

不同载流条件下 Cu-Ag-Cr 合金导线的摩擦磨损行为

高勤琴, 张吉明, 谢 明, 王 松, 程 勇, 杨有才

(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 载流条件下材料的摩擦磨损行为探究对于铜合金架空导线、电极电刷以及继电器触头等的实际使用具有重要意义。在自制摩擦磨损试验机上, 以黄铜为对磨材料, 对真空感应熔炼制备的 Cu-4Ag-0.8Cr 合金导线进行载流摩擦磨损试验。采用电子天平、扫描电子显微镜等对合金载流磨损率、磨损表面形貌及载流磨损机理予以分析。结果表明, 电流在 0~6 A 范围内, 随着电流的增加, 合金导线的磨损率和温度均在增大。随着时间的延长, 接触电阻由较大的初始值迅速降低, 而后围绕一个中值上下波动。Cu-4Ag-0.8Cr 合金导线在载流条件下的主要磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损以及电侵蚀磨损。

关键词: 金属材料; 铜银铬合金; 载流摩擦磨损; 表面形貌; 接触电阻; 磨损形式

中图分类号: TM244.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)S1-0067-05

Friction and Wear Behavior of Cu-Ag-Cr Alloy Conductor under Electrical Current

GAO Qinqin, ZHANG Jiming, XIE Ming, WANG Song, CHENG Yong, YANG Youcai

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,

Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Research on the friction and wear behavior under electrical current has important significance for the actual using of copper alloy overhead wires, electrodes and brush, relay contacts, etc. Friction and wear test was conducted on Cu-4Ag-0.8Cr alloy conductor fabricated by vacuum induction melting technology against brass block using a self-made friction and wear equipment. The electrical sliding wear rate, worn surface morphology and wear mechanism of the alloy were investigated by electronic balance and scanning electron microscope. The results indicate that in the range of 0~6 A, with the current increasing, the wear rate and the temperature of the alloy increase gradually. With the time prolongation, the contact resistance decreases rapidly from the initial high value, then fluctuates around a mid-value. The abrasive wearing, adhesive wearing and arc erosion wearing would be the main wearing mode of the Cu-4Ag-0.8Cr alloy conductor under currents.

Key words: metal materials; Cu-Ag-Cr alloy; frictional wear under electrical current; surface morphology; contact resistance; wearing mode

Cu-Ag-Cr 合金作为一种新型高强高导材料, 已在架空导线、继电器触头等领域得到了广泛的商业化应用^[1-4]。近年来, 在合金成分设计与优化、显微组织调控、析出相种类与结构、形变与热处理工艺

改进、组织与性能关联性等领域, 国内外材料科研者对 Cu-Ag-Cr 系合金开展了持续的研究, 使其综合性能进一步得到提高、应用领域也在逐步拓展^[5-9]。李红卫等^[10]在研究 Cu-0.1Ag-0.5Cr 合金的强化

收稿日期: 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51164015)、云南省院所技术开发专项基金(2011CF012)、云南省应用基础研究重点基金(2011FA026)、云南省科技创新团队项目(2012HC027)、省院省校科技合作专项(2012IB002)。

第一作者: 高勤琴, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 稀贵金属合金材料。E-mail: gqq@ipm.com.cn。

机制时发现, 微量 Ag 在 Cu-Ag-Cr 合金中主要以固溶形式存在, 微量 Cr 主要以单质 Cr 粒子形式存在并与基体共格。细小弥散分布的析出相质点能够强烈地钉扎位错, 阻碍位错运动和亚晶界的合并, 从而使合金中仍能保持较高的位错密度, 延缓回复过程和再结晶形核的开始。合金的强化机制是 Ag 的固溶强化、预冷变形引入的亚结构强化和 Cr 粒子的析出强化。贾淑果等^[11]对低溶质 Cu-0.1Ag-0.11Cr 合金时效析出特性的研究也指出, Cu-Ag-Cr 合金时效处理后其显微硬度和导电率会发生显著的回升。在显微硬度峰值状态下, 析出相与基体保持共格关系, 通过 Orowan 机制来提高合金的抗拉强度。

在文献[12]中, 作者对 Cu-4Ag-0.8Cr 的微观组织和力学、电学性能进行了研究, 采用真空熔炼-固溶-拉拔-时效集成工艺成功制备出抗拉强度和导电率分别为 585 MPa 和 85% IACS 的铜银铬合金线材。为实现该合金架空接触导线的产业化应用, 本文根据其在实际工作使用中的载流摩擦磨损特点, 采用黄铜为对磨材料, 在自制摩擦磨损试验机上模拟 Cu-4Ag-0.8Cr 合金/黄铜摩擦副的相对滑动, 研究不同载流条件下合金的磨损率、温度、接触电阻的变化规律, 并分析其载流磨损机理。

1 实验

合金名义成分为 Cu-4Ag-0.8Cr, 原材料采用纯度为 99.9% 的标准阴极铜, 99.99%Ag 和 99.5%Cr。合金在 GP30-CW7 型真空高频感应熔炼炉中熔炼, 熔炼温度为 980℃, 真空度为 1×10^{-2} Pa。合金在水冷铜模中将浇铸成直径为 20 mm 的棒坯, 棒坯经切除冒口、抛光去除氧化皮后得到棒状试样。试样棒材经 850℃, 2 h 固溶处理及水淬后, 进行时效处理。固溶及时效处理都在氮气保护的箱式电阻炉中进行。时效态合金棒材被拉制成直径为 2 mm 的导线, 再将导线制成内径为 50 mm 合金环, 并安装于试样盘卡槽上。试验用时效态 Cu-4Ag-0.8Cr 合金导线的物理性能列于表 1。

表 1 Cu-4Ag-0.8Cr 合金的部分物理性能

Tab.1 Part of physical properties of Cu-4Ag-0.8Cr alloy

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸 长率/%	硬度 /HV0.2	导电率 /%IACS
585	471	9.2	137	85

在自行设计的 MCMS-600 型摩擦磨损试验机上, 以黄铜为对磨材料, 对时效态的 Cu-4Ag-0.8Cr 合金导线进行载流摩擦磨损试验, 其示意图见 1 所示。该试验机试样盘的转速范围为 0~600 r/min, 并连续可调; 电源采用 SS1799 型直流稳定电源, 输出电流分别控制为 0、2、4 和 6 A。采用精度 1 mg 的 EA-320A 型电子天平称量合金材料的磨损质量损失, 取 5 次测量结果的平均值, 用以评价材料的耐磨损性能。导线与滑块接触面的温度通过希玛 AR872D 型非接触红外测温仪测量。接触电阻依据公式 $R=U/I$ 计算, U 和 I 分别为合金导线与黄铜滑块间的电压和电流。

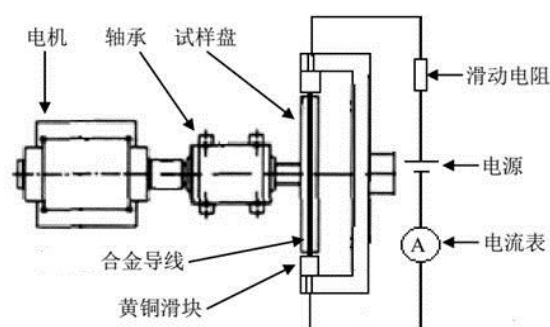


图 1 自制备载流摩擦磨损试验机结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the self-made friction and wear equipment under current

2 结果与讨论

2.1 电流大小对合金磨损率的影响

图 2 给出了转速为 400 r/min, 不同加载电流条件下, Cu-4Ag-0.8Cr 合金磨损率随时间变化的关系曲线。

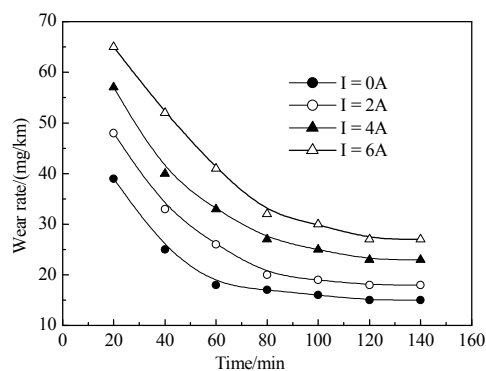


图 2 不同加载电流下, 磨损率随时间的变化曲线

Fig.2 Changing curves of the wear rate with time under different current

由图 2 可以看出, 加载电流为 0、2、4 和 6 A 条件下, 合金磨损率随时间变化的趋势基本一致, 即在磨损的初始阶段, 合金磨损率较大, 但随着磨损时间的增加, 平均磨损率逐步降低, 最终趋于一个稳定值。分析认为, Cu-Ag-Cr 合金导线与黄铜滑块组成的摩擦副在运行初期, 由于各自表面的表面粗糙度值较大, 实际接触面积较小, 接触点数少而多数接触点的面积又较大, 固接触点粘着严重, 磨损率较高。随着磨损试验的进行, 摩擦副表面微凸起逐渐磨去, 表面粗糙度值降低, 实际接触面积增大, 接触点数增多, 磨损率降低, 逐渐进入稳定磨损阶段, 因而合金磨损率随时间变化曲线表现为逐步降低而后稳定的规律。但加载电流不同, 合金导线的平均磨损率也不相同, 相同磨损时间内, 加载电流越大, 则磨损率越大。例如磨损时间为 60 min, 加载电流 0、2、4 和 6 A, 合金的磨损率分别为 18、26、33 和 41 mg/km。

2.2 电流大小对摩擦副接触面温度的影响

Cu-Ag-Cr 合金的载流摩擦磨损实验是在室温 25℃ 下进行的, 摩擦副接触面的温度是通过实测温度减去室温计算得出。图 3 给出了恒定转速 200 r/min、不同加载电流下, Cu-4Ag-0.8Cr 合金/黄铜摩擦副接触面温度随时间的变化曲线。

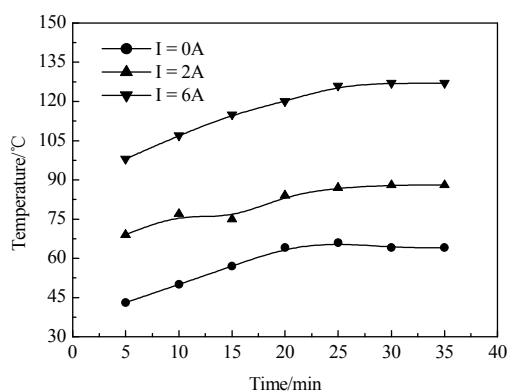


图 3 不同加载电流下, 接触面温度随时间的变化曲线

Fig.3 Changing curves of the temperature of contact surface with time under different current

从图 3 可直观地看出, 随着时间的延长, 接触面温度不断升高, 最后趋于恒值, 且加载电流越大, 温度升高的幅度也增大。相同的时间段内, 接触面温度的大小排序为: 6A>2A>0A。

载流磨损过程中, 影响摩擦副接触面温升的主要因素包括: 摩擦热、焦耳热、电弧热和热传导。

随着时间增加, 产生的摩擦热、焦耳热和电弧热不断累积, 导致接触面的温度不断上升, 当摩擦系统与周围环境的热交换达到平衡状态时, 接触面的温度便趋于一个稳定值。在其他条件一定的情况下, 随着加载电流的增大, 接触面产生的焦耳热变大, 接触面温度升高的幅度也增大。

2.3 摩擦过程中接触电阻的变化

图 4 给出了不同时间条件下, 加载电流为 4 A 时, 滑块与 Cu-Ag-Cr 合金导线之间接触电阻 R_c 数值的变化曲线。

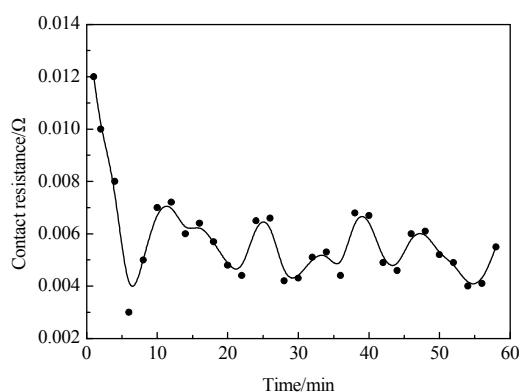


图 4 接触电阻随时间的变化曲线

Fig.4 Changing curves of the contact resistance with time

由图 4 可以看出, 随着摩擦时间的延长, 接触电阻由较大的初始值迅速降低, 而后围绕一个中值上下波动, 该中值约为 0.005 Ω。接触电阻由收缩电阻 R_s 和表面膜电阻 R_m 两部分构成, 即 $R_c = R_s + R_m$ 。在摩擦起始阶段, 滑块与导线的接触形式实际为各自表面微小凸点之间的接触, 当有电流流过时, 在点接触处产生较大的两接触面的收缩电阻 R_s , 因而接触电阻的初始值较大。随着摩擦的继续进行, 滑块与导线之间的微凸点被磨平, 收缩电阻减小, 进而使滑块与导线的接触电阻减小。当摩擦进行到一定阶段, 摩擦功和电流收缩会产生高密度的焦耳热, 随着热量的积累, 接触点温度升高, 接触面间会形成一层很薄的氧化层膜, 形成表面膜电阻 R_m , 从而致使接触电阻出现回升。由于接触面间存在机械载荷, 摩擦时, 当接触点不能继续支撑接触载荷时, 接触点与氧化膜遭受破坏, 直到形成一个新的接触点重新支撑载荷为止, 这样周而复始便构成了接触电阻围绕中值上下波动的变化规律。

2.4 合金磨损表面形貌分析

图 5 给出了未加载电流和加载电流为 4 A 时, Cu-Ag-Cr 合金导线经 50 min 磨损试验后的

磨损表面 SEM 图片。对比分析图 5(a)和图 5(b)可以看出,未加载电流情况下,合金磨损表面表现出塑性变形的痕迹,沿滑动方向表面上有少许的犁沟与切削痕迹,表面局部有被剥离后留下的凹坑,此时,合金导线的磨损形式以粘着磨损和磨粒磨损为主。加载电流为 4 A 情况下,合金磨损表面除出现切削痕迹与凹坑外,还明显存在熔融区和细小气孔。由于电弧产生的热量较大,合

金导线表面释放电弧的地方被烧蚀甚至熔化,再加上一定的滑动速度和载荷,合金导线表面将会被严重磨损。因为合金局部熔化物在冷却与凝固过程中发生收缩,就会形成细小的腐蚀气孔,从而加剧合金的磨损程度,此时,Cu-Ag-Cr 合金导线的主要磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损以及电侵蚀磨损。

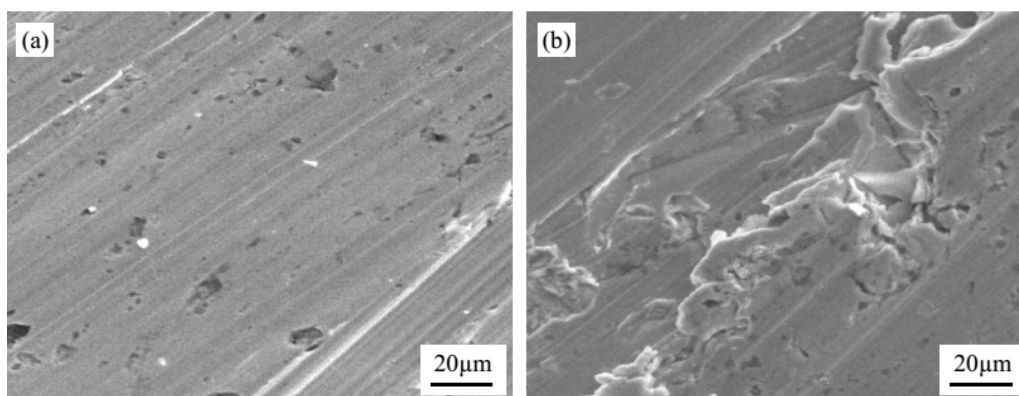


图 5 Cu-Ag-Cr 合金线摩擦表面形貌

Fig.5 Friction surface morphology of the Cu-Ag-Cr alloy wire

[(a). without current; (b). with 4 A current]

为进一步分析 Cu-Ag-Cr 合金电侵蚀形式,在加载电流为 4 A 条件下,对合金导线进行 120 min 的载流摩擦磨损试验,所得磨损表面形貌见图 6。

由图 6 可见,长时间载流摩擦磨损时,合金磨损表面出现了更多的电弧侵蚀点,导线表面有烧蚀和熔焊现象。分析认为,在载流摩擦磨损过程中,熔焊点被撕开,形成磨屑,并粘在一起成为大的磨粒,这些大磨粒部分从铜银合金导线表面脱落,部分仍粘在导线表面^[13]。

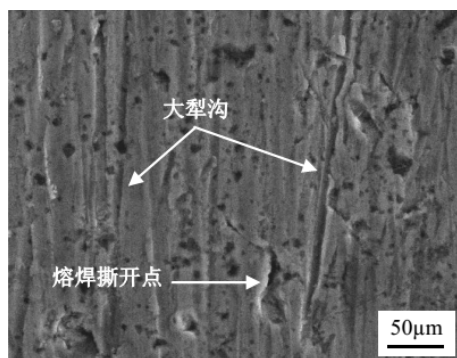


图 6 120 min 摩擦磨损后 Cu-Ag-Cr 合金线表面形貌

Fig.6 Surface morphology of the Cu-Ag-Cr alloy by friction and wear for 120 min

由于长时间摩擦带来的高温,线材表面层软化,抗剪切强度降低,产生严重塑性变形,与合金基体的结合力减弱,在速度与载荷的共同作用下,合金磨损表面出现大的犁沟,导致表面粗糙度增加,磨损加剧。这说明电弧侵蚀作用会在一定程度上加速 Cu-Ag-Cr 合金的磨损。

3 结论

(1) 加载电流对 Cu-Ag-Cr 合金导线的摩擦磨损性能有显著影响。随着电流的增加,合金导线的磨损率和温度逐渐增大。随着摩擦时间的延长,摩擦副之间的接触电阻由较大的初始值开始降低,继而围绕一个中值上下波动。

(2) 未加载电流时,Cu-Ag-Cr 合金导线的磨损形式以粘着磨损和磨粒磨损为主。加载电流后,合金的主要磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损以及电侵蚀磨损,且电弧侵蚀会加速合金的磨损程度。

参考文献:

- [1] 宋练鹏,尹志民,孙伟,等. 形变热处理对 Cu-Ag-Cr 和 Cu-Ag-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学

- 报, 2006, 27(6): 66-69.
- Song L, Yin Z, Sun W, et al. Influence of thermo-mechanical processing on microstructure and mechanical properties of Cu-Ag-Cr and Cu-Ag-Zr alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(6): 66-69.
- [2] 贾淑果, 郑茂盛, 刘平, 等. Cu-Ag-Cr 合金电摩擦性能研究[J]. 功能材料, 2006, 37(4): 658-662.
- Jia S, Zheng M, Liu P, et al. Study on the electro-tribological property of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(4): 658-662.
- [3] Vinogradova A, Patlanb V, Suzukib Y, et al. Structure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr-Zr alloy produced by equal-channel angular pressing[J]. Acta Materialia, 2002, 50(7): 1639-1651.
- [4] 刘克明, 陆德平, 周海涛, 等. 形变 Cu-Cr-Ag 原位复合材料组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(11): 1931-1935.
- Liu K, Lu D, Zhou H, et al. Microstructure and properties of Cu-Cr-Ag in-situ composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(11): 1931-1935.
- [5] Jia S G, Zheng M S, Liu P, et al. Aging properties studies in a Cu-Ag-Cr alloy[J]. Materials Science & Amp Engineering A, 2006, 419(1/2): 8-11.
- [6] Lei Jingguo, Liu Ping, Tian Baohong, et al. Aging precipitation behavior of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Diffusion and Defect Data, 2006, 118: 41-46.
- [7] Jia S G, Liu P, Ren F Z, et al. Wear behavior of Cu-Ag-Cr alloy wire under electrical sliding[J]. Materials Science & Amp Engineering A, 2005, 398(1/2): 262-267.
- [8] Mahmudi R, Karsaz A, Akbari-Fakhrabadi A, et al. Impression creep study of a Cu-0.3Cr-0.1Ag alloy[J]. Materials Science & Amp Engineering A, 2010, 527(10/11): 2702-2708.
- [9] Song J S, Kim H S, Lee C T, et al. Deformation processing and mechanical properties of Cu-Cr-X(X=Ag or Co) microcomposites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 272-277.
- [10] 李红卫, 戴姣燕. Cu-Ag-Cr 合金的强化机制及定量探讨[J]. 稀有金属, 2010, 34(6): 828-832.
- Li H, Dai J. Strengthen mechanism and ration analysis of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(6): 828-832.
- [11] 贾淑果, 刘平, 任凤章, 等. 高强高导低溶质 Cu-Ag-Cr 合金时效析出特性的研究[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(2): 8-10.
- Jia S, Liu P, Ren F, et al. Study on the aging precipitation of the high strength and high conductivity dilute solute Cu-Ag-Cr alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(2): 8-10.
- [12] 王松, 谢明, 王塞北, 等. 时效态高强高导 Cu-Ag-Cr 合金的组织与性能[J]. 稀有金属, 2014, 38(2): 210-215.
- Wang S, Xie M, Wang S, et al. Microstructures and properties of Cu-Ag-Cr alloy with high strength high conductivity[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(2): 210-215.
- [13] 郭美华. 铜银合金线材载流摩擦磨损行为研究[J]. 电线电缆, 2008(5): 4-8.
- Guo M. Wear behavior of Cu-Ag alloy with current[J]. Electric Wire & Cable, 2008(5): 4-8.