

DOI: 10.7652/xjtuxb201709013

铜基石墨密封材料的摩擦磨损性能研究

张鹏鹏¹, 赵伟刚², 董光能¹

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西北工业大学航天学院, 710072, 西安)

摘要: 为研究液体火箭发动机密封材料——铜基石墨材料的摩擦磨损规律,采用销盘试验考察了铜基石墨材料在干摩擦和水润滑条件下的摩擦磨损性能和磨损机理,探讨了速度、载荷、摩擦温升对材料摩擦磨损性能的影响,结果表明:水润滑条件下不易形成铜基石墨转移膜,所以水润滑时的摩擦因数比干摩擦时的摩擦因数大;水润滑下,磨损机理为黏着和磨粒磨损,适当增加载荷、降低速度有利于降低铜基石墨材料的磨损率;干摩擦下,磨损机理为黏着磨损,适当降低载荷、提高速度有利于降低铜基石墨材料的磨损率。

关键词: 密封材料;铜基石墨;摩擦磨损性能;磨损机理

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0092-06

Investigation into Friction and Wear Behaviors of Copper-Based Graphite Seal Material

ZHANG Pengpeng¹, ZHAO Weigang², DONG Guangneng¹

(1. Key Laboratory of Modern Design and Rotor-Bearing System of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The friction and wear behaviors of copper-based graphite seal material used in liquid rocket engine were investigated by means of pin-on-disk machine. The effects of load, velocity and temperature rise on friction and wear behaviors of the copper-graphite material were analyzed. Results show that: 1) It is not easy to form copper-graphite transfer film under water lubrication condition, so the friction coefficient under water lubrication condition is higher than that under dry friction; 2) Under the condition of water lubrication, the wear mechanism is adhesive wear and abrasive wear, and properly increasing load and decreasing velocity can reduce the wear rate of the copper-based graphite material; and 3) Under the condition of dry friction, the wear mechanism is adhesive wear, and properly decreasing load and increasing speed can help reduce the wear rate of copper-based graphite material.

Keywords: seal material; copper-based graphite; friction and wear behavior; wear mechanism

我国液体火箭发动机涡轮泵密封的常见形式为接触型机械密封,具有高转速、高压、高振动及密封介质特殊等特点^[1-2]。铜基石墨材料具有良好的力学性能、耐蚀性能和自润滑性能^[3],作为密封材

料,已在我国的航天工业中得到了成功的应用。改善铜基石墨材料的减摩、耐磨性,提高其综合性能,一直是研究的主要内容之一^[4-5]。在发动机启动阶段,铜基石墨的磨损易导致密封介质泄漏,存在安全

收稿日期: 2017-01-11。 作者简介: 张鹏鹏(1992—),男,硕士生;董光能(通信作者),男,教授,博士生导师。

网络出版时间: 2017-06-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170621.1624.008.html>

隐患,因此急需探明铜基石墨材料的摩擦磨损规律。

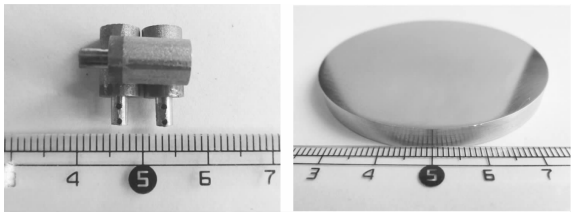
摩擦磨损性能是评价铜基石墨密封材料性能的重要内容^[6],目前相关的研究主要集中于铜基石墨材料自润滑减摩机理、材料改性效果评价和磨损机理。Sarmadi 等通过销盘摩擦试验发现,在摩擦过程中铜基石墨材料中的石墨被挤出形成固体润滑膜,具有自润滑减摩效果^[7]。Rajkumar 等对添加纳米石墨颗粒改性后的铜基石墨材料进行了加速摩擦试验,发现改善石墨粒度及空间分布可显著提高摩擦磨损性能^[8-9]。马文林等通过摩擦试验发现,铜基石墨材料的磨损机制受速度、温度、润滑状态及配副材料等条件的影响^[10-12]。

随着铜基石墨在航空航天领域的广泛应用,特殊工况、极端工况下的材料摩擦磨损研究受到了越来越多的关注^[13-15]。本文以火箭发动机密封环的动、静环材料为对象,采用销盘摩擦磨损试验,系统地研究了不同润滑条件下的摩擦性能与磨损机理,以期对密封材料的性能分析和性能改进提供试验依据。

1 试 验

1.1 试样制备

采用线切割将静环(铜基石墨)加工成销试样,粗端直径为 6 mm,细端直径为 2.5 mm;为测量摩擦过程中接触面的温升,在距细端端面 1 mm 处加工出直径为 0.5 mm 的圆孔。铜基石墨材料的密度为 6.61 g/cm³,硬度(HB)为 50。采用线切割将动环(S07 钢)加工成盘试样,直径为 60 mm,厚度为 5 mm,表面粗糙度(*R_a*)为 0.01 μm。销、盘试样如图 1 所示。



(a)销试样 (b)盘试样

图 1 销盘试样照片

1.2 试验设备与试验方法

采用 CETR UMT-2 摩擦磨损试验机的旋转模块进行销盘试验^[16],试验原理如图 2 所示。利用阿尔泰 USB2010H 型数据采集卡和自制 K 型热电偶温度采集模块采集摩擦区域的温度数据。

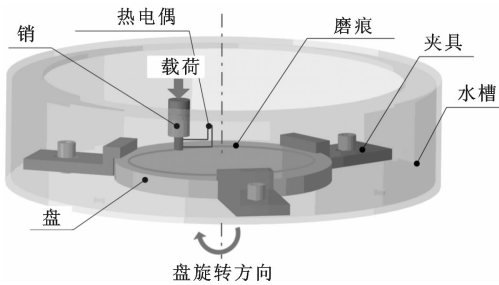


图 2 销盘试验原理图

试验分别在干摩擦和水润滑条件下进行,采用控制 *p**v* 值的试验方法^[17]研究不同载荷、速度条件下的摩擦磨损性能。试验前,将销、盘分别固定在摩擦试验机上低速预磨,盘上附有 1200 号砂纸,保证试验中为面接触。预磨后,将销及销夹具同时取下,采用丙酮超声清洗,烘干 1 h。试验前、后分别将销试样置于丙酮中进行超声清洗,烘干后用梅特勒电子天平记录试验前、后的质量差,天平的分辨率为 0.01 mg。根据材料密度将质量磨损量转化为体积磨损量,并根据式(1)求得磨损率^[18]。利用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)来表征销、盘的磨损表面。

$$W_s = \frac{V_d}{FL} \tag{1}$$

式中:*W_s* 为磨损率;*V_d* 为磨损体积;*F* 为载荷;*L* 为摩擦行程。

1.3 试验条件

试验在常温下进行,采用滴管以 20 mL/min 的速度向接触区域添加蒸馏水以实现水润滑,采用 K 型热电偶测试摩擦过程中接触区域的温度。水润滑方式及温度测量示意图如图 3 所示。

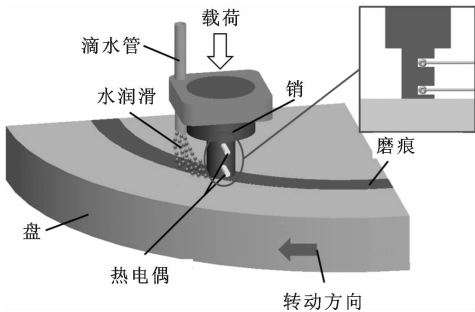


图 3 水润滑方式及温度测量示意图

每组销盘试验时长为 5 min,分别在干摩擦和水润滑条件下进行试验:一种方法为固定相对速度、改变载荷,试验参数见表 1;另一种方法为固定载荷、改变相对速度,试验参数见表 2。

表 1 固定相对速度改变载荷的试验参数

$p v / \text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p / MPa
0.5	0.5	1.0
1.0		2.0
1.5		3.0
2.0		4.0
2.5		5.0

表 2 固定载荷改变相对速度的试验参数

$p v / \text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p / MPa
0.5	0.2	2.5
1.0	0.4	
1.5	0.6	
2.0	0.8	
2.5	1.0	

2 结果与讨论

2.1 载荷对摩擦因数和磨损率的影响

试验获得的载荷对铜基石墨材料摩擦磨损性能的影响如图 4、图 5 所示。

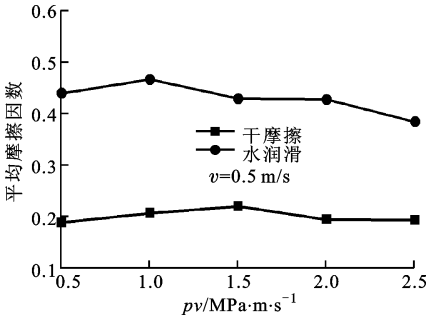


图 4 相对速度一定时载荷对摩擦因数的影响

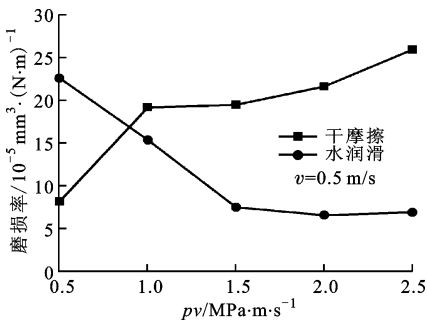


图 5 相对速度一定时载荷对磨损率的影响

从这 2 个图中可以看出：随着载荷的增大，不同润滑条件下的摩擦因数变化不大，水润滑时的摩擦因数始终大于干摩擦时的摩擦因数；水润滑时的磨损率随着载荷的增大逐渐减小，最后基本稳定，而干

摩擦时的磨损率受载荷影响较大，随着载荷的增大逐渐增大。

因此，当相对速度一定时：在水润滑条件下，增加载荷有利于降低铜基石墨材料的磨损率；在干摩擦条件下，适当降低载荷有利于降低材料的磨损率。

2.2 相对速度对摩擦因数和磨损率的影响

相对速度对铜基石墨材料摩擦磨损性能的影响如图 6、图 7 所示。从图中可以看出：在水润滑条件下，随着相对速度的提高，铜基石墨材料的摩擦因数逐渐减小，但始终高于干摩擦时的摩擦因数，而磨损率却是先增大后减小；在干摩擦条件下，随着相对速度提高，摩擦因数逐渐增大，但是磨损率逐渐减小。

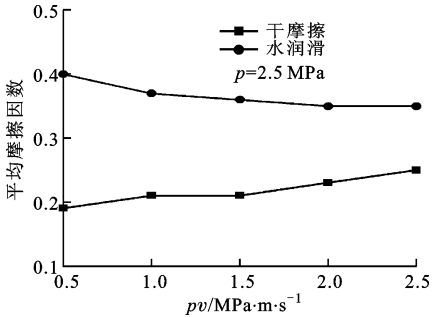


图 6 载荷一定时相对速度对摩擦因数的影响

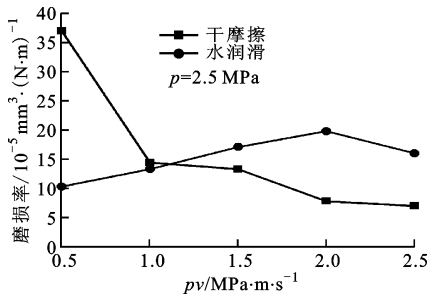


图 7 载荷一定时相对速度对磨损率的影响

当载荷一定时，在水润滑条件下适当降低相对速度有利于降低铜基石墨材料的磨损，而在干摩擦条件下，增大相对速度有利于降低磨损。

2.3 摩擦热对摩擦磨损的影响

摩擦副的温升曲线如图 8、图 9 所示。

在干摩擦条件下，随着载荷或相对速度增加，摩擦副接触区域的温度迅速升高，最高温升达 20℃；在相同 pv 值下，载荷对温升的影响较大。在水润滑条件下，因为水带走了摩擦热量，所以随着载荷或相对速度的增加，摩擦副的温度缓慢升高，温升在 3℃ 范围内。

因为试验是在低 pv 值下进行的，所以在摩擦过程中所产生的摩擦功较小，摩擦温升并不高，但在干摩擦条件下，载荷和速度的变化可导致温升的急

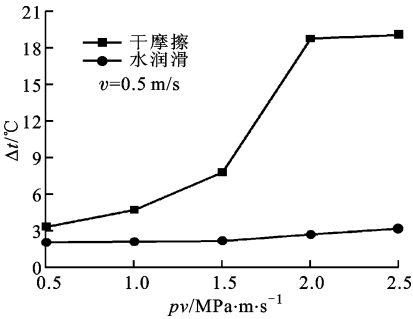


图 8 摩擦温升随载荷的变化曲线

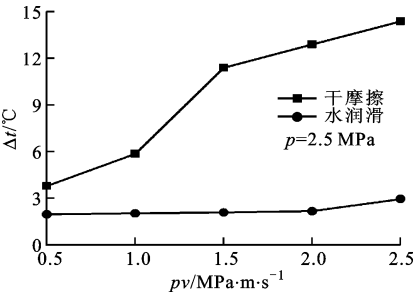
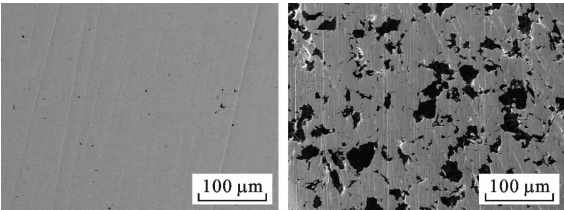


图 9 摩擦温升随相对速度的变化曲线

剧变化。可见,针对高压、高转速和强氧化介质的工况条件,应考虑摩擦温度对材料性能的影响。

2.4 表面形貌及元素分析

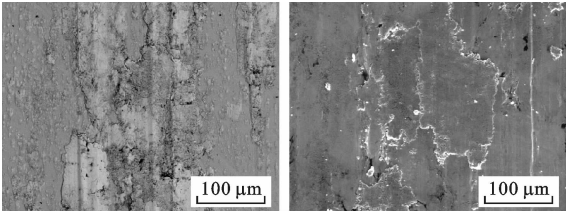
试验销、盘经抛光后的初始表面形貌如图 10 所示,可以看到盘表面光滑,有少量抛光痕迹。根据铜基石墨材料的属性,销表面的黑色物质应该是石墨填充物。



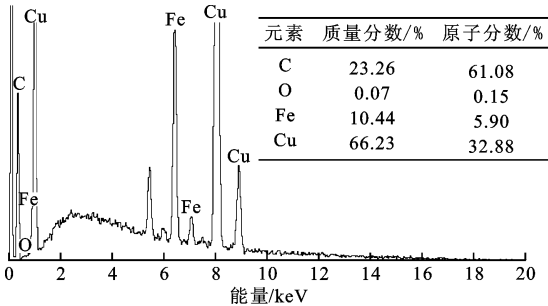
(a) 盘表面 (b) 销表面
图 10 销盘抛光后的表面形貌

本文仅对比在 $pv=2.5\text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 时,不同润滑条件下的销、盘表面形貌。当相对速度一定时,在最大载荷下试验后的销、盘形貌分析如图 11 和图 12 所示。与原始钢盘表面对比,干摩擦后的盘表面存在大块材料黏着。EDS 分析表明,盘表面 Cu 元素的原子分数为 32.88%。因 Cu 来源于铜基石墨销,说明有大量铜基石墨材料黏着在盘表面。由于出现了黏着,销表面与原始表面对比存在材料转移痕迹,如图 11 所示。与原始钢盘表面对比,水润滑摩擦后的盘表面只存在极少量黏着,同时还存在划痕。EDS 分析表明,盘表面 Cu 元素的原子分数仅

为 0.86%,说明盘表面存在极少量的铜基石墨材料转移。与原始销表面对比,摩擦后的销表面存在犁沟和材料转移现象,如图 12 所示。

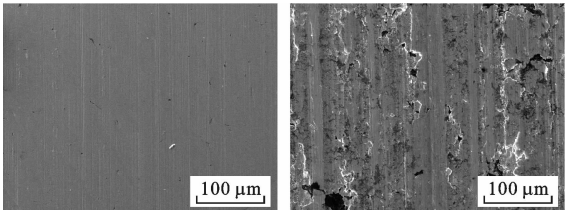


(a) 盘表面形貌 (b) 销表面形貌

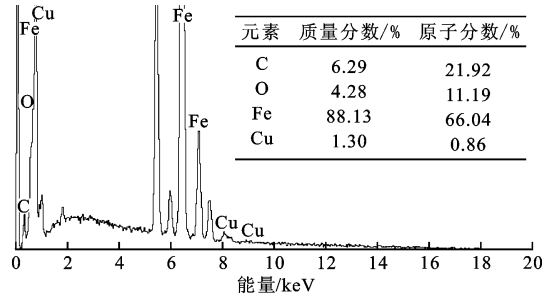


(c) 盘表面能谱分析

图 11 相对速度一定、最大载荷下干摩擦后的销盘表面形貌分析



(a) 盘表面形貌 (b) 销表面形貌



(c) 盘表面能谱分析

图 12 相对速度一定、最大载荷下水润滑摩擦后的销盘表面形貌分析

当载荷一定时,在最大相对速度下试验后的销、盘形貌分析如图 13 和图 14 所示。由图 13 可知,干摩擦后盘表面存在不均匀的材料转移膜,盘表面元素中 Cu 的原子分数为 14.85%,证明有大量铜基石墨材料黏着在盘表面。由图 14 可知,水润滑摩擦后盘表面元素中 Cu 的原子分数仅为 0.44%,且盘表

面只有极少量的铜基石墨材料黏着。

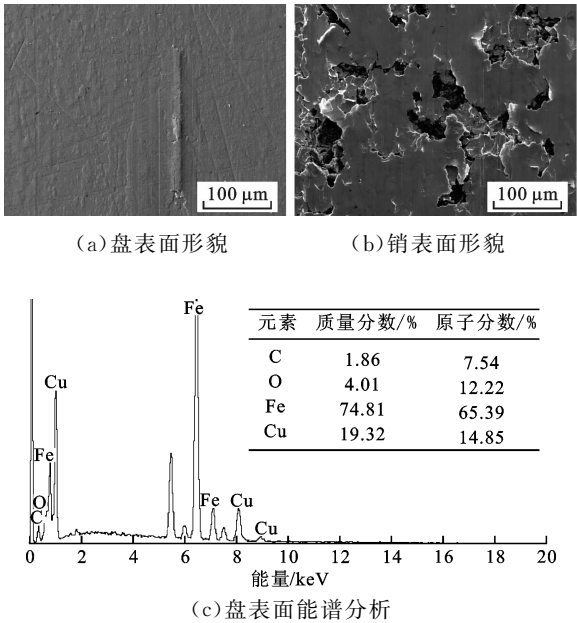


图 13 载荷一定、最大相对速度下干摩擦后的销盘表面形貌分析

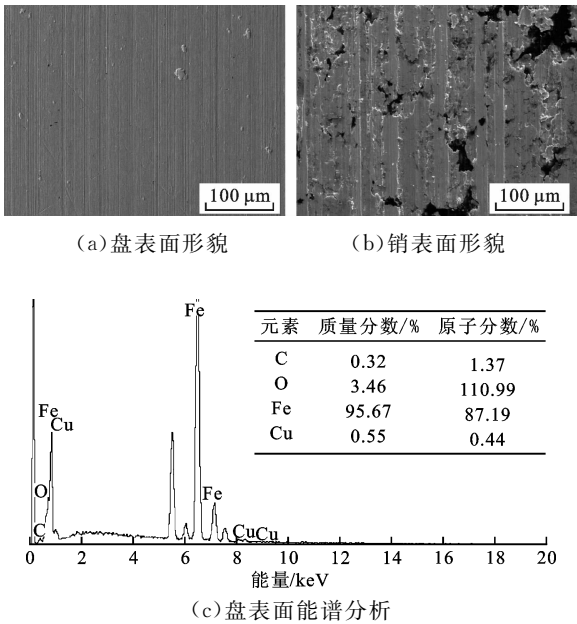


图 14 载荷一定、最大相对速度下水润滑摩擦后的销盘表面形貌分析

在水润滑条件下试验后,润滑液中存在铜基石墨磨屑,说明在磨损过程中,磨屑因水的作用最终未黏着在盘表面。对比在相同 $p v$ 值、不同载荷和速度条件下的磨损形貌(见图 11~图 14)可知,当 $p v$ 值相同时,高载低速条件下发生的黏着比高速低载条件下严重。

2.5 机理分析

由图 11~图 14 可知,在干摩擦条件下,有铜基

石墨黏着在钢盘表面并形成转移膜,但在水润滑条件下仅有极少量铜基石墨材料黏着在盘上。

干摩擦条件下铜基石墨转移膜的形成过程如图 15 所示:在干摩擦过程中铜石墨材料反复经历黏着、剥落过程,最终形成稳定的转移膜。铜基石墨材料具有润滑性能,其转移膜可起到固体润滑剂的作用,因而干摩擦时的摩擦因数较小。当相对速度一定时,载荷越大,就越不易形成稳定的铜基石墨转移膜,所以磨损率不断增大,如图 5 所示;当载荷一定时,随着相对速度的提高,形成稳定转移膜的时间变短,磨损率逐渐降低,如图 7 所示。

水润滑摩擦时,在水的作用下,黏着在盘上的铜基石墨材料被冲刷剥落,从而阻碍了铜基石墨膜的形成,使铜基石墨的自润滑作用减弱,导致水润滑时的摩擦因数高于干摩擦时的摩擦因数。由于黏着磨损受到抑制,所以水润滑时的磨损率处于较低的水平。

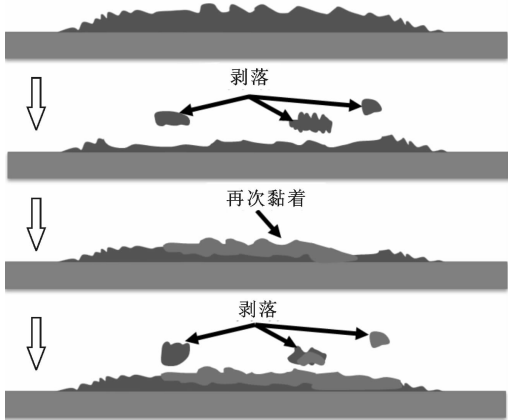


图 15 铜基石墨转移膜形成示意图

3 结 论

本文以铜基石墨销和 S07 钢盘作为配副,在不同润滑条件下进行了摩擦磨损试验,获得如下结论。

- (1)钢盘表面在干摩擦条件下易形成铜基石墨转移膜,但在水润滑条件下不易形成,所以水润滑时的摩擦因数高于干摩擦时的摩擦因数。
- (2)在水润滑条件下,适当增加载荷、降低速度有利于降低铜基石墨材料的磨损;水润滑时铜基石墨材料的磨损形式为黏着和磨粒磨损。
- (3)在干摩擦条件下,降低载荷、增加速度有利于铜基石墨材料减摩;干摩擦时铜基石墨材料的磨损形式为黏着磨损。

致谢 本研究得到了西安航天动力研究所的支持与资助,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 张国渊,袁小阳,赵伟刚,等.螺旋槽端面密封脱开转速的理论及试验[J].机械工程学报,2008,44(8): 55-60.
ZHANG Guoyuan, YUAN Xiaoyang, ZHAO Weigang, et al. Theoretical and experimental approach of separation speed of spiral groove face seals [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (8): 55-60.
- [2] WANG Jianlei, JIA Qian, YUAN Xiaoyang, et al. Experimental study on friction and wear behaviour of amorphous carbon coatings for mechanical seals in cryogenic environment [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(24): 9531-9535.
- [3] 袁青,李兵虎,童文俊,等.铜石墨复合材料改性研究进展[J].材料导报,2004,18(11): 47-49.
YUAN Qing, LI Binghu, TONG Wenjun, et al. Progress of studying modifying copper/graphite composite [J]. Materials Review, 2004, 18(11): 47-49.
- [4] 浩宏奇,丁华东,李雅文,等.工艺因素对铜石墨烧结材料性能的影响[J].西安交通大学学报,1997,31(3): 120-122.
HAO Hongqi, DING Huadong, LI Yawen, et al. Effect of processing factors on properties of copper-graphite sintered materials [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(3): 120-122.
- [5] JIANG Rongrong, ZHOU Xufeng, FANG Qile, et al. Copper-graphene bulk composites with homogeneous graphene dispersion and enhanced mechanical properties [J]. Materials Science & Engineering: A, 2016, 654: 124-130.
- [6] 蒋娅琳,朱和国.铜基复合材料的摩擦磨损性能研究现状[J].材料导报,2014,28(3): 33-36.
JIANG Yalin, ZHU Heguo. Research status of friction and wear properties of copper matrix composites [J]. Materials Review, 2014, 28(3): 33-36.
- [7] SARMADI H, KOKABI A H, REIHANI S M S. Friction and wear performance of copper-graphite surface composites fabricated by friction stir processing (FSP) [J]. Wear, 2013, 304(1/2): 1-12.
- [8] RAJKUMAR K, KUNDU K, ARAVINDAN S, et al. Accelerated wear testing for evaluating the life characteristics of copper-graphite tribological composite [J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 3029-3035.
- [9] RAJKUMAR K, ARAVINDAN S. Tribological behavior of microwave processed copper-nanographite composites [J]. Tribology International, 2013, 57: 282-296.
- [10] MA Wenlin, LU Jinjun. Effect of surface texture on transfer layer formation and tribological behaviour of copper-graphite composite [J]. Wear, 2011, 270(3/4): 218-229.
- [11] MA Wenlin, LU Jinjun, WANG Bo. Sliding friction and wear of Cu-graphite against 2024, AZ91D and Ti6Al4V at different speeds [J]. Wear, 2009, 266(11/12): 1072-1081.
- [12] 马文林,吕晋军.干摩擦条件下铜-石墨复合材料与ZQA19-4铝青铜的磨损图研究[J].摩擦学学报,2008,28(5): 389-393.
MA Wenlin, LÜ Jinjun. Dry sliding wear map of the copper-graphite composite and the copper alloy ZQA19-4 [J]. Tribology, 2008, 28(5): 389-393.
- [13] BULLEN G N. Advanced materials for aerospace and space applications [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(1): 146-155.
- [14] XIAO J K, ZHANG L, ZHOU K C, et al. Micro-scratch behavior of copper-graphite composites [J]. Tribology International, 2013, 57: 38-45.
- [15] JOHNSON M T, CHILDERS A S, RAMIREZ-RICO J, et al. Thermal conductivity of wood-derived graphite and copper-graphite composites produced via electrodeposition [J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 2013, 53: 182-189.
- [16] 张东亚,林平,董光能,等.性能可调的自润滑叠层复合材料的摩擦学行为研究[J].西安交通大学学报,2012,46(11): 53-57.
ZHANG Dongya, LIN Ping, DONG Guangneng, et al. Study on controllable tribological behaviors of self-lubricating laminated composites [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 53-57.
- [17] JONES G A. On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact: part II Bulk ceramics, diamond and diamond-like carbon films [J]. Wear, 2004, 256(3): 415-432.
- [18] 赵帅,王晓雷.高分子材料机械密封磨损特性及表面织构的影响[J].摩擦学学报,2015,35(6): 761-767.
ZHAO Shuai, WANG Xiaolei. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers [J]. Tribology, 2015, 35(6): 761-767.

(编辑 葛赵青)