# 腐蚀-动态疲劳寿命研究

## 李晗,魏小琴,王琪,赵阳,赵方超,张晋尚,周雪鹏,刘伟,黄文明

(西南技术工程研究所,重庆 400039)

摘要:目的研究飞机典型吊挂材料在腐蚀-疲劳动态环境下的寿命。方法 对装备服役环境因数进行统计分析,利用典型金属材料的当量腐蚀加速关系及折算系数设计加速试验环境谱,将40CrNiMoA 合金钢和2A12 铝合金放置在模拟海洋大气环境中,利用自制大气腐蚀-动态疲劳环境模拟试验装置,开展腐蚀-疲劳协同试验,测试2种材料的S-N曲线,快速评估飞机典型吊挂材料在热带海洋环境下服役的腐蚀-疲劳寿命。结果 在 pH=4 酸性盐溶液(5% NaCl+0.05% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.05% CaCl<sub>2</sub>)中喷淋4h(*t*=40℃)后再干燥4h(*t*=60℃),反复交替进行环境和疲劳试验后,利用线性模型对40CrNiMoA 合金钢和2A12 铝合金试验数据进行处理,得到在腐蚀疲劳协同作用下,10<sup>5</sup>循环周次对应的疲劳强度分别是906.2 MPa 和224.6 MPa,与纯粹的疲劳强度相比,下降了2个数量级。主要是由于在腐蚀环境下,盐雾在金属材料表面腐蚀形成了腐蚀坑,最终成为裂纹源,扩展至断裂。结论 飞机吊挂结构在热带海洋大气环境下服役时,由于腐蚀-疲劳协同作用,疲劳强度呈数量级降低。

关键词:热带海洋环境;40CrNiMoA 合金钢;2A12 铝合金;腐蚀-疲劳;失效机理;寿命 中图分类号:TJ04;TG172 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2024)12-0121-07 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.015

## Corrosion-Fatigue Life of Aircraft Suspension Materials in Tropical Marine Atmosphere

LI Han, WEI Xiaoqin<sup>\*</sup>, WANG Qi, ZHAO Yang, ZHAO Fangchao, ZHANG Jinshang, ZHOU Xuepeng, LIU Wei, HUANG Wenming

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the life of typical aircraft suspension materials under corrosion-fatigue dynamic environments. Statistical analysis was conducted on service environment factors. An accelerated test environment spectrum was designed by the equivalent corrosion acceleration relationship and the conversion factors for typical metal materials. 40CrNiMoA alloy steel and 2A12 aluminum alloy were placed in a simulated marine atmosphere environment. A self-made atmospheric corrosion-dynamic fatigue environment simulation test device was used to conduct corrosion-fatigue synergistic tests. The *S-N* curves of the two materials were tested to rapidly assess the corrosion-fatigue life of typical aircraft suspension materi-

收稿日期: 2024-08-13; 修订日期: 2024-09-06

Received: 2024-08-13; Revised: 2024-09-06

**引文格式:** 李晗, 魏小琴, 王琪, 等. 飞机典型吊挂材料热带海洋环境大气腐蚀-动态疲劳寿命研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 121-127. LI Han, WEI Xiaoqin, WANG Qi, et al. Corrosion-Fatigue Life of Aircraft Suspension Materials in Tropical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 121-127.

<sup>\*</sup>通信作者(Corresponding author)

als in a tropical marine environment. In a pH=4 acidic salt solution (5% NaCl+0.05% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.05% CaCl<sub>2</sub>), after spraying for 4 hours (t=40 °C) and then drying for 4 hours (t=60 °C), and repeatedly alternative environment and fatigue tests, the test data of 40CrNiMoA alloy steel and 2A12 aluminum alloy were processed with a linear model. Under the synergistic effect of corrosion and fatigue, the fatigue strength corresponding to 10<sup>5</sup> cycles was 906.2 MPa and 224.6 MPa, respectively, which decreased by two orders of magnitude compared to the strength under pure fatigue. The primary reason was that in the corrosive environment, salt spray corroded the metal surface, forming corrosion pits, which eventually became crack sources and propagated to fracture. When the aircraft suspension structure is used in a tropical marine atmosphere, the fatigue strength significantly decreases due to the synergistic effect of corrosion and fatigue.

**KEY WORDS:** tropical marine atmosphere; 40CrNiMoA alloy steel; 2A12 aluminum alloy; corrosion-fatigue; failure mechanism; life

在我国东南沿海地区服役的飞机,长期面临高 温、高湿、高盐雾及强太阳辐射等恶劣气候条件的挑 战,尤其是在飞机起飞和降落阶段,大量级冲击载荷 引起的循环、扰动应力与地面停放期间大气环境的腐 蚀共同作用。另一方面,飞机在持续飞行过程中,金 属材料会反复承受拉伸、压缩、弯曲等应力载荷作用, 导致飞机上的金属材料被腐蚀疲劳协同作用破坏<sup>[1-4]</sup>。 研究表明,在飞机吊挂结构几何形状不连续的应力集 中部位,若出现腐蚀坑等缺陷,断裂韧性会迅速降低, 最终导致疲劳断裂,严重影响飞机的服役寿命与安全 性<sup>[5-7]</sup>。因此,准确评估飞机吊挂结构的腐蚀疲劳寿命 至关重要,以便及时更换相关部件,保障飞行安全<sup>[8-9]</sup>。

目前,由于缺乏专用的腐蚀疲劳试验装置,国内 外通常将腐蚀和疲劳问题单独考虑,即先在单一或组 合环境中进行预腐蚀,再在疲劳试验机上进行疲劳测 试或简单叠加<sup>[10]</sup>。这种方法未能考虑腐蚀与疲劳的相 互影响及交变载荷对腐蚀的加速作用,导致所得的腐 蚀疲劳寿命值难以准确模拟飞机实际服役环境。刘建 武等<sup>[11]</sup>对 40CrNiMoA 钢的腐蚀疲劳行为进行了研 究,先在中性盐雾溶液中的腐蚀 480 h 后,再进行疲 劳性能测试,发现热喷涂碳化钨涂层有助于提升其腐 蚀疲劳性能。范镒等<sup>[12]</sup>研究了奥氏体不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀疲劳行为,发现在该种环境下, 奥氏体不锈钢 304、316、321 的疲劳性能有不同程度 的下降。张艳等<sup>[13]</sup>研究了不同表面 40Cr 钢在 3% NaCl 溶液中的腐蚀疲劳行为,发现不同的表面处理方式 (电镀锌铁合金、喷铝、化学镀镍等方式)可以提高 其疲劳寿命能力。陈晓峰等<sup>[14]</sup>研究了航空 AZ31 镁合 金腐蚀疲劳性能,将其浸入中性3.5% NaCl水溶液中, 其疲劳性能较空气中下降了 34.1%。谭玉娜等[15]对海 底管道用钢 X65 在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀疲劳行为 进行了研究,发现3.5% NaCl 溶液环境比空气体系下

的裂纹扩展阈值低 25%。还有许多学者<sup>[16-22]</sup>对多种金属合金材料的腐蚀/预腐蚀疲劳性能与腐蚀机理进行了研究。

利用自主研发的飞机吊挂结构腐蚀-疲劳环境模 拟试验装置<sup>[9]</sup>,能够模拟并强化多种大气环境腐蚀因 素与动态疲劳的协同作用,真实且快速地反映吊挂结 构的腐蚀疲劳性能变化规律。本文以 40CrNiMoA 合 金钢和 2A12 铝合金为对象进行腐蚀疲劳模拟试验, 结果显示,在腐蚀(pH=4 交替盐雾试验)和疲劳协同 作用下,40CrNiMoA 合金钢和 2A12 铝合金在 10<sup>5</sup>循环 周次 50%存活率下的疲劳强度分别为 906.2、224.6 MPa, 表明腐蚀-疲劳协同作用显著降低了这 2 种材料的疲 劳强度。

#### 1 试验

#### 1.1 样品

样品为 40CrNiMoA 合金钢棒状样(成分见表 1), 抗拉强度  $R_m$ 为 860 MPa, 屈服强度  $R_{p0.2}$ 为 740 MPa, 热处理淬火+回火,退火 HBc269,裸材表面  $Ra \leq 0.4 \mu m$ 。 样品形状和尺寸见图 1,样品 2A12 铝合金样品尺寸与 合金钢相同,热处理 T4 状态,详细信息见文献[9]。

#### 1.2 条件

腐蚀环境试验条件:本试验根据对服役环境因数数据的统计分析,再结合典型金属材料的当量腐蚀加速关系及折算系数关系,设计出实验室加速腐蚀环境试验条件<sup>[8,23]</sup>,pH=4 酸性盐溶液(5%NaCl+0.05% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.05% CaCl<sub>2</sub>),40 ℃下喷淋 4 h→40 ℃干燥4 h→…。2A12 铝合金试验:腐蚀 3 d→腐蚀疲劳 3 万 次→腐蚀 3 d→腐蚀疲劳 3 万次→…;40CrNiMoA 合金钢:腐蚀 6 d→腐蚀疲劳 6 万次→腐蚀 6 d→腐蚀疲

表 1	40CrNiMoA 合金钢各化学成分(质量分数	1,%	,)
-----	-------------------------	-----	----

Tab.1 Chemica	l composition	of 40CrNiMoA	alloy steel	(mass fraction,	%)
---------------	---------------	--------------	-------------	-----------------	----

С	Mn	Si	S	Р	Cr	Ni	Мо	Cu
0.40	0.65	0.25	0.013	0.012	0.81	1.48	0.19	< 0.05





劳 6 万次→…。疲劳试验施加载荷应力的具体条件 见表 2。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 断裂机理分析

将 40CrNiMoA 合金钢腐蚀疲劳断裂后的样品外 表面进行 XPS 测试,结果如图 2 所示。根据图 2 可 知,通过对 40CrNiMoA 合金钢外表面的 XPS 分析, 发现铁的结合能变为 712 eV,表明铁元素的价态发生 了变化,铁元素被氧化成 Fe<sup>2+</sup>。这说明在酸性腐蚀气 氛中,40CrNiMoA 合金钢外表面的金属材料被腐蚀, 形成裂纹源。

采用扫描电镜观察 40CrNiMoA 合金钢经过腐蚀 疲劳试验断裂后的断口形貌,如图 3 所示。结合图 2 和图 3 可以看出,40CrNiMoA 合金钢在酸性腐蚀气 氛中,外表面的金属首先被腐蚀,形成裂纹源。在循 环载荷作用下,材料表面发生滑移带的"挤出"和 "凹进"行为,随着循环次数的增加,这些滑移带 变得越来越密集,进一步导致应力集中,并引发微 裂纹的萌生。随着疲劳持续,裂纹源在高应力处由持 久滑移带成核,并受最大剪应力控制,形成的微裂纹 沿最大剪应力方向扩展。裂纹随后沿最大剪应力面 和最大拉应力面扩展,最终形成疲劳裂纹,直至发 生疲劳断裂。

Tab.2 Fatigue test conditions							
试验材料	应力水平/级	载荷幅/N	最大载荷/N	频率/Hz	加载波形	疲劳次数/循环周期	
	1	16 277.76	36 172.8				
	2	15 373.44	34 163.2				
40CrNiMoA 合金钢	3	14 921.28	33 158.4	6	正弦波	60 000	
	4	14 582.16	32 404.8				
	5	14 243.04	31 651.2				
	1	9 382.32	20 849.6				
	2	8 523.22	18 940.5				
2A12 铝合金	3	7 755.96	17 235.5	3	正弦波	30 000	
	4	6 420.67	14 268.2				
	5	5 832.86	12 961.9				

表 2 疲劳试验条件 Tab 2 Fatigue test conditions



图 2 40CrNiMoA XPS 测试图

Fig.2 XPS test diagram of 40CrNiMoA: a)XPS diagram of the outer surface; b)XPS diagram of Fe in the 40CrNiMoA

#### 2.2 腐蚀-疲劳寿命评估结果

#### 2.2.1 评估方法标准

根据 GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003 金属材 料疲劳试验数据统计方案与分析方法中 S-N 数据的

统计分析,利用线性数学模型对试验数据进行分析 处理:

$$x = b - ay \tag{1}$$

式中: 
$$x$$
为 log $N$ ;  $y$  为 log $S$ ;  $a$ 和  $b$ 为常数。  
 $\hat{\mu}_x = \hat{b} - \hat{a}$  (2)



c 裂纹源扩展区域

d 裂纹断裂区域

图 3 40CrNiMoA 合金钢断口扫描形貌图

Fig.3 SEM morphology of 40CrNiMoA alloy steel fracture: a) fracture morphology after corrosion-fatigue; b) fracture morphology of crack source zone; c) fracture morphology of crack propagation zone; d) fracture morphology of crack zone

$$\hat{a}_{x} = -\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})(y_{i} - \overline{y})}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}}$$
(3)

$$\hat{b} = \overline{x} + \hat{a}\overline{y} \tag{4}$$

 $\overline{x} + : \quad \overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i ; \quad \overline{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i \circ$ 

采用均值计算 S-N 曲线对数疲劳寿命的标准偏差:

$$\hat{\sigma}_{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ x_{i} - \left( \hat{b} - \hat{a} y_{i} \right) \right]^{2}}{n-2}}$$

$$\vec{x} \div : n-2 \ \vec{b} \doteq \pm \vec{c}_{0}$$
(5)

#### 2.2.2 评估结果

每种材料样品在不同应力水平下各测试 5 组试 验样品,记录每根试验样品断裂时的疲劳次数,试验 数据见表 3。

	Tab.3 Cycles o	f fatigue of samples under diff	erent stress	
试验材料	应力幅/MPa	均值循环次数(N)	均值对数寿命 logN	偏差
	720	165 690	5.219 094	0.016 345
	680	177 803	5.249 451	0.023 126
40CrNiMoA 合金钢	660	191 062	5.280 366	0.029 585
	645	197 072	5.294 406	0.015 432
	630	208 973	5.319 973	0.011 294
	416	12 868	4.108 205	0.037 626
	378	22 346	4.348 108	0.034 471
2A12 铝合金	344	29 002	4.461 143	0.036 909
	286	42 219	4.617 312	0.093 605
	274	76 713	4.881 501	0.060 246

表 3 不同应力下样品的疲劳次数

利用线性模型法对腐蚀疲劳数据进行处理,绘制 S-N曲线。利用最小二乘法,对表 3 中的数据进行拟 合,得到 40CrNiMoA 合金钢和 2A12 铝合金的 S-N 曲线,如图 4 所示,各项参数拟合结果见表 4。

表 4 40CrNiMoA 合金钢和 2A12 铝合金腐蚀–疲劳 <i>S</i> – <i>N</i> 曲线关系式							
Tab.4 Corrosion-fatigue S-N curve relationship of 40CrNiMoA alloy steel and 2A12 aluminum alloy							
试验材料	存活率/%	S=A×lgN+B	相关系数 R <sup>2</sup>	疲劳极限/MPa(N=10 <sup>5</sup> 次)			
40CrNiMoA 合全钢	50	S=-877.5×1gN+5 293.7	0.967 6	906.2			
HOCHNIMOA 日亚的	90	S=-569.5×1gN+3 632.6	0.618 3	785.1			
2412年合会	50	S=-216.8×1gN+1 308.6	0.942 2	224.6			
2A12 阳白壶	90	$S = -227.1 \times lgN + 1.314.3$	0.708.2	178.8			



图 4 S-N 曲线 Fig.4 S-N curve: a) 40CrNiMoA alloy steel; b) 2A12 aluminum alloy

利用最小二乘法对测试结果进行线性拟合, 2A12 铝合金在 50%的存活率下,疲劳寿命极限为 10<sup>5</sup> 周次时,其疲劳强度为 224.6 MPa;在 90%的存活率 下,疲劳寿命极限为 10<sup>5</sup> 周次时的疲劳强度为 178.8 MPa。0CrNiMoA 合金钢在 50%的存活率下,其 疲劳寿命极限为 10<sup>5</sup>周次时的疲劳强度为 906.2 MPa; 在 90%的存活率下,其疲劳寿命极限为 10<sup>5</sup>周次时的 疲劳强度为 785.1 MPa。

在纯疲劳试验中,2A12 铝合金在 50%的存活率下,其疲劳寿命极限为 10<sup>7</sup> 周次时的疲劳强度为 340 MPa。40CrNiMoA 合金钢在 50%的存活率下,其 疲劳寿命极限为 10<sup>7</sup> 周次时的疲劳强度为 830 MPa。与纯疲劳试验结果相比,腐蚀-疲劳协同试验后材料 的疲劳强度显著下降。

### 3 结论

1)在腐蚀-腐蚀疲劳交替试验中,2A12 铝合金 在 50%的存活率下,其疲劳寿命极限周次为 10<sup>5</sup>时的 疲劳强度为 224.6 MPa,而 40CrNiMoA 合金钢在相同 条件下的疲劳强度为 906.2 MPa。相比于材料在纯疲 劳试验中的性能,疲劳强度发生数量级的下降。

2)在腐蚀气氛中,金属材料的外表面先被腐蚀 而形成裂纹源。随着疲劳持续发生,裂纹源不断扩展 形成裂纹源,最后发生断裂。设计人员在材料选型阶 段应充分考虑腐蚀-疲劳协同作用对材料性能的影响 并增加材料防护工艺,提升材料的腐蚀疲劳寿命。

#### 参考文献:

- [1] 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳 研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.
  LI B, DONG L H, WANG H D, et al. Research Progress on Corrosion Fatigue of Aerospace Aluminum Alloy[J].
  Surface Technology, 2021, 50(7): 106-118.
- [2] TAN X M, CHEN Y L, JIN P. Corrosion Fatigue Life Prediction of Aircraft Structure Based on Fuzzy Reliability Approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(4): 346-351.
- [3] 陈群志,杨蕊琴,李国元,等. 腐蚀对 30CrMnSiNi2A
   钢结构疲劳寿命的影响[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5):
   7-9.

CHEN Q Z, YANG R Q, LI G Y, et al. Influence of Corrosion on Fatigue Life of 30CrMnSiNi2A Steel Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(5): 7-9.

- [4] 张丹峰, 谭晓明, 陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲 劳研究现状[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 5-8. ZHANG D F, TAN X M, CHEN Y L. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 5-8.
- [5] 蔡剑, 刘道新, 叶作彦, 等. 腐蚀与交变载荷循环作用

对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响[J]. 中国腐蚀与防 护学报, 2015, 35(1): 61-68.

CAI J, LIU D X, YE Z Y, et al. Influence of Cyclic Action of Corrosion and Alternate Load on Fatigue Life of 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(1): 61-68.

 [6] 杨祎,赵俊军,杨小奎,等.盐雾环境对军用飞机高强 螺栓疲劳极限的影响[J].装备环境工程,2017,14(3): 57-59.

> YANG Y, ZHAO J J, YANG X K, et al. Effects of Salt-Fog Environment on Fatigue Limit of High Strength Bolt for Military Airplane[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 57-59.

- [7] 穆志韬,金平,段成美.现役飞机结构腐蚀疲劳及寿命研究[J].中国工程科学,2000,2(4):34-38.
  MU Z T, JIN P, DUAN C M. The Corrosion Fatigue and Life of Aircraft Structure in Servicing[J]. Engineering Science, 2000, 2(4): 34-38.
- [8] 赵朋飞,辛燕,孙颉,等. 装备关重件腐蚀-疲劳环境/ 载荷试验谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 8-13.

ZHAO P F, XIN Y, SUN J, et al. Study on Compiling Method of Corrosion-Fatigue Environment & Load Test Spectrum for Materiel Key Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 8-13.

- [9] 魏小琴,李晗,蒲亚博,等 2A12 铝合金动态腐蚀-疲劳 耦合失效机理研究[J].表面技术,2021,50(8):359-365.
   WEI X Q, LI H, PU Y B, et al. Study on dynamic corrosion-fatigue coupling failure mechanical of 2A12 Aluminum alloy[J]. Surface technology,2021, 50(8):359-365.
- [10] 邢承亮,孙晓冉,安治国,等.腐蚀疲劳试验系统的开 发及应用[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(4): 39-42. XING C L, SUN X R, AN Z G, et al. Development and Application of Corrosion Fatigue Test System[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2021, 57(4): 39-42.
- [11] 刘建武,张雪莹,张吉阜,等.热喷涂碳化钨涂层对40CrNiMoA 钢耐腐蚀与抗疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 125-128.
  LIU J W, ZHANG X Y, ZHANG J F, et al. Effect of Thermal Sprayed Tungsten Carbide Coating on Corrosion Properties and Fatigue Resistance of 40CrNiMoA Steel[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 125-128.
- [12] 范镒, 苏豪展, 陈凯, 等. 奥氏体不锈钢在海水环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(7):
   67-74.

FAN Y, SU H Z, CHEN K, et al. Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior of Austenitic Stainless Steels in Seawater Environment[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(7): 67-74.

[13] 张艳, 章强, 谢凡. 表面处理对 40Cr 钢腐蚀疲劳寿命

的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(7): 609-612.

ZHANG Y, ZHANG Q, XIE F. Effects of Surface Treatments on Corrosion Fatigue Life of 40Cr Steel[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(7): 609-612.

- [14] 陈晓峰,堂万腾,唐维,等. 航空 AZ31 镁铝合金腐蚀 疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 66(22): 92-94.
  CHEN X F, TANG W T, TANG W, et al. Research on Corrosion Fatigue Properties of Aviation AZ31 Magnesium Alloy[J]. Hot working technology, 2017, 66(22): 92-94.
- [15] 谭玉娜, 余建星, 余杨, 等. 深海管道钢的腐蚀疲劳裂 纹扩展特性试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学 版), 2021, 51(6): 109-115.
  TAN Y N, YU J X, YU Y, et al. Experimental Study on Corrosion Fatigue Crack Propagation Characteristics of Deep Sea Pipeline Steel[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(6): 109-115.
- [16] 杨斌,陈吉,耿越,等. 2205 双相不锈钢在 NaCl 溶液中的疲劳裂纹扩展行为[J]. 材料保护, 2017, 50(9): 27-30. YANG B, CHEN J, GENG Y, et al. Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in NaCl Solution[J]. Materials Protection, 2017, 50(9): 27-30.
- [17] CUI T F, LIU D X, CAI J, et al. Effect of Pre-Corrosion and Corrosion/Fatigue Alternation Frequency on the Fatigue Life of 7B04-T6 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(24): 3869-3879.
- [18] GRELL D, WILKIN Y, GOSTIN P F, et al. Corrosion Fatigue Studies on a Bulk Glassy Zr-Based Alloy under Three-Point Bending[J]. Frontiers in Materials, 2017, 3: 60.
- [19] 张海威,何字廷,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.
  ZHANG H W, HE Y T, FAN C H, et al. Fatigue Life Prediction Method for Aircraft Metal Material under Alternative Corrosion/Fatigue Process[J]. ActaAeronauticaetAstronauticaSinica, 2013, 34(5): 1114-1121.
- [20] 李晓虹,何字廷,张腾,等.腐蚀/疲劳交替作用下 2A12-T4 铝合金的损伤特性[J]. 机械工程材料, 2015, 39(6): 62-66.
  LI X H, HE Y T, ZHANG T, et al. Damage Characteristics of 2A12-T4 Aluminum Alloy under Alternating Action of Corrosion and Fatigue[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(6): 62-66.
- [21] 赵朋飞, 郭文营, 陶阳, 等. 含镀层合金钢循环盐雾加 速腐蚀行为与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 236-246.

ZHAO P F, GUO W Y, TAO Y, et al. Accelerated Corrosion Behavior and Mechanism of Coated Alloy Ateel by Cyclic Salt-Spray Test[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 236-246.

14-21.

[22] 张宇,郑凯锋,衡俊霖,等. 耐候钢和高性能钢焊接接
 头腐蚀疲劳性能研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(7): 171-178.
 ZHANG Y, ZHENG K F, HENG J L, et al. Study on

Corrosion Fatigue Performance of Welded Joints of Weathering Steel and High Performance Steel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(7): 171-178.

[23] 赵朋飞,苏晓庆,吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速 腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO P F, SU X Q, WU J S. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12):