

表面摩擦磨损与润滑

纤维种类对 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响

吴世国, 罗瑞盈

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 目的 为了降低 C/C 复合材料制造成本, 扩展 C/C 复合材料应用领域, 选用低成本预氧丝纤维取代碳纤维, 制备出 C/C 复合材料, 并研究纤维种类对 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响。方法 以两种纤维为原材料, 采用 CVI 工艺制备出 C/C 复合材料, 用 MM-2000 摩擦试验机进行摩擦磨损试验, 采用扫描电镜对摩擦面进行形貌分析。结果 随着载荷的增大, 预氧丝基 C/C 复合材料在与金属摩擦时摩擦因数保持在 0.22 左右, 平均磨损量为 0.82 mg/min, 而碳纤维基 C/C 复合材料与金属配副相对摩擦因数较小 (0.15 ~ 0.20), 平均磨损量为 1.17 mg/min。三种碳与碳配副中, 预氧丝基 C/C 复合材料同预氧丝基 C/C 复合材料配副之间的摩擦因数随载荷波动的范围为 0.28 ~ 0.33, 较稳定, 平均磨损量为 1.76 mg/min。碳纤维基复合材料与碳纤维复合材料配副时, 随着载荷的增大, 摩擦因数变化范围较大 (0.15 ~ 0.33), 平均磨损量为 2.35 mg/min。预氧丝基复合材料与碳纤维基复合材料之间相互配副, 其磨损最大, 平均磨损量为 2.95 mg/min。结论 C/C 复合材料的摩擦磨损性能与纤维种类有很大关系, 采用预氧丝纤维制备出的 C/C 复合材料, 无论与金属相互摩擦, 还是与自身材料摩擦, 均易形成较为稳定的润滑膜。随着载荷的增加, 摩擦因数变化较小, 磨损量和摩擦功也最低, 表现出比碳纤维基 C/C 复合材料更优异的摩擦性能。

关键词: C/C 复合材料; 预氧丝纤维; 化学气相沉积; 粗糙体热解碳; 载荷; 摩擦磨损

中图分类号: TG115.5; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0084-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.013

Effect of Fiber Type on the Friction and Wear Properties of C/C Composites

WU Shi-guo, LUO Rui-ying

(Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Objective In order to reduce the manufacturing cost of C/C composite materials, and expand the application field of

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2015-12-27

Received: 2015-11-20; Revised: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(21071011)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21071011)

作者简介: 吴世国(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进复合材料制备与性能。

Biography: WU Shi-guo (1990—), Male, Master graduate student, Research focus: preparation and properties of advanced composite materials.

通讯作者: 罗瑞盈(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进复合材料和高温陶瓷材料研究。

Corresponding author: LUO Rui-ying (1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: advanced composite materials & high temperature ceramic materials.

C/C composite materials, two kinds of C/C composite materials were prepared, and the effect of fiber type on the friction and wear properties of C/C composites was studied. **Methods** Two kinds of C/C composite materials with two different kinds of fiber materials were prepared by CVI process. The friction and wear behaviors of the two materials in different friction pairs were studied using the MM-2000 friction test machine, and the morphology analysis of the friction surface was conducted using SEM. **Results** The results showed that: with the increase of load, the friction coefficient between pre oxygen basal C/C composites and metal remained at about 0.22, with an average wear loss of 0.82 mg/min; The carbon fiber basal C/C composites and metal had a relatively low coefficient of friction (0.15 ~ 0.20), and the friction coefficient changed with the load fluctuation because of the occurrence of abrasive wear behavior in the process. The average wear amount was 1.17 mg/min. For a pair of C/C composites, the friction coefficient between pre oxygen basal C/C and pre oxygen basal C/C composites ranged 0.28 ~ 0.33, which was relatively stable, with an average wear of 1.76 mg/min; With the increase of load, the friction coefficient of carbon fiber basal composite and carbon fiber composite varied in a relatively large range (0.15 ~ 0.33), besides the average amount of wear was 2.35 mg/min; The wear between pre oxygen basal composite and carbon fiber basal composite was the biggest, with an average wear amount of 2.95 mg/min.

Conclusion The friction and wear properties of C/C composites were greatly related to the fiber type, and the C/C composites prepared by the pre oxygen fiber were easy to form a stable lubricating film. With the increase of load, the fluctuation range of the friction coefficient was relatively small, and the wear and friction work was also the lowest. The friction properties of carbon fiber based C/C composites were more excellent. The friction properties of pre oxygen basal C/C composites were superior to those of the carbon fiber based C/C composites.

KEY WORDS: C/C composites; pre oxygen fiber; chemical vapor deposition; rough pyrolysis carbon; load; friction and wear

C/C 复合材料具有高比强度、低热膨胀系数和优异的抗热震性能,可以在 1600 °C 以上高温下稳定工作,作为结构材料广泛地应用于航空航天等领域。此外,C/C 复合材料具有优异的摩擦磨损性能,作为刹车材料,其广泛应用于飞机、赛车、高速列车等领域^[1-2]。随着 C/C 复合材料的应用延伸到汽车制动、轴承、活塞等领域,对其摩擦行为进行更深入的研究具有重要意义^[3]。

C/C 复合材料的摩擦磨损行为比较复杂,与很多因素有关,如纤维种类、编织方式、沉积工艺、热解碳类型与结构、摩擦条件等^[4]。预制体材料的改变,会对复合材料各种性能都会产生重要影响^[5],目前研究与应用最多的是以碳纤维为原材料制备的 C/C 复合材料,对于预氧丝研究较少。碳纤维成本较高,获得难度较大,并且国产碳纤维稳定性相对较长,难以获得可靠的制备工艺^[6]。而预氧丝成本远远低于同类型的碳纤维,并且有研究证明,采用预氧丝纤维为预制体材料,更容易获得粗糙体碳,工艺可控性更高^[7]。

当前,对于 C/C 复合材料的研究主要集中在碳纤维制备的粗糙体结构 C/C 复合材料与光滑体结构 C/C 复合材料上,并且已经证明粗糙体结构 C/C 复合材料的摩擦行为优于光滑体结构 C/C 复合材料^[8-15]。但其主要集中于低载荷下摩擦磨损研究,对于载荷对 C/C 复合材料摩擦磨损影响研究不足^[16],这些因素大大限制了 C/C 复合材料的应用潜力。因此探究纤维种类对 C/C 复合材料摩擦磨损机理的影

响,对于优化其在摩擦方面的应用具有很强的现实意义。

本文主要选用不同纤维预制体,采用特定工艺参数的 CVI 工艺,制备出两种均具有优异摩擦行为的粗糙体结构的 C/C 复合材料。研究不同载荷下, C/C 复合材料摩擦磨损性能。

1 实验

采用吉林石化生产的 12K T300 碳纤维(聚丙烯腈基碳纤维,密度 1.76 g/cm³)和 12K 预氧丝纤维(密度 1.38 g/cm³)为原材料,通过无纺布网胎叠层针刺制成预制体。

采用等温等压化学气相沉积法(CVI)制备 C/C 复合材料,制备工艺:采用甲烷、丙烷混合碳源,氮气为载气,控制碳源与载气质量比为 3 : 1,沉积温度 1000 ~ 1100 °C,控制压力 10 kPa,经过 350 h 致密化过程,密度达到 1.72 mg/cm³。对制备的 C/C 复合材料进行高温石墨化处理,石墨化处理温度为 2300 °C,Ar 为保护气体,保温时间 2 h,获得实验所用的 C/C 复合材料。

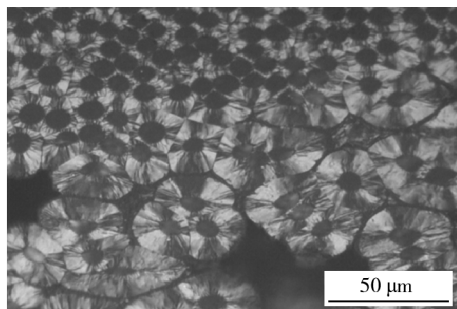
制备 3 种不同的摩擦试样环(预氧丝基 C/C 复合材料、碳纤维基 C/C 复合材料、金属环 GCr15),加工尺寸为外径 $\phi 35$ mm、内径 $\phi 16$ mm、厚度 10 mm。将 CVI 工艺获得的两种 C/C 复合材料加工成尺寸为 10 mm×10 mm×19 mm 的块状试样,将环与块进行配

副,在 MM-2000 型环-块试样摩擦磨损试验机上进行实验。试验机转速为 220 r/min,室温条件、干态,载荷分别为 2,3,4,5,6,7,8 MPa。用精度为 0.1 mg 的分析天平测量试环摩擦前后的质量损失,得到磨损质量损失。用 Hitachi S-4800 型扫描电镜观察材料表面摩擦磨损形貌。

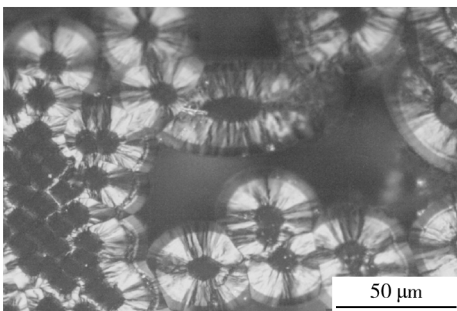
2 C/C 复合材料的结构

热解碳有三种结构,即粗糙体热解碳、光滑体热解碳和各向同性热解碳^[17]。可以用偏光显微镜观察制备的两种 C/C 复合材料的结构。

如图 1 所示,两种不同纤维预制体制备的 C/C 复合材料在正交偏振光下的偏光图(200 倍)。实验过程中,采用 CVI 工艺制备的碳纤维基复合材料与预氧丝基复合材料,其共同特点是具有大量的十字消光,但却不规则,表面显现出明显的层次感,有褶皱,均为粗糙体热解碳。



a 碳纤维



b 预氧丝纤维

图 1 C/C 复合材料的偏光图

Fig.1 Polarization diagram of C/C Composites

3 纤维种类对不同摩擦副摩擦磨损性能影响

本实验共采用 5 组对比试验,研究纤维种类对摩擦磨损性能的影响,摩擦副配副情况见表 1。图 2 是 5 种配副摩擦时摩擦因数随着载荷变化的曲线。

表 1 摩擦配副材料

Tab.1 Materials of the pair in friction

Friction pair	Friction ring	Friction block
a	Metal(GCr15)	Pre oxygen basal C/C composite
b	Metal(GCr15)	Fiber basal C/C composites
c	Pre oxygen basal C/C composite	Pre oxygen basal C/C composite
d	Fiber basal C/C composites	Pre oxygen basal C/C composite
e	Fiber basal C/C composites	Fiber basal C/C composites

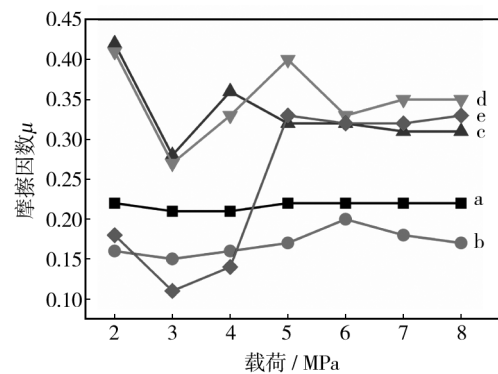


图 2 不同配副状态下摩擦因数随载荷变化曲线

Fig.2 Curve of friction coefficient changing with load in different friction pairs

3.1 纤维种类对异质配副摩擦影响

如图 2 所示,其中 a 曲线是预氧丝基 C/C 复合材料与金属(配副 a)之间的摩擦因数随载荷变化的曲线,b 曲线是碳纤维基 C/C 复合材料与金属(配副 b)之间的摩擦因数随载荷变化的曲线。配副 a 的摩擦因数随载荷变化不大,摩擦因数稳定在 0.22 左右,配副 b 摩擦因数相对较小(0.15~0.20)。即在相同条件下,当预氧丝基复合材料与金属摩擦时,其摩擦因数大于碳纤维基复合材料与金属摩擦时的摩擦因数,且更稳定。由表 2 可知,碳纤维和预氧丝的硬度分别为 1.033 和 0.493 GPa,两种基体的硬度分别为 0.426

表 2 两种材料纳米硬度结果^[18]

Tab.2 Nano-hardness results of the two materials

	Pre oxygen basal C/C composites	Carbon fiber basal C/C composites
Fiber	1.033±0.186	0.493±0.088
Matrix	0.426±0.075	0.422±0.073

和 0.422 GPa。碳纤维的硬度比预氧丝和基体的硬度大两倍多,纤维硬度的差别是影响摩擦磨损行为的重要因素^[6]。

预氧丝基 C/C 复合材料与金属在 5 MPa 载荷下相互摩擦 20 min(图 3a),预氧丝基 C/C 复合材料的摩擦面没有形成润滑膜,许多碳化预氧丝纤维暴露出来,纤维末端出现大量磨损,犁沟、磨屑较少。原因在于碳化预氧丝纤维与基体碳硬度相似,在摩擦力的作用下,纤维与基体碳共同磨损,摩擦面相对较为平整。宏观上表现在摩擦过程中,摩擦因数稳定。

当碳纤维基 C/C 复合材料与金属摩擦时,摩擦表面出现大量的断裂纤维、磨屑、犁沟(图 3b)。由于碳纤维在硬度上远远大于基体碳,当碳纤维基复合材料与金属摩擦时,基体碳首先发生大量磨损,而碳纤维磨损较慢,随着时间的延长,在切向力的作用下,裸露出的碳纤维发生折断,以磨屑的形式存在于摩擦过程中。在摩擦力的作用下,折断的碳纤维会往复破坏基体碳,摩擦面出现大量很深的犁沟,此时磨粒磨损成为主要摩擦方式。随着载荷的增大,摩擦因数逐渐变大,并在 6 MPa 时出现峰值。继续增大载荷,摩擦因数变小,这是由于较大载荷会将部分磨屑压平,磨粒磨损行为减弱,宏观上表现为摩擦因数的降低。

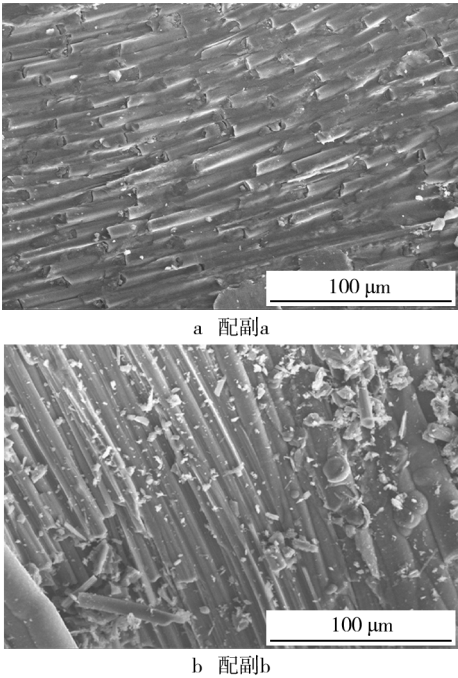


图 3 5 MPa 载荷下摩擦面形貌图

Fig.3 Friction surface morphology under the load of 5 MPa

3.2 纤维种类对同质配副摩擦影响

如图 2 中的 c,d,e 三条曲线,曲线 c 是预氧丝基

C/C 复合材料间(配副 c)的摩擦因数随载荷变化的曲线,曲线 d 是碳纤维基复合材料与预氧丝基复合材料(配副 d)之间的摩擦因数随载荷变化的曲线,曲线 e 是碳纤维基 C/C 复合材料间的(配副 e)摩擦因数随载荷变化的曲线。当载荷较低时,三种配副之间的摩擦因数相差较大,当载荷大于 5 MPa 时,摩擦因数均趋向于 0.32。

对于曲线 c,随着载荷的增加,摩擦因数有下降趋势,在 5MPa 时,C/C 复合材料的摩擦面形成润滑膜,而且几乎没有犁沟(图 4a)。这是因为摩擦过程中,纤维与基体硬度较低,形成的磨削容易挤压成膜。继续加大压力,摩擦因数稳定于 0.33 左右,波动很小。

对于曲线 d,较低载荷下,摩擦因数随着载荷的增大,波动很大(0.27~0.4),摩擦因数于 5 MPa 载荷时出现峰值。在该载荷下,摩擦面呈现高低层次,次表层的磨屑显示出堆叠、挤压成膜的迹象,裂纹数量明显多于表面较完整的润滑膜的数量(图 4b)。由于预氧丝纤维基复合材料相对较软,在与碳纤维基复合

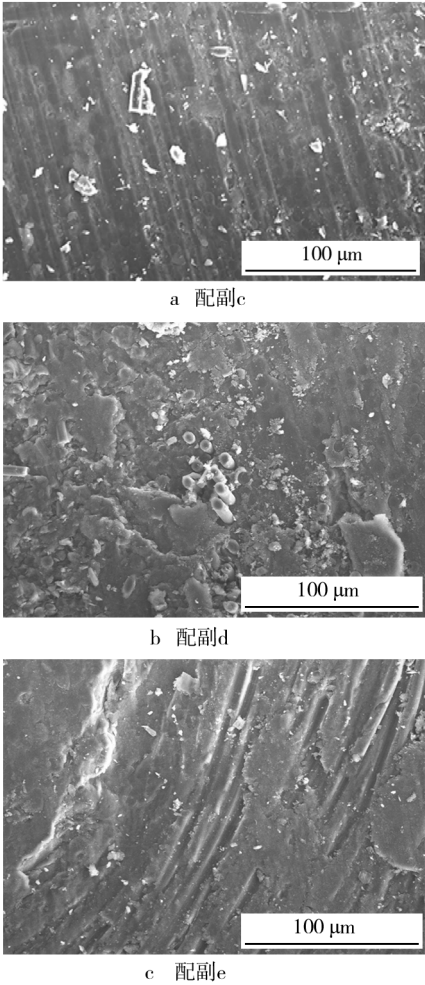


图 4 5 MPa 载荷擦表面形貌

Fig.4 Friction surface morphology under the load of 5 MPa

材料摩擦时,优先发生明显的材料剥落。较低载荷下,摩擦产物会在摩擦表面形成一层润滑膜,但由于润滑膜较薄,在凸出的碳纤维作用下,膜发生破碎,造成材料迁移、堆积现象。润滑膜破碎重组、材料迁移的行为会导致摩擦因数上升,因此摩擦因数会在 5 MPa 时出现一个峰值,在微观上显示为摩擦面上磨屑、裂纹较多(图 4b)。当继续增加载荷时,摩擦面出现的堆积磨屑会被压实,成为稳定的润滑膜。高载荷状态下,摩擦因数稳定于 0.33(曲线 d),证明了稳定润滑膜的形成。

当碳纤维基复合材料与碳纤维基复合材料摩擦时(曲线 e),当载荷较低时,摩擦因数很小,表现出碳与金属摩擦时相似的摩擦行为。碳纤维硬度大,在摩擦过程中,摩擦面出现一道道较浅的犁沟(图 4c)。在 5 MPa 时,摩擦面上出现膜堆叠与犁沟并存的现象,润滑膜逐步生成;当载荷大于 5 MPa 时,完整的润滑膜形成,宏观表现为摩擦因数维持在 0.33。

3.3 纤维种类对不同配副磨损影响

图 5 表示不同配副在不同载荷下对磨 2 min 的摩擦功统计。随着载荷的增加,摩擦功会不断增加,说明反抗摩擦力做功增加。对比发现,几种配副的摩擦功在低载荷下很接近,但在高载荷下相差较大。高载荷下,预氧丝基 C/C 复合材料与金属之间的摩擦功最小(图 5 中的 a 曲线),而碳纤维基复合材料与金属之间的摩擦功相对较大(图 5 中的 b 曲线),这两种纤维制备的复合材料与金属之间的摩擦功在高载荷下远远低于同条件下 C/C 复合材料配副之间的摩擦功。

当预氧丝基 C/C 复合材料与碳纤维基复合材料摩擦时,每个载荷下,其对应的摩擦功均最大(图 5 中的 d 曲线)。碳纤维基 C/C 复合材料与碳纤维基复

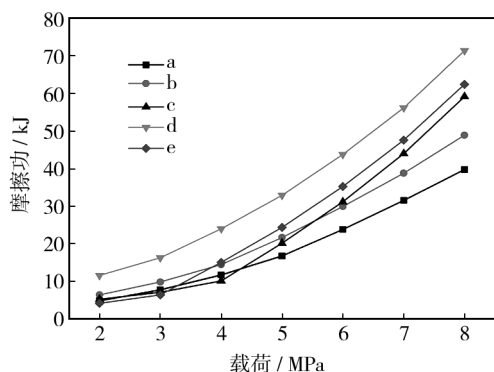


图 5 不同配副的摩擦功随载荷变化曲线

Fig. 5 Curve of friction work changing with load in different friction pairs

合材料的摩擦功略小(图 5 中 c 曲线),而预氧丝基复合材料与预氧丝基复合材料的摩擦功最小(图 5 中的 e 曲线)。

如图 6 所示,5 种配副在 5 MPa 载荷下的每分钟平均磨损量,其中复合材料与金属之间的磨损量(配副 a, b)远小于复合材料之间的磨损量。在复合材料与复合材料的摩擦过程中,预氧丝基 C/C 复合材料与碳纤维基 C/C 复合材料的平均磨损量最大(2.94 mg/min),而预氧丝基复合材料与预氧丝基复合材料的磨损量最低为 1.76 mg/min。对比图 5、图 6,发现高载条件下,摩擦功的大小顺序与对应的磨损率大小顺序一致。即相同载荷下,碳材料与金属摩擦时的磨损量小于碳材料与碳材料摩擦时的磨损量,其中在三种碳材料摩擦副中,配副双方均为预氧丝基 C/C 复合材料的磨损量最小。

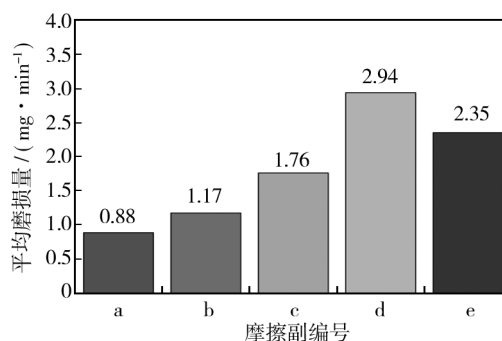


图 6 5 MPa 载荷下不同配副块状试样每分钟平均磨损率

Fig. 6 Average wear rate per minute in different friction pairs under the load of 5 MPa

4 结论

1) 纤维种类的不同会对 C/C 复合材料的摩擦磨损性能产生很大影响。在相同实验条件下,随着载荷的增加,摩擦配副之间的摩擦功会增加,磨损量增大。

2) 当 C/C 复合材料与金属摩擦时,摩擦因数较低,磨损量较小。其中随着压力的改变,预氧丝制备的 C/C 复合材料与金属之间的摩擦因数更稳定,磨损率最低。

3) 在 3 种 C/C 复合材料配副中,当配副相互摩擦时,摩擦因数随载荷的增加,先增加,然后保持不变,但磨损率一直增大。其中预氧丝基 C/C 复合材料与预氧丝基 C/C 复合材料的摩擦因数相对稳定,摩擦过程中形成润滑膜,磨损量较小(1.75 mg/min);碳纤维基复合材料与碳纤维基复合材料配副时,摩擦因数随载荷变化大,平均磨损量大;预氧丝基复合材

料与碳纤维基复合材料相互配副,摩擦行为较差,磨损量最大(2.94 mg/min)。

4) 采用预氧丝制备C/C复合材料,与金属或自摩擦都表现出优异的摩擦磨损行为,可以在较大载荷区间内工作,是一种新型的摩擦材料。

参考文献

- [1] FITZER E. The Future of Carbon-carbon Composites[J]. Carbon, 1987, 25(2): 163—190.
- [2] SAVAGE G. Carbon-carbon Composites[M]. Cambridge: Chapman & Hall, 1993.
- [3] 葛毅成, 易茂中, 彭可. 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): 619—624.
GE Yi-cheng, YI Mao-zhong, PENG Ke. Influence of Carbon Matrix on the Tribology of C/C Composites Used as Shaft Sealing Ring[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 619—624.
- [4] 葛毅成, 易茂中, 彭可. PAN 碳纤维预制体对C/C复合材料滑动摩擦磨损行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 19—25.
GE Yi-cheng, YI Mao-zhong, PENG Ke. Influence of PAN-fiber Flat Weaved Form on the Sliding Tribological Behavior of C/C Composites[J]. Tribology, 2010, 30(1): 19—25.
- [5] 罗瑞盈, 杨峥. 纤维取向对碳/碳复合材料摩擦磨损性能影响[J]. 复合材料学报, 1997, 14(4): 57—61.
LUO Rui-ying, YANG Zheng. Effect of Fiber Orientation on the Friction and Wear Properties of Carbon / Carbon Composites[J]. Journal of Composite Materials, 1997, 14(4): 57—61.
- [6] RAHAMAN M SA, ISMAIL A F, MUSTAFA A. A Review of Heat Treatment on Polyacrylonitrile Fiber[J]. Polymer Degradation and Stabability, 2007, 92(8): 1421—1432.
- [7] 李江鸿, 熊翔, 巩前明, 等. 不同基体炭C/C复合材料的摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 446—451.
LI Jiang-hong, XIONG Xiang, GONG Qian-ming, et al. Friction and Wear Properties of Carbon/Carbon Composites with Different Martix Carbon[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 446—451.
- [8] 李江鸿, 熊翔, 张红波, 等. 不同刹车压力下C/C复合材料的摩擦性能与摩擦面研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 9—13.
LI Jiang-hong, XIONG Xiang, ZHANG Hong-bo, et al. Study of Friction Properties and Friction Surfaces of Carbon/Carbon Composites at Different Braking Pressure[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(4): 9—13.
- [9] 胡志彪, 李贺军, 陈强, 等. 碳/碳复合材料摩擦学性能及摩擦机制研究进展[J]. 材料工程, 2004, 12(61): 59—62.
HU Zhi-biao, LI He-jun, CHEN Qiang, et al. Advance in Research on Tribological Behavior and Mechanism of Carbon/Carbon Composites[J]. Material engineering, 2004, 12(61): 59—62.
- [10] 黄荔海, 李贺军, 李克智, 等. 不同转速及载荷下碳/碳复合材料的摩擦磨损性能[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(6): 330—333.
HUANG Li-hai, LI He-jun, LI Ke-zhi, et al. Influences of Velocity and Pressure on the Tribological Properties of Carbon Composites in Low Energy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(6): 330—333.
- [11] 陈青华, 邓红兵, 肖志超, 等. 炭/炭复合材料摩擦性能与摩擦表面状态的关系[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(3): 430—434.
CHEN Qing-hua, DENG Hong-bing, XIAO Zhi-chao, et al. Relationship between Friction Properties and Friction Surface Status of C/C Composites[J]. Journal of Materials Science&Engineering, 2008, 26(3): 430—434.
- [12] WU X W, LUO R Y, ZHANG J C. Deposition Mechanism and Microstructure of Pyrocarbon Prepared by Chemical Vapor Infiltration with Kerosene as Precursor[J]. Carbon, 2009, 47(6): 1429—1435.
- [13] YEN B K. On Temperature-dependent Tribological Regimes and Oxidation of Carbon-carbon Compositions up to 1800 °C[J]. Wear, 1996, 196(1/2): 254—262.
- [14] YEN B K. An Investigation of Friction and Wear Mechanisms of Carbon-carbon Composites in Nitrogen and Air at Elevated Temperatures[J]. Carbon, 1996, 34(4): 489—498.
- [15] 罗瑞盈, 李贺军, 杨峥, 等. 碳/碳复合材料的摩擦磨损行为[J]. 宇航学报, 1996, 17(1): 57—61.
LUO Rui-ying, LI He-jun, YANG Zheng, et al. Friction and Wear Behavior of Carbon/Carbon Composites[J]. Journal of Astronautics, 1996, 34(4): 489—498.
- [16] 耿黎明, 李红, 任慕苏, 等. 低能载条件下C/C复合材料滑动摩擦磨损性能[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(5): 726—730.
GENG Li-ming, LI Hong, REN Mu-su, et al. Sliding Friction and Wear Behavior of C/C Composite under Low-energy Loads[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28(5): 726—730.
- [17] PIERSON H O, LIEBERMAN M L. The Chemical Vapor Deposition of Carbon on Carbon Fibers[J]. Carbon, 1975, 13(5): 159—166.
- [18] HAO Ming-yang, LUO Rui-ying, HOU Zhen-hua, et al. Effect of Fiber-types on the Braking Performances of Carbon/Carbon Composites[J]. Wear, 2014, 319: 145—149.