

C/C-Cu 复合材料的载流摩擦磨损行为

杨琳, 易茂中, 冉丽萍

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 采用无压熔渗工艺制备一种新型的具有自润滑耐磨性能的碳纤维整体织物/炭-铜(C/C-Cu)复合材料, 在改装的 MM-2000 型环-块摩擦磨损试验机上考察其载流摩擦磨损性能, 利用扫描电子显微镜观察分析磨损的表面形貌, 研究不同载荷和电流强度下复合材料磨损表面的变化规律。结果表明: C/C-Cu 复合材料的体积磨损率随电流强度和载荷的增大而增大; 摩擦因数变化呈单峰曲线, 随电流强度的增大先升高后降低; 载荷为 30 和 70 N, 摩擦因数的峰值出现在 10 A; 载荷为 50 N, 摩擦因数的峰值出现在 5 A, 这与摩擦面粗糙程度有关; 电流引发的摩擦面高温是造成对偶表面熔融的重要原因。

关键词: C/C-Cu 复合材料; 熔渗; 滑动磨损性能; 加载电流

中图分类号: TB 331

文献标识码: A

Electrical sliding wear behavior of C/C-Cu composites

YANG Lin, YI Mao-zhong, RAN Li-ping

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

Abstract: A novel C/C-Cu composite with excellent wear resistance was fabricated by infiltrating molten Cu alloy into C/C preforms. The tribological behavior of the composite block with Cu ring counterpart was evaluated using an MM-2000 friction and wear tester. The worn surface morphologies of the composite blocks and Cu rings were analyzed by scanning electron microscopy. The influences of load and electric current on the tribological behavior of the composites were investigated. The results show that the wear rate of the composites increases with increasing load and electric current. The friction coefficient increases firstly and then drops with rising electric current, following a single peak curve. The peaks of 30 and 70 N appear in 10 A, while that of 50 N appears in 5 A. This may be related to surface toughness. The electric heat on the frictional surface might be the main reason for melting surface on Cu ring counterpart.

Key words: C/C-Cu composites; infiltration; sliding wear properties; electric current

近年来, 随着铁路工业和电机工业的发展, 滑动导电材料发展迅速。炭/铜复合材料作为一种集结构和功能为一体的金属基复合材料, 由于具有优良的导电、导热、减磨、耐磨性能且成本低廉、工艺简单, 在电刷、受电弓滑板等要求高导电性和耐磨性的滑动导电材料领域得到广泛的应用^[1-4]。此类材料的载流摩擦磨损现象广泛存在于电机电刷与整流子及受电弓和金属

导线之间^[5], 其载流磨损性能直接关系到电机、仪表及电力机车运行的可靠性和稳定性。因此, 炭/铜复合材料与铜在载流条件下的磨损行为研究具有重要现实意义^[6-7]。目前, 在所研究的 C/Cu 复合材料中, 炭的主要存在形式有炭颗粒、短碳纤维和长碳纤维等。但由于长碳纤维的成本和涂层成本均较高, 涂层工艺还有待于完善, 因此, 人们主要采用短纤维和炭颗粒为

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB600906); 湖南省重点科技支撑计划资助项目(2007KG2017)

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-03-02

通信作者: 易茂中, 教授, 博士; 电话: 0731-88830894; E-mail: yimaozhong@126.com

C 相通过以粉末冶金为主的固相成型方法来制备 C/Cu 复合材料^[8]。由于炭与铜的浸润性差,粉末冶金方法制备的复合材料一直存在两相分布不均、烧结强度低和传导性能差的问题。作为常见的滑动导电材料,电导率是 C/Cu 复合材料的重要性能指标之一。导电能力主要取决于铜的含量及分布^[9]。而在传统的 C/Cu 复合材料中,铜呈孤立岛屿状分布,很难发挥铜的优良导电性。BEECH 和 PRICE^[10]曾指出,炭/金属复合材料中的金属组分如果能连接成连续的三维网络,并保持炭相均匀分布在网络之间,将能更有效地利用炭/金属复合材料中金属的导电性。传统制造 C/Cu 复合材料的粉末冶金技术和金属浸渍技术很难实现上述设想。

本文作者采用液相熔渗方法制备一种 Cu 相呈网络状分布的碳纤维整体织物增强铜基(C/C-Cu)复合材料^[2-3]。该方法无需浸渗压力,对预制件强度要求小,所需设备及工艺简单,周期短易实现工业化生产,在经济和工艺上有很大的竞争力。采用改装的 MM-2000 型环-块摩擦磨损试验机研究其载流摩擦磨损行为,探讨在不同载荷和电流强度下复合材料摩擦磨损行为的变化规律,从微观角度探讨载流磨损机制,以期为开发新型的高导电高耐磨材料提供试验依据。

1 实验

1.1 实验材料制备

本实验中采用无压熔渗方法制备 C/C-Cu 复合材料。将由聚丙烯腈碳纤维制得的炭毡和无纬布叠层加 Z 向针刺得到密度为 0.5~0.6 g/cm³ 的针刺整体毡,经化学气相渗透(CVI)增密至 1.5 g/cm³,成为孔隙连通的炭/炭(C/C)坯体。将 25 mm×25 mm×50 mm 的 C/C 坯体包埋于由 Cu 粉和 Ti 粉混合而成的熔渗剂粉末中,在真空条件下高温熔渗制得 C/C-Cu 复合材料。

1.2 物理性能测试

分别采用 CSS-44100 型电子万能试验机, A-200 型布洛维硬度计和 JB690-65/0.02 级 QJ36 型单双臂两用电桥测试试样的弯曲强度,洛氏硬度值(HRF)和电阻率。采用 JSM 5600LV 型扫描电镜观察材料的显微结构和磨损表面形貌。

1.3 摩擦磨损性能测试

载流摩擦测试在改装的 MM-2000 型环-块摩擦磨损试验机上进行,实验电源为直流电源,实验装置

示意图如图 1 所示。对偶环为紫铜,硬度为 HRB30~40。滑动速度 0.42 m/s,载荷分别选择 30、50 和 70 N,电流强度为 0~20 A,实验时间为 120 min。试样尺寸为 20 mm×12 mm×6 mm,试验前将 20 mm×12 mm 的工作面均经研磨抛光至表面粗糙度 R_a 为 0.02~0.05 μm ,并用丙酮超声波清洗。按 GB 12444.2-90 标准测量磨痕宽度并按式(1)和(2)转换为体积磨损率。

$$V = l \left[\frac{r^2}{2} \arcsin\left(\frac{b}{2r}\right) - \frac{b}{2} \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}} \right] \quad (1)$$

$$k = V / (LF) \quad (2)$$

式中: V 为体积磨损量, mm^3 ; l 为磨痕长度, mm ; r 为对偶环半径, mm ; b 为磨痕宽度, mm ; k 为比磨损率, $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$; L 为滑动距离, m ; F 为施加的法向载荷, N 。

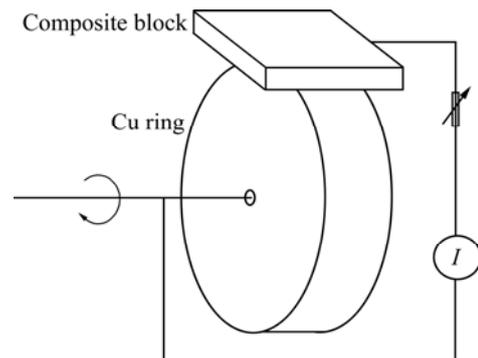


图 1 电磨损实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrical wear equipment

2 结果与分析

2.1 C/C-Cu 复合材料的组织及物理性能

表 1 所列为 C/C-Cu 复合材料及 C/C 坯体的基本性能参数。由表 1 可以看出, C/C 坯体渗入 Cu 后机械性能和导电性能大幅度提高。图 2 所示为所制备的 C/C-Cu 复合材料组织形貌。其中黑色区域为纤维整体织物,白色区域为铜合金。从图 2 中可看出,熔融铜合金充分填充 C/C 坯体内连通的孔隙,形成网络状分布的铜合金基体。

2.2 载荷和电流对摩擦磨损性能/规律的影响

图 3 所示为不同载荷下复合材料的摩擦因数随电流强度的变化。由图 3 可以看出,在未加载电流和电流强度为 5 A 的实验条件下,复合材料的摩擦因数在

表 1 C/C-Cu 复合材料及 C/C 坯体的物理性能

Table 1 Properties of C/C-Cu composites and C/C preforms

Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Bending strength/ MPa	Hardness	Shock strength/ (J·cm ⁻²)	Electrical resistivity/ (μΩ·m)
C/C-Cu composite	3.3	186	HRB75-90	4.7	0.589
C/C perform	1.5	103	HRF33~40	1.2	35.2

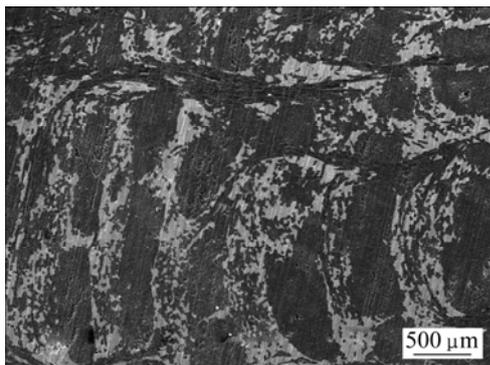


图 2 碳纤维整体织物/炭-铜复合材料的微观组织形貌
Fig.2 Microstructure of C/C-Cu composites

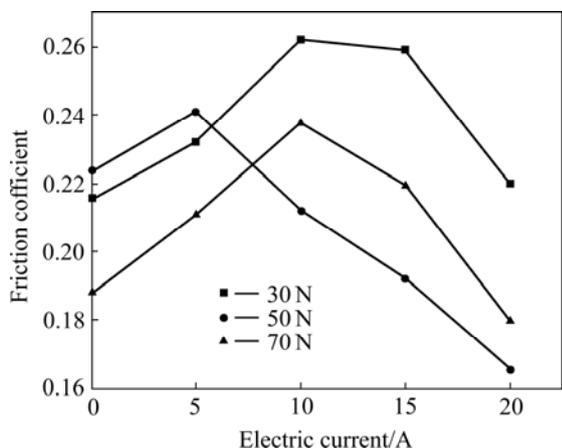


图 3 C/C-Cu 复合材料在不同载荷下摩擦因数随电流的变化
Fig.3 Change of friction coefficient with electric current under different loads

50 N 时最大, 30 N 时次之, 70 N 时最低; 而当电流达到 10 A 后, 摩擦因数在 50 N 时最小, 30 N 时最大, 70 N 居中; 在所有载荷下, 随着电流强度的增大, 摩擦因数均遵循先增大后减小的规律; 载荷为 30 和 70 N 时, 摩擦因数的最高值均出现在电流为 10 A 的实验条件下; 载荷为 50 N, 电流为 5 A 时摩擦因数最大。图 4 所示为不同载荷下复合材料体积磨损率随电流变化的关系。从图 4 中可以看出, 复合材料的体积磨损率

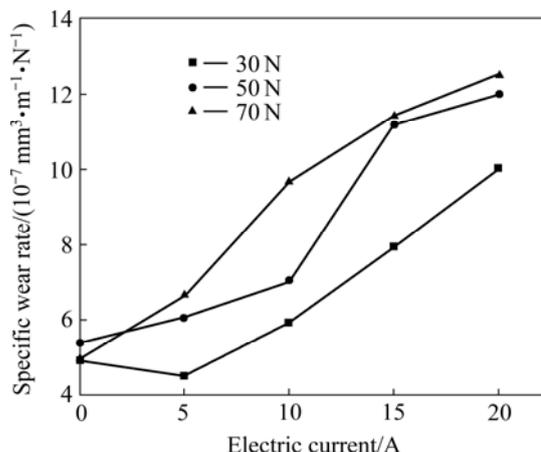


图 4 C/C-Cu 复合材料在不同载荷下体积磨损率随载荷的变化
Fig.4 Change of specific wear rate with electric current under different loads

基本上遵循随电流强度和载荷的增大而增大的规律。

2.3 摩擦表面分析

图 5 所示为不同载荷下 C/C-Cu 复合材料在电流 5 A 时磨损 2 h 后的摩擦面形貌。由图 5 可以看出, 复合材料在 30 和 70 N 载荷下磨损表面较为平整, 50 N 载荷下的磨损面较为粗糙; 在载荷为 30 N 时, 磨损轻浅细微, 摩擦表面没有明显的犁沟和材料粘着转移现象; 载荷增至 50 N 时, 试样磨损表面 Cu 含量明显升高(见表 2)。这是由于试样中的 Cu 和对偶 Cu 粘着点增加, 导致了软材料向硬材料表面转移, 即对偶上的 Cu 转移至试样表面, 故而摩擦因数升高。由于对偶件上的 Cu 粘着在试样表面, 在摩擦切向力的作用下对偶件上的 Cu 便在 C 相表面延展, 使得试样摩擦表面上 C 相的表面积减少, 而 Cu 相的表面积增加, 形成了如图 5(b)所示的摩擦面形貌。当试样处于 70N 载荷下, 磨痕粗大但表面平整。由表 2 可见, 70 N 载荷下磨损表面 O 含量明显升高。据此推测高压反复碾磨使得试样摩擦表层硬度提高且形成氧化膜。氧化膜阻隔了对偶件中的 Cu 和试样中的 Cu 直接接触, 减轻了粘着效应。另一方面可能是由于在载荷为 70 N 时, 高硬度的复合材料表面被较软的对偶表面抛光, 试样摩擦表面上的微凸体逐渐被磨平, 摩擦表面在反复碾压作用下趋于光滑, 从而形成较为平整的摩擦面形貌。在这种情况下, 由于对偶难以再粘附在光洁的硬表面上, 导致粘着作用的减弱, 使得摩擦因数有所下降。

图 6 所示为 Cu 对偶在载荷为 70 N 时与 C/C-Cu 复合材料对磨 2 h 后的摩擦面形貌。由图 6 可看出,

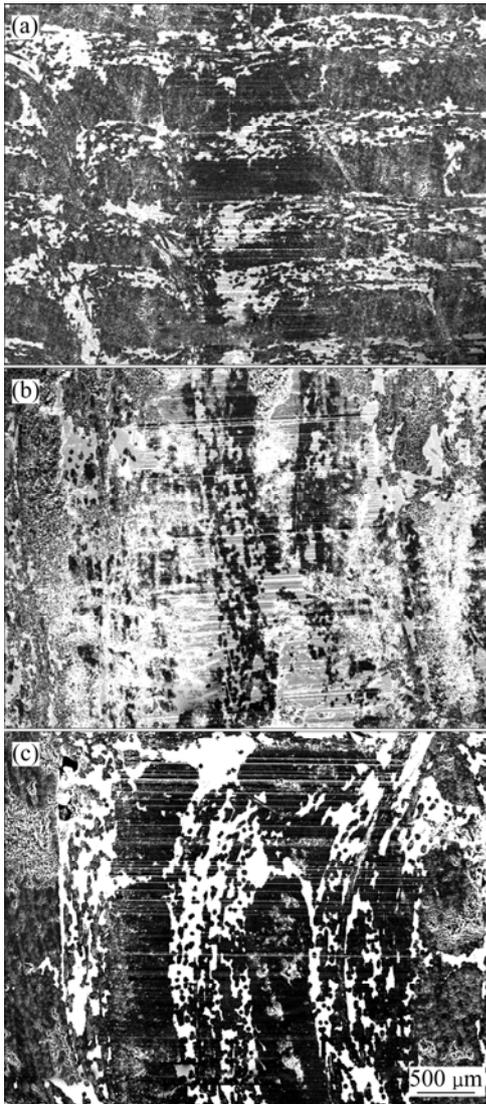


图5 不同载荷下 C/C-Cu 复合材料在电流 5 A 时的摩擦表面形貌

Fig.5 Morphologies of worn surfaces of C/C-Cu composites under electric current of 5 A and different loads: (a) 30 N; (b) 50 N; (c) 70 N

表2 C/C-Cu 复合材料在不同载荷下磨损表面的化学成份

Table 2 Chemical compositions of worn surface of C/C-Cu composites under different loads

Element	Mole fraction/%		
	30 N	50 N	70 N
Cu	11.4	62.0	14.6
C	87.4	34.1	77.3
O	0.3	3.6	7.3
Ti	0.9	0.4	0.8

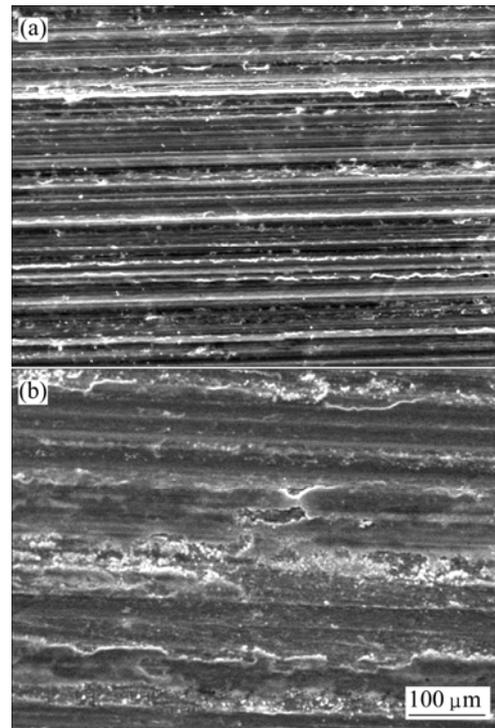


图6 不同电流下 Cu 对偶环在 70 N 载荷下的摩擦表面的形貌

Fig.6 Morphologies of worn surfaces of Cu rings under load of 70 N and different currents: (a) 10 A; (b) 15 A

在载流摩擦过程中, 复合材料与 Cu 对偶产生的热量散失在接触面表层。较硬的磨损表面“犁入”由于受热而软化的 Cu 对偶表面, 使得 Cu 对偶环表面布满了犁沟, 形成如图 6(a)所示形貌。当电流强度提高至 15 A 时, Cu 对偶表面犁削特征消失, 有明显的熔融痕迹。这是由于载流实验条件下, 摩擦过程不仅产生摩擦热, 还增加了电弧热和电阻热^[11-12], 故而电流越大, 产生的电阻热和电弧热越大, 引发摩擦副接触面高温, 瞬间温度甚至超过了紫铜的熔点, 产生局部融化, 从而形成了图 6(b)所示形貌。

2.4 载流磨损机理

以往的大量研究表明^[13-14], 摩擦磨损行为与接触面的温度有很大关系, 接触表面温度过高, 会改变摩擦副的接触方式, 进而影响材料性能。载流磨损条件下, 电流引发电阻热和电弧热, 因此, 摩擦副的接触面温度比无电流摩擦条件下的高。本研究发现, C/C-Cu 复合材料和 Cu 组成的摩擦副在电流强度较低时, 电流和摩擦引起表面高温使得 Cu 对偶软化, 摩擦副实际接触面积增加, 摩擦阻力增大, 摩擦因数升高, 较硬的复合材料犁入对偶软化层形成犁沟形貌。

随着电流的增加,摩擦副接触面间的温度进一步升高,高温导致 Cu 对偶表面熔融,摩擦副相对滑动需克服的剪切力降低所以摩擦因数降低。在所有载荷下,随着电流强度的增大,摩擦因数均呈现先升高后降低的规律。

由于表面粗糙度的存在,摩擦副的真实接触面积很小^[15]。表面越粗糙,真实接触点越少,电流流过接触面时产生的电阻热越高。同时,粗糙表面容易使得摩擦接触点断开产生电弧,瞬间电弧高温会引发局部融化。因而粗糙度高的接触表面对电流变化更为敏感。由于载荷为 50 N 时形成的摩擦表面较为粗糙,故较低的电流就可引发对偶的软化甚至熔融,摩擦因数的峰值比较早到。

3 结论

1) C/C-Cu 复合材料的体积磨损率随电流强度和载荷的增大而增大。

2) 摩擦因数随电流强度的增大先升高后降低,呈单峰曲线。载荷为 50 N 时,摩擦因数的峰值比较早到,这与摩擦面粗糙程度有关。

3) 电流引发的摩擦面高温是造成对偶表面熔融的重要原因。

REFERENCES

- [1] KESTURSATYA M, KIM J K, ROHATGI P K. Wear performance of copper/graphite composite and a leaded copper alloy[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 339: 150-158.
- [2] 杨琳, 易茂中, 冉丽萍. C/C 坯体对 C/C-Cu 复合材料摩擦磨损行为的影响[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2): 10-15.
YANG Lin, YI Mao-zhong, RAN Li-ping. Effect of C/C preform on the tribological behavior of C/C-Cu composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 10-15.
- [3] MOUSTAFA S F, EL-BADRY S A, SANAD A M. Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders[J]. *Wear*, 2002, 253(7/8): 699-710.
- [4] JANG Y, KIM S, LEE S, KIM D, UM M. Fabrication of carbon nano-sized fiber reinforced copper composite using liquid infiltration process[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(5): 781-784.
- [5] 胡忠良, 夏金童, 陈振华, 丁国芸, 宁荣晓, 吴香清. 炭石墨材料/铜滑动摩擦的理论研究和电刷磨损的影响因素[J]. *炭素*, 2007(3): 7-11.
HU Zhong-liang, XIA Jin-tong, CHEN Zhen-hua, DING Guo-yun, NING Rong-xiao, WU Xiang-qing. Theories on carbon materials sliding against copper and influence factors of wear of electric brushes[J]. *Carbon*, 2007(3): 7-11.
- [6] HE D H, MANORY R. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors[J]. *Wear*, 2001, 249(7): 626-636.
- [7] KESTURSATYA M, KIM J K, ROHATGI P K. Wear performance of copper/graphite composite and a leaded copper alloy[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 339: 150-158.
- [8] 高强, 吴渝英, 翟宁. 铜石墨材料导电性能研究[J]. *机械工程材料*, 2002, 26(9): 34-36.
GAO Qiang, WU Yu-ying, ZHAI Ning. Conductance research of copper-graphite material[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002, 26(9): 34-36.
- [9] 金永平. 机械球磨石墨/铜粉末复合材料变形工艺及组织性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
JIN Yong-ping. Microstructure and properties of graphite/copper composites prepared by mechanical milling and pressed[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [10] BEECH R N, PRICE M S T. Copper-graphite materials in industrial carbon and graphite[M]. London: Soc Chem Ind, 1958: 448-464.
- [11] 丁雨田, 郭美华, 许广济, 陈卫华. 单晶铜线材载流摩擦磨损行为研究[J]. *铸造技术*, 2006, 27(12): 1390-1394.
DING Yu-tian, GUO Mei-hua, XU Guang-ji, CHEN Wei-hua. Wear behavior of single crystal copper conducting wire under electrical current[J]. *Foundry Technology*, 2006, 27(12): 1390-1394.
- [12] 郜建新, 徐晓峰, 国秀花, 田保红, 宋克兴. 内氧化法制备 Al₂O₃/Cu 复合材料的载流摩擦磨损特性[J]. *特种铸造及有色合金*, 2006, 26(7): 262-264.
GAO Jian-xin, XU Xiao-feng, GUO Xiu-hua, TIAN Bao-hong, SONG Ke-xing. Current-carrier friction-wear behavior of Al₂O₃/Cu composites prepared by internal oxidation[J]. *Journal Agency of Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2006, 26(7): 262-264.
- [13] 李鹏, 张永振, 孙乐民. 受电摩擦磨损的研究现状[J]. *洛阳工学院学报*, 2002, 23(4): 34-37.
LI Peng, ZHANG Yong-zhen, SUN Le-min. Present friction and wear researches on friction couple in electric field[J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology*, 2002, 23(4): 34-37.
- [14] 雷宝灵, 易茂中, 徐惠娟. 炭/炭复合材料制动过程中温度场的仿真[J]. *中国有色金属报*, 2008, 18(3): 377-382.
LEI Bao-ling, YI Mao-zhong, XU Hui-juan. Simulation of temperature field of carbon/carbon composite during braking[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 377-382.
- [15] 凤仪, 张敏, 徐屹. 压力对碳纳米管-银-石墨复合材料接触电压降的影响[J]. *金属功能材料*, 2005, 12(4): 11-14.
FENG Yi, ZHANG Min, XU Yi. Effect of pressure on the contact voltage drop of CNT-Ag-G composite[J]. *Metallic Functional Materials*, 2005, 12(4): 11-14.

(编辑 李艳红)