

文章编号: 1004 - 0609(2004)08 - 1405 - 05

润滑状态对 C/C 复合材料摩擦磨损特性的影响^①

葛毅成, 易茂中, 黄伯云, 李丽娅
(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 在 M-2000 型摩擦磨损实验机上, 对 3 种 C/C 复合材料与 40Cr 钢配副分别在干态、水润滑、油润滑 3 种条件下的摩擦磨损行为进行了研究。结果表明: 在 3 种润滑条件下, 干态摩擦试样的摩擦系数最大, 体积磨损最小; 基体炭为树脂浸渍炭的试样在 3 种试样摩擦系数最高, 约为 0.141~0.205; 水润滑时试样的摩擦系数最小, 为 0.05~0.10, 但体积磨损最大, 最高可达 7.75 mm³; 油润滑时试样的摩擦系数和体积磨损均介于干态和水润滑之间; 干摩擦时, 试样的摩擦系数随着载荷增加而缓慢降低, 水润滑和油润滑的摩擦系数则随着载荷的增加而先增加后减少; 干态摩擦时材料表面形成了完整的摩擦膜, 水润滑和油润滑条件下摩擦膜很薄且不完整; 所有润滑条件下试样均以磨粒磨损或犁削磨损为主。

关键词: C/C 复合材料; 润滑; 摩擦磨损

中图分类号: TB 332

文献标识码: A

Influence of lubrication on tribology properties of C/C composites

GE Yi-cheng, YI Mao-zhong, HUANG Bai-yun, LI Li-ya
(State Key Laboratory of Powder Metallurgy,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Using M-2000 tribology machine, under non-lubrication, water-lubrication and oil-lubrication test situation, the tribology properties of three kinds of C/C composites were studied with the 40Cr steel as couple part. The results show that among the three kinds of test situation, the samples tested under non-lubrication situation own the highest friction coefficient and the least bulk worn loss under the same loading, and among the three kinds of composites tested under the non-lubrication test situation, the resin carbon matrix sample exhibits the highest friction coefficient that is between 0.141 and 0.205. The samples' friction coefficient under water-lubrication test situation is the least that is between 0.05 and 0.10, but their bulk worn loss is the highest that can be 7.75 mm³ under 150 N loading. Both friction coefficient and bulk worn loss of the samples under oil-lubrication test situation are the midst. The samples' friction coefficient under non-lubrication test situation decreases slowly with increasing load, while those of the samples' under water-lubrication or oil-lubrication test situation increase at first but decrease at last. SEM shows that the integrity friction film is only formed on the non-lubrication tested sample. The wear mechanism under all test situations is abrasion wear and plough wear.

Key words: C/C composites; lubrication; tribology

C/C 复合材料因具有质量轻、比强度、比模量高, 热导率高, 热容大, 热膨胀系数低, 摩擦磨损

性能优异等特性, 已获得广泛的应用, 是一种具有广阔前景的材料^[1~9]。目前对其摩擦磨损性能的研

① 基金项目: 高校骨干教师基金(教技司[2000]143号)

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-04-20

作者简介: 葛毅成(1973-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 葛毅成, 博士研究生; 电话: 0731-8836065; E-mail: csgyc@163.com.

究主要是制动摩擦磨损,对长时间工作条件下材料的摩擦磨损性能的报道较少。在实际应用中,C/C 复合材料处于不同的环境介质中,目前对环境介质的影响研究集中在水分、氧气等方面^[10~13]。对于应用在航空飞机轴间密封环上的 C/C 复合材料而言,有可能受到泄露的润滑油以及高湿度的气氛影响,导致材料的摩擦磨损行为发生改变,影响其正常应用。因此,研究在不同润滑状态下,C/C 复合材料摩擦性能的变化具有现实意义。本文作者对 C/C 复合材料在干态、水润滑、油润滑 3 种条件下的摩擦磨损特性进行了研究。

1 实验

以炭布叠层针刺毡为坯体,分别经过 CVI、浸渍增密和 CVI+ 浸渍混合增密的 C/C 复合材料为摩擦试样,其编号分别为 A、B、C,性能列于表 1。摩擦试样尺寸为 20 mm × 12 mm × 6 mm,摩擦面为 20 mm × 12 mm。对偶件为 40Cr 钢环,试样与对偶的表面粗糙度均为 0.8 μm。在 M-2000 型摩擦磨损实验机上进行环—块滑动摩擦实验,线速度为 0.42 m/s。在对偶件下放置一容器,分别加入水和润滑油来改变摩擦副的润滑条件,所加载荷分别为 60、80、100、120、150 N,实验时间为 5 h。试样的磨痕宽度用光学读数显微镜测量,换算成单位时间体积磨损率,摩擦磨损形貌用 SEM 观察。

2 结果与讨论

2.1 不同润滑状态下的摩擦磨损特性

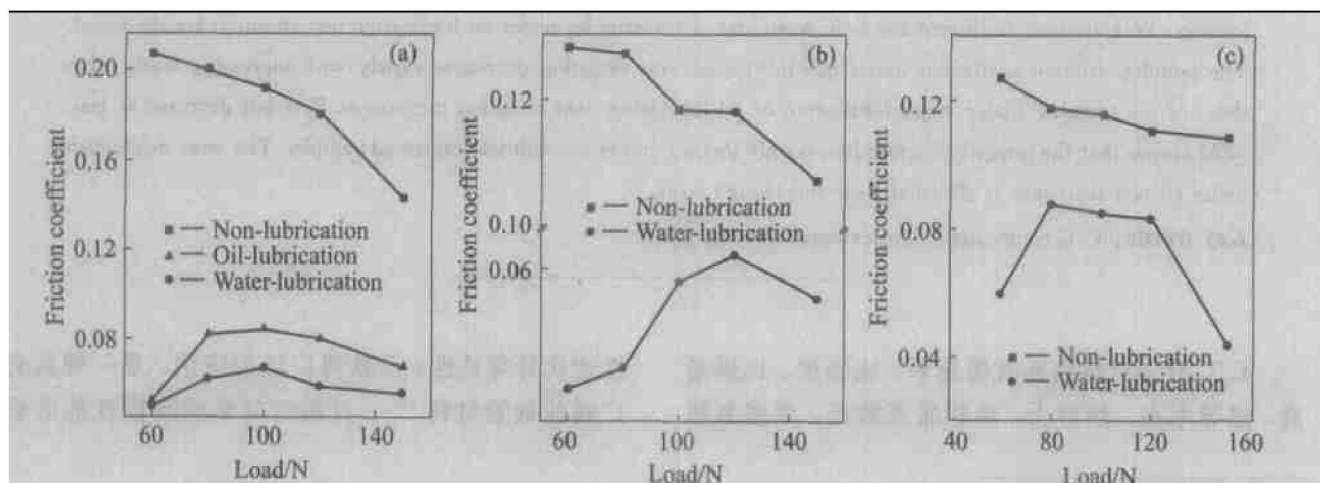


图 1 不同润滑条件下试样的摩擦系数

Fig. 1 Friction coefficients vs test load under different lubrication conditions

(a) —Sample A; (b) —Sample B; (c) —Sample C

图 1(a) 所示为试样 A 在不同润滑条件下摩擦系数随载荷的变化曲线。由图可见,干摩擦状态下,试样的摩擦系数随着载荷的增加而降低。在水润滑及油润滑时,摩擦系数比干态时的低,均随着载荷的增加而先增加后降低,在载荷分别为 100 N 和 80 N 时达到最大。图 1(b) 所示为试样 B 的摩擦系数变化曲线。可以看出,干态摩擦时,试样的摩擦系数随着载荷增加而降低;水润滑时,摩擦系数随着载荷的增加而先增加后降低,在 120 N 时达最大值。图 1(c) 是试样 C 摩擦系数变化曲线。由图可见,试样 C 的摩擦系数变化趋势与试样 A、B 相似。

表 1 3 种试样的基本性能

Table 1 Basic properties of three specimens

Sample No.	Density/ (g·cm ⁻³)	Densify way	Graphitization/ %	Carbon matrix structure	Surface hardness HRF
A	1.79	Impregnation	45	Resin carbon	36
B	1.81	CVI+ impregnation	42	SL+ Resin carbon	49
C	1.76	CVI	29	SL	53

The resin carbon was mixed with graphitization catalyzer.

表 2 所列为试样在不同条件下的体积磨损量。可以看出,在 3 种摩擦状态下,体积磨损量均随着压力增加而增加,并且干态摩擦时的体积磨损量在任何压力下都最小,油润滑时的体积磨损次之,而水润滑时的体积磨损量最大。

2.2 不同润滑状态下的摩擦磨损机理

图 2 所示为试样 A 在干摩擦时的表面形貌。由图可见,载荷为 60 N 时,摩擦表面覆盖一层由片状磨屑形成的摩擦膜,但局部有剥落的磨屑在摩擦

表 2 试样在不同条件下的体积磨损量

Table 2 Bulk wear loss of samples under different test conditions ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3$)

Load/ N	A			B		C	
	Non	Water	Oil	Non	Water	Non	Water
60	7. 22	179. 4	16. 6	16. 1	237. 8	22. 8	130. 6
80	19. 4	346. 7	25. 6	21. 7	288. 9	30. 6	112. 8
100	27. 2	347. 2	29. 4	30. 6	361. 7	31. 7	182. 2
120	39. 4	378. 9	54. 4	59. 4	378. 9	40. 6	200. 0
150	40	436. 1	83. 2	68. 3	433. 3	54. 4	293. 3

Non—Non-lubrication; Water—Water-lubrication; Oil—Oil-lubrication

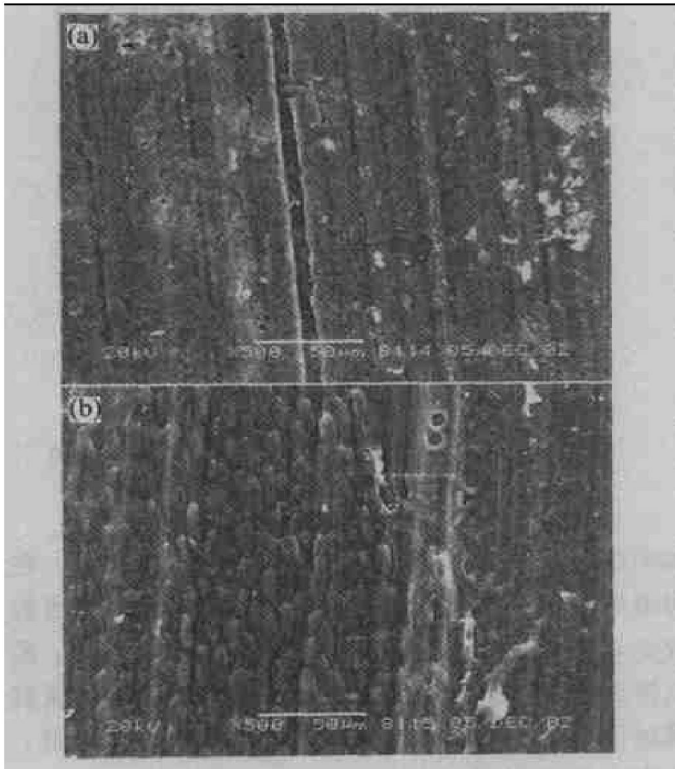


图 2 A 试样在干态条件下的摩擦表面形貌

Fig. 2 Wear surface images of sample A under non-lubrication condition
(a) —60 N; (b) —150 N

表面堆积, 摩擦表面的沟痕是磨粒磨损引起的。载荷为 150 N 时, 摩擦表面也未形成十分平整的摩擦膜, 但纤维端头与摩擦膜的结合十分紧密, 未发现明显裂纹存在; 而无纤维端头的摩擦膜表面形貌与载荷为 60 N 时的类似。

由于干态摩擦时配副是直接接触, 因此, 样品的摩擦性能取决于自身性质。C/C 复合材料含大量有序度不一的石墨微晶, 具有自润滑能力。但不同的增密工艺可得到不同的基体炭结构, 影响其摩擦磨损性能。试样 A 为添加石墨化催化剂的树脂炭结构, 石墨化度高, 石墨微晶晶粒大, 在摩擦过程中, 易形成具有良好润滑能力的摩擦膜。但因硬度低,

与对偶的真实接触面积大, 其摩擦系数在干摩擦时最大。试样 B 和 C 中 SL 炭硬度高, 抗变形能力强, 与对偶的真实接触面积小, 故摩擦系数低^[13]。但摩擦过程中配副之间粗糙峰的嵌入产生的犁削磨损, 以及磨粒磨损和碳纤维等硬炭的影响, 使 C/C 复合材料在干摩擦时摩擦系数高^[14]。但在干摩擦过程中, 磨屑损失少, 能形成较厚的摩擦膜, 隔离配副的直接接触, 降低对偶对试样的犁削磨损, 故其体积磨损量均最低^[15]。

图 3 所示为试样 A 在水润滑时的摩擦表面形貌。由图可见, 载荷为 60 N 时, 摩擦表面有纤维断裂现象, 这是因为包覆纤维的基体炭被损耗, 导致纤维失去支撑, 更容易发生磨损。而部分碳纤维也因基体炭损耗严重, 有脱离的迹象。而与摩擦方向平行、基体炭损耗程度低的纤维表面显得比较平整光滑。另外, 摩擦表面有磨粒磨损痕迹, 出现大小仅为几微米的片状磨屑, 但没有磨屑堆积现象。载荷为 100 N 时, 摩擦表面出现纤维拔出现象, 有几微米大小的片状磨屑分布在摩擦表面, 但碳纤维与基体炭结合良好, 未发现纤维脱粘。在载荷为 150 N 时, 未发现纤维拔除及基体炭剥离等现象, 但有磨粒磨损痕迹, 在与摩擦方向垂直的碳纤维处有明显的磨屑堆积现象。在水润滑时, 配副之间形成楔形夹角, 产生类似挤压膜润滑, 降低对偶之间的摩擦系数。但因水的相对分子质量低, 在试样表面形成的边界膜太薄, 不能隔绝配副的直接接触, 而且摩擦过程中试样摩擦表面的磨屑被水带走, 不能在表面堆积形成摩擦膜, 无法隔离配副接触。所以, 试样表面一直处于被冲击状态, 摩擦表面受到对偶的磨粒磨损高, 故其体积磨损最大^[15]。

图 4 所示为试样 A 在油润滑时的摩擦表面形貌。由图可见, 在 60 N 和 150 N 时, 试样自身摩擦表面未形成摩擦膜, 但都存在表面被磨损或材料剥落的痕迹。一方面因为配副之间的表面粗糙峰相互

接触产生磨损;另一方面因为润滑油与试样的润湿性好,油易向试样内部渗透,在摩擦表面形成尖劈效应,加剧了试样表面的基体炭和碳纤维内部的裂纹扩展,产生磨屑,并且因油粘度高,易将磨屑带走,加大了试样体积磨损。但由于油分子量大,粘度高,能形成完整的边界膜,减少试样与对偶的直接接触面积,故而降低了对试样的犁削磨损,所以其体积磨损量低于水润滑^[15]。

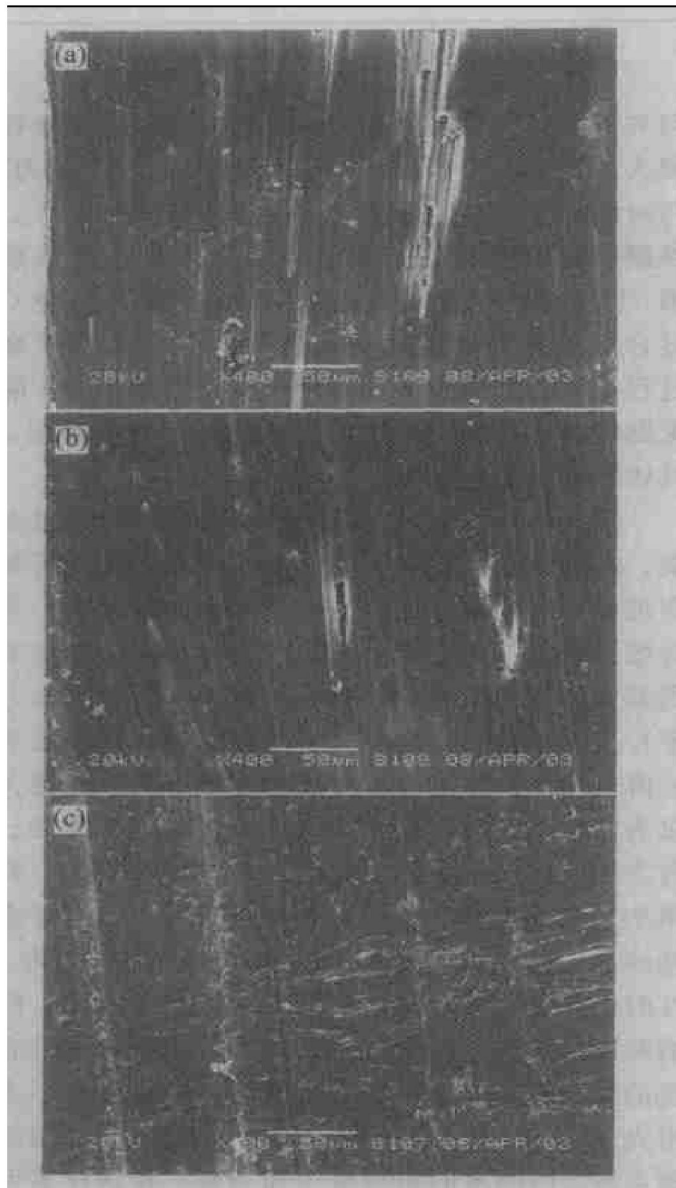


图 3 A 试样在水润滑时摩擦表面形貌

Fig. 3 Wear surface images of sample A under water-lubrication condition
(a) —60 N; (b) —100 N; (c) —150 N

随着载荷增加,试样摩擦系数变化也与润滑条件有关。干摩擦时,载荷越高,试样表面的磨屑更易被碾压成膜,摩擦膜趋向完整,并且对偶表面也因材料转移粘结了一层石墨微晶,形成了炭材料之间的摩擦磨损,使摩擦系数逐步下降。在水润滑或

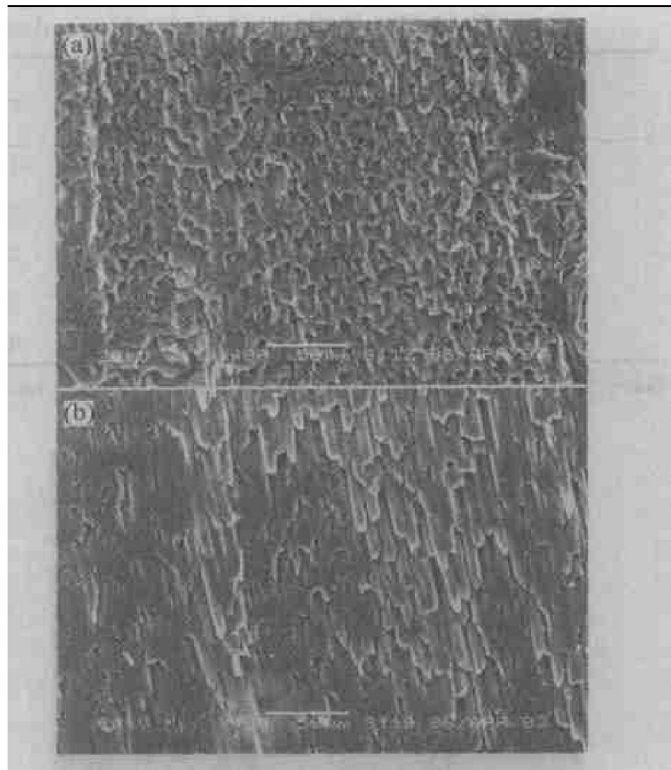


图 4 A 试样在油润滑下的摩擦表面形貌

Fig. 4 Wear surface images of sample A under oil-lubrication condition
(a) —60 N; (b) —150 N

油润滑时,摩擦系数为先增加后降低的趋势。在水润滑时,由于水的作用,使得试样表面的磨屑被水带走,难以对摩擦系数产生影响。低载荷时,虽然试样摩擦表面不完整,但试样摩擦表面与对偶真实接触面积也低,故而对试样的犁削磨损程度低,虽然存在明显的纤维拔出、基体炭剥落等现象,都能被水带走,降低对摩擦表面的影响,所以其摩擦系数低,体积磨损也低。而增加载荷,试样与对偶的接触面积相应增加,增加了犁削磨损和磨粒磨损。因此,试样的摩擦系数也有所上升。但随着载荷进一步增加,磨屑中软的基体炭被水带走前在摩擦表面被碾压成膜的越来越多,减少试样与对偶的直接接触面积,因此,摩擦系数逐渐降低。但也因载荷高,摩擦表面所受磨粒磨损、犁削磨损等加重,试样体积磨损量增加。由于油粘度高,摩擦过程中形成了边界膜,摩擦系数最低。而随着载荷增加,配副表面部分微凸体会突破油膜与对偶接触,导致摩擦系数也随之增加。而高载荷下,与对偶接触的试样表面微凸体所受的正压力和剪切力也增加,从而使其形成磨屑等被润滑油带走,降低其对试样摩擦性能的影响,所以其摩擦系数逐步下降,而体积磨损量增加。

3 结论

1) 在 3 种润滑条件下, 干摩擦时试样的摩擦系数最大, 体积磨损最低。水润滑时的摩擦系数最小但体积磨损最大, 油润滑时的摩擦系数和体积磨损量介于二者之间。

2) 干摩擦时试样的摩擦系数随着载荷的增加而下降, 而油润滑和水润滑的摩擦系数均先增加后下降。

3) 干摩擦时, C/C 复合材料磨屑膜最完整。而在油润滑和水润滑时, 样品摩擦表面均未形成完整摩擦膜。

4) 所有润滑条件下试样磨损机制均以磨粒磨损或犁削磨损为主。

REFERENCES

- [1] Savage G. Carbon-Carbon Composites [M]. London: Chapman & Hall Press, 1992. 323 - 361.
- [2] Mohamed S, Aly-Hassan H H. Comparison of 2D and 3D carbon/carbon composites with respect to damage and fracture resistance[J]. Carbon, 2003, 41(5): 1069 - 1078.
- [3] Yen B K, Tadashi I. The surface and morphology and structure of carbon-carbon composites in high-energy sliding contact[J]. Wear, 1994, 174: 111 - 117.
- [4] Ozturk A. The influence of cyclic fatigue damage on the fracture toughness of carbon-carbon composites[J]. Composites Part A, 1996, 27A: 641 - 646.
- [5] 熊 翔, 黄伯云, 徐惠娟, 等. 不同制动速度条件下炭布叠层炭/炭复合材料的摩擦磨损行为及机理[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 255 - 259.
XIONG Xiang, HUANG Baiyun, XU Huijuan, et al. Friction and wear behaviors of C/C composites from carbon fiber cloth at different braking speeds[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 255 - 259.
- [6] HOU Xiang-hai, LI He-jun, SHEN Jian, et al. Effect of microstructure on the internal friction of carbon-carbon composites[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A286(2): 250 - 256.
- [7] Hyun-kyu S, Hong-Bum L, Kwang-Soo K. Tribological properties of pitch-based 2-D carbon-carbon composites[J]. Carbon, 2001, 39(4): 959 - 970.
- [8] Yen B K, Ishihara T, Yamamoto I. Influence of environment and temperature on dusting wear transitions of carbon-carbon composites[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(4): 681 - 686.
- [9] Zhang W G, Huttinger K J. Densification of a 2D carbon fiber preform by isothermal, isobaric CVI: kinetics and carbon microstructure[J]. Carbon, 2003, 41(13): 2325 - 2337.
- [10] Chen J D, Chen J H, Ju C P. Effect of humidity on the tribological behavior of carbon-carbon composites[J]. Wear, 1996, 193: 38 - 47.
- [11] Yen B K. Influence of water vapor and oxygen on the tribology of carbon materials with sp^2 valence configuration[J]. Wear, 1996, 192: 208 - 215.
- [12] Yen B K, Ishihara T. An investigation of friction and wear mechanisms of carbon-carbon composites in nitrogen and air at elevated temperature[J]. Carbon, 1996, 34(3): 489 - 498.
- [13] 于 澍, 李溪滨, 刘根山, 等. 热解炭结构对炭/炭复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(6): 613 - 616.
YU Shu, LI Xinbin, LIU Gengshan, et al. Influence of microstructure of pyrolytic carbon on friction and wear properties of carbon/carbon composites[J]. Journal of Central South University of Technology, 2002, 33(6): 613 - 616.
- [14] 徐惠娟, 熊 翔, 张红波, 等. 不同热处理温度下炭/炭复合材料制动摩擦性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 991 - 995.
XU Huijuan, XIONG Xiang, ZHANG Hongbo, et al. Braking friction properties of C/C composites at different heat treat temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 991 - 995.
- [15] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 335 - 475.
WEN Shizhu. Theory of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990. 335 - 475.

(编辑 李向群)