

AgWC30 电接触材料的电弧行为研究

任县利, 陈松, 李慕阳, 谢明, 陈静洪, 王塞北, 李爱坤, 刘满门

(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, 云南 昆明 650106)

摘要: 对电弧基本行为的研究一直是电接触材料领域的研究重点, 本研究以 AgWC30 触头为研究对象, 借助高速摄像的手段, 观测电触头对在不同工作条件下, 电弧行为的基本特征和规律, 并进行了定量测量研究。结果表明, 电弧演化阶段经历起弧、稳定燃烧、迅速熄灭 3 个过程。起弧阶段存在多点起弧特征, 并伴有明显的金属熔滴的飞溅行为, 稳定燃烧阶段出现电弧的产生、长大和合并行为, 最后电弧迅速熄灭。通过扫描电镜对燃弧后触头表面的形貌分析, 判断触头表面存在以 WC 为骨架覆 Ag 的大量凸丘, 凸丘与熔桥的产生和断裂行为有密切关系, 触头分断过程中熔桥和电弧可同时存在, 并存在一定的协助作用。

关键词: 电弧侵蚀; 高速摄像; AgWC30 电接触材料; 熔桥

中图分类号: TM206

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3345-07

AgWC30 触头材料具有高导电率、高硬度等优点, 可以在大电流电压条件下工作, 被广泛应用于精密点焊电极, 精密探针及电接触器中。在电触头工作过程中电弧的产生对触头材料的性能有重要影响, 因此对电弧基本行为的研究一直是电接触材料研究的重点^[1,2]。电弧是触头接触或断开过程中电极之间的放电, 一般可以分为金属相电弧、气相电弧 2 种。电触头表面在电弧中多物理场与材料的复杂耦合作用下, 材料表面会发生熔化、气化等行为^[3,4]。在电弧作用下, 表面熔池区域发生熔液飞溅、蒸发等行为, 导致材料的质量转移侵蚀^[5]。对于电弧行为的研究一直是电接触学科中未解决的重要基础问题, 所以对于电弧行为的观察具有重要的学术研究价值。电接触过程中出现的电弧, 其存在时间较短为毫秒量级, 而且强度较弱, 这为常规的实验观测和分析带来困难, 本研究借助高速摄像技术和专门设计的光路系统对电弧现象进行研究^[6,7]。

首先通过粉末冶金技术制备 AgWC30 触头材料的片材, 并通过切割、打磨、抛光、清洗等过程制成片状的实验样品。测试条件为单分断, 选取电流为 25 A, 直流电压分别为 20, 25, 30, 35 共 4 个实验条件进行测试。同时, 设计和构建相应的实验光路, 建立观察电弧行为的高速摄像系统, 通过分析拍摄图像, 以及扫描电镜的测试结果, 进一步分析电接触过程中电弧烧蚀对材料性质、材料相变、触头表面形状等的作用

机制和过程, 确定电弧行为的基本特点和规律。

1 实验

首先将纯度 99.9% 的 Ag 粉, WC 粉进行混粉、烧结, 经二次挤压、轧制方法制成 AgWC30 带材, 并通过线切割、打磨、抛光和清洗过程制成实验用厚度为 2.67 mm, 边长为 4.91 mm 的等边三角形片状触头对 (如图 1)。为了便于实验观察, 将上触头尖部朝下, 下触头平面状方向朝上, 两触头相互垂直放置, 此时上触头宽度为触头的厚度, 尺寸为 2.67 mm, 下触头宽度为触头的边长, 尺寸为 4.91 mm。

采用 JF04C 电接触测试机进行电接触实验, 在电流为 25 A, 直流电压分别为 20、25、30、35 V, 阻性负载条件下, 对触头材料进行 50 次电接触实验。并对实验后的电触头进行 SEM 观察和 EDS 分析。

本研究借助高速摄像技术对电弧现象进行观测, 实验过程的高速摄像系统设计如图 1 所示, 该系统主要由电接触试验机、成像系统和拍摄系统 3 部分组成。其中实验时触头对一次从接通到断开至下次接通前的循环周期为 1 s, 上触头为阳极动触头, 下触头为阴极静触头。透镜与触头接触点的距离为 7.5 cm, 接触压力约为 100 cN。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, 并将测试部分用内部涂黑的遮光

收稿日期: 2016-11-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51267007, 51461023, 51164015, U1302272); 云南省创新团队 (2012HC027); 云南省自然科学基金 (2010CD126, 2012FB195, 2015FA042)

作者简介: 任县利, 男, 1988 年生, 硕士, 昆明贵金属研究所, 云南 昆明 650106, E-mail: renxianli_1@163.com

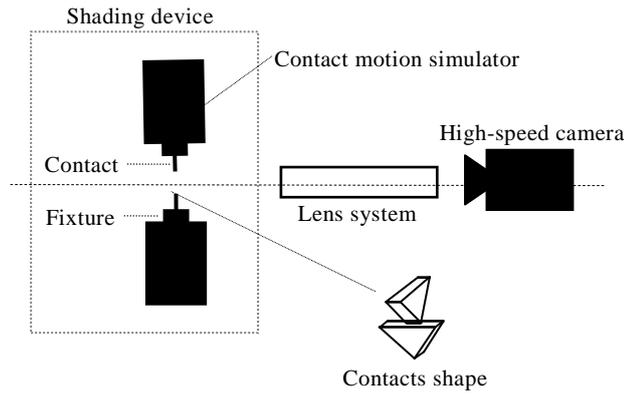


图 1 电弧观察高速摄像系统

Fig.1 Schematic of high-speed camera system

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。为了能采集到电弧演变的多个循环周期的图像，经过多次试验，设置拍摄速度为 1000 帧/s。通过该系统可以拍摄到电弧的从出现、变大、竞争和熄灭整个过程，同时通过记录可以得到关于电弧的存续时间、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^[8-11]。最后，对每个实验条件完成后的触头表面进行形貌观察。

2 结果与分析

2.1 电弧的高速摄像观察

2.1.1 AgWC30 电接触材料在 25 A , 20 V 条件下的电

弧行为观测

图 2 为 AgWC30 触头在 25 A, 20 V 条件下电弧形貌。从图 2 中可以发现触头对在断开的瞬间两极间出现微弱的光斑 (如图 2a)，随后左侧出现具有较大光斑的爆裂状电弧，并伴随有大量的金属熔滴从电弧产生的金属熔池中的飞溅出来，接着电弧逐渐向右侧

转移，继而生成耀眼的巨大电弧光斑，且光斑由数个明显连在一起的中心光斑组成，最后光斑迅速减小至一个微弱的小光斑，最终完全消失。此次过程电弧存在时间约为 7 ms，其中产生和熄灭时间较短，稳定存在时间较长。为了观测光斑的尺寸，挑选容易测量的电弧光斑图作为其尺寸依据。根据上触头宽度 2.67 mm，下触头宽度 4.91 mm，利用图像测量软件 (Digimizer)，测得图 2f 中电弧光斑宽约为 1.278 mm，高约为 0.305 mm。从图 2d 中右侧可以发现断裂后的熔桥凸丘的痕迹。

2.1.2 AgWC30 电接触材料在 25 A , 25 V 条件下的电

弧行为观测

图 3 为 AgWC30 触头在 25 A, 25 V 条件下电弧形貌。从图 3 中发现起初出现微弱的电弧光斑。随后电弧光斑逐渐生长，出现数个中心连在一起的大电弧光斑。随后光斑继续变大并在触头左侧合并成为一个大的趋近于球形的电弧光斑，最后光斑迅速熄灭。此次过程电弧存在时间为 9 ms。测得图 3g 中电弧光斑宽约为 3.000 mm，高约为 0.542 mm。从图 3d、3h 中左侧可以发现断裂后的熔桥凸丘的痕迹。

2.1.3 AgWC30 电接触材料在 25 A , 30 V 条件下的电

弧行为观测

图 4 为 AgWC30 触头在 25 A, 30 V 条件下电弧形貌。从图 4 中拍摄到的电弧形状，发现图 4b 中出现数个微弱的暗红色或橘红色斑点，随后生成有 3 个明显电弧中心的电弧斑点 (说明存在多点同时放电行为)。接着电弧光斑在触头左侧逐渐融合为 1 个大型的趋近于柱状的电弧光斑 (电弧存在合并行为)。此次过程电弧存在时间为 13 ms。测得图 4f 中电弧光斑宽约

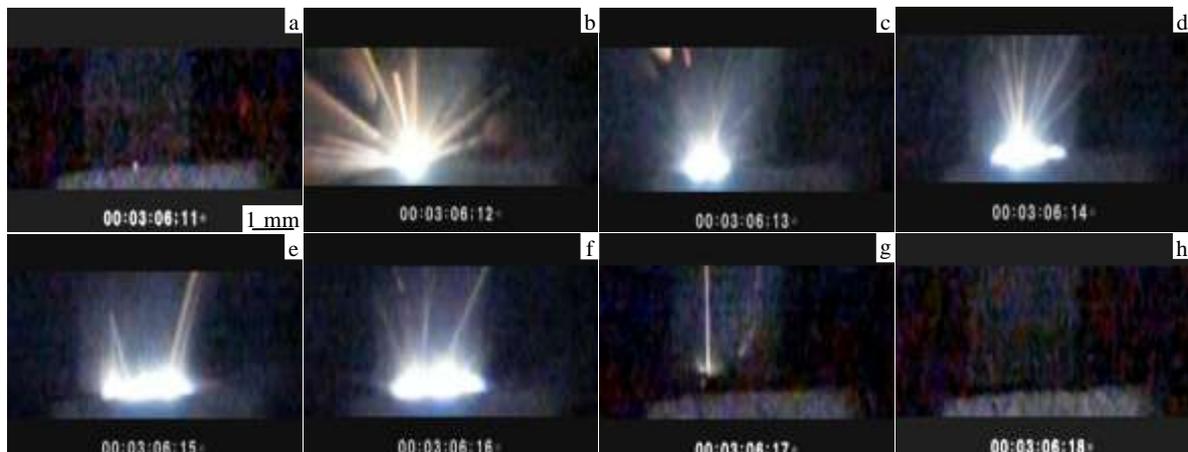


图 2 AgWC30 触头在 25 A, 20 V 条件下电弧形貌

Fig.2 Morphologies of arc discharge under direct current 25 A, 20 V (Fig.2a~2h represent images that start from the arc to the end every millisecond)



图 3 AgWC30 触头在 25 A, 25 V 条件下电弧形貌

Fig.3 Morphologies of arc discharge under direct current 25 A, 25 V (Fig.3a~3k represent the images that start from the arc to the end every millisecond)

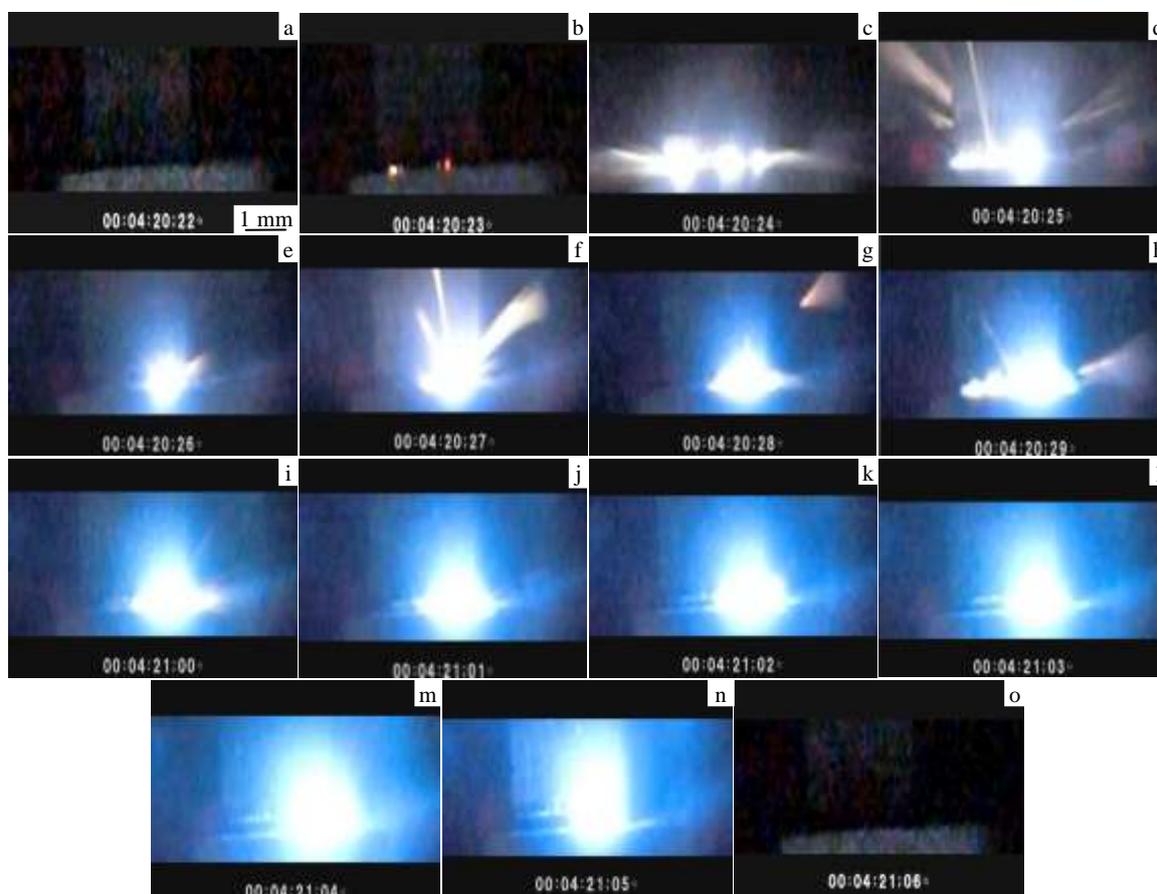


图 4 AgWC30 触头在 25 A, 30 V 条件下电弧形貌

Fig.4 Morphologies of arc discharge under direct current 25 A, 30 V (Fig.4a~4o represent images that start from the arc to the end every millisecond)

为 2.355 mm, 高约为 0.795 mm。

图 4c 具有明显的多点放电现象, 数个放电光斑被遮挡物分开, 这是因为在电弧放电点至摄像机方向上有熔桥产生, 起到遮挡光线的作用, 并通过投影产生影像。图 4b、4h 中均可以看到这种现象, 可以判断此时电弧和熔桥同时存在。同时, 从图中还可以看出有多个熔桥产生, 有的断开, 有的连通。对于连通的熔桥, 由于熔桥的截断面积较小, 有电阻存在, 触点虽然连通但两端电压值不为零, 且随着熔桥的拉长, 电阻增大, 电压增大, 在熔桥断开时更易发生电弧放电。

2.1.4 AgWC30 电接触材料在 25 A, 35 V 条件下的电

弧行为观测

图 5 为 AgWC30 触头在 25 A, 35 V 条件下电弧形貌。从图 5 中拍摄到的电弧形状, 发现图 5a 出现若干个微弱的暗红色的斑点, 随后斑点生长成 1 个弧光四溅的爆炸状电弧, 说明液滴喷溅十分剧烈, 接着电弧明显向右侧偏移变为 1 个有明锐白光特征, 且外形趋近于柱状的电弧, 最终电弧迅速熄灭, 此次过程电



图 5 AgWC30 触头在 25 A, 35 V 条件下电弧形貌

Fig.5 Morphologies of arc discharge under direct current 25 A, 35 V (Fig.5a~5v represent images that start from the arc to the end every millisecond)

弧存在时间为 20 ms, 测得图 5d 中电弧光斑宽约为 1.486 mm, 高约为 0.858 mm。同时, 从图 5a 中可以看到在 2 个电弧放电点之间有熔桥存在。

从上述 4 个条件下电弧行为的观察可以发现 AgWC30 在实验中电弧的寿命随电压的升高而延长。同时不同电压条件下, 电弧的演化过程均相似, 表现为: 触头对在断开过程中, 随着阳极动触头的上升, 由于熔桥和接触面积减小的原因, 在电极表面产生的由于少量金属蒸气与电子发生碰撞导致电离并产生微弱的弧光, 此时弧光颜色为暗红色或橘红色, 说明电弧的温度较低, 且出现的位置存在多位置特征, 随着分离距离加大, 电弧弧光变大且明亮, 且在电弧作用下, 伴随有明显的金属液滴喷溅或脱落行为, 此时电弧弧光为明锐的明黄色或趋于耀眼的白光, 说明电弧温度较高, 此阶段为电弧的形成阶段。随后电弧进入稳定燃烧阶段, 金属液滴喷溅减少, 电弧弧光表现为耀眼的白光, 且生长过程出现由数个电弧放电点光斑合并为一个趋于均匀且饱满的球形或圆柱形, 说明电弧存在竞争行为。最后随着动触头的不断上升, 使得电极间距离拉大, 电场强度减弱, 电流也减弱, 这使得电弧的电离无法继续, 最终电弧彻底熄灭。

2.2 电弧行为的 SEM 分析

图 6 是 AgWC30 触头燃弧后上、下触头的 SEM 形貌照片, 图 6a 为阳极上触头表面形貌, 1#区域为触头尖端部电弧侵蚀区域, 2#横纹区域为未受电弧侵蚀的触头基底。上触头 1#表面有大块不规则熔化区域, 并且有大量

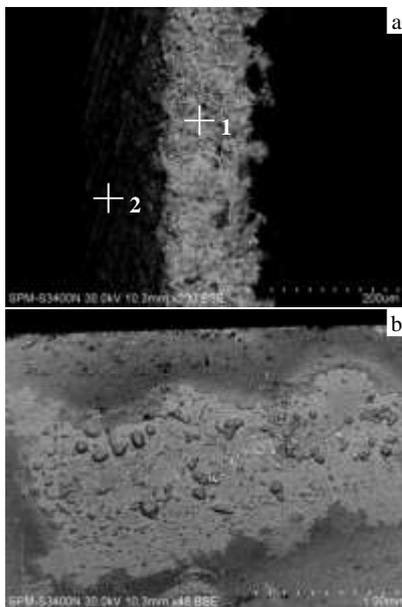


图 6 AgWC30 触头燃弧后上、下触头表面 SEM 照片

Fig.6 SEM images of the erosion surface of AgWC30 contacts: (a) anode and (b) cathode

熔化斑或凸丘, 说明材料的喷溅行为不明显。图 6b 是阴极下触头的形貌。可以看出触头表面凹凸不平, 这主要是电弧烧蚀后喷溅颗粒的堆积导致^[12,13], 并存在从阳极到阴极的质量转移。

对上触头表面电弧侵蚀形貌进行放大观察如图 7a~7d 所示, 可以看出表面有大量凸丘存在, 说明触头分离过程有熔桥行为存在。通过对图 7d 中的凸丘进行 EDS 面扫描(结果如表 1)发现这些区域均为富 W, C 贫 Ag 区域, 从而可以判断这些凸丘以 WC 为骨架, 以 Ag 为包裹层构成。由于熔桥断裂时, Ag 包裹层熔体会沿凸丘顶端向下部流淌, 在多次作用下, 必然导致顶端 Ag 包裹层较薄, 下部包裹层较厚, 在形貌上则表现为明显的分层凝固痕迹。由于顶端包裹层较薄, 对 WC 骨架的包裹保护作用较弱, 导致 W 和 C 被氧化损失的质量相对较多, 并且在高温条件下, W 和 C 的氧化物以挥发的形式从基体脱离, 所以区域 1 Ag 的相对质量较高(Ag 和 WC 质量相比), 同时区域 1 C 的相对质量最低, 说明 C 和 W 相比更易氧化挥发。而在下部如区域 3, 由于 Ag 包裹层较厚, 起到很好的包裹保护作用, 使得 W 和 C 的质量损失较小, Ag 的相对质量较低, 同时较厚的包裹层溶解了更多的 O, 使得区域 3 O 的相对质量最高。

阳极表面有多种凸丘存在, 有些较为圆滑(如图 7b), 有的如弹头一样尖锐(如图 7d), 但这些凸丘的共同特点都是由是 WC 为骨架, 以 Ag 熔体为包裹层, 在电弧多次作用下, 可以有效保护 W 和 C 不被烧损。该凸丘经过电触头多次分断之后, Ag 包裹层逐渐增厚, 凸丘也趋于圆滑。

图 8 是阴极触头的形貌。从图 8a 中可以看出阴极触

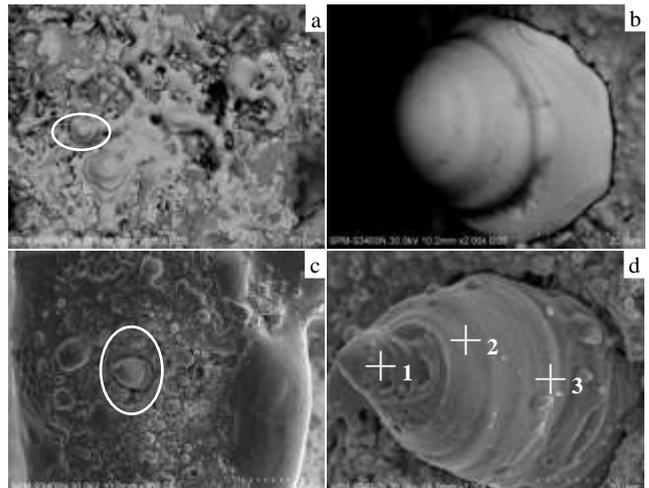


图 7 阳极触头表面电弧侵蚀形貌

Fig.7 SEM morphologies of erosion surface of anode contact: (a, c) the enlargement of anode contact surface, (b) round convex, and (d) bullet-like convex

表 1 图 7d 中 AgWC30 阳极触头触点表面能谱分析
Table 1 Composition data of anode surface measured by EPMA in Fig.7d ($\omega/\%$)

Area	Ag	W	C	O
1	6.29	79.32	8.26	6.13
2	5.44	76.06	11.42	7.08
3	4.14	75.24	10.94	9.69

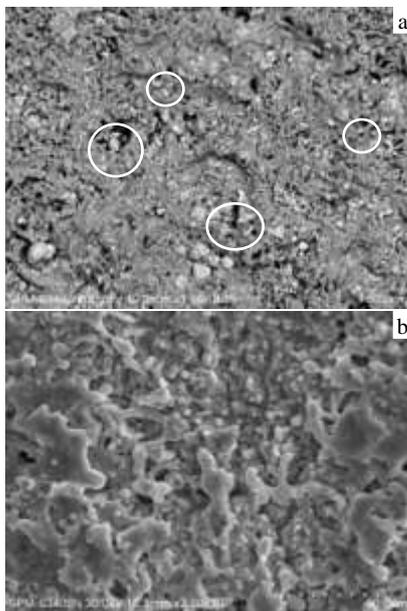


图 8 阴极触头表面电弧侵蚀形貌

Fig.8 SEM morphologies of erosion surface of cathode contact (a) and the enlargement of Fig.8a (b)

头表面有珠状颗粒分布,这主要是液滴喷溅后冷却形成。同时表面有大量孔洞,这主要是因为电弧作用下,由于熔池中熔液的剧烈喷溅行为,使得喷溅出来的细小颗粒打在熔池表面,冷却后形成许多微小孔洞(如图中白线圈区域),同时当熔池区域凝固时,由于溶解的 O 的逸出,使表面形成大量的收缩孔。

图 8b 为对应的触头表面区域形貌。主要是因为燃弧阶段,表面的熔池区域熔融金属的喷溅形成熔层表面的凹凸不平^[14,15]。喷溅现象在整个电弧行为过程中可能一直存在,不仅仅是在电弧形成的初期(如图 2b~2e,

图 5b~5f),在电弧稳定燃烧阶段,由于触头表面熔池较大,电弧作用剧烈,必然有剧烈的溶液喷溅行为。并且认为图 8b 中块状较大的颗粒为电弧稳定燃烧阶段形成,较小颗粒为电弧初始阶段形成。

从图 8 中仍可以看到有凸丘存在,考虑到凸丘是以 WC 为骨架构成,而 Ag 包裹层可以很好的保护 WC 不受电弧烧蚀,所以凸丘可以一直存在。

由于凸丘的形状特点,所以在触头分离过程中极易发生熔桥行为,而且由于 WC 骨架的熔点高,这使得熔桥会较大,存在的时间也较长。这与前面高速摄像中观察到存在熔桥行为是一致的(如图 2d、3d、3h、4b、4c、4h、5a 所示),同时可以发现熔桥在电弧的初期和中期阶段可以同时存在,在电弧初始阶段可以认为熔桥的出现可以帮助电弧放电,高速摄像实验中看到的多点放电很可能与这些熔桥行为相关的凸丘有关。

总之,通过对上、下触头的形貌分析,可以观察到触头表面在电弧烧蚀后有大块喷溅颗粒堆积成的熔化区域及熔桥断裂时留下的大量凸丘,凸丘的长大和演化过程与熔桥行为直接相关^[16,17]。同时,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断过程中同时存在,并且相互之间有一定的协助作用。

3 结 论

1) AgWC30 触头单分段过程中出现的电弧主要经历电弧起弧、稳定燃烧、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) 电弧的起弧阶段存在多点放电特征,同时伴有金属熔滴的喷溅行为,在稳定燃烧阶段出现多个电弧的产生、长大和合并行为,在熄灭阶段前电弧合并为一个近球形或圆柱形的巨大电弧,最后电弧迅速熄灭。

3) 在电弧烧蚀作用下,上下触头表面有明显的熔融现象且有大量凸丘存在,说明触头对在断开过程有明显的熔桥的产生和断裂行为发生,此过程中熔桥和电弧同时存在,并且相互之间有一定的协助作用。

参考文献 References

[1] Chen Song(陈松), Guan Weiming(管伟明), Zhang Kunhua(张昆华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(1): 131

[2] Chen Wenge, Kang Zhanying, Shen Hongfang *et al. Rare Metals*[J], 2006, 25(1): 37

[3] Swingler J, Sumption A. *Rare Metals*[J], 2010, 29(3): 248

[4] Swingler J, McBride J W. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part A*[J], 1996,

- 19(3): 404
- [5] Li Zhenbiao(李震彪), Huang Liang(黄良), Wu Xixiu(吴细秀) *et al. Low Voltage Apparatus*(低压电器)[J], 2007(5): 1
- [6] Wang Junbo(王俊勃), Zhang Yan(张燕), Yang Minge(杨敏鸽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(12): 1954
- [7] Joshi P B, Murti N S S, Gadgeel V L. *Journal of Materials Science Letters*[J], 1995, 14: 1099
- [8] Lin Zhijie, Sun Xudong, Liu Shaohong *et al. Advanced Material Research*[J], 2014, 936: 459
- [9] Li Renxiong, Yang Juehan, Huo Nengjie *et al. Chemphyschem* [J], 2014, 15: 2510
- [10] Masquere M, Hernandez K, Freton P *et al. IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2014, 42(10): 2380
- [11] Chen Yuliang, Yang Chinfu, Yeh Jienwei *et al. Metallurgical and Materials Transaction A*[J], 2005, 36: 2441
- [12] Pons F, Cherkaoui M. *Proceeding of the Fifty-Fourth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*[C]. Orlando, Florida: IEEE, 2008: 9
- [13] Wu Chunping, Yi Danqing, Wen Wei *et al. Materials and Design*[J], 2015, 85: 511
- [14] Boddy P J. *Journal of Applied Physics*[J], 1971, 42(9): 3369
- [15] Tanaka M, Tsuruoka Y, Liu Y *et al. Current Applied Physics* [J], 2011, 11(5): S35
- [16] Gray C N, Hewitt P J. *Annals of Occupational Hygiene*[J], 1982, 25(4): 431
- [17] 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

Arc Erosion Characteristics of AgWC30 Electrical Contact Material

Ren Xianli, Chen Song, Li Muyang, Xie Ming, Chen Jinghong, Wang Saibei, Li Aikun, Liu Manmen

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

Abstract: Arc erosion characteristics of AgWC30 electrical contact material were investigated under direct current 25 A and voltage of 20, 25, 30, 35 V. The images of breaking arc light were obtained by a high-speed camera to deduce the forming regularity of arc evolution. The results show that the arc formation processes at different voltages are similar and they go through three stages, including forming stage, steady burning and discharge quenching stage. On the other hand, the bullet-shaped convex, pore, crack and starchiness coagulum structure were observed on erosion surface of contacts by scanning electron microscopy (SEM). The bullet-shaped convex in the break-off of liquid bridge is formed by the WC skeleton and Ag cladding. The molten bridges and the arc may co-exist and they assist each other.

Key words: arc erosion; high-speed camera; AgWC30 electrical contact material; molten bridge

Corresponding author: Chen Song, Professor, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, P. R. China, E-mail: cs@ipm.com.cn