碎片, 进而导致摩擦失效。

### 参考文献

[1] Bhushan B. Tribology on the macro-to-nano scales of MEMS materials: A review[C]. In: Proceedings of the 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, USA, 1998: 265-266.

[2] Li Zhouyang, Chen Guoding. The application and problems of tribology in micro-electromechanical system[J]. Lubrication Engineering, 2005, (4): 180-186 (in Chinese) [李洲洋, 陈国定. MEMS 中的摩擦学研究及发展趋势[J]. 润滑与密封, 2005, (4): 180-186]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2005.04.061.

[3] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012(in Chinese) [温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012].

[4] Maboudian R, Ashurst W R, Carraro C. Self-assembled monolayers

as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 82(1-3): 219-223. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00337-4.

- [5] Komvopoulos K. Surface engineering and microtribology for microelectromechanical systems[J]. Wear, 1996, 200(1-2): 305-327. doi: 10.1016/S0043-1648(96)07328-0.
- [6] Bai C, Liu M. From chemistry to nanoscience: not just a matter of size[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2013, 52(10): 2678-2683. doi: 10.1002/anie.201210058.
- [7] Dudowicz J, Douglas J F, Freed K F. Self-assembly in a polymer matrix and its impact on phase separation[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2008, 113(12): 3920-3931.
- [8] Black C T. Polymer self-assembly as a novel extension to optical lithography[J]. Acs Nano, 2007, 1(3): 147-150. doi: 10.1021/nn7002663.
- [9] Yusuf H, Kim W G, Lee D H, et al. A hierarchical self-assembly route to three-dimensional polymer quantum Dot Photonic Arrays[J]. Langmuir, 2007, 23(10): 5251-5254. doi: 10.1021/la7002904.
- [10] Li Lankou, Dong Jiangqing, Xu Xiaoyan. The application and research of self-assembly technology in biosensor[J]. Hebei Chemical Industry, 2009, 32(7): 52-53 (in Chinese) [李兰扣, 董江庆, 徐晓燕. 自组装技术及其在生物传感器中的应用研究[J]. 河北化工, 2009, 32(7): 52-53]. doi: 10.3969/j.issn.1003-5059.2009.07.020.
- [11] Zhang Jian. Modern lubrication technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008(in Chinese) [张剑. 现代润滑技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008].
- [12] Deng Zhao, Rao Wenqi, Ren Tianhui, et al. Progress of micro-tribology on micro-electro-mechanical systems[J]. Tribology, 2001, 21(6): 494-498 (in Chinese) [邓昭, 饶文琦, 任天辉, 等. 微机电系统的微观摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 494-498]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2001.06.023.
- [13] Cao X, Gan X, Peng Y, et al. An ultra-low frictional interface combining FDTs SAMs with molybdenum disulfide[J]. Nanoscale,

- 2018, 10(1): 378–385. doi: [10.1039/C7NR06471C](https://doi.org/10.1039/C7NR06471C).
- [14] Jabbarzadeh A. Friction anisotropy and asymmetry in self assembled monolayers[J]. *Tribology International*, 2016, 102: 600–607. doi: [10.1016/j.triboint.2016.06.023](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.06.023).
- [15] Ptak A, Gojzewski H, Kappl M, et al. Quantitative analysis of the interaction between an atomic force microscopy tip and a hydrophobic monolayer[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(49): 21572–21578. doi: [10.1021/jp107948q](https://doi.org/10.1021/jp107948q).
- [16] Berman D, Krim J. Surface science, MEMS and NEMS: Progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices[J]. *Progress in Surface Science*, 2013, 88(2): 171–211. doi: [10.1016/j.progsurf.2013.03.001](https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2013.03.001).
- [17] Song S, Chu R, Zhou J, et al. Formation and tribology study of amide-containing stratified self-assembled monolayers: influences of the underlayer structure[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(10): 3805–3810. doi: [10.1021/jp7100144](https://doi.org/10.1021/jp7100144).
- [18] Ahn H S, Cuong P D, Park S, et al. Effect of molecular structure of self-assembled monolayers on their tribological behaviors in nano- and microscales[J]. *Wear*, 2003, 255(7-12): 819–825. doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00192-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00192-3).
- [19] Ren S, Yang S, Zhao Y. Micro-and macro-tribological study on a self-assembled dual-layer film[J]. *Langmuir*, 2003, 19(7): 2763–2767. doi: [10.1021/la026662e](https://doi.org/10.1021/la026662e).
- [20] Yufei Mo, Min Zhu, Mingwu Bai. Preparation and nano/microtribological properties of perfluorododecanoic acid (PFDA)-3-aminopropyltriethoxysilane (APS) self-assembled dual-layer film deposited on silicon[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 322(1-3): 170–176. doi: [10.1016/j.colsurfa.2008.03.004](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.03.004).
- [21] Ren S, Yang S, Zhao Y. Preparation and tribological studies of C60 thin film chemisorbed on a functional polymer surface[J]. *Langmuir*, 2004, 20(9): 3601–3605. doi: [10.1021/la0350599](https://doi.org/10.1021/la0350599).
- [22] Ou J, Wang J, Liu S, et al. Tribology study of reduced graphene oxide sheets on silicon substrate synthesized via covalent assembly[J]. *Langmuir*, 2010, 26(20): 15830–15836. doi: [10.1021/la102862d](https://doi.org/10.1021/la102862d).
- [23] Wang Hairen, Li Minya, Qu June, et al. Development for self-assembly lubricating film system[J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2013, 31(2): 83–85 (in Chinese) [王海人, 李敏娅, 屈钧娥, 等. 自组装润滑膜体系的研究进展[J]. *胶体与聚合物*, 2013, 31(2): 83–85]. doi: [10.3969/j.issn.1009-1815.2013.02.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1815.2013.02.011).
- [24] Rhe J, Novotny V J, Kanazawa K K, et al. Structure and tribological properties of ultrathin alkylsilane films chemisorbed to solid surfaces[J]. *Langmuir*, 1993, 9(9): 2383–2388. doi: [10.1021/la00033a021](https://doi.org/10.1021/la00033a021).
- [25] Srinivasan U, Houston M R, Howe R T, et al. Alkyltrichlorosilane-based self-assembled monolayer films for stiction reduction in silicon micromachines[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 7(2): 252–260. doi: [10.1109/84.679393](https://doi.org/10.1109/84.679393).
- [26] Tian F, Xiao X, Loy M M T, et al. Humidity and temperature effect on frictional properties of mica and alkylsilane monolayer self-assembled on mica[J]. *Langmuir*, 1999, 15(1): 244–249. doi: [10.1021/la981008d](https://doi.org/10.1021/la981008d).
- [27] Xie G, Wang Q, Si L, et al. Tribological characterization of several silicon-based materials under ionic-liquids lubrication[J]. *Tribology Letters*, 2009, 36(3): 247. doi: [10.1007/s11249-009-9480-0](https://doi.org/10.1007/s11249-009-9480-0).
- [28] Pu J, Wang L, Mo Y, et al. Preparation and characterization of ultrathin dual-layer ionic liquid lubrication film assembled on silica surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 354(2): 858–865. doi: [10.1016/j.jcis.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.11.001).
- [29] Ma J Q, Pang C J, Mo Y F, et al. Preparation and tribological properties of multiply-alkylated cyclopentane (MAC)–octadecyltrichlorosilane (OTS) double-layer film on silicon[J]. *Wear*, 2007, 263(7-12): 1000–1007. doi: [10.1016/j.wear.2006.12.019](https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.019).
- [30] Sianesi D, Zamboni V, Fontanelli R, et al. Perfluoropolyethers: Their physical properties and behaviour at high and low temperatures[J]. *Wear*, 1971, 18(2): 85–100. doi: [10.1016/0043-1648\(71\)90158-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(71)90158-X).
- [31] Anderson J C, Flabbi L, Caporiccio G. The lubrication of plastics by perfluoropolyether fluids[J]. *Journal of Synthetic Lubrication*, 1988, 5(3): 199–214. doi: [10.1002/jsl.3000050304](https://doi.org/10.1002/jsl.3000050304).
- [32] Feng Dapeng, Weng Lijun, Liu Weimin. Progress of tribology of perfluoropolyether oil[J]. *Tribology*, 2005, 25(6): 597–602 (in Chinese) [冯大鹏, 翁立军, 刘维民. 全氟聚醚润滑油的摩擦学研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25(6): 597–602]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2005.06.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2005.06.021).
- [33] Liu Weimin, Xu Jun, Feng Dapeng, et al. The research status and prospect of synthetic lubricating oils[J]. *Tribology*, 2013, 33(1): 91–104 (in Chinese) [刘维民, 许俊, 冯大鹏, 等. 合成润滑油的研究现状及发展趋势[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(1): 91–104]. doi: [10.16078/j.tribology.2013.01.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2013.01.002).
- [34] Caporiccio G, Flabbi L, Marchionni G, et al. The properties and applications of perfluoropolyether lubricants[J]. *Journal of Synthetic Lubrication*, 1989, 6(2): 133–149. doi: [10.1002/jsl.3000060205](https://doi.org/10.1002/jsl.3000060205).
- [35] Morcillo S P, Dauncey E M, Kim J H, et al. Photoinduced remote functionalization of amides and amines using electrophilic nitrogen radicals[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(39): 12945–12949. doi: [10.1002/anie.201807941](https://doi.org/10.1002/anie.201807941).
- [36] Wang Jinqing, Yang Shengrong, Qi Shangkui, et al. Preparation and friction behavior of perfluoropolyether lubricant film on single crystal silicon[J]. *Tribology*, 2001, 21(6): 401–404 (in Chinese) [王金清, 杨生荣, 齐尚奎, 等. 单晶硅表面全氟聚醚润滑膜的制备及摩擦特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(6): 401–404]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2001.06.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2001.06.001).
- [37] Grainger D W. Synthetic polymer ultra-thin films for modifying surface properties[J]. *Progress in Colloid and Polymer Science*, 1997: 243–250.
- [38] Novotny V J, Pan X, Bhatia C S. Tribochemistry at lubricated

- interfaces[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 1994, 12(5): 2879–2886.
- [39] Pu J, Jiang D, Mo Y, et al. Micro/nano-tribological behaviors of crown-type phosphate ionic liquid ultrathin films on self-assembled monolayer modified silicon[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(20): 4855–4863. doi: [10.1016/j.surfcoat.2011.04.089](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.04.089).
- [40] Zhang Junyan. Design and research advances of tribological films and coating[J]. *Tribology*, 2006, 26(4): 387–396 (in Chinese) [张俊彦. 薄膜/涂层的摩擦学设计及其研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(4): 387–396]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2006.04.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2006.04.020).
- [41] Kim H I, Graupe M, Oloba O, et al. Molecularly specific studies of the frictional properties of monolayer films: a systematic comparison of  $\text{CF}_3$ -,  $(\text{CH}_3)_2\text{CH}$ -, and  $\text{CH}_3$ -terminated films[J]. *Langmuir*, 1999, 15(9): 3179–3185. doi: [10.1021/la981497h](https://doi.org/10.1021/la981497h).
- [42] Choi J, Kawaguchi M, Kato T. Nanoscale lubricant with strongly bonded phase and mobile phase[J]. *Tribology Letters*, 2003, 15(4): 353–358. doi: [10.1023/B:TRIL.0000003060.30727.70](https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000003060.30727.70).
- [43] Zhu J, Liang Y, Liu W. Effect of novel phosphazene-type additives on the tribological properties of Z-DOL in a steel-on-steel contact[J]. *Tribology International*, 2004, 37(4): 333–337. doi: [10.1016/j.triboint.2003.11.003](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2003.11.003).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019084

# 基于舌/上颌微间隙下流体流动行为研究

陈汝斯<sup>1</sup>, 钱善华<sup>1,2\*</sup>, 浦广益<sup>1</sup>, 倪自丰<sup>1</sup>, 俞经虎<sup>1</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 为探讨口腔环境下流体的流动行为, 采用数值方法与流变试验深入研究舌/上颌微间隙下流体流量的影响因素. 建立舌/上颌微间隙的简化模型及Reynolds方程, 通过数值方法获取微间隙下流量变化; 在DHR-2流变仪上研究非牛顿流体的黏度与剪切率的变化, 探讨牛顿流体和非牛顿流体的流量影响. 结果表明: 牛顿流体流量平方的倒数同载荷和黏度比值和时间均呈线性函数关系; 所制备的非牛顿流体近似为幂律流体, 其黏度随脂肪含量的增加而增大, 而非牛顿流体流量率先高于后低于等效牛顿流体, 其研究结果将为特定人群功能产品的研发提供技术支持.

**关键词:** 微间隙; 非牛顿流体; 流量; 载黏比; 数值方法

中图分类号: TH117.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0692-06

## Fluid Flow Behavior Based on Tongue/Upper Palate Micro-gap

CHEN Rusi<sup>1</sup>, QIAN Shanhua<sup>1,2\*</sup>, PU Guangyi<sup>1</sup>, NI Zifeng<sup>1</sup>, YU Jinghu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to investigate the fluid flow behavior in the oral environment, numerical methods and rheological tests were used to investigate the influencing factors of fluid flow under the micro-gap between the tongue and the upper palate. A simplified model of the tongue and the upper palate under the micro-gap and the Reynolds equation were established. The flow value under the micro-gap was obtained by mean of numerical method. The viscosity and shear rate of the non-Newtonian fluid were investigated using the DHR-2 rheometer. The effect factors on the flow were discussed by Newtonian and non-Newtonian fluids. The results show that the reciprocal of the square of Newtonian fluid flow functioned as a linear relation with the ratio of load to viscosity and time. The prepared non-Newtonian fluid was approximately power-law fluid, and its viscosity increased with the increasing fat content. The varied rate of non-Newtonian fluid flow underwent a firstly higher then lower than that equivalent Newtonian fluid. The research results can provide technical support for the development of specific populations' functional products.

**Key words:** micro-gap; non-newtonian fluid; flow; load-to-viscosity ratio; numerical methods

Received 15 May 2019, revised 9 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: qianjnw@126.com, Tel: +86-13665160156.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51775244), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20161134), China Postdoctoral Science Foundation (2018T110439), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX19\_1881) and Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology (Jiangnan University) (FMZ201907).

国家自然科学基金项目(51775244), 江苏省自然科学基金项目(BK20161134), 中国博士后科学基金项目(2018T110439), 2019年江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19\_1881)和江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题项目(FMZ201907)资助.

在口腔吞咽过程中, 流体食物经历了复杂的运动, 而舌/上颚的挤压过程是极其重要阶段, 影响食物的流动. 基于舌/上颚构成的动态微间隙, 很多学者深入研究该间隙与牛顿流体黏度、密度和摩擦力等变化关系<sup>[1-4]</sup>, 其中两圆平面挤压是较为经典的舌/上颚的简化模型. 日常饮食中除小部分流体为牛顿流体(如一些蜂蜜<sup>[5]</sup>、水等)外, 大部分均为非牛顿流体, 而流体判别主要依据其黏度与剪切率的变化关系<sup>[6]</sup>. 现已采用两圆平面挤压模型获取牛顿流体<sup>[7-11]</sup>及部分非牛顿流体<sup>[12-15]</sup>流动过程的近似解, 而流量则描述流体的流动状态, 能够较好地反映舌/上颚微间隙的流体流动.

此外, 人口老龄化也是当今社会发展的突出问题, 老年人吞咽障碍的发生率也随年龄增长而增加<sup>[16]</sup>. 正常成年人吞咽流体时所承受接触应力约为30 kPa<sup>[17]</sup>, 对于吞咽障碍人群该接触应力值则较低<sup>[18]</sup>, 为此研发易于吞咽的健康食品是亟待解决的问题之一. 而深入

了解口腔环境中流体的流动行为, 揭示流体流动的影响因素, 有助于功能食品的开发, 为缓解吞咽障碍困难提供参考.

因此, 本文作者建立了舌/上颚微间隙的流体方程, 深入研究了流体在舌/上颚的挤压流动过程中流量与流体黏度及外载荷的关系, 揭示了流体流动的影响因素, 其研究结果对发展我国健康食品产业和研发特定人群功能产品具有参考意义.

## 1 舌/上颚的流体模型及影响参数

### 1.1 舌/上颚的流体模型

图1(a)示出正常成人吞咽流体的X光(二维)图. 可以发现, 舌/上颚可简化为上下两线, 流体位于两者的微间隙. 舌/上颚前端为牙齿(及嘴唇)组成的封闭边界阻碍流体的流出; 两者后端均呈倾斜形态, 便于挤压后流体流进咽部, 其简化模型如图1(b)示出.

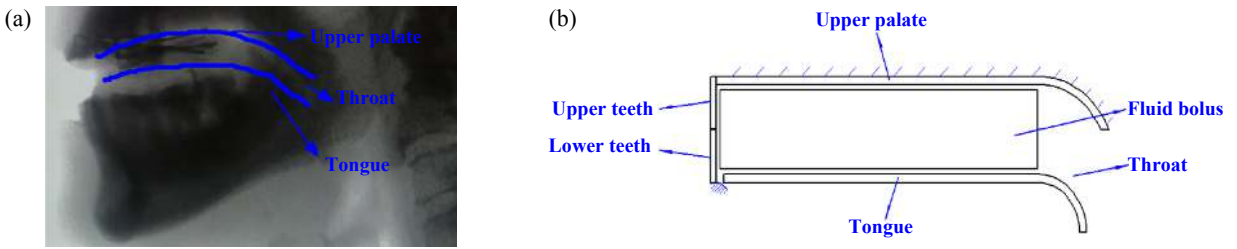


Fig. 1 X map (a) and its two-dimension model (b) from the fluid swallowing at the micro-gap between tongue and upper palate  
图 1 舌/上颚微间隙下流体吞咽的X光图(a)及其二维模型(b)

以牙齿所在直线为轴线, 舌/上颚所在直线绕该轴线旋转一周, 并最终形成图2所示的简化模型, 其上下两圆平面分别为上颚与舌头. 上颚处于静止状态, 舌半径为 $r_m$ , 其所受外载荷为 $W_0$ 并理想化为竖直向上<sup>[19]</sup>. 舌/上颚的微间隙(或称为流体高度)为 $h$ . 在挤压过程中挤出两圆平面的流体, 称为流进咽部的流体. 值得强调的是, 在舌/上颚微间隙挤压流体过程中, 舌产生的应变极小<sup>[20]</sup>, 舌表面的变形将忽略不计, 而上颚相对舌的变形更小, 因此将舌与上颚均近似为刚体. 舌

与流体接触面积和简化模型中舌面积近似相等.

在舌/上颚挤压过程中, 假设舌与上颚没有相对滑动, 则流体Reynolds方程为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 12 r \eta_i \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

由于对称性, 有 $\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0$ , 且 $h$ 与 $r$ 无关, 故将Reynolds方程简化为

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dp}{dr} \right) = \frac{12 \eta_i r}{dr} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

式中: $p$ 为流体与舌头间的压力,  $\eta_i$ 为流体的动力黏度( $\eta_0$ 、 $\eta_1$ 分别为牛顿流体与非牛顿流体黏度),  $r$ 、 $\theta$ 分别为极坐标系下极半径和极角,  $t$ 为运动时间. 故式(2)量纲一化可得,

$$\frac{d}{dR} \left( R \frac{dP}{dR} \right) = \frac{R}{H^3} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

式中: $R=r/r_m$ ,  $H=h/r_m$ ,  $P=p/(12^* \eta_i)$ . 而其边界条件为

$$P|_{R=1} = 0 \quad \frac{dP}{dR}|_{R=0} = 0 \quad (4)$$

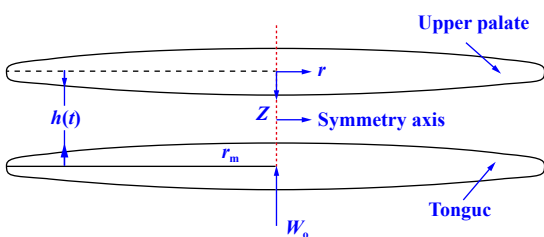


Fig. 2 Simplified model from the fluid swallowing at the micro-gap between tongue and upper palate  
图 2 舌/上颚微间隙下流体吞咽简化模型

有限差分法被广泛应用于求解Reynolds方程,且是极为有效的方法之一;而在有限差分法中“中差分”的精度最高,故本文中选用中差分方法求解. Reynolds方程的偏微分方程标准形式为

$$\frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} + X_i \frac{P_{i+1} + P_{i-1} - 2P_i}{\Delta X^2} = X_i \frac{1}{H^3} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

对应的差分边界条件为

$$P_N = 0, \quad P_2 - P_1 = 0 \quad (6)$$

同时,定义舌/上颚间的流体流量(即体积量)为无量纲数 $Q$ ,即

$$Q(t) = \frac{\pi r_m^2 h(t)}{\pi r_m^2 h(0)} = \frac{h(t)}{h(0)} \quad (7)$$

## 1.2 外载荷

舌压大小与流体黏度均对挤压过程中流体的流动行为有直接影响<sup>[21-22]</sup>. 舌前部宽度和长度分别约为30和50 mm,故舌平均半径取值为 $r_m = 20$  mm<sup>[1]</sup>. 拟取1 800 mm<sup>3</sup>的流体,则初始间隙 $H_0 = 1.5$  mm;一般成年男性的舌重约为 $G_t = 0.7$  N(女性约为0.6 N). 在流体吞咽过程中,舌挤压流体压力约为 $P_0 = 30$  kPa<sup>[17]</sup>,外载荷为 $W_0$ (流体所受舌头施加的外载荷,等于舌头所受的外载荷减去舌重),则有

$$W_0 = \pi r_m^2 \cdot P_0 - G_t = \pi(20 * 10^{-3})^2 \cdot 30 * 10^3 - 0.7 \approx 37 \text{ N} \quad (8)$$

对于老年人、中风患者和阿尔茨海默病人等吞咽障碍人群,其舌对流体的挤压力低于正常成年人,即初始外载荷均低于37 N. 为模拟正常人与不同程度吞咽障碍困难的舌作用力的差异,特选取37、27、17和7 N等4组外载荷.

## 1.3 流体黏度

当食物液体为牛顿流体时,其黏度 $\eta_0$ 为常数,拟选取 $\eta_0$ 为0.01、0.03、0.05和0.07 Pa·s的4组流体. 当食物液体为非牛顿流体时,其黏度与流体运动相关,故特制备4组非牛顿流体,即选取速溶饮品冲剂 $D_1$ 和调节口感全脂粉末 $D_2$ 以及饮用水 $D_3$ ,根据人们喜好不同,配置不同质量比的 $D_1$ 、 $D_2$ 和 $D_3$ 混合液体,具体配比列于表1中. 玻璃棒搅拌充分后,各液体均置于37 °C(正常人体口腔的温度)恒温箱内直至试验开始前.

采用DHR-2多功能流变仪对4组非牛顿流体进行流变性能测试,即测试温度为37 °C,剪切率的变化范围为0.01~1 000 s<sup>-1</sup>. 为便于比较牛顿流体与非牛顿流体间的差异,选取等效牛顿流体(与非牛顿流体的初始黏度相等的牛顿流体)作为对比组.

表1 混合溶液的质量配比表

Table 1 Mixed solution composition table

Group	Percentage of quality score/%		
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
Z <sub>1</sub>	18	2	80
Z <sub>2</sub>	16	4	80
Z <sub>3</sub>	14	6	80
Z <sub>4</sub>	12	8	80

## 2 结果与讨论

### 2.1 牛顿流体的流量

在舌/上颚挤压流体过程中,流体流动较稳定,雷诺数较低,Weinbaum获得短时间内低雷诺数工况下舌/上颚的微间隙距离<sup>[23]</sup>为

$$H(t) = \sqrt{\frac{3}{\frac{k_0}{t_v} t + 3}} \quad (9)$$

式中: $k_0 > 0$ 且为常数, $t_v \propto \eta_0 / W_0$ 且表示黏性流动时间. 将式(9)带入(7)获得流量变化函数.

$$Q(t) = \sqrt{\frac{1}{kt + 1}} \quad (10)$$

式中: $k = k_1 \frac{W_0}{\eta_0}$ , $k_1 > 0$ 且为常数, $\frac{W_0}{\eta_0}$ 为外载荷与黏度的比值(简称载黏比).

图3示为不同黏度与外载荷工况下牛顿流体流量随时间的变化关系(以黏度 $\eta_1 = 0.01$  Pa·s、外载荷 $W_1 = 37$  N为对照组). 可以发现,牛顿流体的流量随时间呈非线性降低,流量与黏度呈正相关,却与外载荷呈负相关,较高黏度和较低外载荷均产生较大的流量;而流量率随时间呈先急剧降低后平稳的变化趋势. 选取式(10)为拟合函数,其拟合结果的相关系数均为0.998以上. 可以看出,随着牛顿流体黏度和外载荷的增大,相邻拟合曲线相距越近,可知较低的黏度和外载荷工况下流量受流体黏度和外载荷的影响较大,较高的黏度和外载荷工况下流量受流体黏度和外载荷的影响较小. 所获得的流量变化与文献[23]中研究结果具有很好的 consistency.

图4示出式(10)的参数 $k$ 值随黏度及外载荷的变化关系. 可以发现, $k$ 值与黏度呈反线性函数关系,与外载荷呈线性函数关系. 结合式(10)可知, $k_1 = 1.894 * \eta_1 = 0.701 / W_1 = 0.018 94$ ,则牛顿流体流量 $Q$ 与载黏比 $W_0 / \eta_0$ 存在下列关系,

$$Q^{-2} = k_1 \frac{W_0}{\eta_0} t + 1 \quad (11)$$

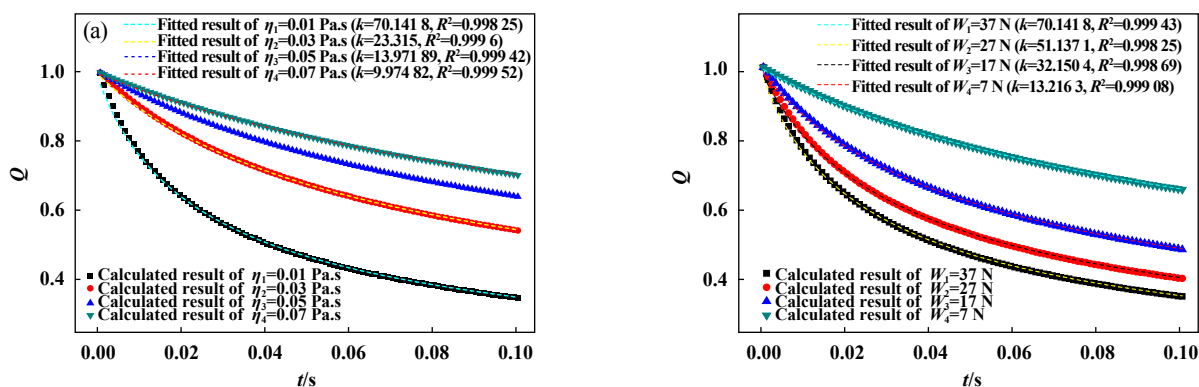


Fig. 3 Variation of Newtonian fluid flow with time under different viscosity (a) and external loads (b)

图 3 不同黏度(a)和外载荷(b)下牛顿流体流量随时间的变化关系

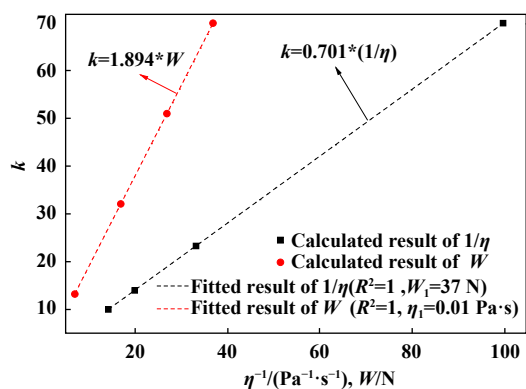


Fig. 4 Variation in the parameter  $k$  with the viscosity/external loads  $W_0/\eta_0$

图 4 参数  $k$  随黏度/外载荷的变化关系

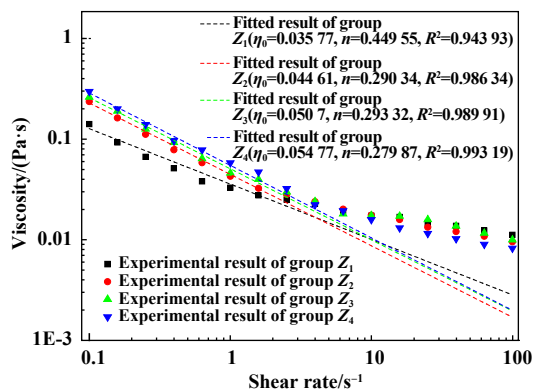


Fig. 5 Variation in Non-Newtonian fluid viscosity with the shear rate

图 5 非牛顿流体黏度与剪切率的变化关系

## 2.2 非牛顿流体黏度与剪切率的关系

为了研究舌/上颌间非牛顿流体的流量变化,对黏度与剪切率的关系开展深入研究.本文中拟采用幂律流体的函数作为非牛顿流体的黏度方程,即为

$$\eta_1 = \eta_0 v^{n-1} \quad (12)$$

式中:  $\eta_0$  为流体初始黏度,  $v$  为剪切率,  $n$  为指数项, 其中  $n > 1$  为剪切稠化的流体, 而  $n < 1$  为剪切稀化的流体. 图5所示为4组非牛顿流体黏度随剪切率的变化关系. 可以发现, 4组流体的黏度随剪切率均呈非线性降低, 表明此非牛顿流体是剪切稀化流体, 符合大部分流体食品的属性.

从图5中发现, 黏度-剪切率在双对数坐标系上呈负线性关系, 选取式(12)为拟合函数, 其拟合结果的相关系数均达到0.94以上. 可以看出, 随着剪切率的增加, 非牛顿流体黏度的变化与其初始黏度值有关. 当剪切率较低时, 非牛顿流体Z<sub>1</sub>的黏度低于其他流体的黏度, 而剪切率高于20 s<sup>-1</sup>的非牛顿流体Z<sub>4</sub>黏度高于其他流体. 值得强调的是, 鉴于纵坐标为对数型, 在剪切

率较高时, 虽然图中显示试验数据与拟合曲线相距较大, 但实际数值相差却极小, 故该类流体可近似认为幂律流体, 能通过式(12)表示各组液体黏度随剪切率的变化. 从表1溶质的质量分数来看, 初始时刻随着D<sub>1</sub>质量分数降低和D<sub>2</sub>质量分数升高, 其黏度呈逐渐增大.

## 2.3 非牛顿流体的流量

对于流体来说, 剪切率为流速差与所取两液表面高度差的比值, 则式(12)可转化为

$$\eta_1 = \eta_0 \cdot \left( -\frac{V[i]}{H[i]} \right)^{n-1} \quad (13)$$

式中:  $V[i]$  为各时刻舌头的速度,  $V[i] < 0$ ,  $H[i]$  为各时刻舌/上颌间隙.

图6示为不同黏度与外载荷工况下非牛顿流体流量随时间的变化关系(以Z<sub>1</sub>组黏度, 外载荷  $W_1=37$  N 为对照组). 为清晰分辨牛顿流体与非牛顿流体间的差异, 图6中也绘制与等效牛顿流体的流量随时间变化的曲线(虚线绘出). 此外, 还标出各对比组的流体流量变化曲线的交点.

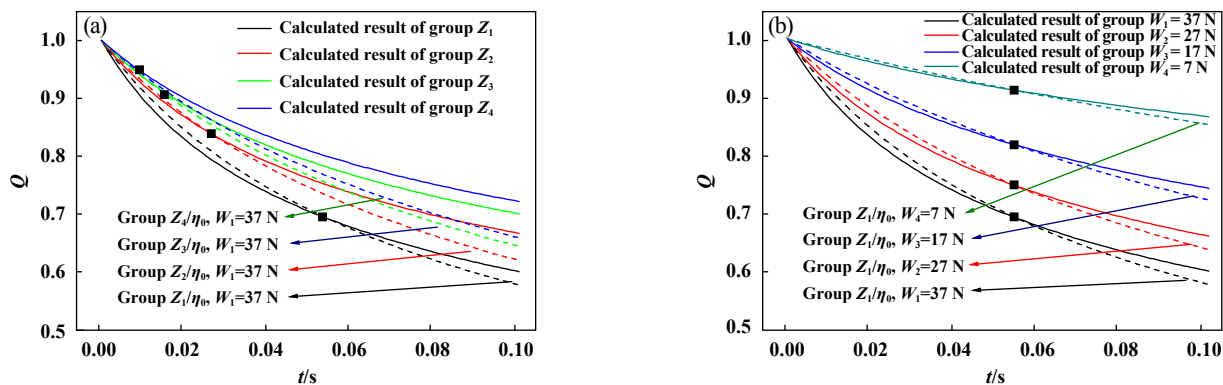


Fig. 6 Variation in non-Newtonian fluid flow with time at different viscosities (a) and external loads (b)

图6 不同黏度(a)和外载荷(b)下非牛顿流体流量随时间的变化关系

从图6中可以发现,在舌/上颚挤压过程中,4组非牛顿流体的流量均随时间呈非线性降低,流量与黏度呈正相关,却与外载荷呈负相关;流量率随时间呈先急剧后平稳的变化趋势,流量率随黏度的增大而减少,却随外载荷的增大而增加.与等效牛顿流体的相比,非牛顿流体流量率先高于后低于等效牛顿流体.此外,还发现非牛顿流体与等效牛顿流体流量相同的时刻,并称为临界时间.临界时间随黏度的增加而增大,但与外载荷无关.

## 2.4 讨论

从上述的研究结果发现,牛顿流体与非牛顿流体流量率均随着黏度的增大而减少.在舌/上颚挤压过程中,流量率随时间增加而减小,这主要是由于随着舌的挤压,流体压力逐渐增大而舌运动速度减小,导致流体流动减缓,流量率呈减小趋势.在吞咽流体过程中,为使得其流量率较均匀,舌所受外载荷需逐渐增加.同时,在舌/上颚挤压过程中,建立非牛顿流体的黏度函数,获得其流量的变化规律.其结果表明在选取的特定时间内,非牛顿流体相较于等效牛顿流体流量率更大,其原因是在舌挤压过程中非牛顿流体的黏度低于其初始黏度.

由非牛顿流体的流变特性可知,该类流体近似为幂律流体,呈剪切稀化现象.所制备的4组非牛顿流体,其黏度呈现较大差异,其原因与混合液体中溶质含量相关. $D_1$ 中脂肪含量远小于 $D_2$ 中脂肪含量,导致从 $Z_1 \sim Z_4$ 流体中脂肪含量依次增大.随着脂肪含量的增大,其黏度依次增加,这与文献[10]结果有较好的一致性.在吞咽困难患者饮食中,通过合理搭配来增加膳食的脂肪含量,既能增加患者的营养摄入,又能降低进餐时呛咳风险<sup>[24]</sup>.

此外,呛咳发生的原因是缘于流量率较高,但流

量率太小将影响其进食速率,因此流量率应保持在合理的区间.从式(11)可知,对于舌/上颚挤压牛顿流体的过程中,载黏比影响其流量,故流量率亦受载黏比的影响较大;对于非牛顿流体也有类似的规律.因此,对于吞咽障碍人群,由于其舌头所受外载荷低于正常人,则选用吞咽黏度更低的流体以达到恰当的载黏比,进而控制合适的流量率.

## 3 结论

a. 在舌/上颚微间隙下挤压牛顿流体的过程中,其流量平方的倒数与载黏比和时间呈线性关系,较低黏度和较高外载荷均产生较小流量.

b. 非牛顿流体流量与黏度呈正相关、与外载荷呈负相关,流量率与时间呈先急剧后平稳的变化;与等效牛顿流体相比,非牛顿流体流量率先高于后低于等效牛顿流体;临界时间随黏度的增大而增大,与外载荷无关.

c. 近似为幂律流体的非牛顿流体,为剪切稀化流体;混合溶液中脂肪含量增加将提高其黏度,合理搭配饮食中脂肪含量能够降低进餐时呛咳风险.

## 参考文献

- [1] Nicosia M A, Robbins J A. The fluid mechanics of bolus ejection from the oral cavity[J]. *Journal of Biomechanics*, 2001, 34(12): 1537-1544. doi: 10.1016/S0021-9290(01)00147-6.
- [2] Nicosia, M A. Theoretical estimation of shear rate during the oral phase of swallowing: effect of partial slip[J]. *Journal of Texture Studies*, 2013, 44(2): 132-139. doi: 10.1111/jtxs.12005.
- [3] Engmann J, Burbidge A S. Fluid mechanics of eating, swallowing and digestion—overview and perspectives[J]. *Food & Function*, 2013, 4(3): 443-447.
- [4] Aken V, George A. Modelling texture perception by soft epithelial surfaces[J]. *Soft Matter*, 2010, 6(5): 826-834. doi: 10.1039/b916708k.



- [5] Sopade P A, Halley P J, D'Arcy B, et al. Friction factors and rheological behavior of Australian honey in a straight pipe[J]. *International Journal of Food Properties*, 2004, 7(3): 393–405. doi: [10.1081/JFP-200032925](https://doi.org/10.1081/JFP-200032925).
- [6] Chen Zhaoxia, Guan Min. Study on rheological properties of non-Newtonian fluids by rotational viscometer[J]. *Modern Instrumentation*, 2007, 13(2): 23–26 (in Chinese) [陈朝霞, 管民. 用旋转黏度计法研究非牛顿流体的流变性能[J]. *现代仪器*, 2007, 13(2): 23–26]. doi: [10.3969/j.issn.1672-7916.2007.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7916.2007.02.008).
- [7] Wang CY. The squeezing of a fluid between two plates[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1976, 43(4): 579–583. doi: [10.1115/1.3423935](https://doi.org/10.1115/1.3423935).
- [8] Kokini J L, Kadane J B, Cussler E L. Liquid texture perceived in the mouth[J]. *Journal of Texture Studies*, 1977, 8(2): 195–218. doi: [10.1111/j.1745-4603.1977.tb01175.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1977.tb01175.x).
- [9] Rashidi M M, Siddiqui A M, Rastegari M T. Analytical solution of squeezing flow between two circular plates[J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2012, 13(5): 342–349. doi: [10.1080/15502287.2012.698698](https://doi.org/10.1080/15502287.2012.698698).
- [10] Qayyum M, Khan H, Rahim, M T. A novel approach to approximate unsteady squeezing flow through porous medium[J]. *Journal of Prime Research in Mathematics*, 2016, 12: 91–109.
- [11] Khan O, Qayyum M, Khan H, et al. Improved analysis for squeezing of newtonian material between two circular plates[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 5703291: 1–9.
- [12] Xu C, Huang W, Xu Y. Squeeze flow of a second-order fluid between two parallel disks or two spheres[J]. *Applied Mathematics & Mechanics*, 2004, 25(9): 1057–1064.
- [13] Xu Chunhui, Huang Wenbin, Xu Yong. Extrusion flow of bingham fluid with wall slip between parallel rigid discs[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(2): 7–10 (in Chinese) [徐春晖, 黄文彬, 徐泳. 平行刚性圆盘间有壁面滑移时宾汉流体的挤压流动[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(2): 7–10]. doi: [10.3321/j.issn:1007-4333.2003.02.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:1007-4333.2003.02.002).
- [14] Huang Wenbin, Xu Chunhui, Xu Yong. Study on the pressure law of two parallel rigid disks squeezed by ideal rigid plastic medium[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2004, 25(1): 111–114 (in Chinese) [黄文彬, 徐春晖, 徐泳. 两平行刚性圆盘挤压理想刚塑性介质时压力规律研究[J]. *固体力学学报*, 2004, 25(1): 111–114]. doi: [10.3969/j.issn.0254-7805.2004.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-7805.2004.01.023).
- [15] Xu Chunhui, Yang Wei. Slip law of contact surface when two parallel rigid disks are squeezed with power law fluid[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(1): 33–36 (in Chinese) [徐春晖, 杨薇. 两平行刚性圆盘挤压幂律流体时接触面的滑移规律[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(1): 33–36].
- [16] Chen Jianshe, Lv Zhihong. Dietary disorders and geriatric food for the aged: challenges and opportunities in the food industry[J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 310–315 (in Chinese) [陈建设, 吕治宏. 老年饮食障碍与老年食品: 食品工业的挑战与机遇[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 310–315]. doi: [10.7506/spkx1002-6630-201521057](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-201521057).
- [17] Ono T, Hori K, Nokubi T. Pattern of tongue pressure on hard palate during swallowing[J]. *Dysphagia*, 2004, 19(4): 259–264. doi: [10.1007/s00455-004-0010-9](https://doi.org/10.1007/s00455-004-0010-9).
- [18] Yoshida M, Kikutani T, Tsuga K, et al. Decreased tongue pressure reflects symptom of dysphagia[J]. *Dysphagia*, 2006, 21(1): 61–65. doi: [10.1007/s00455-005-9011-6](https://doi.org/10.1007/s00455-005-9011-6).
- [19] Mathmann K, Kowalczyk W, Petermeier H, et al. A numerical approach revealing the impact of rheological properties on mouthfeel caused by food[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2007, 42(6): 739–745.
- [20] Redfearn A G, Hanson B. A mechanical simulator of tongue-palate compression to investigate the oral flow of non-newtonian fluids[J]. *Ieee/Asme Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 958–965. doi: [10.1109/TMECH.2018.2808704](https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2808704).
- [21] Hiraoka A, Yoshikawa M, Nakamori M, et al. Maximum tongue pressure is associated with swallowing dysfunction in ALS patients[J]. *Dysphagia*, 2017, 32(4): 1–6.
- [22] Hayoun P, Engmann J, Mowlavi S, et al. A model experiment to understand the oral phase of swallowing of Newtonian liquids[J]. *Journal of Biomechanics*, 2015, 48(14): 3922–3928. doi: [10.1016/j.jbiomech.2015.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.09.022).
- [23] Weinbaum S, Lawrence C J, Kuang Y. The inertial draining of a thin fluid layer between parallel plates with a constant normal force. Part 1. Analytic solutions; inviscid and small- but finite-reynolds-number limits[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985, 156: 463–477. doi: [10.1017/S0022112085002191](https://doi.org/10.1017/S0022112085002191).
- [24] Chen Yanqiu, Xie Hua, Chen Min, et al. Application of dietary texture changes in elderly patients with swallowing dysfunction[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2017, 37(21): 198–200 (in Chinese) [陈艳秋, 谢华, 陈敏, 等. 膳食质地改变在老年吞咽功能障碍患者中的应用[J]. *中国老年学杂志*, 2017, 37(21): 198–200].

DOI: 10.16078/j.tribology.2019124

# 马氏体钢干滑动磨损纳米梯度结构的形成机理研究

高清远, 李淑欣\*, 苏云帅

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 采用SFT-2M销盘式摩擦磨损仪对马氏体钢进行干滑动磨损试验. 通过扫描电镜、透射电镜和显微硬度计对滑动磨损后的显微组织进行了表征. 结果表明: 显微组织的变化随着接触载荷的不同, 受到不同磨损机制的主导. 在相对较低接触载荷下, 马氏体板条在磨粒磨损机制下发生弯曲; 在高接触载荷下, 马氏体板条在黏着磨损机制下形成梯度结构. 滑动磨损引发大量塑性变形, 在材料内部产生高位错密度的几何必要边界(GNBs)和伴生位错边界(IDBs), 导致层片结构的形成. 随着这两种边界数量的增大, 层片间距减小, 晶粒被分割为更小的晶粒, 最终形成纳米层片结构.

**关键词:** 干滑动磨损; 马氏体钢; 梯度结构; 磨损机理; 纳米层片结构

**中图分类号:** TG117.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2019)06-0698-08

## Investigation on Formation Mechanism of Nano-Gradient Structure in Dry Sliding Wear of Martensite Steel

GAO Qingyuan, LI Shuxin\*, SU Yunshuai

(School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Dry sliding wear test was carried out on a martensitic steel using a SFT-2M pin-on-disk friction tester. The microstructure after sliding wear was characterized by scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and microhardness tester. The results show that microstructural change was controlled by different wear mechanisms at both high and low contact loads. At a relatively lower load, martensite lath became bend under the mechanism of abrasive wear, whereas it formed a gradient structure at the mechanism of adhesive wear at the higher load. As a result of sliding wear-induced plastic deformation, high dislocation density of geometrically necessary boundaries (GNBs) and incidental dislocation boundaries (IDBs) was formed. This led to the formation of laminated structure. The lamellar spacing was greatly reduced and grains were partitioned into smaller grains with increasing number of GNBs and IDBs. Eventually, nano-laminated structure was generated.

**Key words:** dry sliding wear; martensitic steel; gradient structure; wear mechanism; nano-laminated structure

滑动磨损会使材料表面产生严重的塑性变形, 导致磨损表面生成纳米晶或纳米层片的组织结构. 这种变形类似于表面机械碾磨处理(SMGT)<sup>[1-2]</sup>、高压扭转(HPT)<sup>[3]</sup>、累积叠轧焊(ARB)<sup>[4]</sup>和等径角挤压(ECAP)<sup>[5-6]</sup>

等严重塑性变形(SPD)的新技术. 近几年, 滑动磨损引起的晶粒细化问题得到了广泛的研究. 材料不同, 晶粒细化机理不同. 在铜、铝和镁等硬度低、塑性好的单相金属材料和相关合金材料得到广泛研究之后<sup>[7-12]</sup>,

Received 3 July 2019, revised 23 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. Email: lishuxin@nbu.edu.cn, Tel: +86-574 87609954.

This project was financially supported by the Natural Science Foundation of China NSFC (51675287) and KC Wong Magna Fund in Ningbo University.

国家自然科学基金项目(51675287)和宁波大学王宽诚幸福基金资助.

一些关于合金钢的磨损研究也接踵而来, 例如奥氏体不锈钢<sup>[13]</sup>、珠光体轨道钢<sup>[14]</sup>、高强度钢的20CrMnTi<sup>[15]</sup>及20CrNi2Mo<sup>[16]</sup>等多种材料, 均通过干滑动摩擦获得了表面纳米结构以及相应亚表面的梯度结构。马氏体钢是目前工业应用最为广泛的高强度钢种, 具有高强度、高硬度和高耐磨性等良好性能, 被用于制作各类机械构件。然而在实际工程应用中, 由于摩擦磨损导致的组织结构演化会引起构件表面硬度和强度的变化, 使其过早失效<sup>[17-18]</sup>。因此, 对马氏体钢由于摩擦磨损引起的塑性变形而导致的结构演变进行了研究。具体是利用显微硬度计、激光共聚焦扫描显微镜(LSCM)、扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)来表征马氏体钢在干滑动磨损过程中形成的变形区域, 并通过分析表征结果来说明摩擦磨损引起的变形区域中纳米层的形成机理。

## 1 试验部分

### 1.1 材料与热处理

试验原材料采用退火态GCr15钢, 热处理工艺如下: 加热至930 °C, 完全奥氏体化90 min后油淬。然后进行2 h的180 °C低温回火, 获得回火马氏体组织。其平均硬度为HV605, 化学成分(质量分数, %)为Fe, 0.95C, 0.3Mn, 1.48Cr, 0.25Si, 0.02S, 0.027P。根据摩擦磨损仪的试验夹具制备成圆盘形样品, 其安装直径和厚度分别为30和5 mm。

### 1.2 试验方法

干滑动摩擦磨损试验在SFT-2M销盘式摩擦磨损仪上进行, 采用球面旋转摩擦磨损方式。对磨球直径6 mm, 材料与圆盘相同, 且固定在夹具上。在100和150 N的恒定载荷下, 以500 r/min的旋转速度进行60 min的干滑动摩擦磨损试验。样品表面在试验前进行了抛光, 表面粗糙度为0.05~0.1 μm。摩擦系数由磨损仪附有的检测系统测量得到。试验后, 所有样品用丙酮进行超声波清洗, 然后使用VK-X210激光共聚焦扫描显微镜和SU-5000扫描电子显微镜分别进行磨损表面的轮廓分析和形貌观察。之后, 使用电火花线切割把圆盘形样品制备成长方体试样, 并分为两组: 一组用于硬度测定, 一组用于亚表面观察。长方体试样经研磨、机械抛光和4%硝酸酒精溶液腐蚀后, 分别进行磨损截面的硬度测定和组织分析: 采用HV-1000显微维氏硬度计, 在0.5 N的载荷作用下, 测定了磨损截面沿深度方向的显微硬度分布; 采用扫描电镜和FEI Talos F200X透射电镜对其截面组织进行了观察, 其中透射

电镜样品由聚焦离子束(FIB)技术制备。

## 2 结果与分析

### 2.1 摩擦系数和磨损表面分析

图1为不同载荷但相同摩擦速度下的摩擦系数。前10 min, 摩擦系数快速上升并且稳定在0.45~0.55, 100 N载荷下, 摩擦系数稳定至试验结束, 而150 N载荷的摩擦系数在稳定30 min后开始逐渐上升, 在试验结束前达到0.60~0.65。产生这一结果的原因是在较高的载荷作用下, 摩擦过程的温升更快。在局部高温高压的作用下, 摩擦副的接触表面形成了黏着点, 为了克服高度黏附的接触点<sup>[19]</sup>, 需要更大的摩擦力, 从而导致了摩擦系数的上升。随着载荷的增加, 磨损率也随之增加。表1为试样在100和150 N载荷下, 以500 r/min的速度进行摩擦磨损试验60 min后的磨损率。

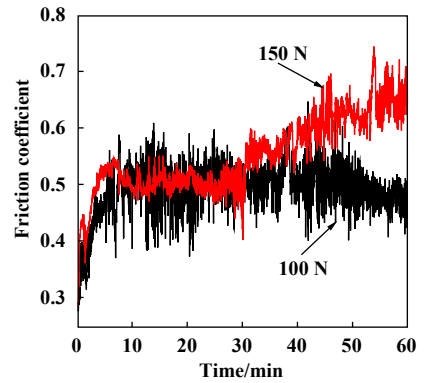


Fig. 1 Frictional traces

图1 摩擦系数随时间的变化

表1 磨损量和磨损率

Table 1 Mass loss and wear rate

Load/N	Time/min	Friction velocity/(r/min)	Mass loss/mg	Wear rate/(mg/m)
100	60	500	5.3	0.004 7
150	60	500	15.8	0.013 5

不同载荷下的磨损表面形貌如图2所示。在图2(a)中可以明显地观察到沿滑动方向上存在长而浅的犁沟和大片的微切削痕迹, 而且整个磨损表面相对光滑且有少量的磨屑附着在磨损表面, 是典型的磨粒磨损特征<sup>[20]</sup>。而图2(b)所示的形貌中, 磨损表面几乎没有划痕和犁沟, 但局部区域存在塑性流动, 且有大量的磨屑粘附在表面。此外, 还发现部分区域覆盖有氧化物。由此可以得出, 150 N载荷下的磨损机理是以黏着磨损为主并伴随着氧化磨损。产生这种变化的主要原因如下: 载荷的增加, 使干滑动摩擦条件下的温升更高。

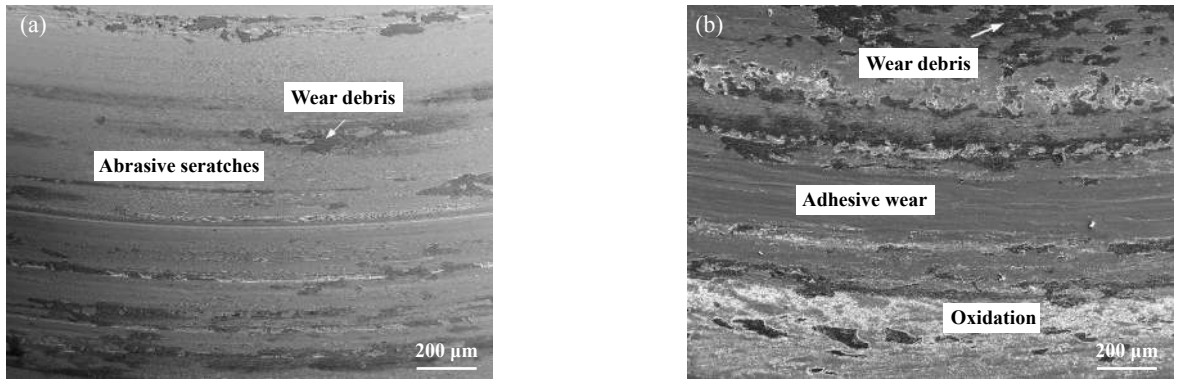


Fig. 2 SEM micrographs of worn surfaces for (a) 100 N; (b) 150 N

图2 磨损表面形貌的SEM照片(a) 100 N; (b) 150 N

局部的高温高压使得摩擦副接触点发生了金属黏着, 由于摩擦副为塑性材料, 黏着结点的破坏呈现塑性流动<sup>[21]</sup>. 另外, 载荷增加也使磨损表面发生了氧化, 生成的氧化膜保护了磨损表面, 使得磨粒磨损逐渐减弱, 直至消失. 磨损机理由原来的磨粒磨损转变为氧化磨损和黏着磨损相结合的磨损方式. 这种变化也可以从150 N载荷下的摩擦系数变化中得出.

图3为不同载荷下磨损表面的局部三维形貌, 以原始表面作为参考面. 磨痕深度随载荷的增加而增加. 100 N载荷时的最大磨损深度为31.4 μm[见图3(a)]. 150 N载荷时, 最大磨损深度增至92.1 μm, 比100 N载荷高出近2倍[见图3(b)]. 磨损深度的变化值与表2的磨损量和磨损率一致. 另外, 图中磨损表面存在的凸起以及磨痕的宽度也反映了磨损过程中塑性变形程度和磨损程度. 这些形貌由于摩擦副的挤压引起, 100 N载荷的磨痕附近没有明显的凸起, 不排除是在摩擦过程中发生了剥落, 故只能对磨痕的宽度进行对比分析. 当负载从100 N增至150 N时, 磨痕的宽度也随之增加, 从1.10增至2.73 mm, 大约提高了1.5倍. 磨痕宽度

的变化程度略低于深度和磨损率, 但在趋势上保持一致.

## 2.2 显微硬度变化

图4显示了显微硬度随磨损截面深度的增加而降低, 表层硬度最大, 但两者硬度变化范围不同. 100 N载荷的显微硬度变化范围为HV650~605, 对应深度为3~25 μm. 而150 N的变化范围为HV701~605, 对应深度为3~40 μm, 可见150 N载荷的硬度变化范围更大. 但无论哪种载荷均在达到基体显微硬度HV605后出现转折, 随后硬度保持不变. 硬度的提高是由微观组织变化和残余应力引起的: 由滑动磨损造成的塑性变形使晶粒细化, 强化了材料硬度; 而部分没有明显形貌变化的组织是由于残余应力使硬度有所提升<sup>[22]</sup>. 具体的晶粒变化将通过下述TEM结果进行讨论.

## 2.3 SEM微观结构

磨损表面形貌的SEM照片如图5所示. 由摩擦磨损累积的应变引起亚表面的组织变形, 呈现梯度结构, 与先前材料表面摩擦变形的研究结果一致<sup>[2, 16, 23]</sup>. 与基体相比, 100 N载荷的磨粒磨损所产生的变形形

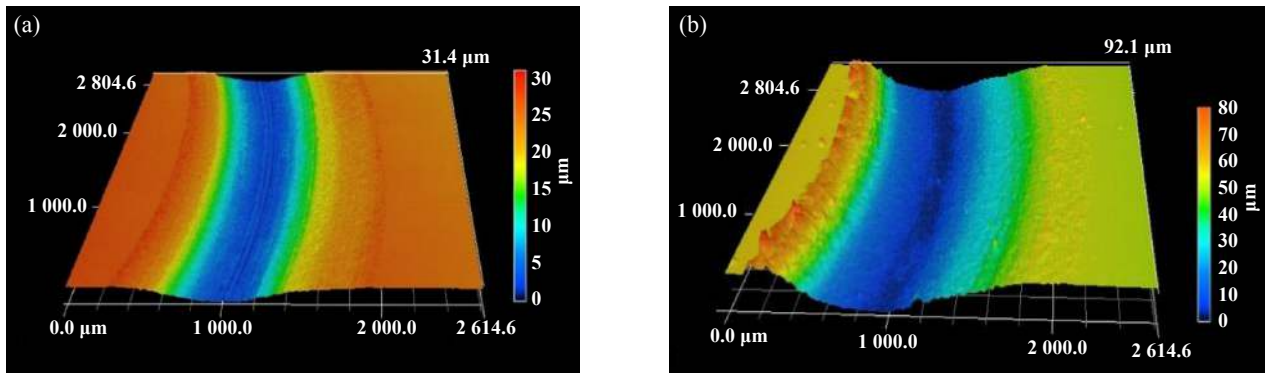


Fig. 3 3D confocal laser scanning micrographs of worn surfaces for (a) 100 N; (b) 150 N

图3 磨损表面三维激光共聚焦扫描显微照片(a)100 N; (b)150 N

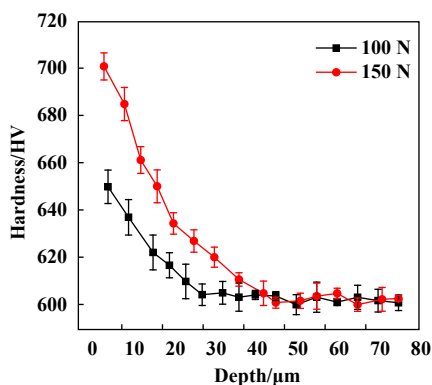


Fig. 4 Microhardness variation with the depth  
图 4 显微硬度随深度的变化

貌在深度10  $\mu\text{m}$ 处, 主要由弯曲的马氏体板条组成, 如图5(a)所示. 而150 N载荷的黏着磨损所产生的塑性变形深度约有25  $\mu\text{m}$ , 被标记成3个区域, 如图5(b)所示. 在深度10  $\mu\text{m}$ 下的III区与100 N载荷的变形区形貌基本一致, 均为弯曲的马氏体板条构成, 仅变形区域厚

度增加了5  $\mu\text{m}$ . 而II区观察到的是一种细化且沿剪切方向拉长的组织结构. 最接近表面的I区与II区类似, 但没有明显的特征, 是一种超细化的微观组织, 通过SEM照片难以识别, 需通过TEM深入分析. 两者亚表面马氏体板条的变形程度均随深度增大而减小. 但载荷越大, 塑性变形程度越严重, 图5(b) I区中的超细化组织就是最明显的区别, 而且形貌的变化也与硬度变化趋势一致.

### 2.4 TEM微观结构

由图5可知, 磨粒磨损与黏着磨损所引起的塑性变形的最大区别在于亚表面的超细化组织以及细化的拉长组织, 而弯曲马氏体所在的变形区域两者基本一致, 故仅对150 N载荷的磨损样品进行系统的TEM表征. 采用FIB在150 N载荷磨损试样的不同深度制备了TEM样品.

图6为磨损表面下10~25  $\mu\text{m}$ 深度的微观组织变化. 该区域主要是弯曲马氏体组织构成, 其明暗场如图6(a)

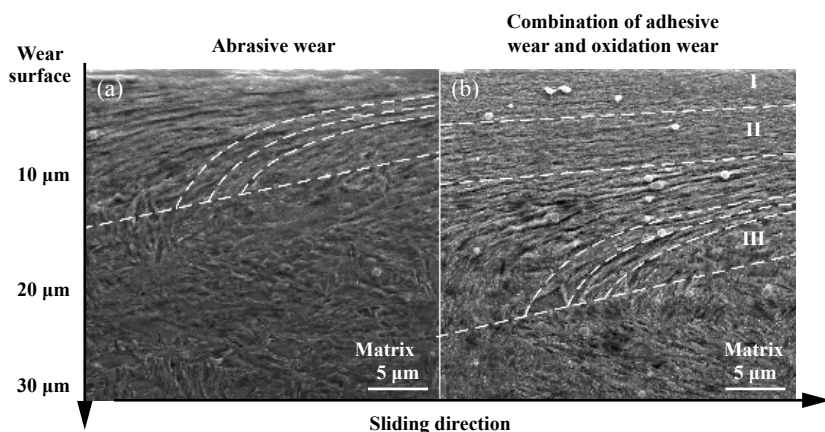


Fig. 5 SEM micrographs of the cross section microstructure of worn surfaces for (a) 100 N and (b) 150 N  
图 5 磨损表面横截面微观组织的SEM照片: (a)100 N, (b)150 N

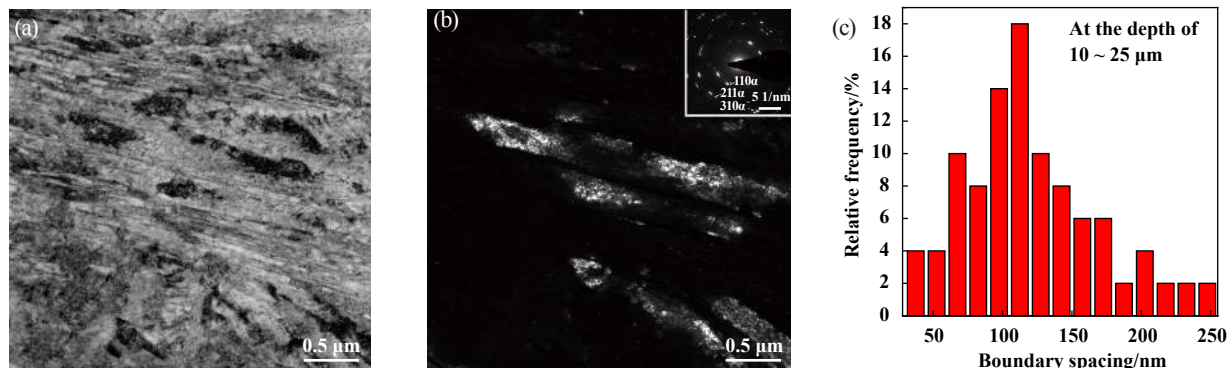


Fig. 6 TEM micrographs of the cross section microstructure at a depth of 10~25  $\mu\text{m}$  under the worn surface: (a) BF image; (b) DF image with SAED pattern; (c) frequency histogram of boundary spacing

图 6 磨损表面下10~25  $\mu\text{m}$ 深度横截面微观组织的TEM照片: (a)明场图像; (b)暗场图像附SAED花样; (c)边界间距的频率直方图

和(b)所示. 马氏体板条沿着滑动方向发生了弯曲和剪切滑移, 从选区电子衍射花样(SAED)中也可以看出 $\alpha$ -Fe衍射斑点发生了变形. 根据近20张TEM照片统计得到的图6(c)频率直方图可以看出, 该深度范围内的板条间距主要在100~120 nm, 但间距更小的晶粒也已经出现. 图7(a~b)为处于深度5~10  $\mu\text{m}$ 呈层片结构的拉长马氏体晶粒. 从图7(c)的直方图可以看到层片间距主要集中在50 nm左右. 拉长晶粒的边界清晰, 晶粒尺寸小, 长度在120~200 nm. 另外, SAED花样上显示 $\alpha$ -Fe多晶衍射环不连续, 某些取向的衍射斑明显强于其他斑点. 这是因为剪应变使马氏体晶粒沿滑动方向拉长, 增强了在该方向上的取向. 深度0~5  $\mu\text{m}$ 处的超细化组织的明暗场如图8(a)和(b)所示, 该层的晶粒更为细小, 呈片状. 图8(c)的直方图表明层片间距仅在40 nm左右. 这是由于近表层的塑性应变最大, 使得晶粒内部存在更多的位错, 导致拉长马氏体晶粒逐渐破碎成短小的晶粒. SAED花样为清晰和连续的 $\alpha$ -Fe衍射环, 这是因为沿剪切方向拉长晶粒的减少以及衍射区域中的小尺寸晶粒数量的增多, 使得取向更加随机. 甚

至有一小部分的晶粒已经趋向于等轴晶, 尺寸仅在30 nm左右.

### 3 讨论

在干滑动摩擦过程中, 磨损表面的塑性变形使得亚表面累积了大量的剪应变才引起了组织变化. 依照Dautzenberg和Zaat所提出的方法, 计算弯曲马氏体板条边界的曲率来得出有效剪应变沿深度方向的变化规律<sup>[24]</sup>. 测量出图9(a)变形流线上不同深度的剪切角( $\theta$ ), 等效剪应变就可以通过方程(1)计算得出:

$$\varepsilon(x) = \tan[\theta(x)] / \sqrt{3} \quad (1)$$

其中 $x$ 是距离磨损表面的深度. 图5(b)磨损亚表面的等效剪应变分布曲线如图9(b)所示, 其最大估计值约为11.9, 随深度的增加而减小. 在深度0~5.3  $\mu\text{m}$ 的纳米层流线由于几乎和磨损表面相平行, 不能准确地测量出剪切角( $\theta$ ), 无法进行剪应变的估算. 然而, 有研究表明近表面的有效剪应变可达到62.98<sup>[15]</sup>. 图5(b)所示形貌即为等效剪应变随深度的变化, 近表面 I 区的剪应变要远大于深度在5  $\mu\text{m}$ 以下的 II 区和 III 区, 是磨损亚表

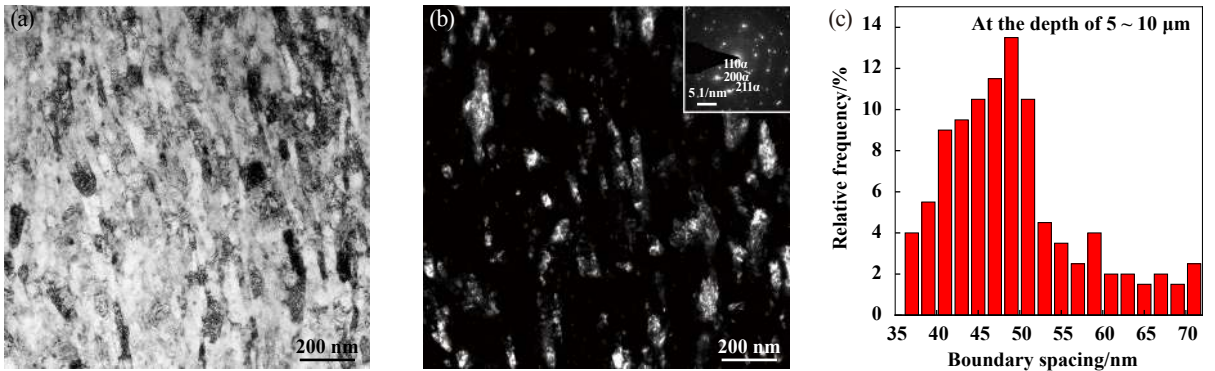


Fig. 7 At a depth of 5~10  $\mu\text{m}$ : (a) BF image; (b) DF image with SAED pattern; (c) frequency histogram

图7 磨损表面下5~10  $\mu\text{m}$ 深度: (a)明场图像; (b)暗场图像附SAED花样; (c)频率直方图

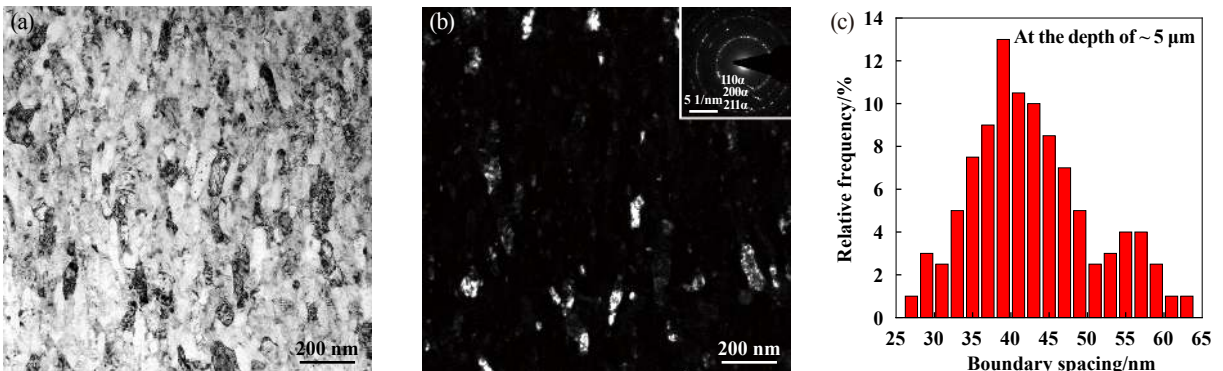


Fig. 8 At a depth of 0~5  $\mu\text{m}$ : (a) BF image; (b) DF image with SAED pattern; (c) frequency histogram

图8 磨损表面下0~5  $\mu\text{m}$ 深度: (a)明场图像; (b)暗场图像附SAED花样; (c)频率直方图

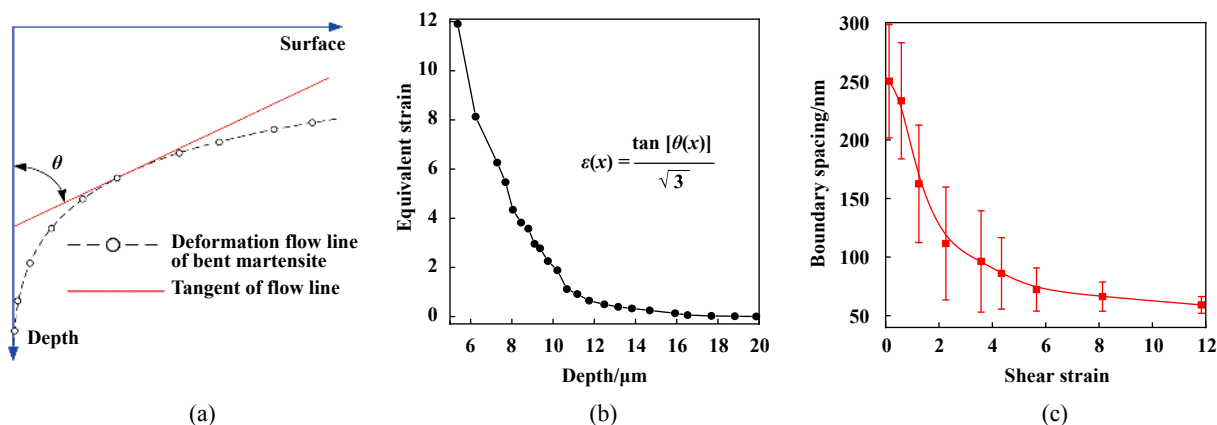


Fig. 9 (a) Schematic diagram of estimated shear strains beneath worn surfaces; (b) shear strain variation with the depth; (c) boundary spacing variation with the shear strain

图 9 (a)磨损表面下估算剪应变示意图; (b)剪应变随深度变化; (c)层片边界间距随剪应变变化

面形成梯度结构的主要原因。图9(c)为层片边界间距和剪应变的对应关系, 层片边界间距随剪应变的增加迅速下降, 在应变达到6以后下降速度明显放缓。这说明当晶粒尺寸缩短到一定程度, 后续变化对应变的需求将是前面阶段的数倍。

由上述可知, 滑移磨损诱发塑性应变的累积导致纳米层片结构的形成。剪切变形产生的位错在原始马氏体板条边界不断塞积[见图10(a)], 位错运动导致平

行于剪切方向的几何必需边界(geometrically necessary boundary, GNB)产生<sup>[25-26]</sup>。高应变增加了GNB中位错的积累, 使平行于剪切方向的板条组织在大变形过程中边界间距减小, 逐渐转变为具有层片结构的拉长组织<sup>[27]</sup>。而且马氏体板条中存在的孪晶界也是位错萌生和富集并形成GNB的有利条件<sup>[28]</sup>。图10(b)所示层片结构就是以GNB为边界形成的。随着应变的增加, 过量的位错被困在GNB内部, 部分位错因交互作用所形成的

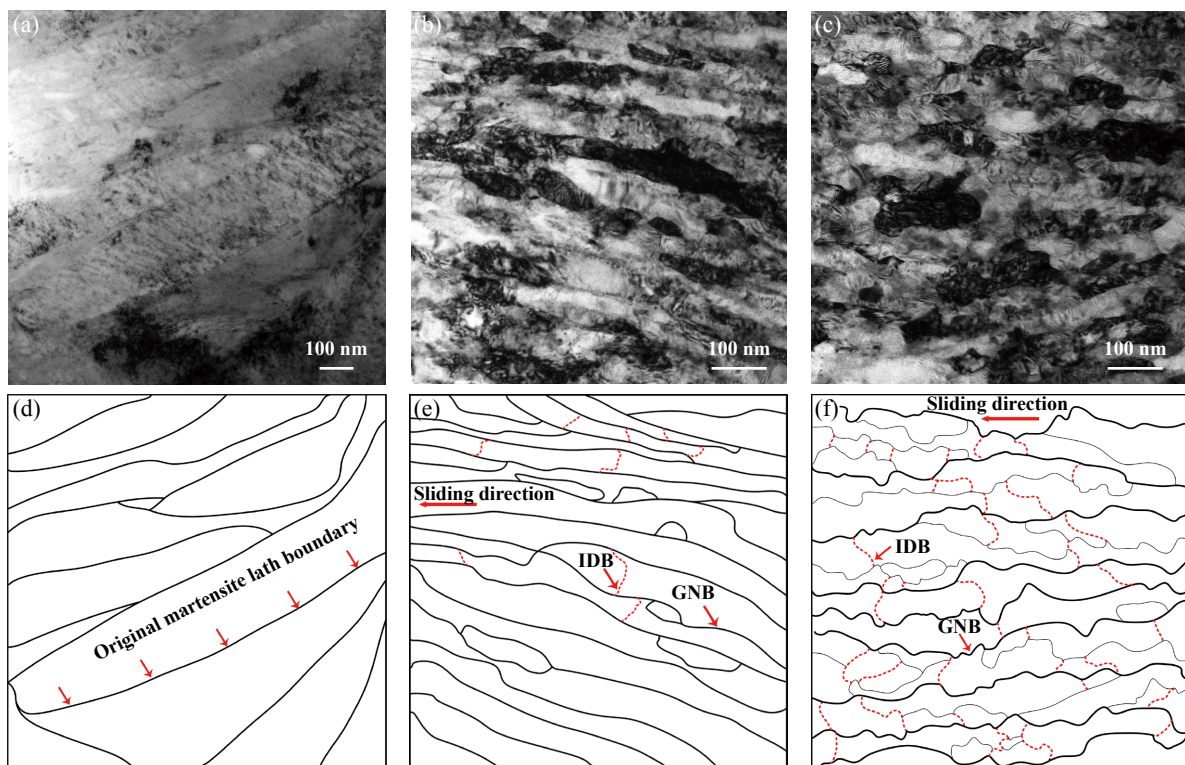


Fig. 10 Schematic diagram of evolution process of martensite structure: (a) original martensite lath; (b) lamellar structure; (c) nano-laminated structure; (e~f) correspond to schematics of (a~c).

图 10 马氏体组织演化过程: (a)原始马氏体板条; (b)层片结构; (c)纳米层片结构; (e~f)对应于(a~c)的示意图

伴生位错边界(incidental dislocation boundary, IDB)<sup>[25-26]</sup>,把拉长组织分隔成更小的晶胞结构,是层片结构演化至纳米级的主要途径,如图10(c)所示。综上所述,存在大的剪切应变有利于纳米结构的形成,是层片纳米结构形成的主要条件,因为GNB和IDB的生成需要足够大的塑性应变来提供大量位错,层片结构通过这两种位错边界将晶粒细化至纳米级。图10(e~f)所示为对应于图10(a~c)的马氏体晶界和GNB及IDB的示意图,表示了纳米层片结构的形成过程。

## 4 结论

a. 干滑动摩擦磨损引起的塑性变形使得磨损亚表面的组织结构发生了变化。150 N载荷下的磨损亚表面形成了梯度结构,而100 N载荷仅存在弯曲的马氏体板条,这是由于不同载荷所引发的磨损机制不同导致。100 N引发的磨粒磨损累积剪应变的能力远低于150 N的黏着磨损。因此150 N载荷下不同深度相差过大的应变梯度导致了变形组织间的巨大差别,形成了梯度结构。

b. 摩擦表面由纳米层片结构组成,该处剪应变最大。高应变意味着组织内部的高位错密度,大量的位错沿滑动方向在马氏体板条边界塞积,从而扩展出新的位错边界,即几何必需边界(GNB),以此为界沿剪切方向形成层片结构。在几何必需边界沿剪切方向扩展的同时,边界中过多的位错因交互作用而形成新的伴生位错边界(IDB)使得晶粒破碎成细晶。而这两种位错边界随着剪应变的增加不断生成,最终将层片结构细化至纳米级。

## 参考文献

- [1] Lu K. Gradient nanostructured materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(1): 1-10 (in Chinese) [卢柯. 梯度纳米结构材料[J]. *金属学报*, 2015, 51(1): 1-10].
- [2] Liu X C, Zhang H W, Lu K. Formation of nano-laminated structure in nickel by means of surface mechanical grinding treatment[J]. *Acta Materialia*, 2015, 96: 24-36. doi: 10.1016/j.actamat.2015.06.014.
- [3] Liu detong. Research on microstructural evolution and thermal stability in ultrafine-grained pure titanium processed by high-pressure torsion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese) [刘德同. 高压扭转处理超细晶纯钛微观组织演变及热稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015].
- [4] Zhan Meiyang, Zhang Weiwen, Zhang Datong. Production of Mg-Al-Zn magnesium alloy sheets with ultrafine-grain microstructure by accumulative roll-bonding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(5): 991-997 (in Chinese) [詹美燕, 张卫
- 文, 张大童. 累积叠轧焊制备超细晶组织Mg-Al-Zn合金薄板(英文)[J]. *中国有色金属学报(英文版)*, 2011, 21(5): 991-997].
- [5] Murayama M, Horita Z, Hono K. Microstructure of two-phase Al-1.7 at% Cu alloy deformed by equal-channel angular pressing[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(1): 21-29. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00308-6.
- [6] Zhao Xiaolian, Hu Zhiliu, Chen Haihong, et al. Research and development prospects of ultrafine-grained materials fabricated by equal channel angular pressing[J]. *Materials Review*, 2008, 22(S3): 2-4 (in Chinese) [赵小莲, 胡治流, 陈海红, 等. 等径角挤压工艺制备超细晶材料的研究与发展[J]. *材料导报*, 2008, 22(S3): 2-4].
- [7] Li Ning, Xia Wei, Zhao Jing, et al. Lubricated fretting wear of gradient ultrafine-grained copper induced by burnishing[J]. *Tribology*, 2014, 34(1): 20-27 (in Chinese) [李宁, 夏伟, 赵婧, 等. 滚压诱导梯度超细晶铜的润滑微动磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2014, 34(1): 20-27]. doi: 10.16078/j.tribology.2014.01.009.
- [8] Sun H Q, Shi Y N, Zhang M X, et al. Plastic strain-induced grain refinement in the nanometer scale in a Mg alloy[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(3): 975-982. doi: 10.1016/j.actamat.2006.09.018.
- [9] Singh J B, Wen J G, Bellon P. Nanoscale characterization of the transfer layer formed during dry sliding of Cu-15 wt. % Ni-8 wt. % Sn bronze alloy[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(13): 3053-3064. doi: 10.1016/j.actamat.2008.02.040.
- [10] Meng-Burany X, Perry T A, Sachdev A K, et al. Subsurface sliding wear damage characterization in Al-Si alloys using focused ion beam and cross-sectional TEM techniques[J]. *Wear*, 2011, 270(3): 152-162.
- [11] Sun H Q, Shi Y N, Zhang M X. Wear behavior of AZ91D magnesium alloy with a nanocrystalline surface layer[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(13): 2859-2864.
- [12] Pan Yongzhi, Ai Xing, Zhao Jun, et al. High-speed friction and wear behavior of ultrafine grain cemented carbide[J]. *Tribology*, 2008, 28(1): 78-82 (in Chinese) [潘永智, 艾兴, 赵军, 等. 超细晶粒硬质合金的高速摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(1): 78-82]. doi: 10.16078/j.tribology.2008.01.013.
- [13] Li Xiaochun, Wei Xicheng, Li Jian. Friction-induced deformation layer of SUS 304 austenitic stainless steel[J]. *Tribology*, 2007, 27(4): 341-345 (in Chinese) [李晓春, 韦习成, 李健. SUS304奥氏体不锈钢的摩擦变形层研究[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(4): 341-345]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2007.04.009.
- [14] Pan R, Ren R, Zhao X, et al. Influence of microstructure evolution during the sliding wear of CL65 steel[J]. *Wear*, 2018, 400-401: 169-176. doi: 10.1016/j.wear.2018.01.005.
- [15] Xin W, Wei X, Hong X, et al. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280(9): 381-387.
- [16] Yin C H, Liang Y L, Jiang Y, et al. Formation of nano-laminated structures in a dry sliding wear-induced layer under different wear



- mechanisms of 20CrNi2Mo steel[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 423: 305–313. doi: [10.1016/j.apsusc.2017.06.187](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.187).
- [17] Kapoor A, Fletcher D I, Franklin F J. The role of wear in enhancing rail life[J]. *Tribology and Interface Engineering Series*, 2003, 41(3): 331–340.
- [18] Liang Yilong, Yi Yanliang, Wang Hang. Collaborative fatigue behavior under wear and fatigue co-loads[J]. *Tribology*, 2015, 35(1): 59–65 (in Chinese) [梁益龙, 易艳良, 汪航. 磨损加疲劳载荷下的协同疲劳行为[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(1): 59–65]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.01.009](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.01.009).
- [19] Alidokht S A, Abdollah-Zadeh A, Assadi H. Effect of applied load on the dry sliding wear behavior and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite[J]. *Wear*, 2013, 305(1-2): 291–298. doi: [10.1016/j.wear.2012.11.043](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.043).
- [20] Ma Hongshuai, Liang Guoxing, Lv Ming, et al. Investigation on friction and wear behavior of AISI4340 steel in dry sliding condition[J]. *Tribology*, 2018, 38(1): 59–66 (in Chinese) [马红帅, 梁国星, 吕明, 等. AISI4340钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(1): 59–66]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.01.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.008).
- [21] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012(in Chinese) [温诗铸, 黄平. *摩擦学原理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012].
- [22] Pyzalla A, Wang L, Wild E, et al. Changes in microstructure, texture and residual stresses on the surface of a rail resulting from friction and wear[J]. *Wear*, 2001, 251(1): 901–907.
- [23] Su Yunshuai, Li Shuxin, Gao Qingyuan, et al. Evolution of nanolaminated structure formed by the thermally-assisted plastic deformation in dry sliding wear[J]. *Tribology International*, 2019, 140. doi: [10.1016/j.triboint.2019.105846](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105846)
- [24] Dautzenberg J H, Zaat J H. Quantitative determination of deformation by sliding wear[J]. *Wear*, 1973, 23(1): 9–19. doi: [10.1016/0043-1648\(73\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90036-7).
- [25] Liu Q, Hansen N. Geometrically necessary boundaries and incidental dislocation boundaries formed during cold deformation[J]. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1995, 32(8): 0–1295.
- [26] Hansen N, Mehl R F, Medalist A. New discoveries in deformed metals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and, Materials Science)*, 2001, 32(12): 2917–2935. doi: [10.1007/s11661-001-0167-x](https://doi.org/10.1007/s11661-001-0167-x).
- [27] Ashby, M. F The deformation of plastically non-homogeneous materials[J]. *Philosophical Magazine*, 1970, 21(170): 399–424. doi: [10.1080/14786437008238426](https://doi.org/10.1080/14786437008238426).
- [28] Zhou Haofei. Progress in mechanical properties, deformation mechanisms and multiscale simulations of gradient nanostructured metals[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(3): 193–212 (in Chinese) [周昊飞. 梯度纳米结构金属力学性能、变形机理和多尺度计算研究进展[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(3): 193–212].

DOI: 10.16078/j.tribology.2019106

# 不同润滑条件下PA66的摩擦学性能研究

李云凯, 王优强\*, 谢奕浓, 龙慎文

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 采用PA66试块和镀镍钢试环, 在MRH-3数显式高速环块磨损试验机上开展控制变量试验, 探究了PA66在干摩擦、湿润滑及不同种类完全水润滑条件下的摩擦学性能, 并结合表面形貌分析其摩擦磨损机理. 结果表明: PA66在线速度0.51 m/s, 载荷1.17 MPa下的摩擦学性能相对良好. 进一步开展正交试验, 得出在线速度1.29 m/s、载荷0.95 MPa的完全水润滑条件下, PA66的摩擦学性能达到最优. 该研究为PA66被用作水润滑轴承或导轨的材料提供了试验依据.

**关键词:** 干摩擦; 水润滑; PA66; 摩擦磨损性能; 正交试验  
**中图分类号:** TH117.1 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2019)06-0706-07

## Tribological Properties of Polyamide 66 in Multiple Lubrication Conditions

LI Yunkai, WANG Youqiang\*, XIE Yinong, LONG Shenwen

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology,  
Shandong Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In this study, controlled variable tests were carried out on the MRH-3 high-speed ring-on-block wear test machine, in order to investigate the tribological properties of polyamide 66 under dry friction, wet friction and various water lubrication conditions. The wear mechanisms were obtained by analyzing topographies of worn surfaces. It is found that polyamide 66 had good tribological properties under the linear velocity of 0.51 m/s and the pressure of 1.17 MPa. Orthogonal tests were further developed and the results showed that the best tribological property was obtained at a linear velocity of 1.29 m/s and the pressure of 0.95 MPa. This study provided the experimental basis to the application of polyamide 66 to the material of water-lubricated bearings and guide rails.

**Key words:** dry friction; water lubrication; polyamide 66; tribological properties; orthogonal test

尼龙(PA)材料的分子具有高结晶性和结构规整性, 故具有良好的自润滑性和耐磨性, 然而PA具有热变形温度低, 干摩擦条件下摩擦系数大、磨损情况严重等缺点, 许多研究便着力于通过对尼龙材料的改性来提高其摩擦学性能. 常用的改性材料有玻璃纤维<sup>[1-3]</sup>、丁腈橡胶<sup>[4]</sup>、固体润滑剂(包括聚四氟乙烯<sup>[5-7]</sup>、石墨<sup>[8]</sup>、纳米二硫化钼<sup>[9]</sup>和碳纳米管<sup>[10]</sup>等)和润滑脂<sup>[11]</sup>等. 转速、载荷、润滑工况以及摩擦副接触面粗糙度等因素

也对尼龙材料摩擦学性能具有影响. Narayana等<sup>[12]</sup>研究表明, 相比滑动距离和速度, 载荷对PA66摩擦磨损性能影响更为显著. 陈平等<sup>[13]</sup>通过正交试验研究得出, 载荷和粗糙度对于干摩擦条件下PA66的摩擦系数与磨损量有显著影响, 而速度的影响相对轻微. 然而, 多数研究集中在尼龙及其改性复合材料在干摩擦条件下的摩擦学性能探究, 对于水润滑条件下的摩擦磨损机理研究甚少.

Received 20 June 2019, revised 20 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: wyq1970301@126.com, Tel: +86-18660279607.

The project was supported by the Natural Science Foundation of China (51575289, 51705270).

国家自然科学基金项目(51575289, 51705270)资助.

目前, PA66被用作润滑轴承的材料有见报道, 还有报道将PA66应用到垃圾车压缩装载机构的导轨处并设计了润滑系统. 但国内外学者们更倾向于研究PA66与其他材料共混或作为改性添加剂时在水润滑条件下的摩擦学性能. Kim等<sup>[2]</sup>研究了潮湿环境下玻纤增强PA66的摩擦学性能, 认为PA66浸水后增加的黏着力提高了其磨损率, 但由于复合材料表面高密度的玻纤接触峰又促使其摩擦学性能的优化. 胡海霞<sup>[14]</sup>的研究表明, SEBS-g-MA橡胶颗粒增强的PA66基复合材料在水润滑条件下具有最低的摩擦系数和最优的耐磨性. 崔旨桃等<sup>[15]</sup>通过在HDPE基体中添加PA66润滑填料, 研究得出PA66的吸水性使共混材料表面形成微凸结构, 提高其摩擦磨损性能. 本文作者系统地探究了不同润滑条件下PA66的摩擦学性能, 通过控制变量试验探究PA66在干摩擦、湿润滑及不同种类完全水润滑条件下的摩擦学性能并分析其摩擦磨损机理, 证明了PA66的应用合理性; 进一步开展正交试验, 得出PA66在不同种类完全水润滑条件下摩擦学性能达到最优的工况, 为PA66应用于水润滑轴承或导轨的材料提供试验依据.

## 1 试验部分

### 1.1 试验设备和参数

采用MRH-3数显式高速环块磨损试验机来测试PA66的摩擦磨损性能. 试验用块状试样为PA66(余姚汉邦塑料科技有限公司, SL-008H GF30 PA66), 几何尺寸为19.05 mm×12.32 mm×12.32 mm, 摩擦副接触面表面粗糙度( $R_a$ )为0.4  $\mu\text{m}$ . 作为对磨副的环状试样使用了镀镍钢, 几何尺寸为 $\phi 49.22$  mm×13.06 mm, 摩擦副接触面表面粗糙度( $R_a$ )为0.8  $\mu\text{m}$ .

### 1.2 试验方法及相关表征

采用控制变量试验和正交试验<sup>[16]</sup>, 在干摩擦、湿润滑和不同种类完全水润滑条件下改变速度和载荷, 进行PA66的摩擦磨损试验研究. 参考实际工况下垃圾车压缩装载机构的滑动速度和导轨处承受的正压力, 以及水润滑轴承一般测试工况, 本次试验中所使用的电机主轴转速分别为50、200、350和500 r/min, 即线速度0.12、0.51、0.90、1.29 m/s; 试验力分别为225、250、275和300 N, 即载荷0.95、1.06、1.17和1.28 MPa. 其中, 湿润滑条件下是将用于润滑的纯净水以每分钟120滴的速率加到摩擦副的接触面上<sup>[17]</sup>. 考虑四种完全水润滑工况, 分别为100%纯净水、98%纯净水+2%NaCl溶液(简称为盐水)、96%纯净水+2%花生油+2%NaCl乳

浊液(简称为汤水)和99.9%盐水+0.1%泥沙悬浊液(简称为杂质水), 用来模拟具有导轨润滑系统的垃圾车压缩装载机构中存在的菜汤倾倒和夹杂颗粒杂质等实际情况, 一定程度上适用于船用水润滑轴承含有泥沙或油泄漏的海水侵蚀时的工作条件. 在水润滑工况下进行试验时, 摩擦副接触面完全浸没在润滑剂中. 每次试验的时间均为40 min, 其中预磨时间20 min, 稳定阶段20 min, 摩擦系数取稳定阶段(试验开始20~40 min)的平均值. 在试验开始前和结束后, 将PA66试块及对磨面均用无水乙醇清洗后烘干, 再使用高精度的电子天平称量试验前后试块的质量变化, 计算得出其磨损质量. 使用扫描电子显微镜对试验后试块的磨损表面形貌进行微观分析.

### 1.3 控制变量试验设计

按照上述试验方法进行3组控制变量试验, 分别为固定线速度为0.51 m/s, 改变载荷分别为0.95、1.06、1.17和1.28 MPa, 以及固定载荷为1.17 MPa, 改变线速度分别为0.12、0.51、0.90和1.29 m/s, 均测试PA66在干摩擦、湿润滑和杂质水润滑条件下的摩擦系数变化趋势; 固定线速度为0.51 m/s、载荷为1.17 MPa, 改变润滑条件分别为干摩擦、湿润滑、纯净水、盐水、汤水和杂质水, 测试不同润滑条件下PA66的摩擦系数和磨损量对比.

### 1.4 正交试验设计

正交试验是考察转速、载荷以及四种完全水润滑工况对于PA66的摩擦系数和磨损量这两个试验指标的影响程度, 要考察的3个因素为润滑条件、转速和载荷, 每个因素均取4个水平. 因此设计三因素四水平的多指标正交试验, 因素水平表如表1所示.

表1 正交试验因素与水平表

Table 1 Orthogonal experimental factors and levels

Level s	Factors		
	A: Lubrication condition	B: Linear velocity/(m/s)	C: Applied load/MPa
1	Purified water	0.12	0.95
2	Brine	0.51	1.06
3	Soup	0.90	1.17
4	Sandy water	1.29	1.28

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦磨损试验分析

如图1所示是固定线速度为0.51 m/s, 不同载荷工况下PA66的摩擦系数变化情况. 可以看出, 摩擦副的

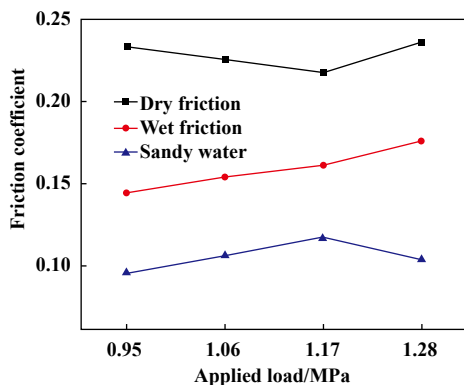


Fig. 1 Frictional traces under different applied loads

图1 不同载荷下PA66的摩擦系数变化情况

直接接触导致干摩擦条件下的摩擦系数较大. 随着载荷的增加, 摩擦系数呈现出先减小后增大的趋势. 在载荷达到1.17 MPa之前, 摩擦系数逐渐减小, 主要是由于载荷的增加使摩擦副的实际接触面积增加, 且干摩擦条件下摩擦副产生的热量堆积使PA66的表面形成了一层熔融膜, 摩擦系数降低; 在1.17 MPa之后, 随着载荷进一步增大, 摩擦副两表面间接触峰点的数量和尺寸均增大, 并存在有大量摩擦热以及剥落的磨屑, 摩擦学性能逐渐恶化.

由于水的润滑作用, 湿润滑条件下的摩擦系数低于干摩擦条件. 但随着载荷的增加, 润滑水膜无法在有限的润滑介质下连续存在, 更无法提供一定的承载力. 金属微粗糙峰与PA66表面直接接触并产生犁沟作用, 摩擦系数也逐渐增加.

杂质水润滑条件下的摩擦系数比湿润滑条件更低, 随着载荷的增加, 摩擦系数呈现出先增大后减小的趋势. 在1.17 MPa之前, 摩擦系数逐渐增大, 这是由于润滑水膜的承载能力不足以支撑载荷的增加, 导致润滑水膜逐渐破裂, 载荷的增加也同时加剧了摩擦副两表面间的接触峰点与杂质颗粒对PA66表面的犁沟作用, 使摩擦系数增加; 在1.17 MPa之后, 摩擦系数有减小的趋势, 这是由于载荷的增大使PA66的弹性变形增大, 逐渐产生弹性流体动力润滑效应, 摩擦副接触面积增大且接触面间获取了更多的润滑介质, 形成连续的润滑水膜并将其隔开.

图2所示为固定载荷1.17 MPa, 不同线速度工况下PA66的摩擦系数变化情况. 由图2可以看出, 干摩擦条件下的摩擦系数较大, 并随着线速度的增大而急剧增加, 这是由于线速度稍大时, 摩擦副接触面间的摩擦热堆积引起温度升高, 而PA66不耐高温, 表面组织受到损伤破坏并产生磨屑, 摩擦系数增加明显. 尤其

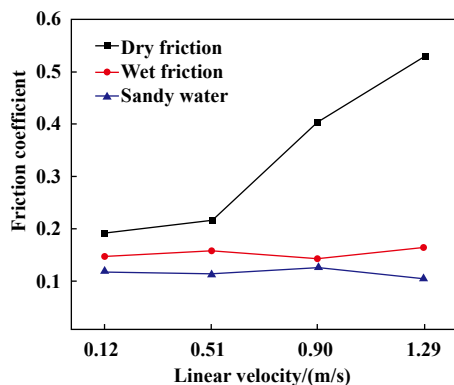


Fig. 2 Frictional traces under different linear velocities

图2 不同线速度下PA66的摩擦系数变化情况

是在线速度到达1.29 m/s时, 大量鳞片状的磨屑剥落, 摩擦副接触面完全失效.

由于水的润滑作用, 湿润滑条件下PA66的摩擦系数明显低于干摩擦条件, 且变化趋势也更加稳定. 随着线速度的增大, 一方面, 润滑水膜拥有更充足的形成条件, 另一方面, 摩擦热的逐渐累积也会使摩擦副接触面间的温度升高, 湿润滑滴加的纯净水快速汽化, 反而不利于润滑, 故摩擦系数的增减存在波动.

由于具有充足的润滑介质, 杂质水润滑条件下PA66的摩擦系数比湿润滑条件更低, 摩擦系数的变化趋势同样比较稳定. 随着线速度的增大, 单位时间内被旋转轴卷吸入摩擦副接触面间的润滑水量越来越多, 满足形成连续的润滑水膜的条件, 流体动压润滑效应增强. 与此同时, 杂质颗粒也会更多地参与到系统的摩擦磨损中. 但随着线速度的继续增大, 水膜压力也不断升高, 摩擦副接触面被连续的水膜完全隔开, 摩擦系数仅取决于润滑水的内部摩擦力. 因此, 摩擦系数经历了先减小后增大而后再减小的过程.

如图3所示是线速度为0.51 m/s、载荷为1.17 MPa时, 不同润滑条件下PA66的摩擦系数和磨损量的对比情况. 可以看出, PA66在不同润滑条件下的摩擦系数和磨损量的大小对比是一致的, 均为纯净水<汤水<盐水<杂质水<湿润滑<干摩擦.

## 2.2 磨损表面形貌分析

为了更好地揭示PA66的摩擦磨损机理, 本文中使用了扫描电子显微镜, 选取线速度为0.51 m/s、载荷为1.17 MPa时, 在干摩擦、湿润滑、纯净水、盐水、汤水和杂质水完全水润滑共六种润滑条件下经过磨损后PA66试块的表面形貌进行了微观分析. 图4所示为不同润滑条件下试样磨损表面形貌的SEM照片.

图4(a)所示是干摩擦条件下PA66磨损后的表面形貌. 可以看出, PA66试块的磨损表面出现了塑性变

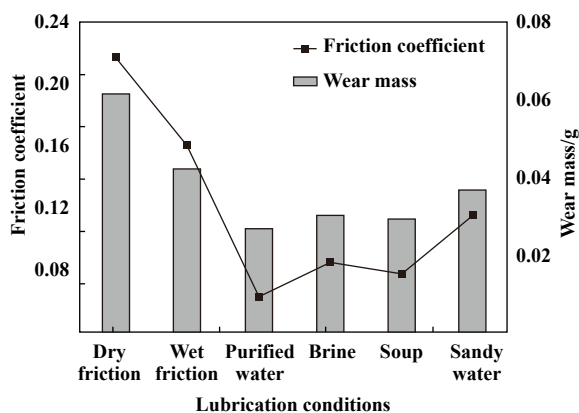


Fig. 3 Comparison of friction coefficient and wear mass under different lubrication conditions

图3 不同润滑条件下PA66的摩擦系数和磨损量对比

形和熔融现象,组织受到损伤破坏并从表面剥落,形成了大量磨屑.还能依稀看出与试环运转方向一致的犁沟,但大多由于组织破坏而不甚明显.这是由于在干摩擦条件下摩擦副直接接触,镀镍钢试环表面的微粗糙峰在法向载荷的作用下嵌入PA66试块表面并挤压,使之产生塑性变形并犁出沟槽,大量鳞片状的磨屑剥落.同时,干摩擦条件使得摩擦副接触面间产生大量摩擦热,形成的磨屑黏附到对偶面并形成了连续的转移膜,这也是干摩擦条件下磨损量较大的原因之一.此时,金属微粗糙峰的犁沟作用减弱.因此,干摩擦条件下PA66的磨损形式主要表现为一般黏着磨损<sup>[18]</sup>,

伴随有挤压剥落的磨粒磨损.

如图4(b)所示是湿润滑条件下PA66磨损后的表面形貌.可以看出,PA66试块的磨损表面清晰可见有与试环运转方向一致的犁沟,并存在少量剥落的磨屑.这是由于在湿润滑条件下,水的边界润滑作用使得黏着结点的强度低于两摩擦副材料的强度,仅发生轻微黏着磨损.但是,湿润滑提供的润滑介质有限,无法完全带走摩擦热,且很难形成连续的润滑水膜,所以金属表面微粗糙峰仍然会与PA66试块表面直接接触,产生犁沟作用.因此,湿润滑条件下PA66的磨损形式主要表现为金属微粗糙峰造成的磨粒磨损,伴随有少量黏着磨损.

如图4(c)所示是纯净水完全润滑条件下PA66磨损后的表面形貌.可以看出,PA66试块的磨损表面仅有少量犁沟,组织剥落情况也比较轻微.这是由于在纯净水完全润滑条件下能够形成连续的润滑水膜,很大程度上抑制了摩擦副接触面间的黏着作用和摩擦副直接接触造成的材料挤压剥落,仅有滑动时的摩擦力会使金属微粗糙峰切削PA66试块表面.因此,纯净水完全润滑条件下PA66的磨损形式主要表现为金属微粗糙峰造成的微观切削<sup>[18]</sup>.

如图4(d)所示是盐水完全润滑条件下PA66磨损表面形貌的SEM照片.可以看出,PA66试块的磨损表面存在不少与试环运转方向一致的犁沟,但组织剥落

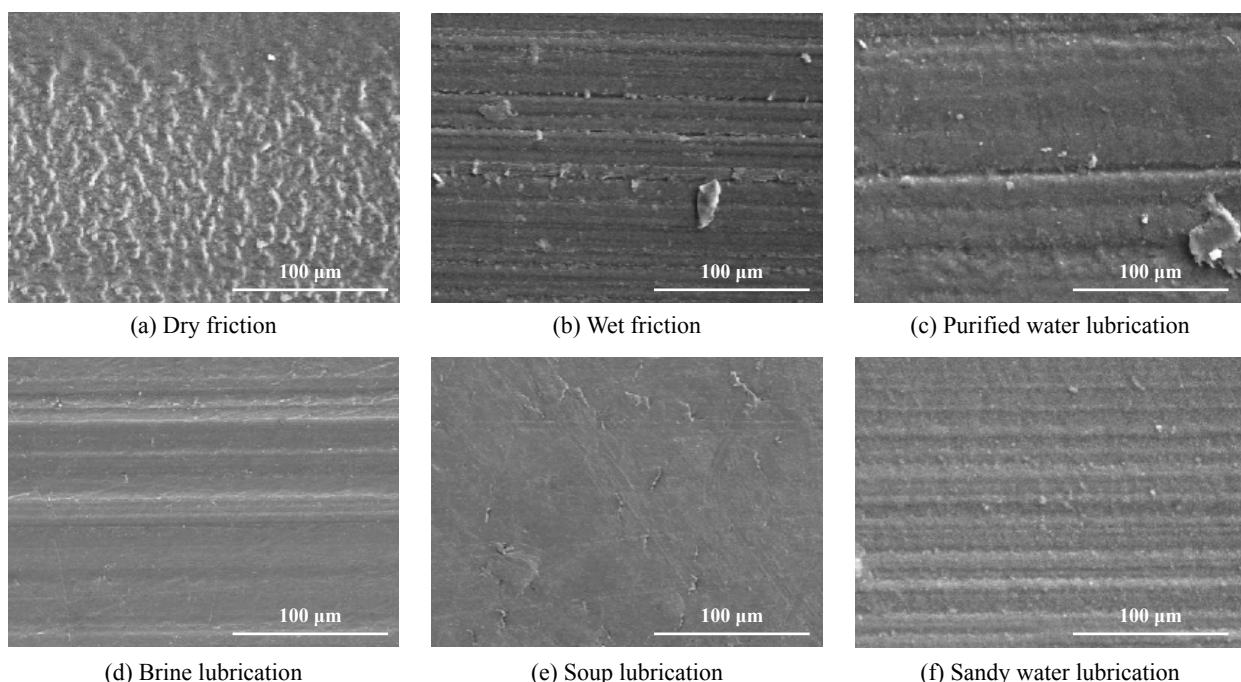


Fig. 4 Topographies of worn surfaces of PA66 sample under different lubrication conditions

图4 不同润滑条件下PA66试块的磨损表面形貌的SEM照片

情况比较轻微.这是由于在盐水完全润滑条件下同样能够形成润滑水膜,但盐分的存在会降低水的黏度,并腐蚀摩擦副接触面,从而阻碍润滑水膜的连续存在,使得摩擦副直接接触并造成磨粒磨损.因此,盐水完全润滑条件下PA66的磨损形式主要表现为磨粒磨损,伴随有轻微的腐蚀剥落.

图4(e)所示为汤水完全润滑条件下PA66磨损表面形貌的SEM照片.可以看出,PA66试块的磨损表面几乎不存在磨粒磨损所产生的犁沟,仅存在不甚严重的黏着磨损造成的组织翘曲和剥落.这是由于在汤水完全润滑条件下,油、水同时进入到摩擦副接触面间形成润滑膜,且相比于水,油的密度更小,黏度更低,润滑效果更佳,并且油、水的润滑作用使得黏着结点的强度低于两摩擦副材料的强度,仅发生轻微黏着磨损.

图4(f)所示为杂质水完全润滑条件下PA66磨损表

面形貌的SEM照片.可以看出,PA66试块的磨损表面清晰可见有大量与试环运转方向一致的犁沟,并存在少量剥落的磨屑.这是由于杂质水中含有盐分和泥沙,泥沙参与了系统的摩擦磨损中并造成了严重的磨粒磨损,而盐分的存在会一定程度上腐蚀摩擦副接触面,使其变得粗糙,同时降低了水的黏度,这均不利于润滑水膜的形成和连续存在,使得摩擦副直接接触,加剧了磨粒磨损的同时产生了一定的黏着磨损.因此,杂质水完全润滑条件下PA66的磨损形式主要表现为杂质颗粒造成的磨粒磨损,伴随有少量黏着磨损.

### 2.3 正交试验分析

表2所示为正交试验的方案和结果.根据试验结果计算极差 $R$ 后得到表3中所列出的PA66的摩擦系数和磨损量的极差分析.

表3中, $K_i(i=1,2,3,4)$ 为其所在列因素取水平为 $i$ 时的所有试验结果之和. $k_i$ 为其所在列因素取水平为 $i$ 时

表2 正交试验方案及结果

Table 2 Orthogonal experimental scheme and results

No	Lubrication condition	Linear velocity/(m/s)	Applied load/MPa	Friction coefficient, $\mu$	Wear mass/g
01	Purified water	0.12	0.95	0.083	0.029 0
02	Purified water	0.51	1.06	0.089	0.029 3
03	Purified water	0.90	1.17	0.069	0.027 2
04	Purified water	1.29	1.28	0.063	0.026 6
05	Brine	0.12	1.06	0.106	0.031 6
06	Brine	0.51	0.95	0.082	0.030 7
07	Brine	0.90	1.28	0.099	0.029 4
08	Brine	1.29	1.17	0.107	0.028 8
09	Soup	0.12	1.17	0.109	0.028 9
10	Soup	0.51	1.28	0.093	0.029 1
11	Soup	0.90	0.95	0.084	0.027 9
12	Soup	1.29	1.06	0.079	0.027 9
13	Sandy water	0.12	1.28	0.121	0.039 5
14	Sandy water	0.51	1.17	0.116	0.036 9
15	Sandy water	0.90	1.06	0.107	0.037 8
16	Sandy water	1.29	0.95	0.116	0.035 7

表3 摩擦系数和磨损量的极差分析

Table 3 Range analysis of friction coefficient and wear mass

Factors	Lubrication condition		Linear velocity		Applied load	
	$\mu$	Wear mass/g	$\mu$	Wear mass/g	$\mu$	Wear mass/g
$K_1$	0.304	0.112 1	0.419	0.129 0	0.365	0.123 3
$K_2$	0.394	0.120 5	0.380	0.126 0	0.381	0.126 6
$K_3$	0.365	0.113 8	0.359	0.122 3	0.401	0.121 8
$K_4$	0.460	0.149 9	0.365	0.119 0	0.376	0.124 6
$k_1$	0.076	0.028 0	0.105	0.032 3	0.091	0.030 8
$k_2$	0.099	0.030 1	0.095	0.031 5	0.095	0.031 7
$k_3$	0.091	0.028 4	0.090	0.030 6	0.100	0.030 5
$k_4$	0.115	0.037 5	0.091	0.029 8	0.094	0.031 2
Range	0.039	0.009 5	0.015	0.002 5	0.009	0.001 2

所有试验结果的算术平均值, 故 $k_i=K_i/s$ . 其中,  $s$ 为因素的水平数量, 本试验中每个因素均取4个水平, 即 $s=4$ .

极差 $R$ 是每一列上最大与最小 $k_i$ 值之差, 即 $R=\max\{k_i(i=1,2,3,4)\}-\min\{k_i(i=1,2,3,4)\}$ , 其大小反映了试验中各因素对于试验指标影响程度的重要性. 所以由表3中计算出的极差 $R$ 可知, 正交试验极差分析的结果显示润滑条件对摩擦系数和磨损量的影响均最大, 线速

度次之, 载荷最小.

为得出试验因素的最优水平组合, 基于表3中的极差分析数据 $k_i(i=1,2,3,4)$ 绘制出各因素下不同水平对于摩擦系数和磨损量影响的变化趋势图, 如图5和图6所示. 综合考察所得结果, 在线速度1.29 m/s、载荷0.95 MPa的完全水润滑条件下, PA66的摩擦磨损性能达到最优.

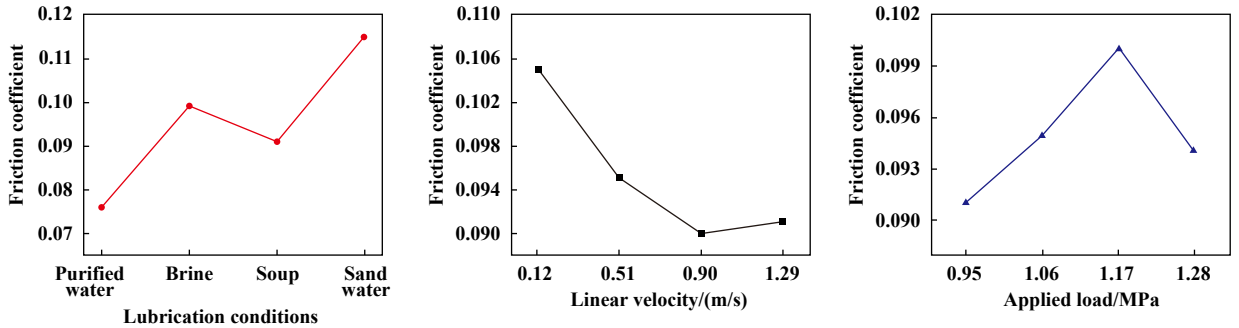


Fig. 5 Trend of friction coefficient with factor level

图 5 摩擦系数随因素水平变化趋势图

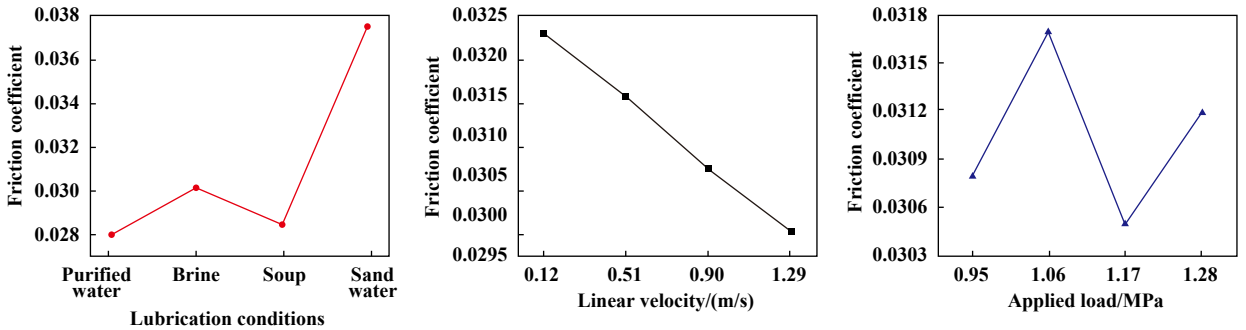


Fig. 6 Trend of wear mass with factor level

图 6 磨损量随因素水平变化趋势图

采用SPSS软件对表2中的试验结果进行单因素方差分析, 分析结果列于表4中. 正交试验的显著性水平 $\alpha=0.05$ , 根据 $F$ 的大小判断各因素对摩擦系数和磨损量影响的显著性. 结果表明, 润滑条件对PA66摩擦系数和磨损量的影响显著, 线速度和载荷影响相对不显著, 与极差分析一致.

表 4 摩擦系数和磨损量的方差分析

Table 4 Variance analysis of friction coefficient and wear mass

Factors	df	F	
		$\mu$	Wear mass/g
Lubrication condition	3	8.628	48.898
Linear velocity	3	0.538	0.240
Applied load	3	0.153	0.050

### 3 结论

a. 通过摩擦磨损试验分析可知: 当线速度0.51 m/s、载荷1.17 MPa时, PA66的摩擦磨损性能较为良好, 这符合一般润滑轴承和垃圾车压缩装载机构的工作条件; 其在四种完全水润滑条件下的摩擦系数和磨损量较低, 说明PA66作为水润滑轴承轴瓦和具有润滑系统的导轨材料的应用合理.

b. 通过磨损表面形貌分析可知: PA66的磨损形式在干摩擦条件下主要表现为黏着磨损, 湿润滑条件下主要表现为金属微粗糙峰造成的磨粒磨损, 纯净水完全润滑条件下主要表现为金属微粗糙峰造成的微观切削, 盐水完全润滑条件下主要表现为磨粒磨损和轻微的腐蚀磨损, 汤水完全润滑条件下主要表现为轻微

的黏着磨损,杂质水完全润滑条件下主要表现为杂质颗粒造成的磨粒磨损。

c. 通过正交试验分析可知: 润滑条件对PA66的摩擦系数和磨损量的影响较大, 转速次之, 载荷最小。在线速度1.29 m/s、载荷0.95 MPa的完全水润滑条件下, PA66的摩擦磨损性能达到最优。

因此, PA66更适用于高速轻载工况下的水润滑轴承瓦材料; 当应用于垃圾车导轨时, 可以改进车厢结构来减小导轨承重, 达到最优的摩擦磨损性能。并且, 与橡胶<sup>[17, 19]</sup>等被广泛应用的水润滑轴承瓦材料相比, PA66具有更优异的摩擦磨损性能和综合力学性能, 尤其表现在耐磨性和硬度、屈服强度等方面, 适合成为水润滑轴承或导轨的材料。

## 参考文献

- [1] Kumar S, Panneerselvam K. Two-body abrasive wear behavior of nylon 6 and glass fiber reinforced (GFR) nylon 6 composite[J]. *Procedia Technology*, 2016, 25: 1129–1136. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.228.
- [2] Kim J W, Jang H, Jin W K. Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions[J]. *Wear*, 2014, 309(1-2): 82–88. doi: 10.1016/j.wear.2013.11.007.
- [3] Wei Xucheng, Su Zhenguo, Xu Baiming, et al. Friction and wear behaviours between GF/PA66 composite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(5): 47–52 (in Chinese) [魏绪成, 苏振国, 徐佰明, 等. 玻璃纤维增强PA66复合材料与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷的摩擦磨损行为[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(5): 47–52].
- [4] Rosa A G D A, Moreto J A, Manfrinato M D, et al. Study on friction and wear behavior of SAE 1045 steel, reinforced nylon 6.6 and NBR rubber used in clutch disks[J]. *Materials Research*, 2014, 17(6): 1397–1403. doi: 10.1590/1516-1439.282714.
- [5] Hunke H, Soin N, Gebhard A, et al. Plasma modified polytetrafluoroethylene (PTFE) lubrication of  $\alpha$ -olefin-copolymer impact-modified polyamide 66[J]. *Wear*, 2015, 338-339: 122–132. doi: 10.1016/j.wear.2015.06.003.
- [6] Rudresh B M, Ravi Kumar B N. Influence of experimental parameters on friction and wear mechanisms of PA66/PTFE blend reinforced with glass fiber[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, 71(2): 339–349. doi: 10.1007/s12666-017-1164-0.
- [7] Demirci M T, Düzçükoğlu H. Wear behaviors of polytetrafluoroethylene and glass fiber reinforced polyamide 66 journal bearings[J]. *Materials & Design*, 2014, 57: 560–567.
- [8] Shi Yu, Wang Donghong. Study on the wear resistance of the PA66/graphite composite[J]. *New Chemical Materials*, 2007, 35(6): 49–50 (in Chinese) [石玉, 王东红. 石墨改性尼龙66复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. *化工新型材料*, 2007, 35(6): 49–50]. doi: 10.3969/j.issn.1006-3536.2007.06.018.
- [9] Yang Haiyang, Lu Feng, Wang Quanbing, et al. Friction and wear properties of PA66 composites filled with different solid lubricants[J]. *China Plastics Industry*, 2016, 44(10): 100–103 (in Chinese) [杨海洋, 陆逢, 王全兵, 等. 固体润滑剂对玻纤PA66复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *塑料工业*, 2016, 44(10): 100–103]. doi: 10.3969/j.issn.1005-5770.2016.10.026.
- [10] Lee S M, Shin M W, Jang H. Effect of carbon-nanotube length on friction and wear of polyamide 6, 6 nanocomposites[J]. *Wear*, 2014, 320: 103–110. doi: 10.1016/j.wear.2014.08.011.
- [11] Zhang Qiong, Wen Jun, Li Yi, et al. The properties of MC nylon materials filled with different kinds of lubricant[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(5): 126–129 (in Chinese) [张琼, 文军, 李毅, 等. 不同种类润滑剂改性MC尼龙复合材料的性能[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(5): 126–129]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2018.05.022.
- [12] Narayana K S, Suman K N S, Vikram K A. Investigation on dry sliding wear behavior of nylon66/GnP nano-composite[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2016, 98(1): 71–78.
- [13] Chen Ping, Wang Pengfei, Qiao Xiaoxi. Friction and wear behavior of 45 steel/PA66 pairs under dry sliding condition[J]. *Tribology*, 2019, 39(1): 26–34 (in Chinese) [陈平, 王鹏飞, 乔小溪. 45钢/PA66配副干滑动摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(1): 26–34]. doi: 10.16078/j.tribology.2018138.
- [14] Hu Haixia. Tribological behaviors of epoxy resin and polyamide 66 matrix composites[D]. Jilin: Jilin University, 2008(in Chinese) [胡海霞. 环氧树脂及尼龙66复合材料的摩擦磨损性能[D]. 吉林: 吉林大学, 2008].
- [15] Cui Zhitao, Guozhi Wei, Xie Xin, et al. The synergistic effect mechanism of PA66 self-lubrication property and surface texture on tribological performance of HDPE water-lubricated bearing[J]. *Tribology*, 2019, 39(4): 407–417 (in Chinese) [崔旨桃, 郭智威, 谢心, 等. 尼龙自润滑性与表面织构协同作用对HDPE基水润滑轴承摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(4): 407–417]. doi: 10.16078/j.tribology.2018171.
- [16] Yuan Zhifa, Yun Haiyan. Experimental design and analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007(in Chinese) [袁志发, 俞海燕. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007].
- [17] Wang Youqiang, Lin Xiujuan. Water lubrication mechanism of the rubber/nickel coating pair[J]. *Lubrication Engineering*, 2006, 31(1): 54–56 (in Chinese) [王优强, 林秀娟. 橡胶滑块与镀镍钢环的水润滑机理分析[J]. *润滑与密封*, 2006, 31(1): 54–56]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2006.01.017.
- [18] Wen Shizhu, Huang Ping, Tian Yu, et al. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018(in Chinese) [温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018].
- [19] Wang Youqiang, Wang Long, Huang Bingxi, et al. Experimental study on friction and wear mechanism between rubber/nickel coating on steel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2006, 37(2): 136–140 (in Chinese) [王优强, 王龙, 黄丙习, 等. 水润滑橡胶轴承摩擦试验研究[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2): 136–140]. doi: 10.3969/j.issn.1000-1298.2006.02.036.



DOI: 10.16078/j.tribology.2019114

# 水轮发电机碳刷/集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究

秦红玲<sup>1,3</sup>, 付阳<sup>1</sup>, 喻叶<sup>2</sup>, 刘云帆<sup>1</sup>, 杨昌<sup>1</sup>, 赵新泽<sup>1</sup>, 张小龙<sup>1\*</sup>

(1. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002;

2. 中国长江电力股份有限公司葛洲坝电厂, 湖北宜昌 443000;

3. 国家水运安全工程技术研究中心福建分中心, 福建福州 350108)

**摘要:** 针对水轮发电机碳刷/集电环摩擦副磨损严重、打火和励磁电流不稳等现象. 在对常用碳刷(D172、E468e)磨损原因及影响因素分析的基础上, 采用碳刷/GCr15钢球配副在Anton Paar Tribometer多功能摩擦磨损试验机上, 研究干滑动条件下载荷、速度及电流密度对碳刷/GCr15钢球配副摩擦学性能的影响. 结果表明: 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大. 无载流时, D172和E468e两碳刷的磨损率均随载荷的增大呈现先减小后增大的趋势, 在达到最小值时出现大转折, 两碳刷磨损率变化趋势呈“U”字型. 无载流时D172碳刷磨损率远低于E468e, 载流时则情况相反. D172碳刷无载流时磨损机理以磨粒磨损为主并伴有轻微黏着磨损, 载流时碳刷除发生磨粒磨损、黏着磨损外还伴有氧化磨损. E468e碳刷在载流前后均为磨粒磨损. D172碳刷摩擦系数整体呈增大趋势, 而E468e碳刷摩擦系数先缓慢增大随后逐渐减小, 电流对D172碳刷摩擦系数的影响比E468e碳刷更明显.

**关键词:** 碳刷/集电环; 载流摩擦; 磨损率; 电流密度; 水轮发电机

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0713-10

## Tribological Performance of Carbon Brush/Collector Ring for Hydroelectric Generator under Dry Sliding Condition with Current-Carrying and without Current-Carrying

QIN Hongling<sup>1,3</sup>, FU Yang<sup>1</sup>, YU Ye<sup>2</sup>, LIU Yunfan<sup>1</sup>, YANG Chang<sup>1</sup>, ZHAO Xinze<sup>1</sup>, ZHANG Xiaolong<sup>1\*</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China

2. Gezhouba Hydropower Plant, China Yangtze Power Co, Ltd, Hubei Yichang 443000, China

3. Fujian sub-center of National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Fujian Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to reveal the cause of the severe wear, sparking and unstable excitation current of the carbon brush/collector ring on hydroelectric generator, the carbon brush/GCr15 ball pair was used to simulate its contact and friction condition on the Anton Paar Tribometer multi-functional friction and wear tester. Then the effects of load, speed and current density on the tribological properties of the carbon brushes (D172, E468e) under the dry sliding condition with current-carrying and without current-carrying were analyzed. The results show that the tribological performance of the carbon brushes with current-carrying was quite different from that without current-carrying. Without current-carrying, the wear rates of D172 and E468e carbon brushes decreased first and then increased with the increase of load.

Received 26 June 2019, revised 13 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: xlzhang12@sina.com, Tel: +86-18371798561.

The project was supported by the Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTKF19B09).

清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目(SKLTKF19B09)资助.

When the minimum value was reached, a large turning point occurred, so that the change trend of the wear rate of the two carbon brushes was “U” shape. Without current-carrying, the wear rate of the D172 carbon brush was much lower than that of the E468e, while opposite result was obtained for current-carrying condition. Without current-carrying, the wear mechanism of D172 carbon brush was mainly abrasive wear accompanied by mild adhesive wear. With current-carrying, in addition to abrasive wear and adhesive wear, the carbon brush was accompanied by oxidative wear. The wear mechanism of E468e carbon brushes was abrasive wear with and without current-carrying. The friction coefficient of D172 carbon brush increased, while the friction coefficient of E468e carbon brush increased slowly and then gradually decreased. The effect of current on the friction coefficient was obvious for D172 carbon brush but not obvious for E468e carbon brush.

**Key words:** carbon brush/collector ring; current-carrying friction; wear rate; current density; hydroelectric generator

水电作为环保、经济的可再生清洁能源,在我国现有能源中占有重要地位<sup>[1]</sup>。水力发电的核心设备是水轮发电机,水轮发电机中碳刷/集电环装置是将励磁电流引入励磁绕组的重要部件,其通过碳刷与集电环滑动接触来实现水轮发电机励磁电流的输送<sup>[2]</sup>。碳刷与集电环的滑动接触属于电接触学和摩擦学构成的具有强烈性能耦合和损伤耦合的载流摩擦系统<sup>[3]</sup>。据统计,在水轮发电机常见事故中励磁系统故障约占发电机故障的1/3,而碳刷/集电环打火烧损等事故约占励磁系统故障的26%。碳刷/集电环摩擦副的过度磨损<sup>[4]</sup>以及接触不匀所造成的碳刷过热、跳火和环火问题是所有大小型水轮发电站目前所面临的急需解决的问题之一,也一直是工程界和学术界所关注的焦点。

碳刷/集电环是各种电机和发电机用于高导电率和导热率的主要电接触摩擦副,碳被广泛应用于电流收集系统(例如用于水轮发电机励磁系统的碳刷/集电环摩擦副)。在这些系统中碳与集电环的载流摩擦和磨损行为对于电流稳定传输具有相当重要的实用意义。Vera Deeva等<sup>[5]</sup>研究表明电流增加摩擦接触界面氧分子的压力使氧化层生成速率加快导致摩擦系数减小。在高速电接触滑动下,实际接触面积仅为名义接触面积的百分之几<sup>[6]</sup>,所以电流在碳刷/集电环间传输是在局部接触峰点传导且在热堆积部位承载,由于强烈的电阻热和摩擦热的联合作用会导致电接触界面附近出现高温区域,这可能会降低材料的性能并导致严重磨损<sup>[7-9]</sup>。Mitjan Kalin等<sup>[10]</sup>指出,聚合物粘结的石墨/Cu形成光滑的摩擦薄膜降低了局部接触压力和温度,并且较大表面覆盖率降低了磨损和接触电阻,从而降低了接触不稳定性和摩擦。Kong等<sup>[11]</sup>指出氧化层可以起到保护界面作用也可以被电弧和磨料磨损所破坏。林修洲等<sup>[12-14]</sup>发现碳刷的磨损机制受电弧的影响,低载荷下主要磨损机制为黏着磨损和材料转移,高载荷下主要磨损机制是机械磨损。这些文献显示载流滑动接

触材料在不同条件下存在不同的磨损机理。

基于此,本文作者采用多功能摩擦磨损试验机通过控制变量法研究载荷、速度和电流密度等因素对碳刷/集电环摩擦磨损性能的影响,通过对试验后摩擦系数、磨损率及磨损表面形貌、微观结构特征的分析,研究接触界面损伤演变行为及关键影响因素,揭示碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时性能差异及磨损机理,为长寿命、高可靠度的水轮发电机励磁系统设计提供理论依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验设备和材料参数

基于等效原理在Anton Paar Tribometer多功能摩擦磨损试验机上采用球-盘接触方式进行碳刷/集电环往复滑动摩擦试验,接触方式如图1所示。

试验用球为 $\Phi 10$  mm的GCr15钢球(Mo质量分数不大于1%),硬度为HRC59~61。盘试样选用摩根新材料(上海)有限公司生产的摩根D172型号碳刷和德国产E468e型号碳刷,两者尺寸分别为32 mm $\times$ 25 mm $\times$ 8 mm、38 mm $\times$ 34 mm $\times$ 8 mm。用切割机将碳刷切割成厚度为9 mm的长方块,截面尺寸与原碳刷保持一致,然后依次用100<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、2 000<sup>#</sup>金刚石砂纸研磨至厚度为

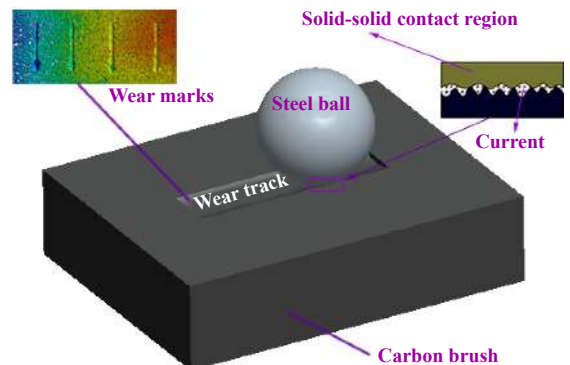


Fig. 1 Carbon brush-steel ball contact

图1 碳刷-钢球磨损接触示意图

8 mm, 表面粗糙度达 $R_a 0.8 \mu\text{m}$ 的试样. 试验条件为室温, 工况为干摩擦. 载流试验中电流大小通过改变电源电压来控制, 电源采用 KEITHLEY 公司的 2635A SYSTEM Source Meter. 考虑到目前在役水电站碳刷电流密度额定值范围为 $5\sim 11 \text{ A/cm}^2$ . 基于相似性原理, 本文中主要研究名义电流密度 $\alpha$ 分别为 $5、7、9$ 和 $11 \text{ A/cm}^2$ 时对两碳刷摩擦学性能的影响. 由电流密度公式 $\alpha = \frac{I}{A}$ , 可得到电流计算式 $I = \alpha A$  (其中 $A$ 为接触面积,  $\text{mm}^2$ ). 使用万用表测得 D172、E468e 两碳刷试样接触电阻平均值分别为 $1.22$ 和 $0.88 \Omega$  (当然此接触电阻包括碳刷与 GCr15 钢球的体电阻), 由此可根据欧姆定律算出两种碳刷名义电流密度分别为 $5、7、9$ 和 $11 \text{ A/cm}^2$ 时的名义等效电压. 两碳刷物理性能列于表 1 中.

表 1 碳刷物理性能

Table 1 Physical properties of carbon brush

Sample	Hardness (HV)	Current density/ ( $\text{A/cm}^2$ )	Unit pressure/ ( $\text{N/cm}^2$ )
D172	5.73	12	14.7~19.6
E468e	5.04	10	-

### 1.2 试样形貌表征

基于 NANOVER 三维表面形貌测试仪观察碳刷磨损后表面形貌, 结合碳刷磨痕深度和宽度计算出各种试验条件下的磨损率, 比较不同工况下的磨损状况. 磨损率通过 $W = V / (SF)$ 计算, 其中 $W$ 为磨损率, 单位 $\text{m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ ;  $V$ 为磨损体积, 单位 $\text{m}^3$ ;  $S$ 为滑动总行程, 单位 $\text{m}$ ;  $F$ 为试验载荷大小, 单位 $\text{N}$ , 为了减小误差, 所得结果为 3 次试验的平均值. 利用计算机软件实时采集摩擦系数, 分析摩擦系数随载荷、速度和电流密度的变化趋势. 采用扫描电镜 (SEM) 观察碳刷表面微观结构特征, 分析其磨损机理及其关键影响因素, 使用 EDS 能谱仪观察磨损前后碳刷表面元素分布.

### 1.3 试验设计

实际工况中影响碳刷/集电环摩擦磨损主要因素有法向载荷、相对线速度和励磁电流大小, 因此本文中采用控制变量法, 在载流与无载流工况下基于单因素试验研究碳刷磨损机理, 选取两种碳刷的试验因素和水平列于表 2 中, 试验过程如下: ① 无载流、线速度为 $10 \text{ mm/s}$ 时, 分别在载荷 $0.2、0.4、0.5$ 和 $0.6 \text{ N}$  (最大赫兹接触应力为 $0.5\sim 4.87 \text{ MPa}$ ), 直线往复摩擦 $900$ 次, 单次行程 $10 \text{ mm}$ ; ② 无载流、载荷为 $0.4 \text{ N}$ 时, 分别在速度 $5、10、15$ 和 $20 \text{ mm/s}$ 下, 直线往复摩擦 $900$ 次, 单次行程 $10 \text{ mm}$ ; ③ 保持载荷 $0.4 \text{ N}$ 与速度 $10 \text{ mm/s}$ 不变进行载流试验, 分别在名义电流密度为 $5、7、9$ 和 $11 \text{ A/cm}^2$ , 直线往复摩擦 $900$ 次, 单次行程 $10 \text{ mm}$ .

表 2 试验因素与水平表

Table 2 Test factors and level

Sample	Factor	Level			
		5	10	15	20
D172/ E468e	Velocity/( $\text{mm/s}$ )	5	10	15	20
	Load/ $\text{N}$	0.2	0.4	0.5	0.6
	Current density/( $\text{A/cm}^2$ )	5	7	9	11

## 2 结果与讨论

### 2.1 载荷对碳刷干摩擦磨损性能的影响

速度 $10 \text{ mm/s}$ 、无载流和干摩擦条件下, 研究载荷 ( $0.2、0.4、0.5$ 和 $0.6 \text{ N}$ ) 对碳刷/GCr15 钢副摩擦磨损性能的影响规律及机理. 图 2(a-b) 为摩擦系数随循环次数的变化曲线图. 由图可知, D172 碳刷摩擦系数的中值随载荷增加先减小后增大, 载荷为 $0.4 \text{ N}$ 时摩擦系数中值出现最小值 (约为 $0.29$ ); E468e 碳刷摩擦系数的中值随载荷增加先增大后减小, 其载荷在 $0.6 \text{ N}$ 时波动程度最小, 载荷在 $0.4 \text{ N}$ 时 E468e 碳刷摩擦系数最大 (中值 $\mu$ 约为 $0.34$ ).

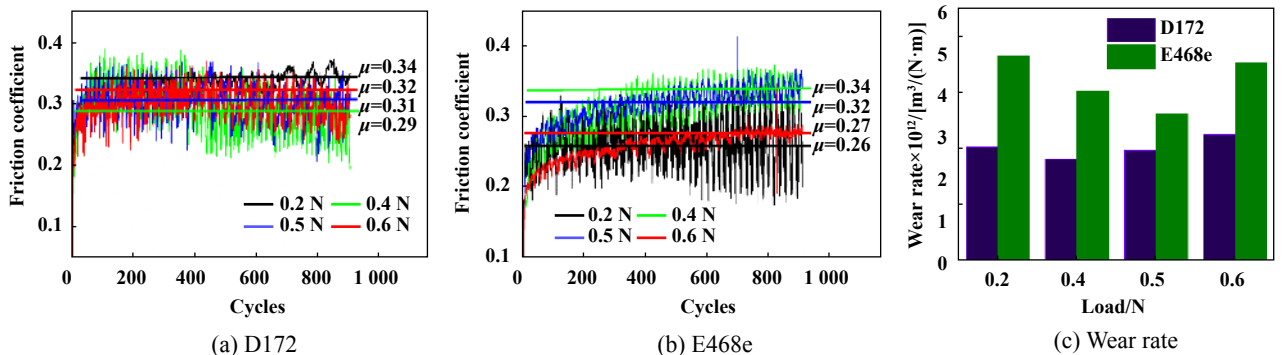


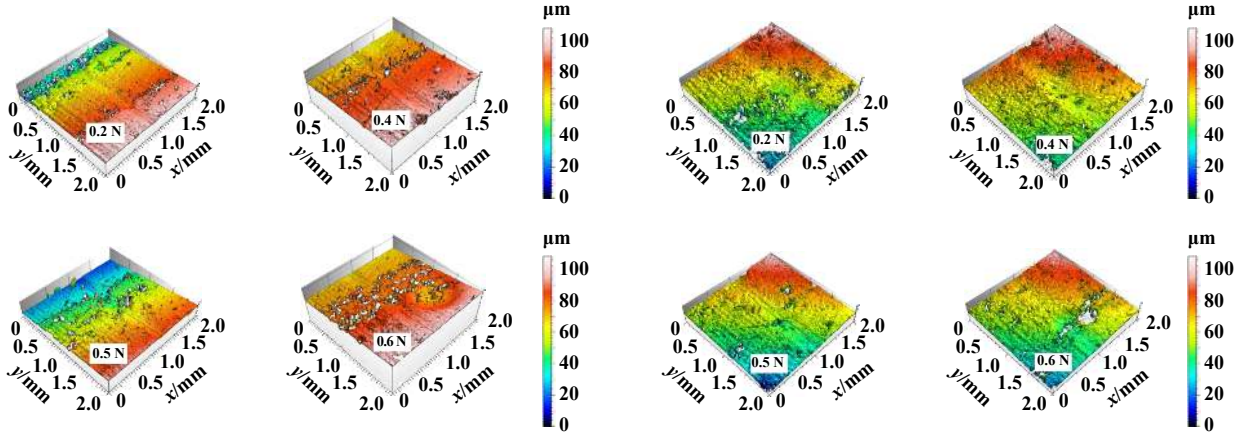
Fig. 2 Friction and wear rate under different loads

图 2 摩擦系数与磨损率随载荷变化趋势图

图2(c)为两碳刷磨损率随载荷的变化直方图. 由图可知, 在每一对应载荷下D172碳刷磨损率约为E468e磨损率的1/4~1/2. D172碳刷磨损率在载荷0.4 N时达到最小, 在载荷0.6 N时达到最大, 增幅达87%. E468e碳刷磨损率在载荷0.5 N达到最小, 在载荷0.2 N时达到最大, 增幅达39%. 两类碳刷的磨损率总体上随着载荷的增大先减小后增大, 在达到最小值时出现转折, 两种碳刷磨损率出现最小值的载荷在0.4~0.5 N

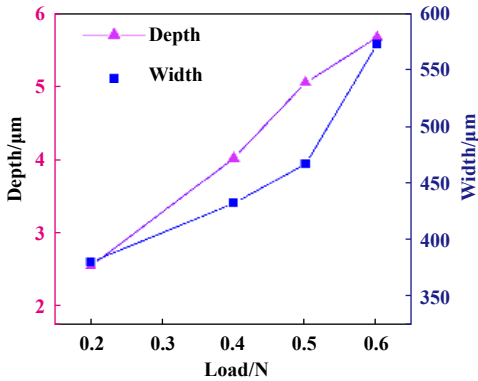
之间. 这将意味着它们均对碳刷/集电环系统在服役过程中的振动和主轴摆动所引起的载荷变化非常敏感.

为了解释磨损机理, 对两碳刷磨损表面进行三维形貌扫描以及扫描电镜检测(见图3). 选取在相同条件下效果最明显、载荷最大的0.6 N试样形貌的SEM照片[见图3(e)、(f)]作为D172碳刷与E468e碳刷磨粒磨损的图证. 由于石墨在摩擦磨损过程中会从碳刷表面剥离, 进而填入碳刷与集电环摩擦界面的微凹坑, 而不

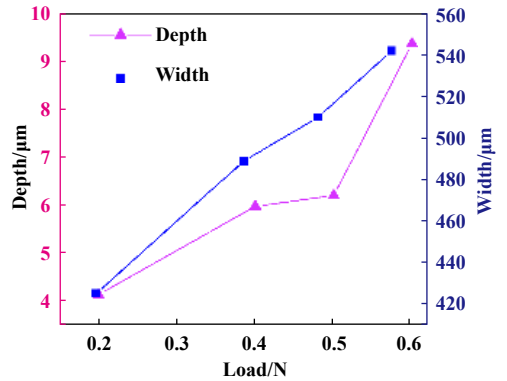


(a) 3D topography for D172

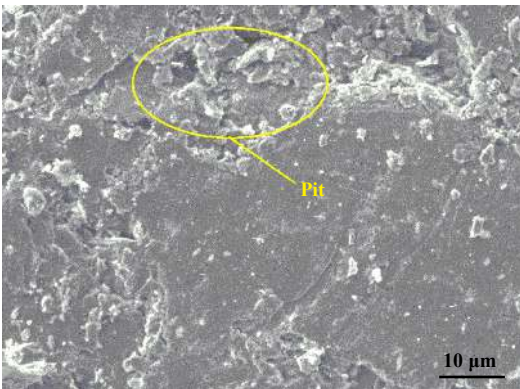
(b) 3D topography for E468e



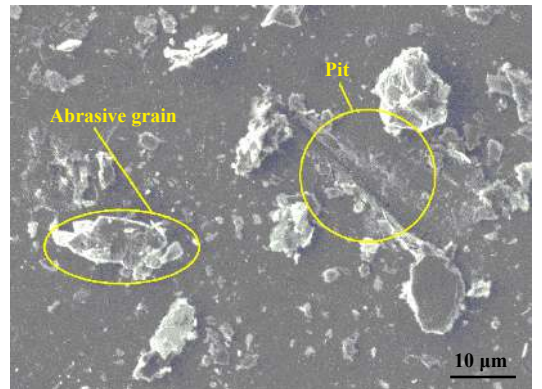
(c) D172



(d) E468e



(e) SEM micrograph for D172



(f) SEM micrograph for E468e

Fig. 3 Characterization of two types of carbon brushes interfaces under different loads

图3 不同载荷下两种型号碳刷界面表征图

同型号碳刷分子结构及化学成分不同导致摩擦界面粗糙度不同。D172碳刷由于含有少量S和Ca元素[见图8(a)],表面微观孔隙较大,磨损剥落的碳粉在低载和摩擦力作用下容易转移到微孔隙形成1层光而明亮的摩擦薄膜,摩擦薄膜有助于提高摩擦界面的润滑性能,最终提高摩擦副的整体抗磨性能,所以低载荷时D172碳刷磨损率较小;当载荷继续增大时,磨损颗粒增多,在接触界面集聚形成磨粒团,导致碳刷摩擦界面出现犁沟,摩擦膜被破坏,此时磨损率会急剧增加。而E468e碳刷纯度高[见图9(a)],摩擦表面致密,孔隙较小,且其硬度较D172碳刷低(表1),材质更疏松,磨损表面有似雨滴长期溅射岩石表面出现的凹坑[见图3(e)],在低载荷时脱落的石墨粉难以滞留在大面积凹坑从而形成光亮摩擦膜,所以此时E468e碳刷磨损率较大。同时该碳刷磨损界面裸露的炭相中存在一定数量垂直于或不完全平行于接触面的碳纤维,随载荷增大碳纤维在摩擦剪切力作用下从碳刷表面脱落形成颗粒,故磨损以磨粒磨损[见图3(f)]为主。为避免载荷过大产生严重的机械磨损同时防止载荷过小产生微跳动撞击碳刷表面形成塑性变形,在实际运行工况中恒压弹簧的法向压力在碳刷/集电环系统服役过程中应该保持在最优值附近,且其波动幅度要尽可能小,以便使碳刷/集电环系统既能保持稳定的运行,又能使碳刷磨损量最小来延长碳刷更换周期。

## 2.2 速度对碳刷干摩擦磨损性能的影响

载荷0.4 N、无载流和干摩擦条件下,研究速度(5、10、15和20 mm/s)对GCr15钢/碳刷配副摩擦磨损性能的影响规律及机理。图4(a~b)为两碳刷摩擦系数随循环次数的变化曲线图。由图可知,两碳刷摩擦系数在速度的变化时基本维持在0.23~0.36之间波动。图4(c)为两碳刷磨损率随速度变化柱形图。由图可见,每一对应速度下D172碳刷磨损率约为E468e磨损率的1/2~2/3。当速度从5 mm/s增至20 mm/s时,D172、E468e

碳刷的磨损率整体上呈现增加趋势,增幅分别为126%和132%。

图5为不同速度下D172、E468e碳刷三维磨损表面形貌图、磨痕的宽深度图以及速度20 mm/s时的两碳刷形貌的SEM照片。两种碳刷在速度20 mm/s时磨损最严重,现象最为明显,故选择速度20 mm/s条件下试样进行SEM观测(放大倍数均为1 500倍)。由图可见,E468e碳刷磨痕深度明显大于D172碳刷。如前所述,E468e碳刷材质为天然石墨纯度高,材质更松软(见表1),在钢球表面微凸体的犁切作用下更易磨损,故其磨损率高于D172碳刷。由图4(c)可知,速度增大时,两碳刷磨损率逐渐增大。这主要是因为,在干滑动摩擦过程中,滑动速度较小时,球-盘之间接触相对平稳,产生的热量较小,摩擦表面因为微凸峰被剪断而形成黏着磨损以及少量的磨粒磨损[见图5(e)、(f)]。而随着速度增大,钢球和碳刷盘之间的振动和冲击作用增大,造成摩擦副的接触状态变差,摩擦界面产生的热量增加。高温使得碳刷表面软化,黏着加剧,摩擦表面变得不平整。同时摩擦膜的完整性遭到破坏,表面膜与基体炭结合能以及抗剪切能力降低<sup>[15]</sup>,形成大量磨料。因此随着滑动速度的增加,两碳刷的磨损率均增大。

## 2.3 电流密度对碳刷干摩擦磨损性能的影响

载荷0.4 N、速度15 mm/s、干摩擦条件下,研究名义电流密度(5、7、9和11 A/cm<sup>2</sup>)对GCr15钢/碳刷配副摩擦磨损性能的影响规律及机理。图6(a)、(b)为两碳刷摩擦系数随电流密度的变化曲线。如图所示,随着电流密度的增大,D172碳刷摩擦系数整体呈增大趋势,而E468e碳刷摩擦系数先缓慢增大随后逐渐减小到0.29左右。D172碳刷载流时的摩擦系数在0.31~0.37之间波动,无载流时D172碳刷摩擦系数在0.3左右波动,相对于无载流D172碳刷摩擦系数在载流时的最大增幅为23%。E468e碳刷载流时摩擦系数在0.29~0.36之间波动,无载流时E468e碳刷摩擦系数在0.33左右,相

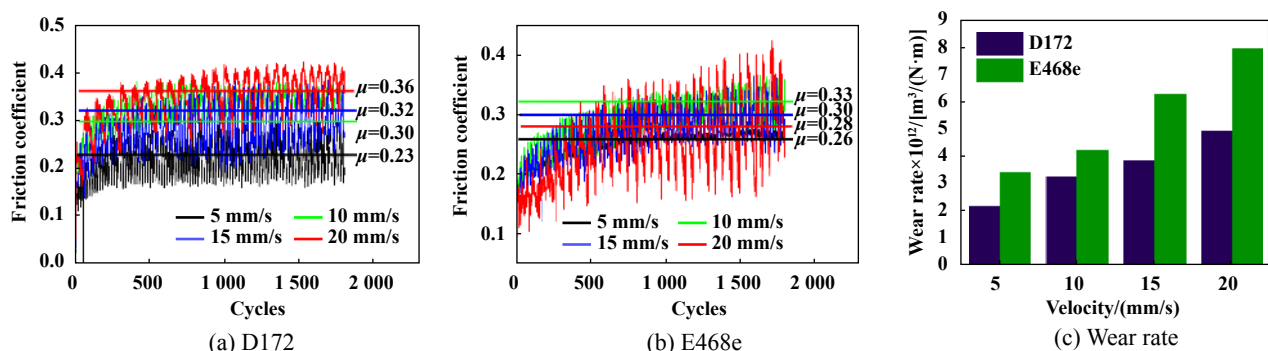
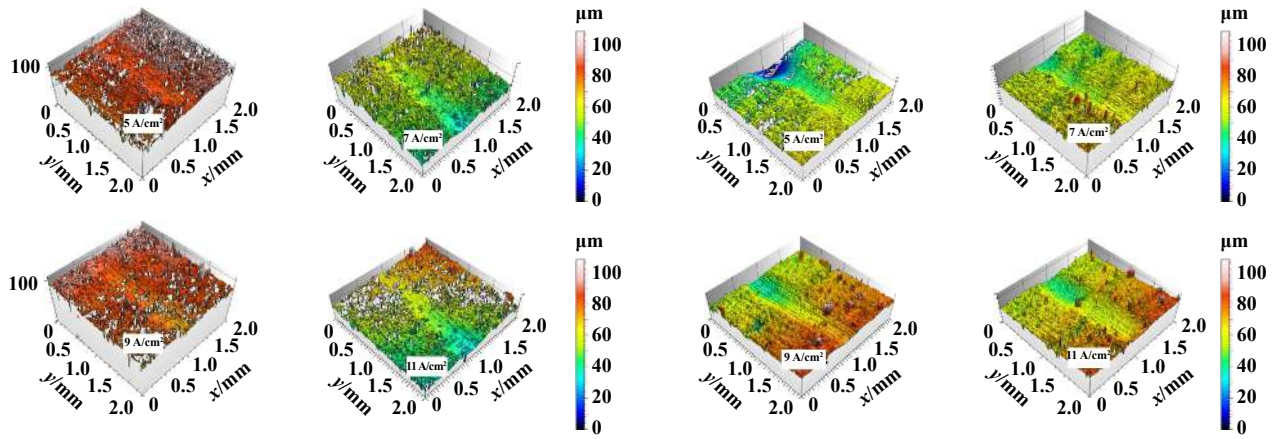


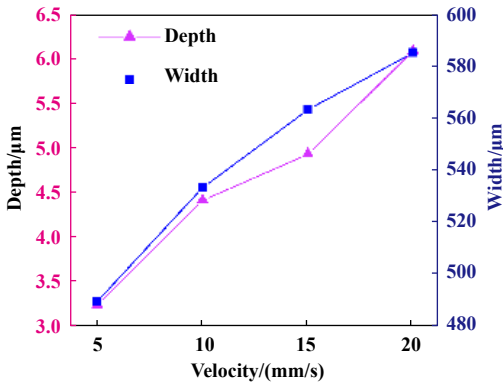
Fig. 4 Friction coefficient and wear rate with speeds

图4 摩擦系数与磨损率随速度变化趋势图

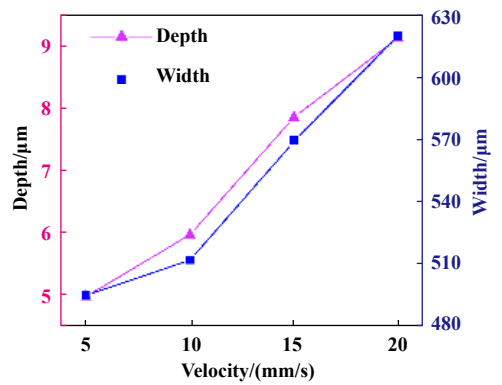


(a) 3D topography for D172

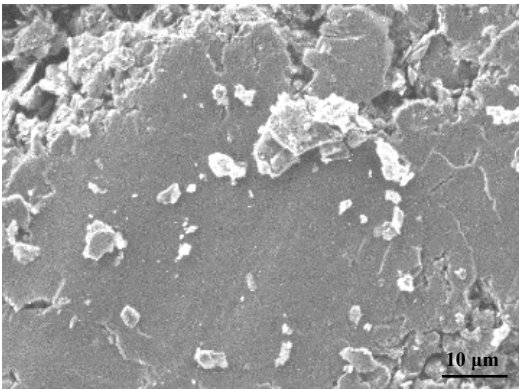
(b) 3D topography for E468e



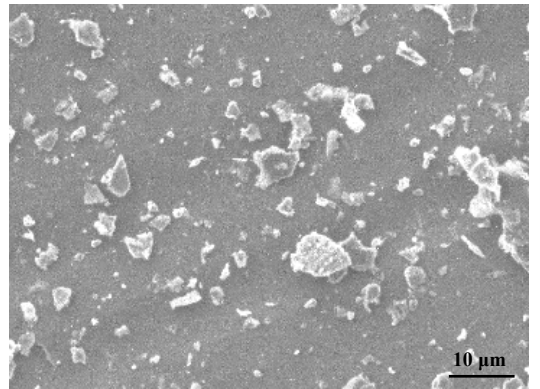
(c) D172



(d) E468e



(e) SEM micrograph for D172



(f) SEM micrograph for E468e

Fig. 5 Characterization diagram of two types of carbon brushes at different speeds [(a) (c) (e) for D172, (b) (d) (f) for E468e]

图5 不同速度下两种型号碳刷界面表征图[(a) (b) (c)为D172, (d) (e) (f)为E468e]

对于无载流E468e碳刷摩擦系数在载流时的最大增幅为9%。说明电流对D172碳刷摩擦系数的影响比E468e碳刷更明显。在整个试验历程中摩擦系数的大小和波动程度均相对无载流时较稳定。电流密度在5~11 A/cm<sup>2</sup>间变化时,摩擦系数中值维持在0.29~0.37之间,变化增幅仅28%左右。图6(c)为两碳刷磨损率随电流密度的变化柱形图。可见随着电流密度的增大,两碳刷的磨损率总体呈现增大的趋势,且E468e的磨

损率受电流密度影响更大,最大增幅达273%。更有趣的现象是,载流时E468e碳刷的磨损率总体上均低于D172,在电流密度为5和9 A/cm<sup>2</sup>时,其磨损率只有D172碳刷磨损率的1/2,这与无载流时情况恰好相反。可见,碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大。

图7为不同电流密度下D172、E468e碳刷三维磨损表面形貌图、磨痕的宽深度图及电流密度为11 A/cm<sup>2</sup>

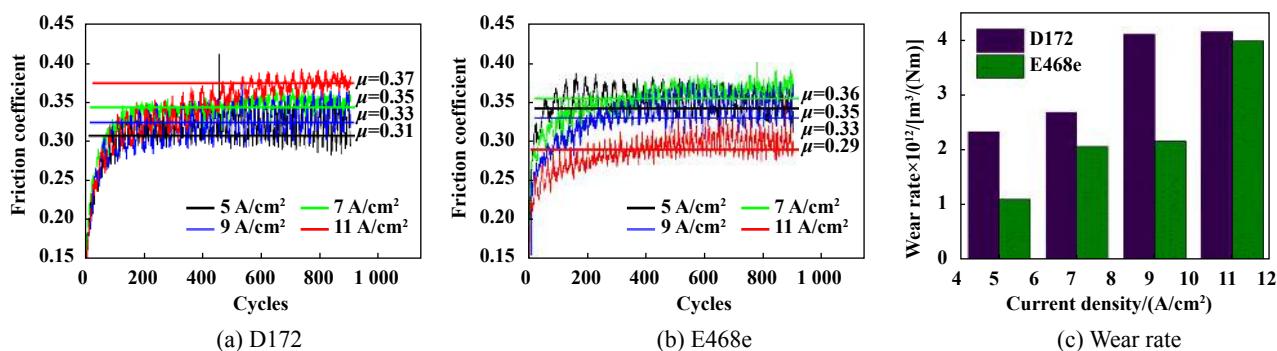
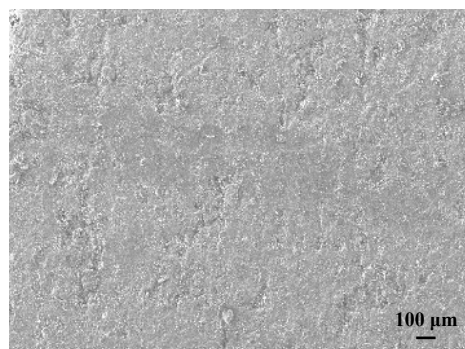
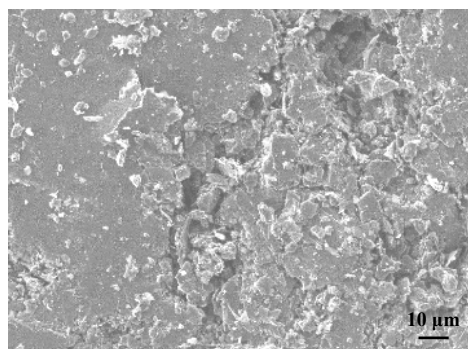
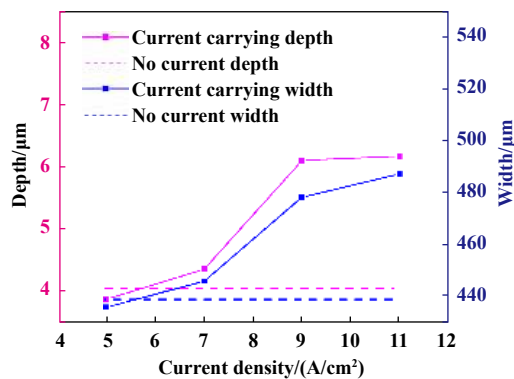
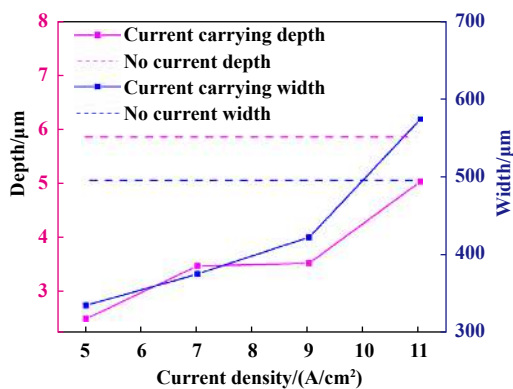
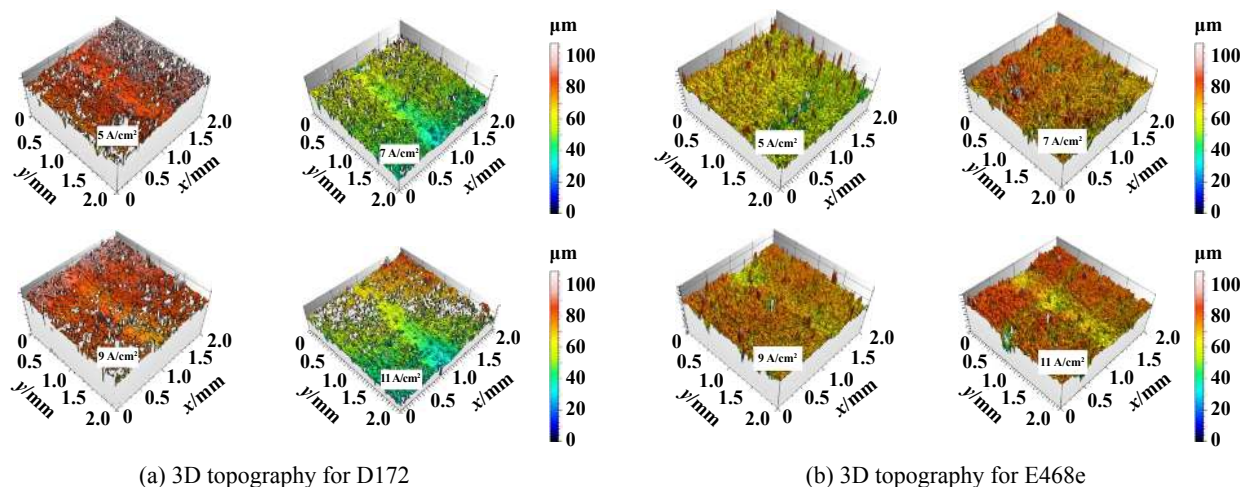


Fig. 6 Friction coefficient and wear rate with current density

图 6 摩擦系数与磨损率随电流密度变化趋势图



(e) SEM micrograph for D172

(f) SEM micrograph for E468e

Fig. 7 Characterization of two types of carbon brushes at different current densities

图 7 不同载流密度下两型号碳刷界面表征图

时的两碳刷形貌的SEM照片. 两种碳刷在电流密度为  $11 \text{ A/cm}^2$  条件的磨损表面更具有代表性, 故选择电流密度  $11 \text{ A/cm}^2$  条件下SEM照片(放大倍数均为800倍). 比较两碳刷在无载流[图5(a)、(b)]和载流[图7(a)、(b)]情况下的三维表面形貌图可知, 载流时两碳刷的摩擦表面变得更为平滑, 犁沟数量减少, 磨痕深度降低, 摩擦表面粘附颗粒减少, 这可能是由于碳刷表面因为电流产生了电流润滑效应. 分析试验结果可知, 在无载流条件下, 磨损界面材料发生了塑性变形、脱落和黏着等微观力学行为, 导致出现大面积凹坑[见图7(e)]; 在载流条件下, 摩擦副在电场力作用下吸附了大量的碳粉磨屑, 随着摩擦副的不断滑动, 钢球将碳粉磨片反复地挤压并填充到划痕中, 界面磨痕将得到磨屑的不断修复, 故而较致密平整. 因此电场吸附部分磨屑是载流条件与无载流条件摩擦表面磨痕差异的主要原因<sup>[16]</sup>. 当两个导体相互接触时, 电流通过的摩擦表面之间的单独接触点称为导电点. 在电流作用下摩擦

热、电弧热和焦耳热<sup>[17]</sup>增加了导电点的温度, 温度升高致使导电点附近材料软化甚至熔化, 产生更多的导电点, 并使基材发生断裂和脱落导致碳刷磨损量随电流增大而增大; 外加电场还会加速碳刷表面氧化, 在摩擦表面形成黑色的氧化膜, 使严重的黏着磨损转变为氧化磨损, 改变了磨损机制<sup>[18]</sup>. 因此, 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大.

图8~9分别为D172、E468e碳刷在载流摩擦试验前后的EDS能谱图. 由图可知, D172碳刷试验前含有大量C元素及少量O、S和Ca元素, 试验后除O元素含量升高之外还发现了Si、Al和Fe元素, 说明D172碳刷在载流条件下发生了氧化磨损和碳刷与钢球之间的材料转移与反转移, 即黏着磨损. 磨损后, 碳刷试验接触面成分明显改变, 碳材料表层出现了从球试样表层转移来的铁元素, 且在碳刷试验的接触表层, 不同区域铁元素的含量也不同. 由图8(a)可知, 碳元素含量降低, 氧元素含量明显增加, 表明碳刷表面氧化严重, 且存

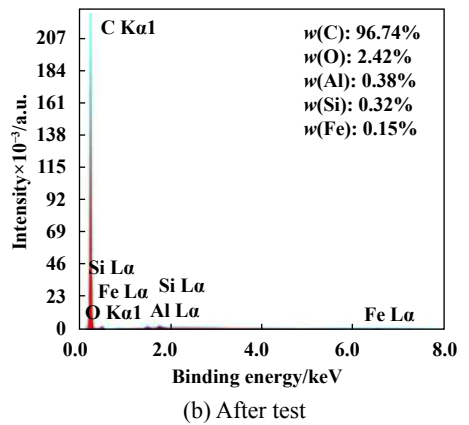
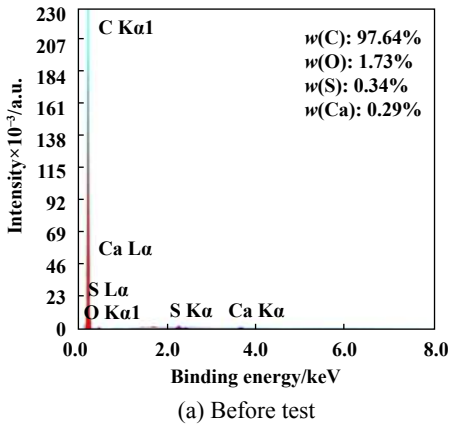


Fig. 8 EDS spectra of D172 carbon brush (Current density  $11 \text{ A/cm}^2$ , load  $0.4 \text{ N}$ , speed  $10 \text{ mm/s}$ )

图8 D172碳刷EDS谱图(电流密度  $11 \text{ A/cm}^2$ , 载荷  $0.4 \text{ N}$ , 速度  $10 \text{ mm/s}$ )

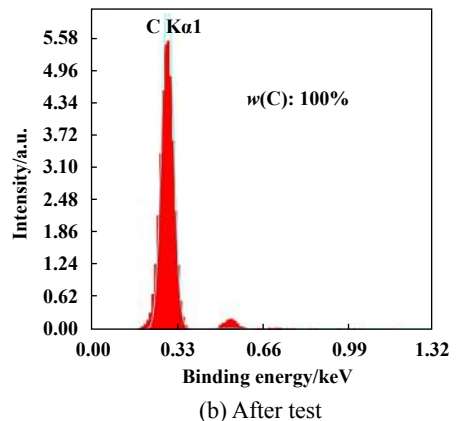
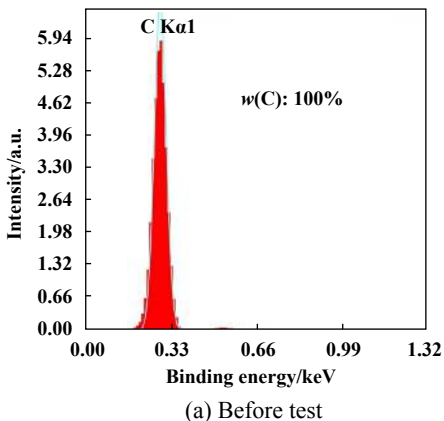


Fig. 9 EDS spectra of E468e carbon brush (Current density  $11 \text{ A/cm}^2$ , load  $0.4 \text{ N}$ , speed  $10 \text{ mm/s}$ )

图9 E468e碳刷EDS图(电流密度  $11 \text{ A/cm}^2$ , 载荷  $0.4 \text{ N}$ , 速度  $10 \text{ mm/s}$ )



在氧化物形成和沉积;碳元素明显减少,这是由于摩擦磨损过程中的高温使得部分被碳氧化,熔凝的金属氧化物在表层的覆盖也造成了碳元素含量的降低。同时正是因为出现了Si、Al和Fe元素,使得碳刷与钢球接触界面出现了硬质相,在摩擦过程中这些硬质相会划伤碳刷表面形成犁沟效应,在摩擦力和剪切力作用下发生了轻微的塑性变形,出现了少量在摩擦过程中未及时排出而粘附在磨损表面的大小不一的片状磨屑。而E468e碳刷试验前后主要成分均为C和少量杂质,说明其磨损形式主要为磨粒磨损,这也是载流情况下D172碳刷磨损率大于E468e碳刷的原因。

### 3 结论

a. 无载流时, D172和E468e两碳刷的磨损率均随载荷的增大呈现先减小后增大的趋势,达到最小值时出现大转折,这意味着两碳刷均对碳刷/集电环系统在服役过程中的振动和主轴摆动所引起的载荷变化非常敏感。

b. 碳刷/集电环摩擦副在载流与无载流时的摩擦磨损性能相差较大。无载流时D172碳刷的磨损率远低于E468e,载流时则情况相反。D172碳刷无载流时的磨损机理以磨粒磨损为主并伴有轻微黏着磨损,载流时碳刷除发生磨粒磨损和黏着磨损外,还伴有氧化磨损。E468e碳刷在载流前后均为磨粒磨损。

c. 名义电流密度对两种碳刷的摩擦系数影响不大,在整个试验历程中摩擦系数的大小和波动程度均较稳定,摩擦系数中值基本维持在0.3上下,变化增幅仅21%左右。

### 参考文献

[1] Gu Guobiao, Ruan Lin. Application and development of evaporative cooling technology in the field of hydroelectric generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5112–5119 (in Chinese) [顾国彪, 阮琳. 蒸发冷却技术在水轮发电机领域的应用和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5112–5119].

[2] Dejan Poljanec, Mitjan Kalin, Ludvik Kumar. Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts[J]. Wear, 2018, 406–407: 75–83. doi: 10.1016/j.wear.2018.03.022.

[3] Feng P, Tu C, Chen Z, et al. The effect of sulfonated graphene oxide on the current-carrying wear characteristics of a resin matrix carbon brush[J]. Carbon, 2017, 124: 729.

[4] Trinh K E, Tshipenyuk A, Varenberg M, et al. Wear debris and electrical resistance in textured Sn-coated Cu contacts subjected to fretting[J]. Wear, 2015, 344–345(4): 86–98.

[5] Deeva V, Slobodyan S. Influence of gravity and thermodynamics on the sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2017, 105: 299–303. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.004.

[6] Vera Deeva, Stepan Slobodyanb, Martik Martikyana. Physical model of the sliding contact of conductors of the alloy Cu-Zr and Cu-Re under high current density[J]. Materials Oday-Proceedings, 2016, 3(9): 3114–3120. doi: 10.1016/j.matpr.2016.09.027.

[7] Wen X, Yuwen F, Ding Z, et al. Electric arc-induced damage on electroless Ag film using ionic liquid as a lubricant under sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2019, 135: 269–276. doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.019.

[8] Kubota Y, Nagasaka S, Miyauchi T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current[J]. Wear, 2013, 302(Special SI): 1492–1498.

[9] Yang Z, Zhang Y, Zhao F, et al. Dynamic variation of arc discharge during current-carrying sliding and its effect on directional erosion[J]. Tribology International, 2016, 94: 71–76. doi: 10.1016/j.triboint.2015.03.012.

[10] Kalin M, Poljanec D. Influence of the contact parameters and several graphite materials on the tribological behaviour of graphite/copper two-disc electrical contacts[J]. Tribology International, 2018, 126: 192–205. doi: 10.1016/j.triboint.2018.05.024.

[11] Kong D J, Guo H Y, Wang W C. Effects of loadings on friction and wear behaviors of cathodic arc ion plating Al TiN coating at high temperature[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(4): 604–612. doi: 10.1080/10402004.2015.1094842.

[12] Wu Xiaoguang, Zhang Hongbo, Yin Jian, et al. Preparation of PF/CNTs-Cu composite and its current carrying friction and wear mechanism[J]. Journal of Tribology, 2018, 38(3): 334–341 (in Chinese) [吴晓光, 张红波, 尹健, 等. PF/CNTs-Cu复合材料的制备及其载流摩擦磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(3): 334–341]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.03.011.

[13] Lin Xiuzhou, Zhu Minghao, Mo Jiliang, et al. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2): 292–299 (in Chinese) [林修洲, 朱旻昊, 莫继良, 等. 碳/铜载流滑动摩擦过程中摩擦学与电弧行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 292–299].

[14] Yang H J, Chen G X, Zhang S D, et al. Effect of the vibration on friction and wear behavior between the carbon strip and copper contact wire pair. Proceedings of the institution of mechanical engineers[J]. Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(J8): 722–728.

[15] Mao Peilin, Yue Yulin, Guo Rui, et al. Friction and wear properties of carbon/carbon composites under nitrogen and a air conditions[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2012, 17(2): 166–171 (in Chinese) [毛佩林, 岳葆林, 郭瑞, 等. 氮气、空气条件下炭/炭复合材料的摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 166–171]. doi: 10.3969/j.issn.1673-0224.2012.02.005.

- [16] Zhou Wenyan, Peng Ke, Yan Liping, et al. Effect of current on the current-carrying friction and wear properties of Mo<sub>2</sub>C modified C/C-Cu composites[J]. Tribology, 2016, 36(4): 503–509 (in Chinese) [周文艳, 彭可, 冉丽萍, 等. 电流对Mo<sub>2</sub>C改性C/C-Cu复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 503–509]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.04.015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.04.015).
- [17] Zhang Y, Sun S, Guo Q, et al. Investigation of transient temperature's influence on damage of high-speed sliding electrical contact rail surface[C]//Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies IV. International Society for Optics and Photonics, 2016, 10030: 100302G.
- [18] Han H, Du S, Zhang Y, et al. Effect of DC magnetic field on friction and wear properties of 45 steel at different velocities[J]. Tribology Letters, 2016, 64(3): 38. doi: [10.1007/s11249-016-0754-z](https://doi.org/10.1007/s11249-016-0754-z).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019071

# 氧化铝/石墨-硫酸钡层状复合材料的 摩擦学性能及润滑机理

宋俊杰, 樊恒中, 苏云峰, 张永胜\*, 胡丽天

(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 将石墨和硫酸钡按一定比例复合作为弱界面层, 通过铺层-冷压-放电等离子烧结工艺制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}-\text{BaSO}_4$  层状复合材料. 考察了复配润滑剂的组分对层状复合陶瓷在室温至  $800\text{ }^\circ\text{C}$  连续加热过程中自润滑性能的影响规律, 并通过磨损表面分析探讨了其在宽温域下的协同润滑机制. 结果表明: 通过复配在室温和中高温温度段具有优异自润滑性能的固体润滑剂, 并借助仿贝壳材料独特的层状结构特征, 可有效改善氧化铝陶瓷在不同温度段的摩擦学性能, 进而实现材料在较宽温度范围内的连续润滑. 基于润滑相组分优化的复合材料在室温至  $800\text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  栓对摩时的摩擦系数可保持在  $0.28\sim 0.48$  之间, 比块体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  栓摩擦副的摩擦系数降低了近 60%.

**关键词:** 氧化铝; 层状复合陶瓷; 宽温域; 自润滑; 耐磨损

中图分类号: TQ174.75; TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0723-07

## Tribological Properties and Lubrication Mechanism of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}-\text{BaSO}_4$ Laminated Composites

SONG Junjie, FAN Hengzhong, SU Yunfeng, ZHANG Yongsheng\*, HU Litian

(State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China)

**Abstract:**  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}-\text{BaSO}_4$  laminated composites, combining graphite and  $\text{BaSO}_4$  in a certain proportion as weak interfacial layer, were prepared by a layer-by-layer method, dry-pressing and spark-plasma-sintering. The influence of the composition of the multi-lubricant on the self-lubrication performance of laminated ceramics during continuous heating from room temperature to  $800\text{ }^\circ\text{C}$  was investigated, and the synergistic lubrication mechanism in a wide temperature range was discussed by analyzing the worn surfaces. Results show that combined strategies, i.e. incorporating different lubricants adapted for room temperature and medium high temperature, and unique layered structure of bionic laminated composites, effectively improved the tribological properties of materials at elevated temperatures, and hence the lubrication over a wide temperature range was realized. The friction coefficients of the optimal laminated materials coupled with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pin were in a range of  $0.20\sim 0.48$  from room temperature to  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , which was 60% lower than that of monolithic alumina ceramics.

**Key words:** alumina; layered composite ceramics; wide temperature range; self-lubricating; wear resistance

Received 22 April 2019, revised 25 June 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: zhysh@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968833.

The project was supported from the National Natural Science Foundation of China (51775534), the Youth Innovation Promotion Association CAS (2013272) and the Program of the Light of the Chinese Academy of Sciences in China's Western Region (2018).

国家自然科学基金项目(51775534), 中国科学院青年创新促进会人才专项(2013272)和中国科学院“西部之光”人才培养计划(2018)资助.

氧化铝结构陶瓷具有高强度、高硬度、耐磨损、抗氧化和耐腐蚀等诸多优异性能,作为机械运动部件能够满足某些苛刻环境下的特殊应用需求<sup>[1]</sup>。但是,陶瓷作为摩擦学材料也有其缺点,突出问题是在干摩擦条件下的高摩擦磨损和本征脆性带来的低可靠性,极大地限制了其在摩擦学领域的应用。在陶瓷基体中复合石墨润滑剂可有效改善陶瓷材料的摩擦学性能<sup>[2-4]</sup>。但是,固体润滑相的引入往往会形成相间界面缺陷,严重破坏陶瓷相的连续性,以致陶瓷材料强度和硬度等机械性能下降,从而大幅降低其抗裂纹破坏能力和应用可靠性<sup>[5-7]</sup>。

通过仿照自然界贝壳珍珠层“砖-泥”层叠结构,对自润滑复合陶瓷材料进行仿生层状结构设计,可解决常规陶瓷润滑材料中力学性能和摩擦学性能间的矛盾,实现陶瓷材料力学性能和润滑功能的统一<sup>[8-18]</sup>。基于该设计理念,我们前期成功制备出了兼具优异力学性能和自润滑性能的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 层状复合材料<sup>[16-17]</sup>。优化后的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 层状复合材料展现出非脆性断裂特征,并且当 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 层和石墨层的厚度分别为212和56  $\mu\text{m}$ 时, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 层状复合材料与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 球配副的摩擦系数可降低至0.31。但是, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 层状复合材料受到石墨润滑相使用温度范围的限制,使其不能够满足高温下的应用要求。为拓宽其使用温度范围,本研究中将较高温度下具有自润滑性能的 $\text{BaSO}_4$ 引入到 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 层状材料的弱界面层中,制备了可在较宽温度范围内具有优异自润滑性能的层状材料,并探讨了陶瓷材料中不同润滑剂在室温至800  $^\circ\text{C}$ 下的协同润滑作用及机理。

## 1 试验部分

### 1.1 材料制备

本试验选用商品纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体(80~120 nm,江苏立达高科特种材料有限公司)、 $\text{BaSO}_4$ 粉体(15~45  $\mu\text{m}$ ,西陇化工股份有限公司)和石墨粉体(<4  $\mu\text{m}$ ,上海胶体试剂厂)为原料。

采用配料-混料-铺层-干压-烧结法制备具有不同复配润滑剂组分的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状复合材料。本研究选用优化设计后的层状结构参数<sup>[16,18]</sup>: $\text{Al}_2\text{O}_3$ 层的厚度为212  $\mu\text{m}$ ,复配润滑剂层的厚度为56  $\mu\text{m}$ ,总层数为93层。其中, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 层由含烧结助剂的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉(将纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体、 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{CuO}$ 以质量比为95:4:1的比例均匀混合获得)制得;不同组分的 $\text{Graphite-BaSO}_4$ 复合粉体分别按照石墨和 $\text{BaSO}_4$ 的体积比为

4:6、5:5、6:4的比例球磨混合获得。材料制备流程如下:(1)在钢模具中交替铺置 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉体和复配润滑剂粉体;(2)干压得到所需素坯,采用双向加压方式,轴向压力为180 MPa,保压时间为5 min;(3)将制备好的素坯在放电等离子炉(SPS,上海晨华科技股份有限公司)中进行烧结,压力为25 MPa,烧结温度为1 150  $^\circ\text{C}$ ,保温时间为4 min,升温速率为250  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,烧结后随炉冷却。三种烧结后的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状材料对应上述组分比例分别命名为AGB46、AGB55和AGB64。作为性能比较,采用相同工艺制备了块体 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BaSO}_4$ 层状复合材料,分别命名为A、AG和AB。

### 1.2 摩擦性能测试

采用栓-盘接触、往复运动的形式,在德国Optimol油脂公司生产的SRV-IV微动摩擦磨损试验机上研究材料在垂直于层方向的摩擦学性能,试验配置如图1所示。样块尺寸为12.5 mm×12.5 mm×4 mm,试验前将样块表面在砂纸上逐级打磨至表面粗糙度( $R_a$ )为0.1~0.3  $\mu\text{m}$ 。摩擦对偶为硬度约为15 GPa的 $\phi 9.3$  mm×10 mm  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷栓(杰奈尔硬质合金有限公司),试验频率为10 Hz,振幅为1 mm,载荷为70 N。试验温度为室温至800  $^\circ\text{C}$ ,采取阶段性升温的方式进行升温,每阶段的升温时间约为2~4 min。其中,在25、200、400、600及800  $^\circ\text{C}$ 下分别保温30 min,升温过程摩擦试验继续进行,摩擦时间共计150 min。摩擦系数曲线由SRV-IV微动摩擦磨损试验机实时采集获得,文中所呈现的摩擦系数曲线均为相同试验条件下重复3次后取典型代表曲线,摩擦系数为相同试验条件下重复3次后取平均值。

### 1.3 显微结构、物相组成和磨损表面表征

用SEM(JSM-5600LV)、XRD(EMPYREAN)、EDS

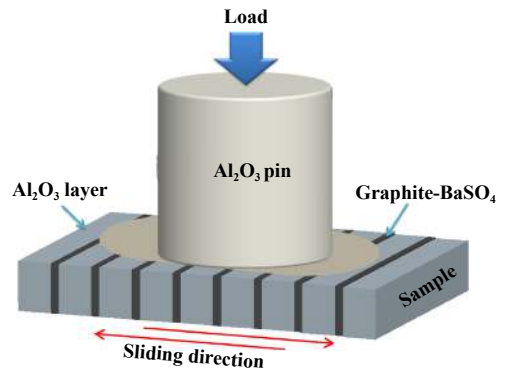


Fig. 1 Schematic diagram of the friction tests for  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$  laminated composites

图1  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状自润滑材料的摩擦试验示意图

观察和分析烧结后 $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料的宏/微观结构及摩擦试验后试样磨损表面形貌和物相组成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 层状材料的显微结构

图2为烧结后 $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料(样品AGB55)的显微形貌及化学组成分析结果. 可以看出, 材料具有明显的多层结构, 相同材质的片层

厚度基本相同, 且层间界面相对平直, 没有出现层间开裂现象.  $Al_2O_3$ 层具有比 $Graphite-BaSO_4$ 弱界面层更加致密的显微结构, 呈现出强/弱相间的层状结构,  $Al_2O_3$ 层厚度约 $220\ \mu m$ ,  $Graphite-BaSO_4$ 层厚度约为 $60\ \mu m$ . 此外, 从XRD分析谱图可以看出, 层状材料的主要组分为 $\alpha-Al_2O_3$ 、 $Graphite$ 和 $BaSO_4$ , 在烧结过程中没有出现其他物相的生成. EDS分析结果表明, 在烧结过程中没有出现界面组分向 $Al_2O_3$ 基体层熔融扩散现象, 层片间呈弱界面结合<sup>[16]</sup>.

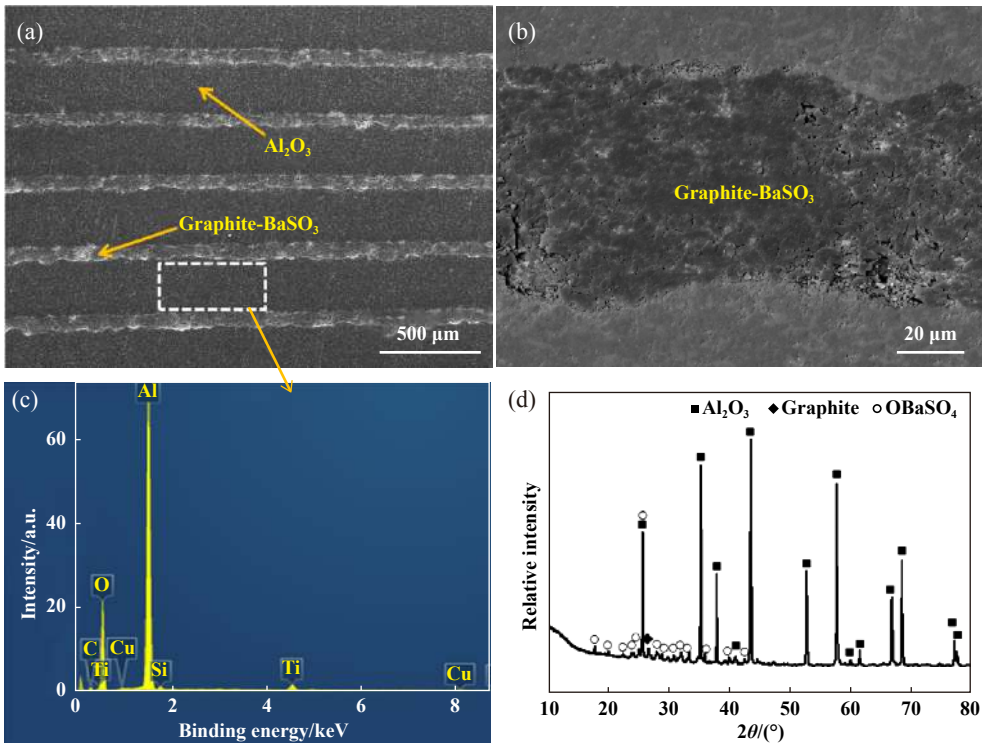


Fig. 2 SEM micrographs (a and b) and EDS spectrum (c) and XRD pattern (d) of the  $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$  laminated composites

图2  $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料的SEM照片(a和b)、EDS(c)和XRD谱图(d)

### 2.2 层状材料的摩擦学性能

图3为块体 $Al_2O_3$ 陶瓷、 $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料与 $Al_2O_3$ 栓在室温至 $800\ ^\circ C$ 连续升温过程中对磨时的摩擦系数曲线. 可以看出,  $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料均展现出比块体 $Al_2O_3$ 陶瓷更加优异的宽温域自润滑性能. 在整个升温过程中, 层状复合材料与 $Al_2O_3$ 陶瓷栓对磨时的摩擦系数可保持在 $0.28\sim 0.48$ 之间, 比块体 $Al_2O_3$ 陶瓷/ $Al_2O_3$ 陶瓷栓摩擦副的摩擦系数( $0.80\sim 1.10$ )降低了近60%. 此外, 从 $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料的摩擦系数曲线可以看出, 材料的摩擦系数没有出现因弱界面层组分不同( $Graphite$ 与 $BaSO_4$ 体积分数比为 $2/3\sim 3/2$ )而出现急剧变化的现象, 并且随着温度的升高, 材料摩擦系数曲

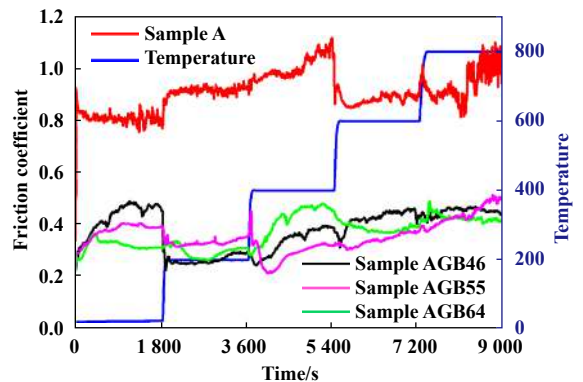


Fig. 3 Friction coefficient curves of monolithic  $Al_2O_3$  ceramic and  $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$  laminated composites at elevated temperature

图3  $Al_2O_3$ 陶瓷和 $Al_2O_3/Graphite-BaSO_4$ 层状复合材料在室温至 $800\ ^\circ C$ 连续升温过程中的摩擦系数曲线

线的变化规律也基本一致,但从总体上可以看出,石墨相组分较多时,材料的常温摩擦系数较低,而较高的BaSO<sub>4</sub>组分则利于高温摩擦系数的降低.

### 2.3 材料表面磨斑形貌

图4为块体Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub>层状材料与对偶Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>栓在连续升温摩擦试验后的磨斑形貌和物相组成.从图4(a-b)可以看出,块体Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷与对偶Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷栓的摩擦表面均覆盖有较多的磨

粒,且摩擦表面有较多的晶粒拔出和较深的犁沟,主要表现出磨粒磨损.然而,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub>层状材料和对偶Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷栓具有与块体Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷栓摩擦副截然不同的磨斑形貌.从图4(c-d)可以看出,摩擦过程中在材料及对偶的表面均形成了塑性形变膜,没有明显的磨粒堆积和磨粒磨损现象,磨损较轻微.此外,从Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub>层状材料摩擦试验前后的XRD谱图可以看出,在摩擦过程中材料表

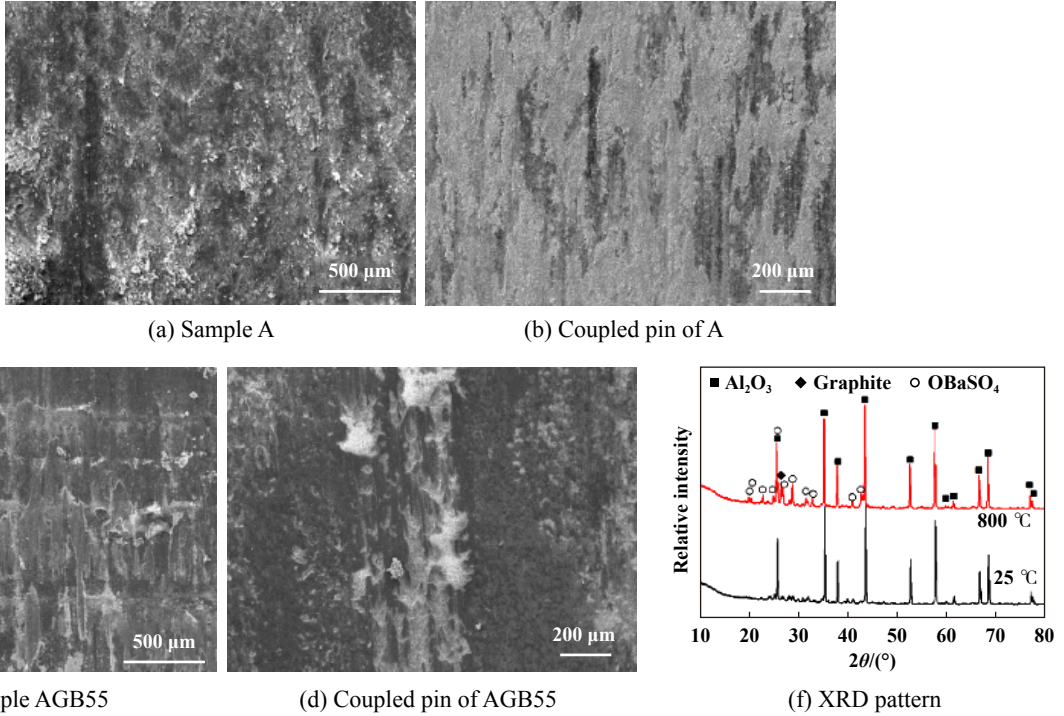


Fig. 4 Microstructures and XRD analysis of worn surfaces for monolithic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub> laminated composite and coupled pin

图4 块体Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub>层状材料与对偶栓的磨斑形貌和XRD分析谱图

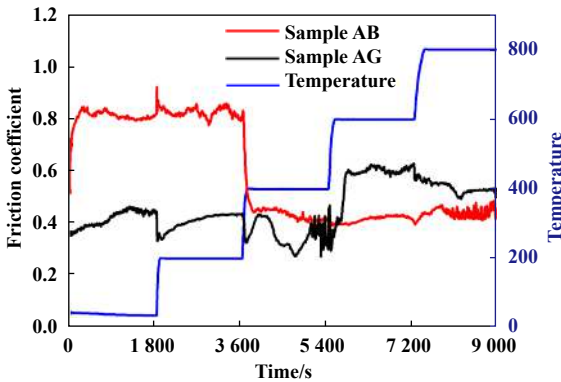


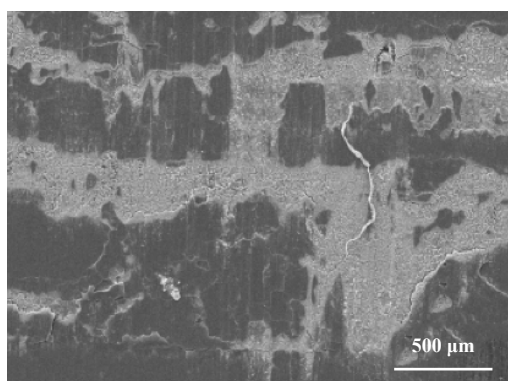
Fig. 5 Friction coefficient curves of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BaSO<sub>4</sub> laminated composites at elevated temperature from room temperature to 800 °C

图5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BaSO<sub>4</sub>层状材料在室温至800 °C连续升温过程中的摩擦系数曲线

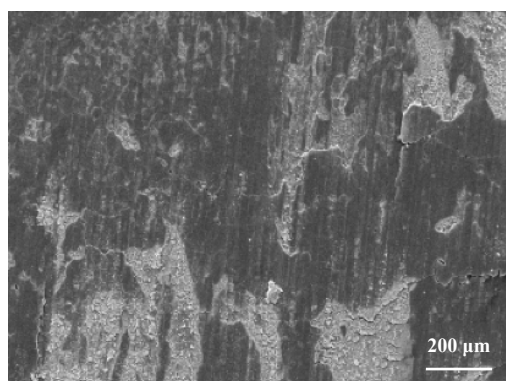
面没有发生组成物相的变化.

### 2.4 润滑机理探讨

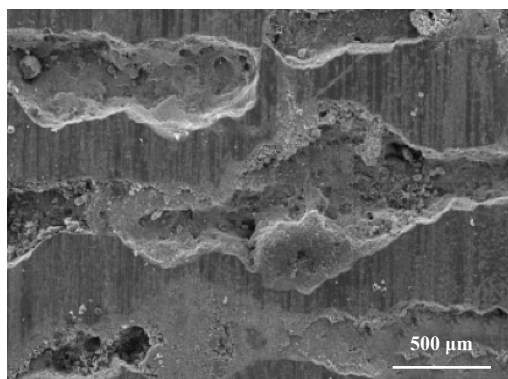
从上述试验结果可以得出,石墨和BaSO<sub>4</sub>是实现材料宽温域自润滑的主要因素.为进一步揭示石墨相和BaSO<sub>4</sub>在连续升温过程中对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite-BaSO<sub>4</sub>层状材料自润滑性能的作用机制,在相同的试验条件下,考察了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BaSO<sub>4</sub>层状复合材料的摩擦学性能,摩擦系数曲线和磨斑形貌分别如图5和图6所示.可以看出,不同润滑剂在不同温度段所起到的润滑作用完全不同.室温至200 °C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Graphite层状复合材料的摩擦系数可保持在0.35~0.42之间.在该温度段的摩擦过程中,石墨润滑相能够被拖敷到材料摩擦表面形成比较连续的润滑膜[见图6(a)],并部分



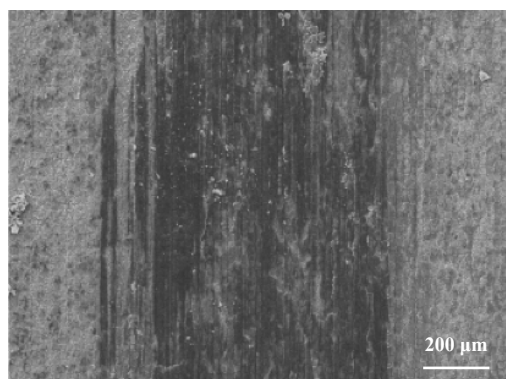
(a) Sample AG, RT~200 °C



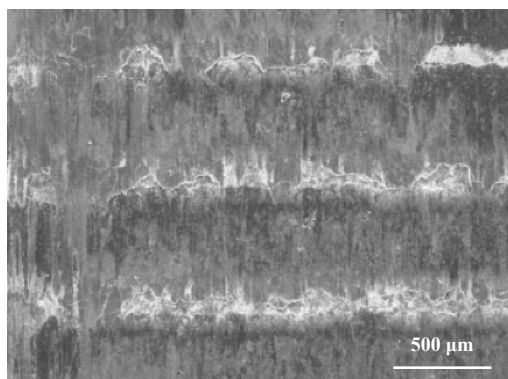
(b) Coupled pin of AG, RT~200 °C



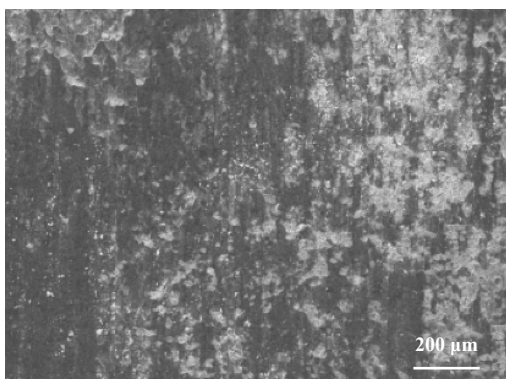
(c) Sample AG, RT~600 °C



(d) Coupled pin of AG, RT~600 °C



(e) Sample AG, RT~800 °C



(f) Coupled pin of AG, RT~800 °C

Fig. 6 Microstructures of worn surfaces of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BaSO}_4$  laminated composites and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pin after the continuous friction experiments in different temperature ranges

图 6  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BaSO}_4$ 层状材料与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 栓经不同温度段连续摩擦试验后的磨斑形貌

转移到对偶表面形成转移膜[图6(b)]<sup>[16]</sup>, 将材料与对偶间的摩擦转换为润滑膜和转移膜之间的摩擦, 降低材料间的摩擦阻力。但是, 当温度升至400 °C时, 石墨相开始缓慢氧化, 摩擦表面的润滑膜和转移膜逐渐失稳, 摩擦系数变得不再稳定(见图5)。当温度升至600 °C或以上温度时, 石墨相氧化速度增大, 石墨润滑相氧化流失[见图6(c)], 致使摩擦表面的润滑膜和转移膜变得不连续[见图6(d)], 甚至消失, 加剧摩擦副间的磨损。并且, 在高温下, 石墨分子间的水分等发生解吸, 也会

进一步恶化石墨相的润滑性能。

$\text{BaSO}_4$ 却可以弥补石墨润滑相不适于在高温环境服役的不足。虽然, 在环境温度低于400 °C时,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BaSO}_4$ 层状复合材料的摩擦系数高达0.8左右。但是, 当温度高于400 °C时,  $\text{BaSO}_4$ 润滑相发生软化, 软化的 $\text{BaSO}_4$ 在摩擦过程中容易被拖敷到摩擦表面形成比较连续的润滑膜[见图6(e)]和转移膜[见图6(f)], 迅速降低摩擦副间的摩擦阻力, 防止材料的进一步磨损<sup>[18-20]</sup>。在400~800 °C之间, 材料与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 栓配副的摩擦系数可

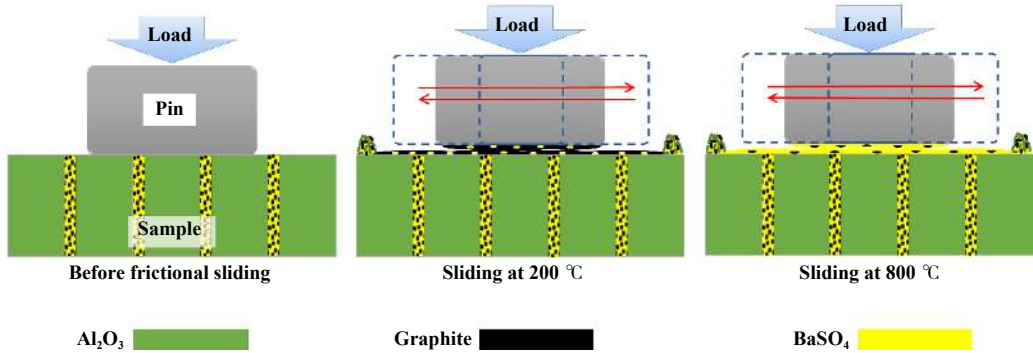


Fig. 7 The schematic diagram of the formation of tribo-films on the surface of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$  laminated material at different operating temperature

图7  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状材料表面在不同温度阶段摩擦膜的形成示意图

稳定在0.4左右。

将石墨润滑相与 $\text{BaSO}_4$ 复合作为弱层引入到氧化铝层状材料中,可有效结合石墨润滑相的低温自润滑效果和 $\text{BaSO}_4$ 的中高温自润滑效果,实现氧化铝结构陶瓷的宽温域自润滑。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状材料表面在不同温度阶段摩擦膜的形成示意图如图7所示。在常温至 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围,石墨润滑相可以在摩擦副表面形成较为连续的润滑膜和转移膜,实现材料的自润滑。当温度高于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,石墨润滑相逐渐氧化流失, $\text{BaSO}_4$ 开始暴露于材料表面。高温下软化的 $\text{BaSO}_4$ 润滑相在摩擦滑动的拖敷作用下,在材料表面形成易于发生剪切的塑性流变性摩擦膜,从而防止材料进一步的磨损,实现材料的高温自润滑。

### 3 结论

a. 将不同温度段具有优异自润滑性能的复配固体润滑剂作为弱界面层,对陶瓷润滑材料进行仿生层状结构设计,可实现陶瓷材料在较宽温度范围内的有效润滑。

b. 具有常温优异自润滑性能的石墨润滑相协同中高温段具有优异自润滑性能的 $\text{BaSO}_4$ ,能够在不同温度段为摩擦表面提供比较连续的润滑膜和转移膜,进而改善材料的摩擦学性能。

c.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Graphite-BaSO}_4$ 层状材料与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 栓配副在室温至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 连续升温摩擦过程中的摩擦系数可保持在 $0.28\sim 0.48$ 之间,比块体 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 栓摩擦副的摩擦系数降低了近60%。

### 参考文献

[1] Asmelash M G, Mamat O, Ahmad F, et al. Thermal shock and fatigue behavior of pressureless sintered  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$  composites[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2015, 4: 190-198.

doi: 10.1007/s40145-015-0146-0.

- [2] Liu H W, Xue Q J. The tribological properties of TZP-graphite self-lubricating ceramics[J]. Wear, 1996, 198: 143-149. doi: 10.1016/0043-1648(96)06946-3.
- [3] Dong Limin, Zhang Baoqing, Tian Jiemo, et al. A study on the friction and wear behavior of ceramic-graphite composite[J]. Tribology, 1997, 17(4): 363-366 (in Chinese) [董利民, 张宝清, 田杰谟, 等. 陶瓷-石墨复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 363-366]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.1997.04.012.
- [4] Chen Wei, Gao Yimin, Chen Can. Tribological behavior of  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-hBN}$  ceramic materials against stainless steel under dry friction condition[J]. Tribology, 2010, 30(3): 243-249 (in Chinese) [陈威, 高义民, 陈灿. 干摩擦条件下 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-hBN}$ 复合陶瓷与1Cr18Ni9Ti配副的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 243-249]. doi: 10.16078/j.tribology.2010.03.010.
- [5] Ouyang J H, Li Y F, Wang Y M, et al. Microstructure and tribological properties of  $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$  matrix composites doped with different solid lubricants from room temperature to  $800\text{ }^\circ\text{C}$ [J]. Wear, 2009, 267: 1353-1360. doi: 10.1016/j.wear.2008.11.017.
- [6] Zhang Y S, Fang Y, Fan H Z, et al. High-performance ceramic lubricating materials. In: Wythers M C, editor[J]. Advances in Materials Science Research, 2014, 17: 83-92
- [7] Chen W, Gao Y M, Ju F L, et al. Tribochemical behavior of  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-hBN}$  ceramic materials with water lubrication[J]. Tribology Letters, 2009, 37: 229-238.
- [8] Qi Y E, Zhang Y S, Hu L T. High-temperature self-lubricated properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  laminated composites[J]. Wear, 2012, 280: 1-4.
- [9] Fang Y, Zhang Y S, Song J J, et al. Influence of structure parameters on the tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  laminated nanocomposite[J]. Wear, 2014, 320: 152-160. doi: 10.1016/j.wear.2014.09.003.
- [10] Fang Yuan, Fan Hengzhong, Zhang Yongsheng, et al. Preparation and tribological performance of three-dimensional lubricating layer on the surface of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  self-lubricating structural ceramics[J].



- Tribology, 2017, 37(3): 395–401 (in Chinese) [方媛, 樊恒中, 张永胜, 等. 氧化铝/钼自润滑结构陶瓷表面三维复合润滑层的制备与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 395–401]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.03.016](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.03.016).
- [11] Song J J, Zhang Y S, Fan H Z, et al. Design of interfaces for optimal mechanical properties in  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  laminated composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35: 1123–1127. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2014.09.023](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.09.023).
- [12] Song J J, Zhang Y S, Fang Y, et al. Influence of structural parameters and transition interface on the fracture property of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$  laminated composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35: 1581–1591. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.004).
- [13] Yu Changxin, Wang Fagang, Yin Kaili, et al. Effect of the directivity of weak interfacial layer on the laminated  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ /graphite ceramic[J]. Materials Review, 2018, 32(6): 2047–2050 (in Chinese) [于长新, 王发刚, 尹凯俐, 等. 弱界面层方向性对层状  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ /石墨陶瓷的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 2047–2050].
- [14] Peng J S, Cheng Q F. High-performance nanocomposites inspired by nature[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1702959. doi: [10.1002/adma.201702959](https://doi.org/10.1002/adma.201702959).
- [15] Cheng Q F, Huang C J, Tomsia A P. Freeze casting for assembling bioinspired structural materials[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1703155. doi: [10.1002/adma.201703155](https://doi.org/10.1002/adma.201703155).
- [16] Song J J, Zhang Y S, Su Y F, et al. Influence of structural parameters and compositions on the tribological properties of alumina/graphite laminated composites[J]. Wear, 2015, 338–339: 351–361. doi: [10.1016/j.wear.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.07.017).
- [17] Song J J, Zhang Y S, Fan H Z, et al. Design of structure parameters and corrugated interfaces for optimal mechanical properties in alumina/graphite laminated nanocomposites[J]. Materials and Design, 2015, 65: 1205–1213. doi: [10.1016/j.matdes.2014.09.084](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.084).
- [18] Song J J, Hu L T, Qin B F, et al. Fabrication and tribological behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoS}_2\text{-BaSO}_4$  laminated composites doped with in situ formed  $\text{BaMoO}_4$ [J]. Tribology International, 2018, 118: 329–336. doi: [10.1016/j.triboint.2017.09.032](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.032).
- [19] Murakami T, Ouyang J H, Umeda K, et al. High-temperature friction and wear properties of X- $\text{BaSO}_4$  (X:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , NiAl) composites prepared by spark plasma sintering[J]. Materials Transactions, 2005, 46(2): 182–185. doi: [10.2320/matertrans.46.182](https://doi.org/10.2320/matertrans.46.182).
- [20] Murakami T, Ouyang J H, Korenaga A, et al. High-temperature tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-X}$  (X:  $\text{BaCrO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$  and  $\text{CaSO}_4$ ) spark-plasma-sintered composites containing sintering additives[J]. Materials Transactions, 2004, 45(8): 2614–2617. doi: [10.2320/matertrans.45.2614](https://doi.org/10.2320/matertrans.45.2614).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019104

# 燃油稀释对柴油机油性能影响规律研究

苏国庆<sup>1,2,3</sup>, 郭灵燕<sup>4</sup>, 王晓波<sup>2</sup>, 李维民<sup>2\*</sup>, 李现明<sup>1\*</sup>, 王静<sup>5</sup>

- (1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;
2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 中国人民解放军92783部队, 山东 青岛 266102;
4. 潍柴动力股份有限公司 发动机研究院, 山东 潍坊 261205;
5. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 以CK-4 15W40柴油机油为基础油, 通过添加不同比例(质量分数分别为5%、10%、15%和20%)的0#柴油制备了不同燃油稀释比例的柴油机油, 对稀释油品的基本理化性能(黏度、倾点、闪点和酸碱值)进行了测试. 采用曲轴箱模拟试验仪、加压差示扫描量热试验仪、点接触光弹流润滑试验台以及SRV试验机对稀释前后油样进行了结胶性能、抗氧化性能、弹流润滑以及边界润滑性能进行了研究. 结果表明: 燃油稀释后的柴油机油黏度和闪点明显下降, 倾点未发生明显变化, 酸碱值和抗氧化性能有一定程度的降低. 弹流润滑条件下发动机油的油膜厚度降低, 同时燃油稀释后柴油机油在边界润滑条件下的减摩与抗磨性能有所下降.

**关键词:** 燃油稀释; 柴油机油; 理化性能; 油膜厚度; 摩擦学性能

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0730-07

## Influence of Fuel Dilution on the Performance of Diesel Engine Oil

SU Guoqing<sup>1,2,3</sup>, GUO Lingyan<sup>4</sup>, WANG Xiaobo<sup>2</sup>, LI Weimin<sup>2\*</sup>, LI Xianming<sup>1\*</sup>, WANG Jing<sup>5</sup>

- (1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Shandong Jinan 250061, China
2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China
3. Unit No92783 of PLA, Shandong Qingdao 266102, China
4. Center of Technology, Weichai Power Co Ltd, Shandong Weifang 261205, China
5. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Shandong Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Different fuel diluted engine oils were prepared by adding different proportions 0# diesel (5%, 10%, 15%, 20%) into CK-4 15W40 engine oil. Their physiochemical properties such as viscosity, pour point, flash point, total acid number and total base number were measured. Crankcase coking tester, pressure differential scanning calorimetry, optical interference point contact elasto-hydrodynamic lubrication tester as well as SRV tester were employed to investigate the coking, oxidation, elasto-hydrodynamic lubrication and boundary lubrication performances, respectively. Results show that viscosity and flash point experienced a drastic decrease with the increase of dilution rate and fuel dilution had a negligible effect on pour point. Total acid number, total base number and oxidation stability decreased to a certain degree. Film thickness of engine oil decreased with the increase of diesel concentration. Friction reducing and anti-wear properties under boundary lubrication regime were also deteriorated with the addition of diesel.

**Key words:** fuel dilution; diesel engine oil; physiochemical properties; film thickness; tribological property

Received 19 June 2019, revised 6 August 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: liwm@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968064; E-mail: mingli@sdu.edu.cn, Tel: +86-531-88395803.

The project was supported by Open Research Fund of State Key Laboratory of Engine Reliability (skler-201803).

内燃机可靠性国家重点实验室开放基金项目(skler-201803)资助.

近些年,随着柴油机技术的不断进步,缸内直喷和涡轮增压等新技术在柴油机中获得广泛应用,另一方面,为提升排温而实现颗粒捕捉器(DPF)再生,柴油机缸内后喷技术不断应用,使得发动机油燃油稀释现象越来越普遍,也受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。发动机在缸内后喷过程中部分燃料由于未完全随排气进入排气系统,会进入到润滑油中造成燃油稀释。研究表明,燃油稀释不仅会造成发动机油黏度与闪点的降低,抗氧化性能的劣化,还会影响发动机油的润滑性能,进而影响发动机的运行可靠性<sup>[3-4]</sup>。国外学者对燃油稀释的研究多集中在生物质柴油<sup>[3,5-7]</sup>稀释对柴油机油性能的影响,研究表明生物柴油不仅影响柴油机油的摩擦学性能,混入曲轴箱的生物燃料会促进机油氧化产生更多的沉积物并增强其腐蚀性。国内在该领域的研究则更多关注燃油稀释的监测和检测方面<sup>[4,8-9]</sup>,发展了红外和表面声波等技术,达到了快速测定润滑油中燃油稀释含量的目的。

为系统考察燃油稀释对柴油机油的性能影响,我们制备了质量分数分别为5%、10%、15%和20%的0#柴油稀释的CK-4 15W40柴油机油样品。对柴油稀释样品的理化性能及在弹流与边界润滑条件下的润滑性能进行了考察,并探讨了燃油稀释对柴油机油性能的影响规律。

## 1 试验部分

### 1.1 试验用油

试验所选用的柴油机油为潍柴动力提供的CK-4 15W40柴油机油,实测其基本理化性能,结果列于表1中,0#柴油为中国石化公司生产,采购于中石化加油站。以新油(0%)作为参比油样,在实验室配制了不同稀释比例(5%、10%、15%和20%)的样品。

### 1.2 理化性能试验方法

不同样品的运动黏度根据GB/T 265进行测定,倾

表1 CK-4 15W40柴油机油的性能指标

Table 1 Typical properties of CK-4 15W40 diesel engine oil

Item	Specification	Test standard
Viscosity (100 °C, cSt)	15.23	GB/T 265
Open cup flash point/°C	219	GB/T 3536
Pour point/°C	-33	GB/T 3535
Base number/(mgKOH/g)	10.50	GB/T 4945
Foaming characteristics (tendentiousness/stability mL/mL)	0/0(24 °C)	
	10/0(93.5 °C)	GB/T 12579
	0/0(After 24 °C)	

点与闪点根据GB/T 3535和GB/T 3536进行测定,酸值与碱值根据GB/T 4945标准(颜色指示剂法)进行了测定。

### 1.3 结胶性能和抗氧化性能试验仪器及条件

采用SH/T 0300-1992曲轴箱模拟试验方法(QZX法)测试样品的结胶性能。测试条件如下:250 ml油样,试验油温150 °C,板温320 °C,运转25 s停35 s间歇试验6 h,考察机油的漆膜和结胶情况。

采用德国耐驰公司生产的加压差示扫描量热仪(PDSC),通过恒温法进行测试。恒温法是将测试池加热至规定的温度,平衡后通入一定压力的高纯氧气(99.995%),PDSC测试池保持在规定的温度和压力下直至氧化放热反应发生,最后测定外推拐点时间,以此作为润滑油在规定试验温度下的氧化诱导期(OIT)。测试条件如下:恒温温度210 °C,氧气压力3.5 MPa,氧气流速100 mL/min,样品皿为 $\Phi 6$  mm开口铝皿,样品用量 $3.0 \pm 0.2$  mg。

### 1.4 弹流润滑试验

采用点接触光弹流润滑试验台对其弹流条件下的润滑性能进行了测试,测试条件:温度常温;载荷30 N;卷吸速度70~400 mm/s。

### 1.5 摩擦学性能试验仪器及条件

采用德国Optimol Instrument公司制造的微动摩擦磨损试验机SRV对油样的边界润滑性能进行了测试。摩擦试验采用球盘点面接触形式,球和盘为标准摩擦副,材料为AISI52100轴承钢,上试件为 $\Phi 10$  mm钢球,硬度HRC62.5 $\pm 2$ ;下试件为直径24 mm、厚7.85 $\pm 0.05$  mm圆盘,硬度HRC61 $\pm 1$ 。试验根据NB/SH/T 0847-2010进行测试。测试条件如下:温度120 °C;频率50 Hz;载荷300 N;行程1 mm,时间120 min。

使用美国KLA-Tencor公司生产的MicroXAM-800型非接触式三维表面轮廓仪测得试验后试验盘磨斑的磨斑体积。采用德国Carl Zeiss公司生产的扫描电子显微镜(SEM)对试验盘磨斑表面形貌进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃油稀释对理化性能的影响

黏度是柴油机油重要理化性能指标之一,对柴油机油的润滑性能有重要的影响,前期的很多研究表明,燃油稀释会造成柴油机油黏度的下降<sup>[3-6,10]</sup>。从表2的测试结果可以看出,随着燃油稀释比例的增大,油样在40和100 °C下的运动黏度均呈现快速下降趋势,其中40 °C运动黏度在柴油质量分数达到10%时下降

表2 不同油样的理化性能数据

Table 2 Physiochemical properties of different oil samples

Dilution concentration	Viscosity 40 °C, cSt	Viscosity 100 °C, cSt	Pour point/°C	Flash point/°C	TAN/(mgKOH/g)	TBN/(mgKOH/g)
0%	108.5	15.23	-33	219	1.15	10.50
5%	96.77	12.77	-33	176	1.06	10.28
10%	74.56	10.91	-36	150	1.07	9.60
15%	58.70	9.42	-36	137	1.06	9.42
20%	46.31	8.05	-33	126	0.99	9.28

比例为31.3%，远超过了换油指标(20%)<sup>[11]</sup>。有研究表明，5%的燃油稀释就会造成柴油机油的闪点显著降低<sup>[2]</sup>，表2中闪点的变化印证了这一结论，以20%稀释的油样开口闪点仅有126 °C，已经低于柴油机油的换油指标(130 °C)，与新油相比降低了42.5%。倾点的变化则在测试误差范围内，表明柴油的加入对柴油机油的倾点影响较小。

酸值和碱值是判断油品老化程度的重要依据，酸值一般反映机油中的酸性添加剂含量，碱值的高低则取决于柴油机油中的碱性添加剂如磺酸钙、磺酸镁、苯甲酸盐和水杨酸盐等<sup>[12]</sup>。通常而言油品在使用过程中的氧化和硝化等过程会产生酸性物质，同时消耗碱性添加剂，油品一般会呈现酸值增加碱值降低的趋势，因此通过测试发动机油的酸碱值变化可以确定油品的老化程度，指导油品的更换。燃油稀释对于柴油机油酸/碱值的影响从表2中可以看出，两者都有不同程度的下降，但是下降幅度都非常小。我们对所加入柴油的酸值与碱值也进行了测试，测试结果为酸值0.04 mgKOH/g，碱值0.06 mgKOH/g，基本可以忽略。因此我们认为柴油的加入对柴油机油的酸/碱性添加剂成分并没有明显的影响，只是由于柴油机油被物理稀释后，酸/碱组分的浓度同时也被稀释而造成酸/碱值的下降。

## 2.2 燃油稀释对结胶和氧化性能的影响

柴油机中的润滑油经常处于80~100 °C，在汽缸活塞部分达到150~250 °C，燃烧室则达到2 000 °C，在这种温度条件下，柴油机油容易发生热氧化变质，生成腐蚀性有机或无机酸化合物，或造成金属的腐蚀与磨损，因此柴油机油的高温氧化性能是1项关键指标<sup>[13]</sup>。曲轴箱模拟试验是将柴油机油飞溅到高温金属表面形成漆膜，模拟曲轴箱在活塞工作时的成漆情况，通过测定金属板上的漆膜和胶重，可以考察柴油机油的高温清净性和高温氧化安定性<sup>[14]</sup>。从图1中可以看出不同燃油稀释浓度的漆膜等级均介于2至3级之间，结胶量略有增加，但随稀释浓度的增加并没有明显的增

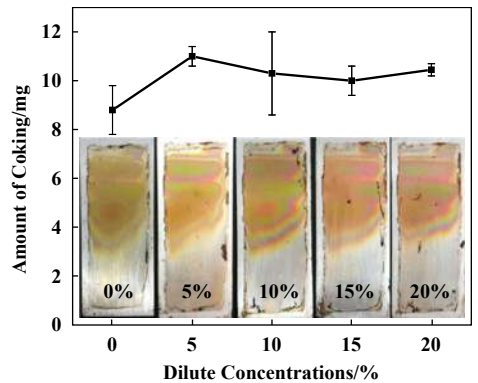


Fig. 1 Coking value and optical images of coking panels of different lubricants

图1 不同油品的结胶量及结胶板照片

长趋势。可见燃油稀释对该新鲜机油的结胶倾向性并不明显，该柴油机油具有较好的高温清净性和高温氧化安定性。

加压差示扫描量热(PDSC)仪是一种薄膜氧化试验设备，常用于模拟润滑油氧化试验<sup>[15]</sup>。我们采用PDSC恒温法研究了燃油稀释样品在210 °C下的氧化安定性，图2为样品氧化诱导期数据，一般起始氧化温度越高，氧化诱导期越长，待测样品的氧化安定性越好<sup>[16]</sup>。可以看出未稀释柴油机油的氧化诱导期最长为24.8 min，最短的是按照质量分数20%稀释的油样，为22.4 min，下降了10%左右。燃油稀释样品的氧化诱导

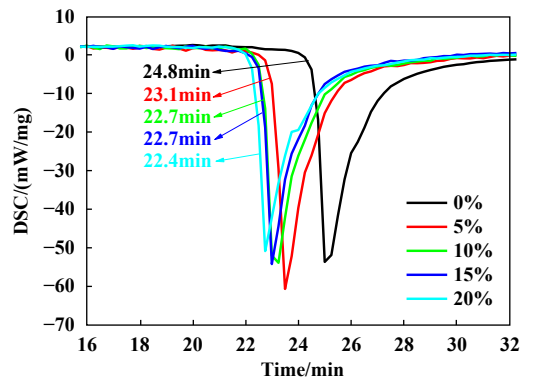


Fig. 2 Oxidation induction time (OIT) of different oil samples

图2 不同油品的氧化诱导期

期随燃油稀释比例的增大而降低,表明燃油稀释会降低柴油机抗氧化性能.对比曲轴箱模拟试验和PDSC法来考察油样的高温氧化安定性,两者有很好的一致性,但曲轴箱模拟试验用量大耗时长,而PDSC法采用高温高压消耗油样少时间短,且重复性好.

### 2.3 燃油稀释对柴油机油弹流润滑性能影响

弹性流体润滑膜的形成与油品的性质密切相关,流体油膜形成的起因是流体油压的产生,而油压的产生则与油品的黏性有关<sup>[17]</sup>.油品的黏度越大,油品越黏稠,在摩擦面保持流体润滑层的能力就越强,即油膜容易形成;黏度越低,则油膜越不容易形成.弹性流体动压润滑主要存在于齿轮和滚动轴承的润滑中,柴油机的自由端为齿轮或链条传动,发动机的曲轴也多采用滚动轴承设计,如果柴油机油黏度过低,则这些部位在运行过程中就不易形成油膜,造成润滑不充分,引起磨损加剧,振动恶化,严重时会影响喷油定时和配气定时,进而影响柴油机的发出功率和运行安全.

图3为不同燃油稀释浓度的油样在弹流润滑条件下接触区中心和最小油膜厚度的变化曲线,可以看出,对于未稀释和经不同比例柴油稀释的机油,当卷吸速度从75.9~398 mm/s变化过程中,弹流接触区的中心膜厚和最小膜厚都持续上升,柴油机油被稀释以后,在任何一种卷吸速度条件下,中心膜厚和最小膜厚均随着稀释比例的增加而降低.从图4可以看出,对于新油来说,在试验所采用的最小卷吸速度75.9 mm/s条件下,可以观测到油膜马蹄形形状,只是两侧耳垂较细,中央平原区域更大.随着卷吸速度的增加,光干涉油膜形状逐渐向经典的马蹄形弹流油膜转变,两侧耳垂变大,中央平原区域变小.在卷吸速度为75.9和114.8 mm/s条件下,随着燃油稀释比例的增加,油膜的

马蹄形形状逐渐变得不明显.在卷吸速度173.8 mm/s条件下,15%燃油比例的油膜形状与114.8 mm/s条件下10%燃油比例的油膜形状类似;而在卷吸速度398 mm/s条件下,20%燃油比例的油膜形状与263 mm/s条件下15%燃油比例的油膜形状类似,说明油膜厚度也类似.也就是说,燃油稀释起到了与卷吸速度下降相似的作用,造成油膜厚度下降.我们认为燃油稀释后造成黏度的急剧下降,黏度的降低会降低柴油机油在弹流润滑条件下的成膜能力,最终导致油膜厚度的降低.

### 2.4 燃油稀释对柴油机油边界润滑性能影响

边界润滑是指两摩擦副间有少量润滑剂,摩擦副表面接触充分,摩擦系数较大(约0.1)<sup>[18]</sup>.众所周知,柴油机在运行过程中,气缸与活塞环、凸轮与顶杆等部位均可能存在边界润滑状态,所以模拟边界润滑研究燃油稀释对柴油机油边界润滑性能的影响尤为重要.从图5(a)不同燃油稀释浓度下油样的摩擦系数变化曲线来看,无论是新油还是不同燃油稀释浓度的油样,试验初始阶段的摩擦系数均比较高并且波动明显,随着摩擦时间的延长,摩擦系数逐渐降低,稀释质量分数低于10%的油样最后趋于平稳,15%和20%在整个摩擦过程中均表现出不稳定的趋势,说明高浓度的燃油稀释降低了柴油机油的黏度的同时稀释了油品中润滑添加剂的比例,影响了柴油机油边界润滑膜的生成.从图5(b)的磨损体积结果可以看出,柴油稀释样品的磨损体积均高于未稀释的柴油机油样品,表明燃油稀释在一定程度上会造成发动机油抗磨损性能的下降.此外,燃油稀释样品的摩擦系数与磨损体积的变化与稀释比例并无明显的规律性,其抗磨损性能与减摩性能之间也没有呈现出对应性,我们认为这可能是

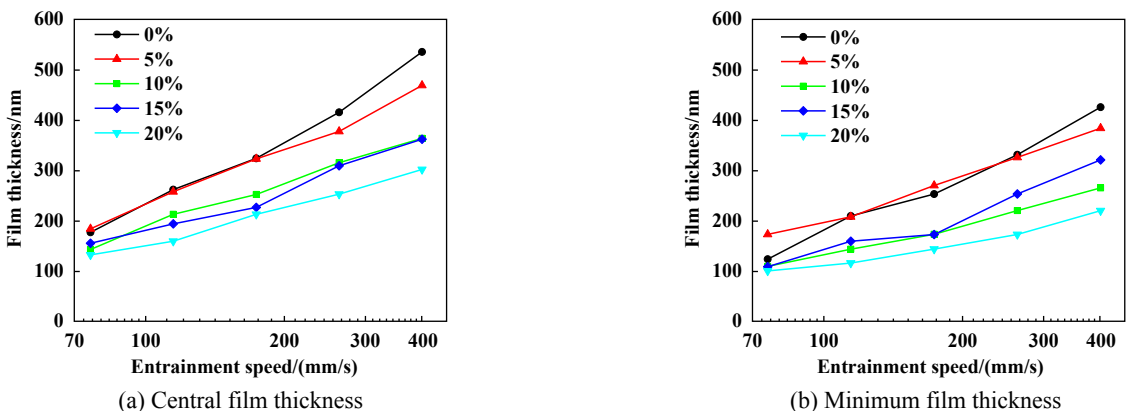


Fig. 3 Variations of film thickness in circular contact by adding different proportion of diesel

图3 不同燃油稀释浓度下圆接触油膜厚度变化

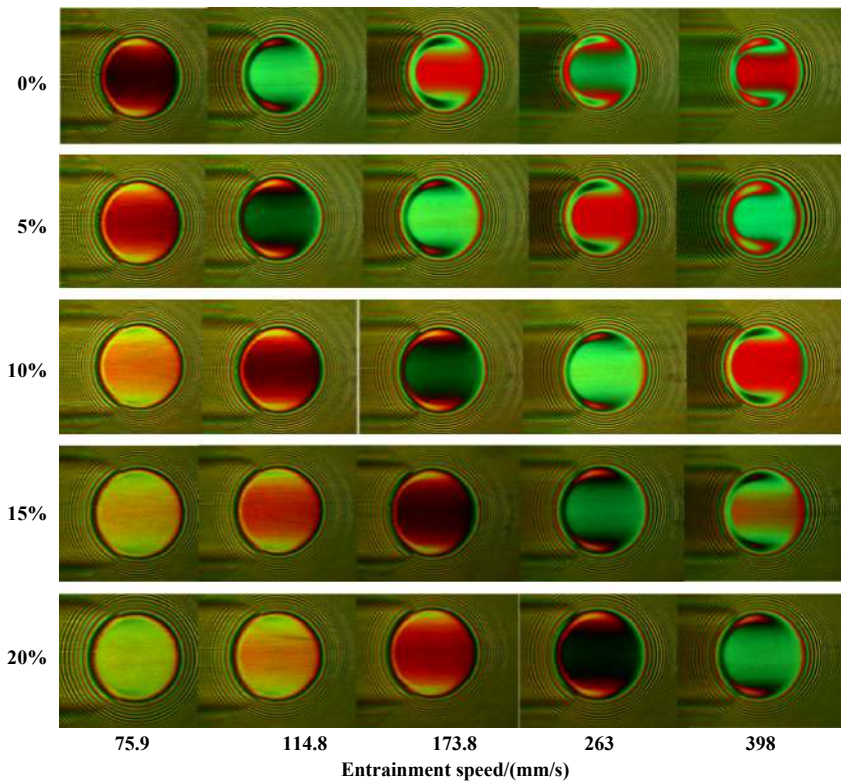
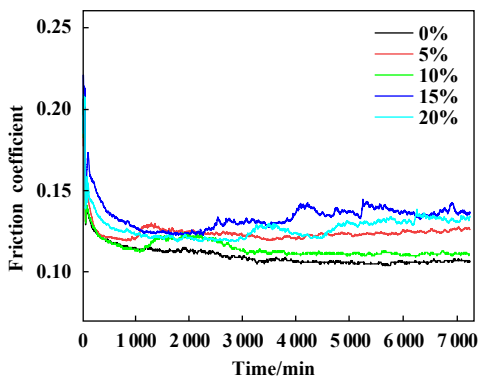
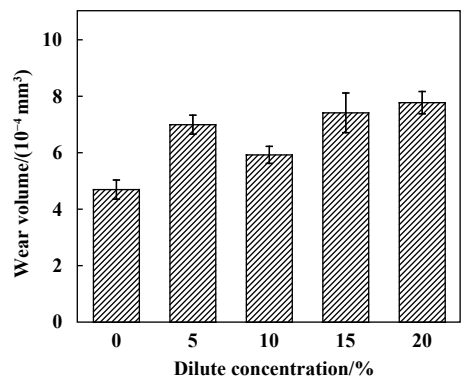


Fig. 4 Optical film images under elastohydrodynamic lubrication condition

图4 弹流润滑条件下的光干涉油膜图像



(a) Friction coefficient



(b) Wear volume

Fig. 5 SRV test results of different samples

图5 不同油样的SRV试验结果

由于柴油稀释引起发动机油的理化性能与组分变化造成边界润滑膜的化学组成与摩擦学性能不同所致。

图6电镜照片(SEM)显示燃油稀释浓度较低(质量分数小于10%)油样的磨斑形貌和空白油样的差别并不明显,摩擦表面较为均一平整,表明在低稀释浓度下,燃油稀释对柴油机油的润滑性能影响较小.高稀释浓度油样的磨斑表面更为粗糙,表面呈现出明显的犁沟,且有明显的黏着磨损与磨粒磨损特征,表明油样黏度的降低会造成添加剂比例的降低,进而影响发

动机油边界润滑膜的生成,造成柴油机油抗磨性能的下落,可见高浓度的燃油稀释对柴油机油的减摩与抗磨性能会造成较大影响。

### 3 结论

a. 随着燃油稀释浓度的增加,柴油机油黏度和闪点明显下降,黏度指标在稀释达到质量分数10%时就已经超过了换油标准;燃油稀释对倾点的影响较小,对柴油机油酸碱值的影响亦不明显。

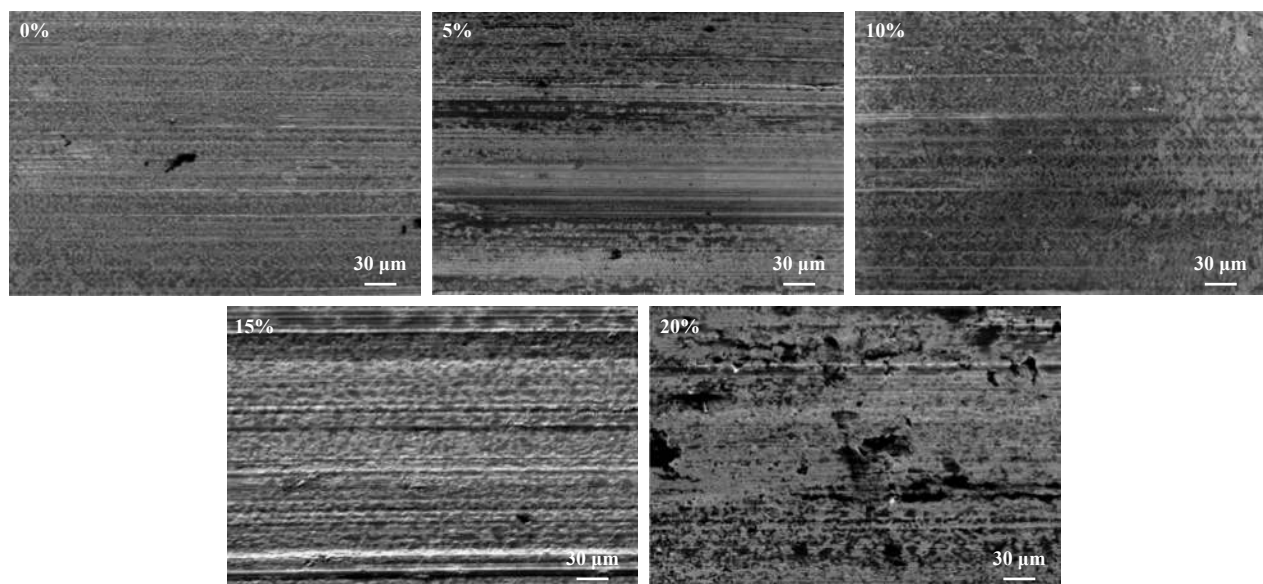


Fig. 6 SEM micrographs of worn disk surfaces

图6 SRV试验磨盘磨斑形貌的SEM照片

b. 燃油稀释对柴油机油的结胶性能影响不大,但对抗氧化性能有一定影响,柴油机油的氧化诱导期随稀释浓度的增加逐渐下降,稀释质量分数为20%时,氧化诱导期下降10%左右。

c. 燃油稀释导致柴油机油的黏度急剧下降,进而影响柴油机油在弹流润滑条件下的成膜能力,油膜厚度随稀释浓度的增大而降低。

d. 低浓度(质量分数不大于10%)的燃油稀释对柴油机油边界润滑条件下的摩擦学性能影响较小,高浓度的燃油稀释(质量分数大于10%)会造成柴油机油在边界润滑条件下减摩与抗磨损性能的劣化。

## 参考文献

- [1] Niedermayer AO, Voglhuber-brunnmaier T, Heinisch M, et al. Monitoring of the dilution of motor oil with Diesel using an advanced resonant sensor system[C] Barsony I, Zolnai Z, Battistig G. Proceedings of the 30th Anniversary Eurosensors Conference-Eurosensors, 2016: 15-18.
- [2] Ljubas D, Krpan H, Matanović I. Influence of engine oils dilution by fuels on their viscosity, flash point and fire point. Nafta: Exploration, Production, Processing[J]. Petrochemistry, 2010, 61(2): 73-79.
- [3] Gulzar M, Masjuki HH, Varman M, et al. Effects of biodiesel blends on lubricating oil degradation and piston assembly energy losses[J]. Energy, 2016, 111: 713-721. doi: 10.1016/j.energy.2016.05.132.
- [4] Xu Guang, Xing Zhina, Qu Jun, et al. A fast monitoring method of oil diluted by fuel based on information relationship[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(11): 87-92, 104 (in Chinese) [徐广, 邢志娜, 瞿军, 等. 基于信息关联的润滑油燃油稀释快速监测方法研究[J].

润滑与密封, 2011, 36(11): 87-92, 104]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.11.021.

- [5] Gili F, Igartua A, Luther R, et al. The impact of biofuels on engine oil performance[J]. Lubrication Science, 2011, 23(7): 313-330. doi: 10.1002/ls.158.
- [6] Hamdan SH, Chong WWF, Ng JH, et al. A study of the tribological impact of biodiesel dilution on engine lubricant properties[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 112: 288-297. doi: 10.1016/j.psep.2017.05.007.
- [7] Nantha Gopal K, Thundil Karuppa Raj R. Effect of pongamia oil methyl ester-diesel blend on lubricating oil degradation of di compression ignition engine[J]. Fuel, 2016, 165: 105-114. doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.031.
- [8] Sun Yunling, He Wei, Tian Hongxiang, et al. Reserch on fuel-dilution monitoring of diesel lubricant by FTIR[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(3): 82-85 (in Chinese) [孙云岭, 何伟, 田洪祥, 等. 基于FTIR的柴油机油被燃油稀释的监测研究[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(3): 82-85].
- [9] Qiu Huirao, Wang Long, Wang Yongan. Determination fuel dilution of in-service lubricants using surface acoustic wave sensing[J]. Guangdong Chemical, 2018, 45(22): 26-27, 5 (in Chinese) [丘晖饶, 王龙, 王安. 采用表面声波技术测定在用润滑油中燃油稀释的含量[J]. 广东化工, 2018, 45(22): 26-27, 5]. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2018.22.013.
- [10] Deng Guangyong, Cui Guangshu, Wang Chenggong, et al. The influence of diesel engine oil diluted by diesel oil on the viscosity and wear property of diesel engine oil for urban bus[J]. Lubricating Oil, 2008, 23(6): 33-38 (in Chinese) [邓广勇, 崔光淑, 王成功, 等. 燃油稀释对城市公交车发动机润滑油黏度和磨损性能的影响[J]. 润滑油, 2008, 23(6): 33-38]. doi: 10.3969/j.issn.1002-

- 3119.2008.06.007.
- [11] National standard of the PRC. Diesel engine oil in oil index[S]. The state administration of quality supervision, inspection and quarantine of the PRC, China national standardization management committee, 2011: 8(in Chinese) [中华人民共和国国家标准. 柴油机油换油指标[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会, 2011: 8.].
- [12] Yang Kun, Wu Tong, Zou Mao, et al. A fast method to measure TAN and TBN of used lubricant oil based on portable infrared spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(2): 452–455 (in Chinese) [杨琨, 吴桐, 邹毛, 等. 手持式直读红外光谱仪快速测定在用润滑油总酸值和总碱值的方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 452–455].
- [13] Xia Yanqiu, Zhang Xinming, Liu Weimin, et al. The antioxidant character and analysis testing technology of lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2004, 163(3): 26–28 (in Chinese) [夏延秋, 张新敏, 刘维民, 等. 润滑油的抗氧化性能和分析检测技术[J]. 润滑与密封, 2004, 163(3): 26–28]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2004.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2004.03.008).
- [14] E Hongjun, Xu Xiage, Lei Ling. Evaluation of elevated temperature detergency of diesel engine oil by gel chromatography[J]. Synthetic Lubricants, 2018, 45(2): 8–10 (in Chinese) [鄂红军, 徐夏歌, 雷凌. 用凝胶色谱评价柴油机油的高温清净性[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(2): 8–10]. doi: [10.3969/j.issn.1672-4364.2018.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4364.2018.02.003).
- [15] Fei Yiwei, Guo Feng, Yang Hongwei, et al. Comparison on national test method standard of the oxidation stability of lubricating oil[J]. Chemical Industry Times, 2015, 29(2): 37–41, 55 (in Chinese) [费逸伟, 郭峰, 杨宏伟, 等. 润滑油热氧化安定性试验方法标准比较分析[J]. 化工时刊, 2015, 29(2): 37–41, 55]. doi: [10.3969/j.issn.1002-154X.2015.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-154X.2015.02.010).
- [16] Zhao Yan, Li Weimin, Wang Xiaobo, et al. Synthesis and tribological study of ester based friction modifier[J]. Tribology, 2017, 37(5): 610–617 (in Chinese) [赵燕, 李维民, 王晓波, 等. 合成酯型摩擦改进剂的制备及摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 610–617]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.007](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.007).
- [17] Kang Mingyan, Lu Jinhua. Production and application of lubricating oil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015(in Chinese) [康明艳, 卢锦华. 润滑油生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015].
- [18] Zhou Feng, Wu Yang. A novel insight into “Lubrication”[J]. Tribology, 2016, 36(1): 132–136 (in Chinese) [周峰, 吴杨. “润滑”之新解[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 132–136]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.01.019](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.01.019).



DOI: 10.16078/j.tribology.2019061

# 机械密封在干摩擦状态下的摩擦界面 热力耦合分析

王计辉, 陈志\*, 顾灿鸿, 邱海涛, 吉华  
(四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 依据W-M分形函数建立了接触式机械密封摩擦副三维瞬态滑动接触模型, 考虑了接触微凸体之间相互机械作用和摩擦的热力耦合, 基于ABAQUS分析平台, 首次提出了能够模拟机械密封摩擦副回转运动的计算模型, 仿真分析了机械密封摩擦副在干运转条件下的摩擦特性. 研究表明: 接触面温度分布不均匀, 局部温度很高, 在接触微凸体中心区域出现极值; 在滑动后很短时间内温度急剧上升, 随着滑动进行, 接触节点温度继续升高, 但是温升速率减缓; 粗糙体轴向温度梯度较大, 其亚表层区域存在较大的热应力, 易发生热损伤失效; 在接触微凸体轴向距表层较近的局部区域存在拉应力, 滑动行为会使微凸体内部拉应力区域扩大, 拉应力的数值也增大. 微凸体接触区轴向上的应力状态是变化的, 依次为压应力-拉应力-压应力.

**关键词:** 机械密封; 干摩擦; 分形理论; 热力耦合; 磨损

**中图分类号:** TH117.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2019)06-0737-09

## Thermo-Mechanical Coupling Analysis of Friction Interface of Mechanical Seals under Dry Friction

WANG Jihui, CHEN Zhi\*, GU Canhong, QIU Haitao, JI Hua

(School of Chemical Engineering, Sichuan University, Sichuan Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Based on W-M fractal function, a three-dimensional transient sliding contact model of the contact friction pair of a mechanical seal was established. The mechanical interaction and thermal-mechanical coupling of friction between contact micro-convex bodies have been considered. Based on ABAQUS, a new computational model has been proposed for the first time using which the rotary motion of mechanical seal friction pair can be numerically simulated. The friction characteristics of a mechanical seal friction pair under dry operation were simulated and analyzed. The results show that the temperature distribution of the contact surface was uneven, the local temperature was very high and the maximum appeared in the center area of the contact micro-convex body. The temperature rose sharply in a very short time after sliding and the temperature of the contact node was rising with sliding, while the temperature rising rate slowed down. The temperature gradient of the rough body along the axial direction was large and the sub-surface area had a large thermal stress, which made thermal damage failure much easier. There was tensile stress in the local zone near the surface of the contact micro-convex body in axial direction, the sliding behavior enlarged the tensile stress zone inside the micro-convex body and the tensile stress also increased. The stress of the contact zone of the micro-convex body changed in the axial direction which subjected to continuous compression-tension-compression.

**Key words:** mechanical seal; dry friction; fractal theory; thermal-mechanical coupling; wear

在机器设备启停阶段及某些特殊工况下, 机械密封在干运转条件下工作, 摩擦端面会产生高于润滑条

件几个数量级的磨损<sup>[1]</sup>, 严重影响机械密封的性能及寿命. 机械密封接触端面粗糙表面形貌具有分形特

征,即粗糙表面的轮廓曲线的局部与整体具有某种自相似性<sup>[2-3]</sup>.粗糙表面的分形特性与几何尺度无关,可以提供存在于分型面上所有尺度范围内的全部粗糙度信息.因此,根据分形理论建立的接触模型,得到的接触分析结果是唯一确定的<sup>[4]</sup>.各种分形接触模型得到广泛的运用<sup>[5-9]</sup>.机械密封研究中,魏龙等<sup>[10-12]</sup>和丁雪兴等<sup>[13]</sup>根据分形理论,建立了机械密封端面分形接触模型,进行相关模拟及试验.

在粗糙表面摩擦热力耦合方面,Lestyán等<sup>[14]</sup>建立粗糙面三维模型,运用数值模拟的方法,计算接触体之间的真实接触面积以及接触面的温度分布.Lang等<sup>[15]</sup>建立分形接触模型,得到温度、摩擦系数与载荷及相对滑动速度之间的关系.胡琼等<sup>[16]</sup>建立混合润滑状态下机械密封端面摩擦热的理论计算公式.丁雪兴等<sup>[17-18]</sup>数值求解了机械密封摩擦接触面最大温度和温度分布规律,数值模拟了摩擦副端面真实接触状况.

在机械密封研究领域,从微观角度讨论机械密封在干运转条件下的摩擦生热、摩擦界面温度分布和等效应力特征等问题鲜有报道.而且相关研究中粗糙面接触模型基本上均采用一维运动的六面体构成的摩擦副,与机械密封接触端面相对回转运动的特征有较大出入,接触热的热传导机理也有所不同.基于此,本文作者首次提出了机械密封摩擦副接触端面回转运动的热力耦合计算模型,运用ABAQUS有限元分析软件数值模拟,研究机械密封在干运转状况下的接触热动力学问题,以期对机械密封端面摩擦磨损研究提供理论指导.

## 1 计算模型的建立

### 1.1 分形粗糙面及接触模型

文献<sup>[19]</sup>给出了三维随机分形表面的W-M函数公式:

$$z(x,y) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{(D-2)} \left( \frac{\ln \gamma}{M} \right)^{1/2} \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-3)n} \times \left\{ \cos \varphi_{m,n} - \cos \left[ \frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \times \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} + \varphi_{m,n} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $L$ 为取样长度, $m$ ;  $G$ 为特征尺度系数, $m$ ;  $\varphi_{m,n}$ 为表示 $(0, 2\pi)$ 间均匀分布的随机相位; $D$ 为分形维数; $M$ 为生成粗糙面的“山脊”数目; $\gamma$ 为生成粗糙面上“山脊”的频率密度, $\gamma > 1$ ;  $\gamma^n$ 为频率, $n$ 为频率系数; $n_{\max}$ 表

示频率的上限

$$n_{\max} = \text{int} \left[ \frac{\log(L/L_s)}{\log \gamma} \right] \quad (2)$$

式中: $L_s$ 为截止长度(m),近似为材料的原子间距.参数取值列于表1中.

表1 W-M函数的参数取值

Table 1 Parameter values of W-M functions

Parameter	Specification
Sample length, $L/m$	0.0002
Height scaling parameter, $G/m$	$2.45 \times 10^{-9}$
Random phase, $\varphi_{m,n}$	$\pi/6$
Fractal dimension, $D$	2.35
Ridge number, $M$	$10^{[19]}$
Density of frequencies, $\gamma$	$1.5^{[19]}$
Cut-off length, $L_s/m$	$5.00 \times 10^{-9[18]}$
Upper limit of frequency index, $n_{\max}$	26

本文作者根据该公式,运用MATLAB编程,生成粗糙表面离散点的坐标,将坐标点数据导入Pro/Engineer,生成粗糙表面,将粗糙面实体化成局部三维实体.

由于分形理论只适用于微米-纳米级尺度,与实际密封环尺寸相差很大,且分形模型中粗糙表面三维形貌特征会占用大量计算内存,因此本文中只选取微米级回转运动模型进行滑动摩擦热动力学问题的研究,以揭示机械密封摩擦副实际摩擦磨损特性.机械密封摩擦副材料常用软-硬端面材料组合,两者的弹性模量 $E$ 相差1~2个数量级(见表1).本文作者将机械密封摩擦副中的静环(实体A)等效为具有分形特征表面的柔性粗糙实体,动环(实体B)等效为具有理想平面的刚性体.建立机械密封摩擦副端面的接触模型,如图1所示.其中面 $A_1$ 、 $(A_1)$ 和面 $B_1$ 、 $(B_1)$ 分别是实体A、B的上下表面,面 $A_2$ 、 $(A_2)$ 、 $A_3$ 、 $(A_3)$ 、 $B_2$ 、 $(B_2)$ 是实体A、B的侧面,面 $(A_1)$ 和 $B_1$ 为实体A、B工作时的摩擦表面.模型中,Z坐标为轴向(厚度方向),X坐标为径向,Y坐标为

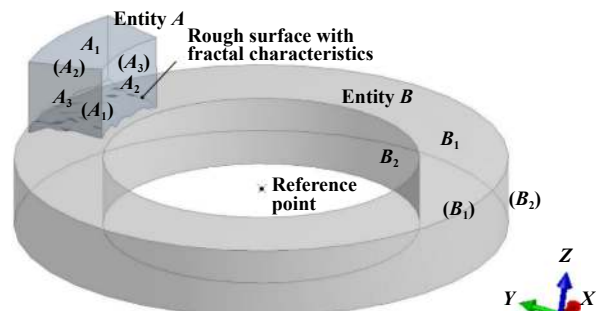


Fig. 1 Fractal contact model

图1 分形接触模型

周向.粗糙实体A:半径 $R_{A外}=190\ \mu\text{m}$ , $R_{A内}=120\ \mu\text{m}$ ,厚度 $H_{A厚}=60\ \mu\text{m}$ ;光滑实体B:半径 $R_{B外}=195\ \mu\text{m}$ , $R_{B内}=110\ \mu\text{m}$ ,厚度 $H_{B厚}=60\ \mu\text{m}$ .

## 1.2 理想模型假设条件

由于模拟计算条件的限制,需要对计算模型作如下假设:

- (1) 摩擦副材料各向同性,且材料热物性参数不随温度改变;
- (2) 摩擦过程符合库伦定律,在滑动接触过程中,摩擦系数保持不变;
- (3) 摩擦消耗的功全部转换为摩擦热,并全部被摩擦副吸收;
- (4) 忽略热辐射影响,认为未接触间隙处传热热阻无限小,接触位置处的热传导为理想导热,即在同一接触点,接触体对应点的瞬时温度相等.

## 1.3 计算模型热边界条件

根据假设条件(3),将摩擦副之间的摩擦功全部转化为摩擦热,作为边界热流输入处理.摩擦热流密度的计算公式为

$$q(x,y,t) = fP_c(x,y,t)V(x,y,t) \quad (3)$$

式中: $q(x,y,t)$ 为摩擦热流密度, $\text{J}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ;  $f$ 为摩擦系数; $P_c(x,y,t)$ 为接触点接触压力, $\text{Pa}$ ;  $V(x,y,t)$ 为接触点相对滑动速度, $\text{m}/\text{s}$ .

摩擦界面上产生的热量为

$$Q = \int_{\Omega} \int_{\Omega} fP_c(x,y,t)V(x,y,t)d\Omega dt \quad (4)$$

式中: $\Omega$ 为计算域; $t$ 为摩擦副相对滑动时间, $\text{s}$ .

根据假设条件(4),本文计算过程中,认为热源在摩擦副端面,再根据摩擦副材料特性及散热环境,让热量在两接触面之间自由分配,即接触区域实体A和B对应点的瞬时温度是相等的.实体A和实体B的热传导方程为

$$\begin{cases} \rho_A c_A \frac{\partial T_A}{\partial t} = k_A \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T_A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T_A}{\partial z} \right) \right] \\ \rho_B c_B \frac{\partial T_B}{\partial t} = k_B \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T_B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T_B}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为材料密度; $c$ 为比热容; $k$ 为热导率; $T$ 为温度; $t$ 为滑动时间.

初始条件: $T_A = T_B = 298\ \text{K}$ ,  $t = 0$

耦合条件: $T_A = T_B$ ,  $q_A + q_B = q(A,B\text{接触区域})$

由于接触面表面形貌不规整的特性,决定了接触只发生在极少数的微凸体,微凸体之间热流以热传导

的形式传递;而在非接触区域由于流体介质的存在,热量以对流换热的形式传递.忽略热辐射影响,对接触面有<sup>[20]</sup>:

$$k_A \frac{\partial T_A}{\partial z} = -[1 - g(m)]h(T_A - T_m) + g(m)q_A \quad (6)$$

$$k_B \frac{\partial T_B}{\partial z} = -[1 - g(m)]h(T_B - T_m) + g(m)q_B \quad (7)$$

其中,  $\begin{cases} g(m) = 1 & \text{接触面上实体AB互相接触的点} \\ g(m) = 0 & \text{接触面上实体AB未接触的点} \end{cases}$

式中: $q$ 为摩擦表面输入的热流密度; $h$ 为接触界面对流换热系数; $k$ 为热导率; $T$ 为温度, $T_m$ 为流体介质温度.

密封环非接触平面 $A_1$ 及 $(B_1)$ 与环境温度下的流体接触,温度梯度相对小,可以假设 $A_1$ 、 $(B_1)$ 是绝热的;同样地,由于回转轴对称,可以假设粗糙实体的侧面 $A_2$ 、 $(A_2)$ 、 $A_3$ 、 $(A_3)$ 和光滑实体的侧面 $B_2$ 、 $(B_2)$ 也是绝热的.

## 1.4 计算模型结构边界条件

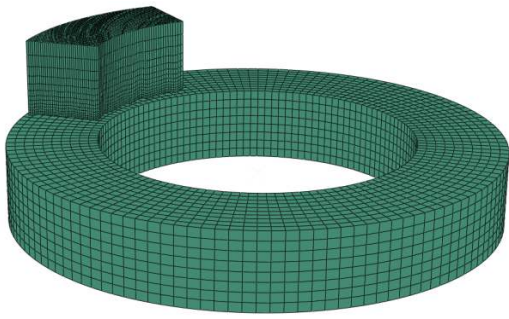
坐标体系如图1所示,在计算时,均布载荷 $P$ 线性加载在粗糙实体A的 $A_1$ 面,约束粗糙实体A的侧面 $A_2$ 、 $(A_2)$ 、 $A_3$ 、 $(A_3)$ 沿 $X$ 、 $Y$ 方向的移动及绕 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴的转动,对于光滑实体B,约束其 $Z$ 方向的位移,建立参考点 $RP(0,0,-30)$ ,将光滑实体与参考点进行刚性约束,在光滑体静止时,约束参考点6个自由度,让两实体平稳地发生接触.之后,外载荷保持不变,给定光滑实体旋转角速度,即给定参考点绕 $Z$ 轴的旋转角速度,让两实体之间发生相对滑动.

## 1.5 热力耦合求解设置

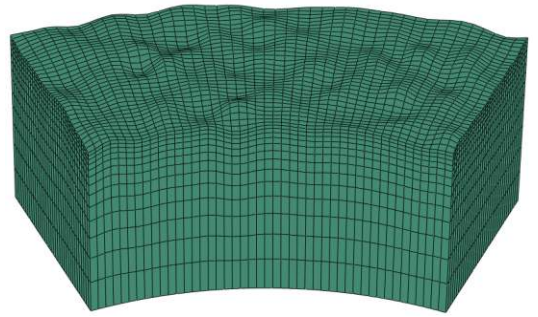
热力耦合数值模拟计算是基于ABAQUS有限元分析软件进行的,采用ABAQUS/Explicit求解方法.接触设定方面,选取刚性光滑实体B的 $B_1$ 面作为主面(Master Surface),柔性粗糙实体A的 $(A_1)$ 面作为从面(Slave Surface);选取有限滑移接触公式来描述接触面之间的相对滑动;选取罚函数法作为求解接触问题的求解算法.由于研究的是热力耦合问题,网格划分选取包含温度自由度的单元类型,粗糙实体A与光滑实体B均采用六面体单元C3D8T进行划分,网格划分如图2(a)所示,粗糙实体单元数目为20 475个,光滑实体单元数目为10 240个,为保证结果的准确性,加密接触界面附近的网格如图2(b)所示.

## 1.6 耦合热应力分析方法

外载荷下相互运动的表面会产生接触压力,导致摩擦热的生成,即接触压力影响接触表面的温度分布;反过来,当温度变化引起热胀冷缩效应会导致热



(a) Mesh generation in computational domain



(b) Enlarged graph of entity A mesh

Fig. 2 Contact model meshing

图2 接触模型网格划分

变形, 又会影响接触压力的变化, 即接触压力、热应力和温度场之间是相互耦合的. 本文作者采用完全热应力耦合分析方法, 求解时, 首先设定初始条件以及边界条件, 初定时间步长, 求解瞬态接触热动力学问题, 得到接触压力、温度场、应力场和热变形, 如果在求解域中任何1个节点上的接触状态参数与上一迭代步所求的接触状态参数之间的残差满足给定的收敛准则, 即认为在该时间步长内计算收敛, 进入下一时间步长计算; 否则, 继续迭代计算, 直到前后接触状态参数近似一致为止. 前一时间步长收敛的接触状态是后一时间步长的初始接触状态, 继续求解, 直至达到设定的总时间. 本文中所用求解器是ABAQUS/Explicit, 其在求解非线性问题时, 能够自动选择合适的时间步长和收敛准则, 以确保得到合适的解.

## 2 算例结果与讨论

### 2.1 参数选择

静环(粗糙实体A)材料为浸呖喃树脂碳石墨M106K, 动环(光滑实体B)材料为钴基碳化钨硬质合金YG8. 由于干摩擦, 两实体之间的干摩擦系数 $\mu$ 取为0.25<sup>[21]</sup>. 材料热物性参数列于表2中.

表2 摩擦副粗糙度及材料物性参数<sup>[18]</sup>

Table 2 Roughness of friction pairs and physical properties of materials

Parameter	Static ring (Entity A)	Moving ring (Entity B)
Density, $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 650	14 500
Specific heat capacity, $c/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	710	875
Thermal conductivity, $k/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	15	80
Thermal expansion coefficient, $\alpha/\mu\text{K}^{-1}$	6.5	5.1
Elastic modulus, $E/\text{GPa}$	16	600
Poisson ratio, $\nu$	0.2	0.24
Friction surface roughness, $R_a/\mu\text{m}$	0.8	Ideal smooth

由于接触非线性, 计算过程难以收敛, 同时因回转运动, 理论上软密封环处于不断被磨损的状态, 表面形貌不断更新. 因此, 本文中只求解滑动发生后短时间内的瞬态摩擦状况. 在40  $\mu\text{s}$ 的时间段内先将30 MPa的载荷线性加载在粗糙实体A的 $A_1$ 面, 加载结束后保持载荷不变, 再给定光滑实体B外径处30 m/s的线速度, 使粗糙实体与光滑实体相对滑动60  $\mu\text{s}$ , 模拟分析机械密封的动环、静环之间的干摩擦滑动.

### 2.2 分析与讨论

#### 2.2.1 热流自由分配方法正确性检验

图3为滑动时间为0.4  $\mu\text{s}$ 时刻粗糙实体A(静环)和光滑实体B(动环)温度分布图. 在滑动0.4  $\mu\text{s}$ 后, 接触微凸体上热量来不及往四周传递, 粗糙表面尚未形成热关联区, 可以看到在接触面上互相接触的两个节点, 节点温度相差很小, 说明本文所使用的热流分配方法是正确的.

#### 2.2.2 粗糙表面温度分布特点及其影响

图4为滑动60  $\mu\text{s}$ 时刻静环A粗糙表面 $A_1$ 温度的分布状况, 可以看到在实际接触的位置点产生大量摩擦热, 由于滑动时间较短, 热量来不及向实体内部传递, 积聚在接触点, 导致接触点温度急剧升高, 出现“热点”. 摩擦端面的局部温升, 可能导致碳石墨密封环出现“疤痕现象”, 从而破坏原有的密封状态, 造成密封失效<sup>[22]</sup>. 由于粗糙面微凸体形貌分布不均匀, 接触压力分布不均匀, 导致粗糙表面温度分布也不均匀, 不同区域温度差距较大, 会产生较大的热应力. 摩擦副端面在不均匀的机械应力及热应力的综合作用下易发生磨损破坏.

#### 2.2.3 不同接触点温度变化

为了讨论接触点的温度变化规律, 选取滑动过程中温升较大的微凸体节点研究, 如图4的A-Node 13583, B- Node 1680, C- Node 4200, D- Node16338. 图5为A、

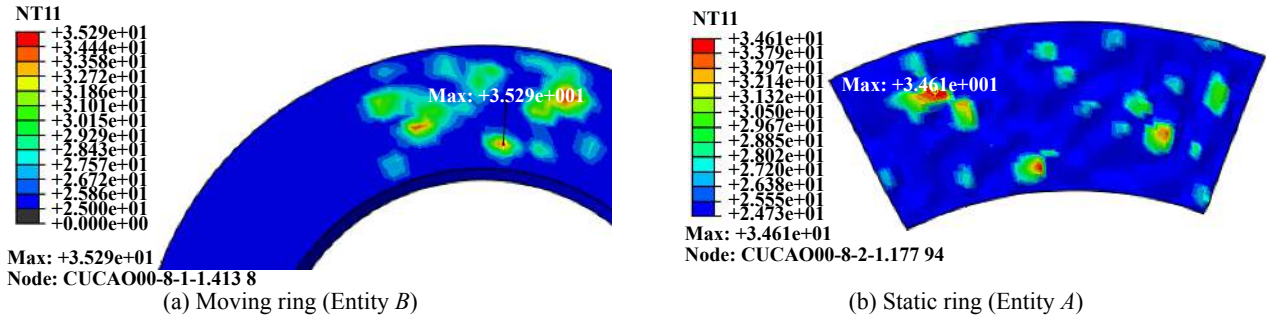


Fig. 3 Temperature distribution of two entities at sliding time of 0.4  $\mu\text{s}$ (Unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

图 3 滑动0.4  $\mu\text{s}$ 时刻两实体温度分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

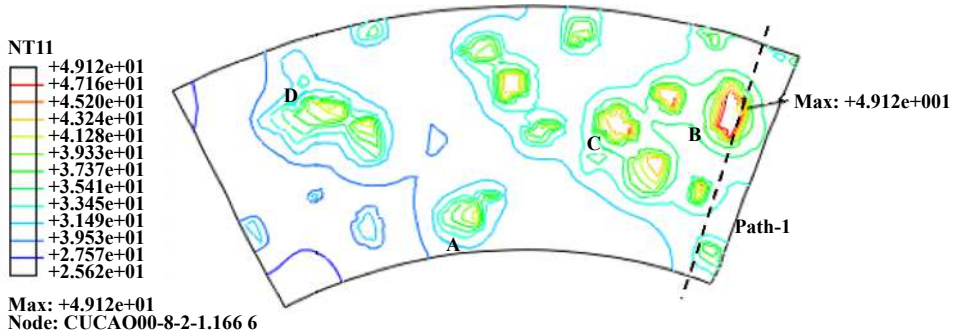


Fig. 4 Temperature distribution of  $A_1$  on rough surface of static ring  $A$  at a sliding time of 60  $\mu\text{s}$ (Unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

图 4 滑动60  $\mu\text{s}$ 时刻静环 $A$ 粗糙表面 $A_1$ 温度分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

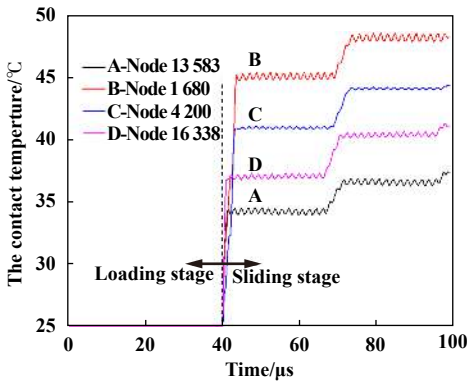


Fig. 5 Temperature change history of different nodes

图 5 不同节点温度变化历程

B、C和D节点的温度变化历程。

由图5可以看到,在滑动发生后的极短时间内,接触点温度急剧升高,之后温度在某个值附近平稳波动,在滑动发生后的某个时间段内,温度又出现小幅度上升,之后又呈平稳的波动状态,可以预测随着滑动状态进行,节点温度将呈阶梯状上升,本文中所建立的转动接触模型得出的节点温升规律与文献[20]得到的接触节点规律是一致的,同时与早期的Archard闪温上升理论[23]也是一致的。在滑动后的瞬间,接触位置生成的摩擦热来不及向四周传递,热量全部积聚在

微凸体内部,因此接触节点温度急剧升高,以节点B-1680为例,在滑动后的3.2  $\mu\text{s}$ 内,节点温度由25  $^{\circ}\text{C}$ 快速上升到44.6  $^{\circ}\text{C}$ ;在滑动后期,由于热量向粗糙实体内部Z方向不断传递,温升速率减缓,从滑动后的3.2~60  $\mu\text{s}$ 内,节点B-1680温度由44.6  $^{\circ}\text{C}$ 上升到49.11  $^{\circ}\text{C}$ 。在快速升温结束后一定时间内,摩擦热生成和热量传递达到平衡状态,由于摩擦热及接触压力之间不断的耦合,接触压力及摩擦热流处于不断变化中,粗糙面接触点温度始终处于稳定波动状态。随着滑动的进行,摩擦热不断在粗糙实体内部Z方向积聚,节点温度仍将不断升高。

高温往往造成石墨材料密封环摩擦端面氧化,使其在干摩擦条件下的润滑方式发生改变,由物理吸附膜润滑变为化学反应膜润滑,增大了石墨材料的磨损率[21]。同时脱落的氧化物会作为磨粒造成二次磨损[1]。因此在干运转机械密封研究工作中,必须开发出热传导系数高、摩擦系数低的耐高温摩擦副材料。

### 2.2.4 沿密封环轴向(Z方向)的温度变化

摩擦副相对滑动,出现最大温度的微凸体节点附近接触微凸体较多,微凸体之间的相互作用明显,研究密封环轴向温度变化规律最能反映实际滑动接触

过程中实体内部的温度分布. 如图4所示, 沿经过最大温度节点1 666的虚线Path-1对粗糙实体进行剖分, 研究粗糙实体内部的温度分布情况.

如图6为滑动过程中粗糙实体过最大温度的剖面(即虚线剖切面)上的温度分布图. 可以看出, 随着滑动过程的进行, 热量不断沿轴向往实体内部传递, 在滑动初期0~3.6  $\mu\text{s}$ , 由于热传导的滞后性, 热量主要积聚在微凸体内部, 因此温升主要集中在微凸体接触节点及其邻近区域; 滑动过程中热量不断往四周传递, 因此在滑动后期在粗糙实体内部轴向也出现了温度梯度; 整个滑动过程中, 微凸体表面温度不断升高; 由于表面温度分布不均匀, 粗糙实体在内部温度分布也不均匀; 同时可以发现, 最高温度节点处于微凸体表面, 这是因为热量是在接触点生成, 滑动过程中热量不断在接触微凸体累积, 导致粗糙表面接触节点温度较高.

如图6(d)所示路径Path-2为滑动结束的60  $\mu\text{s}$ 时刻粗糙面上最高温度节点1 666与实体背面节点1 653间的连线, 图7为路径Path-2上在3.6  $\mu\text{s}$ 及60  $\mu\text{s}$ 时刻温度沿轴向的变化趋势. 可以看出, 在粗糙表面及亚表层区域温度梯度较大, 在远离节点表面的区域, 温度梯度较小, 较大的温度梯度使得亚表层区域热应力较

大, 在机械应力及热应力等的综合作用下, 经长期相对运动, 亚表层区域极易出现失效破坏; 在3.6  $\mu\text{s}$ 时刻, 热量在厚度方向上大概传递了15  $\mu\text{m}$ 的距离, 厚度方向上有20.35  $^{\circ}\text{C}$ 的温差; 在60  $\mu\text{s}$ 时刻, 在背面与节点1 666对应的节点1 653也有了0.8  $^{\circ}\text{C}$ 的温升, 厚度方向上有23.32  $^{\circ}\text{C}$ 的温差. 随着滑动进行, 实体内部温度梯度进一步增大, 导致更大的热应力, 因此摩擦副长期地干运转后, 脆性材料很容易出现破坏.

### 2.2.5 VonMises应力分析

在粗糙实体与光滑实体滑动接触过程中, 外载荷引起的机械应力、温度不均匀产生的热应力以及摩擦力的综合效果称之为等效应力(VonMises应力), 其与接触面的磨损、端面失效和破坏息息相关. 相关研究结果<sup>[24]</sup>表明粗糙表面与刚性平面弹塑性接触滑动, 在粗糙表面接触点Z方向一定距离内存在1个较大的拉应力, 此拉应力一方面阻止了裂纹往轴向扩展, 另一方面加速了裂纹沿平行于滑动摩擦方向扩展. 同样地, 本文中研究了机械密封端面干摩擦运动模型滑动时沿平行于摩擦表面方向的应力, 讨论其对裂纹的产生和扩展影响关系.

Node-2730为粗糙表面上最大VonMises应力节

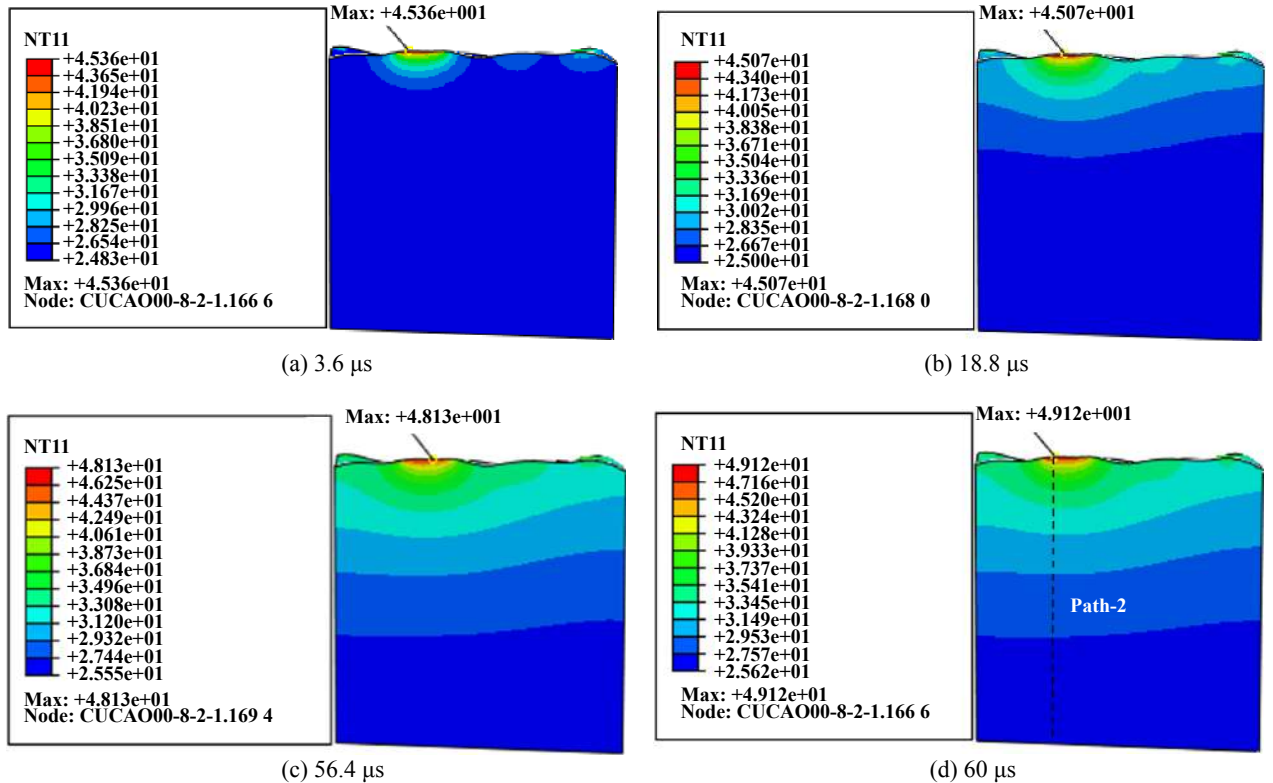


Fig. 6 Axial temperature distribution of the node where the maximum temperature of rough solid is located during sliding process(Unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

图6 滑动过程中粗糙实体最大温度所在节点轴向温度分布图(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

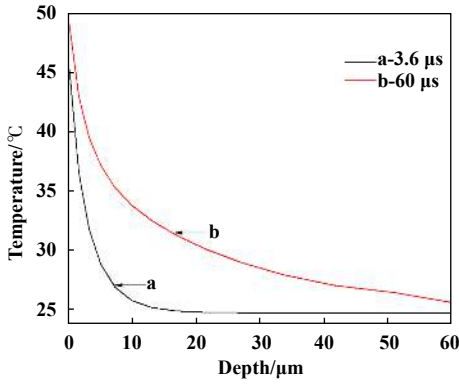


Fig. 7 Temperature along Path-2

图 7 沿Path-2温度变化趋势

点, 其在实体背后对应节点为Node-2717. 图8表示了不同时刻下Node-2730与Node-2717之间所有节点的等效应力在Y方向上的分量, 即表示出了该连线上 $\sigma_{yy}$ 沿Z方向的变化规律.  $t=0 \mu\text{s}$ 表示加载结束滑动前;  $t=0.4 \mu\text{s}$ 表示滑动瞬间;  $t=2.8 \mu\text{s}$ 表示短暂滑动后;  $t=60 \mu\text{s}$ 表示滑动结束.

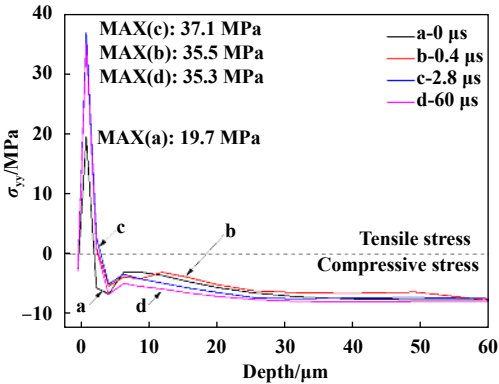


Fig. 8 Variation of VonMises stress component in Y direction along Z direction

图 8 VonMises应力在Y方向的分量 $\sigma_{yy}$ 沿Z方向的变化规律

结果表明, 等效应力在Y方向的分量 $\sigma_{yy}$ 在接触点表面及亚表层附近呈压应力状态, 之后在很小的距离范围内( $z=0.12 \mu\text{m}$ 到 $z=3.3 \mu\text{m}$ 之间)变为拉应力, 在远离接触点的广大区域为压应力. 滑动摩擦过程中, 最大拉应力点存在于接触点后方很小的尺寸的位置, 大概为 $z=1.3 \mu\text{m}$ 处.

如图8所示, 滑动过程的不同时刻下, 粗糙体内部压应力数值波动不大, 拉应力存在较大变化.  $t=0 \mu\text{s}$ 到 $t=0.4 \mu\text{s}$ 阶段, 由于滑动速度的突变, 在摩擦剪切应力的作用下, 承担外载荷的微凸体的数目和形状改变, 接触面积、接触应力、等效应力相应改变, 导致粗糙体内部的最大拉应力增大80.2%, 拉应力层厚度增加28%.

在 $t=0.4 \mu\text{s}$ 到 $t=2.8 \mu\text{s}$ 阶段, 由于摩擦热与接触压力处于不断耦合状态, 热应力不断发生变化, 摩擦端面应力水平处于不断的波动状态, 所以导致拉应力大小及拉应力层厚度有细微变化(拉应力增大4.5%, 拉应力层厚度增加10%).  $t=2.8 \mu\text{s}$ 到 $t=60 \mu\text{s}$ 阶段可以预见, 随着滑动过程传热进行, 粗糙面温差越来越小, 热应力相应变小, 节点应力波动幅度越来越小, 同一节点的拉应力水平趋于稳定. 在相对滑动过程中, 粗糙体轴向内部一直存在压-拉-压应力变化, 可能导致裂纹沿滑动方向扩展. 拉应力的存在可能会导致裂纹扩展, 这点印证了文献[25]的说法: 当裂纹扩展到一定程度, 接触点表面材料将以薄片的形式脱落下来. 有学者研究了浸渍呋喃树脂碳石墨与硬质合金干摩擦后电镜形貌照片, 结果表明被剥落下的材料会重新碾压在软材料表面, 形成凹坑、梨沟以及断裂层状结构[26].

当机械密封端面材料内表层存在缺陷的时候, 经过一段时间的运转, 很容易导致裂纹的产生, 由于脆性材料的抗拉能力较差, 更容易产生裂纹扩展. 机械密封软环的材料一般选用碳石墨, 碳石墨是一种脆性材料, 在摩擦滑动过程中极易开裂、磨损, 因此在选用软质环时应避免摩擦端面内部存在缺陷. 本文的研究有助于对上述现象的解读.

### 3 结论

a. 接触面温度场分布不均匀, 局部温度很高, 在接触微凸体中心区域出现极值. 在滑动后很短时间内温度急剧上升, 随着滑动进行, 接触节点温度继续升高, 但是温升速率减缓.

b. 粗糙体轴向(Z方向)温度梯度较大, 其亚表层区域存在较大的热应力, 在热应力及机械应力的综合作用下, 亚表层材料很容易出现破坏.

c. 在接触微凸体内部轴向一定厚度范围内, 存在1个拉应力区域, 最大拉应力点存在于接触点轴向很小的尺寸的位置. 滑动行为会使微凸体内部拉应力区域有微小扩大, 拉应力的数值也有轻微的增大. 拉应力的存在可能会导致裂纹扩展.

d. 在相对滑动过程中, 接触微凸体轴向上应力状态是变化的. 接触点表面及亚表层附近呈压应力状态, 之后在很小的距离范围内变为拉应力, 在远离接触点的广大区域为压应力.

### 参考文献

[1] Zhang Yongzhen. Dry tribology of materials[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese) [张永振. 材料的干摩擦学[M]. 科学出版

- 社, 2012].
- [2] Sun Jianjun, He Xiaoyuan, Wei Long, et al. Fractal dimension of seal end face for cost-effective finishing contacting mechanical seals[J]. Tribology, 2010, 30(4): 414–418 (in Chinese) [孙见君, 何小元, 魏龙, 等. 接触式机械密封端面经济加工分形维数[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 414–418].
- [3] Mandelbrot B B, Ness J W V. Fractional brownian motions, fractional noises and applications[J]. Siam Review, 1968, 10(4): 422–437. doi: [10.1137/1010093](https://doi.org/10.1137/1010093).
- [4] Chen Guoan, Ge Shirong, Wang Junxiang. Application of fractal theory in tribology[J]. Tribology, 1998, 18(2): 84–89 (in Chinese) [陈国安, 葛世荣, 王军祥. 分形理论在摩擦学研究中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(2): 84–89]. doi: [10.16078/j.tribology.1998.02.017](https://doi.org/10.16078/j.tribology.1998.02.017).
- [5] Majumdar, A & Bhushan, Bharat. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of Tribology-Transactions of the Asme, 1991, 113: 1–11. doi: [10.1115/1.2920588](https://doi.org/10.1115/1.2920588).
- [6] Wang S, Komvopoulos K A. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: Part I-elastic contact and heat transfer analysis[J]. Journal of Tribology, 1994, 116(4): 812–822. doi: [10.1115/1.2927338](https://doi.org/10.1115/1.2927338).
- [7] Wang S, Komvopoulos K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: Part II-multiple domains, elastoplastic contacts and applications[J]. Journal of Tribology, 1994, 116(4): 824–832. doi: [10.1115/1.2927341](https://doi.org/10.1115/1.2927341).
- [8] Cheng yu, Yuan yuan, Gan li, et al. The elastic-plastic contact mechanics model related scale of rough surface[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(3): 485–492 (in Chinese) [成雨, 原园, 甘立, 等. 尺度相关的分形粗糙表面弹塑性接触力学模型[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(3): 485–492]. doi: [10.3969/j.issn.1000-2758.2016.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2758.2016.03.020).
- [9] Song H, Giessen E V D, Liu X. Strain gradient plasticity analysis of elasto-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2016, 96: 18–28.
- [10] Wei Long, Gu Boqin, Feng Xiu, et al. Contact fractal model for friction faces of mechanical seals[J]. Ciesc Journal, 2009, 60(10): 2543–2548 (in Chinese) [魏龙, 顾伯勤, 冯秀, 等. 机械密封摩擦副端面接触分形模型[J]. 化工学报, 2009, 60(10): 2543–2548].
- [11] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Influencing factors analysis and experiments of friction coefficient between the end faces for contact mechanical seals[J]. Tribology, 2016, 36(3): 354–361 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 接触式机械密封端面摩擦系数影响因素分析与试验[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3): 354–361]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.03.013](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.03.013).
- [12] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Leakage fractal model of mechanical seals based on average film thickness and pressure flow rate factor[J]. Tribology, 2018, 38(6): 692–699 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 基于平均膜厚和压力流量因子的机械密封泄漏分形模型[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(6): 692–699]. doi: [10.16078/j.tribology.2018015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018015).
- [13] Ding Xuexing, Yan Ruqi, Jia Yonglei. Construction and analysis of fractal contact mechanics model for rough surface based on base length[J]. Tribology, 2014, 34(4): 341–347 (in Chinese) [丁雪兴, 严如奇, 贾永磊. 基于基底长度的粗糙表面分形接触模型的构建与分析[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 341–347]. doi: [10.16078/j.tribology.2014.04.010](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2014.04.010).
- [14] Lestyán Z, Váradi K, Albers A. FE contact and thermal simulation of an alumina-steel dry sliding friction pair[J]. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2005, 49: 35–44.
- [15] Lang A, Klüppel, Manfred. Influences of temperature and load on the dry friction behaviour of tire tread compounds in contact with rough granite[J]. Wear, 2017, 380-381: 15–25. doi: [10.1016/j.wear.2017.02.047](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.047).
- [16] Hu Qiong, Sun Jianjun, Ma Chenbo, et al. Theoretical prediction of mixed frictional heat of mechanical seals based on shoulder-shoulder contact model of asperities[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 102–108 (in Chinese) [胡琼, 孙见君, 马晨波, 等. 基于微凸体侧接触模型的机械密封端面混合摩擦热理论预测[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 102–108].
- [17] Ding Xuexing, Yan Ruqi, Chen Jinlin, et al. Fractal model of temperature distribution of frictional interface in contacting mechanical seals[J]. CIESC Journal, 2014, 65(11): 4543–4550 (in Chinese) [丁雪兴, 严如奇, 陈金林, 等. 接触式机械密封摩擦界面温度分布分形模型[J]. 化工学报, 2014, 65(11): 4543–4550]. doi: [10.3969/j.issn.0438-1157.2014.11.047](https://doi.org/10.3969/j.issn.0438-1157.2014.11.047).
- [18] Ding Xuexing, Wang Wending, Jin Haijun, et al. A numerical simulation study of frictional characteristics of seal faces on the starting and stopping process of a dry gas seal[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(2): 91–96 (in Chinese) [丁雪兴, 王文鼎, 金海俊, 等. 干气密封摩擦副启停阶段摩擦特性的仿真研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(2): 91–96]. doi: [10.3969/j.issn.1006-396X.2017.02.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2017.02.017).
- [19] Yan W, Komvopoulos K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7): 3617–3624. doi: [10.1063/1.368536](https://doi.org/10.1063/1.368536).
- [20] Huang Jianmeng, Gao Chenghui, Zhou Chao. Influence of different contact deformation between a rough solid and a flat one on the VonMises stress under the thermo-mechanical coupling[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(6): 1178–1187 (in Chinese) [黄健萌, 高诚辉, 周超. 粗糙面/平面接触不同变形特性对热力耦合下VonMises等效应力的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(6): 1178–1187].
- [21] Yan Yutao, Li Xuejuan, Hu Guangyang, et al. Friction/wear behaviors and predication of graphite seal material under high temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 314–320 (in Chinese) [闫玉涛, 李雪娟, 胡广阳, 等. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 314–320].
- [22] Hou Yujie, Cheng Nuo, Li Qiuxia, et al. Discuss the blistering of the



- carbon/graphite seal rings[J]. Carbon, 2017(3): 43–46, 42  
(in Chinese) [侯玉杰, 程诺, 李秋霞, 等. 碳石墨密封材料疱疤现象的产生原因及解决方法研究[J]. 炭素, 2017(3): 43–46, 42].
- [23] Archard J F. The temperature of rubbing surfaces[J]. Wear, 1959, 2(6): 438–455. doi: [10.1016/0043-1648\(59\)90159-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(59)90159-0).
- [24] Huang Jianmeng, Gao Chenghui. Thermo-mechanical research on frictional sliding between elasto-plastic rough solid and rigid flat[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 87–92  
(in Chinese) [黄健萌, 高诚辉. 弹塑性粗糙体/刚体平面滑动摩擦过程热力耦合分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 87–92].
- [25] Suh N P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973, 25(1): 111–124. doi: [10.1016/0043-1648\(73\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90125-7).
- [26] Sun Jiapeng. Friction properties of impregnated carbon graphite sealing material in vaccum conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012(in Chinese) [孙家鹏. 浸渍碳石墨密封材料在真空条件下的摩擦性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012].

DOI: 10.16078/j.tribology.2019063

# 六氟乙酰丙酮离子液体的合成及摩擦学性能研究

杨得锁\*, 李文倩, 马琳, 韩云燕, 王冬梅, 凡明锦\*

(宝鸡文理学院化学化工学院 陕西省植物化学重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:** 合成了三种含有六氟乙酰丙酮阴离子和不同烷基链长咪唑阳离子的室温离子液体( $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ ;  $n=4, 6, 8$ ) 润滑剂, 以 1-丁基-3-甲基咪唑双三氟甲烷磺酰基亚胺盐(L-F104)为参照样, 研究了它们作为不同金属摩擦副润滑剂的摩擦学性能和理化性质, 并探索了其结构中阳离子烷基链长的影响规律. 结果表明:  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  离子液体对金属基底材料腐蚀较轻, 常温下作为钢/铜和钢/铝摩擦副的润滑剂均具有良好的润滑性能, 并且随着其结构中阳离子烷基链的增长, 热稳定性和黏度呈递增趋势, 减摩抗磨作用也更加优异.

**关键词:** 六氟乙酰丙酮; 离子液体; 润滑剂; 腐蚀性; 摩擦学性能

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0746-10

## The Synthesis and Tribological Properties of Hexafluoroacetylacetone Ionic Liquid Lubricants

YANG Desuo\*, LI Wenqian, MA lin, HAN Yunyan, WANG Dongmei, FAN Mingjin\*

(Shaanxi Key Laboratory of Phytochemistry, College of Chemistry & Chemical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Shaanxi Baoji 721013, China)

**Abstract:** Three kinds of room temperature ionic liquid ( $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ ,  $n=4,6,8$ ) lubricants containing hexafluoroacetylacetone anion and imidazole cations were synthesized. Taking 1-butyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide (L-F104) as a control sample, the lubricating and physicochemical properties of the ionic liquid as lubricants for different friction pairs were studied, and the influence of the length of cationic alkyl chain on their properties was explored. The results show that the ionic liquids were less corrosive to the metal substrates. At room temperature, they had good lubrication performance on steel/copper and steel/aluminium friction pairs. With the increase of cationic alkyl chains, their thermal stability and viscosity increased, and their friction reducing and anti-wear properties were also improved.

**Key words:** hexafluoroacetylacetone; ionic liquids; lubricants; corrosivity; tribological properties

运动部件之间的摩擦和磨损是造成机械设备能量损失的重要原因, 因此必须不断开发更有效的润滑剂和润滑添加剂以减少摩擦损失和磨损失效<sup>[1-5]</sup>. 针对这一挑战, 我国研究人员于2001年将离子液体(ILs)首次引入润滑领域<sup>[6-7]</sup>. ILs一般是由较大的有机阳离子

和有机或无机阴离子组成的熔融温度低于100 °C的盐<sup>[8-9]</sup>, 具有较大的黏度、较好的热稳定性和氧化安定性. 它的另一显著特点是结构具有高度可调节性, 可以针对特定应用将各种阴离子和阳离子组合, 每种组合都有独特的性质<sup>[10-12]</sup>. 理论上, ILs的高稳定性有助

Received 12 April 2019, revised 17 September 2019, accepted 19 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: yangds@bjwlxy.edu.cn, fanmingjin@bjwlxy.edu.cn, Tel: +86-917-3566508, +86-917-3565561.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51675006) and an Open Project of State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL-1812).

国家自然科学基金面上项目(51675006)和固体润滑国家重点实验室开放课题项目(LSL-1812)资助.

于提高它们的使用寿命, 高黏度值可在较高负荷下提供有效的表面分离, 结构的高度可调性可以使其具有不同功能, 所以在过去十几年, ILs 作为潜在的高性能、环保型润滑剂和润滑剂添加剂受到广泛关注<sup>[13-16]</sup>. 研究表明金属表面接触凸点在摩擦过程中因电子外逸形成正电荷点, 离子液体的阴离子可以很容易地吸附到磨损金属表面的带正电荷的位置上, 而阳离子则通过与阴离子间的相互作用依次组装在摩擦副表面, 形成基于物理化学吸附作用的离子液体保护膜<sup>[17]</sup>. 其次, 在恶劣的滑动条件下, 金属摩擦副表面可与离子液体分子中的 O、N 和卤素等发生化学反应, 形成化学反应保护膜, 从而使离子液体具有优异的润滑性能<sup>[18-21]</sup>.

目前, 在润滑领域对离子液体的研究主要是四氟硼酸、六氟磷酸、双三氟甲烷磺酰亚胺、磺酸和羧酸等类型离子液体的研究<sup>[22]</sup>, 以碳原子为负电荷中心的离子液体用于润滑剂的研究鲜有报道. 本文中, 我们合成了三种以碳原子作为负电荷中心的六氟乙酰丙酮咪唑离子液体 ( $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ ,  $n=4, 6, 8$ ), 并以 1-丁基-

3-甲基咪唑双三氟甲烷磺酰基亚胺盐(L-F104)作为参照样, 探究了它们在钢/铜和钢/铝摩擦副上的摩擦学性能.

## 1 试验部分

### 1.1 离子液体的合成

将六氟乙酰丙酮(10 mmol)与 5% 的氢氧化钠溶液(10 mmol)1:1 混合于室温下搅拌反应 18 h, 然后加入咪唑氯盐(10 mmol)、乙腈, 室温下搅拌反应 24 h, 待反应结束后得到  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  ( $n=4, 6, 8$ ) 粗产物, 旋蒸除去乙腈和水, 过滤并收集滤液, 然后将其进行萃取. 粗产物  $[C_4\text{mim}][\text{hfac}]$  用乙酸乙酯萃取,  $[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$  和  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$  用甲苯萃取, 将有机相进行多次水洗后蒸除溶剂, 70 °C 真空干燥得到目标产物  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  ( $n=4, 6, 8$ ) 离子液体. 试验所用六氟乙酰丙酮(质量分数 99%) 购于北京百灵威科技有限公司, 咪唑氯盐及参照样 L-F104 购于兰州化学物理研究所. 离子液体结构列于表 1 中.

表 1 所采用润滑剂的分子结构  
Table 1 Structure of the used lubricants

Lubricant	Structure	
	Cation	Anion
L-F104		
$[C_4\text{mim}][\text{hfac}]$		
$[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$		
$[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$		

使用核磁共振波谱(Agilent 400 Mz,  $^1\text{H}$  NMR: 400 MHz,  $^{13}\text{C}$  NMR: 100 MHz, TMS为内标)鉴定了所合成离子液体的纯度和结构, 具体数据如下:

$[C_4\text{mim}][\text{hfac}]$ :  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 10.64 (s, 1H), 7.13~7.11 (m, 2H), 5.68 (s, 1H), 4.25~4.19 (m, 2H), 3.99 (s, 3H), 1.87~1.77 (m, 2H), 1.40~1.29 (m, 2H), 0.95~0.91 (t,  $J = 7.4$  Hz, 3H).  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 174.4, 174.1, 140.5, 122.6, 121.3, 119.9, 117.0, 85.0, 49.9, 36.4, 32.3, 19.5, 13.3.

$[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$ :  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 10.83 (s, 1H), 7.11~7.09 (d,  $J=1.60$  Hz, 2H), 5.70 (s, 1H), 4.26~4.20 (m, 2H), 4.01 (s, 3H), 1.88~1.79 (m, 2H), 1.29 (s, 6H), 0.91~0.83 (m, 3H).  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 174.4, 174.1, 141.0, 122.4, 121.2, 119.9, 117.0, 85.0, 50.2, 36.5, 31.1, 30.4, 26.0, 22.5, 14.0.

$[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$ :  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 10.93 (s, 1H), 7.10~7.08 (m, 2H), 5.72 (s, 1H), 4.29~4.19 (m, 2H), 4.02 (s, 3H), 1.90~1.79 (m, 2H),

1.38~1.15 (d, J=20.4 Hz, 10H), 0.90~0.84 (t, J=6.9 Hz, 3H).  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  (ppm): 174.5, 174.2, 141.3, 122.4, 121.1, 119.9, 117.0, 85.1, 50.3, 36.6, 31.8, 30.5, 29.1, 29.0, 26.3, 22.7, 14.1.

## 1.2 黏度及热稳定性测定

使用石油产品运动黏度仪(SYP1003-III)在40和100 °C下对离子液体的运动黏度进行测试并计算黏度指数;采用STA449C TGA-DSC(NETZSCH)同步热分析仪对热稳定性能进行分析.测试条件:氮气气氛下,从25 °C开始以10 °C/min的速率升温至600 °C.

## 1.3 铜片腐蚀试验

采用标准方法GB-T5096-1985(91)测试离子液体的腐蚀性能.具体方法如下:将规格为12.5 mm×12.5 mm×3 mm的铜片用CW800-CW2000的SiC砂纸进行打磨,丙酮清洗铜片表面,自然风干.将其放入小样品瓶,加入离子液体直至将铜片完全浸没,然后将其在100 °C恒温的鼓风干燥箱中放置1 d.试验结束,待温度降到室温后,用丙酮清洗铜片,自然风干.对试验后的铜片拍照并用扫描电子显微镜分析其表面,根据铜片表面的颜色和粗糙度来评价离子液体的腐蚀性.

## 1.4 摩擦学性能测试

采用德国Optimol油脂公司的SRV-V微动振动摩擦磨损试验机测定了试样的摩擦学性能,摩擦副接触

方式为球-盘点接触.测试条件:频率25 Hz、振幅1 mm、时间30 min、载荷100 N,上试球为直径10 mm的AISI 52100钢球(HRC 59~61),下试盘为直径24 mm,厚度7.9 mm的ZQSn663铜盘(HV130~160)及2024铝盘(HV140~170).测试之前,所有下试盘用CW800-CW2000的SiC砂纸打磨并用乙醇浸泡的棉球擦拭干净.用光学表面轮廓仪(BRUKER-NPFLEX 3D)测试磨损体积.

## 1.5 磨斑表面分析

将摩擦后的下试盘用乙醇超声清洗,并采用扫描电子显微镜(SEM)(FEI Quanta 250)和X射线光电子能谱仪(XPS)(NEXSA)进行分析,推断可能的润滑机理,以C1s峰(284.8 eV)的结合能为内标.

## 2 结果与讨论

### 2.1 黏度及热稳定性

试验所合成的 $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体及参照样L-F104的黏度及黏度指数如表2所示.从表2中可以看到,三种 $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体在100 °C时的黏度及黏度指数低于参照样L-F104,但40 °C时的黏度高于参照样L-F104.而且随着烷基链长度的增加, $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的黏度及黏度指数基本呈现增大趋势.这是因为增加烷基侧链的长度会增加分子之间的范德华力,从而使其黏度和黏度指数有所增加.

表2 所采用离子液体的运动黏度、黏度指数以及热分解温度

Table 2 The kinematic viscosity, viscosity index and onset decomposition temperature of the used ionic liquids

Lubricants	Kinematic viscosity/(mm <sup>2</sup> /s)		Viscosity index	Onset decomposition temperature/ °C
	40 °C	100 °C		
L-F104	19.91	4.52	146	379.9
$[\text{C}_4\text{mim}][\text{hfac}]$	22.43	3.86	25	273.6
$[\text{C}_6\text{mim}][\text{hfac}]$	22.42	3.92	36	279.1
$[\text{C}_8\text{mim}][\text{hfac}]$	23.23	4.26	78	282.4

由表2还可以看出, $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体热稳定性较好,其分解温度均高于250 °C,初始分解温度随着烷基链的增长而有所增加,这可能归因于分子量的增加使分子间范德华力增大,因而热稳定性有所增加<sup>[23]</sup>.在 $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体中, $[\text{C}_8\text{mim}][\text{hfac}]$ 的热稳定性最好,热分解温度达到282 °C.参照样L-F104的热分解温度接近400 °C,说明与参照样相比, $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的热稳定性略差.

### 2.2 对铜片的腐蚀性

图1给出了三种 $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体及参照样L-F104的铜片腐蚀试验照片及扫描电镜图片(放大3 000倍).图1第一行和第二行是离子液体在100 °C铜片腐蚀试验前后的照片,从图中可以看出,无色的

L-F104在100 °C下变为黄绿色, $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体颜色也有很大程度的加深,表明离子液体在与铜片接触时发生了复杂的反应,可能存在对铜片的腐蚀和离子液体自身的分解<sup>[19]</sup>.从图1的第三行和第四行可以看出经L-F104浸泡过的铜片颜色较暗,磨痕较深,表面可以看到大片明显的腐蚀点.所合成的 $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体浸泡过的铜片颜色和磨痕都较浅,而且观察不到较为明显蚀点.这些现象均表明,与L-F104相比, $[\text{C}_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体对铜片的腐蚀程度较轻.

### 2.3 摩擦学性能

#### 2.3.1 在钢/铜摩擦副上的摩擦学性能

##### 2.3.1.1 常温摩擦学性能

从25 °C下几种离子液体在钢/铜摩擦副上的摩擦

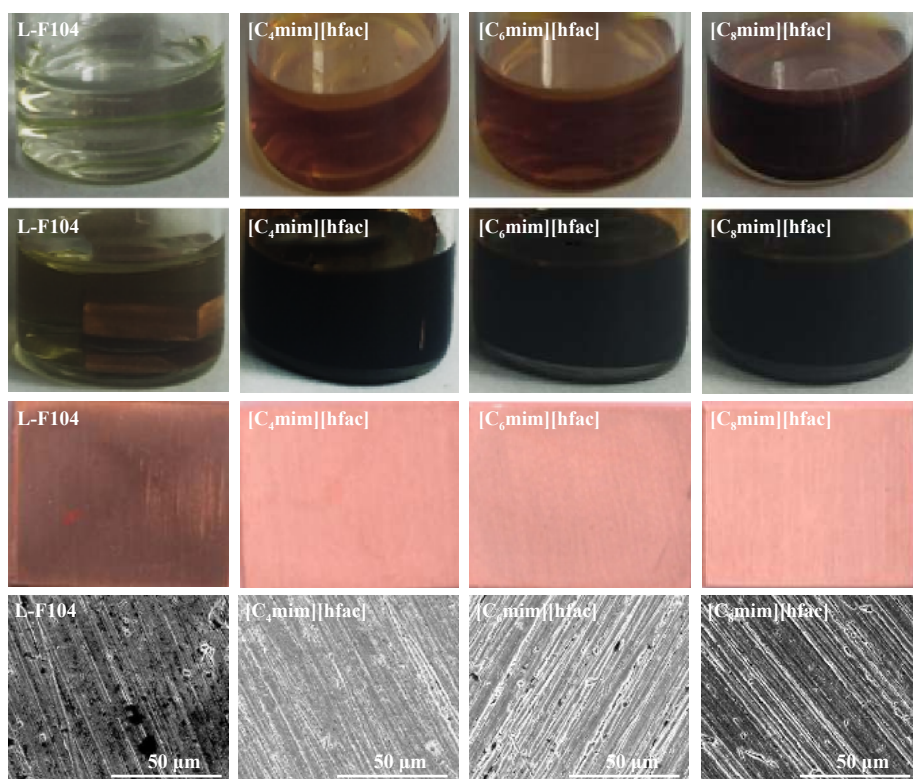


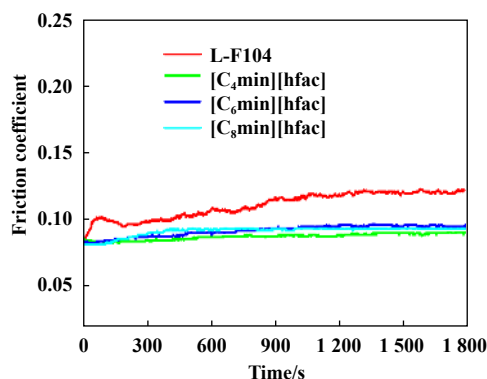
Fig. 1 Photographs and SEM images of the corrosion copper sheets

图 1 铜片腐蚀试验照片和扫描电镜图片

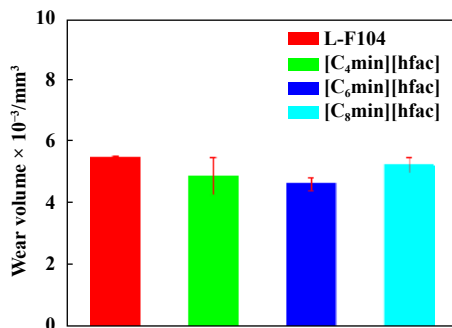
系数和磨损体积图(见图2)可以看出, L-F104的摩擦系数和磨损体积较大, 且随着时间的推移摩擦系数不断增大. 而所合成的三种 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的摩擦系数和磨损体积较小, 摩擦系数在整个测试过程中均较为稳定, 保持在0.08左右. 此外, 观察25 °C下经不同离子液体润滑后的下试样铜块的磨斑形貌图(见图3)可以看到, 在摩擦过程中L-F104形成的磨斑表面存在较深的犁沟, 磨粒磨损较为严重, 而其他三种离子液体的磨斑表面只有较浅的犁沟. 由此可见,  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的减摩抗磨性能优于参照样L-F104.

### 2.3.1.2 高温摩擦学性能

图4为100 °C下在钢/铜摩擦副上几种离子液体的摩擦系数和磨损体积. 从图4中可以看出, 高温时L-F104的摩擦系数和磨损体积较大, 而所合成的 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的摩擦系数和磨损体积较小. 随着试验的进行,  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$ 和 $[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$ 的摩擦系数呈明显下降的趋势, 它们的磨损体积与L-F104相比降低了约50%以上. 这三种离子液体的抗磨性能随着咪唑阳离子侧链烷基链的增长而有所增加. 此外, 从图5可以看到L-F104的磨斑体积较大, 表面有一些蚀点,



(a) Friction coefficient



(b) Wear volume

Fig. 2 Friction coefficient (a) and wear volume (b) of the ionic liquids on steel/copper friction contacts at 25 °C

图 2 25 °C下所采用离子液体在钢/铜摩擦副上的摩擦系数及磨损体积

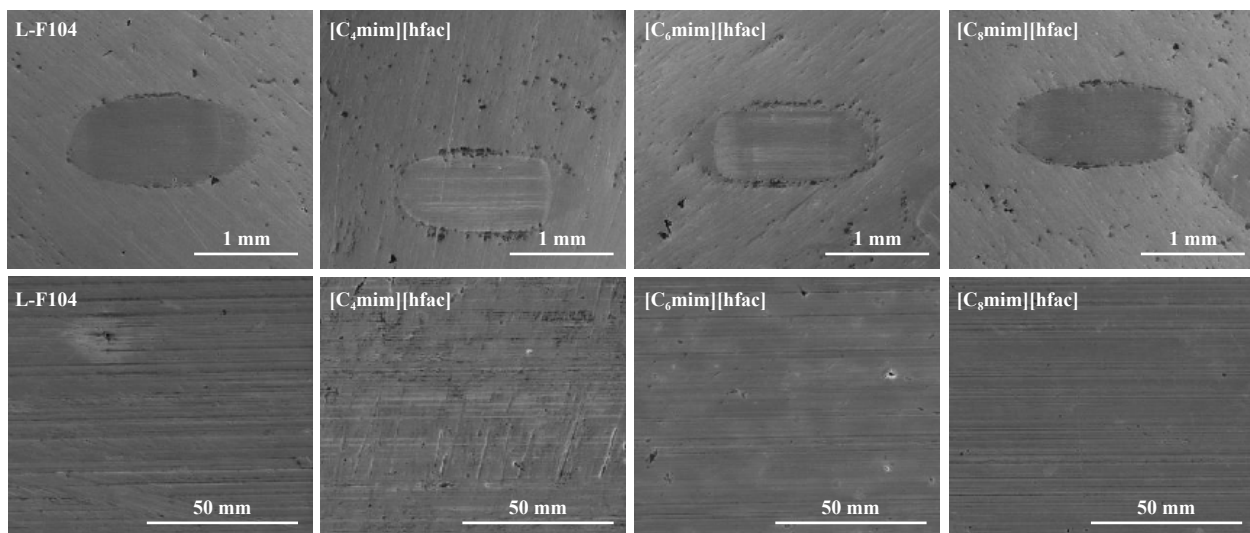


Fig. 3 SEM micrographs of the lower copper disks lubricated by the ionic liquids at 25 °C

图3 25 °C下经不同离子液体润滑后的下式样铜块的磨斑形貌图

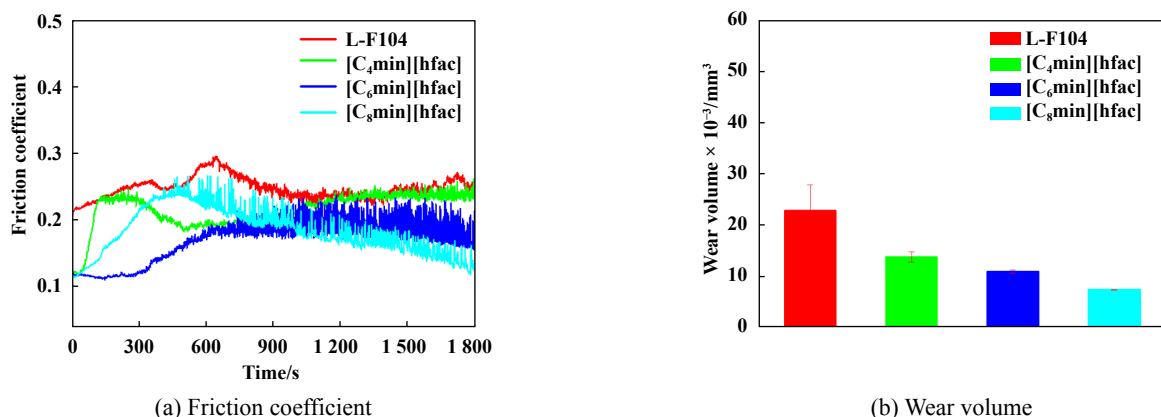


Fig. 4 Friction coefficient and wear volume of the ionic liquids on steel/copper friction contacts at 100 °C

图4 100 °C下所采用离子液体在钢/铜摩擦副上的摩擦系数及磨损体积

部分区域存在严重剥落现象,这说明在摩擦过程中伴有较为严重的黏着磨损和疲劳磨损.而所合成的三种离子液体形成的磨斑较小,表面存在较浅的犁沟和较少的点蚀,只有少部分区域存在剥落现象.由此可见,  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  离子液体比L-F104具有更为优异的减摩抗磨性能.

### 2.3.2 在钢/铝摩擦副上的摩擦学性能

#### 2.3.2.1 常温摩擦学性能

图6为25 °C下几种离子液体在钢/铝摩擦副上的摩擦系数和磨损体积.从图中可以看出,它们的摩擦系数大小顺序为  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}] < [C_6\text{mim}][\text{hfac}] < [C_4\text{mim}][\text{hfac}] < \text{L-F104}$ .在试验过程中,L-F104的摩擦系数波动较大,其余三种  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  离子液的摩擦系数较为稳定,摩擦系数也随着侧链的长度增加而下降,这可能是由于烷基链增长时摩擦副上的吸附层厚度增

加,对摩擦副起到了更有效的保护作用.它们的磨损体积也呈现出同样的规律.其中,  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$  的磨损体积仅为L-F104的25%.此外,观察摩擦过后下试样铝块上的磨斑形貌图可以看到(见图7),L-F104形成的磨斑表面存在较深的犁沟且有大面积的腐蚀现象,其余三种离子液体表面犁沟较浅且有较少的蚀点.由此可见,  $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$  咪唑离子液体在钢/铝摩擦副上具有比L-F104更为优异的减摩抗磨性能.

#### 2.3.2.2 高温摩擦学性能

图8为100 °C下几种离子液体在钢/铝摩擦副上的摩擦系数和磨损体积.从图8中可以看出,在试验过程中,  $[C_4\text{mim}][\text{hfac}]$  的摩擦系数较高甚至出现严重卡咬现象与参照样L-F104相比  $[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$  和  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$  的摩擦系数低且较为稳定,表现出更优异的减摩性能.  $[C_4\text{mim}][\text{hfac}]$  和  $[C_6\text{mim}][\text{hfac}]$  的磨损体积较大,  $[C_8\text{mim}][\text{hfac}]$

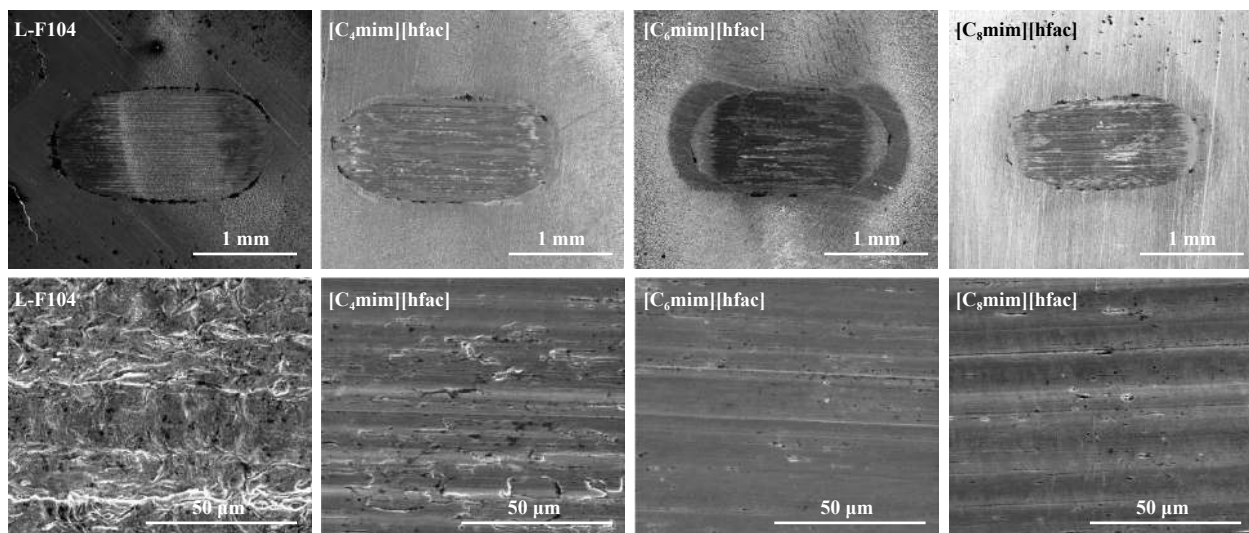


Fig. 5 SEM micrographs of the lower copper disks lubricated by different ionic liquids at 100 °C

图 5 100 °C 下经不同离子液体润滑后的下式样铜块的磨斑形貌图

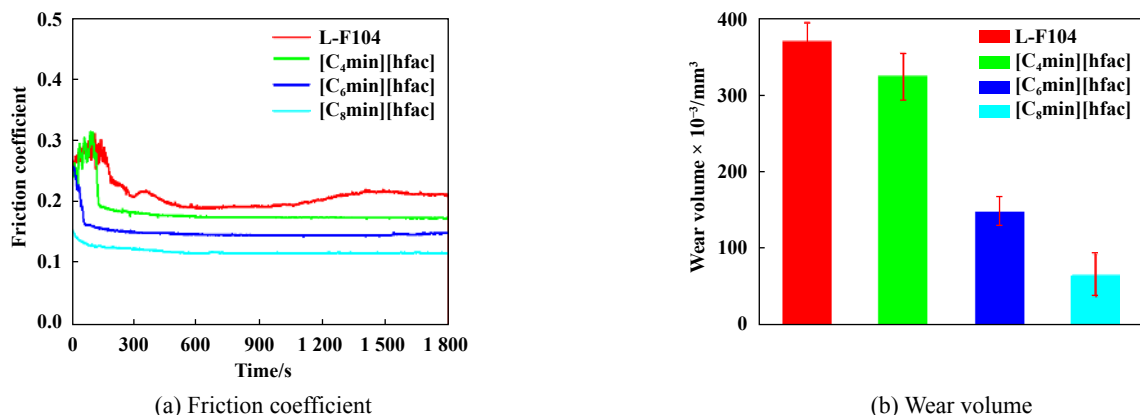


Fig. 6 Friction coefficient and wear volume of the ionic liquids on steel/ aluminum friction contacts at 25 °C

图 6 25 °C 下几种离子液体在钢/铝摩擦副上的摩擦系数及磨损体积

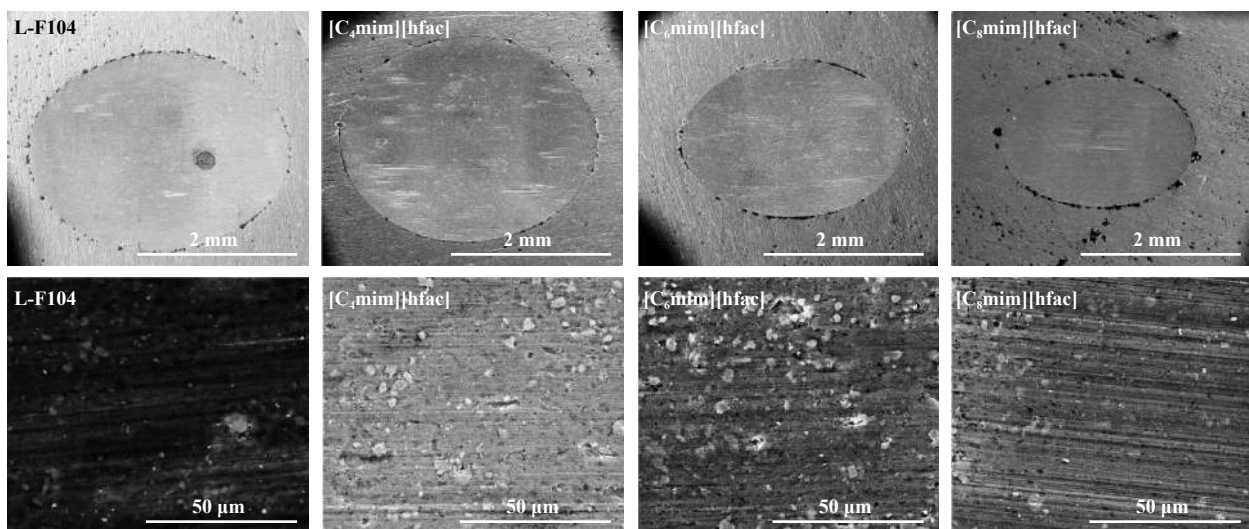


Fig. 7 SEM micrographs of the lower aluminum disks lubricated by different ionic liquids at 25 °C

图 7 25 °C 下经不同离子液体润滑后的下式样铝块的磨斑形貌图

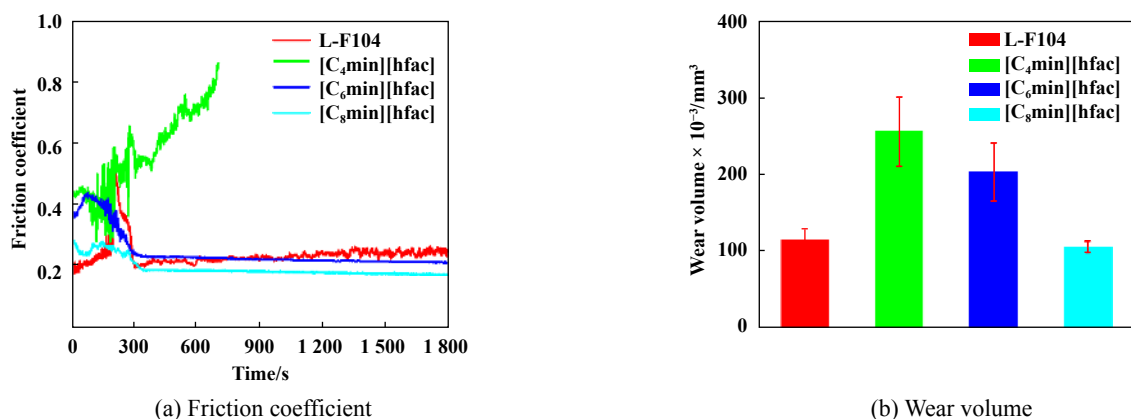


Fig. 8 Friction coefficient and wear volume of the ionic liquids on steel/ aluminum friction contacts at 100 °C

图8 100 °C下所合成离子液体在钢/铝摩擦副上的摩擦系数及磨损体积

[hfac]的磨损体积略低于L-F104. 此外, 三种[C<sub>n</sub>mim][hfac]液体的摩擦系数和磨损体积随着烷基链的增加呈下降的趋势. 观察下试盘铝块上的磨斑形貌图(见图9)可以看到, L-F104的磨斑表面存在大量的腐蚀区域. [C<sub>4</sub>mim][hfac]形成的磨斑表面也出现大面积的剥落区域, 这说明在摩擦过程中存在较为严重的黏着磨损. [C<sub>6</sub>mim][hfac]和[C<sub>8</sub>mim][hfac]的磨斑表面只有较浅的犁沟. 以上研究结果表明, [C<sub>n</sub>mim][hfac]离子液体在高温条件下作为钢/铝摩擦副的润滑剂的润滑性能较差, 但增加咪唑阳离子结构中的烷基侧链可提高其摩擦学性能.

### 3 磨斑表面分析

使用XPS进一步分析[C<sub>n</sub>mim][hfac]离子液体的润滑机理. 在铜块表面(图10), 经[C<sub>n</sub>mim][hfac]润滑后的

磨损表面Cu、N、F和O的结合能相似, 这表明[C<sub>n</sub>mim][hfac]离子液体在摩擦过程中与铜块表面发生了相似的摩擦化学反应. Cu2p在952.6和932.8 eV结合能峰位对应于Cu、Cu<sub>2</sub>O以及铜的络合物等, 结合O1s在530.7 eV的峰位和N1s在400.4 eV的峰位, 说明在摩擦过程中可能生成了铜的氧化物和一些含氮的铜络合物. 此外, O1s在531.5和531.2 eV的峰位主要对应于CuCO<sub>3</sub>、Cu(OH)<sub>2</sub>, 这可能是Cu和空气中的氧或离子液体中的氧在摩擦过程中发生了化学反应. F1s的峰位出现在683.0~685.5 eV、687.1~689.8 eV, 对应于金属氟化物和复杂的有机氟化物. 综上分析, 在摩擦过程中, [C<sub>n</sub>mim][hfac]离子液体中的活性元素F和N与Cu表面反应, 生成含氮的铜络合物、金属氟化物和复杂的有机氟化物, 它们与CuCO<sub>3</sub>、Cu(OH)<sub>2</sub>等化合物在金属表面组成表面保护膜, 有效降低了摩擦副之间的摩擦与

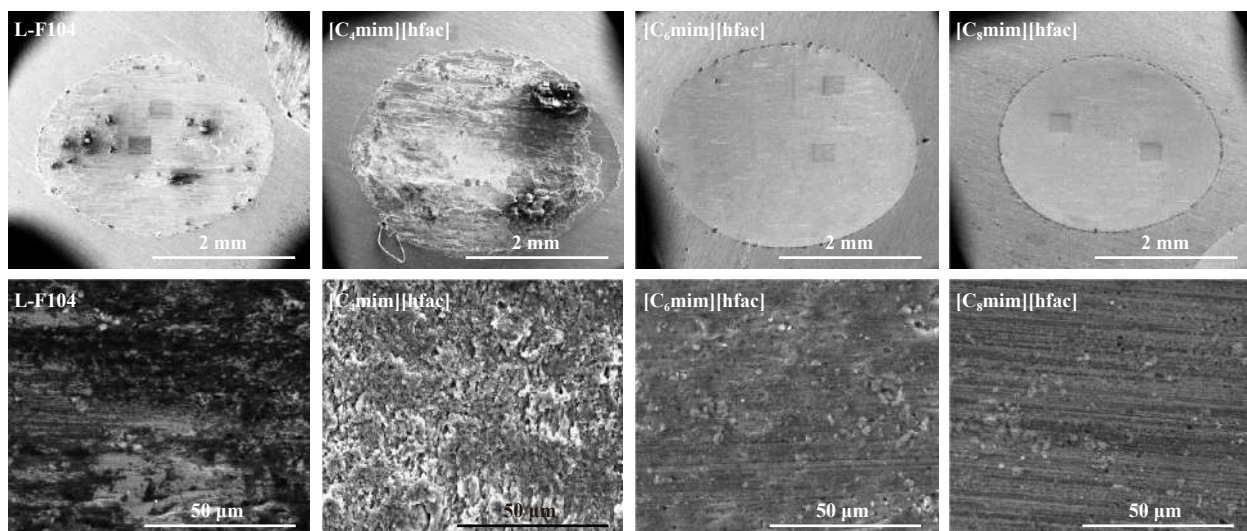
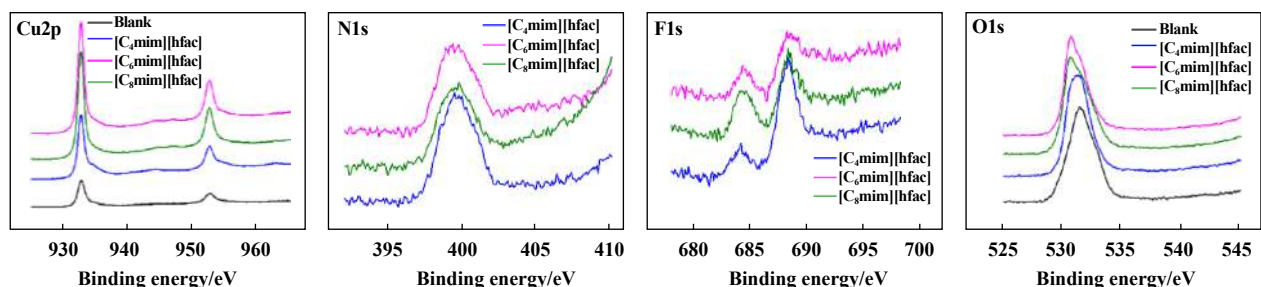


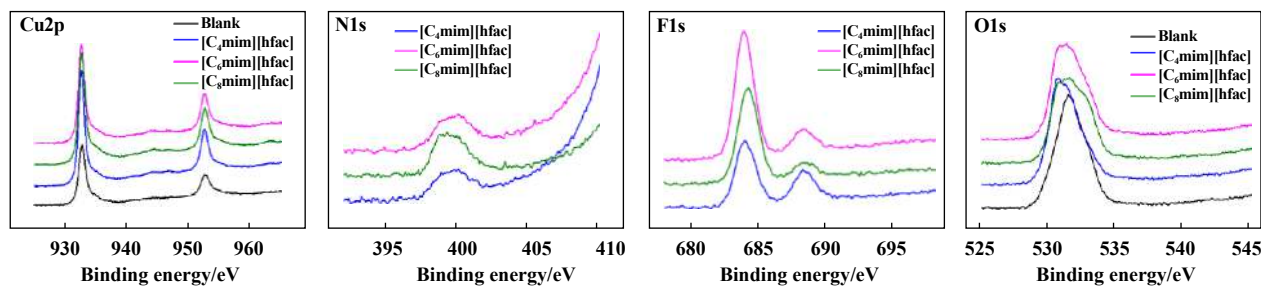
Fig. 9 SEM micrographs of the lower aluminum disks lubricated by different ionic liquids at 100 °C

图9 100 °C下经不同离子液体润滑后的下式样铝块的磨斑形貌图





(a) XPS spectrum 25 °C



(b) XPS spectrum at 100 °C

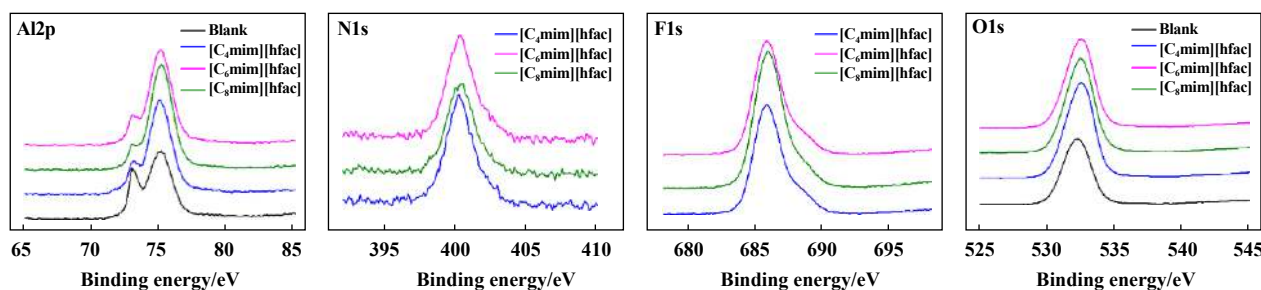
Fig. 10 XPS spectra of the lower copper disks lubricated by different ionic liquids at different temperatures

图 10 不同温度下经不同离子液体润滑后的下式样铜块的XPS谱图

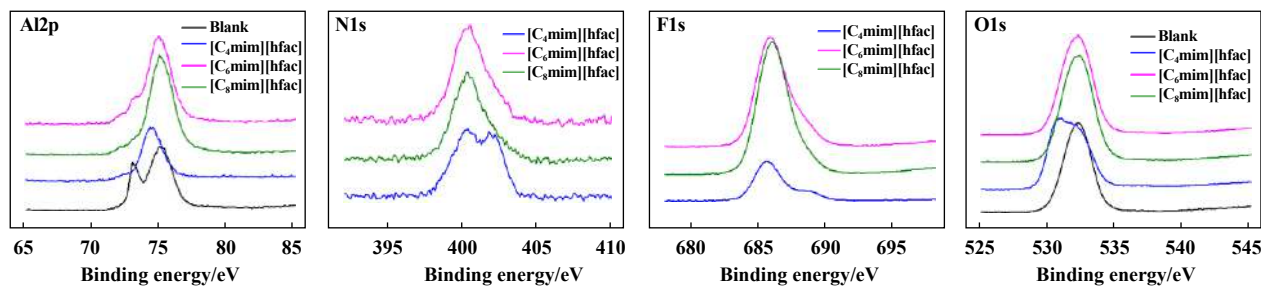
磨损, 除此之外, 离子液体还在铜表面形成吸附膜, 两者共同作用使[C<sub>n</sub>mim][hfac]离子液体表现出较好的润滑性能。

图11(a)为25 °C铝块表面磨斑的XPS图谱, Al2p峰位对应为Al(72.90 eV)和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(75.0 eV), 结合O1s峰位(530.7~532.2 eV)证实了其氧化物以及有机含氧化合物

的存在. N1s在398.1~402.9 eV的特征峰对应为复杂的含氮化合物等. F1s特征峰归属为FeF<sub>2</sub>或FeF<sub>3</sub>(685.00 eV), 说明在摩擦过程中F元素与钢球中的Fe发生了摩擦化学反应. 图11(b)为100 °C铝块表面磨斑的XPS图谱, 结合O1s谱, 可知磨斑表面Al主要以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(75.0 eV)和Al(OH)<sub>3</sub>(74.4 eV)的形式存在, 与未经润滑的铝表面对



(a) XPS spectrum 25 °C



(b) XPS spectrum at 100 °C

Fig. 11 XPS spectra of the lower aluminum disks lubricated by different ionic liquids at different temperatures

图 11 不同温度下经不同离子液体润滑后的下式样铝块的XPS谱图

比,经离子液体润滑过的磨斑表面Al(72.90 eV)的峰强度较弱,这可能是摩擦过程中 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 在Al表面形成了保护膜.此外,在N1s谱中磨斑表面还有复杂含氮化合物生成.综上所述, $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体在摩擦过程中与铝表面发生了摩擦化学反应,生成了含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{FeF}_3$ 等化合物的保护膜以及物理吸附膜,两者都有利于减少摩擦和磨损.25℃下L-F104在铝块上也是物理吸附膜起主导作用<sup>[17]</sup>,但是在摩擦过程中可能会产生硫化物造成金属腐蚀,致使其摩擦学性能较差并且100℃时在铝块上发生了与 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 不同的摩擦化学反应,磨损表面形成了由有机氟、无机氟和硫化物等组成的表面保护膜<sup>[17]</sup>,改善了摩擦磨损行为,这可能也是造成它们不同润滑性能的原因.

## 4 结论

a. 合成了三种 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体.

b. 与参照样L-F104相比, $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体在100℃时对铜片腐蚀作用较小.

c. 钢/铜摩擦副上,无论是常温还是高温条件下,三种 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体的减摩抗磨性能均优于参照样L-F104,且在高温下随着阳离子烷基链长的增大,其磨损体积有所减小;钢/铝摩擦副上,三种 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液体在常温下具有比L-F104更好的减摩抗磨性能,而且无论是在常温还是高温条件下,随着阳离子烷基链的增长,其摩擦系数和磨损体积均有减小的趋势.

d. 经XPS谱图分析,常温下在铜块和铝块上离子液体间相同特征元素结合能峰值相差不大,所以摩擦化学反应不是导致几种离子液体润滑性能差异的主要原因,物理吸附作用在摩擦过程中起主导作用.而在高温条件下,铝块上磨斑表面Al峰强度较弱,推测 $[C_n\text{mim}][\text{hfac}]$ 离子液生成了较厚含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{FeF}_3$ 等化合物的保护膜,摩擦化学反应和物理吸附共同作用使其具有优异的润滑性能.

## 参考文献

- [1] Liu Weimin, Xu Jun, Feng Dapeng, et al. The research status and prospect of synthetic lubricating oil[J]. Tribology, 2013, 33(1): 91–104 (in Chinese) [刘维民, 许俊, 冯大鹏, 等. 合成润滑油的研究现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 91–104]. doi: 10.16078/j.tribology.2013.01.002.
- [2] Cheng Jun, Yu Yuan, Zhu Shengyu, et al. Lubrication characteristics of multifunctional liquid-state metal materials under different sliding-pairs[J]. Tribology, 2017, 37(4): 435–441 (in Chinese) [程军, 于源, 朱圣宇, 等. 多功能室温液态金属在不同摩擦副条件下的润滑性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 435–441]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.04.003.
- [3] Cai M R, Guo R S, Zhou F, et al. Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(12): 2888–2913. doi: 10.1007/s11431-013-5403-2.
- [4] Wang W, Xie G, Luo J. Black phosphorus as a new lubricant[J]. Friction, 2018, 6(1): 116–142. doi: 10.1007/s40544-018-0204-z.
- [5] Zhang Y, Wei L, Hu H, et al. Tribological properties of nano cellulose fatty acid esters as ecofriendly and effective lubricant additives[J]. Cellulose, 2018, 25(5): 3091–3103. doi: 10.1007/s10570-018-1780-9.
- [6] Ye C, Liu W, Chen Y, et al. Room-temperature ionic liquids: A novel versatile lubricant[J]. Chem Commun, 2001, 21(21): 2244–2245.
- [7] Reeves C J, Siddaiah A, Menezes P L. Tribological study of imidazolium and phosphonium ionic liquid-based lubricants as additives in carboxylic acid-based natural oil: Advancements in environmentally friendly lubricants[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 241–250. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.099.
- [8] Liu Weimin, Ye Chengfeng. Tribological properties of alkyl imidazolium tetrafluoroborate ionic liquids as lubricants[J]. Tribology, 2001, 21(6): 482–484 (in Chinese) [刘维民, 叶承峰. 烷基咪唑四氟硼酸盐离子液作为润滑剂的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 482–484]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2001.06.019.
- [9] Wang D, Galla H J, Patrick Drücker. Membrane interactions of ionic liquids and imidazolium salts[J]. Biophysical Reviews, 2018, 10(3): 735–746. doi: 10.1007/s12551-017-0388-x.
- [10] Moneo A, Antón Victor, Martín Santiago, et al. Interfacial tensions of pyridinium-based ionic liquids and, n-alkanes or, n-alkanols[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 252: 469–474. doi: 10.1016/j.molliq.2018.01.017.
- [11] Macías-Salinas Ricardo. A viscosity model for ionic liquids based on the Eyring's theory and a cubic EoS[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 262: 161–174. doi: 10.1016/j.molliq.2018.04.048.
- [12] Zhang H, Li M, Yang B. Design, synthesis, and analysis of thermophysical properties for imidazolium-based geminal dicationic ionic liquids[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(5): 2467–2474. doi: 10.1021/acs.jpcc.7b09315.
- [13] Somers A, Howlett P, MacFarlane D, et al. A review of ionic liquid lubricants[J]. Lubricants, 2013, 1(1): 3–21. doi: 10.3390/lubricants1010003.
- [14] Saurín N, Avilés MD, Espinosa T, et al. Carbon nanophases in ordered nano fluid lubricants[J]. Wear, 2017, 376-377: 747–755. doi: 10.1016/j.wear.2017.01.008.
- [15] Cigno E, Magagnoli C, Pierce MS, et al. Lubricating ability of two

- phosphonium-based ionic liquids as additives of a bio-oil for use in wind turbines gearboxes[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 756–765. doi: [10.1016/j.wear.2017.01.010](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.010).
- [16] Qu J, Bansal D G, Yu B, et al. Antiwear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(2): 997–1002.
- [17] Song Zenghong, Liang Yongmin, Liu Weimin, et al. Tribological properties of lithium-based ionic liquid in lubricated steel/copper and steel/aluminum contacts[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(6): 100–105 (in Chinese) [宋增红, 梁永民, 刘维民, 等. 锂离子液体对钢/铜、钢/铝摩擦副的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(6): 100–105].
- [18] Ge X, Li J, Zhang C, et al. Superlubricity of 1-ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate ionic liquid induced by tribochemical reactions[J]. *Langmuir*, 2018, 34(18): 5245–5252. doi: [10.1021/acs.langmuir.8b00867](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00867).
- [19] Zhou F, Liang Y, Liu W. Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications[J]. *Cheminform*, 2009, 38(9): 2590–2599.
- [20] Totolin V, Minami I, Gabler C, et al. Lubrication mechanism of phosphonium phosphate ionic liquid additive in alkylborane-imidazole complexes[J]. *Tribology Letters*, 2014, 53(2): 421–432. doi: [10.1007/s11249-013-0281-0](https://doi.org/10.1007/s11249-013-0281-0).
- [21] Zhou Y, Qu J. Ionic liquids as lubricant additives—a review[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 9(4): 3209–3222.
- [22] Qu J, Truhan J, Dai S, et al. Ionic liquids with ammonium cations as lubricants or additives[J]. *Tribology Letters*, 2006, 22(3): 207–214. doi: [10.1007/s11249-006-9081-0](https://doi.org/10.1007/s11249-006-9081-0).
- [23] Kulkarni P S, Branco L C, Crespo J G, et al. Comparison of physicochemical properties of new ionic liquids based on imidazolium, quaternary ammonium, and guanidinium cations[J]. *Chemistry—A European Journal*, 2007, 13(30): 8478–8488. doi: [10.1002/chem.200700965](https://doi.org/10.1002/chem.200700965).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019048

# 原位合成Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>纳米复合润滑剂对YSZ涂层摩擦学性能的影响

杨晶晶<sup>1,2</sup>, 陕钰<sup>1</sup>, 付英英<sup>1</sup>, 乔竹辉<sup>1,3</sup>, 贾均红<sup>1</sup>, 易戈文<sup>1\*</sup>, 王文珍<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 材料与光电研究中心, 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 青岛市资源化学与新材料研究中心, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 通过大气等离子喷涂工艺制备了氧化钇稳定氧化锆(YSZ)涂层, 采用真空浸渍技术和水热合成的方法, 将含有反应物离子或分子的前驱体溶液引入YSZ涂层内部固有的微裂纹和孔洞等缺陷中, 并在缺陷中原位合成了直径约78~111 nm的Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>类球形纳米颗粒, 首次制备出了YSZ-Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合涂层. 摩擦试验结果表明: 与YSZ涂层相比, YSZ-Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合涂层由于在室温和600 °C下形成了润滑层, 抑制了YSZ涂层摩擦表面的脆性断裂和磨粒磨损, 从而显著降低了涂层的摩擦系数和磨损率, 有效提高了涂层的摩擦学性能.

**关键词:** Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>; 真空浸渍; 水热反应; 大气等离子喷涂YSZ涂层; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0756-10

## Effects of In-Situ Synthesis Nanoscale Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> Composite Lubricants on Tribological Properties of YSZ Coatings

YANG Jingjing<sup>1,2</sup>, SHAN Yu<sup>1</sup>, FU Yingying<sup>1</sup>, QIAO Zhuhui<sup>1,3</sup>, JIA Junhong<sup>1</sup>,  
YI Gewen<sup>1\*</sup>, WANG Wenzhen<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Qingdao Center of Resource Chemistry & New Materials, Shandong Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In virtue of the intrinsic defects (micro-cracks and pores) of yttria-stabilized zirconia (YSZ) coatings fabricated by air plasma spraying, Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> were in-situ synthesized inside the pure YSZ coatings via vacuum impregnation process coupled with hydrothermal reaction. Results show that the generated Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> were spherical-like nanoparticles with the diameter of 78~111nm and YSZ-Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> composite coatings were successfully fabricated. The results of tribological tests present that the composite coatings possessed a lower friction coefficient and an extremely lower wear rate compared with the pure YSZ coatings at room temperature (RT) and 600 °C. The excellent lubricating and were-resistant properties were ascribed to the formation of the smooth lubricating layers on the worn surfaces of composite coatings, thus effectively restraining the brittle fracture and abrasive wear of pure YSZ coatings.

**Key words:** Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> composite lubricants; vacuum impregnation; hydrothermal reaction; air plasma-sprayed YSZ coatings; friction and wear

Received 22 March 2019, revised 7 July 2019, accepted 17 September 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: gwyi@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968611; E-mail: wzhwang@licp.cas.cn.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51575505, 51675508, 51471181).

国家自然科学基金项目(51575505, 51675508, 51471181)资助.

随着现代工业的飞速发展, 运动机械零部件的服役环境日益严苛<sup>[1-2]</sup>, 用于航空发动机、燃气轮机和汽车发动机等热端运动部件的表面防护涂层材料<sup>[3-7]</sup>, 不仅需要具有耐高温、抗氧化、抗热震和耐腐蚀等性能, 还需要具有良好的宽温域摩擦磨损性能<sup>[8-11]</sup>, 以提高受热运动部件在不同工况下的摩擦学性能和使用寿命. 陶瓷涂层因具有熔点高、硬度高、化学和热稳定性好以及优异的耐磨性、耐高温、耐腐蚀、耐氧化和隔热等综合性能, 已成为耐磨部位涂层材料的最佳选择之一<sup>[3-6, 12-14]</sup>. 通过热喷涂技术制备的部分氧化钇稳定氧化锆(YSZ)涂层因其沉积率高、可塑性及高温稳定性好而被广泛应用于转动部件的表面防护材料<sup>[15-18]</sup>. 然而, 目前国内外对YSZ涂层的研究主要集中在热障性能方面和室温摩擦学性能方面<sup>[3-7, 19-21]</sup>, 对其宽温域摩擦学性能的研究尚不多见, 为了满足对热端运动部件表面涂层材料的迫切需要, 研究其宽温域摩擦学性能具有重要的意义.

由于YSZ涂层固有的脆性, 使其在摩擦过程中易发生脆性断裂而形成较多磨粒, 导致严重的磨粒磨损, 使摩擦系数升高, 耐磨性降低, 因此为改善YSZ涂层的摩擦学性能, 需要在涂层中引入润滑相, 以实现减小摩擦系数的同时最大发挥YSZ涂层耐磨性能. 大量研究表明, 为提高涂层材料在宽温域内的摩擦学性能, 人们通常采用高低温润滑剂复配体系<sup>[22-25]</sup>. 金属银(Ag)和钼酸银(Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>)是常见的中低温润滑剂和高温润滑剂, 这归因于金属银具有良好的延展性和低剪切力; 而钼酸银含有弱的Ag-O键<sup>[22, 26-27]</sup>, 高温下易发生层间滑移<sup>[22-25, 28]</sup>, 可以利用Ag和Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>的复配实现材料在宽温域内的连续摩擦学性能, 但是若将银和钼酸银作为喷涂粉直接喷入YSZ陶瓷涂层, 会因与陶瓷相容性差使得涂层内部出现更多的缺陷而导致涂层机械性能恶化. 而在喷涂过程中, 由于熔融粒子间的不完全浸润和堆垛, 使涂层内部不可避免地产生了大量孔洞和裂纹等缺陷<sup>[29]</sup>, 这不仅会降低涂层的机械性能, 还会造成涂层的摩擦学性能降低<sup>[29-30]</sup>. 目前, Deng等<sup>[19]</sup>和Li等<sup>[20]</sup>通过利用热喷涂YSZ涂层中的孔洞和微裂纹, 在其中合成了具有润滑性的MoS<sub>2</sub>, 使得YSZ涂层的室温摩擦性能有了显著的提高. 因此, 本文作者拟通过化学合成的方法, 在热喷涂YSZ涂层的孔洞和微裂纹中合成Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合润滑剂, 以初步研究涂层在室温(RT)和600 °C时的摩擦学性能, 为改善等离子喷涂YSZ涂层的宽温域摩擦学性能提供

借鉴方法.

基于此, 本研究中利用大气等离子喷涂YSZ涂层内部固有的孔洞和裂纹, 通过真空浸渍和水热法, 在YSZ涂层内部合成了Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合润滑剂, 并研究了Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>对YSZ涂层在RT和600 °C下摩擦学性能的影响.

## 1 试验部分

### 1.1 YSZ涂层的制备

本试验中采用大气等离子喷涂系统(9MC, Sulzer Metco, USA)制备YSZ涂层. 采用北矿新材料科技有限公司提供的具有纳米结构的氧化锆喷涂粉作为陶瓷面层; 以Inconel718高温合金为基底材料; 喷涂前对基底材料进行喷砂处理, 并用丙酮溶液超声清洗以去除表面油渍; 在基底和面层之间先喷涂NiCrAlY粘结层, 以防止因YSZ陶瓷涂层和金属基底之间因膨胀系数不匹配而造成的陶瓷涂层剥落. 所制备的YSZ涂层标记为Y, 其厚度约为350 μm, 优化后的喷涂参数列于表1中.

表1 大气等离子喷涂工艺参数

Table 1 Atmospheric plasma spraying parameters

Parameters	NiCrAlY coating	YSZ coating
Arc current/A	500	500
Voltage/V	55	60
Spray distance/mm	100	90
Powder feed rate/(g/min)	42	36
Ar gas flow rate/(L/min)	40	40
H <sub>2</sub> gas flow rate/(L/min)	5	5

### 1.2 YSZ涂层内合成Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合润滑剂

采用真空浸渍技术和水热法, 在YSZ涂层内部的孔洞和微裂纹中合成Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合润滑剂. 具体步骤如下: i: 前驱体溶液制备. 将定量吡啶(络合剂)和不同量的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)(还原剂)分别加入0.2 mol/L硝酸银溶液和0.1 mol/L钼酸钠溶液中, 磁力搅拌30 min; 将溶有PVP的钼酸钠溶液倒入溶有吡啶的硝酸银溶液并搅拌30 min, 使之混合均匀. ii: 真空浸渍. 预先将YSZ涂层表面进行抛光处理, 其表面形貌见图1(a), 在丙酮中超声清洗30 min并在烘箱中烘干; 再将其浸入前驱体溶液中并置于真空箱中, 在0.08 MPa的真空压力下负压浸渍1 h, 使前驱体充分渗入涂层内部的孔隙和裂缝中. iii: 水热反应. 将浸渍后的涂层和溶液转移到高压反应釜, 在180 °C下反应24 h后自然冷却至室温. iv: 产物收集. 使用离心机收集反

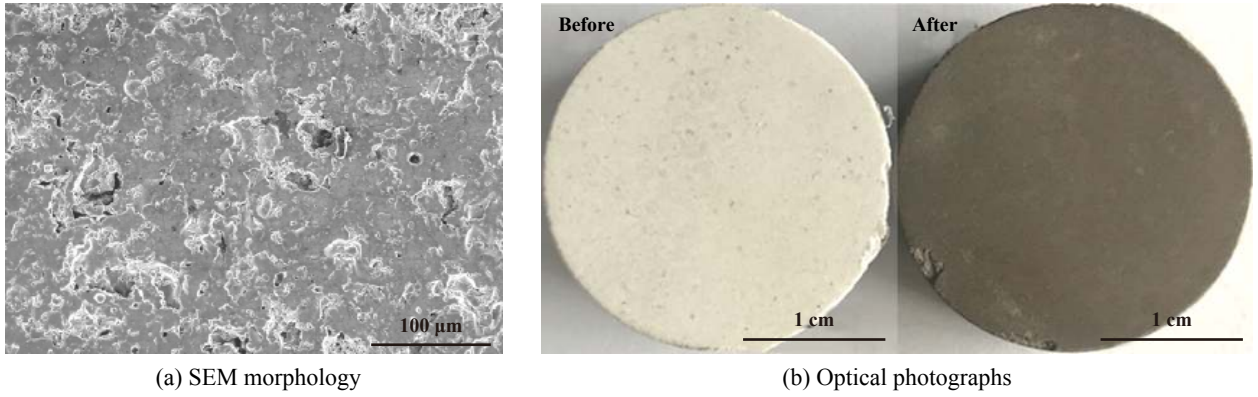


Fig. 1 The SEM morphology (a) of the polished surface of coating Y and the optical photographs (b) of coating Y before and after hydrothermal reaction

图1 涂层Y的表面形貌的SEM照片(a)和水热反应前后涂层表面的宏观形貌(b)

反应釜中的粉末并将所制备的复合涂层在乙醇溶液中超声清洗,二者在干燥烘箱中70 °C下烘干24 h;合成前后的涂层表面见图1(b).以上所加入的PVP量分别为硝酸银质量的0.5、1.0和1.5倍,其所对应生成的粉体和涂层依次标记为AM1~AM3和YAM1~YAM3.

### 1.3 Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>粉末及复合涂层结构与性能表征

采用D/max-2400型X射线衍射仪(XRD, Philips X'Pert MPD, Netherlands)和LabRAM HR Evolution型激光共聚焦拉曼光谱仪分析粉末及复合涂层的物相组成;采用场发射扫描电子显微镜(FESEM, SU8020)观察粉末形貌、复合涂层断面的微观结构和磨损表面的微观形貌等;同时采用EDAX能谱仪(EDS)分析粉末与涂层表面的元素分布.

### 1.4 复合涂层的摩擦磨损性能测试

采用球盘式高温摩擦试验机(CSM Switzerland)进行摩擦磨损试验,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>球(6 mm)作为对偶球,测试温度选取室温(RT)和600 °C,载荷为4 N,线速度为0.1 m/s,旋转半径为5 mm,行程200 m,摩擦系数取3次平行试

验的平均值.采用MicroXAM三维轮廓仪测定涂层的磨损体积,磨损率依照公式 $W=V/FS$ 计算,其中 $V$ 为磨损体积(mm<sup>3</sup>), $F$ 为载荷(N), $S$ 为滑动行程(m).

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>粉末的特性

图2给出了AM1~AM3粉末的XRD谱图和AM3粉末形貌的SEM照片及其元素分布图.合成粉末的所有特征峰都符合立方相Ag(ICDD/JCPDS-PDF 04-0783)和β-Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>(ICDD/JCPDS-PDF 08-0473)的特征峰<sup>[26, 31]</sup>,并且无其他杂质的特征峰出现[图2(a)].这是因为在水热反应中,银离子先被储存于吡啶中,随着反应温度逐渐升高,吡啶缓慢释放出银离子<sup>[32]</sup>,当溶液中的银离子达到一定浓度后,一部分银离子与溶液中的钼酸根离子结合生成钼酸银,另一部分银离子被PVP中的N和O原子捕捉并活化,使其更容易被还原成银单质<sup>[33]</sup>,并且随着PVP含量增加,Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>含量比随之增加.由于粉末AM1~AM3的微观形貌基本相

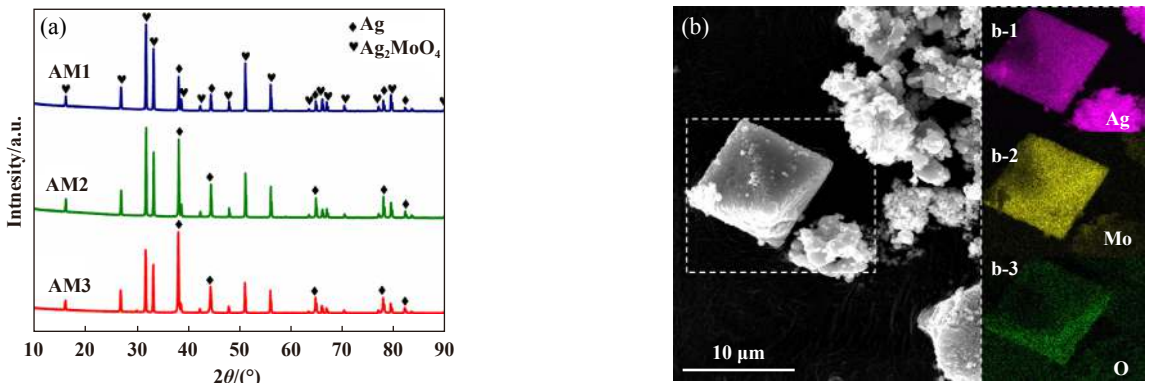


Fig. 2 The XRD patterns (a) of the synthesized powders AM1~AM3 with different contents of PVP; the SEM micrograph and corresponding elemental mapping (b) of powder AM3

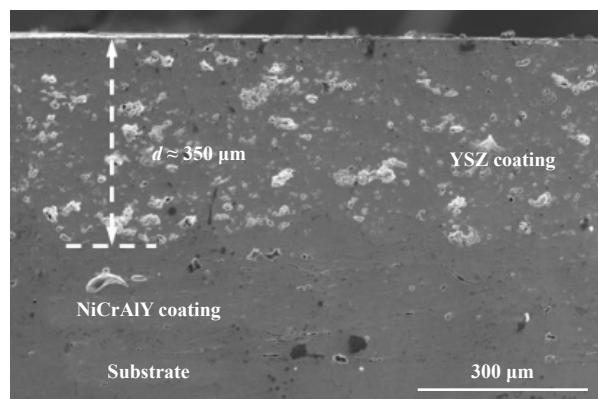
图2 不同PVP含量下所合成粉末AM1~AM3的XRD图谱(a)和AM3合成粉末的SEM形貌图以及相应的元素分布(b)

同, 故给出粉末AM3形貌的SEM照片和元素分布图[图2(b)], 可以看出钼酸银呈八面体颗粒和类球形颗粒<sup>[34-35]</sup>, 而银则主要为类球形颗粒.

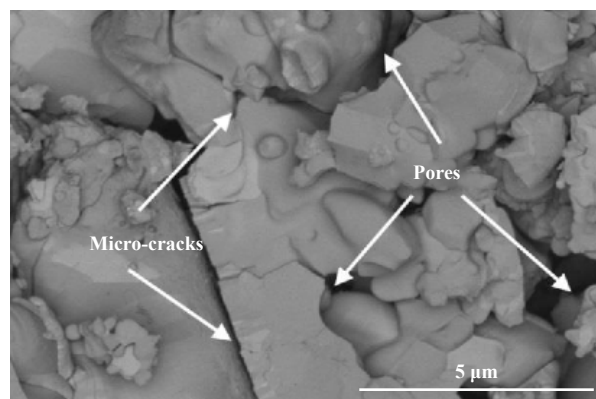
## 2.2 复合涂层的微观结构及物相组成

图3给出了YSZ涂层抛光后截面和断面形貌的SEM照片. 由图3(a)可见Y涂层厚度约350 μm, 且涂层中不可避免地存在孔隙, 这主要是由于大气等离子喷涂技术所固有的特性导致的. 从涂层断面形貌也可看

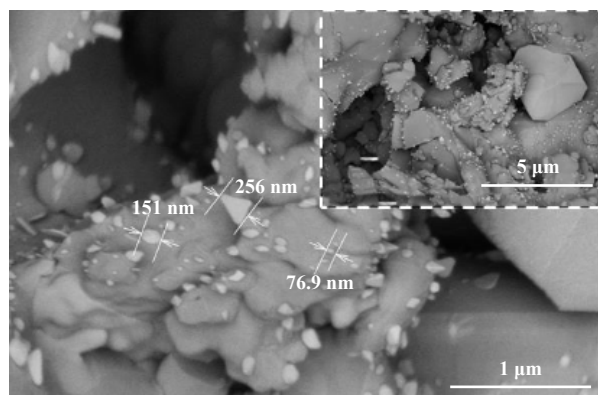
出, 涂层内部分布着许多孔洞和微裂纹[图3(b)], 这些缺陷为前驱体溶液进入涂层内部并原位生成复合润滑剂提供了良好的反应场所. 进一步观察复合涂层YAM1~YAM3的断面形貌, 可见纳米颗粒附着于YAM1~YAM3涂层内部缺陷中, YAM1涂层缺陷中出现了厚度约为25 nm的缺角三角形纳米片和直径约为70~150 nm的类球形纳米颗粒<sup>[31]</sup>[图3(c)]; YAM2涂层缺陷中生成了厚度约20 nm的不规则的纳米片和尺



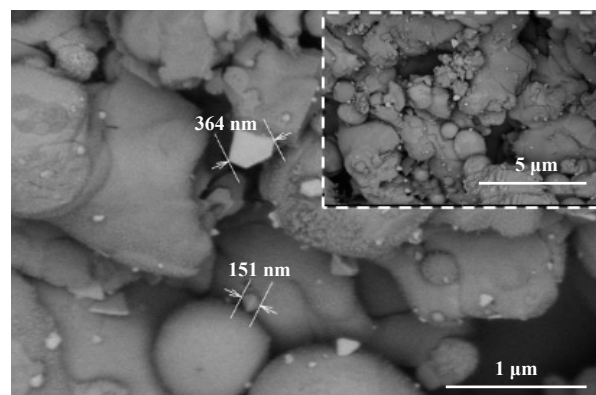
(a) Y



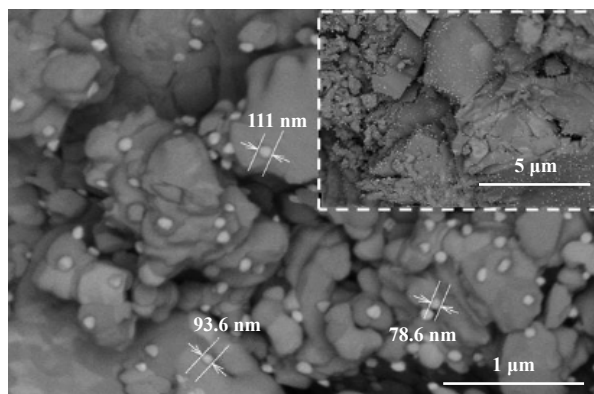
(b) Y



(c) YAM1



(d) YAM2



(e) YAM3

Fig. 3 The SEM morphologies (a) of cross-section of coating Y; the FESEM morphologies of fractured surface of coating Y (b) and coating YAM1~YAM3[(c), (d) and (e)]

图3 涂层Y截面形貌的SEM照片(a), 涂层Y(b)及和复合涂层YAM1~YAM3 [(c), (d) 和 (e)]的断面形貌照片

寸约为151 nm的纳米颗粒[图3(d)]; YAM3涂层缺陷中生成了直径约78~111 nm的类球形及不规则纳米颗粒[图3(e)]. 这说明生长在YSZ孔隙中的纳米颗粒, 其形貌和尺寸可能受PVP含量和涂层孔隙大小的影响. 当PVP含量最高时, YAM3涂层孔隙中的产物尺寸较小, 趋向于形成球形纳米颗粒且分布更均匀[图3(e)]. 进一步对YAM3表面进行XRD和Raman分析, XRD检

测出Ag的特征峰而没有检测到钼酸银的特征峰[图4(a)中放大图], 这可能是由于涂层表面的钼酸银含量低于XRD检出限. 而通过Raman光谱检测发现了 $\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 相的拉曼峰<sup>[36-37]</sup>[图4(b)], 表明在YSZ涂层中成功合成了 $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 复合润滑剂. 下面将重点考察涂层YAM3和Y的室温及600 °C下的摩擦磨损性能, 并进行对比分析和讨论.

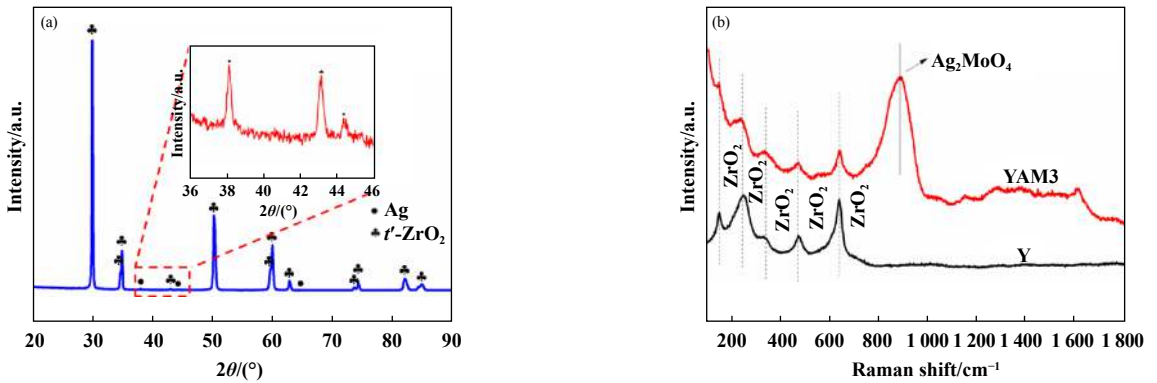


Fig. 4 The XRD pattern (a) and Raman spectra (b) of the surface of the synthesized coating YAM3

图4 复合涂层YAM3表面的XRD(a)和拉曼谱图(b)

### 2.3 涂层在室温(RT)和600 °C下的摩擦磨损性能

图5(a)给出了涂层Y和YAM3分别在RT和600 °C的摩擦系数和磨损率. 室温下, Y涂层的摩擦系数(0.67)与磨损率 $[1.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{Nm})]$ 均较高, 而YAM3的摩擦系数(0.42)与磨损率 $[0.1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})]$ 明显降低. 在600 °C下, Y涂层摩擦系数为0.76, 相应磨损率为 $6.50 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ ; 而YAM3的摩擦系数降到0.15, 磨损率也显著降低, 但因磨损体积太小未能测出, 所以在图5中列出<sup>[38]</sup>. 此外, 从图5(b)可以看出涂层Y在RT和600 °C的摩擦系数曲线经历短暂磨合后, 曲线保持稳定且摩擦系数较高; 涂层YAM3的摩擦系数曲线在RT时经历相对较长的磨合期后达到稳定状态, 而在600 °C时则很快进入了稳定期, 该曲线平滑且摩擦系数较低. 总体而言, 与YSZ涂层相比, YSZ- $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 复合涂层在RT和600 °C均表现出优异的摩擦磨损性能, 说明纳米 $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 颗粒可显著降低涂层在RT和600 °C的摩擦系数和磨损率.

### 2.4 涂层磨损形貌及摩擦机理

室温下, 涂层Y和YAM3磨痕形貌的SEM照片见图6(a)和(b). 可以看出, 涂层YAM3的磨痕宽度(265  $\mu\text{m}$ )明显小于涂层Y(1 160  $\mu\text{m}$ ) [图6中低倍图]; 涂层Y的磨损表面存在大量的颗粒, 表现出较严重的脆性断裂和磨粒磨损. 其原因可能是由于涂层缺乏润滑性和固有

的脆性, 反复摩擦过程中接触表面不断形成高硬度磨屑(YSZ陶瓷和对偶球 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 硬度均较高), 形成三体磨粒磨损<sup>[38]</sup>, 而导致较高的摩擦系数和磨损率; 而复合涂层YAM3磨损表面呈现光滑而致密的摩擦层, 磨痕中产生的磨屑或磨粒非常少, 磨损机制以塑性变形和黏着磨损为主, 摩擦系数和磨损率均较低. 其原因一方面可能是由于Ag本身的中低温润滑作用, 另一方面, 可能是位于缺陷内部的 $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 纳米颗粒保护了裸露的YSZ涂层材料, 增加了破坏涂层所需的能量<sup>[39]</sup>, 在摩擦表面形成具有塑性和润滑性的摩擦层减少了摩擦表面磨屑的形成和三体磨粒磨损, 从而大大减少了由硬质磨屑引起的磨粒磨损. 从YAM3磨痕横截面曲线[图7(c)]也可以看出: 磨痕表面产生高出基面的摩擦层(高约0.9  $\mu\text{m}$ , 宽约0.277  $\mu\text{m}$ ), 摩擦层的形成阻隔了YSZ涂层与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 球之间的剧烈摩擦. 进一步分析YAM3磨痕内外元素分布[图7(a)和(b)], 可以看出磨痕外的 $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 颗粒在涂层表面分布不均匀, 而在磨痕内的Ag、Mo和Al元素分布均匀, 说明复合涂层经过摩擦后, 润滑相均匀分布于摩擦层. 从其磨痕的Raman谱图看出[图8(a)], 摩擦表面含有 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ . 上述分析表明该摩擦层可能是由磨屑与 $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{MoO}_4$ 组成, 大大抑制了YSZ涂层的脆性断裂和磨粒磨损, 从而降低了摩擦系数和磨损率.



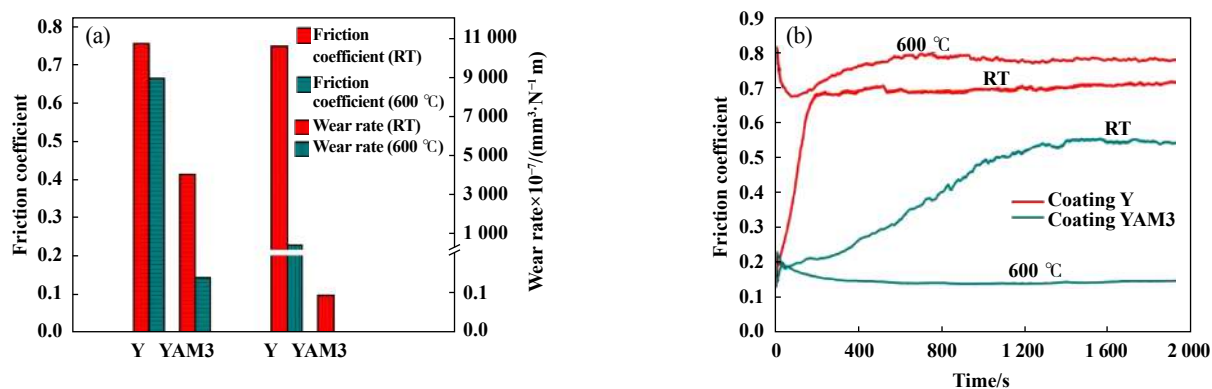


Fig. 5 Friction coefficients and wear rates (a) of coating Y and YAM3 at RT and 600 °C, coupled with corresponding friction coefficient curves (b), respectively. Note: the wear rate of YAM3 at 600 °C cannot be calculated because its worn volume was unmeasurable<sup>[23]</sup>

图 5 涂层Y和YAM3分别在RT和600 °C下的摩擦系数和磨损率(a)以及相应的摩擦系数曲线(b). 注: YAM3涂层在600 °C下的磨损体积无法测出<sup>[23]</sup>

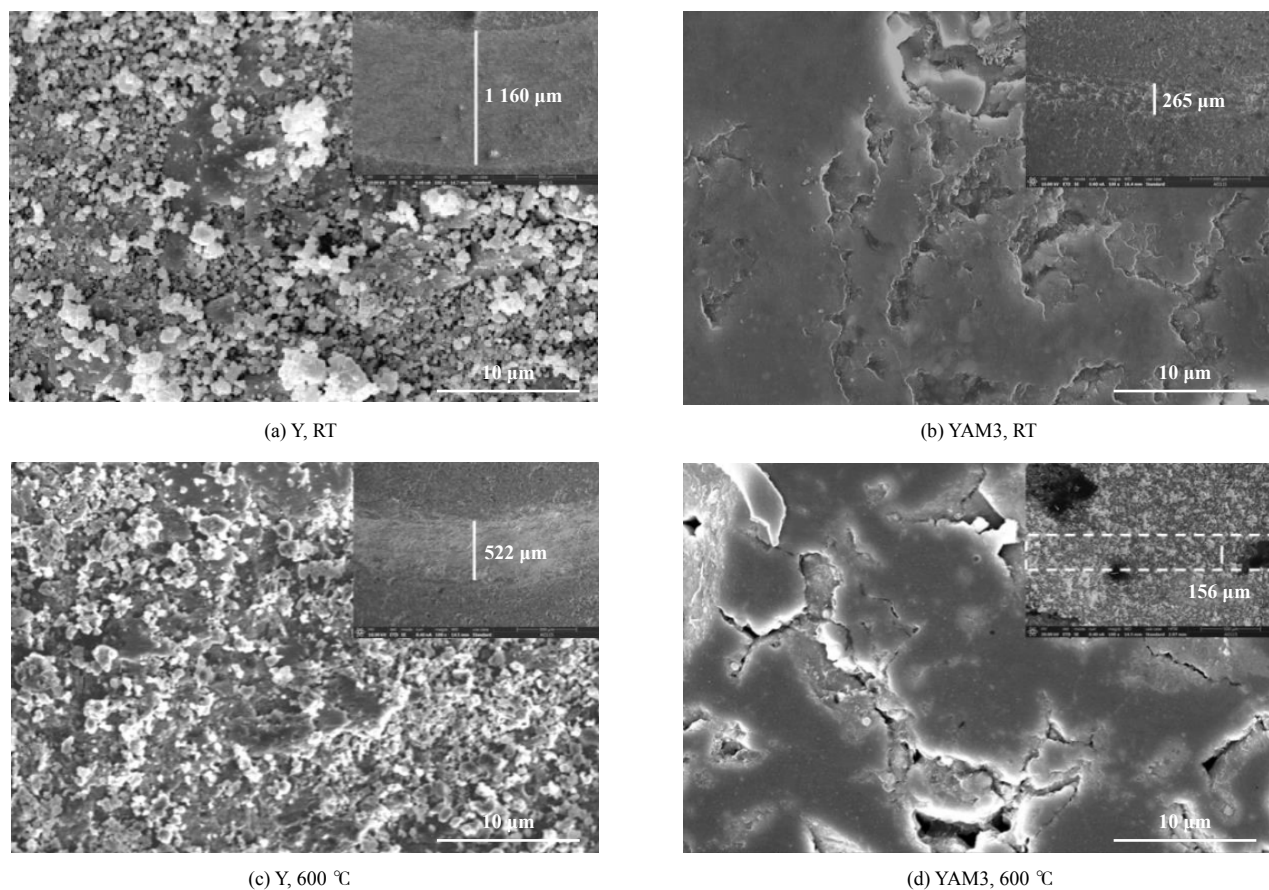


Fig. 6 The SEM morphologies of worn surface: coating Y and coating YAM3 at elevated temperatures

图 6 涂层Y和复合涂层YAM3在不同温度下磨损表面形貌的SEM照片

600 °C下, 涂层Y和YAM3的磨痕形貌见图6(c~d). 600 °C下两种涂层的磨痕宽度均比其室温时小, 但YAM3的磨痕宽度(156 μm)比Y的磨痕宽度(522 μm)小很多. 涂层Y的磨损表面有大量磨屑和少量塑性变形, 磨损机制仍然以磨粒磨损为主; 而复合涂层

YAM3的摩擦表面形成了光滑的润滑膜, 润滑膜有少量脱落, 磨痕内的磨屑极少, 磨损机制以塑性变形和黏着磨损为主. 上述结果表明复合润滑剂在600 °C时对涂层Y的减摩降磨起到了关键作用. 由于磨痕既浅又窄, 采用三维轮廓仪无法检测出YAM3在600 °C下

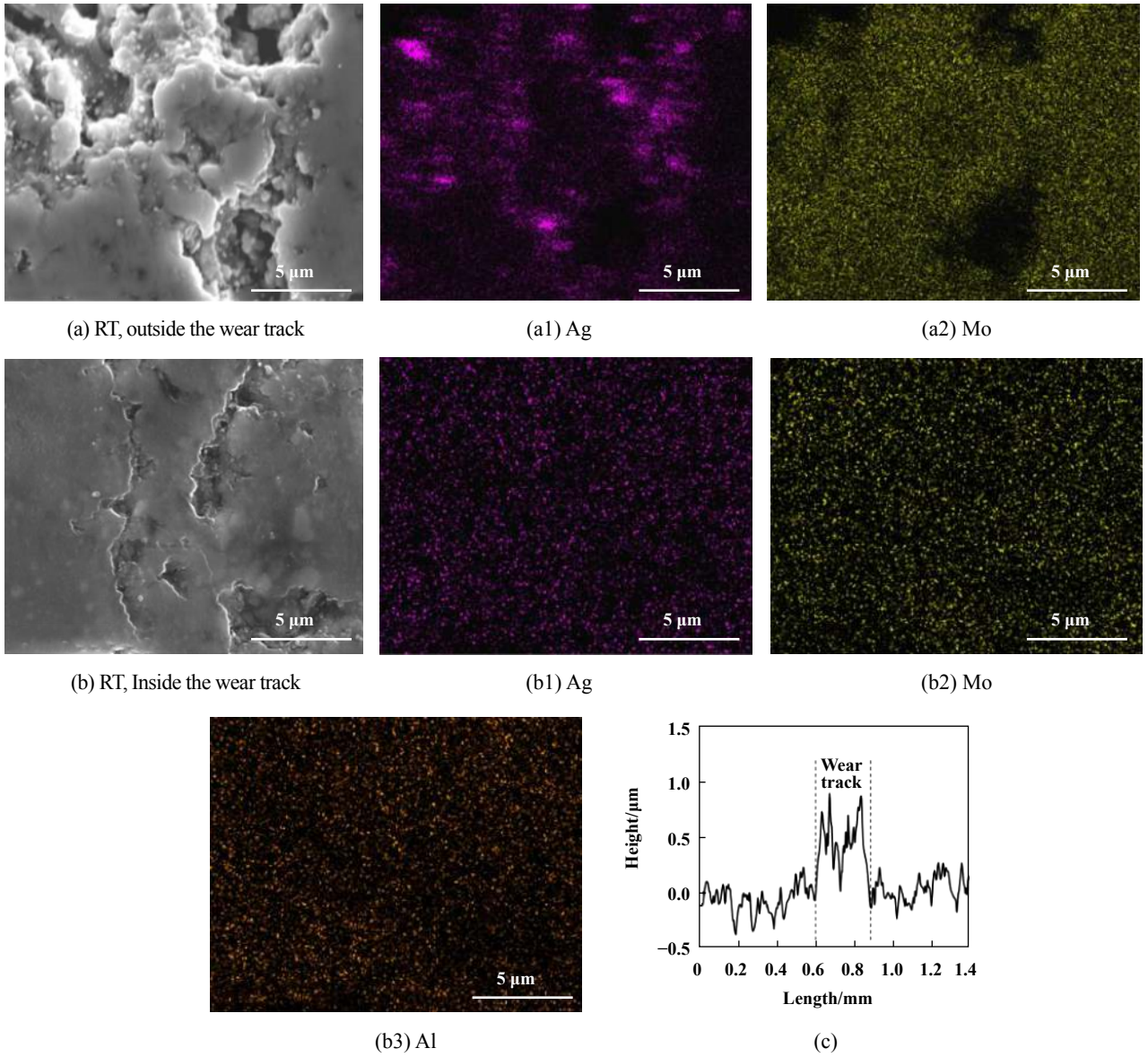


Fig. 7 The SEM micrographs and corresponding elemental mapping: surfaces outside (a) and inside (b) the wear track of coating YAM3 at RT as well as cross-sectional profile (c) of wear track formed on coating YAM3 at RT

图7 室温下,复合涂层YAM3磨痕内外表面形貌的SEM照片[(a)和(b)]和相应的元素分布以及磨痕截面轮廓图(c)

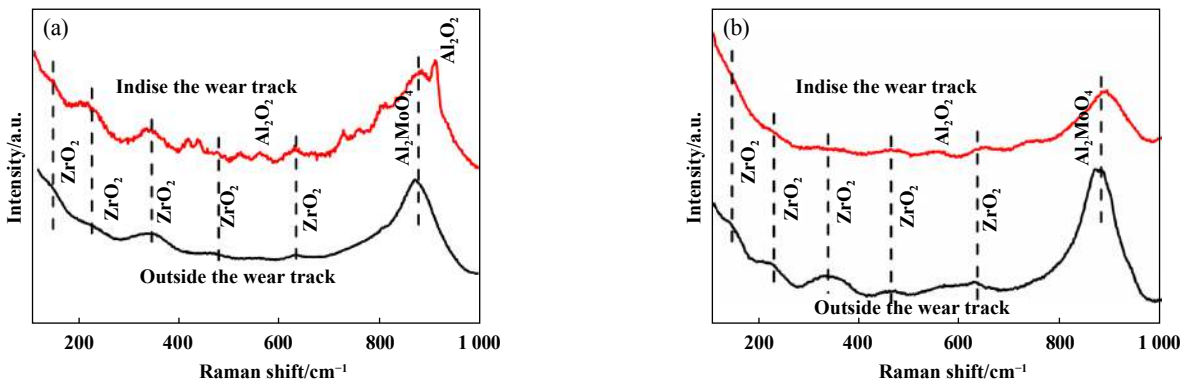


Fig. 8 The Raman spectra of surfaces inside and outside the wear track of coating YAM3 at RT(a) and 600 °C(b)

图8 在RT(a)和600 °C(b)下,复合涂层YAM3磨痕内外表面的Raman谱图

的磨损体积, 这一点从YAM3的磨痕横截面曲线图[图9(c)]中的磨痕表面与基面高度基本一致也可以看出. 进一步对比YAM3在室温[图7(a~b)]和600 °C[图9(a~b)]的磨痕内外元素分布, 发现600 °C时YAM3磨痕内的Ag、Mo元素形成明显的表面富集[图9(b)], 而且分布较均匀, 表明摩擦表面可能形成了含有Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>的润滑膜<sup>[40-41]</sup>. 此外, 从其磨痕Raman谱图可以看出[图8(b)], 润滑膜含有ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>. 由此推测, 由于Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>含有较弱的Ag-O化学键, 并且其熔点较低(574 °C), 同时高温时Ag具有较高的迁移率, 因此在该温度和摩擦力的驱动下, Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>易于向涂层摩擦表面迁移, 在涂层表面形成具有高温润滑减

磨作用的润滑膜<sup>[40-41]</sup>, 从而进一步降低了涂层的摩擦系数和磨损率. 由于YAM3在600 °C下的磨损体积无法用三维轮廓仪测出, 其磨损率的精确表征和计算仍在进行中. 值得注意的是, 本试验中利用YSZ涂层结构中存在的缺陷, 在涂层中原位合成Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合润滑剂, 但由于合成的复合润滑剂以及分布会受到涂层内部孔洞和裂纹分布及大小的影响, 因而与其力学和摩擦学性能相关的可控合成与制备技术还需进一步研究.

### 3 结论

a. 通过大气等离子喷涂技术制备了YSZ陶瓷涂

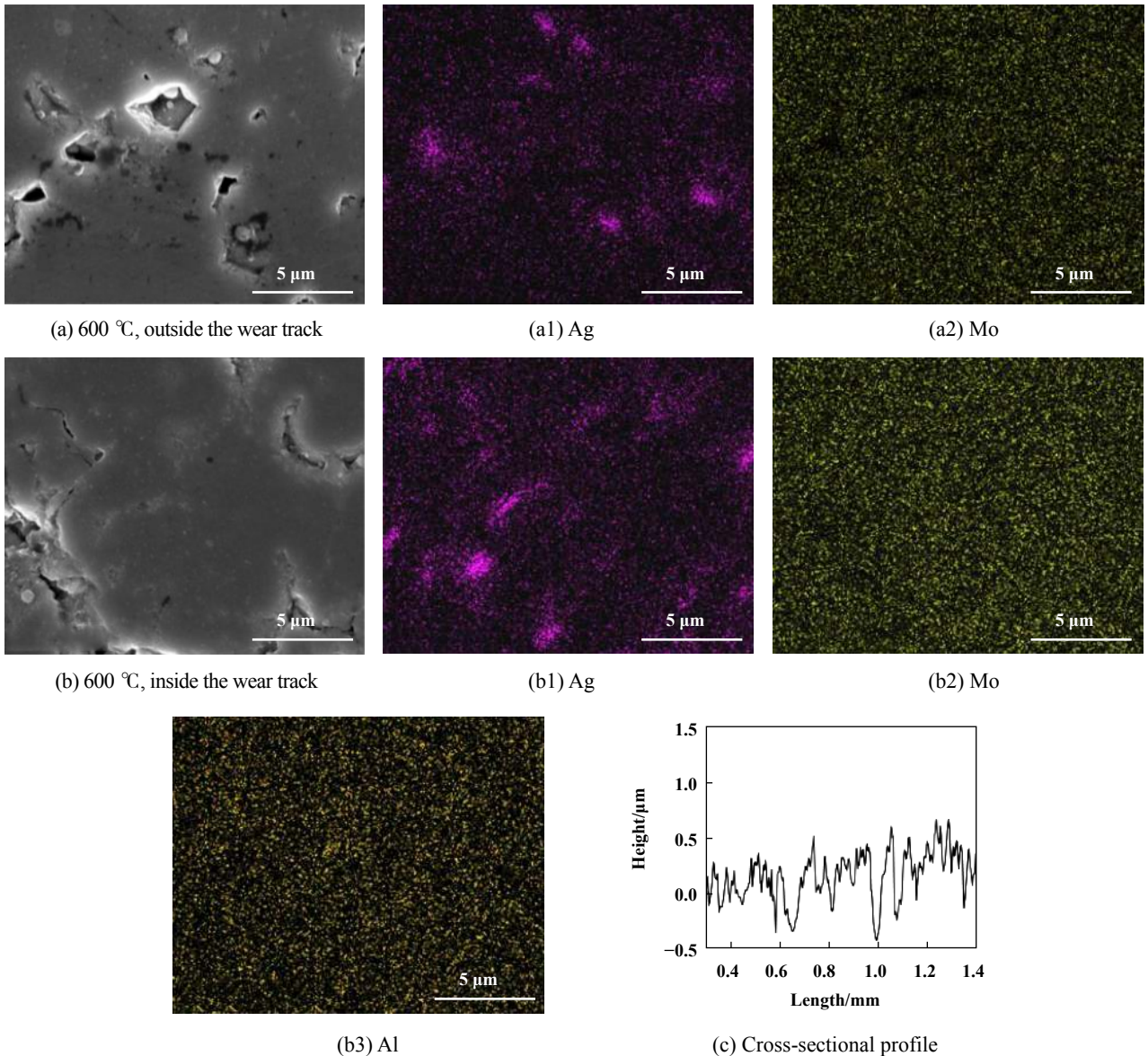


Fig. 9 The SEM micrographs and corresponding elemental mapping: surfaces outside (a) and inside (b) the wear track of coating YAM3 at 600 °C as well as cross-sectional profile (c) of wear track formed on coating YAM3 at 600 °C

图9 600 °C下, 复合涂层YAM3磨痕内外表面形貌的SEM照片[(a)和(b)]和相应的元素分布以及磨痕截面轮廓图(c)

层,并采用真空浸渍技术和水热法,在涂层内部的孔洞和微裂纹等缺陷中原位合成了直径约78~111 nm的Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>类球形纳米颗粒,成功制备出YSZ-Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>复合涂层。

b. YSZ涂层中引入Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>后,涂层室温摩擦系数由0.67降至0.42,磨损率由 $1.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ 降至 $1.00 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ ; 600 °C摩擦系数由0.76降至0.15,磨损率极小。

c. YSZ涂层缺陷中引入Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>纳米复合润滑剂,不仅在室温下促进了涂层摩擦表面形成光滑而致密的摩擦层,阻隔了对偶球和涂层之间的直接接触,而且在600 °C和摩擦力驱动下,促进了Ag/Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>向摩擦表面迁移和富集,形成润滑薄膜,从而有效抑制了YSZ涂层表面的磨粒磨损,大大降低了涂层的摩擦系数和磨损率。

## 参考文献

- [1] Zhang Xushou, Yu Laigui, Chen Jianmin. Research progress in surface engineering tribology[J]. Tribology, 2000, 20(2): 156–160 (in Chinese) [张绪寿, 余来贵. 表面工程摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 156–160]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2000.02.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2000.02.020).
- [2] Xu Binshi, Ou Zhongwen, Ma Shining, et al. Nano-surface-engineering[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(6): 707–712 (in Chinese) [徐滨士, 欧忠文, 马世宁, 等. 纳米表面工程[J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 707–712]. doi: [10.3321/j.issn:1004-132X.2000.06.032](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-132X.2000.06.032).
- [3] Sun Fanghong, Ma Zhuang, Liu Yingrui, et al. Research progress of plasma spray techniques for preparing thermal barrier coatings[J]. Journal of Materials Protection, 2013, 46(5): 45–57 (in Chinese) [孙方红, 马壮, 刘应瑞, 等. 等离子喷涂制备热障涂层的研究进展[J]. 材料保护, 2013, 46(5): 45–57].
- [4] Guo Hongbo, Gong Shengkai, Xu Huibin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. Materials China, 2009, 28(9-10): 18–26 (in Chinese) [郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(9-10): 18–26].
- [5] Cui Huiran, Li Hongran, Cui Qizheng, et al. Summary of blade coatings for aero-engine and gas turbine[J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(1): 82–94 (in Chinese) [崔慧然, 李宏然, 崔启政, 等. 航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(1): 82–94]. doi: [10.3969/j.issn.1674-7127.2019.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7127.2019.01.011).
- [6] Shin Dongyun, Hamed Awatef. Influence of micro-structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions[J]. Wear, 2018, 396-397: 34–47. doi: [10.1016/j.wear.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.005).
- [7] Guo Hongbo, Gong Shengkai, Xu Huibin. Research progress on new high/ultra-high temperature thermal barrier coatings and processing technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2722–2732 (in Chinese) [郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2722–2732].
- [8] Peng Zeyan, Du Shengtong. Principles of aviation gas turbine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990(in Chinese) [彭泽琰, 杜声同. 航空燃气轮机原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1990].
- [9] Rajendran R. Gas turbine coatings—An overview[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 26: 355–369. doi: [10.1016/j.engfailanal.2012.07.007](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.007).
- [10] Wang Dingjiang, Pan Qingjun, Xia Chengbao. Corrosion and protection of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006(in Chinese) [汪定江, 潘庆军, 夏成宝. 军用飞机的腐蚀与防护[M]. 北京:航空工业出版社, 2006].
- [11] Muratore C, Voevodin A A. Chameleon Coatings: Adaptive surfaces to reduce friction and wear in extreme environments[J]. Annual Review of Materials Research, 2009, 39(1): 297–324. doi: [10.1146/annurev-matsci-082908-145259](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145259).
- [12] Qiao X, Wang Y M, Weng W X, et al. Influence of pores on mechanical properties of plasma sprayed coatings: Case study of YSZ thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 21564–21577. doi: [10.1016/j.ceramint.2018.08.220](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.220).
- [13] Padture N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 804–809. doi: [10.1038/nmat4687](https://doi.org/10.1038/nmat4687).
- [14] Murray James W, Rance Graham A, Xu Fang, et al. Alumina-graphene nanocomposite coatings fabricated by suspension high velocity oxy-fuel thermal spraying for ultra-low-wear[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(4): 1819–1828. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.022](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.022).
- [15] Ghaemi M H, Reichert S, Krupa A, et al. Zirconia ceramics with additions of Alumina for advanced tribological and biomedical applications[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 9746–9752. doi: [10.1016/j.ceramint.2017.04.150](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.150).
- [16] Kong Lingqian, Bi Qinling, Niu Muye, et al. High-temperature tribological behavior of ZrO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub> self-lubricating composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(1): 51–59. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.08.003).
- [17] Lamuta C, Di Girolamo G, Pagnotta L. Microstructural mechanical and tribological properties of nanostructured YSZ coatings produced with different APS process parameters[J]. Ceramics International, 2015, 41(7): 8904–8914. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.03.148](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.148).
- [18] Voevodin A, Zabinski J. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications[J]. Composites Science And Technology, 2005, 65(5): 741–748.
- [19] Deng Wen, Li Shuangjian, Liu Xia, et al. A novel approach to fabricate hybrid materials with excellent tribological properties from spray-formed ceramic[J]. Materials Letters, 2017, 193: 199–202.

- doi: [10.1016/j.matlet.2017.01.148](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.148).
- [20] Li Shuangjian, Zhao Xiaoqin, An Yulong, et al. YSZ/MoS<sub>2</sub> self-lubricating coating fabricated by thermal spraying and hydrothermal reaction[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(15): 17864–17872. doi: [10.1016/j.ceramint.2018.06.258](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.258).
- [21] Deng wen, Zhao Xiaoqin, Li Shuangjian, et al. Preparation and tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub> composite coating[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(5): 110–118 (in Chinese) [邓雯, 赵晓琴, 李双建, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub>复合涂层的制备及摩擦磨损性能[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(5): 110–118]. doi: [10.11933/j.issn.1007-9289.20170324001](https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20170324001).
- [22] Aouadi S M, Paudel Y, Simonson W J, et al. Tribological investigation of adaptive Mo N<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub>/Ag coatings with high sulfur content[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(10-11): 1304–1309. doi: [10.1016/j.surfcoat.2008.10.040](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.10.040).
- [23] Hu J J, Muratore C, Voevodin A A. Silver diffusion and high-temperature lubrication mechanisms of YSZ–Ag–Mo based nanocomposite coatings[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(3-4): 336–347. doi: [10.1016/j.compscitech.2006.09.008](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.09.008).
- [24] Chen Jie, An Yulong, Yang Jie, et al. Tribological properties of adaptive NiCrAlY–Ag–Mo coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 235: 521–528. doi: [10.1016/j.surfcoat.2013.08.012](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.012).
- [25] Li Bo, Gao Yimin, Jia Junhong, et al. Influence of heat treatments on the microstructure as well as mechanical and tribological properties of NiCrAlY–Mo–Ag coatings[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 503–510. doi: [10.1016/j.jallcom.2016.06.075](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.075).
- [26] Moura J V B, da Silva Filho J G, Freire P T C, et al. Phonon properties of β-Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>: Raman spectroscopy and ab initio calculations[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2016, 86: 97–102. doi: [10.1016/j.vibspec.2016.06.009](https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.06.009).
- [27] He Pengfei, Wang Haidou, Ma Guozheng, et al. Research progress of high-temperature tribological properties of silver-containing hard coatings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(11): 2962–2974 (in Chinese) [何鹏飞, 王海斗, 马国政, 等. 含银硬质涂层高温摩擦学性能的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(11): 2962–2974].
- [28] Muratore C, Voevodin A A. Molybdenum disulfide as a lubricant and catalyst in adaptive nanocomposite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 4125–4130. doi: [10.1016/j.surfcoat.2006.08.014](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.014).
- [29] Wang Z, Kulkarni A, Deshpande S, et al. Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(18): 5319–5334. doi: [10.1016/S1359-6454\(03\)00390-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00390-2).
- [30] Du Hao, Shin Jae Heyg, Lee Soo Wohn. Study on porosity of plasma-sprayed coatings by digital image analysis method[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, 14(4): 453–461. doi: [10.1361/105996305X76450](https://doi.org/10.1361/105996305X76450).
- [31] Thomas Neethu, Mani Ethayaraja. Mechanism and modeling of poly(vinylpyrrolidone) (PVP) facilitated synthesis of silver nanoplates[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2018, 20(22): 15507–15517. doi: [10.1039/C8CP01610K](https://doi.org/10.1039/C8CP01610K).
- [32] Wang Hua, Li Yang, Li Chen, et al. Facile synthesis of AgBr nanocubes for highly efficient visible light photocatalysts[J]. *Crystengcomm*, 2012, 14(22): 7563. doi: [10.1039/c2ce25750e](https://doi.org/10.1039/c2ce25750e).
- [33] Yang Hui, Liu Yan, Shen Qianhong, et al. Mesoporous silica microcapsule-supported Ag nanoparticles fabricated via nano-assembly and its antibacterial properties[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(45): 24132. doi: [10.1039/c2jm35621j](https://doi.org/10.1039/c2jm35621j).
- [34] Wang Zhongliao, Zhang Jinfeng, Lv Jiali, et al. Plasmonic Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>/AgBr/Ag composite: Excellent photocatalytic performance and possible photocatalytic mechanism[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396: 791–798. doi: [10.1016/j.apsusc.2016.11.031](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.031).
- [35] Moura J V, Freitas T S, Cruz R P, et al. β-Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> microcrystals: Characterization, antibacterial properties and modulation analysis of antibiotic activity[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2017, 86: 242–247.
- [36] Zhu Jiajun, Xu Meng, Yang Wulin, et al. Friction and wear behavior of an Ag–Mo Co-implanted GH4169 alloy via ion-beam-assisted bombardment[J]. *Coatings*, 2017, 7(11): 191. doi: [10.3390/coatings7110191](https://doi.org/10.3390/coatings7110191).
- [37] Gulbiński Witold, Suszko Tomasz. Thin films of MoO<sub>3</sub>–Ag<sub>2</sub>O binary oxides—the high temperature lubricants[J]. *Wear*, 2006, 261(7-8): 867–873. doi: [10.1016/j.wear.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.008).
- [38] Li Shuangjian, An Yulong, Zhou Huidi, et al. Plasma sprayed YSZ coatings deposited at different deposition temperatures, part 2: Tribological performance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 998–1007. doi: [10.1016/j.surfcoat.2018.06.093](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.093).
- [39] Liu Jiongjie, Wang Zixi, Yin Bing, et al. A novel method to prepare self-lubricity of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ag composite: Microstructure, mechanical and tribological properties[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(9): 3745–3748. doi: [10.1111/jace.15569](https://doi.org/10.1111/jace.15569).
- [40] Zhang Tiantian, Lan Hao, Huang Chuanbing, et al. Formation mechanism of the lubrication film on the plasma sprayed NiCoCrAlY–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–AgMo coating at high temperatures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319: 47–54. doi: [10.1016/j.surfcoat.2017.03.065](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.065).
- [41] Aouadi Samir M, Paudel Yadab, Luster Brandon, et al. Adaptive Mo<sub>2</sub>N/MoS<sub>2</sub>/Ag tribological nanocomposite coatings for aerospace applications[J]. *Tribology Letters*, 2007, 29(2): 95–103.

DOI: 10.16078/j.tribology.2019143

# 攻角对聚醚醚酮/泡沫镍双连续复合材料料浆冲蚀行为的影响

杨晓光<sup>1,2</sup>, 姜胜利<sup>2</sup>, 张雪<sup>2</sup>, 段德莉<sup>2\*</sup>, 李曙<sup>2</sup>, 张会臣<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026;

2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 聚醚醚酮(PEEK)/泡沫镍双连续复合材料是一种新型复合材料, 它是由比强度高的PEEK树脂(基体相)和韧性较高的泡沫镍(增强相)牢固结合而成, 具有两相相互连通、拓扑连续和各向同性等特点。使用孔径为100 PPI(每英寸孔隙数目)的泡沫镍与PEEK树脂混合, 采用热压成型技术制备了PEEK/泡沫镍双连续复合材料(PEEK-Ni)。利用喷射式腐蚀冲蚀试验设备研究了纯PEEK树脂、金属镍和PEEK-Ni在5个攻角下(30°、45°、60°、75°和90°)的料浆冲蚀行为。使用ANSYS Fluent有限元仿真软件对不同攻角下料浆的冲蚀过程进行建模和仿真, 并设置了边界条件。试验和仿真的结果均表明: 随着攻角增加, 冲蚀损伤形貌由月牙形损伤区域变为U型损伤区域, 并最终发展成为围绕驻点的环形损伤区域, 试验和仿真能相互吻合。由于泡沫镍具有遮挡效应和协同效应, PEEK-Ni比纯PEEK具有更低的冲蚀损伤量, 且对攻角不敏感。

**关键词:** 料浆冲蚀; 攻角; 仿真; 聚醚醚酮; 双连续复合材料; 损伤机理

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0766-11

## The Influence of Impact Angle on Erosion Behavior of PEEK/Ni Foam Co-continuous Composite

YANG Xiaoguang<sup>1,2</sup>, JIANG Shengli<sup>2</sup>, ZHANG Xue<sup>2</sup>, DUAN Deli<sup>2\*</sup>, LI Shu<sup>2</sup>, ZHANG Huichen<sup>1</sup>

(1. Dalian Maritime University, Liaoning Dalian, 116026

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Polyether-ether-ether -ketone (PEEK)/Nickel co-continuous composites (“PEEK-Ni” for short) is a type of new structure composites. This material is composed of PEEK polymer with high specific strength (matrix phase) and nickel foam with high toughness (reinforcement phase), which has the characteristics of two-phase interconnection, topological continuity and isotropy. Hot pressing technology was used to obtain the PEEK-Ni by infiltrated the melt PEEK polymer into the nickel foam of 100 PPI (pores per inch). The slurry erosion behavior of pure PEEK resin, pure nickel and PEEK-Ni at 5 different impact angles (30°, 45°, 60°, 75° and 90°) was investigated by slurry jet erosion test apparatus. The slurry erosion process with different impact angles was modeled and simulated by using ANSYS Fluent finite element simulation software, and the boundary conditions were set. The results showed that, with the increase of impact angle, the damage area changed from crescent-shaped to U-shaped, and finally it develop into the annular damage area around the stagnation point. The simulation results agreed well with the slurry erosion experiment. Due to the shielding effect and synergistic effect of nickel foam, PEEK-Ni has exhibited lower erosion damage than pure PEEK, and the slurry erosion damage of PEEK-Ni was not sensitive to the impact angle.

**Key words:** slurry erosion; impact angle; simulation; PEEK; Co-continuous phase composite; damage mechanism

Received 29 July 2019, revised 9 October 2019, accepted 14 October 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: duandl@imr.ac.cn, Tel: +86-24-23971775.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51275506, 51801207).

国家自然科学基金项目(51275506, 51801207)资助。

双连续相复合材料(又被称为互穿相复合材料)是一种新型的具有三维网络增强结构的复合材料,其基体相与增强相均在三维空间内各自连续分布,并以拓扑贯穿的形式连通整个结构<sup>[1-3]</sup>.与颗粒或纤维增强复合材料相比,双连续相复合材料还具有各项同性、利于分散和传递应力等优点,即便将材料中的某一相从结构中去掉,另一种材料仍能保持完整的连续结构,最值得关注的是,两种材料均能在双连续相复合材料中表现出各自独特的性质.美国科学家David R Clarke<sup>[4]</sup>于1992年首先提出双连续相复合材料的概念,并引起了各国学者的广泛关注.目前,经过20多年的发展和研究,双连续相复合材料已逐渐成为一个独立的复合材料体系.

冲蚀磨损是液体或固体以松散颗粒形式按一定速度和角度对材料表面进行冲击所造成的一种材料磨损现象,其广泛存在于机械、冶金、能源、建材和航空等诸多领域中,是引起材料破坏或设备失效的重要原因之一<sup>[5]</sup>.目前,这些设备中常使用单一材料制作耐冲蚀部件,如喷砂设备中使用陶瓷材料制作喷嘴<sup>[6]</sup>,湿法冶金中使用金属材料制作搅拌釜,在制药行业中常使用高分子材料制作反应釜中的搅拌器等.然而无论是金属、陶瓷还是树脂,均不能在复杂的应用环境中提供足够的抗冲蚀能力<sup>[7]</sup>,因此,有学者提出通过多种材料复合的方法解决材料的冲蚀磨损问题.吕广超等<sup>[8]</sup>制备了玻璃纤维/环氧树脂复合材料(GF/EP)并研究了其耐冲蚀行为,结果表明:纯EP的耐固体粒子冲蚀磨损性能远优于GF/EP复合材料,这是由于复合材料中添加了大量脆性的玻璃纤维,颗粒的冲击过程会使纤维提前出现破碎和断裂,从而加剧了材料的流失.蔺文峰<sup>[9]</sup>使用纳米级别的CaCO<sub>3</sub>颗粒对聚氨酯(PU)进行改性,冲蚀试验证明当CaCO<sub>3</sub>颗粒质量分数超过1%后,复合材料的冲蚀性能急剧下降,这是由于复合材料在制备的过程中,纳米CaCO<sub>3</sub>颗粒容易发生团聚,在冲蚀过程中颗粒大面积从基体中脱出,最终导致材料的急剧流失.可见使用颗粒或纤维等对基体进行改性,结果并不理想.

冲蚀磨损具有复杂的作用机制,有限元方法可以模拟颗粒的冲击以及液流状态等.杜明超等<sup>[10]</sup>借助ABAQUS软件,使用FEM-SPH耦合的方法模拟了单个硬质菱形颗粒冲击靶面的过程,研究了颗粒在冲蚀过程中对靶材的作用机制.郑思佳等<sup>[11]</sup>使用CFD的方法,模拟了输气管路弯头内壁面受喷砂冲蚀的过程,并结合试验结果对传统冲蚀模型进行了适当修正.然

而,采用有限元方法模拟射流冲蚀过程的研究鲜有报道,此类模拟工作,可以为材料的冲蚀机理研究提供必要的理论依据.

料浆冲蚀工况与喷砂冲蚀不同,料浆中的液流载体对靶材产生腐蚀作用,使靶材的耐磨性能发生严重退化<sup>[12-13]</sup>.据研究,在喷砂冲蚀中造成材料的质量流失的速度阈值大约在10 m/s,而料浆冲蚀在10 m/s的流速下可以使材料出现明显的损伤,可见料浆冲蚀与喷砂冲蚀对材料的作用机制和规律完全不同<sup>[14]</sup>.

综上所述,为进一步提高复合材料耐冲蚀性能,本文作者选用耐高温性好,强度高的PEEK树脂作为基材,使用热压成型技术制备了聚醚醚酮/泡沫镍双连续相复合材料(PEEK-Ni).利用自制喷射式冲刷腐蚀试验装置,研究PEEK-Ni、PEEK及镍在5个攻角下(30°、45°、60°、75°和90°)的耐料浆冲蚀行为.随后,使用ANSYS Fluent软件对试验工况进行了模拟,对料浆中的颗粒速度分布等参数进行了分析,探索了材料在不同攻角下的损伤机理.

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料及制备

作为PEEK-Ni的原材料,本文中所使用到的PEEK粉末由长春吉大特塑工程研究有限公司提供,PEEK粉末原料牌号为085P,该粉末粒度分布在30~80 μm之间;泡沫镍由吉林卓尔新型材料有限公司提供,选取孔径为100PPI的泡沫镍作为PEEK-Ni的增强体(骨架),用于改善PEEK树脂的耐料浆冲蚀能力,该泡沫镍骨架为正十二面体结构,其结构示意图和微观形貌如图1所示,泡沫镍详细参数列于表1中.

PEEK-Ni使用高温模压法制备<sup>[15]</sup>,该方法首先需要对PEEK粉末施加不超过50 MPa的压力,使粉末压实以减少粉末内部空气,随后将压实的PEEK块体放在泡沫镍骨架上方;使用高温炉将模具整体加热至380 °C并保温10 min,缓慢施加不超过2 MPa的压力使熔融的PEEK树脂完全、充分地浸入泡沫镍骨架之中;最后将模具降温至120 °C并保温40 min以保证PEEK的结晶程度,使复合材料具有较好的综合力学性能.

### 1.2 试验方法

料浆冲蚀试验在自制的喷射式冲刷腐蚀试验装置中进行,图2(a)为该装置的照片,图2(b)为其结构示意图.该装置可模拟料浆冲蚀射流工况,用于考察材料的耐料浆冲蚀性能.冲刷腐蚀试验装置主要由四部分组成,分别是电控系统、循环系统、加速系统以及射

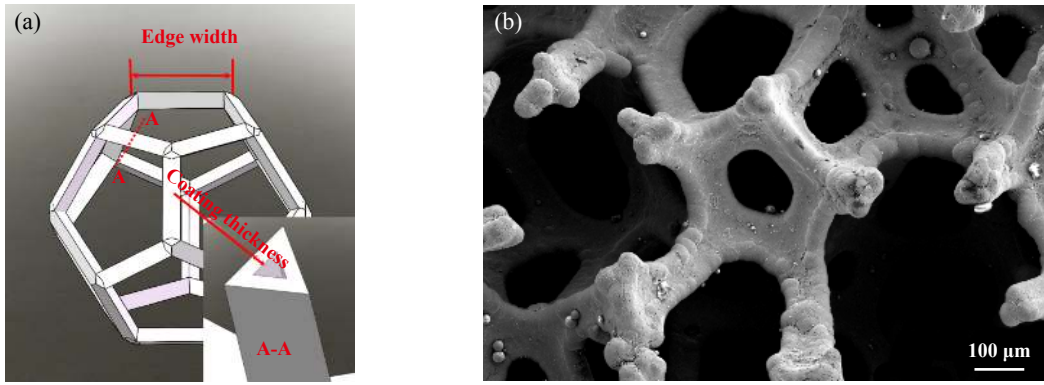


Fig. 1 The structure sketches (a) and microstructure (b) of the Ni foam

图1 泡沫镍结构示意图(a)及其微观形貌(b)

表1 泡沫镍规格参数

Table 1 Parameters of the nickel foam

Sample	Pores per inch(PPI)	Volume density/(g/cm <sup>3</sup> )	Coating thickness/μm	Edge width/μm
Nickel foam	100	0.214	11	100

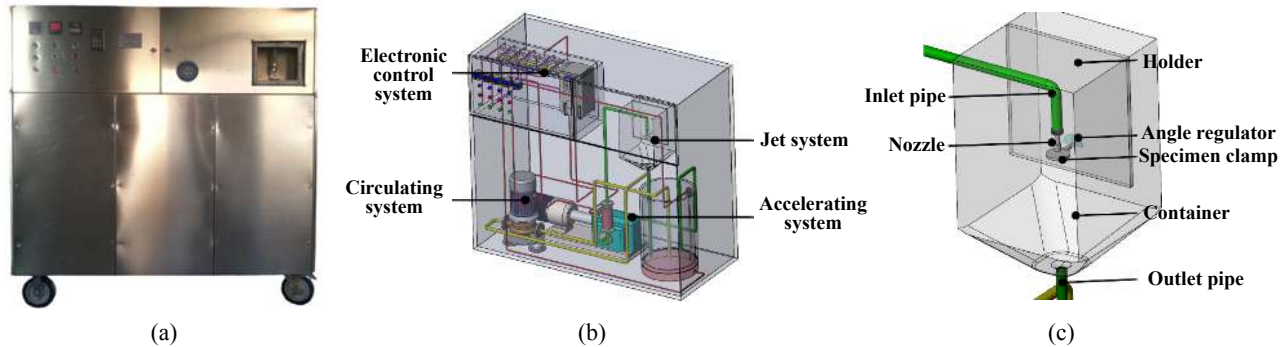


Fig. 2 Self-made slurry impinging jet apparatus (a) Photograph of the apparatus (b) Structure diagram of the apparatus and (c) Schematic diagram of the jet system

图2 自行研制的冲刷腐蚀试验装置(a)装置照片(b)装置结构示意图及(c)射流系统示意图

流系统。料浆经循环系统混合均匀后,由循环泵加速至所需流速,试验过程中的时间、温度和流速等参数均可以通过电控系统进行调整和控制。图2(c)为射流系统示意图,料浆流经喷嘴喷出后冲击至样品平台,试验的攻角可通过平台后方角度调节仪进行调整,冲击后的料浆流经容器短暂收集后回流至料浆罐。试验过程中样品与喷嘴均处于空气当中,为非浸没式冲刷试验。

将蒸馏水与质量分数为4%的石英砂混合配成冲刷料浆,料浆中的石英砂粒径约为53 μm(275目);喷嘴直径为2 mm;喷嘴中心到靶材表面的距离为5 mm;试验过程中料浆的冲刷速度为30 m/s,该速度由数字流量控制器精确控制;料浆的冲击角度为液流与靶材所成的最小夹角( $\phi$ ),试验中选取30°、45°、60°、75°和90°作为料浆冲刷的攻角,冲刷时间设置为2 h;进行冲刷试验的样品(靶材)尺寸为 $\phi 12.5$  mm $\times$ 5 mm,每组试

验均重复2次以上以减小数据误差。

试验前,样品采用最高800#砂纸进行打磨,随后依次使用蒸馏水、酒精和石油醚等在超声波清洗器中对样品进行清洗,最后置于150 °C真空条件下烘干2 h以去除复合材料中的水分及其他杂质,使用排水法测量样品的室温体积;试验后使用同样方法对样品进行清洗和测量,试验前后体积差作为材料的体积损失量,本文作者据此评价材料的耐料浆冲刷性能。

冲刷试验结束后,使用基恩士VR-3200三维轮廓测量仪观察PEEK-Ni损伤表面形貌;采用电子扫描显微镜(SEM)观察样品损伤区域的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的冲刷行为

在不同攻角下测试PEEK-Ni、PEEK树脂以及金



属镍的耐料浆冲蚀性能, 其结果如图3所示. 从冲蚀体积损失量随攻角变化的曲线中可以观察到, PEEK树脂的损失量随攻角先增大后降低, PEEK树脂的最大损失量出现在75°攻角下; 而PEEK-Ni的冲蚀损失量随攻角略有增加, 最终在75°~90°间出现峰值, 任何攻角下其损失量均低于PEEK树脂. 该结果与PEEK复合材料的喷砂冲蚀结果相差较大<sup>[16]</sup>, 这是由于二者损伤机理不同所致<sup>[17]</sup>. 金属镍具有更优的韧性和强度, 其耐冲蚀性能要优于PEEK-Ni和PEEK树脂. 金属镍的冲蚀损失量随攻角变化不明显, 峰值分别位于30°和75°攻角下, 90°攻角下损失量最小.

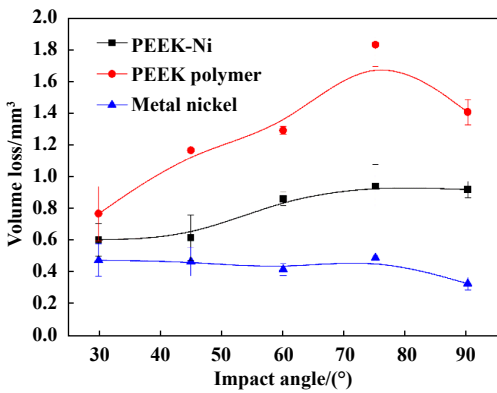


Fig. 3 The relationship between volume loss and impingement angle

图3 攻角-体积损失关系曲线图

图4为不同攻角下材料表面的宏观损伤形貌, 除90°攻角外, 在其他各攻角下料浆的冲蚀方向均为由下至上.

三种材料在相同攻角下均表现出极为相似的损伤形貌, 由于PEEK树脂与金属镍为均质材料, 其冲蚀形貌更具代表性. 从图4中可以观察到, 三种材料无论攻角如何, 均出现了一处损伤较小的区域, 该区域为驻点区域, 以金属镍的损伤形貌为例, 图中标记的位置即为驻点区域的位置. 在攻角为90°时, 驻点区域为圆形, 位于料浆冲击点(射流中心)正下方, 随着攻角的降低, 驻点区域不断被压缩, 面积逐渐缩小并远离料浆冲击点.

单纯观察材料的损伤区域形状, 在30°和45°攻角下, 材料表面展现出月牙形的损伤区域, 不同的是, 30°攻角月弓处的损伤较为严重; 60°攻角下, 损伤区域变为U形; 当攻角超过75°后, 损伤区域为封闭的环形. 与其他两种材料相比, PEEK-Ni的损伤表面较为粗糙, 损伤表面镍棱要高于基体材料(见图4).

### 2.2 有限元分析

在料浆冲蚀中, 料浆流的持续冲击是造成材料表面损伤的源头, 而液固两相流对材料表面的冲蚀过程, 无论在理论分析还是在试验测定上, 均较为困难. 为详细了解样品表面受料浆的冲蚀情况, 使用ANSYS Fluent有限元分析软件对料浆冲蚀过程进行模拟和分析.

首先使用ANSYS workbench中的Spaceclaim软件对冲蚀喷嘴、流道及靶面等进行建模, 模型如图5所示; 使用非结构网格对复杂的三维模型进行网格划分, 以使网格能够更好地贴合模型; 以Realizable k-epsilon作为湍流模型, 在材料中添加液态水(water-

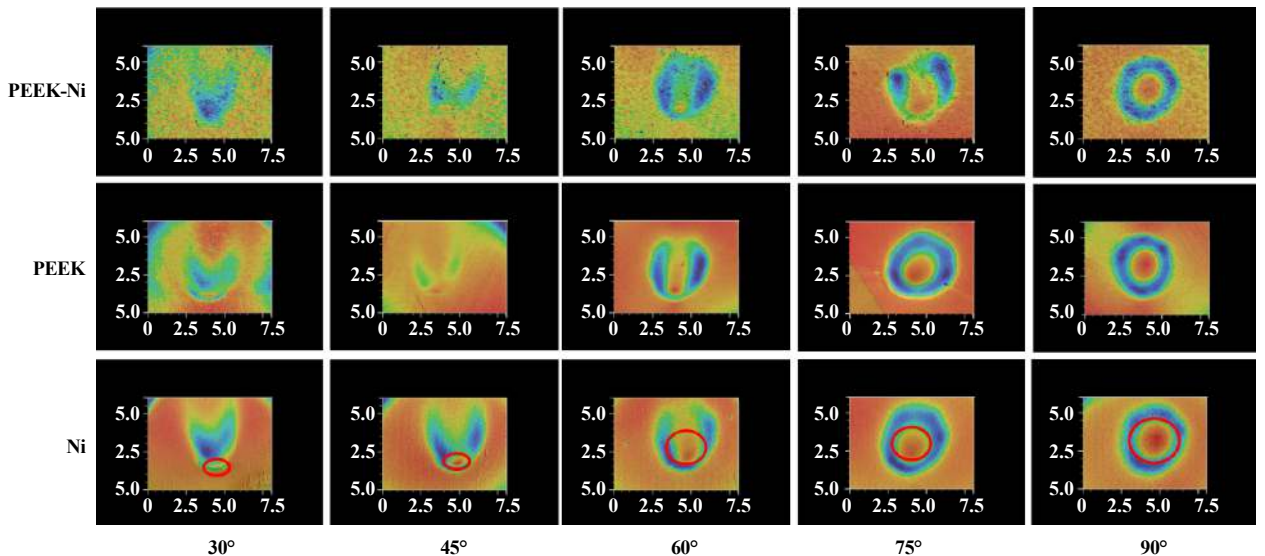


Fig. 4 The macro damage morphologies of the three materials after slurry erosion tests

图4 材料冲蚀后表面宏观损伤形貌

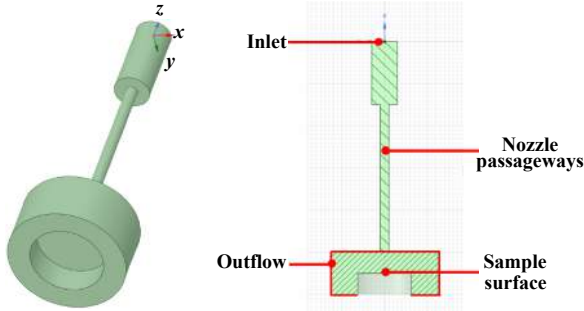


Fig. 5 Simulation modeling of slurry erosion process  
图5 料浆冲蚀过程的仿真建模

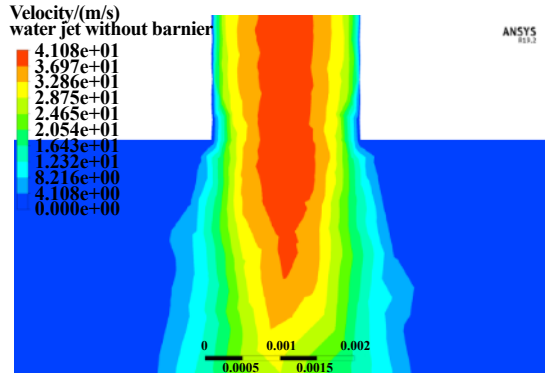


Fig. 6 The simulation results of slurry erosion test  
图6 料浆冲击过程仿真结果

liquid)作为连续相;设置进口为Velocity inlet、空间边界为outflow,其余边界默认为壁面Wall,其中,在inlet边界条件中输入由数字流量计测得的液流速度,计算100次迭代以获得初步的流体模型.随后开启离散相模型Discrete Phase Model(DPM),在inject中设置颗粒注入面,设置颗粒直径和质量流速等参数;参考Huser及Edward等的文献<sup>[18-19]</sup>对壁面反弹系数(Discrete Phase Reflection coefficients)等进行设置,最后在100次迭代的基础上继续计算迭代1 000步待结果收敛.图6为料浆冲击过程的仿真结果.

料浆喷出后发生扩散<sup>[20]</sup>,该扩散角度与喷嘴结构、喷嘴尺寸以及料浆流速等有关,当流速为30 m/s、喷嘴直径为2 mm时,通过有限元分析计算可得此时扩散角 $\theta$ 约为 $5.71^\circ$ .当喷嘴中心距离样品表面5 mm时,样品主要处于料浆流的破裂段中<sup>[21]</sup>.经过扩散后,部分料浆流的冲蚀方向发生改变,这导致颗粒冲击靶面的角度也有所变化.本文中 $\alpha$ 表示料浆流冲击靶面时,与靶面之间所形成的夹角.从料浆冲蚀靶面示意图(图7)可以看出,当攻角固定时,在A点处料浆与靶面的夹角最大, $\alpha_{max}$ 为 $(\pi-\Phi+\theta)^\circ$ ,其中 $\Phi$ 为冲蚀攻角, $\theta$ 为料浆流的扩散角.

料浆冲击表面时的动能及其流量决定了靶材的损伤程度,因此考察料浆流在冲击靶材时的速度,对于研究材料的损伤形貌和损伤机理至关重要.有限元软件将靶材理想化为一刚性材料,当料浆流冲击到靶面的瞬间,颗粒的速度均为零.正因如此,本文中高于靶面0.2 mm的平面作为基准面,对速度、压力和颗粒轨迹等进行了仿真,通过这种方法,可以进一步了解即将冲击到靶面料浆流的状态.

图8所示分别为不同攻角下样品试验后截面损伤轮廓和通过Fluent分析获得的数据信息.各图中曲线意义如下:黑色实线表示PEEK-Ni样品经不同攻角冲蚀后样品的截面轮廓;红色实线为有限元仿真软件计算得到的料浆速度分布曲线;蓝色和粉色实线依次代表料浆沿*i,j*两个坐标轴的速度分布[见图8(f)].值得注意的是,当*i*方向的颗粒速度为负时,表示颗粒正以一定速度远离样品表面,无法对样品造成损伤;青色实线代表靶材表面上的压力分布,该压力值是以喷嘴入口原点处(inlet)压力为基准的相对压力.

从图8中可以看出,靶面的损伤程度与料浆流速

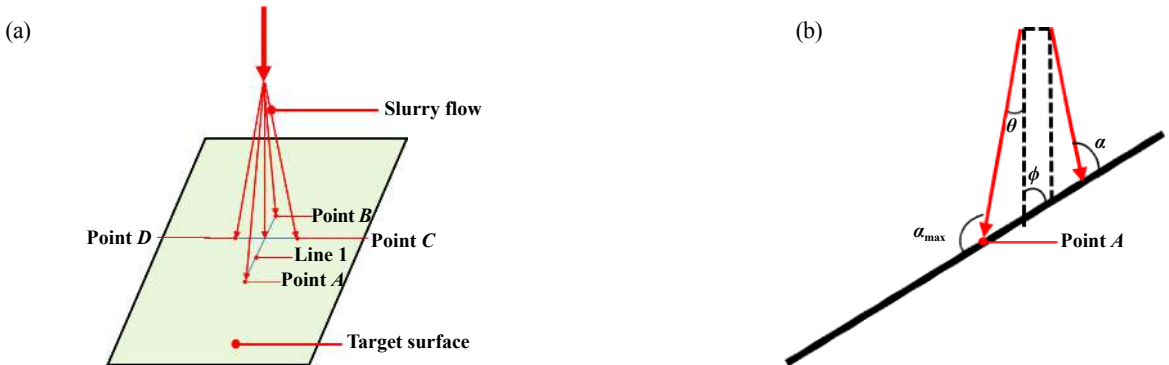


Fig. 7 The sketch of slurry erosion on the target surface (a) erosion range on the target surface (b) included angle between the slurry and the target surface on point A

图7 料浆冲蚀靶面示意图(a)靶面冲蚀范围 (b)A点处料浆与靶面夹角示意图

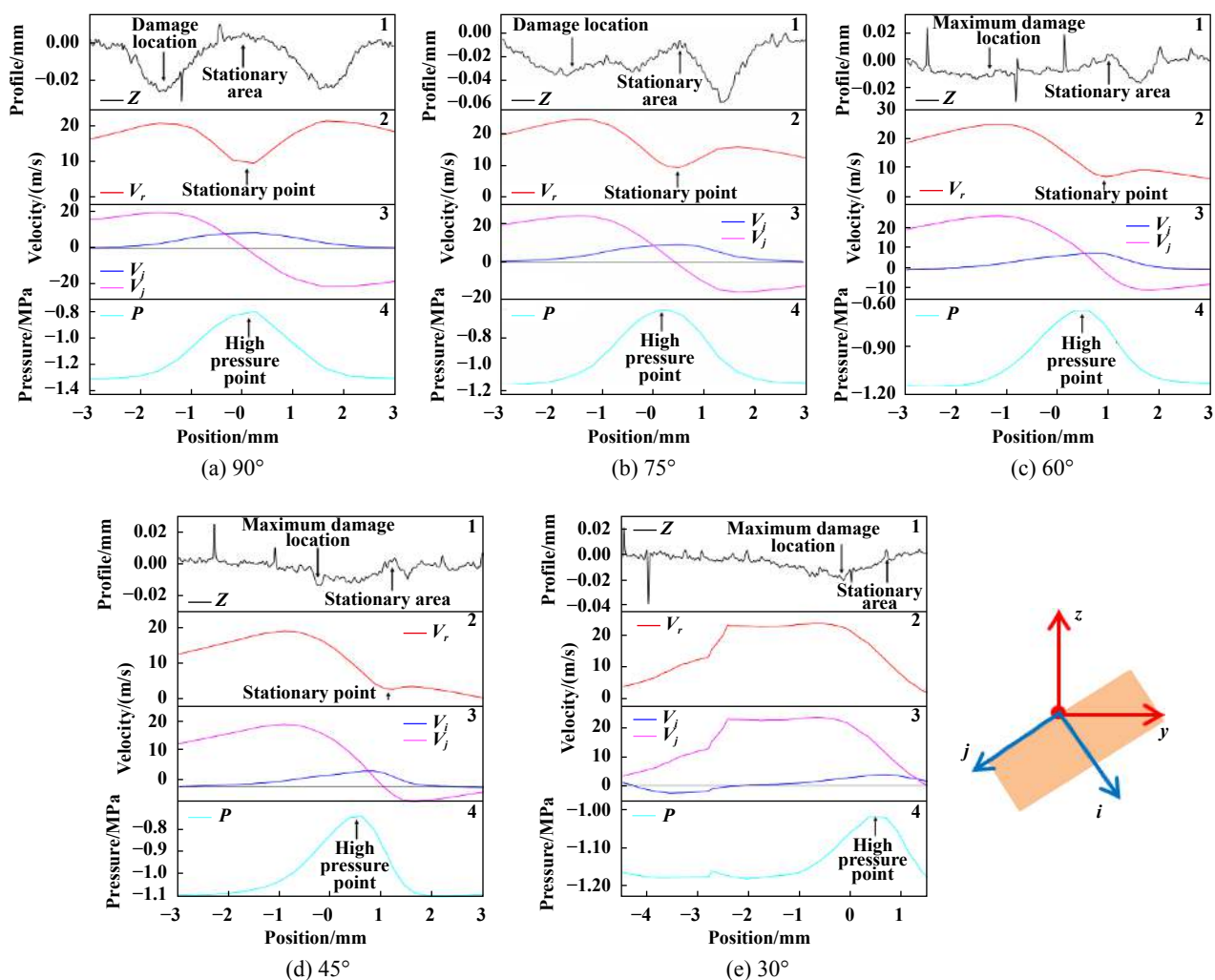


Fig. 8 The damage cross profile and the calculated slurry velocity and pressure distribution curves by Fluent at different impact angles

图 8 不同攻角下样品截面损伤轮廓及Fluent计算得到的料浆速度及压力分布曲线.

密切相关, 较为明显的是, 材料的最大损伤位置几乎与料浆的最大速度一一对应. 从料浆流法向和切向的速度上看: 样品在驻点区域附近, 靶面主要受垂直向下的料浆冲击, 此处料浆切向速度近乎为零(图8蓝色实线所示); 在距离驻点区域较远的损伤区域, 料浆的切向冲击速度远大于法向冲击速度(图8粉色实线所示). 除此以外, 还能够观察到除90°攻角外, 样品表面最大压力点与驻点位置并不重合, 驻点位置稍有滞后.

通过有限元软件仿真, 发现靶面上方存在1个高压区, 料浆流会受到高压区的阻力作用而发生绕流现象, 压差的存在是产生绕流的主要原因. 料浆流所受阻力可以从两方面看, 一方面使料浆流减速, 另一方面使料浆流发生偏转. 受偏转力的影响, 料浆在击中靶材前, 液流夹带颗粒会向周围分散. 显然, 夹角 $\alpha$ 越大, 料浆越容易在偏转力的影响下绕出靶材, 使得A点

[图7(a~b)]附近颗粒的命中率降低.

从样品表面压力分布图(图9)可知, 高压中心与射流中心(黑色十字)位于同一直线上, 但二者在低角度冲蚀时并不重合. 当攻角较低时, 样品表面高压区轮廓呈椭圆形, 其侧面轮廓下低上高, 如图9所示, 高压位置靠近图7所示B点一侧, 随着攻角的增加, 样品表面高压区轮廓由椭圆形变为圆形, 高压点逐渐与射流中心重合.

攻角改变后, 高压区域的形状和位置随之变化, 直接影响了料浆流的状态. 图10为不同攻角下颗粒的冲蚀轨迹, 在低攻角下料浆流主要向A点(图7所示)一侧冲刷, 随着攻角的增加, 料浆流逐渐向B、C和D点(见图7)方向分流, 到90°攻角时各个方向上的料浆流分布相同. 料浆流的分布必然影响靶材的损伤形貌, 把材料表面分为9个区(见图11), 红点处为射流中心.

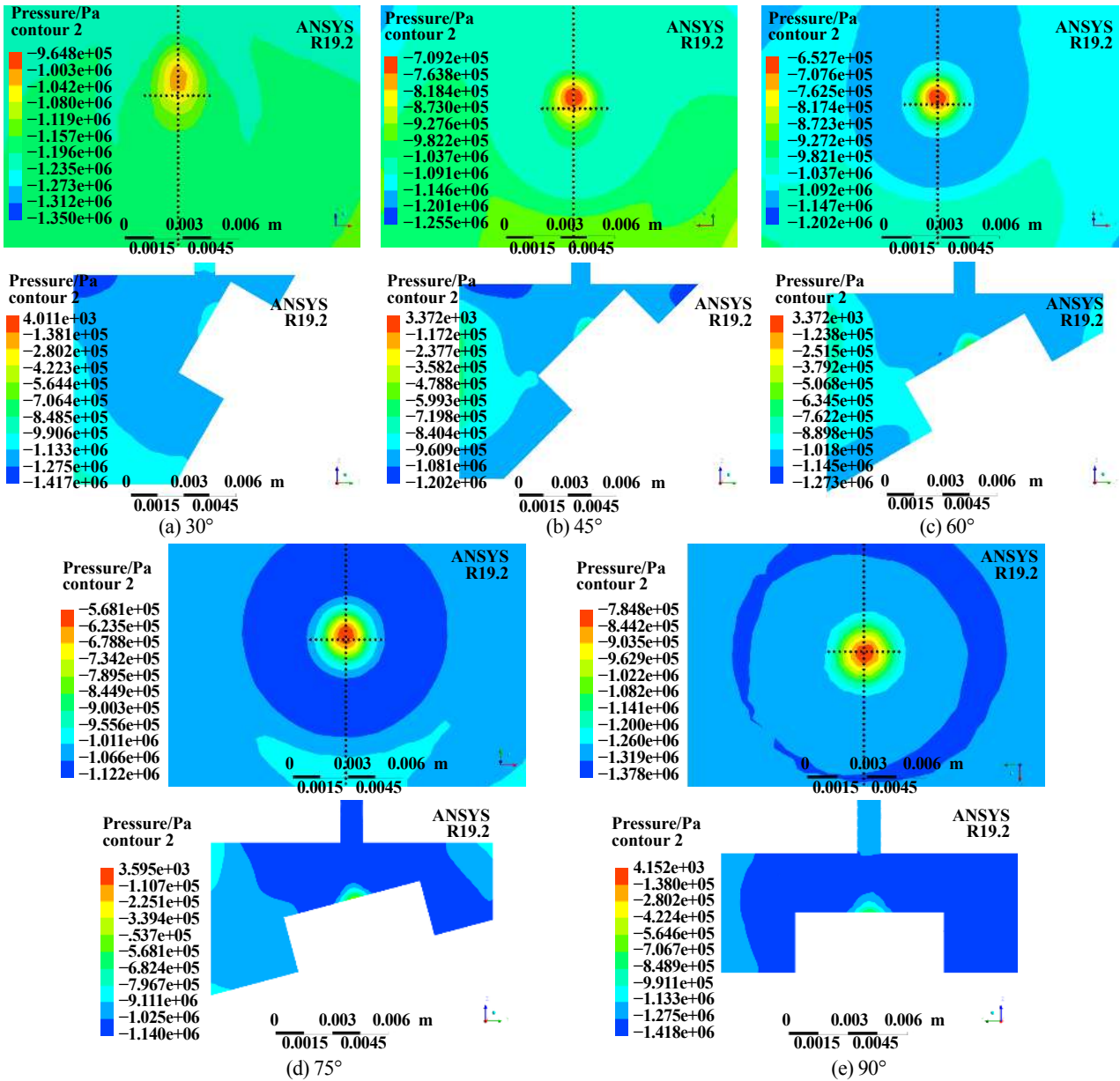


Fig. 9 The pressure distribution above the sample (1) the sample surface and (2) the plane perpendicular to the sample surface and through line 1

图9 样品上方压力分布情况(1)样品表面及(2)经过Line1并垂直于样品表面的平面

当样品处于30°攻角时,样品表面高压区中心紧贴B点一侧,位于区域Ⅷ中,因此绝大部分料浆受偏转力影响而向B处下方一侧冲刷。而A处附近的料浆因具有最大的 $\alpha$ 角,因此几乎很难对区域Ⅱ位置造成损伤。最终在料浆流量和流速的综合作用下,区域Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ损伤严重,区域Ⅰ、Ⅲ损伤较轻,靶材表面最终形成如图5中30°攻角下所示的月牙型损伤区域。当材料处于45°攻角时,高压区向射流中心移动,部分料浆受此影响开始逐渐向C和D方向偏转,因此形成两侧深(区域Ⅰ、Ⅳ和区域Ⅲ、Ⅵ)而中部损伤减小(区域Ⅴ)的月牙形损伤区域,如图5所示。随着高压区继续下移,更多

的料浆向射流中心上方和两侧偏转,向B、C和D方向冲刷的料浆流量增加,对靶材的区域Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ等造成严重损伤并形成U型损伤区域。此时随着攻角的提高,夹角 $\alpha_{max}$ 逐渐减小,偏转力对料浆影响减弱,这使得区域Ⅱ处损伤有所增加;当攻角超过75°后,高压中心点与射流中心重合,此时各向支流的状态以及材料表面的损伤程度趋于一致,最终形成了1个封闭的圆环型损伤区域(图5中75°和90°攻角所示)。在75°攻角下,PEEK-Ni的损伤形貌与另外两种材料略有不同,这可能是由于泡沫镍的存在改变了料浆流的局部流向所致。

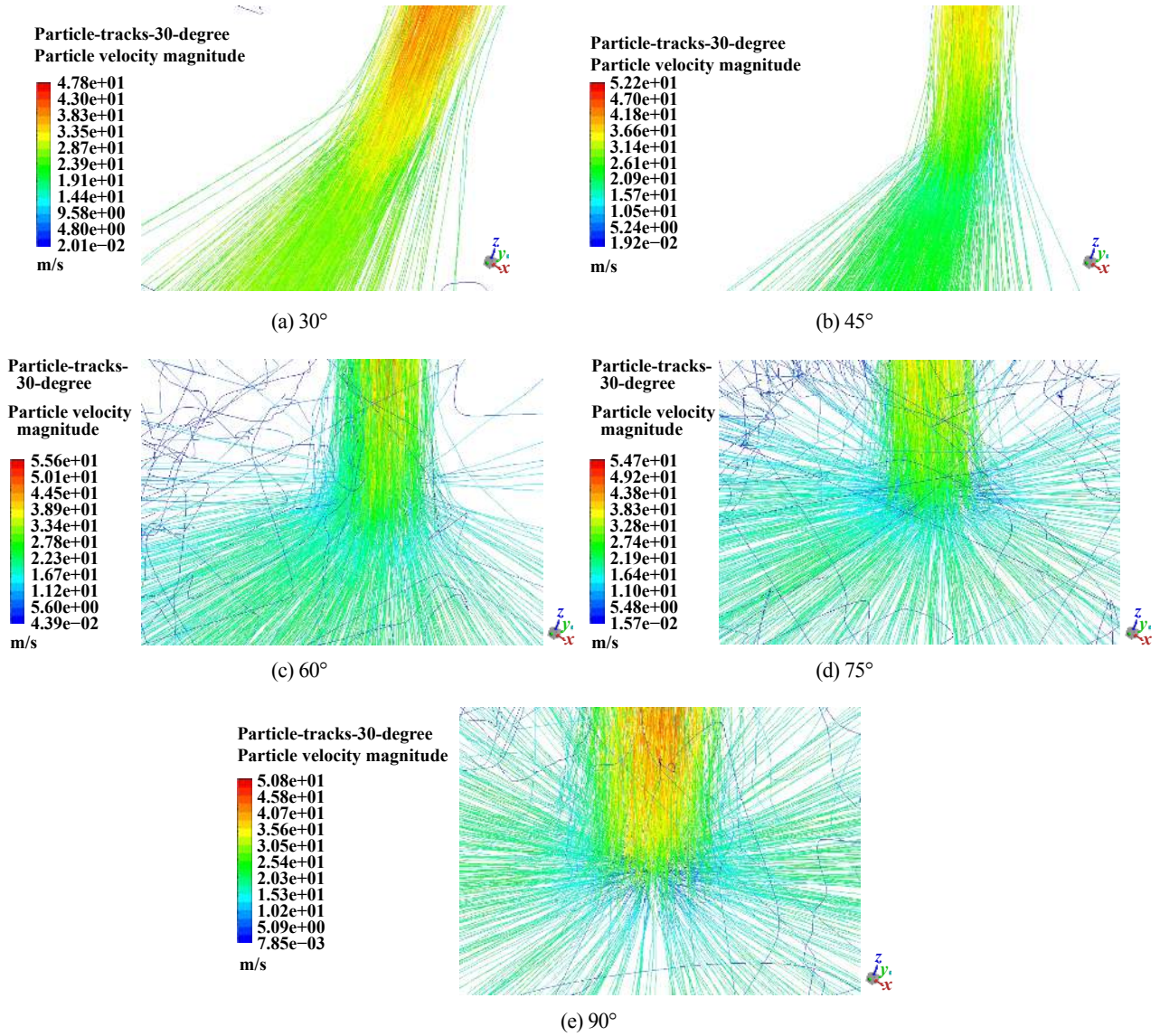


Fig. 10 The distribution of the slurry flow under impact angle of 30°、45°、60°、75° and 90°

图 10 30°、45°、60°、75°以及90°攻角下的料浆流的分布

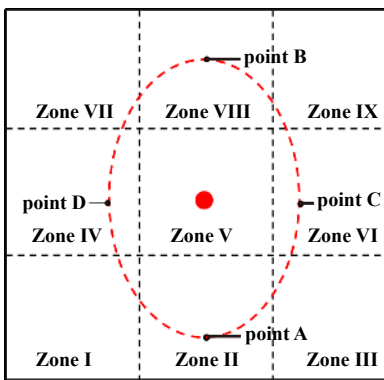


Fig. 11 The sketch of the damage area of the samples

图 11 样品损伤区域示意图

通过建模仿真, 计算了冲蚀过程中料浆流的速度和分布状态, 料浆流的速度与材料的损伤深度吻合,

仿真结果与试验结果符合性较好.

### 2.3 PEEK-Ni损伤机理

为进一步了解不同攻角下PEEK-Ni的损伤机理, 使用SEM对PEEK-Ni的表面微观损伤形貌进行了观察, SEM照片中深色部分为PEEK树脂基体, 浅灰色部分为金属镍骨架(图12). 重点观察了每组试验后靶面上的3个区域, 其中区域1位于驻点附近, 区域2和区域3位于材料表面损伤较大的位置.

从SEM照片中可以观察到, 区域1处表面划痕无明显方向性, 损伤主要以翘起的唇片结构为主, 如图12(a~e)中的区域1所示, 这是由于该区域主要受料浆流的法向冲击所致. 核心部分的高速料浆流会突破高压区域的影响到达样品表面, 对其进行持续的冲击<sup>[14]</sup>, 使得该处靶面损伤没有方向性, 呈现出锻打等特征.

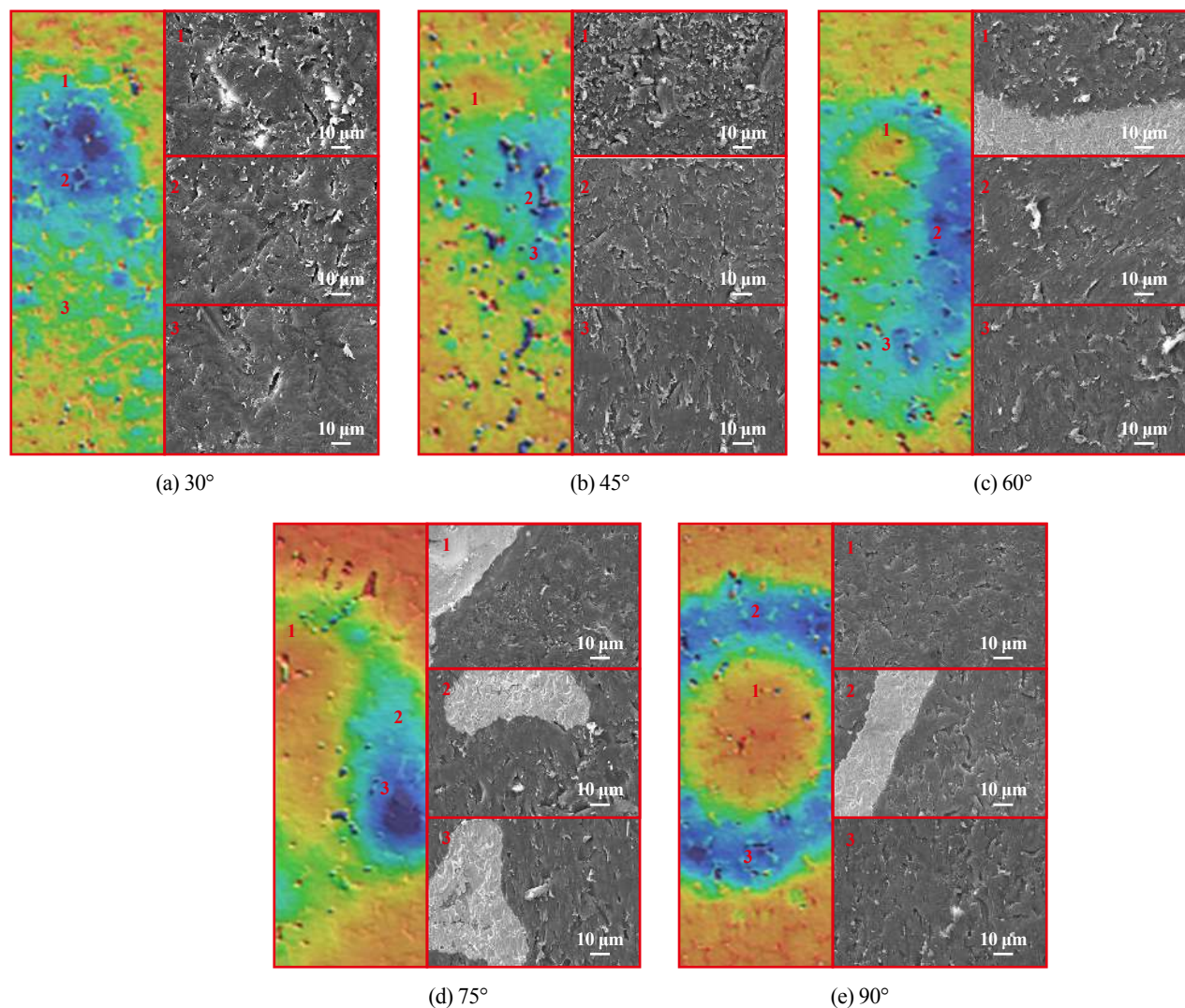


Fig. 12 The micro morphologies of PEEK-Ni after the erosion test

图 12 冲蚀试验后PEEK-Ni表面微观形貌

在颗粒的冲击和锻打过程中,树脂基体表面产生裂纹,并在裂纹上方形成唇片,唇片在颗粒的持续作用下发生断裂,最终以屑片的形式从母材表面脱落;泡沫镍因具有良好的韧性和强度,在受到料浆法向作用时,表面仅出现部分韧窝状形貌。

区域2和3处表面裂纹具有明显的方向性,裂纹沿着料浆冲蚀的方向有序扩展,损伤主要以微切削为主,如图12(a~e)中2、3所示,有所不同的是,当攻角较小时,裂纹长度较长,约为10~20 μm,而攻角较大时,尤其是在90°攻角时,裂纹长度仅有2~5 μm。PEEK-Ni在颗粒的剪切力作用下,材料表面出现微切削特征。当微切削损伤汇聚后,可以看到大面积的材料被去除。

仿真结果(图8)和材料的微观损伤形貌均表明,在任何攻角下,材料都受到料浆流的切向和法向力的共同作用,且部分区域切向力远大于法向力,但随着攻

角的增加,法向力的权重逐渐增加。值得注意的是75°攻角下,三种材料均出现了较大的损伤量,这可能是由于在75°攻角下料浆流的切向速度25 m/s和法向速度10 m/s均较高,材料处于料浆切向作用和法向作用的混合区,这种混合作用使材料的损伤比其他攻角更为严重。总体上看,PEEK随攻角的增加损失量增大,表现出脆性特征;金属镍随攻角的增加损失量减小,表现出韧性特征;PEEK和镍在PEEK-Ni中保持了各自的优势,使PEEK-Ni的损伤对攻角不敏感。

图13(a~e)为通过SEM观察到的PEEK-Ni在界面处的损伤形貌,金属镍表面几乎没有明显的剥落痕迹,仅在小角度冲蚀试验下出现微切削留下的划痕,而在大攻角下,金属表面则出现韧窝状粗糙形貌。金属与PEEK树脂基体在界面处结合良好,未观察到两相分离现象。树脂基上受到的冲击力能够通过相界传

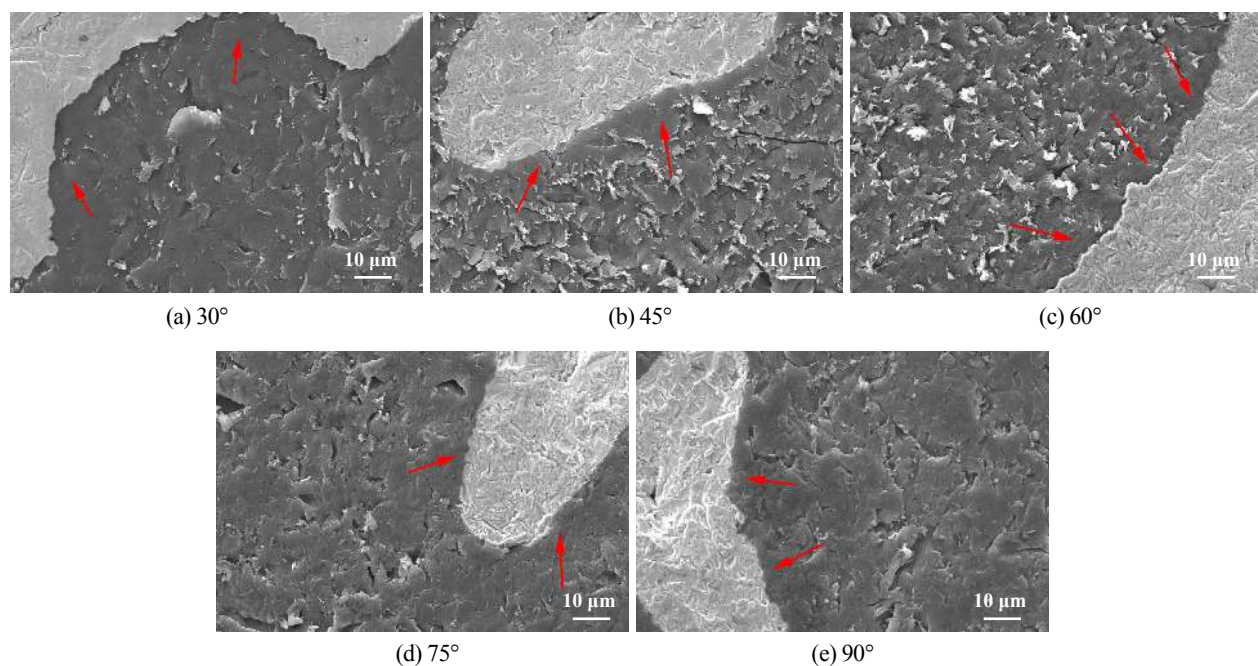


Fig. 13 The damage morphologies of the PEEK-Ni interface

图 13 PEEK-Ni界面处损伤形貌

递到金属镍中, 并沿泡沫镍的网状结构向材料内部传递. 泡沫镍的存在能够在一定程度上传递和分散材料表面受到的冲击力, 从而降低PEEK-Ni的损伤程度, 该作用亦被称为协同效应.

金属镍的韧性和强度均优于PEEK树脂, 因此当PEEK-Ni受到冲蚀后, 泡沫结构的金属镍损伤较弱, 随着冲蚀时间的延长, 镍棱慢慢高出基体表面, 如图5~6所示. 凸出的镍棱能够似屏障一般遮挡并拦截颗粒的冲击, 避免料浆流对基体的进一步冲击, 在距离两相界面5~10 μm处出现了一段明显的“无损伤或损伤较小”的区域, 足以证明泡沫镍起到了遮挡效应(图13标记处). 因此, 使用泡沫镍作为复合材料骨架, 起到了支撑和传递能量的双重作用, 能够有效改善PEEK树脂的耐冲蚀性能.

### 3 总结

采用热压成型技术制备了PEEK-Ni, 考察了该材料在不同攻角下的耐冲蚀性能. 使用有限元分析软件对冲蚀过程进行了模拟, 对料浆冲蚀的机理进行了分析. 模拟和试验结果表明:

a. 材料的损伤形貌由料浆流的分布和速度决定, 随着攻角增大, 损伤形貌由月牙形变为U形, 最终成为圆环形.

b. 在所有攻角下, 材料均受到法向力和切向力的共同作用, 且除驻点区域外切向力远大于法向力. 随

着攻角的增加, 法向力的权重逐渐增加. 在75°攻角下, 材料受到较大的切向力和法向力的共同作用, 损失量较大.

c. 在本文的冲蚀条件下, PEEK-Ni中PEEK和泡沫镍的界面结合紧密, 没有受到破坏, 基体相和增强相保持了各自的优点, 使PEEK-Ni对攻角不敏感.

d. PEEK-Ni中泡沫镍作为骨架, 减少了料浆对其周围树脂的损伤, 具有遮挡效应; 同时, 能够通过界面传递树脂受到的冲击力, 具有协同效应; 在两种效应共同作用下, 与PEEK相比, PEEK-Ni的耐冲蚀性能得到明显提升.

### 参考文献

- [1] Long Chunguang, Zhang Zhen, Guo Fangyu, et al. Effect of different porosity on aluminum alloy foam/polyformaldehyde interpenetrating phase composites[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 88-94 (in Chinese) [龙春光, 张臻, 郭芳宇, 等. 泡沫铝合金孔隙率对泡沫铝合金/聚甲醛互穿复合材料的影响[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(3): 88-94].
- [2] Jiang Shengli, Hou Sihan, Liu Yang, et al. Slurry erosion of nickel foam/epoxy/SiC co-continuous composite[J]. Tribology, 2017, 37(1): 44-51 (in Chinese) [姜胜利, 侯思焱, 刘洋, 等. 泡沫镍/环氧树脂/碳化硅双连续复合材料的料浆冲蚀行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(1): 44-51]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.01.006.
- [3] R Jhaver, H Tippur. Processing compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase

- composite (IPC)[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2009, 499(1): 507–517.
- [4] D R Clarke. Interpenetrating phase composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 75(4): 739–758.
- [5] Ma Ying, Ren Jun, Li Yuandong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2005, 31(1): 21–25 (in Chinese) [马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. *兰州理工大学学报*, 2005, 31(1): 21–25]. doi: [10.3969/j.issn.1673-5196.2005.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5196.2005.01.006).
- [6] Pan Mu, Luo Zhiping. Erosion of materials[J]. *Materials Science & Engineering*, 1999, 17(3): 92–96 (in Chinese) [潘牧, 罗志平. 材料的冲蚀问题[J]. *材料科学与工程*, 1999, 17(3): 92–96].
- [7] M Meyers, K Chawla. *Mechanical behavior of materials 2nd edition*[M]. New York: Cambridge University Press, 2017: 205
- [8] Lv Guangchao, Lu Zhili, Dong Mengyao, et al. Effect of carbon nano-fiber on glass fiber/epoxy composite[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017, (6):51-56(in Chinese) [吕广超, 鲁智力, 董梦瑶, 等. 碳纳米纤维对单向玻纤/环氧树脂复合材料的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017, (6):51-56]. doi: [10.3969/j.issn.1003-0999.2017.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2017.06.009)
- [9] Lan Wenfeng. Mechanical properties of nano-CaCO<sub>3</sub>/PU elastomer composites[J]. *China rubber/plastics technology and equipment (plastics)*, 2018, 44(16): 15–20 (in Chinese) [藺文峰. 纳米CaCO<sub>3</sub>/PU弹性体复合材料力学性能研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2018, 44(16): 15–20].
- [10] Du Mingchao, Li Zengliang, Dong Xiangwei, et al. Experimental and numerical study on erosion characteristics of rhomboid particles[J]. *Tribology*, 2018, 38(5): 501–511 (in Chinese) [杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲蚀磨损特性试验及仿真研究[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(5): 501–511]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.05.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.002).
- [11] Zheng Sijia, Zhang Peng, Jing Jiaqiang, et al. Experimental and numerical study of surface erosion evolution at inner wall of elbow in gas flow line[J]. *Tribology*, 2015, 35(6): 754–760 (in Chinese) [郑思佳, 张鹏, 敬加强, 等. 输气管路弯头内壁面冲蚀进化的试验和数值模拟研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(6): 754–760]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.06.015](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.06.015).
- [12] Liu M, Duan DL, Jiang SL, et al. Tribocorrosion behavior of 304 stainless steel in 0.5 mol/L sulfuric acid[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2018, 31(10): 1049–1058. doi: [s40195-018-0773-x](https://doi.org/10.1007/s40195-018-0773-x).
- [13] Huang Weijiu, Li Zhijun, Wang Junjun, et al. Investigation of erosion mechanism of tin brass in 3.5% NaCl liquid-solid two phase flow[J]. *Tribology*, 2016, 36(1): 27–34 (in Chinese) [黄伟九, 李志均, 王军军, 等. 锡黄铜在3.5% NaCl中的液固两相流冲蚀机理研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(1): 27–34]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.01.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.01.005).
- [14] Li Shizhuo, Dong Xianglin. *Erosion wear and fretting wear of material*[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 1987(in Chinese) [李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987].
- [15] Yang XG, Duan DL, Jiang SL, et al. Preparation and erosion-corrosion behavior of polyetheretherketone (PEEK)/nickel foam co-continuous composites[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2018, 25(2): 289–296. doi: [10.1515/secm-2015-0449](https://doi.org/10.1515/secm-2015-0449).
- [16] K Friedrich, A A Almajid. Solid particle erosion of polymers and composites[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Times of Polymers and Composites(TOP)*, Ischia, Italy, 2014. AIP Conference Proceedings, 2015, 1599: 2-5.
- [17] Simon Ka-Keung Li, J AC. Humphrey, AV Levy Erosive wear of ductile metals by a particle-laden high velocity liquid jet[J]. *Wear*, 1981, 73(2): 295–309. doi: [10.1016/0043-1648\(81\)90297-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90297-0).
- [18] A Huser, O Kvernfold. Prediction of sand erosion in process and pipe components[C]. *Proceedings of the 1st North American Conference on Multiphase Technology*, Banff, Canada, 1998. BHR Group Conference Series Publication, 1998, 31: 217-228.
- [19] K Jeremy BSM Edwards, S A Shirazi. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service[C]. *Proceedings of the 2000 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, New York, American, 2000. ASME Symposia Volumes, 2000, 2: 959-966.
- [20] Qin Guozhi, Tian Zhiming. Application of high pressure water jet cleaning techhigue[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2001, (1): 38–40 (in Chinese) [秦国治, 田志明. 高压水射流清洗技术及其应用[J]. *管道技术与设备*, 2001, (1): 38–40]. doi: [10.3969/j.issn.1004-9614.2001.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9614.2001.01.014).
- [21] Zhou Wenhui. Numerical and simulation research on the high pressure water jet nozzle in inside and outside efflux flow field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008(in Chinese) [周文会. 高压水射流喷嘴内外部流场的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008].



DOI: 10.16078/j.tribology.2019128

# 载荷和纳米MoS<sub>2</sub>添加剂含量对圆形锤头-棒料的摩擦磨损特性及其机理分析

张立军\*, 韩琳, 张德潇, 李增辉, 张军伟, 金永山, 王早祥  
(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 针对精密下料中圆形锤头与棒料之间弧状接触面剧烈的摩擦磨损问题, 借助WTM-2E型可控气氛摩擦磨损试验机, 利用GCr15钢块-45钢柱摩擦副在纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和0.7%等七种润滑工况下, 重点对不同载荷下摩擦磨损试验进行分析; 采用扫描电子显微镜观察了GCr15钢块磨损表面形貌, 采用能量色散谱仪(EDS)分析了GCr15钢块磨损表面成分, 并探讨了其润滑抗磨及自修复机理. 结果表明: 随着载荷增加, 摩擦接触应力变大, 摩擦系数和磨损量呈上升趋势, 磨损表面形态由轻微磨粒磨损转变为黏着磨损. 同时加入的MoS<sub>2</sub>添加剂的质量分数并非越高越好, 摩擦系数和磨损量随MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的升高呈现先减小后增大趋势, 且MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数在0.1%~0.3%范围内时减摩抗磨效果较好. 通过对比不同润滑条件下摩擦副因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升, 进一步定量确定出纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0.1%时, 可以最大程度地降低摩擦副的损耗.

**关键词:** 精密下料; 圆形锤头-棒料摩擦副; 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂; 减摩抗磨; 载荷

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)06-0777-09

## Friction and Wear Characteristics and Mechanism Analysis of Load and Nano MoS<sub>2</sub> Additive on Circular Hammerhead-Bar

ZHANG Lijun\*, HAN Lin, ZHANG Dexiao, LI Zenghui, ZHANG Junwei,  
JIN Yongshan, WANG Hanxiang

(College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Aiming at solving the wear problem of the arc-shaped contact surface between the circular hammerhead and the bar in precision blanking, the tribological performance of GCr15 steel block-45 steel column tribo-pair was determined on a WTM-2E controllable atmosphere micro-friction and wear tester, under lubrication of oils containing nano-MoS<sub>2</sub> additive (mass fraction of 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.7%), focusing on the friction and wear results under different loads. The worn surface of GCr15 steel was observed by scanning electron microscopy and analyzed by energy dispersive spectrometer. The possible mechanisms of lubrication and self-repair were discussed. The results show that increasing the applied load increased the contact stress, friction coefficient and wear. The wear regime varied from mild abrasive wear to adhesive wear. Friction coefficient and wear first decreased and then increased as the mass fraction of MoS<sub>2</sub> additive increased. Oil with the mass fraction of MoS<sub>2</sub> additive of 0.1% to 0.3% provided good lubrication. By comparing the noise, vibration speed and temperature rise of the tribo-pair, oil with 0.1% nano-MoS<sub>2</sub> additive showed the best tribological performance.

**Key words:** precision cropping; circular hammerhead-bar friction pair; nano MoS<sub>2</sub> additive; antifriction and antiwear; load

Received 29 January 2019, revised 25 April 2019, accepted 15 May 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: zlj-2@163.com, Tel:+86-15666485538.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(51575532) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(15CX08007A).

国家自然科学基金项目(51575532)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(15CX08007A)资助.

下料是指确定制作某种产品所需的材料形状和数量后,从整个或整批材料中取下一定形状和数量材料的加工过程。其中棒管材的分离断料是下料工序的一种,广泛应用于航空航天、石油石化和内燃机配件等行业中,通常是机械制造领域金属成型加工工艺的第一道工序。目前众多生产中的下料方法主要有:金属切削机床下料、剪切下料和特种切割下料等<sup>[1-2]</sup>。实践证明,这些下料方法不同程度地存在着下料效率低、原材料浪费严重、刀具寿命短等不足,无法满足绿色制造的要求。因此,一种基于断裂设计的高效低应力下料应运而生<sup>[3-4]</sup>。低应力下料是首先通过在棒料表面产生1个微裂纹,然后控制外部加载和环境条件使得裂纹朝着期望的路径扩展,最终使得材料以低应力脆断形式分离<sup>[4]</sup>。然而现有下料模具中圆形锤头和棒料直接接触,挤压磨损较严重,这不仅导致下料模具寿命低,每隔一段时间需要更换新的圆形锤头。同时,剧烈的摩擦磨损还会引起较大的摩擦热、冲击振动和噪声,使机器动力损耗增加。因此分析不同因素变化对圆形锤头与棒料接触表面的摩擦磨损机理至关重要。

目前,许多学者针对不同工况中出现的摩擦磨损现象进行了深入研究。肖鹏等<sup>[5]</sup>采用模拟列车刹车制动方法研究了C/C-SiC复合材料在不同制动速度下的摩擦磨损性能,结果表明,随着制动速度提高,磨屑被碾磨更细,磨损量随之增大,但摩擦系数呈先升高而后降低的趋势。王秀飞等<sup>[6]</sup>研制了一种适应高速列车制动的铜基摩擦材料,考察了ZrO<sub>2</sub>的质量分数对其摩擦性能的影响。结果表明,添加质量分数8%ZrO<sub>2</sub>的铜基摩擦材料在高速下的摩擦系数较高,磨损率较小且变化平稳,摩擦性能最好,且随着速度的增加,磨损逐渐从以黏着磨损为主转变为以剥层脱落和氧化磨损的混合机制为主。王云鹏等<sup>[7]</sup>针对在直升机起落架、齿轮和精密模具等中广泛使用的18Ni(300)钢进行了高速干滑动摩擦磨损特性研究,结果表明,18Ni(300)钢-GCr15钢摩擦副的摩擦系数随载荷和速度的增加而下降,磨损机制由黏着磨损转变为严重的氧化磨损。

另外,本课题组为减小在低应力下料中的摩擦磨损,采用正交试验法,研究了在低应力下料中圆形锤头上开槽形状、开槽个数、开槽深度和槽间距等槽参数对圆形锤头-棒料摩擦副的减摩抗磨效果的影响<sup>[8]</sup>,结果表明:对耐磨轴承-棒料摩擦副的摩擦系数影响最大的因素是槽型,对磨损量影响最大的因素是槽数。为探寻不同变量变化对磨损效果的影响,课题组还研究了不同转速和不同质量分数纳米MoS<sub>2</sub>添加剂对

GCr15钢块-45钢柱摩擦副的摩擦磨损性能<sup>[9]</sup>,结果表明,随着转速的升高,摩擦系数和磨损量呈降低趋势,磨损表面形态由黏着磨损转变为磨粒磨损,纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0.5%时,其减摩抗磨效果最佳。但多次下料试验结果表明,载荷对摩擦磨损也有很大影响。为此,用GCr15钢块-45钢柱摩擦副模拟下料中圆形锤头-棒料摩擦副,研究在载荷和纳米MoS<sub>2</sub>添加剂共同耦合作用下的摩擦学性能,重点对摩擦系数、磨损量和磨损表面形貌等进行研究,提出基于试验中所产生的振动响应值、噪声值和温度值等参数来定量确定纳米MoS<sub>2</sub>颗粒的最佳质量分数。

## 1 低应力下料基本原理

低应力下料的基本原理就是利用V型槽的应力集中效应,将开有V型槽的棒料一端放入下料模具中的圆形锤头内,另一端固定在夹具中,通过施加适宜的载荷造成对棒料断裂较为敏感的应力状态,使裂纹按照预定的方式稳定扩展,从而实现材料连续界面的快速和低能耗的分离,完成下料。下料模具主要包括轴头、滑块和可替换式圆形锤头等,如图1(a)所示,圆形锤头与棒料的工作关系如图1(b)所示。下料模具作为下料机中的主要磨损部件与棒料的直接接触,挤压磨损剧烈,不仅导致摩擦副表面温度过高,棒料端面产生明显的损伤和磨损变形,而且使棒料V型槽处产生破坏,如图2(a~b)所示。在以往的下料试验中使用普通轴承充当圆形锤头进行下料时发现,普通轴承所承受载荷小,可能导致裂纹始终不起裂或扩展缓慢,致使生产效率低;若施加的载荷过大,可能由于裂纹的瞬间扩展而使棒材瞬断,导致下料品质差、振动和噪声大<sup>[10]</sup>。这不仅会使普通轴承损坏无法继续使用[见图2(c)],而且很大程度上影响了下料机的使用性能与寿命。因此,为研究载荷变化时圆形锤头-棒料摩擦副的润滑问题,通过在试验中改变载荷的大小和润滑油中MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数,研究其对摩擦系数、磨损量和磨损表面形貌等的影响。在此基础上,提出利用GCr15钢块-45钢柱摩擦副试验过程中因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升等参数来定量确定出不同载荷下最佳纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的质量分数。

## 2 圆形锤头-棒料摩擦副的试验部分

本试验中所用的基础油为60 N,添加剂选用由上海润立得公司生产的纳米MoS<sub>2</sub>。将纳米MoS<sub>2</sub>颗粒以不同质量百分比添加到基础油60 N中,并放在超声波

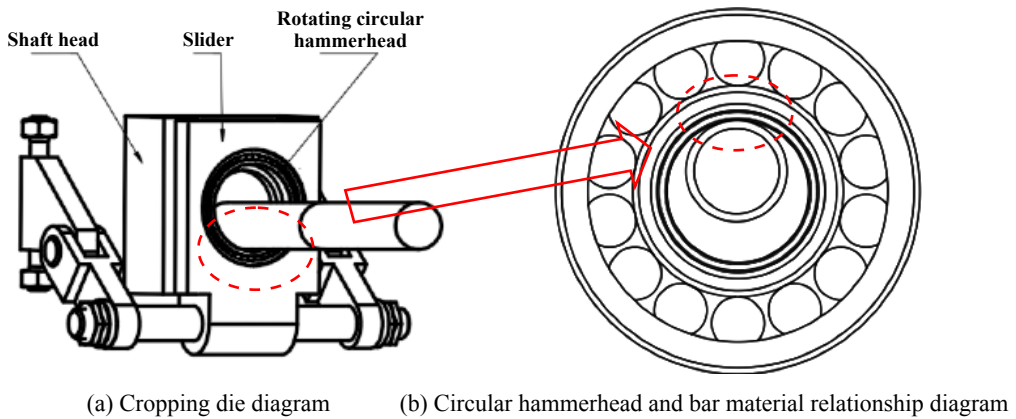


Fig. 1 Working principle diagram of cutting die

图 1 下料模具工作原理图



(a) Wear on the end of the bar (b) Damage on the V-shaped groove



(c) Damaged bearing

Fig. 2 Effect of severe wear on bars and common bearings

图 2 严重的摩擦磨损对棒料与普通轴承的影响

振荡仪中振荡30 min使其混合均匀, 从而制备出含有不同比例, 分布均匀弥散的油样<sup>[9-10]</sup>.

改变载荷的大小和润滑油中MoS<sub>2</sub>添加剂的质量分数, 借助WTM-2E型可控气氛微型摩擦磨损试验仪进行摩擦磨损试验, 试验台如图3所示. 载荷设定为5、8和11 N, MoS<sub>2</sub>添加剂的质量分数设定为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和0.7%. 用经过热处理后耐磨性好、接触疲劳强度高的GCr15钢块作为摩擦试验中的下试样, 代替下料中的圆形锤头. 试验转速 $n$ 取1 500 r/min, 下试样GCr15钢块固定不动, 上试样45钢柱标准件旋转, 旋转半径为6 mm, 时长10 min, 两者摩擦工作原理见图4, 两者摩擦系数由摩擦磨损试验仪自动记录; 在试验过程中对反映摩擦副润滑状况和磨损状态的噪声、振动速度和温升值进行采集测量, 搭

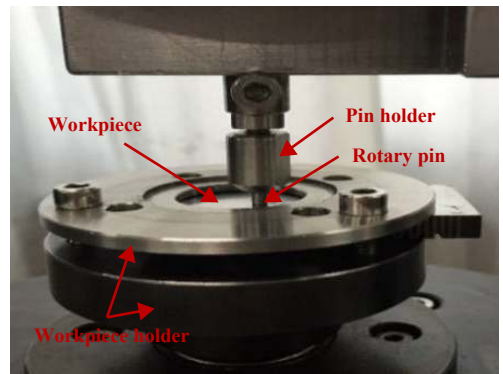


Fig. 3 Friction and wear test bench

图 3 摩擦磨损试验台

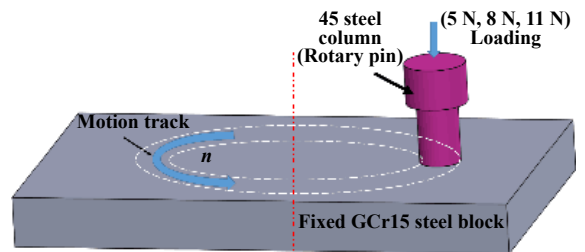


Fig. 4 Working principle diagram

图 4 工作原理示意图

建的试验台主要包括红外线测温仪、噪声测试仪和工作测振仪(S908). 试验首先采用纯60 N基础油润滑, 启动试验仪, 使其在转速一定, 载荷分别设置为5、8和11 N的工况下开始运行, 并在运转直至趋于稳定时测量记录每种载荷下的振动响应值、噪声值和温度升高值. 然后把润滑系统中的纯60 N润滑油换成含有质量分数为0.1%、0.2%、0.3%、0.5%和0.7%的纳米MoS<sub>2</sub>颗粒的60 N润滑油, 按相同的步骤记录试验仪试验过程中的噪声值、振动响应值和温度升高值. 国际标准中通常选用振动速度作为衡量振动激烈程度的参量. 振动

速度的有效值是振动速度的均方根值, 直接反映振动的能量. 试验中所采用的振动传感器如图5所示. 振动传感器的一头通过电缆与主机相连, 另一头通过磁座固定在摩擦磨损试验仪上试样旋转销的地方, 这种传感器外置型的工作方式, 有效地保证了测量的安全性与精准性. 试验结束后, 用丙酮超声清洗试验后的高碳铬轴承钢试样, 再放在FA1004电子天平上称重, 计算试样磨损前后的质量差, 并用扫描电镜观察磨斑表面形貌, 使用能量色散谱仪(EDS)分析GCr15钢块磨损表面的元素成分.

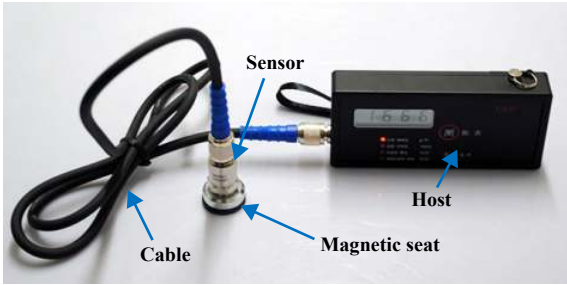


Fig. 5 Vibration measuring instrument  
图5 振动测量仪图

### 3 载荷对摩擦系数、磨损量及磨损表面的影响机理分析

#### 3.1 载荷与纳米添加剂对摩擦系数、磨损量的影响

图6所示为GCr15钢块-45钢柱摩擦副在5、8和11 N载荷条件下, 随着纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数不同时摩擦系数和磨损量变化图; 在加入的MoS<sub>2</sub>质量分数较低时, 摩擦系数和磨损量明显低于不添加MoS<sub>2</sub>的基础油工况, 这表明加入少量的纳米MoS<sub>2</sub>可以改善润滑效果, 提高润滑油的减摩抗磨性能, 从而降低其摩擦系

数与磨损量. 当MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数分别为0.1%、0.2%和0.3%时, 与基础油相比, 其摩擦系数平均降低19%、14.1%和8.7%, 磨损量平均降低22.7%、21.3%和15.1%左右. 当纳米MoS<sub>2</sub>质量分数在0.4%和0.5%时, 摩擦系数和磨损量与基础油条件下无明显变化. 继续增至0.7%, 摩擦系数和磨损量便高于基础油的工况. 这表明质量分数过高的纳米添加剂反而不利于润滑油性能的提高, 这是因为一是随着纳米颗粒质量分数增多, 基础油的黏度增大, 在摩擦过程中与金属磨屑颗粒之间相互碰撞使摩擦阻力加大<sup>[11]</sup>; 二是纳米颗粒质量分数过高不仅会影响润滑油膜的形成和润滑剂的分散稳定性, 而且相互团聚会导致形成较大的颗粒, 在所受压力的作用下, 纳米颗粒会对摩擦副产生犁沟作用<sup>[12]</sup>, 最终表现为摩擦系数和磨损量的升高.

#### 3.2 载荷对磨损表面的影响

图7表示在不同载荷条件下, 扫描电镜观察到的GCr15钢块试件磨损表面形貌的照片. 随着载荷增加, 摩擦系数和磨损量逐渐升高, 磨损表面也由犁沟较浅的光滑状态转变成轻微黏着磨损. 图7(a)为5 N时扫描电镜下的磨损表面, 此时摩擦接触表面光滑、平整, 仅存在微小的犁沟现象, 部分磨屑在应力作用的反复碾压下被压在磨斑表面形成了图中的A处; 图7(b)显示为8 N时的磨斑表面, 可见沿滑动方向上存在连续粗糙且较深的犁沟和划痕现象, 犁削作用严重, 是典型的磨粒磨损; 图7(c)显示在载荷升至11 N时, 整个磨损表面存在少量光滑的地方, 呈现粗糙的黏着特征且零散分布着细长的擦伤凹槽. 这是因为在相对滑动过程中随着载荷升高, 接触表面的摩擦接触应力升高<sup>[14-15]</sup>, 硬度较高的表面微凸体急剧碰撞发生破碎, 与少数团聚在一起的硬质添加剂颗粒一起压入摩擦副的表面层内, 致使接触面的金属破坏而形成犁沟和黏着现象.

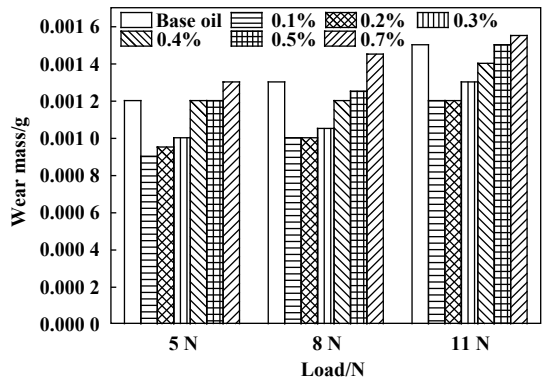
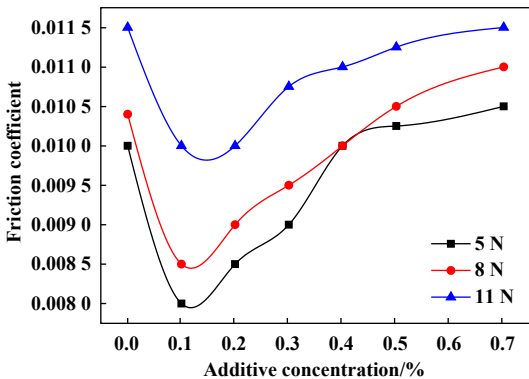


Fig. 6 Effects of load on friction coefficient and wear under different working conditions

图6 不同工况下载荷对摩擦系数和磨损量的影响

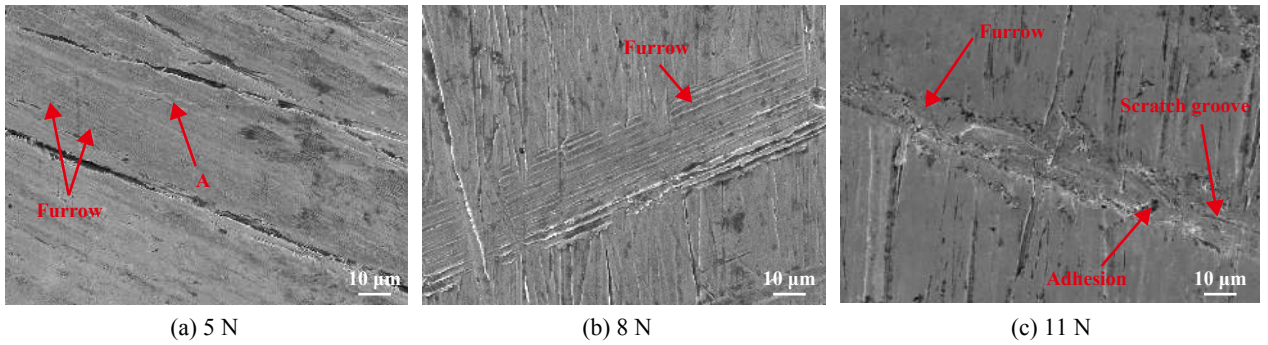


Fig. 7 Wear surface topography under different loads

图 7 不同载荷下磨损表面形貌图

## 4 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的减摩抗磨机理分析

### 4.1 MoS<sub>2</sub>颗粒的减摩抗磨性能分析

纳米MoS<sub>2</sub>颗粒在摩擦过程中所发挥的减摩抗磨作用如图8所示. 分散在润滑油中的纳米MoS<sub>2</sub>颗粒在油的流动过程中可以随之进入对磨表面的微坑与凹区, 并嵌入到摩擦副表面粗糙的凹谷中, 填补凹处, 如图8(a)所示. 当两表面受到压力持续摩擦时, 表面凸峰率先接触<sup>[16]</sup>; 当达到材料的屈服极限时被磨掉的凸峰与细小的MoS<sub>2</sub>颗粒在反复碾压下形成薄层状混合物, 粘附在摩擦表面形成1层比原表面更强韧、更光滑的

摩擦保护膜起到自修复作用<sup>[17-18]</sup>, 如图8(b)所示. 随着试验的持续进行, 越来越多的表面凸峰被磨掉, 磨屑被挤压成修复膜, 填平金属表面的凹处和损伤部位, 如图8(c)所示, 同时类似于球状的纳米颗粒在摩擦副间作微滚动<sup>[19]</sup>, 即微滚动效应. 这不仅在微观上变滑动摩擦为滚动和滑动复合摩擦, 而且使得两粗糙的摩擦副表面不直接接触, 起到支撑负荷的作用, 而且二硫化钼是片层状结构, 除了可以填平凹坑外, 还能在微凸体表面形成可滑移的二硫化钼吸附膜, 起到润滑作用.

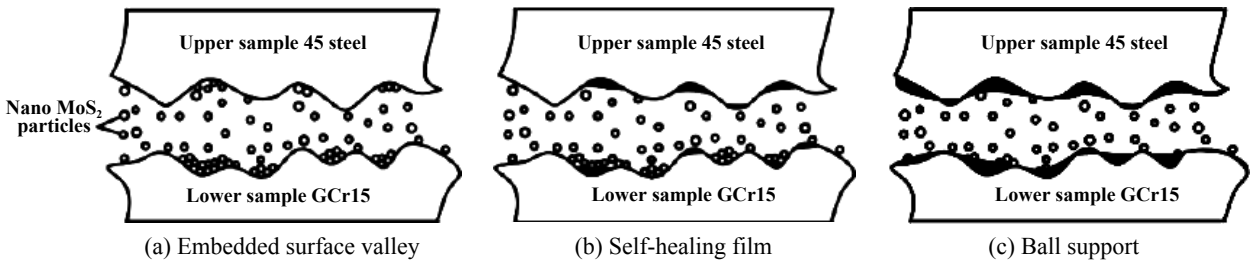


Fig. 8 Anti-friction and anti-wear mechanism of nanometer molybdenum disulfide particles

图 8 纳米MoS<sub>2</sub>颗粒减摩抗磨原理图

表1列出了基础油工况和含纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的润滑工况下磨损试样表面元素组成的EDS测定结果. 通过对比可以发现, 基础油工况下含有微量的S元素, Mo元素质量分数为0; 而含MoS<sub>2</sub>添加剂润滑工况下的磨损表面S元素含量增加, Mo元素质量分数从0%增至0.2%, 其中S元素部分来自于基体材料, 但是Mo元素只来自于MoS<sub>2</sub>添加剂. 同时, 图9显示了含MoS<sub>2</sub>添加

剂工况下的Gcr15钢磨损表面分布着Mo元素. 因此, MoS<sub>2</sub>添加剂在磨损过程中能够填补表面凹坑沉积成膜, 起到一定的润滑作用.

### 4.2 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂使用量的分析

不同载荷下的摩擦系数、磨损量与纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的关系如图10所示. 随着基础油中纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的增多, 摩擦系数与磨损量的值

表 1 不同工况下磨损表面元素组成测定结果

Table 1 Determination of the chemical composition of worn surface under different working conditions

Worn surface	w(Mo)/%	w(S)/%	w(Cr)/%	w(C)/%	w(Fe)/%
Base oil	0	0.01	1.34	12.63	Balance
Nano MoS <sub>2</sub>	0.2	0.03	1.32	13.26	Balance

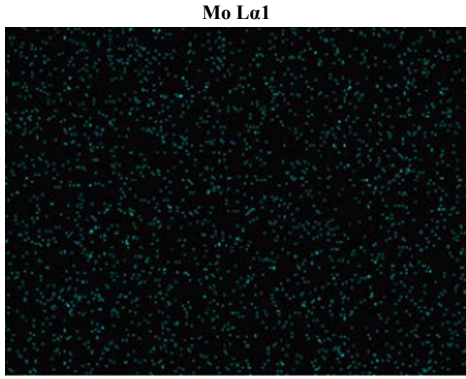


Fig. 9 Mo element distribution on the worn surface

图9 磨损表面Mo元素分布图

呈现先下降后上升的变化趋势. 基础油中加入合理质量分数的纳米MoS<sub>2</sub>添加剂可以改善耐磨减摩效果, 增强对摩擦表面的摩擦学特性. 当质量分数在0.1%~0.3%范围时, 减轻摩擦、降低磨损的效果较好. 当纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数升高至0.5%时, 抗磨损效果与基础油工况相差无几; 当质量分数继续升高至0.7%时, 减摩抗磨效果反而低于基础油工况. 结果显示, 摩擦系数和磨损量等的值并不总能确定出最佳的纳米添加剂质量分数, 只能确定出1个较优的纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的范围.

### 4.3 最佳纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的确定

#### 4.3.1 噪声、振动速度和温升与含纳米MoS<sub>2</sub>润滑剂的摩擦磨损关联分析

在精密下料中, 鉴于圆形锤头-棒料摩擦副剧烈的摩擦磨损, 下料机在工作过程中产生的较大噪声和振动冲击速度不仅影响下料机各组成部件的使用性能与工作平稳性, 还会影响下料机和下料模具的使用寿命. 而下料过程中释放出的摩擦热则会影响所下棒料的质量. 因此, 为得到最佳的润滑工况, 极大程度地

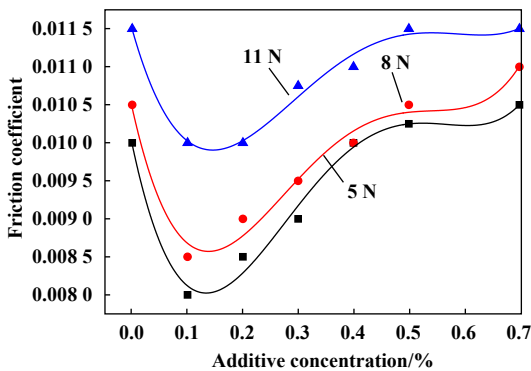
提高磨损面的摩擦学性能, 降低磨损过程中产生的噪声、振动速度和温升值, 本文作者提出通过处理分析对摩擦表面在摩擦磨损过程中所产生的噪声、振动速度和温升值等参数, 来进一步定量确定出纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的最佳质量分数.

影响噪声、振动和摩擦热的原因既有宏观的, 也有微观的, 如施加的载荷、润滑状况、滑动速度及时间、基体材料和表层特性、表面形貌等因素, 其中任一因素的变化均会对噪声、振动和摩擦热产生影响, 表现为数值大小的变化. 摩擦副表面在微观上存在着凸峰和凹谷, 在摩擦过程中凸峰之间率先接触发生碰撞与剪切作用, 导致部分凸峰破碎引起噪声与振动; 同时伴随着能量的释放与转换, 一部分能量转化成摩擦热使摩擦副间的温度升高. 纳米MoS<sub>2</sub>颗粒由于尺寸小且呈片层结构, 不仅可以填补凹谷, 还可以在微凸体表面形成摩擦保护膜, 减少凸峰之间的接触, 从而降低摩擦过程产生的噪声、振动和摩擦热. 因此, 对摩擦表面产生的噪声、振动和摩擦热的变化规律能够间接反映摩擦副间的润滑状况和磨损状态<sup>[20]</sup>.

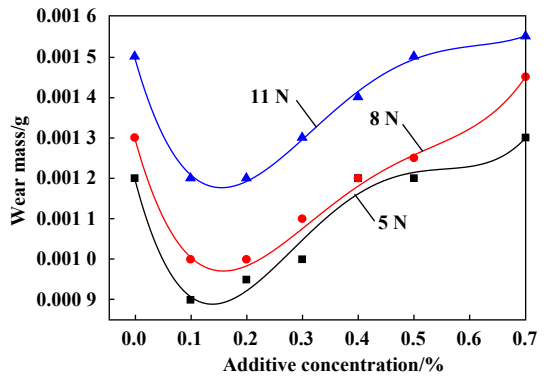
#### 4.3.2 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数对噪声影响

测量过程的声场环境和测量安装位置要求应符合GB/T17248.3-1999的规定<sup>[21]</sup>, 测点高度与工作台的水平面相持平, 测点位置见图11, 待机器运转稳定后于同一位置处重复测量3次取中间值.

由图12可知, 随着试验过程中载荷从5 N提高到11 N, 测量到的由于摩擦接触产生的噪声值明显升高. 当载荷较低为5 N时, 噪声值的变化随纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的变化幅度更大, 噪声值的上升趋势较为明显. 比较不同的润滑状态可以看出, 在载荷较小为5 N时, 使用纯基础油润滑产生的噪声较小; 在载荷为8和11 N时, 使用含有质量分数为0.1%纳米二硫化钼的



(a) Friction coefficient



(b) Wear

Fig. 10 Friction coefficient and wear under different loads

图10 不同载荷下摩擦系数和磨损量的变化曲线

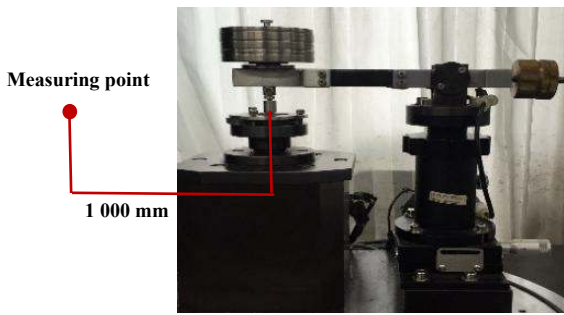


Fig. 11 Noise measurement point distribution

图 11 噪声测量测点分布

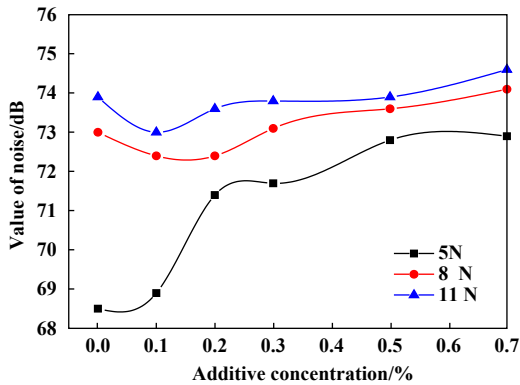


Fig. 12 Diagram of load and noise under different lubrication conditions

图 12 不同润滑工况下载荷和噪声关系图

60 N基础油润滑时, 试验仪产生的噪声普遍低于其他工况。

#### 4.3.3 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数对振动速度影响

试验仪在工作状态运转至稳定状态后, 测量由于磨损表面相互摩擦产生的振动速度有效值, 待示数稳定后进行读数, 测量3次, 取中间值为最佳。如图13所示, 当工作载荷升高至8和11 N时, 此时的振动速度的值相接近, 数值相差最大处为0.3 mm/s, 平均相差0.2 mm/s左右。随着基础油中纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数的升高, 振动速度有效值整体呈现平缓上升的趋势, 但在0.1%附近有微小的先减小后上升的变化, 因此纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0.1%时, 振动速度的值较小, 即此时磨损表面由于摩擦磨损引起的振动较低。

#### 4.3.4 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数对温升影响

摩擦磨损试验仪在不同载荷和润滑工况下运转, 每次试验运转10 min, 当运行稳定后开始测量温升直至试验结束, 测点位于GCr15钢块-45钢柱摩擦副的工作区域内且靠近二者摩擦接触的部位, 图14显示的是试验前后摩擦副间的温度变化量。

如图14所示, 试验仪摩擦接触处温升值随着试验

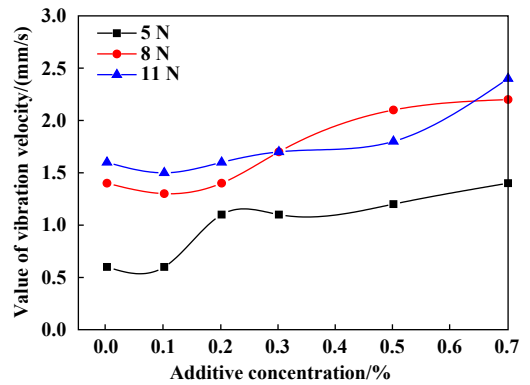


Fig. 13 Diagram of load and vibration speed under different lubrication conditions

图 13 不同润滑工况下载荷和振动速度关系图

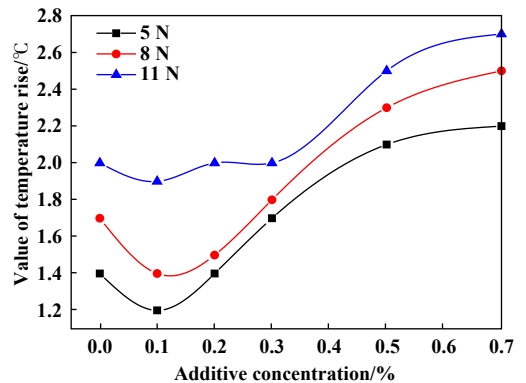


Fig. 14 Diagram of load and temperature rise under different lubrication conditions

图 14 不同润滑工况下载荷和温升关系图

仪施加载荷的提高而升高。在不同润滑状态下温升值的变化趋势比较接近, 呈现在纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0.1%处温升值最小。当纳米MoS<sub>2</sub>添加剂质量分数为0.3%时, 此时与使用基础油润滑工况下的温升值相接近; 当超过0.3%, 温升值持续升高, 反而劣于基础油润滑的状态。

## 5 结论

a. 针对低应力精密下料中圆形锤头与棒料弧状接触面处剧烈的摩擦磨损问题, 分析了载荷和添加剂共同耦合作用下摩擦副的润滑抗磨及自修复机理。研究结果显示, 随着载荷的增加, 接触表面的摩擦接触应力升高, 且磨损表面由轻微的磨粒磨损转变为黏着磨损。

b. 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的添加量并不是越高越好, 具有合理质量分数的纳米MoS<sub>2</sub>添加剂能有效降低材料的摩擦系数与磨损量。当载荷变化时, 纳米MoS<sub>2</sub>添加剂的质量分数为0.1%~0.3%时具有良好的减摩抗磨效

果且明显优于基础油的工况,当润滑油中纳米 $\text{MoS}_2$ 添加剂质量分数大于0.5%,润滑效果反而劣于基础油的工况。

c. 随着施加载荷的增大,噪声、振动速度和温度等性能参数的数值也逐渐升高。综合考虑对降低摩擦副因摩擦磨损而产生的噪声、振动速度和温升的影响,含有质量分数为0.1%纳米 $\text{MoS}_2$ 颗粒的60 N基础油润滑工况,可以最大程度地降低GCr15钢块-45钢柱摩擦副在工作过程产生的噪声、振动速度和温升。

## 参考文献

- [1] Yao Fusheng. Advanced manufacturing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011(in Chinese) [姚福生. 先进制造技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011].
- [2] Hu Yamin, Hua Lin. Forging process and mold design[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, Peking University Press, 2006(in Chinese) [胡亚民, 华林. 锻造工艺过程及模具设计[M]. 北京: 中国林业出版社, 北京大学出版社, 2006].
- [3] Zhang Lijun, Zhang Depei, Wang Hanxiang, et al. Research on variable frequency-loading curve in precision cropping system with high speed and centrifugal action[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2969–2978.
- [4] Zhang Lijun, Chen Xianfeng, Wang Hanxiang, et al. Research on critical loading force in precision cropping system based on hydraulic compensation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 142–143: 44–50. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.039.
- [5] Xiao Peng, Xiong Xiang, Ren Yunyun. Effect of braking speed on friction and wear properties of C/C-SiC composites[J]. Journal of Tribology, 2006, 26(1): 12–17 (in Chinese) [肖鹏, 熊翔, 任芸芸. 制动速度对C/C-SiC复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 12–17]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2006.01.003.
- [6] Wang Xiufei, Xu Guisheng, Han Juan, et al. Effect of  $\text{ZrO}_2$  addition on friction and wear properties of copper-based friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(1): 22–27 (in Chinese) [王秀飞, 许桂生, 韩娟, 等. 添加 $\text{ZrO}_2$ 对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(1): 22–27]. doi: 10.3969/j.issn.1001-3784.2013.01.005.
- [7] Wang Yunpeng, Sun Kun, Yang Size, et al. Study on high speed dry sliding friction and wear characteristics of 18Ni(300) steel[J]. Journal of Tribology, 2017, 37(2): 218–224 (in Chinese) [王云鹏, 孙琨, 杨思泽, 等. 18Ni(300)钢高速干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 218–224].
- [8] Zhang Lijun, Han Lin, Zhang Junwei, et al. Analysis of anti-friction and antiwear effects of wear-resistant bearing-bar friction pair in low stress materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(3): 308–314 (in Chinese) [张立军, 韩琳, 张军伟, 等. 低应力下料中耐磨轴承-棒料摩擦副的减摩抗磨效果分析[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 308–314]. doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2019.03.045.
- [9] Zhang Lijun, Han Lin, Zhang Dexiao, et al. Analysis of tribological properties of circular hammer-bar friction pair in precision cutting[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 1–8 (in Chinese) [张立军, 韩琳, 张德潇, 等. 精密下料中圆形锤头-棒料摩擦副摩擦学性能分析[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 1–8].
- [10] Zhang Lijun, Zhao Shengdun, Lei Jing. Effect of bar material geometric parameters on stress concentration factor of v-groove bottom of prefabricated surface[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 66–71 (in Chinese) [张立军, 赵升吨, 雷净. 棒料几何参数对其预制表面V型槽槽底应力集中系数的影响规律[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 66–71]. doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2007.01.015.
- [11] Ruan Tinggang, Zhou Guiyuan, Xie Xiandong, et al. Comparison of anti-friction, antiwear and self-repair properties of titanium-based nano-lubricating additives[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 47–53 (in Chinese) [阮亭纲, 周桂源, 谢先东, 等. 钛基纳米润滑添加剂的减摩抗磨及自修复特性对比[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 47–53]. doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.006.
- [12] Han Xiaoming, Fu Rong, Gao Fei, et al. Effect of  $\text{SiO}_2$  content on the friction behavior of copper-based friction materials[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1848–1853 (in Chinese) [韩晓明, 符蓉, 高飞, 等.  $\text{SiO}_2$ 质量分数对铜基摩擦材料摩擦行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1848–1853]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0609.2009.10.022.
- [13] Han Xiaoming, Gao Fei, Song Baoyun, et al. Effect of friction speed on friction and wear properties of copper-based friction materials[J]. Journal of Tribology, 2009, 29(1): 89–96 (in Chinese) [韩晓明, 高飞, 宋宝韞, 等. 摩擦速度对铜基摩擦材料摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 89–96]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2009.01.015.
- [14] Ma Hongshuai, Liang Guoxing, Lv Ming, et al. Study on dry sliding friction and wear characteristics of AISI 4340 steel[J]. Journal of Tribology, 2018, 38(1): 59–66 (in Chinese) [马红帅, 梁国星, 吕明, 等. AISI 4340钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 59–66]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.01.008.
- [15] Zhu Gongzhi, Gao Yuzhou, Liu Shiyong, et al. Anti-wear self-repairing mechanism of lubricating oil additive of magnesium hydroxysilicate composite powder on steel-steel friction pair[J]. Tribology, 2012, 32(2): 183–188 (in Chinese) [朱公志, 高玉周, 刘世永, 等. 羟基硅酸镁复合粉体润滑油添加剂对钢-钢摩擦副的抗磨自修复机理[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 183–188]. doi: 10.16078/j.tribology.2012.02.013.
- [16] Li Hongqi, Liu Meihua, Wang Jing. Study on antiwear and anti-friction mechanism of nanoparticles[C]. National Conference on Nanomaterials and Technology Applications. Nanjing, China, 2003: 327–330(in Chinese) [李鸿琦, 刘美华, 王静. 对纳米颗粒抗磨减摩机理的研究[C]. 全国纳米材料和技术应用会议. 中国 南京, 2003: 327–330].



- [17] Liu Meihua, Li Xiuzhen, Wang Shuren, et al. Comparison of antiwear and antifricition mechanisms between traditional antiwear additives and nanoparticles[J]. *Journal of Synthetic Lubricants*, 2002, 29(2): 19–22 (in Chinese) [刘美华, 李秀珍, 王树人, 等. 传统抗磨添加剂与纳米粒子的抗磨减摩机理分析比较[J]. *合成润滑材料*, 2002, 29(2): 19–22]. doi: [10.3969/j.issn.1672-4364.2002.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4364.2002.02.005).
- [18] Tang Yang, Liu Liguang, Wang Zeyu, et al. Friction and wear properties of 45<sup>#</sup> steel in 18<sup>#</sup> gear oil containing micron-sized molybdenum disulfide[J]. *Journal of Clothing Research*, 2014, 13(1): 76–79 (in Chinese) [唐扬, 刘利国, 王泽宇, 等. 45<sup>#</sup>钢在含有微米级二硫化钼的18<sup>#</sup>齿轮油中的摩擦磨损性能[J]. *江南大学学报(自然科学版)*, 2014, 13(1): 76–79].
- [19] Yuan Xiaodong, Ni Li, Zhang Jianfeng, et al. Antiwear and friction reduction mechanism of materials[J]. *Lubricant*, 2011, 26(2): 5–10 (in Chinese) [袁晓东, 倪丽, 张建锋, 等. 材料的抗磨减摩机理探讨[J]. *润滑油*, 2011, 26(2): 5–10].
- [20] Zheng Hua. Discussion on the relationship between friction noise and wear scar morphology under metal reciprocating sliding condition[D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2004(in Chinese) [郑华. 金属往复滑动条件下摩擦噪声与磨痕形貌关系的探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2004].
- [21] He Qiang, Liu Hongzhao, Ye Jun. Tribological properties of nano-Cu as an additive for N32 lubricating oil[J]. *Journal of Tribology*, 2010, 30(2): 145–149 (in Chinese) [何强, 刘宏昭, 叶军. 纳米铜作为N32润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(2): 145–149]. doi: [10.16078/j.tribology.2010.02.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2010.02.012).

DOI: 10.16078/j.tribology.2019072

# 第22届材料磨损国际会议的简要评述

郭智威<sup>1,2\*</sup>, 白秀琴<sup>1,2</sup>, 周新聪<sup>1,2</sup>, 袁成清<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北武汉 430063;  
2. 国家水运安全工程技术研究中心可靠性工程研究所, 湖北武汉 430063)

**摘要:** 本文中对第22届材料磨损国际会议进行了总结与评述, 对大会涉及到的传统磨损、表面技术、聚合物、腐蚀磨损、金属磨损、模型仿真和磨损检测等多个领域的最新进展做出了简要的概括, 对今后摩擦学领域的研究重点进行了展望。

**关键词:** 磨损; 传统磨损; 表面技术; 模型仿真; 磨损检测  
**中图分类号:** TH117.2 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2019)06-0786-06

## Review of Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials

GUO Zhiwei<sup>1,2\*</sup>, BAI Xiuqin<sup>1,2</sup>, ZHOU Xincong<sup>1,2</sup>, YUAN Chengqing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology (Ministry of Transport), Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063, China  
2. Reliability Engineering Institute, National Engineering Research Center for Water Transportation Safety, Hubei Wuhan 430063, China)

**Abstract:** In this paper, the 22nd International Conference on Material Wear was summarized and reviewed. The latest developments in 18 fields, including abrasive wear, lubrication wear, high temperature wear, metal wear, surface coating and composite materials, were briefly summarized. The future research emphasis in the field of tribology was prospected.

**Key words:** wear; traditional wear; surface technology; modeling and simulation; wear test

材料磨损国际会议(The International Conference on Wear of Materials, 简称WOM)是摩擦学领域内的顶级会议之一, 每两年举办1次。本次第22届材料磨损国际会议于2019年4月14日至4月18日在美国迈阿密举行。会议主要以特邀报告, 口头报告以及海报交流三种形式进行, 为来自世界各地从事摩擦学研究的学者们提供了1个交流平台。本次会议共有来自世界各地的近300名学者参与, 与会人员主要来自于美国、中国、英国、巴西、德国、法国、加拿大、印度和澳大利亚等国家。与会机构主要以高校以及研究所为主, 有少

量企业参与这次会议。其中, 参加本次会议的中国学者来自清华大学、武汉理工大学、西南交通大学、西安交通大学、北京科技大学、西北工业大学、上海交通大学、南京航空航天大学、合肥工业大学、香港城市大学、东北大学、河海大学、湖南大学、三峡大学、西南科技大学、西安工业大学、内蒙古工业大学和中国科学院沈阳金属研究所等单位, 共计40余人。

本次会议共分为4个会场, 其中大会主旨报告3个, 大会主旨专题讨论1个, 口头报告152篇以及海报张贴报告117张。涵盖了磨粒磨损、润滑磨损、微动磨

Received 26 April 2019, revised 4 June 2019, accepted 24 June 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: zwguo@whut.edu.cn, Tel: +86-13886088463.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51509195).

国家自然科学基金项目(51509195)资助。

损、表面织构、表面涂层、腐蚀磨损等多个主题。152篇口头报告具体分布情况如下:润滑磨损11篇,刀具磨损17篇,腐蚀磨损16篇,滑动磨损10篇,表面涂层10篇,表面织构10篇,仿真建模5篇,仿生摩擦学5篇,摩擦腐蚀6篇,磨粒磨损9篇,高温磨损11篇,三体磨损6篇,微动磨损6篇,金属磨损9篇,发动机零件磨损5篇,轮轨接触磨损5篇,磨损试验与监测6篇,聚合物5篇。本次会议经过审稿专家推荐以及参会人员投票选出了4张获奖海报(2个三等奖,1个二等奖以及1个一等奖)以及3篇最佳口头报告(三等奖,二等奖,一等奖各1个)。本文中就这次会议所反映的最新进展与最新动态加以简要总结。

## 1 主题报告

本次大会上,来自美国桑迪亚国家实验室的Chandros<sup>[1]</sup>依据试验和模拟之间的联系开发了用于预测纳米晶金属接触摩擦稳定性的物理模型。研究证实了材料的耐磨性和其硬度没有必然联系,同时他展示了该模型的预测性能。

来自挪威科技大学的Espallarga<sup>[2]</sup>详细解释了腐蚀磨损学的概念。腐蚀磨损学是1个年轻的研究领域,在过去的20年内因为磨损-腐蚀共同作用的工程系统需求而得到了发展。腐蚀磨损学主要研究材料在腐蚀性环境下发生摩擦,由摩擦磨损和腐蚀之间的相互作用引起材料的降解或转变。在报告中,Espallargas详细介绍了钝性金属材料 and 合金材料在过去、现在的腐蚀磨损研究以及未来可能的发展趋势。

来自法国里昂中央理工大学的Fouvry<sup>[3]</sup>的报告主要介绍了微动磨损在现代工业中的危害性以及微动磨损建模中摩擦能的局限性以及预测作用,并认为“P-V(载荷-速度)”方法可以预测微动磨损现象的分布。

## 2 专题会场

### 2.1 传统磨损

传统磨损一直是材料磨损领域内的研究重点之一,其主要包括磨粒磨损、润滑磨损、滑动磨损、腐蚀磨损和微动磨损等。

磨粒磨损是传统的材料磨损研究方向之一,其与工程实际具有非常紧密的联系。本届大会关于磨粒磨损的论文共收录了15篇。Lin等<sup>[4]</sup>在砂土环境下研究了激光冲击强化和未经处理的Ti-6Al-4V合金的冲击磨损行为。分析了不同冲击动能和磨损演变过程中的动态响应、界面响应和磨损机理。分析结果表明,在相同

的试验条件下,激光冲击强化对Ti-6Al-4V合金的力学性能和耐磨性没有显著影响。当冲击动能相对较低或冲击循环次数相对较小时,其磨损明显大于原始表面。当冲击动能相对较高或冲击循环次数相对较大时,磨痕中心为凹坑,磨痕边缘高于原始表面。试验结果还表明,吸收能量与冲击磨损过程中材料的磨损密切相关,材料损失越大,吸收的能量越多。Ali等<sup>[5]</sup>利用实验室球磨机磨损试验,量化了冲击严重程度对白口铸铁性能的影响。研究结果表明,增加冲击强度会增加材料受到的冲击力,但这种冲击不会影响到研磨后材料的性能,反而可能会在一定程度上提升材料的性能。材料的磨损只是一种简单的磨粒磨损的过程,而与冲击磨损无关,且材料的磨损程度主要受磨粒的成分影响,受磨粒尺寸的影响较小。

润滑磨损是许多企业关注的热点问题之一。本次大会关于润滑磨损的研究论文涵盖了润滑液的改善和润滑机理分析等方面。Del Sol等<sup>[6]</sup>将离子液体作为添加剂加入到水基切削液中,并通过铝-碳化钨销盘摩擦试验机,将其与含卤素元素的切削液进行了对比分析。研究结果表明,使用加入质量分数为1%不含卤素的离子液体的水基切削液,可以在降低70%的摩擦系数的同时,大幅度降低材料的磨损。与含卤素的切削液相比,使用离子液体作为切削液试验后在球的表面没有发现明显磨痕,有效地增加了工具的使用寿命。Huang等<sup>[7]</sup>研究了丁腈橡胶、超高分子量聚乙烯、超高分子量聚乙烯-丁腈橡胶复合材料以及聚合物树脂在水润滑条件下,水温对于材料摩擦性能的影响。结果表明:随着水温在20~80℃的范围内升高,丁腈橡胶和复合材料的摩擦系数略有增加,而超高分子量聚乙烯材料的摩擦行为基本不受水温的影响。当试验水温超过60℃时,聚合物树脂材料的磨损显著增加。

滑动磨损一直是摩擦学研究的热点之一,本次大会共收录了14篇与滑动磨损有关的论文。Cai等<sup>[8]</sup>研究了退火处理对于铜干摩擦性能的影响。在800℃条件下对铜试件进行了24h的退火处理,并将原样与退火后的样品进行了销盘试验。研究结果表明,载荷对于材料的磨损有着较大的影响。而退火处理会导致铜的晶粒尺寸增加,硬度降低,耐磨性提高。He等<sup>[9]</sup>研究了氮化硅对硅酸盐和磷酸盐玻璃的滑动摩擦行为。研究结果表明,氮化硅的磨损性能受环境条件以及对磨材料的影响较大。当对磨件为硅酸盐玻璃时,氮化硅材料在干燥条件下主要发生了机械磨损,在有水条件下发生了摩擦化学磨损。当对磨件为磷酸盐玻璃时,氮

化硅材料在各种环境条件下的化学磨损得到了抑制。

微动磨损会对机械构件造成各种不良影响,且微动磨损的机理十分复杂。Kirk等<sup>[10]</sup>对自配合高强度钢摩擦副进行了微动测试。研究表明,微动频率对磨屑的尺寸与成分基本没有影响,对材料表面的损伤有较大影响。在低频率时,材料的磨损层主要由氧化物碎屑构成,并主要分布在大部分未发生变形的马氏体亚结构顶部;在高频率时,材料亚表面的磨损层主要由氧化物碎屑,严重损坏的金属层和发生了塑性变形的马氏体组成。Baydoun等<sup>[11]</sup>通过改变测试时间、接触压力、滑动振幅和频率研究了35NCD16钢合金在不同工作条件下的微动磨损,并通过引入幂律公式,提出了一种考虑所有载荷条件的磨损体积预测模型,对各条件下材料的磨损率做出了有效的预测,测试结果证明了磨损动力学中磨损形式受接触压力的影响较大。

冲蚀是一种在工业中较为常见的腐蚀磨损方式,由于其与实际工程应用联系紧密,冲蚀一直以来得到了较为广泛的关注。在本次会议中,学者从理论仿真到试验多方面对冲蚀进行了研究。Molina等<sup>[12]</sup>介绍了一种将FFT技术应用于尾砂管道输浆过程中典型冲蚀磨损表面图像的处理方法,基于快速傅里叶变换的扫描电镜(SEM)图像分析表明,磨损痕迹的方向性随速度的增加而变化,表明磨损速率与湍流条件之间存在相关性。Gocha等<sup>[13]</sup>采用CFD概述了侵蚀的最佳预测,并进行了直接冲击射流中黏性泥浆侵蚀的试验研究。此外,还利用交叉模型对试验程序中的非牛顿流体进行了建模。结果表明,与牛顿模型相比,该流变模型对侵蚀的预测更符合实际情况。Thiana等<sup>[14]</sup>测量了63处不同流动条件下弯头外径的壁厚磨损,并采用欧拉-拉格朗日方法对湍流和多相流进行了计算流体力学(CFD)仿真。结果表明,随着搅拌速度的增加,最大冲蚀量增大,CFD模拟中使用的欧拉-拉格朗日方法可以预测流体砂和分散气泡砂的最大冲蚀速率、冲蚀位置和冲蚀模式。

磨损腐蚀学主要研究材料在腐蚀性环境下发生摩擦,由摩擦磨损和腐蚀之间的相互作用引起材料的降解或转变。Chen等<sup>[15]</sup>研究了海水中不同的刮擦频率对AL-Mn薄膜的影响。结果表明,材料的总磨损率(包括机械磨损和化学磨损)随着刮擦频率的增加而增加,机械磨损随刮擦频率增加而增加,主要与摩擦系数和实际接触面积的增加有关,而化学磨损随着刮擦频率的增加而增加,是由于在较低频率下材料再钝化速度加快导致的。Ardila等<sup>[16]</sup>探究了不同的表面粗糙

度和磨料夹带方向之间的相对取向对纯微磨蚀和微磨蚀-腐蚀协同过程中微粒动力学的影响。试验结果表明,在纯微磨损条件下表面形貌的影响很小,而在微磨蚀-腐蚀条件下其有着显著的影响。

## 2.2 高温磨损

高温磨损主要是极端工况条件下的摩擦副的磨损形式,涉及方面较广,在本次会议中有涂层的高温磨损行为以及热冲压过程中的高温磨损行为。例如Venkata等<sup>[17]</sup>在25~575℃范围内将Ti6Al4V和Ti6Al4V-TiC采用冷喷涂方式沉积在低碳钢板上,并研究了其干摩擦过程中的摩擦学性能,发现摩擦副磨损率和摩擦系数随温度的升高而降低,复合涂层在所有温度下均表现出较高的耐磨性,并且随着温度的变化,磨损的形式也有所不同。Ghiotti等<sup>[18]</sup>探讨了材料热处理工艺参数对AA7075型冲压件的黏着问题,发现随着温度的升高,摩擦系数呈先减小后增大的趋势,并且随着材料向模具的转移,在最高温度下出现黏着现象。Patrik等<sup>[19]</sup>通过对新开发的高导热工具钢Thermodur 2383与1.236 7工具钢摩擦学性能比较,分析了刀具材料对摩擦磨损的影响,确定了热冲压应用中的基本磨损和摩擦机理。Kazumichi等<sup>[20]</sup>研究了铬含量对高铬铸铁(铬质量分数分别为12%、17%、22%和27%)高温侵蚀磨损特性的影响。结果表明,铬的加入有效提高了试样的硬度,并导致试样侵蚀率逐渐降低。

## 2.3 聚合物材料

聚合物材料因其特有的结构和性能而具有与传统金属材料完全不同的摩擦磨损行为以及机理。本次大会共收录了6篇与聚合物相关的论文。Wu等<sup>[21]</sup>通过在聚氨酯基体中混入一定量聚乙烯蜡得到了一种新型聚氨酯复合材料,通过使用CBZ-1摩擦磨损试验机测试了聚氨酯和复合材料的磨损性能。研究表明在基体中添加适量聚乙烯蜡可以有效提升材料在水润滑低速条件下的耐磨性能。Mao等<sup>[22]</sup>研究了玻璃纤维增强的聚甲醛材料作为齿轮副时的磨损性能。通过使用聚合物齿轮试验台,对比分析了聚甲醛以及玻璃纤维增强的聚甲醛材料的磨损性能。研究表明,玻璃纤维增强的聚甲醛齿轮的磨损性能得到了显著的提升,与普通的聚甲醛相比,其承载能力约提升了50%。

## 2.4 表面技术

在本次会议中,大部分关于表面纹理和涂层技术的研究集中在不同形式表面改性技术对摩擦副的性能影响。例如Lorenzo等<sup>[23]</sup>采用低振幅的球面往复运动平台对热处理后的无涂层氧化锆和氧化铝涂层氧化

锆的微动磨损性能进行了研究,结果表明,沉积的氧化铝涂层对摩擦副微动磨损性能有一定的改善作用. Huynh等<sup>[24]</sup>对玻璃搪瓷涂层的摩擦学和力学性能进行了试验研究,并且在铬钢、氧化锆和氮化硅配副的作用下,研究了涂层的摩擦学差异. 试验结果表明:在氧化硅配副干摩擦的条件下,富钛搪瓷涂层的摩擦副摩擦系数小于铬钢球,而氧化锆球磨损严重. 对于表面纹理技术改善摩擦副性能的研究也有不少,例如 Salguero等<sup>[25]</sup>通过改变脉冲的能量密度和激光的扫描速度,制备了多种纹理类型,并研究了激光表面纹理结构对钛合金Ti6Al4V摩擦学行为的影响,结果表明,激光参数对摩擦副表面的摩擦学性能有很大的影响,与传统的无纹理结构进行相比可以减少高达62%的摩擦系数以及两个数量级的磨损量. Rao等<sup>[26]</sup>对机械加工的螺纹槽纹理结构对缸套-活塞环的性能进行了研究,发现螺纹槽纹理结构不仅能够有效改善缸套-活塞环的摩擦学性能,而且还有利于提升摩擦副的密封性能.

Gowtham等<sup>[27]</sup>采用合适的增塑剂对聚氨酯弹性体涂层的交联密度和刚度进行了改性,并研究了增塑剂对涂层的耐磨性和冰吸附力的影响,发现添加质量分数为20%~30%的增塑剂能够有效改善涂层冰吸附力和耐磨性. Varinder等<sup>[28]</sup>将质量分数5%的TiO<sub>2</sub>原料粉与80Ni-15Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和80Ni-15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层粉混合,并采用超音速火焰喷涂(HVOF)技术在管道材料上沉积涂层,结果表明,冲蚀磨损对固体颗粒的转速、时间和性质有较大的依赖性,添加质量分数5%的二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)原料粉后,还可以显著提高材料的耐蚀磨损性能.

## 2.5 金属磨损

金属及金属基复合材料的摩擦磨损性能依旧是研究的重点之一. 本次会议中,有3个会场讨论与金属材料磨损相关的议题,涵盖了金属及金属基复合材料,金属材料的摩擦腐蚀,加工工具材料的磨损. Piasecki等<sup>[29]</sup>使用激光合金化技术在镍基600合金上制备自润滑硼化物层. 首先将含有无定形硼和氟化钙CaF<sub>2</sub>的糊剂涂覆在基底材料的表面作为自润滑添加剂,之后使用激光束重新熔化材料表面. 含有固体润滑剂再熔融区的显微硬度低于仅含硼的激光合金层的显微硬度,同时具有更高的耐磨性. 在硼和CaF<sub>2</sub>的激光合金层的磨损表面上观察到摩擦膜. 摩擦膜的存在减少了对摩擦副之间的磨损. Redmore等<sup>[30]</sup>开发了一种基于整体热处理技术和表面陶瓷转化相结合的新

型表面加工工艺. 在无润滑和油润滑两种条件下采用WC和硬化钢球进行销盘往复滑动磨损试验. 试验结果表明,表面处理可使LCB合金的耐磨性提高4~16倍,对于未处理的材料,其摩擦系数从1.0降低至0.8,对于经过处理过的样品,其摩擦系数降低到0.2~0.4附近. León-Patiño等<sup>[31]</sup>研究了Ni/TiC复合材料的干滑动磨损行为. 通过液体渗透技术制备增强材料体积分数为60%的复合材料,所得到的复合材料具有连续的基底材料和均匀分布的增强材料. 在销-环装置上研究M2硬质钢与复合材料的摩擦磨损行为. 随着滑动距离和施加载荷的增加,复合材料的磨损率上升. 这是因为在高速条件下,对摩擦端面之间的温度升高,对于复合材料,其表面容易生成NiO这样的黏着氧化物和TiO<sub>2</sub>这样的固体润滑剂. 而对于M2硬质钢,其表面可能形成FeO和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. 在高载荷和低速度工况下,大量材料朝着磨痕的边缘转移,这表明黏着磨损是主要的磨损机理. 暴露在复合材料表面上的TiC颗粒降低了对基质的压力,因此降低了复合材料的磨损率.

## 2.6 建模、仿真

磨损的建模与模拟是材料磨损研究中的重要环节,通过模型的建立,能够方便地分析和预测摩擦行为,探究磨损机理. 本次会议中,有两个会场讨论与仿真相关的议题. Feng等<sup>[32]</sup>提出了1套基于振动分析的齿轮磨损预测模型. 将滑动速度和接触力与Archard磨损模型结合使用,以计算网格中每个接触点的磨损深度,之后将磨损的齿轮齿廓作为新的几何传动误差反馈到动态模型中,新的几何传动误差是磨损的齿轮轮廓与理想渐开线的偏差,然后从模型获得新的振动响应和齿接触力,并且重复该过程以产生不同严重程度的真实齿轮磨损轮廓. 通过不断更新的动态磨损模型,可以很好地监控齿轮磨损过程. Waddad等<sup>[33]</sup>提出了一种多尺度的摩擦学系统热力学模拟的理论. 这个理论主要在接触界面现象的尺度下对系统组件进行建模,使用快速傅里叶变换和优化技术作为分析方法,将温度与Archard定律结合使用,得到模型的磨损率. 这个理论是瞬态的,表面形貌会随着磨损和机械热力学的影响而变化.

## 2.7 磨损检测

Gonzalez-Arias等<sup>[34]</sup>研究了一种能够预测磨损表面磨损状态的计算策略,从经过磨损试验的铸铁样品磨损表面提取图像数据,根据磨损率,将图像分为两类“严重磨损”和“温和磨损”. 将磨损表面的表面特征使用密集的定向梯度直方图(HOG)描述符进行编码,

从而得到材料表面磨损程度的学习模型. 使用高斯朴素贝叶斯、决策树和随机森林作为分类器模型, 使用k-折交叉验证法来识别“严重磨损”和“温和磨损”的图像. 结果表明, HOG计算和分类器模型对磨损表面图像的定性表征能够很好地预测材料表面的磨损状态, 其准确度超过了80%. Cao等<sup>[35]</sup>提出了1套磨损碎片图像分析方法和磨损状态识别算法, 主要应用于油液在线磨损监测. 开发磨损碎片图像处理算法增强了磨屑图像与其背景之间的对比度, 通过对监测图像进行重建和噪声去除, 便获得更准确的监测信息. 结果表明, 磨损碎片图像分析方法和磨损状态识别算法准确, 能够快速识别行星齿轮箱的健康状况, 健康状态识别数据与齿轮箱检测结果一致.

### 3 结论

材料摩擦磨损的现象极为复杂, 且影响因素很大, 同时摩擦学又涉及到材料学、物理学等多门学科的交叉融合, 具有很强的综合性以及较高的复杂性. 多年来, 不断有学者投入研究摩擦学, 摩擦学研究也不断取得进展. 本文作者对本次大会关于材料摩擦磨损研究的最新进展进行了简要的总结与概述. 在此基础上, 我们认为以下几个方面将成为材料摩擦磨损学科的研究热点:

a. 传统摩擦学研究方面, 相关研究应不局限于试验现象的重现与试验规律的总结, 更需深入微观层面, 详细地分析现象形成的机理.

b. 复合材料方面, 应在加强新材研发的同时, 探索添加剂作用的机理与规律.

c. 表面技术方面, 目前表面改性技术在宏观程度上已经得到了较好的发展, 在未来该技术应该会朝着微观发展.

d. 在金属材料的研究方面, 在未来将着重于两个方面的研究: 一方面是复合构型的设计, 特别是通过调控增强体的空间分布实现强韧化; 另一方面是通过结构功能一体化、多功能化设计实现金属材料的高性能化.

e. 摩擦学仿真建模研究可以有效降低试验的代价, 并对实际试验具有良好的指导作用. 因此摩擦学仿真建模在未来一段时间内仍会是研究的热点之一.

f. 磨损检测在未来可借助多传感器融合技术、模糊逻辑和自组织神经网络相结合的手段获取磨损信号, 基于统计学原理的相关算法, 建立自动化程度高、抗干扰性强的通用材料磨损检测系统.

### 参考文献

- [1] Chandross M. Materials by Design: Using atomistic mechanisms to create wear-resistant alloys[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [2] Espallargas N. What is actually tribocorrosion[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [3] Fouvry S. Modelling of fretting wear: Limits and perspectives of the friction energy concept[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [4] Lin Y, Cai Z B, Li Z Y, et al. Study on the abrasive wear behavior of laser shock peening Ti-6Al-4V titanium alloy under controlled cycling impact[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [5] Ali Y, Garcia-Mendoza C D, Gates J D. Effects of ‘impact’ and abrasive particle size on the performance of white cast irons relative to low-alloy steels in laboratory ball mills[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [6] Del Sol I, Gámez A J, River A, et al. Tribological performance of ionic liquids as additives of water-based cutting fluids[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [7] Huang J, Zhou X C, Wang J, et al. Influence of temperature on friction of polymeric materials in water[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [8] Cai W J, Bellon P. Effect of annealing treatment on the dry sliding wear behavior of copper[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [9] He H T, Xiao T J, Qiao Q, et al. Tribochemical wear of silicon nitride against silicate and phosphate glasses[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [10] Kirk A M, Shipway P H, Sun W, et al. The effect of frequency on both the debris and the development of the tribologically transformed structure during fretting wear of a high strength steel[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [11] Baydoun S, Fouvry S, Descartes S, et al. Fretting wear rate evolution of a flat-on-flat low alloyed steel contact: A weighted friction energy formulation[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [12] Molina N, Aguirre J, Walczak M. Application of FFT analysis for the study of directionality of wear scars in exposure to slurry flow of varying velocity[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [13] Gocha G, Siamack A. A combined CFD-experimental study of erosion wear life prediction for non-Newtonian viscous slurries[C].

- In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [14] Thiana A, Siamack A, Yeshwanth R. Experiments and CFD simulations of erosion of a 90° elbow in liquid-dominated liquid-solid and dispersed-bubble-solid flows[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [15] Chen J, Cai W J. Effect of scratching frequency on the tribocorrosion resistance of Al-Mn amorphous thin films [C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [16] Ardila M A N, Labiapari W S, Costa H L, et al. Influence of stainless steel specimen topography on micro-abrasion and micro-abrasion-corrosion[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [17] Venkata N, Tyler B, Thomas W, et al. High temperature friction and wear behavior of cold-sprayed Ti6Al4V and Ti6Al4V-TiC composite coatings[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [18] Ghiotti A, Simonetto E, Bruschi S. Influence of process parameters on tribological behavior of AA7075 in hot stamping[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [19] Patrik S, Philipp N, Marion M. Investigation on basic friction and wear mechanisms within hot stamping considering the influence of tool steel and hardness[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [20] Kazumichi S, Riki H, Kenta K, et al. Microstructural evaluation and high-temperature erosion characteristics of high chromium cast irons[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [21] Wu Z M, Guo Z W, Yuan C Q. Influence of polyethylene wax on wear resistance for polyurethane composite material under low speed water-lubricated conditions[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [22] Mao K, Greenwood D, Ramakrishnan R, et al. The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [23] Lorenzo M, Ajayi O, Hartman K, et al. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on fretting wear performance of Zr alloy[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [24] Huynh N, Wan S H, Kiet A, et al. Tribological behavior of enamel coatings[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [25] Salguero J, Del Sol I, Vazquez J, et al. Effect of laser parameters on the tribological behavior of Ti6Al4V titanium microtextures under lubricated conditions[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [26] Rao X, Sheng C X, Guo Z W, et al. Effects of thread groove width in cylinder liner surface on performances of diesel engine[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [27] Gowtham S, Jocelyn J, Halil C, et al. Effect of plasticizer on the wear behavior and ice adhesion of elastomeric coatings[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [28] Varinder S, Satish K, Dwarikanath R. Synergistic effect of the addition of TiO<sub>2</sub> feedstock on solid particle erosion of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [29] Piasecki A, Kotkowiak M, Makuch N, et al. Wear behavior of self-lubricating boride layers produced on Inconel 600-alloy by laser alloying[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [30] Redmore E, Li X Y, Dong H S. Tribological performance of surface engineered low-cost beta titanium alloy[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [31] León-Patiño C A, Braulio-Sánchez M, Aguilar-Reyes E A, et al. Dry sliding wear behavior of infiltrated particulate reinforced Ni/TiC composites[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [32] Feng K, Borghesani P, Smith W A, et al. Vibration-based updating of wear prediction for spur gears[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [33] Waddad Y, Magnier V, Dufrénoy P, et al. Multiscale thermomechanical modeling of frictional contact problems considering wear—Application to a pin-on-disc system[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [34] Gonzalez-Arias C, Viafara C C, Coronado J J, et al. Automatic classification of severe and mild wear in worn surface images using histograms of oriented gradients as descriptor[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.
- [35] Cao W, Zhang H, Wang N, et al. The gearbox wears state monitoring and evaluation based on on-line wear debris features[C]. In Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials, Miami, USA, 2019.

DOI: 10.16078/j.tribology.2018172

# 涉海装备用机械密封技术研究现状及发展趋势研究

赵文静, 金杰, 孟祥铠, 彭旭东\*

(浙江工业大学机械工程学院, 浙江杭州 310023)

**摘要:** 随着海洋资源的不断开发和探索, 机械密封技术已成为保证涉海装备正常运行和海洋开发可靠进行的必备关键要素之一. 本文作者从摩擦学和动力学等角度综述了涉海装备用机械密封技术的研究现状, 重点从密封界面效应、多场耦合、动力学特性和密封面表面织构等几方面展开具体分析与讨论, 对机械密封相关技术进一步的研究方向和发展趋势进行了总结和探索, 指出了涉海装备用机械密封技术的发展方向及趋势, 为今后涉海装备用机械密封的设计开发及应用提供了基础, 对提高涉海装备用机械密封性能及装置运行安全性、稳定性和可靠性具有重要意义.

**关键词:** 机械密封; 涉海装备; 摩擦; 润滑; 密封性能

**中图分类号:** TH117.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2019)06-0792-11

## State of the Art and Development Trend of Mechanical Seal for Marine Equipment

ZHAO Wenjing, JIN Jie, MENG Xiangkai, PENG Xudong\*

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Zhejiang Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** With the development and exploration of marine resources, mechanical seal has become one of the essential and key elements in stable operation of marine equipment and reliable ocean development. Research status on mechanical seal for marine equipment were reviewed from the views of tribology and dynamics. The sealing interface effect, multi-field coupling, dynamic characteristics, sealing surface texture were mainly focused, and the research directions and trends of mechanical seal technology were summarized and explored. The development trend of mechanical seal technology for marine equipment was presented. It provided the foundation for the design, development and application of mechanical seals for marine equipment in the future. It is of great significance to improve the sealing performances, safety, stability and reliability of mechanical seal for marine equipment in operation.

**Key words:** mechanical seal; marine equipment; friction; lubrication; sealing performance

随着科技和经济的飞速发展, 我国海洋装备正在向深海水域、高参数、高性能和复杂结构方向发展, 因此给涉海装备密封技术特别是艉轴动密封提出了挑战. 相比于陆地环境, 海洋环境条件比较苛刻, 特别是在深海高压、腐蚀、低温、变温和变密度等恶劣环境因

素的作用下, 对深海装备用机械密封技术的耐压性、耐磨性、密封性和润滑性等要求很高, 迫切需要提高其密封性能来保证涉海装备运行的安全性、稳定性和可靠性. 目前, 涉海装备动密封同时也引起了越来越多研究者的广泛关注, 已成为密封研究领域的一大热

Received 14 November 2018, revised 13 March 2019, accepted 21 March 2019, available online 28 November 2019.

\*Corresponding author. E-mail: xdpeng@126.com, Tel: +86-13805766526.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51605436, 51775505) and National Science Foundation of Zhejiang Province, China (LQ16E050009, LY17E050018).

国家自然科学基金项目(51605436, 51775505)和浙江省自然科学基金项目(LQ16E050009, LY17E050018)资助.



点,但是国外一直对涉海装备密封技术严格保密,开展相关技术研究,研制开发出自主知识产权的各类系列涉海装备动密封,不仅具有重要的理论价值,而且具有深远的战略意义问题.本文作者综述了近几年来海洋装备用机械密封技术的研究进展,重点从密封界面效应、多场耦合、动力学特性及密封面表面织构等几方面展开分析与讨论,并对涉海装备用机械密封的发展方向进行了展望.

## 1 涉海机械密封界面效应及密封性能研究

### 1.1 静态和准稳态工况

机械密封端面的摩擦状态和摩擦工况对密封性能起着决定性的作用.根据密封结构、密封介质特性和工况条件的不同,机械密封端面的摩擦状态可分为干摩擦、流体摩擦、边界摩擦和混合摩擦四种类型.目前对边界摩擦和混合摩擦的研究还不够成熟,特别是在试验研究方面有一定的差距,端面的摩擦特性问题一直都是国内外研究者关心的热点和重点问题.Mayer的早期研究认为机械密封端面的摩擦一般属于边界摩擦,在高或低黏度介质中采用软质摩擦副具有较长使用寿命.Nau<sup>[1]</sup>通过利用滑动轴承,认为目前在实际应用中的机械密封绝大多数都工作于流体摩擦状态,且有研究表明在一定条件下械密封端面运转处于混合摩擦状态<sup>[2]</sup>.同时,国内王汝美<sup>[3]</sup>也提出在实际运转中的一般机械密封绝大多数是处于混合摩擦状态的结论,而高速、高黏度或轻载的机械密封工作于全膜流体摩擦状态.在机械密封端面摩擦性能的研究中,虽然许多学者对端面的接触特性进行了分析,但都是在保持压力恒定或是接触面间载荷不变的条件下进行的<sup>[4]</sup>,不符合实际涉海特别是深海装备的运行特点.对于实际深海装备的运行过程,国内学者很早就提出了深海动态密封,对水下1 km内的动态密封进行了分析<sup>[5]</sup>,且从材料选择和结构等方面报道了机械密封在水下机器人中的应用,并设计出可满足水下450 m密封要求的水下机器人用机械密封机构<sup>[6]</sup>.虽有学者对涉海装备下潜深度发生改变时端面的接触特性和摩擦特性进行了分析讨论<sup>[7]</sup>,且基于有限元方法分析了深海装备电机用机械密封性能<sup>[5]</sup>,指出了端面接触应力随着水深的增加而增加及端面内周紧密接触逐渐变为外周紧密接触的变化规律,还得到了端面接触压力与密封环参数间的作用关系,但是相关研究尚少,没有深海环境下海水压力与密封性能间影响作用的系统分析,而这正是涉海用机械密封与普通机械密封

的重要区别.

机械密封端面间的液膜非常薄,处于微米级,它与端面间的摩擦状态有着非常密切的联系.在涉海机械密封的实际工作中,端面间存在复杂的热力流固耦合作用,研究涉海机械密封的摩擦与润滑特性时必须考虑涉海密封端面的表面粗糙度、波度之间接触摩擦热及液膜的剪切摩擦热.虽有国内外学者提出了一定条件下的机械密封混合摩擦模型,在一定程度上考虑了微凸体摩擦热<sup>[8]</sup>、表面粗糙度<sup>[9-11]</sup>和端面锥度<sup>[11]</sup>等因素的影响,但这类研究很复杂,目前还没有一个全面考虑各个因素的混合摩擦工况模型可供涉海装备应用.

在混合摩擦状况下,当液膜在端面间承担较大载荷时,就可提高端面润滑特性,降低端面磨损,减少端面摩擦热引起的形变,提高机械密封运行稳定性.国内外学者在机械密封端面间流体润滑效应方面的研究较少,主要考虑端面的变形和摩擦热对端面液膜和润滑特性的影响.虽然国内外学者通过分析流体静压效应,指出了流体静压效应是流体膜压形成的主要影响因素<sup>[12]</sup>,提出了液膜压力分布方程和流体静压的平均值<sup>[13]</sup>,并利用计算流体力学技术分析了机械密封端面流场分布<sup>[14]</sup>,但是这些研究均局限于理论研究,试验研究很少,很难通过试验研究准确地测量出端面间的液膜厚度,并且对接触式机械密封端面间的流体润滑机理的研究也相对较少,尤其是海水润滑研究偏少,仅有的海水润滑研究也主要局限于纯海水环境中,需要进行更多的关注和研究,以提高涉海特别是深海高参数机械密封的密封性能和密封装置运行的稳定性和可靠性.

### 1.2 变工况

与准静态或稳态条件相比,涉海机械密封环在变工况下运转时呈现出不同的特性,即动态特性.国内外学者对这种变工况下的动态特性开展了相关的研究和分析,例如Harp等<sup>[15]</sup>提出了可用于分析预测变速条件下端面液膜厚度、压力分布、变形和泄漏率等参数的械密封环瞬态特性的数学模型;谢启祥<sup>[16]</sup>针对涉海船用机械密封装置,分析了变压下密封端面比压、变形量、变形锥度和摩擦系数;单晓亮<sup>[17]</sup>运用粘接方法对不同转速与水深时的涉海鱼雷热动力装置机械密封温度场进行了研究;刘录等<sup>[18]</sup>讨论了变工况下机械密封的失效机理,并进行了变工况机械密封的研制与开发,对涉海变工况机械密封设计提供了依据;Xiong等<sup>[19]</sup>建立了接触型机械密封的动态模型,分析了变工况对端面泄漏的影响;蔡晓君<sup>[20]</sup>依据机械密封

理论, 确定了变工况条件下影响机械密封工作的主要因素, 并设计完成了具有抗变工况能力的密封装置; 吴铸新等<sup>[21]</sup>通过开展船舶尾轴机械密封变工况性能试验研究, 得出在不同工况下转速和压力等对端面温度和泄漏率等的影响规律, 这些研究成果均为涉海装备用机械密封设计开发及应用提供了客观依据。

同时, 机械密封的变工况试验研究表明, 由变工况引起的端面液膜失稳是导致密封性能恶化和密封失效的主要原因<sup>[18]</sup>。针对端面液膜, 在流体动压润滑效应方面, 国内外学者提出了混合摩擦工况下的机械密封数值模型, 考虑了涉海装备用机械密封端面摩擦热、流体剪切效应和液膜挤压效应等<sup>[19, 22]</sup>, 涉及端面形貌、变形、摩擦热和液膜厚度之间的影响关系<sup>[23]</sup>, 建立了考虑表面粗糙度和端面锥度的流体动压润滑模型<sup>[11]</sup>, 还考虑了端面波度和液膜黏性热<sup>[24]</sup>、端面倾斜<sup>[25]</sup>和相变等的影响, 并进行了试验研究<sup>[26]</sup>。

与油润滑相比, 水润滑在涉海装备中具有其独特的优势。国外开展水润滑研究较早, 在二十世纪四十年代美国舰艇就已使用水润滑轴承, 并对研究成果进行了保密处理。八十年代末, 我国开始进行水润滑的探索研究, 主要以纯水作为润滑介质, 虽然已有对淡水和海水的关注, 但是更多围绕海水对材料摩擦磨损行为的影响, 集中于腐蚀磨损交互作用机制的研究, 在海水本身的润滑方面研究甚少, 尤其是涉海机械密封海水润滑特性研究方面, 这给涉海机械密封性能的研究带来了一定的挑战。

目前变工况机械密封技术的发展处于理论和试验相结合的阶段, 虽然理论研究已达到一定的程度, 获得了丰硕的成果, 但是主要局限于单一润滑介质, 且尚未出现考虑包含微生物的海水润滑模型, 离实际运用还存在一定的差距, 不能真实反映实际涉海运用中的润滑及密封机理。因此, 设计开发变工况机械密封以适应实际涉海工作状态, 提升机械密封抗变能力, 是提高涉海机械密封使用寿命的关键。研究并逐步完善变工况密封理论, 分析变工况下机械密封主要参数变化规律及其主要影响因素, 结合实际涉海情况研制变工况机械密封装置, 是目前涉海高参数机械密封性能得到提升的一大主要途径。

## 2 涉海机械密封端面耦合效应及密封性能研究

涉海机械密封在运转过程中, 摩擦副端面产生大量的摩擦热, 使端面温度升高, 产生热量损耗和热应力, 发生形变, 改变液膜厚度, 从而使得端面的接触状态发生变化, 加上端面因受到介质压力、弹簧力和液膜压力的作用, 将产生力变形, 因此, 密封端面在热力耦合作用下不仅会导致端面变形, 而且会引起液膜的汽化甚至干磨。同时, 这种端面变形反过来又影响端面间的压力分布、热量分布和温度分布等, 遭受来自海洋海水或微生物的侵蚀作用, 改变端面流体润滑效果和摩擦磨损状况, 造成端面进一步变形, 形成如图1所示的循环图。

它们之间相互影响, 相互作用, 过程十分复杂, 进

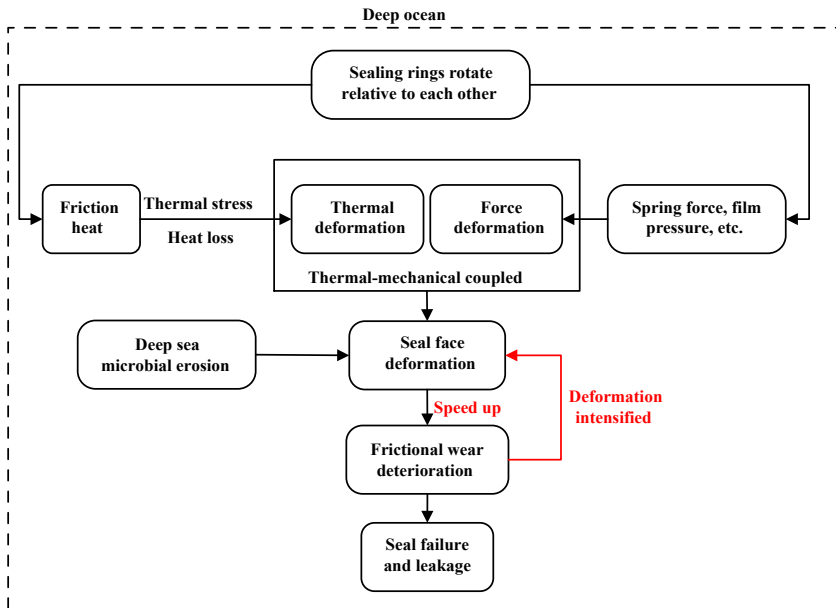


Fig. 1 Friction and wear on mechanical seal face

图 1 机械密封端面摩擦磨损过程

而影响涉海装备用机械密封装置的使用性能和安全性.这种温度场、流体场和热力场等之间的相互耦合作用对涉海装备用机械密封性能及其使用寿命的提高起着关键作用,在深海高参数极端不稳定条件下尤为明显,因此,开展对涉海特别是深海高参数机械密封多场耦合问题的研究尤为重要.然而,要准确获得涉海装备机械密封的密封性能,仅仅通过研究端面的力变形或是热变形来表征端面的密封特性是不准确的,必须综合考虑海洋环境中热、流动、变形和侵蚀等各个影响因素以及各因素间的耦合关系,才能更真实准确地反映端面的密封特性,提高密封设计的可靠性,保障机械密封安全、稳定地运行.同时,这也是目前涉海机械密封研究的主流热点和难点问题.

国内外许多学者都在涉海机械密封耦合效应方面做了一定的研究,涉及的物理场不仅包含应力场和温度场,还涉及到流体场.例如,Clark等<sup>[27]</sup>采用计算流体力学方法建立了机械密封摩擦副热流耦合模型,并提出了端面冷却的改进措施;Ayadi等<sup>[28]</sup>通过耦合机械密封环传热及变形模型,对水密封介质下的端面摩擦扭矩、温度和泄漏率等性能进行了预估研究;Zhou等<sup>[29]</sup>利用ANSYS软件建立了船用艉轴球面机械密封的热固耦合模型,讨论了海水压力和艉轴转速等因素对密封性能的影响;Lai等<sup>[30]</sup>基于管道产品应用建立了机械密封耦合模型,并对摩擦副端面的变形、温度、液膜厚度和泄漏率等参数大小进行了预估;王隽等<sup>[31]</sup>采用整体耦合法对涉海艉轴密封摩擦副端面的温度场分布进行了稳态计算求解,获得了不同工况条件下端面接触压力、温度和热变形等情况;周剑锋等<sup>[32]</sup>建立了机械密封摩擦副的传热模型,研究了在涉海全液润滑条件下摩擦副端面摩擦热与端面变形的耦合过程;周旭辉等<sup>[33]</sup>建立了涉海水下航行器艉轴球面机械密封热固耦合模型,分析了不同深度和转速条件下的接触压力、温度和变形的影响规律;陈汇龙等<sup>[34]</sup>也进行了涉海船舶艉轴机械密封的热固耦合研究,指出了热应力主要集中的位置.以上研究虽然能够处理解决一种或是几种耦合关系,但是涉海装备机械密封结构和性能涉及到洋流流动、海水密度与温度的变化、侵蚀、热变形、力变形等以及它们间的多场耦合效应,问题很复杂,尚未建立统一有效的机械密封多场耦合模型,在理论和应用技术方面发展缓慢,还无法真正用于实际工程实践,尤其在深海和变深密封领域,国内还主要依赖进口,研究也仅局限于温度场和变形特性方面.目前,现有的耦合模型多为仅考虑

固体和液膜作用的流固耦合模型、涉及密封环变形的热固耦合模型及研究温度分布的热流耦合模型,且这些模型多用于一般机械密封的稳态条件,成果大多建立在诸多假设和仅考虑单一影响因素的基础上,与实际深海高参数极端不稳定工作状态有较大的差距,在深海高参数产品设计与应用中的作用机理和影响趋势尚不明确,需要做进一步的研究与分析.另外,有关主轴与机械密封系统耦合模型的求解,问题相对复杂,研究文献更是少见<sup>[35]</sup>,且关于涉海非稳定极端条件下的机械密封流固耦合及其解耦问题的研究,在理论和设计方法方面还尤显缺乏,尚未引起密封界的充分重视,因此涉海装备工程应用问题的广泛解决需求加剧了开展相关研究的必要性和迫切性.

机械密封元件在深海高参数环境下极易遭受深海微生物侵蚀,出现侵蚀加剧的现象,深海密封这种特有的侵蚀工况,对摩擦副端面表面形貌、摩擦特性、元件性能和热力学响应等均有很大的影响,侵蚀剧烈直接降低密封性能,导致密封失效,产生泄漏问题.虽有学者已开展了深海环境下摩擦性能和密封性能的研究工作,但大多数研究都只单一分析了高压工况下密封元件和密封材料的变形性能<sup>[36]</sup>,尚未开展深海洋流环境下海水或是深海微生物侵蚀对密封结构和密封性能的影响研究.虽有考虑选材与侵蚀控制<sup>[37]</sup>、侵蚀行为及其机理<sup>[38]</sup>、涂层结构失效过程<sup>[39]</sup>等,但成果均建立在诸多材料学和海洋化学等基础上,均是对单一材料或是单一化学行为进行研究,没有明确提及密封领域或是与密封结构相关的密封性能或密封摩擦学特性的研究,更没有充分考虑多个物理场间的耦合效应.因此,尽快开展深海洋流高参数机械密封多场耦合效应研究,考虑深海洋流作用下流体流动、温度变化和传热与变形等影响,考虑相关微生物侵蚀作用,分析其机械密封特性及密封性能,探究深海高参数机械密封失效机理,为设计开发高性能深海机械密封装置和提高深海装备水下作业深度及作业可靠性奠定基础.

### 3 涉海机械密封动力学特性研究

机械密封摩擦副的动力学特性是机械密封领域研究的重点问题,对涉海机械密封的工作状态和密封性能影响很大,密封角度偏摆或轴向振动均会使摩擦副端面磨损加剧或泄漏率增加,影响涉海机械密封运转的动力稳定性、可靠性和安全性.在高速和高压等涉海高参数极端不稳定工况下,涉海装备正面临着振

动冲击、压力大范围波动以及洋流扰动等一般机械密封设计方法所无法企及的运行工况,研究并提出涉海特别是深海高参数不稳定状态下的机械密封动力学特性及动态设计方法已迫在眉睫,是现代工业技术和海洋技术发展所必须要解决的1项重要问题和任务。

伴随着涉海装备固有振动冲击的发生,机械密封工作参数随之变化,端面间液膜的压力分布、润滑状态和相态将发生变化,严重时引起泄漏,甚至导致密封失效。开展涉海装备用机械密封振动问题的研究对提高密封性能,保证涉海密封装置运行的稳定性和可靠性起着关键作用。在机械密封动力学问题方面,国内外相关研究很少,仅少数学者进行了研究与分析<sup>[40-42]</sup>。在涉海高参数极端不稳定工况下,机械密封间隙量受密封环轴向动态振动影响较大,密封的这种非线性振动特性与机械密封机理和失效形式直接相关,由密封环和端面间的液膜特性共同决定。虽然已有不少研究者提出了直接数值求解方法对密封静态特性进行研究的思路,并对机械密封结构进行了优化设计,从最初的挤压平面流体润滑模型发展到了考虑热效应和弹性变形的耦合分析模型<sup>[43-44]</sup>,但这些研究大多数是在稳定工况下,从摩擦学角度来开展的,很少考虑密封动力学振动特性及涉海极端不稳定运行条件。然而,在实际深海高参数极端工况下,端面摩擦热效应、相变效应以及端面间空化效应所引起的端面流体膜轴向振荡、径向摆振和章动等动态特性均会对涉海密封产生极大影响。因此,基于机械密封多场耦合作用,研究多场耦合下的涉海机械密封振动特性,分析轴振的产生、传播及其影响因素,分析涉海机械密封失效机理,对提高深海环境下机械密封性能及其可靠性具有重要意义。在深海高参数不稳定状态下,机械密封不仅需要考虑各种影响因素和复杂的流固动耦合效应,而且还需要考虑特有的瞬态特性和动态密封性能,对其开展相关研究对提高密封性能,设计寿命长、可靠性好和稳定性高的深海高参数机械密封装置具有重要理论价值和应用意义。

#### 4 涉海机械密封性能优化及表面织构研究

随着涉海机械密封装置性能参数指标要求的不断提高,机械密封性能的优化研究得到了一定的关注和发展。目前针对机械密封性能的优化研究主要涉及3个方面:第一,密封端面参数优化,主要研究密封端面开槽<sup>[44-46]</sup>及激光加工处理<sup>[47]</sup>;第二,密封环的结构参数优化,主要研究密封环的结构尺寸<sup>[48]</sup>;第三,密封端

面的冲洗冷却技术优化<sup>[49]</sup>。其中,密封端面参数优化,是除密封环结构参数外,目前最常用的一种优化策略。

在实际工程应用中,为了改善机械密封端面的润滑状况和密封性能,许多研究者采用端面开槽的技术方法来实现端面非接触、低磨损和低泄漏等,例如国外学者依据鸟类细长翼翅或宽阔翅的表面织构开发了一种端面型槽,成功应用在高速离心压缩机<sup>[50]</sup>和反应釜<sup>[51]</sup>上,保障了密封装置的使用寿命和稳定性,这种技术逐渐在航空、航天、制药和海洋等领域中受到了广泛的关注和重视。自然界中动植物表面这种非光滑形态特征所表现出来的优异疏水、耐磨和润滑等特性也引起了摩擦学者们的强烈兴趣。国内彭旭东团队借鉴自然界中植物表面织构所具有的优异疏水特性,开展了水润滑及表面织构润湿性机理的研究,得出了表面有微凸体织构的结构具有较好的疏水特性,并且通过合理调整微凸体和微沟槽尺寸,获得了可提高密封性能的优异疏水特性的仿生织构<sup>[52]</sup>,且对螺旋槽衍生结构、典型均压槽及经典曲线型槽进行了稳态特性及使用工况研究<sup>[53-55]</sup>,还发明了一种零泄漏疏水型机械密封结构,可在低速低压条件下降低泄漏率。依据国内外学者的研究成果<sup>[56-58]</sup>,微沟槽、微孔等具有一定仿生微纹理织构的摩擦表面均表现出优异的摩擦学特性和密封性能,并在改善和提高机械密封端面耐磨特性、润湿特性和润滑特性等方面取得了丰硕的成果,已在海洋石油平台泵送机械密封技术中应用。然而,在单纯的微观形态仿生方面,缺乏与机械密封型槽整体构型及结构的耦合效应研究,而且在改善端面耐磨性和润湿性时,总以牺牲泄漏率和流体膜刚度等密封性能为代价,难以显著提高涉海机械密封的综合密封性能。当采用海水作为润滑介质时,海水中包含有微生物,使得润滑状态变成低黏度多介质流体动压润滑形态,目前还尚未成功建立包含海水微生物的多介质润滑模型来分析润滑特性、密封性能和表面织构特性等。同时,目前机械密封性能研究未考虑由织构引起的微空化效应,仍延续了原有的空化模型,忽略了表面织构导致的微空化与原有非平行摩擦副之间的大尺度空化的耦合作用,国内外还未出现能够完整描述跨尺度空化模型的公开研究报道,对涉海机械密封空化研究提出了更高的要求。

与此同时,国际上开展的关于机械密封运行时增大瞬时开启特性,提高运行稳定性和可靠性等研究,究其本质其中不少研究是借鉴了自然界中昆虫和鸟等翼翅的提稳结构来进行分析研究的,例如Dresser-

Rand公司开发的密封端面燕尾螺旋槽,模仿雨燕叉形尾翼,在密封启停的实际应用中具有较好的高低速密封性能<sup>[59]</sup>,可在涉海变速装备上应用;Flowserve公司提出了一种类似于鹰隼翼翅的组合槽,其中深槽具有显著的流体动静压效应,可以承受高压作用,可用于深海装备机械密封设计等.这种构形仿生的理念在涉海机械密封中的应用主要体现在端面形貌织构上,也就是端面型槽的设计和开发上.彭旭东等<sup>[60]</sup>也借鉴了飞鸟翼翅中增加升力和提高稳定性的有利结构,开发了一系列仿鸟翼型槽密封结构,研究表明这些仿生型槽相比于经典的螺旋型槽具有更好的密封性能,在基于飞鸟翼翅局部几何特征结构的端面型槽仿生设计方面取得了初步成果,但是还尚未建立比较完善的涉海环境设计理论体系,缺乏涉海装备应用方面系统性的设计指导,亟需进行深入的系统化设计理论与技术方法的指导,为涉海机械密封的仿生设计、配副选型、性能优化及实际应用提供基础.

海洋中蕴含着丰富的微生物资源,微生物的附着增加了机械密封端面的摩擦阻力和端面的微生物腐蚀问题,给涉海装备的水下运用带来了很大的危害.目前海洋微生物对密封装置的影响研究主要体现在装置表面防止微生物附着腐蚀的防护方法和流体作用下微生物的定植状态两个方面,微生物的定植是指微生物定居、附着、生长和繁殖等过程的统称.目前涂层技术是涉海装备机械密封装置表面防止微生物附着腐蚀的常用防护措施,在密封装置的防腐方面扮演着重要角色.采用改变密封装置材料物理特性或是改变表面形貌设计的方法来减少微生物的附着也是一种有效的防腐措施.虽然这些方法有效抑制了密封装置摩擦副的微生物侵蚀,在一定程度上保证了密封性能的稳定,但是其中针对海洋微生物定植状态的影响以及抑制方法的研究甚少,需要给予进一步的关注.

海洋环境中微生物的定植会随着洋流环境的变化而变化,在洋流环境下不仅增加了摩擦副表面的粗糙度,加大了流体流动的动载荷效应,而且还改变了摩擦副端面的表面形貌以及摩擦润滑特性.为了确定微生物的定植状态,首先需要建立对应的数学模型,例如稳态模型和动态模型等<sup>[61]</sup>.Braiko<sup>[62]</sup>建立了微生物定植模型,但是该模型仅包含一些可测量参数,例如流速、海水流量、附着物表面积和定植持续时间等.Railkin<sup>[63]</sup>基于湍流环境也建立了数学模型,描述了湍流条件下海洋微生物在金属表面随时间变化的淤积程度,但没有考虑附着过程中海水冲刷等导致微生物

脱落以及附着到一定程度达到动态平衡等情况.目前海洋微生物的定植模型研究主要是基于开放流域,在狭小间隙、强剪切效应流域中的研究甚少,并且由于微生物的附着腐蚀使密封端面表面特性改变,表面处理技术也很快失效,需要考虑定植模型与表面处理技术的协同作用.因此,研究海洋微生物附着腐蚀下的机械密封表面织构特性和密封性能,不仅满足客观实际需求,而且为密封性能的设计优化以及密封稳定性和可靠性的提高奠定了基础.

## 5 涉海机械密封端面测试及可控技术研究

机械密封通常只在所设计的涉海工作条件下稳定运行,一旦涉海工作条件或外界环境发生变化,就可能产生端面高负载、严重磨损或严重泄漏等情况,或造成密封件失效.随着机械密封技术向深海高参数方向发展,这种失效损失的后果越来越严重,迫切需要设计开发一种能对外界涉海工况条件或环境变化做出快速反应,并能及时自动调节端面液膜厚度、液相占比或温升的高可靠性深海高参数机械密封装置.

目前,对涉海机械密封装置端面的测试主要集中在温度、膜厚、摩擦力矩、磨损量和膜压这几个基本参数上.

(1)端面温度测试.目前机械密封端面温度的测试方法主要有热电偶、热电阻和红外线测试法.Tournerie等<sup>[64]</sup>采用热电偶方法对静环端面的温度进行了测试,并分析了端面温度随转速和介质压力变化的情况,同时还利用红外照相机对机械密封温度场进行了可视化测量;Salant等<sup>[65]</sup>提出了热量传到密封端面中的份额与其各自的热阻成反比的理论,并可通过测量端面传热系数来确定端面温度分布;Ayadi等<sup>[28]</sup>通过铺设热电偶传感器测量了摩擦端面及密封件周围的温度分布情况;王玉明等<sup>[66]</sup>通过在静环端面铺设热敏电阻测量了螺旋槽流体动压机械密封的端面温度分布情况.通过这三种测试手段,可以获知机械密封端面的温度分布情况,但是这三种测试手法原理各不相同,各有优势,在实际的测试和应用过程中需综合各种因素选用合理恰当的测试手法进行端面温度测试.

(2)端面膜厚的测试.机械密封端面的液膜厚度表征了端面的摩擦润滑状态.目前端面膜厚的常用测试方法主要有电涡流法和电容法<sup>[67]</sup>,通过测试端面液膜厚度就可了解端面的摩擦润滑特性<sup>[68]</sup>.

(3)摩擦力矩测试.目前端面摩擦力矩的测试方法主要有支反力法和传递法.Mayer<sup>[69]</sup>研究者采用支

反力法已成功对端面的摩擦力矩进行了测试. Ayadi等<sup>[28]</sup>通过力传感器测量了密封件的摩擦扭矩. 孙见君等<sup>[70-71]</sup>则采用转矩传感器测试了端面的摩擦力矩. 吴宗祥等<sup>[72]</sup>通过试验研究得出支反力法和传递法测试出的摩擦系数与试验较为接近, 并说明了传递测试法的简捷性.

(4) 端面磨损量的测试. 机械密封端面的摩擦磨损关系到密封性能的好坏和密封装置的整个使用寿命. 精确测试端面磨损量是监测机械密封装置稳定运行的重要手段之一. 已有研究者通过采用电阻磨损测试法、因子隐马尔可夫模型(FHMM)<sup>[73]</sup>和摩擦磨损试验机<sup>[74]</sup>等对机械密封摩擦副端面磨损量及磨损状态进行了试验测试研究.

(5) 端面液膜压力的测试. 机械密封端面的液膜压力不仅可以表征端面液膜的承载能力, 还决定了端面的润滑特性和密封性能. 端面液膜压力的测量方法有很多, 已有学者通过采用微型传感器成功测试了机械密封端面的液膜压力, 预估了液膜承载能力的大小<sup>[10]</sup>.

涉海机械密封的可控性研究不仅可以提高密封装置的密封性能和运行稳定性, 还可以提高整个装备在深海运行的稳定性和可靠性. 国内外学者在机械密封的可控性方面已做了一些研究, 为今后机械密封性能的提高奠定了一定的基础. Salant等<sup>[75]</sup>提出的可控机械密封装置, 由动环、静环(附带温度传感器)和静环后设置的促动器组成, 利用端面温度信号作为控制系统的反馈信号来达到自动调节的目的, 以提高装置运行的稳定性. Ayadi等<sup>[28]</sup>基于水密封介质开展了大尺度速度和压力条件下的机械密封端面摩擦扭矩、温度和泄漏率等性能试验研究. 国内彭旭东等<sup>[76]</sup>也提出了一些可控机械密封装置的设计思想, 指出了由研究泄漏的无源控制转向以限制泄漏为目的的有源控制的新概念, 对涉海机械密封装置的可控性研究提供了一定的基础. 孙见君等从理论和试验角度方面分析了可控机械密封工程应用的可行性<sup>[71, 77]</sup>, 对涉海装备机械密封应用提供了依据. 吴铸新等<sup>[21]</sup>设计研制了船舶尾轴可控式机械密封试验台架, 得出在不同工况下转速、压力等对端面温度、泄漏率等的影响规律. 许杨<sup>[78]</sup>提出了船舶艏轴机械密封端面变形的控制方法, 并进行了试验验证. 赫晓光等<sup>[79]</sup>研制了可用于探讨机械密封工作机制的船舶艏轴机械密封试验装置, 可模拟各种工况下的密封工作情况. 综上所述, 虽然已经开展了针对不同应用需求的涉海机械密封可控技术及试

验测试研究, 取得了一些重要的成果<sup>[9, 43, 79]</sup>, 但试验测试研究不能严格按照相似理论来模拟实际工作状况, 尤其对深海密封及摩擦润滑的试验研究成果仍非常有限, 获取可靠的动态数据亟待解决, 且深海高参数系统对密封性能匹配试验测试研究的需求越来越大, 有效并可靠的高参数试验模拟及测试技术对验证理论模型的正确性、合理性以及提高密封性能水平具有重要意义和价值. 从深海装备用机械密封装置的运行原理和密封失效的因素出发, 采用相关的自动控制技术, 不仅可以使密封装置能够自主适应外界涉海工况条件的变化, 还可以提高涉海密封装置运行的稳定性和可靠性, 在一定范围内保证涉海机械密封装置的密封性能.

## 6 总结

随着海洋资源的不断探索和开发, 海洋装备的自动化、智能化和集成化水平不断提高, 且趋于极端参数化、规模化发展, 诸多设备的旋转摩擦副遭受深水流冲击、侵蚀、高低温变化、压力大范围波动、轴系振动和轴系应变弯曲等影响, 处于高参数极端不稳定工作状态, 泄漏问题时常发生, 直接影响涉海装备的航行安全问题, 这样就给涉海装备机械密封的密封性能和使用寿命提出了更高的要求, 尤其在一些深海的海洋军事、抢险救生和石油管线铺设与检修等特殊应用场合. 深海极端环境及任务需求的特殊性和复杂性加大了涉海装备机械密封装置性能的要求, 必须保证其具备一定的可靠性、稳定性和安全性, 但传统的设计方法已无法达到理想的使用效果, 迫切需要高性能、长寿命的高参数机械密封装置来提高深海装备运行的可靠性和稳定性, 开展深海环境下机械密封问题的研究具有重要的直接现实价值和意义. 我国在涉海高参数机械密封装置技术方面与世界先进水平差距很大, 对适用于深海高参数极端不稳定条件下的机械密封关键技术的系统性研究还比较落后, 关键部件的材料还主要依赖进口, 研究并提出深海高参数不稳定状态下的长寿命机械密封动态设计方法已迫在眉睫, 成为现代涉海装备工业技术发展和海洋探索研究必须要解决的一项重大任务, 对提高深海装备的作业深度、连续作业时间及运行安全性和可靠性具有重要应用价值.

海洋环境恶劣, 并具有其自身的特殊性和复杂性, 在研究涉海装备用机械密封装置时会面临很多难点问题, 例如深海环境下热流固力等多场耦合问题、

微生物附着侵蚀问题、海水润滑和多尺度空化等。目前微生物附着侵蚀特性的研究与机械密封小间隙流场环境差别较大,建立微生物在机械密封端面流场中的定植模型已成为海水润滑机械密封必须克服的难题。涉海装备用机械密封问题的研究不仅需要海洋极端环境下机械密封问题有较深的了解,还涉及到化学、物理和信息技术等多学科的交叉,需要综合考虑各个方面的因素以及它们间的耦合作用,来保证涉海装备机械密封装置的稳定性和可靠性。

## 参考文献

- [1] Nau B S. Observations and analysis of mechanical seal film characteristics[J]. *Transaction of the ASME Journal of Lubrication Technology*, 1980, 102(3): 341–347. doi: 10.1115/1.3251534.
- [2] Chen Zhen. Advance in tribological study of mechanical seals[J]. *Fluid Machinery*, 1989, 17(5): 30–34 (in Chinese) [陈震. 机械密封技术研究进展—摩擦学[J]. *流体工程*, 1989, 17(5): 30–34].
- [3] Wang Rumei. Question and answer of practical mechanical seal technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1995: 118–122(in Chinese) [王汝美. 实用机械密封技术问答[M]. 北京: 中国石化出版社, 1995: 118–122].
- [4] Zhu Xueming. Research on numerical analysis and optimization of mechanical sealing performance[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005(in Chinese) [朱学明. 机械密封性能的数值分析及优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005].
- [5] Zou Bo. Study on the rotating shaft seal of deep-sea motor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008(in Chinese) [邹波. 深海电机旋转轴密封性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008].
- [6] Liu Zijun, Cui Jiefan. Research on the deepwater seal for underwater motor of underwater robot[J]. *Robot*, 1997, 19(1): 61–64 (in Chinese) [刘子俊, 崔皆凡. 海洋机器人水下电机的深水密封研究[J]. *机器人*, 1997, 19(1): 61–64].
- [7] Zhu Hanhua, Liu Zhenglin, Yan Xinping, et al. Influence of the variation of diving-depth on the deformation of marine mechanical face seals[J]. *Lunrication Engineering*, 2008, 33(4): 27–29 (in Chinese) [朱汉华, 刘正林, 严新平, 等. 水深变化对船用机械密封端面变形的影响[J]. *润滑与密封*, 2008, 33(4): 27–29]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2008.04.008.
- [8] Lebeck A O. A Mixed friction hydrostatic face seal model with phase change[J]. *ASME Journal of Lubrication Technology*, 1980, 23(4): 357–387.
- [9] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Influencing factors analysis and experiments of friction coefficient between the end faces for contact mechanical seals[J]. *Tribology*, 2016, 36(3): 354–361 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 接触式机械密封端面摩擦系数影响因素分析与试验[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(3): 354–361]. doi: 10.16078/j.tribology.2016.03.013.
- [10] Wei Long, Zhang Penggao, Liu Qihe, et al. Leakage fractal model of mechanical seals based on average film thickness and pressure flow rate factor[J]. *Tribology*, 2018, 38(6): 692–699 (in Chinese) [魏龙, 张鹏高, 刘其和, 等. 基于平均膜厚和压力流量因子的机械密封泄漏分形模型[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(6): 692–699]. doi: 10.16078/j.tribology.2018015.
- [11] Ge Peiqi, Chen Lihai, Cheng Jianhui, et al. The mixed-friction calculation model of mechanical face seals considering surface roughness and radial taper[J]. *Lubrication Engineering*, 2001, 5: 14–16 (in Chinese) [葛培琪, 陈立海, 程建辉, 等. 考虑表面粗糙度和径向锥度的机械密封混合摩擦计算模型[J]. *润滑与密封*, 2001, 5: 14–16]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2001.02.005.
- [12] Lebeck A O. A study of contacting mechanical face sealing performance by mixed friction model[C]. In: *Proceeing of the 12th International Conference on Fluid Sealing*, BHRA, Cannes, 1991.
- [13] Doust T G. An Experimental and theoretical study of pressure and thermal distortion in a mechanical seal[J]. *ASLE Transactions*, 1996, 29(2): 151–159.
- [14] Jiang Xiaowen, Gu Boqin. Numerical simulation of flow in convergent wedgelike gap[J]. *Lubrication Engineering*, 2004, 3: 47–49 (in Chinese) [蒋小文, 顾伯勤. 收敛楔形间隙中流体流动的数值模拟[J]. *润滑与密封*, 2004, 3: 47–49]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2004.06.017.
- [15] Harp S R, Salant R F. Analysis of mechanical seal behavior during transient operation[J]. *Journal of Tribology*, 1998, 120(2): 191–197. doi: 10.1115/1.2834409.
- [16] Xie Qixiang. Research on variable pressure mechanical seal of marine device[J]. *Ship Science and Technology*, 1994, 6: 19–24, 50 (in Chinese) [谢启祥. 船用变压力机械密封装置的研究[J]. *舰船科学技术*, 1994, 6: 19–24, 50].
- [17] Shan Xiaoliang. Research on temperature field of mechanical seals in the torpedo thermal power ststem[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2007(in Chinese) [单晓亮. 鱼雷热动力装置机械密封温度场研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007].
- [18] Liu Lu, Shen Qiyong, Shao Yugong. The discussion on face stableness of mechanical face seal with vapor-liquid phase in changing operating conditions[J]. *Lubrication Engineering*, 2002, 3: 15–18 (in Chinese) [刘录, 沈齐英, 邵予工. 变工况条件下汽液两相机械密封端面稳定性探讨[J]. *润滑与密封*, 2002, 3: 15–18]. doi: 10.3969/j.issn.0254-0150.2002.01.006.
- [19] Xiong S, Salant R F. A dynamic model of a contacting mechanical seal for down-hole tools[J]. *ASME Journal of Tribology*, 2003, 125(7): 469–479.
- [20] Cai Xiaojun. Design of mechanical seal experimental platform and building of test system in the variational working condition[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005(in Chinese) [蔡晓君. 变工况机械密封实验台的设计及测试系统的建立[D]. 沈阳: 东北大学, 2005].
- [21] Wu Zhuxin, Liu Zhenglin, Tian Xiangyu. Experimental study on performance of controllable stern shaft mechanical seal under

- varying condition[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation science & Engineering), 2009, 33(4): 655–658 (in Chinese) [吴铸新, 刘正林, 田相玉. 船舶尾轴可控式机械密封变工况性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(4): 655–658]. doi: [10.3963/j.issn.1006-2823.2009.04.012](https://doi.org/10.3963/j.issn.1006-2823.2009.04.012).
- [22] Salant R F, Cao B. Unsteady analysis of a mechanical seal using duhamel's method[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(7): 623–631.
- [23] Ruan Bo. A mixed lubrication model of liquid/gas mechanical face seal[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1995.
- [24] Kim Chung-Kyun. An analytical investigation of leakage and thermoelastic problems in roating seals[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1987.
- [25] Liu Lu, Shen Qiyang, Shao Yugong. Study on dynamic effect of mechanical seal end face[J]. Modern Machinery, 2002, 3: 33–36, 11 (in Chinese) [刘录, 沈齐英, 邵予工. 机械密封端面的动压效应研究[J]. 现代机械, 2002, 3: 33–36, 11]. doi: [10.3969/j.issn.1002-6886.2002.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6886.2002.01.030).
- [26] Sun Jianjun, Wei Long, Gu Boqin. Development course and research trend on the mechanical seal[J]. Lubrication Engineering, 2004, 4: 128–131, 134 (in Chinese) [孙见君, 魏龙, 顾伯勤. 机械密封的发展历程与研究动向[J]. 润滑与密封, 2004, 4: 128–131, 134]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2004.04.050](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2004.04.050).
- [27] Clark R Azibert H, Oshinowo L. Computer simulation of mechanical seal leads to design change that improves coolant circulation[J]. Materials and Design, 2002, 23(1): 113–117. doi: [10.1016/S0261-3069\(01\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00048-6).
- [28] Ayadi K, Brunetière N, Tournerie B, et al. Experimental and numerical study of the lubrication regimes of a liquid mechanical seal[J]. Tribology International, 2015, 92: 96–108. doi: [10.1016/j.triboint.2015.05.022](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.022).
- [29] Zhou X H, ZOU L. Simulation analysis of spherical mechanical seal property of marine stern shaft[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 63: 02025. doi: [10.1051/mateconf/20166302025](https://doi.org/10.1051/mateconf/20166302025).
- [30] Lai T, Gabriel R, Mayer-Yep L. Improved performance seals for pipeline applications[J]. Lubrication Engineering, 2003, 59(4): 18–29.
- [31] Wang Jun, Wang Juan, Zhou Xuhui, et al. The investigation of temperature distribution of friction pair in the shipping stern shaft sealing[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7): 122–124, 139 (in Chinese) [王隽, 王娟, 周旭辉, 等. 船舶艉轴密封装置端面密封摩擦副温度场稳态分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(7): 122–124, 139]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2007.07.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2007.07.032).
- [32] Zhou Jianfeng, Gu Boqin. Coupling analysis of frictional heat of fluid film and thermal deformation of mechanical seal end faces[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(2): 77–81 (in Chinese) [周剑峰, 顾伯勤. 机械密封端面摩擦热与热变形的耦合分析[J]. 核动力工程, 2007, 28(2): 77–81]. doi: [10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0926.2007.02.018).
- [33] Zhou Xuhui, Liu Zhenglin. Thermal-structure coupling analysis of and spherical mechanical seal of stem shaft in underwater vehicle[J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(3): 63–69 (in Chinese) [周旭辉, 刘正林. 水下航行器艉轴球面机械密封热-结构耦合分析[J]. 船舶工程, 2016, 45(3): 63–69]. doi: [10.3963/j.issn.1671-7953.2016.03.015](https://doi.org/10.3963/j.issn.1671-7953.2016.03.015).
- [34] Chen Huilong, Lin Qinglong, Peng Zhengdong, et al. Coupling analysis of heat-thermal stress on stern-shaft mechanical seal[J]. Ship Engineering, 2011, 33(6): 41–44 (in Chinese) [陈汇龙, 林清龙, 彭正东, 等. 船舶艉轴机械密封的热-热应力耦合研究[J]. 船舶工程, 2011, 33(6): 41–44]. doi: [10.3969/j.issn.1000-6982.2011.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6982.2011.06.011).
- [35] Xu H, Zhu J. Influence of the mechanical seals on the dynamic performance of robot-bearing systems[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2006, 1(1): 96–100. doi: [10.1007/s11465-005-0008-5](https://doi.org/10.1007/s11465-005-0008-5).
- [36] Zhou Bo, Chen Jiawang, Gu Linyi. Analysis on self-compressibility of sealing materials under high pressure in deep-sea[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(12): 1481–1484 (in Chinese) [周博, 陈家旺, 顾临怡. 深海高压环境下的密封材料变形特性分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(12): 1481–1484].
- [37] Li Hui, Shi Lei, Zhang Lei, et al. Materials selection and corrosion control for subsea production equipment[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(10): 963–967 (in Chinese) [李辉, 石磊, 张雷, 等. 深海水下生产设施选材与腐蚀控制[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(10): 963–967]. doi: [10.11973/fsyfh-201510013](https://doi.org/10.11973/fsyfh-201510013).
- [38] Yin Bin. The research of MIC and protection of copper-nickel alloy in the marine environment[D]. Shandong: Ocean University of China, 2012(in Chinese) [尹兵. 海洋环境下铜镍合金的微生物附着腐蚀与防护研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2012].
- [39] Liu Jie. Study on the deterioration processes of organic coating/low alloy steel systems in simulated deep-sea environment[D]. Shandong: Ocean University of China, 2011(in Chinese) [刘杰. 模拟深海环境下有机涂层/低合金钢体系失效过程的研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2011].
- [40] Zhang H, Miller B A, Landers R G. Nonlinear modeling of mechanical gas face seal systems using proper orthogonal decomposition[J]. Journal of Tribology, 2006, 128(4): 817–827. doi: [10.1115/1.2345405](https://doi.org/10.1115/1.2345405).
- [41] Green I, Barnsby R M. A simultaneous numerical solution for the lubrication and dynamic stability of noncontacting gas face seals[J]. Transactions of the ASME, 2001, 123(4): 388–394.
- [42] Xie Jing, Bai Shaoxian. The effect of high speed airflow lubrication on hydrodynamic properties of inclined-dimples face seals[J]. Tribology, 2017, 37(6): 806–813 (in Chinese) [谢静, 白少先. 高速气流阻塞效应应对倾斜微孔端面密封动压特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 806–813]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.012).
- [43] Xiao N, Khonsari M M. Thermal performance of mechanical seals with textured side-wall[J]. Tribology International, 2012, 45(1): 1–7.



- doi: [10.1016/j.triboint.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.09.002).
- [44] Yang Xiao, Meng Xiangkai, Peng Xudong, et al. A TEHD lubrication analysis of surface textured mechanical seals[J]. *Tribology*, 2018, 38(2): 204–212 (in Chinese) [杨笑, 孟祥铠, 彭旭东, 等. 表面织构化机械密封热弹流润滑性能分析[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(2): 204–212]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.02.011](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.011).
- [45] Ma Xuezhong, Meng Xiangkai, Wang Yuming, et al. Mechanism and performance of end face seal of rayleigh steps and annular grooves[J]. *Tribology*, 2016, 36(5): 585–591 (in Chinese) [马学忠, 孟祥铠, 王玉明, 等. 雷列台阶-环槽端面密封机理与性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(5): 585–591]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.05.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.05.008).
- [46] Zhang Ke, Ji Hua, Li Yanlin, et al. Relationship between geometric convergent point and leakage rate of mechanical seal with elliptical dimples[J]. *Tribology*, 2017, 37(5): 602–609 (in Chinese) [张科, 吉华, 李岩霖, 等. 椭圆微孔端面机械密封泄漏率与几何收敛点的关系[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(5): 602–609]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.006](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.006).
- [47] Young L, Roosch E, Hill R. Enhanced mechanical face seal performance using modified face surface topography[C]. In: 17th International Conference on Fluid Sealing, York, UK, 2003.
- [48] Inoue H, Satou E. Improvement of seal performance and addition of seal functions to mechanical seals under high-speed conditions[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 1997, 63(608): 1324–1329. doi: [10.1299/kikaic.63.1324](https://doi.org/10.1299/kikaic.63.1324).
- [49] Houte J A M. Research in high parameters mechanical seal[C]. In: Eleventh International Conference on Fluid sealing, BHRA, Cannes, 1987.
- [50] Saxena M N. Dry gas seals and support systems: benefits and options[J]. *Hydrocarbon Processing*, 2003, 82(11): 37–41.
- [51] Pecht G G, Netzel J P. Design and application of non-contacting gas lubricated seals for slow speed services[J]. *Lubrication Engineering*, 1999, 55(7): 20–25.
- [52] Ma Chunhong, Bai Shaoxian, Peng Xudong, et al. Transient spreading of water droplet on laser micro-structured SiC surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311: 789–792. doi: [10.1016/j.apsusc.2014.05.168](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.168).
- [53] Jiang Jinbo, Chen Yuan, Xu Qichao, et al. Evolution rule and working applicability of typical derived structures of spiral groove dry gas seal[J]. *Tribology*, 2018, 38(3): 264–273 (in Chinese) [江锦波, 陈源, 徐奇超, 等. 干气密封螺旋槽衍生结构演变规律与工况适用性[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(3): 264–273]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.03.003](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.003).
- [54] Zhao Yanfeng, Peng Xudong, Jiang Jinbo, et al. Influence of the pressure-equalizing groove on the seal performance of hydrostatic dry gas seal[J]. *Tribology*, 2017, 37(5): 677–685 (in Chinese) [赵艳凤, 彭旭东, 江锦波, 等. 均压槽结构形状对静压干气密封性能影响分析[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(5): 677–685]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.016](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.016).
- [55] Xu Qichao, Jiang Jinbo, Chen Yuan, et al. Numerical analysis of steady-state and dynamic characteristics of typical molded line groove dry gas seals[J]. *Tribology*, 2018, 38(5): 584–594 (in Chinese) [徐奇超, 江锦波, 陈源, 等. 经典曲线型槽干气密封动态密封特性数值分析[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(5): 584–594]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.05.012](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.05.012).
- [56] Etsion I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication[J]. *Friction*, 2013, 1(3): 195–209. doi: [10.1007/s40544-013-0018-y](https://doi.org/10.1007/s40544-013-0018-y).
- [57] Bathe R, Krishna V, Nikumb S K, et al. Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior[J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(1): 117–123. doi: [10.1007/s00339-014-8281-y](https://doi.org/10.1007/s00339-014-8281-y).
- [58] Wang Yan, Sun Jianjun, Hu Qiong, et al. Numerical analysis of dry gas seal flow orderliness based on microstructure modeling[J]. *Tribology*, 2018, 38(6): 673–683 (in Chinese) [王衍, 孙见君, 胡琼, 等. 基于微尺度造型的干气密封流动有序性数值分析[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(6): 673–683]. doi: [10.16078/j.tribology.2018098](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018098).
- [59] John S S. Design, operation and maintenance considerations for improved dry gas seal reliability in centrifugal compressors[J]. *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Turbomachinery symposium*, 2001: 203–208.
- [60] Jiang Jinbo, Peng Xudong, Bai Shaoxian, et al. Performance analysis and selection of a bionic bird wing multi-array spiral groove dry gas seal[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 274–281 (in Chinese) [江锦波, 彭旭东, 白少先, 等. 仿鸟翼微列螺旋槽干气密封性能分析与选型[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3): 274–281]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.03.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.03.005).
- [61] Characklis W G. Biofilm development: a process analysis[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2009, 102(2): 310–347.
- [62] Braiko V D. Obrastanie v chernom more (fouling in the black sea)[J]. *Nauk. Dumka, Kiev*, 1985: 124–147.
- [63] Railkin A I. Marine biofouling: colonization processes and defenses[M]. CRC Press: Boca Raton, 2004.
- [64] Tournerie B, Reungoat D, Frene J. Temperature measurements by infrared thermography in the interface of a ridial face seal[J]. *ASME Journal of Tribology*, 1999, 113(3): 571–576.
- [65] Salant R F, Key W E. Development of an analytical model for use in mechanical seal design[C]. In: Proc. of 10th ICFS, BHRA, Cannes, 1984.
- [66] Wang Yuming, Wang Qiang, Zhao Chen. Test technology of mechanical seal[J]. *Fluid Engineering*, 1990, 10: 19–22 (in Chinese) [王玉明, 王强, 赵晨. 机械密封的试验技术(一)[J]. *流体工程*, 1990, 10: 19–22].
- [67] Zou M, Green I. Clearance control of a mechanical face seal[J]. *Tribology Transactions*, 1999, 42(3): 535–540. doi: [10.1080/10402009908982252](https://doi.org/10.1080/10402009908982252).
- [68] Li Zhenhao, Wang Zanlei, Hao Muming, et al. Cavitation experiment and performance analysis of downstream pumping spiral groove seals[J]. *Tribology*, 2017, 37(6): 743–755 (in Chinese) [李振涛, 王

- 赧磊, 郝木明, 等. 下游泵送螺旋槽密封空化试验及性能分析[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 743–755]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.005](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.005).
- [69] Mayer E. Mechanical seal (6th Edition, translated by Yao Zhaosheng)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1981(in Chinese) [Mayer E. 机械密封(第六版, 姚兆生译)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1981].
- [70] Sun Jianjun, Wei Long, Zhu Hongsheng. A new test device for mechanical seal[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(2): 25–28 (in Chinese) [孙见君, 魏龙, 朱洪生. 弹簧比压可控振动可测型机械密封试验装置[J]. 石油机械, 2002, 30(2): 25–28]. doi: [10.3969/j.issn.1001-4578.2002.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4578.2002.02.009).
- [71] Ji Zhengbo, Sun Jianjun, Lu Jianhua, et al. Predicting method for static leakage of contacting mechanical seals interface based on percolation theory[J]. Tribology, 2017, 37(6): 734–742 (in Chinese) [嵇正波, 孙见君, 陆建花, 等. 基于逾渗理论的机械密封界面静态泄漏预测方法[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 734–742]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.06.004](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.004).
- [72] Wu Zongxiang, Zhang Shugui, Liu Zhirong, et al. Determination of friction coefficient of single face mechanical seals[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1990, 14(1): 36–41 (in Chinese) [吴宗祥, 张书贵, 柳志荣, 等. 单端面机械密封摩擦系数的测定[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1990, 14(1): 36–41].
- [73] Li Kesi, Zhang Erqing, Fu Pan, et al. Condition assessment on mechanical seal face wear based on incomplete prior knowledge[J]. Tribology, 2016, 36(6): 717–725 (in Chinese) [李克斯, 张尔卿, 傅攀, 等. 不完备先验知识下的机械密封端面磨损状态评估研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(6): 717–725]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.06.008](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.06.008).
- [74] Ding Xuexing, Wang Pingxi, Wei Long, et al. Experimental study on friction characteristics of end face of dry gas seal rings with different spiral angle[J]. Tribology, 2017, 37(3): 290–296 (in Chinese) [丁雪兴, 王平西, 魏龙, 等. 两种螺旋角干气密封端面摩擦特性试验研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 290–296]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.03.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.03.002).
- [75] Salant R F, Wolff P, Navon S. Electrochemically controlled mechanical seal for aerospace application-part I: design, analysis, and steady state test[J]. Tribology Transaction, 1994, 37(1): 189–195. doi: [10.1080/10402009408983283](https://doi.org/10.1080/10402009408983283).
- [76] Peng Xudong, Gu Yongquan. New idea of mechanical seal-controllable mechanical seal[J]. Lubrication Engineering, 1995, 4: 6–9 (in Chinese) [彭旭东, 顾永泉. 机械密封的新思想-可控机械密封[J]. 润滑与密封, 1995, 4: 6–9].
- [77] Sun Jianjun, Gu Boqin, Wei Long. Discussion on controllability of mechanical seal and its engineering application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 15–19 (in Chinese) [孙见君, 顾伯勤, 魏龙. 机械密封可控性研究及其工程应用问题的探讨[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 15–19]. doi: [10.3321/j.issn:0577-6686.2005.02.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6686.2005.02.003).
- [78] Xu Yang. Deformation control technology and test study on ship stern-shaft seal[D]. Shandong: Qingdao Technology University, 2015(in Chinese) [许杨. 船舶艉轴密封变形控制技术与试验研究[D]. 山东: 青岛理工大学, 2015].
- [79] He Xiaoguang, Wang Jun, Yang Jun, et al. The design of mechanical seal testing device of marine stern shaft and the sealing tests[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(2): 93–97 (in Chinese) [赫晓光, 王隽, 杨俊, 等. 船舶艉轴机械密封试验装置的设计及密封试验[J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 93–97].

### 总 目 次

#### 研 究 论 文

导磁制动副摩擦磁化行为及机理研究·····	鲍久圣, 刘 阳, 葛世荣, 徐 浩, 阴 妍, 刘同冈	1 ( 1 )
液体密封端面倾斜椭圆孔上游泵送特性·····	白少先, 宋源森	1 (10)
全合成机油润滑下热氧化改性 TC4 钛合金的摩擦学行为 ·····	曹 磊, 孙 航, 万 勇, 杨淑燕, 徐铁伟	1 (17)
45 钢 /PA66 配副干滑动摩擦磨损性能研究 ·····	陈 平, 王鹏飞, 乔小溪	1 (26)
石墨烯 /LaF <sub>3</sub> 的制备及其作为水基润滑剂的摩擦学性能研究 ·····	郭效军, 蒲茂杰, 杨志刚, 王金清	1 (35)
剂量对润滑条件下氮离子注入 316L 不锈钢摩擦学行为的影响 ·····	····· 韩 露, 程传杰, 陈 晨, 付志强, 岳 文, 康嘉杰, 朱丽娜, 王成彪	1 (43)
TC4 合金微弧氧化膜的摩擦磨损性能及其失效机理研究 ·····	刘百幸, 彭振军, 梁 军	1 (50)
有限长滚子黏滑接触分析·····	彭 鹏, 汪久根	1 (57)
干气密封滑动摩擦界面切向接触刚度分形模型·····	孙宝财, 丁雪兴, 陈金林, 张伟政, 严如奇	1 (65)
固体表面润湿性对滑块 - 盘接触润滑供油的影响·····	王 茜, 郭 峰, 韩素立	1 (73)
溅射沉积 WS <sub>x</sub> /Ni/a-C/Ni 多层膜的微结构及大气环境摩擦学性能 ·····	杨芳儿, 王贡启, 龚润泽, 刘 涛, 郑晓华	1 (82)
织造中碳纤维束间的摩擦磨损试验模拟·····	杨 洁, 吴 宁, 李 帅, 解锡明, 焦亚男, 陈 利	1 (90)
碳含量对碳素钢磁场摩擦磨损性能的影响与作用机制研究 ···	谢瑜龙, 孙 超, 张永振, 石红信, 宋晨飞, 杜三明	1 (99)
氧化铝抛光液对铝合金化学机械抛光性能的研究·····	张泽芳, 张文娟, 张善端, 李富友	1 (109)
T 型槽端面密封气膜热弹流润滑动态稳定性 ·····	白少先, 魏 佳, 朱得磊, 马春红	2 (131)
石墨烯 / 二硫化钼复合纳米添加剂的制备及摩擦学性能研究 ·····	巴召文, 黄国威, 乔 旦, 冯大鹏	2 (140)
基于分形理论的双渐开线齿轮接触应力研究 ·····	樊智敏, 张秀文, 马永东	2 (150)
石墨烯在金刚石基体表面的纳米摩擦学行为研究·····	黄哲伟, 吉喆, 陈苏琳, 张执南, 沈 彬	2 (157)
退火温度对氧化铬薄膜结构和高温摩擦学性能的影响 ·····	····· 刘晓红, 卢小伟, 何乃如, 吉 利, 李红轩, 周惠娣, 陈建敏	2 (164)
考虑空化效应的螺旋槽机械密封液膜动力学特性研究·····	孟祥锐, 江莹莹, 赵文静, 江锦波, 彭旭东	2 (171)
织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究·····	苏峰华, 毛 川, 李助军	2 (181)
中碳钢 / 不锈钢磁场摩擦中磨屑的行为和作用 ·····	石红信, 张永振, 孙 超, 宋晨飞, 杜三明	2 (188)
界面调控对类金刚石碳基薄膜 / 铜摩擦副摩擦学行为的影响 ·····	····· 吴刊选, 刘增家, 郑韶先, 张广安, 李 霞, 鲁志斌, 蒲吉斌	2 (197)
TC4 钛合金在模拟海水中腐蚀 - 磨损交互行为研究 ·····	王林青, 周永涛, 王军军, 王忠维, 黄伟九	2 (206)
温度对 Cu-12.5Ni-5Sn- 石墨自润滑复合材料摩擦学性能的影响 ·····	····· 王小超, 李 珍, 陆 龙, 杨正海, 王静波, 张永振	2 (213)
基于摩擦耗散的石墨 /WC-Ni 干摩擦下磨损定量及预测 ·····	张高龙, 刘 莹, 王悦昶, 刘向锋	2 (221)
孔隙渗流对环面复层含油轴承润滑性能的影响·····	张国涛, 尹延国, 李蓉蓉, 许 明, 李聪敏, 丁曙光	2 (228)
计及轴颈倾斜的径向滑动轴承端流润滑分析 ·····	····· 朱少禹, 孙 军, 李 彪, 刘广胜, 苗恩铭, 李云强, 朱桂香, 任燕平	2 (235)

自泵送流体动静压型机械密封自清洁性分析	陈 群, 孙见君	3 (259)
干气密封力学系统动态性能及其影响因素间的交互作用分析		
.....陈 源, 江锦波, 彭旭东, 严天宏, 李运堂, 李孝禄, 李纪云		3 (269)
新型苯并三氮唑功能化离子液体的缓蚀与摩擦学行为研究	李 毅, 张松伟, 丁 奇, 胡丽天	3 (279)
球轴承多体弹性流体动力润滑研究	刘 宇, 马志飞, 孟凡明	3 (287)
叠片式气体箔片推力轴承热特性分析	李映宏, 胡小强, 张 凯, 冯 凯	3 (295)
热对流条件下考虑球形夹杂分布的材料热弹接触摩擦热影响分析		
.....马 力, 杨万友, 王家序, 黄彦彦, 周青华, 祝晋旋		3 (304)
高速涡轮泵机械密封端面温度变化规律研究	彭旭东, 金 杰, 李 定, 江锦波, 孟祥锐, 李纪云	3 (313)
应用于高速轮轨滚动接触的蠕滑理论算法对比研究	戚 壮, 梁 钰, 王晓雷, 张千冀	3 (319)
碳纤维切向微动磨损特性研究	王梦婕, 彭金方, 庄文华, 张晓宇, 蔡振兵, 朱旻昊	3 (330)
滞后与流体动压润滑的相关性研究	王 茜, 韩素立, 郭 峰, 李 超	3 (340)
无氢类金刚石薄膜表面 H <sub>2</sub> O 和 O <sub>2</sub> 分子共同作用的第一性原理计算	王顺花, 霍 磊, 鞠鹏飞, 蒲吉斌	3 (350)
球化退火态重载车轮钢 CL70 磨损性能及组织演化	王文宇, 刘德义, 赵秀娟, 刘鹏涛, 任瑞铭	3 (357)
MoSi <sub>2</sub> -Mo <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> -Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> /SiC 配对副的摩擦磨损性能	颜建辉, 康 蓉, 黄金鑫, 汪 异, 康永海	3 (366)
开式热沉内冷刀具的设计及其导热性能分析	郑 伟, 孙见君, 马晨波, 於秋萍, 张玉言, 牛 韬	3 (374)
γ 射线辐照对机械密封用烧结材料性能的影响	郑文凯, 刘 莹, 邬国平, 谢方民	3 (381)
聚多巴胺辅助两性离子聚合物界面组装制备水润滑纳米涂层		
.....魏强兵, 岳芹宇, 李乐乐, 付 甜, 麻拴红, 周 峰		4 (387)
热氧化温度对 TC4 钛合金在生理盐水中腐蚀磨损性能的影响	曹 磊, 孙 航, 徐铁伟, 万 勇, 蒲吉斌	4 (396)
尼龙自润滑性与表面织构协同作用对 HDPE 基水润滑轴承摩擦磨损性能的影响		
.....崔旨桃, 郭智威, 谢 心, 袁成清		4 (407)
载荷对 Ni <sub>3</sub> Al 基自润滑复合涂层摩擦学行为的影响	范祥娟, 李文生, 杨军, 朱圣宇, 程 军, 胡 伟, 何东青	4 (418)
混合润滑下螺旋锥齿轮抗胶合能力分析	甘 来, 蒲 伟, 肖 科, 王家序, 曹 伟, 汪巨基	4 (426)
水润滑环境下聚合物 PLL-g-PEG 的宏观摩擦学性能的研究	李 栋, 杨淑燕, 郭 峰	4 (434)
硅基底复合自组装膜的制备及其微摩擦磨损性能研究	刘同冈, 游 坤, 赵康康, 查塔尔	4 (444)
惯性效应对超高速倾斜端面气膜密封稳动态特性影响	沈 伟, 彭旭东, 江锦波, 李纪云, 赵文静	4 (452)
丁腈橡胶紫外线臭氧照射亲水改性及其水润滑性能研究	王家序, 冯 伟, 韩彦峰, 王立武, 李俊阳	4 (463)
几何修形对低速圆柱滚子轴承混合润滑性能的影响研究	吴继强, 王黎钦, 陆宇帆, 古 乐, 张传伟	4 (470)
D2 车轮钢原始组织对滑动磨损性能的影响	辛 悦, 赵秀娟, 潘金芝, 潘 睿, 任瑞铭	4 (479)
行星滚柱丝杠动态摩擦力矩和传动效率分析	解志杰, 张传伟, 薛其河, 王黎钦, 古 乐, 马欣新, 王 非	4 (489)
空间扫描电机油润滑轴承寿命试验验证	徐增闯, 崔维鑫, 梁宇翔, 袁志刚, 刘石神	4 (497)
定子表面织构对超声电机性能的影响	曾帅帅, 李锦棒, 陈鹏飞, 崔玉国	4 (504)
机械密封织构化表面粗糙度效应的有限元模型与摩擦学特性分析	陈文杰, 孟祥锐, 王玉明, 梁杨杨, 彭旭东	5 (523)
曲轴轴向运动对粗糙表面曲轴主轴承润滑性能影响的研究		
.....高亚明, 孙 军, 李 彪, 朱少禹, 付杨杨, 任燕平, 朱桂香		5 (532)
牙齿表面微观磨损形貌的数值化分析研究	华李成, 王玮园, 黄海波, 沈明学	5 (541)
不同分子量和交联密度对形状记忆聚酰亚胺摩擦学性能的影响机制研究		
.....李 霄, 杨增辉, 段春俭, 王廷梅, 王齐华, 张新瑞		5 (547)
利用圆锥压头微米划痕测试材料断裂韧性	刘 明, 李 烁, 高诚辉	5 (556)

铝掺杂 WC-Co 硬质合金的高温摩擦学性能、磨损机理及抗氧化性能研究 .....	刘育林, 朱圣宇, 于源, 程军, 宋承立, 乔竹辉, 胡斌	5 (565)
基底纹理对镍 / 铜纳米双层膜刮擦行为影响的分子动力学模拟 .....	马俊, 王冰, 范海冬, 蒋晗	5 (577)
计入油膜惯性作用椭圆接触弹流润滑性能研究 .....	孟凡明, 张万民	5 (585)
基于界面超分子主客体识别作用的仿生自修复水润滑研究 .....	魏鑫, 徐蓉年, 蔡美荣, 吴杨	5 (593)
干燥气氛下速度对钠钙玻璃磨损性能的影响 .....	肖童金, 何洪途, 余家欣	5 (601)
空间结构增强铜基复合材料的摩擦磨损特征 .....	徐慧燕, 黎振华, 滕宝仁, 杨睿, 李淮阳, 任博	5 (611)
复层孔隙分布铁基粉末冶金材料的力学和摩擦学性能 .....	张国涛, 尹廷国, 李蓉蓉, 童宝宏, 刘聪	5 (619)
质子型离子液体水基润滑液摩擦学性能研究 .....	张建文, 张朝辉, 刘志杭	5 (628)
表面速度异向条件下定量脂润滑特性试验观察 .....	周广运, 栗心明, 郭峰, 张建军, 王晓波	5 (635)
节流孔截面形状对静压干气密封稳态性能和压力波动特性影响 .....	车健, 江锦波, 李纪云, 彭旭东, 王玉明	6 (584)
玻璃表面全氟聚醚衍生物润滑膜的自组装及性能研究 .....	陈海杰, 乔旦, 巴召文, 冯大鹏, 张坚, 宋增红	6 (680)
基于舌 / 上顎微间隙下流体流动行为研究 .....	陈汝斯, 钱善华, 浦广益, 倪自丰, 俞经虎	6 (692)
马氏体钢干滑动磨损纳米梯度结构的形成机理研究 .....	高清远, 李淑欣, 苏云帅	6 (698)
不同润滑条件下 PA66 的摩擦学性能研究 .....	李云凯, 王优强, 谢奕浓, 龙慎文	6 (706)
水轮发电机碳刷 / 集电环无载流与载流干滑动摩擦磨损性能研究 .....	秦红玲, 付阳, 喻叶, 刘云帆, 杨昌, 赵新泽, 张小龙	6 (713)
氧化铝 / 石墨 - 硫酸钡层状复合材料的摩擦学性能及润滑机理 .....	宋俊杰, 樊恒中, 苏云峰, 张永胜, 胡丽天	6 (723)
燃油稀释对柴油机油性影响规律研究 .....	苏国庆, 郭灵燕, 王晓波, 李维民, 李现明, 王静	6 (730)
机械密封在干摩擦状态下的摩擦界面热力耦合分析 .....	王计辉, 陈志, 顾灿鸿, 邱海涛, 吉华	6 (737)
六氟乙酰丙酮离子液体的合成及摩擦学性能研究 .....	杨得锁, 李文倩, 马琳, 韩云燕, 王冬梅, 凡明锦	6 (746)
原位合成 Ag/Ag <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> 纳米复合润滑剂对 YSZ 涂层摩擦学性能的影响 .....	杨晶晶, 陕钰, 付英英, 乔竹辉, 贾均红, 易戈文, 王文珍	6 (756)
攻角对聚醚醚酮 / 泡沫镍双连续复合材料料浆冲蚀行为的影响 .....	杨晓光, 姜胜利, 张雪, 段德莉, 李曙, 张会臣	6 (766)
载荷和纳米 MoS <sub>2</sub> 添加剂含量对圆形锤头 - 棒料的摩擦磨损特性及其机理分析 .....	张立军, 韩琳, 张德潇, 李增辉, 张军伟, 金永山, 王早祥	6 (777)
<b>· 评述与进展</b>		
食品口腔摩擦学研究进展 .....	李立, 张晓琴, 张昀, 杨亚玲, 麻拴红, 王晓龙, 周峰	1 (118)
人工髌、膝关节磨损测试标准及模拟试验机研究进展 .....	崔文, 张亚丽, 王志强, 曾泓凯, 吴东升, 靳忠民	2 (248)
石墨烯掺杂的陶瓷和金属自润滑材料研究进展 .....	冯彦寒, 方建华, 吴江, 刘坪, 范兴钰, 王鑫, 姜自超	4 (511)
汽液两相流机械密封的研究进展 .....	彭旭东, 金杰, 孟祥铠, 江锦波, 赵文静, 李纪云	5 (643)
电接触材料摩擦学研究进展 .....	谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 李红轩, 周惠娣, 陈建敏	5 (656)
第 22 届材料磨损国际会议的简要评述 .....	郭智威, 白秀琴, 周新聪, 袁成清	6 (786)
涉海装备用机械密封技术研究现状及发展趋势研究 .....	赵文静, 金杰, 孟祥铠, 彭旭东	6 (792)

# TRIBOLOGY

VOLUME 39 (NUMBER 1 ~ 6, 2019, TOTAL NUMBER 189 ~ 194)

## CLASSIFIED INDEX

### Research paper

- Friction Induced Magnetization Behavior and Mechanism of Magnetic Conductive Brake Pair .....  
..... *BAO Jiusheng, LIU Yang, GE Shirong, XU Hao, YIN Yan, LIU Tonggang* 1 ( 1 )
- Upstream Pumping Characteristic of Inclined-Ellipse-Dimples on Liquid-Lubricated Seal Face .....  
..... *BAI Shaoxian, SONG Yuansen* 1 ( 10 )
- Tribological Behavior of Thermally Oxidized TC4 Titanium Alloy under Lubrication of a Full Formulated Engine Oil ...  
.....*CAO Lei, SUN Hang, WAN Yong, YANG Shuyan, XU Tiewei* 1 ( 17 )
- Friction and Wear Behavior of 45 steel/PA66 Pairs under Dry Sliding Condition.....  
..... *CHEN Ping, WANG Pengfei, QIAO Xiaoxi* 1 ( 26 )
- Synthesis, Structure and Tribological Properties of Graphene/LaF<sub>3</sub> Composites as Water-Based Lubricant Additives .....  
..... *GUO Xiaojun, PU Maojie, YANG Zhigang, WANG Jinqing* 1 ( 35 )
- Effect of Dose on Tribological Performance of N+-Implanted Stainless Steel under Lubrication Conditions .....  
..... *HAN Lu, CHENG Chuanjie, CHEN Chen, FU Zhiqiang, YUE Wen, KANG Jiajie, ZHU Lina, WANG Chengbiao* 1 ( 43 )
- Investigation of Friction and Wear Performance and Failure Mechanism of PEO Coating on TC4 Alloy .....  
..... *LIU Baixing, PENG Zhenjun, LANG Jun* 1 ( 50 )
- Contact and Stick Slip of Finite Length Roller.....  
..... *PENG Peng, WANG Jiugen* 1 ( 57 )
- Fractal Model for Tangential Contact Stiffness of Sliding Frictional Interface in Dry Gas Seals .....  
..... *SUN Baocai, DING Xuexing, CHEN Jinlin, ZHANG Weizheng, YAN Ruqi* 1 ( 65 )
- Influence of Surface Wettability on the Lubricating Oil Supply in a Slider-on-Disc Contact .....  
..... *WANG Qian, GUO Feng, HAN Suli* 1 ( 73 )
- Microstructure and Tribological Properties in Atmosphere of WS<sub>x</sub>/Ni/a-C/Ni Multilayer Films Deposited by Sputtering ...  
..... *YANG Fanger, WANG Gongqi, GONG Runze, LIU Tao, ZHENG Xiaohua* 1 ( 82 )
- Experimental Simulation of Friction and Wear of Carbon Fibre Tows in the Weaving Process .....  
..... *YANG Jie, WU Ning, LI Shuai, XIE Ximing, JIAO Yanan, CHEN Li* 1 ( 90 )
- Effect of Carbon Content on the Dry Friction and Wear of Carbon Steel under Magnetic Field and the Mechanism .....  
..... *XIE Yulong, SUN Chao, ZHANG Yongzhen, SHI Hongxin, SONG Chenfei, DU Sanming* 1 ( 99 )
- Chemical Mechanical Polishing of Aluminum Alloys using Alumina-Based Slurry.....  
.....*ZHANG Zefang, ZHANG Wenjuan, ZHANG Shanduan, LI Fuyou* 1 ( 109 )
- Thermoelastohydrodynamic Gas Lubrication of T-Groove Face Seals: Stability of Sealing Film .....  
..... *BAI Shaoxian, WEI Jia, ZHU Delei, MA Chunhong* 2 ( 131 )
- Preparation and Tribological Performance of RGO/MoS<sub>2</sub> as Composite Nano-Additives .....  
..... *BA Zhaowen, HUANG Guowei, QIAO Dan, FENG Dapeng* 2 ( 140 )

Contact Stress of Double Involute Gear Based on Fractal Theory .....	<i>FAN Zhimin, ZHANG Xiuwen, MA Yongdong</i>	2 (150)
Nanoscale Tribological Behavior of Graphene on Diamond Substrates .....	<i>HUANG Zhewei, JI Zhe, CHEN Sulin, ZHANG Zhinan, SHEN Bin</i>	2 (157)
Influence of Annealing Temperature on Structure and High Temperature Tribological Properties of Chromium oxide Films .....	<i>LIU Xiaohong, LU Xiaowei, HE Nairu, JI Li, LI Hongxuan, ZHOU Huidi, CHEN Jianmin</i>	2 (164)
Fluid Film Dynamic Characteristics of Spiral-Grooved Mechanical Seals with Cavitation Effect .....	<i>MENG Xiangkai, JIANG Yingying, ZHAO Wenjing, JIANG Jinbo, PENG Xudong</i>	2 (171)
Experiment and Simulation Study on the Effect of Texture Depth on Tribological Properties of Stainless Steel Surface under Oil Lubricating Condition .....	<i>SU Fenghua, MAO Chuan, LI Zhujun</i>	2 (181)
Behaviors and Effect of the Wear Debris during Friction between Medium-Carbon Steel and Stainless Steel with the Magnetic Field.....	<i>SHI Hongxin, ZHANG Yongzhen, SUN Chao, SONG Chenfei, DU Sanming</i>	2 (188)
Effects of Interface Tailoring on Tribological Properties of Diamond-like Carbon Based Film/Cu System .....	<i>WU Kanxuan, LIU Zengjia, ZHENG Shaoxian, ZHANG Guangan, LI Xia, LU Zhibin, PU Jibin</i>	2 (197)
Corrosion-Wear Interaction Behavior of TC4 Titanium Alloy in Simulated Seawater .....	<i>WANG Linqing, ZHOU Yongtao, WANG Junjun, WANG Zhongwei, HUANG Weijiu</i>	2 (206)
Effect of Temperature on Tribological Properties of Cu-12.5Ni-5Sn-Graphite Self-Lubricating Composites .....	<i>WANG Xiaochao, LI Zhen, LU Long, YANG Zhenghai, WANG Jingbo, ZHANG Yongzhen</i>	2 (213)
A Friction-Dissipation Based Method for Quantity Model and Prediction of Graphite/WC-Ni Wear under Dry Sliding.....	<i>ZHANG Gaolong, LIU Ying, WANG Yuechang, LIU Xiangfeng</i>	2 (221)
Effect of Porous Seepage on Lubrication Performance of Circular-Face Bilayer Oil Bearing .....	<i>ZHANG Guotao, YIN Yanguo, LI Rongrong, XU Ming, LI Congmin, DING Shuguang</i>	2 (228)
Analysis of Turbulent Lubrication of Misaligned Journal Bearing .....	<i>ZHU Shaoyu, SUN Jun, LI Biao, LIU Guangsheng, MIAO Enming, LI Yunqiang, ZHU Guixiang, REN Yanping</i>	2 (235)
Analysis of Self-Cleaning for Self-Pumping Hydrodynamic and Hydrostatic Mechanical Seal .....	<i>CHEN Qun, SUN Jianjun</i>	3 (259)
Dynamic Performance of Dry Gas Seals and Analysis of Interactions among Its Influencing Factors .....	<i>CHEN Yuan, JIANG Jinbo, PENG Xudong, YAN Tianhong, LI Yuntang, LI Xiaohu, LI Jiyun</i>	3 (269)
The Corrosion Inhibiting and Tribological Properties of Novel Benzotriazole Based Ionic Liquids .....	<i>LI Yi, ZHANG Songwei, DING Qi, HU Litian</i>	3 (279)
Elastohydrodynamic Lubrication Study on Multiple Rolling Elements of Ball Bearing .....	<i>LIU Yu, MA Zhifei, MENG Fanming</i>	3 (287)
A Thermohydrodynamic Analysis of Laminated Gas Foil Thrust Bearing .....	<i>LI Yinghong, HU Xiaoqiang, ZHANG Kai, FENG Kai</i>	3 (295)
Thermal Effects of Friction on Thermoelastic Contact between Heterogeneous Materials including Spherical Inclusions Considering Surface Heat Convection .....	<i>MA Li, YANG Wanyou, WANG Jiaxu, HUANG Yanyan, ZHOU Qinghua, ZHU Jinxuan</i>	3 (304)
Analysis of Face Temperature in Mechanical Seal Applied in the High Speed Turbo pump .....	<i>PENG Xudong, JIN Jie, LI Ding, JIANG Jinbo, MENG Xiangkai, LI Jiyun</i>	3 (313)
Comparative Study on the Theory of Creeping Theory Applied to High Speed Wheel-Rail Rolling Contact .....	<i>QI Zhuang, LIANG Yu, WANG Xiaolei, ZHANG Qianji</i>	3 (319)

Fretting Wear Damage Characteristics of Carbon Fiber	3 (330)
..... WANG Mengjie, PENG Jinfang, ZHUANG Wenhua, ZHANG Xiaoyu, CAI Zhenbing, ZHU Minhao	
Correlation between Contact Angle Hysteresis and Hydrodynamic Lubrication	3 (340)
..... WANG Qian, HAN Suli, GUO Feng, LI Chao	
The First-Principles Calculations of the Interaction of H <sub>2</sub> O and O <sub>2</sub> Molecules on the Surface of Hydrogen-Free Diamond Films	3 (350)
..... WANG Shunhua, HUO Lei, JU Pengfei, PU Jibin	
Wear Behavior and Microstructure Evolution of Spheroidized Annealed Heavy Load Wheel Steel CL70	3 (357)
..... WANG Wenyu, LIU Deyi, ZHAO Xiujuan, LIU Pengtao, REN Ruiming	
Friction and Wear Properties of MoSi <sub>2</sub> -Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> -Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> Composite against SiC	3 (366)
..... YAN Jianhui, KANG Rong, HUANG Jinxin, WANG Yi, KANG Yonghai	
Design and Thermal Performance Analysis of an Open Internal Cold Cutting Tool with Heat Sinks	3 (374)
..... ZHENG Wei, SUN Jianjun, MA Chenbo, YU Qiuping, ZHANG Yuyan, NIU Tao	
Effect of Gamma Irradiation on the Properties of Sintering Materials	3 (381)
..... ZHENG Wenkai, LIU Ying, WU Guoping, XIE Fangmin	
Polydopamine Assisted Co-Assembly for Fabrication of Zwitterionic Polymer Nanocoating with Efficient Aqueous Lubrication	4 (387)
..... WEI Qiangbing, YUE Qinyu, LI Lele, FU Tian, MA Shuanhong, ZHOU Feng	
Effects of Thermal Oxidation Temperature on Tribocorrosion Performance of TC4 Alloy in Physiological Saline Solution	4 (396)
..... CAO Lei, SUN Hang, XU Tiewei, WAN Yong, PU Jibin	
The Synergistic Effect Mechanism of PA66 Self-Lubrication Property and Surface Texture on Tribological Performance of HDPE Water-Lubricated Bearing	4 (407)
..... CUI Zhitao, GUO Zhiwei, XIE Xin, YUAN Chengqing	
Effect of Loads on Tribological Behaviors of Ni <sub>3</sub> Al Matrix Self-Lubricating Composite Coating	4 (418)
..... FAN Xiangjuan, LI Wensheng, YANG Jun, ZHU Shengyu, CHENG Jun, HU Wei, HE Dongqing	
Analysis of Spiral Bevel Gears Scuffing Load Capacity in Mixed EHL Regime	4 (426)
..... GAN Lai, PU Wei, XIAO Ke, WANG Jiayu, CAO Wei, WANG Juji	
Macro-Tribological Studies of Polymer PLL-g-PEG in Aqueous Lubrication	4 (434)
..... LI Dong, YANG Shuyan, GUO Feng	
Preparation and Microtribological Properties of Self-assembling Composite Films on Silicon Substrate	4 (444)
..... LIU Tonggang, YOU Kun, ZHAO Kangkang, MUHAMMAD Chhattal	
The Influence of Inertia Effect on Steady Performance and Dynamic Characteristic of Super High-Speed Tilted Gas Face Seal	4 (452)
..... SHEN Wei, PENG Xudong, JIANG Jinbo, LI Jiyun, ZHAO Wenjing	
Hydrophilic Modification and Water Lubrication Performance of NBR Rubber UV/Ozone (UVO) Treatment	4 (463)
..... WANG Jiayu, FENG Wei, HAN Yanfeng, WANG Liwu, LI Junyang	
Geometric Modification on Mixed Lubrication Performance of Low-Speed Cylindrical Roller Bearing	4 (470)
..... WU Jiqiang, WANG Liqin, LU Yufan, GU Le, ZHANG Chuanwei	
Influences of Microstructure on Sliding Wear Performance of D2 Wheel Steel	4 (479)
..... XIN Yue, ZHAO Xiujuan, PAN Jinzhi, PAN Rui, REN Ruiming	
Analysis of Dynamic Friction Torque and Transmission Efficiency of Planetary Roller Screw	4 (489)
..... XIE Zhijie, ZHANG Chuanwei, XUE Qihe, WANG Liqin, GU Le, MA Xinxin, WANG Fei	
Life Test Verification of Oil-Lubricated Bearing for Space Scanning Motor	4 (497)
..... XU Zengchuang, CUI Weixin, LIANG Yuxiang, YUAN Zhigang, LIU Shishen	



Effect of Stator Surface Texture on the Performances of an Ultrasonic Motor .....	<i>ZENG Shuaishuai, LI Jinbang, CHEN Pengfei, CUI Yuguo</i>	4 (504)
Finite Element Model and Tribological Properties Analysis of Textured Mechanical Seals Considering Roughness Effect.....	<i>CHEN Wenjie, MENG Xiangkai, WANG Yuming, LIANG Yangyang, PENG Xudong</i>	5 (523)
Influence of Axial Motion of Crankshaft on Lubrication Performance of Rough Crankshaft Main Bearing .....	<i>GAO Yaming, SUN Jun, LI Biao, ZHU Shaoyu, FU Yangyang, REN Yanping, ZHU Guixiang</i>	5 (532)
Numerical Analysis of Microwear Morphology of Tooth Surface .....	<i>HUA Licheng, WANG Weiyuan, HUANG Haibo, SHEN Mingxue</i>	5 (541)
Effects of Molecular Weight and Crosslinking Density on the Tribological Properties of Shape Memory Polyimides .....	<i>LI Xiao, YANG Zenghui, DUAN Chunjian, WANG Tingmei, WANG Qihua, ZHANG Xinrui</i>	5 (547)
Fracture Toughness Measurement by Micro-Scratch Tests with Conical Indenter .....	<i>LIU Ming, LI Shuo, GAO Chenghui</i>	5 (556)
Wear Mechanism, Tribological and Anti-Oxidation Properties of Al Doped WC-Co Hardmetals under High Temperature .....	<i>LIU Yulin, ZHU Shengyu, YU Yuan, CHENG Jun, SONG Chengli, QIAO Zhuhui, HU Bin</i>	5 (565)
Molecular Dynamics Simulation of Substrate Texture's Effect on Nano-Scratch of Nickel/Copper Bilayer Film .....	<i>MA Jun, WANG Bing, FAN Haidong, JIANG Han</i>	5 (577)
Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contact Considering Effect of Inertia of Lubrication Film .....	<i>MENG Fanming, ZHANG Wanmin</i>	5 (585)
Bionic Self-Healing Aqueous Lubrication Based on Interfacial Supramolecular Host-guest Interaction .....	<i>WEI Xin, XU Rongnian, CAI Meirong, WU Yang</i>	5 (593)
Effect of Sliding Speed on Wear Behaviors of Soda Lime Glass in Dry Air.....	<i>XIAO Tongjin, HE Hongtu, YU Jiabin</i>	5 (601)
Tribological Properties of Copper Matrix Composite with Lattice Reinforcement .....	<i>XU Huiyan, LI Zhenhua, TENG Baoren, YANG Rui, LI Huaiyang, REN Bo</i>	5 (611)
Mechanical and Tribological Properties of Fe-Based Powder Metallurgy Materials with Multi-Layer Porosity .....	<i>ZHANG Guotao, YIN Yanguo, LI Rongrong, TONG Baohong, LIU Cong</i>	5 (619)
Lubricating Properties of the Protic Ionic Liquids as the Water-Based Lubricating Additives .....	<i>ZHANG Jianwen, ZHANG Chaohui, LIU Zhihang</i>	5 (628)
Experimental Observation of Single-Charging Grease Lubrication with Different Directions of Surface Motion .....	<i>ZHOU Guangyun, LI Xinming, GUO Feng, ZHANG Jianjun, WANG Xiaobo</i>	5 (635)
Effect of Orifice Cross-Section Shape on Steady Performance and Pressure Fluctuation Characteristics of Hydrostatic Dry Gas Seal .....	<i>CHE Jian, JIANG Jinbo, LI Jiyun, PENG Xudong, WANG Yuming</i>	6 (669)
Self-Assembly and Property of Perfluoropolyether Derivatives Lubricating Films on Glass Surface .....	<i>CHEN Haijie, QIAO Dan, BA Zhaowen, FENG Dapeng, ZHANG Jian, SONG Zenghong</i>	6 (680)
Fluid Flow Behavior Based on Tongue/Upper Palate Micro-gap .....	<i>CHEN Rusi, QIAN Shanhua, PU Guangyi, NI Zifeng, YU Jinghu</i>	6 (692)
Investigation on Formation Mechanism of Nano-Gradient Structure in Dry Sliding Wear of Martensite Steel .....	<i>GAO Qingyuan, LI Shuxin, SU Yunshuai</i>	6 (698)
Tribological Properties of Polyamide 66 in Multiple Lubrication Conditions .....	<i>LI Yunkai, WANG Youqiang, XIE Yinong, LONG Shenwen</i>	6 (706)
Tribological Performance of Carbon Brush/Collector Ring for Hydroelectric Generator under Dry Sliding Condition with Current-Carrying and without Current-Carrying .....	<i>QIN Hongling, FU Yang, YU Ye, LIU Yunfan, YANG Chang, ZHAO Xinze, ZHANG Xiaolong</i>	6 (713)

Tribological Properties and Lubrication Mechanism of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Graphite–BaSO <sub>4</sub> Laminated Composites .....	SONG Junjie, FAN Hengzhong, SU Yunfeng, ZHANG Yongsheng, HU Litian	6 (723)
Influence of Fuel Dilution on the Performance of Diesel Engine Oil .....	SU Guoqing, GUO Lingyan, WANG Xiaobo, LI Weimin, LI Xianming, WANG Jing	6 (730)
Thermo-Mechanical Coupling Analysis of Friction Interface of Mechanical Seals under Dry Friction .....	WANG Jihui, CHEN Zhi, GU Canhong, QIU Haitao, JI Hua	6 (737)
The Synthesis and Tribological Properties of Hexafluoroacetylacetone Ionic Liquid Lubricants .....	YANG Desuo, LI Wenqian, MA lin, HAN Yunyan, WANG Dongmei, FAN Mingjin	6 (746)
Effects of In-Situ Synthesis Nanoscale Ag/Ag <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> Composite Lubricants on Tribological Properties of YSZ Coatings .....	YANG Jingjing, SHAN Yu, FU Yingying, QIAO Zhuhui, JIA Junhong, YI Gewen, WANG Wenzhen	6 (756)
The Influence of Impact Angle on Erosion Behavior of PEEK/Ni Foam Co-continuous Composite .....	YANG Xiaoguang, JIANG Shengli, ZHANG Xue, DUAN Deli, LI Shu, ZHANG Huichen	6 (766)
Friction and Wear Characteristics and Mechanism Analysis of Load and Nano MoS <sub>2</sub> Additive on Circular Hammerhead-Bar .....	ZHANG Lijun, HAN Lin, ZHANG Dexiao, LI Zenghui, ZHANG Junwei, JIN Yongshan, WANG Hanxiang	6 (777)

## Review

Progress of Oral Tribology in Food .....	LI Li, ZHANG Xiaoqin, ZHANG Yun, YANG Yaling, MA Shuanhong, WANG Xiaolong, ZHOU Feng	1 (118)
Review of the Artificial Hip and Knee Wear Testing Standards and Simulation Testing Machines .....	CUI Wen, ZHANG Yali, WANG Zhiqiang, ZENG Hongkai, WU Dongsheng, JIN Zhongmin	2 (248)
Research Progress on Graphene Doped Ceramic and Metal Self-lubricating Materials .....	FENG Yanhan, FANG Jianhua, WU Jiang, LIU Ping, FAN Xingyu, WANG Xin, JIANG Zichao	4 (511)
Research Progress on the Liquid Face Seal of Vapor-Liquid Two-Phase Flow .....	PENG Xudong, JIN Jie, MENG Xiangkai, JIANG Jinbo, ZHAO Wenjing, LI Jiyun	5 (643)
Research Progress on Tribology of Electrical Contact Materials .....	XIE Bohua, JU Pengfei, JI Li, LI Hongxuan, ZHOU Huidi, CHEN Jianmin	5 (656)
Review of Proceedings of 22nd International Conference on Wear of Materials .....	GUO Zhiwei, BAI Xiuqin, ZHOU Xincong, YUAN Chengqing	6 (786)
State of the Art and Development Trend of Mechanical Seal for Marine Equipment .....	ZHAO Wenjing, JIN Jie, MENG Xiangkai, PENG Xudong	6 (792)