

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.04.006

阳极氧化时间对 2A12 铝合金剥落腐蚀性能的影响

肖可谋, 聂伟军, 蹇海根, 王业东, 杨孝梅

(湖南工业大学 材料与先进制造学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 利用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 以及膜厚测量等分析测试方法研究了不同阳极氧化时间对 2A12 铝合金抗剥落腐蚀性能的影响。结果表明: 随着阳极氧化时间延长, 氧化膜厚度逐渐增加, 其抗剥落腐蚀性能越好。当阳极氧化时间从 30 min 延长至 60 min 时, 氧化膜厚度从 2.43 μm 增大到 4.72 μm , 膜厚标准差从 0.75 减少至 0.52。但是当阳极氧化时间超过 60 min 后, 氧化膜厚度增长趋势缓慢, 膜厚标准差逐渐趋于一水平值。宏观、微观形貌综合分析结果表明, 当阳极氧化时间为 60 min 时, 2A12 铝合金的耐腐蚀性能最好。

关键词: 2A12 铝合金; 阳极氧化膜; 剥落腐蚀; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG171

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)04-0039-08

引文格式: 肖可谋, 聂伟军, 蹇海根, 等. 阳极氧化时间对 2A12 铝合金剥落腐蚀性能的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(4): 39-46.

Effects of Anodizing Time on Exfoliation Corrosion Properties of 2A12 Aluminum Alloy

XIAO Kemou, NIE Weijun, JIAN Haigen, WANG Yedong, YANG Xiaomei

(College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been conducted on the effects of different anodizing times on the exfoliation corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy by means of scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and film thickness measurement. The results show that with the increase of anodizing time, the thickness of anodic oxide film increases gradually, with an improved performance in the anti-exfoliation corrosion. With the anodization time extended from 30 min to 60 min, the thickness of the oxide film increases from 2.43 μm to 4.72 μm , meanwhile, the standard deviation of the film thickness decreases from 0.75 to 0.52. However, when the anodizing time exceeds 60 min, the thickness of the oxide film increases slowly, with the standard deviation of the film thickness gradually tending to be a level value. A comprehensive analysis of macroscopic and microscopic morphology shows that the corrosion resistance of the alloy is characterized with the best performance with an anodizing time of 60 min.

Keywords: 2A12 aluminum alloy; anodic oxide film; exfoliation corrosion; corrosion resistance

收稿日期: 2021-05-27

基金项目: 湖南省创新型省份建设专项科普专题基金资助项目 (2020ZK4023); 湖南省教育厅科研基金资助重点项目 (20A147); 教育部产学研合作协同育人基金资助项目 (202102072081)

作者简介: 肖可谋 (1998-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为铝合金电化学腐蚀性能与防护, E-mail: 1335163797@qq.com

通信作者: 蹇海根 (1980-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为铝合金微观结构, E-mail: jianhaigen2001@163.com

1 研究背景

2A12 铝合金具有密度小、比强度高、导电性能优、加工及焊接性能好等优点,被广泛应用于飞机骨架、肋梁、蒙皮及隔框等航空航天领域^[1-2]。

剥落腐蚀是目前对铝合金危害性较大的一种局部腐蚀,同时也是飞机结构腐蚀的主要形式之一^[3],图 1^[4]为变形铝合金的剥落腐蚀示意图。M. J. Robinson^[5]和 D. J. Kelly^[6]等研究认为,发生剥落腐蚀必须有两个条件:拉长的晶粒和晶界电偶腐蚀(沉淀相/溶质贫化区)造成的腐蚀通路。对晶间腐蚀敏感的铝合金经过压力加工后,晶粒呈宽而长的扁平状,发生腐蚀时,腐蚀沿平行于材料表面的平面,即呈阳极性的晶间或晶界发展^[7],此时腐蚀产物体积大于消耗的金属体积,从而产生“楔入效应”,撑起上方没有腐蚀的金属,引起分层和剥落^[8]。

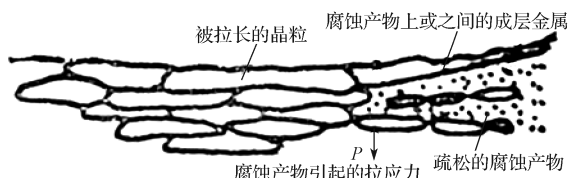


图 1 变形铝合金的剥落腐蚀示意图

Fig. 1 Exfoliation corrosion model of deformed aluminum alloys

实际服役过程,经压力加工后的 2A12 铝合金材料具有较高的剥蚀敏感性,容易造成飞机结构件的腐蚀失效,进而影响飞机的飞行安全。因此,采用适当的方法对 2A12 铝合金材料表面进行处理,进一步提高其耐腐蚀性能显得非常必要^[9-16]。

目前常用阳极氧化法处理铝合金表面,氧化过程中在铝合金表面生成氧化膜层,可有效提高铝合金的耐磨和耐蚀性能,但是在含有氯离子的酸性或者碱性环境中容易被腐蚀,使铝合金阳极氧化膜失效^[17-18]。为此,研究阳极氧化膜在含有氯离子的酸性环境中的剥蚀行为具有重要的现实意义。

近年来,对 2A12 铝合金阳极氧化的研究主要集中在氧化工艺与添加剂等方面^[19-23],而对阳极氧化膜抗剥落腐蚀行为的研究较少。为此,本文选用己二酸-硫酸为槽液,研究不同的阳极氧化时间对 2A12 铝合金抗剥落腐蚀性能的影响。

2 实验材料与方法

2.1 原材料与仪器

1) 原材料。实验材料选用 T4 态 2A12 铝合金板材,由东莞市东业大拓钢材金属有限公司生产,合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 2A12 铝合金化学成分

Table 1 Chemical components of 2A12 aluminum alloy

元素	Cu	Mg	Si	Zn	Mn	Ti	Al
质量分数 /%	3.8 ~ 4.9	1.2 ~ 1.8	≤ 0.5	≤ 0.3	0.3 ~ 0.9	≤ 0.15	余量

2) 仪器。扫描电子显微镜(JSM-IT200 型)、能谱仪(Oxford 牛津 X-MaxN 型),日本电子株式会社;超声波清洗机, KQ80 型,昆山市超声仪器有限公司;电子恒温不锈钢水浴锅, HHS-2S 型,上海虞龙仪器设备有限公司; DK77 系列电火花数控线切割机床, Model 型,泰州市长德机械制造有限公司;直流电源, DM-1552C 型,郑州市东明电子有限公司;测厚仪, Dualscope MPO 型,菲希尔测试仪器有限公司。

2.2 实验步骤

将铝合金板材切割成 20 mm × 20 mm × 8 mm 的试样,选择 20 mm × 20 mm 面作为工作面,其余面用自凝型义齿基托树脂密封。试样工作面采用 400#、800#、1 000# 和 2 000# 砂纸逐级打磨,打磨至粗糙度值约为 0.1 μm 即可,再用酒精和丙酮除油、去离子水超声清洗干燥后置于试样袋中备用。

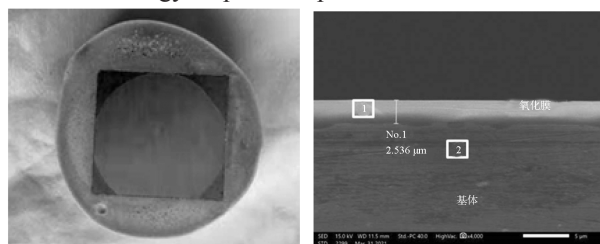
阳极氧化槽液选用硫酸与己二酸混合溶液,用 DM-1552C 型直流电源控制电压。阳极氧化工艺参数如下:阳极氧化电解液硫酸质量浓度为 55 g/L,己二酸质量浓度为 6 g/L,电压为 15 V,氧化时间分别为 30, 45, 60 min。阳极氧化后,用沸腾的去离子水对试样进行封闭处理,时间为 30 min。

剥落腐蚀实验按 HB 5455—1990 标准《铝合金剥层腐蚀实验方法》执行。腐蚀介质为 EXCO (exfoliation corrosion) 溶液,该体系为 234 g/L 氯化钠 + 50 g/L 硝酸钾 + 6.5 mL/L 硝酸,室温下实验,溶液面容积不小于 20 mL/cm²。浸泡 96 h 后,取出试样观察腐蚀情况。为获得腐蚀后试样的质量变化曲线,将剥落腐蚀时间延长至 240 h,每隔 20 h 取出试样,用去离子水冲洗后干燥称量,获得其质量变化数据。

3 实验结果与分析

3.1 试样的制备

图 2 为阳极氧化 30 min 的氧化膜宏、微观形貌及 EDS (energy dispersive spectrometer) 分析结果。



a) 氧化膜宏观形貌

b) 氧化膜截面 SEM 图

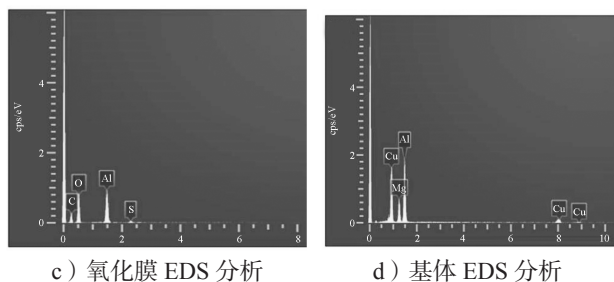


Fig. 2 Oxide film morphology obtained at 30 min with EDS analysis results

由图 2a 可看出, 铝合金试样氧化膜覆盖区域和非氧化区域存在明显的色差, 阳极氧化膜覆盖区域呈银白色, 而非氧化区域则呈现出金属光泽。通过图 2b 可看出, 生成的氧化膜均匀地覆盖在基体表面, 图中标注的膜厚为 $2.536 \mu\text{m}$ 。与图 2d 对比发现, 图 2c 中除含有 Al 和 O 元素外, 还含有 C 和 S 元素, 其中 C 和 S 主要来自阳极氧化过程中的电解溶液。

阳极氧化完成后, 测量膜层厚度, 每个试样取 10 个测点, 取其平均值, 得到的阳极氧化时间与氧化膜厚度、膜厚标准差间关系曲线见图 3。

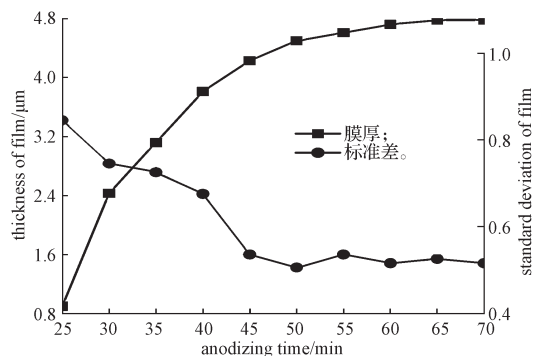


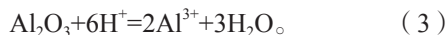
图 3 阳极氧化时间与阳极氧化膜厚度、膜厚标准差之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between oxidation time, oxide film thickness and the standard deviation of oxide film thickness

由图 3 中的曲线可知, 随着氧化时间增加, 氧化膜的厚度不断增加, 但当氧化时间超过 60 min 后, 随着氧化时间的延长, 膜层厚度增加速率变缓。可能的原因是在阳极氧化过程中, 同时进行着阳极氧化膜的生成和溶解, 生成氧化膜的反应式为^[24]



基体和氧化膜溶解的方程式分别如下:



阳极刚开始氧化时, 氧化膜的生成速率大于溶解速率, 氧化膜不断变厚, 随着氧化时间延长, 氧化膜的厚度继续增加, 与此同时其电阻增大, 产热增加,

使其生成速率下降, 溶解能力上升, 当溶解速率和生成速率相等时, 氧化膜的生成和溶解达动态平衡, 此时氧化膜的厚度将达到一个稳定值。

由图 3 还可知, 膜厚标准差随阳极氧化时间的增加呈下降趋势, 说明阳极氧化时间越长膜厚越均匀。

3.2 腐蚀动力学分析

室温下不同阳极氧化处理试样在 EXCO 溶液中的质量变化与剥落腐蚀时间关系曲线如图 4 所示。不同阳极氧化时间下制备的氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡 240 h 后的宏观腐蚀形貌如图 5 所示。

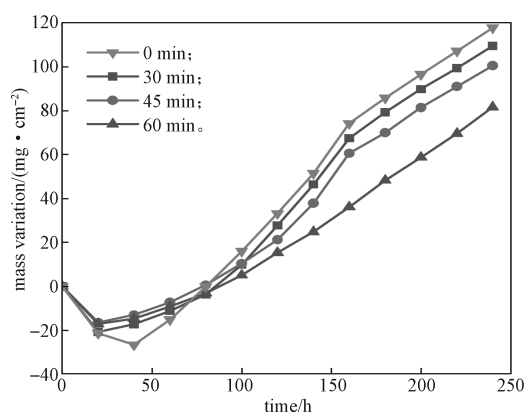


图 4 试样腐蚀质量变化与腐蚀时间的关系曲线
Fig. 4 Relationship curves between mass variation and corrosion time of specimens

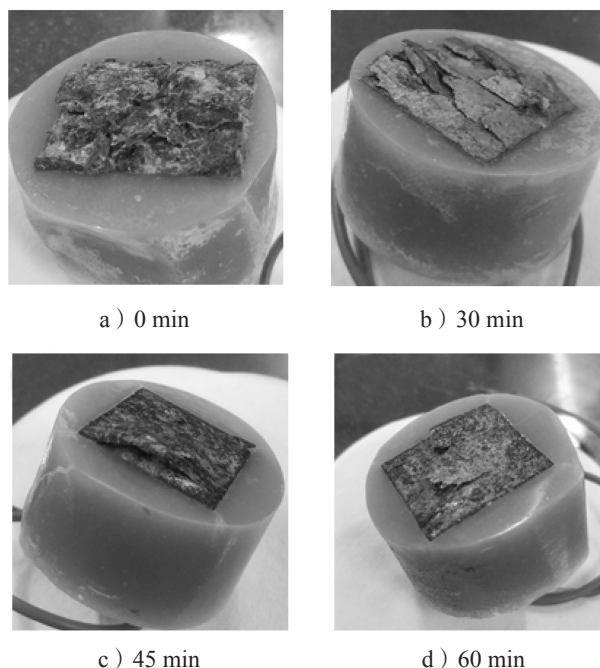


图 5 不同氧化时间下制备的氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡 240 h 后的宏观腐蚀形貌

Fig. 5 Macroscopic corrosion morphology of oxide films prepared under different anodizing times after immersion in EXCO solution for 240 h

由图 4 可以看出, 阳极氧化 30 min 试样的曲线最先出现变化, 偏离了原本轨迹, 曲线斜率向着未进行阳极氧化处理的试样靠近, 接着是阳极氧化时间为 45 min 的试样, 最后才是阳极氧化 60 min 的试样, 由此可见阳极氧化 30 min 的试样膜最薄, 脱落最早; 而 60 min 的膜最厚, 脱落最晚。

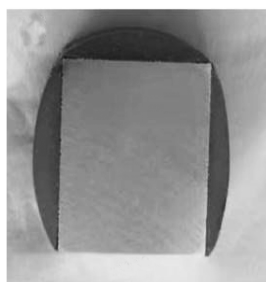
图 5 中试样表面除少量碎块直接剥落, 大部分翘起的金属未彻底脱离基体, 加上缝隙中残留和表面堆积的腐蚀产物, 使得试样整体呈增重趋势。因阳极氧化膜在 EXCO 溶液中不断溶解变薄乃至脱落, 失去对基体的保护作用, 试样最后的增重速率趋近一致。

试样浸泡 48 h 前, 腐蚀类型主要是点蚀和晶间腐蚀^[25]。由于 EXCO 溶液为酸性氯化物溶液, 故而点蚀过程是从氯离子对 2A12 铝合金表面局部钝化状态的破坏开始^[26]。当合金表面出现蚀坑后, 腐蚀溶液会进入坑内与基体发生反应, 生成 Al^{3+} 并放出氢气^[25, 27-30]。有研究^[31]表明, 对于 Mg、Zn、Al、Fe 和 Ni 等可发生点蚀的金属, 溶解产物 MCl_x (M 为金属原子) 会在蚀坑底部形成固体盐层。因早期蚀坑尺寸较小, 溶解产物未大量堆积, 极易从试样上自行脱落, 故而基体合金在此阶段会存在一定的质量损失, 这便是图 4 的质量变化曲线初期呈现短暂下降趋势的主要原因。由于 2xxx 系铝合金在 EXCO 溶液中的腐蚀属于加速腐蚀过程, 从点蚀过渡到剥蚀的速度相对较快, 其腐蚀产物对腐蚀介质的阻挡作用主要表现在初期, 加上后续点蚀扩大为晶间腐蚀并形成沿晶微裂纹^[32], 腐蚀产物沿裂纹进入试样内部导致整体质量增加, 失重速率因此降低, 直至出现增重趋势。

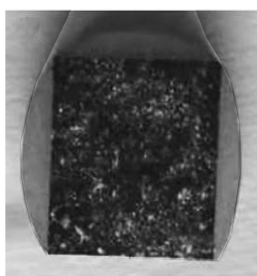
浸泡 48 h 后, 腐蚀类型逐渐转向剥蚀^[25], 腐蚀产物开始大量堆积在试样表面或残留在试样内部的裂纹中, 而其体积又大于消耗的基体金属体积, 在其楔入力影响下, 裂纹上方的金属一层一层向上翘起, 试样表面呈现出典型的铝合金剥蚀特征^[7]。

3.3 宏观形貌观察

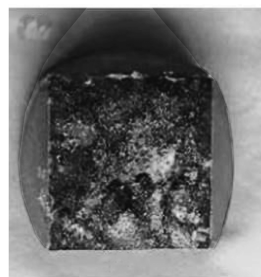
不同氧化时间下制备的阳极氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡前后的宏观腐蚀形貌如图 6 所示。



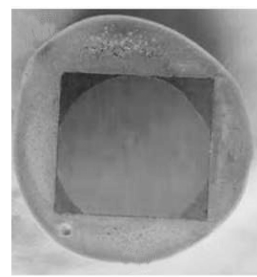
a) 氧化 0 min, 浸泡 0 d



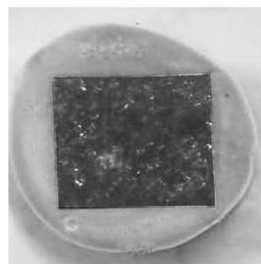
b) 氧化 0 min, 浸泡 2 d



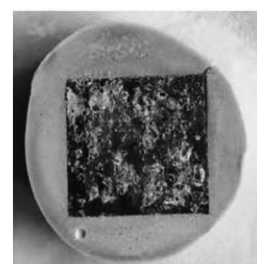
c) 氧化 0 min, 浸泡 4 d



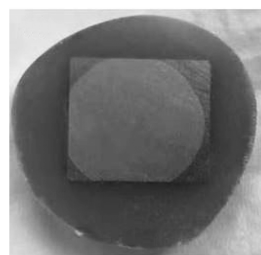
d) 氧化 30 min, 浸泡 0 d



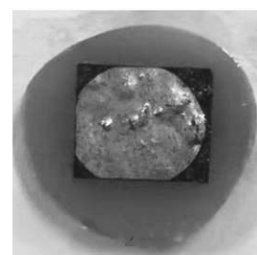
e) 氧化 30 min, 浸泡 2 d



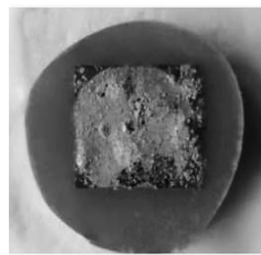
f) 氧化 30 min, 浸泡 4 d



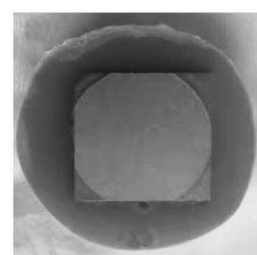
g) 氧化 45 min, 浸泡 0 d



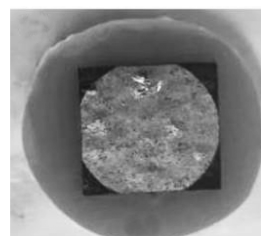
h) 氧化 45 min, 浸泡 2 d



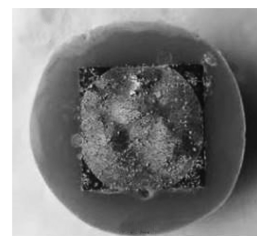
i) 氧化 45 min, 浸泡 4 d



j) 氧化 60 min, 浸泡 0 d



k) 氧化 60 min, 浸泡 2 d



l) 氧化 60 min, 浸泡 4 d

图 6 不同阳极氧化时间下制备的氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡不同时间后的宏观腐蚀形貌

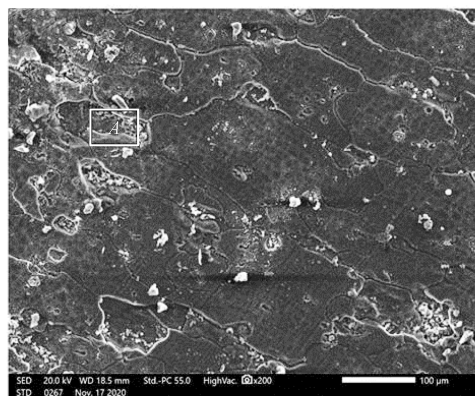
Fig. 6 Macroscopic corrosion morphology of oxide films prepared under different anodizing times after immersion in EXCO solution for different times

由图 6 可知, 浸泡前, 氧化膜覆盖区域呈银白色, 试样宏观形貌无明显区别(如图 6d、g、j)。浸泡 2 d 后,

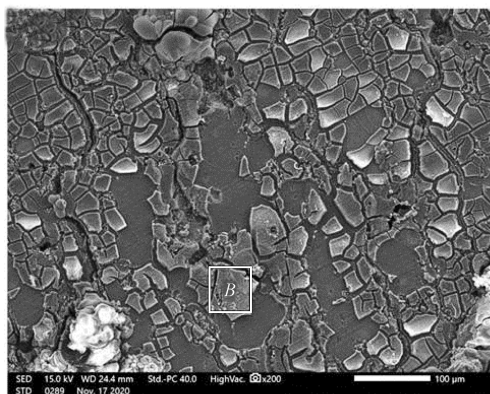
未经氧化处理试样鼓泡严重, 颜色变黑, 并覆盖少量白色腐蚀产物 (如图 6b); 氧化处理 30 min 后, 试样表面阳极氧化膜被严重腐蚀并发生脱落, 膜层覆盖区域腐溶液直接接触并腐蚀基体, 膜层颜色由银色变为黑色 (如图 6e); 氧化 45 min 的试样表面氧化膜保存较为完整, 但其他部分区域出现明显鼓泡、起皮现象, 甚至与基体发生剥离 (如图 6h); 氧化 60 min 的试样氧化膜较完整, 无明显剥离、脱落迹象 (如图 6k)。浸泡 4 d 后, 随着腐蚀时间延长, 剥落腐蚀加重, 试样表面均出现严重腐蚀现象。未经氧化处理试样鼓泡现象更严重, 部分区域出现块状剥落, 表面分层明显, 白色腐蚀产物增多 (如图 6c); 氧化 30 min 的试样阳极氧化膜脱落, 膜层区域基体露出并严重腐蚀, 合金表面覆盖大量白色腐蚀产物 (如图 6f); 氧化 45 min 的试样氧化膜完整性被严重破坏, 表面出现明显鼓泡、起皮现象, 部分区域膜层大块剥离脱落致使基体裸露被腐蚀, 膜对基体的保护作用失效 (如图 6i); 氧化 60 min 的试样氧化膜虽出现明显鼓泡、起皮现象, 但并未大块剥离脱落, 其整体性保存较好, 对基体仍有一定的保护作用 (如图 6l)。

3.4 微观形貌观察与成分分析

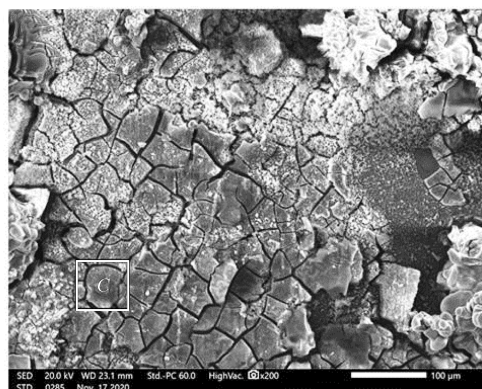
采用 JSM-IT200 型 SEM 对不同阳极氧化时间下制备的阳极氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡 4 d 之后的微观形貌进行表征, 结果如图 7 所示。



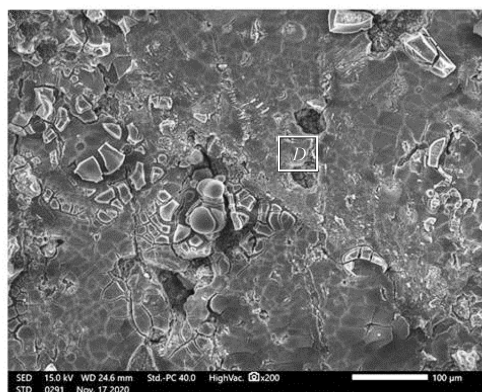
a) 0 min



b) 30 min



c) 45 min



d) 60 min

图 7 不同氧化时间下制备的阳极氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡 4 d 后的微观腐蚀形貌

Fig. 7 Micro-corrosion morphology of anodic oxide films prepared at different oxidation times after immersion in EXCO solution for 4 d

由图 7 可以看出, 阳极氧化处理时间不同, 经 EXCO 溶液浸泡后, 试样表面的微观形貌有明显的差别。未经氧化处理的铝合金试样表面有大面积的块状剥离脱落现象, 部分块状剥落区域相连, 形成较大的腐蚀“洼地”, 试样表面分层明显 (如图 7a)。氧化处理 30 min 的铝合金试样, 整个膜层表面被腐蚀成零散碎片, 碎片间间距大、不相连, 部分区域的氧化膜碎片出现“抱团”剥落现象, 氧化膜受到严重腐蚀 (如图 7b)。阳极氧化 45 min 的铝合金试样表面龟裂现象非常严重, 腐蚀沿晶界进行并产生了沿晶界扩散的微裂纹, 腐蚀沿晶裂纹交叉、相连, 将整个膜层分成数量众多的小块。同时, 腐蚀沿晶界向里层渗透的过程中, 由于裂纹扩张产生的应力作用使得表层氧化膜与里层氧化膜剥离脱落, 最终在膜层表面形成块状剥落现象 (如图 7c)。阳极氧化 60 min 的铝合金试样表面较完整, 局部腐蚀坑扩张为孔洞, 出现明显裂纹, 但裂纹的宽度和长度要小于阳极氧化时间为 45 min 的铝合金试样 (如图 7d)。

进一步对图 7a~d 方框所示区域的腐蚀产物进行

EDS 分析, 其结果如表 2 所示。

表 2 不同氧化时间下制备的阳极氧化膜在 EXCO 溶液中浸泡 4 d 后的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of anodic oxide films prepared under different oxidation times after immersion in EXCO solution for 4 d

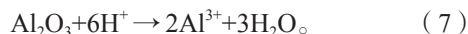
位 置	原子质量分数 /%										
	Al	O	Mg	Cu	Na	Cl	C	K	P	S	Mn
A	34.17	51.99	0.60	1.81	2.82	0.89	7.40	0.20	-	-	0.12
B	27.60	58.62	0.23	0.26	3.46	1.27	8.34	0.22	-	-	-
C	22.63	62.40	-	1.74	4.52	0.47	7.61	-	0.11	-	-
D	27.42	66.90	-	0.34	3.68	1.01	-	-	-	0.16	-

由表 2EDS 分析结果可知, 未经氧化处理的合金试样表面除了来自基体的 Al、Cu、Mn、Mg 等元素外, 还含有腐蚀产物中的 K、Na、Cl、O 等元素。阳极氧化 30 min 的铝合金试样表面检测到了 Cu 和 Mg 元素。这说明阳极氧化时间过短, 生成的氧化膜层较薄, 达不到防护效果。阳极氧化时间为 45 min 铝合金试样 Al 和 O 元素的含量低于阳极氧化 60 min 的铝合金试样, 这说明氧化 45 min 的铝合金试样, 表面的氧化膜遭到的破坏更严重。

通常情况下, 铝合金氧化膜表面会形成一层 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 而剥蚀溶液中的 Cl^- 易吸附在氧化膜表面, 并逐渐取代 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 中的 OH^- 生成含氯的腐蚀产物, 从而使氧化膜遭受破坏, 主要反应过程如下^[33]:



同时剥蚀溶液中的 H^+ 也会与氧化膜发生溶解反应, 反应式如下^[34]:



氯离子是具很强吸附能力的侵蚀性离子, 是发生点蚀的主要原因^[32], 在含氯离子的酸性溶液中, 氯离子首先吸附在阳极氧化膜的活性位置形成腐蚀源点, 随着腐蚀持续进行, 点蚀发展为晶间腐蚀, 并产生沿晶微裂纹, 腐蚀沿晶界进行时不断地向周边和里层渗透, 在渗透过程中由于裂纹扩张而产生的应力作用使得表层的阳极氧化膜与周边和里层的阳极氧化膜产生剥离脱落, 最终在膜层表面形成块状剥落。

阳极氧化时间为 45 min 和 60 min 的铝合金试样, 其表面膜层厚度大于阳极氧化时间为 30 min 的铝合金试样, 浸泡周期内, 虽然表层阳极氧化膜受侵蚀脱落, 但里层阳极氧化膜仍有一定的防护效果。

整体看, 阳极氧化时间越长, 氧化膜越厚越均匀, 阳极氧化膜在 EXCO 溶液中的抗腐蚀性能越好。

4 结论

本文采用 2A12 铝合金作为实验材料, 研究不同阳极氧化时间对其在 EXCO 溶液中剥落腐蚀性能的影响, 得出的结论如下:

1) 2A12 铝合金浸泡在 EXCO 溶液中初期会表现出轻微的失重趋势。后续腐蚀产物开始在金属表面堆积, 并沿裂纹进入试样内部, 失重速率随之降低, 最终发展为增重趋势。

2) 当阳极氧化时间不超过 60 min 时, 随着氧化时间的延长, 阳极氧化膜越厚越均匀, 抗剥落腐蚀性能越好。

3) 当阳极氧化时间超过 60 min 后, 氧化膜厚度增长趋势缓慢, 膜厚标准差趋于水平值。

综合分析表明, 当阳极氧化处理时间为 60 min 时, 合金的抗剥落腐蚀性能最好。

参考文献:

- [1] 王业东, 蹇海根, 杨孝梅, 等. 2A12 铝合金电化学腐蚀行为研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 69-75.
WANG Yedong, JIAN Haigen, YANG Xiaomei, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(1): 69-75.
- [2] 曹歆昕, 李吉丹, 张 晶, 等. 2A12 铝合金硬质阳极氧化工艺研究 [J]. 电镀与精饰, 2017, 39(9): 38-41.
CAO Xinxin, LI Jidan, ZHANG Jing, et al. Technical Study on Hard Anodic Oxidation of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Plating & Finishing, 2017, 39(9): 38-41.
- [3] SHAFFER I S, SEBASTIAN J C, ROSENFELD M S, et al. Corrosion and Fatigue Studies of Extruded 7075-T6 Spar Caps[J]. Journal of Materials, 1968, 3(2): 400.
- [4] 韩如意, 满瑞平, 李鹏伟, 等. 剥落腐蚀在铝合金交通产品上的表征和防护措施 [J]. 世界有色金属, 2017(20): 263-264.
HAN Ruyi, MAN Ruiping, LI Pengwei, et al. Characterization and Protective Measures of Exfoliation Corrosion on Aluminum Alloy Traffic Products[J]. World Nonferrous Metals, 2017(20): 263-264.
- [5] ROBINSON M J. Mathematical Modelling of Exfoliation Corrosion in High Strength Aluminium Alloys[J]. Corrosion Science, 1982, 22(8): 775-790.
- [6] KELLY D J, ROBINSON M J. Influence of Heat Treatment and Grain Shape on Exfoliation Corrosion of Al-Li Alloy 8090[J]. Corrosion, 1993, 49(10): 787-795.
- [7] 牟 春, 温庆红, 冯 旺, 等. 铝合金剥落腐蚀文献

- 概述[J]. 铝加工, 2020(5): 9-13.
MU Chun, WEN Qinghong, FENG Wang, et al. Overview of the Literature on Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys[J]. Aluminium Fabrication, 2020(5): 9-13.
- [8] 李芳芳. 高强铝合金剥落腐蚀的研究综述[J]. 湖南冶金职业技术学院学报, 2009, 9(2): 9-12.
LI Fangfang. Study on Exfoliation Corrosion of High-Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Hunan Metallurgical Professional Technology College, 2009, 9(2): 9-12.
- [9] 周和荣, 李晓刚, 董超芳, 等. 2A12 铝合金在模拟溶液中的周浸腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 1-6, 43.
ZHOU Herong, LI Xiaogang, DONG Chaofang, et al. Corrosion Behaviors of Aluminum Alloy 2A12 Under Cyclic Wet-Dry Immersion Test in Simulation Solutions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(5): 1-6, 43.
- [10] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.
CHEN Qunzhi, CHENG Zonghui, XI Huizhi, et al. Corrosion Behavior on Joint Section of Aircraft Aluminium Alloy Structure[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 334-337.
- [11] 钱建刚, 李 荻, 郭宝兰, 等. LC4 高强铝合金的腐蚀性能研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(8): 340-343.
QIAN Jiangang, LI Di, GUO Baolan, et al. Corrosion Behavior of High-Strength Aluminum Alloy LC4[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(8): 340-343.
- [12] 刘湘伟, 李劲风, 张瑞丰, 等. 工艺参数对 2195 铝锂合金阳极氧化膜层腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(3): 107-111, 116.
LIU Xiangwei, LI Jinfeng, ZHANG Ruifeng, et al. Effect of Process Parameters on Corrosion Behavior of Anodized Film on 2195 Al-Li Alloy[J]. Materials Protection, 2020, 53(3): 107-111, 116.
- [13] 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.
- [14] 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.
YANG Jianjun, WANG Bowen, CHEN Tian'ou, et al. Study on Anodizing and Properties of 2A96 Aluminum Alloy Surface[J]. Packaging Journal, 2019, 11(5): 16-23.
- [15] 蹇海根, 谢幸儿, 尹志民, 等. 5B01 铝合金方管型材的热挤压温度试验[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(4): 9-12.
JIAN Haigen, XIE Xing'er, YIN Zhimin, et al. Extrusion Temperature Test for 5B01 Aluminum Alloy Square Tube[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(4): 9-12.
- [16] 吴若梅, 巢光华, 孙兆飞, 等. 润湿性对铝合金涂层耐蚀及防污性能的影响[J]. 包装学报, 2016, 8(4): 8-12.
WU Ruomei, CHAO Guanghua, SUN Zhaofei, et al. Effect of Wettability on Corrosion Resistance and Vulnerability of Aluminum Alloy Coating[J]. Packaging Journal, 2016, 8(4): 8-12.
- [17] 曹 敏, 刘 莉, 余钟芬, 等. 2A02 铝合金在模拟海洋大气环境中的剥蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(5): 502-510.
CAO Min, LIU Li, YU Zhongfen, et al. Exfoliation Corrosion Behavior of 2A02 Al-Alloy in a Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(5): 502-510.
- [18] 周和荣, 胡碧华, 姚 望, 等. 铝合金阳极氧化层在江津污染大气环境中暴露腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(3): 273-278.
ZHOU Herong, HU Bihua, YAO Wang, et al. Atmospheric Corrosion of Anodized Pure Al1060, Al-Alloys 2A12 and 7A04 Exposed to Polluted Atmospheric Environment at Jiangjin Region[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(3): 273-278.
- [19] 查 康, 顾 琳. 不同硫酸浓度对 2A12 脉冲硬质阳极氧化工艺的影响[J]. 铸造技术, 2008, 29(7): 952-954.
ZHA Kang, GU Lin. Effect of Sulfuric Acid Concentration on Pulsed Hard Anodizing Technology of Aluminum Alloy 2A12[J]. Foundry Technology, 2008, 29(7): 952-954.
- [20] 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 Weiyan, SHI Yulong. Optimization of Electrolyte Formula of Pulse Hard Anodic Oxidation for 2A12 Aluminum Alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29(9): 30-32.
- [21] SAEEDIKHANI M, JAVIDI M, VAFAKHAH S. Anodising of 2024-T3 Aluminium Alloy in Electrolyte of Sulphuric-Boric-Phosphoric Mixed Acid Containing Cerium Salt as Corrosion Inhibitor[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 711-721.

- [22] 钱建才, 邹洪庆, 许 斌, 等. 电解液对 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜层性能的影响 [J]. 表面技术, 2015, 44(11): 40–45.
QIAN Jiancai, ZOU Hongqing, XU Bin, et al. Influence of Electrolyte on the Properties of Hard Anodic Oxide Coating on 2A12 Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 40–45.
- [23] 范才河, 沈 彤, 胡泽艺. 铝合金弹壳成形及失效分析 [J]. 包装学报, 2019, 11(1): 87–93.
FAN Caihe, SHEN Tong, HU Zeyi. Forming and Failure Analysis of Aluminum Alloy Cartridge Case[J]. Packaging Journal, 2019, 11(1): 87–93.
- [24] 许玉玲. 阳极氧化工艺对 7075 铝合金氧化膜性能影响的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XU Yuling. The Study on the Influence of Anodic Oxidation Process on the Properties of 7075 Aluminum Alloy Oxidation Film[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [25] 张 胜, 张 腾, 何宇廷, 等. EXCO 溶液与沿海大气环境中铝合金的剥蚀损伤等效关系模型 [J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(4): 294–299, 304.
ZHANG Sheng, ZHANG Teng, HE Yuting, et al. Equivalent Relationship Model of Exfoliation Corrosion Damage for Aluminum Alloy in EXCO Solution and Coastal Atmospheric Environment[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(4): 294–299, 304.
- [26] 徐丽新, 胡 津, 耿 林, 等. 铝的点蚀行为 [J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(2): 21–24.
XU Lixin, HU Jin, GENG Lin, et al. Pitting Behavior of Aluminum[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002, 32(2): 21–24.
- [27] 万 晔, 金雨楠, 申轩宇. 浅述铝合金点蚀的研究进展 [J]. 材料保护, 2020, 53(8): 133–144.
WAN Ye, JIN Yunan, SHEN Xuanyu. Research Progress on Pitting Corrosion of Aluminum Alloy[J]. Materials Protection, 2020, 53(8): 133–144.
- [28] FORD F P, BURSTEIN G T, HOAR T P. Bare Surface Reaction Rates and Their Relation to Environment Controlled Cracking of Aluminum Alloys[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1980, 127(6): 1325.
- [29] DESPIĆ A R, DRAŽIĆ D M, PURENOVIĆ M M, et al. Electrochemical Properties of Aluminium Alloys Containing Indium, Gallium and Thallium[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1976, 6(6): 527–542.
- [30] 曹发和, 张 昭, 苏景新, 等. 局部腐蚀形态转换的电化学研究 [C]//2004 年全国腐蚀电化学及测试方法学术交流会议论文集. 武汉: 中国腐蚀与防护学会腐蚀电化学及测试方法专业委员会, 2004: 69–71.
CAO Fahe, ZHANG Zhao, SU Jingxin, et al. Electrochemical Study on Transformation of Local Corrosion Morphology[C]//National Symposium on Corrosion Electrochemical and Testing Methods in 2004. Wuhan: Professional Committee of Corrosion Electrochemistry and Test Methods of China Society of Corrosion and Protection, 2004: 69–71.
- [31] VIJH A K. The Pitting Potentials of Metals: The Case of Titanium[J]. Corrosion Science, 1973, 13(10): 805–806.
- [32] 李 涛, 冯海涛, 李晓刚, 等. 2A12 铝合金在含 Cl^- 环境中的腐蚀行为和规律研究 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(3): 43–48.
LI Tao, FENG Haitao, LI Xiaogang, et al. Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy in Cl^- Containing Solution[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(3): 43–48.
- [33] 周和荣, 李晓刚, 董超芳. 铝合金及其氧化膜大气腐蚀行为与机理研究进展 [J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 1–9.
ZHOU Herong, LI Xiaogang, DONG Chaofang. Review of Atmospheric Corrosion Behavior and Mechanism of Aluminum Alloys and It's Anodic Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 1–9.
- [34] 王 曼. 2A12 铝合金硬质阳极氧化工艺及复合自润滑膜的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
WANG Man. 2A12 Aluminum Alloy Hard Anodic Oxidation Process and Composite Research of Self Lubricating Film[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.

(责任编辑: 姜利民)