doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.028

指尖密封用炭-炭复合材料摩擦磨损性能

路 菲1,陈国定1,苏 华1,易茂中2,彭 可2

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要:为确定指尖密封用炭-炭(炭纤维增强炭基体)复合材料的摩擦学性能,针对指尖密封的轻载使用条件,应用 UMT-2 摩擦磨损测试仪进行炭-炭复合材料摩擦磨损性能试验,测量摩擦系数与磨损率,并采用扫描电子显微镜(SEM)分析材料的 摩擦磨损机理.结果表明,无纬布层垂直于摩擦平面时,材料的摩擦系数和磨损率较低.载荷增加,较高密度材料的磨损率增 加缓慢,摩擦系数减小.与载荷相比,材料磨损率受频率的影响较小,且随频率升高摩擦磨损性能越好.磨损表面的 SEM 分析 表明:低频、低载条件下材料发生磨粒磨损;频率的提高加快磨屑膜的成形,自润滑能力增强;载荷的增加虽使磨屑快速被挤 压形成磨屑膜,但磨屑膜被不断挤出剥落,纤维裸露断裂产生严重磨损,这一点在材料密度较低时表现更为显著.选用较高密 度的材料以及布置无纬布层垂直于摩擦平面可以有效缓解密封材料的磨损.

关键词:炭-炭(炭纤维增强炭基体)复合材料;摩擦;磨损;载荷;频率;指尖密封

中图分类号: V25,TB743 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2017)01-0184-05

Friction and wear behaviors of carbon-carbon composites used in finger seal

LU Fei¹, CHEN Guoding¹, SU Hua¹, YI Maozhong², PENG Ke²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The carbon-carbon (carbon fiber reinforced carbon matrix) composites were applied in the finger seal and the tribological behaviors were investigated using UMT-2 tribology tester under the light loads condition. The friction coefficient and the wear rate were measured. Friction and wear mechanisms were analyzed using SEM (scanning electron microscope) method. Results show that the friction coefficient and wear rate are lower when the non-woven cloth is perpendicular to sliding surface. For the higher density material, with increasing load the wear rate increases with small amplitude and the friction coefficient decreases. The frequency has less effect on the wear rate compared to the load on wear rate, and the tribological behaviors are better with increasing frequency. SEM analysis indicates as follows. First, abrasive wear occurs under low frequency and low load. Second, increasing the frequency quickens formation of the wear debris into film, and self-lubricating effect is strengthened. Last, although wear debris are quickly squeezed into film with increasing load, severe wear occurs due to fibers exposure and fracture with the film further squeezed out and peeled off. The effect of load on wear is notable when the material density is lower. Selecting higher density material and the material with non-woven cloth perpendicular to sliding surface can effectively mitigate wear.

Keywords: carbon-carbon (carbon fiber reinforced carbon matrix) composites; friction; wear; load; frequency; finger seal

近年来将炭-炭复合材料用作密封材料得到学术界和工程界的关注^[1-3].相比于篦齿密封和刷式 密封,指尖密封是在密封性能和制造成本两个方面 都具有优良特性的一种先进密封技术,在航空发动

收稿日期: 2015-04-29

- 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51575445);
 陕西省自然科学研究计划项目(2014JM7266)
 作者简介:路 菲(1986—),女,博士研究生;
 陈国定(1956—),男,教授,博士生导师
- 通信作者: 陈国定, gdchen@ nwpu.edu.cn

机轴承腔和二次流动系统等密封部位有潜在的应用 前景^[4-5].将炭-炭复合材料用于指尖密封,正确和 系统认识这种工作场合下炭-炭复合材料的摩擦学 性能十分重要,其中摩擦学试验是最直接和可靠的 方法.国内外已开展大量的炭-炭复合材料摩擦磨 损试验研究工作,其中以应用于刹车盘材料的研究 居多.研究表明,炭-炭复合材料的预制体类型、基 体炭类型、纤维取向以及工作环境条件(湿度、转 速、载荷)对材料的摩擦磨损性能影响很大^[6-12].

由于现有研究多是集中于以刹车盘应用为背景

的重载条件,而对于指尖密封具有的轻载应用条件的相关炭-炭复合材料的摩擦学试验研究较少.此外,由于指尖密封结构在工作过程中通常需要承受一定的轴向气体压力差,对纤维取向的布置也有一定要求.因此,本文针对指尖密封工程应用需要,开展轻载条件下炭-炭复合材料的摩擦磨损试验,分析材料纤维取向、工作载荷和运动频率对炭-炭复合材料摩擦系数和磨损率的影响,采用扫描电子显微镜(SEM)探讨炭-炭复合材料的摩擦磨损机理,为指尖密封用炭-炭复合材料的选择与设计分析提供技术支持.

1 试 验

1.1 材料制备

采用 12 K 的 T700 聚丙烯腈炭纤维,将 0°无纬 布、炭纤维网胎层、90°无纬布依次循环叠加,采用接 力针刺技术在厚度方向上将网胎层纤维垂直刺入无 纬布间,形成三维针刺炭毡预制体.其中,平均每个 炭毡单元(单层无纬炭布+网胎)厚度约 0.5~ 0.8 mm,坯体密度约 0.45 g/cm³,总的纤维体积含 量为(30±3)%.首先对预制体进行 CVD 坯体增密 至1.5~1.6 g/cm³,高温石墨化后采用浸渍、炭化、石 墨化增密至 1.80~1.85 g/cm³.其基体炭为光滑层/ 粗糙层结构的热解炭和树脂炭.将制备好的炭-炭 复合材料切割加工成 30 mm×20 mm×3 mm 的块状 试样,摩擦面为 30 mm×20 mm.对偶件为 45 淬火 钢,尺寸为 Φ2 mm×8 mm,摩擦面为 Φ2 mm.

1.2 试验方法

应用 UMT-2 多功能摩擦磨损测试仪(美国 CE-TR 公司生产,如图 1 所示)开展往复式钢销与炭-炭复合材料盘的摩擦磨损试验研究.试验过程中, 上试样固定,下试样做线性往复运动.试验前,使用 800#水砂纸对炭-炭复合材料盘试样摩擦表面进行 磨光,用 300#水砂纸对钢销进行预磨 5 min,用丙酮 对试样进行去污处理,以标定每组试验试样的初始 状态.然后将炭-炭复合材料盘试样粘贴在下试样 驱动模块的底座上开始试验.基于文献[13]的有限 元方法获得指尖密封的指尖靴与转子之间的最大接 触压力,从而确定销-盘摩擦试验载荷范围为 10~ 70 N.

对于密度分别为1.80 和1.85 g/cm³的试样进行 O₁、O₂和O₃等3个纤维取向(如图2所示)的摩擦磨 损试验,每组试验进行1h,测量炭-炭复合材料的 摩擦系数和磨损率.其中,O₁、O₂和O₃纤维取向的定 义如下:O₁和O₂取向的无纬布层所在平面垂直于滑 动平面,不同的是O₁取向的无纬布叠层方向垂直于 滑动方向,而 O₂取向的无纬布叠层方向平行于滑动 方向;O₃取向的 O°和 90°无纬布层所在平面平行于 滑动平面.对于 O₁取向,由于炭毡单元厚度比销的 直径小很多,宏观上认为两种材料均匀接触.



图 1 炭-炭复合材料摩擦磨损试验测试仪





图 2 纤维取向与滑动方向的关系

Fig.2 Fiber orientation with respect to sliding direction 由于炭-炭复合材料层间连接强度较弱,而指 尖密封结构在工作中通常需承受一定的轴向密封气 体压力差,且指尖靴和转子间相对滑动方向垂直于 密封轴向,因此针对 O₁取向的试样,进一步研究载 荷与频率对炭-炭复合材料摩擦磨损性能的影响是 很有必要的.而炭-炭复合材料摩擦磨损性能的影响是 很有必要的.而炭-炭复合材料在指尖密封上的这 一纤维取向布置特点与文献[1]的描述是相同的. 据此,在 O₁取向、10~70 N(20 N 为一个间隔)和4~ 16 Hz(以 4 Hz 为一个间隔)条件下,分别测量两种 密度的炭-炭复合材料在不同载荷与频率条件下的 摩擦系数和磨损率.

摩擦系数为测试仪上力学传感器测量的摩擦力和法向正压力的比值,由试验稳定阶段摩擦系数的平均值表示.针对指尖密封用炭-炭复合材料,为测量磨损体积,采用轮廓法测量磨痕.磨痕的轮廓尺寸由三维表面轮廓测定仪(型号:Surf Nanofocus AG)在磨痕上3个位置取点测量截面轮廓,并对截面轮廓进行积分求得3点的截面面积平均值,由此获得磨损体积.磨损率用单位滑动距离、单位载荷下的体积磨损量表示,单位为mm³·N⁻¹·m⁻¹.采用扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕,分析摩擦磨损机理.

2 结果与分析

2.1 纤维取向对摩擦磨损性能的影响

如图 3 所示,在 30 N、8 Hz条件下不同纤维取向 材料的摩擦系数和磨损率排序为 0₂≤0₁≤0₃,且 0₁ 和 0,纤维取向的摩擦系数和磨损率差别较小. 在同 一纤维取向条件下,1.85 g/cm3试样的摩擦系数和磨 损率较小. 由于 0,取向材料的无纬布层纤维纵横交 错易形成凹凸不平的粗糙表面和孔隙,摩擦过程中微 凸体互相嵌入,导致摩擦力增大,摩擦系数也较 0,和 O,纤维取向的摩擦系数大. 对于垂直于滑动平面的纤 维层起主要承载作用的情况(01和02取向),纤维的 韧性和纵向强度较高,发生剪切断裂的难度增加,耐 磨性提高. 然而无纬布层纤维垂直于滑动平面时, 0, 比 0,取向的磨损率低,尽管 0,取向的无纬布叠层方 向垂直于滑动方向,理论上具有比 0,取向无纬布叠 层方向平行于滑动方向更有利于增加耐磨性. 试验结 果是由于以下原因造成的. 在本研究工作载荷条件 下,0,取向的材料先发生纤维断裂产生较多磨屑,一 定程度上钝化磨粒,缓解了磨损,这一现象与文献 [14]的研究结果存在一定相似性. 密度较高的炭-炭 复合材料因为致密化程度较高,纤维和基体连接强度 较大,以及材料孔隙数目较小,表面更为平整,更容易 形成完整的磨屑膜,摩擦磨损性能良好.



图 3 纤维取向对摩擦系数与磨损率的影响

Fig.3 Effect of fiber orientation on friction coefficient and wear rate

由于 O₁和 O₂的摩擦学性能相近,且多数情况下 指尖密封用炭-炭复合材料采用 O₁取向布置,下面采 用 SEM 分析比较 O₁和 O₃的材料摩擦磨损性能.在 30 N、8 Hz 条件下,当无纬布层垂直于滑动平面时 (见图 4(a)),垂直于接触面的纤维层起主要承载作 用,在滑动摩擦剪切应力作用下发生剪切断裂的难度 较大,消耗的纤维较少,耐磨性较好.此外,垂直方向 的纤维因具有较强的韧性而难以发生断裂,在摩擦剪 应力作用下纤维与基体间产生裂纹,虽然先期摩擦系 数因为摩擦阻力增加而较高,但随着基体炭碎屑摩擦 膜的形成,大面积包裹纤维端头,一定程度降低了材 料的摩擦系数.而当无纬布层平行于滑动平面时(见图 4(b)),磨屑膜破坏导致大量纤维暴露和消耗,磨损 加剧.由于工作载荷相对较低,大量平行于摩擦面 的纤维在摩擦力剪切作用下被剪断形成粒度较大的 磨屑,在表面平整性较差的表面发生磨粒磨损,出现 较明显的犁沟效应,因而图 4(b)摩擦系数较大.



(a)O₁取向
 (b)O₃取向
 图 4 不同纤维取向的复合材料磨损表面 SEM 形貌
 Fig.4 SEM of wear surface under different fiber orientations

2.2 工作载荷对摩擦磨损性能的影响

在 0, 取向、8 Hz 条件下, 载荷对不同密度试样摩 擦系数的影响趋势不同,表现为低密度试样的摩擦系 数因载荷增加而提高,且出现一定幅度的波动,而高 密度试样的摩擦系数逐步减小,如图5所示.另外,两 种密度试样的磨损率随着载荷增加而增加,并且低密 度试样的这种变化趋势更显著. 由于低密度材料表面 孔隙率较大,平整性较差,随载荷的增大,摩擦表面微 凸体相互嵌入程度较大,实际接触面积增大,摩擦力 也随之增大,摩擦剪切作用增强,因而摩擦系数升高, 材料磨损越严重. 然而,高密度材料摩擦表面相对平 整、致密,微凸体嵌入程度与密度较低的材料相比较 小. 此外,在10N载荷下高密度试样摩擦系数高于低 密度试样摩擦系数,是由于两种材料都未发生大面积 磨损破坏,其中低密度试样摩擦表面因为少量微凸体 较易剥离被压实形成摩擦膜,起到自润滑作用而使得 摩擦系数较高密度试样的摩擦系数小. 虽然随载荷增 加.微凸体嵌入程度增加,并逐渐发生剪切断裂,摩擦 力增大,但剪切断裂的微凸体更易在摩擦表面快速挤 压成膜,起到自润滑和减小摩擦力的作用.因此,对高 密度材料而言,随着载荷增加,与微凸体的变形和断 裂影响相比,粘着作用对材料的摩擦性能影响更大, 因此磨损率增加较为缓慢.



图 5 载荷对摩擦系数与磨损率的影响

Fig.5 Effect of load on friction coefficient and wear rate 针对两种密度材料的摩擦学性能随载荷表现出 的不同变化规律和趋势,更直观地从磨损表面 SEM 进行分析解释. 对于 1.80 g/cm3密度的试样,载荷较 低时,因基体炭的强度韧性较低而首先发生脆性破 坏,形成细小颗粒状磨屑,压实形成磨屑膜,随后磨 屑膜开始出现裂纹(见图 6(a)). 而载荷较高时(见 图 6(b)),摩擦表面微凸体相互嵌入程度增加,在剪 应力与压应力作用下,微凸体断裂剥落并在主摩擦 表面快速形成磨屑挤压膜 A. 在材料连接薄弱或存 在缺陷的部位产生裂纹,随着裂纹进一步扩展大片 磨屑膜被挤出摩擦表面发生剥落. 裸露的纤维在往 复摩擦作用下出现剪切断裂,随之产生的端头应力 集中使纤维与基体出现脱粘,出现明显翘曲,断裂的 纤维磨屑进入摩擦表面,使得摩擦阻力升高,摩擦系 数增大.纤维磨屑逐渐被挤压碾碎,再次压实涂覆 于露出的破坏表面,形成亚摩擦层 B,这种材料的自 修复功能在一定程度上起到润滑作用,降低摩擦系 数. 在这种综合作用下,对于低密度试样,随着载荷 增加,摩擦系数总体上呈现增大趋势,而磨损率急剧 升高. 对于 1.85 g/cm³密度的试样(见图 6(c)~ (d)),因磨损表面相对平整,材料内部纤维-基体连 接强度较大,摩擦系数和磨损率较低.随着载荷增 加,粗糙微凸体接触面积增加,犁沟作用减弱,光亮 划痕的颜色变浅显示划痕变浅,犁削作用产生的磨 屑形成磨屑膜在摩擦剪切应力作用下以层状或鳞片 状磨屑再次被挤出摩擦表面,磨损程度变化不大.







(c) 1.85 g/cm³,30 N,8 Hz
 (d) 1.85 g/cm³,50 N,8 Hz
 图 6 不同载荷下的复合材料磨损表面 SEM 形貌
 Fig.6 SEM of composite wear surface under different loads
 2 版变式 麻痹 麻 出 性 給 的 影响

2.3 频率对摩擦磨损性能的影响

图 7 为 O₁取向试样在载荷为 30 N 条件下的摩 擦系数和磨损率.频率增加,材料摩擦系数减小,低 密度试样的磨损率大幅度减小,而高密度试样磨损 率先减小后增加,总体上变化不大.与载荷对磨损 率的影响比较,频率对磨损率的影响小的多.



Fig.7 Effect of frequency on friction coefficient and wear rate 随着往复滑动频率的升高,单位时间内摩擦表 面更易形成完整连续的磨屑膜,起到自润滑作用,从 而降低摩擦系数.由于低密度材料存在较大孔隙, 材料组织硬度较低,随着频率升高,材料磨损产生的 磨屑更易形成转移膜涂覆于销的表面,缓解磨损,使 得频率继续增加而磨损程度大幅度降低.然而,对

于高密度材料,由于孔隙较小,材料因为多次增密而 使得组织硬度较高. 在整个频率范围内,材料磨损 率变化不大,呈现小幅度的波动. 在频率从 12 Hz 至 16 Hz,磨损率出现小幅攀升是因为之前产生的磨屑 不断在材料表面发生粘着,形成的润滑膜在剪切作 用下发生断裂剥离所导致.

在 30 N、4 Hz 条件下,两种密度的材料磨损表 面 SEM 形貌如图 8 所示.对比图 8(a)与图 6(a)可 以看出,1.80 g/cm³材料在 4 Hz 条件下,形成磨屑膜 较慢,较薄的磨屑膜覆盖包裹纤维,在磨屑粒子的犁 削作用下出现细小的裂纹(图 8(a)椭圆区域),表 面犁沟较多,不完整和不连续的磨屑膜使得摩擦系 数较大,磨损程度严重.而 1.85 g/cm³材料在 4 Hz 条件下(见图 8(b)),形成的磨屑膜较薄和易于剥 落,摩擦系数和磨损率较 8 Hz 条件下(见图 6(c)) 大.由于高密度材料(见图 8(b))磨损表面裸露的 纤维排列较图 8(a)更为紧密,周围磨屑膜较为平 整,因此磨损率变化幅度较小.



(a) 1.80 g/cm³, 30 N, 4 Hz
 (b) 1.85 g/cm³, 30 N, 4 Hz
 图 8 低频条件下的复合材料磨损表面 SEM 形貌
 Fig.8 SEM of composite wear surface under light frequencies

3 结 论

1)与 O₃取向(无纬布纤维层平行于滑动平面)
 相比,O₁和 O₂取向(无纬布纤维层垂直于滑动平面)
 的试样摩擦系数较小,磨损率较低,耐磨性较好.

2) O₁取向条件下,试样密度较低时,随着载荷 的增加,炭-炭复合材料的摩擦系数和磨损率大幅 度增加;而密度较高时,试样的摩擦系数随着载荷增 加而减小,磨损率增大的幅度较小.

3) 0₁ 取向条件下,随着频率增加,试样的摩擦 系数逐渐减小,低密度试样的磨损率减小,而高密度 试样的磨损率变化不大.此外,与载荷的影响相比, 频率对材料磨损性能的影响较小.

4)低频和低载条件下,材料主要产生磨粒磨 损,犁沟效应显著;频率的提高使磨屑膜形成更快、 更完整,摩擦磨损性能更好;载荷的增加虽然使成膜 快,但随着磨屑膜被不断挤出剥落,纤维裸露及断裂 产生严重磨损,这一影响在材料密度较低表现更为 显著. 而密度较高的材料在载荷和频率较高条件 下,摩擦磨损性能受粘着作用的影响比磨粒磨损作 用的影响更大,表现出较好的摩擦磨损性能.

参考文献

 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. DOI: 10.14136/j. cnki.issn1673-2812.2006.06.007.
 HUANG Lihai, LI Hejun, LIU Hao, et al. Analysis of sealing characteristics of carboncarbon composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(6): 826-829. DOI: 10.14136/j. cnki.issn1673-2812.2006.06.007.
 [2] 黄荔海,李贺军,李克智,等.碳密封材料的研究进展及其在航空 航天领域的应用[J].字航材料工艺,2006(4):12-17. DOI: 10. 3969/j.issn.1007-2330.2006.04.003.

HUANG Lihai, LI Hejun, LI Kezhi, et al. Research development and application of carbon sealing material onavigation and spaceflight field [J]. Aerospace materials & Technology, 2006 (4):12-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2006.04.003.

[3] 张路生.动密封用 C/C 复合材料性能的研究[D].长沙:中南大学,2005.
 ZHANG Lusheng. Study on the performance of C/C composites used

as rolling seal[D]. Changsha: Central South University, 2005.

- [4] JOHNSON M C, PHOENIX, MEDLIN E G, et al. Laminated finger seal with logarithmic curvature: 5108116[P]. 1992.
- [5] ARORA G K, PROCTOR M P, STEINETZ B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results: NASA/TM – 1999 – 209191[R]. LOS ANGELES: Glenn Research Center, 1999.
- [6] CHEN J D, LIN J H C, JU C P. Effect of load on tribological behaviour of carbon-carbon composites [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(5): 1221-1229.
- [7] ABDO J, SHAMSELDIN E A. Comparative study of friction and wear of two generation of CVI C-C composite[J]. Emirates Journal for Engineering Research, 2007, 12(3): 57-67.
- [8] OZCAN S, FILIP P. Microstructure and wear mechanisms in C/C composites[J]. Wear, 2005, 259(1): 642-650.
- [9] HUTTON T J, JOHNSON D, MCENANEY B. Effects of fibre orientation on the tribology of a model carbon-carbon composite [J]. Wear, 2001, 249(8): 647-655.
- [10] KASEM H, BONNAMY S, BERTHIER Y, et al. Fiber-matrix unbonding and plastic deformation in C/C composites under tribological loading[J]. Wear, 2010, 269(1/2): 104-111.
- [11]XIONG Xiang, HUANG Baiyun, LI Jianghong, et al. Friction behaviors of carbon/carbon composites with different pyrolytic carbon textures[J]. Carbon, 2006, 44(3): 463-467.
- [12] DHIEB H, BUIJNSTERS J G, EDDOUMY F, et al. Surface and sub-surface degradation of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy composites under dry and wet reciprocating sliding[J].Composite: Part A, 2013, 55:53-62.
- [13] LU Fei, CHEN Guoding, LIU Jian. Dynamic analysis of 2.5D C/C composites finger seal [C]//Applied Mechanics, Materials and Manufacturing. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2013: 159-164.
- [14] BIJWE J, AWTADE S, GHOSH A. Influence of orientation and volume fraction of Aramid fabric on abrasive wear performance of polyethersulfone composites [J]. Wear, 2006, 260 (4/5): 401-411. (编辑 王小唯 苗秀芝)