# 不同电流下钯触头材料熔桥行为研究

陈静洪,方继恒,陈 松\*,谢 明,崔 浩,王塞北,王 松,胡洁琼,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:用自制的电接触-高速摄像试验系统观测了钯触头材料在直流单分断模式下的电接触过程中 的熔桥行为,用 SEM 分析触头表面形貌。结果表明,熔桥演化过程可分为熔桥形成、熔桥拉长和 熔桥断开 3 个阶段,历时约 2.08 ms;熔桥的形状有哑铃型和圆柱型 2 种,其尺寸为微米级,并且 熔桥断开时具有针尖状的特征;熔桥行为会侵蚀触头表面形成具有熔池和凸丘等特征的表面特征; 熔桥的直径和长度随电流的增大均呈现出先增大后减小的趋势,在熔桥形成之前可能有电弧出现, 在 DC 6 V 的分断电压下,钯触头材料的理想工作电流不宜大于 14 A。 关键词:金属材料;钯触头材料;熔桥;高速摄像 中图分类号:TM206 文献标识码:A 文章编号: 1004-0676(2017)03-0040-06

### **Observation on Molten Bridge of Pd Electrical Contact Material under Different Current**

CHEN Jinghong, FANG Jiheng, CHEN Song<sup>\*</sup>, XIE Ming, CUI Hao, WANG Saibei, WANG Song, HU Jieqiong, CHEN Yongtai (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

**Abstract:** The molten bridge evolution behavior of Pd electrical contact material was investigated by the homemade electrical contact-high speed video camera system under the DC and break only operation mode, along with the measurements of SEM morphology on the contact surface. Results showed that the evolution of Pd molten bridge could be divided into three stages: the formation of the molten bridge, the extension of the molten bridge and the rupture of the molten bridge during the process of electrical contact. The duration of these three stages was about 2.08 ms. The shape of the molten bridge had two types, dumbbell and cylindrical, and the dimension of the molten bridge was in micron level. The molten bridge would develop a needle tip-shape feature when it was broken. The molten bridge would erode the Pd contact surface, leading to the formation of molten pool and convex. Both the diameter and length of the molten bridge would build up with the increase of current and then diminished with the continuous increase of current. Arc phenomenon would occur before the formation of the molten bridge. The ideal working current of Pd contact material should not exceed 14 A under a DC of 6 V.

Key words: metal materials; Pd electrical contact material; molten bridge; high speed video camera

随着电工、电子、航空、航天等领域的不断发展,电接触问题受到越来越广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。数值模拟分析与计算机应用技术的发展为电接触现象的研

究提供了有效的理论分析手段。由于缺乏必要的熔 桥行为演化等相关试验的支撑,目前对熔桥的模拟 分析以及相关模型的建立大多都是在简化和忽略熔

收稿日期: 2016-10-13

基金项目:国家自然科学基金(51461023, 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)、稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室开放课题(SKL-SPM-201526)。

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

<sup>\*</sup>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

桥在形成到断开过程中形貌等因素变化的基础上进 行的,因此对熔桥行为的研究具有重要的意义<sup>[4-10]</sup>。 金属熔桥尺寸较小(微米到毫米级),存在时间较短 (微秒到毫秒级),所以金属熔桥的直接观察研究存 在一定的难度<sup>[11]</sup>。国内外学者在低电流、低分断速 度及真空条件下对电接触过程中熔桥的特征进行了 大量的研究,但电接触过程中熔桥从形成到断开这 一连续过程的演化特征却很少有文献报道[12-15]。

钯强度高, 耐磨性好, 导电导热性能优良, 且 具有较好的抗氧化和抗腐蚀的能力, 广泛应用于电 接触领域[16-17]。本文采用电接触-高速摄像试验系统 观测电接触中熔桥的高速动态连续变化特征,用扫 描电镜(SEM)分析熔桥作用后触头表面的微观形 貌,研究熔桥行为及其对钯触头材料的影响。

#### 实验 1

实验所用触头试样为纯钯片材,厚度为 0.55 mm,其中上触头(阳极, Anode)为三角形,下触头(阴 极, Cathode)为矩形。采用电压 6 V, 电流分别为 8、 10、12、14、16、18 和 20 A 共 7 组载荷条件,在 单分断直流模式下通过电接触-高速摄像实验系统 对纯钯触头试样在电接触过程中所产生的熔桥现象 进行研究。自制电接触-高速摄像摄像试验系统如图 1 所示。



图1 电接触-高速摄像试验系统

系统主要由光源(Illuminant)、电接触试验机 (Electrical contact testing machine)、成像系统 (Scanning system)、计算机(Computer)共4部分组成。 实验过程中电接触试验机的分断速度为 50.0 mm/s, 接触压力为 0.50 N。高速摄像机的拍摄速率为 480 fps,即拍摄得到的视频数据中每两帧图像之间的时

间间隔为 2.08 ms, 每帧图片的分辨率为 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,从中选取典型的图 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。用扫描电镜(Hitachi S-3400N SEM)对熔桥作用后的触头表面进行微观 形貌观测。

#### 结果与讨论 2

## 2.1 钯触头的熔桥行为

2.1.1 荷载电流 8~18 A

图 2 为钯触头在 DC 6 V, 电流为 8~18 A 的 6 组载荷条件下拍摄到的电接触熔桥行为轨迹图片。

从图 2 中可以看出这 6 组实验条件下电接触熔 桥行为的特征基本相似,总体上可分为熔桥形成、 熔桥拉长及断开3个过程。图2中的每组3张图像 均取自相邻的照片,因此可判定这3个过程所经历 的时间大约在 4.16 ms 范围内。

以电流 8 A 为例,图 2(a1)为阳极触头分断动作 已经进行并且触头对还处于接触状态时的状态;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 2(a) 所示,可以观察到该熔桥的形状为哑铃型;当触头 对之间的分断距离进一步增大时,熔桥消失,触头 对处于完全分离状态,如图 2(a3)所示。以下触头宽 度 3.50 mm 为参照, 经 Digimizer 软件测得图 2(a1) 中接触区域直径为236.0 µm,图2(a2)中熔桥的直径 为 37.7 µm, 长度为 55.9 µm。

随着荷载电流的增加, 熔桥形状和尺寸发生变 化。荷载为10A时,熔桥为哑铃型(图2(b)),直径 为46.1 µm,长度为61.7 µm。荷载为12 A时,在 触头对之间有 2 根熔桥出现(图 2(c<sub>2</sub>)),其中左侧熔 桥形状为圆柱型,而右侧熔桥已在其中间部位断开 并呈现出针尖状的特征,圆柱型熔桥的直径为50.0 μm,长度为 67.5 μm。荷载为 14 A 时,熔桥为圆柱 型(图 2(d<sub>2</sub>)),其直径为 59.9 µm,长度为 71.3 µm; 荷载为16A时,有2根熔桥出现,其形状均为哑铃 型(图 2(e<sub>2</sub>)), 熔桥的直径分别为 55.9 µm(左)和 78.3 um(右),长度为 83.9 um;随着触头对之间分断距 离的增大, 熔桥直径逐渐减小并断开(图 2(e3))。荷 载为18A时, 熔桥为圆柱型(图2(f2)), 直径为61.7 μm,长度为 67.5 μm。

Fig.1 The electrical contact-high speed video camera system



图 2 不同电流下钯触头熔桥行为(DC 6 V)

Fig.2 The behavior of Pd molten bridge under different current (DC 6 V)

从实验中可以观察到钯触头在电接触过程中所 产生的熔桥有哑铃型和圆柱型2种形貌,从而证实 了 Davidson<sup>[18]</sup>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。从熔桥行为图像可 以看出,熔桥演化过程可分为熔桥形成、熔桥拉长 以及熔桥断开3个步骤,3个步骤历时约2.08 ms。

2.1.2 荷载电流 20 A

图 3 为钯触头在 DC 6 V(20 A)条件下拍摄得到 的电接触熔桥行为轨迹。



(a). 触头分断开始(Contact breaking start); (b). 电弧出现(Arc appearance);
(c). 熔桥形成(Molten bridge formation); (d). 触头对完全分离(Complete separation of contacts)

图 3 DC 6 V (20 A)条件下钯触头熔桥行为 Fig.3 The behavior of Pd molten bridge under DC 6 V (20 A)

当荷载电流为 20 A 时,在触头分断动作开始后 与熔桥出现前这一期间有电弧出现,如图 3(b)所示; 随着触头分断动作的进行,电弧消失并且有熔桥出 现,如图 3(c)所示,熔桥的形状为哑铃型;当触头 对之间的分断距离进一步增大时,熔桥消失,并且 触头对处于完全分离状态,如图 3(d)所示。图 3(a) 中接触区域直径为 363.4 μm;图 3(c)中熔桥直径为 60.6 μm,长度为 67.0 μm。

钯触头熔桥行为实验中观察到在电接触过程中 电弧可能先于熔桥而产生,这是 Ishida 等<sup>[19]</sup>对熔桥 现象的研究所没有观测到的。在本实验中,在电压 远低于钯触头的最小起弧电压的情况下也能形成电 弧,其原因可能有:电接触熔桥行为导致触头表面 受到严重侵蚀,形成熔池和凸丘,导电面积急剧减 少,使这些区域的电流密度急剧增高,将钯熔化并 形成大量金属蒸气而引起电弧;同时在这些地方还 可能存在尖端放电现象从而引起电弧;此外,实际 工作中电路不可避免地存在电感,也可能导致在分 断过程中出现电弧。

#### 2.2 触头表面 SEM 形貌

图 4 和图 5 分别为钯上触头(阳极)和下触头(阴极)电接触行为后(每组电流条件下进行 50 次电接触 操作)触头表面的 SEM 形貌。

从图 4 可以观察到在触头中部的接触区域上有 明显的侵蚀区域,这些区域由大量的熔斑及凸丘构 成,说明在实验中有大量的熔化行为及熔桥出现。 从图 5 可以观察到在下触头的中部有侵蚀区域,这 些区域由大量叠压的直径 50~200 μm 的熔池构成。 这些熔池的表面平坦,而熔池的边缘凸起比较明显, 并且在其附近往往存在熔桥断裂凝固后形成的小体 积熔体。

根据 2.1.1 的结果, 钯触头在电接触过程中所产 生的熔桥直径为 37.7~78.3 μm, 长度为 55.9~83.9 μm。根据图 5 的结果, 形成这些熔桥的熔池也为微



(a). 整体形貌图(Overall morphology); (b). 局部放大形貌图(Partial magnification morphology)图 4 电接触行为作用后阳极触头表面 SEM 图像 Fig.4 SEM images of the anode after the electrical contact



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

#### 图 5 电接触行为作用后阴极触头表面 SEM 图像 Fig.5 SEM images of the cathode after the electrical contact

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<sup>[20-22]</sup>。比较每组实验中触头对接触区域 直径、熔桥直径的大小可知,熔桥的直径小于接触 区域直径,同时根据接触区域中熔池、熔斑和凸丘 的特征可以证实:在电接触过程中导电斑点面积只 占视在接触面积的一小部分。

#### 2.3 熔桥尺寸与电流的关系

图 6 为钯触头在电接触过程中形成的熔桥直径 和长度与电流的关系图。图 6 中熔桥直径和长度均 随电流增大,呈现先增大后减小的变化趋势:电流 小于 16 A 时熔桥的直径和长度都随电流的增大而 增大;电流大于 16 A 时熔桥的直径和长度都随电流 的增大而减小。结合高速摄像的实验结果,当电流 大于 14 A 时钯触头在电接触过程中易形成尺寸较 大的熔桥,会影响到触头的寿命;而当电流大于 20 A 时可能有电弧出现,这将对钯触头造成更严重的 侵蚀。因此,在 DC 6 V 条件下,钯触头的理想工 作电流应不大于 14 A,在设计和使用时应予考虑。

### 3 结论

1) 在直流单分断条件下,钯触头在电接触过程 中其熔桥演化过程可以分为熔桥形成、熔桥拉长以 及熔桥断开3个阶段,经历的时间约为2.08 ms。

2) 在 DC 6 V(8~20 A)条件下, 钯触头在电接触 过程中所形成的熔桥具有哑铃型和圆柱型 2 种形 貌, 熔桥的尺寸为直径 37.7~78.3 μm、长度 55.9~83.9 μm。微米级的熔桥直径明显小于接触区域直径, 熔 桥断开时具有针尖状的特征, 熔桥行为会侵蚀触头 表面, 形成熔池和凸丘。

3) 熔桥的直径和长度随电流的增大均呈现出 先增大后减小的趋势,在熔桥形成之前可能会出现 电弧。在 DC 6 V 条件下,钯触头的理想工作电流 应不大于 14 A。



current of the molten bridge

#### 参考文献:

- SLADE P G. Electrical contacts: principles and applications[M]. New York: Marcel Dekker, 2013: 4-5.
- [2] BRAUNOYIC M, KONCHITS V V, MYSHKIN N K. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology[M]. New York: CRC Press, 2006: 7-8.
- [3] HOLM R. Electrical contacts, theory and applications[M]. Berlin: Springer, 2000: 3-5.
- [4] 谭志龙,陈松,管伟明,等. AgNi10 触头材料闭合接触 阶段的热-电-力耦合分析及实验研究[J]. 稀有金属材 料与工程, 2012, 41(2): 1780-1784.
  TAN Z L, CHEN S, GUAN W M, et al. Thermalelectric-structure coupling finite element analysis and experimental study of AgNi10 contact material under the closed contact stage[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(2): 1780-1784.
- [5] 张昆华, 孙加林, 管伟明, 等. 反应合成制备 Ag-Sn-O 系电接触材料热力学分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1581-1585.

ZHANG K H, SUN J L, GUAN W M, et al. Thermodynamic analysis of Ag-Sn-O electrical contact material by reaction synthesis processing[J]. Rare metal materials and engineering, 2006, 35(10): 1581-1585.

- [6] TAN Z L, GUAN W M, GUO J M, et al. Electrical and thermal coupled-field simulation of a molten metal bridge during contact separation[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, 3(6): 960-966.
- [7] 陈松,管伟明,张昆华,等. Ag/La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> 基电触头使用
   中温度场的有限元分析和实验研究[J]. 稀有金属, 2008, 32(3): 320-326.

CHEN S, GUAN W M, ZHANG K H, et al. A finite element calculation and experiment study of transient temperature field of  $Ag/La_2NiO_4$  based electrical contacts during operation[J]. Rare metals, 2008, 32(3): 320-326.

[8] 谭志龙,管伟明,郭俊梅,等. AgNi10 触头材料分离阶段的热-电-力耦合分析及实验研究[J].稀有金属材料与工程,2012,41(10):1780-1784.
 TAN Z L, GUAN W M, GUO J M, et al. Finite element

analysis and experimental study on the thermal-electricmechanical coupling of AgNi10 electrical contactor during the breaking process[J]. Rare metal materials and engineering, 2012, 41(10): 1780-1784.

- [9] 陈松,管伟明,张昆华,等. Ag/La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>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, et al. Finite element method and experimental investigation on the arc erosion of Ag/La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> base electrical contacts at high direct current[J]. Rare metal materials and engineering, 2009, 38(1): 131-137.
- [10] 谭志龙,郭俊梅,陈松,等. 电接触现象数值模拟的研 究现状及发展趋势[J]. 电工材料, 2010(1): 3-8.
  TAN Z L, GUO J M, CHEN S, et al. Review of the numerical simulation of the electric contact phenomena[J]. Electrical engineering materials, 2010(1): 3-8.
- [11] 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 defence industry press, 2006: 5-15.
- [12] MIYANAGA K, KAYANO Y, TAKAGI T, et al. Effect of holder heat capacity on bridge shape at low speed breaking contact[J]. IEICE transactions on electronics,

2010, 93-C(9): 1456-1459.

- [13] SLADE P G. The transition from the molten metal bridge to the metallic phase bridge column arc on discharges and electrical contacts opening in vacuum[C]. Proceedings of the 23rd international symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, 2008, 198-201.
- [14] KAYANO Y, MIYANAGA K, INOUE H. Experimental analysis of arc waveform affected by holder temperature change at slowly separation of silver-tin dioxide contacts
  [J]. IEICE transactions on electronics, 2013, E96-C(9): 1110-1118.
- [15] REN W B, CHANG C, CHEN Y, et al. Formation process of intermittent molten bridge between Au-plated contacts at super low breaking velocity[J]. Plasma science and technology, 2016, 18(3): 236-240.
- [16] 刘义. 高强度金银钯铜合金的性能与应用研究[J]. 贵金属, 1991, 12(1): 23-29.
  LIU Y. Study on the high-strength gold-silver-palladium-platinum-copper alloys[J]. Precious metals, 1991, 12(1): 23-29.
- [17] 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.
- [18] DAVIDSON P M. The growth of the liquid bridge in an electrical contact[J]. British journal of applied physics, 1954, 5(5): 189-191.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] BORKOWSKI P, WALCZUK E. Computerized measurement stands for testing static and dynamic electrical contact welding[J]. Measurement, 2011, 44(9): 1618.
- [22] 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. Seattle WA: IEEE, 2004: 519-522.