

密封用炭/炭复合材料的摩擦磨损性能^{*}

张 波¹, 李瑞珍^{1,2}, 解惠贞^{1,2}, 邓海亮^{1,2}

(1. 西安航天复合材料研究所, 西安 710025; 2. 高性能碳纤维制造及应用国家地方联合工程研究中心, 西安 710089)

摘 要: 针对液体火箭发动机涡轮泵密封件磨损量较大问题, 在 MVF-1A 多功能立式摩擦磨损试验机上, 以 GCr15 钢环为对偶件, 研究低载荷高线速度(12 N, 2.25 m/s)以及高载荷低线速度(50 N, 1.25 m/s)工况条件下热处理温度不同时(2 250、2 400 和 2 500 ℃)对炭/炭(C/C)密封材料摩擦磨损性能的影响, 采用扫描电镜观察摩擦表面形貌, 利用能谱仪确定摩擦表面元素组成。结果表明: 低温(2 250 ℃)热处理材料石墨化程度低, 弯曲强度高, 摩擦因数小, 线性磨损量大; 随着热处理温度的升高, 材料石墨化程度升高、界面结合强度弱化, 弯曲强度降低; 当热处理温度升高到 2 500 ℃ 后, 材料表面易形成完整致密的磨屑膜, 磨损机制由磨粒磨损转变为粘着磨损, 摩擦因数大, 线性磨损量低。此外, 在高载荷条件下, 适当增大线速度(1.50、1.88 m/s), 有利于降低摩擦因数及线性磨损量。由此可知, 采用高温(2 500 ℃)热处理的 C/C 复合材料具有良好抗磨性能, 可较好地满足密封件使用要求。

关键词: C/C 复合材料; 摩擦磨损; 热处理温度

中图分类号: TB332; TG115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)04-0026-07

Friction and Wear Properties of C/C Composites Used as Sealing Materials

ZHANG Bo¹, LI Rui-zhen^{1,2}, XIE Hui-zhen^{1,2}, DENG Hai-liang^{1,2}

(1. Xi'an Aerospace Composite Materials Research Institute, Xi'an 710025; 2. National and Local Union Engineering Research Center of High-performance Carbon Fiber Manufacture and Application, Xi'an 710089)

Abstract: To solve the problem that the seal component of the turbine pump of a liquid rocket engine is badly worn the friction coefficient and line wear of C/C composites (heat-treated at different temperatures 2 250 ℃, 2 400 ℃ and 2 500 ℃) to GCr15 steel vice were tested on the MVF-1A multifunction vertical friction and wear machine under the conditions of lower load but higher line speed (12 N, 2.25 m/s), higher load but lower line speed (50 N, 1.25 m/s). The effects of heat-treated temperature (HTT) on tribology of C/C composites were investigated, the wear surfaces morphologies were examined by SEM, and the element of the wear surfaces were analyzed by EDAX. The results show that the samples heat-treated at 2 250 ℃ attain the lower degree of graphitization, higher flexural strength, lower friction coefficient and a larger amount of line wear. With the increase of HTT, the degree of graphitization increases, the interface bonding strength is weakened, and the flexural strength decreases. When the HTT of the samples is raised to 2 500 ℃, the friction coefficient increases but the line wear decrease. The SEM shows that it is easy to form an integrated and dense film on wear surface, and the mechanism of wear is transferred from abrasion to adhesion wear. Additionally, under the high load condition, appropriately increasing the line speed (1.50 m/s and 1.88 m/s) can help to reduce the friction coefficient and line wear. Heat-treated at high temperature (2 500 ℃) can improve the wear resistance of the C/C composites and better meet the seal component requirements.

Keywords: C/C composites; friction and wear; heat-treated temperature(HTT)

收稿日期: 2015-03-09; **修回日期:** 2015-06-18; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51202233)

通讯作者: 张波(1988-), 男(汉), 助理工程师, 硕士; **研究方向:** C/C 高温材料及制造; **Tel:** (029) 8360 8087; **E-mail:** 15129202140@163.com

网络出版日期: 2015-06-23 17:15; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1715.010.html>

引文格式: 张波, 李瑞珍, 解惠贞, 等. 密封用炭/炭复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 26-32. Zhang B, Li R Z, Xie H Z, et al. Friction and wear properties of C/C composites used as sealing materials [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 26-32.

0 引言

1986年美国“挑战者”号航天飞机升空后爆炸;韩国“罗老”号火箭,在2009~2010年间,两次发射失败。这些航天事故究其原因,均为密封故障所致^[1-2]。由此可见,没有良好的密封就没有“航天梦”。而当密封结构设计合理时,材料的性能成为保证密封构件可靠性的重要因素。

作为液体火箭发动机涡轮泵密封材料,需要在高温差(-183~600℃)、高速旋转(70~100 m/s)、剧烈振动的环境下工作。要保证密封的可靠性,选取的材料应具备密度高、强度大、导热性良好、摩擦因数低、磨损量小等性能。传统石墨密封材料具有脆性大、强度低、磨损量大等缺陷,使其应用受到限制^[3]。C/C复合材料具有较高强度(比高强石墨密封材料高出3~6倍弯曲强度^[4]),且断裂时表现出“假塑性”断裂特征;最重要是它具有复合材料的可设计性,根据使用环境对其进行设计,充分发挥材料性能优势,最大限度满足使用要求;成为未来空天领域内颇有前景的一类密封材料^[5-10]。

国内将C/C复合材料应用于液体火箭发动机涡轮泵密封还处于起步阶段,使用过程中部分材料出现磨损量较大问题。文中根据不同推力液体火箭发动机涡轮泵密封件工况条件(压强0.2~2.0 MPa,线速度70~100 m/s),合理设计摩擦磨损性能测试参数,研究不同工况条件下,热处理温度(Heat-treated temperature, HTT)对C/C复合材料摩擦磨损性能的影响,分析摩擦磨损机理,完善抗磨性能良好的C/C密封材料制备工艺。

1 试验

1.1 样品制备

以1600℃高温预处理后的针刺网胎无纬布为预制品(东丽碳纤维T700,10 mm厚度含有18~21层无纬布),进行化学气相沉积(在等温沉积炉内,以丙烯为碳源气体,纯度 $\geq 85\%$;氮气为稀释气体,纯度 $\approx 99.9\%$,温度高于1000℃时裂解沉积。致密周期为5)、树脂浸渍固化炭化(在浸渍罐内,以糠酮树脂为原料,加入适量固化剂,进行浸渍;浸渍温度高于80℃,随后打压固化,最后在炭化炉内进行炭化,炭化温度高于800℃。致密周期为4)和沥青浸渍-高压炭化(温度高于沥青软化点时,在浸渍罐内进行沥青浸渍,随后将

产品转入高强钢包套内,应用热等静压机进行高压炭化。致密周期为3)致密化处理,其间分别进行2250、2400和2500℃高温处理,制备密度大于1.90 g/cm³,编号分别对应为1、2和3号的C/C密封试样。

1.2 石墨化度测试

采用D8ADVANCE型X射线衍射仪(德国Bruker公司),依据QJ2507-93标准测试。文中石墨化度表征结果为C/C复合材料中最容易石墨化成份(高织构热解炭和沥青炭)的石墨化程度^[11]。

1.3 摩擦磨损性能测试

在MVF-1A多功能立式试验机(济南恒旭试验有限公司)上进行销-盘摩擦磨损试验,其载荷为10~200 N,线速度为0.25~2.50 m/s,回转直径23.873 mm。销-盘摩擦副由C/C复合材料销试样($\Phi 6\text{ mm} \times 12.7\text{ mm}$)和GCr15钢环($\Phi 16\text{ mm} \times \Phi 31.7\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)组成,摩擦副表面粗糙度 R_a 均为0.4 μm 。用精度为0.01 mm的千分尺测量销试样磨损前后尺寸变化,得到线性磨损量。

根据密封材料应用工况,设置摩擦磨损试验参数。文中测试了低载荷12 N,高线速度2.25 m/s,摩擦时间40 min工况下不同试样的摩擦磨损性能。测试载荷过高、线速度过大、摩擦时间过长时,将导致材料磨损量骤增过大,测试结果偏差过大;根据上述情况及应用工况,在高载荷50 N,较低线速度(1.25、1.50和1.88 m/s),摩擦时间20 min工况下对不同材料进行摩擦磨损性能测试。

1.4 微观结构表征

利用JSM-6460LV型扫描电子显微镜(SEM)观察材料形貌和磨损后的表面状况及磨屑;利用能谱(EDAX)分析确定磨损表面元素组成。

2 结果与讨论

材料基本性能见表1。由表1中可以看出,材料密度均大于1.90 g/cm³;随着热处理温度的升高,材料的压缩强度与模量降低,材料石墨化度升高。

2.1 载荷12 N时材料的摩擦磨损性能

小推力液体火箭发动机涡轮泵密封环工作压力小、转速高;选用低载荷高线速度(载荷12 N,线

速度 2.25 m/s,摩擦时间 40 min)参数对热处理温度不同的 C/C 试样进行摩擦性能测试,结果如图 1 所示。由图可知,随着热处理温度的升高,材料摩擦因数逐渐增大,2 500 ℃时摩擦因数高

达 0.17;同时可看出,当热处理温度高时材料线性磨损量低,热处理温度为 2 500 ℃时线性磨损量只有 0.025 mm,而 2 250 ℃热处理的材料线性磨损量却高达 0.061 mm。

表 1 不同热处理温度下试样的基本性能
Table 1 Basic properties of the samples with different HTT

Samples No.	HTT/℃	Density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Compressive strength/MPa	Compressive modulus/GPa	Graphitization/%
1	2 250	1.966	271	8.87	74
2	2 400	1.944	231	4.20	79
3	2 500	1.920	222	4.09	84

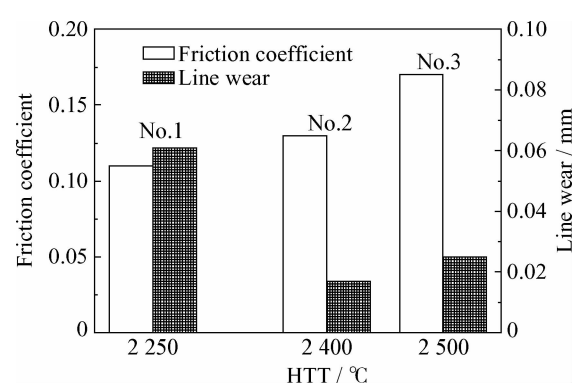


图 1 在低载荷高线速度条件下热处理温度对材料摩擦因数及线性磨损量的影响
Fig.1 Effects of HTT on friction coefficient and line wear of C/C composites tested under low load but high line speed

对测试后材料摩擦面形貌进行观察如图 2 所示。图 2(a)中 1 号试样表面有摩擦膜形成,但剥落的磨屑未能充分包裹碳纤维,摩擦表面不够

均匀,呈现磨粒磨损特征。这是由于 1 号试样热处理温度较低,材料整体石墨化度低,硬度高,较软部位剥落的磨屑易于压制成膜;较硬部位剥落的磨屑难以成膜,出现纤维裸露迹象,微观接触面积较小,摩擦因数小,磨损量较大。图 2(b)中 2 号试样表面摩擦膜较为均匀,出现一定的剥落迹象,磨屑为片层状有利于降低摩擦因数与磨损量,这与邹林华对剥层磨损描述较为相似^[12]。图 2(c)中 3 号试样表面磨屑堆积较厚,局部有金属光泽,说明对偶盘发生了磨损,试样发生一定程度粘着磨损。这是由于 3 号试样热处理温度高,石墨化程度高,基体与基体之间、基体与纤维之间结合较弱,磨屑易于剥落,且剥落的磨屑较软,易于压制成膜,厚而致密的摩擦膜增大了试样与偶件的微观接触面积,因而材料摩擦因数增大;另一方面致密的摩擦膜阻止了偶件与试样的进一步接触,降低了材料的磨损量。

对测试后材料的摩擦面进行能谱分析,表面

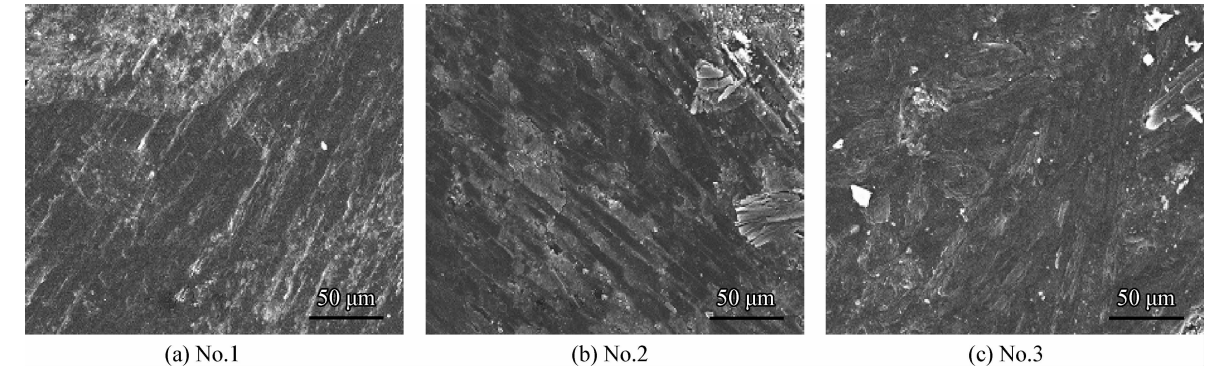


图 2 3 种材料在低载荷高线速度条件下的摩擦表面形貌
Fig.2 Wear surfaces morphologies of the three materials tested under low load but high line speed

元素及含量见表 2。可知,1 号试样磨损表面只含有 C 元素,2 号与 3 号试样磨损表面含有 Fe 元素,说明摩擦过程中金属偶件发生一定磨损。

表 2 3 种试样摩擦表面元素 EDAX 分析结果			
Table 2 EDAX analysis of the element of the wear surfaces			
(w/%)			
Element	No. 1	No. 2	No. 3
C	100	94.98	99.18
Fe		1.93	0.82
O		3.07	
Others		0.02	

出现上述结果的原因:1 号试样热处理温度低,材质硬度较 2、3 号试样高,但却低于金属偶盘硬度,未能犁削对偶盘产生新的金属磨粒,因此,摩擦表面没有金属元素。相关研究表明,在低载荷高转速下,组织结构不均匀两接触面会发生相对低振幅振荡而引起材料的失损^[13-15]。2 号试样热处理温度较高,石墨化程度较高,虽然可产生较多磨屑,但磨屑填充及成膜能力较差,摩擦副间缝隙偏大,振动振幅增加,振动剧烈;在该状态下金属偶件将会疲劳断裂^[16],较宽的缝隙会有活性氧的渗入,因此在销试样表面会检测到金属元素和氧元素。3 号试样由于热处理温度最高,石墨化度高,磨屑填充成膜能力好,摩擦膜厚而致密易擦伤金属,发生粘着磨损,局部出现金属光泽。

2.2 载荷 50 N 时材料的摩擦磨损性能

2.2.1 热处理温度的影响

大推力液体火箭发动机涡轮泵密封材料工作压力高,线速度相对较小。选用高载荷低线速测

试条件(载荷 50 N,线速度为 1.25 m/s,摩擦时间 20 min),研究热处理温度对材料摩擦因数及线性磨损量的影响(见图 3)。

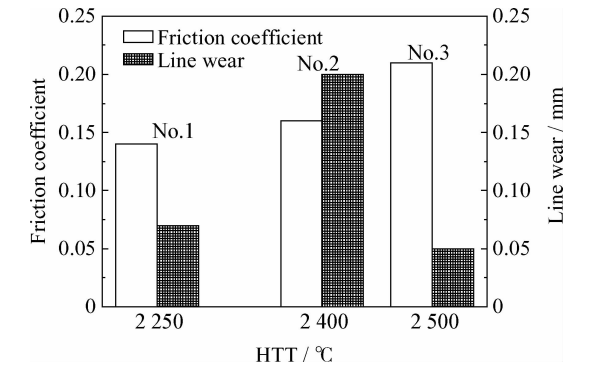


图 3 在高载荷低线速度条件下热处理温度对材料摩擦因数及线性磨损量的影响

Fig.3 Effects of the HTT on friction coefficient and line wear of C/C composites tested under high load and low line speed

由图 3 可知,2 250 ℃ 热处理的材料摩擦因数最小为 0.14,线性磨损量适中为 0.070 mm;热处理温度为 2 500 ℃ 时,材料摩擦因数虽然最大,但线性磨损量最小(0.052 mm);2 400 ℃ 处理的材料线性磨损量过大,无法满足使用要求。对测试后材料摩擦表面形貌观察见图 4。图 4(a)可看出,1 号试样表面有少量的摩擦膜,但存在明显的沟槽和划痕,呈现出典型磨粒磨损特征;图 4(b)可看出,2 号试样摩擦表面不够平整,出现片层状和鳞片状磨屑剥落和大量的纤维被剪断现象;图 4(c)可看出,3 号试样磨屑较细且均匀,摩擦表面覆盖了一层厚厚的摩擦膜。对比高倍率下 3 种试样表面形貌(如图 4 各图右上角放大图),可发现随着热处理温度的升高,纤维束与基体结合的界面处裂纹明显增多。

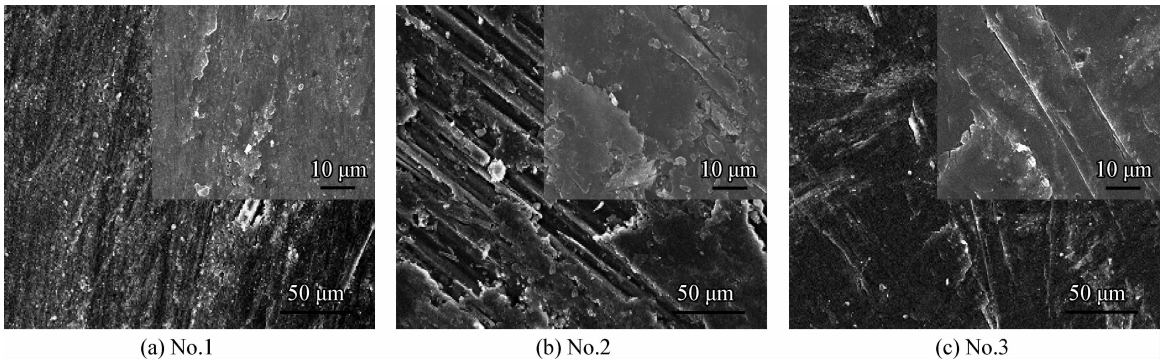


图 4 在高载荷低线速度条件下 3 种试样的摩擦表面形貌

Fig. 4 Wear surface morphologies of the three samples tested under high load but low line speed

出现上述现象主要是因为试样与金属偶件表面有一定的粗糙度,摩擦初始阶段微凸体相互嵌入、啮合,摩擦时断裂产生磨粒。1 号试样热处理温度低,磨粒石墨化程度低,硬度高,摩擦时法向载荷将硬质磨粒压入摩擦面,滑动时摩擦力通过磨粒的犁沟作用使表面犁皱和切削,产生槽状磨痕,呈现磨粒磨损中的微观切削,摩擦因数小磨损量较大。2 号试样热处理温度较高,产生磨粒硬度降低,部分磨粒易于压制成膜;但基体与基体之间,基体与纤维之间结合强度弱化,加之硬质磨粒的存在,摩擦时产生的摩擦膜易于剥落,磨损量大。3 号试样热处理温度高,材质较软且基体与纤维之间结合强度弱,磨屑易于剥落,摩擦时较多的磨屑在摩擦力与载荷共同作用下形成厚而致密的摩擦膜,阻止偶件对试样进一步磨损,磨损量小。

2.2.2 线速度的影响

液体火箭发动机涡轮泵密封材料在高速下工作时要求材料具有良好的抗磨性能,2 500 ℃处理的 3 号试样可较好地满足性能要求。相关研究

表明线速度影响着材料摩擦磨损性能^[17],文中在载荷为 50 N 时,适当增加线速度(1.25,1.50 和 1.88 m/s),研究线速度对 3 号试样摩擦磨损性能的影响,测试结果如图 5 所示。从图 5 中可看出,3 号试样摩擦因数与磨损量均随着线速度的增大逐渐减小。观察该试样测试后摩擦面形貌如图 6 所示。

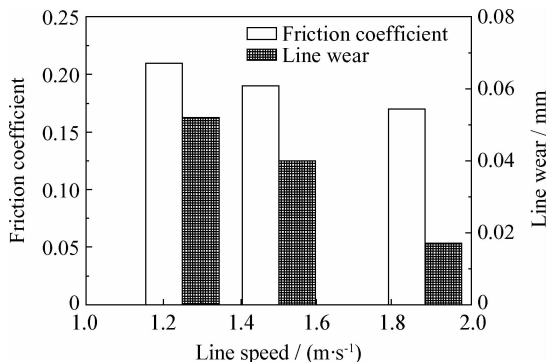


图 5 载荷为 50 N 时,线速度对 3 号试样摩擦因数及线性磨损量的影响

Fig. 5 Effects of the line speed on friction coefficient and line wear of No. 3 sample tested under the load of 50 N

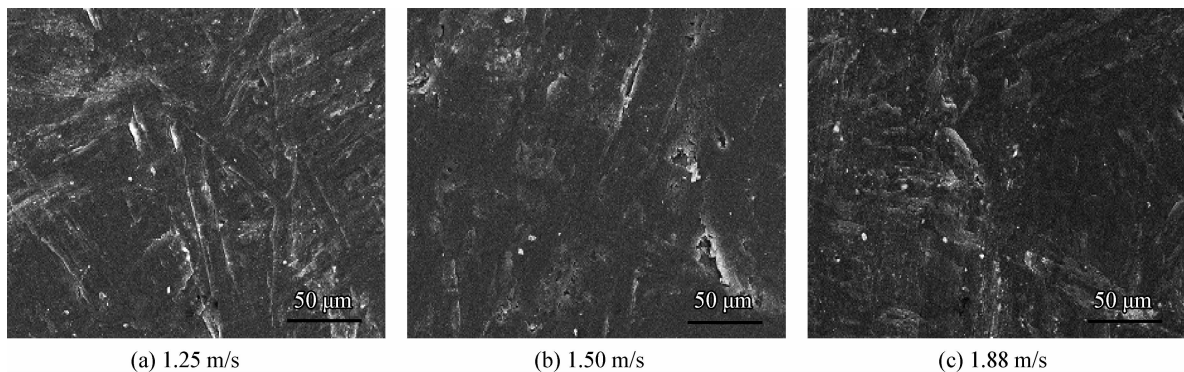


图 6 载荷 50 N 时不同线速度条件下 3 号试样的摩擦表面形貌

Fig. 6 Wear surface morphologies of No. 3 sample at different line speeds tested under the load of 50 N

图 6 中摩擦表面均有明显的磨屑堆积现象,图 6(a)中磨屑填充缝隙,覆盖纤维,但未能充分包裹纤维,纤维形态清晰可见。随着线速度的增加磨屑数量增多,厚度增加,充分覆盖并包裹纤维,表面纤维隐约可辨,磨屑膜厚度增加且更加致密(如图 6(b)(c));这与陈金多、Murdie 等^[17-19]观察到的 C/C 复合材料摩擦磨损形貌类似。出现上述结果是由于线速度提高后,相同时间内滑行距离变大,摩擦面由厚粉末 II 型摩擦面转变为光滑有自润滑性能的 III 型摩擦面,使得摩擦因数及磨损量降低;此外,线速度提高后碳层面的平均

接触时间不及其弹性恢复变形的时间长,层面间的振动将增大,导致摩擦副之间表面上局部不配合趋势增大,真实接触面积减小,摩擦因数降低,磨损量减小^[20]。

3 结 论

(1) 热处理温度影响材料基本性能,材料热处理温度低,石墨化程度低,力学强度高。

(2) 在低载荷高线速度(12 N,2.25 m/s)条件下,热处理温度低试样易发生磨粒磨损,摩擦因数小磨损量大;热处理温度高试样(2 500 ℃)

易形成厚而致密摩擦膜,发生粘着磨损,并擦伤金属偶件或使其发生疲劳断裂,摩擦因数大(0.17)、磨损量小(0.025 mm)。

(3) 在高载荷低线速度(50 N, 1.25 m/s)条件下,低温热处理试样(2 250 ℃)发生磨粒磨损,摩擦因数低(0.14),磨损量大(0.070 mm);高温热处理试样(2 500 ℃),石墨化度高,界面结合弱,磨屑较软且易于剥落成磨屑膜,阻止偶件与试样进一步接触,磨损量小(0.052 mm)。适当增大线速度,可降低试样与偶件接触面积,形成更加均匀致密的摩擦膜,摩擦因数及磨损量均有所降低。

(4) 液体火箭发动机涡轮泵密封材料工作条件苛刻,虽然工作时间短,但工作时需进行重复启停,因而要求抗磨性能良好。采用 2 500 ℃处理的高石墨化度试样虽然摩擦因数大,但磨损量小可较好满足使用要求。

参考文献

- [1] 杜天恩. 高压液体火箭发动机新结构压液密封 [J]. 推进技术, 2000, 21(4): 6-19.
Du T E. New sealing structure of high pressure liquid rocket engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 16-19 (in Chinese).
- [2] 李晓慧, 潘攀. 没有密封的韩国航天梦——从“罗老”号两次推迟发射看火箭/导弹的维护技术 [J]. 兵器知识, 2013(2): 61-65.
Li X H, Pan P. Not sealed the Korea Aerospace dream - from "Lo Lo" launch postponed twice to see the rocket/missile maintenance techniques [J]. Ordnance Knowledge, 2013(2): 61-65 (in Chinese).
- [3] 解惠贞, 崔红, 李瑞珍, 等. 一种 C/C 密封材料的设计与性能表征 [J]. 固体火箭技术, 2006, 29(2): 139-145.
Xie H Z, Cui H, Li R Z, et al. Design and characterization of a kind of C/C sealing material [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(2): 139-145 (in Chinese).
- [4] 黄荔海, 李贺军, 李克智, 等. 复合工艺制备炭/炭密封材料弯曲断裂特征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(2): 245-248.
Huang L H, Li H J, Li K Z, et al. Fracture characteristics of C/C composites prepared by mix technics [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(2): 245-248 (in Chinese).
- [5] 冉丽萍, 易茂中, 王朝胜, 等. 炭/炭复合材料密封性能的研究 [J]. 机械工程材料, 2006, 30(11): 29-32.
Ran L P, Yi M Z, Wang C S, et al. Study on the sealing performances of C/C composites [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(11): 29-32 (in Chinese).
- [6] 黄荔海, 李贺军, 刘皓, 等. 碳/碳复合材料密封性能分析

- [J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(6): 826-829.
Huang L H, Li H J, Liu H, et al. Analysis of sealing characteristics of C/C composites [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(6): 826-829 (in Chinese).
- [7] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究 [J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 1-4.
Hu G Y. Application research of seal technologies for aero engine [J]. Aeroengine, 2012, 38(3): 1-4 (in Chinese).
- [8] 葛毅成, 易茂中. 基体碳结构对轴间密封环用 C/C 复合材料摩擦磨损特性的影响 [J]. 航空学报, 2004, 25(6): 621-624.
Ge Y C, Yi M Z. Influence of carbon matrix on the tribology of C/C composites used as shaft sealing ring [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 621-624 (in Chinese).
- [9] 李新春, 易茂中, 冯一雷, 等. C/C 复合材料特性对其摩擦磨损性能的影响 [J]. 新型炭材料, 2005, 20(2): 151-155.
Li X C, Yi M Z, Feng Y L, et al. The effect of C/C composites characteristic on sliding friction and wear behavior [J]. New Carbon Materials, 2005, 20(2): 151-155 (in Chinese).
- [10] 解惠贞, 崔红, 李瑞珍. 热处理温度对 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响 [C]. 中国电工技术学会炭-石墨材料专业委员会. 第 22 届炭-石墨材料学术会议论文集, 西安: 中国电工技术学会炭-石墨材料专业委员会, 2010: 79-84.
Xie H Z, Cui H, Li R Z, et al. Effect of heat-treatment temperature on Friction and wear behavior of C/C composite [C]. The Specific Committee on Carbon-Graphite Materials of the China Electrotechnical Society. The 22nd carbon-graphite material conference proceedings, Xi'an: The Specific Committee on Carbon-Graphite Materials of the China Electrotechnical Society, 2010: 79-84 (in Chinese).
- [11] 李崇俊, 马伯信, 霍肖旭, 等. 炭/炭复合材料石墨化度的表征 [J]. 新型炭材料, 1999, 14(1): 19-25.
Li C J, Ma B X, Huo X X, et al. Characterization of graphitization degree in C/C composites [J]. New Carbon Materials, 1999, 14(1): 19-25 (in Chinese).
- [12] 邹林华. 航空刹车用 C/C 复合材料结构及性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 1999.
Zou L H. Structure and properties of C/C composites as aviation braking materials [D]. Changsha: Central South University, 1999 (in Chinese).
- [13] 林敦黔. 高速旋转机械产生剧烈振动原因探析 [J]. 福建建材, 2000(01): 64-69.
Lin D Q. An investigation on the causes of extreme vibration in high-speed rotating machinery [J]. Fujian Building Materials, 2000(01): 64-69 (in Chinese).
- [14] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
Wen S Z. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990 (in Chinese).

[15] 克拉盖尔斯基. 摩擦磨损与润滑手册(第二册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
Carat G S. Friction and wear and lubrication manual (The Second) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986 (in Chinese).

[16] 高彩桥, 刘家浚. 材料的粘着磨损与疲劳磨损 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
Gao C Q, Liu J J. Adhesive wear and fatigue wear of the materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989 (in Chinese).

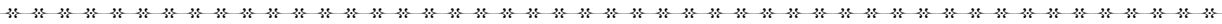
[17] Chen J D, Ju C P. Effect of sliding speed on the tribological behavior of a PAN-pitch carbon-carbon composite [J]. Materials Chemistry and Physics, 1995, 39(3): 174-179.

[18] Chen J D, Lin J H C, Ju C P. Effect of load on tribological behavior of carbon-carbon composites [J]. Journal of Material Science, 1996, 31(3): 1221-9.

[19] Murdie N, Ju CP, Don J, et al. Microstructure of worn pitch/resin/CVI C-C composites [J]. Carbon, 1991, 29(3): 335-342.

[20] Yen B K, Ishihara T. On temperatue depend tribological regimes and oxidation of carbon/carbon composites up to 1800 C [J]. Wear, 1996, 196(2): 254-262.

(责任编辑: 常青)



• 本刊讯 •

2014 年度《中国表面工程》优秀论文评选结果公布

《中国表面工程》2014 年度优秀论文评选活动终于落下帷幕。为使更多优秀论文有展示的机会,编辑部通过网站和微信平台的投票结果,结合文章被引和下载排行情况,综合专家评定意见,最终选出“领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”2 篇,“机械工程学会优秀论文”2 篇,以及“2014 年度《中国表面工程》优秀论文”4 篇,同时随机抽取 10 名微信平台投票参与者。具体如下:

一、领跑者 5000

- 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
- 张伟, 吉小超, 魏敏, 等. 国内外再制造技术体系及竞争力分析 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(3): 1-9.

二、机械工程学会优秀论文

- 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 多尺度强韧化碳基润滑薄膜的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 4-27.
- 蔡振兵, 朱旻昊. 扭动微动磨损的研究进展和现状 [J]. 2014, 27(4): 1-11.

三、2014 年度本刊优秀论文

一等奖:

- 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.

二等奖:

- 张早娣, 李慧, 王泽松, 等. 团簇离子束纳米加工技术研究进展 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(6): 28-43.

三等奖:

- 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂粒子碰撞行为和临界速度预测的数值模拟研究现状 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 1-11.
- 吴楠, 赵红阳, 郭媛媛, 等. AZ31 镁合金沉积类金刚石薄膜的表面形貌和腐蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 81-86.

参与投票奖(微信名):

丁丁、早起的虫儿、婷婷(动动妈)、follow heart、齐鲁弘毅、轱の胤、彩云追月、圆圈、Firefly、杨永琦

(本刊编辑部 供稿)