

2A96 铝合金表面阳极氧化及性能研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2019.05.003

阳建君¹ 王博文¹
陈天鸥² 范才河¹
刘丹³ 欧玲¹
旷焕¹ 雷新蕾¹

1. 湖南工业大学
冶金与材料工程学院
湖南 株洲 412007
2. 株洲时代新材料科技
股份有限公司
湖南 株洲 412007
3. 湖南华菱湘潭钢铁有限
公司科技开展中心
湖南 湘潭 411101

摘要:针对铝合金表面极易氧化生成结构疏松、耐腐蚀性差的氧化膜问题,利用阳极氧化法对2A96铝合金表面进行防腐蚀处理。通过改变阳极氧化实验中的氧化电压,在2A96铝合金表面制备不同的阳极氧化膜;利用金相显微镜观察各个阳极氧化膜的表面形貌、测厚仪测量其厚度、显微硬度计测定其硬度、点滴实验获取其点滴时间、电化学工作站获取其极化曲线和交流阻抗谱,进而对阳极氧化膜的耐腐蚀性进行研究。结果表明,在所测电压范围(8~16 V)内,随着电压的升高,阳极氧化膜的厚度、硬度、点滴时间也逐渐增加,耐腐蚀性能也随之增强。2A96铝合金经过表面阳极化处理后,其性能显著提高。

关键词: 2A96 铝合金; 阳极氧化膜; 氧化电压; 交流阻抗谱

中图分类号: TG174.14 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2019)05-0016-08

引文格式: 阳建君, 王博文, 陈天鸥, 等. 2A96 铝合金表面阳极氧化及性能研究 [J]. 包装学报, 2019, 11(5): 16-23.

1 研究背景

相对于第二代铝锂合金, 2A96 铝锂合金中的 Li 含量较低, Cu 含量较高^[1]; 此外还添加了 Mn、Mg、Zn、Ag 及 Zr 等微合金化元素; 因而 2A96 铝锂合金具有密度低、模量高、强度-韧性平衡良好、耐损伤性能优良、各向异性小、热稳定性好等特点^[2]。然而在自然条件下, 铝合金表面极易被氧化形成一层氧化膜, 该氧化膜厚度约为 4 nm, 表层结构疏松、耐腐蚀性差^[3]。为了解决上述问题, 铝合金在加工成型前, 通常需要对其表面进行防腐蚀处理, 工业上常采用的处理方法有阳极氧化法、化学转化法等^[4]。

铝合金阳极氧化膜的结构一般以 Kellar 模型为基础^[5]; 其认为阳极氧化膜的结构是以针孔为中心的六棱体蜂窝结构, 由内外双层组成, 靠近铝基体的内层是致密的阻挡层, 外层是厚而疏松的多孔层^[6]。氧化膜这种多孔状的特质使其暴露在腐蚀介质中的有效面积增加, 耐腐蚀性较差, 需要作封闭处理^[7], 工业上常用的封闭方法是沸水封闭^[8]。沸水封闭的本质是利用氧化膜表面和孔壁中的氧化铝与水发生水合反应, 使 Al_2O_3 转化为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ^[9]; 此时水合物体积膨胀约为 33%, 可填充多孔氧化膜孔道, 从而将微孔封闭, 达到阻滞侵蚀性介质进入膜层, 提高阳极氧化膜耐腐蚀性的目的^[10]。

收稿日期: 2019-08-12

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ60068), 株洲市科技计划基金资助项目(株科发[2018]62号5), 湖南工业大学大学生创新创业训练计划基金资助项目(湘教通[2017]205号469), 湖南株洲轨道交通及先进材料技术科普基地基金资助项目(湘科函[2018]48号29)

作者简介: 阳建君(1985-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事铝合金阳极氧化、金属激光熔覆复合涂层方面的研究, E-mail: 125841540@qq.com

通信作者: 范才河(1976-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事高强高韧铝合金、金属耐磨材料方面的研究, E-mail: 369581813@qq.com

P. Kwolek 等^[11]运用硬质阳极氧化工艺制备了阳极氧化膜, 并采用 Taber abrasion test 方法测试了氧化膜的耐磨性能与硬度的关系, 结果表明阳极氧化膜硬度越大, 其耐磨性能越好。M. Bononi 等^[12]通过改变硬质阳极氧化的工艺参数(硫酸浓度、电流密度等), 发现高硫酸浓度以及高电流密度会增加阳极氧化膜的硬度, 但同时也会增加氧化膜的缺陷, 从而导致阳极氧化膜的耐腐蚀性能变差。

我国对铝合金阳极氧化工艺的研究起步较晚, 但是在 30 多年的引进、吸收和发展的过程中, 积累了大量的工艺经验。石绪中等^[13]通过研究不同电流密度和温度对阳极氧化膜性能的影响, 发现电流密度越大, 槽电压越高; 槽液温度对氧化电压影响很大, 温度越低槽电压越高, 尤其在氧化后期, 槽电压迅速上升。李明祥等^[14]通过对阳极氧化技术的特点进行分析, 分别从预处理工艺、阳极氧化工艺及膜层封闭处理三方面阐述航空工业中铝合金阳极氧化技术的研究现状。目前对于铝合金阳极氧化多孔膜的研究主要从两方面着手: 一是利用它的多孔结构, 研制新型的超精密分离膜^[15-17]; 二是在其纳米级微孔中沉积各种性质不同的物质^[18-19]。

本研究利用阳极氧化法, 通过将 2A96 铝合金与电源的正极相接, 负极与铅板相接, 以硫酸溶液为电解液形成一个闭合回路^[20-21], 再改变氧化电压使铝合金表面获得不同的阳极氧化膜; 利用金相图及电化学性能测试等手段分析阳极氧化膜的厚度、硬度、点滴时间及耐腐蚀性与氧化电压的关系^[22-24], 以期获得优质的阳极氧化工艺。铝合金经过表面阳极氧化处理后, 其耐腐蚀性、硬度、耐磨性等均大幅度提高。

2 实验

2.1 实验前准备

1) 主要试剂及材料

浓硫酸(H_2SO_4), 分析纯, 河南东科化工产品销售有限公司; 高锰酸钾($KMnO_4$), 分析纯, 河南曙业化工产品有限公司; 氯化钠($NaCl$), 分析纯, 天津市福晨化学试剂厂; 酒精(C_2H_5OH), 分析纯, 江苏常州市恒光化学试剂制造有限公司; 盐酸(HCl), 分析纯, 辛集市嘉泽化工有限公司; 重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$), 分析纯, 郑州震峰化工产品有限公司; 去离子水, 实验室自制。

实验所选用的材料为 2A96 铝合金, 使用线切割

机将其切成 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的正方形薄片试样, 厚度为 2 mm。

2) 主要仪器与设备

超声波清洗机, KQ80 型, 昆山市超声仪器有限公司; 金相抛光机, MP-2B 型, 上海电机(集团)公司日用电机厂; 直流电源, DM-1552C 型, 郑州市东明电子有限公司; 电化学工作站, CHI670E 型, 上海辰华仪器公司; 电子天平, JA5003N 型, 上海精密科学仪器有限公司; 显微硬度计, LEICA VHMT 型, 莱元科学仪器有限公司; 金相显微镜, DMC4500 型, 徕卡显微系统(上海)贸易有限公司; 测厚仪, Dualscope MPO 型, 德国菲希尔 FRETTEST 公司。

2.2 阳极氧化处理

2.2.1 表面预处理

对铝合金进行表面预处理是为了去除其表面油污及杂质, 以获得洁净的表面及良好的试样状态^[11]。首先, 将无水乙醇和去离子水按体积比 1:1 配制 200 mL 的清洗液; 再将切割完成的试样放入盛有清洗液的烧杯中, 并置于超声波清洗机中, 清洗 5 min; 清洗结束后, 用滤纸将试样擦拭干净, 然后依次用 240#、400#、600#、800#、1 200#、2 000# 砂纸将试样表面打磨平整、抛光; 最后, 将试样依次放入蒸馏水中清洗, 进而将其放入盛有丙酮溶液的烧杯中, 置于超声波清洗机中清洗 10 min, 取出试样并烘干。

2.2.2 阳极氧化膜的制备

将预处理好的试样放入阳极氧化装置中, 以质量浓度为 100 g/L 硫酸溶液作为电解液, 并各自施加 8, 10, 12, 14, 16 V 的氧化电压, 以获得具有不同阳极氧化膜的样品。

2.2.3 封孔处理

将适量的去离子水倒入烧杯中, 置于水浴锅中加热至沸腾, 然后将阳极氧化后的试样放入沸腾的去离子水中进行封孔处理, 静置 20 min, 取出试样, 并用去离子水冲洗, 自然风干。

2.3 性能测试

1) 金相观察。利用金相显微镜对铝合金的阳极氧化膜和未镀膜区域进行观察。

2) 硬度及厚度测定。用显微硬度计及测厚仪对阳极氧化膜的硬度及厚度进行测定, 并与未镀膜区域进行比较。

3) 点滴实验。用盐酸 5 mL, 重铬酸钾 3 g, 去离子水 75 mL, 配制所需实验溶液。在 22~26 °C 条件下, 取出烘干后的待测试样, 用彩色蜡笔在试样上画

出直径为 1 cm 的圆,然后在试片上滴 2~4 滴实验溶液,记录封闭膜上的染色液由橙色开始变为绿色所需要的时间,记为点滴时间 (min)。若在实验溶液变色之前液滴已干,则应在原来位置再滴一滴实验溶液,可持续此操作,直到溶液变色为止。

4) 电化学性能测试。采用 CHI760E 型电化学工作站,使用三电极体系,对铝合金阳极氧化膜的电化学性能进行测试。测试介质为质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,参比电极为 232 型饱和甘汞电极,辅助电极为铂片 (尺寸为 20 mm × 20 mm × 0.2 mm),铝合金阳极氧化膜的测试面积为 0.785 cm²,试样固定后连接工作电极。

3 结果与分析

3.1 金相图

在质量浓度为 100 g/L 的硫酸电解液、8 V 电压下,铝合金经阳极氧化、封孔处理前后的表面金相对比图如图 1 所示。

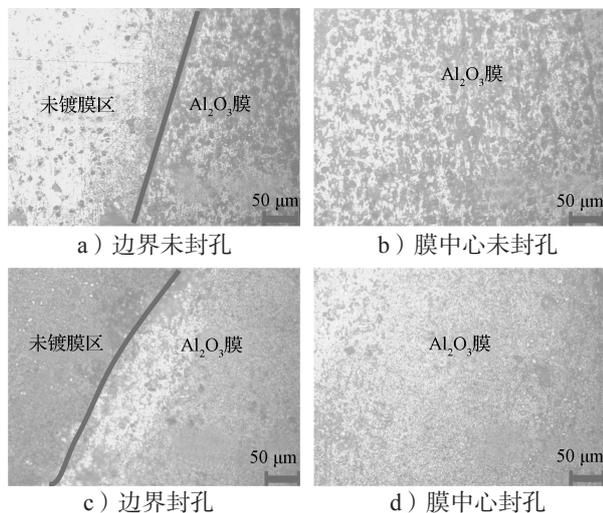


图 1 不同处理的铝合金表面金相对比图

Fig. 1 Gold contrast ratio of different treated aluminum alloy surfaces

对比图 1a~d 可以看出,铝合金经阳极氧化后所生成的阳极氧化膜与未镀膜区域相比,组织结构更加紧密,缺陷更少;未经封孔的阳极氧化膜表面有许多孔洞,在很大程度上影响了阳极氧化膜的显微硬度和耐腐蚀性,因此氧化膜需要进行封孔处理。

在质量浓度为 100 g/L 的硫酸电解液、不同电压 (8, 10, 12, 14, 16 V) 下,铝合金阳极氧化 (已封孔) 前后的金相图如图 2 所示,所形成的阳极氧化膜中间金相图如图 3 所示。

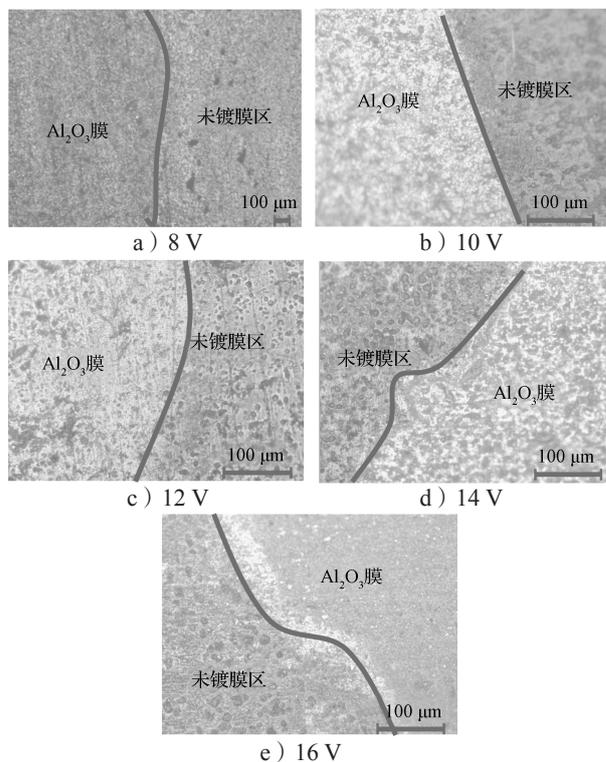


图 2 不同电压下的阳极氧化膜边界金相图

Fig. 2 Metallographic diagram of anode oxide film boundary under different oxidation voltages

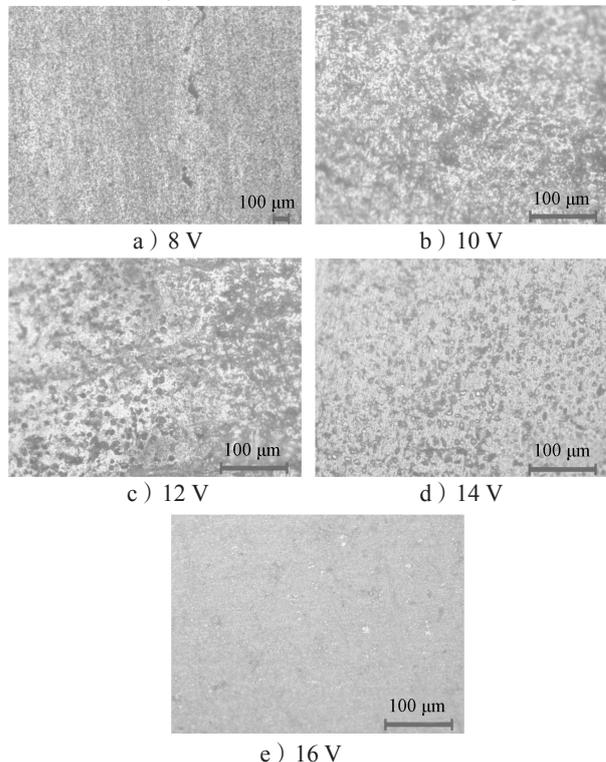


图 3 不同电压下的阳极氧化膜中心金相图

Fig. 3 Metallographic diagram of anode oxide film at different oxidation voltages

从图 2~3 可以看出, 随着电压升高, 阳极氧化膜无论是边界或中心位置, 其表面缺陷越来越少, 组织结构更加致密, 电压为 16 V 时阳极氧化膜的组织结构最致密。这是由于随着电压的升高, Al_2O_3 晶粒开始缩小, 且晶粒排布越发紧密。从图 2c 和图 3c 可以看出, 阳极氧化膜孔道附近有坑蚀现象, 这是由于在阳极氧化过程中试样表面散热不及时造成的局部腐蚀。局部腐蚀会造成氧化膜孔道大小不均一、致密性较差等缺点。

3.2 氧化膜厚度以及点滴实验

在质量浓度为 100 g/L 的硫酸电解液、不同电压下, 铝合金经阳极氧化、封孔处理之后进行阳极氧化膜的厚度及点滴实验的测定, 实验结果如表 1 所示。

表 1 阳极氧化膜厚度及点滴实验数据

电压 / V	厚度 / μm	厚度最小值 / μm	厚度最大值 / μm	方差 S	点滴时间 / min
8	1.76	1.14	2.74	0.48	1
10	2.94	2.54	3.24	0.21	1
12	4.38	3.89	4.94	0.33	4
14	5.74	5.54	6.17	0.87	5
16	7.56	7.16	7.89	0.19	6

由表 1 可以看出, 随着电压的逐渐增大, 阳极氧化膜的厚度缓慢增加, 当电压达到 16 V 时, 其厚度增加明显。在低电压条件下, 试样阳极氧化膜厚度的最小值与最大值差距较大, 由此说明低电压条件下生成阳极氧化膜的厚度不均匀, 阳极氧化不稳定; 高电压条件下, 阳极氧化膜的厚度较均匀, 阳极氧化较稳定。这一方面可能是操作仪器不能较好地检测较薄的氧化膜, 另一方面也可能是因为阳极氧化时电压过小, 不能生成稳定均匀的阳极氧化膜。

根据表 1 中不同电压下阳极氧化膜的最大厚度值与点滴时间的数据, 绘制二者的关系曲线如图 4 所示。

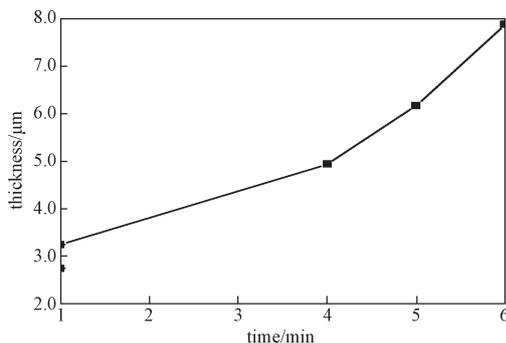


图 4 不同电压下阳极氧化膜厚度与点滴时间关系图

Fig. 4 Relationship between thickness of anode oxide film and droplet time under different voltages

如图 4 所示, 点滴时间与阳极氧化膜厚度的成正比相关, 随着阳极氧化膜厚度的增加, 点滴时间也会增加, 由此说明阳极氧化膜的耐腐蚀性能大大提高。在点滴实验中, 不能排除因阳极氧化膜的厚度不均匀或缺陷所带来的影响, 从金相图片中也能看出阳极氧化膜会出现因受热不均而导致的缺陷、坑蚀, 因此, 点滴实验只能客观反映阳极氧化膜的厚度与致密性。

3.3 氧化膜硬度

在不同电压下, 对铝合金基体与封孔处理后的阳极氧化膜进行硬度测定, 每个试样选 9 处进行测试, 不同电压下处理后试样的硬度比较如图 5 所示。

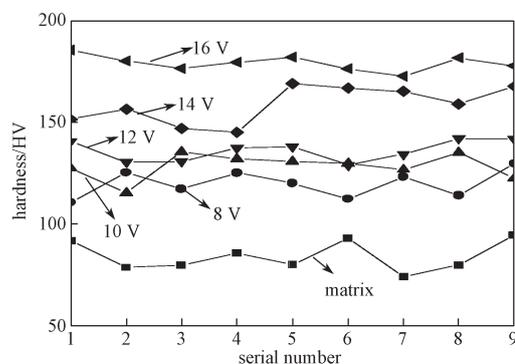


图 5 不同样品的硬度比较

Fig. 5 Compare the hardness of different samples

由图 5 可以看出, 随着电压的增大, 阳极氧化膜的硬度呈逐渐增大的趋势, 总体上具有阳极氧化膜的铝合金硬度均比未镀膜的硬度高, 且电压越高 (大于 12 V) 铝合金的硬度增加越明显。未镀膜铝合金硬度的最大值为 94.5 HV, 经 16 V 电压氧化后, 其硬度可以稳定提升至铝合金基体的两倍, 由此说明在一定氧化电压范围内 (8~16 V), 增大电压确实能够提升铝合金的硬度。

3.4 电化学分析

图 6 为不同电压下阳极氧化膜的开路电位曲线。从图 6 中可以看出, 不同电压下阳极氧化膜的化学电位 (U) 都较小, 但随时间的增加呈现出不同的变化趋势。当电压为 12 V 和 10 V 时, 随着时间的推移, 阳极氧化膜的化学电位会逐渐减小, 但下降趋势趋于平缓, 由此说明该电压下阳极氧化膜的化学电位比较稳定, 氧化膜的溶解较为均匀; 而当电压为 8, 14, 16 V 时, 随着时间的推移, 化学电位先急剧下降后缓慢提升, 这是由于阳极氧化膜先溶解, 达到一定程度时又生成新的氧化膜。不同电压下, 阳极氧化膜的化学电位从大到小依次为 $U_{16} > U_{10} > U_{12} > U_{14} > U_8$,

由此说明当电压为 16 V 时, 阳极氧化膜的耐腐蚀性最好, 而电压为 8 V 时, 其耐腐蚀性最差。

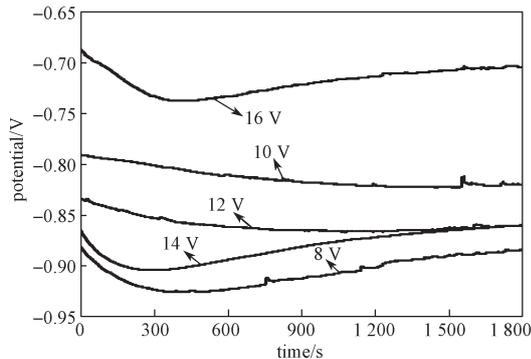


图 6 不同电压下阳极氧化膜的开路电位曲线

Fig. 6 Open circuit potential curve of anode oxide film at different voltages

2A96 铝合金经阳极氧化、封孔处理之后, 在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中进行极化试验, 所得不同电压下阳极氧化膜的 Tafel 曲线如图 7 所示。

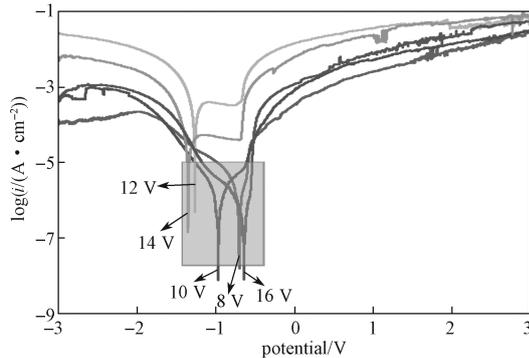


图 7 不同电压下所得阳极氧化膜的 Tafel 曲线

Fig. 7 Tafel curve of anode oxide film obtained at different voltages

从图 7 可以看出, 不同电压下所得阳极氧化膜的自腐蚀电位 (E) 不同, 从大到小依次为 $E_{16} > E_8 > E_{10} > E_{12} > E_{14}$ 。根据电化学知识可知, 自腐蚀电位越大说明该电压 (16 V) 下阳极氧化膜的耐腐蚀性能越好。

利用 Tafel 曲线外推法, 求出各个电压下阳极氧化膜的自腐蚀电流及电位电阻, 如表 2 所示。

表 2 不同电压下阳极氧化膜腐蚀参数

Table 2 Corrosion parameters of anode oxide film under different voltages

电压 /V	自腐蚀电位 /V	自腐蚀电流 / μ A	自腐蚀电阻 / Ω
8	-0.644	0.213	6 207.4
10	-1.292	0.304	1 673.9
12	-1.328	9.138	4 867.4
14	-0.998	0.245	16 782.6
16	-0.353	1.523	21 866.3

由表 2 可知, 电压为 16 V 时阳极氧化膜的自腐蚀电位及自腐蚀电阻均最高, 因而此时阳极氧化膜的耐腐蚀性最好; 而电压为 12 V 时阳极氧化膜的耐腐蚀性最差。

在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中, 对不同电压下的阳极氧化膜进行交流电阻试验, 所得交流阻抗谱如图 8~9 所示。

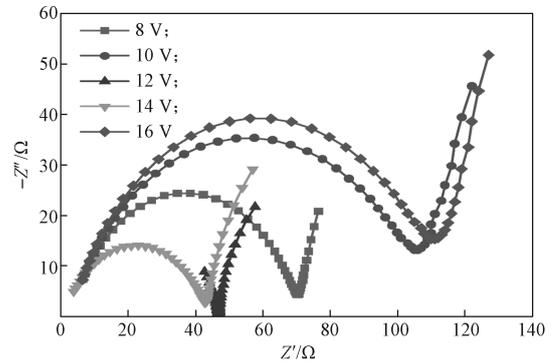


图 8 不同电压下阳极氧化膜的 Nyquist 图

Fig. 8 Nyquist diagram of anode oxide film at different voltages

由图 8 可知, 不同电压下阳极氧化膜的容抗弧直径 (d) 大小依次为: $d_{16} > d_{10} > d_8 > d_{12} > d_{14}$ 。容抗弧直径越大, 说明该材料的内阻越大, 因而其耐腐蚀性能越好。故电压为 16 V 时所制得的阳极氧化膜的耐腐蚀性能最优。

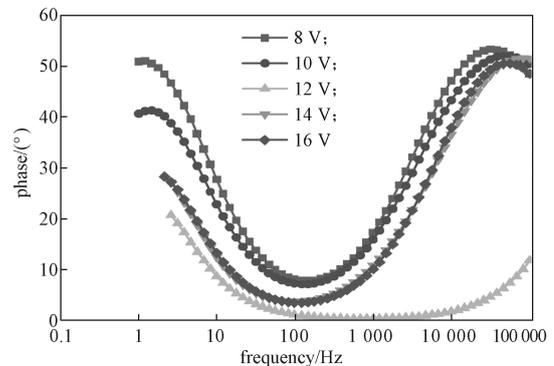


图 9 不同电压下阳极氧化膜的 Bode 图

Fig. 9 Bode diagram of anode oxide film at different voltages

由图 9 可以看出, 当电压为 8 V 时阳极氧化膜的最大相位角为 53° ; 电压为 10, 14, 16 V 时其最大相位角相近, 约为 51.9° ; 电压为 12 V 时其最大相位角为 20° 。材料的最大相位角越大, 说明其表面越均匀, 因此被腐蚀破坏的程度越小。故当电压为 8 V 时阳极氧化膜的抗腐蚀能力最强, 耐腐蚀性最好; 电压为 12 V 时阳极氧化膜的耐腐蚀性最差; 而电压为 10,

14, 16 V 时阳极氧化膜的最大相位角与 8 V 时的并无太大区别, 阳极氧化膜的均匀性及耐腐蚀性能相当, 故可以根据实验需求选择合适的氧化电压。

利用 ZSimp Win 软件对不同电压下阳极氧化膜的交流阻抗谱进行拟合, 利用 $R\{Q[R(QR)]\}$ 型等效电路图进行模拟, 其电路图如图 10 所示。图中 R_1 表示溶液的电阻; R_2 表示氧化膜电阻; R_3 表示电化学反应的电阻; C_1 表示常相位角元器件电容; C_2 表示为氧化层电容, 其具体参数进行拟合后见表 3。

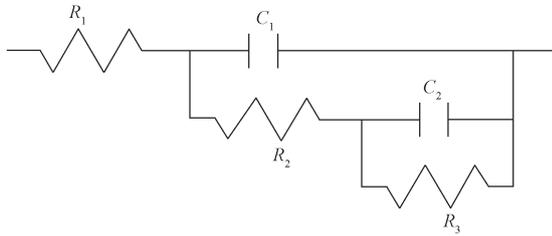


图 10 阻抗谱拟合电路图

Fig. 10 Impedance spectrum fitting circuit diagram

表 3 不同电压交流阻抗谱拟合结果

Table 3 Different voltage impedance spectrum fitting results

电压/V	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω	$C_1/\mu\text{F}$	$C_2/\mu\text{F}$
8	0.033	30.42	1 950	3.456×10^{-6}	4.323×10^{-4}
10	2.593	105.81	5 120	4.687×10^{-6}	5.875×10^{-3}
12	1.811	45.05	73	6.012×10^{-8}	2.837×10^{-3}
14	10.721	42.45	105	7.872×10^{-6}	2.196×10^{-3}
16	3.076	7.91	17 470	2.891×10^{-6}	1.303×10^{-3}

从表 3 可以看出, 5 种不同电压的溶液电阻 R_1 差距很大, 电压较高 (大于 12 V) 时的溶液电阻高于低电压时的; 不同电压下氧化层电阻大小依次为: $R_{2(16)} < R_{2(8)} < R_{2(14)} < R_{2(12)} < R_{2(10)}$, 由此说明 10 V 电压下的阳极氧化膜表面氧化严重, 而 16 V 时的阳极氧化膜抗氧化能力强; 16 V 时阳极氧化膜的电化学反应电阻 R_3 最大, 10 V 和 8 V 时的 R_3 次之, 由此说明 16 V 电压下的阳极氧化膜最耐腐蚀。综上所述, 16 V 电压下制得的阳极氧化膜的耐腐蚀能力最强。

4 结论

本实验选用 2A96 铝合金为研究对象, 在不同电压 (8, 10, 12, 14, 16 V) 下进行阳极氧化试验, 通过分析阳极氧化膜的金相组织、硬度、厚度及电化学腐蚀性能等, 得到如下结论。

1) 在硬度测定中, 随着电压的升高, 阳极氧化膜的硬度持续增大, 最大硬度值达到 185.5 HV, 是

未镀膜铝合金硬度的两倍多。

2) 对阳极氧化膜进行金相显微组织观察时发现, 随着电压的升高, Al_2O_3 晶粒更细小, 组织结构排列更加紧密, 因而阳极氧化膜的致密性更好。

3) 在阳极氧化膜的厚度和点滴实验测试中, 随着电压的逐渐增大, 阳极氧化膜的厚度缓慢增加, 点滴时间也随之增加; 当电压达到 16 V 时, 其厚度增加明显, 点滴时间也迅速增加。

4) 利用电化学工作站对不同氧化电压下得到的阳极氧化膜进行耐腐蚀性测试时发现, 16 V 电压下的阳极氧化膜耐腐蚀性最好, 8 V 电压时的阳极氧化膜虽然耐腐蚀性也较优良, 但并不稳定。

参考文献:

- [1] ZOU C L, GENG G H, CHEN W Y. Development and Application of Aluminium-Lithium Alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 599/600/601: 12-17.
- [2] 郑子樵, 李劲风, 陈志国, 等. 铝锂合金的合金化与微观组织演化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2337-2351.
ZHENG Ziqiao, LI Jinfeng, CHEN Zhiguo, et al. Alloying and Microstructural Evolution of Al-Li Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2337-2351.
- [3] 刘伟华. 热循环作用下铝合金阳极氧化膜的开裂行为与机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
LIU Weihua. Studys of Anodic Film on Cracking Behavior and Mechanism after Heating[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [4] 徐义库, 爨洛菲, 王旭阳, 等. 铝合金复合阳极氧化的研究现状及进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 1-6.
XU Yiku, CUAN Luofei, WANG Xuyang, et al. Research Status and Progress of Aluminum Alloy Composite Anodic Oxidation[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 1-6.
- [5] 薛笑莉, 宋政伟. 铝合金阳极氧化后处理工艺及涂层耐蚀性研究[J]. 山东化工, 2018, 47(19): 36-37, 41.
XUE Xiaoli, SONG Zhengwei. The Study of Post-Treatment Process for Anodic Oxidation of Al Alloy and Coating Corrosion Resistance[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(19): 36-37, 41.
- [6] 高镜涵, 李菲晖, 巩运兰, 等. 铝合金阳极氧化技术研究进展[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(8): 18-23.
GAO Jinghan, LI Feihui, GONG Yunlan, et al. Recent Research Progress of Surface Treatments and Anodic

- Oxidation of Aluminum Alloys[J]. *Plating & Finishing*, 2018, 40(8): 18–23.
- [7] 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, 2004: 117–139.
ZHU Zufang. *Anodic Oxidation and Surface Treatment Technology of Aluminum Alloy* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 117–139.
- [8] 杨勇. 铝合金阳极氧化工艺对氧化膜层性能的影响 [J]. *广东建材*, 2014, 30(8): 67–71.
YANG Yong. Effect of Aluminum Alloy Anodizing Process on the Performance of Oxide Film Layer[J]. *Guangdong Building Materials*, 2014, 30(8): 67–71.
- [9] 戴一帆, 沈士泰, 卢洁琴, 等. 2024 铝合金混合酸阳极氧化 [J]. *表面技术*, 2018, 47(1): 198–202.
DAI Yifan, SHEN Shitai, LU Jieqin, et al. 2024 Aluminum Alloy Anodic Oxidation in Mixed Acid[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 198–202.
- [10] CAMPBELL F C. *Aluminum[M]//Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Oxford: Elsevier, 2006: 15–92.
- [11] KWOLEK P, KRUPA K, OBLÓJA, et al. Tribological Properties of the Oxide Coatings Produced Onto 6061-T6 Aluminum Alloy in the Hard Anodizing Process[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(7): 3268–3275.
- [12] BONONI M, GIOVANARDI R. Hard Anodizing of AA2011-T3 Al-Cu-Pb-Bi Free-Cutting Alloy: Improvement of the Process Parameters[J]. *Corrosion Science*, 2018, 141: 63–71.
- [13] 石绪忠, 刘晓鹤, 余向飞, 等. 6061 铝合金硬质阳极氧化的影响因素研究 [J]. *材料开发与应用*, 2018, 33(4): 53–58.
SHI Xuzhong, LIU Xiaohu, YU Xiangfei, et al. Study on the Influence Factors of Hard Anodic Oxidation of 6061 Aluminum Alloy[J]. *Development and Application of Materials*, 2018, 33(4): 53–58.
- [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 Mingxiang, ZOU Yujie, SUN Baolong, et al. The Development of Anodizing Technology in Aviation Aluminum Alloy[J]. *Plating and Finishing*, 2014, 36(8): 41–46.
- [15] 阳建君, 旷焕, 田金旺, 等. 2A96 铝合金表面含三价铬转化膜制备及其电化学性能研究 [J]. *包装学报*, 2019, 11(1): 80–86.
YANG Jianjun, KUANG Huan, TIAN Jinwang, et al. Preparation and Electrochemical Properties of 2A96 Al Alloy Surface Conversion Coating Containing Trivalent Chromium[J]. *Packaging Journal*, 2019, 11(1): 80–86.
- [16] 吴璐莹. 压铸铝合金环保型阳极氧化膜的制备与性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WU Luying. *Studies on Environmental Friendly Technology for Anodic Oxidation of Die Casting Aluminum Alloy*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [17] 王斌, 杨笠, 申坤, 等. 孔形对铝合金阳极氧化膜耐蚀性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2014, 43(4): 130–132.
WANG Bin, YANG Li, SHEN Kun, et al. Influence of Pores Shape on Corrosion Resistance of Anodic Oxidation Film for Al Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(4): 130–132.
- [18] AHMED B, WU S J. Aluminum Lithium Alloys (Al-Li-Cu-X)-New Generation Material for Aerospace Applications[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 440: 104–111.
- [19] GUPTA R K, NAYAN N, NAGASIREESHA G, et al. Development and Characterization of Al-Li Alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 420(1/2): 228–234.
- [20] 赵永岗, 吕红军, 曾小莉. 铝合金硫酸阳极化耐蚀性试验失败原因分析 [J]. *装备环境工程*, 2018, 15(7): 15–19.
ZHAO Yonggang, LÜ Hongjun, ZENG Xiaoli. Failure of Anodized Aluminum Corrosion Resistance Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(7): 15–19.
- [21] 郝雪龙, 何耀祖, 樊志罡, 等. 6063 铝合金阳极氧化膜的耐碱腐蚀性能 [J]. *中国表面工程*, 2015, 28(4): 98–104.
HAO Xuelong, HE Yaozu, FAN Zhigang, et al. Alkali Corrosion Resistance of Anodic Oxide Coating on 6063 Aluminum Alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(4): 98–104.
- [22] 张鹏, 陈朝轶, 刘静, 等. 2024 铝合金阳极氧化膜腐蚀性能研究 [J]. *铸造技术*, 2012, 33(9): 1061–1063.
ZHANG Peng, CHEN Chaoyi, LIU Jing, et al. Investigation on Corrosion Behavior of Anodic Oxide Film on 2024 Aluminum Alloy[J]. *Foundry Technology*, 2012, 33(9): 1061–1063.
- [23] 冒佳卫. 阳极氧化及封孔处理对 2024 铝合金耐腐蚀性能的影响 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
MAO Jiawei. *The Effect of Anodizing and Sealing Process on Corrosion Resistance of 2024 Aluminum Alloy*[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and

Telecommunications, 2018.

- [24] 陈小丽, 麻彦龙, 黄伟九, 等. 环保型铝合金阳极氧化表面处理研究进展 [J]. 材料导报, 2015, 29(7): 107-112.

CHEN Xiaoli, MA Yanlong, HUANG Weijiu, et al.
Researches on Environmentally Friendly Anodizing

Surface Treatments of Aluminum Alloys[J]. Materials Review, 2015, 29(7): 107-112.

(责任编辑: 李玉华)

Study on Anodizing and Properties of 2A96 Aluminum Alloy Surface

YANG Jianjun¹, WANG Bowen¹, CHEN Tianou², FAN Caihe¹,

LIU Dan³, OU Ling¹, KUANG Huan¹, LEI Xinlei¹

- (1. College of Metallurgical and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd, Zhuzhou Hunan 412007, China;
3. The Technological Center of Xiangtan Iron Steel Co., Ltd, Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: The surface of the aluminum alloy tends to get oxidized to form an oxide film with porosity structure and poor corrosion resistance. The surface of the 2A96 aluminum alloy was treated by anodizing. Different anodized films were prepared on the surface of 2A96 aluminum alloy by changing the oxidation voltage in the anodizing experiment. The surface morphology of each anodized film was observed by the metallographic microscope, while the thickness of the anodized film was measured by a thickness gauge, and the microhardness tester was used for measuring the hardness, with spotting experiment for obtaining its drip time, and electrochemical workstation for obtaining its polarization curve and AC impedance spectrum, and then its corrosion resistance was studied. The results showed that the thickness, hardness and drip time of the anodized film increased gradually with the increase of voltage within the measured voltage range (8~16 V), and the corrosion resistance was also enhanced. After the surface anodization of 2A96 aluminum alloy, its performance was significantly improved.

Keywords: aluminum alloy 2A96; anodic oxide film; oxidation voltage; AC impedance spectrum