

表面处理对 2A12 铝合金耐酸性盐雾性能影响

陈梦婕

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: **目的** 获得有效的耐舰载机酸性盐雾典型环境腐蚀性能的 2A12 铝合金表面处理方法。**方法** 分别利用铬酸阳极氧化、硫酸阳极氧化、苹果酸阳极氧化等方法对 2A12 铝合金表面进行处理, 并采用 3 种不同类型的漆进行涂漆防护, 然后按照 GJB 150.11A—2009 进行酸性盐雾试验考核。**结果** 铬酸阳极氧化和其中 2 种防护漆体系不耐酸性盐雾腐蚀, 硫酸阳极氧化和苹果酸阳极氧化耐酸性盐雾腐蚀性能好, 丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系耐酸性盐雾腐蚀性能良好。**结论** 硫酸阳极处理并喷涂丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层可有效提高 2A12 铝合金的耐腐蚀性。

关键词: 2A12 铝合金; 表面处理; 酸性盐雾; 阳极氧化; 涂层; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0100-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.010

Effect of Surface Treatment on Acid Salt Spray Corrosion Resistance of 2A12 Aluminum Alloy

CHEN Mengjie

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The work aims to identify effective surface treatment methods for the 2A12 aluminum alloy to enhance its corrosion resistance in typical corrosive environments such as acidic salt spray. Surface treatments including chromic acid anodizing, sulfuric acid anodizing, and malic acid anodizing were applied to the 2A12 aluminum alloy, followed by application of three different types of coatings for corrosion protection. Evaluation was conducted according to GJB150.11A-2009 standard through acid salt spray tests. Chromic acid anodizing and two of the coating systems did not withstand acid salt spray corrosion. Sulfuric acid anodizing and tartaric acid anodizing exhibited good resistance to acid salt spray corrosion, especially with acrylic polyurethane/fluoropolyurethane coating systems showing excellent performance. Sulfuric acid anodizing followed by application of acrylic polyurethane/fluoropolyurethane coatings effectively enhances the corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy.

KEY WORDS: 2A12 aluminum alloy; surface treatment; acid salt spray; anodizing; coating; corrosion resistance

2A12 铝合金是航空工业中应用极为广泛的热处理强化铝合金之一, 其塑性成形和机加工性能好, 可用于制造蒙皮、翼肋、翼梁、骨架等零件, 也可用来制造一些非主要受力构件^[1-3]。比如, 某舰载直升机

零件为采用 2A12 铝合金作为骨架零件和橡胶共硫化制造的复合制品。

舰载机服役环境特殊, 除了在热带海域经受的海洋气氛、海水及持续干/湿交替循环的侵蚀, 经受的

收稿日期: 2024-07-18; 修订日期: 2024-09-12

Received: 2024-07-18; Revised: 2024-09-12

引文格式: 陈梦婕. 表面处理对 2A12 铝合金耐酸性盐雾性能影响[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 100-105.

CHEN Mengjie. Effect of Surface Treatment on Acid Salt Spray Corrosion Resistance of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 100-105.

更为特殊的腐蚀性环境是由于航母动力装置排放的燃烧废气以及舰载飞机起飞、降落排放的尾气与高盐雾海洋大气形成局部富集 SO_2 、 NO_2 等污染物质的酸性盐雾气氛^[4-5]。美国海军研究中心已经证实, 停放在飞行甲板上的飞机表面聚积的湿气中含有 SO_4^{2-} , 并具有较低的 pH 值(约为 2.4~4.0)^[6]。然而, 2A12 铝合金中 Cu 元素含量多, 耐腐蚀性受到较大影响, 常发生点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂及剥落腐蚀等^[7-8], 易形成腐蚀坑, 影响飞机结构的疲劳寿命和剩余强度^[9]。因此, 提高 2A12 铝合金在酸性盐雾环境中的抗腐蚀性能, 对舰载航空装备的研制具有重要意义。

对 2A12 铝合金进行表面处理, 是提高其抗腐蚀性能的有效方法之一^[10]。常见的表面处理方法有阳极氧化^[11-12]、电镀^[13-15]、化学镀^[15-17]、涂层^[18-20]及表面纳米化^[21]等。其中, 阳极氧化是一种常见的表面处理方法。阳极氧化处理后的铝合金表面硬度显著提高,

抗磨损性能提升, 形成的阳极氧化膜可以有效地防止铝合金表面因潮湿、化学腐蚀等环境影响而腐蚀, 延长其使用寿命。另外, 阳极氧化处理过程中一般使用的电解液可以循环利用, 减少废液排放, 对环境影响较小。

基于此, 本文选取不同阳极氧化和涂漆表面处理措施的 2A12 铝合金试样为研究对象, 通过酸性盐雾试验, 对比不同表面处理措施对 2A12 铝合金耐酸性盐雾腐蚀性能的影响, 为 2A12 铝合金零件抗舰载平台酸盐雾环境的防腐蚀表面处理提供技术支持。

1 试验

1.1 材料与试剂

试样材料采用 2A12 铝合金, 热处理状态 T4, 其化学成分见表 1。铝板试样尺寸为 64 mm×20 mm×5 mm。

表 1 2A12 铝合金的化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	其他		Al
								单个	合计	
0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	0.30	0.15	0.05	0.10	余量

1.2 设备与分析仪器

漆膜的附着力由划格试验测得, 采用压敏胶带测试结合力。试样表面阳极氧化膜层和漆层膜厚采用 MiniTest 740 涂层测厚仪测得。

1.3 方法

1.3.1 阳极氧化处理

1) 铬酸阳极氧化。采用 HB/Z 118 中^[22]的工艺方法, 电解液为用去离子水配置的浓度为 45 g/L 铬酐(工业级)溶液, 六价铬的质量浓度为 35~60 g/L。阳极氧化温度为(35±2) °C, 电压为(40±1) V, 铅为阴极。阳极氧化 35 min 后, 从槽液中取出, 再用流动冷水清洗和去离子水清洗, 在(96±2) °C、1 g/L 重铬酸钾溶液中进行封孔处理。

2) 硫酸阳极氧化。采用 HB/Z 233 中^[23]的工艺方法, 电解液为用去离子水配置的 150~200 g/L 硫酸溶液(H_2SO_4 , $\rho=1.84$ g/mL)。阳极氧化温度为 13~26 °C, 电压为(22±1) V, 阴极为铅。阳极氧化 30 min 后, 从槽液中取出, 分别用流动冷水清洗后, 在 90~100 °C、40~55 g/L 重铬酸钾溶液中进行封孔处理。

3) 苹果酸阳极氧化。采用文献[24]中的工艺方法, 电解液为用去离子水配置的 40~60 g/L 硫酸(H_2SO_4 , $\rho=1.84$ g/mL)、4~8 g/L 苹果酸等的混合溶液。阳极氧化温度为 25 °C, 电压为(15±1) V, 阴极不为锈钢。阳极氧化 20 min 后, 从电解槽中取出, 用流动冷水清

洗后, 在含氟硅烷的表面耐蚀性处理胶体溶液中进行封孔处理。

1.3.2 涂层防护

选用环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系、环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系和丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系 3 种不同的防护涂层体系, 对铬酸阳极氧化后 2A12 铝合金试样进行涂漆。先涂 2 道底漆, 在室温下自然干燥, 再涂 2 道面漆, 在室温下自然干燥固化 7 d 后进行测试。

1.3.3 膜层厚度试验

采用 MiniTest 740 涂层测厚仪分别测试试样表面阳极氧化膜层和漆层膜厚, 在每个试样表面取 5 个均匀分布的点, 然后取平均值。

1.3.4 漆膜附着力试验

按 GB/T 9286—1998 进行漆膜的划格试验, 采用交叉划格法, 如图 1 所示。划格间距为 2 mm, 每个方向的切割数为 6, 划线划穿漆层直至基体。在每个试样上取 3 个不同位置进行划格试验, 用压敏胶带测试结合力。

1.3.5 酸性盐雾试验

按 GJB 150.11A—2009 要求进行酸性盐雾试验, 采用单次循环 48 h (24 h 连续喷雾和 24 h 干燥), 循环次数 4 次/8 d (192 h) 的试验程序。盐雾采用(5±1)% 的 NaCl 溶液, 然后采用化学纯稀硫酸和化学纯氢氧

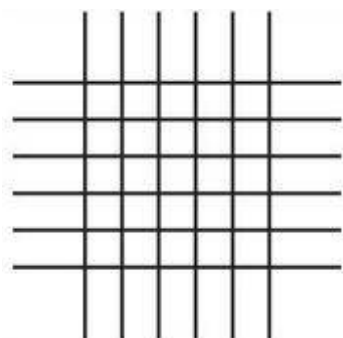


图1 交叉划格法
Fig.1 Cross-cut method

化钠调整 pH 值为 3.5 ± 0.5 。在喷雾前将试样在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下保持 2 h。在整个喷雾期间,盐雾沉降率和沉降溶液的 pH 值至少每隔 24 h 测量一次,保证盐溶液的沉降率为 $(1 \sim 3) \text{ mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ 。然后在标准大气条件温度 $(15 \sim 25^\circ\text{C})$ 和相对湿度不高于 60% 的条件下干燥 24 h,如此完成 1 次循环。4 次循环试验完成后,在标准大气条件下用流动水轻柔冲洗试件,再进行外观检查。

2 结果及分析

2.1 膜层厚度测试

阳极化膜是阻断铝合金与环境接触的关键,故对经过以上 3 种阳极氧化工艺处理后的试样膜层厚度测试,每个处理方法测试 5 组平行样品,结果如图 2 所示。经过硫酸阳极氧化处理后的铝合金试样,表面膜层最厚为 $12 \mu\text{m}$,苹果酸阳极氧化处理铝合金表面镀层厚度为 $3.0 \mu\text{m}$,铬酸阳极氧化处理 2A12 铝合金表面镀层厚度最薄为 $2.0 \mu\text{m}$ 。

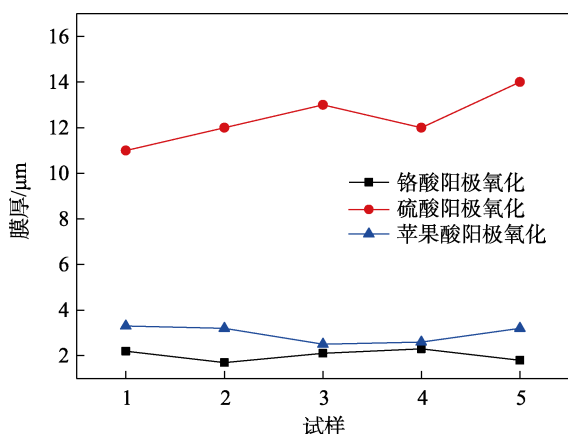


图2 2A12 铝合金不同阳极氧化膜厚对比
Fig.2 Thickness comparison of different anodized films on 2A12 aluminum alloy

对阳极氧化处理后的 2A12 铝合金试样分别喷涂环氧聚酰胺/环氧硝基、丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层,并对漆层厚度进行测量,结果如图 3 所示。可以看出,

环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系漆层厚度最厚,为 $98 \mu\text{m}$;其次为丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系,厚度为 $93 \mu\text{m}$;最后为环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系,厚度为 $90 \mu\text{m}$ 。

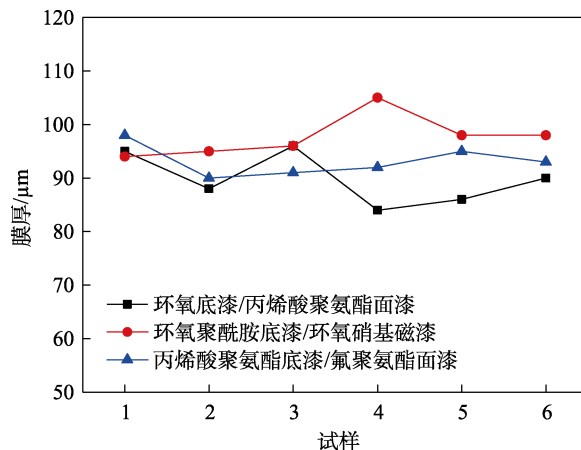


图3 2A12 铝合金阳极氧化后漆膜厚度对比
Fig.3 Thickness comparison of coating on 2A12 aluminum alloy after anodic oxidation

2.2 漆层附着力测试

对经铬酸阳极氧化处理的 2A12 铝合金试样表面不同漆层进行划格法胶带结合力测试,结果如表 4。由表 4 可知,漆层附着力良好,无明显漆层脱落,按标准评定为 1 级。

表2 2A12 铝合金表面漆层附着力
Tab.2 Adhesion of coating layer on 2A12 aluminum alloy

试验结果分级	1	2	3	均值
环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系	0	1	1	1
环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系	1	1	1	1
丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系	1	1	1	1

2.3 阳极氧化层耐腐蚀性

将不同表面处理工艺的铝合金试样进行酸性盐雾试验,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,无表面处理和铬酸阳极氧化的铝合金表面腐蚀严重,白色腐蚀物较多,腐蚀面积近 100%。硫酸阳极氧化和苹果酸阳极氧化未发现腐蚀。

2A12 铝合金耐腐蚀性差,易发生点蚀、晶间腐蚀等问题,因此未经表面处理的铝合金试样出现严重腐蚀。铝合金铬酸阳极氧化膜较薄,易被 Cl^- 和 SO_4^{2-} 穿透到达铝合金基体,导致腐蚀发生。硫酸阳极氧化膜层较厚,对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 具有较好的阻隔性能,因此耐腐蚀性较好。苹果酸阳极氧化膜层虽然较薄,但是由于采用苹果酸代替一部分硫酸降低了阳极氧化过程中对阳极氧化膜层的溶解,提高了阳极氧化膜

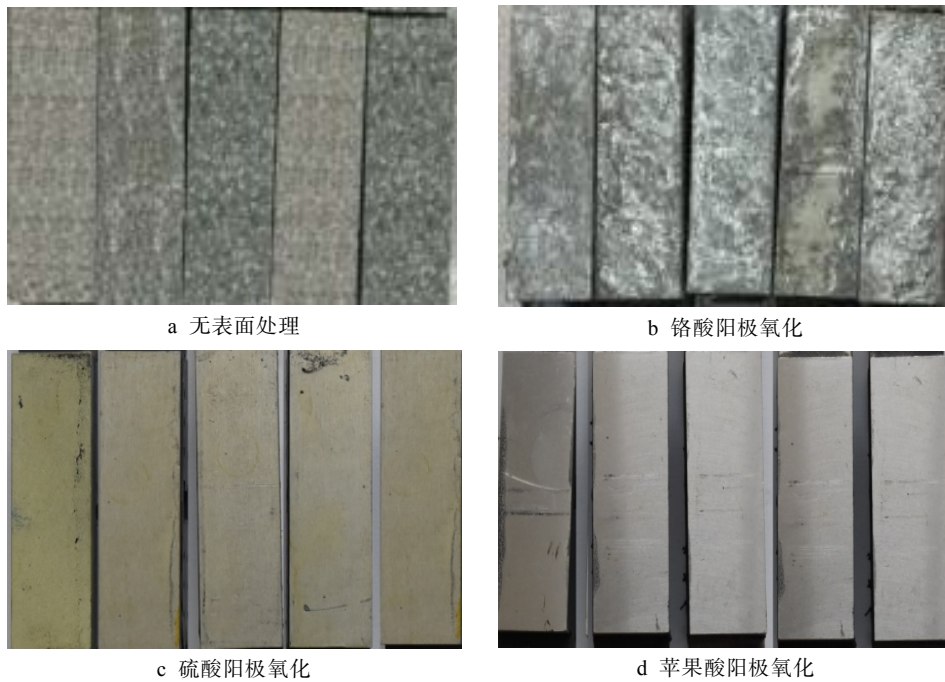


图 4 不同表面处理 2A12 铝合金试样经 192 h 酸性盐雾后表面形貌

Fig.4 Surface morphology of 2A12 aluminum samples subject to different surface treatments after 192 h acid salt spray test: a) no treatment; b) chromic acid anodizing; c) sulfuric acid anodizing; d) malic acid anodizing

阻挡层的厚度。同时，由于采用了疏水性好的含氟硅氧烷进行封闭，强化了膜层抗腐蚀介质浸入的能力，因此其具有较好的耐酸性盐雾腐蚀性能。

2.4 防护涂料耐腐蚀性

以铬酸阳极氧化的 2A12 铝合金为基底材料，考察不同防护涂料对铝合金试样耐酸性盐雾性的影响。

从图 5 可以看出，铬酸阳极氧化的铝合金试样（如图 5a 所示）表面白色腐蚀物多，腐蚀面积接近 100%。涂环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系试样出现了漆层起泡现象（如图 5b 和图 6a 所示），涂环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系试样漆层出现了褪色发白和起泡现象（如图 5c 图 6b 所示）。涂丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系试样外观未发现异常，如图 5d 所示。由此可见，

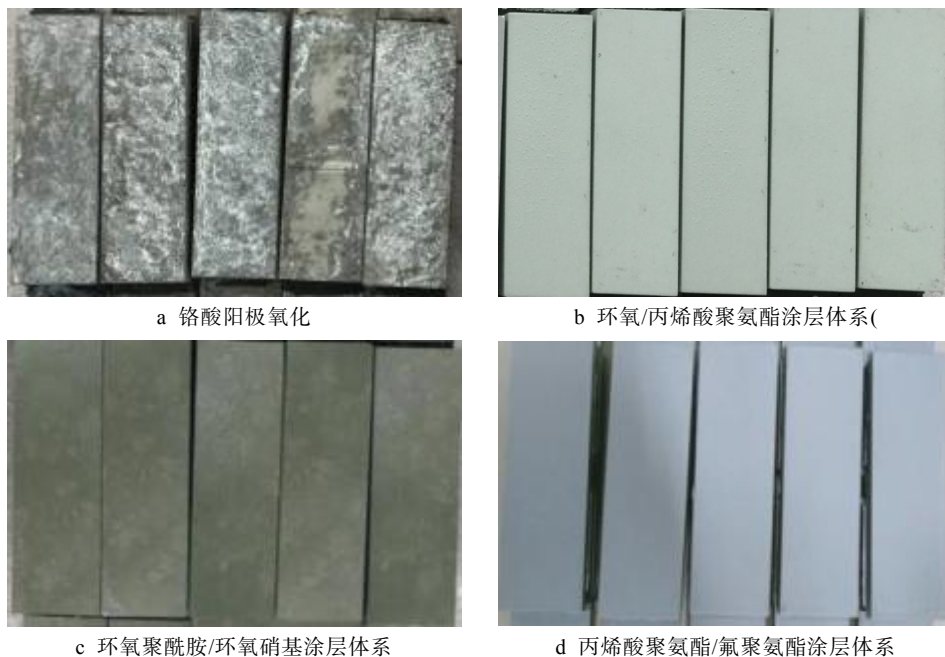
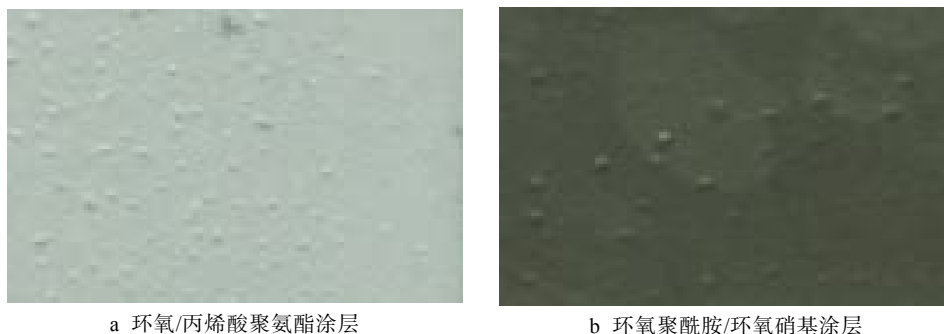


图 5 不同防护涂层 2A12 铝合金试样经 192h 酸性盐雾后表面形貌

Fig.5 Surface morphology of 2A12 aluminum samples with different protective coatings after 192h acid salt spray test: a) chromic acid anodizing; b) epoxy/acrylic polyurethane; c) epoxy polyamide/epoxy nitro enamel; d) acrylic polyurethane/fluoro-polyurethane



a 环氧/丙烯酸聚氨酯涂层

b 环氧聚酰胺/环氧硝基涂层

图6 2A12铝合金防护涂层试样经192h酸性盐雾后局部放大形貌

Fig.6 Partially enlarged morphology of coated 2A12 samples after 192 h acid salt spray test: a) epoxy/acrylic polyurethane; b) epoxy polyamide/epoxy nitromagnetic coating

铬酸阳极氧化的2A12铝合金表面涂覆不同涂层具有不同的耐腐蚀性。当铬酸阳极氧化处理耦合丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系时,2A12铝合金的耐酸性盐雾性能良好,当其与另外2种航空常用涂料环氧/丙烯酸聚氨酯、环氧聚酰胺/环氧硝基涂料耦合时,耐酸性盐雾性能则较差。

铬酸阳极氧化膜层较薄,对 H^+ 和 SO_4^{2-} 的阻隔性能差,使其透过阳极氧化层进入铝合金基体发生腐蚀。漆层起泡通常是漆膜防护能力不足的外观表征^[25-26],环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系和环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系2种防护体系起泡,是漆膜局部丧失附着力而从底材上突起的表现。一方面可能是由于铝合金和漆层所处酸性盐雾环境中的 H^+ 透过漆层,在漆层和铝合金基体之间获得电子而产生氢气,即所谓析氢现象,由于氢气聚集导致漆膜慢慢鼓起,产生起泡现象;另一方面可能是环氧底漆和环氧聚酰胺底漆对 H^+ 和 SO_4^{2-} 的阻隔性能差,导致铝合金基体发生腐蚀,腐蚀产物膨胀使漆层结合力减弱,从而引起漆层起泡。

3 结论

1) 2A12铝合金铬酸阳极氧化层不耐酸性盐雾腐蚀,而硫酸阳极氧化层和苹果酸阳极氧化层具有较好耐酸性盐雾腐蚀性能。

2) 环氧/丙烯酸聚氨酯涂层体系和环氧聚酰胺/环氧硝基涂层体系2种防护涂层体系耐酸性盐雾能力差,在酸性盐雾条件下均出现起泡现象,而丙烯酸聚氨酯/氟聚氨酯涂层体系耐酸性盐雾腐蚀性能良好。

参考文献:

[1] 杨炳鑫, 马运五, 山河, 等. 2A12-T4 铝合金自冲摩擦铆焊接头力学行为研究[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 625111.
YANG B X, MA Y W, SHAN H, et al. Mechanical Performance of Friction Self-Piercing Riveted Joint for 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 625111.

[2] 吴雪猛, 刘浩, 温泉, 等. 搅拌摩擦焊修复 2A12 铝合金蒙皮裂纹的接头显微组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(5): 71-77.
WU X M, LIU H, WEN Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Repair Joints for 2A12 Aluminum Alloy Airframe Skin Cracks[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(5): 71-77.

[3] 丁清苗, 秦永祥, 崔艳雨. 飞机蒙皮 2A12 铝合金搅拌摩擦焊的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(7): 144-150.
DING Q M, QIN Y X, CUI Y Y. Numerical Simulation Study on Friction Stir Welding of Aircraft Skin 2A12 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 144-150.

[4] 张艳辉. 浅析舰载武器海洋环境适应性验证要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 8-11.
ZHANG Y H. Requirement on Suitability Verification of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 8-11.

[5] 朱金阳, 李明, 程丛高. 美海军舰载航空装备“盐雾-SO₂”试验方法发展历程及启示[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 33-38.
ZHU J Y, LI M, CHENG C G. Development and Enlightenment of “Salt Spray-SO₂” Test Method for Carrier-Based Aircraft of US Navy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 33-38.

[6] 张令波, 程丛高. 舰载直升机环境条件确定方法探讨[J]. 航空标准化与质量, 2011(5): 25-29.
ZHANG L B, CHENG C G. Discussion on the Method of Determining the Environmental Conditions of Ship-Borne Helicopters[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2011(5): 25-29.

[7] 张金涛, 杨春勇, 潘亮, 等. 2A12 铝合金表面钨盐掺杂硅烷杂化膜在 3.5%NaCl 溶液中耐蚀性能的电化学研究[J]. 金属学报, 2008, 44(11): 1372-1377.
ZHANG J T, YANG C Y, PAN L, et al. Electrochemical Study of Corrosion Resistance of Cerium Nitrate Doped silane-Based Hybrid Films on Aluminum Alloy 2A12[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(11): 1372-1377.

[8] 曹波, 朱凯, 何勇, 等. 航空用 2A12 铝合金型材表面缺陷形成原因及其改善措施[J]. 轻合金加工技术, 2022, 50(8): 48-53.
CAO B, ZHU K, HE Y, et al. Cause and Improvement Measures for Surface Defect Formation of Aeronautical

- 2A12 Aluminum Alloy Profiles[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2022, 50(8): 48-53.
- [9] 张有宏, 吕国志, 陈跃良. LY12-CZ 铝合金预腐蚀及疲劳损伤研究[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 779-782.
ZHANG Y H, LYU G Z, CHEN Y L. Predicting Fatigue Life from Pre-Corroded LY12-CZ Aluminium Test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 779-782.
- [10] 王彬, 苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 64-68.
WANG B, SU Y. Research Progress in Atmospheric Corrosion Behavior and Anticorrosion Measures of Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 64-68.
- [11] 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.
XIAO K M, NIE W J, JIAN H G, et al. Effects of Anodizing Time on Exfoliation Corrosion Properties of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(4): 39-46.
- [12] 陈莉, 武英英, 许恒庭, 等. 阳极氧化后某 2A12 铝合金零件表面缺陷的成因[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(2): 114-118.
CHEN L, WU Y Y, XU H T, et al. Causes of Surface Defects of 2A12 Aluminum Alloy Parts after Anodizing[J]. Corrosion and Protection, 2024, 45(2): 114-118.
- [13] 张优, 陈楚平, 张政, 等. 电解液中铈盐对 LDH/AAO 复合膜层耐蚀性影响[J/OL]. 中国表面工程, 2023: 1-12. (2023-08-21). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BMGC20230818008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
ZHANG Y, CHEN C P, ZHANG Z, et al. Effect of Cerium Salt in Electrolyte on Corrosion Resistance of LDH/AAO Composite Film[J/OL]. China Industrial Economics, 2023: 1-12. (2023-08-21). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BMGC20230818008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] 孙源, 罗彦, 王旭敏, 等. 2024-t6 铝合金表面电镀镍/氧化石墨烯涂层的耐蚀性能[J]. 材料保护, 2019, 52(8): 15-23.
SUN Y, LUO Y, WANG X M, et al. Corrosion Resistance of Ni/GO Coatings Electrodeposited on 2024-T6 Aluminum Alloy Surface[J]. Materials Protection, 2019, 52(8): 15-23.
- [15] 常德华. 铝合金电镀前处理技术探究[J]. 冶金与材料, 2022, 14(1): 67-68.
CHANG D H. Study on Pretreatment Technology of Aluminum Alloy Electroplating[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 14(1): 67-68.
- [16] 杜广, 杨志刚, 陈扬杰, 等. 多巴胺预处理后 2A12 铝合金表面化学镀镍-磷合金及其性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(21): 34-39.
DU G, YANG Z G, CHEN Y J, et al. Study on Electroless Plating and Properties of Nickel-Phosphorus Alloy on 2A12 Aluminum Alloy Pretreated with Dopamine[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(21): 34-39.
- [17] 刘义林, 袁康杰, 王军华, 等. 化学镀高 Cu 含量 Ni-Cu-P 镀层的组织结构及显微力学性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(7): 144-149.
LIU Y L, YUAN K J, WANG J H, et al. Study on Microstructure and Micromechanical Properties of Cu-Rich Ni-Cu-P Coating Synthesized by Electroless Plating[J]. Materials Protection, 2022, 55(7): 144-149.
- [18] 汪前雨, 张丽, 陆江银, 等. 双镀锌铝合金镀层的组织结构和耐蚀性[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(7): 392-398.
WANG Q Y, ZHANG L, LU J Y, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Zinc-Aluminum Alloy Coating Prepared by a Two-Step Hot Dipping Process[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(7): 392-398.
- [19] 丁永志, 刘元海, 慕仙莲, 等. 2A12 铝合金表面石墨烯富镁涂层性能研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 57-62.
DING Y Z, LIU Y H, MU X L, et al. Properties of Graphene Magnesium-Rich Coating on 2A12 Aluminum Alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 57-62.
- [20] 侯悦, 田原, 赵志鹏, 等. 海洋工程用铝合金的腐蚀与防护研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 1-14.
HOU Y, TIAN Y, ZHAO Z P, et al. Corrosion and Protection of Aluminum Alloy for Marine Engineering[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 1-14.
- [21] 王兆林, 李香云, 宋海鹏, 等. 2A12 铝合金基体超疏水表面制备及性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(2): 83-89.
WANG Z L, LI X Y, SONG H P, et al. Preparation and Performance Analysis of Superhydrophobic Surface on 2A12 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Technology, 2023, 31(2): 83-89.
- [22] 中华人民共和国航空工业部. 铝及铝合金铬酸阳极氧化工艺: HB/Z 118—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
Ministry of Aviation Industry of the People's Republic of China. Aluminum and Aluminum Alloy Chromic Acid Anodizing Process: HB/Z 118—1987[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987.
- [23] 中华人民共和国航空工业部. 铝及铝合金硫酸阳极氧化工艺: HB/Z 233—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
Ministry of Aviation Industry of the People's Republic of China. Aluminum and Aluminum Alloy Sulfuric Acid Anodizing Process: HB/Z 233—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [24] 王强, 宇波, 易俊兰, 等. 一种提高铝及铝合金防护性能的阳极化方法: CN 105463549 B[P]. 2018-06-26.
WANG Q, YU B, YI J L, et al. Anodizing Method for Improving the Protection Performance of Aluminum and Aluminum Alloys: China Patent, CN 105463549 B[P]. 2018.
- [25] 汪金奇. 铁路客车外皮涂层起泡脱落分析[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(5): 41-43.
WANG J Q. Analysis on Blister and Cracking-off of Finish of Train[J]. Modern Paint & Finishing, 2008, 11(5): 41-43.
- [26] 钮京芳. 漆层起泡形成的机理分析及预防控制措施[J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(7): 63-65.
NIU J F. Mechanism Analysis and Control Measures of Blistering of Paint Film[J]. Modern Paint & Finishing, 2022, 25(7): 63-65.