

放电等离子烧结 Cu-Mo-WC 复合材料电接触特性

田保红, 程新乐, 张毅, 刘勇

(河南科技大学 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023)

摘要: 采用放电等离子烧结 (SPS) 工艺制备出 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 和 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 2 种复合材料, 对复合材料的密度、硬度、导电率和显微组织进行了对比分析。并对复合材料进行了电接触性能测试, 研究了其在直流阻性负载条件下的阴极、阳极材料转移和质量损失规律, 并通过扫描电镜观察材料在电弧侵蚀后的形貌, 对复合材料的电弧侵蚀特征进行了初步分析。结果表明: 采用 SPS 工艺制备的复合材料具有良好的综合性能; 随电流的增大材料转移量不断增加; 电弧侵蚀后的触头表面呈现气孔、熔池和凹坑等形貌特征, 且电流值越大, 其形貌特征越明显; 当电压一定时, 接触电阻随电流的增大而减小; 当电压、电流相同时, 接触电阻随电流变化无明显波动, 而熔焊力随电流增大呈增加趋势。

关键词: Cu-Mo-WC 复合材料; 电弧侵蚀; 材料转移; 接触电阻; 熔焊力

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)03-0943-06

电接触元件是电气线路中必不可少的重要元件, 其可靠性和寿命对系统的安全性至关重要。电器工作时, 由于载荷类型、大小, 接触形式, 环境状态等不同, 使得在接触过程中电、力、热和环境气氛等与电接触材料的相互作用极其复杂。因此, 电触头应用到工作环境中时会发生复杂的失效现象, 失效形式一般呈现出磨损、氧化、熔焊和桥接^[1,2]。通常要求电接触材料具备良好的导电性、较高的热导率、低而稳定的接触电阻、优异的耐磨性能(电弧磨损和机械磨损)、抗熔焊性能、良好的化学稳定性和一定的力学强度^[3,4]。李权等研究^[5]表明, 大量 W 硬质点可有效削弱铜基合金的焊点强度, 显著降低熔焊概率; 李震彪等^[6]指出, 高熔点 W、Mo 在铜基电触头材料中, 可通过形成表面富 W、Mo 层而降低电弧侵蚀量; 王塞北等^[7]提出, 高传导金属基体添加适量氧化物质点具有提高抗熔焊性能的作用。

Cu-Mo 作为新型真空开关和高压开关动触头材料, 目前存在抗电弧侵蚀和抗熔焊性能偏低等问题, 直接影响其使用寿命和安全性。为此, 本研究通过添加少量 WC 硬质相, 旨在改善 Cu-Mo 电接触材料的抗电弧侵蚀和熔焊性能, 并综合评价其电接触性能。本研究对采用放电等离子烧结工艺制备的 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 和 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 2 种触头材料进行了电接触试验, 测试了其接触电阻和熔焊力等电接触性能, 探讨了触头材料的电弧侵蚀

特征及其电流因素对该过程的影响。

1 实验

采用的原材料为平均粒径 38 μm 和纯度 99.9% 电解铜粉, 平均粒径 3 μm 和纯度 99.9% 钼粉, 平均粒径 48 μm 和纯度 99.9% 碳化钨粉末, 以及微量化学纯 LaCl₃ 粉末, 其中添加微量稀土化合物 LaCl₃ 的目的在于提高 SPS 颗粒处于局部液相烧结时熔合金液相的流动性和润湿性。将上述原材料按表 1 成分配比进行配料和充分混合, 然后在 SPS-30 型放电等离子烧结炉中进行烧结。烧结工艺参数: 真空度 < 1×10⁻⁵ Pa, 升温速度 100 °C/min, 升温至 650 °C, 保温 2 min, 然后加压 30 MPa, 继续升温至 950 °C, 保温 10 min, 随炉冷却至 100 °C 取出空冷。

按照 GB/T5586-1989 采用流体静力天平利用阿基米德原理测定复合材料密度; 用 HVS-1000 型显微硬度计测量显微硬度; 采用 D60K 数字金属电导率测量

表 1 Cu-Mo-WC 复合材料成分

Table 1 Chemical composition of Cu-Mo-WC composites (wt%)

Composite	Cu	Mo	WC	LaCl ₃
(Cu-50Mo)-0.5%LaCl ₃	Bal.	49.75	0	0.5
(Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl ₃	Bal.	47.25	5	0.5

收稿日期: 2017-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51101052)

作者简介: 田保红, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023, 电话: 0379-65627356, E-mail: bhtian007@163.com

仪测量电导率；采用 JSM-5610LV 型扫描电镜分析材料微观组织和电接触试验后触头端面的电侵蚀形貌。

将制备的复合材料加工成尺寸为 $\Phi 3\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}+\Phi 1.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的阶梯圆柱形触头，动、静触头的测试端面均为光滑平面。

在 JF04C 型电接触性能测试仪上进行触头接触闭合断开试验。试验参数为：电源电压 40 V，直流 20、30、40 A；上触头为动触头作为阳极，下触头为静触头作为阴极，动静触头垂直放置，触头间的闭合力 0.8 N，稳态分断力 1.6 N，开断频率为 1 Hz（接通、断开时间均为 0.5 s），开断间距 1.5 mm。在不同的电流下试验次数为 10^4 次。

在电接触试验前后用精度为 10^{-4} g 的 LP3200D 型电子分析天平分别对阳极和阴极触头称重，测量质量变化 (Δw)。 $\Delta w = \text{测试后触头质量}(w_1) - \text{测试前触头质量}(w_0)$ 。为考察触头接触操作次数对接触电阻和熔焊力的影响，每闭合断开 100 次自动测量一次接触电阻。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的性能及显微组织

表 2 为采用 SPS 技术制备的 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 和 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 2 种复合材料烧结态的综合性能。由表 2 可知，2 种复合材料的密度分别为 8320 和 8090 kg/m³。加入质量分数 5%WC 颗粒明显提高了 Cu-Mo 复合材料的显微硬度，比未添加的提高了约 19%；其导电率有所下降，比未添加的降低了约 11%。这与添加的 WC 颗粒一方面本身硬度较高，另一方面增加了 Cu-Mo 复合材料中的相界面面积，导致自由电子散射程度增加，从而降低了导电率有关^[8]。

图 1 为 2 种复合材料烧结态的 SEM 微观组织。由图 1 可以看出复合材料的基体都比较致密，无明显的孔洞和微裂纹，灰色基体为 Cu 相，灰白色区域为 Mo 相，较均匀地分布在致密的铜基体上，局部有轻微 Mo 颗粒团聚现象。图 1b 中亮白色颗粒为 WC 相，因添加量仅为 5%，其分布均匀性有待通过减小颗粒粒径进行改善。

表 2 Cu-Mo-WC 复合材料的密度、导电率和显微硬度

Table 2 Comprehensive properties of Cu-Mo-WC composites

Composite	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\gamma/\text{IACS}\%$	Hardness, HV/MPa
(Cu-50Mo)-0.5%LaCl ₃	8320	29.4	950
(Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl ₃	8090	26.1	1130

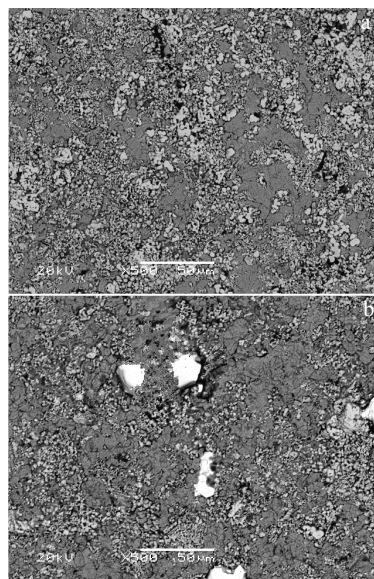


图 1 复合材料烧结态 SEM 显微组织

Fig.1 SEM images of the composites as SPS sintered: (a) (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (b) (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃

2.2 电接触条件下材料转移量及转移方向

电接触试验后 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 和 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 复合材料的阳极触头、阴极触头及总的的变化分别示于图 2 和图 3。对比图 2 和图 3 可以看出，本试验条件下，随着电接触负载电流的增大，电触头材料的侵蚀量随之不断增加。加入 5%WC 颗粒使 Cu-Mo 复合材料的阴极质量变化、阳极质量变化和总质量变化均呈明显降低趋势。

由图 2 可以看出，电流为 20 A 时，阴极和阳极材料几乎不发生转移，质量都有轻微损耗，总的的质量略有减少；随着电流增加到 30 A 时，阳极持续增重，阴极持续失重，阴极材料损耗大于阳极，表明材料的转移方向是从阴极转向阳极；当电流增大到 40 A 时，阴极的损耗进一步增大，材料转移量也随之增加，总的损耗变化不大，材料的转移方式依然是由阴极转向阳极。图 3 的变化规律与图 2 基本相同，但可以明显看出在相同的条件下加入 WC 颗粒之后，材料的总损耗有所降低，说明加入 WC 颗粒提高了复合材料的抗电弧侵蚀性能。

在开关和继电器开断过程中会出现电弧放电现象，由它引起的触头侵蚀是导致开关电器不能正常工作的主要原因。电弧在形成过程中经历了 2 个阶段——金属电弧阶段和气体电弧阶段。金属电弧又称阳极电弧^[8]，它引起材料从电极的阳极向阴极转移^[9-11]，当电弧由金属电弧向气体电弧过渡时，材料转移方向发生

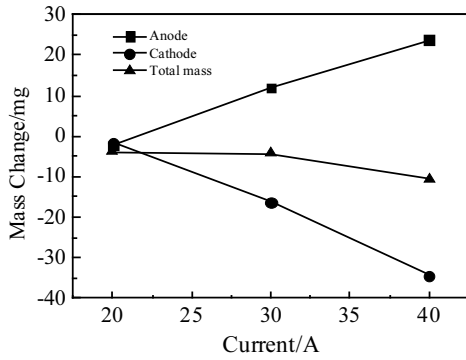


图 2 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 复合材料电极质量变化

Fig.2 Electrode mass changes of (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ composite (DC 40 V)

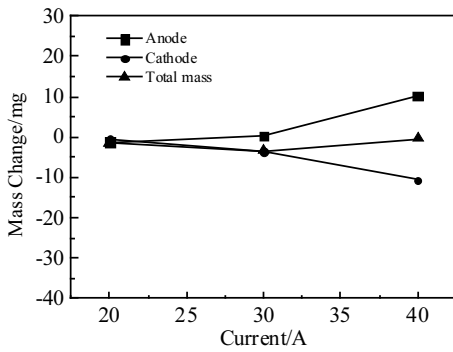


图 3 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 复合材料电极质量变化
Fig.3 Electrode mass changes of (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%-LaCl₃ composite (DC 40V)

反转，由阴极转向阳极，随着气体电弧的进一步发展，阴阳极均出现了材料损耗^[11]。本试验条件下，2 种复合材料的电侵蚀机制以气体电弧侵蚀为主，阳极电弧侵蚀次之。

2.3 电弧侵蚀表面形貌

图 4 为 2 种复合材料在电压为 40 V，电流 20 A

的条件下，经过 10⁴ 次电弧侵蚀后不同放大倍数下的阳极触头表面形貌图。从图中可以看出，未添加 WC 颗粒的触头材料阳极表面电弧侵蚀面积较大，呈现出较多的气孔和孔洞、裂纹以及熔池和凝固的熔滴等电弧侵蚀现象，如图 4a、4b 所示，10⁴ 次操作后阳极损耗为 2.5 mg；当 WC 含量为 5% 时，触头表面侵蚀面积变小，且侵蚀程度减轻，如图 4c、4d 所示，可观察到触头在电弧作用下表面局部熔化形成的液态金属流动特征，观察不到明显的凹坑、凸起、熔池及熔滴等电侵蚀形貌，局部放大后可看到除有少量气孔外，触头表面材料内部分散着很多细小的颗粒，未观察到热应力裂纹和较大的熔池坑，10⁴ 次操作后阳极材料损耗仅为 1.2 mg，明显低于未添加 WC 的，表明其电弧侵蚀抗力明显提高。

图 5 为 2 种复合材料在电压为 40 V、电流 40 A 的条件下，经过 10⁴ 次电弧侵蚀后不同放大倍数的阴极形貌图。对比可以看出，未添加 WC 的触头材料经电弧侵蚀后，阴极表面有大量的气孔、孔洞，液态金属凝固后的山包状等桥接特征，侵蚀比较严重，10⁴ 次操作后阴极质量损耗为 34.4 mg；加入 5%WC 之后，电弧侵蚀后的阴极表面气孔和孔洞数量明显减少，无大的侵蚀凹坑和热应力裂纹，有较大的凝固平滑区，较未加 WC 的触头材料烧损程度较轻，如图 5c、5d 所示，相同条件下阴极质量损耗为 10.6 mg。

影响触头材料抗电弧侵蚀性能高低的直接因素主要取决于熔池的深浅和喷溅量^[12]，较小电弧能量下，触头材料以喷溅侵蚀为主，材料熔化潜热越大，抗喷溅侵蚀能力越强；较高电弧能量下，触头材料以蒸发侵蚀和喷溅侵蚀共同作用为主，其电弧侵蚀量取决于材料的熔化潜热和气化潜热。Cu 和 Mo 的熔化潜热分别为 211.86 与 292.25 kJ/kg。Cu-Mo 触头材料中添加 5%WC，因 WC 的导热性弱于 Cu 和 Mo，且其熔点 2867 °C 高于 Mo 的 2623 °C，因此本实验条件下在电流一定时，Cu-Mo-WC 触头材料的熔化潜热高于未添加 WC 的，其表面的熔池较 Cu-Mo 的浅，较低电流

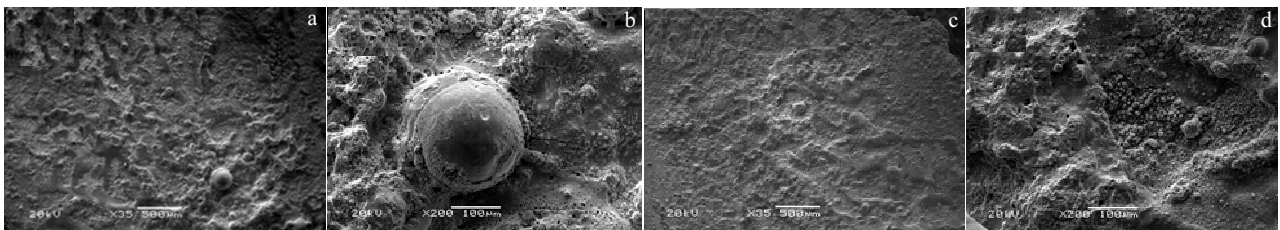


图 4 未添加和添加 WC 的复合材料触头的阳极侵蚀形貌

Fig.4 Anode surface morphologies of composites without and with WC addition: (a, b) (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (c, d) (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃

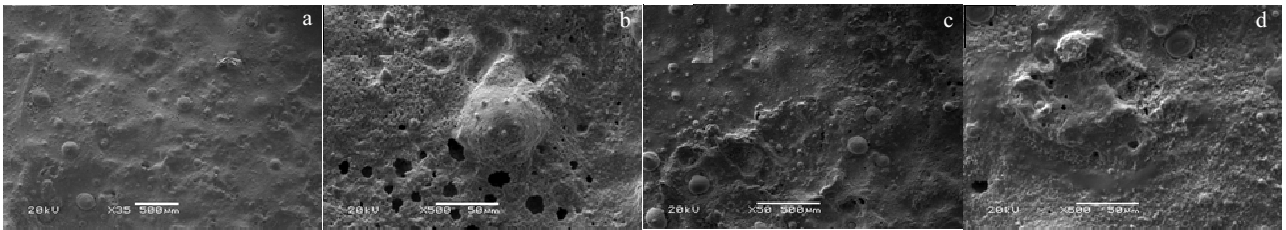


图 5 未添加和添加 WC 的复合材料触头的阴极侵蚀形貌

Fig.5 Cathode surface morphologies of composites without and with WC addition: (a, b) (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (c, d) (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃

(20 A) 的喷溅侵蚀量明显减少, 电弧侵蚀后触头表面相对平坦 (图 4c、4d); 较高电流 (40 A) 时, 添加 WC 的触头材料蒸发侵蚀和喷溅侵蚀也相应减少 (图 5c、5d)。

2.4 接触电阻和熔焊力变化

图 6 为 2 种未添加和添加 WC 的复合材料的接触电阻随操作次数的变化曲线。从图 6 可以看出, 试验过程中, 2 种复合材料的接触电阻的数值分别在 0.51 mΩ (20 A)、0.33 mΩ (30 A) 0.25 mΩ (40 A) 左右变化, 添加和未添加 WC 对触头的接触电阻影响不大; 电压电流相同时, 接触电阻的变化很稳定; 当电压一定时, 随电流的增加, 复合材料接触电阻都逐渐变小。这是因为随着电流的增大, 燃弧能量也增加, 大量能量输入触头, 导致触头表面氧化物分解, 液态金属的粘度减小导电率增大, 且熔池面积增加^[13,14], 相应的载流接触面积也变大, 因此接触电阻下降且趋于平缓。上述复合材料触头的接触电阻随电流强度的变化规律与陶麒麟等^[15]对 AgCuO 触头材料的研究结果一致。

图 7 为 2 种未添加和添加 WC 的复合材料的熔焊力随操作次数的变化曲线。由图 7 可以看出, 电压 40 V、电流 20 A 时, 2 种复合材料的熔焊力变化都比较稳定, 试验初期有轻微的熔焊, 然后熔焊力几乎降为零, 未发生明显熔焊。当电流增加到 40 A 时, 2 种复合材料在整个试验过程中均发生了明显的熔焊现象, 但熔焊力较小, 说明材料的抗熔焊性能良好。试验条件下, (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 复合材料触头的最大熔焊力为 0.040 N, 单位触头面积的熔焊力为 5.6×10⁻³ MPa; (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 复合材料触头的最大熔焊力为 0.075 N, 单位触头面积的熔焊力为 10.6×10⁻³ MPa, 熔焊力呈现略有增加的趋势, 表明添加 5%WC 对触头的熔焊力有不利的影 响, 但整体熔焊力仍然保持在较低水平。

图 7a~7c 的熔焊力变化规律相似, 而图 7d 的熔焊力一致呈上升的不稳定趋势, 这与 Cu-Mo-WC 复合材

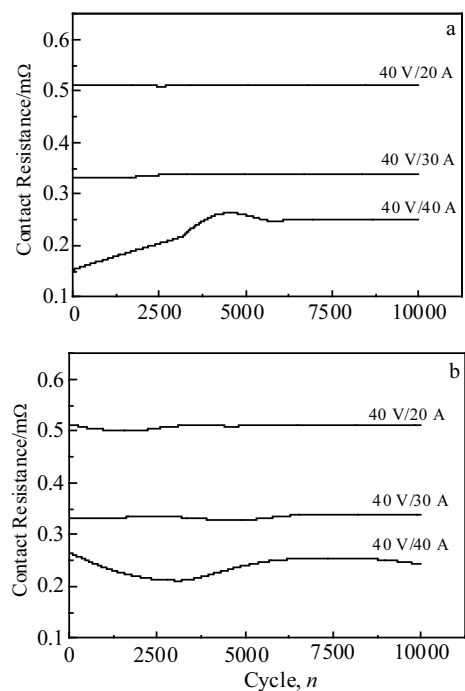


图 6 未添加和添加 WC 的复合材料的接触电阻随操作次数的变化

Fig.6 Contact resistance changes with operation times of composites without and with WC addition: (a) (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (b) (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃

料在较高电流条件下, 阳极表面蒸发侵蚀大于喷溅侵蚀有关, 直接造成电极表面粗糙度较大, 难以形成稳定接触有关。而添加 WC 后, 较低电流 (20 A) 下, 试验后期形成稳定接触后熔焊力明显下降 (图 7c), 较高电流下, 由于熔池溅射效应加大, 试验周期内难以形成稳定接触表面, 造成熔焊力明显升高 (图 7d)。

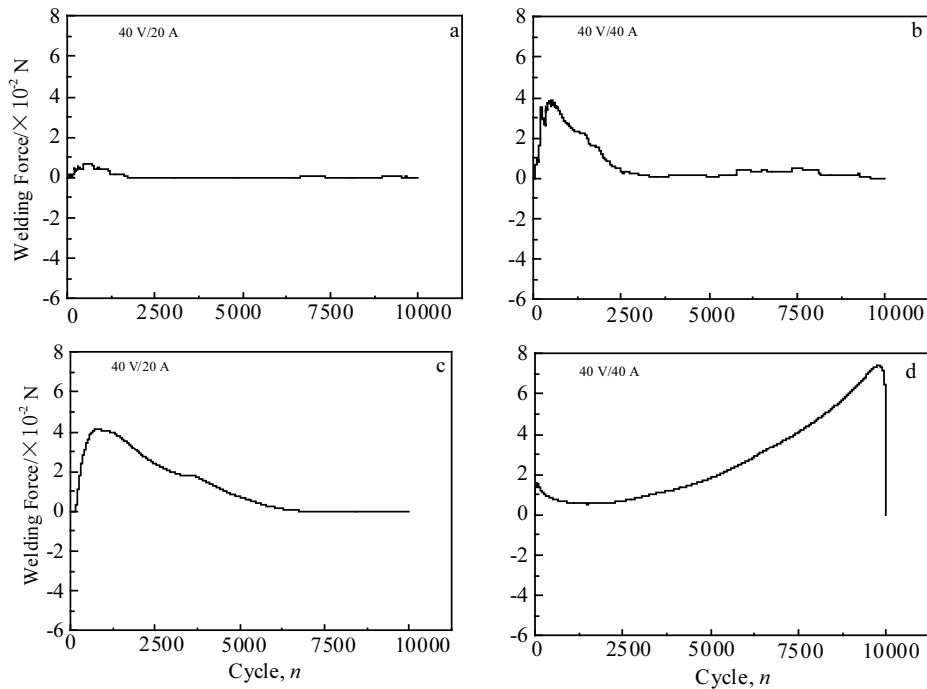


图7 未添加和添加 WC 的复合材料的熔焊力随操作次数的变化

Fig.7 Welding force with operation times of composites without and with WC addition: (a, b) (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (c, d) (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃

3 结论

1) SPS 制备的 (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ 和 (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ 2 种复合材料具有良好的综合性能, 加入 5%WC 使其显微硬度比未添加的提高了 19%, 导电率比未添加的降低了 11%。

2) 2 种复合材料触头的材料转移方向均从阴极转向阳极, 加入 5%WC 颗粒使 Cu-Mo 复合材料的阴极质量、阳极质量和总质量损耗均呈明显降低趋势, 且复合材料触头电弧侵蚀后的阴极表面气孔和孔洞数量明显减少, 较未加 WC 的触头材料烧损程度减轻; 试验条件下, 2 种复合材料的电侵蚀机制以气体电弧侵蚀为主, 阳极电弧侵蚀次之。

3) 添加和未添加 WC 对触头的接触电阻影响较小, 添加 5%WC 对触头的熔焊力有不利的影响, 熔焊力呈现增加趋势, 但整体熔焊力仍然保持在较低水平。

参考文献 References

[1] Guo Fengyi(郭风仪), Chen Zhonghua(陈忠华). *Electrical Contact Theory and Its Application Technology*(电接触理论及其应用技术)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 35
[2] Shao Wenzhu(邵文柱), Cui Yusheng(崔玉胜), Yang Dezhuang

(杨德庄). *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 1999(1): 11

[3] Fehim F, Huseyin U. *Materials and Design*[J], 2003, 24: 489
[4] Xu Yun(徐云), Guo Yingchun(郭迎春), Liu Fangfang(刘方方) et al. *Precious Metals*(贵金属)[J], 2007, 28(3): 16
[5] Li Quan(李权), Ding Min(丁敏), Wu Aiping(吴爱萍) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23(8): 2213
[6] Li Zhenbiao(李震彪), Zhang Guansheng(张冠生), Qin Qingsheng(秦庆生) et al. *Proceedings of the CSEE*(中国电机工程学报)[J], 1994, 14(1): 34
[7] Wang Saibei(王塞北), Xie Ming(谢明), Liu Manmen(刘满门) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 875
[8] Peng Beishan(彭北山), Ning Ailin(宁爱林). *Metallurgical Collections*(冶金丛刊)[J], 2004, 5: 4
[9] Liu Fangfang(刘方方), Chen Jingchao(陈敬超), Guo Yingchun(郭迎春) et al. *Precious Metals*(贵金属)[J], 2007, 28(3): 24
[10] Chung H H, Lee R T, Chiou Y C. *Measurement and Technology*[J], 2002, 149(4): 172
[11] Swingler J, McBride J W. *Proceedings of the 41th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*[C]. Montreal: IEEE, 1995

- [12] Cheng Lichun(程礼椿), Li Zhenbiao(李震彪), Zou Jiyan(邹积岩) *et al.* *High Voltage Apparatus*(高压电器)[J], 1993, 29(3): 33
- [13] Guan Weiming(管伟明), Zhang Kunhua(张昆华), Chen Song(陈松) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(3): 464
- [14] Han Bo(韩波), Shi Qingnan(史庆南), Xie Ming(谢明) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2012, 41(6): 994
- [15] Tao Qiying(陶麒麟), Zhou Xiaolong(周晓龙), Zhou Yunhong(周允红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1219

Electrical Contact Characteristics of Cu-Mo-WC Composites Prepared by Spark Plasma Sintering Process

Tian Baohong, Cheng Xinle, Zhang Yi, Liu Yong

(Collaborative Innovation Center of Non-Ferrous Materials, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The (Cu-50Mo)-0.5%LaCl₃ and (Cu-50Mo)-5%WC-0.5%LaCl₃ composites were prepared by spark plasma sintering (SPS) process. The density, the hardness, the electrical conductivity and microstructure of the composites were investigated. The electrical contact test was carried out for both composites. The materials transfer direction and the anode, cathode mass change and the contact ends total mass change of the composites were studied under the condition of different DC and resistance load. The morphologies after arc erosion were investigated by scanning electronic microscopy (SEM). The electrical erosive characteristics of the composites were analyzed. The results show that the composites prepared by SPS method have better comprehensive properties. The transfer mass increases with increasing of electrical current. The contact surface of the composites presents the appearance characteristics with pores, molten pool and pits after arc erosion test. The surface arc erosion characteristics become more obvious with increasing of current. The contact resistance decreases with increasing of current when the voltage is constant. The contact resistance with the current changes has no obvious fluctuation when the voltage and current are the same, while the welding force increases with increasing of current.

Key words: Cu-Mo-WC composite; arc erosion; material transfer; contact resistance; welding force

Corresponding author: Tian Baohong, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, P. R. China, Tel: 0086-379-65627356, E-mail: bhtian007@163.com