

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.03.005

植酸及铈盐溶液封闭对铝锂合金阳极氧化膜性能的影响

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2099铝锂合金作为基体, 制备阳极氧化膜, 研究了电解液中植酸体积分数对阳极氧化膜的微观形貌、成分、厚度、硬度、耐磨性和耐蚀性能的影响。结果表明: 添加适量植酸后, 促使形成较平整、结构致密的阳极氧化膜, 并使阳极氧化膜的厚度增加, 抵御弹塑性变形能力和阻碍电化学腐蚀能力增强, 因此硬度和耐蚀性能提高。而过量植酸的添加, 导致阳极氧化膜表面疏松, 厚度和硬度都降低, 耐蚀性能随之下降。当电解液中植酸体积分数为5 mL/L时, 制备的阳极氧化膜表面平整且结构致密, 其厚度为14.2 μm , 硬度达到360.5 HV, 电荷转移电阻与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比提高约 $1.58 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 表现出优良的耐蚀性能。该阳极氧化膜经铈盐溶液封闭后平整度和致密性明显改善, 成分除了4种元素Al、O、C和P外, 还含有Ce元素。封闭过程中反应产物的填补作用与覆盖封闭作用叠加, 使铈盐封闭后阳极氧化膜的耐蚀性能更好, 表现出优良的耐磨性能。

关键词: 铝锂合金; 阳极氧化膜; 植酸; 铈盐溶液封闭; 硬度; 耐蚀性能

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Effect of phytic acid and sealing treatment with cerium salt solution on properties of anodic oxidation films on aluminum-lithium alloy

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: The anodic oxidation films were prepared on 2099 aluminum-lithium alloy matrix, and the effects of the volume fraction of phytic acid in the electrolyte on the microstructure, composition, thickness, hardness, wear resistance and corrosion resistance of the anodic oxidation films were studied. The results showed that when the phytic acid was added, the anodic oxide film with relatively flat and dense structure was formed, and the thickness of the anodic oxide film was increased. The ability to resist elastic-plastic deformation and hinder electrochemical corrosion was enhanced, so the hardness and corrosion resistance were improved. However, adding excessive phytic acid would lead to the loose anodic oxidation film, the thickness and hardness were reduced, and the corrosion resistance was weakened. When the volume fraction of phytic acid added in the electrolyte was 5 mL/L, the anodic oxide film was smooth and compact with thickness of 14.2 μm and hardness up to 360.5 HV. The charge transfer resistance was increased by about $1.58 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ compared with the anodic oxidation film prepared without adding phytic acid, showing excellent corrosion resistance. The flatness and compactness of the anodic oxidation film were obviously improved after being sealing treatment with cerium

收稿日期: 2022-08-21

修回日期: 2022-09-22

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)

salt solution, and the composition included four elements of Al, O, C and P, and also contained Ce element. The filling effect of the reaction products generated in sealing process was superimposed with the covering effect, so that the corrosion resistance of the anodic oxidation film after sealing treatment with cerium salt solution was better, exhibiting excellent wear resistance.

Keywords: aluminum-lithium alloy; anodic oxidation film; phytic acid; sealing treatment with cerium salt solution; hardness; corrosion resistance

铝锂合金作为一种新型结构材料,具有密度低,比强度和比刚度高,成形性能、低温性能和抗疲劳性能好等特性,在航空航天、武器装备和船舶等领域中展现出广阔的应用前景^[1-3]。然而,锂元素非常活泼,导致铝锂合金暴露在潮湿环境中或与含氯盐、酸碱溶液接触时易被腐蚀。针对此问题,为了满足不同服役条件下的使用要求,通常利用表面处理工艺来提高铝锂合金的耐蚀性能。

阳极氧化工艺已被证实适用于铝锂合金表面处理^[4-8]。在阳极氧化过程中,除了优化工艺条件,还使用添加剂(即向电解液中添加无机盐、有机物等)来调控阳极氧化膜的综合性能^[9-10]。添加无机盐虽然能有效提高阳极氧化膜的硬度、耐磨和耐腐蚀等性能,但部分金属离子残留在电解液中会造成较严重的污染问题。而电解液中添加环保的有机物既能有效提高阳极氧化膜的综合性能,同时也不会造成较严重的环境污染问题。

植酸是一种环境友好型生物基化合物,特殊的分子结构赋予植酸强螯合能力,常用其作为添加剂,在制备微弧氧化膜、磷化膜和镀层中已有报道^[11-13]。然而,植酸作为添加剂,用于制备阳极氧化膜的研究鲜有报道。因此,本文选用2099铝锂合金作为基体,制备阳极氧化膜,研究电解液中植酸体积分数对阳极氧化膜性能的影响,确定最佳的植酸体积分数,从而为提高阳极氧化膜性能提供参考。此外,为进一步提高阳极氧化膜的综合性能,使用铈盐溶液对阳极氧化膜进行封闭处理。

1 材料与方法

1.1 材料

实验选用2099铝锂合金,其化学成分参见文献[14]。裁切成5.0 cm×3.0 cm×0.2 cm的待用试样,然后依次进行表面抛光→无水乙醇超声波清洗→热碱溶液浸泡(50℃、50 g/L的氢氧化钠溶液中浸泡

5 min)→热水清洗→酸洗活化(常温、100 g/L硝酸+10 mL/L氢氟酸混合溶液中浸泡40 s)→冷水清洗→烘干。

1.2 铝锂合金阳极氧化

铝锂合金阳极氧化实验中,采用预处理的铝锂合金试样作为阳极,纯铝板作为阴极,都浸在电解液中,电解液主要成分为:草酸50 g/L、植酸0~8 mL/L。实验过程中只改变植酸的体积分数,在铝锂合金表面制备不同阳极氧化膜。阳极氧化工艺条件为:电流密度2 A/dm²、温度20℃、阳极氧化时间50 min。

1.3 铈盐溶液封闭处理

将硝酸铈溶解在去离子水中,然后添加适量硝酸配成铈盐溶液,主要成分为:硝酸铈20 g/L、硝酸4 mL/L。将试样浸在铈盐溶液中对阳极氧化膜进行封闭处理,设置封闭工艺条件为:温度90℃、封闭时间30 min。

1.4 性能测试

1.4.1 微观形貌及成分

利用MERLIN Compact型扫描电镜表征不同阳极氧化膜的微观形貌,在加速电压10 kV下放大20 000倍。此外,选取扫描电镜视场的局部区域,利用X-max 80型能谱仪分析不同阳极氧化膜成分,得到各元素质量分数。

1.4.2 厚度

对试样预处理后,利用ED300型测厚仪测量不同阳极氧化膜的厚度。在每个试样表面任意取3个点,测量结果取平均值。

1.4.3 硬度

利用MV-TEST1000型维氏硬度计测定不同阳极氧化膜的硬度,同时测定铝锂合金的硬度作为对比。施加载荷为0.49 N,保持15 s后均匀卸载。在每个试样表面任意取5个点(呈十字交叉形),测定结果取平均值。

1.4.4 耐磨性能

利用 CETR-UMT-3 型多功能摩擦试验机进行摩擦磨损实验,摩擦副为直径 5 mm 的 GCr15 钢球。设置实验条件为:环境温度 25 °C、法向载荷 3 N、往复摩擦频率 5 Hz、行程 10 mm、摩擦时间 8 min。实验结束后清理每个试样表面的磨屑,然后浸在无水乙醇中超声波清洗并烘干,利用灵敏度为 0.1 mg 的电子天平称量每个试样摩擦磨损后的质量,求差值得到铝锂合金及不同阳极氧化膜的磨损失重。此外,利用 Micro Xam-800 型三维轮廓仪测量每个试样的磨损体积,根据文献[15]给出的公式计算铝锂合金及不同阳极氧化膜的磨损率。为了降低软件测量误差,每个试样的磨损体积为 3 条不同磨痕测量结果的平均值。

1.4.5 耐蚀性能

铝锂合金和不同阳极氧化膜试样作为工作电极,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。腐蚀介质选用 3.5 wt.% 的氯化钠溶液,铝锂合金及不同阳极氧化膜试样暴露在 3.5 wt.% 氯化钠溶液中的面积均为 1 cm²。三电极体系在 3.5 wt.% 氯化钠溶液中浸泡 1 h 获得稳定的开路电位,然后利用 CHI 660E 型电化学工作站进行电化学阻抗谱测试。扰动电位为 10 mV,测试频率范围 10⁻²~10⁵ Hz。利用 ZSimpWin 软件选取合适的等效电路拟合电化学阻抗谱测试数据,然后利用 Origin 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 添加植酸对阳极氧化膜微观形貌和成分的影响

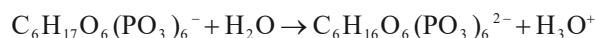
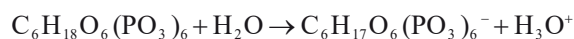
电解液中植酸体积分数为 0~8 mL/L 时,不同阳极氧化膜的微观形貌如图 1 所示。电解液中不添加植酸时,阳极氧化膜具有典型多孔状形貌,孔洞(图中黑点)和凹坑(图中黑色背景区域)呈无序分布,如图 1(a)所示。在阳极氧化过程中,同时发生阳极氧化膜形成和阳极氧化膜溶解两个对立又密切关联的反应,伴随着氢气析出,从而形成多孔结构的阳极氧化膜。而电解液中添加适量植酸后,制备的阳极氧化膜趋于平整致密,表面的孔洞和凹坑减少。

结合植酸分子结构分析认为,植酸具有羟基和磷酸基等活性基团,使其表现出很强的螯合特性,在电场作用下发生电离后带负电荷,极易与电解液中的铝离子结合生成性质稳定的植酸铝(参见如下方

程式)^[16]。在阳极氧化过程中,植酸铝参与阳极反应过程,附着在阳极氧化膜表面能局部阻隔电解液,从而在一定程度上减轻阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,使孔洞数量减少且不容易形成凹坑,促使形成较平整、结构致密的阳极氧化膜。此外,植酸铝还可能进入阳极氧化膜中。



植酸电离:



生成植酸铝:

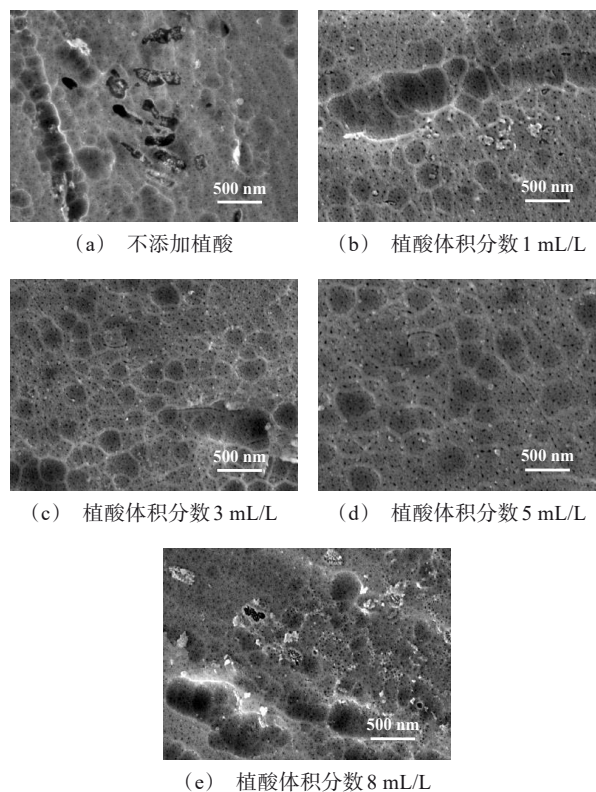
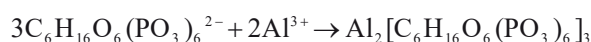


图 1 不同阳极氧化膜的微观形貌

Fig.1 Micro-morphology of different anodic oxidation films

当电解液中植酸体积分数为 5 mL/L 时,在阳极氧化过程中生成适量植酸铝,有效地减轻阳极氧化膜腐蚀溶解程度,因此制备的阳极氧化膜表面平整且结构致密。然而,电解液中添加过量植酸后,制备的阳极氧化膜表面结构疏松,孔洞和凹坑变大,数量都增多。分析认为,添加过量植酸导致在阳极氧化

过程中生成过量植酸铝,强附着效应虽然在很大程度上减轻了电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,但与此同时也阻碍了阳极氧化膜的连续生长,导致成膜效率降低,因此制备的阳极氧化膜表面结构变得疏松。

电解液中植酸体积分数为 0~8 mL/L 时,不同阳极氧化膜的能谱如图 2 所示,表 1 列出了不同阳极氧化膜中各元素质量分数。

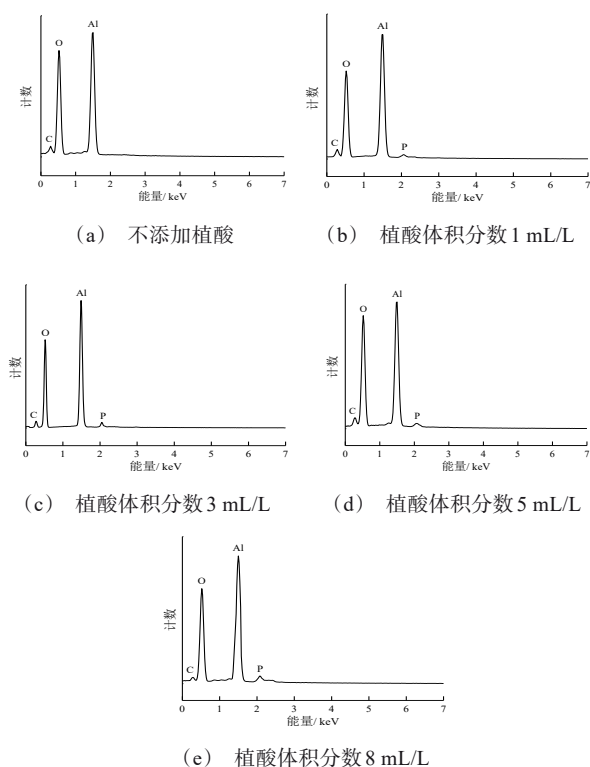


图 2 不同阳极氧化膜的能谱

Fig.2 Energy spectrum of different anodic oxidation films

结合图 2 和表 1 可知,添加植酸对阳极氧化膜的元素组成有影响,与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比,电解液中添加植酸后,阳极氧化膜中除了 Al、O 和 C 三种元素,还含有 P 元素。由于配制电解液未使用含磷试剂,因此 P 元素的存在表明植酸的磷酸根基团参与形成阳极氧化膜的反应,并进入阳极氧化膜中。此外,电解液中添加适量植酸后,阳极氧化膜中 Al 和 P 元素的质量分数升高,进一步表明植酸参与形成阳极氧化膜的反应。在电场作用下,植酸电离生成的基团与电解液中的铝离子结合生成植酸铝,参与阳极反应过程,从而导致 Al 和 P 元素的质量分数升高。随着电解液中植酸体积分数增加

到 5 mL/L,阳极氧化膜中 Al 和 P 元素的质量分数都呈现升高趋势,印证了上述分析的合理性,即添加适量植酸促进植酸铝形成并参与阳极反应过程进入阳极氧化膜中。然而,电解液中植酸体积分数达到 8 mL/L 时,虽然阳极氧化膜中 Al 和 P 元素的质量分数更高,但是过量植酸铝阻碍了阳极氧化膜连续生长,将对阳极氧化膜性能造成不利影响。

表 1 不同阳极氧化膜中各元素含量

Tab.1 Content of elements in different anodic oxidation films

阳极氧化膜	元素含量/(wt. %)			
	Al	O	C	P
不添加植酸	42.19	48.66	9.15	—
添加 1 mL·L ⁻¹ 植酸	43.04	47.07	8.15	1.74
添加 3 mL·L ⁻¹ 植酸	43.81	45.58	8.25	2.36
添加 5 mL·L ⁻¹ 植酸	44.25	44.48	8.23	3.04
添加 8 mL·L ⁻¹ 植酸	45.06	43.38	8.09	3.47

2.2 添加植酸对阳极氧化膜厚度和硬度的影响

电解液中植酸体积分数为 0~8 mL/L 时,不同阳极氧化膜的厚度和硬度如图 3 所示。

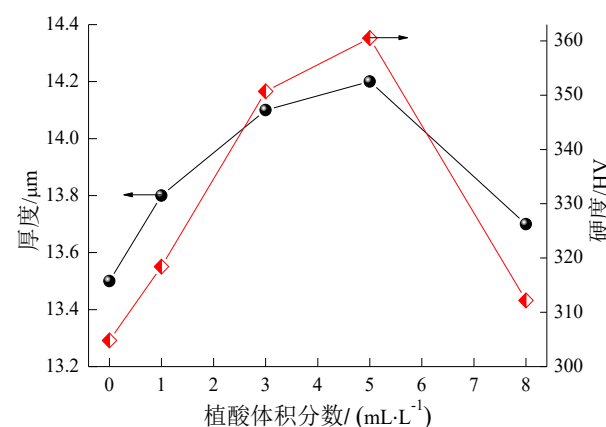


图 3 不同阳极氧化膜的厚度和硬度

Fig.3 Thickness and hardness of different anodic oxidation films

由图 3 可知,添加适量植酸促使阳极氧化膜的厚度有所增加,硬度随之提高。由于植酸参与形成阳极氧化膜的反应,能在一定程度上减轻阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,使阳极氧化膜的溶解速度变慢,成膜效率提高。因此,添加适量植酸促使阳极氧化膜的厚度有所增加。此外,添加适量植酸促使形成较平整、结构致密的阳极氧化膜,抵御弹塑性变形能力增强,从而表现为硬度提高。当电解液中植酸体积分数为 5 mL/L 时,阳极氧化膜的厚度最大且硬度

最高,分别为14.2 μm 、360.5 HV,硬度与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比提高了约56.0 HV。然而,添加过量植酸阻碍了阳极氧化膜连续生长,降低了成膜效率,导致阳极氧化膜的厚度降低。此外,添加过量植酸制备的阳极氧化膜表面结构疏松,抵御弹塑性变形能力减弱,因此其硬度减小。

2.3 添加植酸对阳极氧化膜耐蚀性能的影响

电解液中植酸体积分数为0~8 mL/L时,不同阳极氧化膜的电化学阻抗谱和电荷转移电阻如图4和图5所示。

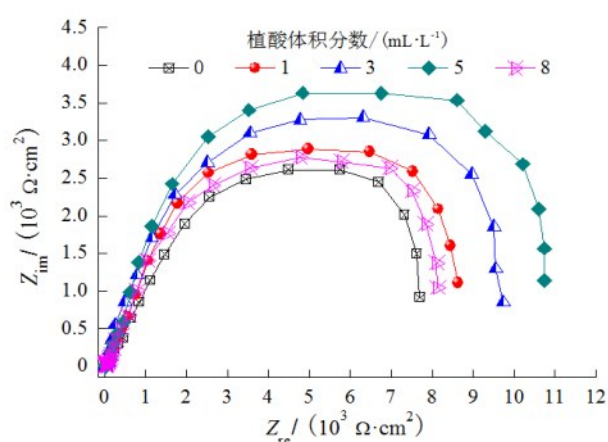


图4 不同阳极氧化膜的电化学阻抗谱

Fig.4 Electrochemical impedance spectroscopy of different anodic oxidation films

由图4和图5可以看出,添加适量植酸后,阳极氧化膜的容抗弧半径增大,电荷转移电阻明显提高。当电解液中植酸体积分数为5 mL/L时,阳极氧化膜具有最大的容抗弧和最高的电荷转移电阻 $5.59 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$,电荷转移电阻与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比提高了约 $1.58 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$,表明该阳极氧化膜具有优良的耐蚀性能。这是由于添加适量植酸使阳极氧化膜的孔洞数量减少且不容易形成凹坑,促使形成较平整、结构致密的阳极氧化膜,有效地阻挡腐蚀介质侵入阳极氧化膜内部,阻碍了电荷转移过程,从而延缓电化学腐蚀发展。然而,当电解液中植酸体积分数达到8 mL/L时,阳极氧化膜的容抗弧半径减小,电荷转移电阻随之降低,其耐蚀性能明显下降。这是由于添加过量植酸制备的阳极氧化膜表面结构疏松且厚度降低,阻挡氯离子侵入阳极氧化膜内部和限制腐蚀介质扩散能力下降,使得电荷转移容易发生,电化学腐蚀进程加快。

综上所述,当电解液中植酸体积分数为5 mL/L时,制备的阳极氧化膜表面平整且结构致密,其厚度最大,硬度最高并且表现出优良的耐蚀性能。为进一步提高该阳极氧化膜的综合性能,采用铈盐溶液对其进行封闭处理。

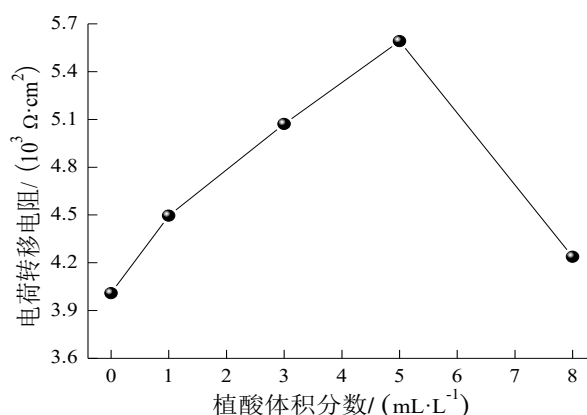


图5 不同阳极氧化膜的电荷转移电阻

Fig.5 Charge transfer resistance of different anodic oxidation films

2.4 铈盐溶液封闭对阳极氧化膜微观形貌和成分的影响

电解液中植酸体积分数为5 mL/L时,阳极氧化膜经铈盐溶液封闭后的微观形貌如图6所示。与图1(d)未封闭阳极氧化膜相比,铈盐封闭后阳极氧化膜表面的孔洞和凹坑被有效填补,缺陷得以修复,平整度和致密性明显改善。

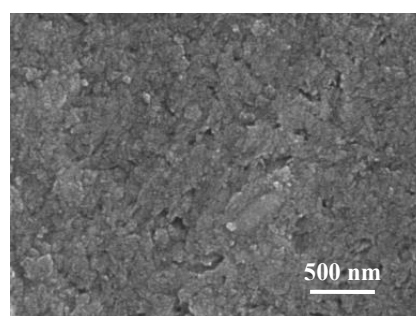


图6 阳极氧化膜经铈盐封闭后的微观形貌

Fig.6 Microstructure of anodic oxidation film after sealing treatment with cerium salt solution

未封闭阳极氧化膜中含有Al、O、C和P元素,而铈盐封闭后阳极氧化膜中除了这4种元素,还含有Ce元素,如图7所示。从封闭机理方面分析,铈盐溶液封闭过程中发生氧化铝水合反应和铈离子沉淀反应(参见如下方程式),分别生成勃姆体氧化铝、铈的

氢氧化物^[17-18]。这些化合物都能沉积在阳极氧化膜的孔洞和凹坑中以及表面,利用体积膨胀效应起到填补封堵作用。此外,铈的氢氧化物逐步沉积在阳极氧化膜表面还可能形成一层胶体状薄膜,起到一定的覆盖封闭作用。反应产物的填补作用与覆盖封闭作用叠加,使得铈盐封闭后阳极氧化膜的平整度和致密性明显改善。

氧化铝水合反应:



铈离子沉淀反应:

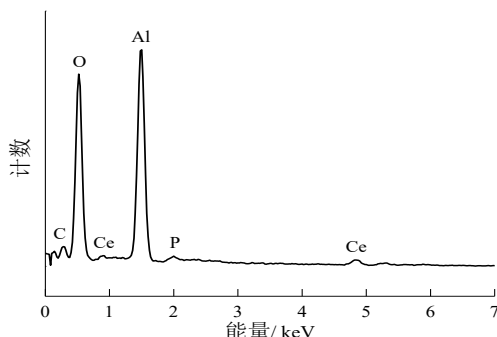
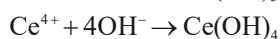
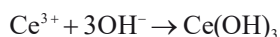


图 7 阳极氧化膜经铈盐封闭后的能谱

Fig.7 Energy spectrum of anodic oxidation film after sealing treatment with cerium salt solution

2.5 铈盐溶液封闭对阳极氧化膜耐蚀性能的影响

图 8 为不同氧化膜的电化学阻抗谱。可以看出,当电解液中不添加植酸时,阳极氧化膜的容抗弧半径最小,电荷转移电阻仅为 $4.01 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。当电解液中植酸体积分数为 5 mL/L 时,阳极氧化膜的容抗弧半径增大,电荷转移电阻与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比明显提高。进一步经铈盐溶液封闭后,阳极氧化膜的容抗弧更大,电荷转移电阻达到 $6.41 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。更高的电荷转移电阻表明植酸与铈盐溶液封闭共同作用使得阳极氧化膜阻挡腐蚀介质侵入以及阻碍电荷转移能力增强^[19-20],电化学腐蚀过程被很大程度抑制,阳极氧化膜的耐蚀性显著提高。

由于铈盐溶液封闭过程中生成的反应产物填补作用与覆盖封闭作用叠加,使阳极氧化膜表面的孔洞被有效填补,切断了腐蚀介质通过渗透与铝锂合金基体接触的路径。此外,阳极氧化膜表面的凹坑

减少,阻碍了腐蚀介质积聚和向阳极氧化膜深处扩散,导致腐蚀反应阻力增大。

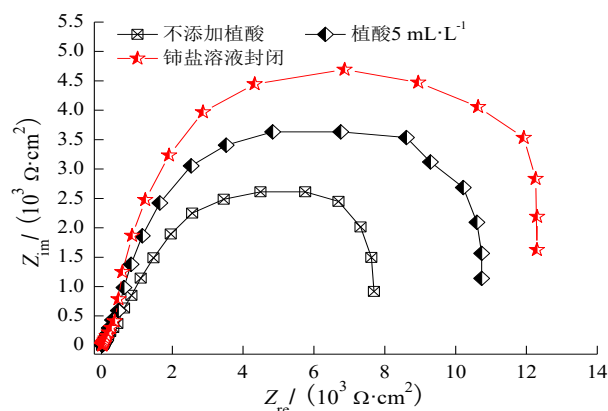


图 8 不同阳极氧化膜的电化学阻抗谱

Fig.8 Electrochemical impedance spectroscopy of different anodic oxidation films

2.6 铈盐溶液封闭对阳极氧化膜硬度和耐磨性能的影响

电解液中植酸体积分数为 5 mL/L 时,阳极氧化膜经铈盐溶液封闭后的硬度、磨损失重和磨损率如表 2 所示。与未封闭阳极氧化膜相比,铈盐封闭后阳极氧化膜的硬度提高约 32.3 HV,磨损失重降低约 16.7%,磨损率降低到 $1.62 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。由于铈盐封闭后阳极氧化膜的平整度和致密性得以改善,抵御弹塑性变形能力增强,因此硬度更高。在摩擦磨损过程中,铈盐封闭后阳极氧化膜由于硬度高承受外加载荷能力较强,表面不容易发生剥落现象,因此抵抗磨粒刮擦能力增强,表面磨损程度较轻,从而表现出优良的耐磨性能。

表 2 阳极氧化膜经铈盐溶液封闭后的硬度、磨损失重和磨损率

Tab.2 Hardness, wear loss and wear rate of anodic oxidation films sealed by cerium salt solution

阳极氧化膜	硬度/ HV	磨损失重/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	磨损率/ ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
未封闭 阳极氧化膜	360.5	0.036	1.75×10^{-3}
铈盐封闭后 阳极氧化膜	392.8	0.030	1.62×10^{-3}

3 结论

(1) 电解液中添加植酸后,在阳极氧化过程中形

成植酸铝,植酸铝附着在阳极氧化膜表面能一定程度上减轻阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,同时参与阳极反应过程并进入阳极氧化膜中。添加适量植酸促使形成较平整、结构致密的阳极氧化膜,并使阳极氧化膜的厚度有所增加,抵御弹塑性变形能力和阻碍电化学腐蚀能力增强,因此硬度和耐蚀性能提高。而添加过量植酸导致阳极氧化膜表面结构疏松,厚度和硬度都降低,耐蚀性能随之下降。

(2)与不添加植酸时制备的阳极氧化膜相比,电解液中植酸体积分数为5 mL/L时制备的阳极氧化膜成分发生变化,硬度和电荷转移电阻分别提高约56.0 HV、 $1.58 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$,表现出高硬度和优良的耐蚀性能。该阳极氧化膜经铈盐溶液封闭后平整度和致密性明显改善,成分中新增Ce元素,硬度提高约32.3 HV,磨损失重降低约16.7%,磨损率降低到 $1.62 \times 10^{-3} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。封闭过程中反应产物的填补作用与覆盖封闭作用叠加,使铈盐封闭后阳极氧化膜的耐蚀性能更好,表现出优良的耐磨性能。

参考文献

- [1] 尹嘉明, 马鹏程, 陈永来, 等. 铝锂合金的发展及在运载火箭贮箱的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(3): 137-141.
- [2] 李劲风, 陈永来, 马云龙, 等. 国内铝锂合金基础研究及应用技术开发[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 37-47.
- [3] 王一唱, 童鑫, 游国强, 等. 铝锂合金组织、性能及成形工艺的研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 42(3): 1069-1083.
- [4] Ma Y, Zhou X, Liao Y, et al. Effect of anodizing parameters on film morphology and corrosion resistance of AA2099 aluminum-lithium alloy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016, 163(7): C369-C376.
- [5] 颜鹏, 厉新明, 何林波, 等. 2198和5A90铝锂合金脉冲阳极氧化膜制备及耐蚀性[J]. 航空材料学报, 2017, 37(2): 13-20.
- [6] 肖金涛, 陈妍, 邢明秀, 等. 工艺参数对2195铝锂合金阳极氧化膜的耐蚀性影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(5): 431-438.
- [7] 张政权, 王玉玲, 李良锋, 等. 阳极氧化对2060-T8铝锂合金氧化膜的形貌控制[J]. 西南科技大学学报, 2020, 35(2): 63-68.
- [8] 韩保红, 张骐, 孙志华, 等. 前处理工艺对航空铝锂合金硫酸阳极氧化膜层性能影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(5): 48-54.
- [9] 马宗耀, 谢发勤. 铝-锂合金阳极氧化及膜层性能的研究[J]. 电镀与环保, 2008, 28(6): 31-34.
- [10] 李文, 朱彦海, 白雪飘, 等. 2060铝锂合金在3种溶液体系中所得阳极氧化膜层的性能[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(11): 492-496.
- [11] Jiang D, Zhou H, Wan S, et al. Fabrication of superhydrophobic coating on magnesium alloy with improved corrosion resistance by combining micro-arc oxidation and cyclic assembly[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 339(15): 155-166.
- [12] 张庆芳, 王明, 邵忠财. 植酸改善镁合金锌系磷化膜耐蚀性的研究[J]. 电镀与环保, 2014, 34(5): 23-25.
- [13] Meng G Z, Sun F L, Shao T, et al. Effect of phytic acid on the microstructure and corrosion resistance of Ni coating[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(20): 5990-5995.
- [14] 凌付平. 铝锂合金表面制备草酸阳极氧化膜及无铬封孔处理[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(9): 45-50.
- [15] 李荣泽, 赵晓琴, 段文山, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 涂层与高硬配副的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 184-195.
- [16] 高焕方. 镁合金环保型化学转化膜制备及其性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [17] Yu X W, Yan C W, Cao C A. Study on the rare earth sealing procedure of the porous film of anodized Al6061/ SiC_p [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 76(3): 228-235.
- [18] 吴姗姗, 于瑾佳, 刘历波. 铈盐封孔对建筑铝合金阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(4): 1-6.
- [19] 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.
- [20] 王帅星, 赵晴, 杜楠, 等. 铈盐对铝合金硼酸-硫酸阳极氧化膜的封闭效应[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1132-1141.