

短碳纤维增强 C/C-SiC 制动材料的摩擦磨损性能

杨 阳, 熊 翔, 肖 鹏, 旷文敏, 姜四洲

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 采用温压-原位反应法制备 C/C-SiC 复合材料, 利用 QDM150 型摩擦试验机研究短碳纤维(SCF)长度和纤维体积分数对 C/C-SiC 制动材料摩擦磨损性能的影响。结果表明: C/C-SiC 制动材料能够保持较高且稳定的摩擦因数; SCF 的体积分数将影响 C/C-SiC 制动材料的摩擦磨损性能, 纤维体积分数为 10% 时, 材料具有适中的摩擦因数和较低的磨损率; SCF 长度对 C/C-SiC 制动材料的摩擦磨损性能有显著影响, 碳纤维长度为 12 mm 时, 材料具有最佳的摩擦磨损性能。

关键词: 短碳纤维; C/C-SiC 复合材料; 摩擦磨损

中图分类号: TP 332

文献标识码: A

Friction and wear properties of short carbon fiber reinforced C/C-SiC braking materials

YANG Yang, XIONG Xiang, XIAO Peng, KUANG Wen-min, JANG Si-zhou

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

Abstract: C/C-SiC composites were manufactured by warm compacted-in suit reacted process. The influence of short carbon fiber length and content on the friction and wear behaviors of C/C-SiC composites was investigated using QDM-150 wear tester. The results show that C/C-SiC composites can keep high and stable friction coefficient. The friction and wear behaviors of C/C-SiC composites are affected by carbon fiber content. When the volume fraction of fiber is 10%, the material has moderate friction coefficient and lower wear rate. The length of carbon fibers significantly influences the friction and wear behaviors of C/C-SiC composites. When the length of carbon fiber is 12 mm, the material has the best friction and wear properties.

Key words: short carbon fiber; C/C-SiC composite; friction and wear

C/C-SiC 复合材料具有密度低(约 $2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、耐磨性好、制动平稳、抗腐蚀、耐高温、环境适应性强和寿命长的优点^[1-3], 是一种有着广阔应用前景的制动材料, 可应用于航空航天、车辆工程、机械工程等领域^[4-5]。

目前, 国内外研究工作者对连续纤维增强 C/C-SiC 复合材料进行了深入的研究, 而对短碳纤维增强 C/C-SiC 复合材料的报道则相对较少^[6-8]。与连续纤维复合材料相比, 短纤维增强 C/C-SiC 复合材料具

有制备周期短, 节约能源, 易于实现近净成形等优点; 而且以短碳纤维代替连续纤维编制体可大大降低原料成本, 是目前最具成本优势的制备方法, 在汽车等民用领域有着广阔的应用前景^[9-10]。影响 C/C-SiC 制动材料摩擦磨损性能的因素很多, 不仅与制动条件有关, 而且与材料各组元含量及组元本身特性密切相关^[11-13]。而复合材料中纤维长度及纤维体积分数直接影响材料的摩擦磨损性能, 本文作者以短碳纤维、硅粉、炭粉和粘结剂为原料, 通过温压-原位反应法制

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA03Z560); 湖南省杰出青年科学基金资助项目(06JJ1007)

收稿日期: 2006-12-28; 修订日期: 2007-05-25

通讯作者: 肖 鹏, 教授, 博导; 电话: 0731-8830131; E-mail: xiaopeng@mail.csu.edu.cn

备 C/C-SiC 复合材料, 研究短碳纤维长度、纤维体积分数对 C/C-SiC 制动材料摩擦磨损性能的影响, 以期优化复合材料的成分配方, 从而更加有效地控制材料的性能, 为高性能 C/C-SiC 制动材料的工程化打下一定的技术基础。

1 实验

1.1 试样的制备

短纤维为东丽 T700 碳纤维, 长度 2~12 mm; 硅粉纯度 99.3%, 粒度约 50 μm; 炭粉粒度 75 μm; 采用树脂作为粘结剂。

将硅粉、炭粉、短碳纤维和粘结剂按一定比例均匀混合, 约 180 ℃温压成形后, 在 1 450 ℃通过原位反应在坯体中生成 SiC 最终制得 C/C-SiC 复合材料, 工艺流程如图 1 所示。

为了研究纤维长度和纤维体积含量对 C/C-SiC 制动材料摩擦磨损性能的影响, 制备了 7 组试样。其中 1~3 号试样均采用长 8 mm 的碳纤维, 体积分数分别为 5%、10% 和 15%; 而 4~7 号试样具有相同的纤维体积分数(15%), 长度分别为 2、5、8 和 12 mm。

1.2 性能测试

根据汽车用制动器衬片国家标准 GB5763—86,

摩擦磨损测试在 QDM150 型定速摩擦试验机上进行, 采用盘-块接触形式, 偶件为 d 300 mm 的圆盘, 材质为灰铸铁, 试样尺寸为: 25 mm×25 mm×10 mm, 以 25 mm×25 mm 面作为摩擦面。实验条件: 圆盘转速 500 r/min; 压紧力 0.98 MPa; 总转数 5 000 r; 测试温度 100 ℃恒温。

试样冲击强度测试采用摆锤式冲击试验机, 试样尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm, 其计算公式如下:

$$\alpha_k = \frac{A}{bh}$$

(1)

式中 α_k 为冲击韧性, kJ/m²; A 为击断试样所消耗的冲击功, kJ; b 为试样的宽度, m; h 为试样的厚度, m。

采用金相显微镜对材料摩擦表面进行微观分析, 用 D/MAX-2550BV+18kW 型 X 射线衍射分析仪检测磨屑物相, 并利用 JSM-6360LV 型扫描电镜对磨屑形貌进行观察分析。

2 结果与分析

2.1 碳纤维含量的影响

随碳纤维含量的增加, 材料摩擦磨损性能的变化如表 1 所示。

从表 1 可以看出: 纤维体积分数对材料的摩擦因

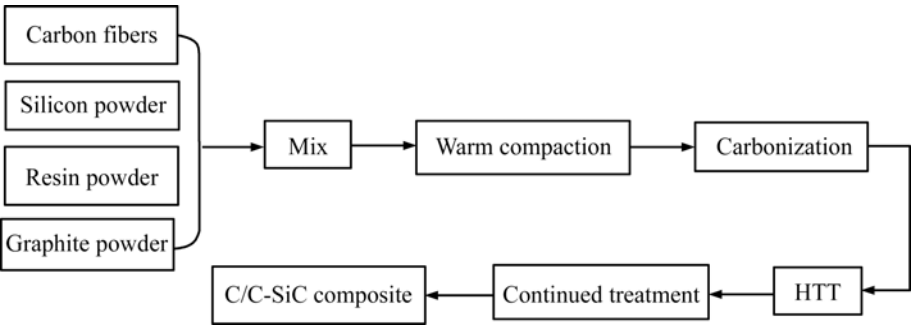


图 1 C/C-SiC 复合材料制备工艺流程图
Fig.1 Preparation process of C/C-SiC composite

表 1 不同碳纤维含量材料的摩擦磨损性能

Table 1 Tribological properties of C/C-SiC composite with different contents of carbon fiber

Sample No.	Volume fraction of C fiber/%	Temperature/℃	μ	ω /g	δ /mm	$w/(10^{-7}\text{cm}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$\alpha_k/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$
1	5	100	0.585	0.35	0.154	0.599	2.38
2	10	100	0.591	0.28	0.091	0.349	2.85
3	15	100	0.570	0.32	0.116	0.442	2.63

μ —Average friction coefficient; ω —Average mass loss of wear; δ —Average dimension of wear; w —Wear ratio; α_k —Impact toughness

数影响相对较小, 而对材料磨损率的影响较大。随着碳纤维体积分数的增加, 材料冲击强度和摩擦因数先增后减, 而磨损率先减后增, 体积分数为 10% 的 2 号试样具有最佳的摩擦性能, 摩擦因数为 0.591, 磨损率最低, 为 $0.349 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

各试样的摩擦表面形貌如图 2 所示, 可以看出, 3 种试样摩擦表面区别不大, 试样表面均形成了一定的摩擦膜, 在摩擦表面弥散分布, 但形成的摩擦膜不连续。

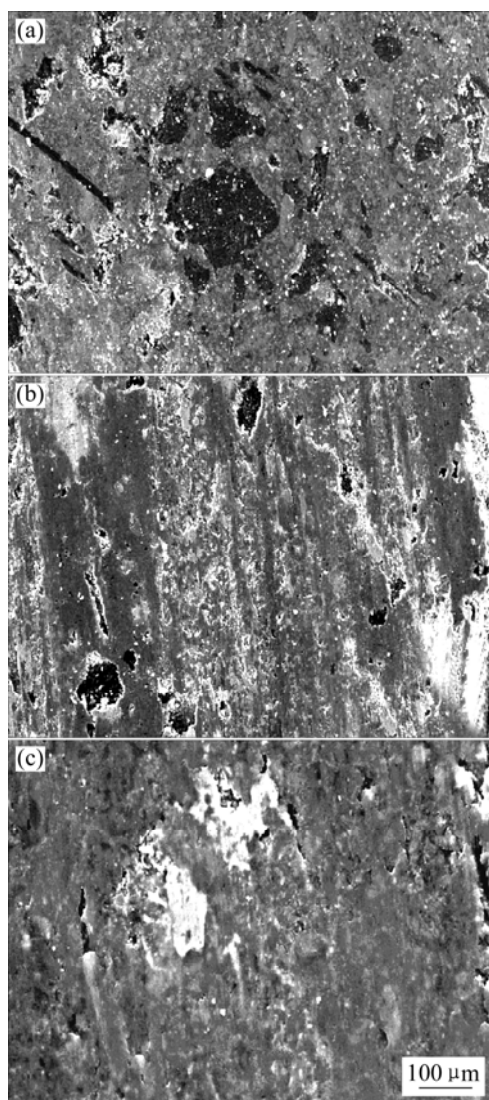


图 2 摩擦表面的 SEM 形貌

Fig.2 SEM photographs of friction surface: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

不同试样磨屑的 SEM 形貌如图 3 所示, 可以看出, 试样的磨屑粒径大小不一, 主要为颗粒状与片状。3 号试样的磨屑中有少量剪断的纤维存在, 说明试样在摩擦过程中, 随着纤维体积分数的增加, 有少量的

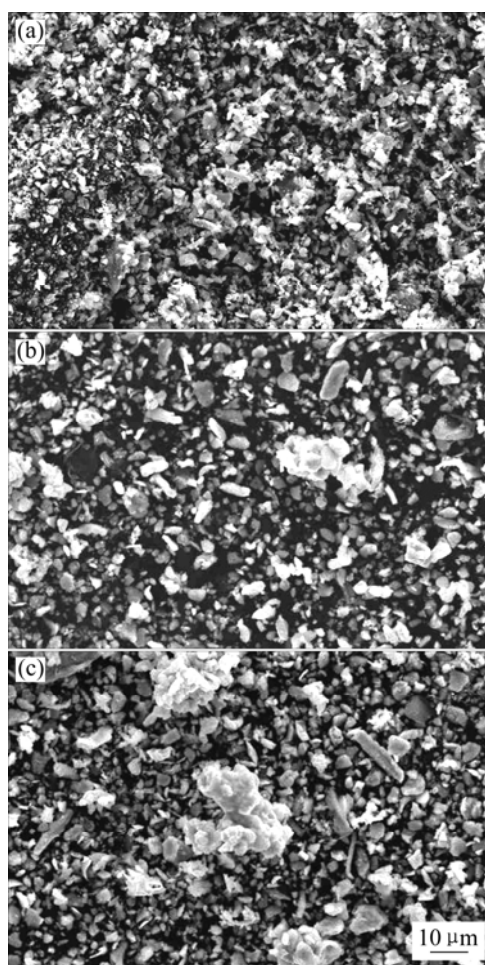


图 3 不同试样磨屑的 SEM 形貌

Fig.3 SEM photographs of wear debris of different samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

纤维被剪切剥离下来, 在摩擦剪切力的作用下被剪断形成磨屑。其中大块的絮状物质经能谱分析为 Fe 的氧化物, 认为是材料硬质相压入钢对偶犁沟切削形成的铁屑在高温下氧化所致。

对于短纤维增强复合材料, 纤维体积分数有 1 个最佳值。一般认为: 纤维量过少, 纤维间距就会较大, 对基体强化效果很小, 甚至不起强化作用, 反而成为杂质, 造成弱化。肖鹏等^[12]指出, 当复合材料中纤维间距大于 0.8 mm 时, 基体实际上得不到强化。因此, 在基体中纤维必须有足够高的体积分数。

材料在与对偶件的摩擦过程中, 增强纤维将被剥离、拉拔和剪切, 因而提供一定的摩擦力矩。当材料中纤维含量较低时, 随着纤维含量的增加, 增强纤维提供的摩擦力矩增大, 摩擦因数也随之提高; 同时, 随着纤维的增多, 在基体中均匀分布, 其增强效果能更好地体现, 这也有利于降低材料的磨损率。但当纤维含量超过一定限度时, 由于碳纤维本身具有“乱层石

墨”结构，表现出良好的自润滑和减摩性能。因此，随着碳纤维体积分数的继续增大，摩擦因数将会有所下降；同时由于纤维和其他组分之间是依靠树脂等胶粘剂粘合，树脂含量不变，当碳纤维体积分数增大时，粘结剂的含量相对减少，纤维与基体之间的粘结力将会下降，纤维更容易被剥离和拉拔，摩擦时纤维层也容易发生层间剥落，导致磨损率增大^[15]；另外，纤维体积分数过大，混料时纤维容易团聚在一起，不易与其他组分混合均匀，致使摩擦性能不稳定，磨损率增大。

2.2 碳纤维长度的影响

取碳纤维长度分别为 2、5、8 和 12 mm 进行摩擦实验，结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，随着碳纤维长度的增加，摩擦因数缓慢增大，材料的冲击强度也随之增大，而材料的磨损率递减。纤维长度为 12 mm 的 7 号试样具有最佳的摩擦磨损性能，摩擦因数为 0.582，磨损率为 $0.357\times 10^{-7}\text{ cm}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

图 4 所示为各试样的摩擦表面形貌。由图 4 可以看出，各试样摩擦表面类似，均形成了不连续的摩擦膜，说明纤维长度对材料摩擦过程中摩擦膜的形成影响不大。

各试样磨屑的 SEM 形貌如图 5 所示。由图 5 可见，当纤维长度从 2 mm 增加到 12 mm 时，磨屑变化不大，均以颗粒状与片状磨屑为主，并夹杂有大块絮状铁氧化物。

在短碳纤维增强复合材料中，纤维长度对复合材

表 2 不同碳纤维长度下材料的摩擦磨损性能

Table 2 Tribological properties of C/C-SiC composite with different lengths of carbon fiber

Sample No.	C fiber length/mm	Temperature/℃	μ	ω/g	δ/mm	$w/(10^{-7}\text{ cm}^3\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$a_k/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$
4	2	100	0.566	0.51	0.236	0.942	2.20
5	5	100	0.568	0.35	0.136	0.529	2.45
6	8	100	0.570	0.32	0.116	0.442	2.63
7	12	100	0.582	0.29	0.093	0.357	2.96

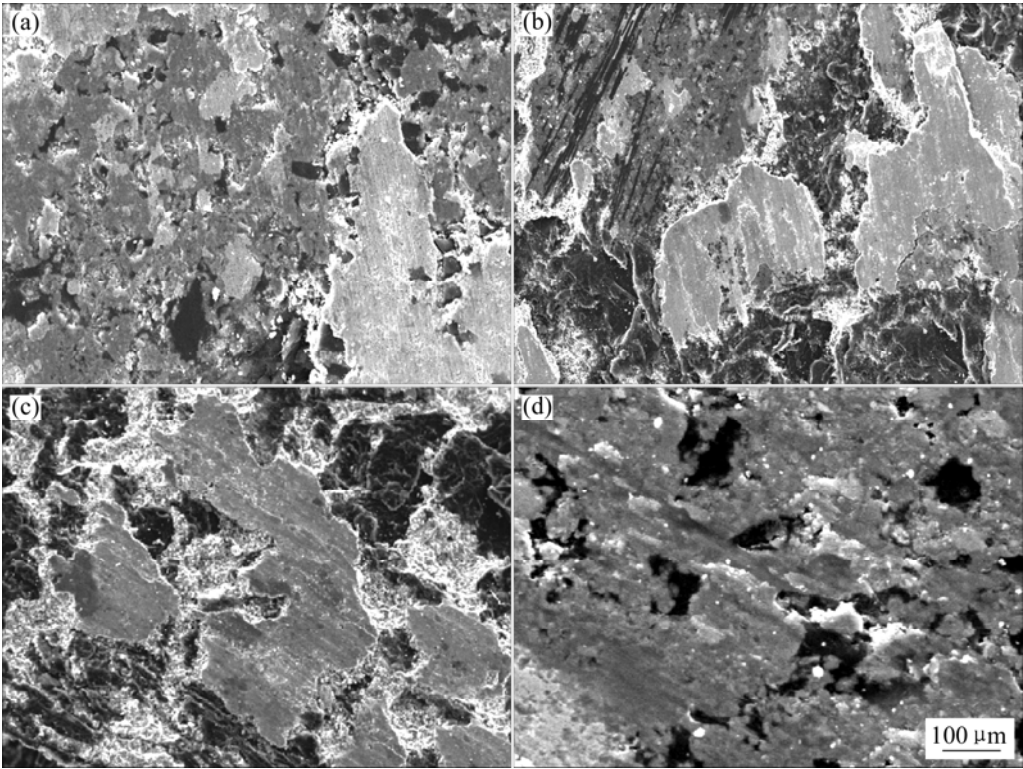


图 4 试样摩擦表面的 SEM 形貌

Fig.4 SEM photographs of friction surfaces of samples: (a)—Sample 4; (b)—Sample 5; (c)—Sample 6; (d)—Sample 7

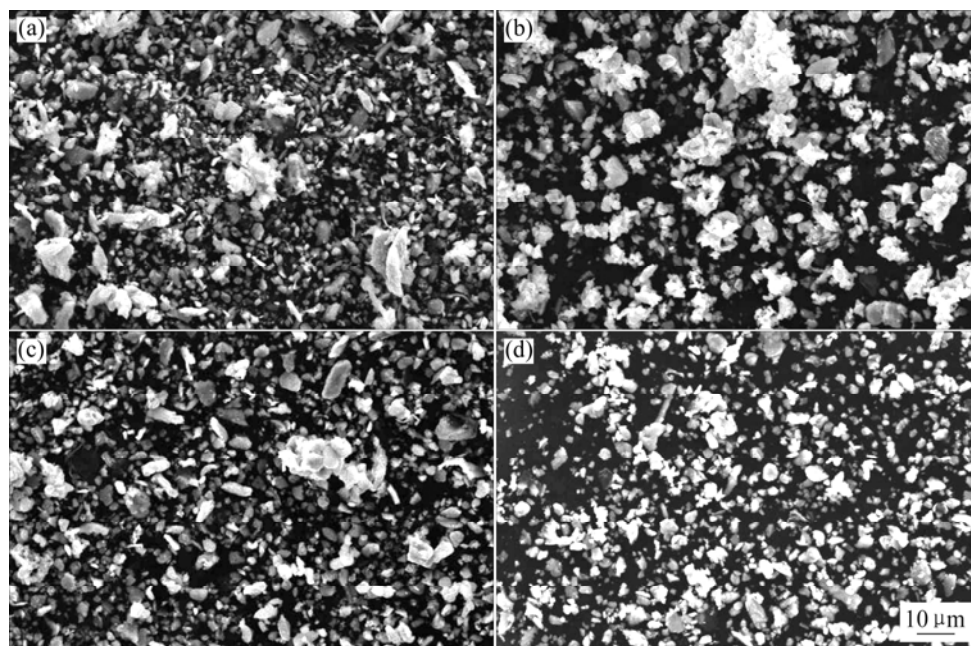


图 5 不同试样磨屑的 SEM 形貌

Fig.5 SEM photographs of wear debris of different samples: (a) Sample 4; (b) Sample 5; (c) Sample 6; (d) Sample 7

料有一定的影响。由纤维临界强度理论可知, 只有当碳纤维的长度大于临界纤维长度 l_c 时, 即能够达到最大纤维应力的最小长度时, 纤维才能发挥其增强增韧的作用。根据纤维临界长度计算公式:

$$l_c = \frac{d\sigma_f}{2\tau_i} \quad (2)$$

式中 l_c 为纤维的临界长度; σ_f 为碳纤维拉伸强度; τ_i 为阻止纤维拔出的剪切应力; d 为纤维直径。

在短碳纤维增强碳化硅基复合材料中^[16], 一般取 $\sigma_f=5$ GPa, $\tau_i=20$ MPa, $d=7$ μm , 得到 $l_c=0.875$ mm, 即只要短碳纤维的长度不小于 0.875 mm, 就能发挥其增强增韧作用。

实验所选取碳纤维长度均大于 l_c , 从理论上讲, 都能充分发挥碳纤维的增强作用, 而纤维的增强作用可用增强系数 K 来表达^[17], 即

$$S_c = K S_f \varphi_f + S_m \varphi_m \quad (3)$$

式中 S_f , S_m , φ_f , φ_m 分别代表纤维、树脂的强度和体积分数, 在 S_f , S_m , φ_f , φ_m 一定的前提下, 复合材料的强度 S_c 取决于增强系数 K 。 K 值的大小与纤维长度有关, 纤维长度越长, K 值越大, S_c 越大。因此, 在保证纤维长度大于临界纤维长度 l_c 的前提下, 尽量使纤维有较大的长径比, 以最大限度地发挥纤维的增强作用。即纤维长度越长, 其增强增韧作用越明显。因此, 相应材料的冲击强度也越高, 而强度的提高则

有利于提高材料的摩擦因数, 降低磨损率。当纤维长度 $l > 10l_c$ 时, 短纤维复合材料的强度趋近于具有相同体积分数的连续纤维复合材料。因此, 从理论上说, 当采用的短碳纤维长度超过 8.75 mm 时, 其制备材料的强度将接近于连续纤维增强的复合材料。

另外, 碳纤维具有高比强度和比模量, 在滑动过程中不易折断。不同长度碳纤维对应的摩擦材料的摩擦因数和磨损率主要取决于碳纤维与基体的界面结合强度, 在碳纤维体积分数一定的情况下, 较长的碳纤维表面积较大, 与基体接触面积大, 结合强度高。因此, 相应的增强材料具有较高的摩擦系数和较低的磨损率。

3 结论

1) 定速摩擦实验中, C/C-SiC 制动材料能够保持较高且稳定的摩擦因数。

2) SCF 体积分数对 C/C-SiC 制动材料的摩擦磨损性能有显著的影响, 随碳纤维体积分数的增加, 材料摩擦因数先升后降而磨损率先降后升。当纤维体积分数为 10% 时, 材料具有综合的摩擦磨损性能, 摩擦因数为 0.591, 磨损率为 $0.349 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 达到我国国家标准的要求。

3) SCF 长度影响 C/C-SiC 制动材料的摩擦磨损性

能, 在本实验中, 碳纤维长度为 12 mm 的材料具有最佳的摩擦磨损性能。

REFERENCES

- [1] Krenkel H. Development of CC-SiC brake pads for high performance elevators[J]. Applied Ceramic Technology, 2005, 2(2): 105-113.
- [2] Krenkel W, Henke T. Design of high performance CMC brake discs[J]. Key Engineering Materials, 2005, 164/165: 421-424.
- [3] 姜广鹏, 徐永东, 张军战. 反应溶体浸渗法制备 C/SiC 复合材料的显微结构与摩擦性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005, 1: 25-28.
JIANG Guang-peng, XU Yong-dong, ZHANG Jun-zhan. Microstructure and friction property of C/SiC composite made by reactive melt infiltration[J]. Fiber Reinforced Plastics Composites, 2005, 1: 25-28.
- [4] Krenkel W, Berndt F. C/C-SiC composites for space applications and advanced friction systems[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 412(1/2): 177-181.
- [5] 梁锦华, 黄启忠, 苏哲安, 谢志勇. 短纤维 C/C-SiC 复合材料的组织结构与断裂机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(6): 924-928.
LIANG Jin-hua, HUANG Qi-zhong, SU Zhe-an, XIE Zhi-yong. Structure and fracture mechanism of short fiber reinforced C/C-SiC composites[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2005, 36(6): 924-928.
- [6] 肖 鹏, 徐永东, 黄伯云. CVI 法快速制备 C/SiC 复合材料[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(2): 240-243.
XIAO Peng, XU Yong-dong, HUANG Bai-yun. Rapid fabrication of C/SiC composites using chemical vapor infiltration method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(2): 240-243.
- [7] 刘震云, 黄伯云, 苏 堤, 李度成. 增强纤维含量对汽车摩擦材料性能的影响[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 322-326.
LIU Zhen-yun, HUANG Bai-yun, SU Di, LI Du-cheng. Relationship between fiber content and properties of automotive friction materials[J]. Tribology, 1999, 19(4): 322-326.
- [8] Schulte-Fischedick J, Zem A, Mayer J. The morphology of silicon carbide in C/C-SiC composites[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 332(1/2): 146-152.
- [9] 肖 鹏, 熊 翔, 张红波, 黄伯云. C/C-SiC 陶瓷制动材料的研究现状与应用[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 667-674.
XIAO Peng, XIONG Xiang, ZHANG Hong-bo. Progress and application of C/C-SiC ceramic braking materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 667-674.
- [10] Krenkel W, Heidenreich B, Renz R. C/C-SiC composites for advanced friction systems[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 4(7): 427-436.
- [11] 张亚妮, 徐永东, 楼建军, 张立同. 碳/碳化硅复合材料摩擦磨损性能分析[J]. 航空材料学报, 2005, 25(2): 49-54.
ZHANG Ya-ni, XU Yong-dong, LOU Jian-jun, ZHANG Li-tong. The analysis of friction and wear performance of C/C-SiC composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(2): 49-54.
- [12] 肖 鹏, 熊 翔, 任芸芸. 不同成分对 C/C-SiC 材料摩擦磨损性能行为的影响与机理[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(7): 1040-1044.
XIAO Peng, XIONG Xiang, REN Yun-yun. Effect and mechanism of different components of C/C-SiC composites on friction and wear behaviors[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(7): 1040-1044.
- [13] 全永昕, 施高义. 摩擦磨损原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1988: 147-155.
QUAN Yong-xin, SHI Gao-yi. Principle of friction and wear[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1988: 147-155.
- [14] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 430-442.
HUANG Pei-yun. Principle of powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 430-442.
- [15] 关庆丰, 李晓宇, 李光玉, 刘亦丰. 碳纤维增强摩擦阻材料的摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 87-90.
GUAN Qing-feng, LI Xiao-yu, LI Guang-yu, LIU Yi-feng. The friction and wear behaviors of carbon fiber reinforced antifriction material[J]. Tribology, 1999, 19(1): 87-90.
- [16] 周长城, 周新贵, 于海蛟, 邹世钦. 短碳纤维增强碳化硅基复合材料的制备[J]. 高科技纤维与应用, 2004, 29(4): 35-38.
ZHOU Chang-cheng, ZHOU Xin-gui, YU Hai-jiao, ZOU Shi-qin. Processing and mechanical properties of short carbon fiber reinforced SiC matrix composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2004, 29(4): 3-38.
- [17] 贺 福, 王茂章. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 195-196.
HE Fu, WANG Mao-zhang. Carbon fiber and its composites[M]. Beijing: Science Press, 1995: 195-196.

(编辑 李向群)