

## C/C-Cu 复合材料的组织和摩擦磨损性能

冉丽萍, 易茂中, 王朝胜, 杨 琳, 易振华

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘 要:** 以碳纤维针刺整体毡为预制体, 用化学气相渗透(CVI)、浸渍/炭化(I/C)的方法制备密度和基体炭不同的 C/C 多孔坯体, 采用真空熔渗将熔融 Cu 渗入到 C/C 坯体中制备 C/C-Cu 复合材料, 利用 X 射线衍射、金相显微镜和扫描电镜分析复合材料的组织结构, 研究复合材料的摩擦磨损性能。结果表明: Cu 成功地渗入 C/C 坯体中, 并填充了坯体的孔洞和碳纤维之间的孔隙, 复合材料的主要相为 Cu、C 及少量的 TiC 相, 当渗剂中 Ti 的质量分数达到 15% 时, 出现微量的 Cu 和 Ti 的金属化合物相; 复合材料的摩擦因数随着摩擦时间的增加而逐渐增加并趋于稳定。渗剂相同时, 摩擦因数和体积磨损量随着材料密度增加而增加; 坯体相同时, 随着渗剂中 Ti 含量增加, 摩擦因数增加, 体积磨损减小。随着外加载荷的增加, 摩擦因数和体积磨损先增后减, 80 N 载荷时均达到最大值; 与 J204 电刷对比, 同样条件下, 两者摩擦因数接近, 但 C/C-Cu 复合材料的体积磨损量远远小于 J204 电刷的。

**关键词:** C/C-Cu 复合材料; C/C 坯体; 熔渗 Cu; 显微组织; 摩擦磨损性能

**中图分类号:** TB 332

**文献标识码:** A

## Friction and wear behavior of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating molten Cu into C/C preforms

RAN Li-ping, YI Mao-zhong, WANG Chao-sheng, YANG Lin, YI Zhen-hua

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

**Abstract:** C/C-Cu composites were fabricated by infiltrating molten Cu into different C/C preforms that were prepared by chemical vapor infiltration(CVI), resin impregnation and carbonization (I/C). The microstructure and the friction and wear behavior of the composites were studied by X-ray diffraction, optical microscopy and scanning electron microscopy wear test using 40Cr steel as couple parts respectively. The results show that the main phases in the composites are Cu, C and a little of TiC. When the mass fraction of Ti reaches 15%, there exist a few metal compounds of Cu and Ti in infiltrating agents. With prolonging the wear test time, the friction coefficients of the composites increase and tend to stable eventually; with the increase of the C/C-Cu composites density, the friction coefficients and the bulk wear loss of the composites increase at the same infiltrating agents. With the increase of Ti content in the agents, the friction coefficients increase, while the bulk wear loss decreases. With the increase of test loads, the friction coefficients and the bulk wear loss increase at first and then decrease and get to maximum under 80 N. Compared with electric brush material J204, the composite has similar friction coefficient but the bulk wear loss of the composite is much lower.

**Key words:** C/C-Cu composites; C/C preforms; molten copper infiltration; microstructure; friction and wear behaviour

碳纤维以其优异的性能被广泛用作金属基复合材料的增强纤维<sup>[1-2]</sup>。碳纤维增强 Cu 基复合材料(C/Cu)具有优良的导电、导热性, 在无油润滑条件下具有良好的减摩和耐磨性<sup>[2-6]</sup>, 广泛用作电刷、滑块和触点等

滑动导电材料。这类材料除要求有好的导电性外, 还要求好的耐磨性<sup>[7]</sup>, 且材料的摩擦磨损性能决定了其零部件的使用寿命<sup>[8-10]</sup>。

关于 C/Cu 复合材料的制备工艺一直是研究的热

点之一, 目前生产中制备工艺大致分为固相法和液相法<sup>[11-12]</sup>。固相法主要包括粉末冶金法、热压法等; 液相法主要为浸渗法。由于固相法存在成本高、碳纤维分散难、C 与 Cu 润湿性差; 而传统的液相浸渗法为碳纤维与有机溶剂结合做成预制块放入模具, 将金属液倒入模具中, 待有机溶剂挥发, 金属液进入预制件而制得复合材料, 但该法由于润湿问题效果不太理想。有关用熔渗法将 C/C 坯体制备成 C/C-Cu 复合材料的研究未见报道。本文作者通过在 Cu 液中添加合金元素的方法改善 Cu 与 C 的润湿性, 将 Cu 熔渗到多孔的 C/C 复合坯体中制备 C/C-Cu 复合材料, 并对其摩擦磨损性能进行了研究, 探索 C/C-Cu 复合材料用作为滑动导电材料的可能性。

# 1 实验

以密度为 0.5~0.6 g/cm<sup>3</sup> 的聚丙烯腈碳纤维针刺整体毡为预制体, 用化学气相渗透(CVI)、浸渍/炭化(I/C)的方法制备不同密度、不同孔隙度的 C/C 复合多孔坯体, 基体分别为热解炭、树脂炭及热解炭加树脂炭, 其坯体制备工艺见文献[13]。熔渗在真空炉中进行, 熔渗剂是纯度 99% 以上、粒度为 50~75 μm 的 Cu 粉和 Ti 粉。将这两种粉末按不同的质量分数比混合后, 与 C/C 复合坯体置于石墨坩埚中, 并在 1 300 ℃进行熔渗, 通过铜合金液熔渗到多孔的 C/C 坯体中而制备 C/C-Cu 复合材料。熔渗制备的复合材料的试样编号、坯体类型和材料的密度如表 1 所示。

分别用 RIGAKU-3014 X 射线衍射仪(XRD)、REICHERT MeF3 A 金相显微镜(OM)和带能谱(EDS)的 JSM 5600LV 型扫描电镜(SEM)对复合材料的物相

结构、显微组织和摩擦磨损表面形貌进行分析。将所制备的 C/C-Cu 复合材料和电炭厂提供的 J204 电刷材料加工成尺寸为 20 mm×12 mm×6 mm 的试样用于摩擦磨损实验。实验在 MM-2000 型摩擦磨损实验机上进行; 采用 40Cr 钢为对偶, 硬度为 58HRC; 实验载荷分别为 50、80 和 100 N; 摩擦线速度为 0.42 m/s, 实验时间为 10 h。

# 2 结果与讨论

## 2.1 C/C-Cu 复合材料的组织结构

图 1 所示为 C/C-Cu 复合材料的 XRD 谱, 从图 1 (a) 可见, 复合材料的相组成为 Cu 和 C 及 TiC 相。当渗剂中添加的 Ti 元素含量达到 15% 时, 还会形成微量的 Cu<sub>3</sub>Ti 和 Cu<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> 金属间化合物, 如图 1(b)所示。半定量结果分析表明, 当坯体相同时, 随着 Ti 含量的增加, TiC 的含量有所增加。

图 2 所示为经过 CVI 和 IC 处理的 C/C 坯体渗 Cu 后的组织。从图 2(a)可见, Cu 渗入到 C/C 坯体内部, 图中光亮色相是渗入的 Cu, 从图 2(b)的偏光形貌清楚地看到, 具有明显消光十字的热解炭包围着碳纤维, 纤维周围银灰色的区域为树脂炭, 此外的孔隙处均为亮色的 Cu 的区域。由图可见, 渗入的 Cu 已填充了 C/C 坯体中的孔洞和碳纤维之间的孔隙。因此, 根据表 1 中材料密度的变化、图 1 所示的物相及图 2 所示的显微组织可知, 实验成功地将 Cu 渗入到 C/C 复合坯体中制得 C/C-Cu 复合材料。

## 2.2 材料密度及基体炭类型对滑动摩擦磨损性能的影响

表 1 C/C 复合坯体熔渗制备的复合材料的编号、密度及坯体类型

Table 1 Sample, type of preform and density of composites fabricated by infiltrated Cu into different C/C preforms

| Sample | Type of preform | Mass fraction of Ti in agent/% | Density of preform/(g·cm <sup>-3</sup> ) | Density of composites/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|--------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| A1     | CVI             | 7                              | 0.73                                     | 4.59                                        |
| A2     | CVI             | 10                             | 0.73                                     | 4.63                                        |
| A3     | CVI             | 15                             | 0.73                                     | 4.04                                        |
| A4     | CVI             | 7                              | 1.12                                     | 3.81                                        |
| A5     | CVI             | 10                             | 1.12                                     | 3.87                                        |
| B      | I/C             | 10                             | 1.12                                     | 3.62                                        |
| C1     | CVI & I/C       | 7                              | 1.23                                     | 2.82                                        |
| C2     | CVI & I/C       | 10                             | 1.23                                     | 3.07                                        |
| C3     | CVI & I/C       | 15                             | 1.23                                     | 3.12                                        |

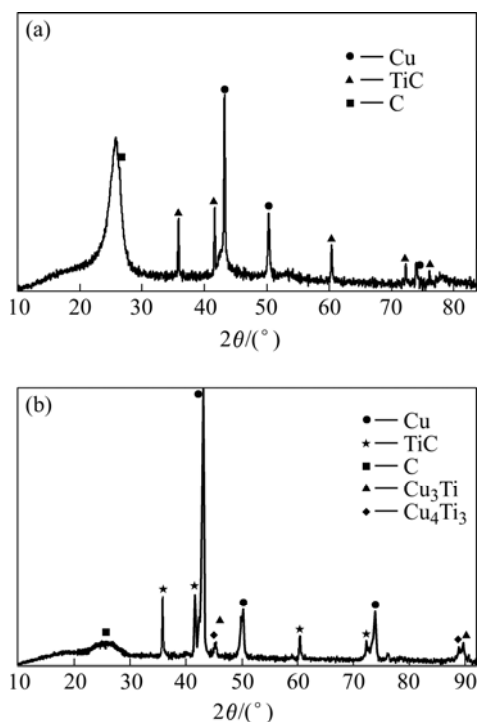


图 1 不同坯体、不同渗剂熔渗后 C/C-Cu 复合材料的 XRD 谱

**Fig.1** XRD patterns of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating agents with different mass fraction of Ti into different preforms: (a) Sample C1, 7%Ti-Cu; (b) Sample A3, 15%Ti-Cu

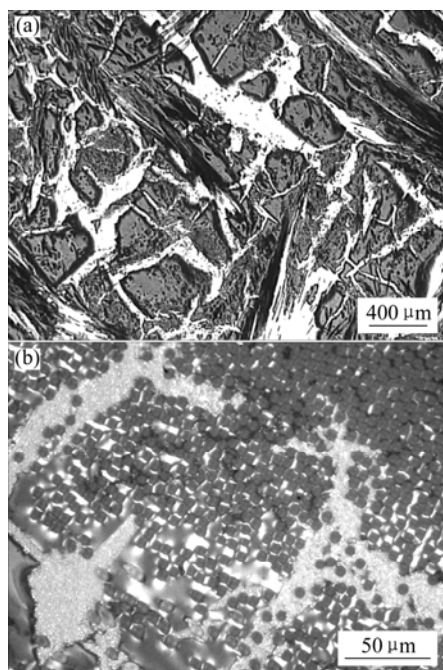


图 2 C1 试样的金相组织

**Fig.2** Optical micrographs of sample C1: (a) Bright field morphology; (b) Polarized morphology

图 3 所示为渗剂中 Ti 含量为 10% 和 7% 时不同坯体渗 Cu 制备 C/C-Cu 复合材料的摩擦因数随时间的变化规律。可以看出, 随着时间的延长, 材料的摩擦因数逐渐增大并趋于稳定, 且复合材料的摩擦因数与其密度有直接的关系, 材料的密度高, 其摩擦因数大。这是因为坯体密度低, 渗 Cu 后复合材料密度高, 复合材料中 C 相的比例则较低, 形成具有自润滑作用的摩擦膜少, 其摩擦因数高。

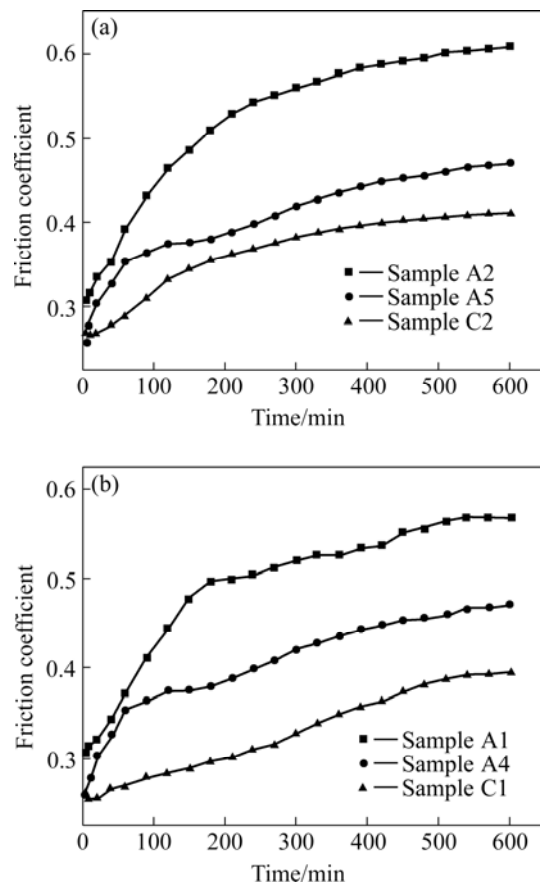


图 3 相同渗剂、不同坯体制备的复合材料摩擦系数随时间的变化曲线

**Fig.3** Curves of friction coefficients of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating same agents into different C/C preforms vs time: (a) 50 N load, 10%Ti-Cu; (b) 100 N load, 7%Ti-Cu

而当坯体密度相同时, 与 CVI 坯体比较, I/C 坯体中的开孔孔隙度低, 渗 Cu 后复合材料的密度低, 材料中 C 相的比例则较高, 因而摩擦因数也较低, 如图 4 所示。

图 5 所示为 A2 和 C2 试样在 50 N 载荷下摩擦 10 h 后的磨损表面形貌, 图 5(a)中光滑表面膜相对较少, 这是因为 C2 试样表面有更多的 C 相, 可以形成更多有自润滑作用的表面膜, 使材料的摩擦性能得到改善。

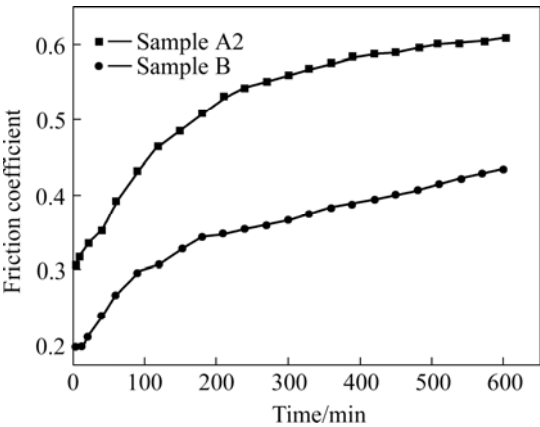


图 4 渗入 10%Ti-Cu 到不同坯体制备的复合材料摩擦因数随时间的变化曲线

**Fig.4** Curves of friction coefficient of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating 10%Ti-Cu into different preforms vs time

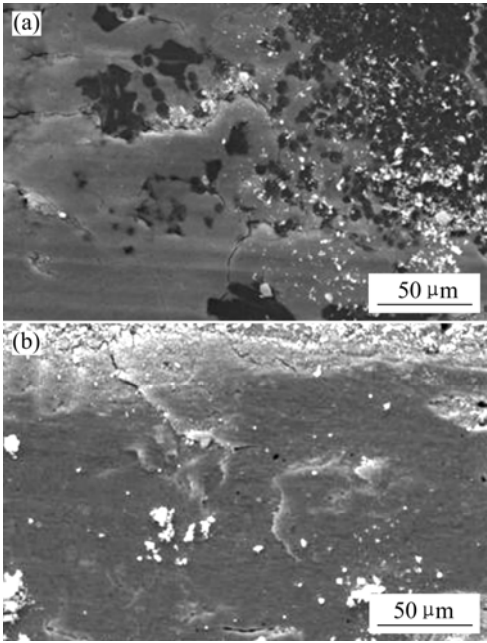


图 5 不同试样在 50 N 载荷下摩擦 10 h 后材料磨损表面形貌

**Fig.5** Surface morphologies of different samples after wear 10 h with 50 N load: (a) Sample A2; (b) Sample C2

表 2 所示为 C/C-Cu 复合材料在不同载荷下摩擦 10 h 后的体积磨损量。可以看出, 在渗剂相同的情况下, 坯体类型相同(如 CVI)时, 坯体密度越低, 复合材料的磨损量加大; 而坯体密度相同时, CVI 坯体熔渗后复合材料的磨损量略高于 I/C 坯体制备的复合材料的磨损量。这主要与熔渗后复合材料中渗入的 Cu 量有关, 渗剂相同时, CVI 坯体熔融渗入的 Cu 量越

表 2 不同载荷下摩擦 10 h 材料的体积磨损量

**Table 2** Bulk wear loss of composites after wear 10 h with different loads

| Sample | Bulk wear loss/mm <sup>3</sup> |       |       |
|--------|--------------------------------|-------|-------|
|        | 50 N                           | 80 N  | 100 N |
| A1     | 1.572                          | 6.603 | 3.894 |
| A2     | 1.059                          | 5.116 | 3.212 |
| A4     | 0.884                          | 4.776 | 3.164 |
| A5     | 0.378                          | 3.633 | 2.116 |
| B      | 0.803                          | 4.623 | 3.102 |
| C1     | 0.398                          | 4.059 | 1.239 |
| C2     | 0.219                          | 3.438 | 1.163 |
| C3     | 0.168                          | 3.132 | 1.014 |

多, 材料的磨损量越高。

2.3 渗剂中 Ti 添加量对滑动摩擦磨损性能的影响

图 6 所示为示出了相同坯体不同渗剂制备的 C/C-

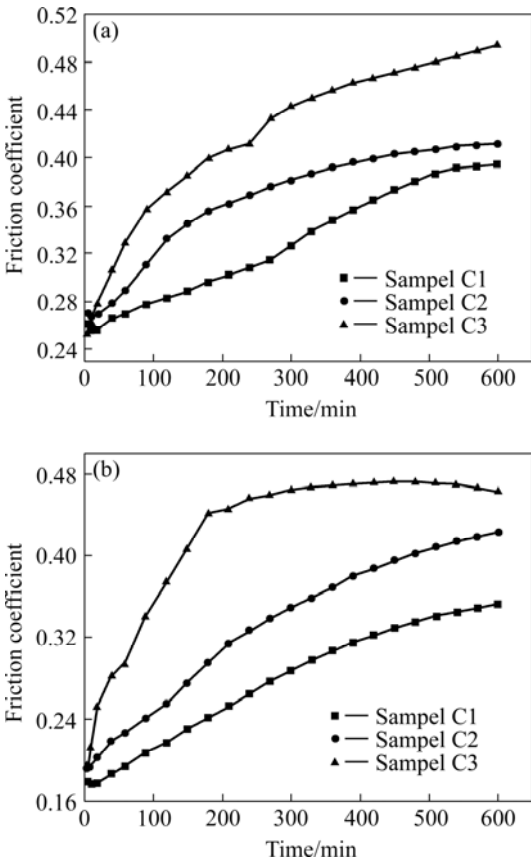


图 6 渗剂中不同 Ti 含量时复合材料的摩擦因数与时间的变化曲线

**Fig.6** Curves of friction coefficient of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating different content of Ti in agents into C/C preforms vs time: (a) 50 N load; (b) 100 N load

Cu 复合材料(C1、C2 和 C3 试样)摩擦因数随时间变化的关系曲线。可见,随着 Ti 含量的提高,摩擦因数增大,这是因为随着 Ti 含量的提高,Cu 与 C/C 复合坯体的润湿性得到改善<sup>[4]</sup>,渗入的 Cu 增加,材料的密度增大,C 相所占比例下降的缘故。从表 2 可见,坯体相同时,随着 Ti 含量的增加,虽然渗入的 Cu 相增大,但复合材料组织中形成的化合物相(如 TiC 相)的相对量增加,磨损量减小。

## 2.4 实验载荷对滑动摩擦磨损性能的影响

图 7 所示为 C2 试样在不同载荷下摩擦因数随时间的变化关系。载荷为 50 N 时摩擦因数较低,载荷为 80 N 时摩擦因数增高较多,但当载荷为 100 N 时,摩擦系数反而降低,因为载荷增大,使材料中的 C 相更快地暴露在表面,对材料起到自润滑的作用,而且更快地在表面形成光滑的摩擦膜,使摩擦因数反而降低。其他不同坯体和不同成分的渗剂熔渗制备的复合材料的摩擦因数也有相似的变化规律。从表 2 还可以看出,体积磨损量随载荷变化的规律与此相同,载荷为 50 N 时磨损量较低,载荷为 80 N 时磨损量增加,载荷为 100 N 时,体积磨损量也随之减小。其他试样的实验载荷与摩擦磨损量的关系也有相同的规律。

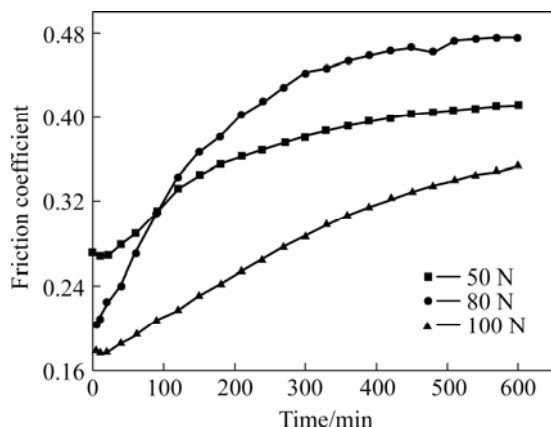


图 7 C2 试样在不同载荷下摩擦因数随时间的变化曲线

Fig.7 Curves of friction coefficient of sample C2 vs time with different loads

## 2.5 与金属石墨电刷的摩擦磨损性能比较

金属石墨是目前常用的电刷材料,图 8 所示为金属石墨电刷材料 J204 在 50 N 载荷作用下摩擦因数与时间的关系,并与 C/C-Cu 复合材料的摩擦性能进行对比分析。可以看出,C/C-Cu 复合材料的摩擦因数先是增大,然后趋于平稳,摩擦因数和 J204 相差不大,但是两者的体积磨损量却相差很远。在 50 N 载荷下摩擦 10 h 后,J204 电刷材料的体积磨损量是  $6.76 \text{ mm}^3$ ,

远远大于同样条件下 C/C-Cu 复合材料的体积磨损量。J204 电刷材料由石墨粉和 Cu 粉压制烧结制得,其组织为孤立岛状的 Cu 分布于石墨基体上(如图 9 所示),由于金属石墨电刷材料没有碳纤维的支撑作用,在摩擦过程中,与对偶件的真实接触面积大;虽然石墨材料易形成磨屑膜,但因其硬度低,微晶移动能力高,所以其体积磨损量比 C/C-Cu 复合材料大得多。

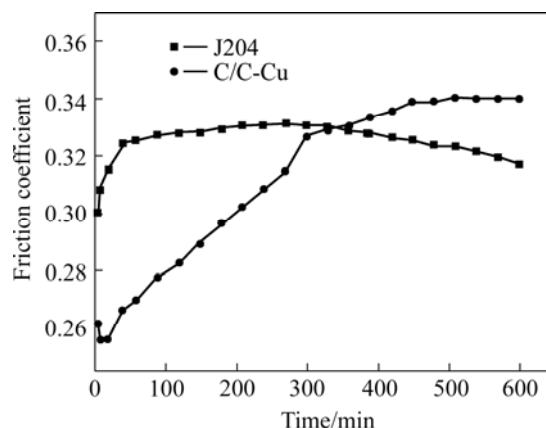


图 8 J204 电刷材料与 C/C-Cu 复合材料(A4 试样)摩擦因数随时间的变化曲线

Fig.8 Curves of friction coefficient of C/C-Cu composite (sample A4) and electric brush material J204 vs time

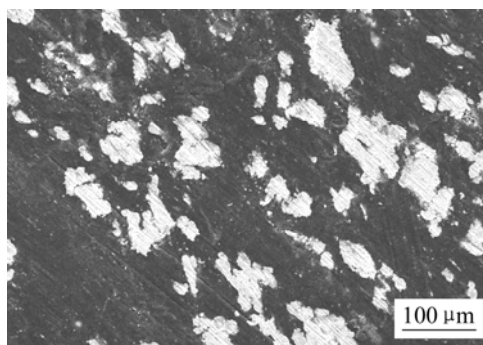


图 9 J204 Cu/石墨电刷材料的显微组织

Fig.9 Microstructure of Cu/graphite electric brush material J204

## 3 结论

- 1) 通过添加 Ti 元素,成功将 Cu 渗入到 C/C 坯体中,填充了坯体的孔洞和碳纤维之间的孔隙。复合材料的主要相为 Cu、C 及少量的 TiC 相。当渗剂中 Ti 含量达到 15% 时,出现微量 Cu 和 Ti 的金属化合物相。
- 2) 复合材料的摩擦因数随着时间的增加而逐渐增加并趋于稳定。渗剂相同时,随着材料密度的增加,

摩擦因数和体积磨损量增加。

3) 坯体相同时, 随着渗剂中 Ti 含量的增加, 摩擦因数增加, 体积磨损量却减小。随着载荷的增加, 摩擦因数和体积磨损量先增后减, 载荷为 80 N 时, 两者均为最大值。

4) 与 J204 电刷对比, 同样条件下两者摩擦因数相近, 但是 J204 电刷的体积磨损量远远大于 C/C-Cu 复合材料。

## REFERENCES

- [1] Daoud A. Microstructure and tensile properties of 2014 Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufactured by gas pressure infiltration[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, A391: 114–120.
- [2] Wan Y Z, Wang Y L, Luo H L. Effects of fiber volume fraction, hot pressing parameters and alloying elements on tensile strength of carbon fiber reinforced copper matrix composite prepared by continuous three-step electrodeposition[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, A288: 26–33.
- [3] Lin M H, Buchgraber W, Korb G, Kao P W. Thermal cycling induced deformation and damage in carbon fiber reinforced copper composite[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46: 169–173.
- [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: 781–784.
- [5] 韩绍昌, 徐仲榆. 碳/铜复合材料研究进展[J]. *机械工程材料*, 1999, 23(6): 6–9.  
HAN Shao-chang, XU Zhong-yu. Researching progress of C/Cu composites[J]. *Material for Mechanical Engineering*, 1999, 23(6): 6–9.
- [6] Ting J M, Tseng J S. A copper-infiltrated carbon substrate for diamond deposition[J]. *Material Science and Engineering*, 2000, B77: 213–217.
- [7] 陈文革, 沈宏芳, 胡 博. 制备工艺对 Cu/C 复合材料组织和性能的影响 [J]. *电工材料*, 2004(4): 3–6.
- CHEN Wen-ge, SHEN Hong-fang, HU Bo. Influence of preparation process on structure and properties of Cu/C sliding electrical contact materials[J]. *Electrical Material*, 2004(4): 3–6.
- [8] 车建明. 载荷、速度对 C/Cu 复合材料的摩擦磨损特性研究[J]. *润滑与密封*, 2004(3): 1–2.  
CHE Jian-ming. Effects of load and velocity on solid self-lubricating film of C/Cu composite material[J]. *Lubrication Engineering*, 2004(3): 1–2.
- [9] 王文芳, 许少凡, 凤 仪, 王成福. 碳-铜基复合材料摩擦磨损性能的研究[J]. *金属热处理*, 2001, 26(4): 19–21.  
WANG Wen-fang, XU Shao-fan, FENG Yi, WANG Cheng-fu. Friction and wear behaviors of carbon copper composites[J]. *Heat Treatment*, 2001, 26(4): 19–21.
- [10] HE D H, Manory R. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors[J]. *Wear*, 2003, 249: 626–636.
- [11] 邹柳娟, 范志强, 朱孝谦. 碳纤维增强铜基(碳/铜)复合材料的研究现状与展望[J]. *材料导报*, 1998, 12(8): 56–59.  
ZOU Liu-juan, FAN Zhi-qiang, ZHU Xiao-qian. Research status quo and outlook for carbon fiber reinforced copper (Cu) matrix composites[J]. *Material Review*, 1998, 12(8): 56–59.
- [12] Queipo P, Granda M, Santamary R, Menendez R. Preparation of pitch-based carbon-copper composites for electrical applications[J]. *Fuel*, 2004, 83: 1625–1634.
- [13] 冉丽萍, 易茂中, 陈 斌. C/C 坯体对 RMI C/C-SiC 复合材料组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(8): 1208–1213.  
RAN Li-ping, YI Mao-zhong, CHEN Bin. The influence of different C/C preforms on the microstructure of C/C-SiC composites fabricated by RMI [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(8): 1208–1213.
- [14] 易振华, 易茂中, 冉丽萍, 杨 琳. 添加 Ti 对炭/炭复合材料渗铜的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(8): 1214–1218.  
YI Zhen-hua, YI Mao-zhong, RAN Li-ping, YANG Lin. Influence of adding Ti on molten copper infiltration into C/C composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(8): 1214–1218.

(编辑 杨幼平)