

航空电泳涂层防腐蚀性能研究

程健丽, 徐小芳, 毛景, 丁瑶
(上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

摘要: 环保问题和生产效率问题一直以来受到政府和企业的高度重视, 我国面临稀有资源稀缺、空气质量急速下降、绿化面积越来越少等众多环境问题。针对日益严苛的环保要求和批产提速以及涂装质量提升需求, 研究新的涂装方式势在必行。电泳涂装绿色环保, 涂装效率高, 涂装质量好, 可有效解决目前喷涂引起的一系列问题。本文以阳极电泳涂层为研究对象, 研究不同表面处理方式、不同涂层厚度等因素对电泳涂层中性盐雾、酸性盐雾以及丝状腐蚀等防腐蚀性能的影响。结果表明: 不同前处理工艺对电泳涂层耐腐蚀性有不同影响, 阳极化表面处理的电泳涂层耐腐蚀性最好; 耐腐蚀性与电泳涂层厚度没有线性相关关系。

关键词: 航空; 电泳涂层; 中性盐雾; 酸性盐雾; 丝状腐蚀

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)12-0016-04

Study on the Corrosion Resistance of Aerospace Electrophoretic Coatings

CHENG Jian-li, XU Xiao-fang, MAO Jing, DING Yao
(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

Abstract: Environmental protection issues and production efficiency problems have always been highly valued by the government and enterprises. China is confronted with the scarcity of rare resources, the rapid deterioration of air quality, the reduction of green areas and many other environmental problems. In response to increasingly strict environmental protection requirements, the need for accelerated production and the demand for improved coating quality, it is imperative to explore new coating methods; Electrophoretic coating is environmentally friendly and highly efficient. It offers excellent coating quality and can effectively solve a series of problems caused by current spraying methods. In this paper, anodic electrophoretic coating applied for aerospace were studied. The effect of different pretreatment method and different thickness of dry film for the corrosion resistance were studied. The test results show that different pretreatment processes have different effects on the corrosion resistance of the electrophoretic coating and the electrophoretic coating with anodized surface treatment has the best corrosion resistance, the corrosion resistance has no linear relationship with the thickness of the electrophoretic coating.

Key words: aviation; electrophoretic coating; neutral salt spray; acidic salt spray; filiform corrosion

0 引言

铝合金具有卓越的高强度质量比、优异的延展性、高损伤容限和断裂韧性以及良好的弹性刚度, 被广泛应用于汽车和航空领域^[1-2]。

电泳涂装过程中, 电泳涂层可以均匀且致密地覆盖在被涂物表面, 涂装过程中, 涂料渗透力强, 对形状复杂的零部件具有优越的涂装能力, 可有效提高工件的耐腐蚀性。电泳技术虽然在汽车领域已经成熟应用, 但铝合金结构对温度变化敏感, 当温度超过 120 °C 时, 铝合金结构可能会发生不可逆的变化, 给铝合金的表面处理技术带来一定的挑战^[3]。基于对涂料固化温度、涂层的防腐蚀性以及涂装对基体材料的影响等的考

收稿日期: 2025-10-15

作者简介: 程健丽(1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事飞机涂装工作。E-mail: chengjianli1228@126.com。

虑,电泳涂装技术在航空领域的应用研究尚处于起步阶段^[4-6],本文将探索阳极化航空电泳涂装技术的应用,对涂层耐腐蚀性能进行研究。

影响电泳涂层耐腐蚀性的因素有很多,其中不同前处理、不同涂层厚度等均会对电泳涂层防腐性产生影响。目前民机上铝合金零部件的前处理工艺主要是阳极化和化学氧化,不同牌号铝合金零部件阳极化后氧化膜厚度有一定差异,这就导致在电泳涂层基本性能均能达标的情况下所需要的电压参数有差异,对不同牌号铝合金零部件同槽电泳产生一定影响。为了提升电泳涂装效率,考虑电泳涂层本身具有良好的防腐性,将铝合金酸洗前处理作为一种表面处理方式,同时探索了酸洗前处理后进行电泳涂装的研究。

实验室评估涂层耐腐蚀性时通常需要对涂装样品在盐雾试验前进行划线预处理。划线处理是通过人为破坏模拟涂层在实际使用中刮伤,在盐雾氛围中加速腐蚀破坏的结果,能反映腐蚀试验中涂层的耐久性。本文中试样分别进行了中性盐雾、酸性盐雾以及丝状腐蚀测试,探究不同基材、不同前处理和不同涂层厚度对涂层体系耐腐蚀性能的影响规律。

1 试验部分

1.1 材料

铝合金材料。

1.2 试验件制备

1.2.1 试板准备

本文中试样基材选用铝合金,所有测试面板规格为 6 in×3 in×0.02 in,在进行表面处理之前应将面板切割至所需尺寸。

1.2.2 前处理

本文主要研究 3 种不同表面处理电泳涂层耐盐雾性能,分别为铬酸阳极极化表面处理、阿洛丁表面处理(MC)和酸洗表面处理。铬酸阳极化是通过电化学反应使铝表面形成一层尖晶石氧化物层(Al_2O_3),该层氧化物具有良好的抗腐蚀性能,可以在铝合金的表面形成一层保护层以增强其耐腐蚀性和硬度并能提升与涂层的附着力。阿洛丁表面处理是利用化学溶液在金属表面形成氧化膜的一种方法,其原理是将金属表面亲水性转化为疏水性,从而提高其防腐性。酸洗处理可去除残留在制品表面上的氧化产物,获得光亮的金属表面,处理过程耗时短、耗能低,采用该方法是由于不同牌号铝合金基材经酸洗处理后表面状态一致,以消除不同牌号基材前处理后表面氧化膜层状态不同对电泳带来的不良影响。

1.2.3 电泳涂装

电泳涂装可通过调节电泳参数获取不同厚度电泳

涂层,主要工艺流程如下:经表面处理后的试板→电泳→槽上喷淋→超滤液 1 水洗→超滤液 2 水洗→纯水洗→沥水→烘干。

1.3 试验内容

本文探究基材种类、前处理方法、电泳涂层厚度对涂层耐中性盐雾(NSS)、酸性盐雾(CASS)以及耐丝状腐蚀(FFC)的影响,探究阳极航空电泳涂层的耐腐蚀性能。

1.3.1 中性盐雾

判定标准:暴露于 5% 的盐雾 3 000 h 后,底漆(带或不带面漆)在离划线 0.125 in(3.175 mm)以外不得出现起泡或附着力损失。

1.3.2 酸性盐雾

判定标准:暴露在铜盐加速醋酸盐雾 500 h 后,底漆在距离划线 0.125 in(3.175 mm)以外不得出现起泡或附着力损失。

1.3.3 丝状腐蚀

判定标准:底漆不得在划线处出现延伸超过 0.25 in(6.35 mm)的丝状腐蚀。1 000 h 后检查是否出现腐蚀、起泡和其他末端损伤,距划痕 0.125 in(3.175 mm)外无腐蚀或附着力损失(附着力 ≤ 3 级)。

2 试验结果

2.1 中性盐雾测试结果

2.1.1 不同表面处理

图 1 为 2024 铝合金试样不同前处理试片经过中性盐雾测试后的试片(涂层厚度基本一致),其中 a 为阳极化处理,b 为酸洗处理,c 为 MC 处理。每组图片第 1 片试验件为未划线处理盐雾腐蚀试验,第 2 片和第 3 片试验件为经过划线处理进行盐雾腐蚀试验,分别标记为①和②。

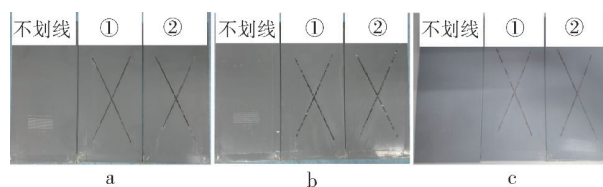


图 1 2 系铝合金不同前处理中性盐雾测试结果程

不同前处理后涂层中性盐雾试验结果见表 1,由表 1 可知:不划线处理盐雾腐蚀试验均未出现腐蚀;阳极化和酸洗处理后的试片 3 000 h 盐雾测试后漆膜均无变化,附着力 0 级,划线处单向起泡扩蚀 <0.5 mm。MC 处理后试片划线处单向起泡扩蚀 <2.0 mm,腐蚀宽度较阳极化及酸洗处理宽,证明不同前处理对涂层耐腐蚀性能有影响。

表 1 不同前处理后涂层中性盐雾试验结果

前处理	附着力/级	中性盐雾测试结果
阳极化	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
酸洗	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
MC	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<1.9 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<2.0 mm

注:基材为 2 系铝合金。

由以上数据可知阳极化处理的试板涂层耐盐雾性能十分优异,这是因为氧化膜成膜元素三价铬离子具有自身修复功能,导致前期腐蚀环境下产生的孔隙在后期并未发生扩大。腐蚀产物含六价的铬离子,而六价铬离子具有较强的氧化性,与局部腐蚀后裸露的铝合金基体发生氧化还原反应,得到含三价铬的化学膜对基体进行了有效的保护,阻止了外界腐蚀介质的侵入。

2.1.2 不同厚度及基材

对 2 系铝合金及 7 系铝合金试片进行阳极化前处理后通过调整电泳涂装参数获得不同厚度电泳涂层,随后对试片进行中性盐雾性能测试,测试结果如图 2~3 所示,其中 a 对应 5~10 μm 厚度涂层,b 对应 15~20 μm,c 对应 25~30 μm。每组图片第 1 片为未划线处理盐雾腐蚀试验,第 2 片和第 3 片试验件为经过划线处理进行盐雾腐蚀试验,分别标记为①和②。

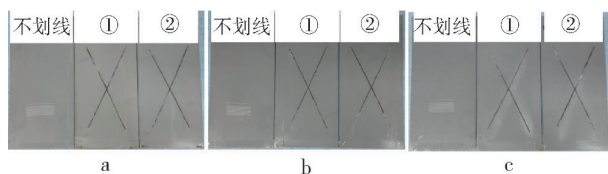


图 2 2 系铝合金阳极化处理试样不同厚度耐盐雾性能测试结果

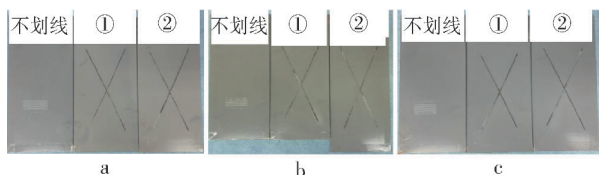


图 3 7 系铝合金阳极化处理试样不同厚度耐盐雾性能测试结果

图 2 显示,中性盐雾测试后 2 系铝合金阳极化处理的试样漆膜无变化,附着力 0 级,未划线处无变化,

划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm,结果均符合航空电泳涂层要求。阳极化和酸洗处理后的试片涂层经相同测试条件测试后耐腐蚀性均达标,与电泳工艺适配性良好。图 3 显示,7 系铝合金试样阳极化前处理的电泳涂层具有良好的耐盐雾性能,经过测试后漆膜无变化,附着力 0 级,未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm。以上测试结果均符合标准要求。

不同基材及厚度电泳涂层中性耐盐雾试验结果见表 2 所列。由表 2 可知,涂层厚度不是影响耐盐雾性能的决定性因素,在 5~30 μm 范围内涂层厚度变化未影响盐雾试验结果,因此并不是涂层越厚耐腐蚀性越好。盐雾测试结果均满足 AMS 3144 要求,证明电泳涂层具有良好的耐腐蚀性,均达到行业标准要求。涂层与基板之间的附着力较好,均为 0 级。

表 2 不同基材及厚度电泳涂层中性耐盐雾试验结果

基材前处理信息	膜层厚度/μm	附着力/级	测试结果
2 系铝合金酸洗	5~10	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀 0.6 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
	15~20	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀 0.5 mm
	25~30	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
7 系铝合金阳极化	5~10	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
	15~20	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm
	25~30	0	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm;②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm

2.2 酸性盐雾测试结果

相对于中性盐雾,酸性盐雾是一种快速判断涂层防腐性能的方法,采用同样的电泳涂装参数,同等的涂层干膜厚度 15~20 μm,对 2 系铝合金和 7 系铝合金

开展酸洗和阳极化表面处理后,开展酸性盐雾试验,试验结果如表3所列,在500 h范围内,划线处向外层扩蚀宽度均小于3.175 mm,均符合要求,其中7系铝合金酸洗表面处理的扩蚀宽度最大。通过进一步对比结果发现,相同前处理条件下2系铝合金涂层耐腐蚀性较7系铝合金涂层耐蚀性更好,相同基材,阳极化处理较酸洗处理耐蚀性更佳。

表3 不同前处理试板酸性盐雾测试结果

基材及前处理信息	酸性盐雾检测结果
2系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)
2系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)
7系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀1.0 mm(500 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀1.5 mm(500 h)
7系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(500 h)
2系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀0.8 mm(1 000 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀0.5 mm(1 000 h)
2系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀<0.5 mm(1 000 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀1.2 mm(1 000 h)
7系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀1.8 mm(1 000 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀5.0 mm(696 h)
7系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀0.8 mm(1 000 h)②:未划线处无变化,划线处单向起泡扩蚀2.0 mm(1 000 h)

2.3 丝状腐蚀测试结果

采用同样的电泳涂装参数、同等的涂层干膜厚度(15~20 μm),对2系铝合金和7系铝合金开展酸洗和阳极化表面处理后,开展丝状腐蚀试验,试验结果如表4所列。丝状腐蚀向外扩展宽度:7系铝合金阳极化>7系铝合金酸洗>2系铝合金阳极化>2系铝合金酸洗,通过对比分析可知7系铝合金基材比2系铝合金基材更容易产生丝状腐蚀。无论是7系铝合金基材还是2系铝合金基材,酸性前处理的丝状腐蚀向外扩展宽度小于其阳极化前处理的丝状腐蚀向外扩展宽度,主要原因可能与前期试验得出的阳极化膜层与基体材料的

附着力虽符合要求,但是不同基材与电泳涂层间的附着力有关,因此腐蚀性能向外扩展更快。

表4 1 000 h 丝状腐蚀试验结果

基材及前处理信息	丝状腐蚀测试结果
2系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度2.3 mm,附着力0级;②:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度2.0 mm,附着力0级
2系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度2.6 mm,附着力0级;②:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度2.5 mm,附着力0级
7系铝合金酸洗	①:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度2.5 mm,附着力0级;②:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度3.0 mm,附着力0级
7系铝合金阳极化	①:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度4.0 mm,附着力1级;②:未划线处无变化,划线处单向最长丝状腐蚀宽度3.0 mm,附着力1级

3 结语

通过一系列盐雾试验结果分析可知,不同前处理工艺对电泳涂层耐腐蚀性有不同影响,呈现出的电泳涂层耐腐蚀性规律:阳极化前处理>酸洗前处理>MC前处理。同时,耐腐蚀性与电泳涂层厚度没有线性相关关系,涂层越厚耐腐蚀性不一定更好。不同基材试片的电泳涂层耐腐蚀性能稍有差异,2系铝合金较7系铝合金耐腐蚀性能好。总体而言,航空电泳涂层具有良好的耐盐雾性能,符合行业应用要求。

参考文献:

- [1] 徐晨光,刘科研,金龙兵,等.民用航空铝合金材料产业化及其推广应用[J].铝加工,2018(5):9-13.
- [2] 孙鹏,董劲,黄惠,等.铝合金表面防腐涂层的研究进展[J].上海涂料,2023(3):52-61.
- [3] 吴妍.2024 铝合金耐腐蚀性能与力学性能研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [4] 岳慧艳.基于环氧体系的双组分阴极电泳涂料的研制[D].天津:天津大学,2006.
- [5] 余祖孝,郝世雄,黄新,等.丙烯酸阳极电泳涂料制备及电泳涂装工艺[J].涂料工业,2014(6):52-56.
- [6] 刘玉,陈小琴,王杰.新型耐候性丙烯酸阳极电泳涂料的研制[J].现代涂料与涂装,2012(10):52-55.