

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

陈 松, 管伟明, 张昆华, 郭迎春, 耿永红, 郭俊梅, 邓德国

(昆明贵金属研究所, 云南 昆明 650106)

摘 要: 在电接触试验机上测量 Ag/La₂NiO₄ 基电触头, 得到在直流 18 V、30 A 的工作条件下的相关实验数据。并进一步分析电触头对的阴极和阳极的表面形貌、电弧侵蚀和质量变化特点。在此基础上, 通过对实验中闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却过程的分析, 建立一个电触头使用过程中的瞬态温度场的计算模型; 根据测得的相关实验数据, 采用有限元方法对该模型进行计算, 得到电触头的瞬态温度场的分布和演化特点。通过计算结果可以较好预测电弧侵蚀的特点以及材料转移方向, 并给出关于材料熔化、汽化等方面的许多重要信息。这些结果对于该电触头材料的侵蚀和使用寿命的研究具有一定参考价值。

关键词: 电触材料; 电弧侵蚀; 有限元; 温度场; 模型

中图分类号: TG146.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)01-0131-07

银金属氧化物(Ag/MeO)电接触材料是一种广泛使用的电接触材料, 常见的有 Ag/CdO、Ag/SnO₂、Ag/ZnO 等。研究表明, 加入不同金属氧化物的银基电接触材料, 使用中出现的电弧具有不同特性^[1-3]。所以, 人们一直研究不同金属氧化物对电接触材料各种性能的影响, 并通过添加新的金属氧化物来制备新型的电接触材料。La₂NiO₄ 是一种新的类金属导电陶瓷, 并且其电阻率远远小于 SnO₂^[4,5], 同时具有熔点较高、耐电弧烧蚀以及化学稳定性较高等特点^[4-6]。本研究小组和山东大学通过合作研究, 成功研制了新型 Ag/La₂NiO₄ 电触头材料^[4,5]。并采用昆明贵金属研究所研制的电接触试验机, 测量该电触头材料在模拟使用过程中的各参量变化^[6]。

本研究的目的是在依靠实验测量数据的基础上建立温度场模型, 并采用有限元方法进行求解; 通过计算结果了解材料在接触电阻热、电弧作用下材料的熔化、汽化等方面的定量信息, 并可以预测和解释的材料转移方向; 最终在电触头材料研究方面, 建立实验和计算紧密结合的一种研究方法和思路。

1 实 验

1.1 试样制备

将 La₂NiO₄ 粉末(山东大学提供)与 Ag 粉(纯度≥99.95%)以 1:9 的质量比混合, 经压结、烧结、二次挤压、

拉制等过程, 制成直径 $\phi 1.4$ mm 的 Ag/La₂NiO₄ 丝材, 然后墩制成 $\phi 3.0$ mm \times 1.0 mm + $\phi 1.5$ mm \times 2 mm 的触点, 其中动触头的端面为球形, 静触头的端面为平板形。

1.2 实验过程

在电接触试验机上对该电触头进行试验^[7]。实验条件如下: 接触压力 0.8 N, 直流 18 V、30 A; 频率 1 Hz; 操作次数 5000 次。通过电接触试验机, 可测得电触头在实验过程中的电流、电压、接触电阻等参数。采用光学天平测量电触头对中阴极、阳极质量在实验前后的变化。最后对操作 5000 次后的电触头对的阴极、阳极, 采用 PHILIPS-XL30ESEM 扫描电学显微镜进行表面形貌分析。

2 结果与分析

2.1 材料转移量

电触头在闭合与分断过程中均可观察到出现电弧。表 1 给出了 3 对电触头, 经 5000 次操作后的阴极、阳极和电触头对的总质量变化(即材料损耗)。可以发现, 阳极失重而阴极增重, 电触头的材料也损耗了。这说明在本实验条件下存在材料的转移, 而且由于材料的气化、飞溅等导致材料损耗非常明显。由表 1 中 3 个试样的测量数据, 可计算得到平均一次操作后, 阳极质量变化 -2.0×10^{-4} mg, 阴极质量变 1.5×10^{-4} mg, 材料损耗 -5×10^{-5} mg。

收稿日期: 2008-01-21

基金项目: 国家“863”基金资助项目(2001A A320175)及云南省自然科学基金(1999E0007Z)

作者简介: 陈 松, 男, 1976 年生, 硕士, 昆明贵金属研究所, 云南 昆明 650106, 电话: 0871-8328950, E-mail:fermi_gas@sina.com

表 1 操作 5000 次后的电触头质量变化

Table 1 Mass change of electrical contacts after 5000 times

(mg)			
No.	Anode	Cathode	Total
1	-1.30	1.00	-0.30
2	-0.50	0.35	-0.15
3	-1.15	0.85	-0.30

2.2 电弧侵蚀

图 1 和图 2 是电触头的阴极和阳极表面的 SEM 照片。可以发现, 电弧侵蚀后在阴极上产生几个凸丘、喷溅产生少量熔滴和大片的凝固组织。一般认为阴极上产生的凸丘与阳极型电弧有密切关系^[1,2], 而大片的凝固组织以及熔滴, 则与阴极型电弧有关^[1,2]。从图 2 中可发现, 由于电弧对阳极强烈侵蚀出现了大面积的凝固组织、电弧喷溅产生的大量富 Ag 熔滴和电弧侵蚀坑, 以及材料气化产生的絮状物。通过比较图 1 和图 2 可见, 阳极上出现明显的侵蚀坑, 而对应的阴极则出现由于材料转移导致的凸丘。结合表 1 中的阴极、阳极和总质量变化, 可以确定电弧对阳极的侵蚀作用远大于阴极, 并且电弧侵蚀主要通过喷溅和蒸发方式进行。

2.3 分析与讨论

由于电触头材料使用中主要经历闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却过程。通常认为材料的侵蚀、转移和损耗, 主要发生在闭合电弧和分断

电弧作用阶段。许多研究结果证明^[1~3]: 闭合电弧是阳极型电弧又称短弧(材料从阳极转移到阴极), 主要由阴极发射的电子组成; 而分断电弧是阴极型电弧又称长弧(材料从阴极转移到阳极), 主要是由金属和气体的离子组成。值得注意的是这两种电弧导致材料转移方向是相反的。因此, 电弧导致材料侵蚀、转移现象是这 2 种电弧作用的综合结果, 最终的侵蚀和转移结果取决于那种电弧起主要作用。结合实验结果和分析的大量已有研究^[1,2], 可以得出如下结论: (1)电触头在闭合过程中的闭合电弧是阳极型电弧, 并且在材料的转移现象中起主导作用; (2)在操作过程中, 电弧对阳极的侵蚀作用远大于阴极, 并且侵蚀主要是通过喷溅和蒸发方式进行。

3 有限元模拟研究

电接触材料的侵蚀一直是电接触研究领域中的基本问题, 并且直接决定了电触头的使用寿命, 因此对该问题的研究一直是国内外研究的重点和热点^[8~10]。由于电接触材料在使用中需要经历闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却过程, 故材料的侵蚀是多过程、多变量和多物理场耦合的结果。如果要深入研究这些过程中电接触材料的具体行为, 必须采用一定的研究方法和手段。

目前国内外研究主要采用实验和数值模拟相结合的思路^[8~14]: 首先在实验数据的基础上, 建立一定的数学模型; 其次采用数值分析方法(主要是有限元方法)进行求解和计算; 最后, 通过计算结果和实验结果的比较, 从而了解电接触材料的侵蚀机制、过程和控制因素, 同时也可改进和完善数学模型。

在电接触材料的数值模拟研究方面, 国外进行研究最早是 Robertson^[13]、Nied^[14] 等人; 近年来 Borkowski^[9]、Swingler^[10]建立了电弧作用的唯象模型, 并进行了相应的计算和分析。国内主要是西安交通大学、华中科技大学和北京邮电大学等学校从事该方面的研究。特别是西安交通大学的王其平和荣命哲等教授, 对接触电阻焦耳热产生的温度场进行了分析和计算^[11,12], 还建立了恒定大电流工作条件下, 电弧对材料作用的简化模型, 并采用有限差分法求解温度场, 计算结果与实验结果符合较好^[11]。近年来, 华中科技大学李震彪教授等建立了较好的电弧作用模型, 并采用有限元方法进行计算和分析^[8], 取得了一些有价值的研究成果。但目前这些国内外的研究中存在一些不足: (1)分开研究电阻焦耳热和电弧作用的温度场问题; (2)建立的模型, 特别是电弧作用模型与实际还有一定距离, 例电弧的作用半径恒定、电弧功率恒定等;

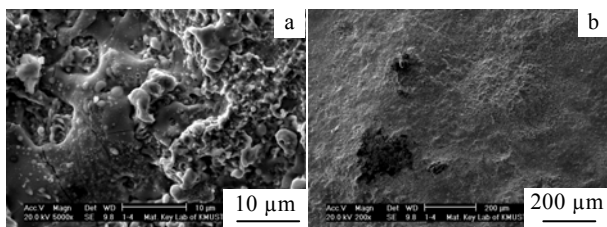


图 1 操作 5000 次后阴极在不同放大倍率下的表面形貌
Fig.1 Morphology of cathode surface in different magnification after 5000 time operation: (a) ×5000 and (b) ×200

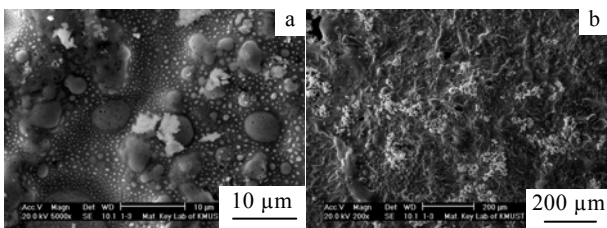


图 2 操作 5000 次后阳极在不同放大倍率下的表面形貌
Fig.2 Morphology of anode Surface in different magnification after 5000 time operation: (a) ×5000 and (b) ×200

(3)实验中测量得到的许多实际数据,未用到模拟计算中,使得计算结果与实测结果之间存在一定差别;(4)计算中存在一定问题主要是人为划定的计算区域太小,且在划定区域的边界处人为设定了边界条件,这与真实边界条件存在一定差异^[1,8,11,12],这都将导致计算结果不能完全反映实际情况;(5)对于电触头实际使用过程中,经历闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却整个过程的瞬态温度场模型没有建立起来。

本研究通过分析电触头的实际使用过程,同时根据实测数据和有限元计算技术,初步建立了一个可以克服以上问题的数学模型和计算方法。

3.1 模型建立

通过分析电触头在使用中经历的闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却过程,建立了相应的轴对称瞬态温度场模型(如图3所示)。接触电阻焦耳热热流或电弧热流的总功率为 $P(t)$; 对于阳极或阴极,通过半径为 $r(t)$ 的圆面进入电触头的功率 $Pf(t)=P(t)*\eta$, 且热流密度 $J=k(t)(k(t)=P(t)*\eta/\pi r(t)^2)$ 在圆面中分布均匀,其中 η 是功率输入因子($0<\eta\leq 1$),值得注意的是对于接触电阻焦耳热作用时 $\eta=0.5$,而当电弧作用时 η 不一定是 0.5,且对于阳极和阴极 η 也不同;电触头的其它表面保持绝热 $J=0$ 或由于水冷而保持室温 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$,电触头初始温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,电触头采用 Ag/La₂NiO₄ 电触头材料制成。

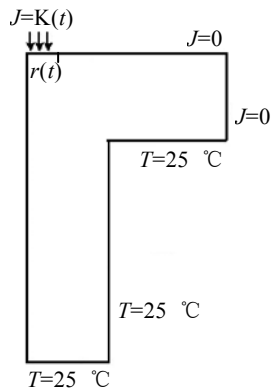


图3 瞬态温度场计算模型示意图

Fig.3 Sketch of transient temperature field calculation model

需要注意的是模型中的热流作用功率 $P(t)$ 、作用半径 $r(t)$ 、热流密度 $k(t)$ 都随时间变化,这反映了闭合电弧、接触电阻焦耳热、分断电弧连贯作用的特点,这也更接近实际使用过程,也是本模型与以往的模型的重要区别。同时本模型采用了实际使用情况下的边界条件,有效的避免了以往模型中人为划定区域和设

定区域边界条件的问题,计算结果可较好反映电触头上的温度场分布。本模型为轴对称非线性瞬态温度场问题,采用焓法建立基本方程并进行计算,基本计算公式为(1):

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \nabla \cdot [k(T) \cdot \nabla T] \tag{1}$$

式中: $H(T) = \int_0^T \rho \cdot C_p(T) dt$

边界条件为(2)、(3)、(4):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = J = k(t) = P(t) \cdot \eta / \pi r(t)^2$$

(触头顶部的圆面内) (2)

$$T = 25\text{ }^\circ\text{C} \text{ (电触头柄部表面)} \tag{3}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ (电触头其他表面)} \tag{4}$$

$$\text{初始条件为: } T = 25\text{ }^\circ\text{C} \text{ (整个电触头)} \tag{5}$$

3.2 计算过程

首先,通过差热分析和热导仪的测量,并通过计算得到了 Ag/La₂NiO₄ 电触头材料的热导率 K (图4)、热焓 H (图5)等参量;接着通过电接触试验机的实测数据,确定或推算出模型中的热流作用功率、作用半径等参量。闭合、分断电弧作用时,作用半径 $r(t)(\mu\text{m})$ 可用电弧电流 $I(t)(\text{A})$ 与作用半径的经验公式 $\pi r(t)^2 = 1.67 \times 10^3 I(t)^{[1,2]}$ 得到;由于电弧输入两极的功率不同,所以分别对 $\eta=0.5$ (输入两极的功率相同)和 $\eta=1.0$ (功率只输入一极)两种情况进行计算;而接触电阻焦耳热作用时,可以通过材料的显微硬度 $\text{HB}=60$ 推算出作用半径^[11]约为 $20\text{ }\mu\text{m}$;计算热流作用功率时,认为接触电阻焦耳热输入两极的功率相同,即 $\eta=0.5$,电弧、接触电阻焦耳热总功率 $P(t)$ 均直接由电接触实验机测量得到。

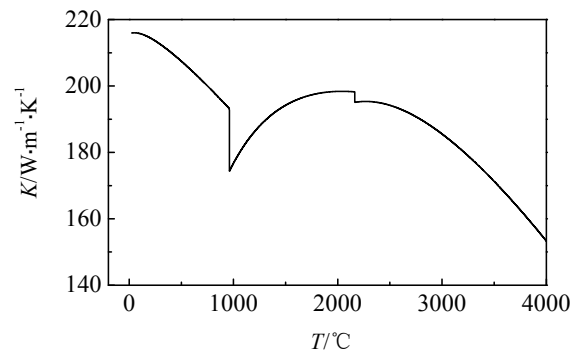


图4 Ag/La₂NiO₄ 材料的热导率

Fig.4 Thermal conductivity of Ag/La₂NiO₄ material

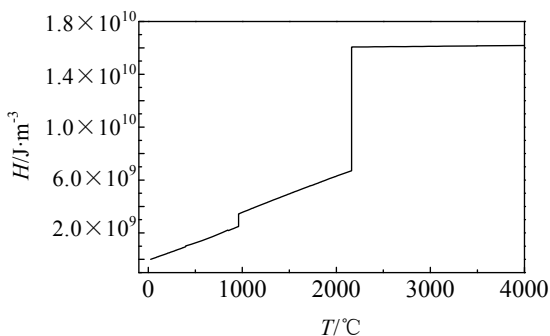


图 5 Ag/La₂NiO₄ 材料的热焓

Fig.5 Enthalpy of Ag/La₂NiO₄ material

在开路直流电压 18 V、闭路电流 30 A 的工作条件下，通过电接触试验机对 Ag/La₂NiO₄ 基电触头，使用过程中的电压、电流、接触电阻功率等参量进行了测量，并对相应的参数进行了计算。图 6 和图 7 分别给出了电触头在经历闭合电弧(0~19.7 ms)→接触电阻焦耳热(19.7~485.7 ms)→分断电弧(485.7~501.7 ms)→自然冷却($t > 501.7$ ms)过程中，热流作用功率 $P(t)$ 、作用半径 $r(t)$ 的关系。图 6、图 7 中显示在闭合、分断电

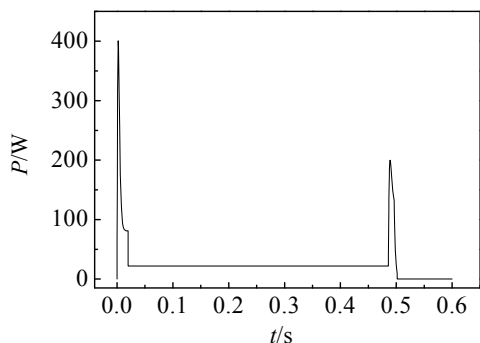


图 6 电触头使用中作用在触头上的热流作用功率

Fig.6 Heat flux $P(t)$ on contact during contact operation

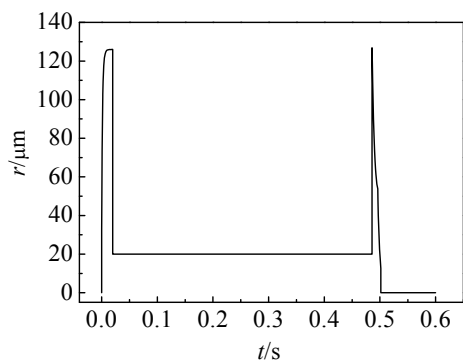


图 7 电触头使用中作用在触头上的热流的作用半径

Fig.7 Heat flux radius of on contact during contact operation

弧作用阶段，作用功率 $P(t)$ 和作用半径 $r(t)$ 的数值较大，且增加速度极快，而接触电阻焦耳热作用阶段，作用功率和作用半径基本为定值。

在以上参数的基础上，采用有限元方法进行计算^[14~16]。首先对图 3 中轴对称模型的区域进行网格划分，特别是接近热流作用区域的网格密度较大(单元尺寸为 0.5 μm)，而靠近触头柄部的网格密度较小(单元尺寸为 50 μm)，在这 2 个区域之间网格密度逐渐过渡，这样可以有效提高计算效率；计算时间范围：0~0.6 s(电触头的一个操作周期)，时间步长范围为 0.20~20 ms，计算程序用 Fortran 编写，分别对 $\eta=0.5$ 和 $\eta=1.02$ 种情况进行了计算。

3.3 结果与分析

Ag/La₂NiO₄ 基电触头，在使用过程中各时刻温度场的计算结果，对于该电触头材料的侵蚀过程、使用寿命等方面的研究具有重要的参考价值。温度场计算结果显示，触头顶部的中心位置是电触头上的最高温度位置。图 8 和图 9 给出不同 η 值时，该位置的

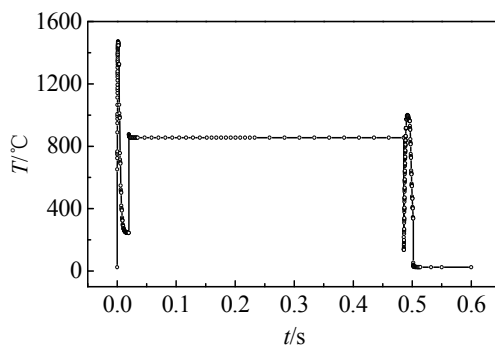


图 8 18 V、30 A 条件下 Ag/La₂NiO₄ 电触头顶部的中心处的温度与时间关系($\eta=0.5$)

Fig.8 Temperature in the center of Ag/La₂NiO₄ base contact top at 18 V, 30 A ($\eta=0.5$)

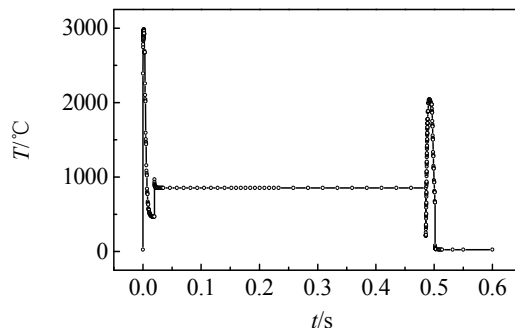


图 9 18 V、30 A 条件下 Ag/La₂NiO₄ 电触头顶部的中心处的温度与时间关系($\eta=1.0$)

Fig.9 Temperature in the center of Ag/La₂NiO₄ base contact top at 18 V、30 A ($\eta=1.0$)

温度与时间曲线。可以发现一些相同点: (1) 电触头在闭合、分断电弧作用时段, 温度升高非常迅速, 达到最高, 并且最高温度的出现均发生在闭合或分断电弧开始作用后 1~10 ms 之内; (2) 不同 η 值时在接触电阻焦耳热作用时段, 由于计算中采用的接触电阻焦耳热的热流强度相同, 所以温度基本都恒定在 854.8 °C 左右, 温度变化幅度很小, 也表明温度场分布基本是稳态分布了; (3) 由于计算中在闭合、分断电弧作用时段与接触电阻焦耳热作用时段的交界处, 采用的热流作用功率、面积均会发生突变(如图 6 和图 7), 导致温度也发生突变, $\eta=0.5$ 时温度最低处分别为 244.8 和 136 °C, 而 $\eta=1.0$ 时最低处分别为 468.5 和 211.4 °C; (4) 值得注意的是 $\eta=0.5$ 和 $\eta=1.0$ 时, 分断电弧结束作用后 10 ms, 电触头的温度就都降低到室温 25 °C, 考虑到电触头在实际使用中, 从完全分断后到再次闭合之间的间隔通常都远大于 10 ms, 所以电触头下一次工作时已基本全冷却。

而当 $\eta=0.5$ 时, 在闭合电弧作用 $t=1.74$ ms 时, $T_{\max}=1471.62$ °C, 超过材料中银的熔点, 出现该阶段富银体积最大的熔池; 而熔池在 0.36~4.53 ms 之间出现共存在 4.17 ms; 分断电弧作用 $t=491.8$ ms 时, $T_{\max}=1000.21$ °C, 也超过材料中银的熔点, 出现该阶段富银体积最大的熔池; 而熔池在 490~496 ms 出现共存在 6 ms。由于在这 2 个电弧作用阶段都出现了熔池, 所以电弧作用在熔池上, 很容易出现喷溅现象。这对于研究材料的转移方向和大小有重要意义。为了深入研究, 图 10 给出闭合电弧作用阶段, $t=1.74$ ms 出现最高温度时的熔池图。而图 11 给出分断电弧作用阶段, $t=491.8$ ms 出现最高温度时的熔池图。表 2 中定量给出了电弧作用在这 2 个时刻时产生熔池的有关参数。

通过图 10 和 11 及表 2 中的数据, 可以发现闭合电弧作用下的最高温度和熔池体积和质量都远高于分断电弧, 只是熔池存在时间略低与分断电弧。考虑到材料的转移行为与电弧作用在熔池上产生的喷溅行为密切相关, 而熔池的体积和存在时间直接决定了喷溅行为的强度和数量。可认为在本实验条件下, 闭合电弧产生喷溅作用的结果应远强于分断电弧的结

果。同时考虑到闭合电弧是一种阳极型电弧(材料的转移是从阳极转移到阴极), 而分断电弧是一种阴极型电弧(材料的转移是从阴极转移到阳极), 所以材料的净转移是从阳极转移到阴极^[1]。这一结论与前面的实验结果相符合。结合表 1 中数据通过计算可以发现, 实验中一次操作后, 阳极平均减少的质量和材料损耗是表 2 中闭合和分断电弧作用下最高温度时熔池质量的 4.9% 和 1.2%。

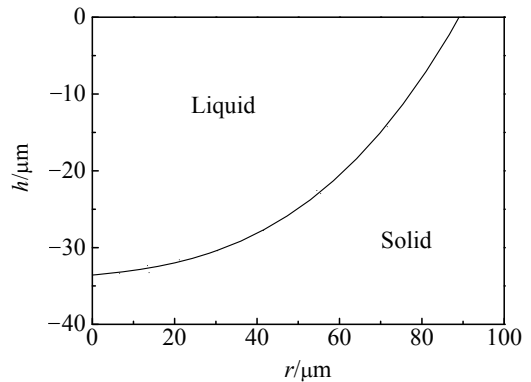


图 10 $\eta=0.5$ 时闭合电弧作用下最高温度时的熔池图
Fig.10 Melton pool map of contact at the maximum temperature by a close arc of $\eta=0.5$ ($t=1.74$ ms)

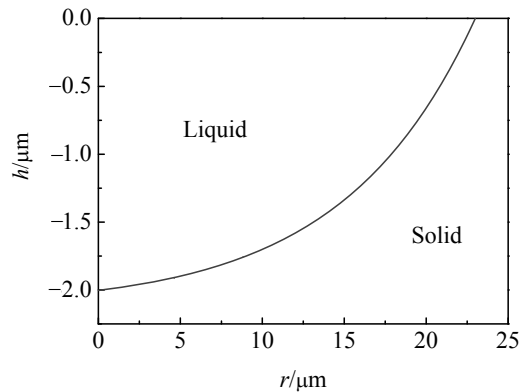


图 11 $\eta=0.5$ 时分断电弧作用下最高温度时的熔池图
Fig.11 Melton pool map of contact at the maximum temperature by a open arc of $\eta=0.5$ ($t=491.8$ ms)

表 2 电弧作用在 Ag/La₂NiO₄ 材料上产生熔池的有关参数

Table 2 Parameters of molten pool that was made by Arc effect on Ag/La₂NiO₄ ($\eta=0.5$)

	Closed arc	Open arc
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	1471.62 ($t=1.74$ ms)	1000.21 ($t=491.8$ ms)
Volume of melt pool at $T_{\max}/\mu\text{m}^3$	4.58×10^5	1.87×10^3
Mass of melt pool at T_{\max}/mg	4.12×10^{-3}	1.68×10^{-5}
Time for melt pool/ms	4.17(0.36~4.53 ms)	6(490~496 ms)
Volume ratio of molten pool between closing arc and opening arc		245:1
Lifetime ratio of molten pool between closing arc and opening arc		1:1.4

当 $\eta=1.0$ 时, 在闭合电弧作用 $t=1.74$ ms 时, $T_{\max}=2983.4$ °C, 超过了银的沸点, 不仅有该阶段富银体积最大的熔池, 也存在最大的气化池; 熔池出现在 0.08~6.92 ms 存在 6.84 ms, 气化池出现在 0.13~3.72 ms 存在 3.59 ms; 分断电弧作用 $t=491.8$ ms 时, $T_{\max}=2045.24$ °C, 仅存在富银熔池; 熔池出现在 487~499.6 ms 存在 12.6 ms。同样在两个电弧作用阶段均出现熔池, 因此电弧作用在熔池上产生的喷溅现象也会出现, 值得注意的是闭合电弧作用阶段还会出现气化池, 气化池是决定材料的耗损的重要因素, 同时气化池是在熔池的上面, 这对熔池的喷溅行为有一定影响。为了深入研究, 图 12 给出了闭合电弧作用下出现最高温度时的熔池和汽化池图, 图 13 给出分断电弧作用下出现最高温度时的熔池图。表 3 中定量给出了电弧作用在这 2 个时刻时产生的熔池、气化池的有关参数。

通过图 12 和 13 及表 3 中的数据, 可以发现闭合电弧作用下的最高温度, 熔池的尺寸、体积和质量也都远远高于分断电弧, 只是熔池存在时间略低与分断电弧, 而只在闭合电弧作用下才出现气化池。由于材料的转移与电弧产生的喷溅、气化行为密切相关, 而熔池体积和存在时间决定了喷溅行为的强度; 同时气化池的体积与存在时间与材料的损耗有十分密切的关系。结合表 1 中数据, 通过计算发现, 实验中一次操作后阳极平均减少的质量是表 3 中闭合电弧作用下最高温度时熔池质量的 0.8%, 是最高温度时气化池质量的 8.6%, 而减少的总质量既材料损耗质量是最高温度时气化池质量的 2.1%。

综合以上分析并结合计算结果, 可以认为在本实验条件下, 虽然闭合电弧产生的熔池存在时间略低与分断电弧, 但由于闭合电弧产生熔池的尺寸和体积都远大于分断电弧, 而且只有闭合电弧会产生气化池, 所以闭合电弧作用造成的材料转移结果和材料损耗都远强于分断电弧的作用。而由于闭合电弧是一种阳极型电弧, 而且由于气化池只出现在闭合电弧作用阶

段, 所以材料的净转移是从阳极转移到阴极, 而且材料的损耗也主要来自于阳极, 且与材料的气化过程有密切关系, 这与前面的实验结果符合。

总之, 通过对 $\eta=0.5$ 和 $\eta=1.0$ 时的计算结果的分析, 以及和实验结果比较和计算, 可以得出如下结论: (1)材料的转移和损耗行为主要是受闭合电

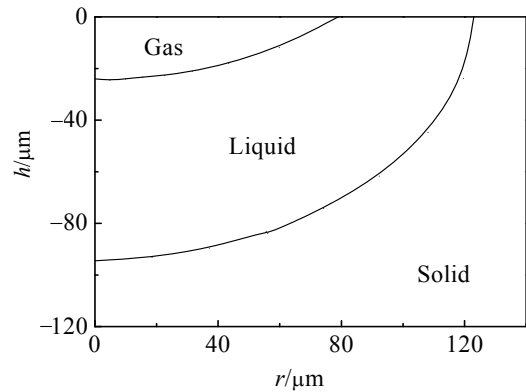


图 12 $\eta=1.0$ 时闭合电弧作用下最高温度时的熔池和汽化图
Fig.12 Melton pool and gas pool map of contact at the time of maximum temperature appear by close Arc when $\eta=1.0$

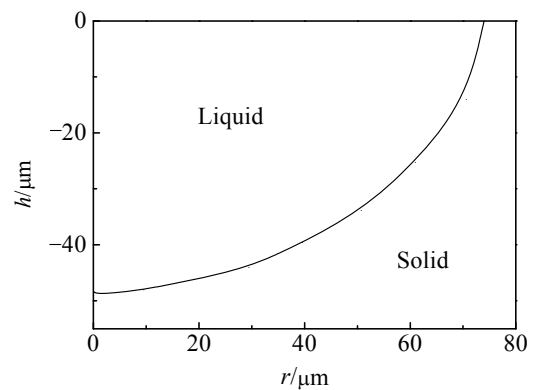


图 13 $\eta=1.0$ 时分断电弧作用下最高温度时的熔池图
Fig.13 Melton pool map of contact at the time of maximum temperature appear by open Arc when $\eta=1.0$

表 3 电弧作用在 $\text{Ag/La}_2\text{NiO}_4$ 材料上产生的熔池、气化池的有关参数($\eta=1.0$)

Table 3 Parameters of melt pool and gas pool by arc effect on $\text{Ag/La}_2\text{NiO}_4(\eta=1.0)$

	Closed arc	Open arc
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	2983.4($t=1.74$ ms)	2045.24($t=491.8$ ms)
Volume of gas pool at $T_{\max}/\mu\text{m}^3$	2.59×10^5	-
Mass of melt pool at T_{\max}/mg	2.33×10^{-3}	-
Time for gas pool/ms	3.59(0.13~3.72 ms)	-
Volume of melt pool at $T_{\max}/\mu\text{m}^3$	2.93×10^6	5.3×10^5
Mass of melt pool at T_{\max}/mg	2.64×10^{-2}	4.77×10^{-3}
Time for melt pool/ms	6.84(0.08~6.92 ms)	12.6(487~499.6 ms)
Volume ratio for gas, closed and open pools		1:11.3:2
Time ratio for gas, closed, open pools		1:1.9:3.5

弧作用控制; (2)由于闭合电弧是阳极型电弧, 材料主要是从阳极转移到阴极, 材料的损耗也主要来自阳极; (3)当闭合电弧作用在阳极上未形成气化池时, 材料的转移和损耗行为主要受闭合电弧作用在阳极上的熔池导致的喷溅行为控制; 而当气化池出现后, 材料的转移和损耗行为开始转变为受气化池的气化行为影响。

这些结论不仅与实验结果符合, 而且还说明了材料在该实验条件下受到电弧侵蚀的特点和影响因素。该电触头材料的侵蚀和使用寿命的研究具有一定参考价值 and 实际意义。同时也说明了该研究模型具有一定的合理性, 并且有限元方法计算得出的结果是正确和有效的。这将对新型电接触材料的研发具有一定的推动作用。

4 结 论

1) 采用电接触试验机测量了新型 Ag/La₂NiO₄ 基电接触材料, 得到了在直流 18 V、30 A 的工作条件下的相关实验数据。在此基础上, 建立了新的可以描述电触头经历, 闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧→自然冷却的实际使用过程的温度场计算模型。

2) 采用本计算模型和 Ag/La₂NiO₄ 电触头材料的实测数据, 用有限元方法进行了求解。计算结果不仅可以较好的解释材料的转移方向等实验结果, 而且对于材料的电弧侵蚀机理、特点和影响因素, 都得到了一些有价值的研究结果, 对于该电接触材料的研究和开发具有一定参考价值。

参考文献 References

[1] Rong Mingzhe(荣命哲). *Theory of Electrical Contact*(电接触理论)[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2005:

- [2] Cheng Lichun(程礼椿). *Application and Theory of Electrical Contact*(电接触理论及应用)[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1988:
- [3] Wang Qiping(王其平). *Electrical Apparatus Arc Theory*(电器电弧理论)[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1982:
- [4] Guan Weiming(管伟明) et al. *Precious Metals*(贵金属)[J], 2002, 23(1): 26
- [5] Yin Na(尹娜) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(6): 990
- [6] Hou Zhi(侯智). *Preparation and Performance of Ag/Conductive Ceramic Contact Materials*(银/导电陶瓷电接触材料制备与性能研究)[D]. Jinan: Shandong University, 2005
- [7] Xu Yun(徐云) et al. *Precious Metals*(贵金属)[J], 2007, 28(1): 15
- [8] Wu Xixiu(吴细秀) et al. *Proceedings of the CSEE*(中国电机工程学报)[J], 2003, 6: 96
- [9] Borkowski P et al. *47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*[C]. Montreal Canada: IEEE, 2001: 259
- [10] Swingler J et al. *IEEE Transactions on CHMT*[J], 1998, 21(1): 54
- [11] Rong Mingzhe(荣命哲). *Electrician Technology Transaction*(电工技术学报)[J], 1994(3): 34
- [12] Shun Ming(孙明). *Arc Erosion of Contact Material and Mathematic Model Research*(触头材料的电弧侵蚀特性及其数学模型研究)[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1992
- [13] Robertson S R. *IEEE Transactions on CHMT*[J], 1982, 5(1): 3
- [14] Nied H A et al. *IEEE transactions on CHMT*[J], 1984, 7(1): 112
- [15] Guo Zengyuan(过增元) et al. *Arc and Hot Plasma*(电弧和热等离子体)[M]. Beijing: Science Press, 1986
- [16] Chen song(陈松) et al. *Precious Metals*(贵金属)[J], 2007, 28(1): 18

Finite Element Method and Experimental Investigation on the Arc Erosion of Ag/La₂NiO₄ Base Electrical Contacts at High Direct Current

Chen Song, Guan Weiming, Zhang Kunhua, Guo Yingchun, Geng Yonghong, Guo Junmei, Deng Deguo
(Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Experimental data of Ag/La₂NiO₄ base electrical contacts in the condition of DC 18V/30A were obtained by electrical contact experimental instrument. The morphology of anode and cathode surface, arc erosion and weight change were analysis. A transient temperature field model of electrical contacts was established by the following procedure analysis: the close arc→ the contact resistance Joule heat → the open arc. The features and distribution of the transient temperature field were calculated by finite element method according to the experimental data. From the results, not only the feature of arc erosion and direction of mass change were predicted, but also the important information about material melting and vaporization were understood, which are valuable to research the erosion mechanism and lifetime for the Ag/La₂NiO₄ base electrical contacts material.

Key words: electric contacts material; arc erosion; finite element; temperature field; model

Biography: Chen Song, Master, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, P. R. China, Tel: 0086-871-8328950, E-mail: fermi_gas@sina.com