

5%NaCl 盐雾环境对铝合金铆接防护 结构性能影响研究

韩允¹, 赵连红², 张红飞², 叶远珩², 刘成臣², 刘元海², 王浩伟²

(1.海装武汉局业务处, 武汉 430080; 2.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 2024 铝合金在 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳性能。**方法** 开展 2024 铝合金 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳试验, 采用“疲劳加载-腐蚀环境”交替循环的试验模式, 通过试验测试铝合金铆接结构在 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳寿命值, 分析不同疲劳载荷大小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铆接结构疲劳寿命有较大影响, 疲劳载荷对防护涂层防护性能和腐蚀疲劳载荷的滞后效应等两方面影响, $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷相较于 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷, 涂层防护作用影响更小, 低载锻炼效应更强, 腐蚀疲劳寿命降低量更少。**结论** 2024 铝合金铆接结构耐腐蚀性能与结构载荷和防护涂层特性有重要关系。

关键词: 2024 铝合金; 铆接结构; 5%NaCl 盐雾环境; 腐蚀疲劳寿命

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.010

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0051-05

Influence of 5% NaCl Salt Spray Environment on the Performance of Aluminum Alloy Riveted Protection Structure

HAN Yun¹, ZHAO Lian-hong², ZHANG Hong-fei², YE Yuan-heng², LIU Cheng-chen²,
LIU Yuan-hai², WANG Hao-wei²

(1. Naval Equipment Department Wuyhan Bureau of Military Representatlie, Wuhan 430080, China;

2. Key Laboratory of Structure Corrosion Protection and Control of Aviation Science and Technology, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study corrosion fatigue properties of 2024 aluminum alloy in 5% NaCl salt spray environment.

Methods Corrosion fatigue test of 2024 aluminum alloy was carried out in in 5% NaCl salt spray environment. The test mode of "corrosive environment - fatigue loading" alternate cycle was applied to get the corrosion fatigue life value of aluminum alloy riveted structure in 5% NaCl salt spray environment and analyze the influences of different fatigue loads on corrosion fatigue life of aluminum alloy joint structure. **Results** 5% NaCl salt spray environment had a great impact on the fatigue life of aluminum alloy joint structure. The effect of fatigue load was reflected in the protective performance of protective coating and the hysteresis effect of corrosion fatigue load. Compared with $0.3P_{\text{damage}}$ load, the coating protection of $0.25P_{\text{failure}}$ load had less effect, stronger low load exercise effect and less corrosion fatigue life reduction **Conclusion** The corrosion resistance of the 2024 aluminum alloy riveted structure is close related to the structural load and protective coating properties.

KEY WORDS: 2024 aluminum alloy; riveted structure; 5% NaCl salt spray environment; corrosion fatigue life

2024 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系列铝合金,其高强度和高抗疲劳性能等诸多优点^[1-2]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 铝合金材料腐蚀^[3-5]。铝合金铆接连接结构作为飞机常用结构形式,在结构缝隙处/结构连接涂层破坏处,腐蚀介质会积聚,导致腐蚀介质与金属基体接触产生腐蚀。刘祖铭^[6]指出,在腐蚀环境作用下,无论是外部结构还是内部结构,不同金属的紧固件和连接件,还是同种金属的紧固件和连接件,腐蚀损伤和破坏常首先在这些部位发生。连接结构的腐蚀损伤直接影响飞机安全和可靠性^[7-9],腐蚀环境/疲劳载荷交替作用下研究金属的腐蚀疲劳寿命是结构寿命评定的常用方法^[10-12]。张海威^[13]提出腐蚀/疲劳交替作用下飞机金属材料的疲劳寿命计算方法,研究了 2A12-T4 铝合金在腐蚀/疲劳交替作用下结构寿命的退化状况。陈群志^[14]等采用周期浸润加速腐蚀试验与疲劳试验相结合的方法,研究特定条件下疲劳载荷与腐蚀环境交替作用对某型飞机机翼主梁疲劳寿命的影响。杨晓华等^[15]提出腐蚀环境/疲劳载荷交替作用的腐蚀/疲劳累积迟滞模型。李昌范^[16]提出 7B04-T6 铝合金腐蚀疲劳交替寿命预测模型。这些研究主要是不同腐蚀环境下金属材料腐蚀疲劳性能退化规律和疲劳寿命预测计算方法等方面的研究,而对于不同防护涂层下金属结构的腐蚀疲劳研究相对

较少。在这样的研究背景下,文中研究在不同防护涂层、不同载荷大小下铝合金铆接结构的腐蚀疲劳性能,按照“疲劳加载-腐蚀环境”交替试验方法^[15-16],开展腐蚀疲劳试验,对比铝合金铆接结构腐蚀疲劳寿命值,研究 5%NaCl 盐雾环境下不同载荷对铝合金铆接结构腐蚀疲劳性能的影响。

1 试验

1.1 试验件

试样材料为 2024 板材,其化学成分见表 1。试验件为哑铃状试验,连接形式为铝制铆钉连接。试验件的平行试样数量为 5 件,其长度为 393.28 mm,如图 1 所示。试验件表面处理采用硫酸阳极化,试验件选用两种典型的防护体系。其中,防护涂层 N1 由新型纳米涂料(40~50 μm)+TS96-71 面漆(40~50 μm)构成;防护涂层 N2 由 TB06-9 底漆(15~25 μm)+TS96-71 面漆(40~50 μm)构成。对 N1 涂层的喷涂过程是:内表面喷涂新型纳米涂料底漆 1 层(有机-无机纳米聚硅氧烷涂料)+外表面喷涂 TS96-71 面漆 1 层;对 N2 涂层,内表面喷涂 TB06-9 底漆 2 层+外表面喷涂 TS96-71 面漆 1 层。

表 1 试验材料的化学成分 %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.40	0.50	3.8~4.9	0.30~1.0	2.1~2.9	0.1	0.25	余量

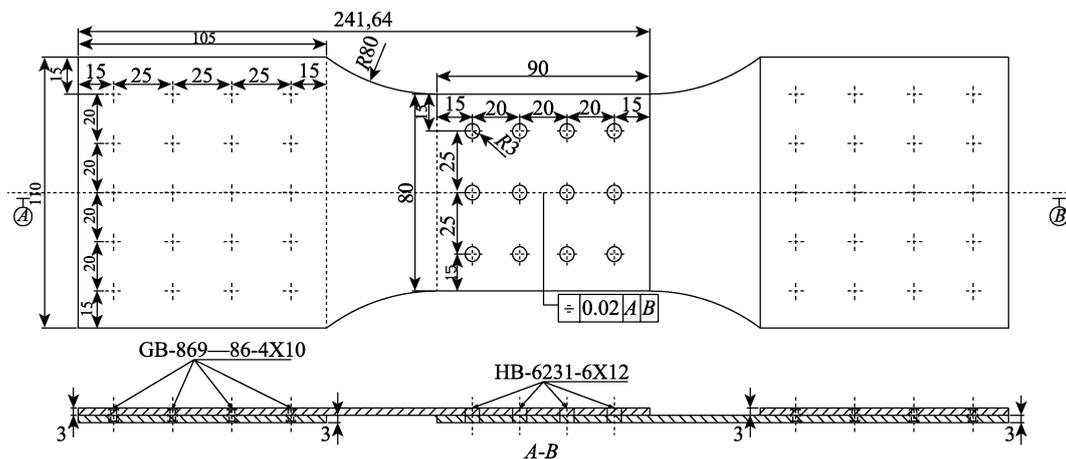


图 1 铆接试验件

1.2 试验过程

按照《航空材料环境试验及表面防护技术》关于典型结构试样评定涂层防护有效性评估方法的试验过程要求,开展铝制铆接试验件腐蚀疲劳试验。首先采用静力试验确定铆钉连接试验件破坏载荷 $P_{破坏}$ 均为 74 981 N,确定试验件在 $0.3P_{破坏}$ 载荷和 $0.25P_{破坏}$ 载荷的疲劳寿命分别为 N_{P1} 、 N_{P2} 。按照两种载荷疲劳寿命的 20%作为每次加载的次数,即每次加载的寿命

记为 N_{ui} , $i=1, 2$ 。试验件破坏之前最后一次剩余疲劳寿命记为 $N_{u_{剩余}}$,具体试验步骤如下所述。

1) 将试验件安装于疲劳试验机上,取静力破坏试验载荷 $0.3P_{破坏}$ 作为疲劳试验载荷,应力比为 $R=0.5$,以 10 Hz 频率加载 $20\%N_P$ 次。对试样进行目视,记录实际加载次数 N_{u1} ,检查记录试验件防护涂层、铆钉以及试验件表面损伤状态。

2) 取下试验件,将试验件放置于试验室中进行

30 天标准中性盐雾 (5%NaCl) 试验, 对试样进行检测, 并记录防护涂层、铆钉和试验件表面腐蚀程度。

3) 重复步骤 1)、2) 1 次, 将试验件安装于疲劳试验机上, 取静力破坏试验载荷 $0.3P_{\text{破坏}}$ 作为疲劳试验载荷, 应力比为 $R=0.5$, 以 10 Hz 频率加载至试验件破坏。分别记录试验件的 N_{u2} , N_{u3} , ... 和剩余疲劳寿命 $N_{u\text{剩余}}$, 检测并记录试样破坏形貌, 进行破坏特性分析。

4) 按照步骤 1)、2)、3), 开展 $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷的腐蚀疲劳试验, 直至试验结束。

2 结果与分析

2.1 不同载荷条件下铝合金铆接结构腐蚀疲劳性能

$0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷下, 铝制铆钉连接试验件的疲劳寿命 $N_{P=0.3}$ 为 325 807, LZMDLJ11 试验件 (纳米涂料防护体系) 在腐蚀环境下其疲劳寿命下降至自身疲劳寿命的 22.56% 左右, GZLSLJ21 试验件 (2 层 TB06-9+1 层 TS96-71 防护体系) 下降至 22.32% 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。LZMDLJ11 试验件在 5%NaCl 盐雾环境下的 5 组腐蚀疲劳寿命值的变

异系数为 0.0034; GZLSLJ21 试验件为 0.0262, 符合 HB 5287—1996 的要求。同时对数腐蚀疲劳寿命数据都经过 H 检验法检验^[17], 试验数据合理有效。

$0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷下, 铝制铆钉连接试验件的疲劳寿命 $N_{P=0.25}$ 为 436 186, LZMDLJ12 试验件 (纳米涂料防护体系) 在腐蚀环境下其疲劳寿命下降至自身疲劳寿命的 24.73% 左右, GZLSLJ22 试验件 (2 层 TB06-9+1 层 TS96-71 防护体系) 下降至 23.77% 左右。LZMDLJ12 试验件在 5%NaCl 盐雾环境下的 5 组腐蚀疲劳寿命值的变异系数为 0.036; GZLSLJ22 试验件为 0.0235, 符合 HB 5287—1996 的要求。同时对数腐蚀疲劳寿命数据都经过 H 检验法检验^[17], 试验数据合理有效。

通过对比分析两种疲劳载荷条件下铝制铆钉连接试验件在 5%NaCl 盐雾环境下的腐蚀疲劳寿命, 5%NaCl 盐雾环境对铝制铆钉连接试验件腐蚀影响较为严重。两种疲劳载荷对试验件腐蚀疲劳性能影响比较而言, 腐蚀环境对 $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷下的腐蚀疲劳寿命影响较少。在“疲劳加载-腐蚀环境”交替循环模式下, 第 1 次加载的疲劳载荷作用对第 2 次疲劳载荷下的裂纹形成“滞后”作用, 符合“低载锻炼效应^[15]”。相较于 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷而言, $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷下腐蚀产生的“迟滞效应”更强, 使得铝合金铆接试验件腐蚀疲劳寿命值减低量少。

表 2 腐蚀疲劳试验后铆接结构试验的残余疲劳寿命

试验件类型	防护涂层及试验件编号	$N_{u\text{剩余}}$	$N_{u1}+N_{u2}+N_{u\text{剩余}}$	N_P	$(N_{u1}+N_{u2}+N_{u\text{剩余}})/N_P$	平均值	备注
$0.3P_{\text{破坏}}$	N1 涂层 (纳米涂料) LZMDLJ11	7 566	72 727	325 806	0.223 222	0.225 61	第二周期破坏
		10 330	75 491	325 806	0.231 705		第二周期破坏
		11 236	76 397	325 806	0.234 486		第二周期破坏
		3 988	69 149	325 806	0.212 24		第二周期破坏
		8 601	73 762	325 806	0.226 399		第二周期破坏
	(2 层 TB06-9+1 层含氟 磁漆 TS96-71) GZLSLJ21	4 431	69 592	325 806	0.213 6	0.223 24	第二周期破坏
		8 695	73 856	325 806	0.226 687		第二周期破坏
		9 302	74 463	325 806	0.228 55		第二周期破坏
		9 825	74 986	325 806	0.230 155		第二周期破坏
		8 607	73 768	325 806	0.226 417		第二周期破坏
$0.25P_{\text{破坏}}$	N1 涂层 (纳米涂料) LZMDLJ12	14 931	102 168	436 186	0.234 231 1	0.247 29	第二周期破坏
		20 561	107 798	436 186	0.247 139 2		第二周期破坏
		22 087	109 324	436 186	0.250 637 2		第二周期破坏
		26 713	113 950	436 186	0.261 243 4		第二周期破坏
		18 852	106 090	436 186	0.243 221 3		第二周期破坏
	(2 层 TB06-9+1 层含氟 磁漆 TS96-71) GZLSLJ22	18 932	106 169	436 186	0.243 403 1	0.237 71	第二周期破坏
		16 282	103 519	436 186	0.237 327 9		第二周期破坏
		17 549	104 786	436 186	0.240 233 2		第二周期破坏
		15 361	102 598	436 186	0.235 217 5		第二周期破坏
		14 118	101 356	436 186	0.232 368 1		第二周期破坏

2.2 试验结果分析

在 5%NaCl 盐雾环境下, 铝制铆钉连接试验件均在第二个周期的试验中破坏断裂, 疲劳破坏的位置均在试验件铆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。在 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷的腐蚀疲劳试验中, 铝制铆钉连接试验件通过纳米涂料和传统涂层(TB06-9 底漆+TS96-71 面漆)两种涂层的防护, 腐蚀疲劳寿命值下降为其疲劳寿命值的 22%左右。 $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷的腐蚀疲劳试验中, 两种涂层防护的腐蚀疲劳寿命值下降为其疲劳寿命值的 24%左右。说明铝制铆钉连接试验件在受到较大疲劳载荷作用下, 试验件紧固件孔壁与铆钉的涂层的破坏区域较多, 如图 3 所示。腐蚀介质穿过已经破坏的涂层, 破坏紧固件孔壁表面处理膜, 导致腐蚀介质与紧固件孔壁涂层内部金属基体接触, 铝合金材料中的阳极相在腐蚀环境下会发生电化学腐蚀。由于晶界中阳极相的存在, 腐蚀优先沿晶界扩展, 发生晶间腐蚀。同时腐蚀介质中 Cl^- 具有极强的穿透性, 会沿试样表面腐蚀方向继续向下发展, 形成点蚀坑。随着腐蚀时间的进一步延长, 点蚀坑数量增多, 面积不断增大。试验件在后面的疲劳加载过程中, 腐蚀环境试验形成的点蚀作为损伤源, 在试验件紧固件孔壁表面受交变载荷作用, 将形成方向性的损伤。这不仅加速了紧固件孔壁表面涂层和钝化膜的破裂, 而且紧固件孔壁蚀坑处应力集中会使疲劳损伤在蚀坑周围进一步扩展, 使材料产生沿晶开裂, 形成小裂纹, 并产生相互连接的趋势, 极大地促进铝合金孔壁腐蚀疲劳提前发生, 导致铝制铆钉连接试验件的腐蚀疲劳寿命值大幅减少。

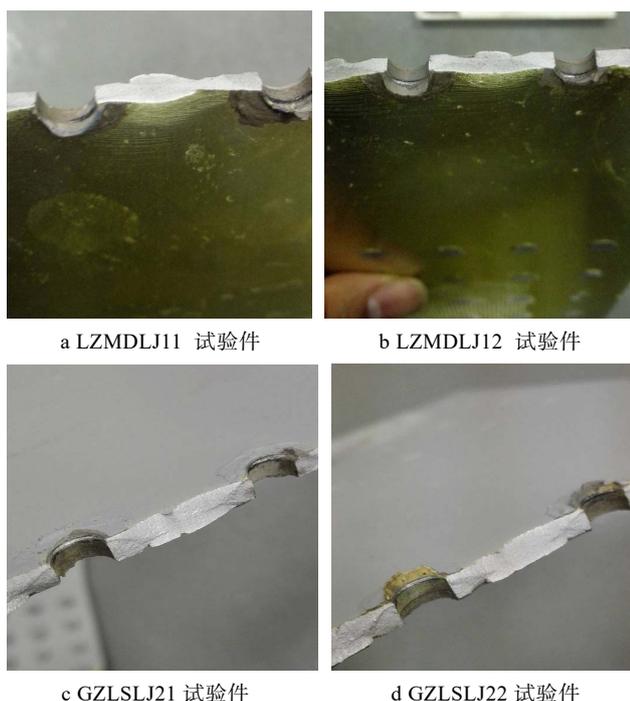
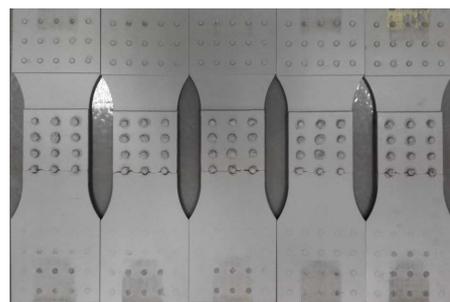
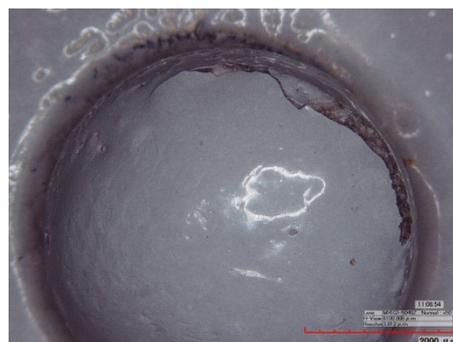


图 2 铝制铆钉铆接试验件腐蚀疲劳试验断口照片



a 宏观破坏照片



b 涂层微观破坏照片

图 3 GZLSLJ21 铝制铆钉铆接试验件破坏照片

开展 5%NaCl 盐雾环境下两种载荷下 2024 铝合金连接件的腐蚀疲劳试验, 对比 2024 铝合金连接件在两套涂层体系下的腐蚀疲劳寿命。针对纳米涂料试验件 LZMDLJ11、LZMDLJ12 与传统涂层试验件 GZLSLJ21、GZLSLJ22, 疲劳载荷为 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷时, LZMDLJ11 的腐蚀疲劳寿命下降到疲劳寿命 22.561%、GZLSLJ21 下降到 22.324%; 而疲劳载荷为 $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷时, LZMDLJ12 腐蚀疲劳寿命下降到疲劳寿命 24.729%, GZLSLJ22 下降到 23.771%。这说明在 5%NaCl 盐雾腐蚀环境下, 不同防护涂层对铝合金铆接结构腐蚀疲劳寿命有影响, 载荷的大小对铝合金铆接结构腐蚀疲劳寿命也有影响。在“疲劳加载-腐蚀环境”交替循环模式相同的情况下, 分别对比分析同种涂层在两种不同载荷作用下的腐蚀疲劳寿命, 两种涂层试验件均表现出在 $0.3P_{\text{破坏}}$ 的腐蚀疲劳寿命比 $0.25P_{\text{破坏}}$ 的寿命下降量大的特点。按照李昌范^[16]的预测模型, 在“疲劳加载-腐蚀环境”交替循环模式中, 30 天的 5%NaCl 盐雾环境试验前后两次加载 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷 (或者 $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷), 同时考虑了 5%NaCl 盐雾环境和载荷的共同作用, 相当于常规条件下的低-高两级加载。在两级载荷加载形式中, 第 1 次载荷相对第 2 次载荷都具有“低载锻炼效应”^[15], 能有效降低载荷对于试验件的腐蚀疲劳寿命影响。因此, “疲劳加载-腐蚀环境”交替循环模式下, 疲劳载荷大小对“低载锻炼效应”有影响, 在 5%NaCl 盐雾腐蚀环境下, 相较于 $0.3P_{\text{破坏}}$ 载荷而言, $0.25P_{\text{破坏}}$ 载荷下腐蚀产生的“迟滞效应”会增加。

3 结论

1) 5%NaCl 盐雾环境对于铝合金铆接结构的腐蚀疲劳寿命影响较大, 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概率, 降低了结构疲劳寿命。

2) 在 5%NaCl 盐雾腐蚀环境下, 纳米涂层和传统涂层 (TB06-9 底漆+TS96-71 面漆) 两种试验件, 相较于 $0.3P_{破坏}$ 载荷, $0.25P_{破坏}$ 载荷下腐蚀产生的“迟滞效应”会增加。

3) 疲劳载荷从涂层防护效果和腐蚀疲劳载荷锻炼效应两方面影响铝合金结构腐蚀疲劳性能, 因此, 结构的载荷大小对于结构涂层维护和日历寿命评定有重要影响。

参考文献:

- [1] 夏耘, 王勇刚. 铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(10): 15-19.
- [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] 秦剑波, 王生楠, 刘亚龙, 等. 腐蚀环境下 2024-T3 铝合金疲劳裂纹扩展和剩余强度实验研究[J]. 材料工程, 2006(3): 14-17.
- [4] 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(4): 42-44.
- [5] 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.
- [6] 刘祖铭, 曹定国, 吴有金, 等. 不同装配方法对 LY12CZ 铝合金典型螺接件腐蚀疲劳性能的影响[J]. 航空学报, 2003(2): 189-192.
- [7] 贺小帆, 刘文斑, 王忠波, 等. 预腐蚀对 30CrMnSiNi2A 连接件疲劳寿命影响的试验研究[J]. 机械强度, 2009, 31(4): 664-669.
- [8] 贺小帆, 刘文斑, 王忠波, 等. 预腐蚀对疲劳寿命分布特性及参数影响的初步研究[J]. 航空材料学报, 2007(6): 21-26.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 贺小帆, 杨洪源, 刘文斑. 预腐蚀疲劳退化加速因子研究[J]. 航空动力学报, 2008(7): 1328-1333.
- [12] 陈跃良, 卞贵学, 衣林, 等. 腐蚀和疲劳交替作用下飞机铝合金疲劳性能及断裂机理研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 73-79.
- [13] 张海威, 何宇廷, 范超华, 等. 腐蚀/疲劳交替作用下飞机金属材料疲劳寿命计算方法[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1114-1121.
- [14] 陈群志, 杨瑞琴, 李国元, 等. 腐蚀对 30CrMnSiNi2A 钢结构疲劳寿命的影响装备环境工程, 2007, 4(5): 7-10.
- [15] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 腐蚀环境下 LC4 铝合金疲劳损伤累积规律研究[J]. 航空学报, 2003(3): 234-236.
- [16] 李昌范, 何宇廷, 张胜, 等. 7B04-T6 铝合金腐蚀疲劳交替寿命预测模型[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1073-1080.
- [17] 赵连红, 刘元海, 王浩伟. 实验室加速腐蚀环境中 A286 口盖锁的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(12): 938-942.