

Ag-30W 的电弧行为高速摄像及表面侵蚀研究

陈静洪, 任县利, 方继恒, 陈松*, 谢明, 王塞北, 孙绍霞, 李爱坤, 朱刚, 李再久
(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: 采用高速摄像的方法, 研究了直流条件下 Ag-30W 电接触材料电弧行为的基本特征和规律。通过扫描电镜技术, 探讨了在电弧烧蚀触头表面的微观组织形貌、元素分布等特征。结果表明, 电弧演化经历快速起弧、稳定燃烧和迅速熄灭 3 个过程。电弧烧蚀触头表面形貌由以钨为骨架、银为包裹层的大量凸丘组成。在电弧作用下, 银包裹层可以有效保护钨骨架不被烧损, 同时减少钨与空气的接触, 减轻凸丘处电弧燃烧造成的侵蚀。

关键词: 金属材料; 电接触材料; 电弧; 高速摄像; 熔桥; 表面侵蚀; 形貌

中图分类号: TM206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)04-0034-05

Study on Surface Erosion and Arc Erosion Profile of Ag-30W by Using High-speed Imaging Technique

CHEN Jinghong, REN Xianli, FANG Jiheng, CHEN Song*, XIE Ming,
WANG Saibei, SUN Shaoxia, LI Aikun, ZHU Gang, LI Zaijiu

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metal,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Arc erosion profile and regularity of Ag-30W, an electrical contact material, were investigated by the high-speed imaging technique along with the measurement of SEM morphology on contact surface under direct current. Results showed that the arc formation at different voltages was similar and underwent three stages including forming stage and steady burning and discharge quenching stage. The convex was observed on the erosion surface of the contacts under scanning electron microscopy (SEM). The convex was formed in the break off of molten bridge by the W skeleton and Ag cladding. With the continuous erosion by the arc light, Ag cladding would protect the W skeleton from burning loss and oxidative damage, endowing the contact material with an enhanced anti-erosion ability.

Key words: metal materials; electrical contact material; arc erosion; high-speed camera; molten bridge; surface erosion; morphology

Ag-30W 电触头材料具有硬度高、抗黏着和抗熔焊能力强的优点, 广泛应用于高压开关、重负荷继电器、电加工电极和空气断路器等。触头在电接触闭合断开过程中, 触头间会发生弧光放电而形成电弧, 电弧的产生必然对触头表面材料造成侵蚀,

经过多次积累作用, 使触头材料发生损耗, 这种损耗严重限制了电接触材料的使用寿命, 因此电弧行为一直是电接触材料领域的研究重点^[1-5]。由于电弧放电发生于触头闭合和断开的瞬间, 放电行为相对复杂, 存续时间最短只有几毫秒, 对实验的观测和

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(51461023, 51767011, 51507075, 51267007, U1602275, U1602271, U1302272)、云南省自然科学基金(2015FA042, 2014FB164, 2010CD126, 2012FB195)、云南省创新团队项目(2012HC027)、云南省技术创新人才项目(2015HB024)。

第一作者: 陈静洪, 男, 硕士研究生, 研究方向: 电接触材料。E-mail: hellochenjh@163.com

*通讯作者: 陈松, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 计算材料。E-mail: cs@ipm.com.cn

分析带来较大的困难。

高速摄像技术是一种可以记录高速瞬发过程的测试手段, 出现于 20 世纪 70 年代, 在电接触领域中有广泛应用。王俊勃等^[6]借助高速摄像手段观测电弧放电过程中等离子云的变化过程, 判断出电弧行为的演化特征; Junya 等^[7]通过高速摄像方法研究了电弧放电过程不同阶段电压电流的变化规律等。高速摄像技术在多数实验中可以直接进行观察和测量, 而在电接触材料电弧行为的研究中, 由于电弧亮度较高, 触头实验区域较小, 需要设计专门的光路系统对电弧行为进行研究。本研究中光路系统主要由光源系统、成像系统和拍摄系统 3 部分组成, 用来拍摄电弧从出现、变大、竞争到熄灭的整个过程^[8-10]。

由于银和钨在液态和固态条件下均无法互溶, 所以本研究采用粉末冶金技术制备 Ag-30W 合金材料^[11-13], 并通过切割、打磨、抛光、清洗等过程制成片状的触头材料。在单分断测试条件下, 选取电流为 25 A, 直流电压分别为 20、25、30 和 35 V 共 4 个实验条件进行测试。通过自行设计的光路系统观察电弧的演变特点, 并对电弧烧蚀后的触头表面进行电子扫描电镜观察, 进一步分析电接触过程中电弧烧蚀对材料性质、触头表面形貌等的作用机制和过程, 确定电弧行为的基本特征和规律。

1 实验

首先将纯度>99%的银粉, 钨粉进行混粉、烧结, 经二次挤压、轧制等方法制成 Ag-30W 带材, 并通过线切割、打磨、抛光和清洗过程制成实验所用触头对, 如图 1 所示。其中上面是动触头(阳极), 接触面为弧面; 下面是静触头(阴极), 接触面为平面。

实验过程中所用的高速摄像系统^[14]主要由电接触试验机、成像系统和拍摄系统 3 部分组成。拍摄时首先调节消色差透镜组与高速摄像机物镜的距离以观察到试验机上触头对最清晰的像, 而后关闭光源, 并将电接触试验机用内部涂黑的遮光暗箱罩住, 防止外界光线进入, 开动电接触试验机, 并用高速摄像机对电弧行为进行记录, 拍摄速度为 1000



图 1 Ag-30W 触头对形貌

Fig.1 The morphology of Ag-30W contacts

帧/秒。通过该高速摄像系统可以拍摄到电弧的存续时间、颜色变化、电弧产生和运动特点、尺寸参数, 以及熔桥行为等重要特征^[15-17]。最后对每个实验条件完成后的触头表面进行形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 电弧行为的高速摄像观测

图 2 为 Ag-30W 触头对在电压 20 V、电流 25 A 条件下电接触分断过程中的电弧行为。随着动触头分断动作的进行, 触头对之间开始放电并产生弧光, 如图 2b 所示, 电弧颜色为白色, 存续时间为 1 ms。



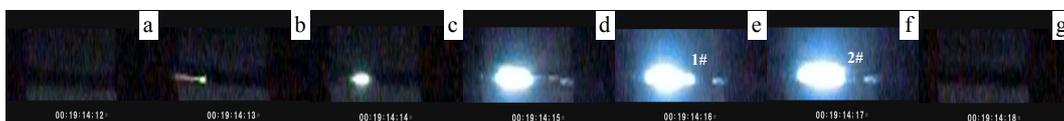
a. 触头分断开始(Contact breaking start);

b. 电弧形成(Arc formation); c. 电弧熄灭(Arc quenching)

图 2 20 V/25 A 条件下电弧行为观测

Fig.2 The observation of arc discharge under 25 V/25 A

Ag-30W 触头对在电压 25 V、电流 25 A 的条件下电接触分断过程中的电弧行为如图 3 所示, 在电弧放电初始阶段有若干微弱的电弧斑点出现, 且弧光呈淡黄色, 随后合并变大, 逐渐趋于圆柱形, 弧光呈耀眼的白光, 电弧的存续时间为 5 ms。在电弧出现的同时有熔桥存在, 如图 3e 和 3f 中的 1# 和 2# 区域下方所示。



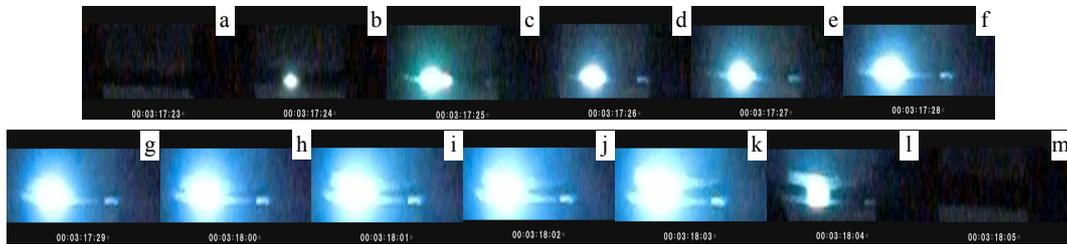
a. 触头分断开始(Contact breaking start); b-f. 电弧形成及变化(Arc formation and change); g. 电弧熄灭(Arc quenching)

图 3 25 V/25 A 条件下电弧行为观测

Fig.3 The observation of arc discharge under 25 V/ 25 A

图 4 为电压 30 V、电流 25 A 条件下拍摄得到的电弧行为轨迹。放电初始阶段, 产生球状微弱白光, 接着弧光不断变大, 放出耀眼的白光, 并充斥

于两极间逐渐趋于柱状电弧(如图 4l), 最后迅速熄灭。电弧的存续时间为 11 ms, 放点过程伴随有多点放电和熔桥现象产生。

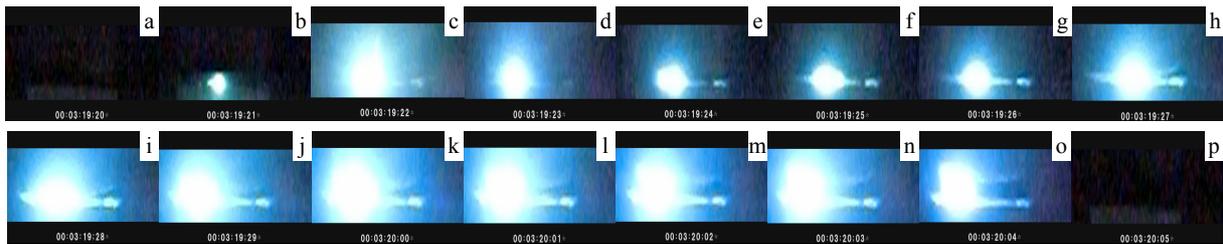


a. 触头分断开始(Contact breaking start); b~l. 电弧形成及变化(Arc formation and change); m. 电弧熄灭(Arc quenching)

图 4 30 V/25 A 条件下电弧行为观测 Fig.4 The observation of arc discharge under 30 V/25 A

图 5 为 Ag-30W 触头对在电压 35 V、电流 25 A 的条件下电接触分断过程中的电弧行为。电弧产生阶段其光斑微弱并近似球形(如图 5b 所示), 随后电弧不断变大并形成爆炸似的电弧光斑, 放出耀眼的

白光(如图 5c~5o 所示), 最后迅速熄灭。电弧的存续时间为 14 ms, 放电过程伴随有多点放电和熔桥现象产生。



a. 触头分断开始(Contact breaking start); b~o. 电弧形成及变化(Arc formation and change); p. 电弧熄灭(Arc quenching)

图 5 35 V/25 A 条件下电弧行为观测 Fig.5 The observation of arc discharge under 35 V/25 A

将以上 4 个条件下电弧稳定燃烧阶段弧光斑点的存续时间、光斑尺寸测量结果列于表 1, 其中测量过程根据动触头宽度 3.33 mm, 静触头宽度 3.54 mm, 利用图像测量软件(Digimizer), 分别测得弧光斑点的宽度和高度。

表 1 不同条件下电弧持续时间及稳定燃烧阶段光斑尺寸

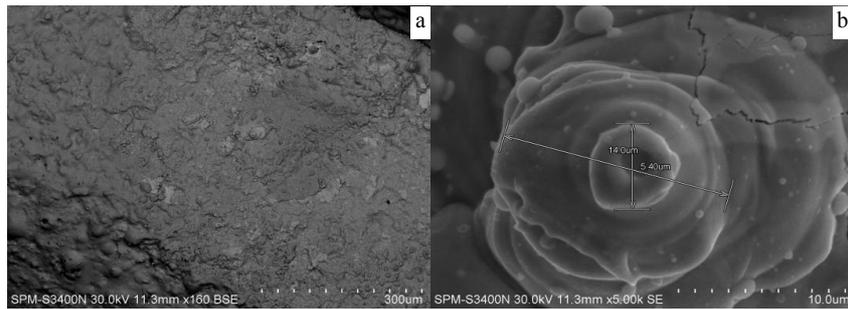
Tab.1 The duration time of arc discharge and the size of arc light in stable burning stage in different voltage conditions

Direct voltage-current conditions	The duration time of arc discharge /ms	The width of arc light /mm	The height of arc light /mm
20 V/25 A	1	0.604	0.448
25 V/25 A	5	1.206	0.514
30 V/25 A	11	1.406	0.725
35 V/25 A	14	1.627	0.804

从表 1 可以看出, Ag-30W 材料电弧的寿命随电压的升高而延长, 电弧稳定燃烧阶段光斑尺寸随电压升高也相对较大。电弧初始阶段为单点放电, 弧光微弱趋于球形。电弧稳定燃烧阶段出现多个放电点, 随后放电点发生合并, 放电斑点变大逐渐趋于柱形, 弧光呈耀眼的白光, 说明电弧温度较高, 电弧迅速熄灭。放电过程伴随有熔桥产生, 在电弧各阶段都无明显爆炸、喷溅行为。

2.2 电弧行为后触头表面形貌观测

图 6 为电弧侵蚀后动触头表面的 SEM 形貌图。从图中可以观察到触头表面的侵蚀特征表现为不规则的熔化区域, 熔化区域由大量相互叠压的熔斑以及凸丘构成, 材料的喷溅行为不明显。图 6b 可以发现熔体从凸丘上流下的痕迹, 通过 EDS 检测得到凸丘的钨含量在 74%以上, 说明该凸丘是以钨为骨架构成的。结合高速摄像对电弧演变过程的观测结



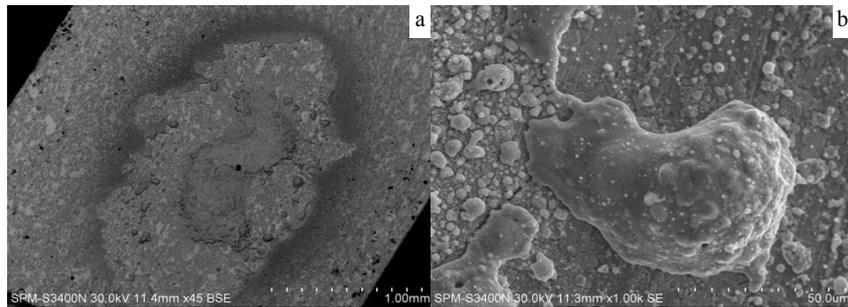
a. 整体形貌(Overall morphology); b. 局部放大形貌(Partial magnification morphology)

图6 动触头表面电弧侵蚀形貌 Fig.6 Morphologies of the movable contact surface after arc erosion

果表明,在触头分离过程中钨凸丘处易于形成熔桥,当熔桥断裂后熔体会从凸丘上流下,表现出分层凝固的痕迹。由此判断,熔桥的存在有赖于钨为骨架、银为包裹层所构成的凸丘,并且可以有效保护钨不被烧损,减轻电弧燃烧的侵蚀。熔桥的出现并不与电弧现象相矛盾,可以认为熔桥和电弧在分段过程中可以同时存在,并且可能有一定的协助作用。

图7为电弧侵蚀后静触头表面的SEM形貌图。

从图7中可以观察到静触头表面有明显的电弧侵蚀区域,图7b观察到侵蚀区域中有凸丘存在,凸丘的周围有大量细小的喷溅颗粒。凸丘主要是由大的熔体滴落到静触头表面后凝固形成的。凸丘上的分层凝固现象相对不是很明显,但仍然是以银为包裹层、内部钨为骨架构成的。相比动触头而言,电弧对静触头表面的侵蚀作用比熔桥作用更明显。



a. 整体形貌(Overall morphology); b. 局部放大形貌(Partial magnification morphology)

图7 静触头表面电弧侵蚀形貌 Fig.7 Morphologies of the fixed contact surface after arc erosion

2.3 分析与讨论

综合实验观测和分析结果,可以得出 Ag-30W 电接触材料抗电弧侵蚀的主要机制是:触头分离过程中存在多点放电现象,并在触头表面微小的凸丘处伴随有熔桥的产生,当熔桥断裂后银熔体会从凸丘上流下,形成以钨为骨架、银为包裹层的凸丘,并表现出分层凝固的痕迹,在熔桥断裂后出现的电弧作用下,银包裹层可以有效保护钨骨架不被烧损,同时减少钨与空气的接触,减轻凸丘处电弧燃烧造成的侵蚀。而且凸丘的形状可以保证在每次触头分离过程中均会有熔桥出现,从而保证银包裹层可以不断长大和修复,从而使凸丘得以保存和长大。

3 结论

1) Ag-30W 触头单分段过程中的电弧现象主要经历电弧起弧、稳定燃烧和迅速熄灭3个阶段。在相同电流条件下,随着电压的升高,电弧存在时间越长,稳定燃弧阶段表现更为剧烈。

2) 电弧的放电存在多点放电特征,同时伴有熔桥的产生,熔桥断裂后,形成以钨为骨架、银为包裹层的凸丘,在电弧多次作用下,可以有效保护钨骨架不被烧损,减轻电弧侵蚀。

3) 本研究通过结合高速摄像技术和扫描电镜

分析手段,验证了 Ag-30W 电接触材料电弧放电过程中熔桥的存在,熔桥存在与电弧放电行为之间有协同关系,为电接触科学领域尤其是电弧复杂行为的研究提供了一种有效的研究方法。

参考文献:

- [1] CHEN Y L, LEE S W, YE H J W. et al. A novel process for fabricating electrical contact SnO₂/Ag composites by reciprocating extrusion[J]. Metallurgical and materials transaction A, 2005, 36: 2441-2447.
- [2] WU C P, YI D Q, WENG W, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ni electrical contact materials[J]. Materials and design, 2015, 85: 511-519.
- [3] SWINGLER J, SUMPTION A. Arc erosion of AgSnO₂ electrical contacts at different stages of a break operation[J]. Rare metals, 2010, 29(3): 248-254.
- [4] SWINGLER J, MCBRIDE J W. The erosion and arc characteristics of Ag/CdO and Ag/SnO₂ contact materials under DC break conditons[J]. IEEE transactions on components packaging & manufacturing technology part A, 1996, 19(3): 404-415.
- [5] 李振彪, 黄良, 吴细秀, 等. 42 V 汽车继电器触点电弧特性[J]. 电压电器, 2007, 15: 1-5.
LI Z B, HUANG L, WU X X, et al. Arcing contact behavior for 42VDC automotive relay[J]. Low voltage apparatus, 2007, 15: 1-5.
- [6] 王俊勃, 张燕, 杨海鸽, 等. Fe 掺杂对纳米复合 Ag-SnO₂ 电接触合金电弧演化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(12): 1954-1958.
WANG J B, ZHANG Y, YANG H G, et al. The effect of Fe doping on arc evolution behavior of nanocomposite Ag-SnO₂ contact alloys[J]. Rare metal materials and engineering, 2006, 35(12): 1954-1958.
- [7] JUNYA S, TETSUYA K, TAKAYOSHI E. Observation of arc-emitted light between slowly opening electrical contacts using a high-speed camera[J]. IEEE transactions on plasma science, 2004, 2(4): 47-52.
- [8] LIN Z J, SUN X D, LIU S H. Effect of SnO₂ particle size on properties of Ag-SnO₂ electrical contact materials prepared by the reductive precipitation method[J]. Advanced material research, 2014, 936: 459-463.
- [9] 陈松, 管伟明, 张昆华. Ag/La₂NiO₄ 基电触头在直流大电流条件下电弧侵蚀的实验与有限元研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 131-137.
CHEN S, GUAN W M, ZHANG K H. Finite element method and experimental investigation on the arc erosion of Ag/La₂NiO₄ base electrical contacts at high direct current[J]. Rare metal materials and engineering, 2009, 38(1): 131-137.
- [10] CHEN W G, KANG Z Y, SHEN H F. Arc erosion behavior of a nanocomposite W-Cu electrical contact material[J]. Rare metals, 2006, 25(1): 37-42.
- [11] LI R X, YANG J H, HUO N J. Effect of electrical contact on the performance of Bi₂S₃ single nanowire photo-detectors[J]. Chemphyschem, 2014, 15(12): 2510-2516.
- [12] MATHIEU M, KARINA H, PIERRE F. Arc contact ablation: high speed camera visualization[J]. IEEE transactions on plasma science, 2014, 42(10): 2380-2381.
- [13] CHRISTIAN W, MICHAEL K, MANFRED L. Arcing behavior on different TMF contacts at high-current interrupting operations[J]. IEEE transactions on plasma science, 2011, 39(6): 1284-1290.
- [14] 陈静洪, 方继恒, 陈松, 等. 不同电流下钨触头材料熔桥行为研究[J]. 贵金属, 2017, 38(3): 40-45.
CHEN J H, FANG J H, CHEN S, et al. Observation on molten bridge of pd electrical contact material under different current[J]. Precious metals, 2017, 38(3): 40-45.
- [15] GHOSH P K, DORN L, KULKARNI S, et al. Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(3): 1262-1274.
- [16] TANAKA M, TSURUOKA Y, LIU Y. Stability analysis of multi-phase AC arc discharge for in-flight glass melting[J]. Current applied physics, 2011, 11(5): S35-S39.
- [17] 韩波, 史庆南, 谢明. 直流条件下 W-15wt%Cu 电接触材料燃弧特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(6): 994-997.
HAN B, SHI Q N, XIE M. Arc erosion characteristics of W-15wt% Cu electric materials under DC conditon[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(6): 994-997.