

LD10 铝合金微弧氧化膜的生长及腐蚀性能^{*}

阳超林, 鲁 亮, 曲 尧, 杜建成, 华 铭, 薛文斌

(1. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875; 2. 北京市辐射中心, 北京 100875)

摘 要: 采用双极性交流电源在 LD10 铝合金表面制备出微弧氧化膜。测量了硅酸盐电解液里微弧氧化膜的生长曲线, 并分析了微弧氧化膜的结构、成分和相组成。采用浸泡腐蚀试验、醋酸加速盐雾腐蚀试验、动电位极化和电化学阻抗谱(EIS)方法评估了微弧氧化处理前后 LD10 铝合金的腐蚀性能。结果表明: LD10 铝合金微弧氧化膜主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成, 膜外层还有少量非晶相。微弧氧化初期, 氧化膜主要以向外层生长为主, 且表面粗糙度快速增加。随后膜层向内生长速度逐渐加快, 最后阶段微弧氧化膜主要以向内生长为主。微弧氧化处理后 LD10 铝合金的腐蚀电位提高, 腐蚀电流密度下降约 2 个数量级。微弧氧化膜的阻抗模值 $|Z|$ 比铝合金基体大幅提高, 同时其容抗弧半径远远大于铝合金基体。微弧氧化表面处理显著提高了 LD10 铝合金的耐腐蚀性能。

关键词: 微弧氧化; LD10 铝合金; 生长曲线; 腐蚀性能; 电化学阻抗谱

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)02-0070-08

Fabrication and Corrosion Behaviors of Micro-arc Oxidation Coating on LD10 Aluminum Alloy

YANG Chao-lin, LU Liang, QU Yao, DU Jian-cheng, HUA Ming, XUE Wen-bin

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875)

Abstract: Micro-arc oxidation(MAO) coating on the LD10 aluminum alloy was fabricated in silicate solution by an AC bipolar power source. The growth curve of the coating was measured. The microstructure, composition and phase constituents of the coating were analyzed. The corrosion properties of the bare and coated LD10 alloy were compared by the immersion test, acetic acid accelerated salt spray test, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that: the MAO coating on LD10 aluminum alloy is composed of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and a small amount of amorphous phase. In the initial stage of micro-arc oxidation, the ceramic coating mainly grows toward the outer surface and meanwhile its surface roughness increases rapidly. Then, the growth rate of the coating toward the inner layer gradually increases. Finally, the coating mainly grows inwards. After MAO, the corrosion potential of the LD10 alloy increases and its corrosion current density decreases by about two orders of magnitude. The electrochemical impedance modulus $|Z|$ of the coating is much higher than that of the bare LD10 alloy, and its capacitive loop radius is far higher than that of the bare LD10 alloy. Therefore, the MAO treatment significantly improves the corrosion resistance of the LD10 aluminum alloy.

Keywords: micro-arc oxidation(MAO); LD10 aluminum alloy; growth curve; corrosion property; electrochemical impedance spectroscopy(EIS)

收稿日期: 2014-09-27; **修回日期:** 2015-01-22; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51071031); 北京市自然科学基金(2102018, 2122017); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120003110010)

通讯作者: 薛文斌(1968-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 材料表面改性; **Tel:** (010) 6220 7222; **E-mail:** xuewb@bnu.edu.cn

网络出版日期: 2015-03-11 09:31; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150311.1011.017.html>

引文格式: 阳超林, 鲁亮, 曲尧, 等. LD10 铝合金微弧氧化膜的生长及腐蚀性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 70-77. Yang C L, Lu L, Qu Y, et al. Fabrication and corrosion behaviors of micro-arc oxidation coating on LD10 aluminum alloy [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 70-77.

0 引言

LD10 铝合金为可热处理强化的 Al-Cu-Mg-Si 系合金,其密度低、比强度和比刚度,被广泛用于国防和航空航天领域,如航天器承力构件及模锻件^[1-2]。其中,LD10 铝合金的合金相 CuAl₂ 可以提高铝合金的强度,但它作为阴极相使用时却降低了 LD10 铝合金的耐腐蚀性能。目前国内外关于提高该合金耐腐蚀性能的文献较少,传统表面处理如阳极氧化和涂漆技术存在工序多、废液处理难等问题,限制了它的应用范围^[3-5]。

微弧氧化(Micro-arc oxidation, MAO),又称等离子体电解氧化,是近年研究比较多的一种表面改性技术。它利用微区等离子体放电在 Al、Mg、Ti、Zr、Ta 表面生成一层致密氧化膜,提高了金属表面的硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能^[6-12]。高强度铝合金微弧氧化的研究主要集中在 2024 铝合金和 2A12 铝合金方面,而对于 LD10 铝合金微弧氧化的报道较少^[13-15]。梁戈^[16]等研究了微弧氧化表面处理对 LD10 铝合金疲劳性能的影响,发现膜层中存在残余压应力,微裂纹易沿放电通道产生。但关于 LD10 铝合金微弧氧化膜腐蚀性能的研究还比较少。

文中研究了 LD10 铝合金微弧氧化膜的生长过程,并分析了膜层的形貌和相组成,采用多种试验方法对比测试了 LD10 铝合金及微弧氧化膜的腐蚀性能。

1 材料及方法

试验材料为 LD10 铝合金板材,其尺寸为 130 mm × 12 mm × 6 mm,化学成分如表 1 所示。

表 1 LD10 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the LD10 aluminum alloy (w/%)

Element	Cu	Si	Fe	Mg
Content	3.9-4.8	0.4-1.2	0.7	0.4-0.8
Element	Mn	Zn	Ni	Al
Content	0.4-1.0	0.3	0.1	Bal.

采用自行研制的 WHYH-40 kW 型微弧氧化装置进行氧化试验。微弧氧化装置如图 1 所示,主要由电解槽和电源组成,电解槽外采用循

环水冷却保证溶液温度在 40 ℃ 以下。微弧氧化前用砂纸将试样外表面磨光并洗去油污,其表面粗糙度 Ra 为 0.212 μm,然后放入电解槽里进行氧化处理。所用电解液为 9 g/L Na₂SiO₃ + 少量 KOH + 去离子水,氧化时采用双极性电源恒电压模式,正电压为 +530 V,负电压为 -70 V。

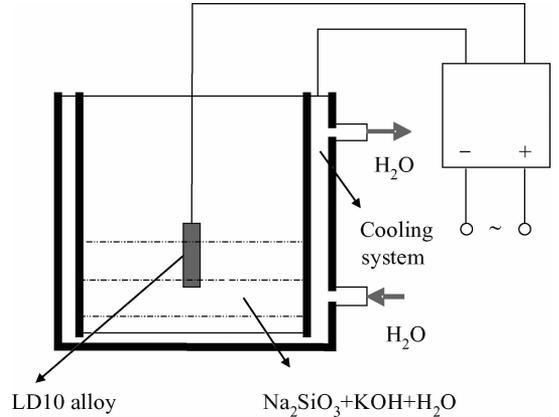


图 1 微弧氧化装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micro-arc oxidation device

采用 DWH-A 型涡流无损测厚仪测量微弧氧化膜厚度 h ,如图 2 所示。图中膜内虚线为铝合金原始表面位置。用精度为 0.001 mm 数字螺旋测微计测定氧化前后试样同一部位的厚度增加量 h_{out} ,其代表微弧氧化膜向外生长部分。然后,根据 $h = h_{out} + h_{in}$ 计算出微弧氧化膜向铝合金基体内生长的厚度, h_{in} 。

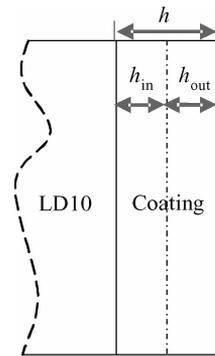


图 2 微弧氧化膜厚度测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the coating thickness measurement

采用 TR200 粗糙度仪测量不同氧化时间样品的表面粗糙度,其中测量时间点如表 2 所示。选取 50 μm 厚的典型微弧氧化膜进行形貌、成分

与相组成分析。采用 Hitachi S-4800 扫描电镜 (SEM) 观察样品组织形貌, 并用其附带的能谱仪对微弧氧化膜截面进行线扫描成分分析。采用 X'Pert PRO MPD X 射线衍射仪分析膜层的物相组成。采用 Cu K α X 射线, 工作电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描速度 4 °/min, 扫描范围 10°~90°。

表 2 微弧氧化过程的持续时间

Table 2 Duration time of the MAO process (min)

No.	1	2	3	4	5
Time	6	13	17	27	45
No.	6	7	8	9	10
Time	65	95	125	155	190

将 LD10 铝合金和微弧氧化膜样品分别置于 1 mol/L NaCl + 10 mL/L H₂O₂ 溶液中进行浸泡腐蚀试验, 时间 4 h。根据中华人民共和国国家标准 GB/T 10125-1997《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》进行酸性盐雾试验。将 LD10 铝合金和微弧氧化膜样品悬挂在 35 °C 盐雾试验箱中, 腐蚀溶液为 5% NaCl + 2 mL/L CH₃COOH, 加入醋酸是为了加速腐蚀进程, 时间设定为 100 h。用 500~1 200 号砂纸打磨样品表面后用去离子水清洗, 采用 PARSTAT 2273 电化学工作站测定 LD10 铝合金基体和微弧氧化膜的极化曲线和电化学阻抗谱 (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS), 所用的参比电极为饱和甘汞电极 (Saturated calomel electrode, SCE), 对电极为铂丝, 工作电极为测试样品, 测试面积 1 cm², 溶液为 1 mol/L NaCl + 10 mL/L H₂O₂。极化曲线扫描速率为 1 mV/s, EIS 扫描频率范围为 10⁻²~10⁶ Hz。

2 结果与讨论

2.1 微弧氧化膜的生长曲线

LD10 铝合金微弧氧化过程中电流密度随时间的变化见图 3。在初始 20 min, 放电火花细密且明亮。这是因为在微弧氧化初期电流密度很大, 随后电流密度迅速减小, 此过程持续时间很短。在 20~65 min, 样品表面火花放电仍然较剧烈, 样品表面出现较大的红色弧点, 它们在样品表面移动, 电流密度变化比较平稳。在 65~190 min, 样品表面只有一些细小的火花, 此阶段电流密度比较稳定, 约为 15 A/dm² 左右。氧化

初期铝合金表面会生成一层很薄的钝化膜, 容易被击穿放电, 所以电流密度在微弧氧化初期较大, 火花细密。但是随着氧化膜逐渐生长, 放电击穿变得越来越困难, 放电集中在膜层较为薄弱的区域进行, 同时电流密度也快速下降^[6]。

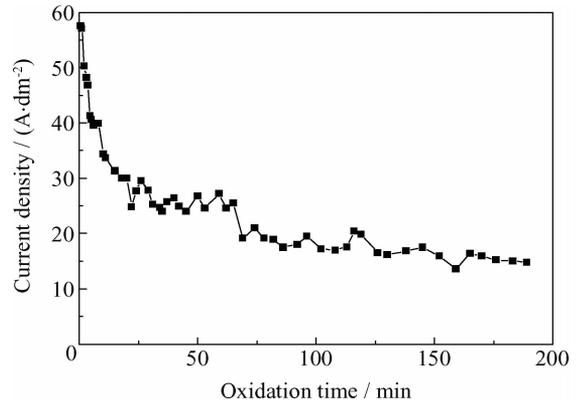


图 3 LD10 铝合金微弧氧化电流密度随时间的变化
Fig. 3 Relationships of the current density and oxidation time of the MAO coating on aluminum alloy

对不同微弧氧化时间的 LD10 铝合金样品, 分别测定微弧氧化膜总厚度 h , 以及氧化膜相对于铝合金基体原始表面向外生长厚度 h_{out} , 从而计算出氧化膜向内生长的厚度 h_{in} , 结果如图 4 所示。在 0~20 min, h_{out} 曲线的斜率明显高于 h_{in} 的斜率, 说明微弧氧化膜向外生长的速率比向内生长速率高, 膜层生长主要以向外生长为主。此阶段火花放电剧烈, 在铝基体上快速生成氧化膜。在 20~65 min, 微弧氧化膜开始向内生长, 内层膜和外层膜的生长速度都较快。随着氧化时间的增加, 火花密度变小, 移动速度变慢, 火花变大。在 65~190 min,

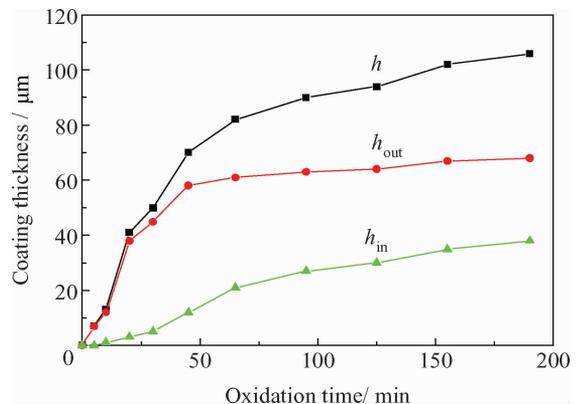


图 4 LD10 铝合金表面微弧氧化膜的厚度随氧化时间的变化
Fig. 4 Relationships of the thickness and oxidation time of the MAO coating on LD10 aluminum alloy

从图中曲线可以看出 h_{out} 值基本不变,膜层生长主要以向内层生长为主,火花放电变弱且在表面移动,这些细小的放电火花在一定程度上对膜层还有修复作用^[17]。

图5为LD10铝合金微弧氧化膜表面粗糙度随时间的变化曲线。在微弧氧化初期,膜表面粗糙度快速增加,这同放电通道喷出物不断产生有关,膜层主要以向外层生长为主。随着氧化的进行,微弧氧化膜表面粗糙度增加速率减慢。火花密度减少使放电通道内喷射出的沉积物相应减少,粗糙度增加速度降低,膜层开始向内层生长。在0~65 min,样品表面放电剧烈,电流密度较大。在放电通道内生成的熔融物随后覆盖在放电

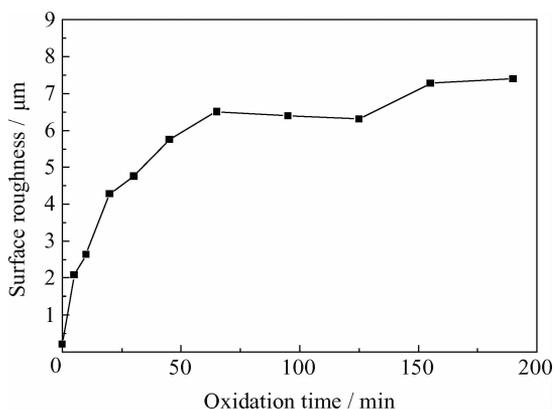
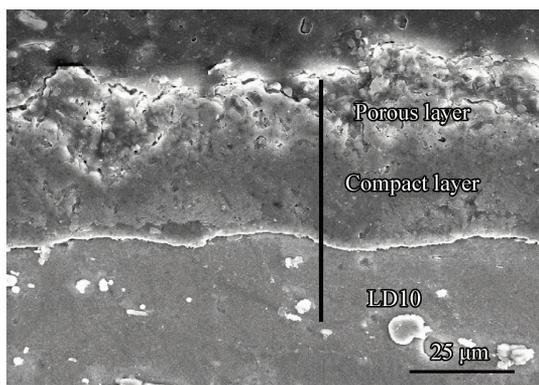


图5 LD10铝合金微弧氧化膜表面粗糙度随氧化时间变化曲线

Fig. 5 Relationships of the surface roughness and oxidation time of the MAO coating on LD10 aluminum alloy



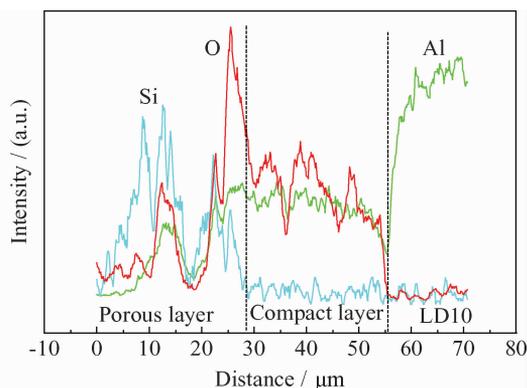
(a) Morphology

通道周围,使得样品表面变得粗糙多孔,粗糙度上升。65 min以后只有一些细小的火花,粗糙度变化不大。此时微弧氧化膜生长主要以内层生长为主,向外层生长为辅。

结合以上结果得出:在微弧氧化开始阶段(0~20 min),微弧放电主要以膜层击穿为主,同时氧化膜快速向外生长,放电通道的不断形成和通道内喷射出的熔融物沉积导致粗糙度快速增加。随着氧化的进行(20~65 min),膜层的放电击穿变得越来越困难,放电火花不再细密,此阶段粗糙度增长速度减慢,说明放电通道内喷射出的熔融物减少,膜层开始快速向内生长。在微弧氧化最后阶段(65~190 min),膜内层和外层都较厚,电压击穿困难,稀少的放电火花主要对膜层进行修复^[17],膜层向内生长为主。所以电流密度最小,火花最弱,同时粗糙度也无明显变化。

2.2 微弧氧化膜的截面组织及成分

图6为LD10铝合金微弧氧化膜(50 μm ,下同)的截面显微组织和成分分布。由图6(a)可知:微弧氧化膜由典型的致密内层和疏松外层构成。图6(b)中的虚线是基体、致密层和疏松层的分界线。Al元素在致密层中含量明显高于外部疏松层。来自硅酸盐电解液的Si元素富集在疏松外层里并形成 SiO_2 相。微弧放电通道内的高温 and 高压环境导致溶液中溶质和溶剂迅速与熔融铝基体反应并快速冷却^[6],从而在膜层中生成 Al_2O_3 和 SiO_2 。



(b) Composition profiles of Al, Si and O

图6 LD10铝合金微弧氧化膜的截面组织和成分分布

Fig. 6 Cross section morphology and composition profile of the MAO coating on LD10 aluminum alloy

2.3 微弧氧化膜的相组成

图7为LD10铝合金微弧氧化膜的XRD图

谱。由图7可知:LD10铝合金微弧氧化膜主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成,图中的Al衍射峰来自铝合金

基体。除了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的衍射峰外,在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 范围内还出现一个非晶衍射包。图 6(b)证实疏松层中 Si 含量较高,而内层中 Si 含量很低。这说明在硅酸盐电解液中, Si 元素富集在外层膜里并可能以 SiO_2 非晶形式存在。微弧放电过程中产生大量的热量,使得膜层与基体界面附近的铝瞬间发生局部熔融,与铝基体/氧化膜界面处的 O 原子迅速反应生成 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

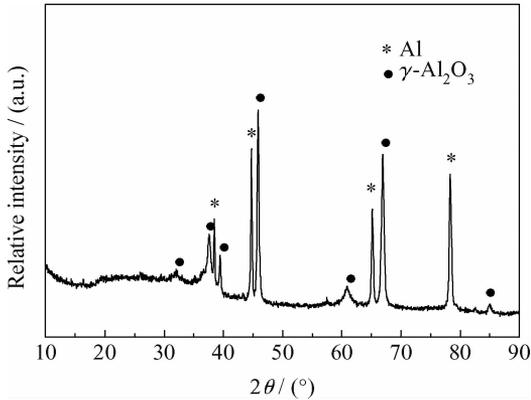


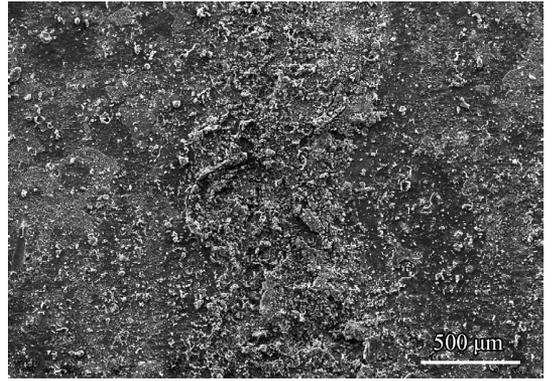
图 7 LD10 铝合金微弧氧化膜的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of the MAO coating on LD10 aluminum alloy

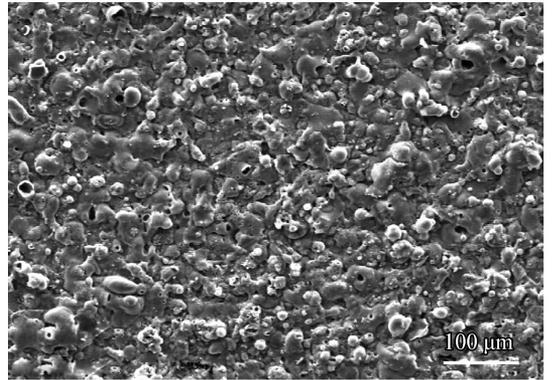
2.4 微弧氧化膜的耐腐蚀性

图 8 为 LD10 铝合金及微弧氧化膜在 $1\text{ mol/L NaCl} + 10\text{ mL/L H}_2\text{O}_2$ 溶液中浸泡前后的表面形貌。图 8(a)显示,铝合金基体浸泡后出现明显腐蚀,其表面残留大量腐蚀产物。这与溶液中 Cl^- 半径较小,容易破坏钝化膜有关^[18]。而微弧氧化样品在浸泡前后(见图 8(b)(c))膜表面几乎无变化。这是因为 Cl^- 不易通过微弧氧化膜进入铝/膜界面,腐蚀反应很难产生,因而表面保存完好,且无腐蚀产物,说明微弧氧化膜较好地保护了铝合金基体不受腐蚀。

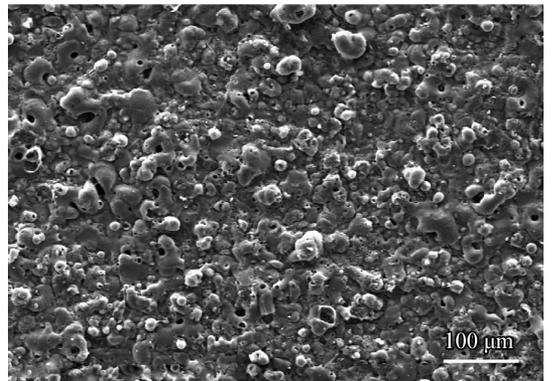
对 LD10 铝合金及微弧氧化膜样品进行醋酸加速盐雾腐蚀试验,腐蚀表面形貌如图 9 所示。铝合金基体表面出现了大量的腐蚀产物,而微弧氧化膜表面疏松层虽有所剥落,但致密层仍然保留在铝合金表面。因此微弧氧化处理有效地提高了铝合金的耐腐蚀性能,这同浸泡腐蚀试验的结果一致。比较图 9(b)和图 8(c)发现,盐雾腐蚀试验后致密层还保留在基体表面,而疏松层已脱落,说明文中试验条件下醋酸加速盐雾腐蚀环境比浸泡腐蚀环境更恶劣。



(a) Bare LD10 aluminum alloy after immersion test



(b) MAO coating after immersion test



(c) MAO coating before immersion test

图 8 LD10 铝合金及其微弧氧化膜浸泡前后的表面形貌
Fig. 8 Surface morphologies of the LD10 aluminum alloy and the MAO coating on LD10 aluminum alloy before and after immersion test

为了进一步评估微弧氧化膜的腐蚀性能,在 $1\text{ mol/L NaCl} + 10\text{ mL/L H}_2\text{O}_2$ 溶液中测定 LD10 铝合金及微弧氧化膜的动电位极化曲线,如图 10 所示。微弧氧化膜的腐蚀电位 E_{corr} 比 LD10 铝合金基体的提高了约 0.5 V ,而腐蚀电流密度 i_{corr} ($2.40 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$) 相比铝合金基体的腐蚀电流密度 ($4.15 \times 10^{-4}\text{ A/cm}^2$) 减少约 2 个数量级,腐蚀电位越高说明其越难腐蚀,且腐蚀电

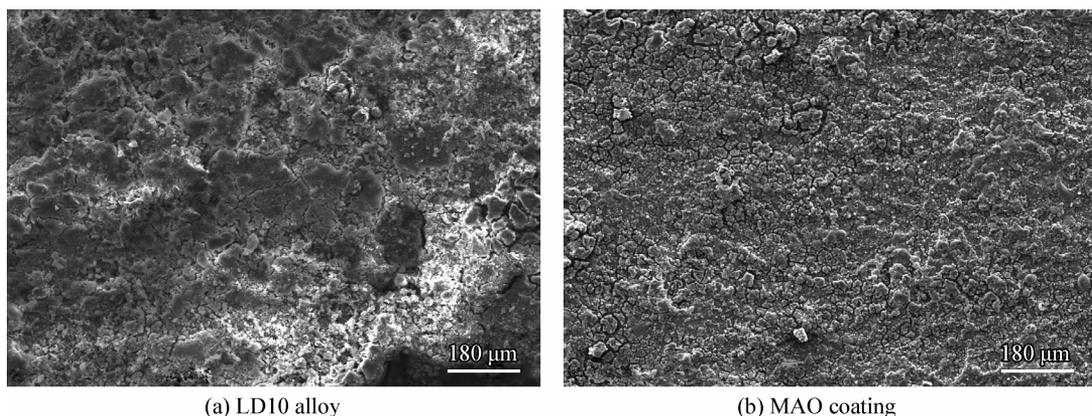


图 9 LD10 铝合金及微弧氧化膜盐雾腐蚀试验后的表面形貌

Fig. 9 Surface morphologies of the LD10 aluminum alloy and the MAO coating on LD10 aluminum alloy after salt spray test

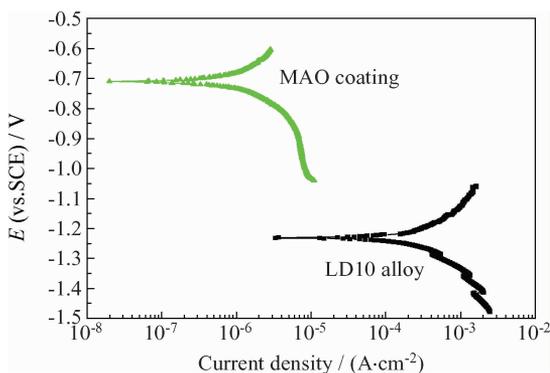


图 10 LD10 铝合金及微弧氧化膜的动电位极化曲线
Fig. 10 Potentiodynamic polarization curves of the LD10 aluminum alloy and the MAO coating on LD10 aluminum alloy

流密度越低说明腐蚀速率越慢,由此可以看出微弧氧化处理可以有效提高 LD10 铝合金的耐腐蚀性能。图 11 为 1 mol/L NaCl + 10 mL/L H₂O₂ 溶液中 LD10 铝合金和微弧氧化膜的 EIS 谱。比较图 11(a) (b) 发现,微弧氧化膜的容抗弧半径远远大于 LD10 铝合金基体的容抗弧半径。容抗弧半径越大,电荷在膜层转移越困难,腐蚀速率越低,耐腐蚀性能越高。图 11(c) 显示,LD10 铝合金微弧氧化膜阻抗模值 $|Z|$ 比同频率下铝合金基体阻抗模值要高 2 个数量级,说明 LD10 铝合金微弧氧化表面处理有效地提高了铝合金基体的耐腐蚀性能。另外,图 11(a) 的铝合金基体 EIS 谱出现了感抗弧,说明 LD10 铝合金存在点

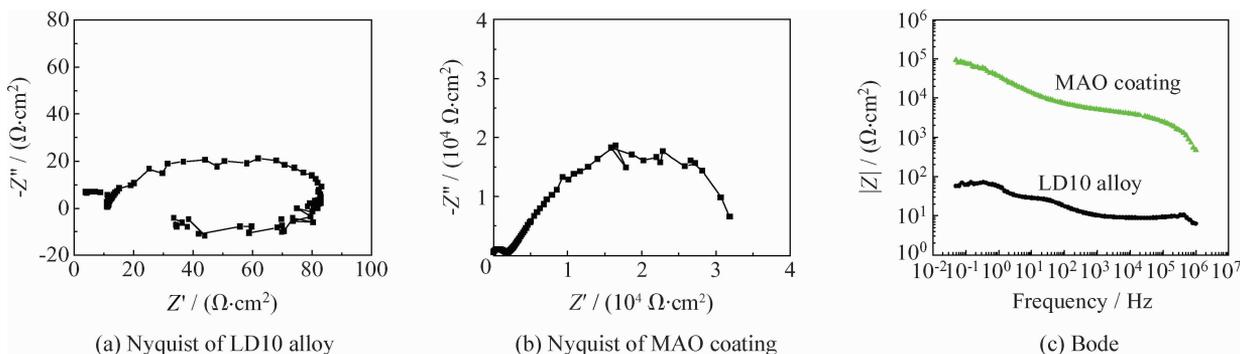


图 11 LD10 铝合金及微弧氧化膜的电化学阻抗谱

Fig. 11 EIS of the LD10 aluminum alloy and MAO coating on LD10 aluminum alloy

蚀倾向,容易发生点蚀。而图 11(b) 中微弧氧化膜 EIS 谱没有出现感抗弧,因此微弧氧化处理的 LD10 铝合金抗点蚀能力得到提高。

根据微弧氧化膜电化学反应体系中腐蚀过程

的特点^[19],分别建立 LD10 铝合金基体和微弧氧化膜的阻抗谱等效电路模型,见图 12。图 12(a) 为铝合金基体的等效电路模型。 R_s 为溶液电阻, C 为双电层电容, R_t 为电荷转移电阻,CPE 和 R_f 是与

铝合金表面钝化膜相关的常相位角元件和电阻。其中常相位角元件 CPE 是描述电容参数发生偏离时的物理量,由 Y_0 和 n 两个参数来表征。它的阻抗计算公式为 $Z=1/[Y_0(j\omega)^n]$, Y_0 表示导纳的模量, ω 为扰动频率, n 值的大小代表“弥散效应”的偏离程度。当 n 为 0 时, CPE 为电阻, 当 n 为 1 时它为理想电容, 当 n 为 -1 时它为纯电感。 R_L 为对应低频段感抗弧的等效电阻, L 为对应低频段感抗弧的等效电感。图 12(b) 为微弧氧化膜的等效电路模型, R_s 为溶液电阻, R_p 、 R_b 代表氧化膜疏松层和致密层的电阻值。 CPE_p 、

CPE_b 为疏松层和致密层的常相位角元件。

对图 11 的 EIS 谱图用 ZSimpWin 软件进行参数解析, 拟合得到等效电路的各参数如表 3 和表 4 所示。对比发现: 铝合金基体的 R_t 比微弧氧化膜的 R_b 和 R_p 要低很多, 因此微弧氧化大大提高了铝合金基体的耐腐蚀性, 这同浸泡腐蚀、盐雾腐蚀以及极化曲线的试验结果一致。此外, 由表 4 可知: 微弧氧化膜致密层电阻值 R_b 比疏松层电阻值 R_p 高得多, 预示微弧氧化膜的致密层对于铝合金耐腐蚀性的提高起关键作用。

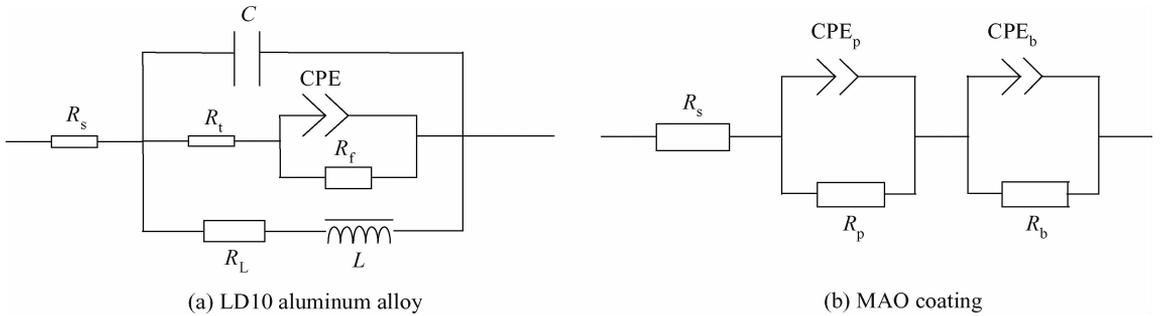


图 12 LD10 铝合金及微弧氧化膜 EIS 谱等效电路模型

Fig. 12 Equivalent circuit of the EIS of the LD10 aluminum alloy and MAO coating on LD10 aluminum alloy

表 3 LD10 基体 EIS 图谱拟合数据

Table 3 Fitting results of EIS plots of the LD10 aluminum alloy

$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_t/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}, Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_L/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$L/(\text{H} \cdot \text{cm}^2)$
10.9	1.8×10^{-8}	17.55	4.5×10^{-3}	0.94	625	86	516

表 4 LD10 微弧氧化膜 EIS 图谱拟合数据

Table 4 Fitting results of EIS plots of the MAO coating on LD10 aluminum alloy

$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}_p, Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_p	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}_b, Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_b	$R_b/(10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2)$
15	1.53×10^{-6}	0.73	4.36×10^3	9.03×10^{-7}	0.76	8.79

3 结论

(1) 利用微弧氧化技术可以在 LD10 铝合金表面生成氧化膜, 其由疏松外层和致密内层组成。微弧氧化膜主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成, 外层膜层还含有少量 SiO_2 非晶相。

(2) 在微弧氧化初期, 氧化膜主要以向外层生长为主。随后其向内生长和向外生长都较快。最后阶段微弧氧化膜主要以向内生长为主。

(3) LD10 铝合金微弧氧化膜的腐蚀电位 E_{corr} 比铝合金基体的提高了约 0.5 V, 而腐蚀电

流密度 i_{corr} 减少了约 2 个数量级。其 Nyquist 图容抗弧半径远远高于铝合金基体, 阻抗模值 $|Z|$ 相比同频率的铝合金基体高很多, 因此微弧氧化处理显著提高了 LD10 铝合金的耐腐蚀性。

参考文献

- [1] 王涛, 尹志民. 高强变形铝合金的研究现状和发展趋势 [J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 197-202.
Wang T, Yin Z M. Research status and development trend of ultra-high strength aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(2): 197-202 (in Chinese).
- [2] 王亚荣, 黄文荣, 雷华东. 焊后热处理对 2A14 高强铝合金

- 电子束焊接头组织及力学性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 141-145.
- Wang Y R, Huang W R, Lei H D. Effects of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of 2A14 high strength aluminum alloy by electron beam welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(20): 141-145 (in Chinese).
- [3] 常新龙, 刘万雷, 赖建伟, 等. LD10 铝合金应力腐蚀性能的研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(4): 347-350.
- Chang X L, Liu W L, Lai J W, et al. Stress corrosion cracking susceptibility of LD10 aluminum alloy [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(4): 347-350 (in Chinese).
- [4] 穆志韬, 赵霞. 航空结构材料的腐蚀失效分析及防腐控制 [J]. 材料工程, 1997(3): 42-45.
- Mu Z T, Zhao X. Corrosion failure analysis and corrosion control for aircraft structure materials [J]. Material Engineering, 1997(3): 42-45 (in Chinese).
- [5] Liu W L, Mu Z T, Jin P. Accelerated corrosion test and corrosion failure distribution model of aircraft structural aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(3): 1485-8.
- [6] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A, et al. Plasma electrolysis for surface engineering [J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 122(2/3): 73-93.
- [7] Xue W B, Deng Z W, Lai Y C, et al. Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(5): 1365-8.
- [8] Li X J, Liu X Y, Luan B L. Corrosion and wear properties of PEO coatings formed on AM60B alloy in NaAlO₂ electrolytes [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(21): 9135-41.
- [9] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A, et al. Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 130: 195-206.
- [10] 薛文斌, 金乾, 朱庆振, 等. 铝合金表面微弧氧化陶瓷膜制备及特性分析 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(2): 119-122.
- Xue W B, Jin Q, Zhu Q Z, et al. Preparation and properties of ceramic coating formed by microarc oxidation on zirconium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2): 119-122 (in Chinese).
- [11] Petković M, Stojadinović S, Vasilić R, et al. Characterization of oxide coatings formed on tantalum by plasma electrolytic oxidation in 12-tungstosilicic acid [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(24): 10590-4.
- [12] Akatsu T, Kato T, Shinoda Y, et al. Thermal barrier coating made of porous zirconium oxide on a nickel-based single crystal superalloy formed by plasma electrolytic oxidation [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 223: 47-51.
- [13] Rama Krishna L, Somaraju K R C, Sundararajan G. The tribological performance of ultra-hard ceramic composite coatings obtained through microarc oxidation [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163-164: 484-490.
- [14] 关春龙, 王春华, 单英春, 等. Na₂ZrF₆-KOH 中微弧氧化 2024 铝合金陶瓷膜 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S1): 179-182.
- Guan C L, Wang C H, Shan Y C, et al. Ceramic coating on 2024 alloy by micro-arc oxidation in Na₂ZrF₆-KOH solution [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S1): 179-182 (in Chinese).
- [15] 孙志华, 刘明, 国大鹏, 等. 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.
- Sun Z H, Liu M, Guo D P, et al. 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 (in Chinese).
- [16] 梁戈, 张亚娟, 林敏. 微弧氧化处理 LD10 铝合金的疲劳特性 [J]. 材料热处理学报, 2010, 31(2): 123-126.
- Liang G, Zhang Y J, Lin M. Fatigue properties of LD10 aluminum alloy with micro-arc oxidation coatings [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2): 123-126 (in Chinese).
- [17] Santosh Prasad Sah, Etsushi Tsuji, Yoshitaka Aoki, et al. Cathodic pulse breakdown of anodic films on aluminum in alkaline silicate electrolyte - understanding the role of cathodic half-cycle in AC plasma electrolytic oxidation [J]. Corrosion Science, 2012, 55: 90-96.
- [18] 李涛, 冯海涛, 李晓刚, 等. 2A12 铝合金在含 Cl⁻ 环境中的腐蚀行为和规律研究 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(3): 43-48.
- Li T, Feng H T, Li X G, et al. Corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in Cl⁻ containing solution [J]. Materials Science & Technology, 2011, 19(3): 43-48 (in Chinese).
- [19] 朱庆振, 薛文斌, 鲁亮, 等. (Al₂O₃-SiO₂)_{sf}/AZ91D 镁基复合材料微弧氧化膜的制备及电化学阻抗谱分析 [J]. 金属学报, 2011, 47(1): 74-80.
- Zhu Q Z, Xue W B, Lu L, et al. Preparation of microarc oxidation coating on (Al₂O₃-SiO₂)_{sf}/AZ91D magnesium matrix composite and its electrochemical impedance spectroscopic analysis [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(1): 74-80 (in Chinese).