

C/C/Cu 及 C/Cu 复合材料摩擦磨损行为比较

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优异耐磨性能的碳纤维整体织物/炭/铜(C/C/Cu)复合材料, 在 UMT-3 多功能摩擦磨损测试仪上考察复合材料的摩擦磨损行为, 并与粉末冶金方法制备的滑板用炭/铜(C/Cu)复合材料进行了对比分析。结果表明: C/C/Cu 复合材料形成了连通状的网络结构, 其导电性能及力学性能明显优于传统 C/Cu 复合材料; 2 种复合材料摩擦系数相近; 2 种复合材料及其对偶的磨损率随载荷增大而增大; 与 C/Cu 相比, C/C/Cu 的耐磨性较优, 且对对偶损伤较小, 在 70 N 载荷下更为明显。连通状的网络结构及磨损表面形成的磨屑保护层是 C/C/Cu 复合材料具有良好摩擦磨损特性的主要原因。

关键词: 铜基复合材料; 炭/炭坯体; 熔渗; 摩擦; 磨损

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A

Comparative study of friction and wear behavior of C/C/Cu and C/Cu composites

YANG Lin, YI Maozhong*, RAN Liping

(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 pressureless infiltration. The tribological behavior of the composite was evaluated using UMT-3 test system, and compared with C/Cu composite prepared by traditional powder metallurgy process. C/C/Cu composite has better electrical conductivity and mechanical performance compared to C/Cu composite, which may be attributed to the 3D net-like interconnected structure. The friction coefficients of both composites are similar. The wear rates of both the composites and corresponding counterparts increase with the rising load. C/C/Cu composite shows a significantly better wear resistance and causes small damage to the counterpart, especially under a load of 70 N. The interconnected structure and a continuous debris layer are main causes for favorable tribological characteristics of C/C/Cu composite.

Keywords: copper matrix composite; carbon/carbon preform; infiltration; friction; wear

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。此类材料的摩擦磨损现象广泛存在于电机电刷、整流子和受电弓与金属导线之间^[1],其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,近年来滑动导电材料的研究备受关注。由于滑动导电材料在使用过程中,除了受到机械力和摩擦力作用以外,还有焦耳热、电弧的灼烧以及因电流极性而产生的材料转移,因此通常要求其具有良好的导电性、高耐磨性和较好的力学强度^[2-4]。炭/铜(C/Cu)复合材料是典型的滑动导电材料,广泛地用于制造电刷、滑块

和触点等,它主要依靠铜来改善材料的导电能力,依靠炭的减摩、自润滑来提高材料的耐磨性。但铜含量的增加在改善导电、导热性的同时,导致材料耐磨性下降,而炭含量的增加在改善润滑、耐磨性的同时削弱了材料的强度和导电性^[5-6]。Beech^[7]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,将能更有效地提高复合材料的导电性和耐磨性。传统的制造 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。

本文中尝试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,研究了该材料的组织结构、物理性能及摩擦磨损行为,并与粉末冶金方法制备的滑板用 C/Cu 复合材料进行比较,为该类材料在要求高导电性和耐磨性领域中的应用提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料制备

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 1.6 g/cm³,成为三维互连通的具有开孔隙网络的 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,无压熔渗制得 C/C/Cu 复合材料。本文中选用比较材料(粉末冶金方法制备的 C/Cu 复合材料)取自实际使用的电力机车受电弓滑板。

1.2 性能评价

采用 CSS-44100 型电子万能试验机和 JB6-3/6 冲击试验机测试试样弯曲强度和抗冲击强度。抗弯强度和抗冲击强度试验中负荷方向垂直于炭毡和无纬布方向。用 JB 690-65/0.02 级 QJ36 型单双臂两用电桥测试试样电阻率。用 JSM 5600LV 型扫描电镜观察材料显微结构和磨损表面形貌。

摩擦实验在 UMT-3 多功能微摩擦磨损测试仪上进行,按销-块线接触方式作往复运动。销对偶为紫铜,往复速度为 1500 次/min,滑动距离为 15 mm,载荷选用 30 N、50 N 和 70 N,实验时间 30 min,试样尺寸 25 mm×25 mm×15 mm,试验前 25 mm×25 mm 的工作面均经研磨抛光至表面粗糙度 $R_a=0.02\sim0.05\ \mu\text{m}$,并用丙酮超声波清洗。质量测量在 TG328A 光学分析天平上进行,可精确至 $1.0\times10^{-4}\ \text{g}$ 。按 GB 12444.2-90 测量磨痕宽度并按下式转换为体积磨损率:

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

$$k=V/(LN)$$
 (2)

其中: V 为体积磨损量; B 为磨痕长度; r 为销对偶圆弧半径; b 为磨痕宽度; k 为比磨损率; L 为滑动距离; N 为施加的法向载荷。

2 结果与分析

2.1 组织结构及物理性能

表 1 列出了 2 种 C/Cu 复合材料的物理、力学性能。可以看出 C/C/Cu 复合材料的物理、力学性能明显优于粉末冶金方法制备的 C/Cu 复合材料。主要表现为 C/C/Cu 复合材料具有比 C/Cu 复合材料低的电阻率和高抗弯强度及抗冲击强度,这与材料的显微组织结构密切相关。图 1 为 2 种复合材料组织形貌。图 1(a)所示的 C/C/Cu 复合材料显微组织中黑色区域为纤维整体织物,白色区域为铜合金。从图中可看出,熔融铜合金充分填充 C/C 坯体内连贯的孔隙,形成网络状分布的铜合金基体。碳纤维整体织物和铜基体形成“双连通”的网络结构可以充分发挥 Cu 的优良导电性,且对提高复合材料的力学性能十分有利。而图 1(b)所示的 C/Cu 复合材料中 Cu 相孤立地分布于 C 相之间,故其力学性能及导电性能明显低于 C/C/Cu 复合材料。

2.2 摩擦磨损性能

表 2 列出了 2 种复合材料及其对偶在不同载荷下的体积磨损率和摩擦系数。2 种复合材料摩擦系数相近,均随载荷增大而增大。在本文中的实验条件下 C/C/Cu 复合材料耐磨性远优于 C/Cu 复合材料,且对对偶损伤较小。随载荷增加, C/Cu 复合材料的磨损率迅速增大,而 C/C/Cu 复合材料磨损率变化不明显。由于 2 种复合材料化学成分相近(见表 1),故可以推断磨损性能的巨大差异与其组织结构有密切关系。

2.3 磨损形貌及机制分析

图 2 所示为 C/Cu 复合材料在 70 N 载荷下的

表 1 C/C/Cu 复合材料和 C/Cu 复合材料的物理性能
Table 1 Properties of C/C/Cu composite and C/Cu composite

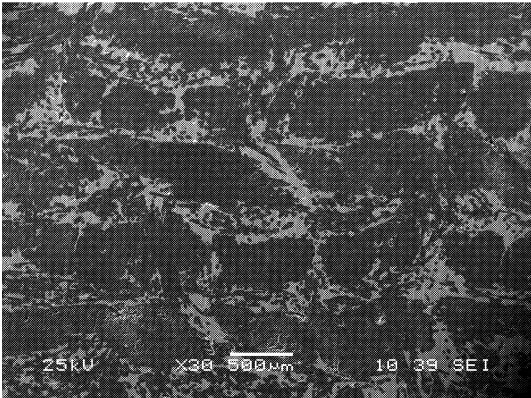
Composite	Mass fraction of Cu/%	Density/(g·cm ⁻³)	Bending strength/MPa	Shock strength/(J·cm ⁻²)	Electrical resistivity/(μΩ·m)
C/C/Cu	28	2.9	186	4.7	1.1(//)/4.2(⊥)
C/Cu	22	2.3	42	1.2	13.2

Note:“//, ⊥” represent the text direction is parallel and normal to the carbon fabric direction

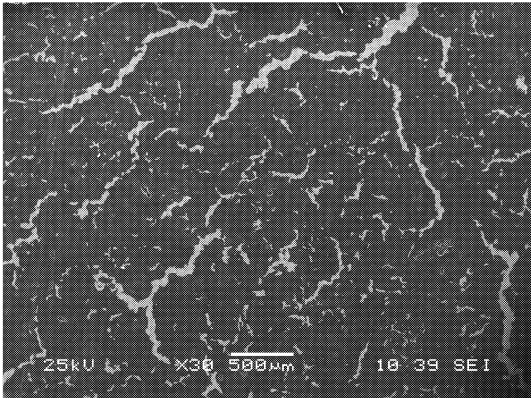
表 2 C/Cu 和 C/C/Cu 复合材料及其对偶在不同载荷下的体积磨损率和摩擦系数

Table 2 Friction coefficient and wear rate of C/Cu and C/C/Cu composites and counterparts under different loads

Load/N	Wear rate/($\times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$)				Friction coefficient μ	
	C/Cu	Counterpart mated with C/Cu	C/C/Cu	Counterpart mated with C/C/Cu	C/Cu	C/C/Cu
30	196	8.7	32.6	2.46	0.04960	0.05636
50	243	32.9	40.3	2.58	0.05976	0.05668
70	276	54.8	49.6	2.31	0.08397	0.08644

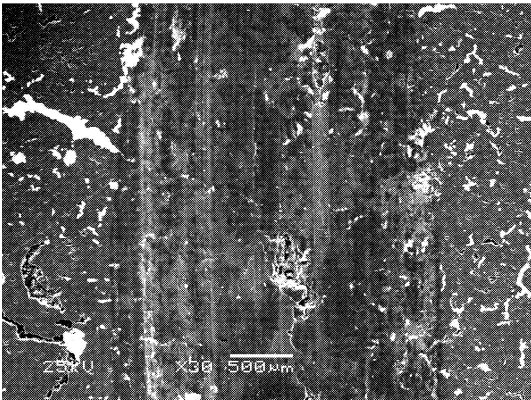


(a) C/C/Cu

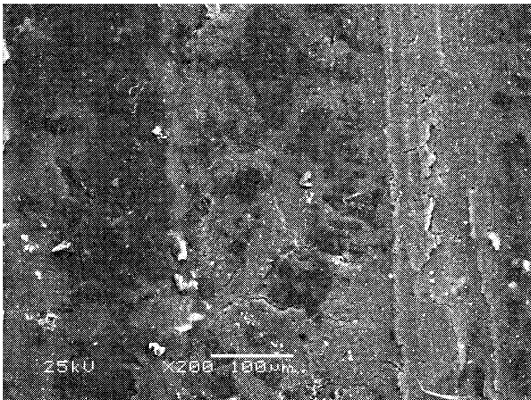


(b) C/Cu

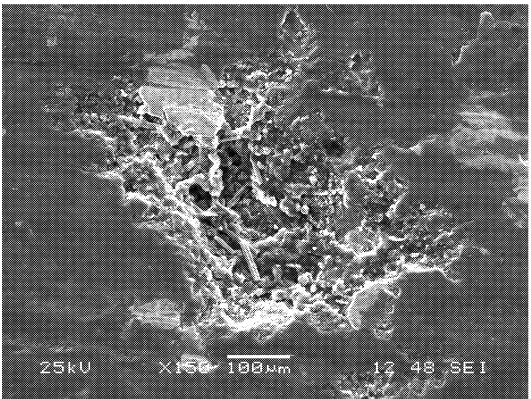
图 1 C/C/Cu 复合材料和 C/Cu 复合材料的微观组织形貌
Fig. 1 Microstructures of C/C/Cu composite and C/Cu composite



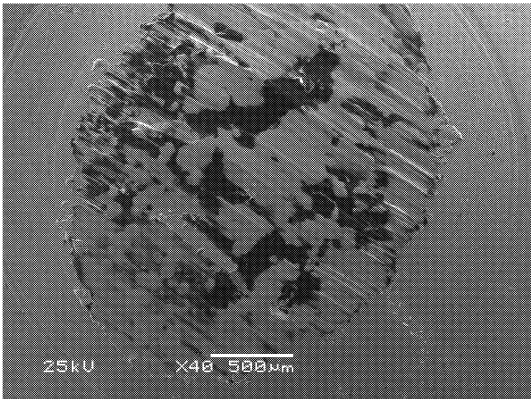
(a) Worn surface of C/Cu



(b) High magnification photograph of (a)



(c) High magnification photograph of (a)



(d) Worn surface of counterpart

图 2 C/Cu 复合材料及 Cu 对偶在 70 N 载荷下的摩擦面形貌

Fig. 2 SEM morphologies of worn surfaces of the C/Cu composite and corresponding counterpart under 70 N

磨损形貌。图 2(a)显示出 C/Cu 复合材料磨痕相对平滑，表面没有明显变形、撕裂痕迹，宽度约 2 mm。图 2(b)、2(c)是 2(a)的局部放大。通过图 2(b)可以观察到 C/Cu 复合材料磨痕表面覆盖了不完整灰色薄层，且伴有明显剥落坑。经 EDS 能谱分析证实，灰色薄层的主要成分为 Cu。说明在摩擦过程中发生了由对偶向试样的材料转移。C/Cu 复合材料中 Cu 相呈岛状弥散分布于 C 相中，由于 Cu 与 C 颗粒间结合强度低，使得 Cu 相容易在初始的粘着磨损中被撕去，粘附于 Cu 对偶的表面，在 C/Cu 复合材料磨损表面留下剥落坑。粘附于对偶表面的剥落 Cu 颗粒在压力作用下被碾压、延展，凸显于对偶表面。摩擦过程中产生的 C 磨屑填充在凹处，使得对偶表面形成如图 2(d)所示的凸凹不平，黑白相间的形貌。

图 3 所示为 C/C/Cu 复合材料及其对偶 70 N 载荷下的磨损形貌。由图 3(a)、3(b)可知，摩擦实

验进行 30 min 后，C/C/Cu 复合材料磨损表面形成了完整致密的磨屑层，磨痕宽度约 1 mm。表 3 示出的 EDS 能谱分析表明，摩擦表面由 C、Cu、Ti 和 O 组成。图 3(c)所示的复合材料磨损纵剖面证实了磨屑保护层的存在。可以看到磨屑层可以分为 2 层，分别标示为 B、C 层。能谱分析表明 B 层 C 含量稍高，元素组成与 C/C/Cu 复合材料相近。磨屑层 B 连续地附着在复合材料表面，厚度约 5 μm 。接近磨损表层的 C 层 Cu 含量稍高，成分与磨损表面 A 区相近。由双磨屑层的形成推测 C/C/Cu 复合材料发生磨损的机制可能是新旧磨屑层的不断更替。磨屑在摩擦面正压力的作用下被碾压成磨屑层后，在对偶剪切力作用下局部剥落破坏，位于下层的磨屑层重新暴露出来与对偶接触而产生磨屑，其他位置生成的磨屑颗粒也通过机械混合作用在该处形成新的磨屑层叠压在旧磨屑层之上^[5]。图 3(d)所示为与 C/C/Cu 复合材料对磨的 Cu 对偶的磨损

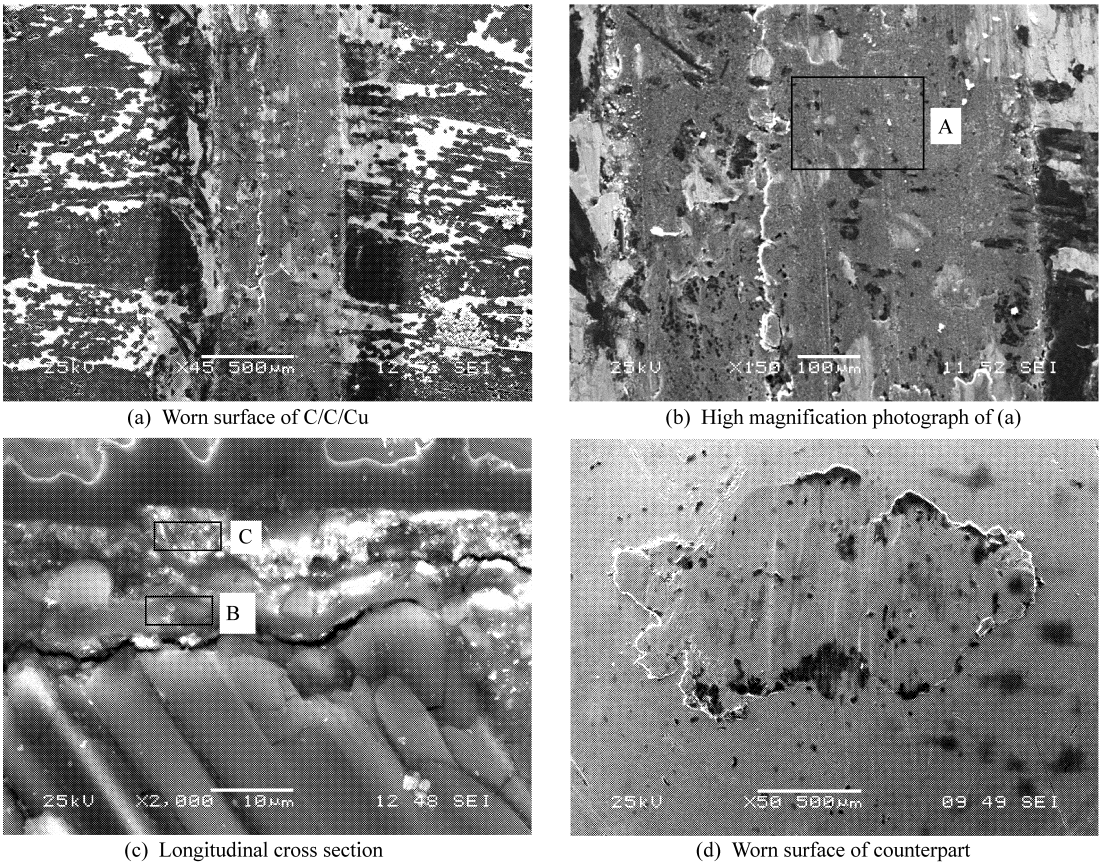


图 3 C/C/Cu 复合材料及 Cu 对偶在 70 N 载荷下的摩擦面及纵截面形貌
Fig. 3 SEM morphologies of worn surfaces and the longitudinal cross section of the C/C/Cu composite and corresponding counterpart under 70 N

表 3 C/C/Cu 复合材料表面不同区域的成分对比

	Table 3 Chemical compositions of C/C/Cu composites in different regions				wt%
	Cu	C	O	Ti	
A in Fig. 3	75.6	21.8	2.3	0.3	
B in Fig. 3	58.2	39.3	1.7	0.8	
C in Fig. 3	74.3	24.2	1.1	0.4	

表面形貌。可以看出对偶磨痕表面平滑, 没有犁沟或粘着撕裂的痕迹, 在磨痕边缘处有少量黑色的 C 相存在, 表明磨损过程未发生大规模材料转移。

图 4 为 C/C/Cu 复合材料磨损 2 min、5 min 和 10 min 时收集到的磨屑形貌。如图 4(a) 所示, 摩擦实验进行 2 min 内的磨屑细小松散, 伴有少量颗粒混合物。摩擦试验进行 10 min 时, 磨屑主要以颗粒混合物形式存在, 松散颗粒较少。摩擦进行 15 min 后, 磨屑出现了大块的剥落层。可以推断复合材料进入稳态磨损阶段后发生磨损的途径是通过对偶的剪切使磨屑层局部剥落破坏。磨屑层的局部剥坏与形成控制着复合材料的磨损率。

通过以上比较可知, C/C/Cu 复合材料耐磨性远优于 C/Cu 复合材料, 且对对偶损伤较小。其主要原因在于形成了 C 相和 Cu 相“双连通”的网络结构, 故不易出现颗粒整体剥离、脱落的现象, 磨损较小。其次, 纤维整体织物容易网罗磨屑, 磨损产生的微粒主要粘附在摩擦副接触表面上, 很少随其他磨屑抛出, 容易形成磨屑层。磨屑层在反复碾压作用下趋于光滑, 不但能抑制磨损表层材料的粘着和脱落, 而且改变了摩擦副的接触形式, 降低了复合材料与对偶的粘着倾向。同时, 碳纤维整体织物充分发挥了碳纤维的承载作用, 减少复合材料表面的塑性变形量和变形深度, 减缓了高载荷下复合材料的磨损, 使其在高载下也能保持较低的磨损率。

3 结 论

- (1) 采用熔渗法制备的 C/C/Cu 复合材料形成了连通状的网络结构, 其导电性能及力学性能明显优于粉末冶金方法制备的 C/Cu 复合材料。
- (2) 2 种复合材料摩擦系数相近。相对于 C/Cu 复合材料, C/C/Cu 复合材料耐磨性较优, 且对对偶损伤较小, 在高载荷下更为明显。2 种复合材料及其对偶的磨损率随载荷增大而增大。
- (3) 连通状的网络结构及磨损表面形成的磨屑

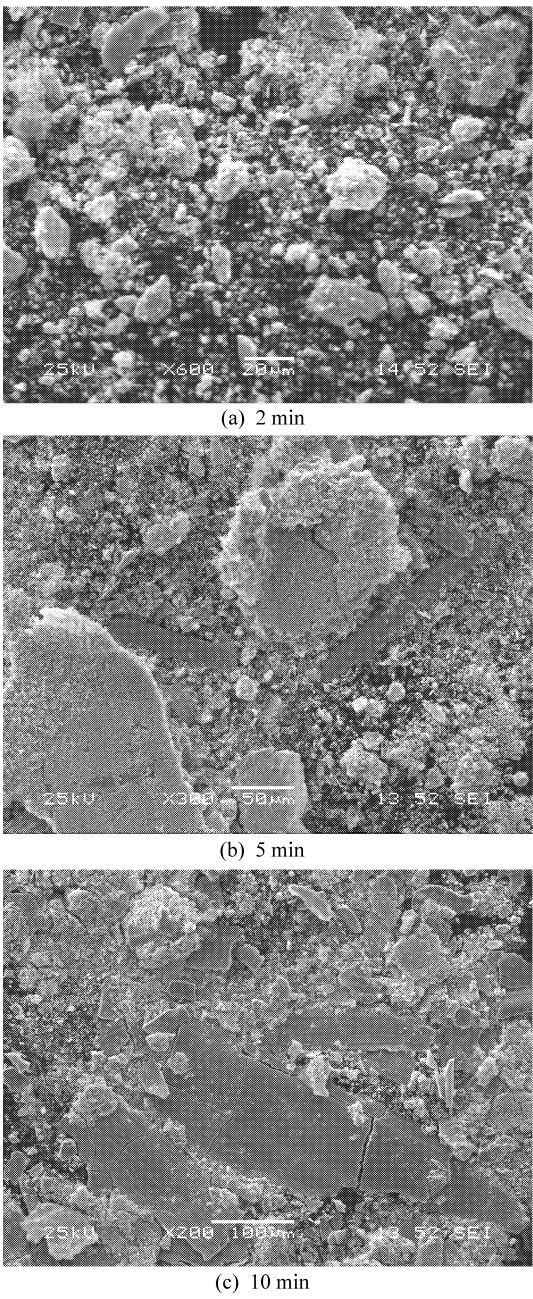


图 4 C/C/Cu 复合材料在不同摩擦时间下的磨屑形貌
Fig. 4 SEM morphologies of wear debris of C/C/Cu composites at different times

保护层是 C/C/Cu 复合材料具有良好摩擦磨损特性的主要原因。

参考文献:

[1] 胡忠良, 夏金童, 陈振华, 等. 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 Zhongliang, Xia Jintong, Chen Zhenhua, et al. Theories on carbon materials sliding against copper and influence factors

of wear of electric brushes [J]. Carbon, 2007(3): 7-11.

[2] 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.

[3] 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 Maozhong, Ran Liping. Effect of C/C preform on the tribological behavior of C/C/Cu composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 10-15.

[4] Kestursatya M, Kim J K, Rohatgi P K. Wear performance of copper/graphite composite and a leaded copper alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A339: 150-158.

[5] 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: 101.

[6] Jang Younghwan, Kim Sangshik, Lee Sangkwan, et al. Fabrication of carbon nano-sized fiber reinforced copper composite using liquid infiltration process [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(5): 781-784.

[7] Beech R N, Price M S T. Copper-graphite materials [C]// Industrial Carbon and Graphite Group of the Society of Chemical Industry: Industrial Carbon and Graphite. London: Soc Chem Ind, 1958: 448-464.