

高强度铝合金典型沿海地区腐蚀行为 加速试验方法研究

崔腾飞^{1,2}, 刘道新², 徐星辰¹, 何宇廷³

(1.中国直升机设计研究所 综合技术研究室, 江西 景德镇 333000; 2.西北工业大学 腐蚀与防护研究所, 西安 710072; 3.空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: **目的** 构建适用于高强度铝合金在某工业海洋性气候地区的加速腐蚀试验方法。**方法** 选用飞机结构用典型高强度铝合金 7B04-T6 为试验材料, 进行实验室加速腐蚀试验与某工业地区海洋大气环境曝晒试验, 并对试验后的试样进行疲劳性能评价。通过平均腐蚀速率测试、腐蚀形态特征观察、疲劳断口特征分析, 腐蚀加速倍率计算, 对两种形式腐蚀铝合金的腐蚀机理和疲劳破坏行为等进行综合对比。**结果** 经历实验室加速腐蚀试验与海洋大气环境曝晒试验后, 7B04-T6 铝合金的质量损失率基本相等, 腐蚀形貌相近, 疲劳断口特征一致, 因而两种腐蚀模式一致, 机理相同。**结论** 所编制的实验室加速环境谱与试验方法, 能够较好地用于某工业海洋性气候地区高强度铝合金材料和结构的环境损伤加速试验, 实验室与外场海洋大气环境曝晒试验的加速比为 97.64。

关键词: 高强度铝合金; 沿海大气腐蚀环境; 环境谱; 疲劳; 加速试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.005

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0033-07

Accelerated Test Method for High Strength Aluminum Alloy in Typical Coastal Area

CUI Teng-fei^{1,2}, LIU Dao-xin², XU Xing-chen¹, HE Yu-ting³

(1. Integrated Technology Research Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333000, China; 2. Corrosion and Protection Research Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Institute of Aerospace Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

ABSTRACT: The paper aims to establish a test method for accelerated corrosion test of high strength aluminum alloys in an industrial marine climate area. Typical high strength 7B04-T6 aluminum alloys for aircraft structure was used for laboratory accelerated corrosion test and atmospheric environment exposure corrosion test. After test, the fatigue property of the sample was evaluated. By average corrosion rate test, corrosion morphology observation and fatigue fracture feature analysis, and corrosion acceleration ratio calculation, the corrosion mechanism and fatigue failure behavior of two types of aluminium alloy were

收稿日期: 2019-04-23; 修订日期: 2019-04-28

Received: 2019-04-23; **Revised:** 2019-04-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51771155); 装备预研领域基金 (61409220202)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51771155) and Equipment Pre Research Fund (61409220202)

作者简介: 崔腾飞 (1987—), 男, 博士, 主要研究方向为装备环境工程与腐蚀控制。

Biography: CUI Teng-fei (1987—), Male, Doctor, Research focus: equipment environmental engineering and corrosion control.

通讯作者: 刘道新 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为装备环境工程与腐蚀控制。

Corresponding author: LIU Dao-xin (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: equipment environmental engineering and corrosion control.

comprehensively compared. The corrosion mode of 7B04-T6 aluminum alloy that undergone accelerated corrosion in laboratory and exposure atmospheric environmental was same. Their mass loss rates were basically the same. Their corrosion morphologies were similar and their fatigue fracture characteristics were consistent. So, the laboratory accelerated environmental spectra and test method could be used as an accelerated test method of high strength aluminum alloy material and structure in an industrial marine climate area. The accelerative ration of laboratory and field exposure is 97.64.

KEY WORDS: high strength aluminium alloy; the coastal atmosphere corrodes environment; environment spectrum; fatigue; accelerated test

飞机在沿海地区服役时,受到高温、高湿、高盐雾海洋大气环境的影响,高强度铝合金承力结构极易受到腐蚀损伤^[1-2],由此大大降低飞机结构的强度和使用寿命。飞机结构服役的特点是地面长时间停放承受大气腐蚀作用,飞机飞行期间则承受疲劳载荷的作用。因此腐蚀和疲劳交替作用是铝合金结构服役的主要损伤形式,目前针对性地构建载荷/环境谱是预测结构件寿命的主要手段^[3-6]。载荷环境谱的编制方法很多,而美国空军编制的针对亚热带地区带涂层体系的载荷/环境谱(CASS谱)较为合理,因此在编制环境谱时,多为参考CASS谱来建立谱的相关模块^[7]。影响金属材料大气腐蚀行为的主要环境因素包括Cl⁻浓度、pH、温度、腐蚀时间、紫外线照射强度、热冲击强度等。构建实验室加速环境谱时,必须充分考虑这些因素^[8-9],同时需要进行实验室和典型环境地区大气暴晒对比试验。目前主要的研究工作是单一因素对材料和构件寿命的影响规律和作用机理^[10-13],以飞机用典型高强度铝合金结构材料在海洋服役环境下的损伤和寿命为背景的多因素环境谱的研究工作尚较少见报道。为此,文中选用飞机结构用7B04-T6典型高强度铝合金为研究对象,编制适用于某工业海洋性气候地区服役高强度铝合金飞机结构的加速试验环境谱。拟通过1个周期的实验室加速腐蚀试验,模拟某工业海洋性气候地区大气暴露1年的外场试验。通过对实验室加速腐蚀试验和外场暴晒试验试样失效模式、机理和疲劳行为的对比研究,确定加速试验的合理性及其加速当量关系。

1 试验

1.1 材料及试样尺寸

试验选用3 mm厚的7B04-T6铝合金板材,其化学成分见表1。热处理制度为490℃淬火+人工时效。力学性能:屈服强度为537 MPa,断裂强度为

表1 7B04-T6铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7b04-t6 aluminium alloy

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
2.0	2.8	0.6	0.15	0.10	6.5	0.05	余量

596 MPa,伸长率为11%。疲劳试样尺寸如图1所示。

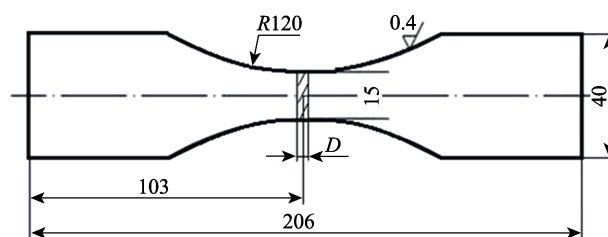


图1 疲劳试样尺寸

Fig.1 Size of fatigue sample

1.2 典型工业海洋性气候地区加速腐蚀环境谱

某沿海地区的环境为典型的暖温海洋性气候环境,年平均气温为13.4℃左右,年平均相对湿度为73%左右,全年环境温差较低。这一地区不仅有海洋性气候的特征,还受工业环境的影响。由于靠近海洋,大气环境中含有的Cl⁻等侵蚀性离子的浓度较高,湿度较大。工业性环境中,由于受污染物排放的影响,还有一定量的SO₃²⁻、SO₄²⁻、NO_x等腐蚀性离子,在雨水和潮湿环境的作用下,使降水偏酸性。再加上飞机高速机动过程中造成的结构温升,需要考虑热冲击的影响。结合美军CASS谱编制及相应的环境特点,编制某工业海洋性地区环境谱,最终确定加速试验环境谱的循环组成模块包括:盐雾腐蚀+热冲击。盐雾腐蚀连续试验时间为90 h,温度为40℃,溶液为5%NaCl(用稀硫酸调整pH值为4);热冲击1 h,温度为149℃。认为上述试验进行1个周期所造成的复试损伤相当于某工业海洋性地区外场暴晒试验1年的当量。

1.3 试验方法

试样试验前经水砂纸逐级打磨至1000#,丙酮超声波清洗除油。外场暴露试验在国内某典型工业海洋地区大气环境试验站进行,暴晒试验时间为1年。实验室加速腐蚀试验依据1.2节所编某工业海洋大气地区环境谱进行,加速试验时间为1个循环周期。

对于经历外场暴晒试验和实验室加速腐蚀试验的试样分别进行疲劳试验。疲劳试验在GPS100高频疲劳试验机上进行,加载方式为拉-拉方式,应力比R

取 0.06。根据测试的 7B04-T6 铝合金最大交变应力-寿命 ($S-N$) 曲线及飞机典型结构受力特点, 疲劳试验的最大应力 σ 分别选取 150、180、210、240 MPa 四个水平。疲劳试验在室温大气环境进行, 平行试样 3 件。

对于试验后的腐蚀试样采用 SHIMADZU-AUW-220D 型电子分析天平 (精度为 0.01 mg) 测量其质量损失。采用体视显微镜观察低倍形貌, 利用 JSM-6290 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样表面的微观腐蚀形貌和断口形貌。

表 2 某沿海地区室外环境和实验室加速环境腐蚀后试样的质量损失

Tab.2 Quality loss of samples after outdoor environment and laboratory accelerated environment corrosion in a coastal area

环境	腐蚀前/g	腐蚀后/g	质量损失/($\times 10^{-2}$ g)	单位面积质量损失/($\times 10^{-2}$ g $\cdot$ cm $^{-2}$)
暴露试验	36.7509	36.69654	5.432	4.983
加速试验	36.7510	36.7106	5.441	4.991

2.2 疲劳寿命对比

经过外场暴晒 1 年和实验室加速腐蚀 1 周期后, 试样疲劳寿命的测试结果分别如图 2 所示。可以看到, 两种状态 7B04-T6 铝合金试样的疲劳寿命均呈现出随应力水平升高而降低的普遍规律^[10], 并且平行试样疲劳寿命的分散性不是十分显著。在所选择的 4 个应力水平试验条件下, 两种腐蚀历程的试样疲劳寿命的一致性良好, 可以说明两种腐蚀所造成的腐蚀损伤相同, 对 7B04-T6 铝合金疲劳寿命的影响规律相同。即文中所编制的加速环境试验谱与某工业海洋性气候地区的实际环境对 7B04-T6 铝合金所造成的的损伤相同, 所编制的环境谱是合适的。

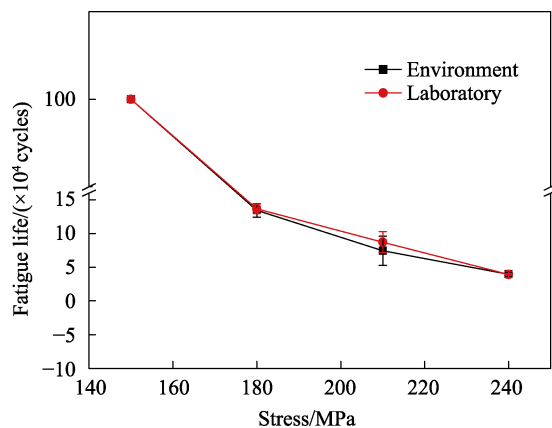


图 2 某沿海地区外场暴露和实验室腐蚀后铝合金试样的疲劳寿命

Fig.2 Fatigue life of aluminum alloy samples after field exposure and laboratory corrosion in a coastal area

2.3 实验室试验加速倍率

7B04-T6 铝合金试样平均腐蚀电流密度的折算

2 结果与讨论

2.1 试样腐蚀质量损失

经历外场暴晒试验和实验室加速腐蚀试验后, 试样的腐蚀质量损失见表 2。从表 2 可以看出, 经过外场暴露试验和实验室加速试验后, 试样的质量损失和质量损失率十分接近。由此表明, 海洋大气暴晒试验和实验室加速试验造成的 7B04-T6 铝合金平均腐蚀速率一致。

系数为 97.33, 编谱时间的折算系数为 97.64。其中, 时间折算系数表示在未进行外场试验时, 通过相关数据编谱后, 得到的外场暴晒 1 年时间和实验室加速腐蚀一个周期时间 (90 h) 的比值, 代表环境谱的设计加速比。平均电流密度折算系数是通过测量经过外场环境暴晒和实验室加速腐蚀试验后 7B04-T6 铝合金的质量损失, 利用法拉第定律计算得到, 代表环境谱的实际加速比。两种加速比基本相同, 可以说明环境谱的设计加速比和实验后得到的实际加速比基本相同, 即所编制的加速试验环境谱加速效果较为合理。

2.4 宏观和微观形态特征

经过外场环境暴晒试验 1 年和实验室加速腐蚀试验 1 周期后, 7B04-T6 铝合金疲劳试样的宏观形貌如图 3 所示。可以看出, 经过两种形式的腐蚀后, 铝合金试样表面均发生了严重的腐蚀, 以点蚀现象为主。经过外场暴晒后, 基本没有腐蚀产物覆盖在试样表面, 而经过加速腐蚀后, 有少量松散的腐蚀产物出现。这主要是因为在在外场暴晒试验中, 气候环境多变, 腐蚀生成的腐蚀产物被雨水冲刷掉, 很难稳定存在于试样表面。实验室加速试验中, 环境因素较为单一, 试样大部分时间在盐雾试验箱中, 腐蚀产物生成后不易流失, 最终存留在试样表面。

经过外场环境暴晒试验 1 年和实验室加速腐蚀试验 1 周期后, 7B04-T6 铝合金试样表面的微观形貌如图 4 所示。可以看出, 两种试样的腐蚀损伤都以点蚀为主, 且表面有腐蚀产物覆盖。经过实验室加速试验后, 试样表面的腐蚀产物较多, 而经过外场暴晒试验后的产物较薄, 腐蚀产物均有部分位置开裂。总体上, 经过两种形式的腐蚀后, 试样微观形貌基本相同。

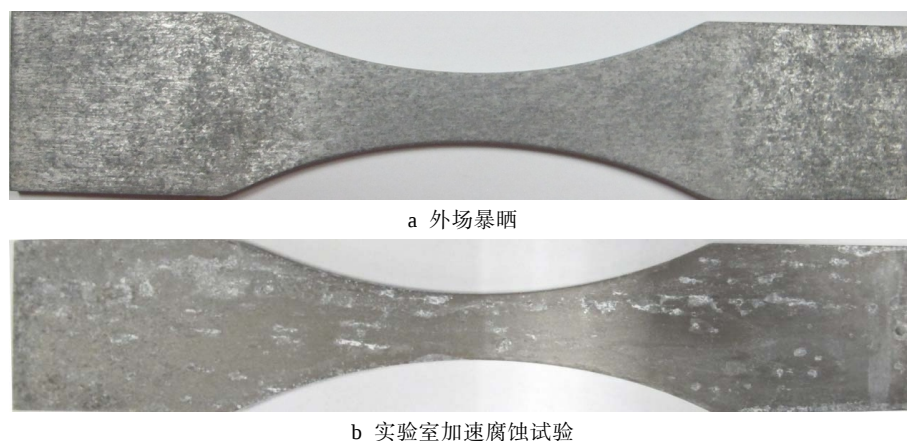


图3 经过外场暴晒和实验室加速腐蚀试验后试样的宏观形貌

Fig.3 Macroscopic appearance of sample after (a) field exposure and (b) laboratory accelerated corrosion test

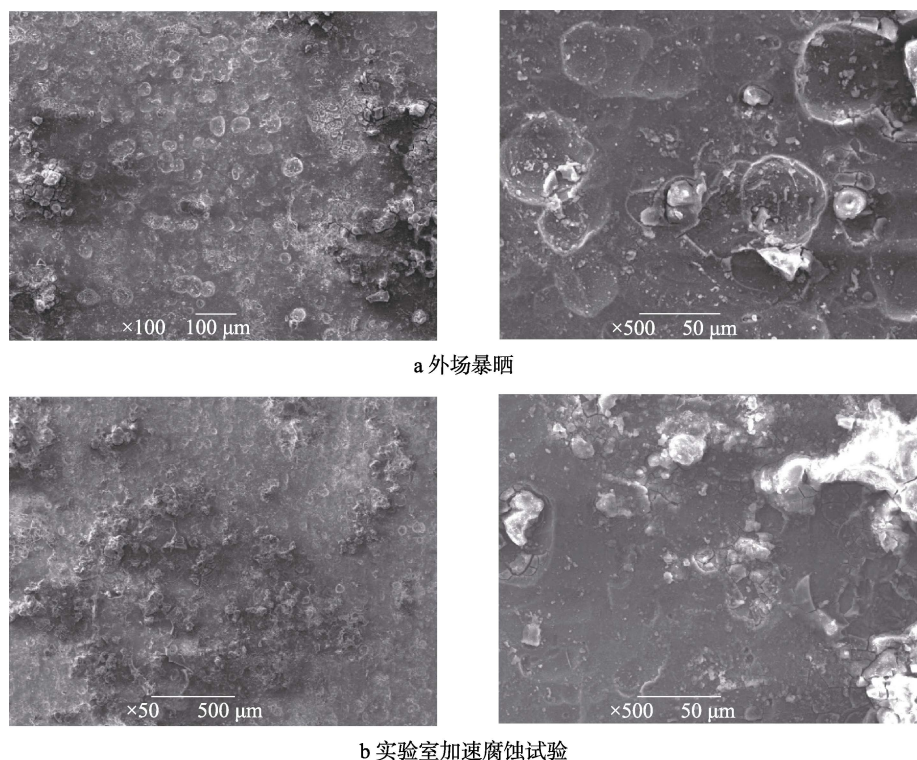


图4 经过外场暴晒和实验室加速腐蚀试验后试样的微观形貌

Fig.4 Microstructure of sample after (a) field exposure and (b) laboratory accelerated corrosion test

两种环境下试验试样的截面形貌如图5所示。可以看出,经过外场暴晒试验和实验室加速试验后,铝合金均以点蚀损伤为主,截面上有深度不一的蚀坑,点蚀坑周围和底部有平行于轧制方向的裂纹出现。这是因为腐蚀一般沿晶界发生,晶界腐蚀后,腐蚀产物的体积较大,楔入晶界会造成内应力,造成晶粒剥离,即轧制铝合金发生了剥离腐蚀(简称剥蚀)破坏现象,铝合金的点蚀与剥蚀常常有直接的关联^[14]。由此表明,在Cl⁻浓度高的腐蚀环境下,轧制7B04-T6铝合金对点蚀、晶间腐蚀、剥离腐蚀均较敏感。同时看到,工业海洋性气候地区外场暴晒试验试样与实验室加速试验试样的腐蚀形式基本相同,腐蚀机理一致,即

以点蚀为主,逐步向晶间腐蚀和剥蚀发展。腐蚀形式和腐蚀机理是否相同,是评定实验室加速试验是否能够代表室外暴晒试验的重要判据。

经过外场暴晒试验和实验室加速试验后,在不同应力水平下,对7B04-T6铝合金试样进行疲劳试验,试样疲劳断口的形貌如图6所示。可以看出,疲劳断口表现出相同的特征,都存在点蚀坑造成的疲劳源区、较为平坦疲劳裂纹稳定扩展区和由大量韧窝组成的瞬断区。在所有的疲劳试验中,裂纹源均为试样棱角处的点蚀坑。可见应力集中结合腐蚀损伤,是成为疲劳起源的重要因素。蚀坑形成后,会继续遭受腐蚀介质的作用,因此蚀坑被腐蚀产物覆盖。疲劳的扩展一

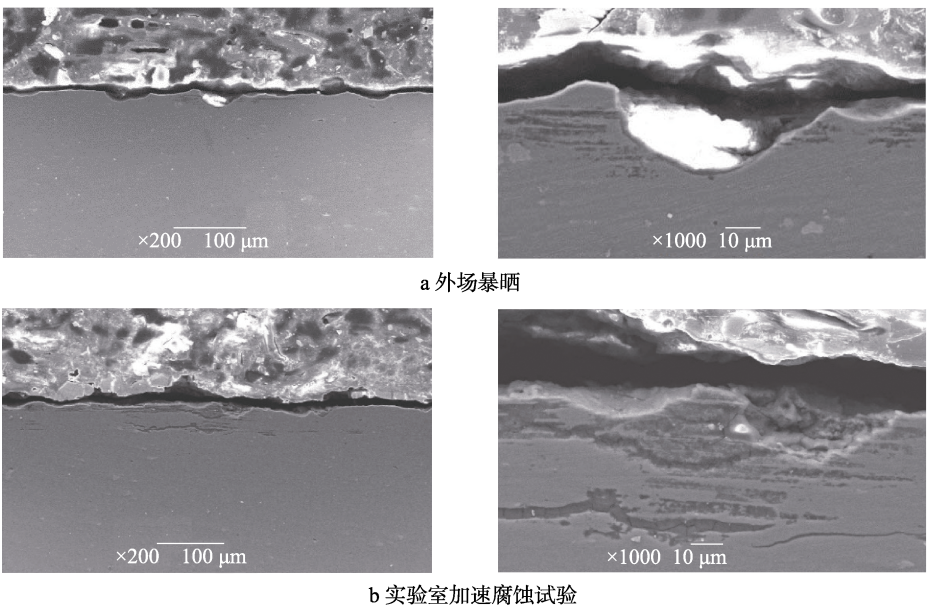
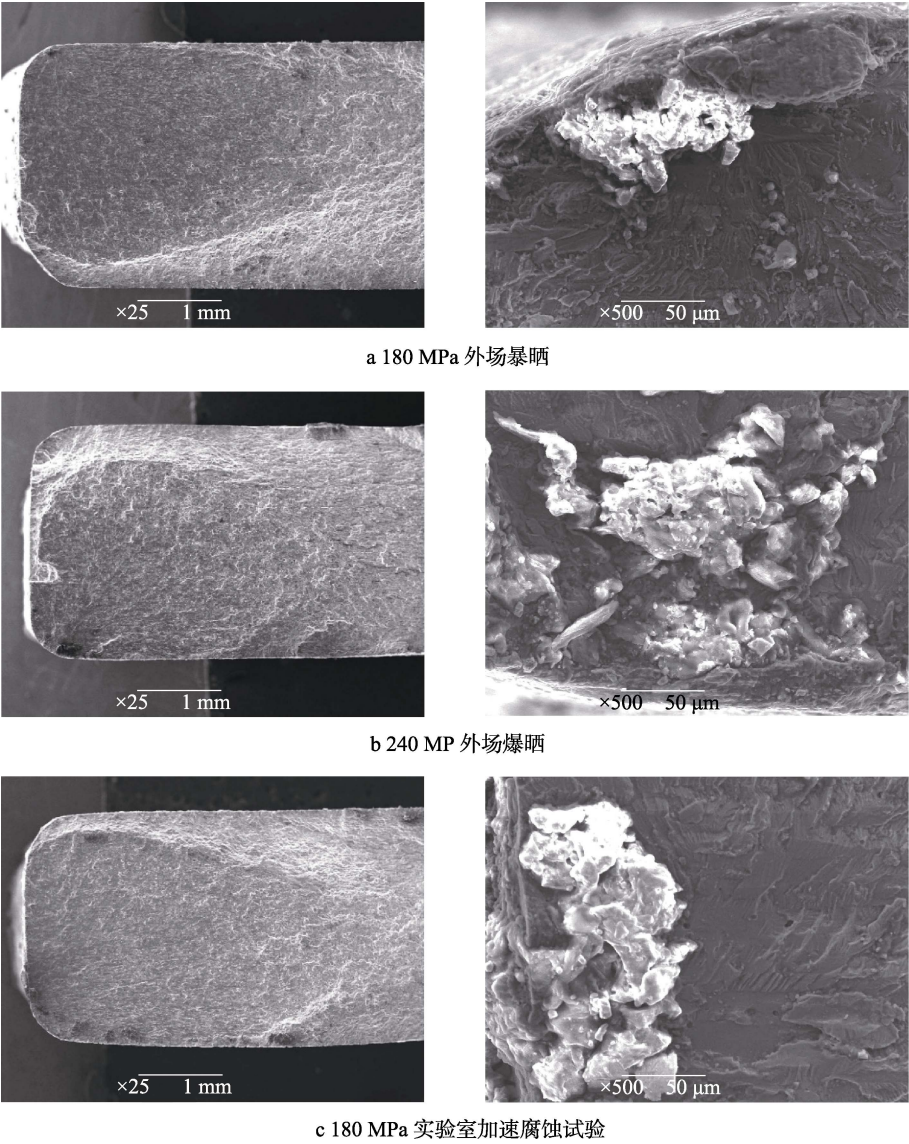
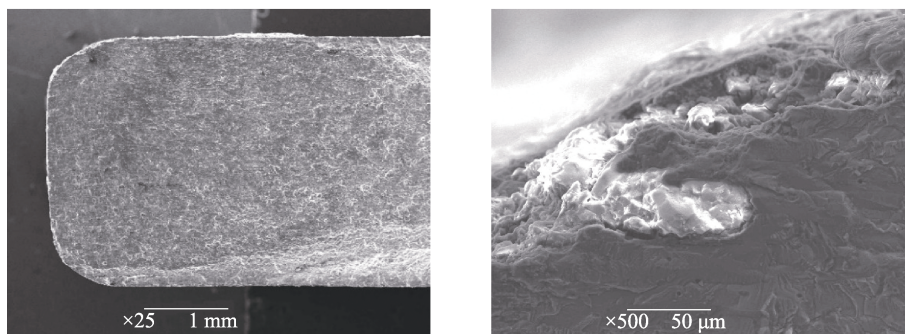


图 5 经过外场暴晒和实验室加速腐蚀试验后试样的截面形貌
Fig.5 Section morphology of sample after (a) field exposure and (b) laboratory accelerated corrosion test





d 240 MPa 实验室加速腐蚀试验

图6 经过外场暴晒和实验室加速腐蚀试验后试样的疲劳断口形貌

Fig.6 Fatigue fracture morphology of samples after (a-b) field exposure and (c-d) laboratory accelerated corrosion test

般以准解理的方式进行,逐渐向试样纵深处发展^[15]。在同等应力水平下,经过外场暴晒和经过实验室加速腐蚀试验后,试样疲劳裂纹稳定扩展区的面积基本相同,这也与试样疲劳寿命的结果一致。可见两种腐蚀所造成的腐蚀损伤基本相同,对疲劳寿命的影响规律和影响机理也基本相同。

2.5 讨论

7B04 铝合金在平常的环境中本身具有较好的耐腐蚀性,但是在含侵蚀性离子,如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等环境中,由于表面钝化膜的某些薄弱位置被破坏,与未破坏的区域形成大阴极-小阳极的微腐蚀电池,再加上自催化作用,会发生较为明显的点蚀。试验采用的 7B04 铝合金试样取自轧制板材,存在明显的织构现象。晶粒沿试样轧制方向拉长,易于发生剥蚀现象。剥蚀与点蚀相互促进,导致局部产生较深的蚀坑,由此易于引发疲劳裂纹的形成,进而导致疲劳性能下降^[16]。

3 结论

1) 7B04-T6 铝合金在某工业海洋性大气环境中的腐蚀行为以剥蚀、点蚀为主要破坏模式,由此促进疲劳裂纹的萌生和扩展。此归因于海洋大气环境中含有酸性 NaCl 介质和轧制 7B04-T6 铝合金对剥蚀和点蚀较为敏感的缘故。

2) 依据某工业海洋大气环境因素所编制的环境谱由“盐雾腐蚀+热冲击”模块组成。盐雾腐蚀介质为 pH=4 的 5%NaCl 水溶液,温度为 40℃,连续试验时间为 90 h;热冲击时间为 1 h,温度为 149℃。上述实验室加速试验 1 个周期相当于某工业海洋性地区外场暴晒试验 1 年的当量,加速系数为 97.33。

3) 实验室加速腐蚀试验试样与某沿海地区的大气暴晒试验试样的腐蚀模式一致,机理相同,腐蚀规律一致,损伤特征相似,损伤程度和疲劳寿命十分接近,即所编制的环境谱和建立的试验方法能够较好地用于某工业海洋性大气环境中高强度铝合金结构的环境耐久性评价。

参考文献:

- [1] 张晓云,孙志华,刘明辉,等.环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2007,26(6): 354-362.
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, LIU Ming-hui, et al. Influence of Different Environments on Stress Corrosion Cracking of High Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 26(6): 354-362.
- [2] 崔继红,蔡建平,贾成厂.盐雾环境下高强度铝合金的点蚀行为[J].中国腐蚀防护学报,2010,30(3): 197-202.
CUI Ji-hong, Cai Jian-ping, Jia Cheng-chang. Pitting Corrosion of High Strength Aluminum Alloys in Salt Spray Test[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(3): 197-202.
- [3] 李玉海,刘文斑,贾国荣.军用飞机结构日历寿命体系评定应用范例[M].北京:航空工业出版社,2005.
LI Yu-hai, LIU Wen-ban, JIA Guo-rong. Application Example of Calendar Life System Assessment for Military Aircraft Structure[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [4] HOSNI E, EL-HOUD A, EL-SHAWEH F. A Study on the Corrosion Behavior of Aluminum Alloys in Seawater [J]. Materials and Design, 2008, 29(5): 801-805.
- [5] PRASANTA K R, GHOSH M M, GHOSH K S. Effect of Solution pH on Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behavior of a7150Al-Zn-Mg-Cu Alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 604(4): 156-165.
- [6] 杨洪源,刘文斑.民机结构外露关键部位涂层加速腐蚀环境谱研究[J].航空学报,2007(1): 90-93.
YANG Hong-yuan, LIU Wen-ban. Accelerated Corrosion Environmental Spectra of Surface Coating of Civil Aircraft Structure[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica. 2007(1): 90-93.
- [7] 蒋祖国,田丁栓,周占廷.飞机结构载荷/环境谱[M].北京:电子工业出版社,2012.
JIANG Zu-guo, TIAN Ding-shuan, ZHOU Zhan-ting. Aircraft Structural Load/Environmental Spectrum[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.

- [8] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. $\times$ 飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 24-29.
ZHANG Yong, CHEN Yue-liang, FAN Wei-jie, et al. Equivalent Accelerated Relationship of Local Environment Spectrum of Semi-closed Parts of a Plane[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 24-29.
- [9] 邓斌, 易丹青, 杨胜, 等. 2E12 铝合金加速腐蚀环境谱下的疲劳裂纹扩展[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(5): 770-773.
DENG Bin, YI Dan-qing, YANG Sheng, et al. Effect of Accelerated Corrosive Environment Spectrum on Fatigue Crack Growth of 2E12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(5): 770-773.
- [10] BARTER S A, MOLENT L. Fatigue Cracking from a Corrosion Pit in an Aircraft Bulkhead[J]. Engineering Failure Analysis 2014, 39(3): 155-163.
- [11] DAN Z H, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 57(1): 22-29.
- [12] 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 Jian, LIU Dao-xin, YE Zuo-yan, 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.
- [13] 李涛, 李晓刚, 董超芳, 等. Cl^- 含量对 2A12 铝合金初期腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 1576-1582.
LI Tao, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Influence of Cl^- Concentration on the Initial Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(12): 1576-1582.
- [14] 李晓宁, 李云涛, 包俊成, 等. 2024 铝合金在模拟大气环境下的腐蚀性分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(16): 93-95.
LI Xiao-ning, LI Yun-tao, BAO Jun-cheng, et al. Analysis on Corrosion Behavior of 2024 Al Alloy in Simulated Atmosphere[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(16): 93-95.
- [15] PAO P S, GILL S J, FENG C R. On Fatigue Crack Initiation from Corrosion Pits in 7075-T7351 Aluminum Alloy[J]. Scripta Materias, 2000, 43(5): 391-396.
- [16] 陈跃良, 卞贵学, 衣林, 等. 腐蚀与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): 66-72.
CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, YI Lin, et al. Research on Fatigue Characteristic and Fracture Mechanics of Aluminum Alloy under Alternate Action of Corrosion and Fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 66-72.