

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.003

封孔处理对建筑铝材复合阳极氧化膜耐蚀性的影响

刘艳芬¹, 陈昭怡^{2*}

(1. 山西工程科技职业大学, 山西 晋中 030619; 2. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 以常用建筑铝材—6061 铝合金作为基体, 在添加 PTFE 乳液的电解液中制备复合阳极氧化膜, 然后分别采用锆盐溶液、锂盐溶液对复合阳极氧化膜进行封孔处理, 并与沸腾去离子水和镍盐溶液的封孔效果作比较。结果表明: 复合阳极氧化膜在不同溶液中封孔处理后表面致密性都好于未封孔复合阳极氧化膜, 耐蚀性有不同程度提高, 但厚度未增加。锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜表面致密性良好, 主要成分为 Al、O、S、C、F 和 Li 元素, 其质量损失和腐蚀速率仅为 28.74 mg/dm^2 和 $1.04 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$, 腐蚀电流密度 ($9.52 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) 较未封孔复合阳极氧化膜的降低幅度接近一个数量级, 表现出优异耐蚀性。在锂盐溶液封孔过程中会发生反应生成水合氧化铝、氢氧化铝和氢氧化锂等物质, 协同作用起到更好的双重封孔效果, 有效的抑制腐蚀介质腐蚀并降低腐蚀速率, 因而锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的耐蚀性好于沸腾去离子水、镍盐溶液或锆盐溶液封孔后复合阳极氧化膜。

关键词: 复合阳极氧化膜; 建筑铝材; 耐蚀性; 封孔处理; 锂盐溶液

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

Effect of sealing treatment on corrosion resistance of composite anodic oxide film on construction aluminum

Liu Yanfen¹, Chen Zhaoyi^{2*}

(1. Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China;

2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Taking common architectural aluminum material-6061 aluminum alloy as the substrate, composite anodic oxide film was prepared in the electrolyte with PTFE emulsion, and then sealed by zirconium salt and lithium salt solution respectively. The sealing effect of zirconium salt and lithium salt solution was compared with that of boiling deionized water and nickel salt solution. The results show that the surface compactness of the composite anodic oxide film after sealing treatment in different solution is better than that of unsealed counterpart, and the corrosion resistance is improved in different degrees, but the thickness is not increased. After sealing treatment in lithium salt solution, the composite anodic oxide film possesses good surface compactness and the components are mainly Al, O, S, C, F and Li elements. The mass loss and corrosion rate are only 28.74 mg/dm^2 and $1.04 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$, and the corrosion current density ($9.52 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) is nearly an order of magnitude lower than that of unsealed composite

收稿日期: 2024-06-13

修回日期: 2024-07-24

作者简介: 刘艳芬(1984—), 讲师, 研究方向为建筑结构材料, email: Liuyfen123@163.com

通信作者: 陈昭怡(1956—), 教授, 研究方向为机械材料、特种加工技术等, email: Edu_030619@163.com

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2019011007)

引用信息: 刘艳芬, 陈昭怡. 封孔处理对建筑铝材复合阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 13-19, 49.

Liu Yanfen, Chen Zhaoyi. Effect of sealing treatment on corrosion resistance of composite anodic oxide film on construction aluminum[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 13-19, 49.

anodic oxide film, indicating that the composite anodic oxide film after sealing treatment in lithium salt solution exhibits excellent corrosion resistance. During the sealing process in lithium salt solution, boehmite alumina, aluminum hydroxide and lithium hydroxide are generated by reactions, which can play a better double sealing effect, effectively inhibiting the corrosion of corrosive media and reduce the corrosion rate. Therefore, the corrosion resistance of the composite anodic oxide film after sealing treatment in lithium salt solution is better than that after sealing treatment in boiling deionized water, nickel salt solution or zirconium salt solution.

Keywords: composite anodic oxide film; construction aluminum; corrosion resistance; sealing treatment; lithium salt solution

复合阳极氧化膜是通过机械、物理或电化学作用使固体颗粒掺杂在常规阳极氧化膜中而获得^[1-2]。研究证实,复合阳极氧化膜的耐蚀性好于常规阳极氧化膜,在建筑、电子、化工等行业更具应用价值。以幕墙、窗框等铝合金材质的建筑构件为例,由于这类构件长期暴露在自然环境中遭受多种环境因素共同作用(如干湿交替、酸碱性介质腐蚀等),导致外观品质下降并且使用寿命缩短。通过表面处理制备一层复合阳极氧化膜作为有效防护层,可使建筑构件保持良好外观品质同时延长使用寿命。

尽管复合阳极氧化膜具有优良耐蚀性,但从建筑构件耐久性的角度考虑,有必要采取措施进一步提高复合阳极氧化膜的耐蚀性。费强等^[3]通过优化电解液中添加的颗粒质量浓度,获得具有优异耐蚀性的复合阳极氧化膜。钱建才等^[4]通过掺杂具有特殊功能的聚苯胺,获得耐蚀性优异的复合阳极氧化膜。但目前关于提高复合阳极氧化膜耐蚀性的研究较少,并且现有研究都是在阳极氧化阶段采取措施。本文借鉴常规阳极氧化膜后处理思路^[5-8],以常用建筑铝材—6061铝合金作为基体,在添加PTFE乳液的电解液中制备复合阳极氧化膜,并采用毒性低、对环境友好的锆盐溶液和锂盐溶液对复合阳极氧化膜进行封孔处理。通过与沸腾去离子水和镍盐溶液的封孔效果进行比较,旨在为进一步提高复合阳极氧化膜的耐蚀性提供参考。

1 实验

1.1 基体预处理

长和宽分别为50和20 mm、厚度1 mm的6061铝合金试样作为基体,采用羊毛抛光轮双面抛光后,浸入丙酮中利用其强溶解能力去除试样表面油污,再经过水洗和活化处理,迅速存放在干燥箱(HH2101A YYG02型)中。

1.2 复合阳极氧化膜制备

采用以硫酸为主要成分的电解液(200 g/L 98 wt.%硫酸),添加12 mL/L PTFE乳液,然后磁力搅拌4 h使PTFE颗粒在电解液中处于较均匀分散状态。将经过预处理的6061铝合金作为阳极,相同尺寸的铝板作为阴极,都浸入电解液中,通电情况下(设定电流密度为2 A/dm²)在6061铝合金表面制备复合阳极氧化膜。实验过程中,持续搅拌电解液并调控电解液温度为(30±1) °C。

1.3 复合阳极氧化膜封孔处理

选用氟锆酸钾作为主盐,溶于去离子水中配成锆盐溶液。选用醋酸锂和醋酸镁作为主盐,三乙醇胺作为络合剂,溶于去离子水中配成锂盐溶液。另外,选用硫酸镍作为主盐,醋酸钠和硼酸作为缓冲剂,溶于去离子水中配成镍盐溶液。表1所示为复合阳极氧化膜封孔处理使用的不同溶液主要成分。

表1 复合阳极氧化膜封孔处理使用的不同溶液主要成分

Tab.1 Main components of different solutions for sealing treatment of composite anodic oxide film

溶液类型	质量浓度/(g·L ⁻¹)						
	氟锆酸钾	醋酸锂	醋酸镁	三乙醇胺	硫酸镍	醋酸钠	硼酸
锆盐溶液	40	—	—	—	—	—	—
锂盐溶液	—	8	3	2	—	—	—
镍盐溶液	—	—	—	—	8	5	3

以悬挂方式将4个复合阳极氧化膜试样分别浸在预热至50℃的铅盐溶液、预热至90℃的锂盐溶液、预热至90℃的镍盐溶液、沸腾去离子水中进行封孔处理,封孔时间均为35 min。结束后使用去离子水冲洗4个试样,迅速吹干存放在干燥箱中。

1.4 性能测试

1.4.1 微观形貌与成分分析

预先将每个试样固定在离子溅射仪(SPT-20型)的工作台面,设定好参数喷金3 min。取出喷金后试样再固定在扫描电镜(JSM-7500型)的工作台面,观察未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的微观形貌。与此同时,采用能谱仪分析未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的成分。

1.4.2 厚度测定

采用涡流测厚仪(ED400型)测定未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的厚度,在每个试样表面标记3个位置,测定结果取平均值并计算误差棒。

1.4.3 封孔效果评价

依据GB/T 8753.1—2017标准,采用硝酸溶液预浸并结合磷铬酸溶液腐蚀法评价不同溶液对复合阳极氧化膜的封孔效果。先用多排挂钩挂住4个复合阳极氧化膜试样,浸入19℃、质量浓度为470 g/L的硝酸溶液中,静置10 min后取出。再浸入预热至38℃的磷铬酸溶液(20 g/L铬酸+35 mL/L磷酸+去离子水)中,静置15 min后取出,迅速吹干。采用精密电子天平(CP214型)称取每个试样腐蚀前后的质量,通过计算得到单位面积的质量损失(单位为mg/dm²),进而评价不同溶液对复合阳极氧化膜的封孔效果。

1.4.4 耐蚀性分析

将未封孔及封孔后复合阳极氧化膜试样与饱和甘汞电极和铂电极组成三电极体系,采用电化学工作站(Parstat 2273型)测试极化曲线,扫描速率为1 mV/s,腐蚀介质为氯化钠溶液(35 g/L)。采用Tafel外推法拟合极化曲线测试数据,根据拟合结果分析未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的耐蚀性。另外,根据公式^[9]计算未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀速率(v_{corr}),单位为mm/a,进一步分析它们的耐蚀性。

$$v_{\text{corr}} = 3.27 \times 10^{-3} \frac{M}{n\rho} J_{\text{corr}} \quad (1)$$

式中: M 为相对原子质量; n 为电极反应过程中得失电子数; ρ 为密度,g/cm³; J_{corr} 为腐蚀电流密度,A/cm²。对于铝合金表面复合阳极氧化膜,取 $M/n=9$,

$\rho=2.7 \text{ g/cm}^3$ 。

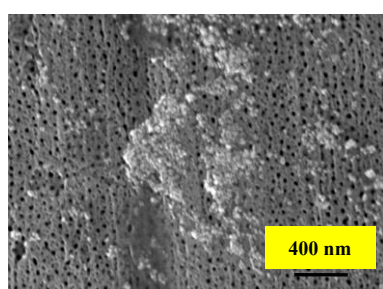
2 结果与讨论

2.1 复合阳极氧化膜的微观形貌与成分

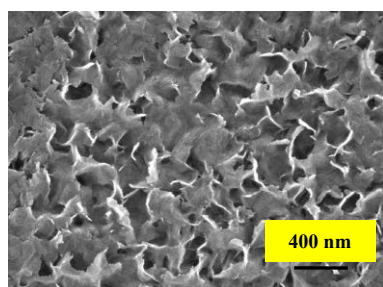
未封孔复合阳极氧化膜的SEM照片如图1(a)所示,封孔后复合阳极氧化膜的SEM照片如图1(b)~1(e)所示。由图1(a)可见,未封孔复合阳极氧化膜中掺杂着较多PTFE颗粒,还存在直径约40 nm、分布呈蜂窝状的微孔,以及少量尺寸超过200 nm的凹坑。由图1(b)可见,沸水封孔后复合阳极氧化膜表面的微孔明显减少,但出现较多尺寸超过200 nm、形态不规则的凹坑。由于在沸水封孔过程中发生反应式(2),会生成水合氧化铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)存在于微孔内部,高温条件下水合氧化铝体积膨胀逐渐封堵微孔,因而封孔后复合阳极氧化膜表面微孔较少。但水合氧化铝还可能沉积在复合阳极氧化膜表面,当局部区域沉积量多逐渐形成凸起,与沉积量少的区域存在高度差,从而形成较多形态不规则的凹坑。但沸水封孔后复合阳极氧化膜表面凹坑的成因与未封孔复合阳极氧化膜不同,前者是由于封孔过程中发生反应生成的物质不均匀沉积形成,凹坑通常较浅。后者则由于局部区域严重溶解形成,凹坑通常较深。因此,与未封孔复合阳极氧化膜相比,沸水封孔后复合阳极氧化膜的致密性较好。

由图1(c)可见,镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜表面微孔很少,基本被呈交错分布的鳞片状物所覆盖。在镍盐溶液封孔过程中既生成水合氧化铝(反应式(2)),也生成氢氧化镍(反应式(3)),都能沉积在微孔内部。高温条件下水合氧化铝体积膨胀,加之氢氧化镍逐渐沉积封堵,反应产物起到双重封孔效果使微孔数量减少,因而复合阳极氧化膜的致密性得以改善。与此同时,水合氧化铝和氢氧化镍还可能沉积在复合阳极氧化膜表面,遵循某种规律沉积从而形成交错分布的鳞片状物。从图1(d)看出,铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜表面较平整,仅存在少量颗粒状物,但是仍存在一些微孔。在铅盐溶液封孔过程中会生成两种铅氢氧化物(反应式(4)和(5))^[10-11],虽然都能沉积在微孔内部起到填充封堵效果。但由于铅盐溶液封孔过程是在中温条件下进行,生成铅氢氧化物的速度相对慢,因而封孔效果不理想,导致复合阳极氧化膜表面一些微孔未被封堵。同样的,两种铅氢氧化物还可能沉积在复合阳极氧化膜表面,当局部区域沉积量多逐渐形成颗粒状物。从图1(e)看出,锂盐溶液封孔后复合阳极氧化

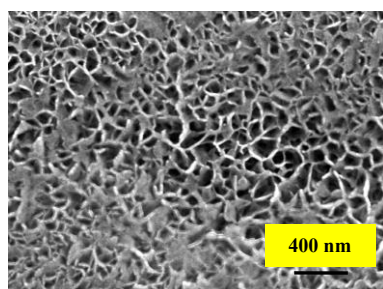
膜表面也被呈交错分布的鳞片状物所覆盖,微孔数量很少。但与镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜相比,覆盖在锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜表面的鳞片状物分布致密。在锂盐溶液封孔过程中会生成水合氧化铝、氢氧化铝和氢氧化锂等物质(反应式(2)、反应式(6)~(9)),都能沉积在微孔内部。高温条件下水合氧化铝体积膨胀,加之氢氧化铝和氢氧化锂逐渐沉积封堵,反应产物协同作用起到更好的双重封孔效果,因而锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜具有良好致密性。



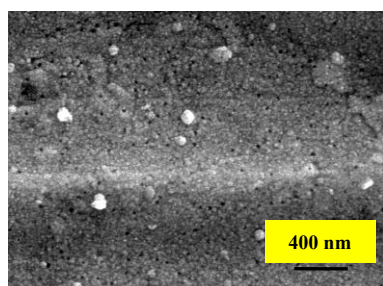
(a) 未封孔



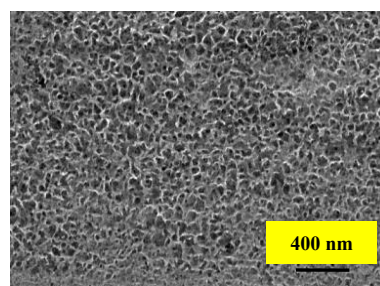
(b) 沸水封孔



(c) 镍盐溶液封孔



(d) 锂盐溶液封孔



(e) 锂盐溶液封孔

图1 未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的SEM照片

Fig.1 SEM image of unsealed composite anodic oxide film and the composite anodic oxide films after sealing treatment

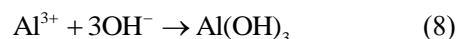
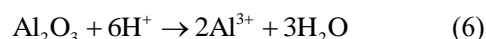
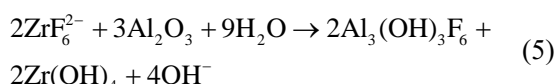
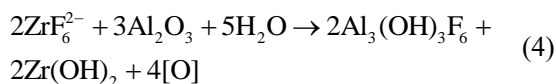
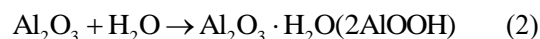
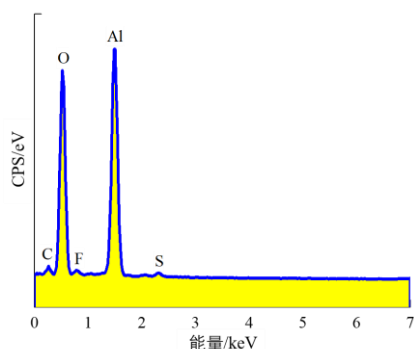
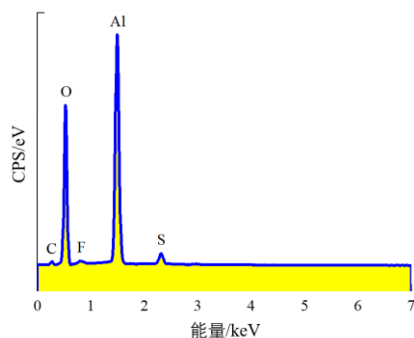


图2(a)为未封孔复合阳极氧化膜的能谱图,可知未封孔复合阳极氧化膜的主要成分为Al、O、S、C和F元素,检测到C和F元素可以证实有一定量PTFE颗粒参与阳极氧化过程从而形成复合阳极氧化膜。图2(b)为在不同溶液中封孔后复合阳极氧化膜的能谱图,可知沸水封孔后复合阳极氧化膜的主要成分与未封孔复合阳极氧化膜相同,由于在沸水封孔过程中只生成水合氧化铝,因而未引入新元素。图2(c)、图2(d)分别为镍盐溶液、锆盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的能谱图,可知经过镍盐溶液或锆盐溶液封孔后,复合阳极氧化膜的主要成分发生变化,除Al、O、S、C和F元素以外,相对应新增Ni元素、Zr元素。由于在镍盐溶液封孔过程中会生成氢氧化镍沉积在微孔内部或表面,因而Ni元素被引入复合阳极氧化膜中。在锆盐溶液封孔过程中会生成两种锆氢氧化物,都可能沉积在微孔内部或表面,因而Zr元素被引入复合阳极氧化膜中。图2(e)为锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的能谱图,可见Al、O、S、C和F元素的特征峰,但未显示Li元素的特征峰。原因是Li元素属于轻元素具有特殊的电子

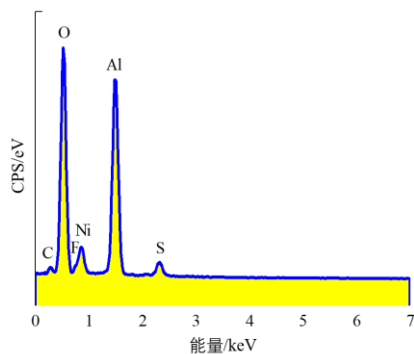
结构, 电子的能级分布和跃迁规律不同于重元素, 因而很难被检测。尽管如此, 通过分析SEM照片并结合相关学者提出的锂盐溶液封孔机理, 可以推断Li元素被引入复合阳极氧化膜中。



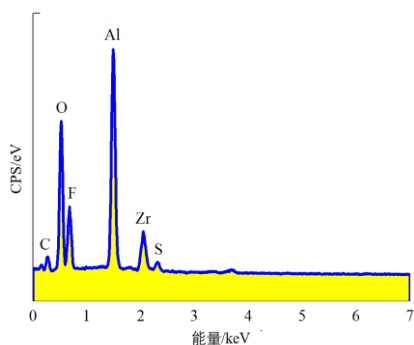
(a) 未封孔



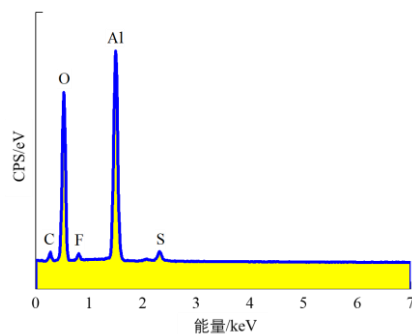
(b) 沸水封孔



(c) 镍盐溶液封孔



(d) 锆盐溶液封孔



(e) 锂盐溶液封孔

图 2 未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的能谱图

Fig.2 Energy spectrum of unsealed composite anodic oxide film and the composite anodic oxide films after sealing treatment

2.2 复合阳极氧化膜的厚度

未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的厚度如图3所示。可知未封孔复合阳极氧化膜的厚度约为20 μm , 经过沸水、镍盐溶液、锆盐溶液或锂盐溶液封孔处理后, 复合阳极氧化膜的厚度几乎未变。这表明封孔处理并未使复合阳极氧化膜明显增厚, 原因是在沸水、镍盐溶液、锆盐溶液或锂盐溶液封孔过程中发生反应生成的物质主要沉积在复合阳极氧化膜微孔内部, 起到填充封孔效果从而改善复合阳极氧化膜的致密性。

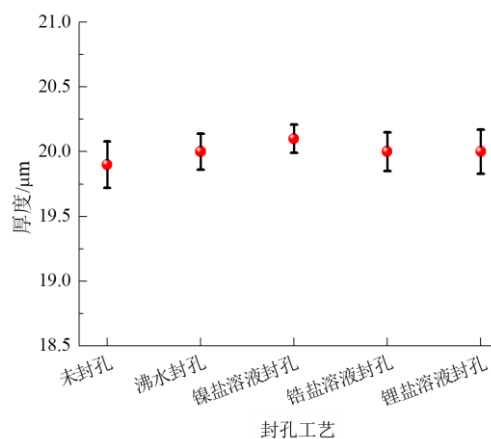


图 3 未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的厚度

Fig.3 Thickness of unsealed composite anodic oxide film and the composite anodic oxide films after sealing treatment

2.3 复合阳极氧化膜的封孔效果

封孔后复合阳极氧化膜的质量损失如图4所示。质量损失被公认为是评价阳极氧化膜耐蚀性的重要指标之一^[12-14]。由图4可知, 沸水封孔后复合阳

极氧化膜的质量损失最高,达到 60.52 mg/dm^2 。镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的质量损失降至 43.35 mg/dm^2 ,原因是在镍盐溶液封孔过程中生成的物质都能沉积在复合阳极氧化膜微孔内部,水合氧化铝体积膨胀,加之氢氧化镍逐渐沉积封堵,起到双重封孔效果,因而封孔后复合阳极氧化膜具有较好的表面致密性,耐腐蚀能力较沸水封孔后阳极氧化膜增强,表现为质量损失降低。铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的质量损失为 48.06 mg/dm^2 ,高于镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜,这是由于在铅盐溶液封孔过程中物质生成速度相对慢,封堵微孔效果不理想,由于一些微孔未被封堵导致铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜耐腐蚀能力与镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜相比较弱。锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的质量损失仅为 28.74 mg/dm^2 ,低于沸水、镍盐溶液和铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜。由于在锂盐溶液封孔过程中生成水合氧化铝、氢氧化铝和氢氧化锂等物质,水合氧化铝体积膨胀,加之氢氧化铝和氢氧化锂逐渐沉积封堵,起到更好的双重封孔效果,使得锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜具有良好表面致密性,能有效抵抗腐蚀,因而其质量损失最低。

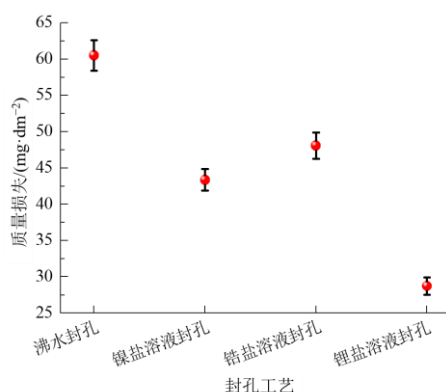


图4 封孔后复合阳极氧化膜的质量损失

Fig.4 Mass loss of the composite anodic oxide films after sealing treatment

2.4 复合阳极氧化膜的耐蚀性

未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的极化曲线如图5所示,表2为拟合得到的腐蚀电化学参数。结合图5和表2可知,沸水、镍盐溶液、铅盐溶液或锂盐溶液封孔处理使复合阳极氧化膜的腐蚀电位正移,腐蚀电流密度相对应降至 5.83×10^{-7} 、 1.64×10^{-7} 、 3.92×10^{-7} 和 $9.52 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀电位与沸水封孔后复合阳极氧

化膜相比正移约25 mV,腐蚀电流密度的降低幅度低于一个数量级。铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀电位与沸水封孔后复合阳极氧化膜相比正移幅度很小,腐蚀电流密度的降低幅度也低于一个数量级。锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀电位较沸水封孔后复合阳极氧化膜正移幅度最大,约38 mV,并且腐蚀电流密度的降低幅度接近一个数量级,仅为 $9.52 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 。通常选取腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(J_{corr})作为评价膜层耐蚀性的参考指标,腐蚀电位越正并且腐蚀电流密度越低,意味着膜层的耐蚀性越好^[15-20]。因此,锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜具有优异耐蚀性,主要原因在于:一方面,在锂盐溶液封孔过程中生成多种物质协同作用起到更好的双重封孔效果,使得封孔后复合阳极氧化膜表面微孔很少,与腐蚀介质的接触面积小,从而表现出弱腐蚀倾向。另一方面,锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜具有良好致密性,能有效抑制腐蚀介质扩散腐蚀,增大腐蚀过程阻力,因而表现出优异耐蚀性。

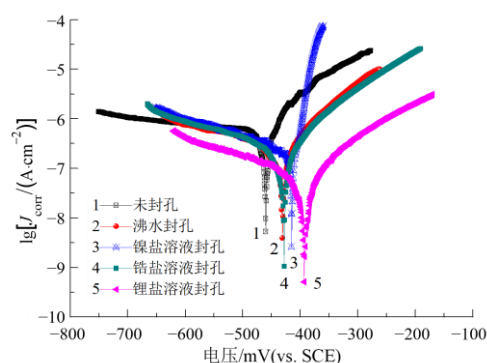


图5 未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of unsealed composite anodic oxide film and the composite anodic oxide films after sealing treatment

表2 极化曲线拟合得到的腐蚀电化学参数

Tab.2 Corrosion electrochemical parameters obtained by polarization curves fitting

不同复合阳极氧化膜	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
未封孔	-460.1	9.07×10^{-7}
沸水封孔	-431.2	5.83×10^{-7}
镍盐溶液封孔	-406.8	1.64×10^{-7}
铅盐溶液封孔	-428.3	3.92×10^{-7}
锂盐溶液封孔	-392.7	9.52×10^{-8}

未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀速率如图6所示。由图6可知,经过沸水、镍盐溶液、铅盐溶液或锂盐溶液封孔处理后,复合阳极氧化膜的腐蚀速率有不同程度降低。铅盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀速率为 $4.27 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$, 低于沸水封孔后复合阳极氧化膜,但是高于镍盐溶液封孔后复合阳极氧化膜和锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜。由于铅盐溶液对复合阳极氧化膜的封孔效果不如镍盐溶液和锂盐溶液,封孔后复合阳极氧化膜表面仍存在一些微孔,因而耐受腐蚀能力不太理想。锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀速率仅为 $1.04 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$,由于锂盐溶液对复合阳极氧化膜的封孔效果好于沸水、镍盐溶液和铅盐溶液,封孔后复合阳极氧化膜具有良好致密性,耐受腐蚀能力较强,因而其腐蚀速率最低,表现出优异耐蚀性。

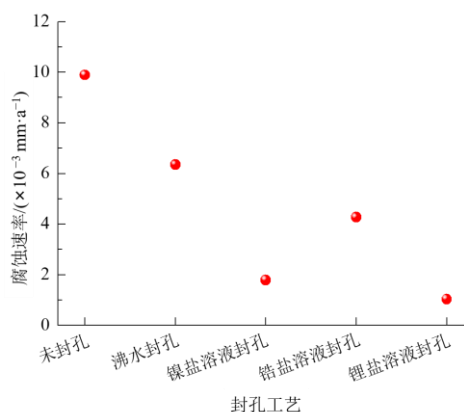


图 6 未封孔及封孔后复合阳极氧化膜的腐蚀速率

Fig.6 Corrosion rate of unsealed composite anodic oxide film and the composite anodic oxide films after sealing treatment

3 结 论

(1) 经过沸腾去离子水、镍盐溶液、铅盐溶液或锂盐溶液封孔处理后复合阳极氧化膜的致密性得以改善,耐蚀性有不同程度提高,主要原因是不同溶液的封孔效果存在差异。但封孔处理并未使复合阳极氧化膜明显增厚。

(2) 复合阳极氧化膜浸在锂盐溶液封孔过程中会发生反应生成水合氧化铝、氢氧化铝和氢氧化锂等物质,协同作用起到更好的双重封孔效果,因而锂盐溶液对复合阳极氧化膜的封孔效果好于沸腾去离子水、镍盐溶液和铅盐溶液。锂盐溶液封孔后复合阳极氧化膜具有良好致密性和优异耐蚀性,其质量损失和腐蚀速率仅为 28.74 mg/dm^2 、 $1.04 \times 10^{-3} \text{ mm/a}$,

腐蚀电流密度仅为 $9.52 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$,较未封孔复合阳极氧化膜的降低幅度接近一个数量级。

参考文献

- [1] 马骏, 苏冬云, 邹栋林. 添加 n-SiC 铝合金复合阳极氧化膜与硬质阳极氧化膜的磨擦磨损性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(9): 784-786.
- [2] 沟引宁, 张丁非, 郭星星, 等. 乙二胺四乙酸对 AZ31 镁合金复合阳极氧化膜性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(1): 169-174.
- [3] 费强, 金标, 张彤, 等. 锂电池铝合金散热片阳极氧化及耐蚀性研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(9): 6-14.
- [4] 钱建才, 邹洪庆, 吕基成. 聚苯胺掺杂对 2A12 铝合金阳极氧化复合膜耐蚀性的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(2): 3-6.
- [5] Queiroz F M, Bugarin A F S, Ayusso V H, et al. Investigation on the effect of a chromium-free sealing treatment for the corrosion resistance of AA2198-T851 after tartaric sulphuric anodizing (TSA)[J]. Corrosion and Materials Degradation, 2023, 4(2): 331-344.
- [6] Zhao H R, Chen X H, Yuan X J, et al. Effect of different sealing treatments of oxide films on corrosion resistance of anodized ZL101A aluminum alloy in simulated marine atmospheric environment[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(8): 220851.
- [7] Fang X P, Zeng Y Y, Mu S L, et al. Study on the effect of acetate ions on the sealing treatment for anodic oxide film of 6063 aluminum alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2023(472): 129961.
- [8] 周宏业, 敬旭初, 许晓文, 等. 建筑铝合金硫酸-苹果酸阳极氧化及混合溶液封孔[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(6): 16-24.
- [9] 张优, 陈楚平, 张政, 等. 电解液中铈盐对 LDH/AAO 复合膜层耐蚀性影响[J]. 中国表面工程, 2023, 36(5): 100-111.
- [10] 高培云. 铅盐封孔对建筑铝合金阳极氧化膜耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(5): 44-49.
- [11] 芦佳明, 王梅丰, 王夏妍, 等. 三价铬和铅盐对铝阳极氧化膜的协同封闭作用[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(4): 31-42.
- [12] 冯晓河. 大风沙地区铝合金接触网零部件表面处理的优选[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 84-88.