

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.01.012

2024-T3 铝合金环境友好型脱氧工艺研究

刘泽恩¹, 马建强^{1,2}, 王梅丰^{1*}, 童子航¹, 张昊¹

(1. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063; 2. 江西乾照半导体科技有限公司, 江西 南昌 330100)

摘要: 针对 2024-T3 铝合金传统三酸脱氧液中 Cr^{6+} 存在严重危害环境问题, 研究开发了 2024-T3 铝合金环保碱性脱氧工艺。通过正交试验对该工艺脱氧处理后的铝合金表面形貌、粗糙度进行分析, 得到最佳碱性脱氧工艺参数为: 碳酸钠 80 g/L、表面活性剂 0.2 g/L、缓蚀剂 15 g/L、整平剂 10 g/L、温度 60 °C、脱氧时间 2 min。对该工艺处理后的铝合金进行阳极氧化及沸水封闭处理, 膜层电化学交流阻抗测试容抗弧的容抗直径为 120 306 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 中性盐雾试验超过 500 h。

关键词: 环保; 无铬脱氧; 2024-T3 铝合金; 盐雾实验

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

Experimental study of environmental protection deoxidation process for 2024-T3 aluminum alloy

Liu Ze'en¹, Ma Jianqiang^{1,2}, Wang Meifeng^{1*}, Tong Zihang¹, Zhang Hao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Jiangxi Changelight Semiconductor Technology Co., Ltd., Nanchang 330100, China)

Abstract: An environmentally friendly alkaline deoxidation process for 2024-T3 aluminum alloy has been developed to address the serious environmental hazards of Cr^{6+} in the traditional tri-acid deoxidation solution. The surface morphology and roughness of aluminum alloy after deoxidation treatment were analyzed using orthogonal experiments. The optimum alkaline deoxidation process parameters are as follows: sodium carbonate 80 g/L, surfactant 0.2 g/L, corrosion inhibitor 15 g/L, leveling agent 10 g/L, temperature of 60 °C, and deoxidation time of 2 min. The aluminum alloy treated by this process was subjected to anodizing and boiling water sealing treatment. The capacitance radius of the electrochemical impedance test for the film layer was 120 306 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, and the neutral salt spray test exceeded 500 h.

Keywords: environmental protection; chromium free deoxidation; 2024-T3 aluminum alloy; salt spray test

2024-T3 铝合金因其优异的机械能和高比强度而常作为航空结构材料^[1]。该铝合金含 Cu 量较高, 因此很容易发生局部腐蚀^[2-3]。航空企业一般采用阳极氧化或化学氧化处理以改善其耐蚀性能。铝合金在空气中会生成 0.4~5.0 nm 的天然氧化膜^[4], 这层

结构松散的氧化膜会降低阳极氧化/化学氧化膜层性能^[5-7]。因此, 铝合金在进行氧化前必须进行脱氧处理^[8-12], 将铝合金表面的自然氧化膜去除。氢氧化钠脱氧是一种传统的铝合金脱氧工艺, 其原理是氢氧化钠能与铝合金表面的氧化膜发生化学反应, 生

收稿日期: 2024-04-28

修回日期: 2024-05-22

作者简介: 刘泽恩 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为金属材料表面处理, email: 2455775931@qq.com

通信作者: 王梅丰, email: 178684138@qq.com

成易溶于水中的化合物,从而达到清除铝合金表面氧化膜的目的。但是氢氧化钠脱氧仅适用于1系、6系等铝含量高的铝合金,在处理合金元素较高的2系铝合金时容易产生晶间腐蚀,而导致其耐蚀等性能下降。目前航空企业普遍采用由 HNO_3 、 CrO_3 及 HF 配制的三酸脱氧工艺^[13-14],该方法处理的2024-T3铝合金表面光亮平整,是一种成熟的铝合金脱氧工艺。但三酸脱氧含有易致癌的 Cr^{6+} 和高毒性的 HF ,这两种物质会对人体健康和环境造成极大危害。为解决三酸脱氧工艺中 Cr^{6+} 造成的危害,马梦婷等^[15]采用硫酸铁及添加剂替代 CrO_3 ,开发出了酸性无铬脱氧工艺,但该工艺仍含有 HF ,亦有毒性及强刺激性,也会造成一定的安全生产隐患。

本文以2024-T3铝合金为研究对象,旨在开发一种新型的无铬无氟脱氧工艺。通过查阅文献和前期的多次试验,初步确定了以碳酸钠为主盐,添加微量表面活性剂的工艺,并以前期实验结果为指导,筛选出了拟添加的缓蚀剂和整平剂。围绕缓蚀剂、整平剂、温度和脱氧时间4个方面,设计了4因素4水平的正交实验^[16-17],探究出最佳的无铬无氟脱氧工艺参数^[18-19]。对无铬无氟脱氧、三酸脱氧和传统碱性脱氧3种脱氧工艺处理的2024-T3铝合金,进行阳极氧化^[20]及沸水封闭^[21-22]处理,采用交流阻抗测试和中性盐雾试验^[23]分析所研发的新型无铬无氟脱氧的耐蚀性,以期满足航标对2024-T3铝合金脱氧的表面处理要求。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验材料采用型号为2024-T3铝合金,试样尺寸为 $25\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$,其化学成分(质量分数)为3.8%~4.9% Cu, 1.2%~1.8% Mg, 0.5% Si, 0.5% Fe, 0.3%~0.9% Mn, 0.3% Zn, 0.15% Ti, 0.1% Ni, 余量为Al。

1.2 脱氧工艺流程及说明

工艺流程为:化学除油($40\sim 60\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 清洗剂Turco4215S, $60\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$, 5 min)→去离子水洗→脱氧处理→去离子水洗→干燥。

1.3 脱氧工艺参数

本文拟在碱性条件下获得一种无铬无氟的铝合金脱氧工艺,通过参考航空有铬脱氧工艺中各组分的作用以及前期的实验结果,初步确定了以碳酸钠为主,辅以缓蚀剂和整平剂,再添加微量表面活性剂的无铬无氟脱氧液基础配方: $80\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸钠(AR)、 $0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表面活性剂,混合均匀后缓慢加入缓蚀剂和整平剂。为确定最佳脱氧工艺,以缓蚀剂浓度(因素A)、整平剂浓度(因素B)、脱氧温度(因素C)以及脱氧时间(因素D)4个因素设计正交试验,为试验结果更全面,每个因素设计4个水平(见表1)。浓度控制为缓蚀剂 $5\sim 20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、整平剂 $5\sim 20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。使用型号为HH-1000水浴锅中加热,温度控制在 $40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 、脱氧时间为 $1\sim 4\text{ min}$,脱氧后取出放入30 vol.%硝酸(AR)中出光 $30\sim 70\text{ s}$ 。

表1 四因素四水平正交表

Tab.1 Orthogonal table of four factors and four levels

水平	A 缓蚀剂浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	B 整平剂浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	C 温度/ $^\circ\text{C}$	D 脱氧时间/min
1	5	5	45	1
2	10	10	50	2
3	15	15	55	3
4	20	20	60	4

确定最佳脱氧工艺参数后,将最佳工艺与三酸脱氧工艺和传统碱性脱氧工艺进行对比研究,对比工艺配方为:(1)航空铝合金有铬三酸脱氧工艺: $50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铬酐(AR), 10 vol.%硝酸(AR), 1 vol.% 氢氟酸(AR), 温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 时间2 min;(2)铝合金传统碱性脱氧工艺为: $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH(AR), 温

度 $40\text{ }^\circ\text{C}$, 时间2 min。

1.4 表征与测试

1.4.1 粗糙度及金相检查

使用JB-6C型粗糙度测量仪对脱氧工艺处后的2024-T3铝合金进行表面粗糙度测试,测试方向应与铝合金条形纹路方向垂直。采用MIT1818070型金相

显微镜，在放大倍数500倍下对脱氧后的铝合金表面进行观察。

1.4.2 接触角

使用JC2000C1型接触角测量仪对经过脱氧工艺处理后的2024-T3铝合金进行接触角测试,并与粗糙度结果协同分析脱氧工艺的脱氧效果。

1.4.3 脱氧速率测试

采用失重法对不同种类脱氧工艺的脱氧速率进行测试，通过脱氧不同时间研究对比3种脱氧工艺的脱氧速率稳定性。

1.4.4 电化学实验

采用RST5000电化学工作站进行电化学测试，测试采用不同种类脱氧工艺处理后的2024-T3铝合金经阳极氧化及沸水封闭处理后的试样。使用三电极体系以饱和甘汞电极（SCE）为参比电极，铂电极（Pt）为辅助电极，工作电极是裸露面积为1 cm²的试样片。测定试样在3.5 wt.%中性NaCl溶液中的EIS曲线，电化学阻抗测试电位为开路电位（OCP），测试频率范围10⁵~10⁻² Hz。

1.4.5 中性盐雾

按照ASTM—B117盐雾试验标准，进行不间断

中性盐雾试验（NSS），测试阳极氧化膜层的耐蚀性能。测试条件为：采用pH值6.5~7.2的5 wt.% NaCl溶液，盐雾箱内温度（35±1）℃。

2 结果与讨论

2.1 碱性脱氧工艺参数的优化与分析

表2为正交试验结果，根据表2得到的极差分析结果见表3。通过分析对比表3中极差R的结果可得出，2024-T3铝合金在碱性脱氧过程中，影响铝合金表面粗糙度的因素排序为：B>A>D>C，即整平剂浓度>缓蚀剂浓度>脱氧时间>脱氧温度。

从表3可以看出，得到的优组合有2种（A₃B₂C₄D₂和A₃B₂C₄D₄），即缓蚀剂15 g·L⁻¹、整平剂10 g·L⁻¹、温度60℃下，脱氧时间2 min和4 min。从实际生产效率考虑，选用脱氧2 min的工艺。因此，碱性脱氧工艺对2024-T3铝合金脱氧处理的最佳工艺参数为：碳酸钠80 g·L⁻¹、表面活性剂0.2 g·L⁻¹、缓蚀剂15 g·L⁻¹、整平剂10 g·L⁻¹、温度60℃、脱氧时间2 min。

表 2 L₁₆(4⁴) 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experiment results of L16(44)

序号	A	B	C	D	R _a /μm
	缓蚀剂浓度/(g·L ⁻¹)	整平剂浓度/(g·L ⁻¹)	温度/℃	脱氧时间/min	
1	5	5	45	1	0.266
2	5	10	50	2	0.251
3	5	15	55	3	0.257
4	5	20	60	4	0.251
5	10	10	55	4	0.228
6	10	15	60	1	0.240
7	10	20	45	2	0.247
8	10	5	50	3	0.260
9	15	15	45	3	0.243
10	15	20	50	4	0.237
11	15	5	55	1	0.259
12	15	10	60	2	0.223
13	20	20	55	2	0.241
14	20	5	60	3	0.253
15	20	10	45	4	0.246
16	20	15	50	1	0.238

表3 正交试验的极差分析结果

Tab.3 Range analysis results of orthogonal test

分析结果	A	B	C	D
K1	1.025	1.038	1.002	1.003
K2	0.975	0.948	0.972	0.962
K3	0.962	0.978	0.985	1.013
K4	0.978	0.976	0.967	0.962
R	0.063	0.090	0.035	0.041
主次顺序	B>A>D>C			
最优水平	A ₃	B ₂	C ₄	D ₂ 、D ₄
最优组合	A ₃ B ₂ C ₄ D ₂ 、A ₃ B ₂ C ₄ D ₄			

2.2 表征与测试分析

2.2.1 粗糙度和金相表面形貌分析

图1为传统碱性脱氧、三酸脱氧与未经脱氧处理的2024-T3铝合金的金相形貌对比图。对空白试验、传统碱性脱氧试样和三酸脱氧试样进行粗糙度

测试, 所得的粗糙度 (R_a) 分别为: 0.328、0.392和0.205 μm 。由图1(a)可以看出未经脱氧处理的铝合金表面比较暗淡, 含有明显的黑色杂质, 其主要成分是铝合金里的合金元素 (铜, 硅等), 其表面杂质元素若不经处理而直接进行阳极氧化处理, 所得的阳极氧化膜的耐蚀性能会被影响而变差。从图1(b)可以明显看出传统碱性脱氧后的铝合金表面非常粗糙, 残留有大量去除表面合金元素的腐蚀坑, 该测试结果与粗糙度结果相对应。由图1(c)可以看出三酸脱氧后的铝合金表面平整、光亮, 基本去除干净表面的合金元素, 且不会出现过度腐蚀导致表面留下腐蚀凹坑, 测得的粗糙度也是最小的。脱氧后铝合金表面越光亮, 合金杂质越少, 表明脱氧工艺越好, 以此可作为本文新型无铬无氟脱氧工艺的评判依据。

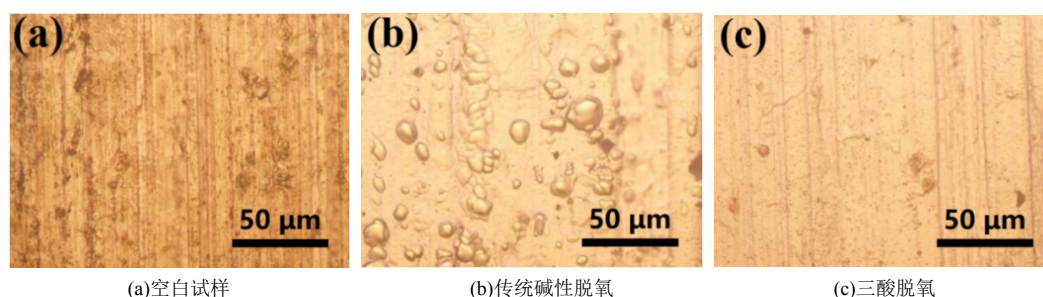


图1 不同脱氧工艺处理后的 2024-T3 铝合金金相形貌

Fig.1 Micromorphology of 2024-T3 aluminum alloy treated by different deoxidation processes

图2为正交表中16个试验条件下获得的试样的金相形貌。依据表2正交实验结果对图2进行分析, 可以看出: 试样1和试样2由于温度低和脱氧时间较短, 导致铝合金表面脱氧过程进展不佳; 试样8和试样14由于整平剂的浓度较低, 铝合金表面整平效果差; 试样11由于整平剂浓度低和脱氧时间短, 对铝合金表面脱氧整平效果甚微; 试样3和试样4表面腐蚀坑较大, 是因为缓蚀剂浓度较低, 对腐蚀速率的抑制作用不佳。由图2可以明显看出, 试样5、6、7、9、10、12、13、15、16铝合金的表面微观形貌光亮平整, 无较大缺陷。依据表2中的 R_a 数值可知, 试样5和试样12的表面粗糙度分别为0.228 μm 和0.223 μm , 属于优异水平。综上, 结合实际生产效率情况, 优选试样12所对应的脱氧工艺参数。

2.2.2 接触角分析

对本文无铬无氟脱氧工艺、三酸脱氧工艺和传统碱性脱氧工艺处理的2024-T3铝合金表面进行接触角测试, 结果如图3所示。三酸脱氧、无铬无氟脱氧和传统碱性脱氧工艺处理的铝合金表面接触角分别为61.5°、57.0°和44.0°。3种脱氧工艺处理的铝合金表面均呈亲水性, 且本文的无铬无氟脱氧工艺与三酸脱氧工艺处理的铝合金表面的接触角相近。对于亲水性的表面, 即接触角小于90°时, 接触角数值会随着表面粗糙度的增加而逐渐减小^[24], 此结果进一步验证传统碱性脱氧的粗糙度是最大的。阳极氧化前铝合金表面粗糙度越大, 则阳极氧化反应的接触面积越大, 且在微观凸起的部位会因为局部电流密度过大, 导致成膜速率过快、致密度差的问题出现^[10], 实际阳极氧化更倾向于粗糙度小的脱氧工艺。

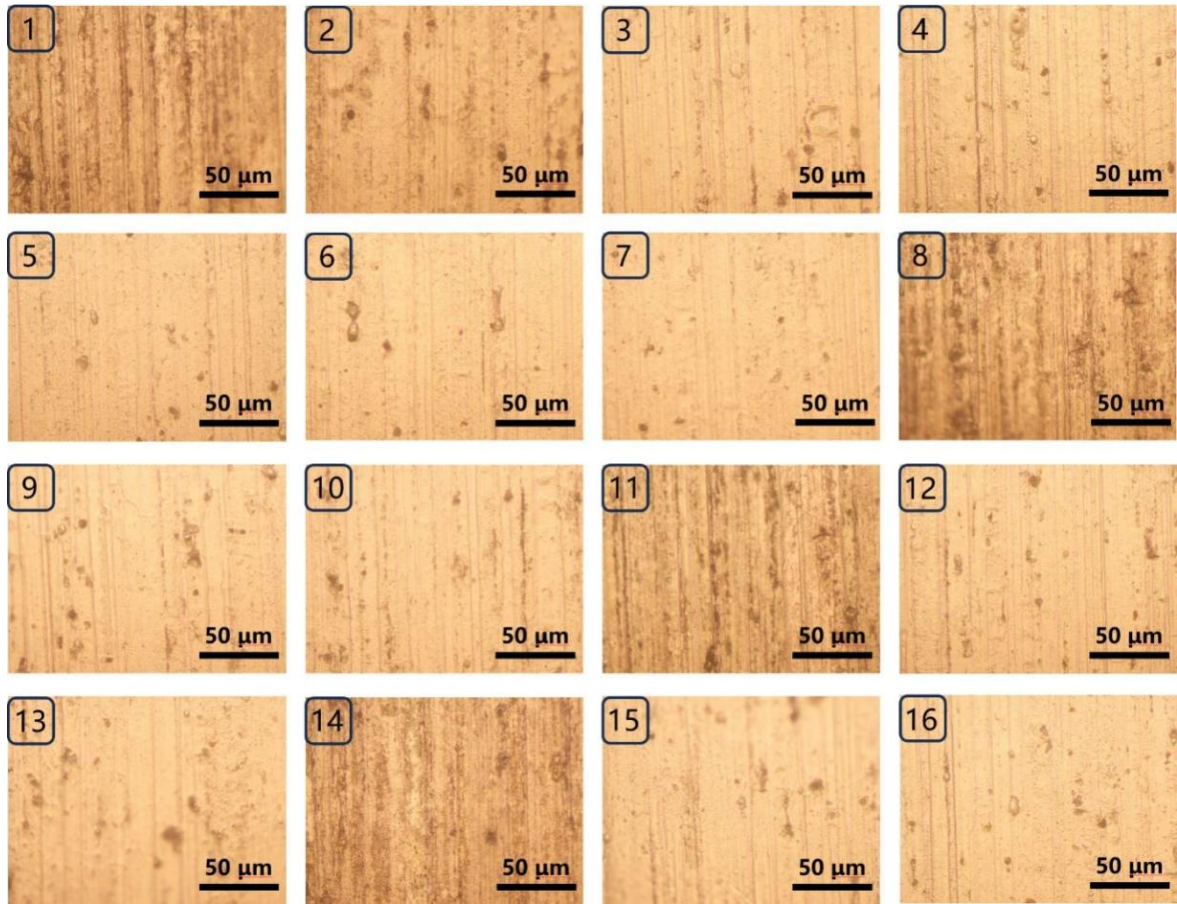


图 2 各正交试验条件下获得的试样的金相形貌

Fig.2 The metallographic morphology of the samples obtained under various orthogonal experimental conditions

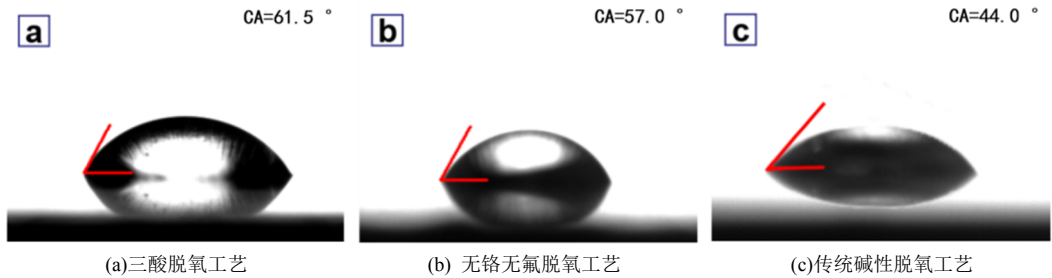


图 3 不同脱氧工艺所得试样的接触角测试结果

Fig.3 Contact angle test results of samples obtained from different deoxidation processes

2.2.3 脱氧速率分析

实际生产中零件有长时间浸泡在脱氧液中的可能，所以脱氧液的脱氧速率是一项重要指标，主要观察脱氧液在短时间内的脱氧速率，分析脱氧速率是否稳定，脱氧速率有无较大起伏。

为研究本文无铬无氟脱氧工艺、三酸脱氧工艺和传统碱性脱氧工艺的脱氧速率，选定了不同的脱氧时间进行脱氧失重测试，结果如表4所示。图4是

由表4所测数据绘制出的脱氧速率曲线，由图4可以直观看出，本文无铬无氟脱氧和三酸脱氧工艺的脱氧速率的趋势是相接近的，与传统碱性脱氧工艺相差巨大。2024-T3铝合金在三酸脱氧中的前5 min内，脱氧速率会有小幅度的上升，在脱氧超过5 min后，三酸脱氧工艺和本文脱氧工艺的脱氧速率均会随着脱氧时间的延长缓慢降低，而传统的碱性脱氧工艺的脱氧速率会随着脱氧时间的延长而增大。

表4 2024-T3 铝合金在3种脱氧液中的脱氧速率

Tab.4 Deoxidation rates of 2024-T3 aluminum alloy in three types of deoxidation solution

脱氧时间/ min	脱氧速率 $v/(g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1})$		
	本文脱氧	三酸脱氧	传统碱性脱氧
2	0.002 311	0.002 844	0.005 956
5	0.001 849	0.003 413	0.006 293
10	0.001 653	0.002 996	0.006 969
15	0.001 399	0.002 720	0.008 130
20	0.001 191	0.002 609	0.008 516

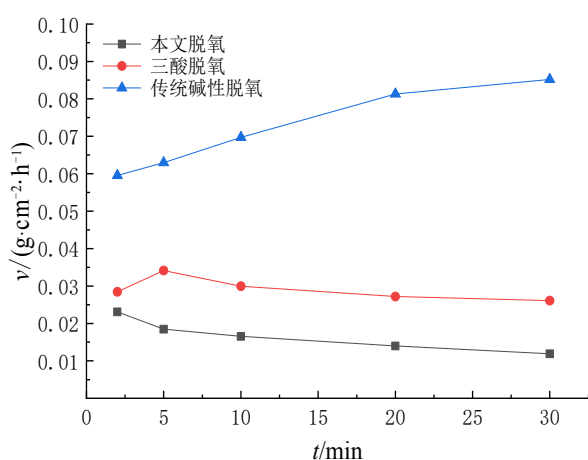


图4 2024-T3 铝合金在3种脱氧液中的脱氧速率曲线

Fig.4 Deoxidation rate curves of 2024-T3 aluminum alloy in three types of deoxidation solution

本文无铬无氟脱氧工艺和三酸脱氧工艺脱氧速率的变化可由两方面解释：（1）反应一开始是在褪除铝合金表面的天然氧化膜，这段时间内三酸破坏了天然氧化膜的完整性，从而腐蚀速率在加快，而在完全褪除了天然的氧化膜后，脱氧液到达金属基体，对基体金属及合金元素（2024-T3铝合金主要是Cu和Mn）的溶解速率下降；（2）由于腐蚀产物的扩散速度有限，导致其聚集在铝合金表面，基体表面继续腐蚀溶解的产物难以向溶液中扩散，阻碍了脱氧液与铝合金基体的物质交换速率。本文脱氧工艺的脱氧速率一直在下降，主要是添加剂增强了第二方面的影响，而传统的碱性脱氧工艺的腐蚀速率太快，腐蚀产生的凹坑足够大，腐蚀产物基本不阻碍物质交换，导致脱氧速率越来越快，由此可见，本文无铬无氟脱氧工艺更接近于三酸脱氧工艺。

2.2.4 电化学 EIS 分析

为了具体分析膜层耐蚀性能，选取多孔层的等效电路图进行拟合（见图5）。 R_s 为参比电极与工作电极之间的溶液电阻，CPE1为常相位角元件， R_{coat} 表面膜层界面层的电阻， R_{ct} 为氧化膜层的电荷转移电阻。 R_{coat} 与氧化膜膜的厚度和形貌有关，膜层厚度的增大或孔径尺寸的减小均可能导致电阻增大。 R_{coat} 与 R_{ct} 相比非常小，说明电解液极易通过微孔到达基体， R_{coat} 对于膜层耐蚀性能的增强几乎可以忽略不计。

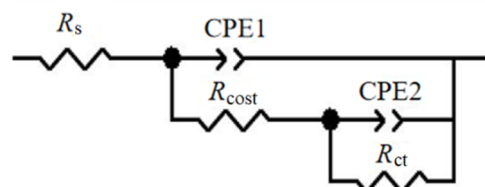


图5 等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram

图6是用Zview软件拟合得到不同脱氧工艺获得的试样经阳极氧化及沸水封闭后测得的交流阻抗图，拟合数据见表5。本文无铬无氟脱氧工艺、三酸脱氧工艺和传统碱性脱氧工艺处理的铝合金经阳极氧化及沸水封闭后，在中性3.5% NaCl中测得的容抗弧的容抗直径分别为141 580、120 306和49 825 $\Omega \cdot cm^2$ 。2024-T3铝合金经传统碱性脱氧处理后，表面粗糙度较大，阳极氧化膜层外部孔径较大，使得电解液更易进入膜层内部，进而增加膜层腐蚀的风险。

电荷转移电阻 R_{ct} 越大，则表明氧化膜的钝化性使得膜层与电解液之间的电荷转移难度增大，即氧化膜可作为阻挡层，阻止基体与电解液之间的接触。从表5可以看出，本文脱氧和三酸脱氧工艺的 R_{ct} 值均比传统碱性脱氧工艺的 R_{ct} 值高，三酸脱氧达到传统碱性脱氧工艺的 R_{ct} 三倍，本文脱氧液也接近其两倍，说明三酸脱氧和本文脱氧工艺耐蚀性远大于传统碱性脱氧工艺。相比于传统碱性脱氧工艺，本文脱氧工艺与三酸脱氧工艺的测试数据相差更小，表明两者脱氧工艺效果更为接近。由此，可以得出：3种脱氧工艺处理后的铝合金经阳极氧化及沸水封闭后，其耐蚀性由大到小依次为：三酸脱氧>本文脱氧>传统碱性脱氧。

表 5 交流阻抗谱图拟合所得的电化学参数

Tab.5 Electrochemical parameters obtained from fitting the AC impedance diagram

脱氧工艺	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE1}/(\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	$R_{\text{coat}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE2}/(\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	$R_{\text{ct}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
三酸脱氧	4.0	0.865 3	11 247	0.680 9	1.32×10^5
本文脱氧	3.0	0.784 8	4 925	0.729 1	7.89×10^4
传统碱性脱氧	2.3	0.781 9	6 426	0.717 1	4.40×10^4

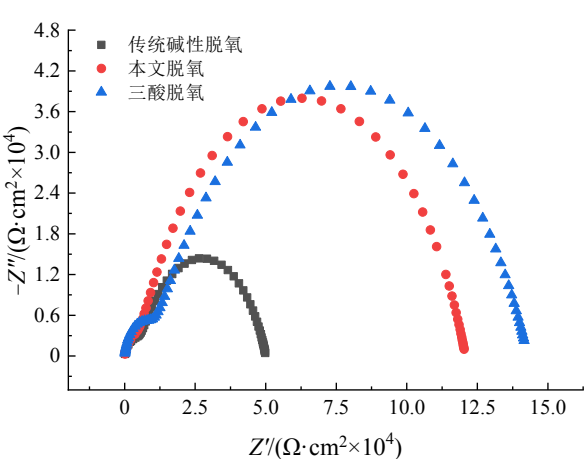


图 6 3 种脱氧工艺获得的试样经阳极氧化及沸水封闭后测得的交流阻抗谱图

Fig.6 AC impedance spectra of samples obtained from three deoxidation processes after anodic oxidation and boiling water sealing

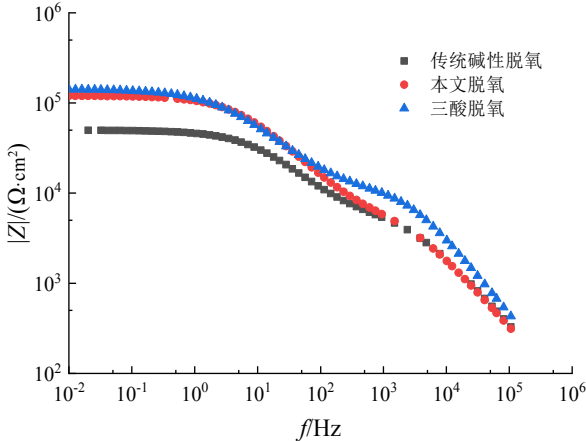


图 7 3 种脱氧工艺获得的试样经阳极氧化及沸水封闭后测得的波特图

Fig.7 Bode diagrams of samples obtained from three deoxidation processes after anodic oxidation and boiling water sealing

图7是3种脱氧工艺对2024-T3铝合金进行脱氧处理，阳极氧化及沸水封闭后，对其做电化学测试的波特图。利用EIS进一步研究了本文脱氧、三酸脱氧和传统碱性脱氧工艺对于阳极氧化及封闭的性能的影响。通常，Bode图中高频区域主要表征了氧化膜多孔层的电容，中频区域主要表征了氧化膜多孔层的电阻，低频区域的电化学行为主要与氧化膜阻挡层（膜层与基体之间的界面）的电容有关^[25]。由图7可以看出，本文脱氧、三酸脱氧和传统碱性脱氧3种脱氧工艺在高频区由于氧化前各自表面的粗糙度不同，其在图7中对应的区域的|Z|值有所差别。在低频区域，本文脱氧与三酸脱氧工艺所对应的|Z|值相差不大，且明显大于传统碱性脱氧工艺。由此可知，本文脱氧工艺与三酸脱氧工艺两者基本相一致，均优于传统碱性脱氧工艺。

2.2.5 盐雾试验分析

表6为3种脱氧工艺处理的航空铝合金经阳极氧化及沸水封闭后的中性盐雾试验测试结果。三酸工艺与本文脱氧工艺的耐盐雾腐蚀时间均在500 h以上，超过了航标ASTM B117的336 h的标准。传统碱性脱氧工艺，由于在脱氧过程中造成了表面粗糙等缺陷，中性盐雾试验时间未达标。中性盐雾试验结果表明，本文无铬无氟脱氧工艺与三酸脱氧工艺效果相近，均优于传统碱性脱氧，可以满足航空铝合金阳极氧化的生产要求。

表 6 3 种脱氧工艺获得的试样经阳极氧化及沸水封闭后的中性盐雾试验结果

Tab.6 Neutral salt spray test results of samples obtained from three deoxidation processes after anodic oxidation and boiling water sealing

脱氧工艺	中性盐雾时间/h
三酸脱氧	576
本文脱氧	504
传统碱性脱氧	216

3 结论

(1)通过设计正交试验,确定了最佳新型无铬无氟脱氧工艺参数为:碳酸钠 $80\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氯代十六烷基吡啶 $0.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、缓蚀剂 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、整平剂 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、脱氧时间 2 min 。

(2)使用3种脱氧工艺对2024-T3铝合金脱氧处理后,本文无铬无氟脱氧工艺、三酸脱氧工艺、传统碱性脱氧工艺处理的铝合金表面 R_a 分别为 0.223 、 0.205 和 $0.392\text{ }\mu\text{m}$,接触角分别为 57.0° 、 61.5° 和 44.0° , 2 min 脱氧速率分别为 $0.002\text{ }311$ 、 $0.002\text{ }844$ 和 $0.005\text{ }956\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,结果表明本文研发的新型无铬无氟脱氧工艺与三酸脱氧工艺效果相近。

(3)使用新型无铬无氟脱氧工艺处理后的2024-T3铝合金经过阳极氧化及沸水封闭,其耐盐雾腐蚀时间为 504 h ,与三酸脱氧的耐盐雾腐蚀时间 576 h 接近,且都超过航标的 336 h 标准,在铝合金阳极氧化脱氧处理中有望替代三酸工艺。

参考文献

- [1] Li S S, Yue X, Li Q Y, et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.
- [2] Birbilis N, Zhu Y M, Kairy S K, et al. A closer look at constituent induced localised corrosion in Al-Cu-Mg alloys[J]. Corrosion Science, 2016, 113: 160-171.
- [3] Boag A, Hughes A E, Glenn A M, et al. Corrosion of AA2024-T3 Part I: Localised corrosion of isolated IM particles[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 17-26.
- [4] 张晓丰. 铝、镁合金表面氧化与粘接性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- [5] 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.
- [6] 李忠建, 肖金涛, 鞠鹏飞, 等. 铝合金不同氧化处理工艺对其表面溅射 MoS_2 膜层耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 23-29.
- [7] 胡永俊, 熊玲, 蒙继龙, 等. 铝合金的前处理对Ni-Co-P化学镀层沉积特性和耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 194-196.
- [8] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.
- [9] Kong D J, Wang J C. Salt spray corrosion and electrochemical corrosion properties of anodic oxide film on 7475 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 286-290.
- [10] 程纪华, 刘明举, 胡振全. 前处理工艺对铝合金铬酸阳极氧化的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(5): 36-42.
- [11] 闫家琦, 苏晓磊, 刘毅. 前处理方式对壳核型 Ag/SiO_2 电磁屏蔽涂层的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 169-176.
- [12] 张跃庭, 王永. 铝合金环保型前处理工艺研究与应用[J]. 现代商贸工业, 2013, 25(18): 191-192.
- [13] 乔永莲, 罗永亮, 董宇, 等. 铝合金脱氧槽液的回收再利用技术研究[J]. 环境技术, 2020, 38(4): 153-157, 172.
- [14] 刘美霞, 杨丽萍, 张红. 三酸抛光液成分分析研究[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(6): 31-34.
- [15] 马梦婷. 铝合金在酸性无铬脱氧溶液中的腐蚀特性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
- [16] 李志刚, 郭汉相, 刘健康. 基于正交试验的多指标铣削参数对铝合金表面粗糙度影响分析[J]. 金属加工(冷加工), 2017(21): 41-43.
- [17] 张爱黎, 徐景雨, 夏春雷, 等. 正交优化带油特种钢材表面高温耐磨涂料[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 253-259.
- [18] 琚文涛, 徐舒婷, 屠逍航, 等. 微细凹槽电沉积铜工艺及影响因素研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(4): 30-35.
- [19] 李孝坤, 闫凯, 刘忻. 工艺参数对钎铁硼化学镀Ni-Mo-P/PTFE复合镀层耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(3): 35-39.
- [20] Veys-Renaux D, Chahboun N, Rocca E. Anodizing of multiphase aluminium alloys in sulfuric acid: in-situ electrochemical behaviour and oxide properties[J]. Electrochimica Acta, 2016, 211: 1056-1065.
- [21] 张培, 赵旭辉, 唐聿明, 等. 铝阳极氧化膜的微观结构及沸水封闭处理对膜层显微硬度的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 45-47, 51.
- [22] 邱小云, 王冀恒. 铝合金阳极氧化膜沸水-稀土盐双重封闭及力学性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(7): 30-35.
- [23] 程文礼, 杨慧, 任德杰, 等. 表面处理对铝合金盐雾环境下的腐蚀特性试验研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 92-96.
- [24] 张健, 许博, 魏建平, 等. 基于粗糙度的煤体表面接触角数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 96-104.
- [25] 杜爱玲, 马希骋, 张鹤鸣. 交流阻抗法研究铝合金表面脉冲氧化膜[J]. 电化学, 1999(3): 319-325.