

电解液对 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层性能的影响

钱建才, 邹洪庆, 许斌, 吴厚昌, 吕基成, 方敏

(西南技术工程研究所 国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039)

摘要:目的 对硫酸、混合酸电解液体系中制备的 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层性能进行研究, 找出混合酸电解液体系对 2A12 铝合金硬质阳极氧化过程的影响机理, 为改善膜层的耐蚀性能提供一种思路。方法 通过对膜层厚度、显微硬度、微观形貌、极化曲线、交流阻抗试验结果进行分析, 研究不同电解液对 2A12 硬质阳极氧化膜层性能的影响。结果 在有机酸的活性吸附作用下, 混和酸电解液解决了硫酸电解液制备 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜存在的厚度、硬度不均匀及烧蚀现象, 制备的膜层厚度范围为 35 ~ 38 μm , 硬度范围为 386 ~ 407HV0.05, 具有厚度和硬度分布均匀、离散性小的特点。极化曲线及电化学交流阻抗分析表明, 混合酸电解液体系中制备的 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层未进行封孔处理时, 膜层的自腐蚀电位为 -619.93 mV, 阻挡层电阻为 $1.4 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$; 封孔处理后, 膜层的自腐蚀电位为 -74.69 mV, 阻挡层电阻为 $2.376 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这说明封孔处理能够改善阻挡层的质量, 显著提高膜层的耐腐蚀性能。结论 采用混合酸电解液体系能够稳定制备出 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层, 制备的膜层应进行封孔处理。

关键词: 2A12 铝合金; 硬质阳极氧化; 显微硬度; 耐蚀性; 极化曲线; 交流阻抗

中图分类号: TG174.451 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)11-0040-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.007

Influence of Electrolyte on the Properties of Hard Anodic Oxide Coating on 2A12 Aluminium Alloy

QIAN Jian-cai, ZOU Hong-qing, XU Bin, WU Hou-chang, LYU Ji-cheng, FANG Min

(Weathering Test and Research Center of Science Technology and Industry for National Defense, Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the properties of hard anodic oxidation coatings on 2A12 aluminum alloy prepared in the electrolyte of sulphuric acids and hybrid acids separately, in order to find out the influencing mechanism of hybrid acids on hard anodic oxidation process of 2A12 aluminum alloy, and provide method to enhance the coating corrosion resistance. **Methods** The properties of hard anodic oxide coatings prepared in different electrolytes were analyzed and characterized by thickness, micro-hardness, SEM morphology, polarization curve and AC impedance spectroscopic to investigate the influence of different electrolytes on the performance of hard anodic oxidation coatings on 2A12 aluminum alloy. **Results** The phenomenon of hard anodic oxide coatings on 2A12 aluminum alloy prepared in electrolyte of sulphuric acids such as ablation, non-uniform distribution of thickness and micro-hardness can be resolved by active adsorption of organic acids in electrolyte of hybrid acids, and the thickness distribution range was 35 ~ 38

收稿日期: 2015-08-06; 修订日期: 2015-09-10

Received: 2015-08-06; Revised: 2015-09-10

作者简介: 钱建才(1980—),男,河北人,工程师,主要从事金属材料腐蚀防护的相关研究。

Biography: QIAN Jian-cai (1980—), Male, from Hebei, Engineer, Research focus: corrosion and protection of metals.

μm , the micro-hardness distribution range was 386 ~ 407HV0.05. The polarization curve and the EIS analysis showed that the corrosion potential of unsealed and sealed coating was -619.93 mV and -74.69 mV separately, the barrier layer resistance of unsealed and sealed coating was $1.4 \times 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ and $2.376 \times 10^6\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ separately, which indicated that corrosion resistance can be enhanced and improved by sealing. **Conclusion** Hard anodic oxide coatings on 2A12 aluminum alloy can be stably prepared in electrolyte of hybrid acids, and the coating should be sealed.

KEY WORDS: 2A12 Aluminium alloy; hard anodic oxide; micro-hardness; corrosion resistance; polarization curve; AC-impedance

2A12 铝合金材料由于添加了铜元素,其强度、硬度及机械加工性能大幅提高,因而在航天、航空、电子、汽车等武器装备及工业领域得到了广泛的应用^[1-2]。由于铜含量较高(3.8% ~ 4.9%),2A12 铝合金材料内含有较多的金属间化合物 CuAl_2 ,进行硬质阳极氧化时,这些金属间化合物存在过快溶解的问题,因此2A12 铝合金采用常规硫酸电解液体系制备硬质阳极氧化膜比较困难,存在成膜不均匀、膜层质量差^[3]等问题,同时在制备过程中极易发生膜层烧损^[4-6]。改变电源波形或电解液成分可以改善膜层的质量,降低膜层的烧损率^[7-15]。文中分别采用混合酸电解液体系和硫酸电解液体系制备了2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层,并对其主要性能进行了研究。

1 试验

1.1 硬质阳极氧化

2A12 铝合金样板规格为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,先依次经过打磨、除油、热处理、固溶时效、碱洗、冷水洗、酸洗出光、冷水洗等工序处理,再进行硬质阳极氧化。

打磨工序是采用 320#—600# 水磨砂纸进行打磨,以去除表面包铝层。除油是在丙酮中浸泡 2 min,取出后用脱脂棉擦拭干净。热处理条件为:将样板于室温放入马弗炉内,以 $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的恒定速率升温到 $500 \sim 505\text{ }^\circ\text{C}$,保持恒温 15 ~ 30 min 后,快速取出,在室温纯水中淬火,冷风吹干,进行不少于 96 h 的自然时效处理。碱洗条件为:50 g/L NaOH,5 g/L 葡萄糖酸钠,温度 $50 \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$,时间 30 ~ 60 s。酸洗出光条件为:300 mL/L HNO_3 ,室温,时间 3 ~ 5 min。

制备硬质阳极氧化膜层采用两个配方。配方 1 为: H_2SO_4 270 g/L,硫酸铝 10 g/L,甘油 15 g/L。配方 2 为: H_2SO_4 270 g/L, $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ 25 g/L, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 15 g/L,硫酸铝 10 g/L,甘油 15 g/L,WX 25 g/L。膜层的制备全部采用直流电源,工艺条件均为:电流密度 2.5 A/

dm^2 ,电解液温度($-3 \sim 0$) $^\circ\text{C}$,时间 60 min,压缩空气搅拌。部分样品进行 30 min 沸水封孔处理,样品编号见表 1。

表 1 样品处理条件及编号

Tab. 1 Conditions and numbers of surface treatment samples

编号	阳极氧化配方	是否封孔处理
A1	配方 2	是
A2	配方 2	否
B1	配方 1	是
B2	配方 1	否

1.2 测试分析

采用 MiniTest600 涂镀层测厚仪测试膜层厚度;采用 HM-MT1000 型显微硬度计测试膜层表面显微硬度;采用 LinK ISIS 型能谱分析仪对膜层进行能谱分析。

采用 EG&G PAR Potentiostat/Galvanostat 273A 和 5210 锁相放大器电化学测试系统进行 Tafel 极化曲线和交流阻抗谱测试。测试采用三电极体系:样品为工作电极,铂片为辅助电极,SCE(饱和甘汞电极)为参比电极。测试溶液为 3.5% (质量分数) NaCl 溶液,测试温度为室温。电化学测试前,样品先在 NaCl 溶液中浸泡 30 min。极化曲线测试采用线性扫描法,扫描速率为 1 mV/s 。交流阻抗测试采用 10 mV 的正弦波信号,测试频率范围为 $100\text{ kHz} \sim 100\text{ mHz}$,测得的数据采用 ZsimpWin 软件进行拟合处理。

2 结果与分析

2.1 厚度

图 1 是采用配方 1、配方 2 制备的 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层的厚度分布图。可以看出,配方 1 制备的膜层厚度范围为 $26 \sim 43\ \mu\text{m}$,分布不均匀,离散

性大;配方2制备的膜层厚度范围为35~38 μm,分布均匀,离散性小。由于2A12铝合金的富CuAl₂相等局部区域溶解过快,是电流聚集的中心,因此该部位的膜层异常增长,不仅会造成膜层厚度分布不均匀,而且容易造成局部过热,极易烧毁零件。配方2中含有草酸和柠檬酸,一旦发生电流聚集,有机酸离子就会在正电场的作用下向铝合金表面的活性点快速迁移,并在铝合金表面发生电化学吸附^[16],从而对电解液传质起到一定的阻碍作用,降低其电化学反应速度,避免此处因过热而快速溶解,不仅极大地降低了试样的烧毁率,而且还使得膜层厚度分布更加均匀。

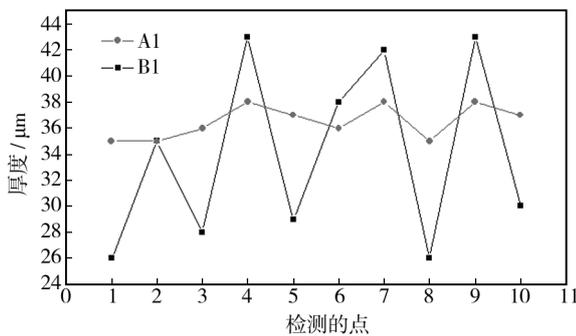


图1 采用配方1和2制备的硬质阳极氧化膜厚度分布
Fig.1 The thickness distribution diagram of hard anodic oxidation coatings prepared by formula 1 and 2

2.2 硬度

如图2所示,采用配方1制备的膜层硬度分布不均匀,硬度范围为235~385HV0.05,平均值为293HV0.05。这主要是因为电流分布不均匀,在电流密度大的区域,膜层厚且硬度高;而在电流密度小的区域,膜层薄且硬度低。采用配方2制备的膜层硬度分布比较均匀,硬度范围为386~407HV0.05,平均值为395HV0.05。

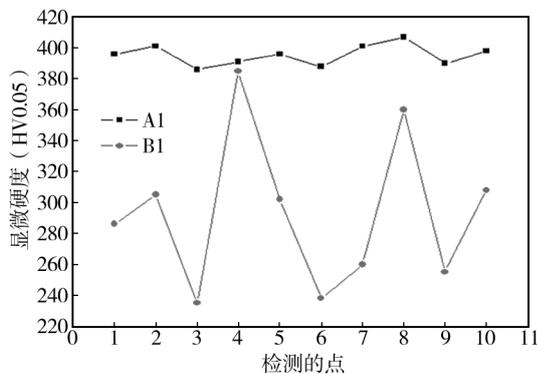


图2 采用配方1和2制备的硬质阳极氧化膜硬度分布
Fig.2 The hardness distribution diagram of hard anodic oxidation coatings prepared by formula 1 and 2

2.3 表面形貌与成分

图3是采用配方2制备的2A12铝合金硬质阳极氧化膜层的微观形貌,可以看到,膜层表面存在很多凸起结构。由元素含量分布(表2)可知,区域A与区域B的C元素含量差别最大,同时从图3可以看出,区域A的膜层存在疏松现象。由硬质阳极氧化的生成原理(Al和O发生氧化反应生成Al₂O₃)及电解液成分可知,硬质阳极氧化膜层中含有C元素主要是由电解液中有机的吸附造成的。从C元素的分布可以看出,有机酸在硬质阳极氧化反应过程中发生了不均匀吸附,在这种不均匀的吸附作用下,2A12铝合金的表面电流分布变得比较均匀,膜层性能得到明显改善。同时,由于有机酸在区域A的吸附较多,一定程度上造成了膜层疏松现象的产生。

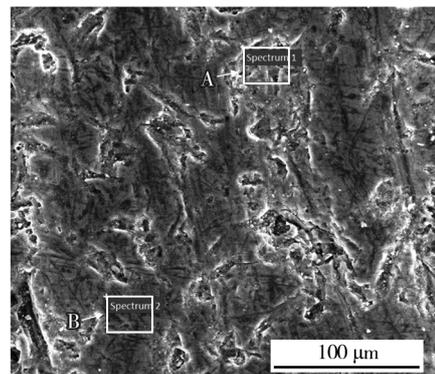


图3 采用配方2制备的硬质阳极氧化膜 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphology of hard anodic oxidation coating prepared by formula 2

表2 图3中区域A和B的元素组成

Tab.2 Contents of elements in area A and B in Fig.3

区域	元素的质量分数/%			
	Al	O	C	S
A	37.56	56.06	0.82	5.56
B	37.58	56.67	0.40	5.35

2.4 极化曲线

图4是2A12铝合金试样及4种硬质阳极氧化试样在3.5% NaCl溶液中的极化曲线,表2是采用Power-suit软件对极化曲线进行拟合后得到的自腐蚀电位(E_{corr})和自腐蚀电流(I_{corr})。从图4及表2中可以看出,自腐蚀电位有A1>B1>2A12>B2>A2,自腐蚀电流有A1<B1<A2<B2<2A12,相同电位条件下的维钝电流有A1<B1<A2<B2<2A12。其中,A2和B2的极化

曲线在超过 1 V 后基本重合。这是因为当电极电压超过 1 V 时,A2 和 B2 发生了明显的腐蚀。由于硬质阳极氧化膜具有阻挡层和多孔层的双层结构,未进行封闭处理时,阻挡层的阻滞作用较小。在电场作用下,Cl⁻ 很容易迁移到阻挡层表面,因此 A2 和 B2 主要反应阻挡层信息,A1 和 B1 则反应阻挡层和多孔层共同作用的信息。从极化曲线的自腐蚀电流及维钝电流可知,A2 阻挡层、B2 阻挡层与 2A12 铝合金在自然条件下形成的氧化膜相比,其耐蚀性由大到小依次为 A2>B2>2A12,但从图 4 中可以看出,A2 和 B2 的自腐蚀电位比 2A12 还要低,这可能是由于氧化过程中 2A12 铝合金局部富 CuAl₂ 区域溶解过快,造成 A2 和 B2 阻挡层表面存在活性点或薄弱点。从图 4 中还可以看出,进行封闭处理的 A1 和 B1 的耐蚀性分别比未封闭处理的 A2 和 B2 明显提高,并且 A1 的耐蚀性显著优于 B1,这说明 A1 硬质阳极氧化膜的质量要好于 B1 硬质阳极氧化膜。

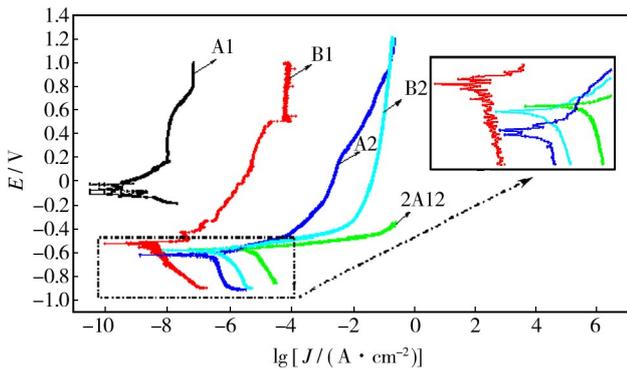


图 4 试样在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of samples in 3.5% NaCl solution

表 3 试样的自腐蚀电位和自腐蚀电流

Tab.3 The corrosion potential and current of different samples

试样	E_{corr}/mV	I_{corr}/nA	试样	E_{corr}/mV	I_{corr}/nA
A1	-74.69	0.5	B1	-551.60	6.6
A2	-619.93	309.9	B2	-579.39	417
2A12	-568.08	5337			

2.5 交流阻抗谱

A1 和 B1 硬质阳极氧化膜层的阻抗谱可以采用图 5a 所示的等效电路拟合,A2 和 B2 硬质阳极氧化膜层及 2A12 自然形成的氧化膜层的阻抗谱可以采用图 5b 所示的等效电路拟合(A2,B2 未进行封孔处理,阻挡层对 Cl⁻ 的阻滞作用较小,可以忽略;2A12 自然

形成的均质氧化膜层可以视为阻挡层处理)^[17-19]。其中,溶液电阻为 R_{sol} ,膜层表面均质结构层中的孔隙及缺陷内的电解液电阻为 R_l (高温封孔处理时,由于扩散作用,膜层表面会有一层很薄的均质结构层生成^[19]),多孔层孔内电阻为 R_p ,阻挡层电阻为 R_b 。 Q_{pw}, Q_p, Q_b 分别为多孔层孔壁、多孔层、阻挡层的常相位角元件(常相位角元件用于表征由于膜层不均匀性造成的膜层容抗行为与理想电容行为的偏离,常相位角元件阻抗 $Z_Q = Y_0^{-1}(j\omega)^{-n}$,其中 Y_0 与要表征的电容相关, n 值在 0 和 1 之间,当 n 值为 1 时是理想电容行为, n 值为 0 时是纯电阻行为^[20])。

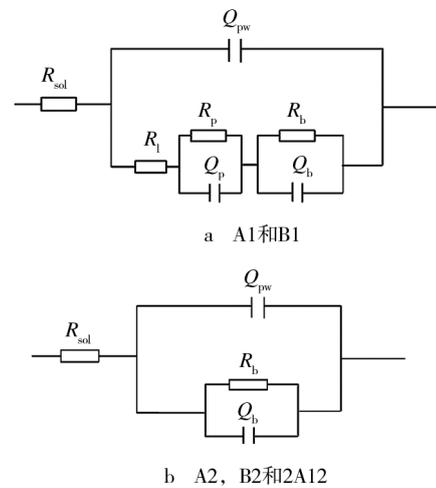


图 5 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层的等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit of hard anodic coatings on 2A12 aluminum alloy

图 6 是 2A12 铝合金试样及 4 种硬质阳极氧化试样在 3.5% NaCl 溶液中测得的 Bode 图及根据图 5 的等效电路进行拟合的效果图。从图 6 可以看出,A1, B1 分别与 A2,B2 具有相似的阻抗谱,其中 A1 和 B1

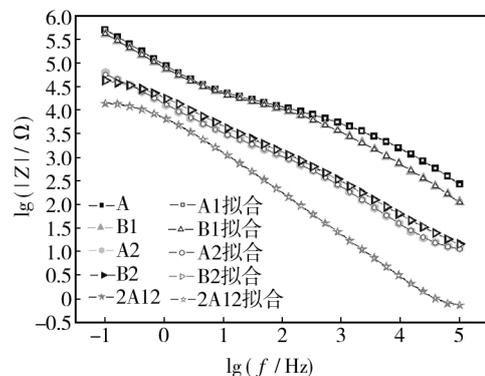


图 6 试样在 3.5% NaCl 溶液中的 Bode 图及拟合结果

Fig.6 Bode diagrams and fitting curves of samples in 3.5% NaCl solution

在约 10 ~ 100 Hz 范围内有一个明显的表征膜层多孔层电阻特性的平台,而 A2 和 B2 基本检测不到多孔层电阻特性信息,说明封孔处理能够明显改善多孔层的阻挡能力。此外还可以看出,采用图 5 的等效电路可以很好地模拟 5 种试样的电化学行为。

表 4 为图 5 等效电路中的各参数值。其中 Q_p , Q_b 的 Y_0 分别用 Q_p-Y_0 , Q_b-Y_0 表示,另外由于 R_{sol} 和 R_i 的值比较小,在试验频率范围内存在很大的不确定性,因此文中不进行分析。表 4 中, R_b 值有 A2>B2, Q_b-Y_0 值有 A2>B2,结合表 3 中的 E_{corr} 值有 A2<B2 以及表 2 的膜层成分分析,可以看出, A2 阻挡层的薄弱部位与 B2 相比具有较大的活性。比较表 4 中 A2, B2, 2A12 的 R_b , Q_b-Y_0 , n_b 可以看出,采用配方 1、配方 2 制备的硬质阳极氧化膜的质量很差,其中 B2 的 R_b 值与 2A12 的 R_b 值处于同一个数量级, A2 的 R_b 值比 B2 和 2A12 稍好, A2 和 B2 的 n_b 值均小于 2A12 的 n_b 值(铝合金阳极氧化膜的阻挡层电阻很大,一般情况

下 $R_b \geq 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, n 值可以对膜层的完整性进行表征,通常在 0 ~ 1 之间变化, n 值越接近 1 表明膜层的完整性越好^[21])。这主要是由于 2A12 铝合金铜含量高,采用配方 1 制备硬质阳极氧化膜的过程中, CuAl_2 等相溶解比较快,导致阻挡层存在较多的薄弱部位;而采用配方 2 制备的硬质阳极氧化膜层,虽然基于有机酸的吸附作用,阻挡层的成膜质量较好,但是由于存在较多的活性点,因而阻挡层整体质量不高。从表 4 中还可以看出,经过沸水封孔处理后,采用配方 1、配方 2 制备的硬质阳极氧化膜层的阻挡层 R_b 和 n_b 值均得到较大提高, Q_b-Y_0 值减小。这表明,封孔处理改善了阻挡层薄弱部位的质量,提高了阻挡层的完整性。此外, R_p 值有 A1>B1, Q_p-Y_0 值有 A1>B1, n_p 值有 A1<B1,这与配方 1 成膜过程中存在电流集中,而造成膜厚不均匀,而配方 2 由于有机酸的活性吸附,膜层中很多微观区域存在疏松现象的试验结果相符合。

表 4 电化学交流阻抗等效电路拟合数据

Tab. 4 Fitting data of impedance spectra on the basis of the equivalent circuit

试样	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_p-Y_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_p	$R_b/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_b-Y_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_b
A1	2.018×10^4	2.591×10^{-6}	0.4705	2.376×10^6	2.627×10^{-6}	0.8198
A2				1.400×10^5	1.628×10^{-5}	0.7011
B1	1.53×10^4	1.334×10^{-6}	0.5873	2.772×10^6	3.246×10^{-6}	0.7678
B2				5.113×10^4	7.109×10^{-6}	0.7179
2A12				1.615×10^4	2.096×10^{-5}	0.7348

3 结论

1) 采用混合酸电解液体系能够有效改善 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层的性能,制备出的膜层硬度、厚度分布均匀,离散性小。

2) 混合酸电解液体系中制备的 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层由于有机酸的吸附作用,存在活性点,未进行封孔处理前,其自腐蚀电位低,耐腐蚀性能差。封孔处理能够改善膜层性能,显著提高膜层的自腐蚀电位及耐腐蚀性能。

参考文献

[1] 王安东,陈跃良,张勇,等. 基于灰色马尔科夫模型的 2A12 铝合金腐蚀预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 22—28.

WANG An-dong, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. The Research on 2A12 Aluminum Corrosion Prediction Method Based on Gray Markov Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 22—28.

[2] 刘马宝,王巧云,张勇,等. 铝合金结构腐蚀传感器综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 29—34.

LIU Ma-bao, WANG Qiao-yun, ZHANG Yong, et al. Review on Corrosion Sensors for Aluminium Alloy Structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 29—34.

[3] 杨钿,周隆先. 铝合金微弧氧化技术应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 131—135.

YANG Tian, ZHOU Long-xian. Study on Application of Aluminum Alloy with Micro Arc Oxidation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 131—135.

[4] 王祝堂. 铝材及其表面处理手册[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1992.

WANG Zhu-tang. Aluminum and Its Surface Treatment Manual

- [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [5] 钱建才,许斌,邹洪庆,等. 2A12 铝合金硬质阳极氧化及膜层性能研究[J]. 表面技术,2014,43(5):37—40.
QIAN Jian-cai, XU Bin, ZOU Hong-qing, et al. Preparation and Properties of Hard Anodic Oxide Coating on 2A12 Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(5):37—40.
- [6] 顾琳. 低温2A12铝铜合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 西华师范大学学报:自然科学版,2011,32(2):184—189.
GU Lin. Hard Anodic Oxidation Technology for 2A12 Aluminium-Copper Alloy [J]. Journal of China West Normal University: Natural Science Edition, 2011, 32(2):184—189.
- [7] 刘建华,刘洲,于美,等. 3种溶液体系下铝合金阳极氧化膜的性能[J]. 中国有色金属学报,2012,22(7):2031—2039.
LIU Jian-hua, LIU Zhou, YU Mei, et al. Properties of Aluminum Alloy Anodic Films Formed in Three Kinds of Solutions [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7):2031—2039.
- [8] SAEEDIKHANI M, JAVIDI M, YAZDANI A, et al. Anodizing of 2024-T3 Aluminum Alloy in Sulfuric-Boric-Phosphoric Acids and Its Corrosion Behavior[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 9:2551—2559.
- [9] 于美,陈高红,刘建华,等. LY12CZ 铝合金的己二酸硫酸阳极氧化[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(3):363—367.
YU Mei, CHEN Gao-hong, LIU Jian-hua, et al. Adipic-Sulfuric Acid Anodizing for LY12CZ Aluminum Alloy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(3):363—367.
- [10] 韩克,欧忠文,蒲滕,等. 铝及铝合金硬质阳极氧化的研究进展[J]. 表面技术,2011,40(5):92—96.
HAN Ke, OU Zhong-wen, PU Teng, et al. Development of Hard Anodizing of Aluminum and Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(5):92—96.
- [11] 莫伟言,石玉龙. 2A12 铝合金常温脉冲硬质阳极氧化电解液配方优化[J]. 电镀与涂饰,2010,29(9):30—32.
MO Wei-yan, SHI Yu-long. Optimization of Electrolyte Formula of Pulse Hard Anodic Oxidation for 2A12 Aluminum Alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29(9):30—32.
- [12] 高丽,黎学明,李武林,等. LY12 铝合金低温硬质阳极氧化工艺研究[J]. 表面技术,2010,39(6):90—92.
GAO Li, LI Xue-ming, LI Wu-lin, et al. Process of Hard Anodic Oxidation Films on LY12 Aluminum Alloy at Low Temperature[J]. Surface Technology, 2010, 39(6):90—92.
- [13] 张修庆,赵祖欣,叶以富. 电解液成分对铝合金磷酸阳极氧化膜性能的影响[J]. 腐蚀与防护,2010(8):619—622.
ZHANG Xiu-qing, ZHAO Zu-xin, YE Yi-fu. Effect of Electrolyte Composition on Properties of Phosphoric Acid Anodization Film on Aluminum Alloy Surface[J]. Corrosion & Protection, 2010(8):619—622.
- [14] 李明祥,邹玉洁,孙宝龙,等. 铝合金阳极氧化技术发展[J]. 电镀与精饰,2014,36(8):41—46.
LI Ming-xiang, ZOU Yu-jie, SUN Bao-long, et al. The Development of Anodizing Technology in Aviation Aluminum Alloy[J]. Plating & Finishing, 2014, 36(8):41—46.
- [15] 刘莉,周英杰,赵冬梅. 双脉冲电源在铝合金硬质阳极氧化中的应用研究[J]. 涂装与电镀,2011(6):28—30.
LIU Li, ZHOU Ying-jie, ZHAO Dong-mei. Study on Application of Double Plus Power in Hard Anodic Oxidation for Aluminum Alloys [J]. Painting and Electroplating, 2011(6):28—30.
- [16] 张振邦. 铝材硬质阳极氧化若干问题探讨[J]. 材料保护,1996,29(1):20.
ZHANG Zhen-bang. Discussion on Some Problems of Hard Anodizing of Aluminum [J]. Materials Protection, 1996, 29(1):20.
- [17] HITZIG J, JÜTTER K, LARENZ W J. AC-impedance Measurements on Corroded Porous Aluminium Oxide Films[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1986, 133(5):887—892.
- [18] DOMINGUES L, FERNANDES J C S, DA CUNHA BELO M, et al. Anodising of Al 2024-T3 in a Modified Sulphuric Acid/Boric Acid Bath for Aeronautical Applications [J]. Corrosion Science, 2003, 45:149—160.
- [19] GONZÁLEZ J A, LÓPEZ V, BAUTISTA A, et al. Characterization of Porous Aluminium Oxide Films from A. C. Impedance Measurements[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1999, 29:229—238.
- [20] 曹楚南,张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京:科学出版社,2002.
CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [21] 赵旭辉. 铝阳极氧化膜的电化学阻抗特征研究[D]. 北京:北京化工大学,2005.
ZHAO Xu-hui. Study of Electrochemical Impedance Spectroscopy on Anodized Aluminum Alloys [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005.