

短碳纤维增强铜基复合材料的摩擦磨损性能研究

Study of Friction and Wear Properties of Cu/Short Carbon Fibers Composites

唐谊平, 刘磊, 赵海军, 朱建华, 胡文彬
(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)
TANG Yiping, LIU Lei, ZHAO Haijun,
ZHU Jianhua, HU Wenbin (State Key Laboratory of Metal
Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 采用冷压烧结工艺制备了短碳纤维增强铜基复合材料, 考察了该复合材料的干摩擦磨损性能。讨论了短碳纤维含量、载荷、转速等对复合材料摩擦性能的影响。结果表明: 复合材料的耐磨性能明显优于基体材料; 随着碳纤维含量的增加复合材料的耐磨性能进一步提高; 随载荷和转速的提高, 摩擦系数和磨损量也随之增加; 复合材料由纯铜的粘着磨损转变为剥层磨损, 并均伴有一定的氧化磨损。
关键词: 短碳纤维; 铜基复合材料; 摩擦磨损
中图分类号: TQ153; TG113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2007)04-0053-04

Abstract: The copper matrix composites reinforced with short carbon fibers (CFs) were prepared by cold press and sintering using copperized short CFs. The friction and wear properties of the composites were tested. The influence of short CFs contents, load and rotating speed on tribological behavior of composites was discussed. The results showed that the wear resistance improved with the increasing of fiber volume fraction. Both friction coefficient and wear mass loss increased with increasing load and rotating speed respectively. The wear mechanism was transferred from abrasive wear for pure Cu to delamination wear for Cu/short CFs composites.

Key words: short carbon fiber; copper matrix composite; friction and wear

碳纤维具有高比强度、高比模量、高的导热和导电、低的热膨胀系数和好的自润滑性能, 其作为增强材料广泛地应用于树脂和金属基复合材料中^[1-3]。碳纤维增强铜基复合材料综合了两种材料的优点, 是一种很有前途的功能材料, 可用作电子封装材料、电接触材料、热交换材料等^[4-7]。但碳纤维与铜之间的浸润性差, 且两者在高温下既不互溶又不反应, 很难制备出界面结合良好的复合材料, 因而限制了该材料的应用与发展。通过对碳纤维的表面改性可以很好地解决上述问题, 如电镀、化学镀、气相沉积、热喷涂等方法, 其中电镀法具有成本低廉、工艺简单等优点, 是一种很有前途的碳纤维金属化工艺。在前期的研究工作基础上^[8], 本工作开发了一种对短碳纤维直接金属化的工艺, 并成功地制备了铜基复合材料。

碳纤维增强铜基复合材料具有较好的摩擦磨损性能, 在耐磨、减摩材料中有很好的应用前景^[7,9-11]。本工作对该复合材料的摩擦磨损性能进行了系统的研

究, 讨论了短碳纤维含量、载荷、转速等的影响, 并探讨了碳纤维在摩擦行为过程中的作用。

1 实验方法

1.1 试样制备

碳纤维为日本东丽的 T300 型, 长度为 1~2mm, 用开发的电镀工艺直接电镀铜, 之后用冷压烧结工艺制备出短碳纤维增强的铜基复合材料。压制压力为 600MPa, 烧结温度为 850℃, 氮气为保护气氛, 得到四种不同含量的铜基复合材料, 其纤维体积分数依次为 9.3%, 13.8%, 17.9%, 23.2%。图 1 为不同短碳纤维含量的铜基复合材料的金相形貌。由图 1 可知, 纤维在基体中的分布比较均匀, 基体中没有明显的缺陷。图 2 为碳纤维与铜基体界面的扫描电镜照片, 可以看出, 铜基体与纤维浸润良好, 界面处无孔洞或缝隙, 说明界面结合良好。

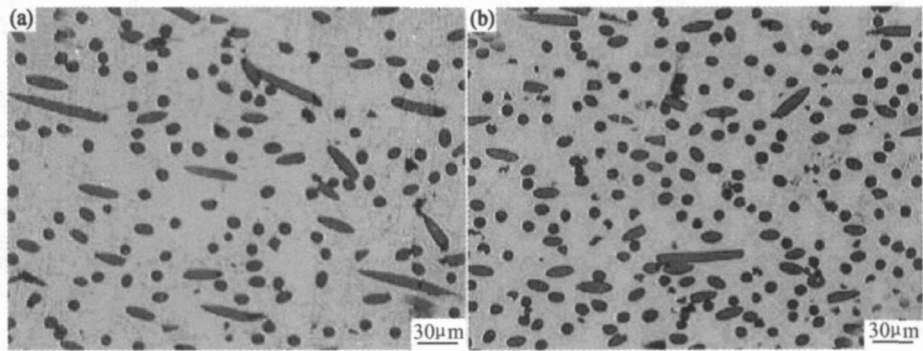


图 1 不同短碳纤维含量的铜基复合材料的形貌 (a) 13.8% 的碳纤维; (b) 23.2% 的碳纤维
Fig. 1 Morphologies of Cu/short CFs composites (a) 13.8 % of CFs; (b) 23.2 % of CFs

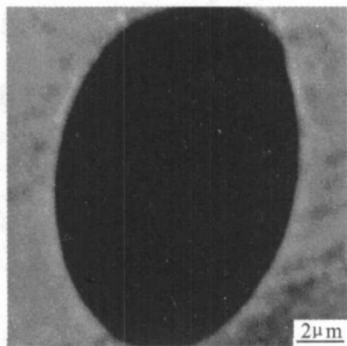


图 2 碳纤维与铜基体界面的微观形貌
Fig. 2 SEM micrograph of the interface between CFs and the Cu matrix

复合材料的摩擦系数和磨损量明显降低, 而显微硬度却有较大提高。说明碳纤维的加入增强了基体的硬度, 从而提高了复合材料的耐磨性能。

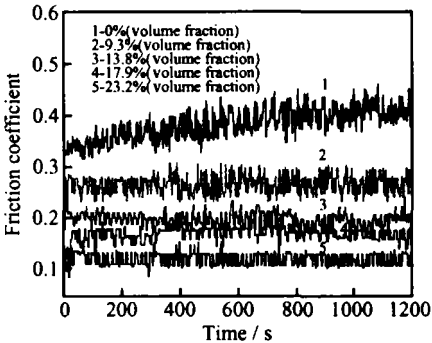


图 3 不同短碳纤维含量对摩擦系数的影响
Fig. 3 Effect of volume fraction of short CFs on friction coefficient

1.2 显微硬度测试和摩擦磨损实验

复合材料显微硬度在 HX-1000 上进行, 施加载荷为 50g, 时间为 10s, 硬度值为 10 个不同部位的平均值; 摩擦性能在 MMU-5G 摩擦磨损试验机上进行, 实验条件: 对偶件为轴承钢 GCr15, 其化学成分为 C 0.95%~1.05%; Si 0.15%~0.35%; Mn 0.20%~0.40%;, Cr 1.30%~1.65%, 余量为铁, 硬度值为 HV760, 载荷为 50N, 转速为 50r/min, 时间为 60min; 在精度为 0.1mg 的分析天平上称量试样磨损前后的质量, 其差值即为磨损量; 用扫描电镜分析磨损表面的形貌; 用能谱分析磨痕及对摩件表面成分。

2 结果与讨论

2.1 短碳纤维含量的影响

不同短碳纤维含量对复合材料的摩擦系数的影响如图 3 所示。从图 3 可知, 随着碳纤维含量的增加, 摩擦系数曲线逐渐降低且变得平整稳定。其中曲线 1 最为不稳, 上下波动较大且有上升趋势, 而曲线 5 最为平整且波动最小。表 1 是不同试样的摩擦系数、磨损量及显微硬度, 由表 1 可知, 随着短碳纤维含量的增加,

表 1 不同短碳纤维含量的复合材料的摩擦系数、磨损量及显微硬度

Table 1 Effect of short CFs contents on friction coefficient, wear behavior and microhardness

Volume fraction of fiber/ %	Friction coefficient	Wear mass loss/(mg · m ⁻¹)	Microhardness
0	0.38	1.63 × 10 ⁻²	78.0
9.3	0.27	1.54 × 10 ⁻³	82.6
13.8	0.20	7.38 × 10 ⁻³	83.9
17.9	0.17	2.91 × 10 ⁻⁴	96.5
23.2	0.12	6.47 × 10 ⁻⁴	103.0

2.2 载荷和转速的影响

表 2, 3 是载荷和转速对短碳纤维体积含量为 17.9% 的复合材料的摩擦磨损性能的影响。随着载荷和转速的增加, 复合材料的摩擦系数和磨损量增加。对摩件表面的硬度远大于复合材料, 复合材料表面所受到的循环正压力与摩擦力也越来越大, 也就是说受到的剪切破坏越来越强, 导致了表面大量的变形, 并使摩擦力也增加, 因此提高了摩擦系数和磨损量。

表 2 载荷对摩擦系数及磨损量的影响

Table 2 Effect of applied loads on friction and wear behavior

Load/N	Friction coefficient	Wear mass loss/(mg·m ⁻¹)
100	0.17	2.91×10 ⁻⁴
150	0.19	3.63×10 ⁻⁴
200	0.24	7.25×10 ⁻⁴
300	0.28	2.16×10 ⁻³

表 3 转速对摩擦系数和磨损量的影响

Table 3 Effect of rotating speed on friction coefficient and wear behavior

Rotating speed/(r·min ⁻¹)	Friction coefficient	Wear mass loss/(mg·m ⁻¹)
50	0.17	2.91×10 ⁻⁴
100	0.21	6.65×10 ⁻⁴
150	0.28	1.76×10 ⁻³

2.3 摩擦磨损机制

图 4 为在 100N, 50r/min 下纯铜的磨损表面和磨屑形貌。在纯铜的磨损表面可以观察到大量的凹坑、裂缝和塑性变形而引起的韧窝。在摩擦过程中, 较硬的对摩件微凸体将压入纯铜试样中, 而引发了磨损和粘着, 这将阻碍对摩件和试样的运动, 因此, 摩擦系数和磨损量必然增大。裂缝的发展可能是由于较硬的磨屑对纯铜试样的压痕影响所造成的。与对摩件 GCr15 相比, 纯铜试样较软, 因此在该过程中主要是纯铜的磨损和转移。对收集起来的磨屑的观察可知, 磨屑非常细小且相互聚集。因此对纯铜试样来说, 粘着磨损为主要的摩擦磨损机制。

短碳纤维的加入提高了基体的显微硬度, 能有效阻碍基体的变形。在摩擦磨损过程中, 局部的接触区域具有很高的温度, 但由于碳纤维的高温稳定性, 可以阻碍基体的软化。短碳纤维体积含量为 17.9% 的复

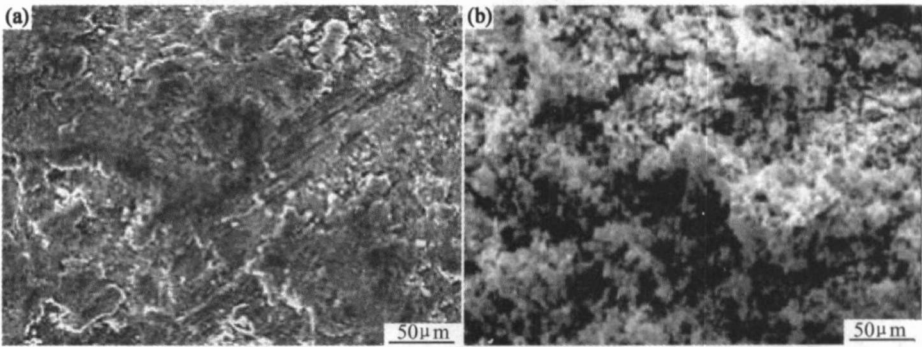


图 4 纯铜试样的微观形貌 (a) 磨损表面; (b) 磨屑
Fig. 4 SEM micrographs of worn surface (a) and debris (b) of pure Cu

合材料的磨损表面及磨屑形貌如图 5 所示。在磨损表面可以发现沿磨损方向有大量的塑性变形和裂纹。图 6 和图 7 为复合材料 Cu-17.9% 短碳纤维的磨损表面和对摩件的 EDS 分析。可以发现, 在磨损表面有几乎可以忽略的铁峰, 而在对摩件表面有很弱的铜峰, 因此可以推断在摩擦磨损过程中, 只有很少的物质转移。

与纯铜相比, 摩擦机制从粘着磨损转变为了剥层磨损。另外, 磨损表面存在的氧峰, 说明了有氧化磨损的存在。复合材料的亚表层受到了周期性的应力作用, 因此塑性变形和层错不断积累, 最后形成了微观裂纹, 裂纹不断长大和结合, 导致了磨损表面的裂纹出现, 并形成了薄片状磨屑。

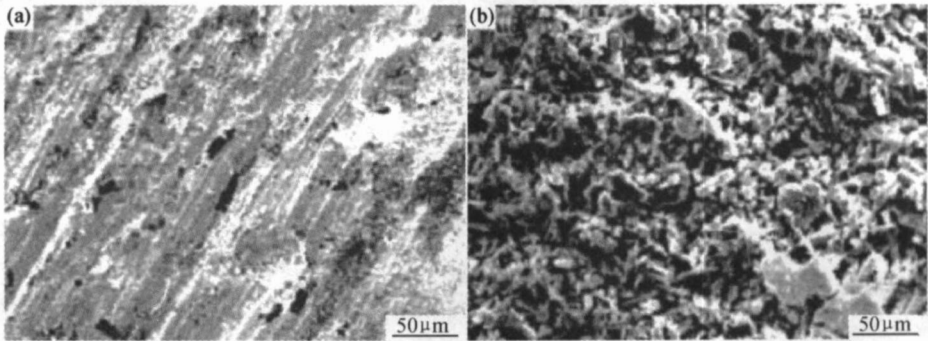


图 5 复合材料 Cu-17.9% 短碳纤维的微观形貌 (a) 磨损表面; (b) 磨屑
Fig. 5 SEM micrographs of worn surface (a) and debris (b) of Cu-17.9% short CFs composites

碳纤维具有石墨微晶结构, 因此具有较低的摩擦系数^[12, 13]。A. Daoud^[14]对 30% 短碳纤维增强的 2014A1 复合材料的摩擦磨损性能的研究发现, 在试样的表面有相当于固体润滑剂的石墨膜的形成。图 6 中的 EDS 数据显示, 复合材料磨损表面的碳含量高达 18.62% (质量分数), 明显高于复合材料本身的含碳量。而对磨件的表面除本身含有的铁外, 还有高碳和低铜含量 (见图 7), 因此可以说明在两金属之间有富碳层的形成。在摩擦过程中, 虽然碳纤维起到了一定

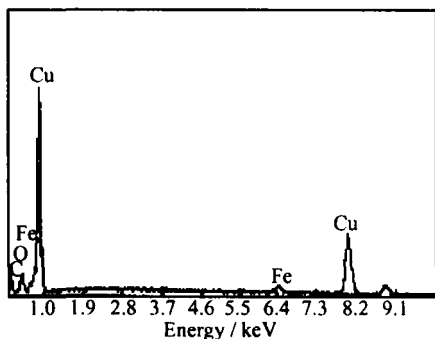


图 6 复合材料 Cu+17.9% 短碳纤维磨损表面的 EDS 分析

Fig. 6 EDS analysis on worn surface of Cu+17.9% short CFs composites

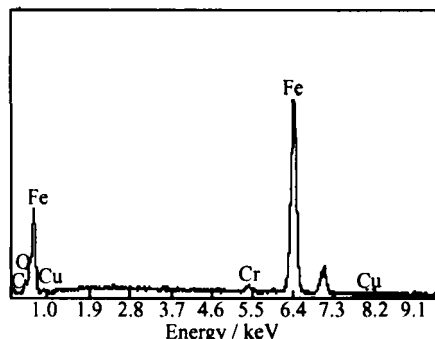


图 7 对磨件磨损表面的 EDS 分析

Fig. 7 EDS analysis on worn surface of the counterpart

的限制作用, 但试样表面仍有金属的塑性流动, 因此一些纤维最终被剥离而裸露出来。这些碳纤维被碾碎成细小的颗粒, 在磨损表面压制并铺展在表面上, 阻止了两金属的直接接触, 并起到了固体润滑的作用。

随着载荷和转速的增加, 表面及压表层的裂纹不断长大, 导致了磨损量的大幅增加。在 150N, 50r/min 时, 磨损表面有一些孔洞和微裂纹, 如图 8a 所示。当载荷和转速分别增加到 300N, 150r/min 时, 大的裂纹和较深的凹坑出现在表面, 如图 8b 所示。

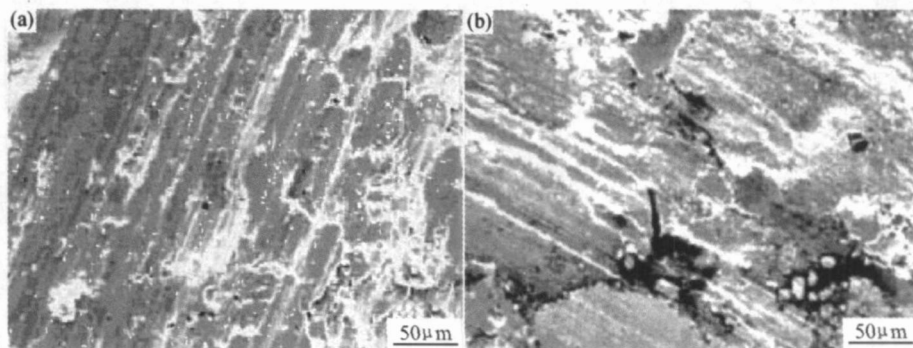


图 8 短碳纤维铜基复合材料的磨损表面形貌 (a) 150N, 50r/min; (b) 300N, 150r/min

Fig. 8 SEM morphologies of worn surfaces of Cu/short CFs composites (a) 150N, 50r/min; (b) 300N, 150r/min

3 结论

(1) 与纯铜相比, 短碳纤维的加入大大提高了复合材料的耐磨性能。随短碳纤维含量的增加, 复合材料的摩擦系数和磨损量降低, 显微硬度增加。而随载荷和转速的增加, 摩擦系数和磨损量也增加。

(2) 纯铜和复合材料的主要摩擦磨损机制分别为粘着磨损和剥层磨损, 并都伴有氧化磨损。

(3) 短碳纤维的加入限制了基体的变形, 阻碍了铜基体的软化, 并在磨损表面形成了富碳层, 从而提高了复合材料的耐磨性能。

参考文献

[1] DONNET J B, BANSAL R C, WANG M J. Carbon fibers [M].

New York: Marcel Dekker Inc, 1990.

- [2] PARK S J, CHO M S. Effect of anti-oxidative filler on the interfacial mechanical properties of carbon-carbon composites measured at high temperature [J]. Carbon, 2000, 38: 1053-1058.
- [3] CHAND S. Carbon fibers for composites [J]. J Mater Sci, 2000, 35: 1303-1313.
- [4] LIN M H, BUCHGRABER W, KORB G. Thermal cycling induced deformation and damage in carbon fiber reinforced copper composite [J]. Scripta Mater, 2002, 46: 169-173.
- [5] ZHU Z, KUANG X, CAROTENUTO G. Fabrication and properties of carbon fibre-reinforced copper composites by controlled three-step electrodeposition [J]. J Mater Sci, 1997, 32: 1061-1067.
- [6] ŠEBO P, ŠTETANIK P. Copper matrix-carbon fiber composites

(下转第 60 页)

增大了银微粒的生长速率,使银微粒迅速长大,导致沉积到 Fe_3O_4 粉表面的银微粒较大,且部分银微粒自身成核长大而未沉积到 Fe_3O_4 粉的表面。另外,反应温度过高,溶液中银的生成速率过快,甚至会发生自分解反应,导致在反应器表面有银镜反应发生。这都不利于银对 Fe_3O_4 粉的包覆。

3 结论

(1) 制备的镀银 Fe_3O_4 粉在相同条件下与原粉比较,经 XRD 和 SEM 检测,证明 Fe_3O_4 粉表面包覆了均匀、完整的银层,具有良好的导电性能。

(2) 反应体系中使用无水乙醇可提高镀银 Fe_3O_4 粉的导电性能,随其用量的增加,镀银 Fe_3O_4 粉的体积电阻率显著减小。

(3) AgNO_3 用量对镀银 Fe_3O_4 粉的导电性能影响显著,随 AgNO_3 用量的增加镀银 Fe_3O_4 粉的体积电阻率减小。当 $m_{\text{Fe}_3\text{O}_4} : m_{\text{AgNO}_3} = 10 : 12.6$ 时可制得外层银包覆完整的镀银 Fe_3O_4 粉。

(4) 在水/乙醇介质中采用化学镀法制备镀银 Fe_3O_4 粉时, AgNO_3 浓度以 0.05mol/L 为宜,反应温度以 50°C 为宜。

参考文献

- [1] 刘飏,官建国,王琦,等.核壳型铁钴复合材料的制备及其微波吸收性能的研究[J].功能材料,2005,36(1):133-135.
- [2] XU Xian-rui, LUO Xiao-jun, ZHUANG Han-rui, et al. Electroless silver coating on fine copper powder and its effects on oxidation resistance[J]. Materials Letters, 2003, 57(24-25): 3987-3991.
- [7] XU J C, YU H, XIA L. Effects of some factors on the tribological properties of the short carbon fiber-reinforced copper composite[J]. Materials Design, 2004, 25: 489-493.
- [8] TANG Y P, LIU L. Loose porous composites of Ni/short carbon fibers prepared by electrodeposition[J]. J Mater Sci, 2005, 40(16): 4399-4401.
- [9] 车建明.炭纤维增强铜基复合材料摩擦磨损性能同其磨损表面相关性研究[J].摩擦学学报,2004,24(2):144-147.
- [10] 凤仪,应美芳,王成福.短碳纤维-铜复合材料摩擦磨损性能[J].新技术新工艺,1995,(6):37-42.
- [11] 郭芝俊,运连仲.碳纤维铜复合材料的摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,1992,12(2):153-159.
- [12] NYO H, HECKLER A J, HOERNSCHEMEVER D L. National SAMPE symposium and exhibition (proceedings) [M]. California: SAMPE, 1997. 197-201.

- [3] 俞建长.核壳结构的氧化锆包裹氧化铝纳米复合粉体的制备研究[J].无机材料学报,2005,20(5):1054-1058.
- [4] 麻明友,何则强,熊利芝,等.均匀沉淀法制备 SnO_2 -石墨复合粉及其电学性能[J].中国有色金属学报,2005,15(5):793-798.
- [5] 姜敏毅,王德平,黄文,等.单分散核壳结构 SiO_2 磁性微球的制备及性能[J].硅酸盐学报,2006,34(3):276-283.
- [6] 景茂祥,沈湘黔. γ - FeNi 包裹 Al_2O_3 复合微球的制备[J].硅酸盐学报,2005,33(9):1163-1168.
- [7] SHUKLA S, SEAL S, RAHAMAN Z, et al. Electroless copper coating of cenospheres using silver nitrate activator[J]. Materials Letters, 2002, 57(1): 151-156.
- [8] 贾瑞宝,余大书,王锐,等. $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 发光粉的包覆研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(3):401-405.
- [9] 邵忠宝,王成艳,陈雪冰,等.纳米 ZnO/Ag 的制备及其光催化性能[J].材料研究学报,2005,19(1):59-63.
- [10] KOUADRI-MOSTEFA S, SERP P, HEMATI M, et al. Silicon chemical vapor deposition CVD on microporous powders in a fluidized bed[J]. Powder Technology, 2001, 120(1-2): 82-87.
- [11] 宿辉,曹茂盛,王正平,等. SiC 颗粒的表面修饰及结构表征[J].材料工程,2005,(2):37-40.
- [12] 朱洁,赫晶远,王晶.影响粉末电阻率测定结果的因素[J].炭素技术,2002,(3):47-49.
- [13] 曲敬信,汪泓宏.表面工程手册[M].北京:化学工业出版社,1998.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50372013);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050562002)

收稿日期:2006-09-12;修订日期:2006-11-28

作者简介:曹晓国(1979-),男,博士研究生,现从事超细粉体的制备和表面处理,联系地址:广州市广州大学城广东工业大学材料与能源学院(510006)。

(上接第56页)

[J]. Int J of Materials & Product Techn, 2003, 18: 141-159.

- [7] XU J C, YU H, XIA L. Effects of some factors on the tribological properties of the short carbon fiber-reinforced copper composite[J]. Materials Design, 2004, 25: 489-493.
- [8] TANG Y P, LIU L. Loose porous composites of Ni/short carbon fibers prepared by electrodeposition[J]. J Mater Sci, 2005, 40(16): 4399-4401.
- [9] 车建明.炭纤维增强铜基复合材料摩擦磨损性能同其磨损表面相关性研究[J].摩擦学学报,2004,24(2):144-147.
- [10] 凤仪,应美芳,王成福.短碳纤维-铜复合材料摩擦磨损性能[J].新技术新工艺,1995,(6):37-42.
- [11] 郭芝俊,运连仲.碳纤维铜复合材料的摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,1992,12(2):153-159.
- [12] NYO H, HECKLER A J, HOERNSCHEMEVER D L. National SAMPE symposium and exhibition (proceedings) [M]. California: SAMPE, 1997. 197-201.

- [13] DAMODARAN S, JIANG H, DESAI P. Proceedings of the american society for composites [M]. Atlanta: Technomic Pub Co, 1996. 594-597.

- [14] DAOUD A. Wear performance of 2014Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufactured by gas pressure infiltration[J]. Mater Lett, 2004, 58: 3206-3213.

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2002A A334010);上海市科委重点新材料资助项目(035211037);上海市科技发展基金资助项目(0211nm052)

收稿日期:2006-08-21;修订日期:2006-12-25

作者简介:唐谊平(1977-),男,博士研究生,主要从事金属基复合材料、复合电沉积及材料表面改性等的研究,联系地址:上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室(200030)。