

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.02.006

铝合金柠檬酸-硫酸阳极氧化及镍盐-铈盐协同封闭

凌付平^{1,2*}

(1. 江苏航运职业技术学院 教务处, 江苏 南通 226010; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 选用 2024 铝合金作为基体, 在柠檬酸和硫酸混合电解液中进行阳极氧化, 并在镍盐和铈盐混合封闭液中对氧化膜进行协同封闭处理。采用扫描电镜和能谱仪对氧化膜的微观形貌和表面成分进行了表征, 并通过静态接触角测试、极化曲线测试和腐蚀失重实验对氧化膜的表面润湿性和耐腐蚀性能进行了分析。结果表明: 柠檬酸-硫酸氧化膜表面致密性与硫酸氧化膜相比较好, 并且经过镍盐封闭、铈盐封闭及镍盐-铈盐协同封闭后, 柠檬酸-硫酸氧化膜的微观形貌、表面成分和表面润湿性发生变化, 耐腐蚀性能提高, 但是厚度基本不变。相比于镍盐和铈盐分别封闭柠檬酸-硫酸氧化膜, 镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性更好且呈较好的疏水性, 其腐蚀电流密度和腐蚀失重仅为 $1.03 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 对铝合金基体的保护效率达到 99.8%, 能更好地抵抗腐蚀, 从而显著提高铝合金的耐腐蚀性能。

关键词: 阳极氧化; 柠檬酸-硫酸电解液; 铝合金; 镍盐-铈盐; 协同封闭; 耐腐蚀性能

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Anodic oxidation of aluminum alloy in citric acid and sulfuric acid electrolyte and synergistic sealing with nickel salt and cerium salt

Ling Fuping^{1,2*}

(1. Academic Affairs Office, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: 2024 aluminum alloy was selected as the substrate for anodizing in a mixed electrolyte of citric acid and sulfuric acid, and then the oxide film was synergistically sealed in the nickel salt and cerium salt mixed solution. The morphology and surface composition of the oxide films were characterized by scanning electron microscope and energy disperse spectroscopy, and the surface wettability and corrosion resistance of the oxide films were analyzed by measuring static contact angle, polarization curve and corrosion weight loss. The results show that the surface compactness of the citric acid-sulfuric acid oxide film is better than that of the sulfuric acid oxide film. After nickel salt sealing, cerium salt sealing and synergistic sealing with nickel salt and cerium salt, the microstructure, surface components and surface wettability of the citric acid-sulfuric acid oxide film are changed, and the corrosion resistance is improved, but the thickness is basically unchanged. Compared with the citric acid-sulfuric acid oxide film after nickel salt sealing and cerium salt sealing respectively, the citric acid-sulfuric acid oxide film after synergistic sealing with nickel salt and cerium salt has better flatness, compactness and hydrophobicity. The corrosion current density and corrosion weight loss are only $1.03 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and

收稿日期: 2022-02-07

修回日期: 2022-03-03

*通信作者: 凌付平(1983—), 男, 硕士, 高级实验师, 高级工程师, email: teacher_ling88@126.com

基金项目: 南通市科技计划项目(MSZ21011)

0.30 g·m⁻², and the protection efficiency on aluminum alloy substrate reaches 99.8 %, indicating that the citric acid-sulfuric acid oxide film after synergistic sealing with nickel salt and cerium salt can better resist corrosion and significantly improve the corrosion resistance of aluminum alloy.

Keywords: anodic oxidation; citric acid and sulfuric acid electrolyte; aluminum alloy; synergistic sealing; nickel salt and cerium salt; corrosion resistance

阳极氧化是常用的铝合金表面处理工艺,可以使铝合金表面生成一层特殊结构的阳极氧化膜,赋予铝合金装饰效果和电绝缘性能,同时有效提高表面硬度和耐腐蚀性能^[1-4]。传统的阳极氧化工艺使用硫酸、草酸等电解液,这类电解液具有强腐蚀性,对阳极氧化膜溶解能力强,导致其孔隙率高、吸附性强。当处在较强腐蚀性环境中,阳极氧化膜的孔隙处会吸附腐蚀性离子从而加剧腐蚀。此外,这类电解液对环境危害较大,不符合当前环保要求。

柠檬酸对环境无害,而且酸性较弱。近年来已有学者将柠檬酸添加到硫酸和草酸电解液中,减轻了阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,有利于提高阳极氧化膜的耐腐蚀性能^[5-7]。然而,在柠檬酸-硫酸或柠檬酸-草酸电解液中生成的阳极氧化膜不能作为铝合金的耐久性防护层。为了进一步提高柠檬酸-硫酸氧化膜或柠檬酸-草酸氧化膜的耐腐蚀性能,有必要进行封闭处理。目前,有关柠檬酸-硫酸氧化膜或柠檬酸-草酸氧化膜封闭处理已有报道^[8-10],但多数是针对单一封闭方式(如铬酸盐封闭、沸水封闭、镍盐封闭等)的研究。单一封闭方式往往存在较严重的环境污染问题,或者封闭效果不彻底导致氧化膜的耐腐蚀性能不理想,难以满足现代工业对氧化膜的使用要求。在不增加工序且不大提高成本的前提下,对氧化膜进行协同封闭处理,有望实现两种乃至多种不同封闭方式的封闭效果叠加,显著提高氧化膜的耐腐蚀性能,从而使氧化膜更好地满足使用要求,具有重要意义。笔者选用2024铝合金作为基体在柠檬酸和硫酸混合电解液中进行阳极氧化,然后在镍盐和铈盐混合封闭液中对氧化膜进行协同封闭处理。

1 实验

1.1 试剂和材料

试剂包括氢氧化钠、硝酸、柠檬酸、硫酸(98%)和氯化钠等,均购于国药集团化学试剂有限公司。

材料为2024铝合金,切割成40.0 mm×25.0 mm×1.5 mm的试片,试片预处理流程:砂纸逐级打磨(1000~2000目砂纸)→碱洗除油(质量浓度50 g·L⁻¹的氢氧化钠溶液,65℃浸泡6 min)→清洗(常温去离子水)→酸洗活化(体积分数20%的硝酸溶液,常温浸泡30 s)→清洗(常温去离子水)→冷风吹干(吹风机)。

1.2 柠檬酸-硫酸阳极氧化

将预处理后的试片浸在柠檬酸-硫酸混合电解液中进行阳极氧化,铝板作为阴极,生成的阳极氧化膜命名为柠檬酸-硫酸氧化膜。与此同时,将预处理后的试片浸在硫酸电解液中进行阳极氧化做对比,生成的阳极氧化膜命名为硫酸氧化膜。表1为电解液成分和阳极氧化工艺条件。

表1 电解液成分和阳极氧化工艺条件

Tab.1 Composition of electrolyte and process conditions of anodic oxidation

电解液成分和工艺条件	柠檬酸-硫酸阳极氧化工艺	硫酸阳极氧化工艺
柠檬酸/(g·L ⁻¹)	150	—
硫酸/(g·L ⁻¹)	40	180
电流密度/(A·dm ⁻²)	2	2
温度/℃	37±0.5	20±0.5
氧化时间/min	45	45

1.3 镍盐-铈盐协同封闭

选用硫酸镍、醋酸钠和硼酸溶解在去离子水中,配制镍盐封闭液,然后添加硝酸铈配成镍盐和铈盐混合封闭液,具体成分为:硫酸镍6 g·L⁻¹、醋酸钠5 g·L⁻¹、硼酸2 g·L⁻¹、硝酸铈18 g·L⁻¹。与此同时,单独配制铈盐封闭液(硝酸铈18 g·L⁻¹)。

将柠檬酸-硫酸氧化膜在预热至90℃的镍盐和铈盐混合封闭液中浸泡30 min,进行镍盐-铈盐协同封闭,封闭后用清水冲洗,并迅速吹干。作为对比,将柠檬酸-硫酸氧化膜分别在镍盐封闭液、铈盐封闭液中浸泡30 min进行镍盐封闭、铈盐封闭,溶液温

度均为90℃,封闭后处理方法相同。

1.4 性能测试

采用MERLIN Compact型扫描电镜表征不同氧化膜的微观形貌,并用X-max 80型能谱仪分析不同氧化膜的表面成分。采用ED300型涡流测厚仪测量不同氧化膜的厚度,每个试样表面随机选取3个点,测量结果取平均值以降低误差。

采用JH-PHC型接触角测量仪测量不同氧化膜的静态接触角,进而评价表面润湿性。当静态接触角小于90°时,表明氧化膜表面呈亲水性,静态接触角越小,润湿性越好。当静态接触角大于90°时,表明氧化膜表面呈疏水性,静态接触角越大,越不容易被润湿。

采用CHI660E型电化学工作站测试不同氧化膜的极化曲线,铂电极作为辅助电极、饱和甘汞电极作为参比电极,工作电极为暴露面积1 cm²的氧化膜试样,腐蚀介质为3.5 wt.%氯化钠溶液。极化曲线的扫描电位相对于开路电位±250 mV,扫描速率为1 mV/s。根据测试数据拟合得到腐蚀电位、腐蚀电流密度和保护效率,见公式(1)所示,用于评价不同氧化膜的耐腐蚀性能。

$$\eta = \frac{J_{\text{corr}} - J_{\text{corr}}''}{J_{\text{corr}}} \times 100 \quad (1)$$

式中: η 表示保护效率,%; J_{corr} 表示铝合金基体的腐蚀电流密度, J_{corr}'' 表示氧化膜的腐蚀电流密度,单位均为A·cm⁻²。

另外,根据GB/T 10124—1988《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》,选用3.5%氯化钠溶液作为腐蚀介质,测试不同氧化膜浸泡18 d的腐蚀失重 W_{corr} ,见公式(2)所示。

$$W_{\text{corr}} = \frac{W_{\text{before}} - W_{\text{after}}}{S} \quad (2)$$

式中: W_{before} 、 W_{after} 分别表示试样腐蚀前后的质量,采用BSA124S型电子天平称量,单位均为g; S 表示试样表面积,单位为m²。

2 结果与讨论

2.1 氧化膜的微观形貌和表面成分

图1为不同氧化膜的微观形貌。可以看出,硫酸氧化膜和柠檬酸-硫酸氧化膜都呈多孔状形貌。但与硫酸氧化膜(图1(a))相比,柠檬酸-硫酸氧化膜表面的微孔缩小,不规则坑洞的数量也减少,如

图1(b)所示。这些微孔和坑洞是电解液对氧化膜腐蚀溶解造成的,由于柠檬酸和硫酸混合电解液对氧化膜腐蚀溶解程度减轻,所以生成的柠檬酸-硫酸氧化膜表面致密性较好。鉴于硫酸氧化膜的形貌质量较差,以下针对柠檬酸-硫酸氧化膜进行分析。

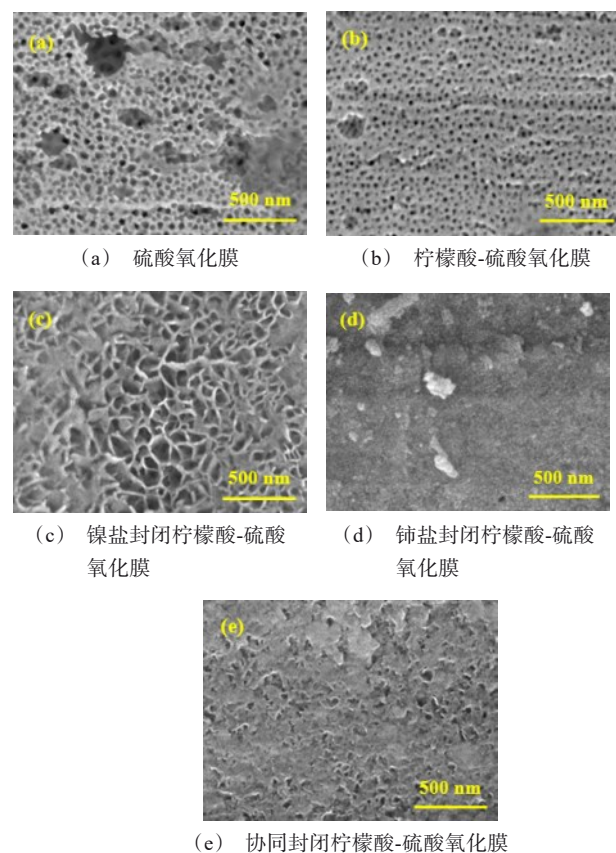


图1 不同氧化膜的微观形貌

Fig.1 Microstructure of different oxide films

经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜的微观形貌发生显著变化,封闭过程中反应产物沉积在孔洞中并覆盖在柠檬酸-硫酸氧化膜表面,有效填补了缺陷,使柠檬酸-硫酸氧化膜的致密性进一步改善。镍盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜呈花瓣状形貌,表面存在大量类似花瓣状的沉积物,分布较均匀,如图1(c)所示。铈盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜表面存在一些颗粒状的沉积物,局部颗粒堆积呈明显凸起,如图1(d)所示。镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜也呈类似花瓣状形貌,但表面沉积物细小,分布更加均匀,如图1(e)所示。相比于镍盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜和

铈盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜,镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性更好。

从封闭机理方面分析,镍盐封闭过程中发生氧化铝水合反应和镍离子沉淀反应,见反应式(3)和(4),生成勃姆体氧化铝和氢氧化镍,沉积在柠檬酸-硫酸氧化膜的微孔和表面,由于体积膨胀和沉积效应,起到填补封闭作用。铈盐封闭过程中发生氧化铝水合反应和铈离子沉淀反应,见反应式(3)和(5),生成勃姆体氧化铝和氢氧化铈,沉积在柠檬酸-硫酸氧化膜的微孔和表面,也起到填补封闭作用。另外,氢氧化铈逐步沉积在柠檬酸-硫酸氧化膜表面还可能形成一层较致密的胶体状薄膜^[11-12],起到一定的

覆盖封闭作用。镍盐-铈盐协同封闭过程中同时发生氧化铝水合反应、镍离子沉淀反应和铈离子沉淀反应,反应产物起到多重封闭作用,更好地填补和覆盖缺陷,所以镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性更好。



图2为不同氧化膜的EDS分析结果。由图2可知,经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜的表面成分发生变化。

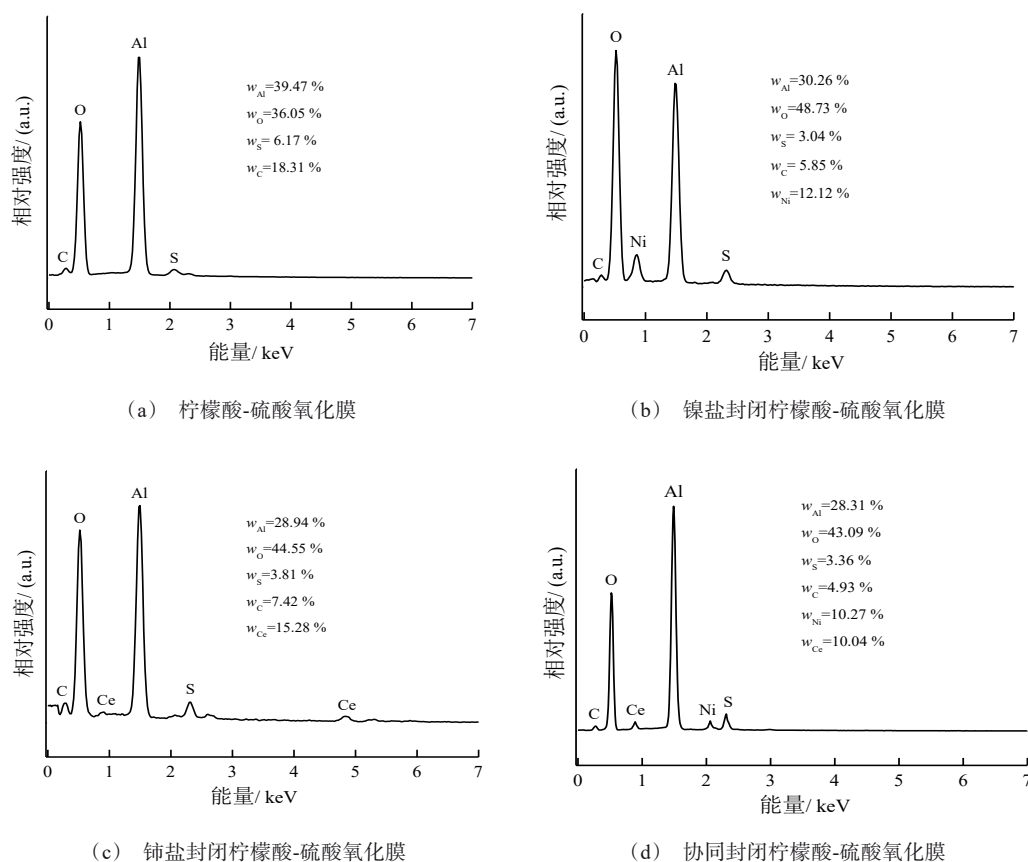


图2 不同氧化膜的EDS分析结果

Fig.2 EDS analysis results of different oxide films

镍盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的表面成分为Al、O、S、C和Ni元素,其中O元素的质量分数最高,达到48.73%,其次为Al元素的质量分数,为30.26%,S和C元素的质量分数均低于10%。Al和O元素是由于铝合金在柠檬酸和硫酸混合电解液中发生氧化

反应,S元素是由于 SO_4^{2-} 参与阳极氧化过程,从而生成含有硫酸根的氧化膜 $[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y]^{[13]}$ 。C元素可能是柠檬酸的羧基基团($-\text{COOH}$)参与阳极氧化过程,从而生成含有羧基基团的氧化膜^[14],Ni元素则是在封闭过程中以生成氢氧化镍形式沉积在

氧化膜表面。铈盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的表面成分为 Al、O、S、C 和 Ce 元素, O 元素的质量分数为 44.55 %, Al 元素的质量分数为 28.94 %, S 和 C 元素的质量分数也低于 10 %。Al、O、S 和 C 元素的存在机理与上述相同, Ce 元素是在封闭过程中以生成氢氧化铈形式沉积在氧化膜表面。镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的表面成分除了 Al、O、S 和 C 元素, 同时含有 Ni 和 Ce 元素, 质量分数分别为 10.27 %、10.04 %, 印证了上述的分析结论。这是由于镍盐-铈盐协同封闭过程中同时生成氢氧化镍和氢氧化铈, 都沉积在氧化膜表面, 由此引入 Ni 和 Ce 元素。

2.2 氧化膜的厚度和表面润湿性

图 3 为不同氧化膜的厚度。由图 3 可知, 经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后, 柠檬酸-硫酸氧化膜的厚度相差不大, 均为 13.5 μm 左右。虽然铈盐封闭和镍盐-铈盐协同封闭过程中可能生成一层薄膜覆盖在氧化膜表面, 但是对氧化膜的厚度基本没有影响。因此, 可以忽略因厚度不同对氧化膜的耐腐蚀性能造成的影响。

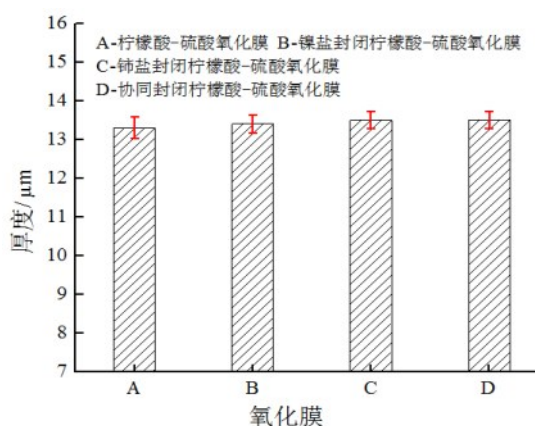


图3 不同氧化膜的厚度

Fig.3 Thickness of different oxide films

图 4 为不同氧化膜的静态接触角。根据静态接触角分析得知, 经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后, 柠檬酸-硫酸氧化膜的表面润湿性发生变化, 由亲水性转变为疏水性, 这有利于进一步改善柠檬酸-硫酸氧化膜的耐腐蚀性能。其原因是: 镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭过程中生成的反应产物沉积使得柠檬酸-硫酸氧化膜表面状况改变, 形成了粗糙结构, 与水的亲和性减弱。其中, 镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的静态

接触角最大(接近 125 $^{\circ}$), 呈较好的疏水性。分析其原因: 一方面是镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜表面具有粗糙结构, 使空气容易滞留, 减少了与氧化膜表面的接触面积。另一方面可能是镍盐-铈盐协同封闭过程中反应产物逐步沉积形成一层胶体状薄膜, 覆盖在氧化膜表面, 使其表面能降低, 水滴铺展受到阻碍, 不容易被润湿。

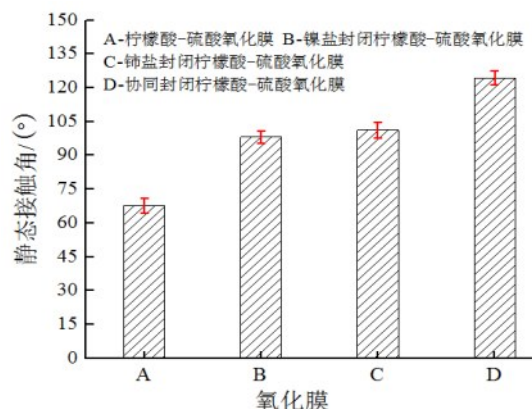


图4 不同氧化膜的静态接触角

Fig.4 Static contact angle of different oxide films

2.3 氧化膜的耐腐蚀性能

2.3.1 极化曲线分析

图 5 为不同氧化膜在 3.5 wt.% 氯化钠溶液中的极化曲线, 表 2 为与极化曲线相关的电化学腐蚀参数。腐蚀电位反映氧化膜的腐蚀倾向, 腐蚀电流密度则反映氧化膜的腐蚀速率^[15-17]。一般来说, 腐蚀电位越正且腐蚀电流密度越低, 氧化膜的耐腐蚀性能越好。

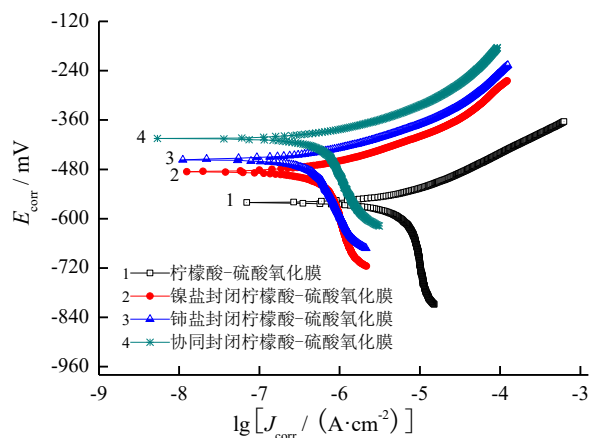


图5 不同氧化膜在 3.5 wt.% 氯化钠溶液中的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of different oxide films in 3.5 wt.% sodium chloride solution

结合图5和表2可知,经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀电位依次正移,腐蚀电流密度不同程度地降低。比较腐蚀电流密度的变化幅度发现,镍盐封闭和铈盐封闭使得柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀电流密度降低了1个数量级,而镍盐-铈盐协同封闭使得柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀电流密度降低了接近2个数量级。因此,相比于镍盐封闭和铈盐封闭,镍盐-铈盐协同封闭能显著改善柠檬酸-硫酸氧化膜的耐腐蚀性能。主要原因在于:一方面,镍盐-铈盐协同封闭氧化膜的平整度和致密性最好,封闭过程中的反应产物更好地填补和覆盖缺陷,有效阻挡腐蚀性离子以缺陷作为通道向氧化膜与铝合金基体结合界面扩散,增大了腐蚀阻力,抑制腐蚀发展;另一方面,镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜表面呈较好的疏水性,可以阻碍腐蚀介质铺展,增大了腐蚀性介质向氧化膜与铝合金基体扩散的阻力,也在一定程度上抑制腐蚀发展。

表2 与极化曲线相关的电化学腐蚀参数

Tab.2 Electrochemical corrosion parameters related to polarization curves

氧化膜	腐蚀电位/mV	腐蚀电流密度/ ($A \cdot cm^{-2}$)
柠檬酸-硫酸氧化膜	-560.8	9.35×10^{-6}
镍盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜	-485.2	9.02×10^{-7}
铈盐封闭柠檬酸-硫酸氧化膜	-455.7	6.01×10^{-7}
协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜	-404.6	1.03×10^{-7}

根据腐蚀电流密度得到不同氧化膜对铝合金基体的保护效率,如图6所示。由图6可知,经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜对铝合金基体的保护效率明显提高,分别达到98.4%、99.0%、99.8%。相比较而言,镍盐-铈盐协同封闭氧化膜对铝合金基体的保护效率最高,其耐腐蚀性能最好。一般来说,保护效率越高,氧化膜对铝合金基体的保护作用越好^[18-20]。由于镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性最好,缺陷被有效地填补和覆盖,使得腐蚀性离子向氧化膜内部渗透扩散受到抑制,从而更好地抵抗腐蚀,对铝合金基体起到良好的保护作用。

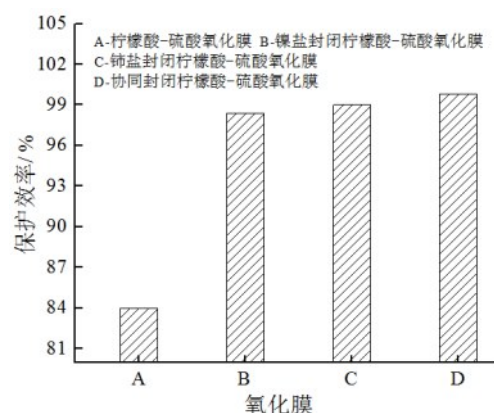


图6 不同氧化膜对铝合金基体的保护效率

Fig.6 Protection efficiency of different oxide films on aluminum alloy substrate

2.3.2 腐蚀失重分析

图7为不同氧化膜的腐蚀失重情况。由图7可知,在3.5 wt.%氯化钠溶液中浸泡18 d,柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀失重为 $1.68 g \cdot m^{-2}$,约为铝合金基体腐蚀失重的1/3。经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀失重明显降低,分别为 $0.57 g \cdot m^{-2}$ 、 $0.42 g \cdot m^{-2}$ 、 $0.30 g \cdot m^{-2}$ 。相比较而言,镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜的腐蚀失重最低,进一步证实其耐腐蚀性能最好。

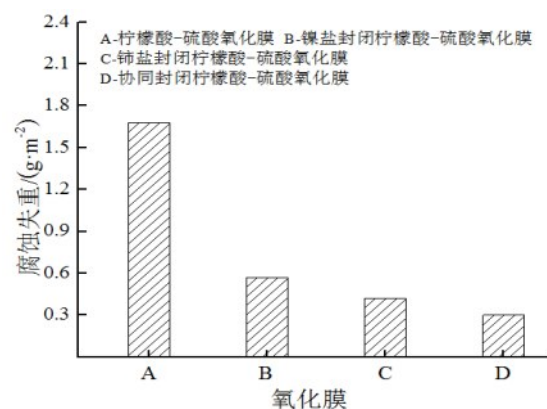


图7 不同氧化膜的腐蚀失重

Fig.7 Corrosion weight loss of different oxide films

很低的腐蚀失重是由于镍盐-铈盐协同封闭过程中生成的反应产物更好地填补和覆盖缺陷,使所得柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性最好,减少了腐蚀介质与氧化膜表面的接触面积,同时阻挡腐蚀性离子向氧化膜内部渗透扩散,有效地减缓腐蚀。另外,镍盐-铈盐协同封闭柠檬酸-硫酸氧化膜表面呈较好的疏水性,使得腐蚀介质的铺展受到阻

碍,增大了腐蚀性离子向氧化膜内部扩散的阻力,也在一定程度上减缓腐蚀,从而减轻镍盐-铈盐协同封闭氧化膜的腐蚀失重。

综上所述,在不增加工序且不大幅提高成本的前提下,镍盐-铈盐协同封闭能进一步提高柠檬酸-硫酸氧化膜的耐腐蚀性能,封闭效果优于单一镍盐封闭和铈盐封闭方式,而且不会产生较严重的环境污染问题。当氧化膜的使用工况对于耐腐蚀性能有着较高要求而且单一封闭方式效果不佳时,协同封闭处理有望获得满意的效果。

3 结论

(1)在柠檬酸和硫酸混合电解液中生成的氧化膜呈多孔状形貌,其致密性优于在硫酸电解液中生成的氧化膜。经过镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭后,柠檬酸-硫酸氧化膜的微观形貌、表面成分和表面润湿性发生变化,耐腐蚀性能提高,但是厚度基本不变。

(2)镍盐封闭、铈盐封闭以及镍盐-铈盐协同封闭过程中反应产物沉积在柠檬酸-硫酸氧化膜的孔洞中及表面,使其致密性进一步改善,有效阻挡腐蚀性离子渗透扩散,抑制腐蚀发展。镍盐-铈盐协同封闭过程中反应产物起到多重封闭作用,封闭后柠檬酸-硫酸氧化膜的平整度和致密性较好且呈良好的疏水性,其耐腐蚀性能较好,可以更好地保护铝合金基体抵抗腐蚀。镍盐-铈盐协同封闭是在单一封闭方式的基础上进行延伸和发展,或将成为铝合金阳极氧化膜封闭方式的发展趋势。

参考文献

- [1] 王英君,刘洪雷,王国军,等. 新型高强稀土 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 铝合金的阳极氧化及其抗腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 131-138.
- [2] 王宏智,吴心元,吕成斌,等. 3A21 铝合金本色阳极氧化膜的抗霉菌研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(7): 52-55.
- [3] Sun H O, Li L C, Wang Z Y, et al. Corrosion behaviors of microarc oxidation coating and anodic oxidation on 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Chemistry, 2020(2): 1-11.
- [4] 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.
- [5] 李小庆,唐楷,林东. 2024 铝合金硫酸-柠檬酸阳极氧化及膜层组织性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(9): 46-51.
- [6] 崔琳琳,庄向仕,陈雅兵. 电流密度对建筑用 6463 铝合金柠檬酸阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 1-5.
- [7] 邓型深,林雲松,黄宏庆,等. 草酸-柠檬酸中 6061 铝合金的阳极氧化[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(9): 417-420.
- [8] 孟祥凤. 铝合金阳极氧化膜的制备及其性能研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [9] Guo Y F, Zhang K, Liu L, et al. Effects of sealing process by sol-gel technology on corrosion and wear resistance of aluminum anodic oxide film[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(9): 182-187.
- [10] 苏奥,王磊,陈慧. 铝锂合金混合酸阳极氧化及无铬封闭研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 22-28.
- [11] Munir B, Soedarsono J W, Suharno B, et al. Corrosion resistance enhancement of an anodic layer on an aluminum matrix composite by cerium sealing[J]. International Journal of Technology, 2015, 6(7): 1191.
- [12] 刘莉,张鲲,骆晓伟,等. 铈盐封孔对 6061 铝合金阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(4): 274-278.
- [13] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [14] Ban C L, He Y D, Shao X. Effect of citric acid on microstructure and electrochemical characteristics of high voltage anodized alumina film formed on etched Al foils[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 133-138.
- [15] Feng C S, Lu T W, Wang T L, et al. A novel high-entropy amorphous thin film with high electrical resistivity and outstanding corrosion resistance[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021(34): 1537-1545.
- [16] Ahmadi R, Asadpourchallou N, Kaleji B K. In vitro study: Evaluation of mechanical behavior, corrosion resistance, antibacterial properties and biocompatibility of HAp/TiO₂/Ag coating on Ti₆Al₄V/TiO₂ substrate[J]. Surfaces and Interfaces, 2021(24): 101072.
- [17] 党在清. 镁合金复合镀层的制备及其结构与性能表征[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(11): 16-19.
- [18] 李雨萍,周吉成,刘元伟,等. 超疏水铝表面的一步法电化学制备及其耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2021, 54(6): 117-121.
- [19] 张庆华,张正旭,赵琦. 锰系磷化处理对汽车传动件材料耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(5): 38-43.
- [20] 史明淑. SUS304 表面防护性自组装复合膜的制备及其性能研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.