

2024 铝合金超疏水表面的制备及其耐蚀性能

钱晨, 王华

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 在 2024 铝合金基体上制备超疏水表面, 从而提高自清洁性能和耐腐蚀性能。**方法** 采用硫酸和草酸钛钾混合电解液阳极氧化, 用月桂酸乙醇溶液修饰, 在铝合金基体上制备超疏水表面, 用扫描电子显微镜 (SEM)、红外光谱和光学接触角测量仪观察、分析超疏水表面形貌、化学结构和润湿性, 用电化学交流阻抗和极化曲线测试研究超疏水表面在 3.5% 氯化钠中的耐蚀性。**结果** 20 V 恒电位阳极氧化时间小于 90 min 时, 随着时间的增加, 接触角增大。铝合金在 0.5 mol/L 硫酸和 0.01 mol/L 草酸钛钾混合电解液中阳极氧化 90 min, 并在 5% (质量分数) 的月桂酸乙醇溶液中修饰 1.5 h, 能制备出最优的超疏水表面, 接触角为 157.99°。在 3.5% 氯化钠中浸泡 14 天后, 超疏水铝的交流阻抗值高于空白铝 4 个数量级, Tafel 极化曲线解析表明, 保护效率为 99.92%。**结论** 在低浓度硫酸中对铝阳极氧化, 并用月桂酸修饰能够成功制备出超疏水表面。所得表面展现出良好的耐腐蚀性, 并且耐孔蚀性能得到改善。

关键词: 铝合金; 超疏水表面; 阳极氧化; 月桂酸; 电化学阻抗; 耐腐蚀

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0238-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.029

Preparation and Corrosion Resistance of Superhydrophobic Surface on 2024 Aluminium Alloy

QIAN Chen, WANG Hua

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare superhydrophobic surfaces on 2024 aluminum alloy substrate and then improve self-cleaning ability and corrosion resistance. The superhydrophobic surfaces were prepared on the aluminum alloy through anodic oxidation by mixed sulfuric acid and titanium potassium oxalate and modification by lauric acid ethanol solution. Surface morphology, chemical structure and wettability of super hydrophobic surface were observed and analyzed by scanning electron microscope (SEM), infrared spectroscopy and optical contact angle measuring instrument and the corrosion resistance in 3.5% sodium chloride was studied by electrochemical impedance spectroscopy and polarization curve test. When the anodic oxidation time was less than 90 min at 20 V constant potential, the contact angle increased with the increase of the time. The optimal super hydrophobic surface could be got when aluminum alloy was anodized in 0.5 mol/L sulfuric acid and 0.01 mol/L titanium potassium mixed electrolyte for 90 min, and modified by the lauric acid ethanol solution with mass fraction of 5% for 1.5 h, and the contact angle was 157.99°. The impedance modulus of superhydrophobic aluminum was 4 orders of magnitude higher than that of blank aluminum immersed in 3.5wt% sodium chloride for 14 d and the Tafel polarization showed that the protection

收稿日期: 2019-01-23; 修订日期: 2019-05-23

Received: 2019-01-23; Revised: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51101025)

Fund: Supported by the National Natural Science Found of China (51101025)

作者简介: 钱晨 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。

Biography: QIAN Chen(1992—), Female, Master, Research focus: metal corrosion and protection.

通讯作者: 王华 (1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属腐蚀与防护。邮箱: whcj1@126.com

Corresponding author: WANG Hua(1974—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: metal corrosion and protection. E-mail: whcj1@126.com

efficiency was 99.92%. Superhydrophobic surface can be successfully prepared by oxidizing the aluminum anode in low concentration sulfuric acid and making modification with lauric acid. The obtained surfaces exhibit good corrosion and the hole corrosion resistance is improved.

KEY WORDS: aluminum alloy; super-hydrophobic surface; anodic oxidation; lauric acid; electrochemical impedance spectroscopy; corrosion resistance

2024 铝合金因为密度小、比强度高和加工性能好等优点,在航空航天等领域得到了广泛的应用,用于制作各种高负荷的零构件。2024 铝合金含有铜金属间化合物,导致耐蚀性能差,现在主要通过阳极氧化法^[1]、化学转化膜法、自组装技术^[2]和有机涂层等表面处理工艺来提高铝合金的耐腐蚀性能。阳极氧化法产生的是多孔氧化膜,为了提高其耐腐蚀和抗污染性能,必须进行封孔处理,常用封孔方法包括沸水封闭、蒸汽封闭、重铬酸盐封闭和镍盐封闭等,存在成本高、环境污染等缺点。化学转化膜中铬酸盐处理效果最好,同样因为环境污染,需要开发无铬转化工艺,如锆钛转化膜^[3]、锆钒转化膜^[4]和稀土转化膜^[5]等。超疏水表面是指与水的接触角大于 150°,而滚动角小于 10°的表面,具有优异的自清洁、抗结冰和油水分离性能。近年研究发现,超疏水表面因为“气垫效应”和“毛细管效应”两种防腐机理,对金属表面具有优良的防护性能,因此超疏水技术也在铝合金的防护方面得到了越来越广泛的重视^[6-7]。

采用化学刻蚀法、激光刻蚀法^[8]、溶胶凝胶法^[9]、化学气相沉积和电化学法等多种方法均可以获得超疏水表面。Li 等^[10]采用盐酸刻蚀、高锰酸钾钝化和氟硅烷改性三步处理在 6061 铝合金表面制备的超疏水结构,在海水中具有优良的防护性能。Huang 等^[11]在 1 mol/L NaOH 溶液中刻蚀 6061 铝合金,并用 0.01 mol/L 硬脂酸修饰制备超疏水膜,其极化电阻可以提高 137 倍,保护效率达到 99%以上。Xiong 等^[12]通过一步电化学沉积技术在 6061 铝合金表面制备了超疏水硬脂酸钴薄膜。Liu 等^[13]通过水热法在泡沫镍表面合成了片状和花状 Co_3O_4 ,经过全氟烷基硅烷 PFAS 改性,获得超疏水表面。He^[14]在 15% (质量分数) 硫酸中以恒电流氧化纯铝,熔融肉豆蔻酸处理获得超疏水表面,在海水中具有良好的防护性能。Mokhtari^[15]在 15% 硫酸中以恒压氧化 6061 铝合金 1 h,熔融硬脂酸处理获得超疏水表面,在 3.5% NaCl 中,保护效率达 97%,而氧化铝膜为 58%。Lu 等^[16]以 0.2 mol/L 磷酸为电解液,在 120 V 阳极氧化电压下氧化纯铝后,用全氟十二烷基三甲氧基硅烷氟化处理,制得的超疏水表面具有良好的抵抗海洋大气腐蚀性能。

目前,超疏水表面的耐腐蚀性研究多集中于硬度较低的纯铝和 6061 系列铝合金,对于铜含量高的硬铝 2024 的研究较少。因为铜的存在,富铜沉淀 CuAl_2 相和相邻的贫铜基体形成电偶电池,导致晶间腐蚀的

发生,而且有的超疏水膜制备过程复杂,需要采用价格昂贵的低表面能氟硅烷,还需要热处理。阳极氧化法常用的酸性溶液为硫酸、草酸和磷酸等,2024 在高浓度硫酸中形成的氧化膜脆,在应力下易产生裂纹。文中以低浓度硫酸和草酸钛钾混合液为电解液,采用阳极氧化法在 2024 铝合金基体上构造粗糙微纳米结构,获得类似陶瓷结构,并用月桂酸修饰制备超疏水表面,研究阳极氧化时间对接触角的影响,以及超疏水表面的自清洁和耐腐蚀性能。

1 试验

1.1 材料

试验所用材料有:2024 铝合金(铜 4.5%,镁 1.5%,锰 0.4%,铝余量)、工业磷酸(85%)、草酸钛钾、无水乙醇、浓硫酸(98%)、氯化钠、正辛基三乙氧基硅烷、月桂酸。除磷酸外,药品均为分析纯,由天津市科密欧化学试剂有限公司生产。

1.2 超疏水表面的制备

将铝片裁剪成大小为 5 cm×1 cm×0.8 mm 的试样,在超声波仪器中用无水乙醇溶液清洗 10 min,取出后用去离子水冲洗。为了使试样表面更加平整和光滑,在工业磷酸溶液中以电流密度 0.250 A/cm² 进行抛光处理 2 min,抛光完成后取出,洗净、吹干。

铝的阳极氧化与超疏水修饰:以预处理后的铝试样作为阳极,氧化面积为 3 cm²,阴极是只经过超声波清洗的铝试样,电解液是硫酸和草酸钛钾的混合水溶液,硫酸浓度为 0.5 mol/L,草酸钛钾浓度为 0.01 mol/L。在室温下进行阳极氧化,保持电压值稳定为 21 V,时间为 30、60、90、120 min。将阳极氧化试样在 5% (质量分数) 月桂酸中修饰 1.5 h,然后把经过修饰的铝试样放在温度为 100 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中 2 h,取出,自然冷却至室温。

1.3 表征分析

用北京时代之峰科技有限公司生产 TR110 粗糙度仪和 TT260F 涂层测厚仪测量氧化膜的粗糙度和厚度,每个试样上测量 5 个点,取平均值。用上海中晨数字技术设备有限公司 JC2000D2W 型接触角测量仪测量接触角,用微样进样器将去离子水滴到试样表面,水滴大小尽量保证为 5 μL,测试 3 次,取其平均值。用 QUANTA 450 钨灯丝扫描电镜进行 SEM 扫描。

用 EQUINOX 55 红外光谱仪进行红外光谱分析, 波数范围为 $650\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。

用上海辰华 CHI604E 型电化学工作站测量复合涂层的电化学阻抗谱 (EIS) 和动电位极化曲线。采用三电极体系, 工作电极为空白铝试样和超疏水试样, 工作面积为 1 cm^2 , 辅助电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)。腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液, 稳定 30 min 后在开路电位下测量, 正弦波扰动电位幅值为 5 mV, 扫描频率 $100\text{ kHz}\sim 0.01\text{ Hz}$ 。极化曲线扫描电位区间为 $-0.3\text{ V (vs. } E_{\text{corr}})\sim +0.3\text{ V}$, 扫描速率为 1 mV/s , 用仪器自带软件对极化曲线进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 接触角分析

阳极氧化时间对疏水表面接触角的影响如图 1 所示。可以看出, 随着阳极氧化时间的增加, 接触角增大。当氧化时间为 90 min 时, 接触角最大, 为 157.99° 。再继续增加氧化时间, 接触角下降。因此, 90 min 为最佳阳极氧化时间。很多文献用硅烷作为低表面能修饰剂, 作为对比, 把阳极氧化 90 min 中的试样浸入正辛基三乙氧基硅烷 (体积分数为 4%) 的乙醇溶液 30 min 后, 再放入到 120°C 的马弗炉中, 放置 2 h, 取出, 自然冷却至室温, 测得接触角为 156.49° 。因此月桂酸和硅烷修饰效果接近, 但是采用月桂酸更经济。

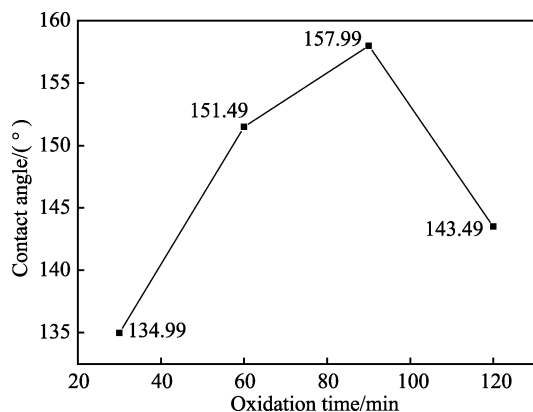


图 1 阳极氧化时间对接触角的影响

Fig.1 Influence of anodizing time on contact angle

2.2 红外光谱分析

经过月桂酸修饰试样的红外光谱如图 2a 所示, 在 2924.03 cm^{-1} 和 2854.59 cm^{-1} 的峰值分别代表了亚甲基的对称伸缩振动和反对称伸缩振动。月桂酸中 COOH 对应的特征峰 1701 cm^{-1} 消失, 而在 1575.81 cm^{-1} 处出现新的峰值, 表明羧酸跟和铝表面发生反应^[17]。 1465.87 cm^{-1} 的峰值代表亚甲基的变形振动, 1000 cm^{-1} 左右的峰值则证明了长直链的存在, 从

而证明了月桂酸修饰在氧化铝表面。正辛基三乙氧基硅烷修饰试样的红外光谱如图 2b 所示, 2922.1 、 2854.59 、 1471.66 cm^{-1} 的峰值分别代表了表面亚甲基的对称伸缩振动、反对称伸缩振动和变形振动, 1180.41 cm^{-1} 的波峰则代表了表面具有 Si-O-Si 键^[18]。因此, 正辛基三乙氧基硅烷修饰在氧化铝表面。

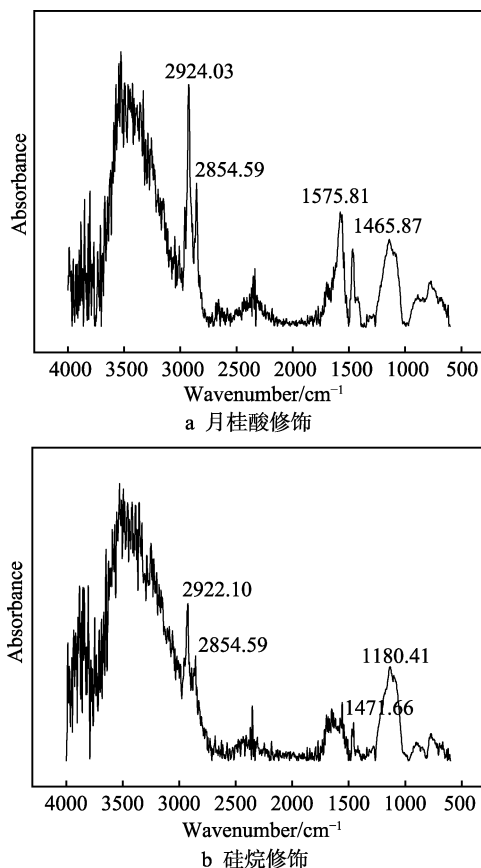


图 2 超疏水氧化铝试样的红外光谱

Fig.2 FTIR of superhydrophobic alumina sample: a) lauric acid modification; b) silane modification

2.3 SEM 形貌分析

用环境扫描电镜观察不同氧化时间的修饰氧化铝表面微观结构, 如图 3 所示。从图 3a 可以看出, 阳极氧化 30 min 时, 由于其阳极氧化时间不足以在铝试样表面氧化出较为粗糙的结构, 只在表面氧化成了一些微突起状的结构, 所以达不到超疏水的要求。图 3b 氧化时间为 60 min, 表面形成纳米棒状结构, 大大增加了基体表面的粗糙度。当继续增加氧化时间到 90 min, 如图 3c 所示, 表面形成了更深的沟壑和较深的氧化孔, 使基体表面的粗糙程度进一步加深。此时对其进行修饰, 接触角达到最高值。再进一步氧化, 增加到 120 min, 如图 3d 所示, 表面大部分氧化的沟壑已经脱落和溶解, 表面的粗糙结构明显减弱, 从而接触角也大幅度下降。不同氧化时间制备的氧化膜的厚度和粗糙度见表 1。由表 1 可知, 随着氧化时间增加, 氧化膜厚度和粗糙度增加, 当氧化时间为

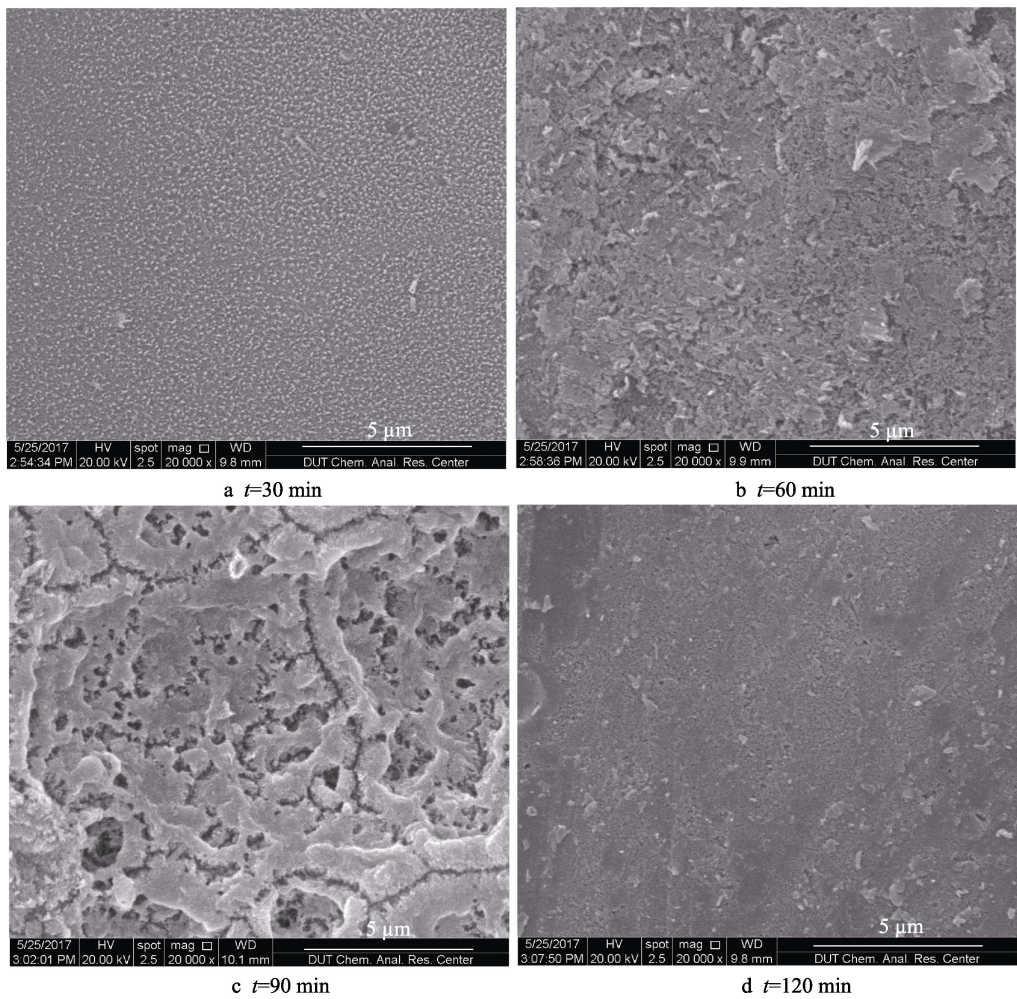


图 3 月桂酸修饰不同阳极氧化时间的阳极氧化铝试样 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphology of anodized aluminum surface after being modified by lauric acid for different time

表 1 不同氧化时间制备的氧化膜的膜厚和粗糙度
Tab.1 Thickness and roughness of the oxide film prepared for different oxidation time

Anodizing time/min	30	60	90	120
Film thickness/ μm	12.9	23.9	29.8	45.2
Roughness/ μm	1.52	2.07	2.98	2.15

90 min 时，氧化膜粗糙度最大。

2.4 耐蚀性分析

空白铝试样、阳极氧化铝试样和超疏水试样在质量分数为 3.5%的氯化钠溶液中的交流阻抗如图 4 所示。如图 4a 所示，浸泡 1 天，空白铝的 Nyquist 图由 2 个容抗弧构成，存在 2 个时间常数，高频对应铝的自然氧化层，低频则代表界面铝的溶解反应。当浸泡时间增加为 7 天，Nyquist 图由 1 个高频容抗弧和 1 个低频感抗弧构成，感抗弧的出现，意味着铝表面的钝化膜发生了破坏，进入点蚀诱导期。随着浸泡时间增加，容抗弧半径减小，表明铝的电荷转移电阻减小，腐蚀速度增加。从阳极氧化铝和超疏水阳极氧化铝试样的交流阻抗随时间变化情况（图 4b）可以看出，

两种试样阻抗模值的对数值都大于 7, 远高于空白铝，超疏水铝的阻抗值高于阳极氧化铝，而且随时间的增加，阻抗值保持基本不变，甚至略有增加。超疏水试样浸泡 14 天，其低频交流阻抗模值从第 1 天的 $4.57 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 上升为 $5.608 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。说明月桂酸修饰超疏水阳极氧化铝试样有良好的防腐蚀性能。

不同铝试样在 3.5%氯化钠溶液中浸泡 14 天后的极化曲线如图 5 所示。使用软件对极化曲线进行拟合处理，腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 拟合结果见表 2。可以看出，超疏水铝的腐蚀电位最正，腐蚀电流密度要比空白铝低 3 个数量级，与电化学交流阻抗结果一致。根据式（1）计算保护效率，为 99.92%。超疏水表面的微纳米结构能够捕获空气，形成“空气垫”，可以提高气液界面面积分数，导致腐蚀介质和表面接触时形成 Cassie-Baxter 模式，减少腐蚀介质与表面的接触，从而能增大阴离子接触到铝基体的阻力^[19-20]，有效抑制阴离子与铝基体表面发生腐蚀反应，因此能提高试样的耐蚀性能。超疏水铝试样的孔蚀电位明显高于单纯阳极氧化铝试样，提高了铝合金的耐孔蚀性能。

$$\eta = \left[\left(J_{\text{corr}}^0 - J_{\text{corr}} \right) / J_{\text{corr}}^0 \right] \times 100\% \tag{1}$$

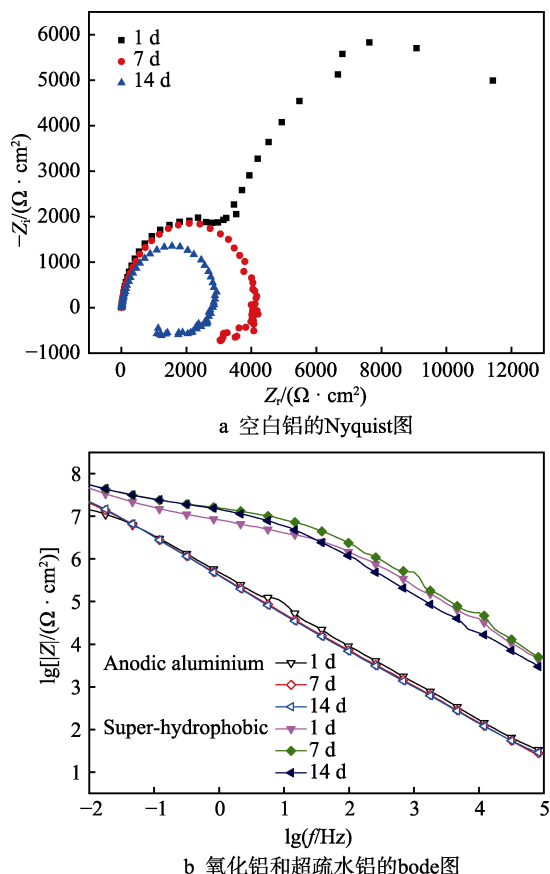


图4 在3.5%氯化钠溶液中浸泡14天的交流阻抗图

Fig.4 (a) Nyquist plots of pristine Al and (b) Bode-modulus plots of anodic aluminium and superhydrophobic Al during 14 days of immersion in 3.5 wt.% NaCl solution

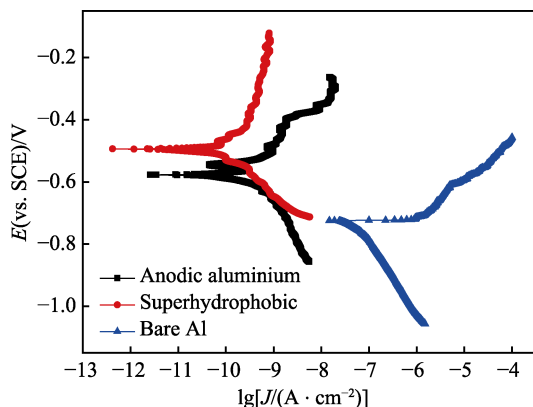


图5 铝试样在3.5%氯化钠溶液中浸泡14 d的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of aluminum samples after immersed in 3.5%NaCl for 14 days

表2 空白铝和超疏水铝的极化曲线拟合参数
Tab.2 Polarization curve fitting parameters of pristine Al and superhydrophobic Al

Samples	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	Protection efficiency/%
Bare Al	-0.7865	1.6075×10^{-7}	—
Anodic Al	-0.5820	4.3796×10^{-10}	99.73
Superhydrophobic Al	-0.4957	1.2266×10^{-10}	99.92

2.5 超疏水表面的自清洁能力分析

超疏水表面的水滴弹跳实验和自清洁实验结果如图6所示。可以清晰地看到,水流注射到超疏水表面,会发生弹跳作用。被电木粉污染的超疏水铝合金表面,通过水滴的作用很容易变得干净如初。未经过处理的表面,在水滴作用下,电木粉会粘附在试样表面。超疏水表面具有自清洁能力的原因可能有两个:一是经过修饰后的表面具有较低的自由能,所以粉末和表面之间不容易形成化学键,并且粉末与表面的粘附能力不强,因此容易被水滴带走;二是因为超疏水表面形成分层微通道,水滴不能渗入到这些通道当中,而是悬浮在试样的表面。液滴不能粘在表面上,就会在一定的坡度下从表面滚下去。正因为以上两种原因,最后使得超疏水表面具有优异的自清洁能力。

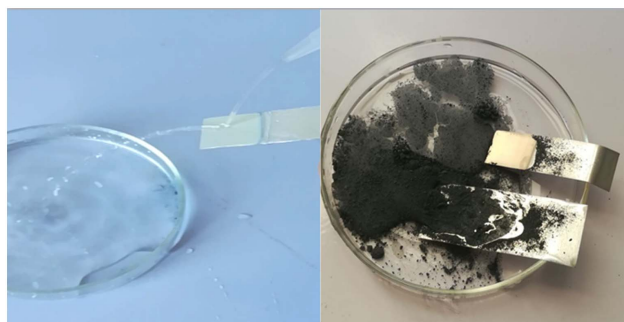


图6 超疏水铝合金表面的自清洁性能

Fig.6 Self-cleaning property of super hydrophobic aluminum alloy surface

2.6 氧化铝超疏水表面的耐摩擦性能分析

参考LU^[21]的文章,将超疏水镀层的一面(3 cm²)朝下放置在500目的金相砂纸上,试样上放置100 g的砝码,压力为3 kPa。保持试样与砝码相对静止,推动两者做匀速直线运动,每移动10 cm,用吹风机清理表面,并立即测试其接触角,直到试样表面的超疏水性能完全失效,记录其保持超疏水性能的最大耐磨距离。当摩擦距离超过80 cm时,镀层失去超疏水性能,与Kumar A的结果接近。Kumar A^[22]采用化学刻蚀法在铝合金表面制备的超疏水表面,在2222 Pa压力下,每3 cm为一个循环,当超过30个循环后失去超疏水性能。这远低于LU采用其他法制备的超疏水涂层的400 cm距离,需要进一步提高耐磨性能。

3 结论

1) 2024 铝合金在0.5 mol/L 硫酸和0.01 mol/L 草酸钛钾混合溶液中进行阳极氧化,氧化电压为20 V,阳极氧化时间为90 min,用5% (质量分数) 月桂酸修饰1.5 h,可获得最大接触角(157.99°),具有良好的自清洁性。

2) 2024 铝合金超疏水铝表面具有优良的耐蚀性能, 在 3.5%氯化钠溶液中浸泡 14 天, 保护效率为 99.92%。

3) 在 3.5%氯化钠溶液中浸泡 14 天, 超疏水铝的低频交流阻抗模值基本不变, 从第 1 天的 $4.57 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 上升为 $5.608 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 比空白铝高了 4 个数量级, 具有良好的耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 唐誉豪, 向东, 李东豪, 等. 含石墨烯纳米片电解液中电流密度对 2024 铝合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 203-208.
TANG Yu-hao, XIANG Dong, LI Dong-hao, et al. Effects of current density in electrolyte containing graphene on properties of 2024 aluminum alloy micro-arc oxidation coating[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 203-208.
- [2] 屈钧娥, 聂德建, 郑克玉, 等. 硫醇-膦酸混合自组装膜对 2024 铝合金腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(4): 331-335.
QU Jun-e, NIE De-jian, ZHENG Ke-yu, et al. Corrosion inhibition effect of thio-phosphonic acid mixed self-assembled monolayers on 2024 aluminum alloy[J]. Corrosion and protection, 2014, 35(4): 331-335.
- [3] 张博, 赵焕, 董宇, 等. 2024 铝合金表面有色钛锆转化膜的制备与性能研究[J]. 材料保护, 2018, 51(7): 1-5.
ZHANG Bo, ZHAO Huan, DONG Yu, et al. Preparation and performance of colored Ti-Zr conversion coating on 2024 aluminum alloy[J]. Journal of materials protection, 2018, 51(7): 1-5.
- [4] 王娇, 郭瑞光. 2024 铝合金表面钒锆复合转化膜的制备及其性能[J]. 材料保护, 2014, 47(3): 1-4.
WANG Jiao, GUO Rui-guang. Preparation of vanadium/zirconium composite conversion coating on 2024 aluminum alloy surface and avaluation of corrosion resistance of the coating[J]. Journal of materials protection, 2014, 47(3): 1-4.
- [5] CONDE A, ARENAS M A, FRUTOS A, et al. Effective corrosion protection of 8090 alloy by cerium conversion coatings[J]. Electrochimica acta, 2008, 53(26): 7760-7768.
- [6] ZHENG S, LI C, FU Q, et al. Fabrication of self-cleaning superhydrophobic surface on aluminum alloys with excellent corrosion resistance[J]. Surface and coatings technology, 2015, 276: 341-348.
- [7] ZHANG B, ZHU Q, LI Y, et al. Facile fluorine-free one step fabrication of superhydrophobic aluminum surface towards self-cleaning and marine anticorrosion[J]. Chemical engineering journal, 2018, 352(15): 625-633.
- [8] SARBADA S, SHIN Y C. Superhydrophobic contoured surfaces created on metal and polymer using a femto-second laser[J]. Applied surface science, 2017, 405: 465-475.
- [9] FENG L, LI H, SONG Y, et al. Formation process of a strong water-repellent alumina surface by the sol-gel method[J]. Applied surface science, 2010, 256(10): 3191-3196.
- [10] LI X, ZHANG Q, GUO Z, et al. Fabrication of superhydrophobic surface with improved corrosion inhibition on 6061 aluminum alloy substrate[J]. Applied surface science, 2015, 342: 76-83.
- [11] HUANG Y, SARKAR D K, CHEN X. Superhydrophobic aluminum alloy surfaces prepared by chemical etching process and their corrosion resistance properties[J]. Applied surface science, 2015, 356: 1012-1024.
- [12] XIONG J, SARKAR D K, CHEN X. Superhydrophobic honeycomb-like cobalt stearate thin films on aluminum with excellent anti-corrosion properties[J]. Applied surface science, 2017, 407: 361-370.
- [13] LIU C, FENG X, LI N, et al. Super-hydrophobic Co_3O_4 -loaded nickel foam with corrosion-resistant property prepared by combination of hydrothermal synthesis and PFAS modification [J]. Surface and coatings technology, 2017, 309: 1111-1118.
- [14] HE T, WANG Y, ZHANG Y, et al. Super-hydrophobic surface treatment as corrosion protection for aluminum in seawater[J]. Corrosion science, 2009, 51(8): 1757-1761.
- [15] MOKHTARI S, KARIMZADEH F, ABBASI M H, et al. Development of super-hydrophobic surface on Al 6061 by anodizing and the evaluation of its corrosion behavior[J]. Surface and coatings technology, 2017, 324: 99-105.
- [16] LU Z, WANG P, ZHANG D. Super-hydrophobic film fabricated on aluminium surface as a barrier to atmospheric corrosion in a marine environment[J]. Corrosion science, 2015, 91: 287-296.
- [17] LIU C S, SU F H, LIANG J, et al. Facile fabrication of superhydrophobic cerium coating with micro-nano flower-like structure and excellent corrosion resistance[J]. Surface and coatings technology, 2014, 258: 580-586.
- [18] 李杨, 王立达, 刘贵昌. 铝基超疏水表面的制备及其耐蚀性[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(5): 34-36.
LI Yang, WANG Li-da, LIU Gui-chang. Preparation and corrosion resistance of super-hydrophobic film on aluminum substrate[J]. Electroplating & finishing, 2012, 31(5): 34-36.
- [19] LIU Y, YIN X M, ZHANG J, et al. A electro-deposition process for fabrication of biomimetic super-hydrophobic surface and its corrosion resistance on magnesium alloy[J]. Electrochimica acta 2014, 125: 395-403.
- [20] SHE Z X, LI Q, WANG Z W, et al. Researching the fabrication of anticorrosion superhydrophobic surface on magnesium alloy and its mechanical stability and durability[J]. Chemical engineering journal 2013, 228: 415-424.
- [21] LU Y, SATHASIVAM S, SONG J, Robust self-cleaning surfaces that function when exposed to either air or oil[J]. Science, 2015, 347: 1132-1135.
- [22] KUMAR A, GOGOI B. Development of durable self-cleaning superhydrophobic coatings for aluminium surfaces via chemical etching method[J]. Tribology international, 2018, 122: 114-118.