

锆溶胶对铝合金微弧氧化过程的影响

王晓芳, 李卫平, 刘慧丛, 朱立群

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 在原位锆溶胶和外加锆溶胶的磷酸盐电解液体系中, 采用恒流模式对铝合金进行微弧氧化, 通过分析氧化过程中电压和电解液参数的变化、氧化膜生长规律以及膜层表面形貌结构, 研究锆溶胶对铝合金微弧氧化成膜过程的影响。结果表明, 原位锆溶胶电解液氧化过程中 pH 值降低及电导率增加幅度较小, 起弧电压、电解液温度较低, 膜层生长速率较快, 其厚度增长速率约为 $2.9 \mu\text{m}/\text{min}$ 。原位锆溶胶电解液制备的膜层表面呈多孔网状结构, 内外膜层结合紧密, 膜层较厚, 可达 $85 \mu\text{m}$; 外加锆溶胶电解液生成膜层表面有火山状沉积物, 膜层疏松; 微弧氧化膜主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $t\text{-ZrO}_2$ 相组成。

关键词: 铝合金; 锆溶胶; 微弧氧化

中图分类号: TG174.45

文献标志码: A

Influence of zirconia sol on microarc oxidation process of aluminum alloys

WANG Xiao-fang, LI Wei-ping, LIU Hui-cong, ZHU Li-qun

(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance, Ministry of Education,
School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aluminum alloy was processed by microarc oxidation method with a control mode of constant current density in phosphate electrolyte with in-situ and additional zirconia sol. The effects of zirconia sol on the microarc oxidation process were investigated. The variations of voltage and electrolyte parameters, the growth process and surface microstructure of coatings were analyzed. The results indicate that in the electrolyte with in-situ zirconia sol, pH values reduce less, conductivity increases less, arcing voltage and electrolyte temperature are lower, and the growth rate of coating is higher, which is about $2.9 \mu\text{m}/\text{min}$. The ceramic layer obtained in electrolyte with in-situ zirconia sol is porous, the internal and external layers combine closely, the coating is thicker and the thickness is up to $85 \mu\text{m}$. The ceramic layer prepared in the electrolyte with additional sol includes more volcano-like deposits and is loose. The ceramic layer is mainly composed of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $t\text{-ZrO}_2$ phases.

Key words: aluminum alloy; zirconia sol; microarc oxidation

铝合金具有比强度高、密度低、易成型、易加工等优良的物理性能, 在航空、航天、汽车、通讯、电子工业等领域应用广泛; 但其化学性质活泼, 容易腐蚀、氧化和磨损, 极大地限制了其应用^[1-2]。因此, 对铝合金进行表面防护非常重要。微弧氧化技术因工艺简单、生成物具有陶瓷属性, 在铝、镁、钛等金属的

表面改性领域具有较大的发展潜力^[4-7]; 而微弧氧化处理铝合金能形成具有高硬度、耐磨、耐腐蚀等优异物理化学性能的膜层, 扩大了铝合金的应用范围^[4, 8-9]。

微弧氧化是一种在普通阳极氧化的基础上发展起来的氧化方法, 在高压弧光放电的条件下, 金属表面生成一层包含基体氧化物和溶液组分、与基体冶金结

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51101010); 2011-航空基金资助项目

收稿日期: 2012-04-09; **修订日期:** 2012-07-17

通信作者: 朱立群, 教授; 电话: 010-82317113; E-mail: zhulq@buaa.edu.cn

合的膜层。影响成膜过程和膜层质量的主要因素包括电解液体系及配方、电参数、氧化时间、电源设备等。而电解液是重要影响因素之一, 目前常用微弧氧化电解液主要由磷酸盐、硅酸盐、氢氧化物、铝酸盐等主盐和各种添加剂组成, 添加剂能够提供参与成膜的物质, 改变电解液中离子的传输方式和成膜过程, 实现膜层的改变^[10-13]。

目前, 国内外研究者对微弧氧化电解液添加剂进行了较多研究, 包括 Na_2WO_4 等无机盐添加剂^[14]、乙二醇等有机物添加剂^[15]、 m-ZrO_2 和纳米 SiO_2 等固体颗粒^[16-17]、硅和铝等溶胶粒子, 其中, 溶胶粒子对微弧氧化影响的相关研究近年来受到广泛关注, 文献^[18-20]的作者将硅、铝、钛溶胶添加到镁合金和钛合金微弧氧化电解液中, 改善了膜层性能, 改变了膜层形貌和相结构等。TANG 等^[1, 21]将钛和锆溶胶添加到铝合金微弧氧化电解液中, 分别生成了黑色钛化合物氧化膜和具有良好力学、隔热、电绝缘、耐腐蚀、耐热冲击等性能的氧化锆膜层; 在电解液中添加钛酸盐和锆酸盐, 分别原位生成钛溶胶和锆溶胶, 制备出性能优异的微弧氧化膜层。现有研究工作主要集中在溶胶粒子对膜层性能的影响。研究表明, 溶胶粒子可以有效改善铝合金微弧氧化膜层的性能, 而探讨溶胶粒子在成膜过程中的作用能为后续研究提供理论依据。

本文作者采用磷酸盐为主盐的电解液体系, 分别以锆酸盐和锆溶胶为添加剂, 研究铝合金在位生成和外加锆溶胶两种磷酸盐电解液体系中微弧氧化过程各参数的变化、膜层的生长特点以及膜层形貌和相结构。

1 实验

试样为 2A70 铝合金材料, 尺寸为 $20\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。微弧氧化电源为 MAO-II, 采用恒流模式, 电流密度为 10 A/dm^2 , 频率为 200 Hz , 占空比为 15%, 氧化时间为 30 min , 不锈钢片作为阴极。

微弧氧化电解液采用磷酸盐基础体系, 因添加剂的不同分为两种: 1) 加入锆酸盐, 原位生成锆溶胶的电解液(原位锆溶胶), 在室温条件下, 将一定量的锆酸盐溶于去离子水, 搅拌溶解后加入磷酸盐; 2) 加入预先制备锆溶胶的电解液(外加锆溶胶), 将磷酸盐溶于去离子水, 完全溶解后再加入锆溶胶, 锆溶胶的制备过程是将正丙醇锆加入无水乙醇中, 在一定温度下搅拌 30 min , 再加入三乙醇胺和去离子水的混合物,

搅拌 6 h 停止加热, 继续搅拌自然冷却至室温。两种电解液中磷酸盐、锆元素的含量对应相等, 氢氧化钠调节 pH 值相等。

采用 DDS-11A 型电导率仪和 pH 计分别控制微弧氧化过程中电解液的电导率和 pH 值的变化; 采用德国 FISCHER 公司生产的 E110B 涡流测厚仪测试膜层的厚度; 采用日立 S-530 型扫描电镜观察膜层的表面和断面形貌; 采用 X 射线衍射仪(D/max 2200PC)测试膜层相结构, $\text{Cu K}\alpha$, 管电压 30 kV , 管电流 20 mA , 连续扫描, 扫描速度为 $6\text{ (}^\circ\text{)/min}$ 。

2 结果与讨论

试验所用两种电解液中, 一种是原位生成的锆溶胶, 另一种是加入预先制备的锆溶胶, 电解液中溶胶的存在主要是通过丁达尔现象^[22-23]证明。

电解液中原位锆溶胶的生成过程如下:



在外加电场的作用下, 电解液中荷负电的锆溶胶粒子 Zr(OH)_4 迁移吸附在阳极表面。火花放电形成放电通道后, 溶胶粒子进入放电通道内, 在高温作用下发生如下反应:



两种电解液中锆元素的总含量相等, 而氧化过程中原位锆溶胶电解液中存在式(1)~(5)的平衡反应, 在反应过程中逐渐生成 Zr(OH)_4 , 因此, 与外加锆溶胶的电解液相比, 原位锆溶胶电解液中锆溶胶的浓度较低, 单位时间填充到放电微孔的溶胶粒子较少, 浓度变化较小, 锆溶胶以较均匀的速度填充到放电微孔中, 生成 ZrO_2 。在外加锆溶胶的电解液中, 大量 Zr(OH)_4 溶胶粒子吸附在阳极表面, 在较短的时间内填充到放电微孔中。

图 1 所示为原位锆溶胶和外加锆溶胶电解液氧化过程中 pH 值随时间的变化。由图 1 可知, 氧化过程中电解液的 pH 值降低, 降低 $0.2 \sim 0.3$, 这是由于氧化过程中的一些反应会消耗电解液中的 OH^- 。原位锆溶

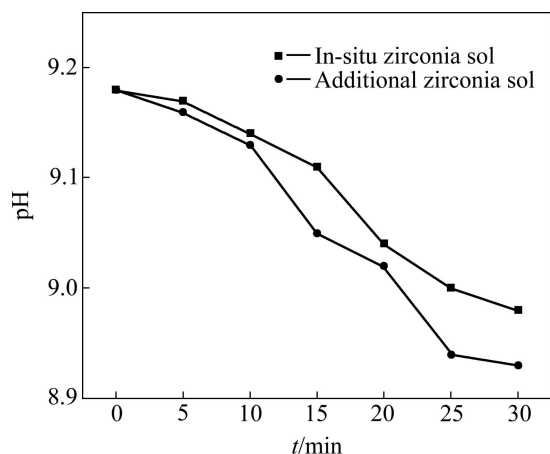


图 1 微弧氧化过程中电解液 pH 值随时间的变化

Fig. 1 Variation of pH values of electrolyte with oxidation time during MAO process

胶电解液的 pH 值变化较小, 主要是原位锆溶胶电解液中锆溶胶生成过程的平衡反应可以调节电解液的 pH 值。

图 2 所示为原位锆溶胶和外加锆溶胶电解液微弧氧化过程中电导率随时间的变化。由图 2 可知, 原位锆溶胶电解液的电导率较外加锆溶胶的电导率大; 氧化过程中两种电解液的电导率均增加, 原位锆溶胶电解液的电导率增加值较小。

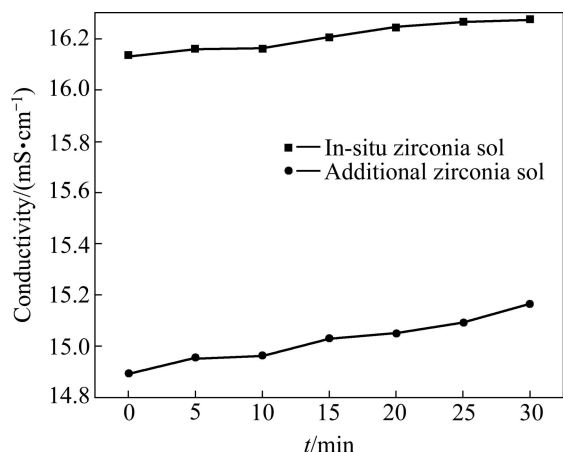


图 2 微弧氧化过程中电解液电导率随时间的变化

Fig. 2 Variation of conductivity of electrolyte with oxidation time during MAO process

图 3 所示为原位锆溶胶和外加锆溶胶电解液中铝合金氧化电压随时间的变化。由图 3 可知, 与外加锆溶胶的电解液相比, 铝合金在原位锆溶胶的电解液中微弧氧化的起弧时间缩短、起弧电压降低, 起弧时间由 18 s 缩短为 15 s, 起弧电压由 214 V 降低到 163 V。

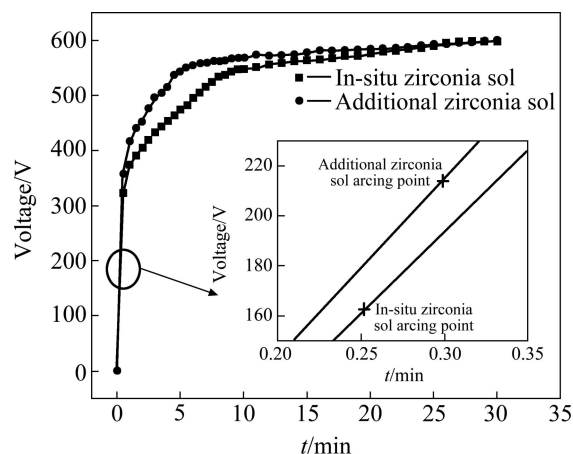


图 3 微弧氧化过程中电压随时间的变化

Fig. 3 Variation of voltage with oxidation time during MAO process

可知, 铝合金在原位锆溶胶的电解液中微弧氧化更容易起弧。在氧化时间 2~15 min 阶段, 原位锆溶胶的电解液中氧化电压明显低于外加锆溶胶的电解液中氧化电压。阳极表面吸附层和电解液电导率是影响氧化电压的重要因素, 原位锆溶胶的电解液中锆溶胶浓度较低, 阳极表面的吸附层较薄, 电压更低; 由图 2 可知, 原位锆溶胶电解液的电导率较大, 也会导致其电压较低。

图 4 所示为氧化过程中两种电解液温度随时间的变化关系。由图 4 可知, 两种电解液氧化过程中的温度变化规律基本相同, 0~20 min 内温度以较快的速率线性增长, 20~30 min 内温度基本保持不变。0~15 min 原位生成锆溶胶电解液较外加锆溶胶电解液温度更低, 主要是由于原位锆溶胶电解液中存在溶胶粒子生

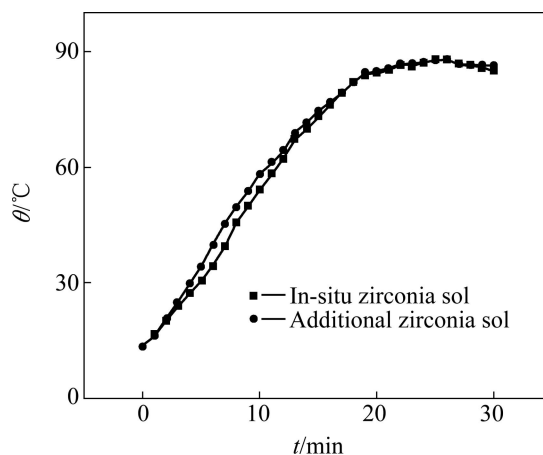


图 4 微弧氧化过程中电解液温度随时间的变化

Fig. 4 Variation of electrolyte temperature with oxidation time during MAO process

成的平衡反应, 使其氧化初期反应较为平缓, 放热较少, 温度的实验结果与图 3 电压变化规律一致。

图 5 和 6 所示分别为铝合金在两种电解液中微弧氧化膜层厚度和质量随氧化时间的变化。由图 5 和图 6 可知, 膜层厚度和质量随氧化时间的延长呈增长趋势, 0~5 min 膜层生长较快, 且两种电解液中膜层生长速率接近; 5~30 min 膜层厚度和质量增长速率降低, 随时间的延长近似线性增加, 而原位锆溶胶电解液膜层的生长速率较快。0~30 min 氧化过程中, 原位锆溶胶电解液膜层厚度平均增长速率为 $2.9 \mu\text{m}/\text{min}$, 质量平均增长速率为 $4.0 \text{ mg}/\text{min}$; 外加锆溶胶电解液膜层平均厚度增长速率为 $1.9 \mu\text{m}/\text{min}$, 平均质量增长速率为 $1.9 \text{ mg}/\text{min}$ 。

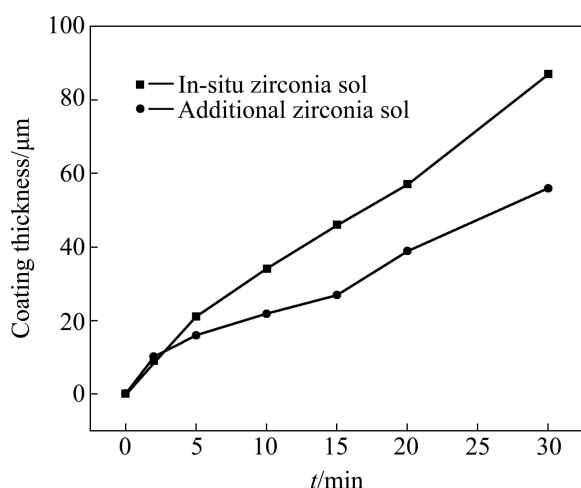


图 5 微弧氧化膜层厚度随氧化时间的变化

Fig. 5 Variation of coating thickness with oxidation time during MAO process

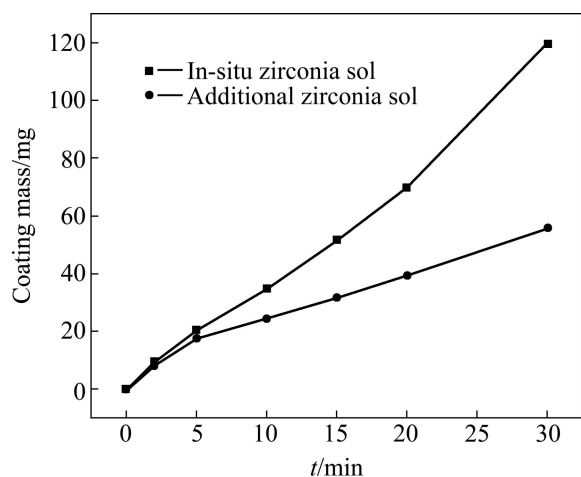


图 6 微弧氧化膜层质量随氧化时间的变化

Fig. 6 Variation of coating mass with oxidation time during MAO process

氧化最初阶段, 膜层厚度和质量的增加主要来源于 Al_2O_3 的生成, 原位锆溶胶和外加锆溶胶的电解液中膜层的生长速率相同。随着氧化时间的延长, 铝合金表面生成了多孔的微弧氧化膜层, 吸附在阳极表面的 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 填充到放电微孔中参与成膜。而原位锆溶胶电解液中的 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 随氧化过程中的反应消耗而重新生成, 锆溶胶浓度较低, 放电孔洞不能被完全填充, 有利于放电反应的持续进行; 锆溶胶浓度变化较小, 锆溶胶以较均匀的速度填充到放电微孔中生成 ZrO_2 , 生成的膜层均匀、与基材结合较好, 膜层较难脱落。在外加锆溶胶的电解液中, 锆溶胶浓度较高, 较多放电通道被填充, 抑制了后续放电反应; 大量吸附于阳极表面的 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 溶胶粒子在较短的时间内集中填充到放电微孔中, 堆积在放电孔洞中生成的膜层较疏松, 在等离子体作用下更容易脱落。因此, 在 5~30 min 的氧化过程中, 原位锆溶胶电解液的膜层生长速率明显较快。

图 7 所示为原位生成和外加锆溶胶电解液中铝合金微弧氧化 30 min 形成膜层的表面和断面形貌。由图 7(a)和(b)可知, 原位锆溶胶电解液制备的膜层表面呈网状沟带结构, 无规律地分布着较多孔径为 $2\sim 20 \mu\text{m}$ 的喷射状孔洞; 外加锆溶胶电解液生成的膜层表面有较多凸出的火山状沉积物, 孔洞较少, 孔径为 $2\sim 3 \mu\text{m}$ 。这些孔洞是微弧氧化过程中进行一系列复杂反应的放电通道, 而原位锆溶胶电解液制备的膜层表面分布着较多的孔洞, 孔径较大, 增加了反应通道, 有利于溶胶粒子的填充。这进一步验证了原位锆溶胶电解液膜层生长速率较快的结论。由图 7(c)和(d)可知, 原位锆溶胶电解液生成膜层较厚, 平均厚度约为 $85 \mu\text{m}$, 内、外膜层之间的结合更紧密; 外加锆溶胶电解液生成膜层较薄, 厚度为 $53 \mu\text{m}$ 左右, 内、外膜层界面处存在较多的孔洞, 结合较差。这与图 5 所示结果一致。

图 8 所示为原位生成和外加锆溶胶电解液中铝合金微弧氧化 30 min 制备膜层的 XRD 谱。两种电解液生成膜层的组成基本相同, 均主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $t\text{-ZrO}_2$ 组成。对于由原位锆溶胶电解液生成的膜层, 其 $t\text{-ZrO}_2$ 相衍射峰强度明显比 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相衍射峰强度更高, 膜层表面 $t\text{-ZrO}_2$ 相含量较高; 对于由外加锆溶胶的电解液制备的膜层, $t\text{-ZrO}_2$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相衍射峰强度接近, 膜层表面两相的含量比较接近。由此可知, 原位锆溶胶电解液中更多的溶胶粒子参与了成膜过程, 生成了 $t\text{-ZrO}_2$ 相。这进一步验证了两种电解液中膜层生长规律的结果。

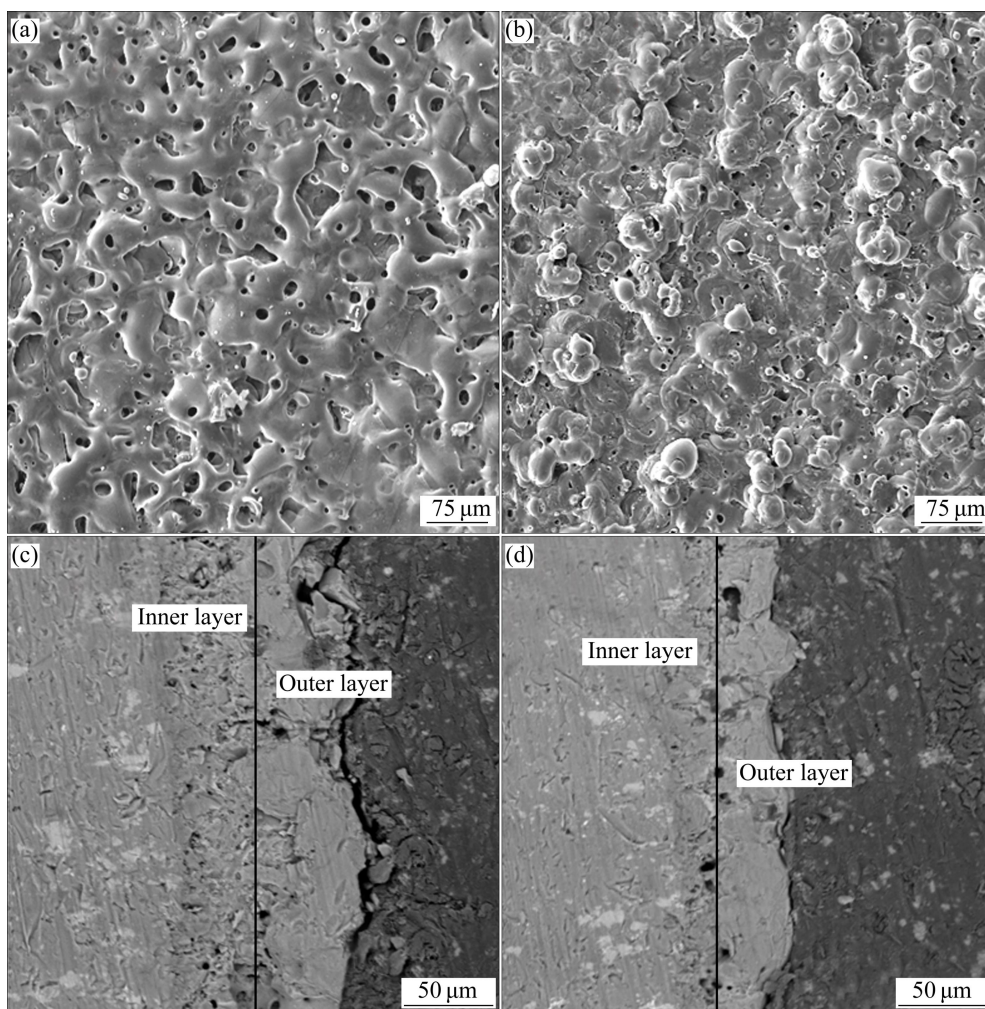


图 7 在不同电解液中氧化 30 min 所得膜层的表面和断面形貌

Fig. 7 Surface (a), (b) and section (c), (d) morphologies of MAO coating oxidized for 30 min in different electrolytes: (a), (c) In-situ zirconia sol; (b), (d) Additional zirconia sol

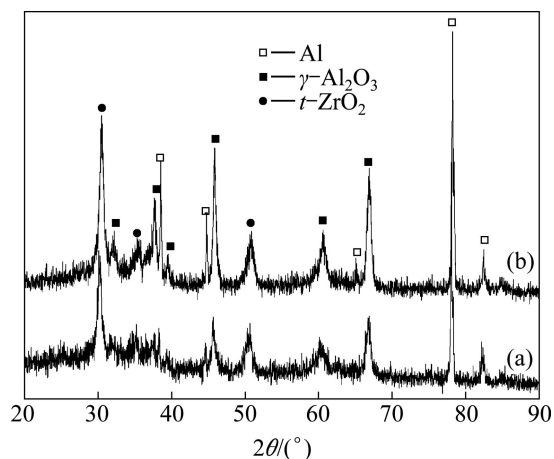


图 8 在不同电解液中氧化 30 min 所得膜层的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of coatings oxidized for 30 min in different electrolytes: (a) In-situ zirconia sol; (b) Additional zirconia sol

3 结论

1) 在铝合金微弧氧化过程中电解液的 pH 值降低, 电导率增加, 氧化电压升高, 电解液温度升高。含原位锆溶胶的电解液 pH 值和电导率的变化较小, 起弧电压较低, 约为 163 V, 电解液温度较低。

2) 微弧氧化膜层厚度和质量随氧化时间的延长呈增长趋势, 氧化初期 0~5 min 内增长速率较快。原位锆溶胶电解液中膜层的生长速率较快, 其厚度增长速率可达 2.9 μm/min。

3) 原位锆溶胶电解液所得膜层表面呈网状沟带结构, 放电孔洞数量较多, 内、外膜层之间结合紧密, 氧化膜较厚, 约为 85 μm; 外加锆溶胶的电解液生成

膜层表面有凸出的火山状沉积物,膜层疏松,内、外两层界面处孔洞较多,膜层较薄,约为 53 μm 。微弧氧化膜层表面主要包含 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $t\text{-ZrO}_2$ 两种相。

REFERENCES

- [1] TANG Ming-qi, LI Wei-ping, LIU Hui-cong, ZHU Li-qun. Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(17/18): 4135–4140.
- [2] 蒋百灵, 白力静, 蒋永锋. LY12 铝合金表面氧化铝陶瓷层的生长过程[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(S2): 186–189.
JIANG Bai-ling, BAI Li-jing, JIANG Yong-feng. Growth of alumina ceramic coatings on aluminum matrix material surface[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(S2): 186–189.
- [3] 孙志华, 刘明, 国大鹏, 郭孟秋, 陆峰, 陶春虎. 2A12 航空铝合金微弧氧化陶瓷层生长过程[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(S1): 64–68.
SONG Zhi-hua, LIU Ming, GUO Da-peng, GUO Meng-qiu, LU Feng, TAO Chun-hu. Formation process of ceramic films fabricated by micro-arc oxidation on 2A12 aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(S1): 64–68.
- [4] SUNDARARAJAN G, RAMA KRISHNA L. Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 167(2/3): 269–277.
- [5] WANG Ping, LI Jian-ping, GUO Yong-chun, YANG Zhong. Growth process and corrosion resistance of ceramic coatings of micro-arc oxidation on Mg-Gd-Y magnesium alloys[J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(5): 798–802.
- [6] 杨巍, 蒋百灵, 时惠英. LY12 铝合金微弧氧化膜层的形成与生长机制[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(10): 1949–1954.
YANG Wei, JIANG Bai-ling, SHI Hui-ying. Formation and growth mechanism of microarc oxidation coating on LY12 aluminium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(10): 1949–1954.
- [7] 郭宝刚, 梁军, 田军, 刘惠文, 徐洮. Ti-6Al-4V 微弧氧化陶瓷膜微观结构与组成研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(12): 1897–1900.
GUO Bao-gang, LIANG Jun, TIAN Jun, LIU Hui-wen, XU Tao. Structure and composition of surface and interface of micro-arc oxide ceramic layer on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(12): 1897–1900.
- [8] 吴振东, 姜兆华, 姚忠平, 张雪林. 反应时间对 LY12 铝合金微弧氧化膜层组织及性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2007, 22(3): 555–559.
WU Zhen-dong, JIANG Zhao-hua, YAO Zhong-ping, ZHANG Xue-lin. Influence of treatment time on structure and property of ceramic coatings formed on LY12 aluminum alloy by micro-arc oxidation [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, 22(3): 555–559.
- [9] 辛世刚, 姜兆华, 吴晓宏, 孙学通, 赵连城. 微弧氧化 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷膜生长过程分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(6): 651–654.
XIN Shi-gang, JIANG Zhao-hua, WU Xiao-hong, SUN Xue-tong, ZHAO Lian-cheng. The analysis of growth characteristic of alumina coatings by micro-plasma oxidation [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(6): 651–654.
- [10] 王德云, 东青, 陈传忠, 雷廷权. 微弧氧化技术的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2005, 33(9): 1133–1138.
WANG De-yun, DONG Qing, CHEN Chuan-zhong, LEI Ting-quan. Recent progress of micro-arc oxidation technique [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 33(9): 1133–1138.
- [11] 索相波, 邱骥, 刘吉延. 电解液中添加纳米 SiO_2 对 7A52 铝合金表面微弧氧化陶瓷层生长过程及性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(3): 42–45.
SUO Xiang-bo, QIU Ji, LIU Ji-yan. Effects of SiO_2 nanoparticles in electrolytes on growth process and surface properties of alumina coatings formed on 7A52 aluminium alloy by micro-arc oxidation [J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(3): 42–45.
- [12] 郭洪飞, 安茂忠, 徐莘, 霍慧彬. 镁合金微弧氧化工艺条件对陶瓷膜耐腐蚀性的影响[J]. *材料工程*, 2006(3): 29–32, 36.
GUO Hong-fei, AN Mao-zhong, XU Shen, HUO Hui-bin. Effect of operating condition on corrosion resistance of ceramic coatings formed on magnesium alloys by micro-arc oxidation[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006(3): 29–32, 36.
- [13] 杨巍, 蒋百灵, 鲜林云, 时惠英. 溶质离子在铝合金微弧氧化陶瓷膜形成过程中的作用机理[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(3): 464–468.
YANG Wei, JIANG Bai-ling, XIAN Lin-yun, SHI Hui-ying. Action mechanism of solute ions on forming process of microarc oxidation coatings on aluminium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(3): 464–468.
- [14] LALEH M, ROUHAGHDAM A S, SHAHRABI T, SHANGHI A. Effect of alumina sol addition to micro-arc oxidation electrolyte on the properties of MAO coatings formed on magnesium alloy AZ91D[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 496(1/2): 548–552.
- [15] ZHENG H Y, WANG Y K, Li B S, HAN G R. The effects of Na_2WO_4 concentration on the properties of microarc oxidation coatings on aluminum alloy[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(2): 139–142.
- [16] YABUKI A, SAKAI M. Anodic films formed on magnesium in organic, silicate-containing electrolytes[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(4): 793–798.

- [17] ARRABAL R, MATYKINA E, SKELDON P, THOMPSON G E. Incorporation of zirconia particles into coatings formed on magnesium by plasma electrolytic oxidation[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(5): 1532–1538.
- [18] 马世宁, 索相波, 邱 骥, 朱海燕. 纳米 SiO_2 复合对铝合金表面微弧氧化层生长动力学的影响[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(1): 68–71.
- MA Shi-ning, SUO Xiang-bo, QIU Ji, ZHU Hai-yan. Effects of n-SiO_2 on growth dynamics of alumina coatings formed on 7A52 aluminium alloy by micro-arc oxidation[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1): 68–71.
- [19] 于松楠, 吴汉华, 陈根余, 袁 鑫, 李 乐. $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶胶浓度对 TC4 钛合金微弧氧化膜特性的影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(2): 729–733.
- YU Song-nan, WU Han-hua, CHEN Gen-yu, YUAN Xin, LI Yue. Effect of $\text{Al}(\text{OH})_3$ sol concentration on characteristics of microarc oxidation coatings of titanium alloy [J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(2): 729–733.
- [20] 朱立群, 刘慧丛. 溶胶成分对镁合金阳极氧化膜层的影响研究[J]. *功能材料*, 2005, 36(6): 923–926.
- ZHU Li-qun, LIU Hui-cong. The effect of sol ingredient to anodic oxidation film on magnesium alloys [J]. *Journal of Functional Materials*, 2005, 36(6): 923–926.
- [21] 唐明奇. 铝和镁合金材料微弧氧化成膜过程中的钛与锆溶胶粒子的作用机制研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011: 45–105.
- TANG Ming-qi. Study of action mechanism of titania and zirconia sol on forming process of microarc oxidation coatings on magnesium and aluminium alloys [D]. Beijing: Beihang University, 2011: 45–105.
- [22] 周祖康, 顾惕人, 马季铭. 胶体化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1996: 191–192.
- ZHOU Zu-kang, GU Xi-ren, MA Ji-ming. Colloid chemistry foundation [M]. Beijing: Peking University Press, 1996: 191–192.
- [23] 王雅静, 翟玉春, 田彦文, 任玉兰. 硅铝酸钠溶液性质的研究[J]. *矿冶工程*, 2004, 24(2): 53–55, 58.
- WANG Ya-jing, ZHAI Yu-chun, TIAN Yan-wen, REN Yu-lan. Study on character of sodium aluminosilicate solution [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(2): 53–55, 58.

(编辑 陈卫萍)