

理论与实验研究

航空高强度LY12CZ铝合金腐蚀剩余强度预测

李旭东, 穆志韬, 刘治国

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 目的 研究LY12CZ铝合金在腐蚀环境下的强度退化规律。方法 按ASTM标准对常温下的LY12CZ铝合金进行预腐蚀,测量腐蚀坑的深度,统计腐蚀坑数目,进行数理统计,获得其几何尺寸的分布。利用MTS 880试验机进行静拉伸试验。建立腐蚀坑的物理模型,基于腐蚀坑平均特征参数和最大特征参数,利用AFGROW软件进行剩余强度预测。结果 剩余强度随着腐蚀损伤加深而逐步减小。结论 与实验值对比的结果证明,该方法具有应用价值。

关键词: 腐蚀坑; 腐蚀损伤; 剩余强度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.001

中图分类号: TG174.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0001-04

Prediction of High-strength Aero LY12CZ Aluminum Alloy Residual Strength with Corrosion Damage

LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo

(Qingdao Campus of Naval Aeronautical Academy, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the degradation behavior of LY12CZ aluminum alloy with corrosion damage. **Methods** In order to create pits on specimen surface, specimens of LY12CZ aluminum alloy were exposed in corrosive solution according ASTM standard, the number and the geometric size distribution of the pits were statistical analyzed. **Results** Single direction tensile tests were conducted on corroded specimen, which proved that residual strength decreases with the increasing of corrosion damage. The thesis proposed an AFGROW based method to predict the residual strength based on the average pit parameters and maximum pit parameters. **Conclusion** The proposed method is applicable for engineering practice.

KEY WORDS: corrosion pit; corrosion damage; residual strength

收稿日期: 2013-08-21; 修订日期: 2013-09-15

Received: 2013-08-21; Revised: 2013-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272173)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation Programme of China(11272173)

作者简介: 李旭东(1984—),男,硕士,讲师,主要研究方向为材料腐蚀疲劳评估。

Biography: LI Xu-dong(1984—), Male, Master, Lecturer, Research focus: material corrosion fatigue assessment.

对于在沿海机场服役的飞机结构,腐蚀损伤是一种主要的结构损伤形式,是很多故障的主要诱因之一。腐蚀坑的存在降低了疲劳裂纹萌生的门槛,而疲劳裂纹的萌生和扩展会引起材料力学性能的下降,威胁机体结构的完整性和飞行安全^[1-4]。由于铝合金材料大量应用于飞机机体结构中,在腐蚀环境下容易产生腐蚀坑,加速疲劳裂纹的萌生和扩展过程,因此引发了相关研究热潮。以Sankaran, Hillberry, Hoepfner, Newman 等为代表的学者主要在腐蚀扩展规律^[5]、腐蚀损伤评估^[6]、腐蚀损伤下疲劳裂纹萌生和扩展行为^[7]、腐蚀损伤下疲劳寿命衰减规律^[8]等方面开展了大量研究。因此文中针对航空铝合金,研究其腐蚀损伤与结构剩余强度的关系具有重要的工程意义,可为腐蚀条件下飞机结构损伤容限评估奠定基础。

1 实验

1.1 材料

试样所用材料为航空用LY12CZ铝合金,材料的力学性能(实测值):抗拉强度为447 MPa,屈服强度为293 MPa。沿轧制方向截取哑铃状试件,其尺寸如图1所示,厚度为1 mm。

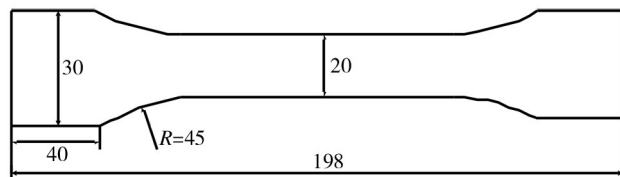


图1 试样尺寸

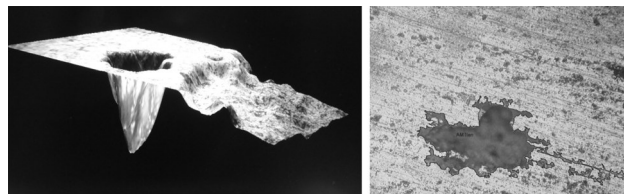
Fig.1 Details of specimen size

1.2 方法

预腐蚀试验按照美国材料协会 ASTM G34-1 标准进行^[9]。首先用丙酮溶液清洗试件表面,将试验件浸润在 EXCO 溶液中。控制浸润时间分别为 12, 24, 36, 72 h, 以在试件表面造成不同程度的腐蚀损伤。用酒精溶液对腐蚀后的试件进行清洗,去除试件表面的腐蚀附着物。

利用科士达 KH-7700 三维扫描电子显微镜对腐蚀后的试件表面进行观测,获得其腐蚀坑的三维和

二维形貌,如图2所示。统计腐蚀坑的数目和深度,不难发现腐蚀坑深度较好地服从 Weibull 分布,如图3所示。



a 三维形貌

b 二维形貌

图2 腐蚀试件表面三维形貌与二维形貌

Fig.2 Three-dimensional and two-dimensional topography of the corroded specimen surface

预腐蚀试件在 Instron 8801 试验机上进行室温下的静拉伸试验,加载速率为 0.02 mm/s,直至试件断裂,获得其剩余静拉伸强度。

2 结果及讨论

2.1 腐蚀损伤对材料静强度的影响

针对腐蚀不同时间后的试件表面损伤区域,在金相显微镜下放大 300 倍随机选取视场进行观测,试件腐蚀区的损伤形貌对比如图4所示。可以看出,随着腐蚀损伤加深,试件表面逐步变得粗糙。LY12CZ 铝合金在空气中形成一层氧化保护层,在酸性 EXCO 溶液中,氧化保护膜会被溶液中的 Cl⁻ 溶解破坏,使得腐蚀向铝合金基体扩展。铝合金是面心六面体结构,晶粒之间的结合面抗腐蚀能力较差,因此腐蚀损伤首先在晶粒结合部位发生,铝合金晶粒轮廓逐步显现,呈现出典型的晶间腐蚀形貌,此时形成的腐蚀坑深度较浅,表面积很小,如图4b所示。随着浸润时间的延长,晶间腐蚀扩展,腐蚀坑分布密度增大,较大的腐蚀坑相互连接,形成大面积剥蚀,晶粒从基体材料上被腐蚀掉,如图4c和d所示。在外载荷作用下,一方面腐蚀坑会造成应力集中,另一方面腐蚀损伤易造成材料基体松动,使得材料的力学性能下降。

对静拉伸试验得到的数据进行处理,获得了材料拉伸强度随着腐蚀损伤的变化曲线,如图5所示。从图5中可明显看出,预腐蚀试件的拉伸强度

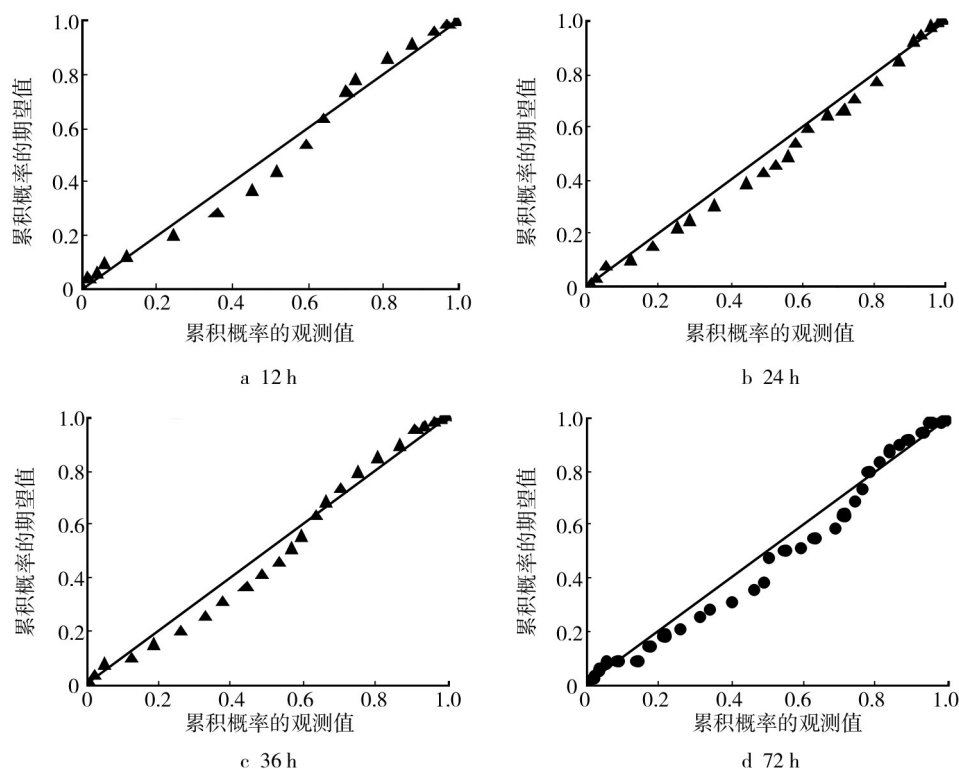


图3 不同浸润试件表面的腐蚀坑深度Weibull分布P-P图

Fig.3 Weibull distribution P-P plot of corrosion pits for specimen with different exposure duration

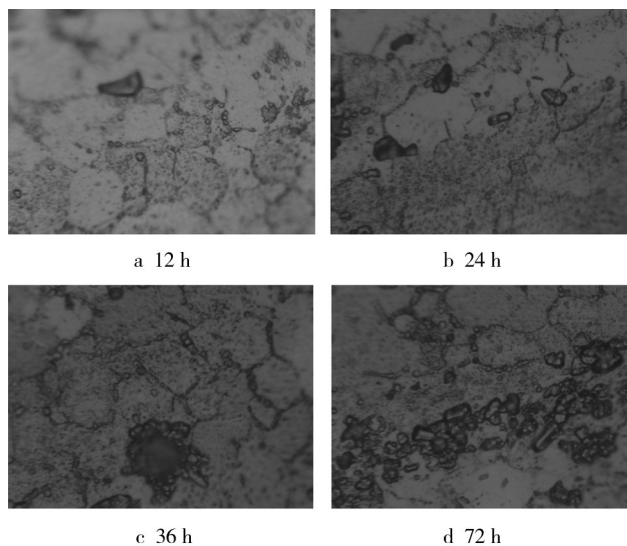


图4 不同浸润时间下的试件腐蚀损伤形貌

Figs.4 Corrosion damage morphology of specimen after different exposure times

相对于无腐蚀损伤试件均出现了明显的下降,剩余强度随腐蚀浸润时间大致呈线性递减关系。

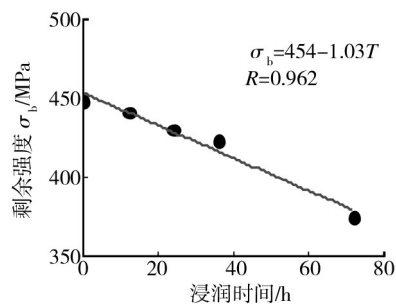


图5 剩余强度随着浸润时间的变化曲线

Fig.5 Residual strength versus exposure duration

2.2 基于AFGROW的剩余静强度预测

对于断口观测,如图6所示,断面上的腐蚀坑多呈半椭圆形。根据试验件断口形态,得到了腐蚀坑物理模型。将该腐蚀坑放置于试件中心位置,利用AFGROW软件建模,进行腐蚀构件的强度预测^[10]。分别取前面测得的不同浸润时间下试件表面腐蚀坑深度和长度的平均值和最大值为该试件腐蚀损伤的特征参数 a 和 $2c$,计算得到基于两种特征参数的剩余强度曲线,如图7所示。从图7中可以看出,基于

腐蚀坑平均值所得到的剩余强度估计值比较接近实验值,偏差不超过10%,有一定的工程参考价值,但是剩余强度估计偏高,偏危险;基于腐蚀坑最大值得到的剩余强度估计值与实验值偏差较大,超过20%,但是估计值偏低,偏安全。利用该模型可以给出材料剩余强度的上下限,具有工程参考意义。

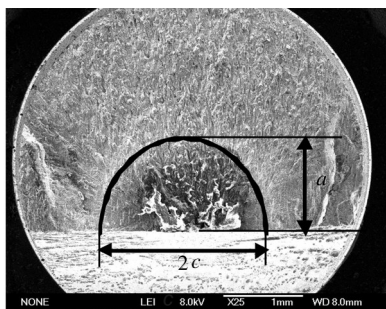


图6 断面上的腐蚀坑及腐蚀坑物理模型

Fig.6 Corrosion pit geometry and physical model in fracture surface

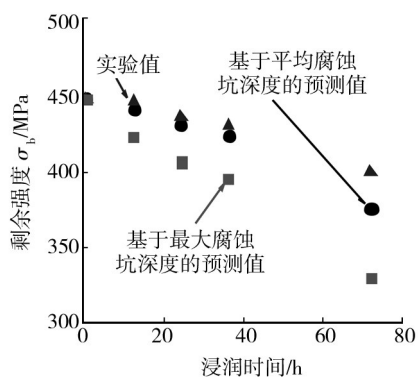


图7 不同浸润时间下的试件剩余强度预测值

Fig.7 Residual strength prediction of specimen of different exposure duration

2种预测模型与实验值的误差随着腐蚀时间的延长而增长,预测精度逐步下降。这是因为腐蚀时间较短的时候,腐蚀损伤程度轻,腐蚀坑的平均值与最大值相差不大。随着腐蚀程度的加重,腐蚀坑的差异程度加大,多条裂纹萌生与连接现象更为普遍,影响因素趋于增多,影响机理更为复杂,难以对剩余强度作出准确的预测。因此上述模型在应用于重损伤试验件预测时,必须考虑多腐蚀坑萌生与多裂纹扩展的影响。

3 结论

1) LY12CZ 铝合金材料在 EXCO 溶液中容易产生腐蚀损伤,形成点蚀腐蚀坑,腐蚀损伤的程度受腐蚀时间控制。随着腐蚀损伤加重,晶间腐蚀倾向明显^[1]。

2) 预腐蚀试验件的剩余强度随腐蚀损伤程度加深呈下降趋势,大致随腐蚀浸润时间的延长而递减。

3) 利用 AFGROW 软件,提供了一种预测预腐蚀试验件剩余强度的简易方法,为飞机结构腐蚀损伤容限分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] LI Xu-dong, WANG Xi-shu, REN Huai-hui, et al. Effect of Prior Corrosion State on The Fatigue Small Cracking Behavior of 6151-T6 Aluminum Alloy[J]. Corrosion Science, 2012, 55: 26—33.
- [2] 李旭东, 穆志韬, 刘治国, 等. 预腐蚀铝合金材料裂纹萌生寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 24—28.
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, et al. Evaluation of Fatigue Initial Life for Aluminum Alloy with Pre-corrosion [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 24—28.
- [3] 李旭东, 穆志韬, 刘治国, 等. 基于分形理论的6A02铝合金腐蚀损伤评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 27—30.
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, et al. Evaluation of Corrosion Damage for 6A02 Aluminum Alloy Based on Fractal Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 27—30.
- [4] 李旭东, 刘治国, 穆志韬. 基于短裂纹的LD10CZ铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(1): 47—52.
LI Xu-dong, LIU Zhi-guo, MU Zhi-tao, et al. Fatigue Crack Growth of LD10CZ Aluminum Alloy with Pre-Corrosion Based on Micro-Crack[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical, 2013, 28(1): 47—52.
- [5] SANKARAN K K, PEREZ R, JATA K V. Effects of Pitting Corrosion on the Fatigue Behavior of Aluminum Alloy 7075-T6: Modeling and Experimental Studies[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A297: 223—229
- [6] GRUENBERG K M, CRAIG B A, HILLBERRY B M, et al.

(下转第76页)

- Protection of Metal Materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 117.
- [18] 徐乃欣, 赵灵源, 丁翠江, 等. 碳钢大气腐蚀时表面结露现象行为的某些影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(12): 522—526.
- XU Nai-xin, ZHAO Ling-yuan, DING Cui-jiang, et al. Some Factors Affecting Dewing Behavior on Mild Steel Surface during Atmospheric Corrosion[J]. Corrosion & Protection, 2001, 22(12): 522—526.
- [19] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢、低合金钢 16 年大气暴露腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 1—6.
- LIANG Cai-feng, HOU Wen-tai. Sixteen-year Atmospheric Corrosion Exposure Study of Steels[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(1): 1—6.
- [20] 梁彩凤. 钢在中国大陆的大气腐蚀研究[J]. 电化学, 2001, 7(2): 215—219.
- Liang Cai-feng. Atmospheric Corrosion of Steels in China[J]. Electrochemistry, 2001, 7(2): 215—219.
- [21] 李晓刚. 金属大气腐蚀初期行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 13.
- LI Xiao-gang. Atmospheric Corrosion Behavior and Mechanism of Metal in the Early Stage[M]. Beijing: Science Press, 2009: 13.
- [22] 廖国栋, 吴国华, 苏少燕. 金属材料曝露试验与人工加速试验腐蚀速率的研究[J]. 环境试验, 2005(增刊): 13—15.
- LIAO Guo-dong, WU Guo-hua, SU Shao-yan. Research on Corrosion Rate by Exposure and Artificial Accelerated Test of Metal Materials[J]. Environmental Testing, 2005(Suppl): 13—15.
- [23] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢及低合金钢 8 年大气暴露腐蚀研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 183—186.
- LIANG Cai-feng, HOU Wen-tai. Atmospheric Corrosion of Carbon Steels and Low Alloy Steels[J]. Corrosion Science and Protection Technique, 1995, 7(3): 183—186.
- [24] 梁彩凤, 郁春娟, 张晓云. 海洋大气及污染海洋大气对典型钢腐蚀的影响[J]. 海洋科学, 2005, 29(7): 42—43.
- LIANG Cai-feng, YU Chun-juan, Zhang Xiao-yun. Corrosion of Steels in Clean and Polluted Marine Atmosphere[J]. Marine Science, 2005, 29(7): 42—43.
- [25] 张忠礼. 钢结构热喷涂防腐技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 143—148.
- ZHANG Zhong-li. Steel Structure of the Thermal Spraying Anti-corrosion Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 143—148.
- [26] 柯伟. 腐蚀科学技术的应用和失效案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 200.
- KE Wei. Application of Corrosion Science and Protection Technology and Failure Case[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 200.
- [27] 李金贵, 郑家荣. 表面工程技术和缓蚀剂[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 95.
- LI Jin-gui, ZHENG Jia-shen. Surface Engineering Technology and Corrosion Inhibitor[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 95.
- [28] 严生贵, 白书亚, 沈承金. 机械化电弧喷涂装置及应用[J]. 腐蚀与防护, 2002(9): 395—396.
- YAN Sheng-gui, BAI Shu-ya, SHEN Cheng-jin. Devices and Applications of mechanization of Arc Spraying[J]. Corrosion & Protection, 2002(9): 395—396.
- [29] 张忠礼. 钢结构热喷涂防腐技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 12.
- ZHANG Zhong-li. Thermal Spraying Anti-corrosion Technology of Steel Structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 12.

(上接第 4 页)

- Predicting Fatigue Life of Pre-corroded 2024-T3 Aluminum[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 629—640
- [7] BURNS J T, LARSEN J M, GANGLOFF R P. Effect of Initiation Feature on Microstructure Scale Fatigue Crack Propagation in Al-Zn-Mg-Cu[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 42: 104—121
- [8] LIAO M, RENAUD G, BELLINGER N C. Fatigue Modeling for Aircraft Structures Containing Natural Exfoliation Corrosion[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 677—686
- [9] Standard test method for exfoliation corrosion susceptibility in 2XXX and 7XXX series aluminum alloys (EXCO test)[S]. ASTM G34201, USA: American Society for Testing and Materials, 2002.
- [10] HARTER J A. AFGROW Users Guide and Technical Manual[Z]. AFRL-VA-WP-TR-2002, 2002.
- [11] 赵立华. 超高强度铝合金研究现状及发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2002, 32(10): 147—150.
- ZHAO Li-Hua. Current Status and Trends in Ultra high Strength Aluminum Alloy Research [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(10): 147—150.