



Mo₂C 改性涂层制备温度对 C/C-Cu 复合材料组织和性能的影响

周文艳, 易茂中, 冉丽萍, 彭 可, 葛毅成

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 以仲钼酸铵为反应物, 采用熔盐法在低密度 C/C 复合材料孔隙表面制备 Mo₂C 涂层, 改善 Cu 与 C/C 坯体的润湿性, 然后通过无压熔渗 Cu 制备 C/C-Cu 复合材料, 研究了 Mo₂C 改性层制备温度对 Mo₂C 涂层和 C/C-Cu 复合材料组织结构及性能的影响。结果表明: Mo₂C 涂层在坯体内部孔隙表面分布均匀, 且与炭基体和 Cu 均有良好的界面结合。在 950~1150 °C 范围内, 随涂层反应温度的提高, Mo₂C 层厚度由 2.0 μm 逐渐增大到 6.5 μm, C/C-Cu 复合材料的密度逐渐增大, 电阻率逐渐降低; 抗弯强度呈现先增大后减小趋势, 在涂层反应温度为 1000 °C 时呈现最大值 251.83 MPa。复合材料的摩擦因数均随磨损时间延长先增大后减小并趋于稳定。随着 Mo₂C 涂层制备温度的提高, 复合材料的摩擦因数逐渐增大, 体积磨损率先减小后增加, 在 Mo₂C 涂层反应温度为 1000 °C 时, 复合材料的磨损率最低。

关键词: Mo₂C 涂层; C/C-Cu 复合材料; 熔渗; 摩擦性能

中图分类号: TB333

文献标志码: A

Influence of preparation temperature of Mo₂C interlayer on microstructure and properties of C/C-Cu composites

ZHOU Wen-yan, YI Mao-zhong, RAN Li-ping, PENG Ke, GE Yi-cheng

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

Abstract: In order to improve the wetting ability between molten copper and C/C preform, Mo₂C interlayer was fabricated on the internal surface of C/C preform via molten salt deposition using ammonium paramolybdate as reactant. Then, C/C-Cu composites were prepared by pressureless infiltration. The influences of preparation temperature of Mo₂C interlayer on the microstructure and properties of Mo₂C interlayer and C/C-Cu composite were investigated. The results show that the Mo₂C interlayer covered internal pore surface of the C/C preform uniformly has a good interface bonding with C/C substrate and Cu. With the increase of preparation temperature in the range of 950–1150 °C, the thickness of the Mo₂C interlayer increases from 2.0 μm to 6.5 μm, the density of C/C-Cu composite increases, the electrical resistivity decreases, the flexural strength firstly increases and then decreases, and reaches the maximum value (251.83 MPa) at 1000 °C. The friction coefficient of the C/C-Cu composite firstly increases and then decreases to a stable value with friction time increasing. With the increase of the reaction temperature, the friction coefficient increases, the volume abrasion rate firstly decreases and then increases, and reaches the minimum value at 1000 °C.

Key words: Mo₂C interlayer; C/C-Cu composite; infiltration; tribological property

炭/铜(C/Cu)复合材料具有优良的导电、导热及摩擦性能, 已被用作滑动导电材料^[1-2]。传统 C/Cu 复合

材料常用粉末冶金法制备, 但由于石墨或碳纤维与铜粉密度相差很大, 球磨难以均匀混合, 且碳与铜不润

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004117); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2013zzts024); 粉末冶金国家重点实验室自主研究课题基金资助

收稿日期: 2014-07-24; **修订日期:** 2014-11-17

通信作者: 彭 可, 副研究员, 博士; 电话: 0731-88877700; E-mail: pengkcsu@csu.edu.cn

湿,所制备的复合材料中存在组织结构不均匀、致密度偏低及力学性能不理想等缺点^[3-5]。炭/炭(C/C)复合材料具有石墨材料自润滑性好的优点以及强度高、韧性好、可设计性好等特性^[6-7]。以低密度 C/C 复合材料为坯体采用熔渗法制备的炭/炭-铜(C/C-Cu)复合材料中,炭相和铜相均以连续形式存在,可使复合材料充分发挥两相各自的优良性能^[8]。但是,采用多孔炭材料熔渗铜制备 C/Cu 复合材料时,铜与碳润湿性差是主要的难点^[9]。为了实现无压熔渗制备 C/Cu 复合材料,通常采用两种方法:一是通过加入合金元素以降低 Cu 合金的界面张力并降低润湿角,添加合金元素 Ti、Cr 可提高 C/Cu 体系的界面润湿性^[10-12];另一种是通过在炭基体表面制备与 Cu 有良好润湿性的涂层以实现 Cu 的渗入。近年来,Cr、W、Mo 及其碳化物耐高温涂层成为改善铜与碳润湿性的研究热点,常用的制备方法有等离子体处理、物理气相沉积和料浆法等^[13]。然而,采用以上方法可制备表面涂层,但不适于在多孔炭材料内部孔隙表面获得均匀、完整的涂层。本文作者首先采用熔盐法在低密度 C/C 复合材料坯体孔隙表面进行改性,制备均匀的 Mo₂C 涂层,然后通过无压熔渗纯铜制备 C/C-Cu 复合材料,研究 Mo₂C 改性涂层制备温度对 C/C-Cu 复合材料组织结构及性能的影响。

1 实验

1.1 试样制备

采用碳纤维针刺整体毡为预制体,密度为 0.50 g/cm³。该预制体是由单层 0°无纬布、网胎、90°无纬布、网胎依次循环叠加,在垂直于铺层方向上用接力式针刺技术将网胎中的碳纤维引入相邻铺层中,使相邻铺层间紧密结合在一起。预制体经过多次化学气相渗透(CVI)及石墨化工艺制备密度为 1.40 g/cm³ 的 C/C 复合材料坯体。将 NaCl 和 KCl 按摩尔比为 1:1 的比例配制成混合熔剂并加入 10%(质量分数)仲钨酸铵,混合均匀后与 C/C 复合材料坯体一同置于坩埚中,在碳管炉中以 5 °C/min 的升温速率分别升温至 950、1000、1050、1100 和 1150 °C,保温 60 min,制备孔隙表面具有改性 Mo₂C 涂层的 C/C 复合材料坯体。最后,以纯铜为熔渗剂,在 1300 °C 无压熔渗制备 C/C-Cu 复合材料。

1.2 试样表征

采用阿基米德排水法测试 C/C-Cu 试样的密度。根

据 JB/T 8133.15—1999 标准测量试样的开孔率。采用 Instron3369 型材料试验机测试材料的抗弯强度,试样尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm,加载方式为三点弯曲,外加载荷垂直于纤维叠层平面。采用 TH2512B 型智能直流低电阻测试仪测试 C/C-Cu 复合材料的电阻并根据电阻率公式计算材料的电阻率,试样尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm。摩擦磨损实验在 M-2000 型环-块摩擦磨损实验机上进行,试样尺寸为 20 mm×12 mm×6 mm,对偶材料为纯 Cu,实验载荷为 50 N,摩擦线速度为 0.42 m/s,实验时间为 10 h。摩擦因数和体积磨损率由式(1)、(2)和(3)计算得到:

$$\mu = \frac{T}{Rp} \times \frac{\alpha + \sin \alpha \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \quad (1)$$

$$W = B(r^2 \arcsin \frac{b}{2r} - \frac{b}{2} \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}}) \quad (2)$$

$$k = \frac{W}{pL} \quad (3)$$

式中: α 为上下试样之接触角; T 为摩擦力矩, N·m; p 为试样所承受的垂直载荷, N; R 为下试样的半径, mm; μ 为摩擦因数; W 为体积磨损量, mm³; B 为对偶件宽度, mm; b 为磨痕宽度, mm; r 为对偶件半径, mm; k 为体积磨损率, mm³·m⁻¹·N⁻¹; L 为滑动距离, mm。

用 RIGAKU-3014 X 射线衍射仪分析材料的物相组成,用带能谱(EDS)的 Quanta FEG250 型扫描电镜分析复合材料的组织以及断口和磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 Mo₂C 涂层改性 C/C 复合材料坯体的物相与显微组织

在熔盐法制备 Mo₂C 涂层的工艺过程中,仲钨酸铵在较低温度便发生分解生成 MoO₃ 并进一步被还原为 MoO₂, MoO₂ 溶解于 NaCl-KCl 熔盐中并随之渗入坯体的孔隙内^[14],随后与 C 发生反应生成 Mo₂C,并随时间延长,生成具有一定厚度的连续的 Mo₂C 涂层。图 1 所示为 Mo₂C 涂层改性 C/C 复合材料坯体截面的 XRD 谱,图中存在 C、Mo₂C 两相的衍射峰,表明制备的改性涂层确为 Mo₂C 涂层。

图 2 所示为不同反应温度下制备的 Mo₂C 涂层改性 C/C 复合材料坯体的截面形貌。从图 2(a)可以看出,由针刺整体毡制备的 C/C 复合材料坯体内存在大量孔隙,呈连通的网状结构。根据孔隙的分布、形貌和尺寸,可分为两类:第一类是尺寸为几十微米到几百

微米的较大孔隙，主要分布在纤维密度低的网胎层和针刺纤维与无纬布纤维的交界处，其表面均匀的分布着白色的 Mo_2C 涂层；第二类是尺寸为几微米到十几微米的较小孔隙，主要分布在无纬布层纤维束之间。在无纬布纤维束外表面生成了均匀 Mo_2C 涂层，而纤维束之间的闭孔没有 Mo_2C 涂层，说明熔盐易于渗入坯体中的第一类较大孔隙，而难以渗入纤维束之间的闭孔。由图 2(b)~(e)可看出，随反应温度提高， Mo_2C 涂层厚度由 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增大到 $6.5\text{ }\mu\text{m}$ ，而涂层与碳纤维间热解炭层的厚度逐渐降低。以上结果同时表明，反应过程中碳纤维周围的热解炭层参与反应生成 Mo_2C ，碳纤维未参与反应，有利于保证复合材料的力学性能。

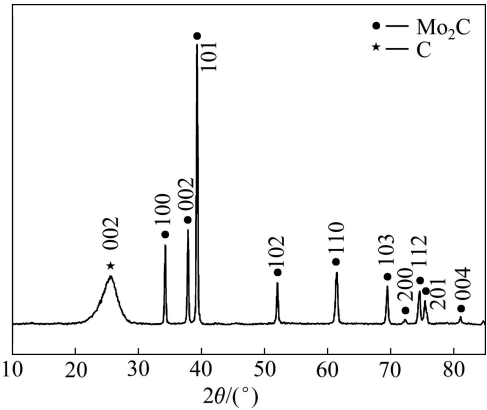


图 1 Mo_2C 涂层改性 C/C 复合材料坯体的 XRD 谱
Fig. 1 XRD pattern of Mo_2C interlayer-coated C/C composite preform

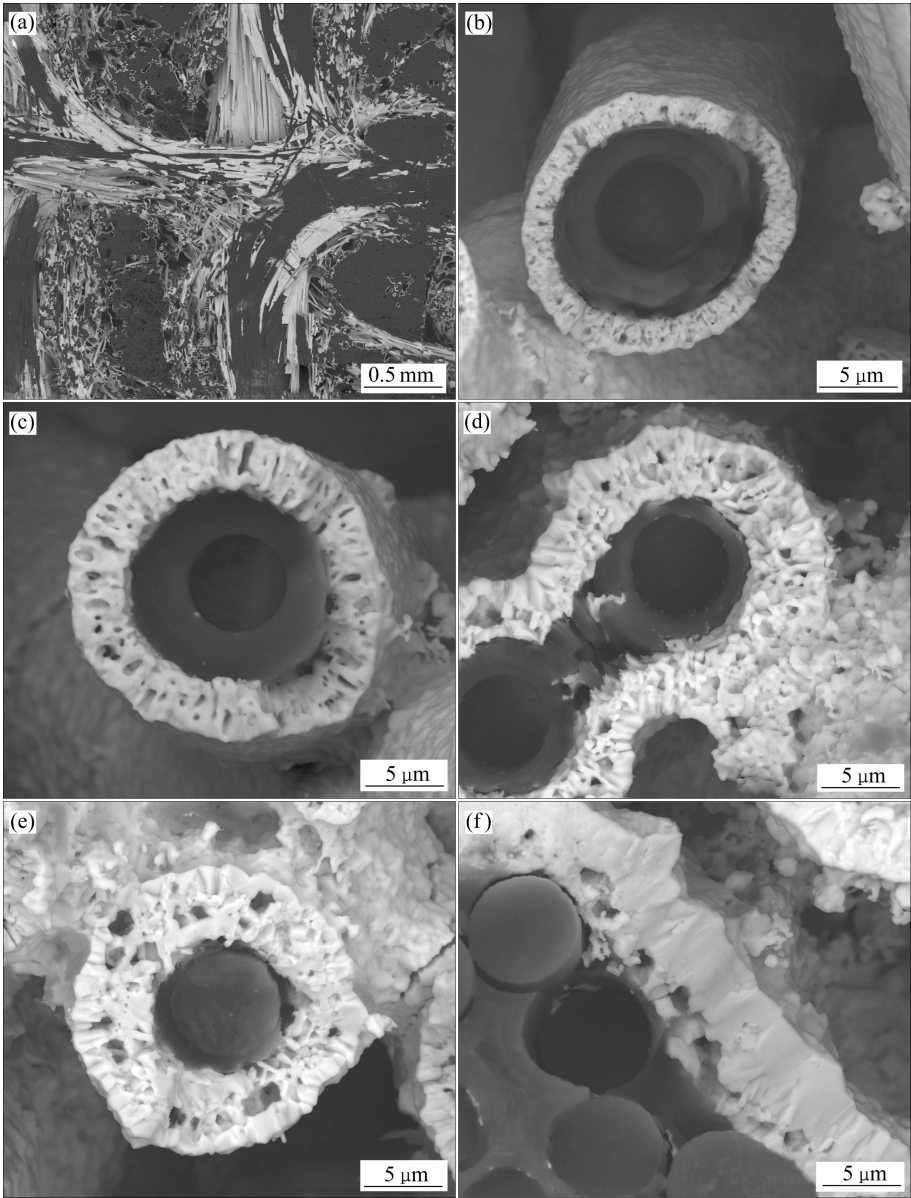


图 2 不同制备温度下 Mo_2C 涂层改性 C/C 复合材料坯体的截面形貌
Fig. 2 Cross-section morphologies of Mo_2C interlayer-coated C/C composite preforms at different preparation temperatures: (a) Low magnification; (b) $950\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $1000\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $1050\text{ }^\circ\text{C}$; (e) $1100\text{ }^\circ\text{C}$; (f) $1150\text{ }^\circ\text{C}$

2.2 C/C-Cu 复合材料的物相与显微组织

图3所示为制备的 C/C-Cu 复合材料的 XRD 谱, 复合材料由 C、 Mo_2C 和 Cu 相组成。图4所示为 C/C-Cu 复合材料的显微组织。由图4可看出, 复合材料由碳纤维、热解炭、 Mo_2C 、Cu 和孔隙组成。由图4(a)可以看出, 无纬布和网胎相互交替排布, 能谱分析表明灰色相为 Cu, 黑色相为 C 相。Cu 充分地填充了坯体内的孔隙, 主要分布在网胎层和无纬布纤维层和针刺纤维束交界处, 形成了连通的网状结构。从图4(b)可看出, 碳纤维(C_f)外侧依次为热解炭层(PyC)、 Mo_2C 涂层和 Cu 基体, Mo_2C 涂层与热解炭层和 Cu 基体之间结合良好, 没有因热失配而产生裂纹。改性 Mo_2C 涂层的形成使不润湿的 Cu/C 界面转换成了原位反应生成的 C/ Mo_2C 界面与润湿的 Cu/ Mo_2C 界面, 改善了复合材料界面的结合, 实现了无压熔渗制备 C/C-Cu 复合材料。

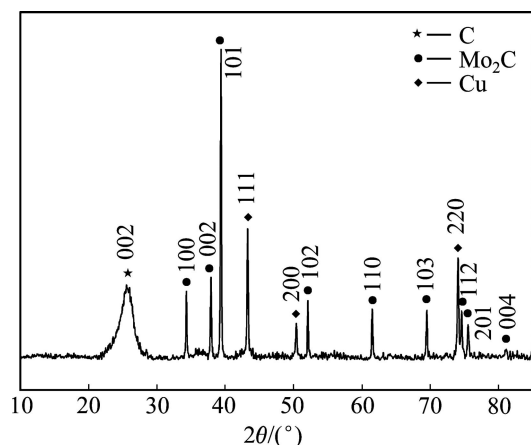


图3 C/C-Cu 复合材料的 XRD 谱

Fig. 3 XRD pattern of C/C-Cu composite

2.3 反应温度对 C/C-Cu 复合材料性能的影响

表1所示为不同反应温度下制备的 Mo_2C 改性涂层对 C/C-Cu 复合材料的密度、开孔率、电阻率和抗弯强度的影响。由表1可看出, 随着反应温度提高, C/C-Cu 复合材料的密度逐渐增大, 开孔率逐渐减小。这主要是由于随反应温度提高, 一方面, C/C 坯体内部孔隙表面被 Mo_2C 涂层覆盖的面积增大, Cu 的渗入体积增加, 孔隙减小, 密度增加; 另一方面, Mo_2C 涂层厚度的增加, 涂层与碳纤维间剩余热解炭的厚度减小, 即复合材料中 Mo_2C 含量提高, 故 C/C-Cu 复合材料的密度增大。本实验中制备的 C/C-Cu 复合材料具有良好的导电性能, 随反应温度提高, 电阻率由 $0.245 \mu\Omega\cdot\text{m}$ 逐渐降低到 $0.150 \mu\Omega\cdot\text{m}$, 这主要是由于随着反应温度的提高, 复合材料的密度逐渐增大, 孔隙

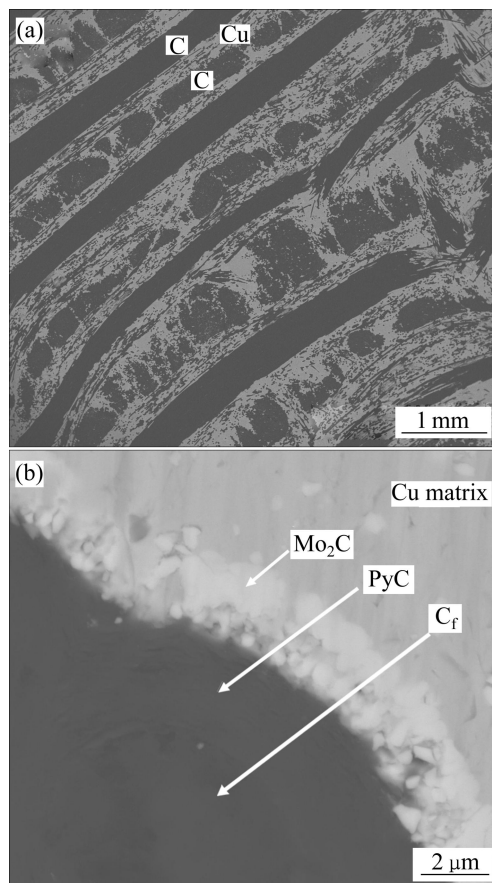


图4 C/C-Cu 复合材料的显微组织

Fig. 4 Microstructures of C/C-Cu composite

逐渐减小, 且复合材料中 Cu 相和 Mo_2C 相所占比例提高, 二者的电阻率均低于 C/C 坯体的电阻率, 因此, 复合材料的电阻率降低。

随着反应温度的提高, 复合材料的抗弯强度先增大后减小, 在反应温度为 1000°C 时达到最大值 251.83 MPa 。图5所示为 C/C-Cu 复合材料的断口形貌。由图5(a)可看出, 断裂面存在拔出的纤维及纤维从热解炭中拔出后留下的孔洞, 而 Cu 相呈明显的塑性断裂特征。由图5(b)中可看出, 纤维与纤维周围的热解炭层其断裂面不在同一平面, 形成阶梯状断口形貌, 材料断裂时, Mo_2C 层及碳纤维周围热解炭层的存在增加了材料断裂时的裂纹扩展路径, 有利于复合材料强度的提高。 Mo_2C 涂层反应温度为 950°C 时, 熔盐的流动性相对较差, 坯体孔隙表面被 Mo_2C 涂层覆盖的完整性不足, 使 C/C-Cu 复合材料的致密性较低、开孔率较大, 因此, 其强度也较低。当温度由 1000°C 逐渐提高至 1150°C 时, 由于涂层增厚, 涂层与纤维间热解炭消耗增多, 阶梯状断裂作用被削弱, 因此, 强度降低。界面结合强度对复合材料的力学性能有很大影响,

表 1 Mo₂C 涂层制备温度对 C/C-Cu 复合材料的性能影响

Table 1 Influence of preparation temperature of Mo₂C interlayer on properties of C/C-Cu composites

Reaction temperature/ ℃	Density/ (g·cm ⁻³)	Open porosity/ %	Electrical resistivity/ (μΩ·m)	Flexural strength/ MPa
950	3.44	4.49	0.245	237.43
1000	3.62	3.04	0.244	251.83
1050	4.14	2.87	0.206	241.45
1100	4.47	2.79	0.167	214.68
1150	4.73	2.68	0.150	193.98

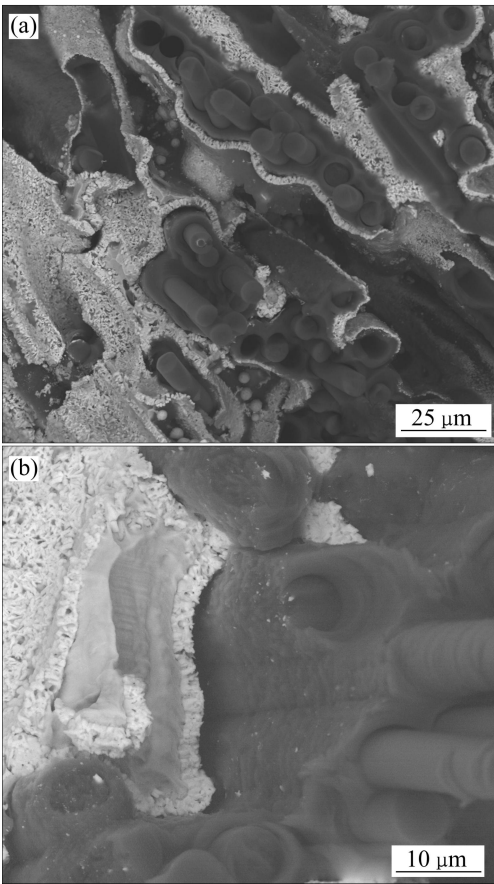


图 5 C/C-Cu 复合材料的断口形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of C/C-Cu composite

良好的界面结合可保证材料断裂过程中应力的有效传递，但过强的界面结合强度会使裂纹快速穿越复合材料整体，趋向于产生脆性断裂的平面状断裂面。因此，为了使复合材料获得良好的力学性能，界面结合强度应适中。APPENDINO 等^[15]研究了 Cr、Mo、W 的碳化物用于改善 Cu/C 的界面连接性能，结果表明：Mo₂C 即可实现 Cu 和三维 C/C 复合材料的有效连接，但接头处的剪切强度仅为 6~11 MPa，表明采用 Mo₂C 作为

中间层连接 Cu 和 C/C 复合材料不会导致过大的界面结合强度。本实验中制备的 C/C-Cu 复合材料的阶梯状断口形貌亦表明其界面结合强度适中，裂纹可沿界面扩展发生偏转，有利于复合材料力学性能的提高。

2.4 C/C-Cu 复合材料的摩擦磨损性能

图 6 所示为 C/C-Cu 复合材料摩擦因数和体积磨损率与 Mo₂C 改性涂层制备温度的关系。由图 6(a)可看出，不同反应温度制备的复合材料的摩擦因数均随磨损时间的延长先增大后减小，然后趋于平稳。随着反应温度的提高，摩擦因数逐渐增大，一方面，由于涂层反应温度的提高，复合材料中 Mo₂C 所占的比例随之提高，材料的密度随之增大，即 C 相所占比例降低，形成的具有自润滑作用的表面膜减少；另一方面，反应温度提高，Mo₂C 涂层增厚，摩擦过程中 Mo₂C 颗粒对摩擦表面膜具有一定的破坏作用，因此，摩擦因数增大。从图 6(b)可看出，Mo₂C 涂层制备温度为 1000 ℃ 时，试样的体积磨损率最低，这是由于此时 Mo₂C 颗粒的承载作用大于其对摩擦膜的破坏作用，使复合材料与对偶的真实接触面积减小，因此，磨损

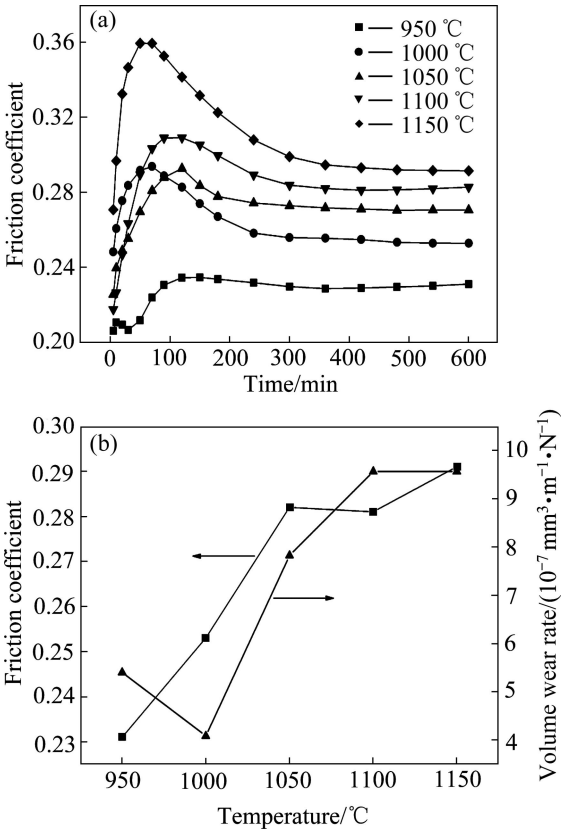


图 6 Mo₂C 涂层制备温度对 C/C-Cu 复合材料的摩擦因数和体积磨损率的影响

Fig. 6 Influence of preparation temperature of Mo₂C interlayer on friction coefficient and volume wear rate of C/C-Cu composites

量最低。图 7 所示为 Mo_2C 改性涂层制备温度分别为 1000 °C 和 1150 °C 时 C/C-Cu 复合材料试样磨损表面形貌。由图 7 可看出, 当涂层制备温度为 1000 °C 时, 试样摩擦表面膜较光滑, 且摩擦膜致密性较好; 而涂层制备温度为 1150 °C 时, 试样摩擦表面膜的光滑度差且存在较多的剥落现象。其主要原因是 Mo_2C 涂层制备温度为 1150 °C 时, Mo_2C 涂层更厚, 约为 6.5 μm , 与涂层制备温度为 1000 °C 试样相比, 材料中炭相所占比例低, 炭相的自润滑作用不足, 此外, Mo_2C 增多导致摩擦过程中 Mo_2C 颗粒的破坏作用更明显, 因此, 材料的磨损率大。

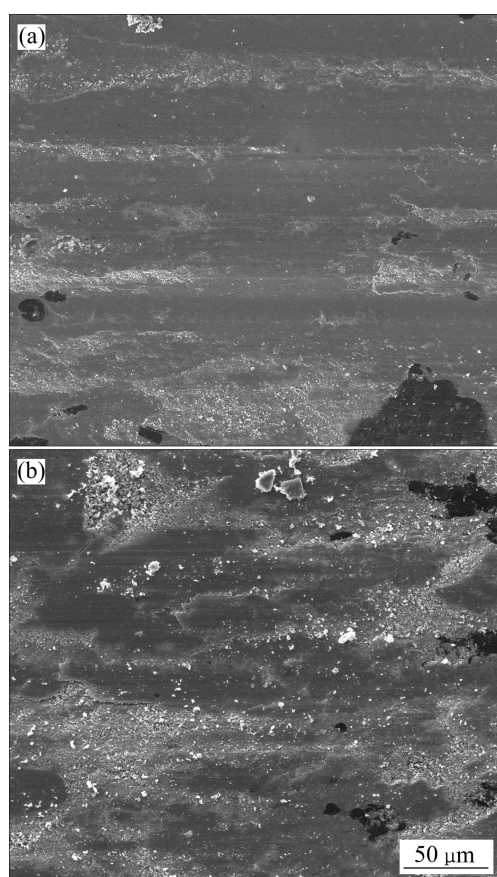


图 7 Mo_2C 涂层制备温度为 1000 °C 和 1150 °C 时 C/C-Cu 复合材料试样磨损表面形貌

Fig. 7 Worn surface morphologies of C/C-Cu composite prepared by Mo_2C interlayer at 1000 °C(a) and 1150 °C(b)

3 结论

1) 采用熔盐法在低密度 C/C 复合材料坯体孔隙表面制备了均匀的 Mo_2C 改性涂层, 随着反应温度的提高, Mo_2C 涂层的厚度逐渐增大。

2) Mo_2C 改性涂层改善 C/C 复合材料坯体与 Cu

的润湿性, 可通过无压熔渗 Cu 制备 C/C-Cu 复合材料。随改性涂层制备温度的提高, C/C-Cu 复合材料的密度随之增大, 电阻率随之降低; 抗弯强度先增大后减小, 在涂层制备温度为 1000 °C 时, 抗弯强度达到最大值 251.83 MPa。

3) C/C-Cu 复合材料的摩擦因数随磨损时间增加先增大后减小, 并逐渐趋于稳定, 随 Mo_2C 改性涂层制备温度的提高, 摩擦因数增大, 磨损率在反应温度为 1000 °C 时最低。

REFERENCES

- [1] YANG L, RAN L P, YI M Z. Carbon fiber knitted fabric reinforced copper composite for sliding contact material[J]. Materials and Design, 2011, 32: 2365–2369.
- [2] LIN Xiu-zhou, ZHU Min-hao, MO Ji-liang, CHEN Guang-xiong, JIN Xue-song, ZHOU Zhong-rong. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2): 292–299.
- [3] 冉丽萍, 周文艳, 赵新建, 易茂中, 杨琳. 熔渗法制备 C/C-Cu 复合材料的力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1607–1613.
- [4] RAN Li-ping, ZHOU Wen-yan, ZHAO Xin-jian, YI Mao-zhong, YANG Lin. Mechanical properties of C/C-Cu composites fabricated by molten infiltration method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1607–1613.
- [5] MOUSTAFA S F, EL-BADRY S A, SANAD A M, KIEBACK B. Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders[J]. Wear, 2002, 253: 699–710.
- [6] 杨琳, 易茂中, 冉丽萍. C/C/Cu 及 C/Cu 复合材料摩擦磨损行为比较[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6): 97–102.
- [7] YANG Lin, YI Mao-zhong, RAN Li-ping. Comparative study of friction and wear behavior of C/C/Cu and C/Cu composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(6): 97–102.
- [8] ZHANG Ming-yu, SU Zhe-an, LI Jian-li, HUANG Qi-zhong. Bending properties and fracture mechanism of C/C composites with high density preform[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1795–1800.
- [9] LE B L, HE L L, YI M Z, RAN L P, XU H J, GE Y C, PENG K. New insights into the microstructure of the friction surface layer of C/C composites[J]. Carbon, 2011, 49: 4554–4562.
- [10] 冉丽萍, 易茂中, 王朝胜, 杨琳, 易振华. C/C-Cu 复合材料的组织和摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 530–535.
- [11] RAN Li-ping, YI Mao-zhong, WANG Chao-sheng, YANG Lin, YI Zhen-hua. Friction and wear behavior of C/C-Cu composites

- fabricated by infiltrating molten Cu into C/C performs[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 530–535.
- [9] TAO Z C, GUO Q G, GAO X Q, LIU L. The wettability and interface thermal resistance of copper/graphite system with an addition of chromium[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 128: 228–232.
- [10] RAN L P, PENG K, YI M Z, YANG L. Ablation property of a C/C-Cu composite prepared by pressureless infiltration[J]. Materials Letters, 2011, 65: 2076–2078.
- [11] 胡 锐, 李海涛, 薛祥义, 李金山, 寇宏超, 常 辉. Ti 对 C/Cu 复合材料界面润湿及浸渗组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5): 840–844.
- HU Rui, LI Hai-tao, XUE Xiang-yi, LI Jin-shan, KOU Hong-chao, CHANG Hui. Effect of Ti on interface wettability and microstructure of C/Cu composites prepared by infiltration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 840–844.
- [12] 易振华, 易茂中, 冉丽萍, 杨 琳. 添加钛对炭/炭复合材料渗铜的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(7): 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(7): 1214–1218.
- [13] SITTNER C E, SCHRANK C, NEUBAUER E, EIPER E, KECKES J. Modification of wetting of copper (Cu) on carbon (C) by plasma treatment and molybdenum (Mo) interlayers[J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 5343–5346.
- [14] SONG J L, GUO Q G, TAO Z C, GAO X Q, SHEN P, SHI J L, LIU L. Mo₂C intermediate layers for the wetting and infiltration of graphite foams by liquid copper[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 2965–2970.
- [15] APPENDINO P, FERRARIS M, CASALEGNO V, SALVO M, MEROLA M, GRATTAROLA M. Proposal for a new technique to join CFC composites to copper[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 348: 102–107.

(编辑 李艳红)