纯银触头熔桥行为高速摄像研究

陈静洪, 陈 松, 谢 明, 王塞北, 胡洁琼, 王 松, 张吉明, 陈永泰 (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:采用自主设计的电接触-高速摄像试验系统,在直流单分断模式下对纯银触头在电接触过程 中所发生的熔桥行为进行观测,从而在不同的电流条件下对电接触过程中熔桥的形貌尺寸进行研 究,同时通过 SEM 对电接触熔桥行为作用后纯银触头的表面进行形貌分析。结果表明,在 DC 10 V (8~20 A)条件下,纯银触头在电接触过程中形成的熔桥有圆柱型和哑铃型 2 种形貌,并且其尺寸为 微米级;熔桥的直径和长度都随电流的增大而呈现出先减小后增大的趋势,10~15 A 范围内纯银触 头在电接触过程中不易形成熔桥,电接触过程中电弧可能先于熔桥而产生,并且熔桥和电弧现象可 以同时存在。

关键词: 纯银触头; 电接触; 熔桥; 高速摄像 中图分类号: TM206 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2016)S1-0044-06

High Speed Imaging Observation on Molten Bridge of Ag Electrical Contact

CHEN Jinghong, CHEN Song, XIE Ming, WANG Saibei, HU Jieqiong, WANG Song, ZHANG Jiming, CHEN Yongtai (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Under the DC and break only operation mode, the molten bridge phenomena of Ag electrical contact material was investigated by the electrical contact-high speed imaging experimental system by own making. The dimension of molten bridge was measured along with measurement of SEM morphology on contacts surface after the behavior of electrical contact. Results showed that the shape of molten bridge which generates during electrical contact process had two types which are the cylindrical and dumbbell, and the dimension of molten bridge was micron level under the condition of DC 10 V (8~20 A). The diameter and length of molten bridge both decrease with the increase of current and then increase with the increase of current. It is difficult to form molten bridge in the electrical contact process of Ag contacts in the range of 10~15 A. It can be observed that arc may occur before the appearance molten bridge, molten bridge and arc can exist at the same time.

Key words: Ag contact; electrical contact; molten bridge; high speed imaging

电触头作为承担接通和分断开关电器电路的核 心元件,主要用于继电器、接触器和小型断路器等 电接触领域中,其性能好坏直接影响开断容量、使 用寿命和运行可靠性^[1-3]。贵金属电接触材料具有较 高的导电和导热性、高化学稳定性、低而稳定的接触电阻、高抗熔焊性和抗电弧侵蚀等优良性能,一 直被认为是最好的电接触材料,尤其在接通和断开 装置中表现出优异的综合性能,因此在许多电接触

收稿日期: 2016-08-30

基金项目:国家自然科学基金(51267007, 51461023, 51164015, U1302272)、云南省自然科学基金(2010CD126, 2012FB195, 2015FA042)、 云南省创新团队项目(2012HC027)、云南省技术创新人才(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

应用领域都选择其作为触点材料^[4]。其中, 银的导 热性最好, 且导电性、加工性能极好, 有高的抗氧 化能力接触电阻稳定,因而早期的电接触材料多采 用纯银^[5]。各种电器开关动作时,特别是随着触点 分离的进行, 触点间实际接触面积随接触压力的减 小而减小, 电流收缩效应增强, 焦耳热使触点收缩 区材料软化变形,甚至熔化并在金属液体表面张力 作用下形成熔桥^[6,7]。熔桥不仅会导致触头材料转 移,其断开后对触点间隙饱和蒸汽压和电弧寿命等 也会造成很大的影响,并且目前研究还认为熔桥可 能是造成触点分离熔焊的主要原因之一[8-11]。由于 金属熔桥尺寸小(微米到毫米级)、存在时间短(微秒 到毫秒级), 所以金属熔桥的直接观察记录存在一定 难度[12]。本文通过电接触-高速摄像试验系统对纯银 触头在电接触过程中所形成的熔桥行为进行观测, 高速摄像试验数据进析比较,就能够对纯银触头在 高速动态过程中发生的物理现象进行研究[13]。并借

高速动态过程中反生的初理现象进行研究。并管助扫描电镜(SEM)对熔桥作用后触头表面的形貌进行分析,从而对熔桥行为及其对纯银触头材料的影响进行讨论分析。

1 实验

实验中所用的触头试样为纯银触头,其中上触头(阳极)为圆锥型,下触头(阴极)为圆柱形。在 5~25 A 的电流负载范围内, φ-θ 理论计算纯银触头出现 熔池及熔化区域的接触电压为 0.38 V 左右^[14],本研 究为更明显地观测到熔桥,并根据大量实验结果采 用电压 10 V,电流分别为 8、10、12、15、18 和 20 A 共 6 组载荷条件。

电接触-高速摄像摄像试验系统主要由光源、电接触试验机、成像系统、计算机四部分组成。电接触试验机采用直流单分断模式进行实验,其分断速度为 50.0 mm/s (v=50.0 mm/s),接触压力为 0.50 N(f= 0.50 N);高速摄像机的拍摄速率为 480 fps (n= 480 fps),其拍摄得到的视频数据其每一帧图片的分辨率为 224×160;在计算机中通过 EDIUS 软件对拍摄得到的视频数据的每一帧图像进行对比分析从而选取典型的图像进行研究,同时通过 Digimizer软件根据触头的直径对熔桥的尺寸进行测定,并结合相应的电压波形图对熔桥行为进行分析。电接触行为作用后借助扫描电镜(SEM)对熔桥作用后触头表面的微观结构进行分析。

2 结果与讨论

2.1 纯银触头的熔桥行为

图 1 为纯银触头分别在 DC 10 V (8、10、12、 15、18 和 20 A)共6组载荷条件下拍摄得到的电接 触熔桥行为轨迹,其中每两张图片之间的时间间隔 为 2.08 ms。

图 1(a₁)为纯银触头在 DC10 V (8 A)条件下,阳 极触头分断动作即将进行并且触头对还处于接触状 态时所拍摄得到的图片;随着阳极触头分断动作的 进行,触头对之间的分断距离增加并且在触头对之 间有熔桥出现,如图 1(a₃)所示;从图中可以观察到 该熔桥的形状为哑铃型。根据下触头直径为 1.50 mm,通过 Digimizer 软件测得图 1(a₁)中接触区域直 径为 0.472 mm;图 1(a₃)中熔桥的平均直径约为 0.244 mm,长度为 0.099 mm。

图 1(b₁、b₂、b₃)为纯银触头在 DC 10 V(10 A) 条件下拍摄得到的电接触熔桥行为轨迹。其中,图 1(b₁)为阳极触头分断动作即将进行并且触头对还处 于接触状态时所拍摄得到的图片,随着阳极触头分 断动作的进行,在触头对之间有电弧出现,如图 1(b₂) 所示;随着触头对之间分离距离的进一步增大,电 弧消失并且有近似圆柱型的熔桥存在,如图 1(b₃) 所示,该熔桥的直径为 0.184 mm,长度为 0.093 mm; 在 DC 10 V (12、15、18 和 20 A)条件下纯银触头电 接触熔桥行为过程的特征与在 DC 10 V (10 A)条件 下的熔桥行为过程的特征基本相似。

在 DC 10 V (12 A)条件下电弧和圆柱型的熔桥 同时存在于触头对之间,如图 1(c₂)所示,熔桥直径 为 0.066 mm,图 1(c₃)中熔桥形状为圆柱型,熔桥直 径为 0.233 mm,长度为 0.079 mm。

在 DC 10 V (15 A)条件下有圆柱型的熔桥存 在,如图 1(d₃)所示,熔桥的直径为 0.241 mm,长 度为 0.084 mm。

在 DC 10 V(18 A)条件下,触头对之间有大量的 电弧出现,同时在其右侧有两根圆柱型的熔桥存在, 其直径分别为 0.050 mm(左)和 0.044 mm(右),如图 1(e₂)所示,随着触头对之间分离距离的增大,电弧 消失并且有近似圆柱形的熔桥存在,如图 1(e₃)所 示,该熔桥的直径为 0.270 mm,长度为 0.093 mm。

在 DC 10 V(20 A)条件下, 触头对之间有明显的 电弧出现,同时在其左右两侧分别有一根圆柱型的



图1 不同电流条件下纯银触头熔桥行为

Fig.1 The behavior of Ag contacts molten bridge under different current

熔桥存在,如图 1(f₂)所示,熔桥的直径分别为 0.071 mm(左),0.119 mm(右),随着阳极触头分离动作的进行,电弧消失并且有近似圆柱型的熔桥存在,该熔桥直径为 0.267 mm,长度为 0.097 mm。

2.2 触头表面 SEM 形貌

图 2 为上触头(阳极)电接触行为后触头表面的 SEM 形貌观测图。从图 2 可以观察到在触头中部的 接触区域上有熔化区域,这些区域由大量的叠压的 圆形熔斑构成,这说明在实验中有大量的熔池出现。



图 2 电接触行为作用后阳极触头表面 SEM 形貌图 Fig.2 SEM morphologies of anode after electrical contact behavior

图 3 为阳极触头表面熔池形貌图。从图 3 中可 以观察到熔池的形状基本为圆形,并且熔池凝固过 程中未发现有明显的喷溅颗粒,熔池表面比较平坦, 可以认为主要是与熔桥行为有关。图中给出了这些 熔池的直径分别为 26.9 µm 和 58.7 µm,据此可以认 为形成这些熔池的熔桥直径不会大于这些尺寸。



图 3 阳极触头表面熔池形貌图 Fig.3 Morphologies of molten pool on anode surface

图 4 为下触头(阴极)电接触行为后触头表面的 SEM 形貌观测图。从图 4 中可以观察到在下触头的 中部有熔化区域,这些区由有大量的叠压的圆形的 熔池构成。



图 4 电接触行为作用后阴极触头表面 SEM 形貌图 Fig.4 SEM morphologies of cathode after electrical contact behavior

图 5 为阴极触头表面熔池形貌图。从图 5 中可 以观察到熔池的形貌基本为圆形,并且熔池凝固过 程中未发现有明显的喷溅颗粒,熔池表面下陷,这 可能与熔桥快速断裂后,下落熔体冲击熔池,从而 形成表面下陷后凝固。图中熔池的直径为 12.4μm, 可以认为形成该熔池的熔桥直径不会大于此尺寸。



图 5 阴极触头表面熔池形貌图 Fig.5 Morphologies of molten pool on cathode surface

2.3 实验结果分析与讨论

从实验中可以观察到纯银触头在电接触过程中 所产生的熔桥有圆柱型和哑铃型两种形貌,从而证 实了 Davidson^[15]所提出的观点,即金属熔桥分为墩 粗型、圆柱型和哑铃型3种类型。同时通过触头表 面熔池形状为圆形可以判定形成的熔桥可能为圆柱 形或哑铃型。纯银触头在电接触过程中所产生的熔 桥其直径大小在 0.044~0.270 mm 之间,长度在 0.079~0.099 mm 之间,并且形成这些熔桥的熔池也 为微米级,这与已有研究认为贵金属熔桥尺寸为微 米级是相一致的^[16-19]。通过比较每组实验中触头对 接触区域直径与所形成熔桥直径的大小可知,熔桥 的直径只占接触区域直径的一小部分,同时根据接 触区域中熔池、熔斑和凸丘的特征可以证实在电接 图 6 为在 DC 10 V(8~20 A)条件下纯银触头在 电接触过程中所产生的熔桥的直径和长度与电流的 关系图(相同条件下多根熔桥存在时取直径最大的 数值)。





Fig.6 Relationship between the diameter, length and the current of molten bridge

从图 6 中可以观察到熔桥直径和长度都径随电流的增大呈现出先减小后最大的变化趋势。当电流 大于 12 A 时熔桥直径和长度都随电流的增大而增 大,但直径随电流的增长梯度明显比长度的大,因 此熔桥随着电流的进一步增大将表现出短粗型的特 征。综合考虑电流对纯银触头在电接触过程中所产 生的熔桥的直径和长度的影响,当电流在 10~15A 范围内时,纯银触头在电接触过程中不易产生熔桥, 因此在纯银触头的设计和使用时应优先选择其工作 电流区间为 10~15 A。

3 结论

1) 纯银触头在电接触过程中所产生的熔桥有圆柱型和哑铃型两种形貌,其尺寸为微米级。

2) 在直流单分断模式下,在 DC 10 V(8 A~20 A) 载荷范围内纯银触头在电接触过程中所产生的熔桥 其直径和长度都随电流的增大呈现出先减小后最大 的变化趋势,当电流在 10 A 至 15A 范围内时,纯 银触头在电接触过程中不易产生熔桥。

3) 在电接触过程中电弧可能先于熔桥而产生,

并且熔桥和电弧现象可以同时存在。

参考文献:

- [1] 陈永泰, 王松, 谢明, 等. 银基滑动电接触材料的研究 进展[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 68-74.
 CHEN Y T, WANG S, XIE M, et al. Research progress in silver based electrical contact material[J]. Precious metals, 2015, 36(1): 68-74.
- [2] VERMA P, PANDEY O P, VERMA A. Influence of metal oxides on the arc erosion behavior of silver metal oxides electrical contact materials[J]. Journal of materials science & technology, 2004, 34(1): 79-83.
- [3] 王松,付作鑫,王塞北,等. 银基电接触材料的研究现状与发展趋势[J]. 贵金属, 2013, 34(1): 79-83.
 WANG S, FU Z X, WANG S B, et al. Present research and future development of silver-based electrical contact material[J]. Precious metals, 2013, 34(1): 79-83.
- [4] 溥存继,谢明,杜文佳,等.贵金属基电接触材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(4):22-25.
 PU C J, XIE M, DU W J, et al. Research development of precious metal-based electric contact materials[J]. Materials review, 2014, 28(4): 22-25.
- [5] 王塞北,谢明,刘满门,等. AgNi 电触头材料研究进展
 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 875-880.
 WANG S B, XIE M, LIU M M, et al. Research progress of AgNi contact material[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(4): 875-880.
- [6] CHEN Z K, WITTER G J. Electrical contacts for automotive applications: a review[J]. IEICE transactions on electronics, 2004, 87(8): 1248-1254.
- [7] 李震彪,徐金玲,黄良,等. 电磁继电器触点动熔焊机 理分析[J]. 电器与能效管理技术,2007(5): 1-3.
 LI Z B, XU J L, HUANG L, et al. Mechanism analysis on dynamic welding of electromagnetic relay contacts[J].
 Electrical and energy management technology, 2007(5): 1-3.
- [8] ZHAO L J, LI Z B, ZHANG H S, et al. Random occurrence of contact welding in electrical tests[J]. IEICE transactions on electronics, 2011, 94(9): 1362-1368.
- [9] YAMANO S, SUGIMOTO H, SONE H, et al. Experimental study on relationship between bridge and arc phenomena in breaking Ag contacts[C]. Proceedings of IEEE Holm conference on electrical contacts, 1994: 53-58.

- [10] SLADE P G, HOYAUX M F. The effect of electrode material on the initial expansion of an arc in vacuum[J]. IEEE transactions on parts, hybrids and packaging, 1972, 8(1): 35-47.
- [11] KHARIN S N, GHORI Q K. Influence of the pre-arcing bridging on the duration of vacuum arc[C]. Proceedings of the 6th international symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, 2000: 278-285.
- [12] 刘金友, 王茜, 杨晓铖, 等. 电触点分离液桥研究概述
 [J]. 电工材料, 2014(6): 29-33.
 LIU J Y, WANG Q, YANG X C, et al. Molten bridge during breaking operation of electrical contacts: a review
 [J]. Electrical engineering materials, 2014(6): 29-33.
- [13] 张三喜,姚敏,孙卫平.高速摄像及其应用技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:5-15.
 ZHANG S X, YAO M, SUN W P. High speed imaging and its application technology[M]. Beijing: National defense industry press, 2006: 5-15.
- [14] LLEWWLLYN J F. The physics of electrical contacts[M]. Oxford: Clarendon Press, 1957: 4-9.
- [15] DAVIDSON P M. The growth of the liquid bridge in an electrical contact[J]. British journal of applied physics,

1954, 5(5): 189-191.

2-11.

- [16] 程礼春. 电接触理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 2-11.
 CHENG L B. Electrical contact theory and its application[M]. Beijing: Machinery industry press, 1989:
- [17] KUBOTA H, SASAKI S, ISHIDA H, et al. Nonlinear and negative resistance in loose electrical contacts dark bridge[J]. American journal of physics and applications, 2013, 1(1): 1-4.
- [18] ISHIDA H, TANIGUCHI M, SONE H, et al. Relationship between length and diameter of contact bridge formed under thermal equilibrium condition[J]. IEICE transactions on electronics, 2005, 88(1): 1566-1572.
- [19] BORKOWSKI P, WALCZUK E. Computerized measurement stands for testing static and dynamic electrical contact welding[J]. Measurement, 2011, 44(9): 1618-1627.
- [20] ISHIDA H, WATANABE Y, TANIGUCHI M, et al. Observation of contact bridge phenomena at transient and steady state[C]. Proceedings of the 50th IEEE Holm conference on electrical contacts, 2004, 519-522.

49