



压力-速度因素对 C_f/PF-Cu 复合材料 载流摩擦磨损性能的影响

邓朝勇¹, 张红波¹, 尹 健¹, 熊 翔¹, 王 培¹, 孙 淼¹, 吴晓光¹, 李万千²

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083

2. 中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 长沙 410004)

摘 要: 采用模压法制备了一种新型的碳纤维混杂铜网增强树脂基复合材料(C_f/PF-Cu 复合材料), 并在销盘式载流摩擦磨损试验机上进行了试验。在电流分别为 0 A 和 50 A 条件下, 研究压力(p)-速度(v)因素(简称 pv 因素, 数值分别为 5、10、15、20、25、30 和 35 MPa·m/s)对 C_f/PF-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响。结果表明: 在非载流条件下, 摩擦因数随 pv 值的增加呈逐渐下降趋势, 质量磨损率则呈缓慢增加趋势, 变化均非常小。在载流条件下, 摩擦因数随 pv 值的增加变化不大, 而质量磨损率则变化剧烈; 当 pv 值在 15~35 MPa·m/s 范围时, 质量磨损率随 pv 值的增加而急剧增加。在载流摩擦磨损过程中, 随着 pv 值的增加, 摩擦磨损机制逐渐由磨粒磨损转变为黏着磨损, 在 pv 值达到 35 MPa·m/s 时则表现为显著的氧化磨损和熔融喷溅。

关键词: C_f/PF-Cu 复合材料; 摩擦; 磨损; 磨损机制

文章编号: 1004-0609(2021)-03-0682-09

中图分类号: U214.9

文献标志码: A

引文格式: 邓朝勇, 张红波, 尹 健, 等. 压力-速度因素对 C_f/PF-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 682-690. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39014

DENG Chao-yong, ZHANG Hong-bo, YIN Jian, et al. Effect of pressure-velocity factor on sliding friction and wear of C_f/PF-Cu composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(3): 682-690. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39014

在电力机车弓网系统里, 受电弓滑板的作用是用向导线取流, 其性能对电力机车的正常运行有着重要影响^[1-3]。在过去数十年中, 科研人员先后开发了粉末冶金滑板、浸金属滑板和纯炭滑板等多种高性能受电弓滑板材料, 并对各滑板材料的磨损机理进行了深入研究^[4-17]。然而, 影响摩擦过程的因素很多, 磨损机理非常复杂。已有大量的研究表明^[18-29], 摩擦磨损过程中的电流、压力、速度、电弧、气氛、湿度等因素均对受电弓滑板的摩擦磨损性能产生显著的影响。

虽然已经对受电弓滑板材料摩擦磨损过程进行了大量的研究, 但由于之前的研究多数集中在单因素方面, 对多因素的综合考虑非常少, 使得摩擦

磨损机制仍然存在争议^[30-32]。因此, 为了更好地理解受电弓滑板的摩擦磨损机制, 就需要同时考虑多个因素对摩擦磨损过程的影响。因为这些因素之间可能会产生协同效应, 而这个问题一直被研究者所忽视。

压力(p)-速度(v)因素(简称 pv 因素)在机械摩擦领域具有相互协同作用, 这早已被大家所熟知, 但在弓网系统的电气磨损领域却鲜有报道。EL-REFAIE 等^[33]、HU 等^[34]和 WANG 等^[35]对 pv 因素在电刷领域的应用进行了报道, 结果表明 pv 因素可以用于表征电刷的磨损率和使用寿命, 并有助于进一步研究其摩擦磨损机制。但上述研究结果仅适用于试验电流、速度和压力均极低的电刷材

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51302322); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3514)

收稿日期: 2019-05-20; **修订日期:** 2020-06-10

通信作者: 尹 健, 副教授, 博士; 电话: 0731-88836877; E-mail: melodycyd@163.com

料,对于电流、速度和压力均极高的受电弓滑板材料并不适用。因此,本文采用本课题组最新制备的一种碳纤维混杂铜网增强树脂基复合材料(C_f/PF-Cu composites)在模拟受电弓滑板实际工况的条件下,考察了 pv 因素的协同作用对摩擦磨损机制的影响,为 C_f/PF-Cu 复合材料在滑动导电材料方面的应用提供试验基础。

1 实验

1.1 材料制备

采用酚醛树脂(PF)(质量分数为 55%)的预浸炭布,按一层预浸炭布一层铜网的方式进行叠层制备预制体。先将预制体置于烘箱内预固化,然后用平板硫化机在 150 ℃和 15 MPa 下对其进行压制成型。取出压制样品置于 180 ℃烘箱内释放应力 2 h,而后随烘箱自然冷却至室温,制得树脂模压型 C_f/PF-Cu 复合材料。该复合材料的制备工艺如图 1 所示,其基本性能如表 1 所示。

表 1 C_f/PF-Cu 复合材料的基本性能
Table 1 Basic physical properties of C_f/PF-Cu and pure carbon composites

Density/ (g·cm ⁻³)	Bending strength/ MPa	Compression strength/ MPa	Impact energy/ (J·cm ⁻²)	Electrical resistivity/ (μΩ·m)
2.01	256.28	308.66	3.24	16.5

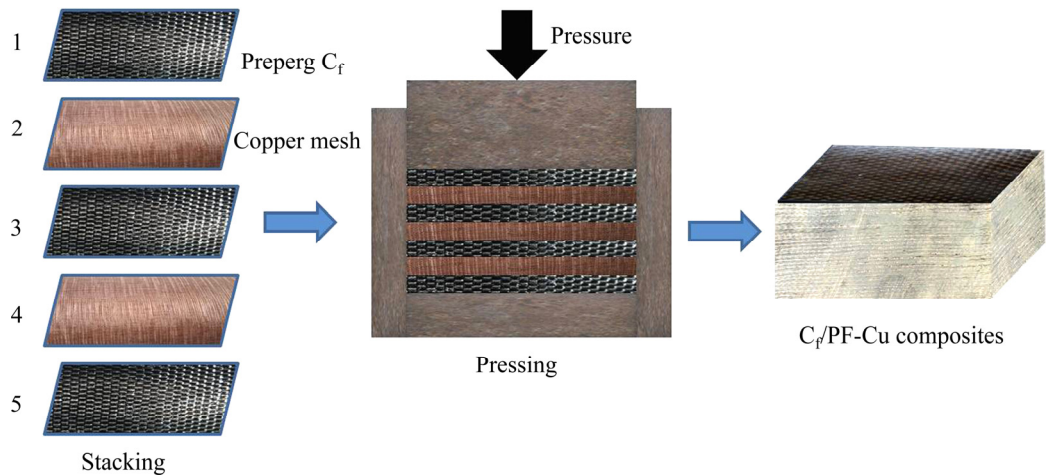


图 1 树脂模压型 C_f/PF-Cu 复合材料的制备工艺示意图
Fig. 1 Scheme showing preparation process of resin hot-pressing type C_f/PF-Cu composites

1.2 载流摩擦磨损性能测试

采用 HST-100 型高速载流摩擦实验机测试 C_f/PF-Cu 复合材料的载流摩擦磨损性能,设定速度范围为 10~40 m/s,压力范围为 0.3~0.9 MPa, pv 值分别取 5、10、15、20、25、30 和 35 MPa·m/s,电流分别取 0 A 和 50 A。样品尺寸为 20 mm×10 mm×8 mm,其中 10 mm×8 mm 为摩擦面。采用光敏二极管测量伴生电弧光强,K 型热电偶测量试样表面温度;采用 Quanta FEG 250 型扫描电子显微镜观察试样摩擦表面形貌,以及采用 EDAX2000 型能谱仪对特定区域进行元素分析。图 2 所示为载流摩擦磨损试验机结构示意图。

2 结果与分析

2.1 pv 因素对摩擦因数和磨损率的影响

图 3 所示为 pv 因素对摩擦因数和质量磨损率的影响。由图 3(a)可知,在非载流条件下,摩擦因数随 pv 值的增加呈逐渐下降趋势,而在载流(50 A)条件下, pv 值在 5~20 MPa·m/s 范围内,摩擦因数随 pv 值的增加呈下降趋势, pv 值在 20~35 MPa·m/s 范围内,摩擦因数随 pv 值的增加呈波浪式增加。在整个测试范围内,载流过程中的摩擦因数均显著低于非载流摩擦因数。由图 3(b)可知,载流摩擦磨损过程中的质量磨损率均远高于非载流摩擦磨损过程中的。在非载流摩擦磨损过程中,质量磨损率随 pv 值的增加呈缓慢增加趋势,变化非常小。而

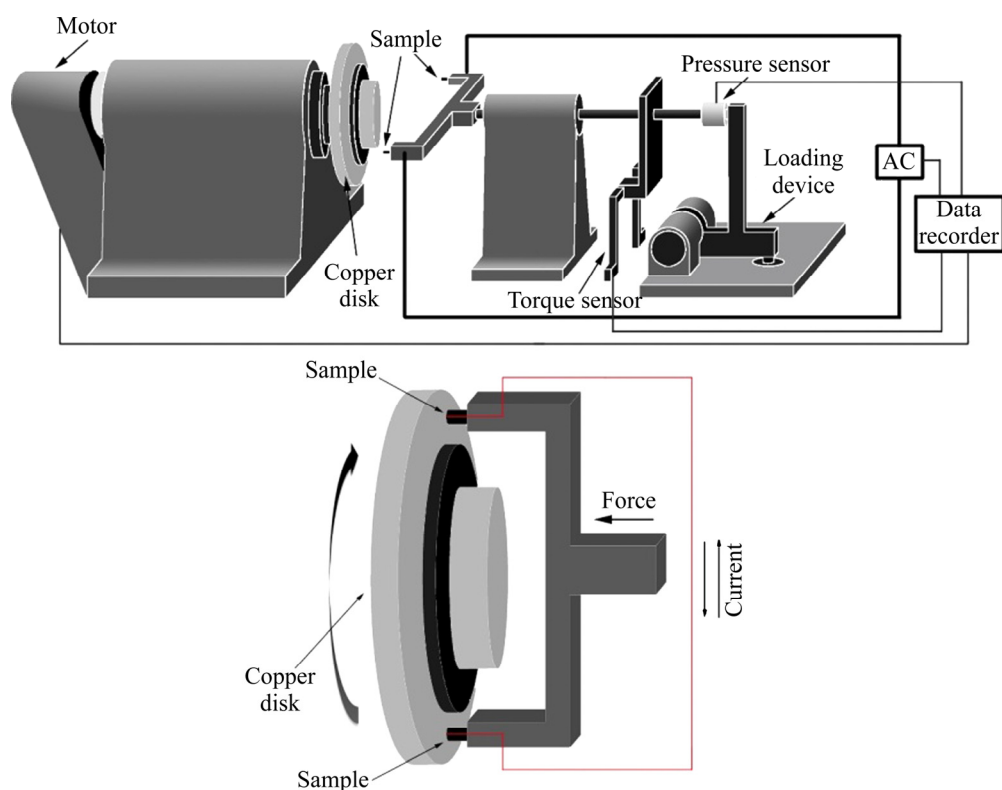


图2 HST-100型多功能载流摩擦磨损试验机结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HST-100 multifunction friction and wear tester with electric current

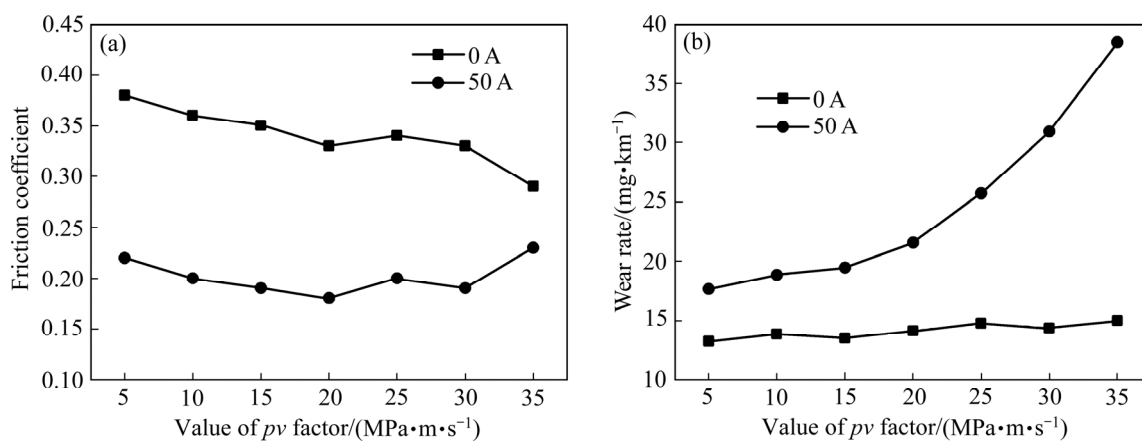


图3 pv 因素对不同电流时摩擦因数和磨损率的影响

Fig. 3 Effects of pv factor on friction coefficient(a) and wear rate(b) with different electric currents

在载流摩擦磨损过程中, pv 值在 5~15 MPa·m/s 范围时, 质量磨损率随 pv 值的增加缓慢增加; pv 值在 15~35 MPa·m/s 范围时, 质量磨损率随 pv 值的增加开始急剧增加。

有研究表明^[36], 机械磨损的质量磨损率与摩擦速度和加载压力之间存在线性相关, 可表示为

$$\Delta m = k \cdot p \cdot s \quad (1)$$

式中: k 为摩擦因数; p 为加载压力; s 为滑动距离。考虑到实际摩擦过程中接触压力跟加载压力并非完全一致, 故对式(1)进行修正:

$$\Delta m = k \cdot p \cdot A \cdot v \cdot t \quad (2)$$

式中: p 为实际接触压力; A 为实际接触面积; v 为滑动速度; t 为滑动时间。那么, 单位时间内的质量磨损率(ω)可表示为

$$\omega = \frac{\Delta m}{t} = k \cdot A \cdot pv \quad (3)$$

由此可见, 非载流摩擦磨损过程中, 质量磨损率与 pv 值的变化关系与式(3)相吻合。而在载流摩擦磨损过程中, 质量磨损率除了跟机械磨损有关外还跟电磨损和电弧烧蚀有关。有研究表明^[37], 载流摩擦磨损过程中的质量磨损率跟摩擦副表面产生的热量有关。根据电接触理论, 摩擦副表面产生的热量主要来源于摩擦热、焦耳热和电弧热^[38]。因此, 单位时间内摩擦副表面产生的热量可以用下式表示:

$$E = E_f + E_j + E_a = \mu A pv + I^2 R + UI \quad (4)$$

由式(4)可知, 摩擦副接触面的电阻对摩擦副表面产生的热量具有极其重要的影响。而真实的摩擦表面是由大量凸出的斑点组成, 在摩擦过程中这些凸出斑点被电流产生的焦耳热、电弧热以及摩擦热不断加热, 并随着温度的不断升高, 这些凸出斑点逐渐发生软化、甚至熔融, 导致大量的凸出斑点被

破坏并脱离摩擦表面, 从而改变摩擦表面电阻, 进而影响电磨损过程。同时, 由于摩擦表面大量凸出斑点的脱落以及电弧对摩擦表面的烧蚀作用, 导致载流摩擦磨损条件下的质量磨损率要远高于非载流摩擦磨损过程。

2.2 pv 因素对燃弧光强和燃弧率的影响

图 4 所示为 pv 因素对燃弧光强和燃弧率的影响。由图 4 可知, 当 pv 值为 5 MPa·m/s 时, 光敏二极管检测到的电弧数量极少, 且强度微弱(燃弧率仅为 0.08%, 相对光强不足, 100 a.u)。当 pv 值为 20 MPa·m/s 时, 光敏二极管检测到的电弧数量显著增加, 燃弧率达到 1.16%, 是 pv 值为 5 MPa·m/s 时燃弧率的 14.5 倍。同时, 相对光强也明显增强。当 pv 值达到 35 MPa·m/s 时, 光敏二极管所能检测到的电弧急剧增多, 燃弧率达到 3.57%。综上所述, 随着 pv 值的增加, 离线电弧变得越来越频繁, 产生的电弧光强也越来越剧烈, 从而导致摩擦试样表面温度快速增加。

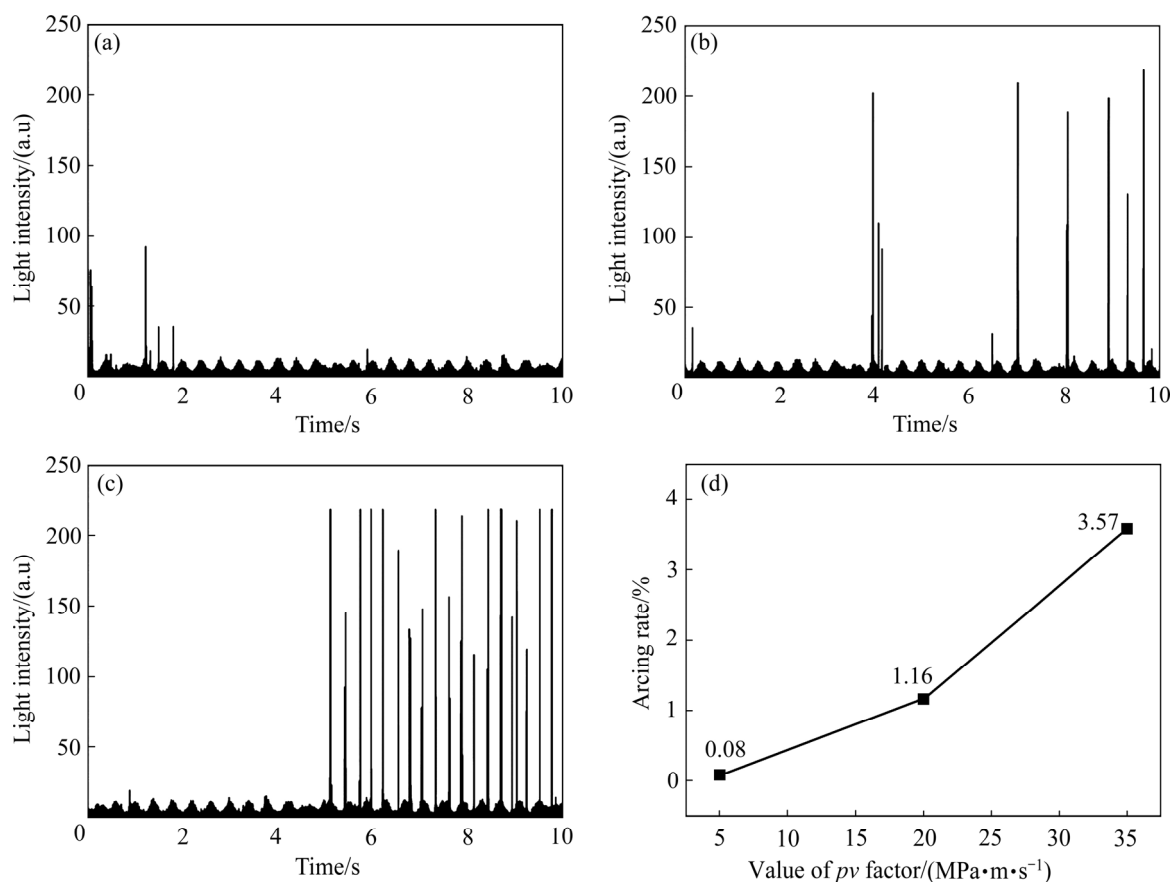


图 4 pv 因素对燃弧光强和燃弧率的影响

Fig. 4 Variation of arc discharge rates and discharge light intensities under different values of pv factor: (a) 5 MPa·m/s; (b) 20 MPa·m/s; (c) 35 MPa·m/s; (d) Arcing rate

2.3 pv 因素对表面温度的影响

图 5 所示为不同 pv 值下试样表面的温度。由图 5 可知, 随着 pv 值的增加, 试样表面温度急剧

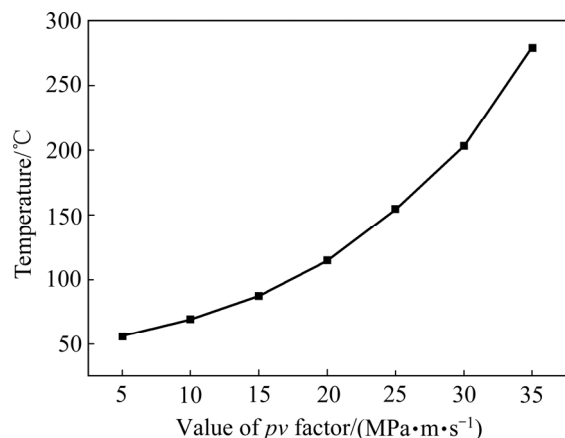


图 5 50 A 电流时不同 pv 值下试样表面的温度

Fig. 5 Steady state temperature of sample surface under different values of pv factor at 50 A electrical current

增加。同时, 曲线斜率不断增加, 这表明试样表面温度增加的速率也在不断增加。根据电摩擦理论和前述分析可知, 在电摩擦过程中, 机械磨损是相对独立的。因此, 增加的温度主要来源于焦耳热和电弧热。由图 5 中急剧增加的燃弧率可知, 在 pv 值大于 20 MPa·m/s 时, 电弧热对试样表面温度的作用远高于焦耳热的作用。

2.4 pv 因素对表面形貌的影响

图 6 所示为不同 pv 值下试样表面形貌和磨屑形貌。由图 6 可知, 当 pv 值为 5 MPa·m/s 时, 摩擦表面存在明显的硬质相以及由硬质相导致的犁沟 (见图 6(a)和(b)), 磨屑呈不规则的颗粒状 (见图 6(c)), 同时夹杂一些断裂的碳纤维, 这些现象均表明 pv 值在 5 MPa·m/s 时, 摩擦磨损机制为典型的磨粒磨损。这是因为 pv 值在 5 MPa·m/s 时, 燃弧率极

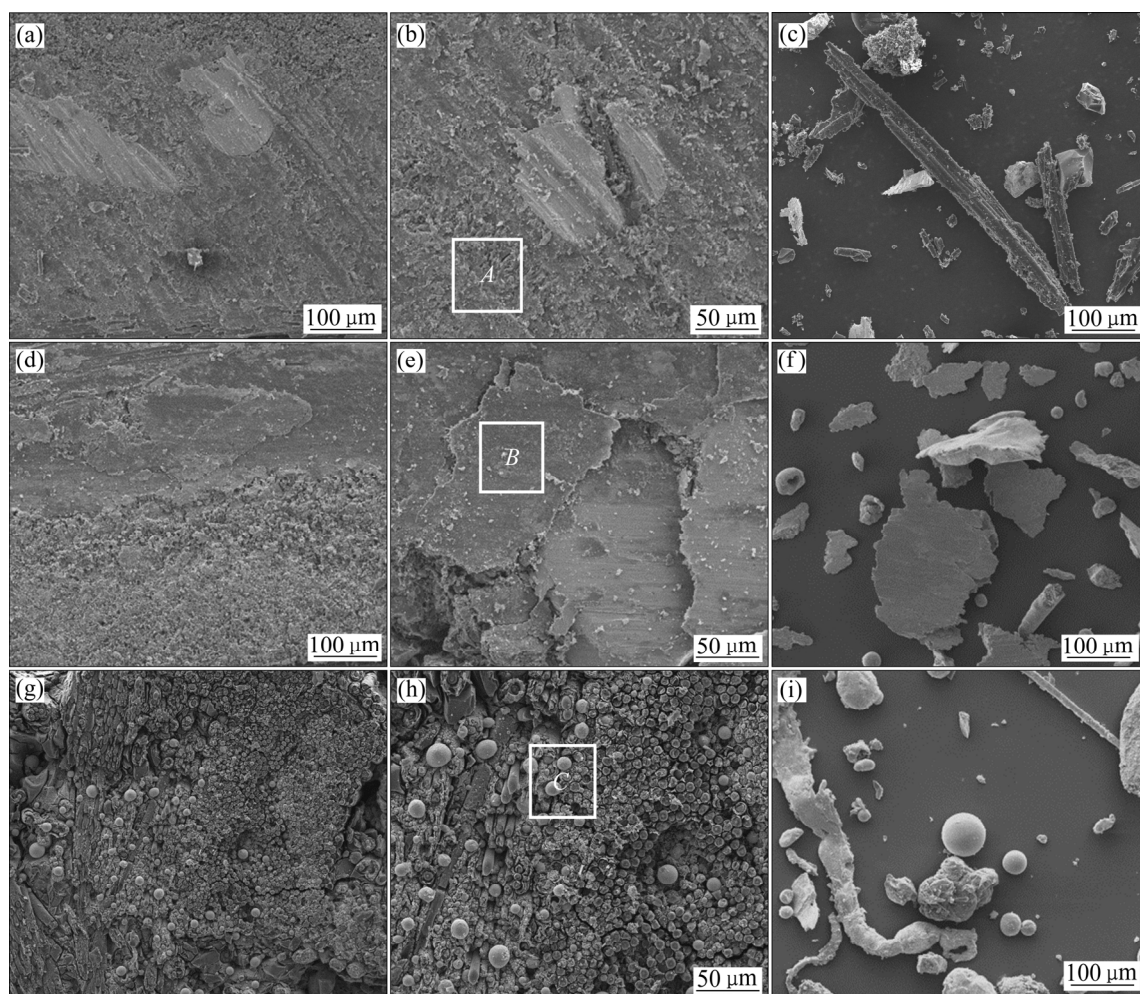


图 6 不同 pv 值下试样表面形貌和磨屑形貌

Fig. 6 Worn surface morphologies and wear debris morphologies under different values of pv factor: (a), (b), (c) 5 MPa·m/s; (d), (e), (f) 20 MPa·m/s; (g), (h), (i) 35 MPa·m/s

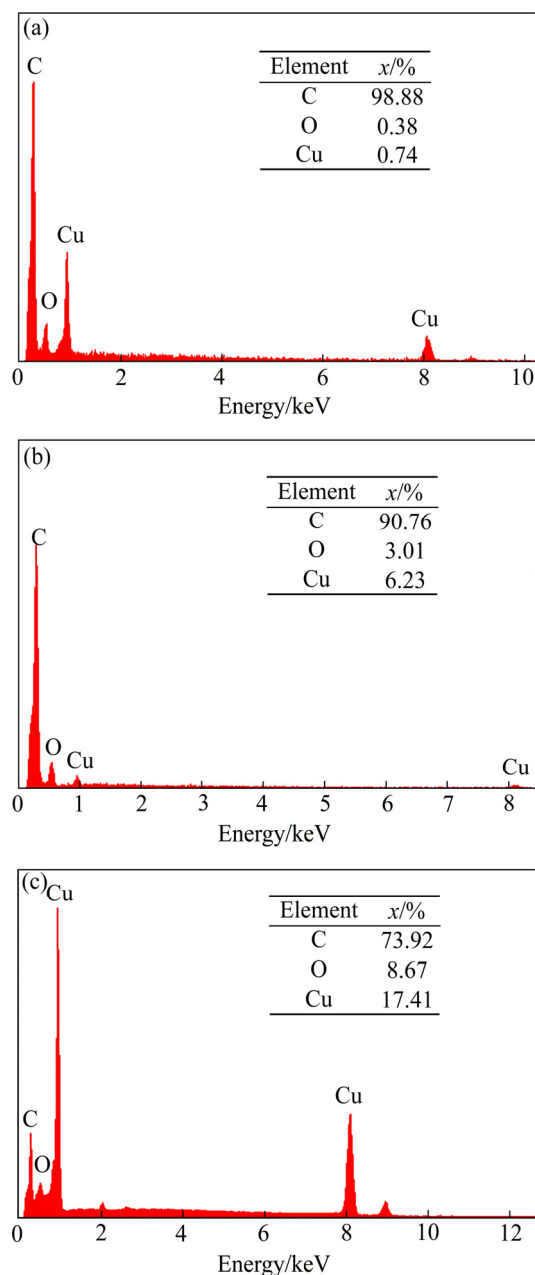


图 7 图 6 中 A、B、C 区域的 EDS 能谱

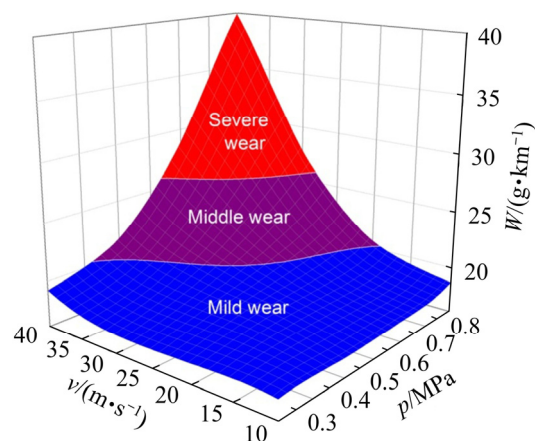
Fig. 7 EDS patterns of region A(a), region B(b) and region C(c) shown in Fig. 6

低, 电弧强度微弱, 由此产生的电弧热非常少, 未能使摩擦表面达到一个合适的温度, 使摩擦副表面发生软化, 表现出润滑效果。当 pv 值为 $20 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 时, 由于电弧放电加剧, 摩擦表面温度升高, 使得摩擦表面形成了一层较为均匀的润滑膜 (见图 6(d)), 表现为黏着磨损。摩擦表面的润滑膜有效降低了摩擦因数, 并在摩擦磨损初期对试样表面起到较好的保护作用。然而, 随着表面载荷重复着加载

-卸载过程, 以及对偶件铜盘对试样表面不间断的剪切作用, 使得一些脆性的摩擦膜与基体发生脱黏, 呈大块的片状剥落, 并在摩擦表面留下巨大的剥落坑 (见图 6(e)), 从而导致质量磨损率增加 (见图 3(b))。由图 7(b) 可知, 这层润滑膜主要是由炭和铜的氧化物组成, 其中铜生成的产物主要是氧化亚铜 (Cu_2O)。当 pv 值达到 $35 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 时, 电弧放电非常剧烈, 燃弧率和电弧强度均较 pv 值为 $20 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 时的有较大增幅。由于电弧温度高达 $3500\sim 4000 \text{ K}$ [38], 导致摩擦表面温度急剧升高。同时, 电弧使摩擦表面发生严重烧蚀, 摩擦试样表面的铜以及对偶件铜盘均发生严重的熔融喷溅, 导致质量磨损率急剧增加 (见图 3(b))。由图 7 可知, 随着 pv 值的增加, 摩擦试样表面的铜元素和氧元素不断增加, 这表明摩擦试样表面氧化程度不断增加。

2.5 磨损图

根据载流摩擦磨损过程中不同 pv 值下的质量磨损率结果, 经矩阵转变, 拟合出随 pv 值变化的磨损率图 (见图 8)。由图 8 可知, 质量磨损率受 pv 值的影响非常显著, 其摩擦磨损行为难以用一种机制进行解释。根据磨损率的情况可大致分为 3 个区域, 分别为轻微磨损区域 (Mild wear)、中等磨损区域 (Middle wear) 和严重磨损区域 (Severe wear)。结合上述摩擦表面的分析可知, 轻微磨损区域 pv 值较小, 燃弧率很低, 表现为典型的磨粒磨损过程。中等磨损区域 pv 值较大, 燃弧率显著增加, 表现为

图 8 不同 pv 值下的质量磨损图Fig. 8 Worn map under different values of pv factor

黏着磨损和剥落磨损过程。严重磨损区域 pv 值最大, 燃弧率最高, 表现为明显的氧化磨损和熔融喷溅。

3 结论

1) 在非载流条件下, 摩擦因数随 pv 值的增加呈逐渐下降的趋势, 而在载流(50 A)条件下, pv 值在 5~20 MPa·m/s 范围内, 摩擦因数随 pv 值的增加呈下降趋势, pv 值在 20~35 MPa·m/s 范围内, 摩擦因数随 pv 值的增加呈波浪式增加。在整个测试范围内, 载流过程中的摩擦因数均显著低于非载流过程的摩擦因数。

2) 在非载流摩擦磨损过程中, 质量磨损率随 pv 值的增加呈缓慢增加趋势, 变化非常小。而在载流摩擦磨损过程中, pv 值在 5~15 MPa·m/s 范围时, 质量磨损率随 pv 值的增加缓慢增加; pv 值在 15~35 MPa·m/s 范围时, 质量磨损率随 pv 值的增加而急剧增加。载流摩擦磨损过程中的质量磨损率均远远高于非载流摩擦磨损过程的。

3) 在载流摩擦磨损过程中, 随着 pv 值的增加, 摩擦磨损机制逐渐由磨粒磨损转变为黏着磨损, 在 pv 值达到 35 MPa·m/s 时则表现为显著的氧化磨损和熔融喷溅。

致谢

作者非常感谢国家自然科学基金(51302322)和湖南省自然科学基金(2017JJ3514)的资助! 同时也十分感谢河南科技大学张永振教授、燕山大学战再吉教授以及西南交通大学陈光雄教授在实验过程给予的无私帮助!

REFERENCES

- [1] DING T, CHEN G X, WANG X, et al. Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds[J]. Tribology International, 2011, 44(4): 437-444.
- [2] AMBR P J, SIO J. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains[J]. Computers & Structures, 2012, 110/111(10): 32-42.
- [3] NITUCA C. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph-catenary system for power supply of electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96: 211-217.
- [4] TANG Y, LIU H, ZHAO H, et al. Friction and wear properties of copper matrix composites reinforced with short carbon fibers[J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 257-261.
- [5] KUBOTA Y, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current[J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1492-1498.
- [6] YIN J, ZHANG H, TAN C, et al. Effect of heat treatment temperature on sliding wear behaviour of C/C-Cu composites under electric current[J]. Wear, 2014, 312(1/2): 91-95.
- [7] YANG L, RAN L, YI M. Carbon fiber knitted fabric reinforced copper composite for sliding contact material[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2365-2369.
- [8] WANG P, ZHANG H, YIN J, et al. Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite- modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current[J]. Wear, 2017, 380/381: 59-65.
- [9] DENG Chao-yong, ZHANG Hong-bo, YIN Jian, et al. Carbon fiber/copper mesh reinforced carbon composite for sliding contact material[J]. Materials Research Express, 2017, 4(2): 025602.
- [10] ZHOU W, YI M, PENG K, et al. Preparation of a C/C-Cu composite with Mo₂C coatings as a modification interlayer[J]. Materials Letters, 2015, 145: 264-268.
- [11] YANG Q, LIU J, LI S, et al. Fabrication and mechanical properties of Cu-coated woven carbon fibers reinforced aluminum alloy composite[J]. Materials & Design, 2014, 57(5): 442-448.
- [12] DING T, CHEN G X, LI Y M, et al. Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway[J]. Tribology International, 2014, 79(11): 8-15.
- [13] 周文艳, 冉丽萍, 彭可, 等. 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[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 990-996.
- [14] 万成, 李继文, 王展, 等. W-30Cu 电接触材料直流电接触行为[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 126-136.

- WAN Cheng, LI Ji-wen, WANG Zhan, et al. Electrical contact behavior of W-30Cu contact material under direct current condition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 126-136.
- [15] 万成, 李继文, 王展, 等. 高致密细晶 W-25Cu 触头材料的电接触性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(3): 504-513.
- WAN Cheng, LI Ji-wen, WANG Zhan, et al. Performances of high-density fine-grain W-25Cu electrical contact materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(3): 504-513.
- [16] 陶麒麟, 周晓龙, 周允红, 等. AgCuO 电触头材料的接触电阻及电弧侵蚀形貌分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1219-1223.
- TAO Qi-ying, ZHOU Xiao-long, ZHOU Yun-hong, et al. Contact resistance and arc erosion morphology of AgCuO electrical contact material[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1219-1223.
- [17] 周文艳, 冉丽萍, 彭可, 等. Mo₂C 改性 C/C-Cu 复合材料的组织及载流摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9): 2074-2081.
- ZHOU Wen-yan, RAN Li-ping, PENG Ke, et al. Structure and tribological property with electric current of Mo₂C modified C/C-Cu composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(9): 2074-2081.
- [18] WANG Y A, LI J X, YAN Y, et al. Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a Cu-Cr-Zr alloy[J]. Tribology International, 2012, 50: 26-34.
- [19] SHANGGUAN Bao, ZHANG Yong-zhen, XING Jian-dong, et al. Comparative study on wear behaviors of metal-impregnated carbon material and C/C composite under electrical sliding[J]. Tribology Transactions, 2009, 53(6): 933-938.
- [20] YANG Z, ZHANG Y, ZHAO F, et al. Dynamic variation of arc discharge during current-carrying sliding and its effect on directional erosion[J]. Tribology International, 2016, 94: 71-76.
- [21] DEEVA V, SLOBODYAN S. Influence of gravity and thermodynamics on the sliding electrical contact[J]. Tribology International, 2017, 105: 299-303.
- [22] BANSAL D G, STREATOR J L. Effect of operating conditions on tribological response of Al-Al sliding electrical interface[J]. Tribology Letters, 2011, 43(1): 43-54.
- [23] LIN X Z, ZHU M H, JI-LIANG M O, ET AL. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2): 292-299.
- [24] GONG T, YAO P, XIAO Y, et al. Wear map for a copper-based friction clutch material under oil lubrication[J]. Wear, 2015, 328/329: 270-276.
- [25] 邓联谱, 涂川俊, 陈刚, 等. 抑弧油对滑板用 C/C 复合材料载流磨损性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014(6): 948-954.
- DENG Lian-pu, TU Chuan-jun, CHEN Gang, et al. Effect of arc restraining oil on current-carrying wear characteristics of C/C composites[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014(6): 948-954.
- [26] 张会杰, 孙乐民, 张永振, 等. 环境气氛对 C/C 复合材料载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 236-241.
- ZHANG Hui-jie, SUN Le-min, ZHANG Yong-zhen, et al. The influence of environmental atmosphere on the tribological performance of C/C composites under electrical current[J]. Tribology, 2015, 32(2): 236-241.
- [27] 张会杰, 孙乐民, 上官宝, 等. 空气/氮气气氛下电流和摩擦速度对 C/C 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 94-97.
- ZHANG Hui-jie, SUN Le-min, SHANGGUAN Bao, et al. Influences of current and friction speed on friction and wear performance with current of C/C composites under air/nitrogen atmospheres[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 94-97.
- [28] 周文艳, 彭可, 冉丽萍, 等. 电流对 Mo₂C 改性 C/C-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 503-509.
- ZHOU Wen-yan, PENG Ke, RAN Li-ping, et al. Effect of electrical current on tribological property of the Mo₂C modified C/C-Cu composite[J]. Tribology, 2016, 36(4): 503-509.
- [29] LARSEN T Ø, ANDERSEN T L, THORNING B, et al. Comparison of friction and wear for an epoxy resin reinforced by a glass or a carbon/aramid hybrid weave[J]. Wear, 2007, 262(7): 1013-1020.
- [30] ZHANG X M, CHEN W P. Review on corrosion-wear resistance performance of materials in molten aluminum and its alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1715-1731.
- [31] SIMÕES F, RODRIGUES D M. Material flow and

- thermo-mechanical conditions during friction stir welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis[J]. *Materials & Design*, 2014, 59(6): 344.
- [32] EL-REFAIE A M F, AZIZ M M A, KHORSHID S A Y, et al. Effect of combined velocity and pressure on life time of carbon brushes[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000, 15(2): 176–180.
- [33] HU Z, CHEN Z, XIA J, et al. Effect of PV factor on the wear of carbon brushes for micromotors[J]. *Wear*, 2008, 265(3/4): 336–340.
- [34] WANG Y A, LI J X, YAN Y, et al. Effect of PV factor on sliding friction and wear of copper-impregnated metallized carbon[J]. *Wear*, 2012, 289(25): 119–123.
- [35] DREVNA M J, KASALES C J. *Introduction to tribology*[J]. Wiley, 2013: 431–436.
- [36] BHUSHAN B. *Principles of tribology*[J]. Macmillan, 1975: 647–648.
- [37] NAGASAWA H, KATO K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 179–183.
- [38] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. *Tribology International*, 1999, 32(7): 367–378.

Effect of pressure–velocity factor on sliding friction and wear of C_f/PF-Cu composites

DENG Chao-yong¹, ZHANG Hong-bo¹, YIN Jian¹, XIONG Xiang¹, WANG Pei¹,
SUN Miao¹, WU Xiao-guang¹, LI Wan-qian²

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Carbon fibre (C_f) and copper fibre (Cu) fabric-reinforced phenol formaldehyde (PF) matrix composites (C_f/PF-Cu) were prepared by hot-pressing method, and then current-carrying friction and wear testing was carried on. The effect of pressure (*p*)–velocity (*v*) factor (*pv* factor for short) on the tribological behavior was investigated. Friction and wear tests were conducted on a pin-on-disc type wear tester. The tests were performed at two electrical currents (0 A and 50 A) and seven different combinations of contact pressure and sliding velocity (5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 MPa·m/s). The results indicate that the friction coefficient decreases with an increase in the *pv* value, and the wear rate slightly increases with an increase in the *pv* value when the current is 0 A. When the electrical current is 50 A, the friction coefficient increases little with the increase of the *pv* value, but the mass wear rate increases drastically. As the *pv* value increases, the wear behavior gradually changes from abrasive wear to adhesive wear. When the *pv* value reaches 35 MPa·m/s, the wear behavior performs as oxidative wear and melt ejection of copper alloy.

Key words: C_f/PF-Cu composites; wear; friction; wear mechanism

Foundation item: Project(51302322) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2017JJ3514) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2019-05-20; **Accepted date:** 2020-06-10

Corresponding author: YIN Jian; Tel: +86-731-88836877; E-mail: melodycyd@163.com

(编辑 龙怀中)