

约束阴极微弧氧化放电特性研究*

张欣盟 田修波 巩春志 杨士勤

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2009 年 5 月 31 日收到; 2009 年 9 月 21 日收到修改稿)

利用 $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-KOH}$ 溶液体系, 以工业纯铝为基体材料对约束阴极微弧氧化的放电特性进行了研究. 考察了恒压模式下电极距离对氧化电流、电位分布及起弧电压的影响, 并对电极距离与微弧氧化电能利用率间的关系进行了分析. 结果表明: 对于阴阳极等约束条件下, 随阴阳极距离加大, 工作电流逐渐减小. 而对于仅约束阴极情况, 工作电流随着阴阳极间距增加而增大. 这是由于增加阴阳极间距时, 虽然约束阴极正下方试样表面的电场强度降低, 工作电流减小, 但远离约束电极处, 阳极表面电场强度却增加, 工作电流增大. 起弧电压随电极间距离的增大而升高, 但阳极表面电场强度几乎保持不变. 微弧氧化陶瓷层厚度由处理中心沿半径向外逐渐变薄, 且中心处陶瓷膜厚度随电极距离的增大迅速减小, 电能利用率随之降低.

关键词: 微弧氧化, 约束阴极, 放电特性, 电极间距

PACC: 5275R, 5280W, 9420S

1. 引 言

微弧氧化 (micro-arc oxidation, MAO) 是一种利用等离子体增强电化学方法在有色金属表面原位生成陶瓷层的表面处理新技术^[1]. 从 Betz 发现微弧放电现象到现在的几十年时间里, 人们对微弧氧化技术进行了大量的研究, 并已成功实现了 Al, Mg, Ti 等金属及其合金表面防腐、耐磨^[2-6] 及各种功能化膜层^[7-10] 的制备. 而且此技术装置简单, 便于操作, 电解液对环境污染小, 制备的膜层与基体结合力强, 近年来在航空、航天、机械、电子、装饰等领域得到不同程度的应用.

迄今为止, 微弧氧化技术多是直接将待处理工件整体放入兼作阴极的不锈钢槽中进行^[11, 12], 阴极面积相对较大, 工件表面微弧放电同时发生, 此时适合于小尺寸工件表面的均匀膜层制备, 且生产效率较高、易于实现自动化, 但这需根据电源的输出功率来确定所能处理的工件尺寸, 当待处理面积较大时, 所需微弧氧化电流随之增大, 因此现有的商用微弧氧化电源有时很难满足要求 (如超过 3 m^2). 针对如何实现对大面积微弧氧化工件的处理, 很多

学者进行了大量研究, 但无论是大功率电源的开发, 还是电解液、工艺参数的优化, 目前能够处理的最大面积也仅为 $3\text{--}4\text{ m}^2$, 且大功率电源的开发和使用大大增加了该技术的成本; 而电解液、工艺参数的优化不具备普适性, 因微弧氧化技术所制备的膜层性能与所采用的溶液体系、浓度以及工艺参数密切相关, 电解液、工艺参数的优化仅能在特定的溶液体系及工艺条件下实现, 因此将会影响到所制备膜层的功能和质量. 从目前的研究和应用来看, 微弧氧化技术无法实现对大尺寸工件的处理, 已成为限制其工业化推广的瓶颈之一. 为此人们采用屏蔽阳极方式对大面积工件进行处理, 但阳极屏蔽 (尤其当工件形状较为复杂时) 较难实施, 而且屏蔽边界效应难以消除. 为此本文提出了约束阴极微弧氧化的新方法, 对阴极进行屏蔽. 阴极屏蔽较易实现, 且电极移动方便, 边缘过渡缓慢.

约束阴极微弧氧化实质是将大尺寸待处理工件分割处理, 实现其表面局部或由局部至整体的微弧氧化. 从而可以摆脱处理工件尺寸受电源输出功率的限制, 并且由于同时起弧面积较小, 使溶液的温度控制更加容易, 进而降低了对冷却装置的要求. 且该方法简单, 易于实现, 极大的增大了微弧氧

* 国家自然科学基金 (批准号: 50773015), 教育部新世纪优秀人才支持计划 (批注号: NCET-05-0349), 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金 (批注号: 2006RFXXS012) 资助的课题.

通讯联系人. E-mail: xiubotian@163.com

化电源的处理能力,大大降低了大面积微弧氧化处理成本.

本文主要考察了约束阴极与阳极距离对微弧氧化放电特性及能量效率的影响. 目的拟通过约束阴极对电极间电场分布的控制,使微弧反应仅在工件的指定区域发生,实现大尺寸工件表面的局部微弧氧化(可以局部功能化、局部修复). 同时还可以通过约束阴极在大尺寸工件表面的移动,实现大尺寸工件表面由局部到整体的大面积处理.

2. 实验方法

实验材料为工业纯铝,试样尺寸 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,样品经表面除油、清洗、烘干后平放于塑料处理槽内. 采用直径 20 mm 、侧面壁厚 1 mm 塑料套管屏蔽的不锈钢棒为阴极,并将其浸到电解液中,如图 1 所示. 实验在自行研制的 20 kW 双极性脉冲微弧氧化电源上进行,所用溶液为硅酸盐和氢氧化钾复合体系,试验过程中控制溶液温度在 50°C 以下,并通过搅拌使处理液成分均匀. 实验采用恒压模式,具体实验方案为:电压 520 V ,氧化时间 20 min ,频率 500 Hz ,占空比 5% ,电极间距离 h 变化为 $5, 10, 15$ 和 20 mm .

不同电极距离微弧氧化时试样表面的弧斑采用数码相机记录,并利用 ImageJ 软件对弧斑的尺寸和数量进行统计. 通过如图 1 中所示的电位测试电路,对不同电极距离条件下试样表面不同位置的电位进行测量. 测量时以阴极电位为参考点,并使探针与阳极试样表面尽量接近 (0.1 mm). 采用涡流厚度测试仪 (TT240, 北京时代公司) 对成膜区的膜层厚度进行考察,厚度测试从成膜中心沿半径逐步向外进行,测试点间隔为 5 mm . 并以单位面积上形成单位厚度陶瓷膜所消耗的能量为依据,对不同电极距离时微弧氧化的电能利用率进行考察.

3. 实验结果与分析

3.1. 电极距离对微弧氧化工作电流的影响

3.1.1. 相同约束电极面积

首先在相同电极面积条件下 ($S_{\text{阴}} = S_{\text{阳}} = 20\text{ mm}^2$),对电极距离对微弧氧化电流的影响进行了研究,其中工作电压保持 520 V 不变,试验结果如图 2

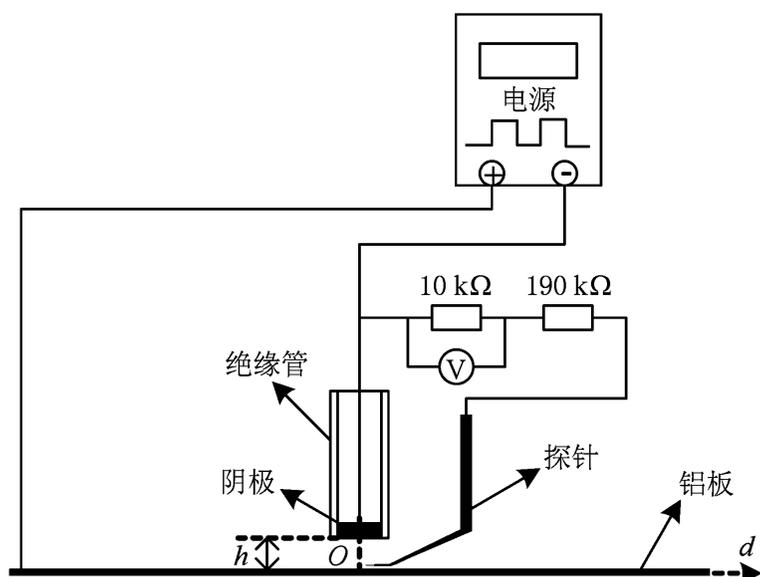


图 1 实验装置原理图

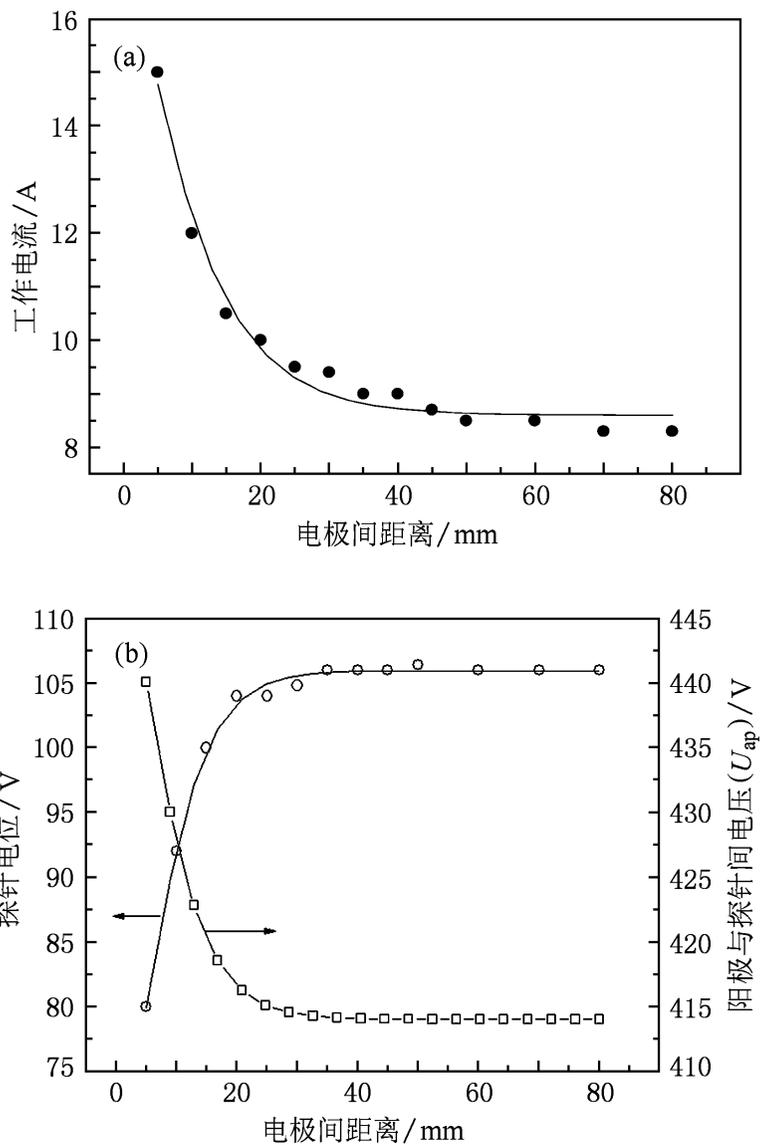


图 2 等电极面积电极距离变化对电流及阳极与探针间电压的影响 (a) 电流随电极距离变化曲线; (b) 探针电位及阳极与探针间电压随电极距离变化曲线

(a) 所示. 可见,随着电极距离的增大,微弧氧化电流迅速降低,当电极间距离增大到一定程度后 ($h > 20\text{ mm}$),氧化电流随电极间距离的增加缓慢减小. 图 2(b) 为电极面积相同时,探针电位 U_p 、阳极与探针间电势差 U_{ap} 随电极距离变化曲线. 很明显 U_{ap} 也随电极距离的增加先快速降低,之后缓慢减小. 可见随电极距离的变化,微弧氧化工作电流具

有与 U_{ap} 相似的变化规律。

因当电极施加电压后, 阳极工件表面将会形成厚度较小但具有一定阻抗的氧化膜. 在不考虑阴阳电极材料本身电阻及电极表面极化影响时, 电极间电阻可简单的等效为膜层电阻 R_f 和溶液电阻 R_s 串联. 因此试样表面电位 U_f 可以表示为

$$U_f = \frac{U_{ac}}{R_s + R_f} \cdot R_s, \quad (1)$$

式中 U_{ac} 为电极间电压, 即工作电压 (520 V), R_s 为电解液电阻, 其与电极距离 h 有关, 即

$$R_s = \frac{h}{S} = k_0 h \quad (2)$$

其中, ρ 为溶液电阻率, S 为导电溶液的截面积. 当溶液体系及电极面积不变时, ρ 和 S 基本保持恒定, 因此两者的比值不变 (设为常数 k_0). (1), (2) 式联立后得出

$$\begin{aligned} U_f &= \frac{U_{ac}}{k_0 h + R_f} \cdot k_0 h \\ &= U_{ac} \left(1 - \frac{R_f}{k_0 h + R_f} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

则施加在阳极试样表面上的电势差为

$$U_{af} = U_a - U_f = \frac{U_{ac} \cdot R_f}{k_0 h + R_f} \quad (4)$$

同时探针电位可表达为

$$U_p = \frac{U_f}{h} (h - h_0). \quad (5)$$

可见, 当探针距阳极试样表面距离 h_0 远远小于电极距离 h 时, U_p 可近似等效于 U_f .

因试验时电极距离变化很快完成, 在整个过程中膜层电阻 R_f 近似保持不变, 而溶液电阻则随着电极距离的增加而增大, 其分压随之逐渐增大, 在电极间电压恒定时, 膜层分压将随之降低. 在微弧氧化过程中, 放电主要是由施加在试样表面的电场强度决定^[13], 即与施加在试样表面两侧的电势差 U_{af} 成正比. 由 (4) 式可知, U_{af} 与电极距离 h 成反比例关系, 因此随电极距离的增加, 工作电流呈现如图 2 (a) 所示的规律. 又因, 当探针距试样表面距离相对于电极间距离较小时, 探针电位可近似等效于试样表面电位. 从而阳极与探针间的电势差 U_{ap} 和施加在试样表面的电压 U_{af} 近似相等, 因此 U_{ap} 随电极距离变化呈现如图 2 (b) 中所示的变化趋势.

3.1.2. 不同电极工作面积

图 3 (a) 给出了阴极直径为 20 mm、阳极尺寸为 200 mm × 200 mm × 0.5 mm 时不同电极距离条

件下, 微弧氧化电流随处理时间变化曲线. 从中可以看出不同电极距离的微弧氧化电流都随工作时间的延长逐渐减小, 这是由微弧氧化成膜特性决定的^[14, 15].

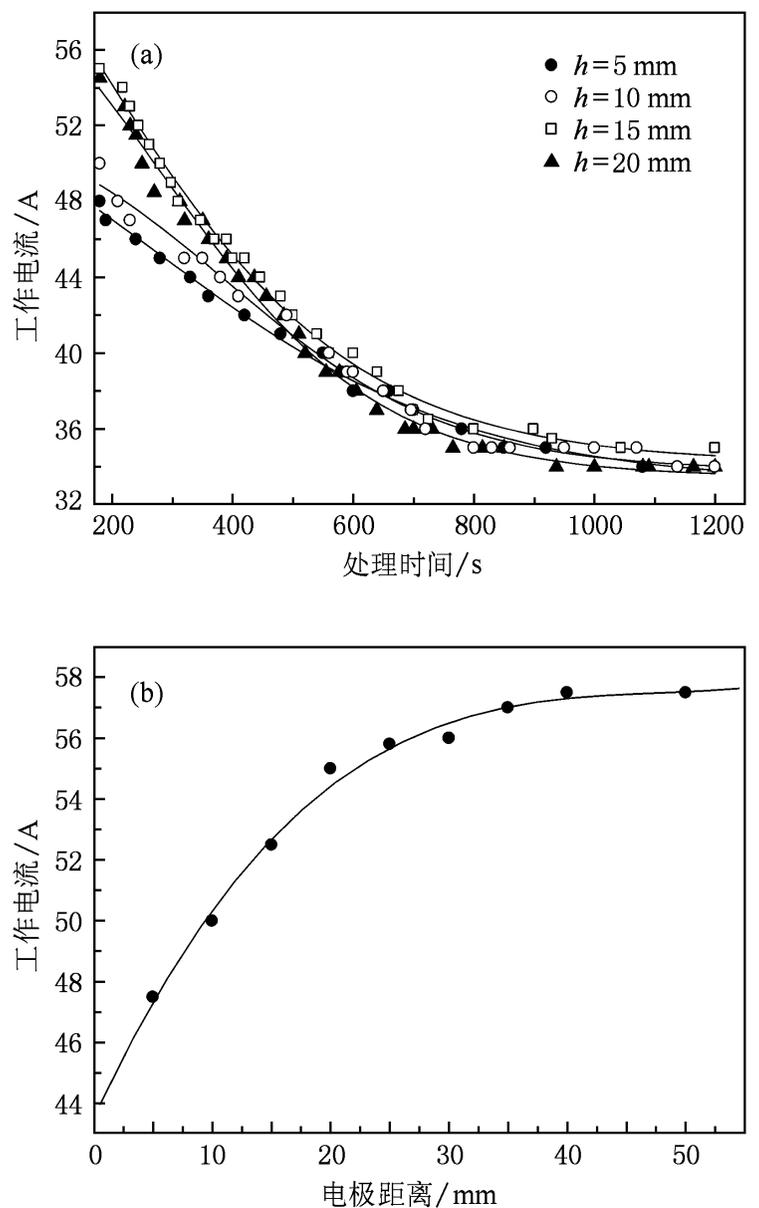


图 3 电极距离对微弧氧化电流的影响 (a) 电流随处理时间变化曲线; (b) 电流随电极高度变化曲线

值得注意的是, 当电极距离变化时, 微弧氧化电流呈现出与前述等电极面积微弧氧化完全不同的变化趋势, 即随电极距离的增加, 氧化电流反而增大, 如图 3 (b) 所示, 这是一个非常有趣的现象. 对于这种情况, 我们认为随着阴极-阳极距离增加, 尽管氧化电流增加, 但阳极中心区电流会下降, 而边缘区电流会升高. 为了洞察其中的物理机理, 本文对电极距离变化时阳极表面不同区域的探针和阳极间电势差及电流进行了系统的测量.

3.2. 电极距离对试样表面不同区域电位及电流的影响

图 4 (a) 为电极间电压恒定 (520 V), 电极距离为 5 mm 时试样表面不同位置处的阳极与探针间电势差 U_{ap} 变化情况, 其求解公式为

$$U_{ap(i)} = U_a - U_{p(i)}, \quad (6)$$

其中 U_a 为阳极电位 (520 V), $U_{p(i)}$ 为试样表面不同位置的探针电位. 从中可以看出, 试样表面的 U_{ap} 呈“山峰”状分布, 即阴极正下方 U_{ap} 值较大, 随着距阴极距离的增大, 试样表面的 U_{ap} 值逐渐减小.

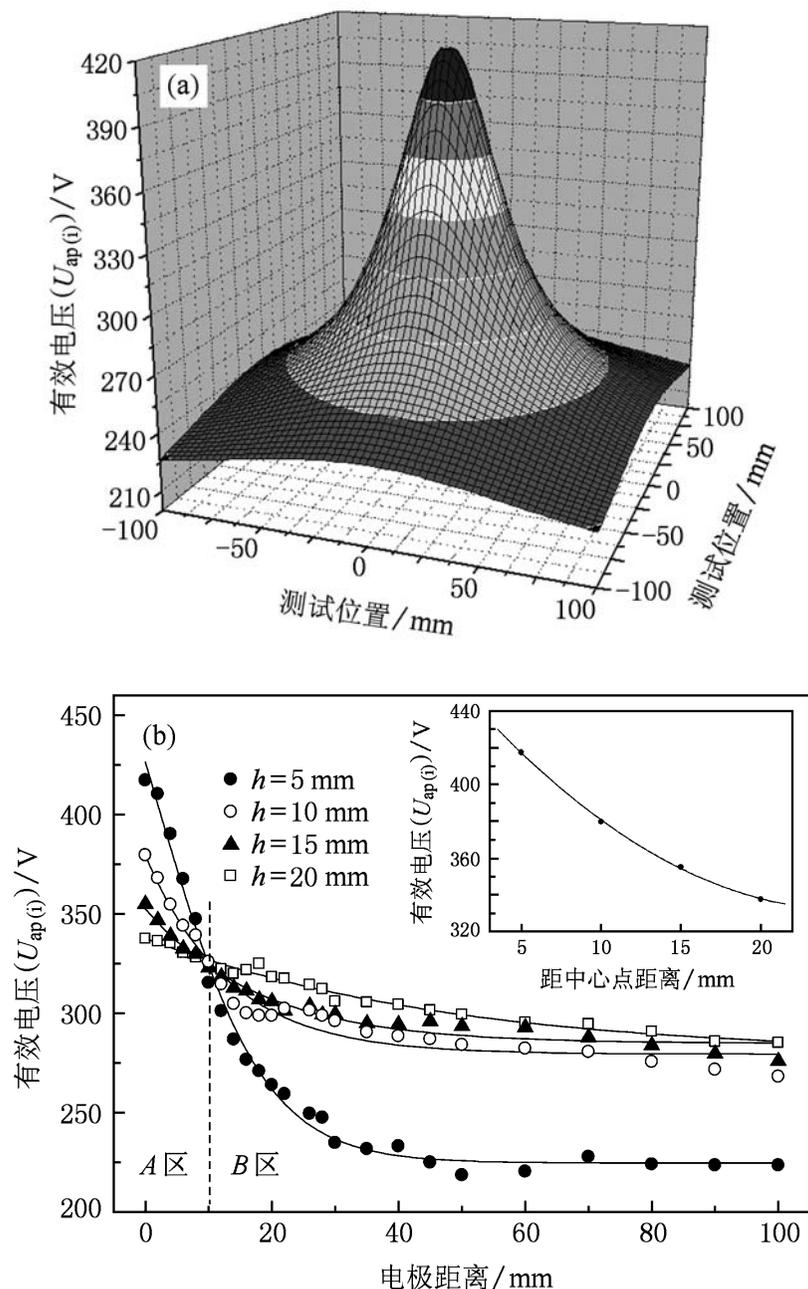


图4 电极距离对阳极和探针间电势差 U_{ap} 的影响 (a) 距离为 5 mm 时 U_{ap} 三维分布图; (b) 不同电极距离 U_{ap} 分布曲线

图 4(b) 为电极距离不同时, U_{ap} 从处理中心到试样边缘的变化曲线. 可见不同电极间距离时, U_{ap} 从处理中心到边缘都呈衰减趋势, 只是当电极间距离较小时, U_{ap} 减小速率较快. 由图 4(b) 还可以看出, U_{ap} 在阳极表面存在两个不同的区域, 即中心区 (A 区) 和边缘区 (B 区). 在中心区 U_{ap} 随电极间距离的增加而降低, 如图 4(b) 中的插图所示, 但在边缘区则随着距离的增加而增加. 这主要是因为, 当电极较近时, 电场集中分布在阴极下方, 随着电极距离的增大, 电场变得发散, 从而导致边缘处电场随之增加. 电极距离变化时, 阳极试样表面不同区域 U_{ap} 不同的变化趋势将会导致各自区域不同的电流-电压效应.

为了考察阳极电位与阳极电流分布的一致性, 本文采用了图 5 插图所示的方法, 将试样 (尺寸同为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$) 分为中心区 (与阴极尺寸相同) 和边缘区, 并将两者以并联方式与电极连接, 工作电压保持在 520 V. 电极距离改变时各自回路中的电流变化如图 5 所示. 可见, 随电极距离的增大, 中心区电流 ($I_{\text{中心}}$)、边缘区电流 ($I_{\text{边缘}}$) 呈现出与 U_{ap} 相同的变化趋势, 即中心电流降低、边缘电流反而增大, 而总体电流 $I_{\text{总体}} = I_{\text{中心}} + I_{\text{边缘}}$ 随电极距离的增大, $I_{\text{总体}}$ 先快速增大, 之后逐渐趋于恒定.

工作时中心区电场强度强, 反应剧烈, 电流密度较高, 但在约束阴极条件下, 阴极尺寸相对阳极试样较小 (不足百分之一), 从而试样表面中心区面积 $S_{\text{中}}$ 远小于边缘区面积 $S_{\text{边}}$, 此时即使试样表面远离阴极的边缘区电流密度较小, 但由于其面积相对较大, 从而在总体电流中起主导作用. 随电极距离的增加, 边缘区电场强度增大, 致使此部分电流增加, 此时虽中心区电流有所降低, 但由于边缘区电流的主导作用, 综合效果表现为随阴阳极间距离的增加, 总体工作电流增大. 但可想而知, 当电极距离增大到一定程度后, 由于电极间溶液分压的增大, 致使作用于试样表面的电压降低, 从而将会使工作电流随之减小.

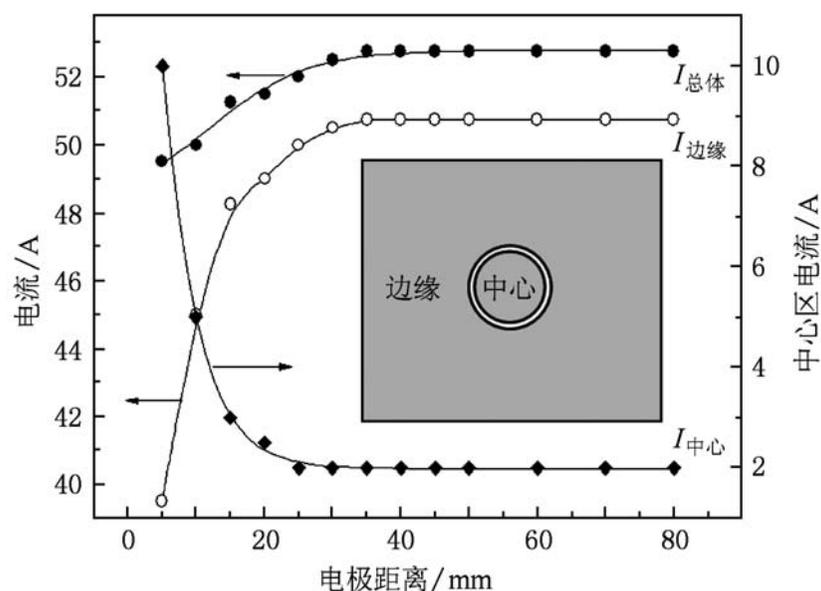


图5 电极距离对总体工作电流及试样表面不同区域电流的影响

3.3. 电极距离对起弧电压的影响

图 6 示出了不同电极距离时起弧电压及起弧时所对应的探针电位变化曲线. 可见, 随电极距离增加, 起弧电压升高 (从距离为 5 mm 时的 390 V 增大到距离为 20 mm 时的 520 V)、探针电位随之增大,

同时值得注意的是起弧电压与探针电位间的差值 U_{ap} 几乎不变 (320—330 V 之间), 这即说明微弧氧化起弧电压是由材料表面氧化膜自身特性决定的. 在微弧氧化起弧之前, 铝基体表面已覆盖一层致密的氧化膜^[16], 只有当施加在试样表面的电场强度超过此氧化膜的临界击穿值时, 微弧放电才能发生^[17, 18]. 该实验结果也表明阴阳极间电压随电极间距增加主要消耗在溶液中, 这对于能量利用是不利的, 此时不仅将会导致电源输入功率增加, 同时也将增大溶液冷却的功率消耗.

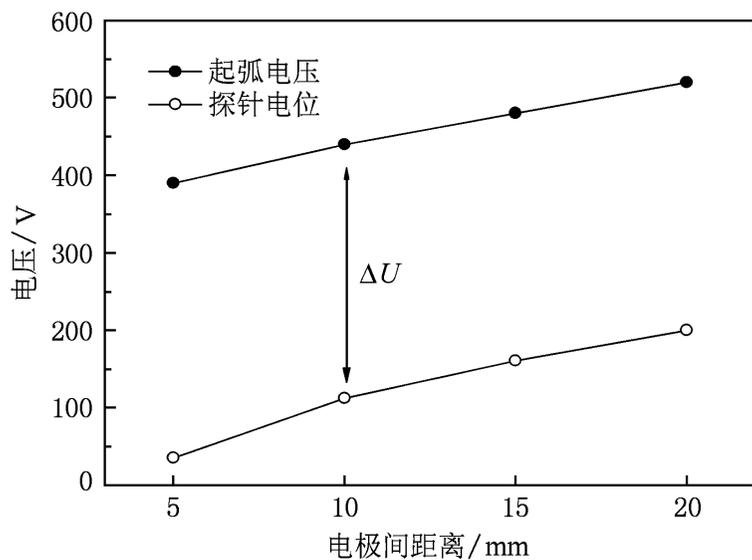


图6 电极距离对击穿电压的影响

3.4. 电极距离对微弧氧化膜层厚度的影响

图7为不同电极距离时, 处理试样从成膜中心沿半径向外的膜层厚度变化曲线. 可见不同电极距离条件下所形成的陶瓷膜厚度都随距处理中心距离的增大而逐渐变薄. 处理中心处微弧氧化陶瓷膜厚度随着电极距离的增大明显减小, 而远离中心处 (大于 15 mm) 的膜层厚度却趋于相同.

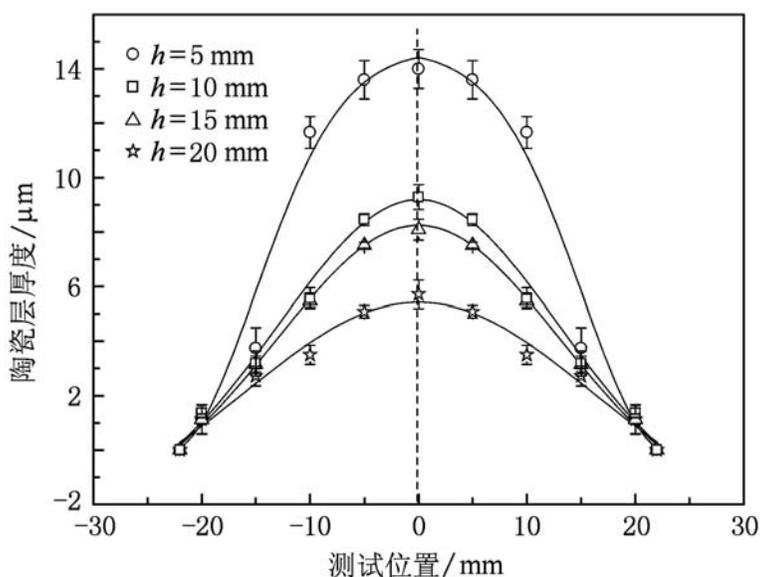


图7 电极距离不同时试样表面陶瓷膜厚度

试样表面放电弧斑数目及尺寸变化与电极间距对膜层厚度的影响是一致的, 如图8所示, 该数据是在电极间距离分别为 5, 20 mm、工作 1200 s 条件下获得的. 可见, 当电极距离较小时, 弧斑数目较少, 但尺寸较大. 当电极距离为 20 mm 时, 弧斑数目增多, 且尺寸细小. 这是因为, 电极距离较近时, 电场集中分布在阴极附近, 且强度较大, 微弧反应剧烈. 此时有利于膜层的快速生长, 一定处理时间后, 陶瓷膜变得难以击穿, 放电仅是集中在膜层的薄弱处发生, 从而致使弧斑数目减少, 但放电剧烈、火花较大. 当电极距离增加时, 电场发散, 放电区域变大, 弧斑数目增多, 但因试样表面的场强变弱, 相同处理时间所形成的膜层较薄, 容易击穿, 因此弧斑细小、数目多.

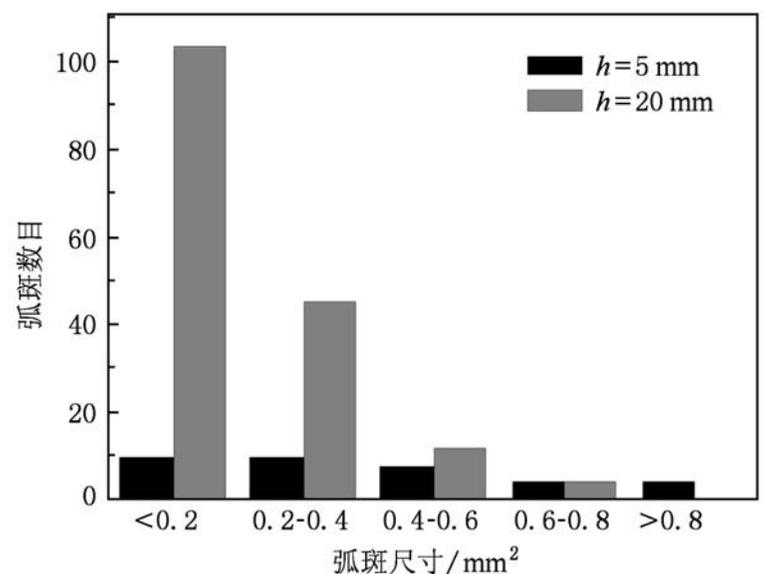


图8 弧斑数目及尺寸分布

3.5. 电极距离对能量效率的影响

图9(a)给出了不同电极距离下, 所生成陶瓷膜的体积变化曲线 (其值根据图7求得). 可知, 随电极距离的增加, 成膜区陶瓷膜体积明显减小. 这是由于随着电极间距的增大, 邻近阴极的试样表面场强减弱, 此时尽管总的工作电流较大, 但有效工作电流却相应减小, 导致成膜速率降低.

不同电极距离氧化过程中所消耗的电能为图9(b)所示, 其求解公式为

$$J = \eta \cdot U \cdot \int_0^T I(t) dt \quad (7)$$

其中 η 为占空比 (5%), $I(t)$ 为微弧氧化电流随时间变化函数 (可以从图3(a)中得出), T 为工作时间 (1200 s), U 为工作电压 (520 V). 可见不同电极距离时微弧氧化的电消耗大体相同. 结合图3(a)可以看出, 不同电极距离时, 整个微弧氧化过程中

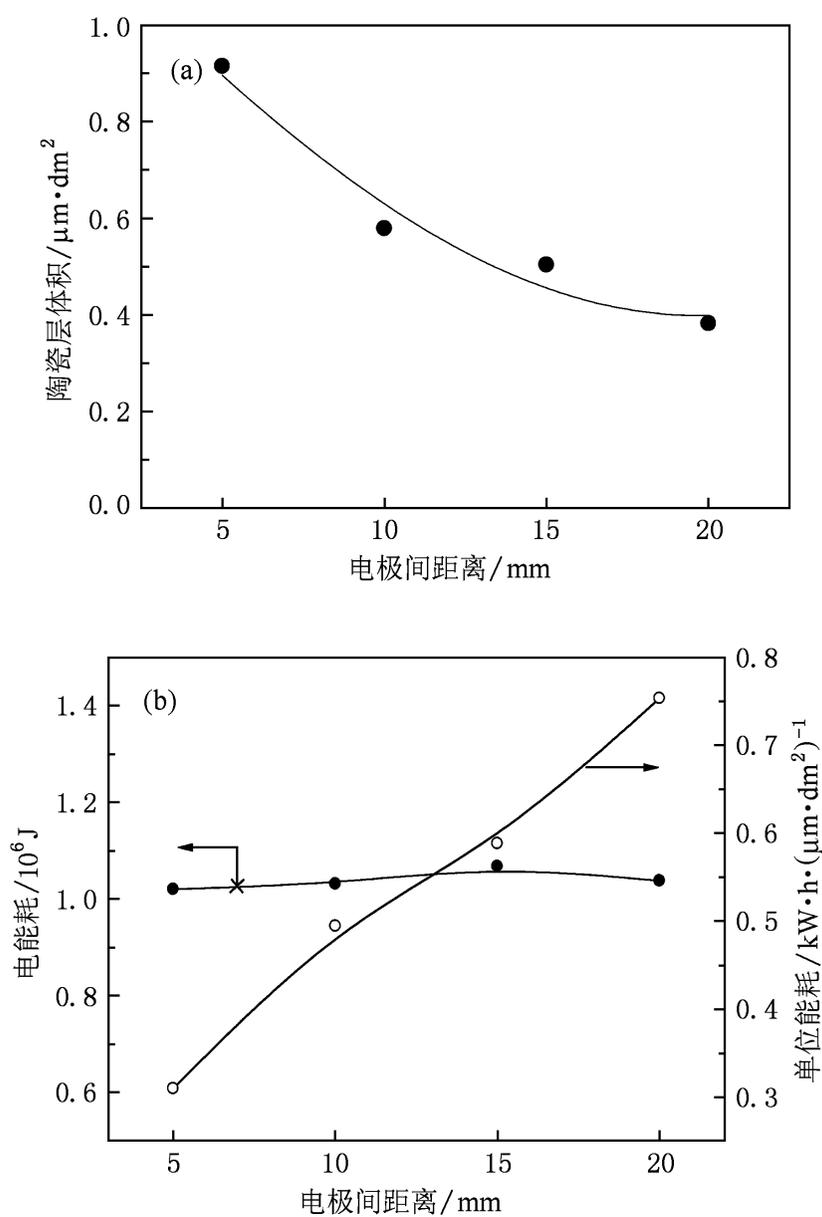


图9 电极距离对电能耗的影响 (a) 不同电极距离时所成陶瓷膜体积; (b) 不同电极距离时总体能量损耗及单位能耗

的电流总和相差不大,从而反映为整个处理过程中所消耗的电能耗基本相同.图9(b)同时给出了不同电极距离微弧氧化时单位能耗变化曲线.单位能耗定义为,单位面积上生成单位厚度的微弧氧化膜所需的能量,具体表达为

$$M = 2.78 \times 10^{-7} \cdot \frac{J}{V} \quad (8)$$

其中 M 为单位能耗 ($\text{kW} \cdot \text{h} / \mu\text{m} \cdot \text{dm}^2$), J 为电能耗 (焦耳), V 为成膜区的陶瓷膜体积 ($\mu\text{m} \cdot \text{dm}^2$).

由图9(b)可见,随着电极距离的减小,单位面积上形成单位厚度膜层所需的能量大幅降低(电极距离为5 mm时的能量损耗几乎是距离为20 mm的1/3).根据前面的分析可知,不同电极距离条件下微弧氧化工作时所消耗的能量基本相同,当电极距离较小时,所形成的陶瓷膜体积较大.可见电极距离的减小,有利于能量利用率的提高.

由膜层厚度分析可知,在约束阴极条件下,微弧氧化陶瓷膜主要在阴极附近生成.当电极距离较小时,阴极附近电场强度较大,且分布集中.随着电极间距离的增大,电场变得发散,试样表面处理中心处场强降低,这样将使邻近阴极区域的有效工作电流减小.Kalkanci等人^[19]研究表明,当电流密度较小时陶瓷膜生长较慢,所以当电极距离增大时,有效电流密度降低,因而电能利用率随之降低.

4. 结 论

本文对约束阴极微弧氧化的放电特性进行了研究,以为大面积微弧氧化提供依据.研究发现此条件下电极间距离对试样表面的电场分布具有很大的影响,进而影响到微弧氧化的放电特性,以及微弧氧化成膜的能量效率.通过研究可以得到下述结论.

1. 约束阴极微弧氧化时,增大电极间距离,电极间电场集中效应减弱,处理中心处试样表面电场强度降低的同时,远离阴极的阳极试样表面的电场强度增加,从而致使总体氧化电流的增大.
2. 减小电极间距离,有利于电极间电场强度的增大,进而可以降低工作电压、减少能耗.
3. 微弧氧化成膜区的膜层厚度随着两极间距离的减小而增加,能量效率随之提高.

[1] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A, Matthews A, Dowey S J 1999 *Surf. Coat. Technol.* **122** 73

[2] Chen F, Zhou H, Yao B, Qin Z, Zhang Q F 2007 *Surf. Coat. Technol.* **201** 4905

[3] Barik R C, Wharton J A, Wood R J K, Stokes K R, Jones R L 2005 *Surf. Coat. Technol.* **199** 158

[4] Jiang B L, Zhang X F 2005 *Rare Metal Materials and Engineering* **34** 393 (in Chinese) [蒋百灵、张先锋 2005 稀有金属材料与工程 **34** 393]

[5] Yerokhin A L, Shatrov A, Samsonov V, Shashkov P, Pilkington A, Leyland A, Matthews A 2005 *Surf. Coat. Technol.* **199** 150

[6] Wang Y, Wang M L, Zhou F, Ding H Y, Dai Z D 2007 *Chin. J. Nonferr. Met.* **17** 1266 (in Chinese) [王远、王美玲、周飞、丁红燕、戴振东 2007 中国有色金属学报 **17** 1266]

[7] Ryu H S, Song W H, Hong S H 2005 *Curr. Appl. Phys.* **5** 512

[8] Curran J A, Clyne T W 2005 *Surf. Coat. Technol.* **199** 177

[9] Han Y, Yan Y Y, Lu C G, Zhang Y M, Xu K W 2009 *J. Biomed. Mater. Res.* **88A** 117

- [10] Li Y, Lee I S, Cui F Z, Choi S H 2008 *Biomaterials* **29** 2025
- [11] Wu H H, Wang J B, Long B Y, Lü X Y, Long B H, Jin Z S, Bai Y Z, Bi D M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5743 (in Chinese) [吴汉华、汪剑波、龙北玉、吕宪义、龙北红、金曾孙、白亦真、毕冬梅 2005 物理学报 **54** 5743]
- [12] Xue W B, Wang C, Li Y L, Deng Z W, Chen R Y, Zhang T H 2002 *Mater. Lett.* **56** 737
- [13] Gu W C, Lü G H, Chen H, Chen G L, Feng W R, Zhang G L, Yang S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2337 (in Chinese) [顾伟超、吕国华、陈 皖、陈光量、冯文然、张谷令、杨思泽 2007 物理学报 **56** 2337]
- [14] Zozulin A J, Bartak D E 1994 *Met. Finish.* **92** 39
- [15] Wang Y M, Jiang B L, Lei T Q 2004 *Mater. Lett.* **58** 1907
- [16] Butyagin P I, Khokhryakov Y V, Mamaev A I 2003 *Mater. Lett.* **57** 1748
- [17] Yerokhin A L, Snizhko L O, Gurevina N L, Leyland A, Pilkington A, Matthews A 2003 *J. phys. D: Appl. Phys.* **36** 2110
- [18] Wang L S, Pan C X, Cai Q Z, Wei B K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5341 (in Chinese) [王立世、潘春旭、蔡启舟、魏伯康 2007 物理学报 **56** 5341]
- [19] Kalkanci H, Kurnaz S C 2008 *Surf. Coat. Technol.* **203** 15

Discharge characteristics of confined cathode micro-arc oxidation*

Zhang Xin-Meng Tian Xiu-Bo Gong Chun-Zhi Yang Shi-Qin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 31 May 2009; revised manuscript received 21 September 2009)

Abstract

Confined cathode micro-arc oxidation (CCMAO) has been investigated in Na_2SiO_3 -KOH solution with industrial pure aluminum as substrate materials. The effects of the electrode distance (ED) on working current, potential distribution, arcing voltage and so on have been focused on. The energy efficiency as a function of ED has also been evaluated. The results show the working current decreases with increasing ED for the same exposure area of confined cathode and anode. However, the working current increases with increasing ED with only the cathode confined. It is attributed to different electrical field on the anode surface. With increasing ED, the electrical field beneath the confined cathode decreases while that far from the cathode increases. This leads to a different total working current. The arcing voltage increases with increasing ED while the effective voltage on anode surface nearly keeps constant. The thickness of the ceramic coating produced at a small ED is much higher than that at a larger ED. The energy consumption per unit volume of oxides by CCMAO indicates that smaller ED leads to higher energy efficiency.

Keywords: micro-arc oxidation, confined cathode, discharge characteristics, electrode distance

PACC: 5275R, 5280W, 9420S

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50773015) , Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-05-0349) , the Technological Innovation Talents Foundation of Harbin City, China (Grant No. 2006RFXXS012) .

Corresponding author. E-mail: Xiubotian@163.com