

# 2024 铝合金连接结构两种防护涂层耐蚀性研究

张红飞, 赵连红, 王浩伟

(中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

**摘要:** **目的** 研究铝合金两种防护涂层在 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳性能。**方法** 针对在两种涂层防护作用下的 2024 铝合金连接结构, 开展实验室加速试验, 采用“腐蚀环境-疲劳加载”交替循环的试验模式, 得到铝合金两种防护涂层在 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳寿命值, 对比分析涂层体系对铝合金连接结构的腐蚀疲劳寿命影响。**结果** 5% NaCl 盐雾环境对于铝合金连接结构疲劳寿命有较大影响, 相较于传统涂层, 纳米涂层在 5% NaCl 盐雾环境下的防护效果更好。**结论** 纳米涂层表面破坏后快速生成的致密氧化膜能有效提高涂层的耐蚀性能。

**关键词:** 纳米涂层; 5% NaCl 盐雾环境; 腐蚀疲劳性能; 腐蚀环境

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.018

**中图分类号:** TG174.44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)07-0082-04

## Corrosion Resistance of Two Protective Coatings of 2024 Aluminum Alloy Structure

ZHANG Hong-fei, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the corrosion fatigue properties of 2 protective coatings of aluminum alloy in 5% NaCl salt fog environment. **Methods** The laboratory accelerated test was carried out for 2024 aluminum alloy connection structure under two coating protective effects. The experimental model of "corrosion environment-fatigue loading" alternating cycle was adopted to obtain the corrosion fatigue lifetime values of two aluminum alloy protective coatings under 5% NaCl salt fog environment. The effect of coating system on corrosion fatigue life of aluminum alloy structure was analyzed. **Results** The study showed that 5% NaCl salt fog environment had a great influence on the fatigue life of aluminum alloy connection structure, and the Nano coating had better protection effect than the traditional coating in 5% NaCl salt fog environment. **Conclusion** The rapid formation of oxide film after the coating surface densification and destruction can improve the corrosion resistance of the coating effectively.

**KEY WORDS:** nano coating; 5% NaCl salt fog environment; corrosion fatigue performance; corrosion environment

2024 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系列铝合金, 具有高强度和高抗疲劳性能等诸多优点<sup>[1-2]</sup>, 在航空制造使用中发挥着重要作用。通常以蒙皮、隔框、翼肋、翼梁等形式运用到飞机结构中。随着我国深海战略的不断推进实施, 飞机在沿海地区和海域的服役机会逐渐增多, 长期的高盐雾、高湿热等严酷海洋环境极易引

起 2024 铝合金材料的腐蚀。特别是其连接结构形式, 由于结构自身缝隙和局部损伤等在海洋环境下更易腐蚀, 导致结构腐蚀破坏直接影响飞机的安全和可靠性<sup>[3-6]</sup>, 同时作为主承力结构的铝合金材料在应力和腐蚀环境的双重作用下易发生腐蚀疲劳损伤。李鸿鹏<sup>[7]</sup>在研究铝合金腐蚀疲劳进展中指出, 疲劳(裂纹)损



中破坏。在腐蚀环境下, A-F-T1 试验件(纳米涂料防护体系防护效果)的疲劳寿命下降至 51.5%左右, A-F-T2 试验件(2层 TB06-9+1层 TS96-71 防护体系)下降至 49.8%左右。按照 HB 5287—1996《金属材料轴向加载疲劳试验方法》, 疲劳中值寿命要满足 95% 置信度要求。在 5% NaCl 盐雾环境下, A-F-T1 试验件 5 组腐蚀疲劳寿命值的变异系数为 0.022 26; A-F-T2 试验件为 0.010 77, 符合 HB 5287—1996 的要求, 试验数据合理有效。A-F-T1、A-F-T2 两种试验件的疲劳寿命和腐蚀疲劳寿命详见表 2。

表 2 腐蚀疲劳试验后试样的剩余疲劳寿命

防护体系	连接方式	$N_{u1}+$ $N_{u2}+$ $N_{u \text{ 剩余}}$	$N_p$	$(N_{u1}+ N_{u2}+ N_{u \text{ 剩余}})/N_p/\text{Hz}$	平均值 /Hz
A-F-T1 试验件	钢螺	398 22 156		0.4072922	
	栓搭	512 22 270		0.4093879	
	接件	14 389 36 147 54 398.288		0.6644878	0.51509
		11 690 33 448		0.6148723	
A-F-T2 试验件		4 321 26 079		0.4794085	
	钢螺	5 400 27 158		0.4992437	
	栓搭	1 176 22 934		0.4215942	
	接件	6 101 27 859 54398.288		0.5121301	0.498041
		4 636 26 394		0.4851991	
		9 360 31 118		0.5720401	

## 2.2 断口形貌分析

在 5% NaCl 盐雾环境下, A-F-T1、A-F-T2 两种试验件在第三个周期的试验中破坏断裂, 疲劳破坏的位置均在试验件螺接部位第一排紧固件孔区域, 具体腐蚀情况和断裂形貌如图 2 所示。对比分析两种涂层试验件的腐蚀疲劳寿命试验结果, 相较于传统涂层(TB06-9 底漆+ TS96-71 面漆), 纳米涂料对铝合金螺接区域的防护作用更好。

2024 连接件的腐蚀疲劳寿命值与连接结构特点和涂料的防护性能有紧密联系。2024 铝合金连接件在载荷作用下, 螺栓和紧固件孔自身的微孔隙会逐渐增大, 破坏紧固件孔壁周围的涂层和密封胶层, 导致螺栓和紧固件孔壁周围的涂层和密封胶层出现微裂纹, 致使外界腐蚀介质  $Cl^-$  穿过涂层和密封胶层进入到涂层内部, 与紧固件孔壁金属基体接触, 并腐蚀金属基体, 形成腐蚀损伤源。相较于传统涂料(TB06-9 底漆+ TS96-71 面漆), 纳米涂料能对基底金属起到钝化作用。钝化涂层发生破坏后, 涂料中的磷酸盐作为修复剂发生氧化还原反应, 形成新的致密涂层, 有效阻止外界腐蚀介质进入涂层内部, 与紧固件孔壁接触发生腐蚀, 减小产生腐蚀损伤源的概率, 降低了试验件连接部位裂纹源产生引起的疲劳破坏。同时纳米涂料中含有聚苯胺等导电聚合物, 可促使金属和聚合物界面形

成钝化层, 有效减少因涂层表面微裂纹形成后腐蚀介质快速进入涂层内部与金属基体发生腐蚀的概率。

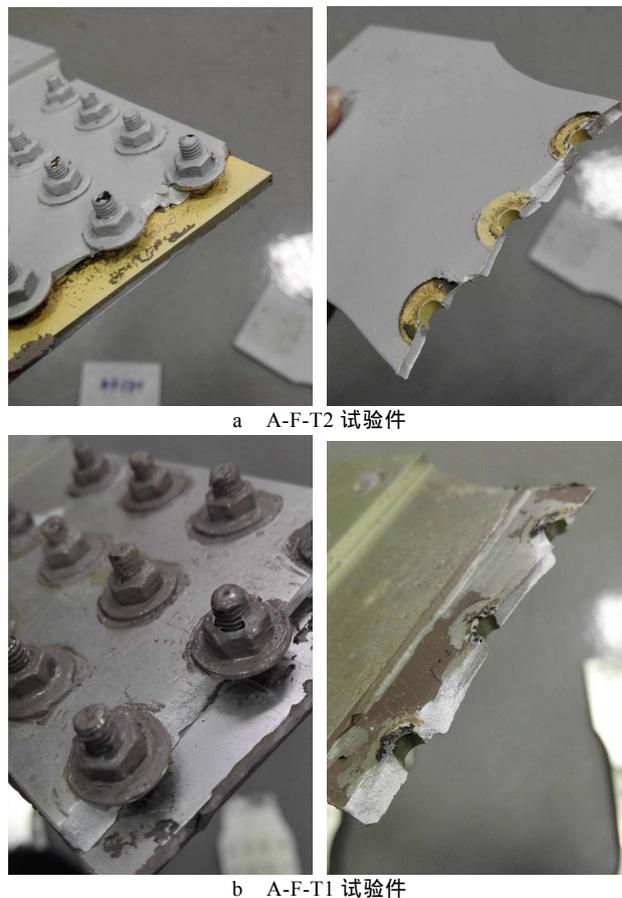


图 2 腐蚀疲劳断口

通过开展 A-F-T2 试验件断口分析(见图 4), 分析得到在 5%NaCl 盐雾环境下 A-F-T2 试样紧固件孔壁腐蚀疲劳破坏的过程, 即紧固件孔壁腐蚀产生→腐蚀损伤→疲劳裂纹源→腐蚀疲劳破坏。紧固件孔壁的腐蚀损伤导致裂纹源产生是试验件连接部位提前发生疲劳破坏的关键因素, 做好连接部位的涂层防护和密封防护是预防连接件提前发生疲劳破坏的重要手段。纳米涂料的良好性能有效阻止了腐蚀介质进入涂层内部, 极大地降低了腐蚀损伤的发生, 减小裂纹源发生的概率, 有效提高了 2024 铝合金螺接结构的腐蚀疲劳寿命。

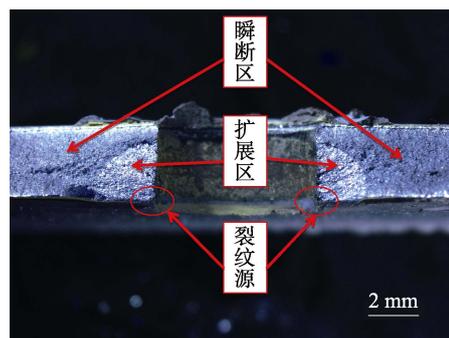


图 3 A-F-T2 试验件断口分析

### 3 结论

1) 5%NaCl 盐雾环境对于铝合金连接结构的疲劳寿命影响较大,  $\text{Cl}^-$  增加了铝合金紧固件孔壁腐蚀损伤的敏感性, 加大了紧固件孔壁裂纹源发生的概率, 降低腐蚀疲劳寿命。

2) 相较于传统涂层 (TB06-9 底漆+TS96-71 面漆), 纳米涂层表面致密度高, 涂层破坏后能快速形成氧化膜, 能有效提高铝合金连接结构耐蚀性能。

3) 研究 2024 铝合金连接结构在 5% NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳发展规律和特点, 对于 2024 铝合金连接结构的腐蚀防护和修理有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 郭洪全, 杨永安, 吴有金. LC4CS 高强铝合金腐蚀疲劳行为研究[J]. 材料工程, 1995, 23(4): 42-44.
- [2] 贺小帆, 刘文璟, 向锦武. C-T 曲线通用性分析和试验研究[J]. 航空学报, 2005(2): 184-189.
- [3] 马少华, 回丽, 周松, 等. 腐蚀环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 91-95.
- [4] 蒋金龙, 赵名洋. 预腐蚀对 LY12CZ 挤压件疲劳寿命的影响[J]. 机械强度, 1996(4): 74-75.
- [5] 李鸿鹏, 李锋, 马康民, 等. LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005(3): 175-177.
- [6] 张丹峰, 谭晓明, 戚佳睿. 飞机结构件腐蚀监测研究[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 32-34.
- [7] 王斌团, 杨庆雄. LC4CS 铝合金和 30CrMnSiNi2A 钢在大气环境预腐蚀后的疲劳曲线[J]. 机械强度, 2000(3): 222-223.
- [8] 郭亮亮, 许洋, 曹碧辉. 纳米涂料与涂层技术的应用[J]. 新材料与新技, 2018(44): 44-46.
- [9] 王超, 三防纳米涂料的合成及耐蚀性研究 [D]. 大庆: 东北石油大学. 2012.
- [10] 潘钊安. 聚硅氧烷-环氧树脂及其纳米涂料的制备与性能研究[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [11] 王东红, 刘利文. 聚苯胺防腐性能及应用研究[J]. 中国涂料, 2011, 26(10): 11-12.
- [12] 贾艺凡, 刘朝辉, 廖梓珺, 等. 本征态聚苯胺/环氧有机硅复合涂层的防腐性能[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 164-168.