

封闭对铝合金微弧氧化膜在酸性溶液中耐蚀性的影响

叶作彦¹, 刘道新¹, 李重阳¹, 张晓化¹, 张小明², 雷明霞²

(1. 西北工业大学 腐蚀与防护研究所, 西安 710072; 2. 中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 为了提高 7A85 铝合金的耐蚀性, 采用单极性正脉冲微弧氧化(MAO)技术在其表面制备了陶瓷膜层, 并采用稀土铈盐、铬酸盐和 SiO₂ 溶胶对 MAO 膜进行封闭处理。采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪和电化学工作站研究了封闭处理对膜层表面形貌、结构和在酸性 NaCl 溶液中腐蚀行为的影响。实验发现, MAO 膜在酸性 NaCl 溶液中不能有效地保护铝合金基体。稀土铈盐和铬酸盐封闭处理通过沉积水合氢氧化物封闭孔隙, 可以提高 MAO 膜的耐蚀性。但在酸性溶液中, 封孔物质会和 H⁺ 发生反应而溶解, 故经封闭的 MAO 试样也会发生腐蚀失效。SiO₂ 溶胶封闭处理后 MAO 膜表面覆盖一层凝胶, 使膜层成为完整的致密层, 可以保护铝合金基体在酸性 NaCl 溶液中免受腐蚀。

关键词: 铝合金; 微弧氧化; 封闭处理; 电化学; 耐蚀性; SiO₂ 溶胶

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Effect of Sealing Treatments on the Corrosion Behavior of Micro-arc Oxidation Coating on Aluminum Alloy in Acid NaCl Solution

YE Zuo-Yan¹, LIU Dao-Xin¹, LI Chong-Yang¹, ZHANG Xiao-Hua¹, ZANG Xiao-Ming², LEI Ming-Xia²

(1. Corrosion and Protection Research Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AVIC the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Ceramic coatings were fabricated on 7A85 aluminum alloy by unipolar positive pulsed micro-arc oxidation (MAO) treatment for enhancing corrosion resistance. A bi-layer coating was formed with large pores between the layers. The outer layer contained several micro pores and cracks. Therefore, cerium nitrate, potash bichromate and SiO₂ sol were adopted to seal the MAO coatings. Scanning electron microscope, X-ray diffraction and electrochemistry instrument were used to investigate the effect of sealing treatments on the surface morphology, coating structure and corrosion resistance of MAO coatings. Results show that the MAO coating can not protect aluminum alloy from acid NaCl solution for the existing of defects. The defects can be sealed by precipitations produced by cerium nitrate and potash bichromate sealing treatment, and corrosion resistance of the MAO coating is improved. However, the sealed coatings also fail in the acid NaCl solution for dissolution of the precipitation. After sealing with SiO₂ sol, the MAO coating is covered with a SiO₂ gel layer has become a compact barrier layer to protect aluminum substrate from corrosion in acid NaCl solution.

Key words: aluminum alloy; micro-arc oxidation; seal treatment; electrochemistry; corrosion resistance; SiO₂ sol

7A85 铝合金是我国新研制的高强高韧、高淬透性铝合金, 满足了新一代飞机对超厚铝合金锻件的

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51171154); 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题研究基金(gf201401001)

National Natural Science Foundation of China (51171154); National Defense key Disciplines Laboratory of light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University (gf201401001)

作者简介: 叶作彦(1987-), 男, 博士研究生. E-mail: yebonpu@126.com

通讯作者: 刘道新, 教授. E-mail: liudaonx@nwpu.edu.cn

迫切需求,为发展先进飞机奠定了材料基础。与其它 7xxx 铝合金相比,7A85 铝合金的 Zn 含量较高和 Cu 含量较低,使其具有较高的断裂韧性和较低的淬火敏感性,但也使其耐蚀性降低。热处理可明显改变铝合金的强度和耐蚀性,但强度和耐蚀性一般是矛盾的,部分热处理工艺能够兼顾强度和耐蚀性,但其窗口期非常短^[1],不适用于超厚锻件。因此,现有热处理制度使新型超厚铝合金难以获得良好的综合性能。

表面处理技术可以在不降低材料整体性能的前提下改善材料的表面性能,使其在工业各领域得到广泛应用。微弧氧化(MAO)技术发展自阳极氧化技术,制备的陶瓷膜层耐磨性和耐蚀性均明显提高,在航空工业等领域有很好的应用前景。但由于自身技术特点,MAO 膜存在较多孔隙和微裂纹^[2-8],会降低膜层的耐蚀性,需要采用后续封闭处理。借鉴阳极化膜封闭技术,沸水、铬酸盐、稀土、溶胶和有机物等均被用于 MAO 膜封闭^[9-11],而且取得了较好的封闭效果。但多数研究关注 MAO 及封闭处理对铝合金在中性或近中性腐蚀溶液中的腐蚀行为,而在酸性溶液中 MAO 膜的腐蚀行为研究较少。飞机结构可能因酸雨或闭塞环境等处于较强酸性环境中,研究 MAO 膜及其封闭处理对铝合金在酸性溶液中的腐蚀行为具有重要工程意义。本工作采用铬酸盐、稀土铈盐和 SiO_2 溶胶对 7A85 铝合金表面 MAO 膜进行封闭处理,期望获得耐酸性腐蚀环境的复合膜层。

1 实验方法

1.1 实验材料和试样

实验材料为国内研发的 7A85 锻件,原始厚度为 220 mm,化学成分为(wt%): 7.76 Zn, 1.69 Mg, 1.75 Cu, 0.026 Fe, 0.013 Si, 0.017 Zr, 0.0022 Ti, 余量 Al。热处理工艺为: 470℃固溶热处理 1 h, 常温淬火,再通过压缩产生 1%至 5%的恒定状态的变形,然后在 110℃下时效 6 h, 160℃下时效 10h。试样采用机械加工的方法直接从锻件表面上截取,浸泡腐蚀试样尺寸为: 40 mm×25 mm×5 mm,电化学测试和分析试样尺寸为: 15 mm×15 mm×5 mm,其中厚度方向与锻件的厚度方向一致。

1.2 表面处理

首先将试样各面机械打磨至 1200#水砂纸,并用乙醇、去离子水清洗后冷风吹干。试样共有 4 种表面状态: 微弧氧化 (MAO), 微弧氧化+ $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$

封闭(表示为 MAO+Ce), 微弧氧化+ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 封闭(表示为 MAO+Cr), 微弧氧化+ SiO_2 溶胶封闭处理(表示为 MAO+Si)。

MAO 处理电解液成分为: Na_2SiO_3 15 g/L, $(\text{NaPO}_3)_6$ 10 g/L, NaOH 1 g/L, NaAlO_2 1 g/L, 采用恒流法处理,电流密度保持为 6 A/dm^2 , 频率 1000 Hz, 占空比 20%, 处理时间 1 h, 得到的 MAO 膜层厚度约为 35 μm 。

稀土铈盐封闭处理: 用去离子水配制每升含 5 g $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 和 5 mL 30% H_2O_2 的溶液, 调节 pH 为 3.5~5.0, 处理温度为 40℃, 时间为 2 h; 重铬酸钾封闭: 用去离子水配制 60 g/L 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 溶液, 调节 pH 为 6~7, 处理温度为 95℃, 时间为 1 h; SiO_2 溶胶封闭: 溶胶配方为正硅酸乙酯:无水乙醇:去离子水=2:4:1(体积比), 用稀盐酸调整溶胶的 pH 为 3~4, 处理温度为室温, 将 MAO 试样放入溶胶浸泡 1 min, 匀速竖直提拉取出试样, 室温固化 24 h 后 120℃烘烤 1 h。

1.3 浸泡腐蚀试验

将 4 种表面状态的试样进行浸泡试验, 每种状态 3 个平行试样。腐蚀溶液每升含 30 g NaCl 和 10 mL HCl (36wt%), 试样表面积和溶液总量的比值为 $2 \text{ dm}^2/\text{L}$, 浸泡时间 24 h, 试验温度 35℃。浸泡完成后, 将试样从一端切掉 5 mm, 制作金相试样, 研磨抛光后在金相显微镜下观察截面形貌。

1.4 分析与测试方法

采用相机拍摄试样表面宏观腐蚀形貌; 采用 SurfTest SJ201 型表面粗糙度仪测试表面粗糙度; 采用金相显微镜观察腐蚀后截面形貌; 采用 JEOL JSM-6360LV 扫描电镜观察与分析 MAO 膜的微观形貌, 并用其附带的 EDS 测定膜层成分。用 X 射线衍射法分析 MAO 膜的物相结构。电化学腐蚀特性分析与测试设备为 PARSTAT -2273 电化学工作站, 采用三电极体系, 工作介质为上述酸性腐蚀溶液, 温度控制在 35℃。

2 结果与讨论

2.1 铝合金 MAO 膜的组成和结构

图 1 为铝合金表面 MAO 膜的 XRD 图谱, 可以看到氧化膜主要物相为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 其中 Al 峰是铝合金基底的衍射峰。

图 2 为 MAO 膜的截面形貌以及截面元素分布, 可以看到, MAO 膜可分为内外两层, 外层氧化物本体致密, 但带有微裂纹和较大孔隙, 内层氧化物带有

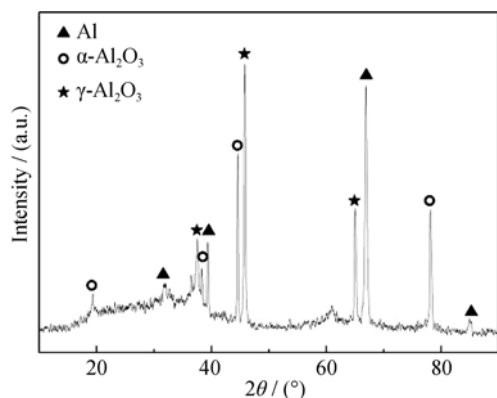


图1 铝合金表面 MAO 膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of the MAO coating on the aluminum alloy

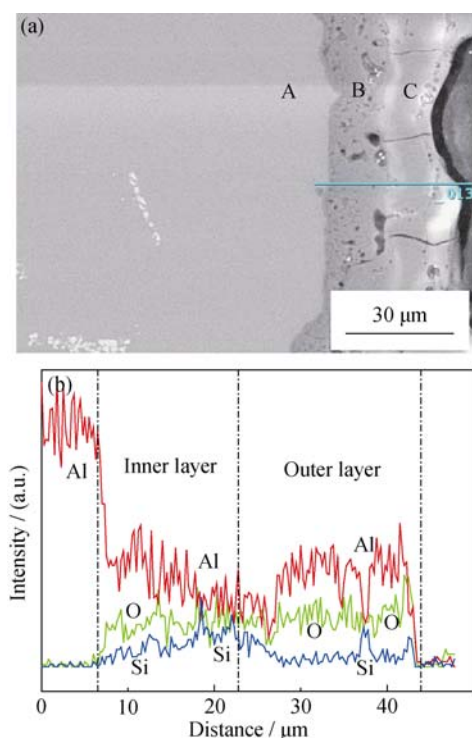


图2 MAO 膜截面形貌(a)及其截面元素分布(b)

Fig. 2 Section morphology (a) and elements distribution along cross section (b) of MAO coating

A-substrate, B-inner layer, C-outer layer

较多微小孔隙, 内外层之间存在较大孔洞。该膜层结构与 Cheng 等^[12]在 2A97 铝合金上制备的 MAO 膜结构相似。从硅元素沿膜层截面的线分布可以看到, Si 的含量在内外层界面处和外层表面出现两个峰值。这反映出了 MAO 膜层的生长机制: 在 MAO 过程中, 电解液通过气孔、裂纹或放电通道到达内层, 内外层间的放电导致内层的生长, 同时也导致 Si 元素进入内层; 膜层外表面的放电导致外层生长和 Si 元素进入外层表面。

2.2 封闭处理对 MAO 膜表面形态的影响

图 3 为 7A85 铝合金 MAO 膜封闭处理前后的表

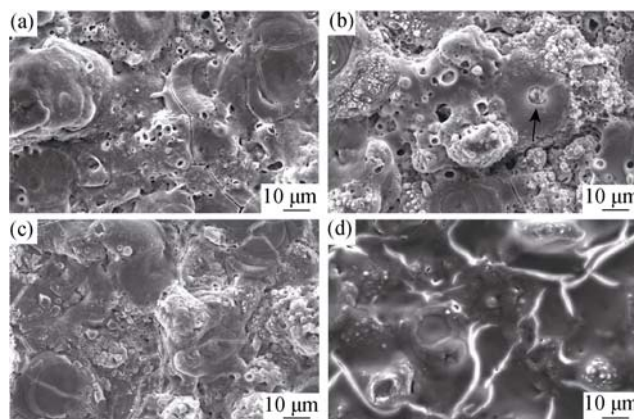


图3 MAO 膜封闭前后表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of MAO coating before and after sealing

(a) MAO; (b) MAO+Ce; (c) MAO+Cr; (d) MAO+Si

面微观形貌, 可以看到未经封闭处理的试样膜层表面存在较多孔洞和微裂纹, 这是弧光放电留下的反应通道和气泡逸出留下的气孔, 以及热应力造成的开裂。孔洞和微裂纹的存在显然不利于膜层对铝合金耐蚀性的改善。采用 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 封闭的 MAO 膜层表面出现明显的沉积物, 图 4(b)中箭头所指位置为沉积物堵塞了孔隙, 但也有部分孔隙未得到有效封闭; $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 封闭的膜层表面也出现了沉积物, 而且孔隙基本消失, 显得更致密平整; SiO_2 溶胶封闭的膜层表面孔隙全部消失, 且覆盖一层凝胶。

对图 3(b)和(c)中沉积物进行了能谱(EDS)分析, 结果如图 4 所示, 沉淀物分别具有较高的 Ce 和 Cr 含量, 说明封孔物质含 Ce 和 Cr 沉淀物。即 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 对 MAO 膜层的封闭机制都是通过反应形成水合物以堵塞孔隙。其中 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 封闭主要依靠反应形成的 $\text{Ce}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Ce}(\text{OH})_4$, 沉淀在孔隙中或 MAO 膜层表面以达到封闭效果^[13]。封闭后的 MAO 膜呈橙黄色也表明封闭产物中包含 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 。 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 通过与膜层中元素反应, 使 Cr^{6+} 还原成 Cr^{3+} , 形成 $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 沉淀以达到封闭效果。虽然 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的封闭效果优于 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$, 但该方法采用了重金属 Cr, 对环境的影响大。在 SiO_2 溶胶-凝胶封闭过程中, 试样从溶胶中取出时表面覆盖一层胶膜, 经固化和热处理之后在 MAO 膜层表面形成一层 $(\text{SiO}_2)_n$ 凝胶层。从图 3(d)可看到, 凝胶层完全封闭了膜层孔隙和裂纹, 使膜层变得致密光滑。

实验测试了 MAO 膜封闭前后的粗糙度, 粗糙度由大到小排序为 $\text{MAO}(3.90 \mu\text{m}) > \text{MAO}+\text{Ce}(2.71 \mu\text{m}) > \text{MAO}+\text{Cr}(2.37 \mu\text{m}) > \text{MAO}+\text{Si}(0.57 \mu\text{m})$, 即封闭处理均使膜层表面粗糙度明显降低, 且溶胶封闭处理降低幅度最大。这说明三种封闭方法对 MAO 膜均

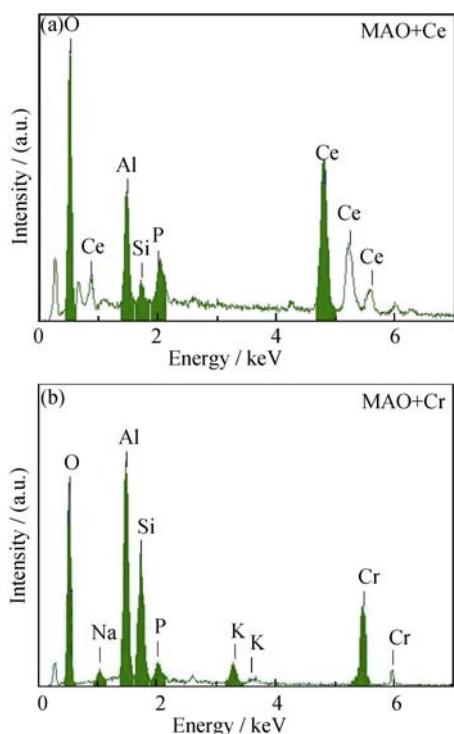


图 4 封孔沉淀物的 EDS 分析结果
Fig. 4 EDS patterns of the precipitations

有整平效果。

2.3 封闭处理对 MAO 膜电化学行为影响

采用电化学交流阻抗技术对封闭前后 MAO 膜

的结构和耐蚀性进行研究。图 5(a)为各试样在腐蚀溶液中浸泡 10 min 后的电化学阻抗谱。对于具有内外层结构的 MAO 试样,在浸泡时溶液会通过氧化膜外层缺陷进入膜层内部,其电化学阻抗谱采用图 6(a)所示等效电路进行拟合^[14],拟合曲线见图 5(b)。由等效电路图可知参比电极到工作电极之间的阻抗包括 3 部分:溶液电阻 R_s 、外层氧化膜电阻 R_{out} 和内层氧化膜电阻 R_{in} , Q 为氧化膜容抗。由于 $Ce(NO_3)_3$ 封闭处理和 $K_2Cr_2O_7$ 封闭处理均未完全封闭膜层,不能明显改变膜层结构及阻抗谱特征,其等效电路与未封闭的相同,拟合曲线如图 5(c)所示。采用 SiO_2 溶胶封闭后氧化膜表面的孔隙被填充且膜层表面覆盖一层凝胶,使氧化膜成为一层完整的隔离层。根据 SiO_2 溶胶封闭处理后氧化膜的表面形貌和电化学阻抗谱特征,采用图 6(b)所示等效电路进行拟合, R_s 为溶液电阻, $R_{coating}$ 为封闭后膜层的电阻, Q 为封闭后膜层容抗。

各试样的阻抗谱拟合结果见表 1。由拟合结果可看到, MAO 膜在腐蚀溶液中起主要保护作用的是氧化膜内层,其阻值约是外层的 5 倍。这是因为氧化膜外层含有裂纹和较大孔隙,溶液很容易穿透膜层,而内层孔隙微小,在溶液中可能具有“自闭封”作用,

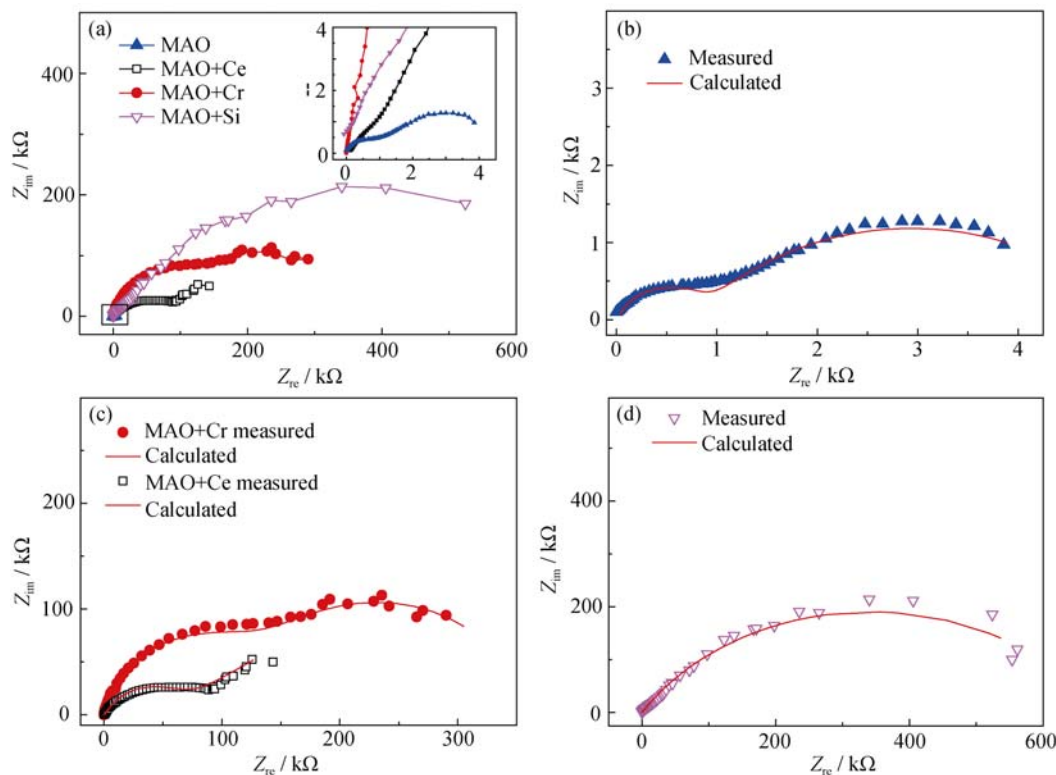


图 5 封闭前后 MAO 膜在腐蚀溶液中的电化学阻抗谱

Fig. 5 Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) spectra of MAO coatings

(a) MAO with and without sealing treatments; (b) EIS fitting curves of MAO coating; (c) EIS fitting curves of MAO+Ce and MAO+Cr; (d) EIS fitting curves of MAO+Si

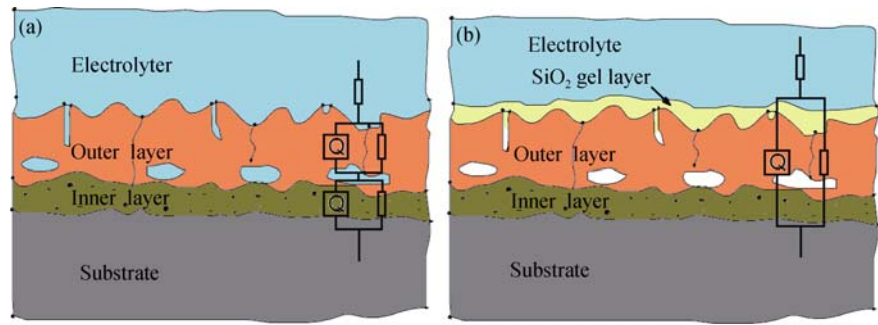


图 6 封闭前后 MAO 膜结构示意图及阻抗谱拟合电路
Fig. 6 Scheme of MAO coating structure and equivalent circuit of EIS
(a) MAO, MAO+Ce and MAO+Cr; (b) MAO+Si

表 1 封闭前后阻抗谱拟合值				
Table 1	Calculated impedance parameters of MAO coatings			
	MAO	MAO+Ce	MAO+Cr	MAO+Si
$R_{out}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	810.9	5.723×10^4	1.344×10^5	6.851×10^5
$R_{in}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	4236	1.416×10^4	2.230×10^5	

保护性较好。 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 封闭处理均明显提高了 MAO 膜的耐蚀性, 但 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 封闭处理提高的幅度更大。两种封闭方法对 MAO 膜内层和外层的耐蚀性均有提高, 但对外层耐蚀性提高的幅度更大。这是因为这两种封闭方式主要作用于氧化膜外层, 但由于封闭溶液可沿着膜层缺陷到达内层, 故对内层也产生了封闭效果, 提高了氧化膜内层的耐蚀性。 SiO_2 溶胶封闭处理明显改变了 MAO 膜的阻抗谱特征, 而且对 MAO 膜的耐蚀性提高幅度最大。

2.4 封闭对 MAO 膜腐蚀行为的影响

将 MAO 处理和 MAO 加封闭处理的试样在腐蚀溶液中进行浸泡试验, 以检验封闭处理对 MAO 膜在酸性环境中耐蚀性的影响。浸泡 1 h 内, 各试样表面均无明显腐蚀现象发生。1 h 后未封闭的 MAO 试样表面开始产生气泡, 气泡从表面个别较大孔隙逸出, 随着时间延长, 产生气泡的孔越来越多, 然后膜层鼓起、破裂, 发生脱落。采用 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 封闭处理的试样分别在浸泡 6h 和 12h 开始产生气泡, 并最终发生膜层鼓泡脱落, 而且浸泡过程中 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 封闭试样表面橙黄色逐渐褪去。采用 SiO_2 溶胶封闭处理的 MAO 试样在浸泡 24 h 内未发生腐蚀现象, 将浸泡时间延长到 100 h, 也未观察到腐蚀现象。图 7 为各试样在腐蚀溶液中浸泡 24 h 后的表面形貌, MAO、MAO+Ce 和 MAO+Cr 处理试样浸泡后均发生了膜层脱落, 而 MAO+Si 处理试样表面完好。

对浸泡后的试样进行截面观察, 图 8 为 MAO

和 MAO+Si 试样截面光学显微镜照片。图 8(a)为 MAO 残留膜层处截面照片, 可以发现腐蚀介质已穿透膜层, 并对基体造成了较为严重的晶间腐蚀; 而 MAO+Si 处理试样浸泡后膜层完好, 未发生腐蚀和膜层脱落现象(图 8(b))。

根据 MAO 试样在腐蚀溶液中的试验现象和失效后的截面形貌, 推断 MAO 处理试样的腐蚀过程可分为三个步骤: (1)腐蚀介质穿透膜层; (2)腐蚀介质到达氧化膜和基体界面, 腐蚀膜基结合面造成膜层脱落; (3)腐蚀沿晶界向材料内部扩展, 对铝合金造成晶间腐蚀。MAO 膜主要物相为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 它们在酸性溶液中本身具有很好的耐蚀

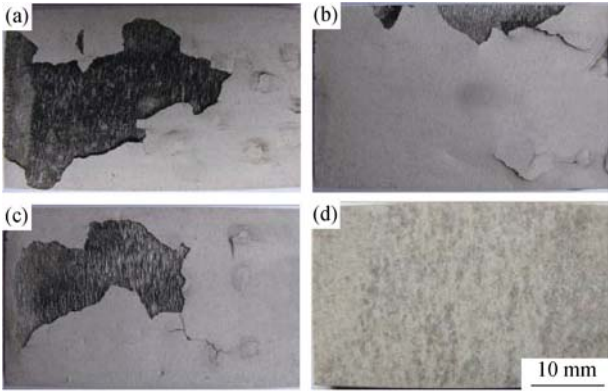


图 7 各表面状态试样浸泡 24 h 后表面形貌
Fig. 7 Surface morphologies of samples immersed for 24 h
(a) MAO; (b) MAO+Ce; (c) MAO+Cr; (d) MAO+Si

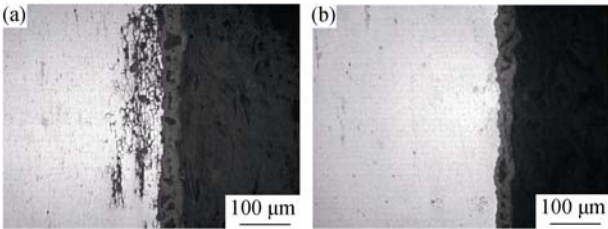


图 8 MAO 和 MAO+Si 浸泡后截面光学显微镜照片
Fig. 8 Optical microscope images of MAO and MAO+Si cross-sectional topography
(a) MAO; (b) MAO+Si

性,但由于 MAO 膜层外层带有较大孔隙和微裂纹,内层也带有微小孔隙,所以当 MAO 膜浸泡在溶液中时,腐蚀介质可沿着这些缺陷到达铝合金基体,腐蚀膜层和基体界面,降低界面结合力,同时腐蚀产生的 H_2 引起膜层鼓泡,鼓泡破裂后造成膜层脱落;另外,由于 7A85-T7452 铝合金对晶间腐蚀十分敏感^[15],腐蚀也会沿着晶界向铝合金内部扩展,造成铝合金性能下降。 $Ce(NO_3)_3$ 和 $K_2Cr_2O_7$ 封闭处理都是依靠反应产生的水合氢氧化物或氧化物以堵塞 MAO 膜层的孔隙和微裂纹,从而延缓腐蚀介质穿透膜层。但这两种封闭方法都不能完全消除膜层的缺陷,而且起封闭作用的水合氢氧化物会与酸性溶液中的 H^+ 反应溶解而造成封闭失效,所以腐蚀介质最终会穿透膜层,对铝合金基体造成腐蚀。只有采用 SiO_2 溶胶封闭的 MAO 膜对铝合金基体起到了良好的保护作用,因为溶胶封闭处理在 MAO 膜表面形成了一层 $(SiO_2)_n$ 凝胶层,凝胶层在酸性溶液中具有很好的耐蚀性,隔离了腐蚀介质,保护基体免受腐蚀。

3 结论

1) 在酸性 NaCl 溶液中,单极性正脉冲制备的 MAO 膜不能十分有效地保护 7A85 铝合金基体,MAO 处理试样的腐蚀失效过程为:溶液穿透 MAO 膜层,腐蚀膜基界面,腐蚀沿铝合金基体晶界发展,造成晶间腐蚀;

2) $Ce(NO_3)_3$ 、 $K_2Cr_2O_7$ 和 SiO_2 溶胶均能达到有效封闭 MAO 膜层的目的, $Ce(NO_3)_3$ 和 $K_2Cr_2O_7$ 封闭机制为反应形成的水合氢氧化物堵塞 MAO 膜孔隙和裂纹, SiO_2 溶胶封闭机制为 MAO 膜表面形成凝胶层;

3) 三种封闭处理方式均可不同程度地提高 MAO 膜的耐蚀性,耐蚀性能改善效果为:MAO+Si>MAO+Cr>MAO+Ce, $Ce(NO_3)_3$ 和 $K_2Cr_2O_7$ 封闭处理的 MAO 膜层仍然存在腐蚀破坏现象,而 SiO_2 溶胶封闭处理的 MAO 膜能够使 7A85 铝合金基体在酸性 NaCl 溶液中免受腐蚀。

参考文献:

- [1] WANG D, NI D R, MA Z Y. Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, **494**(1): 360–366.
- [2] GUO Q, JIANG B, LI J, *et al.* Corrosion resistance of micro-arc oxidized ceramic coating on cast hypereutectic alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, **20**(11): 2204–2207.
- [3] KUNG K, LEE T, CHEN J, *et al.* Characteristics and biological responses of novel coatings containing strontium by micro-arc oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 2010, **205**(6): 1714–1722.
- [4] RAJ V, MUBARAK ALI M. Formation of ceramic alumina nanocomposite coatings on aluminium for enhanced corrosion resistance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(12): 5341–5352.
- [5] GUO H F, AN M Z, HUO H B, *et al.* Microstructure characteristic of ceramic coatings fabricated on magnesium alloys by micro-arc oxidation in alkaline silicate solutions. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(22): 7911–7916.
- [6] WEI T, YAN F, TIAN J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, **389**(1): 169–176.
- [7] TIAN J, LUO Z, QI S, *et al.* Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **154**(1): 1–7.
- [8] YU JIE, WEI DONG-BO, WANG YAN, *et al.* Structure and property of micro-arc oxidation coating modified by laser melting and solidifying on aluminum alloy. *Journal of Inorganic Materials*, 2013, **28**(8): 859–863.
- [9] CHU C L, HAN X, XUE F, *et al.* Effects of sealing treatment on corrosion resistance and degradation behavior of micro-arc oxidized magnesium alloy wires. *Applied Surface Science*, 2013, **271**: 271–275.
- [10] ZHANG Y, BAI K, FU Z, *et al.* Composite coating prepared by micro-arc oxidation followed by Sol-Gel process and *in vitro* degradation properties. *Applied Surface Science*, 2012, **258**(7): 2939–2943.
- [11] ZHU M H, CAI Z B, LIN X Z, *et al.* Fretting wear behaviors of micro-arc oxidation coating sealed by grease. *Wear*, 2009, **267**(1): 299–307.
- [12] CHENG Y, XUE Z, WANG Q, *et al.* New findings on properties of plasma electrolytic oxidation coatings from study of an Al-Cu-Li alloy. *Electrochimica Acta*, 2013, **107**: 358–378.
- [13] DECROLY A, PETITJEAN J. Study of the deposition of cerium oxide by conversion on to aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2005, **194**(1): 1–9.
- [14] VEYS-RENAUX D, ROCCA E, MARTIN J, *et al.* Initial stages of AZ91 Mg alloy micro-arc anodizing: Growth mechanisms and effect on the corrosion resistance. *Electrochimica Acta*, 2014, **124**: 36–45.
- [15] YE Z, LIU D, LI C, *et al.* Effect of shot peening and plasma electrolytic oxidation on the intergranular corrosion behavior of 7A85 aluminum alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, **27**(4): 705–713.