

喷丸强化对超高强度钢耐腐蚀性能的影响

张丹峰, 谭晓明, 钱昂, 战贵盼

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 提高舰载机结构疲劳关键部位的主体材料超高强度钢的耐蚀性能。**方法** 基于实测的环境数据编制加速腐蚀试验环境谱, 针对喷丸和未喷丸超高强度钢试验件在实验室条件下开展加速腐蚀试验, 从宏观/微观形貌、质量损失、腐蚀速率和表面粗糙度等方面表征腐蚀行为, 分析讨论喷丸强化对超高强度钢耐腐蚀性能的影响。**结果** 超高强度钢腐蚀初期为局部点蚀, 然后转变为全面均匀腐蚀。喷丸强化延缓了腐蚀形态转变的时机, 喷丸试验件腐蚀速率约为未喷丸试验件的 75%, 加速腐蚀当量为 3 a, 未喷丸和喷丸试验件表面平均粗糙度分别为 5.67 μm 和 4.16 μm , 前者为后者的 1.36 倍。**结论** 通过质量损失率、腐蚀速率和表面粗糙度的对比分析知, 喷丸强化明显提高了超高强度钢的耐腐蚀性能。

关键词: 超高强度钢; 海洋环境; 喷丸; 腐蚀试验; 耐腐蚀性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.014

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)02-0081-05

Effect of Shot Peening on Corrosion Resistance of Ultra-high Strength Steel

ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, QIAN Ang, ZHAN Gui-pan
(Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the corrosion resistance of ultra-high strength steel which is used as the main material for critical fatigue part of shipborne aircraft structure. Based on the measured environmental data, the environmental spectrum of accelerated corrosion test was compiled. The accelerated corrosion test was carried out under laboratory conditions for shot peening and un-peened ultra-high strength steel specimens. The corrosion behavior was characterized from macro/micro morphology, weight loss, corrosion rate and surface roughness. The effect of shot peening on corrosion resistance of ultra-high strength steel was analyzed and discussed. The results showed that the initial corrosion stage of ultra-high strength steel was local pitting corrosion, and then transformed into overall uniform corrosion. Shot peening delayed the transformation of corrosion morphology. The corrosion rate of shot peened test piece was about 75% of that of non-shot peened test piece. When the accelerated corrosion time was equivalently 3 a, the average surface roughness of un-peened specimens and shot peened specimens was 5.67 μm and 4.16 μm respectively, the former was 1.36 times of the latter. Through the comparative analysis of weight loss rate, corrosion rate and surface roughness, it is found that shot peening significantly improves the corrosion resistance of ultra-high strength steel.

KEY WORDS: ultra-high strength steel; marine environment; shot peening; corrosion testing; corrosion resistance

舰载机在服役过程中要遭受海洋大气、海上盐雾和海浪飞溅的侵蚀作用, 对使用安全构成严重挑

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2019-11-08

Received: 2019-11-08; Revised: 2019-11-08

作者简介: 张丹峰 (1970—), 女, 副教授, 主要研究方向为飞机结构寿命可靠性、腐蚀防护与控制。

Biography: ZHANG Dan-feng (1970—), Female, Associate professor, Research focus: aircraft structural life reliability, corrosion protection and control.

战^[1-4]。例如,2002年3月美国海军一架F-14舰载机在地中海进行飞行训练时,发生一起机毁人亡的重大事故,其原因是超高强度钢前起落架支柱外筒发生了局部腐蚀^[5],导致该型飞机全面停飞检修。因此,在腐蚀环境作用下舰载机起落架的使用安全应当高度重视。

近二三十年来,国内外研究学者针对飞机结构铝合金材料的腐蚀机理和腐蚀行为开展了系统深入的试验和理论研究^[6-15],得到许多有意义的结论。然而,对于飞机结构合金钢尤其是超高强度钢的腐蚀主要侧重于应力腐蚀行为研究^[16-17],目前还没有见到在实验室条件下针对超高强度钢模拟服役环境开展的腐蚀试验研究,尤其是超高强度钢普遍采用的喷丸表面强化作用对耐腐蚀性能的影响。相关事故分析表明,导致美国海军F-14舰载机一等飞行事故的原因不是因为应力腐蚀开裂,而是因为局部点蚀引起结构承载能力降低,进而萌生裂纹而断裂。因此,针对超高强度钢开展服役条件下腐蚀规律研究十分有必要。

文中基于舰载机服役的海洋环境,针对23Co-14-Ni12Cr3MoE超高强度钢喷丸和未喷丸两种表面状态,开展加速腐蚀试验研究。从宏观/微观形貌、质量损失、腐蚀速率和表面粗糙度方面进行了对比分析。

1 试验研究

1.1 试验件

试验件材料为23Co14Ni12Cr3MoE超高强度钢,化学成分见表1。金相组织主要为板条状马氏体和奥氏体,如图1所示。

表1 化学成分

Tab.1 Chemical composition

C	Ni	Co	Cr	Mo	Si	Mn	Fe
0.23	11.73	13.85	3.13	1.25	0.10	0.10	69.61

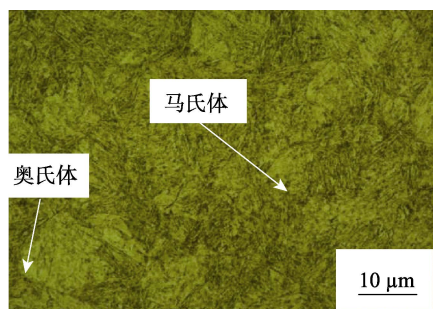


图1 金相组织

Fig.1 Metallurgical structure

试验件结构形式为单边半圆缺口试验件,厚度为5 mm,具体尺寸如图2所示。试验件有喷丸和未喷丸两种表面处理状态。

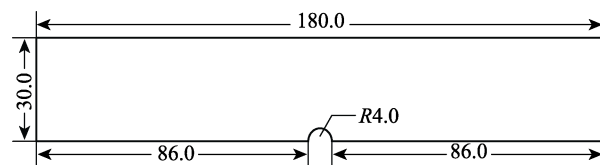


图2 试验件示意(mm)

Fig.2 Specimen schematic (mm)

1.2 加速腐蚀试验环境谱

舰载机要在海洋大气环境中服役二三十年,严酷服役环境对舰载机结构可靠性和使用寿命起着重要作用。为了考核服役环境对结构材料的影响,工程上一般的做法是,针对实测多年的环境数据进行统计分析,得到环境参数随时间的变化历程,编制得到舰载机使用环境谱。在此基础上,根据腐蚀损伤模式一致和腐蚀损伤程度等效的原则,编制加速腐蚀试验环境谱,采用实验室加速腐蚀试验方法考核服役环境对结构材料的影响。

根据实测得到的舰载机服役环境数据,借鉴参考文献[18]给出的当量折算关系,将服役环境数据经过当量折算,得到实验室条件下的加速腐蚀试验谱。加速腐蚀试验当量1 a包括280次干湿交替循环,每次干湿交替循环中包括酸性盐溶液浸泡5 min和烘烤12 min,合计79 h 20 min,如图3所示。

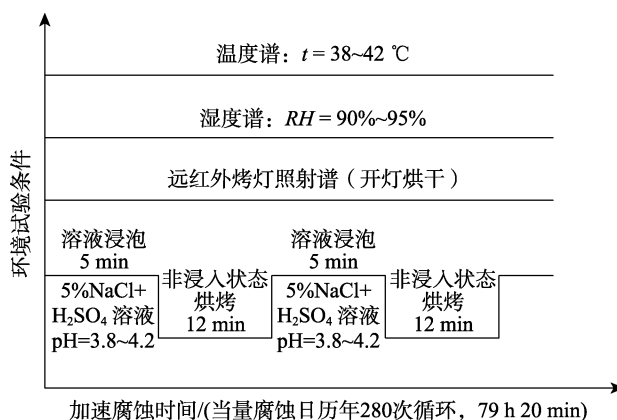


图3 加速腐蚀试验环境谱

Fig.3 Accelerated corrosion test environment spectrum

1.3 加速腐蚀试验

加速腐蚀溶液的配制:采用分析纯NaCl和去离子水按一定的质量比配置成质量分数为5%的加速腐蚀溶液;加入适量稀释后的硫酸,使配置的NaCl溶液pH=4.0后的硫酸。根据图3所示的加速腐蚀试验环境谱,采用ZJF-75G周浸腐蚀试验箱在实验室内开展0~12a的加速腐蚀试验。

2 结果分析讨论

2.1 腐蚀形貌

通过针对不同试验件腐蚀宏观形貌进行观察可

知, 腐蚀初期为典型的局部点蚀, 然后转变为均匀腐蚀。加速腐蚀当量为 3 a 时, 未喷丸试验件和喷丸试验件呈明显的点蚀特征, 表面为小面积斑块状疏松的腐蚀产物, 外层为红棕色腐蚀产物, 内层伴有少量黑色腐蚀产物生成; 喷丸试验件表面的腐蚀产物覆盖面积明显小于未喷丸试验件。加速腐蚀当量为 6 a 时, 腐蚀产物层几乎全部覆盖试验件表面, 呈明显均匀腐蚀特征, 且由于生成的内外层腐蚀产物增多, 腐蚀产物层的厚度明显增大, 喷丸试验件的腐蚀产物覆盖面积仍然略小于未喷丸试验件。加速腐蚀当量为 9 a 时, 未喷丸试件表面呈现大面积“溃疡”状的腐蚀形貌, 基体表面出现大面积剥落现象, 内表层形成了致密的

黑色腐蚀产物, 外表层形成了片状的红棕色腐蚀产物层。加速腐蚀当量为 12 a 时, 腐蚀产物大量聚集, 开始脱落。喷丸试件表面也呈现出“溃疡”状腐蚀形貌, 腐蚀产物出现剥落现象。

未喷丸和喷丸试验件的腐蚀产物明显分为内外两层, 外层为较为疏松的红棕色腐蚀产物, 内层为致密的黑色腐蚀产物, 喷丸试验件外层红棕色腐蚀产物的致密程度明显高于未喷丸试验件, 如图 4 所示。从图 5 中可以看到, 未喷丸试验件的腐蚀产物层中出现了数量较多、尺寸较大的裂纹, 而喷丸试验件腐蚀产物层中的裂纹数量较少, 裂纹尺寸也较小。

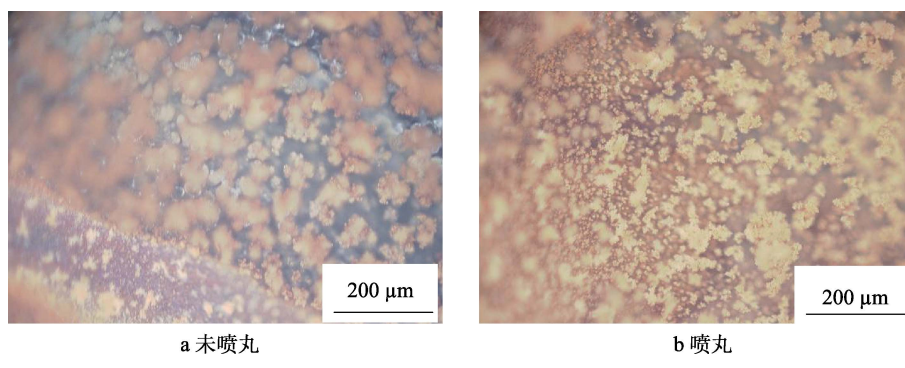


图 4 腐蚀产物显微形貌
Fig.4 Microscopic morphology of corrosion product: a) unpeened; b) shotpeened

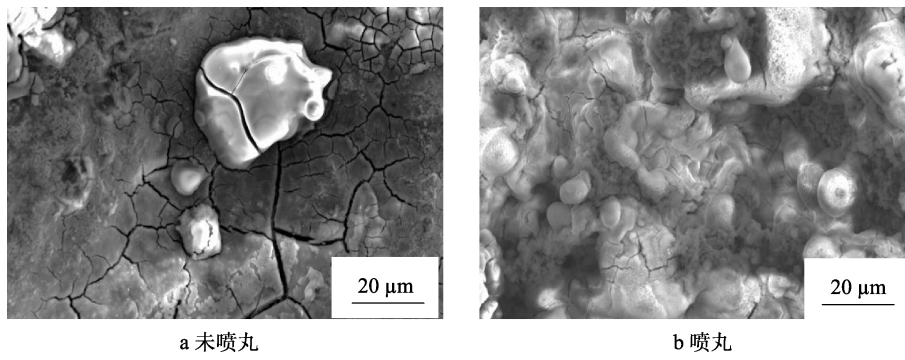


图 5 腐蚀产物 SEM 图
Fig.5 SEMmicrograph of corrosion product: a) unpeened; b) shotpeened

2.2 质量损失率

根据加速腐蚀试验中试验件腐蚀质量损失的测量结果, 按照式 (1) 计算腐蚀质量损失率:

$$\xi = (m_0 - m) / m_0 \quad (1)$$

式中: m_0 为试验件未腐蚀时的质量, g; m 为腐蚀不同年限下去除腐蚀产物后试验件的质量, g。

喷丸和未喷丸试验件质量损失率变化曲线如图 6 所示。可见随着腐蚀试验时间的增长, 喷丸和未喷丸试验件质量损失率差别由小变大, 未喷丸试验件腐蚀质量损失率明显大于喷丸试验件, 前者腐蚀速率约为后者的 75%。

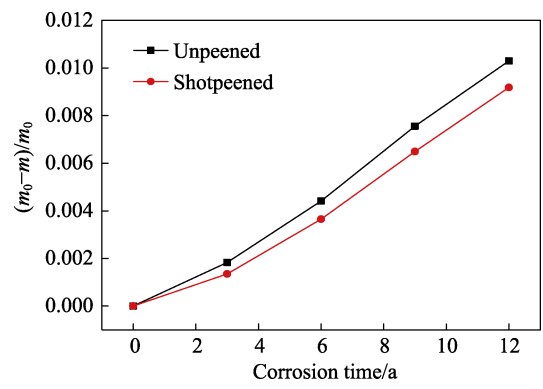


图 6 质量损失率变化规律
Fig.6 The rule of weight loss rate with corrosion time

2.3 腐蚀速率

腐蚀速率 v 的定义式见式 (2):

$$v = \Delta m / (\Delta t \cdot S) \quad (2)$$

式中: Δm 为两不同腐蚀年限下去除腐蚀产物后试验件质量的差值, g; S 为试验件表面积, m^2 ; Δt 为腐蚀年限差值。

喷丸和未喷丸试验件腐蚀速率变化曲线如图 7 所示。从图 7 可知, 腐蚀 0~9 a, 喷丸和未喷丸试验件腐蚀速率不断增大, 未喷丸试验件腐蚀速率明显大于喷丸试验件; 腐蚀 9~12 a, 腐蚀速率降低, 喷丸和未喷丸试验件腐蚀速率差别明显减小。

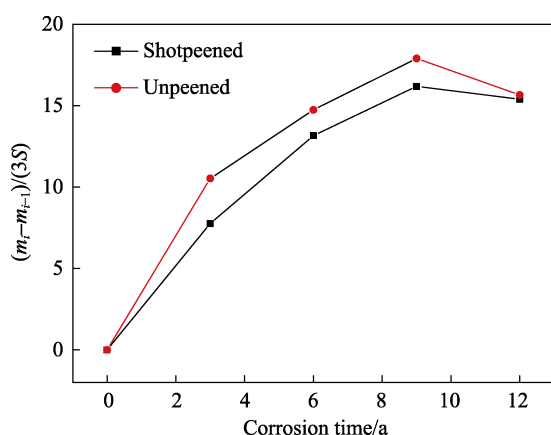


图 7 腐蚀速率变化规律

Fig.7 The rule of corrosion rate with corrosion time

2.4 表面粗糙度

采用 ST-400 三维非接触式表面形貌仪对去除腐蚀产物后的试验件表面形貌进行扫描, 该仪器采用先进的白光共聚焦技术实现高分辨率的表面形貌测量, 可以实时采集每个测量点的三维坐标数据。试验件采样区大小设置为 25 mm×25 mm, 沿试验件长度和宽度方向的扫描步长均为 20 μm , 扫描区域共可获得 1250×1250 个数据点, 通过实测得到算术平均粗糙度 S_a 和均方根粗糙度 S_q 。

喷丸和未喷丸试验件算术平均粗糙度 S_a 和均方根粗糙度 S_q 变化规律曲线如图 8 所示。从图 8 可知, 随着腐蚀时间的增长, S_a 和 S_q 变化规律基本一致, 大致呈线性上升趋势。未腐蚀时, 喷丸试验件的 S_a 为 0.93 μm , 略大于未喷丸试验件; 加速腐蚀当量为 3 a 时, 未喷丸和喷丸试验件 S_a 分别为 5.67 μm 和 4.16 μm , 前者为后者的 1.36 倍; 加速腐蚀当量为 6 a 时, 未喷丸和喷丸试验件 S_a 分别为 11.7 μm 和 9.66 μm , 前者为后者的 1.21 倍; 加速腐蚀当量为 12a 时, 未喷丸和喷丸试验件粗糙度差别减小。

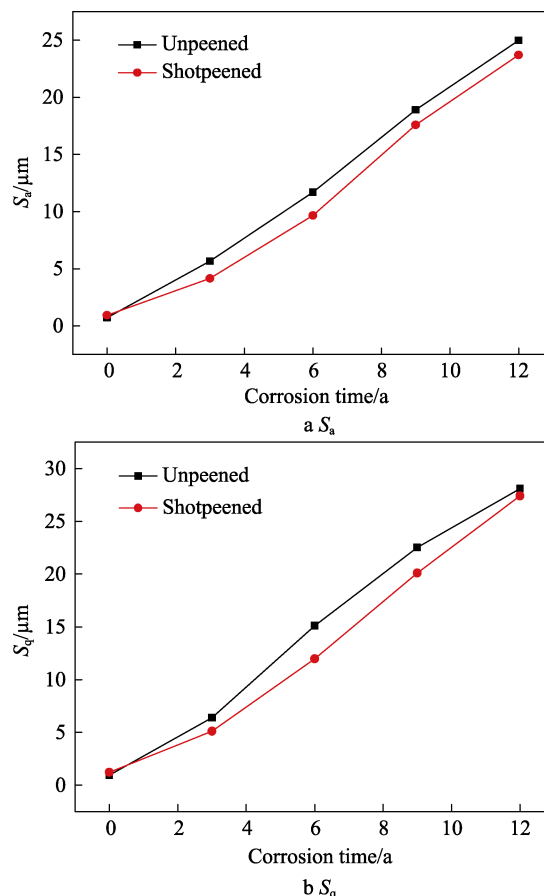


图 8 粗糙度变化规律曲线

Fig.8 The rule of roughness parameters with corrosion time

3 结论

针对超高强度钢喷丸和未喷丸两种表面状态, 基于舰载机服役的海洋环境, 开展了实验室加速对比试验研究, 分别从宏观/微观形貌、质量损失、腐蚀速率和表面粗糙度等方面表征了腐蚀行为, 喷丸强化明显增强了超高强度钢的耐腐蚀性能。通过研究得到如下结论:

1) 超高强度钢腐蚀初期为局部点蚀, 然后转变为全面均匀腐蚀, 喷丸强化延缓了腐蚀形态转变的时机。

2) 通过喷丸和未喷丸超高强度钢试验件的失重率和腐蚀速率对比分析, 喷丸强化明显增强了耐腐蚀性能。

3) 除了未腐蚀时, 喷丸增加了表面粗糙度之外, 腐蚀试验中, 喷丸试验件表面粗糙度明显要小于未喷丸试验件。加速腐蚀当量为 3 a 时, 未喷丸和喷丸试验件表面粗糙度分别为 5.67 μm 和 4.16 μm , 前者为后者的 1.36 倍。

参考文献:

- [1] 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 Dan-feng, TAN Xiao-ming, CHEN Yue-liang. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 5-8.
- [2] 陶春虎, 刘昌奎. 舰载机的腐蚀失效及其预防[J]. 中国材料进展, 2014, 33(10): 623-629.
TAO Chun-hu, LIU Chang-kui. Corrosion Failure and Prevention of Carrier-Based Aircraft[J]. Materials China, 2014, 33(10): 623-629.
- [3] 刘元海, 张幸. 舰载机载设备腐蚀环境适应性要求的剪裁[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 61-67.
LIU Yuan-hai, ZHANG Xing. Tailoring of Corrosion Environmental Adaptability Requirement for the Shipboard Airborne Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 61-67.
- [4] 徐丽, 陈跃良, 武书阁, 张晶. 舰载机舰面停放环境及腐蚀情况研究[J]. 飞机设计, 2016, 36(6): 61-67.
XU Li, CHEN Yue-liang, WU Shu-ge, ZHANG Jing. The Study about the Deck Park Environment of Carrier-Based Aircraft and Corrosive State[J]. Aircraft Design, 2016, 36(6): 61-67.
- [5] BROOKS C L, SIMPSON D. Integrating Real Time Age Degradation Into the Structural Integrity Process[C]// Proceedings AGARD Workshop on Fatigue in the Presence of Corrosion. Corfu, Greece, 1998.
- [6] 谭晓明, 张丹峰, 卞贵学, 等. 腐蚀对新型高强度铝合金疲劳裂纹萌生机制及扩展行为的作用研究[J]. 机械工程学, 2014, 50(20): 76-83.
TAN Xiao-ming, ZHANG Dan-feng, BIAN Gui-xue, et al. Effect of Corrosion Damage on Fatigue Crack Initiation Mechanism and Growth Behavior of High Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 76-83.
- [7] 李玉海, 贺小帆, 陈群志. 铝合金试验件腐蚀深度分布特性及变化规律研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 98-101.
LI Yu-hai, HE Xiao-fan, CHEN Qun-zhi. Investigation on Distribution and Variable Rule for Corrosion Depth of Aluminum Alloy Specimen[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 98-101.
- [8] 张丹峰, 谭晓明, 马力. 服役环境条件下飞机结构铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 93-96.
ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, MA Li. Aluminum pitting corrosion damage rule under service environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 93-96.
- [9] 王刚, 金平, 谭晓明, 等. 海洋环境下 7B04 铝合金腐蚀损伤演化规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 338-342.
WANG Gang, JIN Ping, TAN Xiao-ming, et al. Research on Corrosion Damage Evolution Rule of 7B04 Aluminum Alloy under Ocean Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 338-342.
- [10] BIRBILIS N, CAVANAUGH MK, BUCHHEIT RG. Electrochemical Behavior and Localized Corrosion Associated with Al₇Cu₂Fe Particles in Aluminum Alloy 7075-T651[J]. Corrosion Science, 2006, 48: 4202-4215.
- [11] KIMBERLI J, SACHIN R S, PAUL N C, et al. Effect of Prior Corrosion on Short Crack Behavior in 2024-T3 Aluminum Alloy[J]. Corrosion Science, 2008, 50: 2588-2595.
- [12] KIMBERLI J, DAVID WH. The Interaction between Pitting Corrosion, Grain Boundaries, and Constituent Particles during Corrosion Fatigue of 7075-T6 Aluminum Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 686-692.
- [13] NEWMAN JCJ, ABBOTT W. Fatigue-life Calculations on Pristine and Corroded Open-hole specimens Using Small-crack Theory[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31: 1246-1253.
- [14] 刘治国, 李旭东, 穆志韬. 航空铝合金材料腐蚀坑形状特征[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(2): 128-132.
LIU Zhi-guo, LI Xu-dong, MU Zhi-tao. Configuration Characters of Aero Aluminum Alloy Corrosion Pit[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(2): 128-132.
- [15] 朱做涛, 穆志韬, 陈定海. 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.
ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Corrosion Equivalent Converting Relation Study Based on Median Life and characteristic Life Quality[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2): 253-257.
- [16] 刘建华, 田帅, 李松梅. 新型超高强度钢应力腐蚀断裂行为研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1164-1170.
LIU Jian-hua, TIAN Shuai, LI Song-mei. Stress Corrosion Crack of New Ultrahigh Strength Steel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1164-1170.
- [17] 孙敏, 李晓刚, 李劲. 新型超高强度钢 Cr12Ni4-Mo2Co14 在酸性环境中的应力腐蚀行为[J]. 金属学报, 2016, 52(11): 1372-1378.
SUN Min, LI Xiao-gang, LI Jin. Stress Corrosion Cracking Behavior of a New Kind of Ultrahigh Strength Steel Cr12Ni4Mo2Co14 in Acid Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(11): 1372-1378.
- [18] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. The Calendar Life System Evaluation Technology of Aircraft Structures[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004.