

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.06.010

2219 铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化工艺研究

林少凯*, 唐春, 计培智, 朱小玲, 周洁, 杨娇, 兰翔

(四川航天长征装备制造有限公司, 四川 成都 610100)

摘要: 以航天领域常用的 2219 铝合金为研究对象, 通过单因素实验和正交试验研究了酒石酸浓度、硫酸浓度、氧化温度、氧化时间和氧化电压对酒石酸-硫酸阳极氧化膜的微观形貌、厚度和耐蚀性的影响, 并研究了热水封闭时间对氧化膜耐蚀性能的影响。结果表明: 当硫酸浓度为 50 g/L, 酒石酸浓度为 80 g/L, 氧化电压为 16 V, 氧化温度为 35 °C, 氧化时间为 28 min 时, 阳极氧化膜的耐蚀性最佳。阳极氧化膜的耐蚀性随热水封闭时间的增加而先增加后减少, 当热水封闭时间为 40 min 时, 其耐腐蚀性能最佳, 经 336 h 中性盐雾实验后无腐蚀斑点产生。

关键词: 2219 铝合金; 酒石酸-硫酸电解液; 阳极氧化; 电化学阻抗谱; 热水封闭

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Study on the anodizing process of 2219 aluminum alloy with tartaric acid and sulfuric acid

Lin Shaokai*, Tang Chun, Ji Peizhi, Zhu Xiaoling, Zhou Jie, Yang Jiao, Lan Xiang

(Sichuan Aerospace-Changzheng Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: The 2219 aluminum alloy commonly used in aerospace field was taken as the research object. The effects of tartaric acid concentration, sulfuric acid concentration, oxidation temperature, oxidation time and oxidation voltage on the morphology, thickness and corrosion resistance of tartaric acid-sulfuric acid anodic oxidation film were studied by single factor and orthogonal experiments. The effects of hot water sealing time on corrosion resistance of the film were also studied. The results showed that when the concentration of sulfuric acid was 50 g/L, the concentration of tartaric acid was 80 g/L, the oxidation voltage was 16 V, the oxidation temperature was 35 °C, and the oxidation time was 28 min, the oxidation film had the best corrosion resistance. The corrosion resistance of the anodic oxide film first increased and then decreased with the increase of hot water sealing time. When the hot water sealing time was 40 min, its corrosion resistance was the best. After 336 h neutral salt spray experiment, no corrosion spots were generated.

Keywords: 2219 aluminum alloy; tartaric-sulfuric acid electrolyte; anodic oxidation; electrochemical impedance spectroscopy; hot water sealing

铝及其铝合金具有密度低、比强度和比刚度高, 低温性能和焊接性能好的优点, 被广泛应用于航空航天领域, 然而铝合金表面自然生成的氧化膜较薄, 在潮湿、盐雾等环境中容易被破坏, 导致铝合金基体

发生腐蚀, 通常采用阳极氧化工艺对铝合金进行表面处理, 以提高铝合金的防护性能, 满足不同服役条件下的使用需求^[1]。

硫酸阳极氧化和铬酸阳极氧化是铝合金常用的

收稿日期: 2023-10-07

修回日期: 2023-11-07

*通信作者: 林少凯(1992—), 男, 硕士, 工程师, email: 2033636735@qq.com

表面处理方式^[2-3],但这两种工艺流程中均含有剧毒性六价铬,为人类致癌物并且会带来严重的环境污染,因此,国内外研究学者均开展了环保型阳极氧化工艺的研究,其中法国空客公司研发的酒石酸-硫酸阳极氧化工艺和美国波音公司研发的硼酸-硫酸阳极氧化工艺均被应用于实际生产,其中硼酸-硫酸阳极氧化仍采用稀铬酸溶液进行封闭,并未完全解决六价铬的问题,而酒石酸-硫酸阳极氧化工艺无论是在膜层性能还是环境影响上都优于硼酸-硫酸阳极氧化工艺^[4-5]。

目前,酒石酸-硫酸阳极氧化工艺在航空领域应用广泛^[6-8],但在航天领域中生产应用研究还较少,同时不同的材料、工艺参数、封闭方式也会对阳极氧化膜的性能产生影响,鉴于此,本文以在运载火箭上

广泛应用的 2219 铝合金为对象研究酒石酸-硫酸阳极氧化工艺,通过研究酒石酸浓度、硫酸浓度、氧化温度、氧化时间、氧化电压对阳极氧化膜性能的影响,以确定最佳的阳极氧化工艺参数,并进一步探索热水封闭(HWS)时间对阳极氧化膜耐蚀性能的影响,旨在探索适合 2219 铝合金的高性能、环保型阳极氧化新工艺,并为其在国内航天领域的推广应用提供理论和实验基础。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用材料为 2219 铝合金,试样尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm。材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 2219 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy

元素	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	V	Ti	Zr	Zn	Al
含量/(wt.%)	0.04	6.20	0.10	0.29	0.005	0.10	0.04	0.15	0.01	Bal.

1.2 实验方法

酒石酸-硫酸阳极氧化的工艺流程为:化学除油→水洗→碱腐蚀(40~60 g/L 的 NaOH 溶液中浸泡 1.5~2.0 min)→热水洗→冷水洗→出光(300~500 g/L 的 HNO₃ 溶液中浸泡 2~3 min)→冷水洗→阳极氧化→冷水洗→热水封闭→冷水洗→干燥。通过单因素实验分别研究酒石酸浓度、硫酸浓度、氧化温度、氧化时间以及氧化电压对氧化膜性能的影响,实

验参数设置见表 2。基于单因素实验结果选取各工艺参数范围设计 5 因素 3 水平正交试验,以腐蚀电流密度为评价指标对工艺参数进行优化。基于最优的工艺参数,进一步研究热水封闭的时间(20、30、40 和 50 min)对氧化膜耐蚀性能的影响,并通过盐雾试验考核其耐腐蚀性能,最终确定最佳的热水封闭时间。

表 2 单因素实验参数

Tab.2 The experimental parameter of single factor

研究因素	酒石酸/(g·L ⁻¹)	硫酸/(g·L ⁻¹)	θ /°C	t /min	U/V
实验 1	20、50、80、110、140	45	35	25	15
实验 2	80	15、25、45、65、85	35	25	15
实验 3	80	45	25、30、35、40、45	25	15
实验 4	80	45	35	15、25、35、45、55	15
实验 5	80	45	35	25	5、10、15、25、30

1.3 测试与表征

利用 EVO/MA25 型扫描电镜对阳极氧化膜的微观形貌进行观察。采用 QNIX8500 型涡流测厚仪测量阳极氧化膜的厚度。通过 Gamry Interface 3000 电化学工作站对阳极氧化膜进行电化学阻抗谱和动电位极化曲线测试,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,工作电极为阳极氧化试样,测试介质

选用 3.5% 的 NaCl 溶液。EIS 测试的频率范围为 10⁻²~10⁵ Hz,扰动电压幅值为 10 mV 的正弦波,利用 ZView 软件对所测得的阻抗数据进行拟合。极化曲线测试的扫描速度为 5 mV/s,扫描范围为 -0.5~0.5 V(vs. OCP)。采用 LRHS-412-RY 盐雾试验箱对阳极氧化和热水封闭后的试样进行 336 h 中性盐雾试验。

2 结果与讨论

2.1 酒石酸浓度对阳极氧化膜形貌和厚度的影响

图1为不同酒石酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌。从图1可以看出,随着酒石酸浓度的增加,阳极氧化膜表面的孔洞数量先减少后增加,说明添加酒石酸减弱了电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解作用,有利于生成均匀致密的阳极氧化膜^[9],但当酒石酸浓度达到140 g/L时,阳极氧化膜表面孔洞明显增多,孔径增大,阳极氧化膜致密度降低。

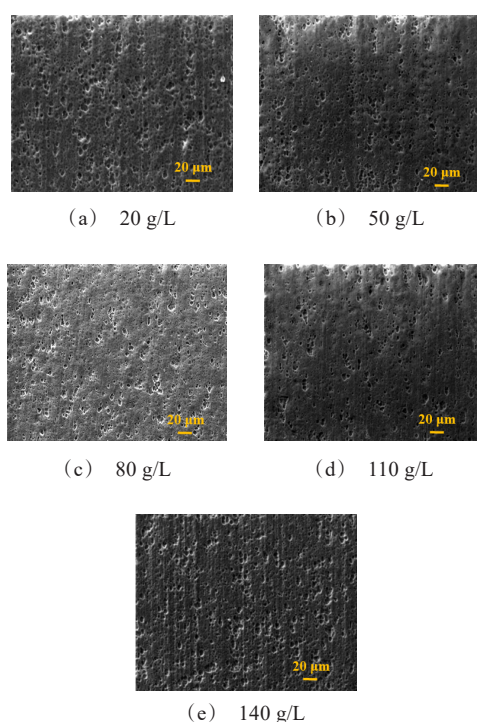


图1 不同酒石酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌
Fig.1 Micromorphology of 2219 aluminum alloy anodized film under different tartaric acid concentrations

图2为在不同酒石酸浓度下阳极化膜层的厚度,可以看出,在一定酒石酸浓度范围内,随着酒石酸浓度的增加,阳极氧化膜的厚度呈先增加后降低的趋势,其原因可能为酒石酸浓度过高会降低氧化膜的成膜速率^[10],导致氧化膜的生长速度小于膜在电解溶液中的溶解速度。

2.2 硫酸浓度对阳极氧化膜形貌和厚度的影响

图3和图4为不同硫酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌和厚度。可以看出,当硫酸浓度

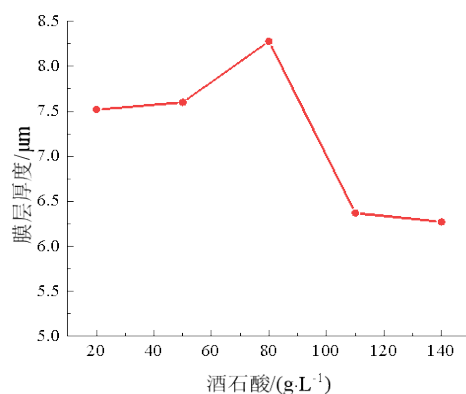


图2 不同酒石酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的厚度
Fig.2 Thickness of anodic oxidation film of 2219 aluminum alloy under different tartaric acid concentrations

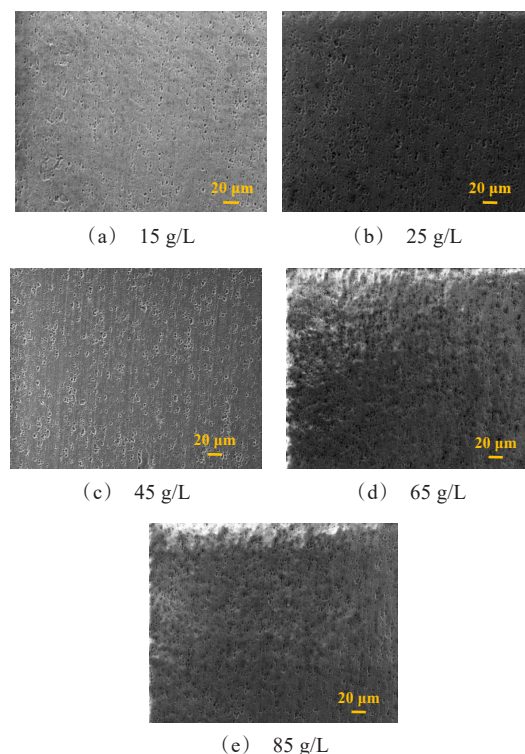


图3 不同硫酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌
Fig.3 Micromorphology of anodic oxide film of 2219 aluminum alloy under different sulfuric acid concentrations

为15~45 g/L时,阳极氧化膜表面平整光滑,当硫酸浓度为65~85 g/L时,阳极氧化膜表面存在明显的凸起。当硫酸浓度为15~85 g/L时,阳极氧化膜的厚度呈非线性增加趋势,这是因为硫酸作为主反应物,在一定范围内,成膜效率随其浓度的增加而提高,但其

浓度过高又会加快阳极氧化膜层溶解,导致膜层粗糙多孔^[11]。

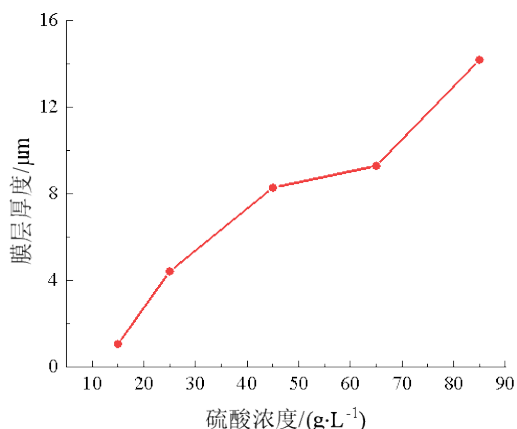


图4 不同硫酸浓度下2219铝合金阳极氧化膜的厚度

Fig.4 Thickness of anodic oxide film of 2219 aluminum alloy under different sulfuric acid concentrations

2.3 氧化温度对阳极氧化膜形貌和厚度的影响

不同氧化温度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌和厚度见图5和图6。

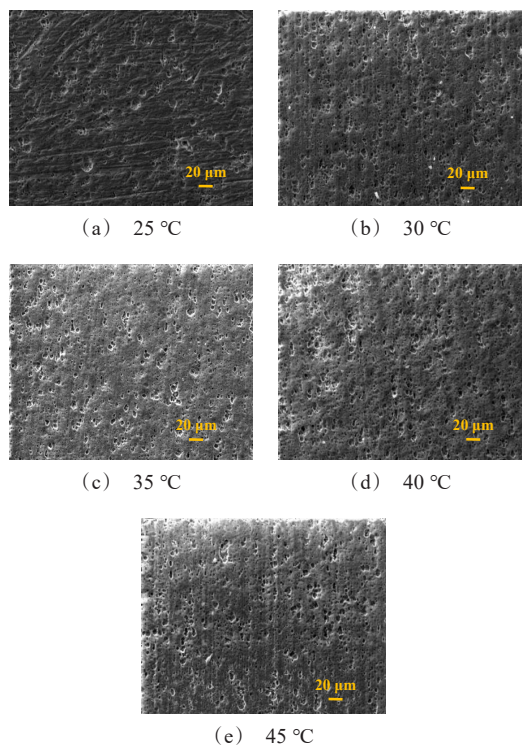


图5 不同温度下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌

Fig.5 Micromorphology of anodic oxide film of 2219 aluminum alloy at different temperatures

可以看出,当温度为25 °C时,阳极氧化膜表面孔洞较少,但此时膜层厚度仅有1.84 μm,随着氧化温度的升高,膜层表面孔洞数量明显增多,阳极氧化膜厚度也随之增大。这是因为在一定温度范围内,氧化膜的生长速度大于膜在电解溶液中的溶解速度,所以随着氧化温度的升高,氧化膜的成膜速率增加,但同时电解液对氧化膜的溶解作用也随温度的提高而增强,进而导致氧化膜孔洞数量变多,孔洞尺寸变大^[12]。

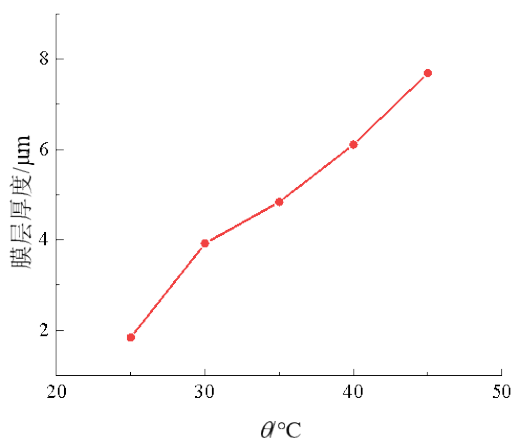


图6 不同温度下2219铝合金阳极氧化膜的厚度

Fig.6 Thickness of anodic oxide film of 2219 aluminum alloy at different temperatures

2.4 氧化时间对阳极氧化膜形貌和厚度的影响

图7为不同氧化时间下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌。从图7可以看出,阳极氧化膜孔洞数量随氧化时间的增加而增多,尤其当氧化时间为55 min时,氧化膜局部凸起严重,产生这种现象的原因在于氧化期间膜层孔中的酸液温度逐渐升高,电解液对氧化膜的溶解能力逐渐提高^[13]。

图8为不同氧化时间下阳极化膜层的厚度,可以看出,在一定时间范围内,膜层厚度随氧化时间的增加而增加,这是因为此时氧化膜的生长速度仍大于膜在电解溶液中的溶解速度,氧化膜厚度保持增长趋势,当氧化时间为15 min时,氧化膜厚度为2.54 μm,氧化时间为35 min时,阳极化膜层厚度达到了7.10 μm。

2.5 氧化电压对阳极氧化膜形貌和厚度的影响

图9为不同氧化电压条件下2219铝合金阳极氧化膜的微观形貌。从图9可以看出,当氧化电压较低时,阳极氧化膜表面孔洞数量多,当氧化电压为

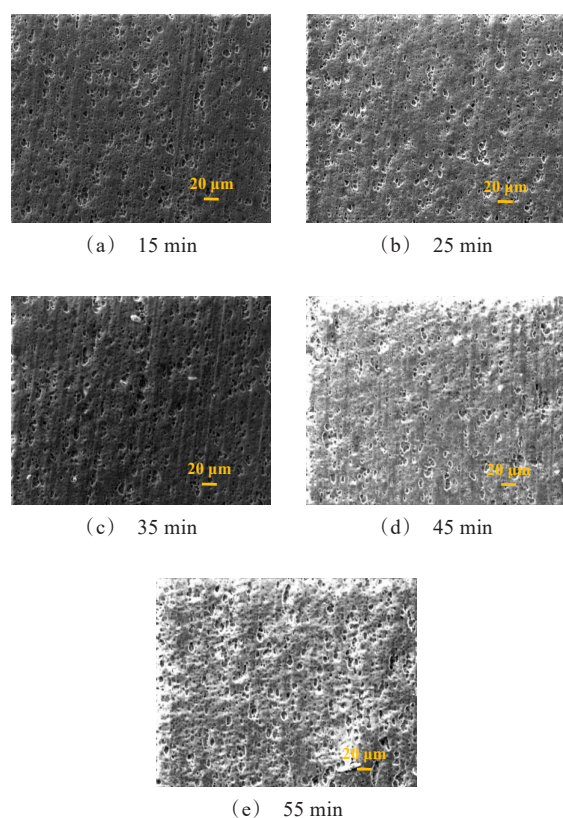


图7 不同氧化时间下2219铝合金阳极氧化膜的表面形貌

Fig.7 Surface morphology of anodic oxidation film of 2219 aluminum alloy at different oxidation time

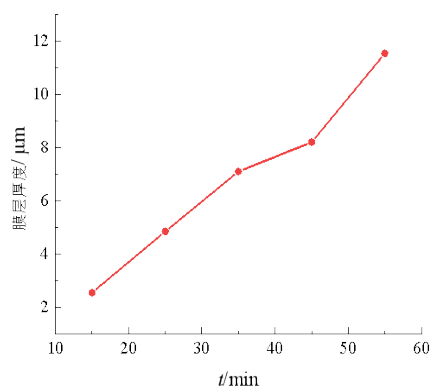


图8 不同氧化时间下2219铝合金阳极氧化膜的厚度

Fig.8 Thickness of anodic oxidation film of 2219 aluminum alloy at different oxidation time

10~15 V时,有利于生成均匀致密的膜层,但当氧化电压升至25 V时,阳极氧化膜表面出现大量凹坑,局部呈聚集形态,致密度降低。图10为不同氧化电压下阳极化膜层的厚度,由图10可知,当氧化电压

为5~30 V时,阳极氧化膜厚度呈增加趋势,这是因为氧化电压高则阳极氧化膜的成膜速率高,此时成膜速率仍大于溶解速率,膜层保持增长趋势,但当氧化电压超过一定限度时,电解液产生的大量热量无法及时散发,造成氧化膜的溶解加快,导致膜层表面孔洞变大^[14]。

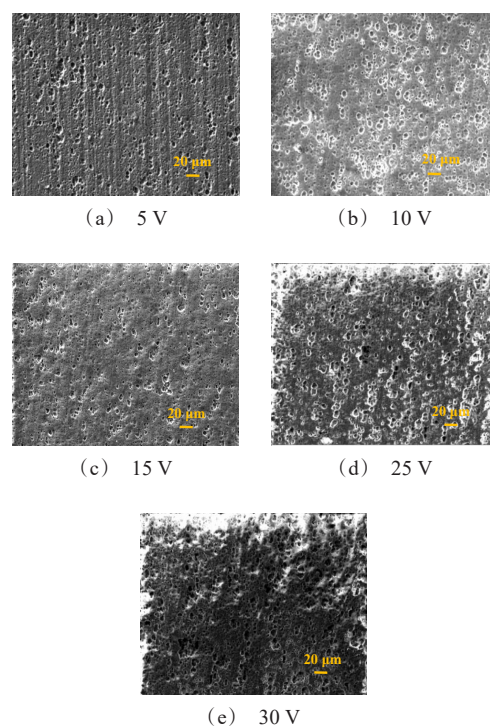


图9 不同氧化电压下2219铝合金阳极氧化膜的表面形貌

Fig.9 Surface morphology of anodized film of 2219 aluminum alloy under different oxidation voltages

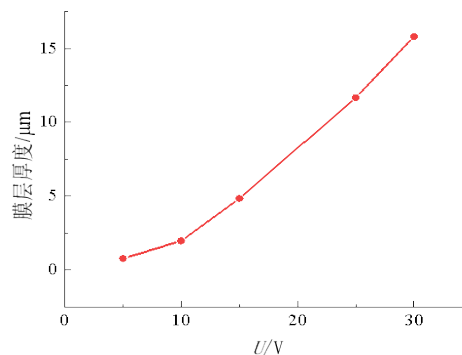


图10 不同氧化电压下2219铝合金阳极氧化膜的厚度

Fig.10 Thickness of anodic oxide film of 2219 aluminum alloy under different oxidation voltages

2.6 正交试验结果

基于单因素实验结果设计正交试验,选取腐蚀电流密度作为酒石酸-硫酸阳极氧化膜耐腐蚀性能的评价指标,实验结果见表 3。极差 R 的大小用于衡量相应因素对实验结果影响的大小,对比 R 值可以看出, $R_E > R_B > R_D > R_C > R_A$, 即氧化时间对腐蚀电流

密度影响最大,硫酸浓度对腐蚀电流密度影响最小。2219 铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化最佳工艺为 $A_4B_2C_3D_2E_3$, 即硫酸浓度 50 g/L, 酒石酸浓度为 80 g/L, 氧化电压为 16 V, 氧化温度为 35 °C, 时间为 28 min。

表 3 正交试验设计及结果表

Tab.3 The design and result of orthogonal experiments

编号	硫酸浓度(A)/(g·L ⁻¹)	酒石酸浓度(B)/(g·L ⁻¹)	氧化电压(C)/V	氧化温度(D)/°C	氧化时间(E)/min	I_{cor} /(10 ⁻⁹ A·cm ⁻²)
1	35	75	14	30	23	13.51
2	35	80	15	35	25	4.60
3	35	85	16	37	28	4.04
4	35	90	17	40	30	19.08
5	40	75	15	37	30	21.69
6	40	80	14	40	28	8.14
7	40	85	17	30	25	4.72
8	40	90	16	35	23	5.33
9	45	75	16	40	25	14.21
10	45	80	17	37	23	5.16
11	45	85	14	35	30	13.48
12	45	90	15	30	28	10.42
13	50	75	17	35	28	2.54
14	50	80	16	30	30	4.54
15	50	85	15	40	23	10.11
16	50	90	14	37	25	9.58
K_1	10.31	12.99	11.18	8.30	8.53	—
K_2	9.97	5.61	11.70	6.49	8.28	—
K_3	10.82	8.09	7.03	10.12	6.29	—
K_4	6.69	11.11	7.87	12.88	14.70	—
R	4.13	7.38	4.67	6.39	8.41	—

2.7 热水封闭工艺研究

图 11 为经酒石酸-硫酸阳极氧化处理后经不同时间热水封闭(HWS)和未封闭后的试样(TSA)在 3.5%NaCl 溶液中所测得的电化学阻抗谱。通过观察 Bode 图可以看出,在整个频率范围内阻抗 $|Z|$ 的大小顺序为: $HWS_{40\text{ min}} > HWS_{50\text{ min}} > HWS_{30\text{ min}} > HWS_{20\text{ min}} > TSA$ 。在中高频范围内,经热水封闭后氧化膜的阻抗值明显高于未封闭氧化膜的阻抗值,这是因为低频范围对应于氧化膜的阻挡层特性,中频和高频范围反映了氧化膜的封闭多孔层特性,氧化膜层经热水封闭后,非晶态氧化铝转化为勃姆体的水合氧化铝,分子体积比原氧化膜大了 30%,体

积膨胀使得氧化膜的微孔填充封闭,从而导致热水封闭的氧化膜的多孔层阻抗值增加^[15-17]。

研究者们提出了各种不同的等效电路来模拟氧化膜中阻挡层和多孔层的特性,其中 Mansfeld 提出的等效电路模型被广泛用于拟合氧化膜的电化学阻抗谱^[18-20],如图 12(a)所示,其中 R_s 是电解液电阻, R_p 和 CPE_p 分别是多孔层的电阻和常相位元件, R_b 和 CPE_b 分别是阻挡层的电阻和常相位元件。未封孔的氧化膜由于存在大量孔隙, Bode 图中只出现了一个时间常数,因此采用图 12(b)的等效电路进行拟合,从图 11 可以看出,拟合结果与实验数据非常相似。电化学阻抗数据拟合结果见表 4。

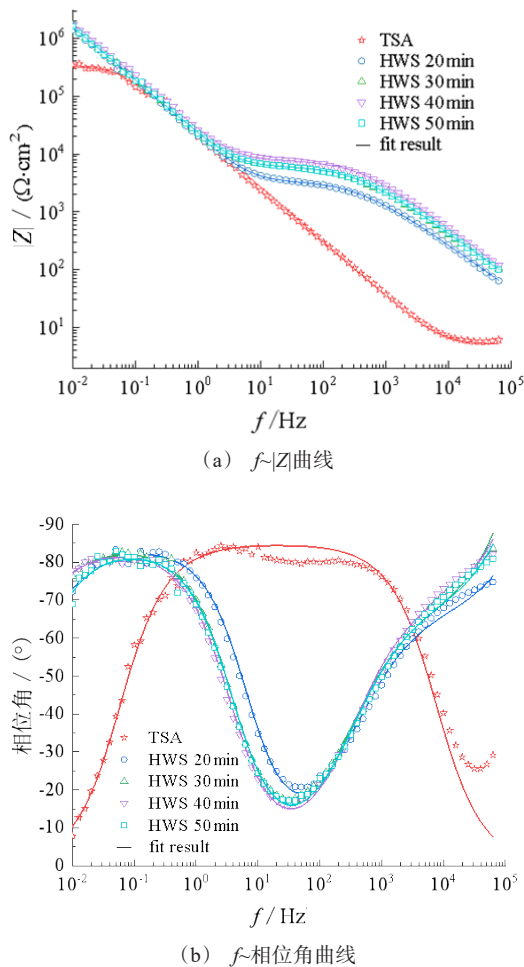


图11 未封闭和热水封闭不同时间后阳极氧化膜的Bode图

Fig.11 Bode diagram of anodic oxide film after unsealing and hot water sealing under different time

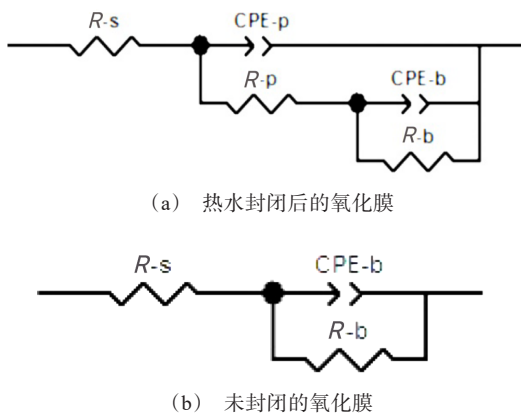


图12 拟合EIS数据的等效电路

Fig.12 Equivalent circuit for fitting EIS data

由表4可知, R_p 、 R_b 值均随着热水封闭时间的增加先增加后减少,当热水封闭时间为40 min时, R_p 和 R_b 值达到了最大,分别为 $8.03 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $1.78 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,说明当热水封闭40 min时,氧化膜具有较强的电阻特性,有效阻止了腐蚀介质向基体的渗透,具有较强的耐腐蚀性能。

表4 电化学阻抗数据拟合结果

Tab.4 Fitting results of electrochemical impedance data

封闭工艺	$R_p / (\text{k} \Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE-p} / (\text{nS} \cdot \text{cm}^2)$	n_p	$R_b / (\text{k} \Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE-b} / (\mu\text{S} \cdot \text{cm}^2)$	n_b
TSA	—	—	—	3352.7	7.58	0.94
HWS 20 min	3.60	915	0.75	8507.2	7.68	0.96
HWS 30 min	5.36	651	0.74	14651.0	7.79	0.94
HWS 40 min	8.03	298	0.79	17829.0	6.82	0.93
HWS 50 min	6.36	472	0.77	7997.0	7.68	0.94

以上述研究内容为基础,选取酒石酸-硫酸阳极化工艺条件为硫酸浓度50 g/L,酒石酸浓度80 g/L,氧化电压16 V,氧化温度35 °C,氧化时间28 min,热水封闭40 min,对2219铝合金进行酒石酸-硫酸阳极氧化,试样经336 h中性盐雾试验后的宏观形貌见图13,可以看出,未阳极化试样区域产生大面积腐蚀斑点,未经热水封闭试样则产生较多腐蚀斑点,而经热水封闭后的试样无腐蚀斑点产生,满足航天型号产品关于铝合金阳极化耐蚀性的要求。

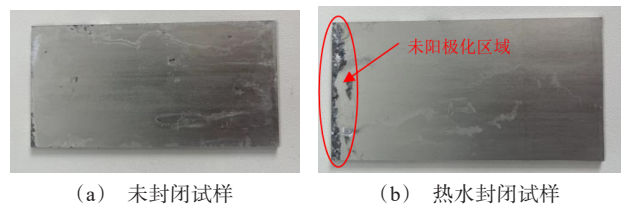


图13 未封闭和热水封闭后的试样盐雾试验结果

Fig.13 Salt spray test results of unsealing and hot water sealing samples

3 结论

(1)2219铝合金氧化膜表面孔洞数量随着酒石酸浓度的增加而先减少后增加;当硫酸浓度达

到 65 g/L 时,氧化膜表面存在明显凸起;随着氧化温度的升高,氧化膜表面孔洞数量均呈增加趋势;当氧化时间为 55 min 时,氧化膜表面局部凸起严重;当氧化电压为 10~15 V 时,氧化膜表面平整度较好,当氧化电压升至 25 V 时,氧化膜表面出现大量凹坑,致密度降低。

(2)在给定的工艺参数范围内,2219 铝合金阳极化膜层厚度随酒石酸浓度的增加呈先增加后降低的趋势,而随硫酸浓度、氧化电压、氧化温度、氧化时间的增加呈增加趋势。

(3)酒石酸-硫酸阳极氧化最佳的工艺条件为:硫酸浓度 50 g/L,酒石酸浓度 80 g/L,氧化电压 16 V,氧化温度 35 °C,氧化时间 28 min。

(4)当热水封闭时间为 40 min 时,氧化膜经 336 h 中性盐雾试验后无腐蚀斑点产生,此时多孔层电阻 R_p 和阻挡层 R_b 值分别为 $8.03 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $1.78 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 孙衍乐,宣天鹏,徐少楠,等. 铝合金的阳极氧化及其研发进展[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(4): 18-21.
- [4] 王若玺. 铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化及封闭工艺研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- [5] 颜杰红,冯双芹,王立亮,等. 两种环保型铝合金表面处理工艺的比较[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(15): 835-838.
- [6] Garcia-Rubio M, Ocon P, Climent-Font A, et al. Influence of molybdate species on the tartaric acid/sulphuric acid anodic films grown on AA2024 T3 aerospace alloy[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2034-2042.
- [7] Wang R, Wang L, He C, et al. Studies on the sealing processes of corrosion resistant coatings formed on 2024 aluminium alloy with tartaric-sulfuric anodizing[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 360: 369-375.
- [8] 樊伟,李小平. 不同阳极氧化工艺对铝合金支架表面氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(9): 51-58.
- [9] 朱彭舟,麻彦龙,蒋璐瑶,等. 电解液成分对 7075 铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化膜结构及性能的影响[J]. 重庆理工大学学报, 2020, 34(1): 148-155.
- [10] 张伟华,于群,孙伟,等. 酒石酸浓度对铝合金阳极氧化膜耐蚀性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6): 93-98.
- [11] 肖金涛,陈妍,邢明秀,等. 工艺参数对 2195 铝锂合金阳极氧化膜的耐蚀性影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(5): 431-438.
- [12] 熊菊,邹梦婷,王维青,等. 温度及酒石酸对 5182 铝合金硫酸阳极氧化膜结构和耐蚀性能的影响[J]. 重庆理工大学学报, 2021, 35(11): 102-108.
- [13] 于海青,王金涛,王东. 氧化时间对铝合金酒石酸氧化膜性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(4): 65-69.
- [14] 张雨,孙立坤,刘佳伦,等. 工艺参数对铝合金阳极氧化膜表面形貌的影响[J]. 电镀与环保, 2015, 35(1): 39-40.
- [15] 刘君,龚利华,潘峰,等. 6061 铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化工艺研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 94-99.
- [16] 陈妍,肖金涛,邢明秀,等. 不同封闭工艺对 2195 铝锂合金环保型阳极氧化膜耐蚀性能影响[J]. 上海航天, 2020, 37(3): 61-67.
- [17] 范丽娜,张晓林,丁一,等. 耐蚀性铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(3): 217-221.
- [18] 凌付平. 植酸及铈盐溶液封闭对铝锂合金阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 46(5): 32-38.
- [19] García-Rubio M, Lara M P D, Ocón P, et al. Effect of posttreatment on the corrosion behaviour of tartaric-sulphuric anodic films [J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(21): 4789-4800.
- [20] 周宏业,敬旭初,许晓文,等. 建筑铝合金硫酸-苹果酸阳极氧化及混合溶液封孔[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(6): 16-24.