

腐蚀坑对疲劳裂纹扩展的影响分析

陈定海^{1,2}, 穆志韬¹, 朱做涛², 丁文勇¹

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041;
2. 中国人民解放军海军91049部队, 山东 青岛 266102)

摘要: 利用显微镜测量了经过预腐蚀的6051铝合金材料的腐蚀坑三维形貌, 分析了腐蚀坑截面形状, 腐蚀坑近似为半椭球形。基于AFGROW软件分析疲劳裂纹扩展寿命, 腐蚀坑深度与宽度对疲劳裂纹扩展寿命影响较大, 随着腐蚀坑深宽比增加, 疲劳裂纹扩展寿命趋于稳定, 腐蚀坑的深度相对于宽度对裂纹扩展寿命影响更大。

关键词: 铝合金; 腐蚀坑; 腐蚀形貌; 裂纹扩展寿命

中图分类号: V215.5; V216.5⁺7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)04-0004-04

Analysis of Corrosion Pitting Effect on Fatigue Crack Growth

CHEN Ding-hai^{1,2}, MU Zhi-tao¹, ZHU Zuo-tao², DING Wen-yong¹

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China;
2. Unit 91049 of PLA, Qingdao 266102, China)

Abstract: Three-dimensional size of corrosion pitting of 6051 aluminum was measured by KH-7700 microscope. The cross-section morphology of corrosion pitting was analyzed, and the corrosion pitting can be approximated to a semi-ellipsoid. Fatigue crack growth life was analyzed with AFGROW. The results showed that pitting depth and width both have significant effect on fatigue crack growth life; with the increase of ratio of pitting depth and width, the fatigue crack growth life tended to be stable; and the pitting depth has greater effect on fatigue crack growth life than the width.

Key words: aluminum alloy; corrosion pitting; corrosion morphology; crack growth life

海军飞机多在沿海地区服役, 其服役环境恶劣(高温、高湿、高盐雾)。随着服役年限增加, 飞机结构材料出现多种形态的腐蚀损伤, 对飞机安全构成严重威胁^[1-2]。飞机结构材料表面的腐蚀主要是点蚀和应力腐蚀, 腐蚀坑的存在导致表面应力集中,

在循环载荷作用下, 腐蚀坑容易形成疲劳源, 从而影响飞机结构材料疲劳特性。通常将腐蚀坑近似成圆锥形、半球形、半椭球形等^[3-5], 且将腐蚀坑沿垂直于外载荷方向进行投影, 使其等效成具有相同寿命的表面裂纹^[6-7]。

收稿日期: 2012-03-13

作者简介: 陈定海(1977—), 男, 福建武夷山人, 博士研究生, 主要研究方向为飞机结构腐蚀疲劳及可靠性。

笔者利用KH-7700三维显微镜测量腐蚀坑形貌,分析腐蚀坑截面(截面垂直于外载荷方向,并经过腐蚀坑最大深度),将腐蚀坑等效成具有相同寿命的表面裂纹,并利用AFGRO软件分析腐蚀坑深度与宽度对疲劳裂纹扩展寿命的影响。

1 预腐蚀试验

试验件材料为6051铝合金,其规格如图1所示。

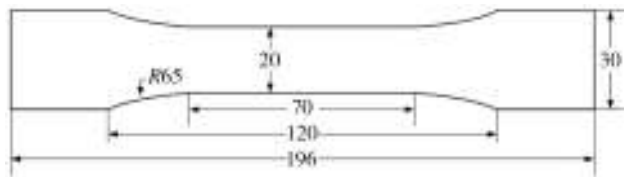


图1 试验件尺寸
Fig. 1 Specimen size

加速腐蚀试验采用以某沿海机场环境谱为基础的加速腐蚀试验谱,工作温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为90%,腐蚀溶液是5%(质量分数,后同) NaCl溶液,加入少量稀硫酸,使溶液的pH值达到4~4.5,采用周期浸润方法,浸泡时间为7.5 min,烘烤时间为10.5 min,每18 min为1个周期,循环255个周期相当于外场腐蚀1 a。每加速腐蚀1 a取出3个试验件,根据GB/T 16545—1996《腐蚀试样上腐蚀产物的清除》,清除腐蚀产物,用蒸馏水洗净,烘干。不同腐蚀日历年限下试验件表面腐蚀损伤(斑坑)情况对比如图2所示。

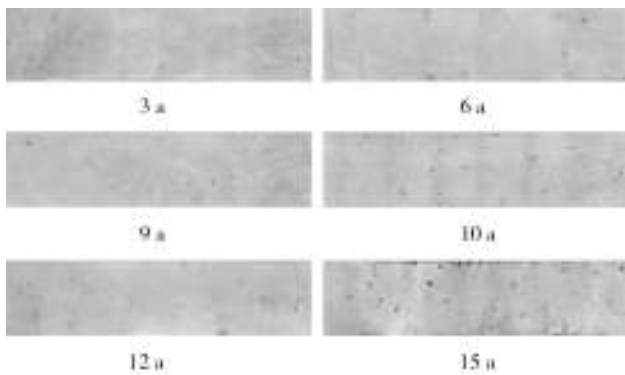


图2 不同腐蚀日历年限下试验件表面腐蚀损伤(斑坑)的分布
Fig. 2 Different specimen surface corrosion damage distribution under different corrosion calendar

2 腐蚀形貌分析

利用KH-7700三维光学显微镜对腐蚀坑进行观察测量,发现蚀坑形貌大部分呈椭球形,如图3所示;其疲劳断面形貌如图4所示;典型腐蚀坑截面如图5所示。通过观察分析认为,将蚀坑近似成半椭球形状优于近似成其它规则的几何图形,其最大深度为 a ,半宽度为 c ,如图6所示。



图3 蚀坑形状示意

Fig. 3 Sketch map of a corrosion pit

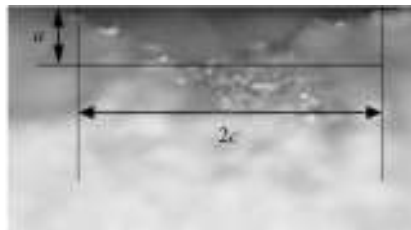


图4 疲劳断面蚀坑形状

Fig. 4 Rupture plane of a corrosion pit

3 讨论

疲劳破坏的断口一般存在疲劳源区、疲劳裂纹稳定扩展区、快速断裂区。通过对预腐蚀试验件的疲劳断口观察分析,发现疲劳裂纹大都起始于腐蚀坑。在预腐蚀试验中,随着腐蚀时间增加,腐蚀坑截面宽度与深度都增加,其深宽比(深宽比是指腐蚀坑最大深度与垂直于外载荷方向并同腐蚀坑最大深度同一截面的腐蚀坑最大宽度的比值)不超过10,这与文献[3]是一致的。为对比腐蚀坑截面宽度和深度对疲劳裂纹扩展寿命的影响,将数据分为2组:第1组腐蚀坑截面宽度不变,深度等比例增大;第2组腐蚀坑深度不变,截面宽度等比例增大。

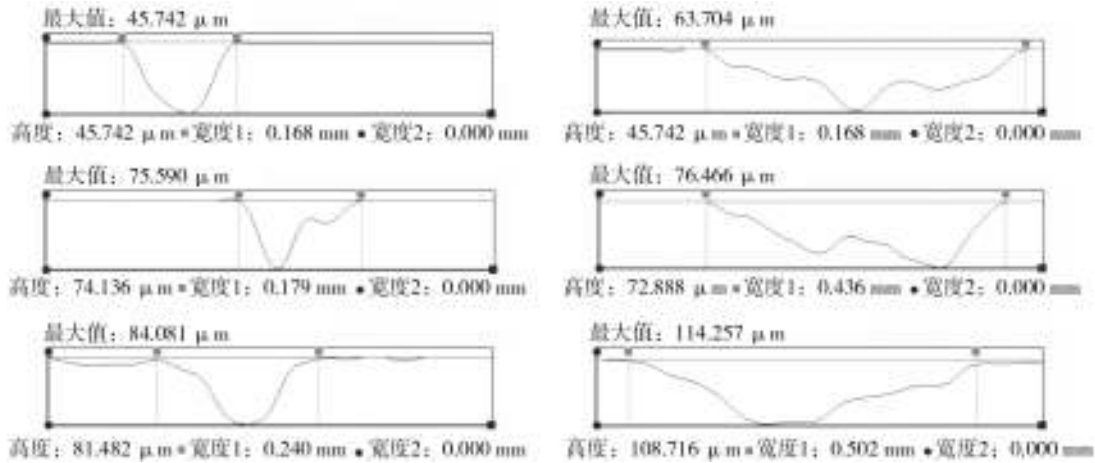


图5 蚀坑的截面视图(350×)
Fig. 5 Corrosion pits section view(350×)

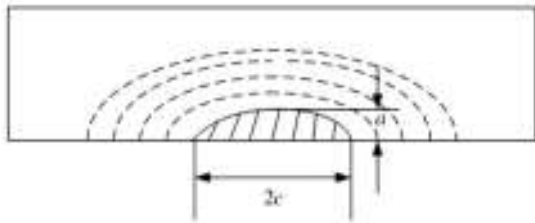


图6 蚀坑疲劳断面形状示意
Fig. 6 Sketch map of a corrosion pit section

在AFGROW分析中,试验件截面为20 mm × 3 mm,腐蚀坑位置在截面中间,加载方式为等幅加载,最大加载应力为253 MPa,应力比R=0.06,腐蚀坑近似为半椭圆表面裂纹,疲劳裂纹扩展公式选择Harter T-Method公式。

图7是6051铝合金材料在R=0.06时的疲劳裂纹扩展速率曲线。图8是深宽比为1时的裂纹扩展寿命曲线,可以看出裂纹沿着深度与宽度方向扩展,其疲劳裂纹扩展分为稳定扩展过程和快速扩展过程。

图9是不同深宽比下疲劳裂纹扩展寿命曲线。从图9可看出,腐蚀坑深度与宽度都对疲劳裂纹扩展寿命有较大影响,并且随着深宽比的增大,疲劳裂纹扩展寿命趋于稳定。从图9无法判断腐蚀坑深度和宽度哪个对疲劳裂纹扩展寿命影响较大,因此,定义腐蚀坑深度与宽度相对影响系数K,即:

$$K = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_1, N_2 分别是在相同深宽比下,宽度不变和深度不变的疲劳裂纹扩展寿命。

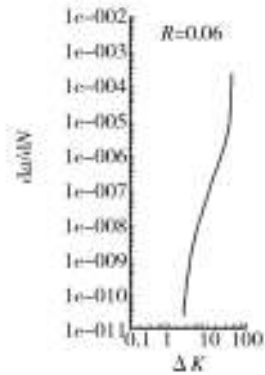


图7 疲劳裂纹扩展速率曲线
Fig. 7 The curve of fatigue crack growth rate

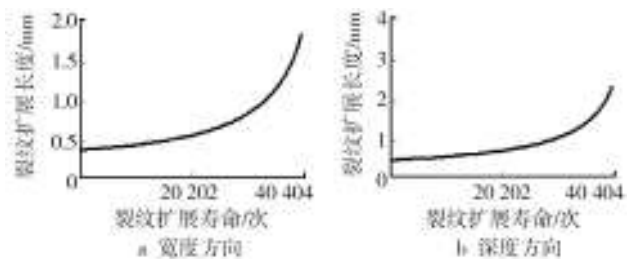


图8 腐蚀坑宽度和深度方向上的裂纹扩展寿命曲线
Fig. 8 The curve of pit depth and width crack growth

图10是不同深宽比下相对影响系数K的曲线,从图10可以看出随着深宽比的增大,腐蚀坑的深度相对宽度对疲劳裂纹扩展寿命影响也增大。

4 结论

1) 通过对试验件不同日历年下表面腐蚀坑形

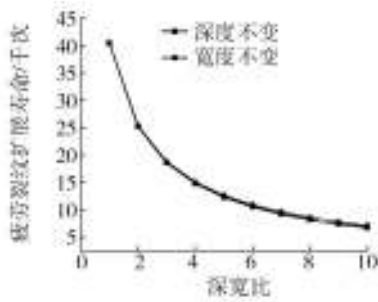


图9 不同深宽比下疲劳裂纹扩展的影响曲线

Fig. 9 The curve of fatigue crack growth under different ratio of pitting depth and width

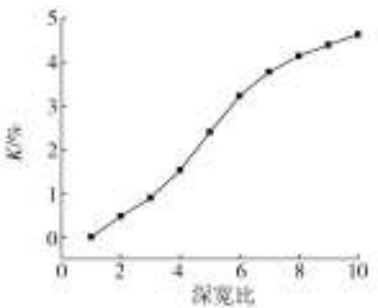


图10 不同深宽比下相对影响系数K曲线

Fig. 10 The relative influence coefficient K curve under different ratio of pitting depth and width

貌统计分析,可以将腐蚀坑近似成半椭球形损伤进行评定计算。

2) 腐蚀坑深度和宽度对疲劳裂纹扩展寿命影响都较大,且随着深宽比的增大,裂纹扩展寿命逐渐趋于稳定。

3) 随着腐蚀坑的深宽比增大,腐蚀坑的深度相对于宽度对裂纹扩展寿命的影响逐渐增大。

参考文献:

- [1] 苏维国,穆志韬,刘涛,等. 基于损伤检测的腐蚀疲劳寿命预测概率模型[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 33—38.
- [2] 朱做涛,穆志韬,陈定海,等. 基于中值寿命和特征寿命相当的腐蚀当量折算关系研究[J]. 机械强度, 2011, 33(2): 253—257.
- [3] KEITH Van Der Walde. Corrosion—Nucleated Fatigue Crack Growth[D]. USA: Purdue University, 2005: 80—124.
- [4] 叶彬,朱做涛,穆志韬. 铝合金材料腐蚀形貌裂纹及扩展分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 54—58.
- [5] DU M L, CHIANG F P, KAGWADE S V. Influence of Corrosion on the Fatigue Properties of Al 7075-T6[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1998, 26(3): 260—268.
- [6] MEDVED J J, BRETON M, IRVING P E. Corrosion Pit Size Distributions and Fatigue Lives—A Study of the EIFS Technique for Fatigue Design in the Presence of Corrosion [J]. Int J Fatigue, 2004, 26: 71—80.
- [7] LIN X B, SMITH R A. Finite Element Modeling of Fatigue Crack Growth of Surface Cracked Plate—Part III: Stress Intensity Factor and Fatigue Crack Growth Life[J]. Fracture Mech, 1999, 63: 541—556.

(上接第3页)

2) Ti-Cu 复合管经海水冲刷试验后无腐蚀; Cu 管受到海水腐蚀及冲刷的作用,失去 Cu 本身的金属光泽,焊缝位置有轻微的腐蚀痕迹,微观表面呈现颗粒状形貌。

参考文献:

- [1] 梁希坤. 爆炸焊的原理和潜能[J]. 铁道机车车辆工人, 1996(2): 24—26.

- [2] 藤田昌大,张丽英. 爆炸焊及其应用[J]. 国外舰船技术, 1982(4): 6—15.
- [3] 郑远谋. 不锈钢-碳钢爆炸复合板和爆炸焊接机理探讨[J]. 广东有色金属学报, 1993, 3(2): 133—138.
- [4] 郑远谋. 爆炸焊与异种金属的焊接[J]. 焊接技术, 2001, 30(5): 25—26.
- [5] 王春涛,章海,朱从容. 海水循环水管道复合防护技术应用[J]. 表面技术, 2005, 34(3): 69—70, 75.