

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.05.006

前处理工艺对铝合金铬酸阳极氧化的影响

程纪华*, 刘明举, 胡振全

(航空工业南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对碱蚀、出光前处理对铝合金基体造成晶间过腐蚀或脱氧效果差,进而导致的铬酸阳极氧化膜层质量差、耐蚀性试验不合格等质量问题进行了分析,采用三酸脱氧前处理工艺,研究了碱蚀、出光、三酸脱氧三种前处理对铝合金基体脱氧效果的影响。结果表明,三酸脱氧中不含碱性成分,不会对铝合金中Fe、Mn等元素的杂质相进行腐蚀,而是通过HF来腐蚀基体表面的氧化物、油脂等,同时 CrO_3 可以有效地抑制HF对基体的腐蚀速率,而加入 HNO_3 的主要作用是处理HF腐蚀过程中所产生的挂灰现象。相比碱蚀和出光,三酸脱氧前处理脱氧效果好,阳极氧化膜层具有膜厚适中、致密度好、耐蚀性强的优点,更有效地保证了铬酸阳极氧化适用于精密零件的生产。

关键词: 碱蚀; 出光; 三酸脱氧; 铬酸阳极氧化; 膜厚; 致密度; 耐蚀性

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Influence of Pretreatment Process on Chromic Acid Anodizing for Aluminum Alloy

CHENG Jihua*, LIU Mingju, HU Zhenquan

(Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, AVIC, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this paper, in view of some quality problems of chromic acid anodizing coating, such as the thin thickness, the poor density and the unqualified corrosion resistance. The effects of three kinds of pretreatment on the deoxidization effect of aluminum alloy matrix were studied by using alkali corrosion, brightening and tri-acid deoxidizing pretreatment process. The results show that there is no basic component in the deoxidization of tri acid, which will not corrode the impurity phase of Fe, Mn and other elements in aluminum alloy, HF is used to corrode oxide and grease on the surface of matrix, meanwhile, CrO_3 can effectively inhibit the corrosion rate of HF to the matrix. The main function of adding HNO_3 is to deal with the ash hanging in HF corrosion process. Compared with alkali corrosion and brightening, the deoxidization effect of tri-acid deoxidizing pretreatment is the best, and the anodizing coating has the advantages of moderate coating thickness, good density and strong corrosion resistance, which ensures the chromic acid anodizing is suitable for the production of precision parts more effectively.

Keywords: alkali corrosion; brightening; tri-acid deoxidizing; chromic acid anodizing; coating thickness; density; corrosion resistance

铝合金以其轻质、延展性好等特点,被广泛应用于航空工业中产品制造^[1-4]。其化学性质比较活泼,

在大气中易发生氧化反应生成一层厚度约 $0.005\ \mu\text{m}$ 左右的氧化膜,该膜具有一定的耐蚀性能,但由于膜

收稿日期: 2020-07-07

修回日期: 2020-09-04

通信作者: 程纪华, Email: nuaacjh@163.com

层薄而多孔,硬度低等问题,无法满足航空工业的防护性能要求^[5-7]。为提高铝合金耐蚀性、耐磨性等防护性能,最广泛的表面处理工艺为阳极氧化^[8-12]。铬酸阳极氧化由于其膜层较薄,对产品尺寸改变较小,耐蚀性好,对基体材料的疲劳性能影响较小,不会改变基体材料的原有精度等优点,而被广泛应用于航空精密零件^[13-14]。根据 HB5373 和 HB5362 要求,非包铝铬酸阳极氧化膜层沸水封闭的耐蚀性为 240 h,重铬酸钾封闭的耐蚀性为 336 h。但近年来,随着民机项目国际化的发展,对铬酸阳极氧化膜层的耐蚀性指标越来越高,MIL-A-8625^[15]要求沸水封闭需满足 336 h 的耐蚀性试验,空客客户标准要求重铬酸钾封闭需满足 500 h 的耐蚀性试验,但是根据现有工艺无法满足这么高的要求。通过与国际不同技术标准比对分析,铬酸阳极氧化主工序及封闭工序的工艺参数没有区别,铬酸阳极氧化前处理工艺将成为问题的突破口。

铬酸阳极氧化前处理主要有两个目的^[16-17]:一是去除产品表面的油脂,二是去除产品表面的氧化物。目前工业上常用的前处理工艺主要有碱蚀+出光工艺(俗称碱蚀)和单独出光工艺,但经碱蚀+出光工艺处理的铝合金基体存在晶间过腐蚀现象,阳

极氧化膜层致密度低、孔隙率多,导致无法通过沸水封闭 336 h 和重铬酸钾封闭 500 h 的耐蚀性指标;经出光工艺处理的铝合金基体仍存在油污、氧化物的现象,阳极氧化膜层薄且膜重 $\leq 200\text{ mg/ft}^2$,无法通过沸水封闭 240 h 和重铬酸钾封闭 336 h 的耐蚀性指标。本文采用三酸脱氧工艺作为阳极氧化前处理工艺,因不含碱性成分,不会对铝合金中 Fe、Mn 等元素的杂质相进行腐蚀,HF、CrO₃可以腐蚀基体表面氧化物、油脂等杂质,同时 HNO₃可以有效除去因腐蚀杂质而产生的挂灰,从而使产品在铬酸阳极氧化前露出洁净、活化的基体表面,以保证阳极氧化的成膜速率和质量,提高膜层的性能指标。这项前处理工艺可应用于航空航天、汽车、手机等铝合金零件要求高的铬酸阳极氧化工艺中。

1 实验

1.1 实验材料

本课题采用的试样为航空产品常用材料 2024-T3,符合技术标准 QQ-A-250/4,其化学成分如表 1 所示。主要化学药品包括:汽油、超声波脱脂剂 P3-almeco18、CrO₃、HNO₃、HF、K₂Cr₂O₇·7H₂O、NaOH、Na₂CO₃·10H₂O 等,具体药品信息如表 2 所示。

表 1 2024-T3 铝合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of aluminum alloy 2024-T3

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	其他	Al
含量/wt.%	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.15	0.1	0.15	其余

表 2 化学药品信息表

Tab.2 Chemical information sheet

药品名称	品级	厂家信息
P3-almeco18	工业级	Henkel(德国汉高)
CrO ₃	工业级	济南裕兴化工有限责任公司
HNO ₃	化学纯	南京化学试剂股份有限公司
HF	分析纯	上海久亿化学试剂有限公司
K ₂ Cr ₂ O ₇ ·7H ₂ O	工业级	重庆民丰化工有限责任公司
NaOH	工业级	天业(集团)有限公司
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	工业级	连云港碱厂

1.2 实验设备

实验设备主要包括铬酸阳极氧化整流器(TM-POWER K.D.F120V/800A)、金相显微镜(ZEISS Scope.A1)、盐雾试验箱(ATLAS SF850)、涡流测厚仪(FORSTER S2.320)、电子分析天平(Sartorius

BSA124S-CW)等。

1.3 实验过程

采用 2024-T3 铝合金试样进行铬酸阳极氧化工艺流程如下:超声波除油→热水洗→冷水洗→前处理脱氧→去离子水洗→铬酸阳极氧化→回收水洗→去离子水洗→封闭→去离子水洗→干燥。

前处理脱氧工步分别采用碱蚀、出光和三酸脱氧工艺进行处理。其对应的成分及工艺参数如表 3 所示。在同一个镀槽内同时进行 50 min 铬酸阳极氧化处理。需要测试膜层厚度和膜层重量的试样无需进行封闭处理;测试膜层耐蚀性试验的试样需分别采用沸水封闭和重铬酸钾封闭进行处理。

铬酸阳极氧化膜层厚度检测方法参照 ASTM B 244^[18],采用涡流测厚仪测定膜层厚度;膜层重量试验方法参照 ASTM B 137^[19],耐蚀性试验方法参

表3 三种前处理工艺成分及工艺参数

Tab.3 Composition and parameters of three pretreatment processes

前处理工艺	碱蚀		出光		三酸脱氧	
成分及浓度	成分	浓度/(g·L ⁻¹)	成分	浓度/(g·L ⁻¹)	成分	浓度/(g·L ⁻¹)
	NaOH	20 ~ 35	HNO ₃	300 ~ 500	HNO ₃	80 ~ 120
					HF	6 ~ 9
					CrO ₃	40 ~ 60
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	20 ~ 30					
温度/℃	45±5		室温 RT		室温 RT	
时间/min	0.5 ~ 3.0		0.5 ~ 5.0		1.0 ~ 3.0	

照 ASTM B 117^[20]。试验结果判定标准参照 MIL-A-8625。

2 结果分析与讨论

2.1 不同前处理工艺对铝合金基体脱氧的效果

分别对 2024-T3 铝合金试样进行碱蚀、出光和三酸脱氧前处理,试样处理前和处理后的表面宏观

形貌如图 1 所示。

从图中可以对比看出未经前处理的试样表面不洁净,存在明显的油脂和氧化物等污物;碱蚀后的试样表面明显出现过腐蚀现象,表面光洁度最差;出光后的试样表面最光滑但仍存在未除尽的油脂和氧化物等污物;三酸脱氧后试样表面无油脂和氧化物且比较光滑。

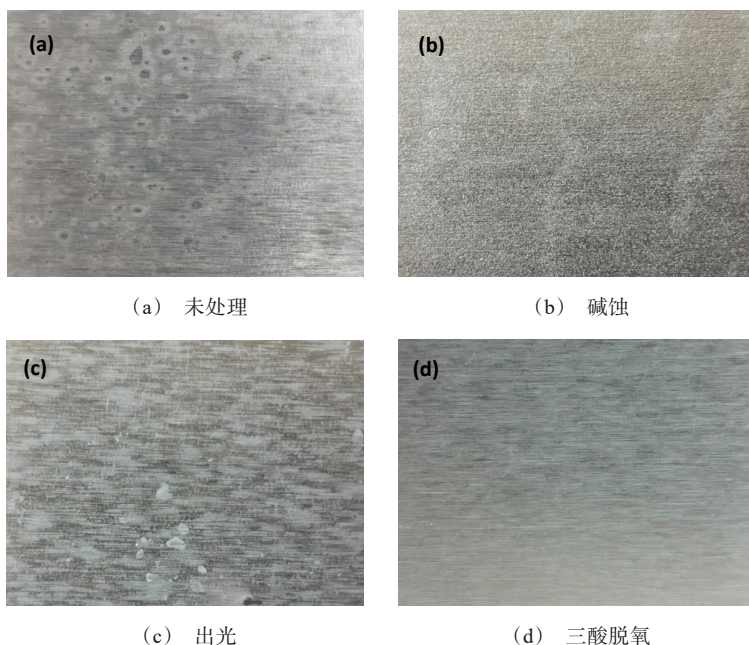


图1 2024-T3 试样不同前处理后宏观形貌

Fig.1 Macro morphologies of 2024-T3 samples after different pretreatment

为了更好地分析三种不同前处理工艺对 2024-T3 铝合金试样表面的脱氧效果,采用金相显微镜分别对试样进行 400 倍微观形貌观察,如图 2 所示。可以发现未经前处理的试样表面存在大面积范鱼鳞状的暗灰色区域、黄色暗斑、银白色长条,这是试样本身原有的油脂和氧化物等污物;经过碱蚀处理的表面存在明显“山丘状”形态的晶间过腐蚀特征^[21-24],

这是由于铝合金晶间处耐蚀性比较差^[25],在进行碱蚀处理时,晶间处优先被腐蚀,进而出现了“山丘状”形态的晶间过腐蚀现象,由此可以得出碱性溶液对晶间位置极为敏感^[26],是造成试样表面过腐蚀的主要原因;经过出光处理的表面仍存在部分暗黄色的区域和“白色条带”,说明出光处理效果一般,无法有效去除表面上的油脂、氧化物等污物;经过三酸脱氧

处理的表面光洁一致,无油脂、氧化物等污物,并且没有出现晶间过腐蚀现象。通过对比三种前处理工艺的脱氧效果发现,碱蚀工艺的特点是极容易去除产品上的油脂、氧化物和其他脏污,但由于其碱性腐蚀能力强,经常造成基体过腐蚀现象,故不能处理铸造件、三级精度以上或 $Ra \leq 1.6$ 的机加精密零件,同时经过碱蚀处理的产品表面会出现挂灰现象,必须要再进行出光清洗,增加了工艺流程;出光工艺的特点是相对碱蚀,其腐蚀性温和,能处理污染较轻、氧化物轻的产品,但对铸造件、焊接件、复杂零件和氧化物重的零件处理效果较差;三酸脱氧工艺中主要

包含 CrO_3 、 HNO_3 和 HF 三种酸性溶液,相比碱蚀和出光工艺,三酸脱氧工艺处理的产品表面更洁净,且不会出现过腐蚀现象,其主要原因是铝合金基体中存在着富含 Fe 、 Mn 等元素的杂质相,这些杂质相对碱性溶液的敏感性较高,经过碱蚀处理后基体表面的这些杂质相会优先溶解,因此形成了宏观可见的“山丘状”形态。而三酸脱氧中不含碱性成分,不会对 Fe 、 Mn 等元素的杂质相进行腐蚀,而是通过 HF 来腐蚀基体表面的氧化物、油脂等,同时 CrO_3 可以有效地抑制 HF 对基体的腐蚀速率,而加入 HNO_3 的主要作用是去除 HF 腐蚀过程中所产生的挂灰。

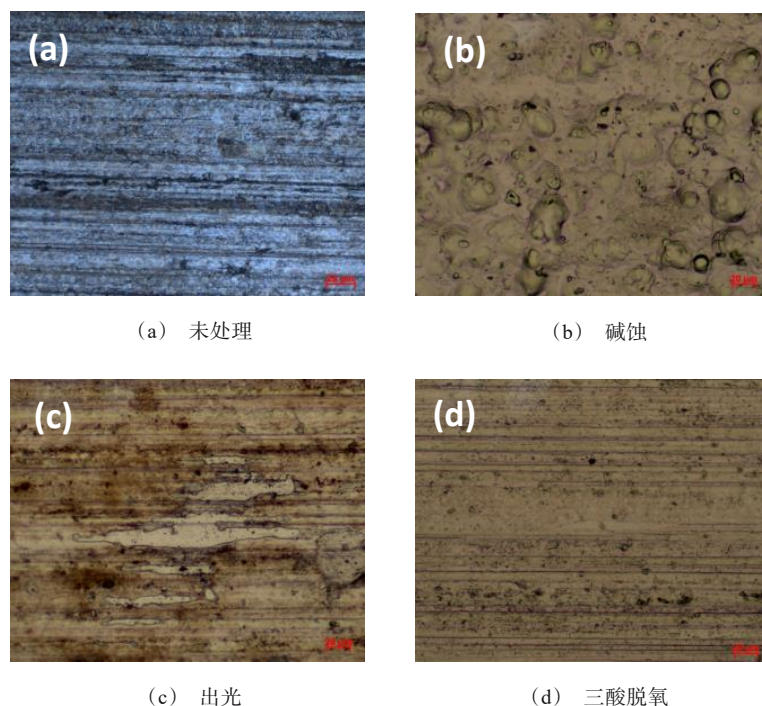


图2 2024-T3试样不同前处理后微观形貌

Fig.2 Micro morphologies of 2024-T3 samples after different pretreatment

2.2 不同前处理工艺对阳极氧化膜层的效果

2024-T3铝合金试样分别经过碱蚀、出光和三酸脱氧前处理后统一进行铬酸阳极氧化。对三种不同前处理脱氧的试样进行膜层厚度检测和膜层重量检测(每一种前处理选取试样30片),检测结果如表4所示。

通过表4数据可以看出,经过出光前处理的阳极氧化膜层厚度和重量都是最小的,并且膜重不满足MIL-A-8625中 $\geq 200 \text{ mg/ft}^2$ 的指标要求。这一现象的原因是由于出光工艺对试样的脱氧效果一般,

表4 三种前处理阳极氧化膜层厚度和重量数据

Tab.4 Data of thickness and weight of anodized film after three kinds of pretreatment

前处理工艺	碱蚀	出光	三酸脱氧
平均膜层厚度/ μm	2.67	1.03	2.43
平均膜层重量/ $(\text{mg} \cdot \text{ft}^2)$	503.13	197.60	538.67

部分严重的油脂、氧化物无法去除干净,导致试样基体在进行阳极氧化时活性不足,成膜速率慢。经过碱蚀前处理的阳极氧化膜层厚度最大,但是膜重并不是最大的,说明其膜层的致密度较差,这一现象的

原因是由于碱蚀脱氧效果好,使基体表面活性充足,并且造成的晶间过腐蚀会使基体表面粗糙、阳极氧化反应接触面积增大,导致成膜速率过快、致密度差的问题出现。而三酸脱氧融合了出光和碱蚀的优点,既满足了脱氧活化的效果,又达到了表面光洁的

目的,从而保证了膜层的厚度和致密度。

经过三类前处理的铬酸阳极氧化试样分别进行沸水封闭和重铬酸钾封闭,然后按照 ASTM B117 进行 5% 中性盐雾试验,角度为 6° ,连续喷雾时间设为 240、336 和 500 h,其试验结果见图 3 和图 4。

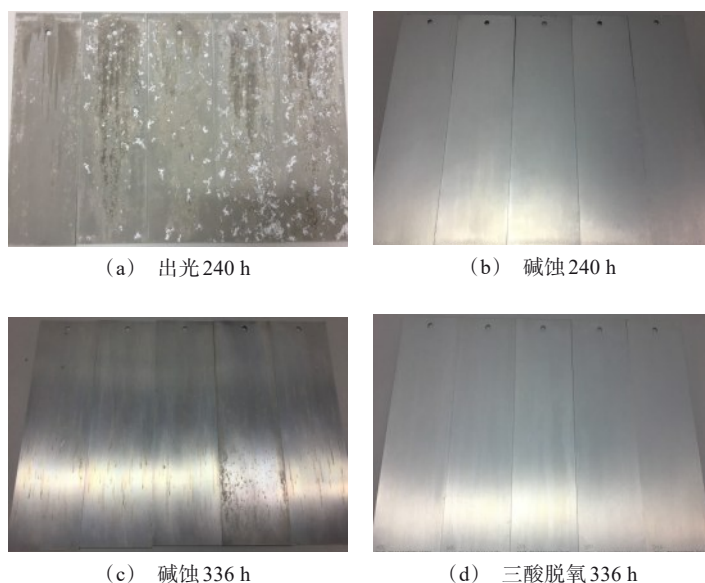


图3 不同前处理铬酸阳极氧化沸水封闭试样的盐雾试验表面

Fig.3 Salt spray test surface of samples sealed by boiling water anodized by chromic acid with different pretreatment

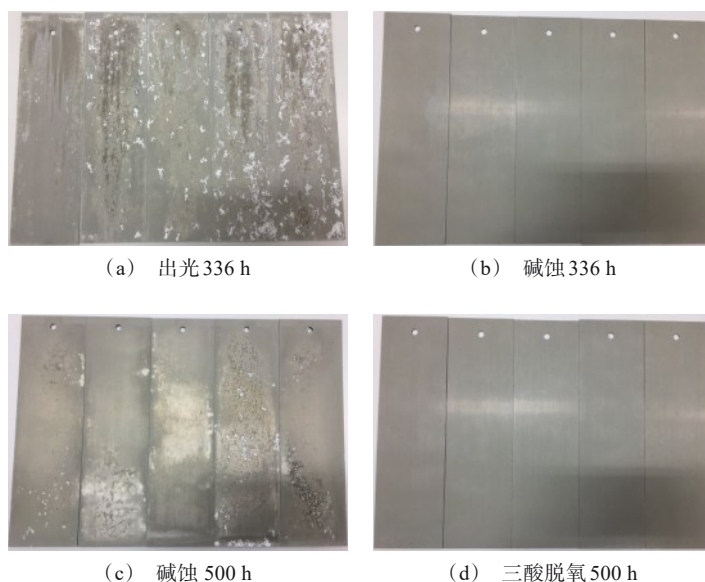


图4 不同前处理铬酸阳极氧化重铬酸钾封闭试样的盐雾试验表面

Fig.4 Salt spray test surface of samples sealed by potassium dichromate anodized by chromic acid with different pretreatment

通过图3和图4可以看出,经过出光前处理的阳极氧化试样,无论是沸水封闭还是重铬酸钾封闭,都无法满足最低的耐蚀性要求(沸水封闭 ≥ 240 h,重铬酸钾封闭 ≥ 336 h),其原因是出光前处理后的阳极氧化膜层太薄,无法抵挡长时间的盐雾腐蚀。经过碱蚀前处理的阳极氧化试样,沸水封闭和重铬酸钾封闭后虽然满足最低的耐蚀性要求,但是当耐蚀性指标提高(沸水封闭 ≥ 336 h,重铬酸钾封闭 ≥ 500 h)时则无法满足,其原因是碱蚀前处理后的阳极氧化膜层虽然比较厚,但是其致密度差导致膜层存在很多微观孔隙,当盐雾试验时间增长,孔隙会因腐蚀逐一串联在一起,并最终触及到试样基体,从而逐步出现腐蚀。经过三酸脱氧前处理的阳极氧化试样,以其优良的膜层致密度和厚度,可以抵挡长时间的盐雾腐蚀,从而满足国际民机标准和客户标准的最高耐蚀性要求。

3 结论

本文研究分析了铬酸阳极氧化三类不同前处理工艺的优缺点,得到以下结论:

(1)相比碱蚀和出光工艺,三酸脱氧具备优良的脱氧活化效果,并且不会造成原材料基体晶间过腐蚀而导致的光洁度、精度下降等问题。

(2)相比碱蚀和出光工艺,经过三酸脱氧前处理的阳极氧化膜层具有厚度适中、致密度好等特点。

(3)出光前处理的阳极氧化试样无法满足沸水封闭耐蚀性240 h,重铬酸钾封闭336 h的要求;碱蚀前处理的阳极氧化试样无法满足沸水封闭耐蚀性336 h,重铬酸钾封闭500 h的要求;三酸脱氧前处理的阳极氧化试样既可满足沸水封闭耐蚀性336 h,又可满足重铬酸钾封闭500 h的要求。

(4)三酸脱氧的优良前处理性能,更有效地保证了铬酸阳极氧化适用于精密零件的生产。

虽然本文研究获得了三酸脱氧是最佳前处理工艺的结论,但未阐述三酸脱氧的溶液分析方法(航标中只提及HF的分析方法),这是限制三酸脱氧应用于实际生产中的一大障碍,也是后期研究重点关注的内容,希望电镀同仁共同研究,合作探讨。

参考文献

[1] 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, 49(1): 198-202.

- Dai Y F, Shen S T, Lu J Q, et al. 2024 Aluminum alloy anodic oxidation in mixed acid[J]. Surface Technology, 2018, 49(1):198-202 (in Chinese).
- [2] 吴英豪,赵文杰,王武荣,等. 铝合金表面微/纳米结构构筑研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 133-145.
Wu Y H, Zhao W J, Wang W R, et al. Research progress in fabricating micro/nano structures on aluminum alloys surface[J]. Surface Technology, 2017, 46(5): 133-145 (in Chinese).
- [3] 刘静安,谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [4] Patermarakis G. Aluminium anodising in low acidity sulphate baths: growth mechanism and nanostructure of porous anodic films[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2006(10): 211-222.
- [5] 吕建琴,陈代伟. 铝及铝合金铬酸阳极化工艺研究[J]. 涂料涂装与电镀, 2006(6): 31-33.
Lv J Q, Chen D W. Chromate anodizing process study for aluminum and its alloy[J]. Coatings Painting & Electroplating, 2006(6): 31-33(in Chinese).
- [6] 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 H R, Li X G, Dong C F. Review of atmospheric corrosion behavior and mechanism of aluminum alloys and its anodic film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 1-9 (in Chinese).
- [7] 郑瑞庭. 铝及其合金铬酸阳极氧化[J]. 电镀与精饰, 2003, 25(1): 13-15.
Zheng R T. Anodizing of aluminum and its alloy in chromic acid solution [J]. Plating and Finishing, 2003, 25(1): 13-15 (in Chinese).
- [8] 郑丽,魏晓伟,罗松. 铝基体对阳极氧化膜的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 39-41.
Zheng L, Wei X W, Luo S. Effect of the aluminum matrix on anodic oxidation film[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 39-41 (in Chinese).
- [9] Liu J H, Li M, Li S M, et al. Effect of the microstructure of A1 7050-T7451 on anodic oxide formation in sulfuric acid[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 432-438.
- [10] 张发余,高虹,张爱黎. 铝合金常温硬质阳极氧化研究[J]. 电镀与精饰, 2006, 28(6): 14-17.
Zhang F Y, Gao H, Zhang A L. Study on aluminum alloy room temperature hard anodization[J]. Plating & Finishing, 2006, 28(6): 14-17 (in Chinese).

- [11] 李峰, 张建周, 马慧媛, 等. 稀土盐对铝合金硼硫酸阳极氧化膜层性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 95-99.
Li F, Zhang J Z, Ma H Y, et al. Study on impact of rare earth salts on the properties of aluminum alloy anodic oxidation film prepared in boron sulfuric acid solution[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 95-99 (in Chinese).
- [12] 时春燕, 王春霞, 吴光辉, 等. 轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜性能对比研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 178-184.
Shi C Y, Wang C X, Wu G H, et al. Comparative study on properties of 2A12 aluminum alloy hard anodized film by roll forming and extrusion[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 178-184 (in Chinese).
- [13] 杨景伟, 赵永岗, 孙杰, 等. 铝合金铬酸阳极氧化后表面缺陷分析[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 72-75.
Yang J W, Zhao Y G, Sun J, et al. Defect analysis of the aluminum alloy substrate after chromic acid anodizing[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 72-75 (in Chinese).
- [14] 王利华, 罗庆, 杨燕, 等. 高耐蚀性铬酸阳极氧化工艺研究[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(2): 131-133.
Wang L H, Luo Q, Yang Y, et al. High anti-corrosion chromic acid anodizing process[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(2): 131-133 (in Chinese).
- [15] MIL-A-8625F, Anodic coatings for aluminum and aluminum alloys[S]. Virginia: HIS, 1993.
- [16] 杨培霞, 安茂忠. 预处理工艺对制备多孔阳极氧化铝膜的影响[J]. 材料过程, 2005(9): 26-29.
Yang P X, An M Z. Influence of pretreatment on preparation of porous anodic alumina film[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(9): 26-29 (in Chinese).
- [17] 易俊兰, 吴松林, 刘明辉, 等. 前处理对化学转化处理铝锂合金耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 42-45.
Yi J L, Wu S L, Liu M H, et al. Influence of pretreatment on corrosion resistance of chromate conversion coated aluminum-lithium alloy[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 42-45 (in Chinese).
- [18] ASTM B 244, Standard test method for measurement of thickness of anodic coatings on aluminum and of other nonconductive coatings on nonmagnetic basis metals with eddy-current instruments[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2014.
- [19] ASTM B 137, Standard test method for measurement of coating mass per unit area on anodically coated aluminum[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2004.
- [20] ASTM B 117, Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2019.
- [21] 李博, 胡伟叶. LD10 连接座表面铬酸阳极氧化白斑原因分析[J]. 电镀与环保, 2011, 31(6): 43-46.
Li B, Hu W Y. Cause analysis of white spots formed on the surface of LD10 connection block in chromic acid anodization[J]. Electroplating and Pollution Control, 2011, 31(6): 43-46 (in Chinese).
- [22] 苏景新, 张昭. 铝合金晶间腐蚀与剥蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(3): 187-191.
Su J X, Zhang Z. Review on the intergranular corrosion and exfoliation corrosion of aluminum alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protect, 2005, 25(3): 187-191 (in Chinese).
- [23] 许孝敬, 吴桂潮. 含 Sr7085 型铝合金的晶间腐蚀和剥落腐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5): 22-25.
Xu X J, Wu G C. Sr addition on intergranular and exfoliation corrosion properties of 7085 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(5): 22-25 (in Chinese).
- [24] 余洪斌, 刘道新. 3 种表面处理对 2E12-T3 铝合金晶间腐蚀和剥离腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(7): 22-24.
Yu H B, Liu D X. Effect on surface treatment on intergranular corrosion behavior and exfoliation corrosion behavior of 2E12-T3 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Protection, 2012, 45(7): 22-24 (in Chinese).
- [25] 苏景新. 铝锂合金剥蚀研究和分形维数在表征腐蚀中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [26] 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质量性能影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(5): 48-54.
Han B H, Zhang Q, Sun Z H, et al. Effect of pretreatment process on properties of aerospace Al-Li alloy sulfuric acid anodic film[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(5): 48-54 (in Chinese).