

化学刻蚀法调控铝合金阳极氧化膜的表面结构及防腐性能^{*}

秦立光^{1,2}, 侯 华¹, 赵文杰², 睢文杰^{1,2}, 郑文茹², 乌学东², 薛群基²

(1. 中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030000; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘 要: 为了提高铝合金的耐蚀性能, 采用化学刻蚀与阳极氧化相结合的方法在铝合金表面构造了微纳结构, 经进一步化学修饰后得到耐蚀性能良好的表面防护膜层。利用扫描电子显微镜、红外光谱仪表征所制备膜层的表面形貌和化学成分, 采用激光共聚焦显微镜测定样品的表面粗糙度, 通过接触角测量仪和电化学工作站对膜层的润湿性和防腐性能进行表征, 考察刻蚀时间对于膜层表面结构和耐蚀性能的影响规律。结果表明: 当刻蚀时间为 3 min 时, 膜层的耐蚀性能最佳; 相对于未经刻蚀的样品腐蚀电位正移了 0.15 V, 腐蚀电流下降了两个数量级。且接触角最大(152°), 这是由于此条件下制备的薄膜表面微/纳结构最完整、比例最合理。

关键词: 化学刻蚀; 阳极氧化; 表面形貌; 耐蚀性

中图分类号: TG174.451

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)03-0082-08

Designing Surface Morphologies and Anti-corrosion Properties of Anodized Aluminum Alloys via a Chemical Etching Method

QIN Li-guang^{1,2}, HOU Hua¹, ZHAO Wen-jie², SUI Wen-jie^{1,2}, ZHENG Wen-Ru², WU Xue-dong², XUE Qun-Ji²

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030000; 2a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 2b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang)

Abstract: To improve corrosion resistance performance of aluminum alloy, micro/nano-structures were formed by chemical etching and anodic oxidation methods on the surface of aluminum alloy. Then, anodic oxidation films with excellent anti-corrosion performance were obtained after being chemically modified via a self-assembly layer to improve the corrosion resistance of aluminum alloys. The surface morphologies and chemical elements of the as-prepared films were investigated by infrared spectroscopy and SEM. The values of surface roughness were measured by laser scanning confocal microscope. The hydrophilic/hydrophobic and anti-corrosion properties of the films were characterized by optical contact angle meter and electrochemical workstation. The influence of etching time on the surface morphologies and anti-corrosion performance was investigated. The results show that when the etching time is 3 min, the film owns the best corrosion resistance performance, the corrosion potential shifted 0.15 V positively, the corrosion current density decreased two orders of magnitude compared to bare aluminum alloy, and the static contact angle is 152° at its maximum which is due to the intact and suitable ratio of the micro/nano-structure of the films under this preparation condition.

Keywords: chemical etching; anodization; surface morphology; anti-corrosion property

收稿日期: 2015-01-27; **修回日期:** 2015-04-01; **基金项目:** * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB643305); 国家自然科学基金(51202263, 51335010); 浙江省“海洋防护材料与工程技术”科技创新团队(2011R50006); 宁波市自然科学基金(2014A610132)

通讯作者: 赵文杰(1981—), 男(汉), 副研究员, 博士; **研究方向:** 海洋功能防护材料; **Tel:** (0574) 8669 4901; **E-mail:** zhaowj@nimte.ac.cn

网络出版日期: 2015-05-20 10:32; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150520.1032.001.html>

引文格式: 秦立光, 侯华, 赵文杰, 等. 化学刻蚀法调控铝合金阳极氧化膜的表面结构及防腐性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 82-89. Qin L G, Hou H, Zhao W J, et al. Designing surface morphologies and anti-corrosion properties of anodized aluminum alloys via a chemical etching method[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 82-89.

0 引 言

Al-Cu-Mg 系 2024 铝合金由于其良好的冷加工和机械性能,广泛用于制造各种高负荷的零件,如飞机上的中央翼大梁、中央翼和对接型材等^[1]。但是由于其 Cu 含量较高,使得 2024 铝合金的耐蚀性能较差,尤其是在恶劣的工作环境下,如潮湿大气环境、海洋大气环境等腐蚀情况更为严重^[2]。因此,为了增强该合金的耐蚀性能,需要对其进行表面防护以达到延长使用寿命的目的。

在铝合金的表面处理技术中,阳极氧化是应用最为广泛的技术,在提高铝合金耐蚀性能的同时还能够改善其装饰性能^[3]。聂学远等^[4]采用硬质阳极氧化、阳极氧化以及改进阳极氧化技术在铝合金表面沉积了一层氧化铝的保护涂层,对该氧化膜进行电化学性能测试发现,改进型阳极氧化工艺不仅环境友好,同时膜层的性能也大大提高,硬度达到了 524.7 HV,自腐蚀电位正移了 0.1 mV 左右。贺春林等^[5]研究了阳极氧化膜层的结构对于耐蚀性能的影响,发现膜的孔隙近乎圆形,且每个孔隙周围多有 6 个孔隙,构成六角柱体结构,孔直径约为 10~30 nm,进一步降低孔隙密度提高了膜层的耐蚀性能。但以上研究都是基于阳极氧化膜本身的耐蚀性能,很少通过调控阳极氧化膜层的结构来增强防腐性能,同时为了进一步增强耐蚀性能还需要不断调节阳极氧化参数或者对制备的膜进行封孔处理,工艺复杂且成本较高。因此通过化学刻蚀法来进行表面形貌的调控简单而又高效,欧军飞等^[6]采用过氧化氢作为刻蚀剂,在镁、铝、钛等轻合金表面构造了微纳结构^[7],并在其上组装硅烷膜,通过电化学测试测定膜层的耐蚀性能,结果表明自腐蚀电位正移了 0.4 mV 左右,腐蚀电流密度下降了 3 个数量级。虽然在基底表面构筑超疏水薄膜可有效提高基底金属的耐蚀性能,但由于该层薄膜纳米级别的厚度,在薄膜的稳定性和保护长效性方面存在不足。

针对上述问题,文中首先利用化学刻蚀法对铝合金进行表面处理,构造了微米级的粗糙结构,然后通过阳极氧化处理构造了纳米级的多孔结构,最后使用硅烷试剂十二氟庚基丙基三甲氧基硅烷(G502)对薄膜进行化学组装修饰,G502 经过水解后生成硅醇,然后化学吸附在阳极氧化

铝的表面,不仅降低了基底的表面能,提高疏水性能,而且在提高基底耐蚀性能的同时不改变基底的表面形貌。最后测定所制备膜层的耐蚀性能,考察刻蚀时间对防护层微结构的影响规律,分析微结构对防护层耐蚀性能的影响机制。该方法在传统阳极氧化法的基础上与化学刻蚀构筑超疏水表面方法相结合,成功提高了膜层的耐蚀性和耐久性。

1 试验部分

1.1 膜层制备

所用材料为铝合金 2024-T3,将其切割成 2 cm×2 cm×0.5 cm 的样品,其主要化学成分(质量分数/%)为:4.5 Cu,1.4 Mg,0.5 Fe,0.6 Mn,0.5 Si,0.2 Zn,其余成分为 Al。前处理:样品在丙酮和去离子水中各超声清洗 10 min,然后使用体积分数比 $V_{\text{H}_2\text{O}}:V_{\text{HCl}}=2:1$ 的盐酸溶液作为刻蚀试剂,化学刻蚀时间分别为 0、1、3 和 5 min,对应的样品分别记为 CE0、CE1、CE2 和 CE3(见表 1)。阳极氧化电解液为 H_2SO_4 ,具体工艺参数见表 2。阳极氧化后将试样放置于 100 mL 0.5 mmol 的 G502 水解液中,40 ℃下浸泡 6 h。

表 1 样品的化学刻蚀时间

Table 1 Chemical etching time of the sample (min)

Sample	CE0	CE1	CE2	CE3
Time	0	1	3	5

表 2 阳极氧化工艺参数

Table 2 Parameters of the anodic oxidation process

Paramaters	Values
$\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	45
Oxidation time/min	30
Current/A	0.2

1.2 性能测试

采用 FEI Quanta 250 FEG 扫描电子显微镜(美国)对样品刻蚀后及阳极氧化后的表面形貌进行观察,加速电压为 15 kV。利用激光共聚焦显微镜(LSCM)测定样品表面粗糙度。使用 Dataphysics OCA20 光学接触角测量仪测定膜层的润湿行为,水滴体积为 5 μL 。利用 Nicolet

6700 智能型傅里叶红外光谱仪对薄膜表面的化学键合进行测定。利用动电位极化曲线和交流阻抗(EIS)来测定所制备膜层的耐蚀性能,电位扫描速度 2 mV/s,交流阻抗的测量范围 10 mHz~10 kHz,所有电化学测试在 3.5% NaCl 溶液中进行。

2 结果与讨论

2.1 结构与形貌

图 1 是经化学刻蚀处理后铝合金表面形貌。从图中可以看出,未经刻蚀的铝合金表面很光滑,只有少量的抛光痕迹存在(图 1(a));样品 CE1(图 1(b))在经过盐酸溶液 1 min 的刻蚀后其

表面可观察到微量的腐蚀坑,但分布较少且较浅,腐蚀坑内结构并不完整。样品 CE2(图 1(c))在经过盐酸溶液 3 min 刻蚀后,表面出现大量腐蚀坑,且坑内结构完整,出现了阶梯状的微米结构且该阶梯状结构一路蜿蜒向下深入到铝合金内部(图 1(c)右上角放大力)。图 1(d)是样品 CE3 的表面形貌,从图中可以看出,在 5 min 刻蚀后表面密布着许多腐蚀坑,且腐蚀坑的深度相对 CE2 要深,坑内结构如图 1(d)右上角放大力所示,可观察到微量的阶梯状结构,以凹坑为主且凹坑很深,内部结构已被破坏。经刻蚀处理前后样品(CE0、CE1、CE2 和 CE3)的粗糙度分别为 0.878、1.589、1.998 和 2.117 μm 。

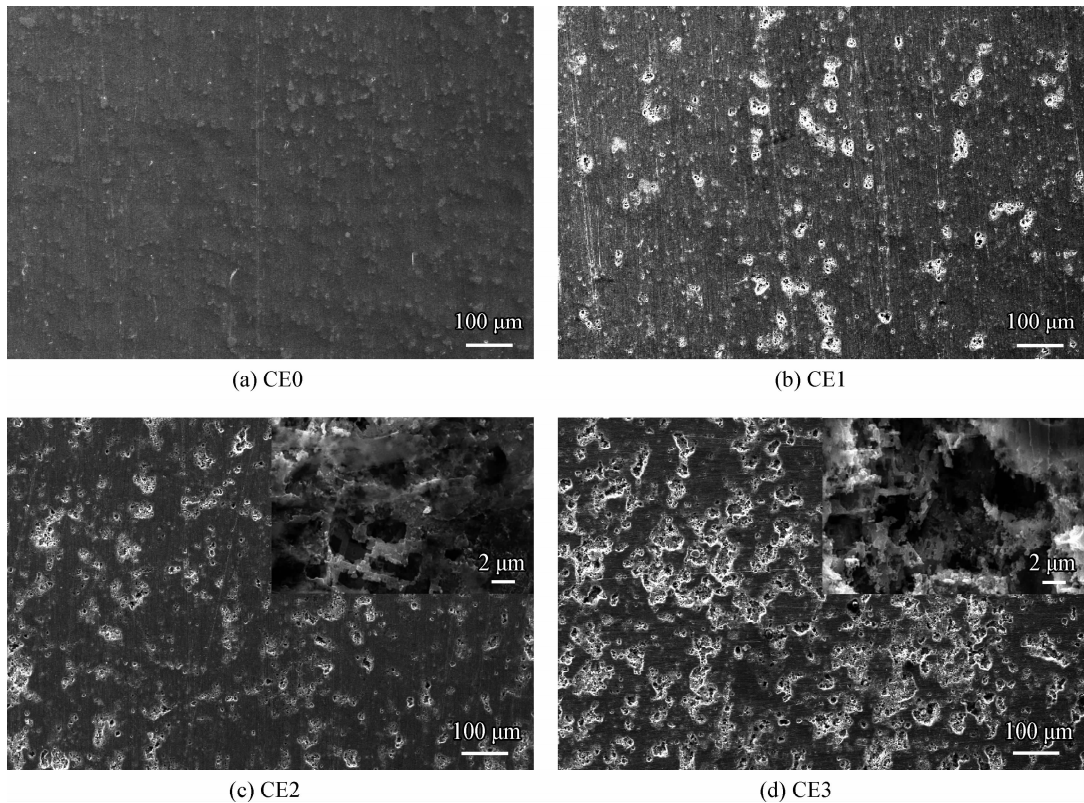


图 1 刻蚀前后铝合金样品表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies for samples before and after etching

图 2 是刻蚀前后经阳极氧化后阳极氧化膜的表面形貌。从图中可以看出,未经刻蚀的铝合金其上阳极氧化膜较为平整,零星分布着几个凹坑,在凹坑内能观察到纳米孔的存在,孔径大小为 50 nm 左右,如图 2(a)所示。样品 CE1(图 2(b))为经过盐酸溶液刻蚀 1 min 后的阳极氧化膜层结构,可以看出膜内的沟壑较浅且分布较为密集,在沟壑内有凹坑出现,纳米颗粒取代了纳米孔的

存在,且颗粒间交联分布,形成了类似于网状的结构。样品 CE2(图 2(c))在经过盐酸溶液刻蚀 3 min 后的表面上的阳极氧化膜层上可以观察到微米级别的凸台与凹坑间隔分布,沟壑较深,内部纳米颗粒的分布相对于图 2(b)来说更加密集,这可能是由于原位生长的阳极氧化膜在继承了原始表面结构的基础上又进行了优化重组,使得结构趋于合理且致密。图 2(d)是样品 CE3 的表

面形貌,从图中可以看出,上面的阳极氧化膜沟壑窄且浅,宽度为 500 nm 左右,沟壑两边的结构较为平整,没有观察到类似于图 2(b)(c)那样的

网状结构,这可能是由于长时间的化学刻蚀破坏了铝合金表面,从而导致如图 2(d)所示的阳极氧化膜结构。

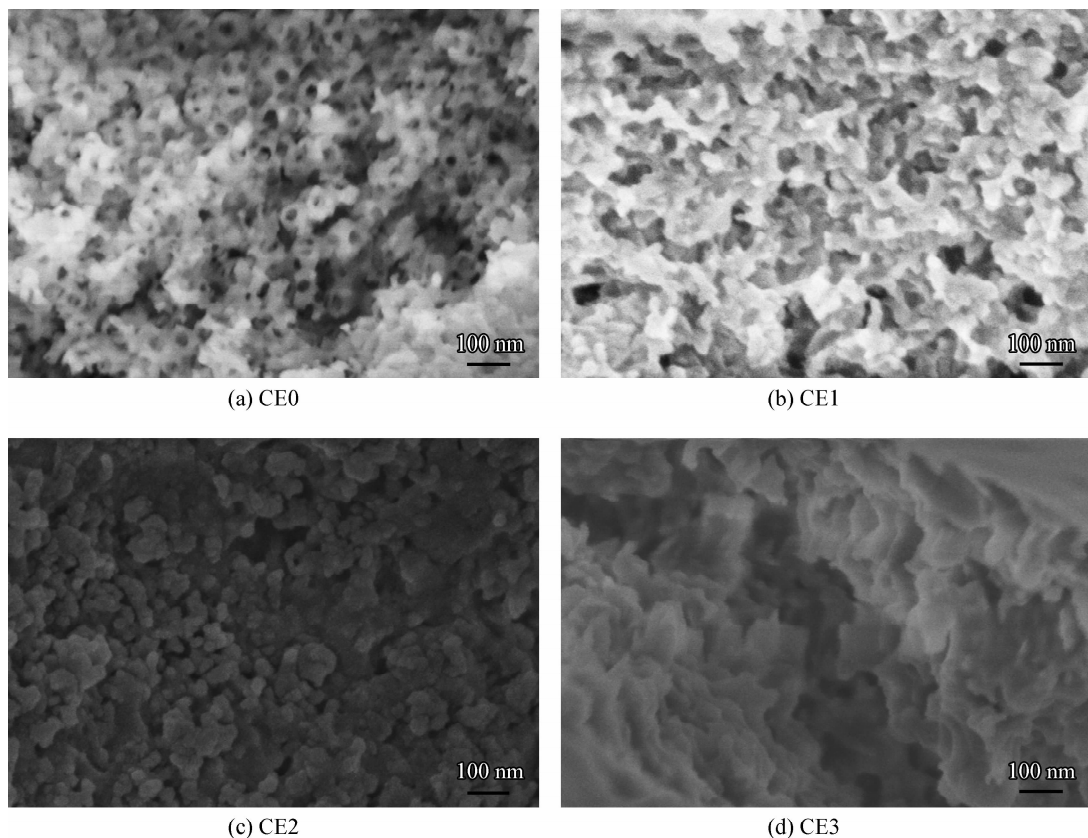


图 2 刻蚀前后阳极氧化膜的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies for anodized films before and after etching

图 3 是经阳极氧化后阳极氧化膜的截面形貌。从图中可以看出,未经刻蚀的铝合金上阳极氧化膜(图 3(a))的孔洞排列均匀,结构较为平整;样品 CE1(图 3(b))截面的孔洞分布高低起伏,这是由于其所生长的表面受到化学刻蚀的影响,表面上的腐蚀坑高低起伏;样品 CE2 的截面如图 3(c)所示,由图 2 可知样品 CE2 的表面存在着微纳米二元结构,因而反映到截面上就可以看出孔洞的相间分布,既有大的凹坑也有小的颗粒;样品 CE3 的截面(图 3(d))只有一部分能观察到孔洞的分布,原因可能是该处孔洞正好分布在较大的凹坑处,深度较深,周边观察到的则是膜内层的阻挡层。

图 4 是表面经过硅烷偶联剂 G502 修饰前后的样品 FT-IR 谱图,从图中可以看出,仅阳极氧化未经 G502 修饰的样品(a)在 $1\,160\text{ cm}^{-1}$ 处观察到的吸收峰为 $\text{Al}-\text{O}-\text{Al}$ 的伸缩振动峰,在经过

G502 修饰的样品(b~e)在 $1\,250\text{ cm}^{-1}$ 处观察到的吸收峰分别为 $-\text{CF}_2$, $-\text{CF}_3$ 基团中 $\text{C}-\text{F}$ 的伸缩振动峰以及在 $1\,127\text{ cm}^{-1}$ 观察到的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 伸缩振动峰。这些特征峰的存在说明, G502 已经成功的组装到阳极氧化铝合金表面。

2.2 形貌对表面润湿性能的影响

图 5 是水滴在样品表面的静态接触角与刻蚀时间的关系曲线。从图中可以看出,随着刻蚀时间的增加,接触角先增大后减小,当刻蚀时间为 3 min 时接触角最大,达到了 152° ,呈现出超疏水的性质。从图 2(c)可以看出,该样品的表面结构为微米平台上纳米颗粒交联排列构成微-纳米二元复合的网状结构,由于铝合金在硫酸中阳极氧化结构为多孔性结构,分为内层的阻挡层和外层的多孔层^[8-10](图 2(a)),但是经过刻蚀后铝合金表面的结构发生了改变,因而也就造成了其上原位生长的阳极氧化膜层的结构发生了改变。

经过 3 min 刻蚀后铝合金的表面结构是阶梯状的微米结构上分布着纳米颗粒,所以其上原位生长的阳极氧化膜内层的阻挡层就出现了凸台与凹坑间隔排列的结构,外层的多孔层由于受到力的牵扯作用不再是典型的孔状结构,而主要以纳米颗粒为主,且纳米颗粒间距很小,排列致密^[11-12](图 2(c))。由于粗糙结构与低表面能物质的协同作用使得 CE2 的接触角最大,此时由于表面粗

糙结构中的沟壑较深其内存有空气,液滴不会直接渗入到沟壑底部,导致液滴与固体表面的接触变成一部分与固体直接接触,还有一部分与沟壑内的空气接触,此时液滴在样品表面呈现 Cassie-Baxter 状态^[6, 13-14],

$$\cos\theta_c = f_s \cos\theta_s + f_a \cos\theta_a \tag{1}$$

其中 θ_c 为 Cassie 模型中的平衡接触角, θ_s 和

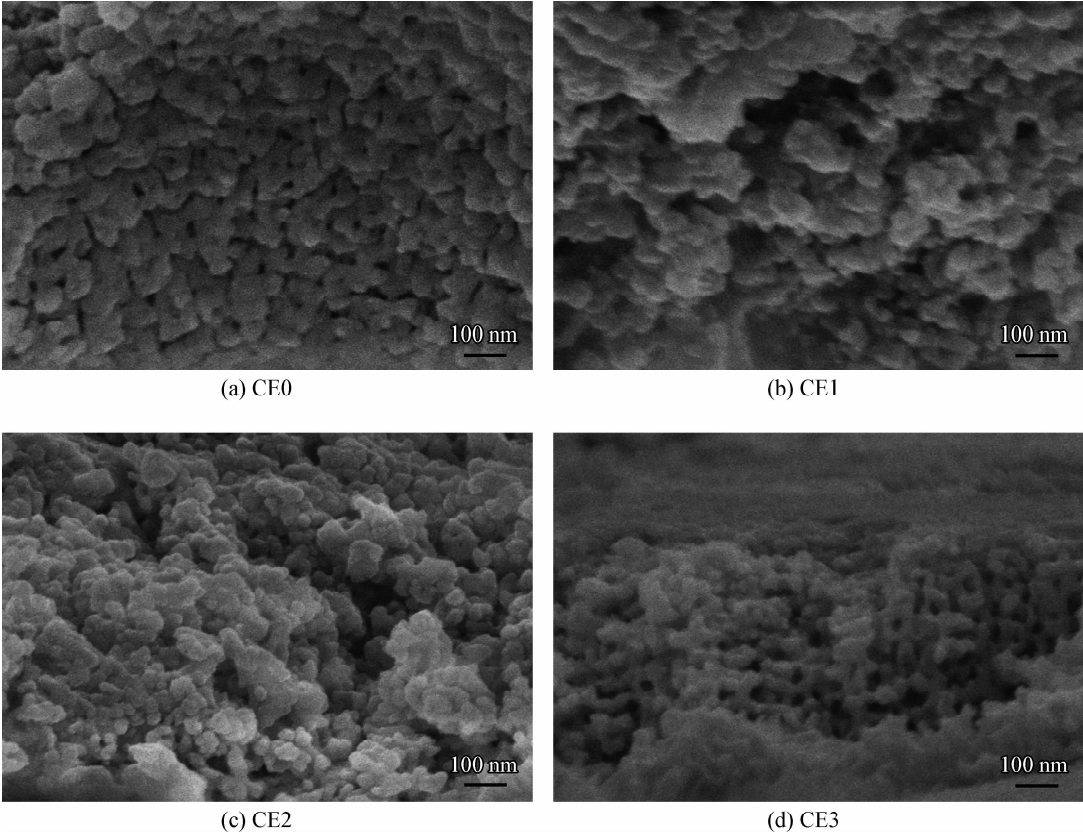


图 3 刻蚀前后阳极氧化膜的截面形貌

Fig. 3 Cross section morphologies for anodized films before and after etching

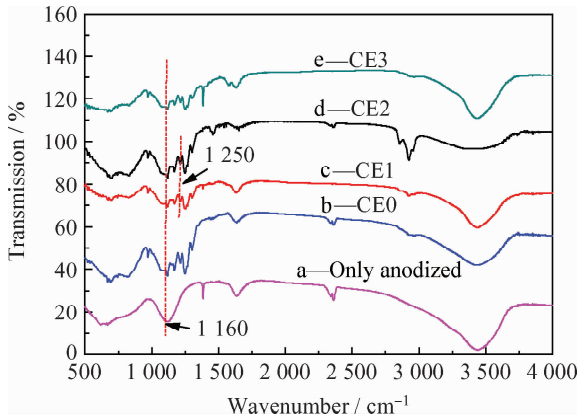


图 4 刻蚀前后样品的红外图谱

Fig. 4 FTIR spectra of samples before and after etching

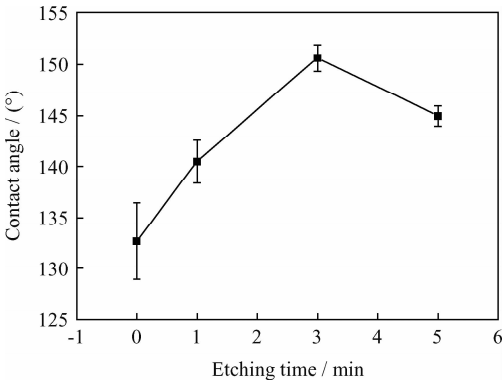


图 5 接触角与刻蚀时间的关系曲线

Fig. 5 Relationships between the etching time and contact angle

θ_a 分别为液滴在固体和气体表面的接触角, f_s 和 f_a 分别为固体和气体两种介质所占的面积分数 ($f_s + f_a = 1$), 随着 f_s 的减小, 也就是表面结构越粗糙, 接触角也越大, 因而 CE2 的接触角最大。

2.3 耐腐蚀性能

在经阳极氧化的铝合金表面构筑一层疏水薄膜后, 利用电化学试验测试了该膜层的耐蚀性能。图 6 是所制备样品的 Tafel 曲线, 从图 6 可看出, 经过 3 min 刻蚀预处理的样品自腐蚀电位最高, 达到 -0.39 V, 相对于其他经刻蚀处理的样品自腐蚀电位上移了 0.15 V 左右, 说明该样品发生腐蚀的倾向较小。而 CE1 和 CE3 的自腐蚀电位相对于 CE0 发生了负移, 可能的原因是 CE1 和 CE3 经化学刻蚀后, 其表面密布着各种点蚀坑, 但是这些点蚀坑的结构并不完整, 未出现 CE2 微纳结构存在的现象, 因而导致样品的耐蚀性能略有下降, 而样品 CE2 在腐蚀电位为 -0.2 V 时腐蚀电流出现了激增, 这可能是由于在该点处发生了击穿现象。但该样品的腐蚀电流密度 (I_{corr}) 为 1.118×10^{-9} A/cm², 相对于只经过阳极氧化处理的样品的腐蚀电流密度 (3.295×10^{-6} A/cm²) 降低了两个数量级, CE1 和 CE3 的腐蚀电流密度分别为 1.458×10^{-6} A/cm² 和 1.455×10^{-6} A/cm²。腐蚀电流密度的减小可能是由于该样品表面粗糙的结构与超疏水膜层的协同作用更加有效的阻隔了 Cl⁻ 等腐蚀介质的进入, 从而起到了延缓样品腐蚀速率的作用。由此看来, 经过化学刻蚀处理后, 阳极氧化膜层的耐蚀性能得到了很大的提高。

图 7 是样品的 Bode 图谱, 图 7(a) 是频率-阻

抗图, 图 7(b) 是频率-角度图。一般使用低频区的阻抗值来表征涂层的耐蚀性能^[15], 从图 7(a) 可以看出, 在 10 mHz 处 CE0, CE1, CE2 和 CE3 的阻抗值分别为 9.29 、 29.29 、 1140 和 34.67 kΩ·cm², 样品 CE2 在低频区的阻抗值比 CE0 的阻抗值大了 3 个数量级, 同时也比 CE1 和 CE3 的低频区阻抗值要大, 说明通过刻蚀预处理调控样品的表面形貌能够起到提高样品耐蚀性能的作用。

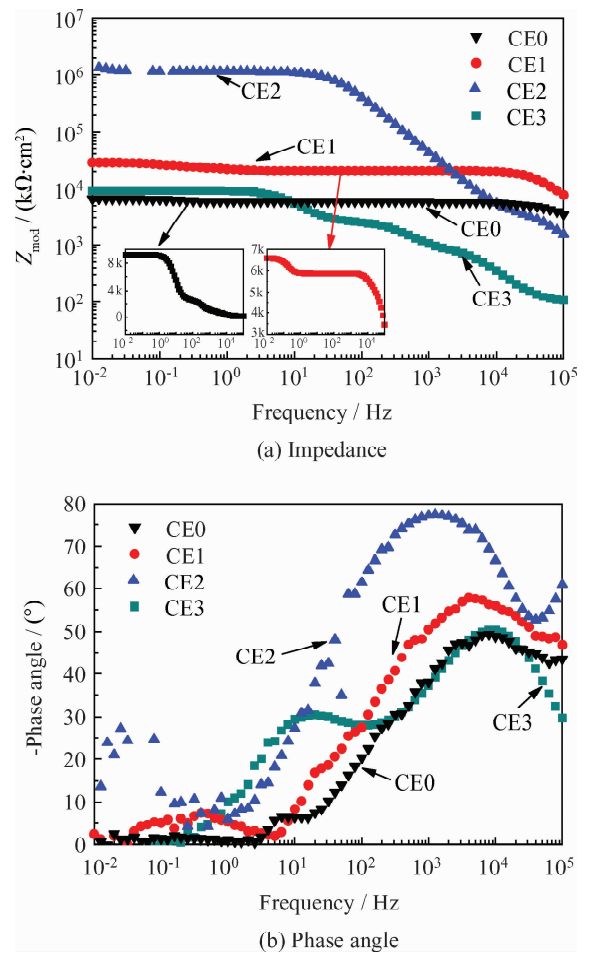


图 7 不同样品的频率-阻抗图和频率-角度图
Fig. 7 Impedance and phase angle graphs for different samples

从图 7(b) 可以看出, 每条曲线都有 3 个峰值, 说明体系中含有 3 个时间常数。对于样品 CE0、CE1 和 CE3 在高频区 (10^4 Hz) 观察到的峰对应阳极氧化膜上硅烷试剂组装的一层疏水膜, 中频区 (10 Hz) 的峰对应的是铝合金表面的阳极氧化膜层, 在低频区 (0.1 Hz) 对应的则是铝合金表面的腐蚀过程。而对于样品 CE2 来说, 在高频区 (10^5 Hz) 观察到的峰值对应的是其上的超疏水膜层, 中频区 (10^3 Hz) 对应的是铝合金表面的阳

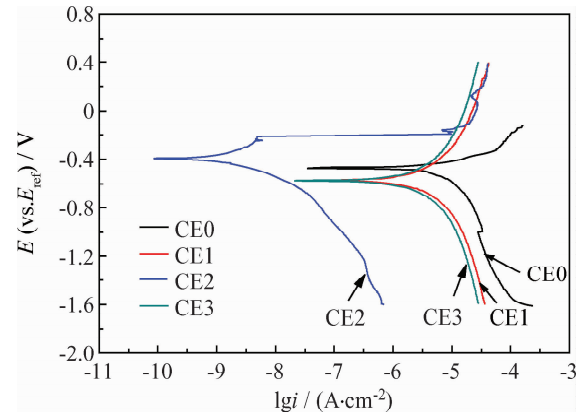


图 6 刻蚀前后样品的极化曲线
Fig. 6 Polarization curves of samples before and after etching

极氧化膜层,在低频区(10^{-2} Hz)的峰对应的是铝合金的腐蚀过程。为了进一步分析阻抗谱图,使用如图 8 所示的等效电路模型^[16],在该等效电路模型中溶液电阻用 R_{Ω} 表示, R_{hd} 表示样品上的硅烷偶联剂自组装疏水膜层, C_{hd} 是与疏水膜层相关的电容, R_{ox} 表示阳极氧化膜层, C_{ox} 是与表面阳极氧化层相关的电容, R_{ct} 表示粗糙的铝合金表面与溶液反应的电子交换电阻, C_{ct} 是与表面氧化层相关的电容^[17]。经软件拟合后,样品 CE0,CE1,CE2 和 CE3 的 R_{ct} 的值分别为:12.84、32.49、960 和 48.1 $k\Omega \cdot cm^2$,与阻抗值的顺序保持一致。

表 3 为经过拟合后样品的 C_{hd} 、 C_{ox} 和 C_{ct} 电容值,从表中可以看出样品 CE2 电容值最小,对应 R_{ct} 的电容 C_{ct} 的值为 1.556×10^{-9} F/ cm^2 ,远小于其他样品的电容值,该结果得出的结论与阻抗值的结论一致。根据 Tafel 曲线和交流阻抗谱可以得出,样品 CE2 的耐蚀性能最佳,可能的原因是经过化学刻蚀后,其表面上分布着很多微结构(图 2(c)),在这些微结构上原位生长了阳极氧化膜层,阳极氧化膜呈现出纳米颗粒交联分布成网状结构,该种结构满足了超疏水形成的结构基础,再加上低表面能的硅氧烷的协同作用,在铝合金表面形成了超疏水膜层,该结果与接触角的变

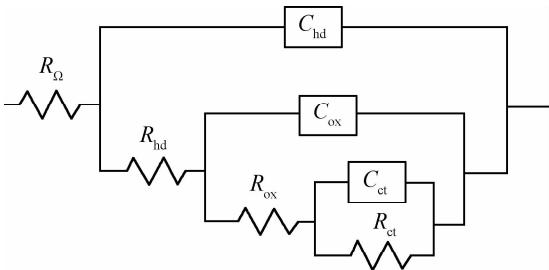


图 8 根据交流阻抗谱拟合的样品等效电路
Fig.8 Equivalent circuit models fitted for different samples according to the electrochemical impedance spectroscopy

表 3 不同样品所使用的等效电路电容
Table 3 Capacitance values of the equivalent circuits applied for different samples (10^{-9} F · cm^{-2})

Sample	C_{hd}	C_{ox}	C_{ct}
CE0	238.6	140.4	1293
CE1	89.77	102.9	238.6
CE2	18.36	3.752	1.556
CE3	180.3	193.8	170.7

化规律一致,该膜层有效地阻隔了 Cl^{-} 等腐蚀介质进入基底表面,因而使得样品的耐蚀性能得到很大的提高。而样品 CE3 的耐蚀性能优于 CE0,其可能的原因是其上阳极氧化膜的沟壑窄且浅,沟壑周边结构平整,起伏较小,从宏观上来说该层结构较为致密,阻挡腐蚀介质进入的能力也较强,因而表现出较 CE0 好的耐蚀性能。

3 结 论

- (1) 利用化学刻蚀与阳极氧化相结合的方法在铝合金表面构造了微纳结构,经进一步化学修饰后制备了耐蚀性能良好的表面防护膜层。
- (2) 通过改变化学刻蚀时间,调控了阳极氧化膜的表面结构和疏水性能,最佳的刻蚀时间为 3 min 时,膜层的微结构最完整、合理,接触角高达 152° 。
- (3) 化学刻蚀时间为 3 min 的样品的耐蚀性能最佳,这是由于化学刻蚀之后的表面及在表面上原位生长的阳极氧化膜构成了理想的粗糙结构与自组装的硅氧烷膜层的协同作用,有效阻隔了 Cl^{-} 等腐蚀介质的进入。

参考文献

[1] 李鸿鹏,李锋,马康明,等. LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(3): 175-177.
Li H P, Li F, Ma K M, et al. Progress on research of corrosion fatigue of LY12CZ [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(3): 175-177 (in Chinese).

[2] 尹国光. 2024 铝合金宽温快速阳极氧化 [J]. 泉州师范学院学报(自然科学版), 2002, 20(4): 37-40.
Yin G G, Rapid anodizing technique of 2024 aluminum alloy in wide temperature range [J]. Journal of Quanzhou Normal College (Natural Science), 2002, 20(4): 37-40 (in Chinese).

[3] 朱祖芳. 铝阳极氧化的应用 [J]. 电镀与涂饰, 1999, 18(1): 40-43.
Zhu Z F, Application of the anodization of aluminum [J]. Electroplating & Finishing, 1999, 18(1): 40-43 (in Chinese).

[4] Li X, Nie X, Wang L, et al. Corrosion protection properties of anodic oxide coatings on an Al-Si alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(5/6): 1994-2000.

[5] 贺春林,于文馨,王建明,等. 2024 铝合金阳极氧化膜的结构和耐蚀性能 [J]. 材料保护, 2006, 39(2): 45-48.
He C L, Yu W Y, Wang J M, et al. Microstructures and anti-corrosion behavior of anodic oxidized coating on Al alloy [J]. Materials Protection, 2006, 39(2): 45-48 (in

Chinese).

[6] Ou J F, Hu W H, Xue M S, et al. Superhydrophobic surfaces on light alloy substrates fabricated by a versatile process and their corrosion protection [J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2013, 5(8): 3101-7.

[7] Liao R, Z Zuo, Gao C, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum by continuous chemical etching and its anti-icing property [J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 701-709.

[8] Jilani O, Njah N, Ponthiaux P. Corrosion properties of anodized aluminum: effects of equal channel angular pressing prior to anodization [J]. Corrosion Science, 2014, 89: 163-170.

[9] Nagaura T, Takeuchi F, Inoue S. Fabrication and structural control of anodic alumina films with inverted cone porous structure using multi-step anodizing [J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(5): 2109-14.

[10] 巩运兰, 王为, 王惠, 等. 铝阳极氧化膜纳米孔阵列结构的自组织过程分析 [J]. 物理化学学报, 2004, 20(2): 199-201.

Gong Y L, Wang W, Wang H, et al. The analysis of self-organizing process of anodic alumina films with Nano-pore array structure [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2004, 20(2): 199-201 (in Chinese).

[11] Li S M, Li B, Liu J H, et al. Corrosion resistance of superhydrophobic film on aluminum alloy surface fabricated by chemical etching and anodization [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, 28(8): 1755-62.

[12] Leese H, Bhurtun V, Davide M, et al. Wetting behaviour of hydrophilic and hydrophobic nanostructured porous anodic alumina [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 420: 53-58.

[13] He B, Patankar N A, Lee J. Multiple equilibrium droplet shapes and design criterion for rough hydrophobic surfaces [J]. Langmuir, 2003, 19(12): 4999-5003.

[14] Swain P S, Lipowsky R. Contact angles on heterogeneous surfaces: a new look at Cassie's and Wenzel's Laws [J]. Langmuir, 1998, 14(23): 6772-80.

[15] 曹楚南. 腐蚀电化学中的频谱分析研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1993, 5(1): 1-9.

Cao C N. Studies on the spectral analyses in the electrochemistry of corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technique, 1993, 5(1): 1-9 (in Chinese).

[16] 高鹏, 朱永明, 李宁, 等. 铁基上析氢反应机理电化学阻抗谱等效电路模型 [J]. 材料保护, 2009, 42(8): 4-7.

Gao P, Zhu Y M, Li N, et al. EIS study for the reaction mechanism of Fe-based hydrogen evolution [J]. Materials Protection, 2009, 42(8): 4-7 (in Chinese).

[17] Vesna M, Ivana J, Inhua J, et al. Electrochemical study of corrosion behavior of graphene coatings on copper and aluminum in a chloride solution [J]. Carbon, 2014, 75: 335-344.

(责任编辑: 常青)

• 学术动态 •

第七届亚洲热喷涂会议将在西安召开

由亚洲热喷涂学会主办,西安交通大学金属材料强度国家重点实验室承办的第七届亚洲热喷涂会议将于 2015 年 9 月 23-25 日在西安交通大学南洋大酒店召开。

会议内容主要涉及与热喷涂相关的基础研究与工业应用等,包括:性能与应用、设备与工艺、理论研究、建模、冷喷涂、热障涂层、SOFCs 涂层、生物涂层和喷涂材料等。会议邀请国际知名专家与学者分别报告最新应用的基础研究进展、新兴热喷涂方法(冷喷涂与等离子喷涂-物理气相沉积)最新进展以及不同研究方向的最新研究成果。

会议工作语言为英文,将包括主旨报告、口头报告和墙报等形式。会议将组织评选优秀论文奖、优秀青年学者奖和青年学生奖,其中青年学生奖获得者将获得赴上届 ATSC 举办国访问学习约 1 周的机会。论文集扩展摘要(限两页)截止日期为 2015 年 7 月 15 日。

联系人: 杨冠军,联系电话: (029) 8266 5299, 邮箱: ygj@mail.xjtu.edu.cn; 地址: 陕西省西安市咸宁西路 28 号(710049)

(摘自 中国机械工程学会表面工程分会 网)