

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.02.004

纳米 La_2O_3 颗粒对建筑铝合金表面阳极氧化膜性能的影响

成张佳宁^{1,2*}, 黄坤坤²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 南通居者安建筑科学研究院有限公司, 江苏 南通 226019)

摘要: 以建筑行业常用的 6463 铝合金作为基材进行阳极氧化, 通过共沉积技术使纳米 La_2O_3 颗粒掺杂在阳极氧化膜中, 进一步提高其耐蚀性。研究了纳米 La_2O_3 颗粒添加浓度对阳极氧化膜的形貌、孔隙率、成分、表面润湿性和耐蚀性的影响。结果表明: 不加纳米 La_2O_3 颗粒时, 阳极氧化膜不致密且孔隙率较高, 表面呈亲水性, 耐蚀性相对较差。适量的纳米 La_2O_3 颗粒参与成膜过程, 使阳极氧化膜的致密性逐步提高, 孔隙率降低且成分发生变化, 表面由亲水性转变为疏水性, 耐蚀性明显提高。当纳米 La_2O_3 颗粒浓度为 2.2 g/L 时, 阳极氧化膜的孔隙率仅为 14.2%, La_2O_3 颗粒含量接近 2.60%, 表面致密且呈良好的疏水性, 其腐蚀电流密度较 6463 铝合金降低了接近两个数量级, 腐蚀失重仅为 1.39 g/m², 可以为 6463 铝合金提供更好的防护作用。

关键词: 阳极氧化膜; 纳米 La_2O_3 颗粒; 掺杂; 表面润湿性; 耐蚀性

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Influence of nano- La_2O_3 particles on performance of anodic oxide films on aluminum alloy for construction

Cheng Zhangjianing^{1,2*}, Huang Kunkun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Nantong Juzhean Architectural Research Institute Co., Ltd., Nantong 226019, China)

Abstract: The 6463 aluminum alloy commonly used in the construction industry was anodized as substrate, and nano- La_2O_3 particles were doped in the anodic oxide films by co-deposition technology to further improve its corrosion resistance. The influence of the concentration of nano- La_2O_3 particles on the morphology, porosity, components, surface wettability and corrosion resistance of the anodic oxide films was studied. The results show that the anodic oxide film is loosen with a relatively high porosity, the surface is hydrophilic and the corrosion resistance is relatively poor when the nano- La_2O_3 particles are not added. Appropriate amount of nano- La_2O_3 particles participate in the film formation process to gradually increase the compactness of the anodic oxide film, reduce the porosity and change the components. Moreover, the surface wettability changes from hydrophilic to hydrophobic, and the corrosion resistance is significantly improved. When the concentration of nano- La_2O_3 particles is 2.2 g/L, the porosity of anodized film is only 14.2%, the content of La_2O_3 particles is close to 2.60%, and the surface is compact and has good hydrophobicity. The corrosion current density decreases by nearly two orders of magnitude compared with 6463 aluminum alloy, and the corrosion weight loss is only 1.39 g/m²,

收稿日期: 2021-12-18

修回日期: 2022-02-14

作者简介: 成张佳宁(1993—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 建筑结构材料、腐蚀防护。

email: 776746576@qq.com

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划项目(K42014159)

indicating that the anodic oxide film can provide better protection for 6463 aluminum alloy.

Keywords: anodic oxide film; nano-La₂O₃ particles; doping; surface wettability; corrosion resistance

铝合金易于加工且具有密度小、力学性能良好等优点,广泛用于制造门窗框、屋架等建筑构件^[1-2]。由于建筑铝合金构件普遍暴露在自然环境中,易受雨水侵蚀和风化影响,当处在沿海地区的盐雾环境中时,较高浓度的氯离子沉降会导致铝合金表面发生点蚀和晶间腐蚀,降低建筑铝合金构件的耐久性。为尽可能避免雨水侵蚀及氯离子沉降对铝合金造成的腐蚀问题,人们采用阳极氧化^[3]、化学转化处理^[4]、粉末喷涂^[5]等工艺在铝合金表面制备不同类型防护膜。研究发现,阳极氧化膜具有很好的结合力,并且结构特殊(由阻挡层和多孔层构成),使其表现出相对较好的耐蚀性,因此得到更广泛的应用。

然而,常规阳极氧化膜存在孔隙率高、表面吸附能力强的问题^[6-7],长时间暴露在自然环境中,孔洞处会成为雨水和氯离子渗透的通道,逐渐失去防护作用从而加重铝合金基体腐蚀。为进一步提高常规阳极氧化膜的耐蚀性,通常进行封孔处理^[8-10]。但是封孔过程增加了额外环节,使阳极氧化工艺流程较繁琐且成本增加。在简化工艺过程又不显著增加成本的情况下,采取措施降低常规阳极氧化膜的孔隙率同时提高其耐蚀性,具有重要意义。笔者以建筑行业常用的 6463 铝合金作为基材,在含有稀土氧化物颗粒(纳米 La₂O₃ 颗粒)的电解液中进行阳极氧化,通过共沉积的原理使纳米 La₂O₃ 颗粒掺杂在阳极氧化膜中,旨在利用纳米 La₂O₃ 颗粒的特殊性质进一步提高阳极氧化膜的耐蚀性,对于保障建筑铝合金构件的耐久性具有参考价值。

1 实验

1.1 材料和试剂

实验所用材料:6463 铝合金试片(40 mm×22 mm×1 mm),化学成分(以元素质量分数计)为:Si 0.2 %~0.6 %、Mg 0.45 %~0.90 %、Cu 0.2 %、Fe 0.15 %、Mn 0.05 %,Al 余量。

试剂:浓硫酸、氢氧化钠、碳酸钠、硝酸和氯化钠等,均为分析纯,去离子水纯度为一级。纳米 La₂O₃ 颗粒的粒径约为 20 nm,纯度高于 99.9 %,经过预处理降低表面能后进行润湿。

1.2 阳极氧化膜的制备

用 1000#、2000# 砂纸逐级打磨铝合金试片直到表面平滑,然后在恒温 60 °C 的碱性溶液中(氢氧化钠 40 g/L+碳酸钠 12 g/L)浸泡 10 min 除油。接着在常温、体积分数 20 % 的硝酸溶液中浸泡 30 s 活化,用常温去离子水清洗后,立即吹干,放置于干燥箱中。

处理后的铝合金试片作为阳极,纯铝板作为阴极,都浸在恒温 24 °C 的电解液中,其成分为:浓硫酸 180 g/L+纳米 La₂O₃ 颗粒 0~3.0 g/L。电流密度设为 2 A/dm²,阳极氧化 50 min 后,取出铝合金试片。为了保证纳米 La₂O₃ 颗粒在电解液中能均匀分散,对电解液进行磁力搅拌,搅拌速率为 150 r/min。

1.3 性能测试

1.3.1 阳极氧化膜的形貌和成分

用 EV018 型扫描电镜和 X-max 50 型能谱仪对阳极氧化膜的形貌和成分进行表征分析,形貌表征放大 30 000 倍,能谱分析为面扫描模式。将扫描电镜拍摄的三个视场图像分别导入 Image J 软件中,提取孔洞特征得到阳极氧化膜的孔隙率,并取平均值。

1.3.2 阳极氧化膜表面润湿性

用 JC2000C1 型接触角测量仪测定阳极氧化膜的表面接触角,水滴体积为 4 μL,测量精度为 0.01 °。分别滴在阳极氧化膜表面 3 处不同位置,读取的接触角计算平均值以减小误差。

1.3.3 阳极氧化膜的耐蚀性

用 PARSTAT 2273 型电化学工作站测试阳极氧化膜的极化曲线,铂片、饱和甘汞电极和待测试样(暴露的工作面积为 10 mm×10 mm)分别作为辅助电极、参比电极和工作电极。极化曲线测试在室温下进行,电位从 -250 mV 到 250 mV,扫描速率为 1 mV/s。根据文献[11]给出的公式,计算阳极氧化膜对铝合金的保护效率。

用 ASR-90 型盐雾箱进行中性盐雾实验,质量分数 5 % 的氯化钠溶液作为腐蚀介质,雾化后连续喷洒 96 h,沉降对待测试样表面。盐雾箱内温度控制在 35±2 °C,实验结束后用常温去离子水清洗试样,清除腐蚀产物后立即吹干,用 AB-204S 型电子

天平称重,计算阳极氧化膜的腐蚀失重。结合腐蚀电位、腐蚀电流密度、保护效率以及腐蚀失重等参数,评价阳极氧化膜的耐蚀性。

2 结果与讨论

2.1 纳米 La_2O_3 颗粒对阳极氧化膜形貌的影响

图1(a)为6463铝合金形貌,图1(b)~1(f)为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜形貌。由图1可知,在铝合金表面制备出了多孔结构的阳极氧化膜,表面分布着许多纳米级孔洞,并且纳米颗粒浓度对阳极氧化膜的形貌有一定影响。不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜表面孔洞较大,直径约40 nm,还存在少量尺寸接近200 nm的不规则孔洞。这些不规则孔洞是阳极氧化膜局部腐蚀溶解程度较严重所形成。添加 La_2O_3 颗粒后,随着颗粒浓度从0.6 g/L增加到2.2 g/L,阳极氧化膜表面的孔洞缩

小,其致密性逐步提高。主要原因:一方面, La_2O_3 颗粒附着在铝合金表面起到均化电流分布的作用,防止阳极氧化膜局部过热引起加速腐蚀溶解^[12-14],避免较大不规则孔洞的形成;另一方面, La_2O_3 颗粒参与阳极氧化膜形成过程,起到填充孔洞的作用,使孔洞直径缩小,同时也在某种程度上降低阳极氧化膜腐蚀溶解程度,从而提高致密性。

但当继续增加电解液中纳米 La_2O_3 颗粒的浓度时,阳极氧化膜表面的孔洞增大,致密性降低,表面还附着一些白色团簇颗粒,如图1(f)所示。这些团簇颗粒可能是纳米 La_2O_3 颗粒浓度较高的情况下发生了一定程度的团聚,附着在阳极氧化膜表面,团聚效应还会导致掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒减少,填充孔洞以及降低阳极氧化膜腐蚀溶解程度的作用减弱,从而表现为阳极氧化膜的致密性降低。

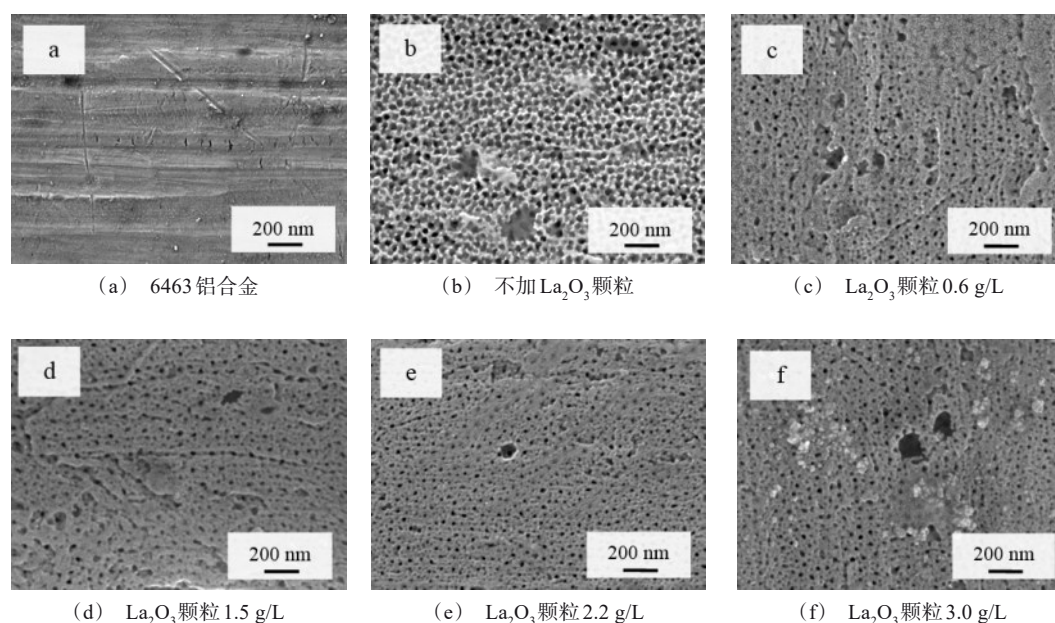
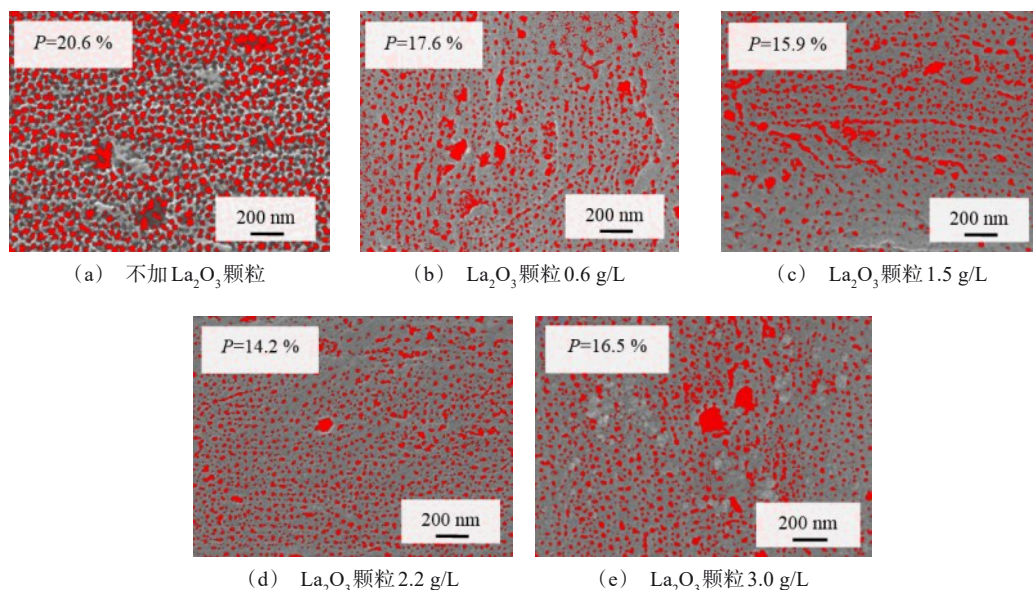


图1 6463铝合金和不同阳极氧化膜的形貌

Fig.1 Morphology of 6463 aluminum alloy and different anodic oxide films

图2为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面孔洞特征提取结果,孔洞(红色填充区域)面积所占的百分比定义为阳极氧化膜的孔隙率(P)。不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜的孔隙率较高,约为20.6%。添加 La_2O_3 颗粒后,随着颗粒浓度从0.6 g/L增加到2.2 g/L,阳极氧化膜的孔隙率呈降低趋势,从17.6%降低到14.2%,表

明适量 La_2O_3 颗粒的添加使阳极氧化膜的致密性逐步改善。当 La_2O_3 颗粒浓度为2.2 g/L时,阳极氧化膜的孔隙率仅为14.2%,致密性良好。但继续增加 La_2O_3 颗粒浓度,阳极氧化膜的孔隙率反而升高到16.5%,表明 La_2O_3 颗粒浓度较高的情况下,导致阳极氧化膜的致密性降低。

图 2 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面孔洞特征提取结果Fig.2 Extraction results of hole characteristics on the surface of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

2.2 纳米 La_2O_3 颗粒对阳极氧化膜成分的影响

表 1 为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜成分。由表 1 可知,不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜主要由 Al、O 和 S 三种元素构成。添加 La_2O_3 颗粒后,阳极氧化膜由 Al、O、S 和 La 四种元素构成。配制电解液时未使用铈盐试剂,所以 La 元素的存在证实 La_2O_3 颗粒参与成膜过程,掺杂在阳极氧化膜中。

表 1 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜成分Tab.1 Components of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

纳米 La_2O_3 颗粒 浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	元素质量分数/%			
	Al	O	S	La
0	48.34	47.26	4.40	—
0.6	48.25	46.72	4.75	0.28
1.5	48.19	46.83	4.01	0.97
2.2	47.82	46.64	3.98	1.56
3.0	47.79	47.18	4.19	0.84

随着颗粒浓度从 0.6 g/L 增加到 2.2 g/L,阳极氧化膜中 La 元素质量分数呈升高趋势,换算成 La_2O_3 颗粒,含量为从 0.47 % 升高到 2.60 %。这表明适量添加 La_2O_3 颗粒使掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒增多,颗粒弥散分布可以填充阳极氧化膜的孔洞,并

在某种程度上降低腐蚀溶解程度,有利于提高阳极氧化膜的性能。但继续增加 La_2O_3 颗粒浓度,阳极氧化膜中 La 元素质量分数呈降低趋势, La_2O_3 颗粒含量降低到 1.39 %。由于 La_2O_3 颗粒浓度较高的情况下容易团聚,导致掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒减少。

图 3 为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面 La 元素分布。根据 La 元素分布情况,可以反映掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒的多少。当 La_2O_3 颗粒浓度为 0.6 g/L 时,La 元素分布较稀疏,说明掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒较少。随着颗粒浓度从 0.6 g/L 增加到 2.2 g/L,La 元素分布密度增加,说明掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒增多。但继续增加 La_2O_3 颗粒浓度达到 3.0 g/L,La 元素分布也较稀疏,印证了表 1 的分析结论。

2.3 纳米 La_2O_3 颗粒对阳极氧化膜表面润湿性的影响

图 4 为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面接触角。不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜表面接触角为 56.2° ,呈现亲水性。添加 La_2O_3 颗粒后,随着颗粒浓度从 0.6 g/L 增加到 2.2 g/L,阳极氧化膜表面接触角呈增大趋势,由亲水性转变为疏水性。这是由于 La_2O_3 颗粒经过预处理表面能很

低,掺杂在阳极氧化膜中可以降低表面能,与水的亲和力减弱,在某种程度上阻碍水滴铺展。当 La_2O_3 颗粒浓度为2.2 g/L时,阳极氧化膜表面接触角达到 129.3° (水滴形态如图5所示),呈现良好的疏水性。但继续增加 La_2O_3 颗粒浓度,阳极氧化膜表面接触角减小,与水的亲和力增强,失去疏水性。原因是:团聚效应导致掺杂在阳极氧化膜中的 La_2O_3 颗粒减少,降低阳极氧化膜表面能的效果减弱,难以有效阻碍水滴铺展。

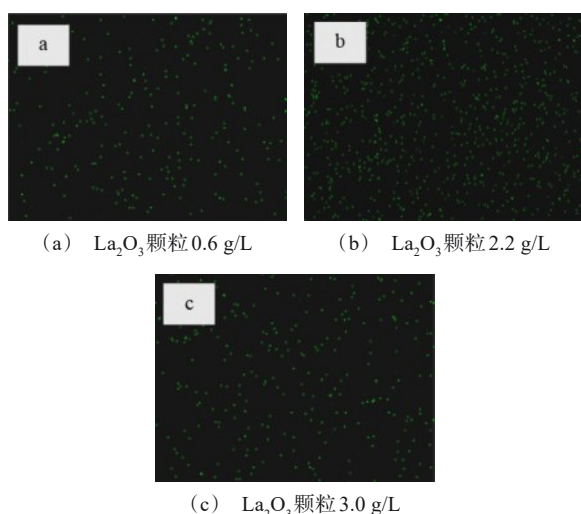


图3 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面La元素分布

Fig.3 Distribution of La element on the surface of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

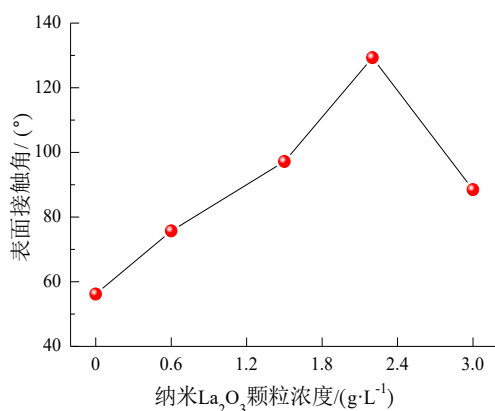


图4 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜表面接触角

Fig.4 Surface contact angle of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

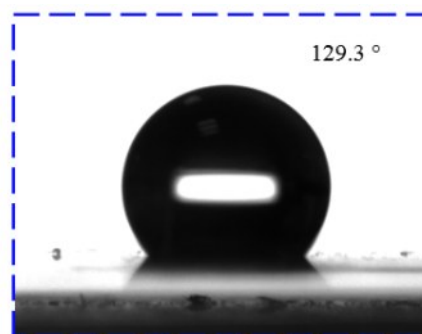


图5 阳极氧化膜表面水滴形态(2.2 g/L 纳米 La_2O_3)

Fig.5 Droplet appearance on the surface of anodic oxide film (2.2 g/L nano- La_2O_3)

2.4 纳米 La_2O_3 颗粒对阳极氧化膜耐蚀性的影响

2.4.1 极化曲线

图6为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜的极化曲线,表2为极化曲线拟合结果。

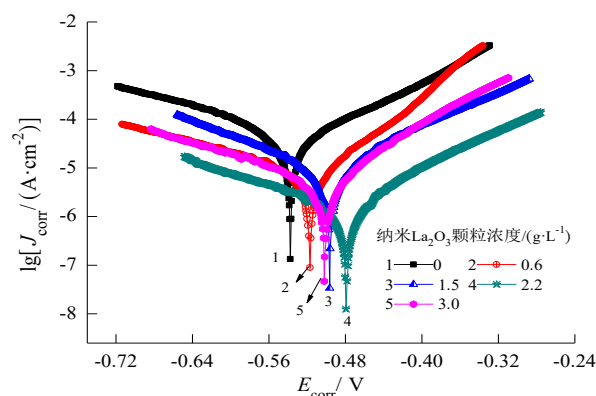


图6 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜极化曲线

Fig.6 Polarization curves of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

表2 极化曲线拟合结果

Tab.2 The fitting results of polarization curve

纳米 La_2O_3 颗粒浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
0	-0.536	5.02×10^{-5}
0.6	-0.517	1.63×10^{-5}
1.5	-0.492	7.58×10^{-6}
2.2	-0.469	3.09×10^{-6}
3.0	-0.504	8.95×10^{-6}

由表2可以看出,随着颗粒浓度从0 g/L增加到3.0 g/L,阳极氧化膜的腐蚀电位呈先正移后负移的

趋势,腐蚀电流密度先降低后增加,这表明适量的 La_2O_3 颗粒掺杂在阳极氧化膜中能提高其耐蚀性。主要原因:一方面,适量的 La_2O_3 颗粒掺杂降低了阳极氧化膜表面能,使其呈疏水性,阻止腐蚀介质与表面接触,从而在一定程度上抑制电化学腐蚀;另一方面,适量的 La_2O_3 颗粒参与阳极氧化膜形成过程,起到填充孔洞、降低阳极氧化膜腐蚀溶解程度的作用,使阳极氧化膜的致密性提高,能有效抑制电化学腐蚀,并且表面会形成一层较致密的腐蚀产物膜,阻止腐蚀进一步发展^[15-16]。当 La_2O_3 颗粒浓度为 2.2 g/L 时,阳极氧化膜的腐蚀电位最正且腐蚀电流密度最低,较铝合金的腐蚀电流密度(约 $1.09 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$)降低了接近两个数量级。但 La_2O_3 颗粒浓度较高的情况下,团聚效应导致阳极氧化膜表面失去疏水性,无法有效阻隔腐蚀介质,因此阳极氧化膜的腐蚀倾向增强,耐蚀性下降。

图 7 为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜对 6463 铝合金的保护效率。

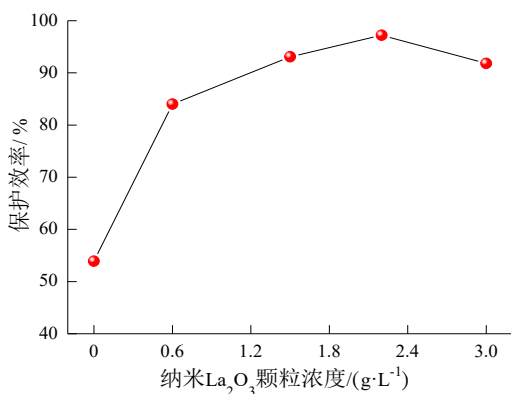


图 7 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜对 6463 铝合金的保护效率

Fig.7 Protection efficiency of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles on 6463 aluminum alloy

从图 7 可以看出,不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜对铝合金的保护效率为 53.9%,相对较低。添加 La_2O_3 颗粒后,阳极氧化膜对铝合金的保护效率发生变化,随着颗粒浓度从 0 g/L 增加到 3.0 g/L,呈先升高后降低的趋势。当 La_2O_3 颗粒浓度为 2.2 g/L 时,阳极氧化膜对铝合金的保护效率最高,达到 97.2%,较不加 La_2O_3 颗粒时制备的阳极氧化膜保护效率显著提高。文献[17-20]报道,保护效率反映阳

极氧化膜对铝合金的保护作用的强弱,越高表明阳极氧化膜具有更好的耐蚀性,可以为铝合金提供更好的防护作用。

2.4.2 盐雾实验

图 8 为不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜腐蚀失重情况。从图 8 可以看出,不加 La_2O_3 颗粒时,常规阳极氧化膜的腐蚀失重为 2.08 g/m^2 ,相对较高。添加 La_2O_3 颗粒后,随着颗粒浓度从 0 g/L 增加到 2.2 g/L,腐蚀失重呈降低趋势,最低仅为 1.39 g/m^2 ,较铝合金的腐蚀失重(约 3.21 g/m^2)显著降低。由于适量的 La_2O_3 颗粒掺杂起到填充孔洞、提高阳极氧化膜致密性的作用,增大了腐蚀阻力,较好地抑制氯离子穿透阳极氧化膜对铝合金基体造成腐蚀。另外,适量的 La_2O_3 颗粒掺杂降低了阳极氧化膜表面能,使其呈现疏水性,阻止了腐蚀介质与表面接触,从而减轻阳极氧化膜腐蚀程度。但继续增加 La_2O_3 颗粒浓度时,由于颗粒团聚效应,导致阳极氧化膜表面孔洞增大、致密性降低,阻挡氯离子侵蚀的能力减弱,孔洞逐渐成为腐蚀通道,使得阳极氧化膜腐蚀程度加重,表现为腐蚀失重增加。

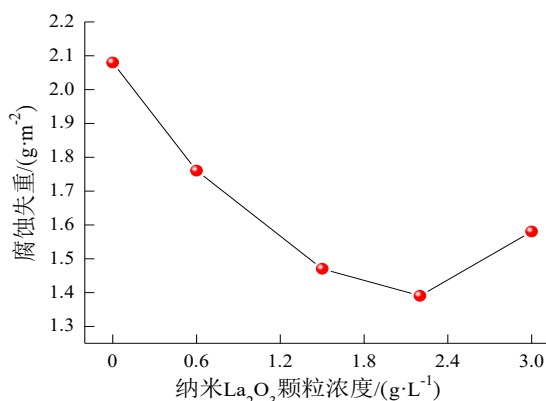


图 8 不同纳米 La_2O_3 颗粒浓度下制备的阳极氧化膜腐蚀失重

Fig.8 Corrosion weight of anodic oxide films prepared under different concentration of nano- La_2O_3 particles

3 结论

(1) 纳米 La_2O_3 颗粒浓度对阳极氧化膜的形貌、孔隙率、成分、表面润湿性和耐蚀性均有一定影响。适量的纳米 La_2O_3 颗粒掺杂可以降低阳极氧化膜腐蚀溶解程度,同时起到填充孔洞、降低孔隙率的作

用,使阳极氧化膜的致密性提高,表面呈疏水性,对腐蚀介质的阻挡能力增强,进一步提高耐蚀性。但纳米 La_2O_3 颗粒浓度过高时容易团聚,填充孔洞以及降低阳极氧化膜腐蚀溶解程度的作用减弱,导致阳极氧化膜的致密性降低,表面失去疏水性,耐蚀性下降。

(2)当纳米 La_2O_3 颗粒浓度为2.2 g/L时,阳极氧化膜的孔隙率仅为14.2%,致密性良好,掺杂的 La_2O_3 颗粒含量接近2.60%。并且表面接触角达到 129.3° ,呈现良好的疏水性。该阳极氧化膜的耐蚀性最好,腐蚀失重仅为 1.39 g/m^2 ,腐蚀电流密度较6463铝合金降低了接近两个数量级且保护效率达到97.2%,可以为6463铝合金提供更好的防护作用。

参考文献

- [1] 袁翔, 姜永刚. 建筑铝合金表面处理技术的现状与发展[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(3): 53-56.
- [2] 何琼. 酒石酸阳极氧化及封闭对建筑铝合金耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(9): 19-24.
- [3] Yu Y D, Ge H L, Wei G Y, et al. 2024 aluminum oxide films prepared by the innovative and environmental friendly oxidation technology[J]. Surface Review and Letters, 2020, 27(12): 2050020.
- [4] Wang X, Zhan W, Gui B Y. Effect of cerium nitrate and salicylic acid on the titanium-zirconium chemical conversion coating of 6061 aluminum alloy[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(2): 205-213.
- [5] Rudawska A, Wahab M A. The effect of cathaphoretic and powder coatings on the strength and failure modes of EN AW-5754 aluminium alloy adhesive joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019(89): 40-50.
- [6] 彭蓉, 杨武霖, 符立才, 等. 低孔隙率阳极氧化铝膜的制备及其高绝缘特性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 964-970.
- [7] 沈亚光. 铝氧化装饰工艺[J]. 电镀与环保, 2005, 25(5): 23-24.
- [8] Fedel M, Franch J, Rossi S. Effect of thickness and sealing treatments on the corrosion protection properties of anodic oxide coatings on AA5005[J]. Surface and Coatings Technology, 2021(408): 126761.
- [9] Hao X L, Zhao N, Jin H H, et al. Nickel-free sealing technology for anodic oxidation film of aluminum alloy at room temperature[J]. Rare Metals, 2020, 40(6): 1-7.
- [10] 袁荷伟, 王培, 袁黎. 不同封孔方法对汽车用2036铝合金草酸氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 11-15.
- [11] 卢勇, 冯辉霞, 杨吉斌. 植酸-钒酸盐复合转化膜的制备及其耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2020, 53(6): 77-82.
- [12] 陈岁元, 李海雄, 杨弥珺, 等. 纳米SiC增强铝合金表面阳极氧化膜的组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(7): 952-955.
- [13] 沟引宁. 镁合金表面 Al_2O_3 纳米粒子增强阳极氧化膜成膜机制及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [14] 孙焕焕, 王辉. ZL101铝合金表面复合防护膜制备及膜层结构研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2013, 32(2): 68-71.
- [15] 赵全成, 罗来正, 黎小锋, 等. 两种典型大气环境下7A85铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 70-75.
- [16] 刘丽, 李佳蒙, 王书亮, 等. $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 分压比和浸泡时间对P110SS钢腐蚀产物膜结构和性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 30-40.
- [17] 张晨峰, 扈俊颖, 钟显康, 等. 双咪唑啉在 CO_2/O_2 环境中的缓蚀行为及其与巯基乙醇的复配性能[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 66-74.
- [18] 曾纪勇, 郭兴伍, 郭嘉成, 等. 镁合金表面新型高耐蚀性植酸化学转化膜的制备[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 230-237.
- [19] Wu Y, Yan R, Duan Y Y, et al. An environmental-friendly tannic acid/Zn conversion film with a good corrosion protection for iron[J]. Surfaces and Interfaces, 2021(24): 101078.
- [20] Akram W, Rafique F A, Maqsood N, et al. Characterization of PTFE film on 316L stainless steel deposited through spin coating and its anticorrosion performance in multi acidic mediums[J]. Materials, 2020, 13(2): 388.