

贵金属电接触材料中熔桥行为的研究进展

陈松, 李慕阳, 谢明, 任县利, 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, 昆明 650106)

摘要: 对熔桥基本行为的研究一直是电接触领域的重点, 本研究系统总结了熔桥的基础理论, 主要实验和测试手段, 主要模拟研究的手段, 以及国内外研究者多年来在熔桥方面取得的重要成果, 总结了熔桥研究中特别是贵金属基电接触材料研究中未解决的基础问题, 简要介绍了本单位的相关研究成果, 最后展望了熔桥研究的发展方向和应用前景。

关键词: 熔桥; 电接触; 贵金属; 电弧

中图分类号: TM206 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2015)S1-0068-10

The research development of molten bridge in electrical contact material

CHEN Song, LI Muyang, XIE Ming, REN Xianli, 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: The molten bridge is a key problem in the research of electric contact materials. This study summarized the basic theory of the molten bridge, main experiment and test methods, the main simulation methods, and the researchers for many years in the molten bridge has made important achievements. The unresolved problems of molten bridge in the research of precious metal base electrical contact materials were listed, and then briefly introduce the related research achievements of Kunming institute of precious metals, finally prospects the research direction and application prospects of molten bridge.

Key words: molten bridge; electrical materials; precious metals; Arc

对电接触现象有着有一百多年的研究史, 电接触主要研究导体接触结合和分段过程中出现的物理、化学现象, 其中电弧、熔桥就是其中两种重要现象, 许多电接触相关的重要行为和特征都有这些行为有重要关系。

由于电触头表面上在微观上看是凹凸不平地, 当触头闭合时在接触面上出现许多斑点接触, 电流通过这些导电斑点^[1-2](称为a点)的流动, 电流密度线在这些斑点附近发生收缩现象, 由于电流焦耳热的作用这些位置的温度比触头其它地方的温度要高。图1显示了熔桥的出现和结束过程: 首先熔桥现象出现在当电触头从闭合开始分离的过程中, 由于电流的热效应使a点处的材料局部熔化而形成液

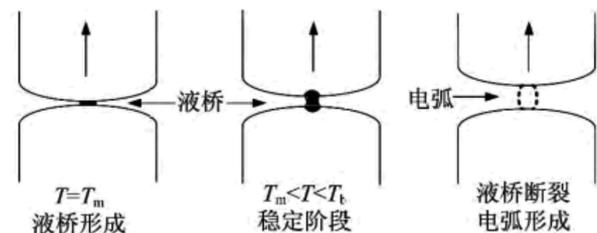


图1 熔桥形成过程示意图

Fig.1 Molten bridge forming process

态金属桥(简称熔桥)^[1-3], 并且随触头分离熔桥被拉长且桥的温度不断升高, 最后达到材料的沸点而发生爆炸断裂; 如此时电压大于电弧最小起弧电压,

收稿日期: 2015-08-28

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

第一作者: 陈松, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 贵金属材料学。E-mail: cs@ipm.com.cn

材料蒸气将引燃分断电弧；反之则熔桥断裂，将导致材料从一个电极向另一个电极转移，称为桥转移。

目前在航天、航空、武器装备等高新技术领域和行业大量使用的 Au 基、Pd 基、Pt 基和部分 Ag 基电接触材料，基本都要求在低压、弱电流的工作条件下具有很高的可靠性^[4]。这些材料的电流—电压工作区域，多在最小起弧电压—电流曲线下方（该区域中的材料转移以桥转移为主）^[2, 4]，这使得桥转移导致材料失效在总失效原因中占较大的比例^[4]。而桥转移与熔桥的演化行为和特征关系是密切相关的，所以对于熔桥方面的研究对于航天、航空、武器装备中使用的高可靠电接触材料的改进、研发和优化设计具有十分重要的应用价值和指导作用。目前为止对于电弧的相关实验和理论研究较多，而对于熔桥行为的相关实验和理论等研究和报道都较少。下面将从熔桥特征和基础理论，以及研究现状和存在问题等方面进行介绍。

1 熔桥的分类

熔桥可分为暗熔桥和辉光熔桥^[5]。暗熔桥发生在触点缓慢分离过程中，焦耳热有足够时间熔化金属，触头整体时刻处在热流平衡的状态。暗桥容易用高速摄影机拍摄到，所以研究较多。辉光熔桥发生在触点快速分离过程中，由于熔桥上的电流焦耳热不能及时向基体传导，焦耳热来不及加热熔化较大体积的金属，同时可以看见由于电流放电导致的辉光现象，称为辉光熔桥。辉光桥不满足热流平衡条件，且寿命短不易被观察到，所以研究较少^[5]。

2 熔桥的基本特征和相关理论

对于熔桥由于的相关特征和理论比较零散，本文进行了系统的总结和归纳，方便对于贵金属熔桥行为的了解和研究。

2.1 熔桥伏安特性

实验发现金属熔桥的伏安特性具有负阻性质，即当电流增大液桥两端的电压值降低，其特征与电弧的伏安特性相同^[2, 4-5]。一般认为金属材料形成的熔融金属桥为微米级，普通金属材料更容易形成熔桥，长度可达毫米，如铁在空气中能形成长而稳定的液体金属桥，但是银和铜是较难形成的。

图 2、3 中分别给出了大电流快速分离、小电流缓慢分离过程中电压曲线的波动起伏部分曲线，并

给出了熔桥存在的时间和特征电压范围^[5]。

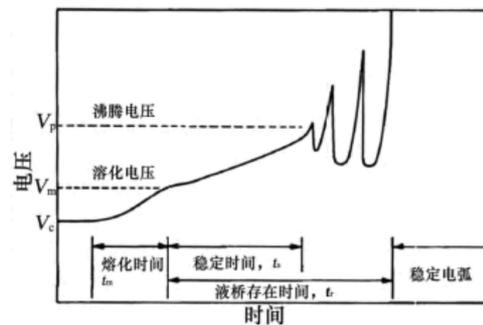


图 2 大电流快速分离过程中电压时间曲线
Fig.2 Voltage and time curve in the process of fast separation under large current

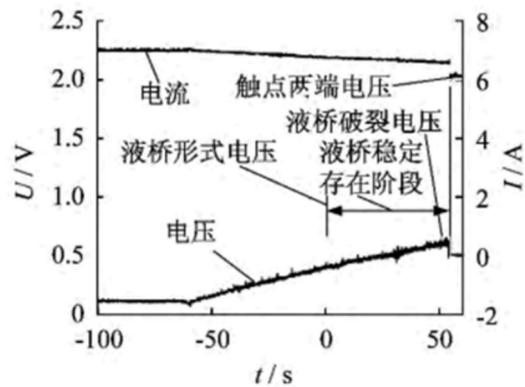


图 3 小电流缓慢分离过程中电压时间曲线
Fig.3 Voltage and time curve in the process of slow separation under small current

从图中可以发现当熔桥出现时电压值都有较小的波动，而当熔桥开始气化直到消失阶段中电压的跃迁和波动十分明显，而在熔桥拉长过程中熔桥电压都在呈直线增加。这些特征也是通过伏安曲线进行熔桥行为识别的主要特征。

2.2 特征电压

Holm^[1-2]根据 $\varphi-\theta$ 关系和 Wiedemann-Franz 定律给出了一个计算相同触头材料接触斑点温升 T_1 和斑点两端电压 U 的关系式：

$$L(T_1^2 - T_0^2) = U^2/4 \tag{1}$$

其中 $T_0 = 295 \text{ K}$, $L = 2.45 \times 10^{-8} (\text{V/K})^2$ 。当 T 对应软化温度 T_s 、熔点温度 T_m 和沸点温度 T_b 时，计算得到的电压值就对应材料的软化电压 U_s 、熔化电压 U_m 和沸点电压 U_b 。部分纯金属触头的特征电压和特征温度^[4-5]列于表 1。

表 1 部分纯金属特征电压及对应温度值

Tab.1 Pure metals characteristics of the voltage and the corresponding temperature

参数	Au	Cu	Ag	Mo	W	Al	Ni	Sn	Pt	Zn	Fe	Pd
U_s/V	0.08	0.12	0.09	0.25	0.60	0.10	0.22	0.07	0.25	0.10	0.21	-
U_m/V	0.43	0.43	0.37	0.75	1.10	0.30	0.65	0.13	0.71	0.17	0.60	0.57
U_b/V	0.90	0.80	0.75	1.10	2.10	0.85	0.97	0.87	1.30	0.37	0.94	1.30
T_s/K	373	463	453	1173	1273	423	793	373	813	443	773	-
T_m/K	133	1357	1233	2883	3695	930	1726	505	2046	693	1813	827
T_b/K	312	2853	2483	4912	5828	2720	3005	2780	4123	1180	3023	443

对于金属其软化电压 U_s ，熔化电压 U_m 和沸点电压 U_b 基本是恒定的，通过在实验中测量得到触头分段过程中的伏安曲线，可以从电压曲线上找到相应特征电压位置，从而确定每个阶段的存在时间和电流-电压变化特征，对于熔桥的研究具有重要意义和作用。

2.3 熔桥形状

Davidson^[6-7]通过比较液桥内部和外部气氛的压力值将熔桥分为 3 种形状(如图 4 所示): 墩粗形、圆柱形和哑铃形。Jones^[8]的 Fe 触头试验证实了 3 种外形金属液桥的存在，通过在极慢速条件下的分析可以发现这三种形状很可能是熔桥不同阶段的形状特征。触头材料分断金属液桥行为，在极慢速分断条件下更加容易地观察到。熔桥的外形主要受熔体的表面张力、触头分离速度、热传导和熔池中的金属量控制。在进行熔桥研究时一般都默认金属液桥呈圆柱形，常用长度和直径来定量描述。

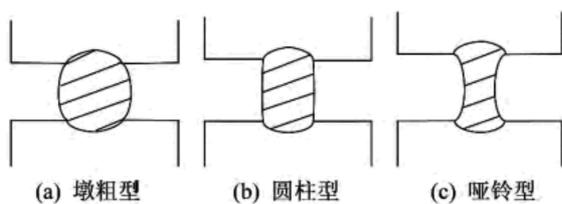


图 4 观察到的熔桥的几种外形

Fig.4 Observe several shape of the molten bridge

2.4 熔桥的体积

Utsumi^[10]提出了一个临界分断速度，其假设热为熔桥是圆柱体，根据临界速度，可将熔桥分为静态或动态熔桥，区分的临界分断速度为：

$$v_c = \frac{l}{g\tau} = \frac{32k^2g^2}{\pi\alpha\beta c l} \quad (2)$$

当 $v < v_c$ 时，静态液桥体积满足：

$$V = \frac{\pi}{64k^2g^2} l\alpha^2 I^2 \quad (3)$$

当 $v > v_c$ 时，动态液桥体积满足：

$$V = \left(\frac{\beta c}{\tau}\right)^{-2} \left[\alpha\beta c \frac{l}{\tau} + \frac{32k^2g^2}{\pi l} \cdot \sqrt{\left(\frac{32k^2g^2}{\pi l}\right)^2 + 2\alpha\beta c \frac{32k^2g^2}{\pi} \frac{l}{d}} \right] \quad (4)$$

其中， $\beta = (dT/dt)/(T_b/\tau)$ ，式中 c 为单位体积比热容； τ 为液桥持续时间。

当取 $g=0.44$ ， $\alpha=1/3200$ ， $\beta=1.5$ 时， $v_c=2.615 \times 10^4 k^2/(cI)$ ；并且金属液桥直径和体积依赖于分断速度。

$$d_b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\alpha I l}{\beta c g v}} \quad (5)$$

$$v = \frac{l}{g\tau} = \frac{l}{g} \frac{\alpha I - 8 \frac{kg}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{q}{l}}}{c\beta q} \quad (6)$$

通过测量得到的分断电压-电流特征曲线，可以计算 $(dT/dt)_b$ 、 l 和 I ，最后采用上述公式即得到金属熔桥的体积。

2.5 影响金属液桥的因素

2.5.1 气氛因素

研究认为当金属熔桥长度一定时，熔桥的伏安特性为： $U_b I = kl = \text{常数}$ ，其中： U_b -熔桥电压； I -流过熔桥电流； k -常数； l -熔桥长度。在高导热气体的氢气气氛下，Pt 金属液桥两端的电压和电流会下降。气氛对 Pt 触头金属液桥特性的影响如图 5 所示。

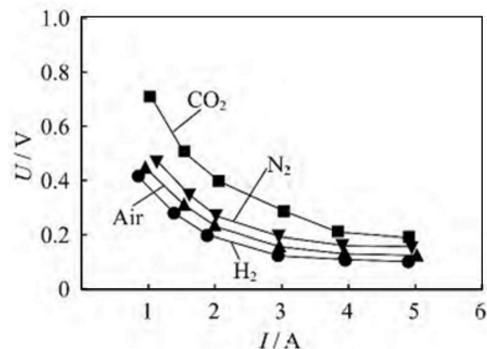


图 5 环境气氛对熔桥伏安特性的影响

Fig.5 The influence of environment atmosphere on molten bridge volt-ampere characteristics

2.5.2 负载影响

如图 6 所示,当电感量 L 较小时($L = 0.2 \sim 0.3 \text{ H}$), 电流从 0 增大到 20 A, 均是阴极触头获得材料; 当电路中 L 较大($L = 0.8 \text{ H}$), 且电流由小变大时, 材料由阴极得材料变为阴极失去材料, 而在氮气环境中则总是阴极失去材料除此之外。

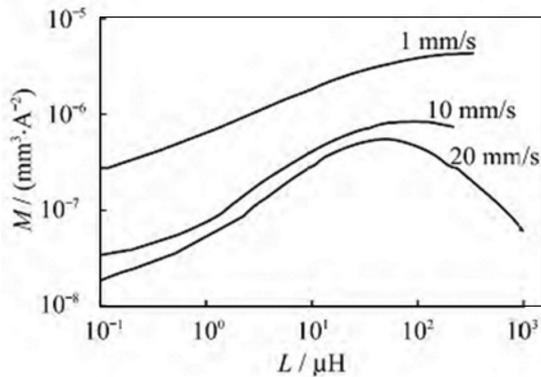


图 6 电感量对熔桥转移量的影响
Fig.6 The influence of inductance for molten bridge transfer mass

2.6 熔桥转移的热电理论

对桥式转移现象, 上世纪 20 年度开始就出现了基于 Thomson、Kohler、Peltier 三种热电效的理论解释^[1-2, 6]。

2.6.1 熔桥转移的 Thomson 效应解释

Thomson 效应是当导体中存在温度梯度时, 电流流经导体时会在导体的一侧吸热, 而在另一侧放热。当 Thomson 系数为正数时, 最高温度截面向阴极移动, 结果阴极材料向阳极转移; 当 Thomson 系数为负数时, 结果相反, 阳极材料向阴极转移。图 7 是常见金属材料的 Thomson 系数。

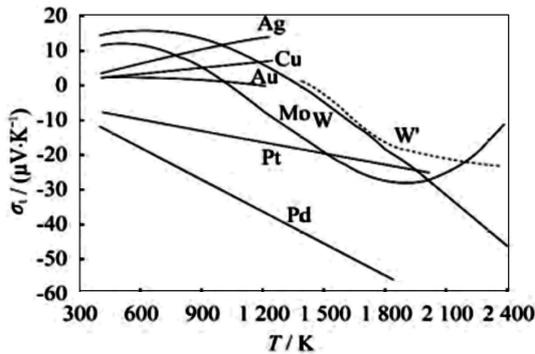


图 7 金属的汤姆逊系数与温度关系

Fig.7 Metal Thomson coefficient relations with temperature

$$\pi a^2 x = 325 \frac{\tau_2 \rho_0^3 I_b^3}{U_{bl}^2} \quad (7)$$

式中, a 为熔桥的直径; x 为偏移量; τ_2 是常数; ρ_0 是材料的电阻率; I_b 是熔桥电流; U_{bl} 是材料沸腾电压。

2.6.2 熔桥转移的 Kohler 效应解释

当触头表面有氧化膜时, 由于隧道效应使得电子穿过氧化薄膜导电, 电子到达阴极后余下的动能以热的形式放出, 这使的阳极的温度高于阴极, 该效应使金属熔桥在靠近阳极一侧折断。Kohler 效应简单来说就是阳极容易折断:

$$\pi a^2 x = \frac{\pi \sigma \rho I_b^2}{4 U_b^2} \quad (8)$$

式中, σ 是隧道电阻率; ρ 是材料的电阻率; I_b 、 U_b 是材料电流、电压降。

2.6.3 熔桥转移的 Peltier 效应解释

当电流通过不同金属触头的接触点时将发生珀尔帖热现象, 当同种金属的固态和液态相接触时, 接触边界上也有 Peltier 效应。当材料的 Peltier 系数为正, 则阳极温度高, 材料从阴极转移到阳极, 当 Peltier 为负数, 则材料转移方向相反。

$$\Pi = TE_{sl} \quad (9)$$

$$\pi a^2 x = \frac{\pi \beta}{285} \frac{\Theta + 300}{\Theta^2 (\rho_0 \lambda)^2} \rho_0^3 I_b^3 E_{sl} \quad (10)$$

式中, $\Theta = I_b^2 \beta \rho_0 / (32 a^2 \lambda)$; Π -Peltier 系数; T -接触面的温度; E_{sl} -固液界面的 Seebeck 系数; β -系数; λ -热导率; 需要指出以上三种计算材料转移的计算式均是在热平衡条件下推导出的结果, 实际触头分断过程中材料桥式转移往往是多种物理机理共同作用的结果。

3 熔桥转移的实验研究

对于桥转移量的测量有 3 种方法^[2, 6]: ① 使用显微镜测量法接触表面形貌, 确定接触面凹坑来确定转移量; ② 采用称重法, 分别直接测量使用后的阳极和阴极的重量来确定转移量; ③ 用放射性示踪法确定每个转移过程的转移量, 通常研究发现材料不是仅从一个电极转移到另一个, 而是两个电极之间都有相互转移。

使用显微测量法、称重法需要进行操作的次数在 10^5 次以上才明显; 而放射性示踪法所需操作的次数较少, 通常为 50~1000 次, 实际计算得到的单次转移量是大量操作结果的平均值。

根据大量试验结果,触头分断一次因液桥转移而损失的触头材料的体积 V 与分断电流 I 之间的关系为 $V = kI^3$, 式中: k 为与材料有关的常数。

4 贵金属熔桥研究现状

4.1 国内研究情况

目前国内从事电接触领域研究的主要有西安交通大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、昆明贵金属研究所等单位。通过文献目前近年在熔桥方面的专门研究报告,主要集中在分断过程等方面的研究中。主要研究单位为华中科技大学李震彪教授^[5]、哈尔滨工业大学翟国富教授^[6, 13], 以及昆明贵金属研究所^[14-17]。华中科技大学李震彪教授^[5]系统总结了分段过程中,熔桥对于分离熔焊现象的影响,以及熔桥的相关特征和影响因素。目前在熔桥的实验研究方面,哈尔滨工业大学张鑫赞等^[13]研制了分析触头分断过程中的熔桥行为的测试装置(图 8),通过该装置可以测量熔桥的电压、电流、存在时间等参数。研究以 $0.1\sim 35\ \mu\text{m/s}$ 恒定速度分断过程中金属液桥电压、电流等特性参数。利用该测试系统研究了 Cu 触点金属液桥的电压、电流特征曲线。

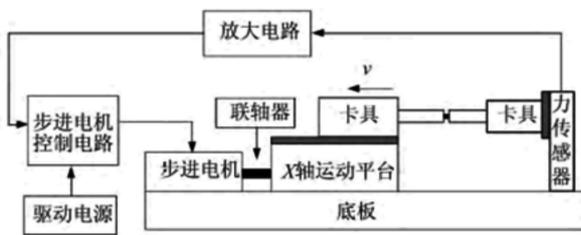


图 8 熔桥实验设备原理图
Fig.8 Molten bridge experiment equipment principle diagram

昆明贵金属研究所近期依托国家基金支持开展了贵金属基电接触材料中熔桥的实验观察研究,观察了熔桥并进行了大量的测量和分析工作,如图 9、10 为实验拍摄到触头的熔桥和电弧共同出现的行为,发现了不少熔桥的演化特征。

与熔桥间接相关的计算模拟研究较多,主要有西安交通大学荣命哲^[18]等进行了静态接触闭合过程中的稳态温度场计算;华中科技大学吴细秀^[19]等对电极材料喷溅的熔池进行了计算和研究;哈尔滨工业大学翟国富^[20]等采用有限元方法研究了分断过程中的瞬态温度场;贵州大学李坚石^[21]等研究了

电接触过程中温度模型并进行了计算研究。专门对熔桥演化的计算模拟研究方面,目前主要是昆明贵金属研究所采用有限元计算和实验结合的方法,进行了熔桥行为的计算模拟研究^[16, 22-23]。熔桥上的温度场分布如图 11,图 12 是熔桥上的电流场分布图。



图 9 拍摄到的纯 Ag 触头上的熔桥及电弧图片
Fig.9 Images of the molten bridge and arc by high-speed photos in Ag contacts



图 10 拍摄到的 AgSnO_2 触头上的熔桥及电弧图片
Fig.10 Images of the molten bridge and arc by high-speed photos in AgSnO_2 contacts

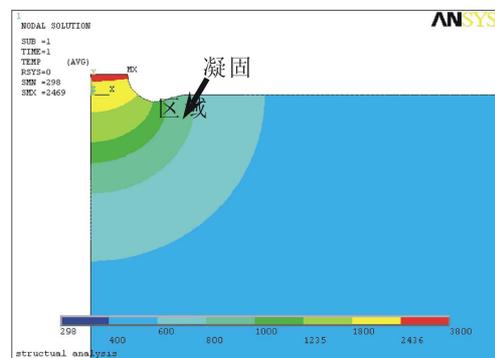


图 11 熔桥上的温度场分布图
Fig.11 Temperature field on molten bridge

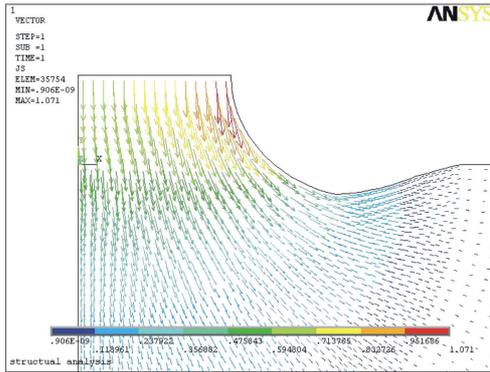


图 12 熔桥上的电流场分布图
Fig.12 Current field on molten bridge

4.2 国外研究情况

国外从事电接触方面研究的主要是德国、英国、日本、美国、波兰和俄罗斯等国。对于贵金属熔桥的研究从 20 世纪初就开始进行实验研究，特别是 20 世纪 40~50 年代，国外学者对合金材料中熔桥现象进行了大量的实验和基于金属传导理论的热电效应为基础的研究。这些研究取得了许多成果：包括测量了熔桥上断裂电压范围、桥转移机制的热电效应解释、负载类型和材料因素等对桥转移现象的影响等^[1-2, 4]。上世纪 50 年代之后对熔桥的研究报道较少。2000 年来在熔桥的实验研究方面主要采用高速摄像和电学测量相结合的手段进行研究，近几年的相关研究也较多。下面按大致时间顺序进行介绍。

在进行熔桥研究时一般都默认金属液桥呈圆柱形，常用长度和直径来定量描述。式(8)是由 Lander 和 Germer^[9]在 1948 年给出的用于计算金属液桥直径的计算式：

$$\frac{d}{I} = \frac{2(\rho_0 + 2\rho_m)}{3\pi[U - (U^2 - U_m^2)^{1/2}]} = \frac{6400(\rho_0 + 2\rho_m)}{3\pi[T_{max} - (T_{max}^2 - T_m^2)^{1/2}]} \quad (8)$$

式中， I 为电流； d 为液桥直径； ρ_0 为室温电阻率； ρ_m 为熔点处的电阻率； U 为液桥两端的电压； U_m 为熔化电压； T_{max} 为最高温度值； T_m 为材料熔点。

根据能量平衡原理，在 1969 年 Utsumi^[10]给出了静态条件下液桥直径 d_b 的计算式：

$$d_b = \frac{1}{4g} \frac{\alpha}{k} I = \frac{d_m}{g} \quad (11)$$

式中： α 为常数； g 为常数， $g = T_m/T_b$ ； k 为热导率； d 为熔点时液桥直径。

Lander 和 Utsumi^[10]给出了 5 种金属触头材料的计算结果，如表 2 所示。

表 2 熔桥直径与电流关系

Tab.2 The relationship between electric current and the diameter of molten bridge (m/A)

触头材料	Utsumi 结果 d_m/I	Lander & Germer 结果 $d_m/I, T=T_m$	Utsumi 结果 d_b/I	Lander & Germer 结果 $d_m/I, T=T_b$
Pd	1.13×10^{-4}	0.82×10^{-4}	2.58×10^{-4}	2.28×10^{-4}
Cu	2.05×10^{-5}	1.70×10^{-5}	5.25×10^{-5}	4.90×10^{-5}
Ag	1.86×10^{-5}	1.30×10^{-5}	4.24×10^{-5}	3.90×10^{-5}
Pt	1.13×10^{-4}	0.70×10^{-4}	2.54×10^{-4}	1.98×10^{-4}
Au	2.50×10^{-5}	1.90×10^{-5}	5.25×10^{-5}	4.80×10^{-5}

图 13 是 Utsumi^[10]显示的 2 种触头材料具有正相关，增加环路电流，降低分离速度将导致熔桥的寿命延长。

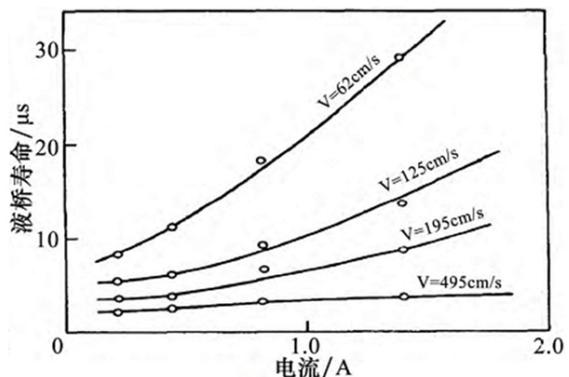
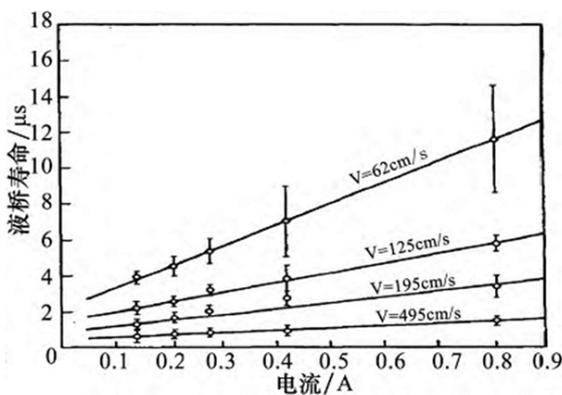


图 13 熔桥的寿命与电流及分断速度的关系

Fig.13 The current and the speed relationship between length of molten bridge

由于电流的增加，焦耳热增加需要更多的熔融金属材料保持熔桥的存在和延长熔桥寿命；较小的

分离速度使熔桥根部有充足的时间融化材料，从而延长熔桥的寿命。熔桥在生长过程中的不稳定性是

由于焦耳热效应、水动力不稳定性和表面张力其主要作用的流体和电磁场收缩效应决定的。热效应一方面使得熔桥温度上的温度升至沸点以上，从而提高熔融金属桥融化的金属量，同时也会使材料蒸发损失。在小电流、流量不稳定和表面张力占主导位置，而大电流作用下的电磁力占主导位置。另一种电流是非常小或在一个短的时间内的触头分离的加速度不够，使金属熔体难形成熔池，熔桥也不会产生。如果接触面损坏严重，表面粗糙度非常大，金属熔桥仍对满足出现熔桥的条件，则有可能产生二次液桥。

图 14 是 Koren^[26]1975 年的研究结果表明 Ag 熔桥长度随加速度增加先增大，达到峰值(对应加速度约为 $1.0 \times 10^3 \text{ms}^{-2}$)后又逐渐减小，最后随分离加速度(大概 $2.0 \times 10^3 \text{ms}^{-2}$ 之后)增加而缓慢增大。

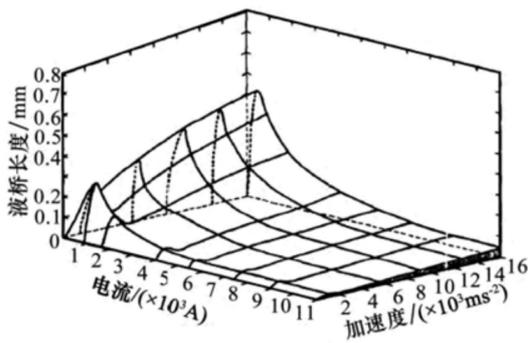


图 14 Ag 熔桥的长度与电流、加速度的关系
Fig.14 The current and the acceleration relationship between Length of Ag molten bridge

对 Pd 触头 Ishida^[11]的研究发现随着电流增大液桥直径也增大，但液桥长度却随着电流增大而下降，液桥的直径 d 和长度 l 关系为：

$$d = 5.861 \ln(l) - 4.7794 \quad (12)$$

日本学者 Ishida^[12, 24-25]利用自己设计的悬臂梁装置，在 $0.03 \mu\text{m/s}$ 的分断速度下，测量了 Pd 触点分离过程中出现的熔桥现象进行了观测。实验在 1~2.5 A 电流下观测到如图 15 所示的暗熔桥。同时利用纵横式开关在 48 V/4 A 条件下拍摄到了如图 16 所示的辉光熔桥照片。但对于电流大于 2.5 A 条件下的熔桥行为未见说明和解释。图 17 是 Ishida 等^[12]的试验结果，在小电流下观察记录了 Pd 触点液桥长度和直径随时间的变化特点。图 17 所示随触点分离运动的进行，液桥长度和直径都在增加，其中液桥长度与时间成正比增长，而液桥直径随时间

增长增速逐渐放缓。直径 d 和长度 l 关系为： $d = 5.861 \ln(l) - 4.7794$ 。

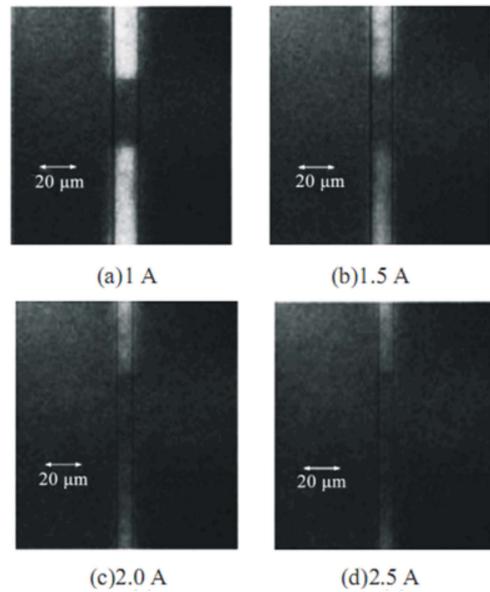


图 15 在不同电流条件下拍摄到的熔桥影像
Fig.15 Images of molten bridge under different currents

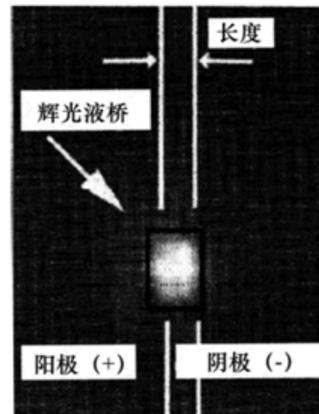


图 16 拍摄到的辉光熔桥影像
Fig.16 Images of glow molten bridge

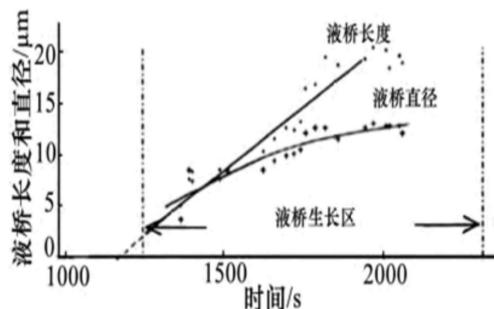


图 17 Pd 熔桥的直径、长度与时间关系
Fig.17 Curve of diameter and length of Pd molten bridge with time

Miyanaga 等^[27-28]通过分别使用平板型和圆柱形触点夹具, 测试 AgPd60 和 Pd(AgPd60 的热导能力弱于 Pd)触点在不同夹具 (平板型热导能力弱于圆柱形)下的熔桥长度和直径变化, 结果如图 18、19 所示。

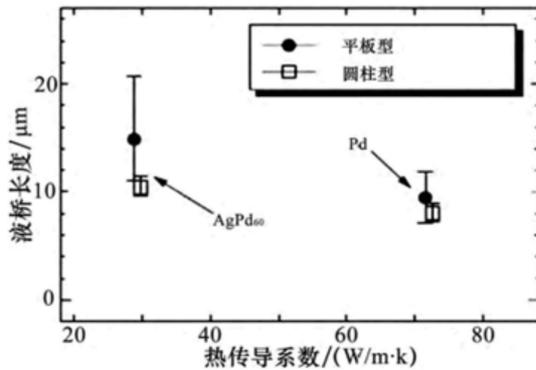


图 18 Ag 和 AgPd30 熔桥的长度与热导率的关系

Fig.18 Relationship between Ag or AgPd30 molten bridge length and thermal conductivity

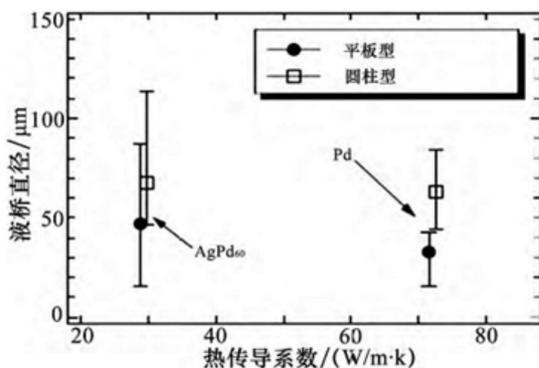


图 19 Ag 和 AgPd30 熔桥的长度与热导率的关系

Fig.19 Relationship between Ag or AgPd30 molten bridge diameter and thermal conductivity

由图 18 可知, 提高触点和夹具的热导率, 可以减小熔桥长度; 由图 19 可知, 扁平型低导热系数夹具的接触熔桥比圆柱(高导电性)夹具的接触熔桥的直径小, 夹具随其热传导系数的增加熔桥的长度增加。然而, 提高了固定装置的热传导率, 使液桥的直径变大, 理理论解释和实验检验也要进一步进行深入研究。

而熔桥数学模型方面的研究报道, 主要来自前苏联物理学家 Kharin^[29-31]的研究, 该学者初步建立了简化的熔桥模型, 给出了一些计算结果, 但由于

当时实验、计算技术以及材料高温下的相关参数比较缺乏的限制, 未能进一步研究实际熔桥的演化和影响因素之间的具体作用机制问题。

2000~2006 年希腊 Sotiris 和 Margaritis^[32]对两个导电平头棒之间导电溶液, 由于分离形成的定体积液桥的形状和导电性方面进行了实验和计算研究; 而该研究中的液桥与电接触领域中的熔桥很大的区别, 主要区别表现在: 熔桥的出现方式、温度分布、未考虑热电效应等。

5 熔桥研究中存在的问题

5.1 测试方法

对于普通金属、部分纯贵金属已有一些实验研究结果, 研究了许多影响因素与熔桥行为之间的关系。这些研究主要有: 采用照相法进行了熔桥外形的观察研究, 采用称重法开展了桥转移行为的研究, 通过电学测试方法确定熔桥的熔化、气化等特征电压和伏安曲线, 研究了分段速度对熔桥寿命和外形方面的关系研究。但对于一些纯贵金属以及贵金属合金的相关实验研究很少。这主要是由于贵金属材料普遍具有较高的熔点, 所以纯的尺寸较小, 且熔桥寿命较短, 导致对于熔桥研究相对较少。同时由于在高速摄像技术未出现前, 受技术的限制只能研究缓慢分开过程中的熔桥影像, 直到近年随着高速摄像技术的普及相关的实验测试研究逐渐增多。

5.2 熔桥理论中存在问题

从熔桥的相关理论的发展上看, 可以发现该现象是典型的交叉学科。虽然已有许多经典理论, 但仍然难以解释许多基本现象。

比较典型的是桥转移的热电效应解释与实际现象的矛盾。热电解释认为当材料的汤姆逊系数为正时, 熔桥达到沸点时断裂位置偏向阴极一侧, 这导致材料发生从阴极转移到阳极的现象; 反之汤姆逊系数为负时, 则断裂位置偏向阳极极一侧, 物质从阳极转移到阴极。实验测得汤姆逊系数结果为: Ag(汤姆逊系数为正)>Au(汤姆逊系数为正但接近零); Pt(汤姆逊系数为负)>Pd(汤姆逊系数为负)。但实验发现 Au、Pd 触头的材料转移与该理论预测方向符合; 而 Ag、Pt 触头的实际材料转移与该理论的预测方向相反; 后来的一些研究也表明该解释是不完善和有局限性的, 但 Ag、Pt 触头材料的桥转移机制问题一直也未得到根本解决, 这也是桥转移机制的热电效应解释理论一直未解决的问题。同时

大量的实验表明桥转移与材料类型、负载类型等许多因素都有关系。这表明熔桥的桥转移行为等问题是一个多物理场、多因素耦合的复杂问题,而非单因素、单变量问题。经典理论解释多只是考虑了其中少数几个影响因素,许多重要因素未被考虑,所以存在很大的片面性,所以只有通过能够尽量多的考虑各影响因素的研究方法,才能较好的解决这些问题,目前来看通过计算模拟的方法取得了一些较好的结果,在研究方法比传统方法有较大的优势。

6 展望

虽然人们对熔桥现象开展研究已经进行了至少80多年,但对于熔桥行为中许多重要基础问题仍然解决。对于贵金属电接触材料中熔桥方面研发方向大致有以下几个方向:1、熔桥基础理论的完善,例如熔桥的转移机制研究,熔桥形状的理论描述,熔桥行为的模拟理论和方法等;2、熔桥行为的影响因素对熔桥影响的高速摄像观察技术的发展,包括熔桥观察装置的研制,熔桥特征的有效测量和表征技术,实验测试结果与理论的联系等方面。

总之,对于熔桥行为的相关实验和理论研究,特别对于贵金属具有重要的理论价值和实际意义。

参考文献:

- [1] Holm R. Electric contacts: theory and application[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] 程礼椿. 电接触理论及应用[M]. 机械工业出版社, 1988.
- [3] 荣命哲. 电接触理论[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [4] 刘先曙. 电接触材料的研究和应用[M]. 国防工业出版社, 1979.
- [5] 刘金友, 王茜, 杨晓铨, 等. 电触点分离液桥研究概述[J]. 电工材料, 2014(6): 29-34.
Liu Jinyou, Wang Qian, Yang Xiaocheng et al. Molten bridge during breaking operation of electrical contacts: A review[J]. Electrical Engineering Materials, 2014(6): 29-34.
- [6] 张鑫赞, 薄凯, 周学, 等. 触头分断金属液桥侵蚀现象分析[J]. 电器与能效管理技术, 2015(7): 1-6.
Zhang Xinyun, Bo Kai, Zhou Xue, et al. The molten bridge erosion between contacts analysis[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(7): 1-6.
- [7] Davidson P M. The growth of the liquid bridge in an electrical contact[J]. British Journal of Applied Physics, 1954, 5(5): 189.
- [8] Jones F L. The physics of electrical contact phenomena[J]. British Journal of Applied Physics, 1961, 12 (7): 318-322.
- [9] Lander J J, Germer L H. The bridge erosion of electrical contacts. Part I[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(10): 910-928.
- [10] Utsumi T. Theoretical and experimental investigations of dynamic molten bridge[J]. IEEE Trans on Parts, Material and Packing, 1969, PMO-5(1): 62-68.
- [11] Ishida H, Suzukis, Sone H, et al. Formation mechanism of dark bridge between contacts with very slow opening speed[J]. IEICE Trans Electron, 2006, E89-C(6): 1136-1140.
- [12] Ishida H, Taniguchi M, Takagi T. Precise measurement of dark bridge between micro-gap electrical contacts in a state of thermal equilibrium condition[C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005, Proceedings of the IEEE. IEEE, 2005(2): 1301-1306.
- [13] 张鑫赞, 陈默, 周学, 等. 触点金属液桥试验系统的研究[J]. 低压电器, 2014(4): 46-50.
Zhang Xinyun, Chen Mo, Zhou Xue, et al. Study on experimental system for molten-bridge between low-velocity opening contacts[J]. Low Voltage Apparatus, , 2014(4): 46-50.
- [14] 李慕阳, 陈松, 谢明, 等. 高速摄像技术在材料科学研究中的应用和发展[J]. 贵金属, 2014, 35(S1): 175-180.
Li Muyang, Chen Song, Xie Ming, et al. Application and development of high-speed video technology in materials science[J]. Precious Metals, 2014, 35(S1): 175-180.
- [15] 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 Zhilong, Guo Junmei, Chen Song, et al. Review of the numerical simulation of the electric contact phenomena[J]. Electrical Engineering Materials, 2010(1): 3-8.
- [16] Tan Z L, Guan W M, Guo J M, et al. Mechanical, 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.
- [17] 郭迎春, 耿永红, 陈松, 等. 电触点直流电侵蚀研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(s3): 264-268.
Guo Yingchun, Geng Yonghong, Chen Song, et al. DC electric erosion of electric contacts[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S3): 264-268.
- [18] 荣命哲, 姜建勇, 王小华. 永磁式接触器动触头动作特

- 性仿真分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 109-113.
- Rong Mingzhe, Lou Jianyong, Wang Xiaohua. Simulation analysis and experimental research of operating characteristic for moving contact of contactor with permanent magnet actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 109-113.
- [19] 吴细秀, 李震彪. 电器电极材料喷溅侵蚀的理论计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 96-101.
- Wu Xixiu, Li Zhenbiao. Theoretic analysis on sputter erosion of electrode[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 96-101.
- [20] 翟国富, 孙韬, 任万滨. 继电器触点分断过程瞬态热场仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 118-123.
- Zhai Guofu, Sun Tao, Ren Wan-bin. Transient thermal field simulation method of relay contacts breaking process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9): 118-123.
- [21] 李坚石, 倪文平, 焦莉. 低压电器电接触热过程的数学-物理理论[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 1990(4): 247-252.
- Li Jianshi, Ni Wenping, Jiao Li. The researching results of mathematical and physical theory for Low-Voltage electrical switch contact corrosion[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science, 1990(4): 247-252.
- [22] 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(2): 276-280.
- Tan Zhilong, Chen Song, Guan Weiming, et al. Thermal-electric-structure coupling finite element analysis and experimental study of AgNi10 contact material under the closed contact stage[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012(2): 276-280.
- [23] 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(10): 1780-1784.
- Tan Zhilong, Guan Weiming, Guo Junmei, et al. Finite element analysis and experimental study on the thermal-electric-mechanical coupling of AgNi10 electrical contactor during the breaking process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012(10): 1780-1784.
- [24] Ishida H, Watanabe Y, Taniguchi M, et al. Observation of contact bridge phenomena at transient and steady state[C]// Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2004: 519-522.
- [25] Ishida H, Watanabe Y, Taniguchi M, et al. Observation of contact bridge phenomena at transient and steady state [C]// Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2004: 519-522.
- [26] Koren P P, Nahemow M D, Slade P G. The molten metal bridge stage of opening electrical contacts[J]. Parts, Hybrids, and Packaging, IEEE Transactions on, 1975, 11(1): 4-10.
- [27] Miyanaga K, Kayano Y, Takagi T, et al. Effect of heating value on contact diameter at low speed breaking contact[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2009, 92-c(8): 1020-1022.
- [28] Miyanaga K, Kayano Y, Komakine T, et al. Effect of heat conductivity on bridge break at different material contact pairs[J]. IEICE transactions on electronics, 2011, 94(9): 1431-1434.
- [29] Kharin S N. Mathematical model of the short arc phenomena at the initial stage[C]. Electrical Contacts, 1997, Proceedings of the 43rd IEEE Holm Conference on. IEEE, 1997: 289-305.
- [30] Kharin S N. Post bridge phenomena in electrical contacts at the initial stage[J]. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, IEEE Transactions on, 1996, 19(3): 313-319.
- [31] Kharin S N. Thermocapillary mechanism of contact erosion during arcing[C]. Electrical Contacts, 1990. Proceedings of the 36th IEEE Holm Conference on. and the 15th International Conference on Electrical Contacts. IEEE, 1990: 37-43.
- [32] Sotiris P E, Margaritis K, Thodoris D K. Electrical conductance study of θ -liquid bridges[J]. Journal of Colloid and Interface Science 2006, 302: 597-604.