

飞机某模拟涂装试样加速腐蚀与自然暴露的对比研究

卞贵学¹, 张杨广^{1,2}, 张勇¹, 陈跃良¹

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 32102 部队, 山东 烟台 265200)

摘要: **目的** 研究飞机某结构模拟试样加速腐蚀试验与自然暴露试验的相关性。**方法** 选取飞机某结构模拟试样分别进行实验室加速腐蚀试验和海南西沙外场自然暴露试验, 以宏/微观形貌、失光率、色差等级、腐蚀产物成分等作为评价指标, 对试样表面涂层的腐蚀损伤情况进行长期观测和对比研究, 对加速腐蚀 2 个周期和户外暴露 2 年的疲劳试样疲劳寿命和疲劳断口形貌进行对比分析。**结果** 加速腐蚀试验 2 个周期和自然暴露试验 2 年试样的试验过程色差变化规律一致, 色差变化等级均为 2 级, 光泽度变化规律一致, 加速腐蚀试验后为 3 级, 户外自然暴露户外为 4 级、棚下为 3 级, 在螺钉边缘均出现面漆剥落现象。7B04 铝合金试样疲劳寿命断口的韧窝和孔洞的数量都没有发生明显的变化, 在显著度为 0.05 时, 两组疲劳寿命的 t 检验量为 1.6971, 疲劳寿命无显著差异。**结论** 加速腐蚀试样表面涂层的腐蚀程度介于户外和棚下暴露试样之间, 这一结果与加速环境谱的编制原则相一致, 也进一步表明加速试验环境谱正确性。疲劳寿命无显著差异, 表明加速腐蚀试验可以较好地模拟飞机实际工作环境对试样疲劳性能造成的影响。

关键词: 加速腐蚀; 自然暴露; 疲劳寿命; 失光率; 色差等级

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.004

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0025-08

Comparative Study on Accelerated Corrosion and Natural Exposure of Simulated Coated Specimen of Aircraft Structures

BIAN Gui-xue¹, ZHANG Yang-guang^{1,2}, ZHANG Yong¹, CHEN Yue-liang¹

(1. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China; 2. Unit 32102 of PLA, Yantai 265200, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the correlation between accelerated corrosion test and natural exposure test of an aircraft structural simulation test specimen. Accelerated corrosion tests in laboratory and natural exposure tests in outfield of Xisha, Hainan province were carried out on a simulated aircraft structure. The macro/micro morphology, gloss reduction, chromatic aberration grade and composition of corrosion products were taken as evaluation indexes to compare the corrosion damage of surface coatings for a long time. The fatigue life and fracture morphology of fatigue specimens with two cycles of accelerated corrosion test and two years of outdoor exposure were compared and analyzed. The change rule of chromatic aberration in two

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-01-24

Received: 2019-12-24; **Revised:** 2020-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375490); 山东省高等学校“青创科技计划”资助项目 (2020KJA014)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51375490) and “Green Innovation Science and Technology Plan” of Colleges and Universities in Shandong Province (2020KJA014)

作者简介: 卞贵学 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构强度、腐蚀防护与控制等。

Biography: BIAN Gui-xue (1981—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: structural strength, corrosion protection and control.

cycles of accelerated corrosion test was consistent with that in two years of natural exposure test, and the change grade after test was 2. The gloss change regularity of the test process was the same, and the grade of gloss reduction was 3 after accelerated corrosion test. It was 4 in outdoor exposure and 3 under roof. Topcoat peeling occurred at screw edges. The number of dimples and holes of fatigue fracture of 7B04 aluminium alloy specimens did not change significantly. When the significance was 0.05, the t-test value of fatigue life of the two groups was 1.6971, and there was no significant difference in fatigue life between the two groups. The corrosion degree of the topcoat of accelerated corrosion test specimens is between that of exposed test specimens in outdoor and under roof, which is consistent with the principle of accelerated environmental spectrum compiling. It further indicates the correctness of accelerated environmental spectrum. There is no significant difference in fatigue life, which indicates that accelerated corrosion test can properly simulate the impact of the actual working environment on the fatigue performance of aircraft specimens.

KEY WORDS: accelerated corrosion; natural exposure; fatigue life; gloss reduction; chromatic aberration grade

飞机在服役环境中面临各种复杂、严酷的自然环境,腐蚀问题不容忽视。尤其是长期服役于沿海地区的海军飞机,由于经常面对高温、高湿、高盐和高紫外辐射的海洋大气环境,腐蚀问题更为突出^[1-4]。在海洋大气环境中进行自然暴露试验是一种行之有效的腐蚀研究方法,通过实地暴露试验,可以掌握不同材料在海洋大气环境中的腐蚀过程和腐蚀机理,为海军飞机设计、选材及寿命预测提供重要依据^[5-9]。然而,自然暴露试验存在试验周期长的特点,不能满足实际生产的迫切需要。近年来,开展室内加速腐蚀试验来推测长期自然暴露试验结果的方法在很多领域得到广泛应用^[2,10-29]。

目前研究人员主要致力于两方面研究:一是完善室内加速腐蚀试验方法^[2,15-19];二是建立室内加速腐蚀试验结果和自然暴露腐蚀结果的相关性^[2,20-29]。室内加速腐蚀试验环境谱编制中考虑的环境因子是否为关键因子、产品本身是否完全暴露于自然环境以及自然暴露试验的时效性等诸多因素都会影响室内加速腐蚀与自然暴露试验结果的相关性。室内加速腐蚀试验与外场暴露试验之间的相关性主要体现在采用什么参数或指标对金属基材及其涂层体系的腐蚀损伤程度进行对比分析,所选参数或指标一般以定性分析为主,定量分析为辅^[20-26]。对飞机结构来说,腐蚀会使得构件疲劳寿命下降,对飞机的使用安全影响较大,所以必须考虑腐蚀后的力学性能作为相关性研究的指标^[16,27-29]。当前对相关性的研究多采用腐蚀程度对比法,不能够全面有效地反映腐蚀损伤对疲劳性能的影响,缺少同时且综合考虑疲劳寿命对比法和腐蚀损伤程度对比法的相关性研究。

文中选取飞机某关键部位涂装模拟试样分别进

行实验室内加速腐蚀试验和机场外场自然暴露试验,对试样表面涂层腐蚀损伤程度和腐蚀后结构疲劳寿命进行对比分析。旨在研究室内加速腐蚀试验与外场暴露试验之间的对比关系,为在实验室内预测结构件的长期腐蚀失效行为提供理论和数据支撑。

1 试验

1.1 试样

依据飞机某部位搭接形式,试样均选用 7B04-7B04 铝合金薄板连接形式,7B04 铝合金成分见表 1。为便于涂层老化规律测试,用于腐蚀试验的试样采用平板搭接方式模拟某部结构连接形式,腐蚀试样外形尺寸如图 1a 所示。用于疲劳寿命测试的试样结构设计采用某部结构实际连接形式,并在此基础上,模拟局部实际结构承受载荷形式,腐蚀疲劳试样外形尺寸如图 1b 所示。试样涂装 TB06-9 底漆和 TS96-71 面漆,并按 GB/T 1765—1989《测定耐湿热、耐盐性、耐候性(人工加速)的漆膜制备法》规定的方法和喷涂厚度制备。

1.2 室内加速腐蚀试验

室内加速腐蚀试验环境谱如图 2 所示。该环境谱是按照腐蚀损伤等量法原理,综合考虑飞机服役地区地理环境、飞机使用情况以及结构形式等因素所编制的。其中飞机使用情况重点考虑飞机服役过程实际,户外飞行、棚下停放和维护在日历寿命中所占时间比例的情况。环境谱由湿热暴露、紫外照射和盐雾等三个环境谱块构成,加速试验 1 周期相当于约自然暴露 1 年。

表 1 7B04 铝合金成分

Tab.1 Chemical composition of 7B04 aluminium alloy

元素	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.10	1.4~2.0	0.05~0.25	0.20~0.60	1.8~2.8	0.10~0.25	0.10	5.0~6.5	0.05	Balance

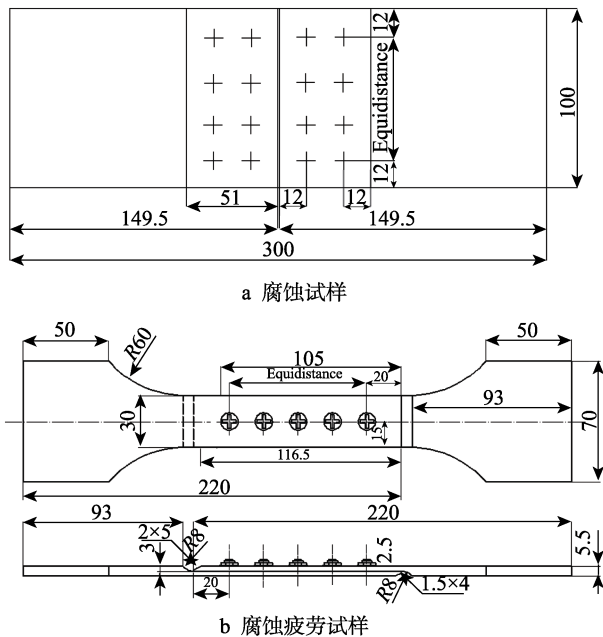
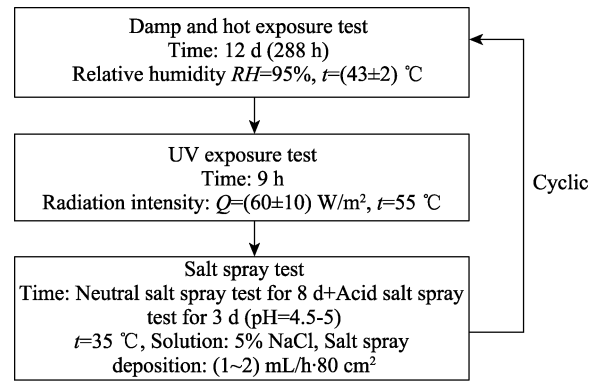


图 1 试样外形和尺寸 (单位: mm)

Fig.1 Configuration and size of the specimen (unit: mm):
a) corrosion test specimen; b) corrosion fatigue test specimen图 2 基于户外环境的加速腐蚀试验环境谱
Fig.2 Accelerated corrosion testing environmental spectrum based on outdoor environment

1.3 自然暴露试验

在海南西沙试验站, 按照 GB/T 6464—1997《金属及其覆盖层 大气腐蚀试验 现场试验的一般要求》分别进行户外、棚下与库房三类自然暴露试验, 如图 3 所示。测试周期为 2 年, 每个月定期对试样表面涂层色差、光泽度等物理性能进行测试。

图 3 自然环境暴露试验
Fig.3 Natural environment exposure test: a) outdoor; b) under roof; c) storage room

1.4 腐蚀程度检测

根据 GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》, 按涂层的失光、色差、开裂、剥落、起泡和粉化等评价指标, 对涂层的腐蚀损伤情况进行观测。宏观照片使用 Canon 60D 数码相机拍摄, 局部微观形貌采用 KH-7700 体视显微镜进行观察。采用天津市信光科技开发公司 XGP60 镜像光泽度计测量光泽度, 测量范围为 0~199.9 Gs, 分度值为 0.1 Gs, 稳定度 ≤ 0.4 Gs/30 min, 示值误差 ≤ 1.0 Gs。采用 HP-200 精密色差仪检测色差, 有效测量口径 (照明口径) 为 $\phi 8$ mm, 标准偏差 ΔE_{ab} 在 0.08 以内。

1.5 疲劳寿命对比试验

疲劳试验在 MTS810 材料综合测试机上进行, 选取外场自然暴露 2 年和加速腐蚀 2 周期的腐蚀疲劳试样。将试样取回实验室, 按照结构设计载荷: $P_{\max}=19\,580$ N, $P_{\min}=0$ 进行疲劳试验。疲劳断口经线切割

后, 用扫描电镜 (SEM) 进行分析。

2 结果分析

对于连接件而言, 由于试样连接部位材料不连续且连接部位存在间隙, 往往导致连接部位附近涂层的腐蚀损伤情况比较严重。因此, 在进行对比分析时, 重点观察连接部位附近涂层的损伤。

2.1 试样腐蚀状况对比分析

2.1.1 表面形貌对比分析

自然暴露试验 2 年和加速腐蚀试验 2 个周期后, 试样表面的宏观形貌如图 4 所示。可以看出, 试样总体均未发生明显腐蚀, 表面涂层完好, 未发生明显起泡、剥落等现象。经历 2 年的自然暴露试验和 2 个周期的加速腐蚀试验后, 加速腐蚀试样 (如图 4d 所示) 的损伤程度比户外自然暴露试样 (如图 4c 所示) 轻微, 但又明显严重于库房和棚下环境中的试样。

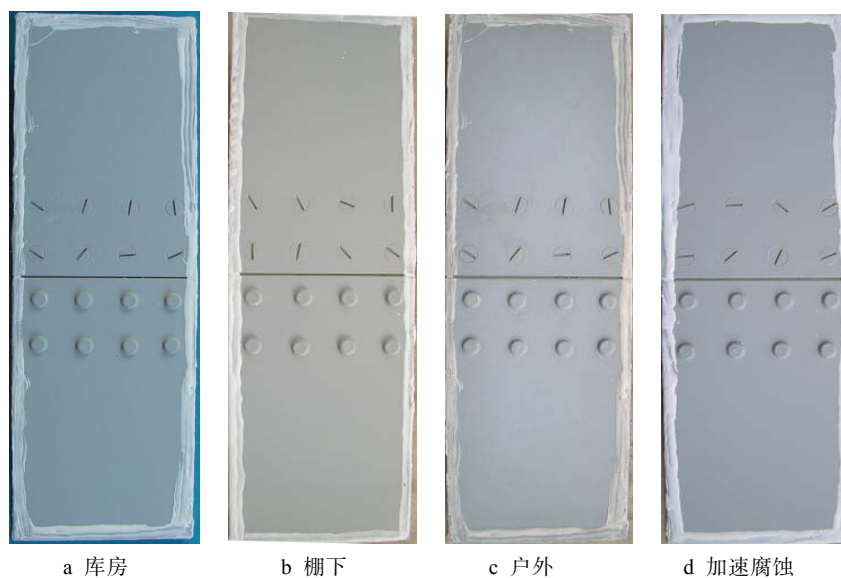


图4 不同环境试验后试样的宏观形貌对比

Fig.4 Macroscopic morphology comparison of specimens after different environmental tests:
a) storage room; b) under roof; c) outdoor; d) accelerated corrosion

自然暴露试验2年和加速腐蚀试验2个周期后,试样螺钉连接处的微观形貌如图5所示。可以看出,螺钉

边缘涂层均出现不同程度的面漆剥落现象,而且加速腐蚀试样螺钉表面出现了裂纹,涂层损伤情况最为严重。

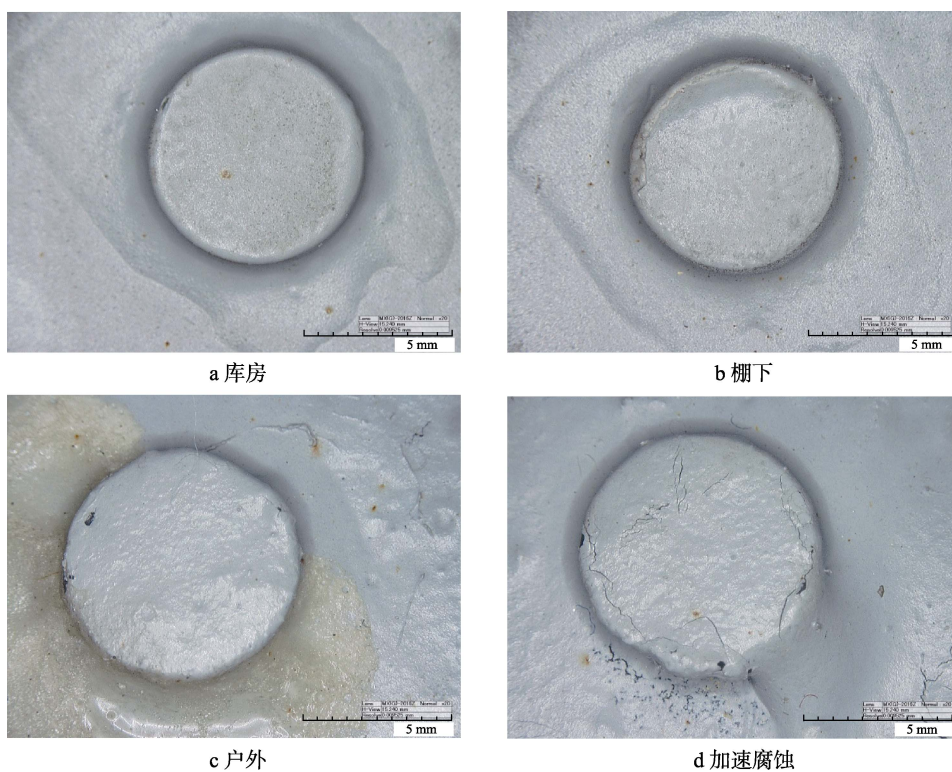


图5 不同环境试验后试样的局部微观形貌对比

Fig.5 Comparison of local microstructure after different environmental tests:
a) storage room; b) under roof; c) outdoor; d) accelerated corrosion

2.1.2 色差和失光率对比分析

将不同暴露条件下试样的色差变化和失光率进行统计平均,绘制随暴露时间的变化曲线如图6所示。由图6a可见,试验后,户外、棚下与库房试样

的色差变化等级为2级,属于轻微变色;加速腐蚀试验的试样在2个周期后,颜色变化等级为2级,属于轻微变色,变色程度介于户外试样与棚下试样之间。从色差对比结果可知,实验室加速腐蚀试验与自然环

境暴露试验规律相似, 色差值属于同一等级。

由图 6b 可见, 试样在户外、棚下和库房自然暴露 2 年后, 出现了不同程度的失光现象。其中户外暴露试样的失光率最高, 失光等级为 4, 属于严重失光。棚下暴露试样的失光程度较轻, 和室内基本一致, 而且由于涂层吸水作用, 出现了先增光后失光的现象。室内加速腐蚀试验 2 个周期后, 试样的失光率介于户外和库房试样之间, 失光等级为 3 级, 属于明显失光。对腐蚀试样继续进行加速试验, 直到自然暴露 5 年和实验室加速腐蚀 5 个周期。第 5 周期结束后, 色差等级和失光率几乎不再增加。这一结果表明, 室内加速腐蚀试验与自然环境试验具有较好的一致性。

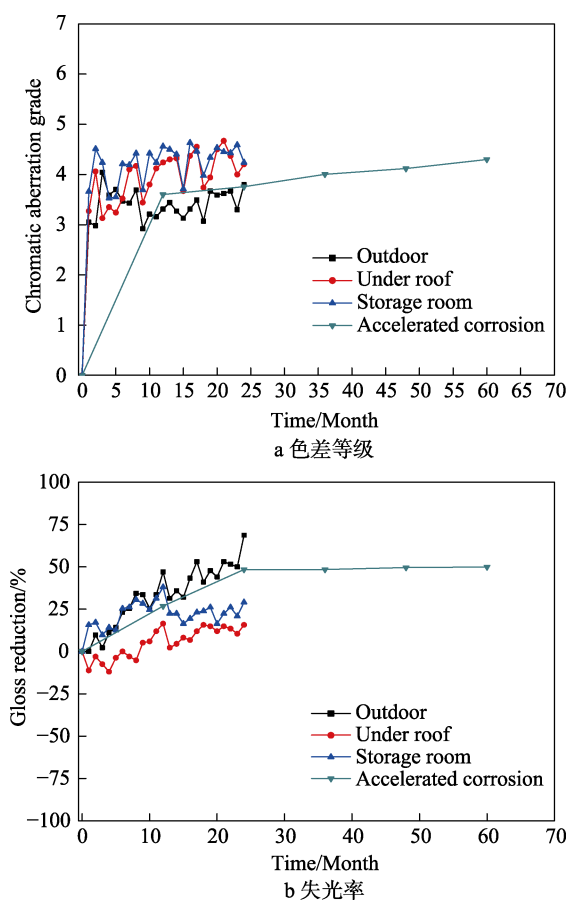


图 6 涂层老化结果对比

Fig.6 Comparison of aging results of coatings: a) chromatic aberration grade; b) gloss reduction

2.1.3 腐蚀产物成分对比分析

选取腐蚀程度最为接近的户外暴露 2 年和加速腐蚀 2 个周期的试样, 对螺钉连接周围区域腐蚀产物进行 X 射线衍射分析, 结果如图 7 所示。图 7 中各峰的位置基本相同, 强度趋于一致, 表明腐蚀产物基本相同。户外暴露试样腐蚀区域主要由金属元素的合金和氧化物组成, 结合标准卡片信息, 判定为 $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。加速腐蚀试样腐蚀区域同样由金属元素的合金和氧化物组成, 但与户外暴露试样的组成有所不

同, 主要腐蚀产物可能为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 Fe_2SO_4 [30]。这主要因为在加速腐蚀试验环境谱的编制过程中, 同时考虑了户外和棚下的腐蚀环境, 其中包括紫外时长、空气湿度等, 与实际户外存在一定差异。

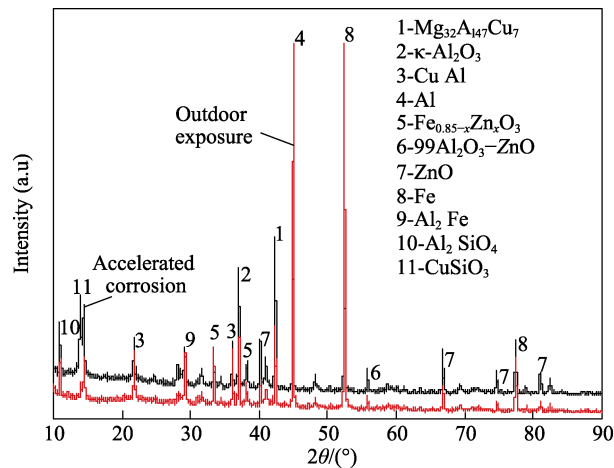


图 7 外场暴晒与加速腐蚀试样腐蚀产物成分对比

Fig.7 Comparison of corrosion product components between outdoor exposure and accelerated corrosion test

2.2 疲劳寿命对比分析

2.2.1 断口形貌对比

按照某部位设计载荷 ($P_{\max}=19\,580\text{ N}$, $P_{\min}=0$) 进行疲劳试验, 试样断口的 SEM 照片如图 8 所示。从图 8 可以发现, 户外环境下, 7B04 铝合金试样疲劳断口的韧窝及含有夹杂相的孔洞数量与加速腐蚀试样基本一致, 且两类断口韧窝和孔洞里面包含完整的夹杂相粒子, 夹杂物数量也基本一致。这表明了试样受环境影响后的弹塑性力学性能一致, 也说明了室内加速腐蚀与户外暴露过程对试样疲劳性能的影响基本一致。

2.2.2 疲劳寿命对比

1) 疲劳寿命的分布参数估计。采用估计分布参数对对数中值寿命和对数标准差的估计值为 [32-33]:

$$\hat{\mu}(T) = \frac{1}{n_T} \sum_{i=1}^{n_T} \lg N_i(T) \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}(T) = \sqrt{\frac{1}{n_T - 1} \sum_{i=1}^{n_T} (\lg N_i(T) - \hat{\mu}(T))^2} \quad (2)$$

按照式 (1) 和式 (2) 分布参数估计方法, 得到户外暴露 2 年和加速腐蚀 2 个周期的试样的疲劳寿命分布参数估计值, 见表 2。

2) 统计对比分析。取显著度 $\alpha=0.05$, 按照 F 检验法进行方差齐性检验:

$$F = \left(\frac{0.0959}{0.2245} \right)^2 = 0.1825 < F_{0.025}(5-1, 6-1) = 7.39 \quad (3)$$

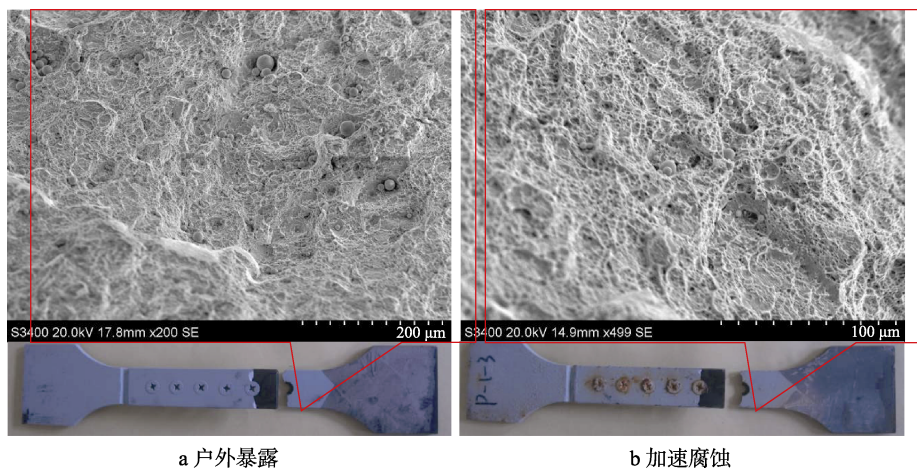


图8 断口微观形貌对比

Fig.8 Comparison of fracture microstructure: a) outdoor exposure; b) accelerated corrosion

表2 疲劳寿命的分布参数估计值

Tab.2 Estimate value of distributed parameter of fatigue life

Test condition	Outdoor exposure for 2 years					Accelerated corrosion for 2 cycles				
	1	2	3	4	5	1#	2#	3#	4#	5#
Fatigue life	11 282	10 902	16 982	11 478	16 508	11 272	41 217	32 030	12 765	15 638
Logarithmic median life $\hat{\mu}(T)$			4.1195					4.2941		
Standard deviation $\hat{\sigma}(T)$			0.0959					0.2245		

表明上述两组数据具有方差齐性，且有总体标准差：

$$S_w = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 1}} = 0.1699 \quad (4)$$

由于上述两组数据具有方差齐性，采用 t 检验法对户外暴露 2 年和加速腐蚀 2 个周期试样的疲劳寿命进行差异性检验，计算 t 检验量：

$$t = \frac{|\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2|}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 1.6971 < t_{0.025}(5 - 1 + 6 - 1) = 2.262 \quad (5)$$

检验表明户外暴晒与室内加速腐蚀试样疲劳寿命对比无显著差异。

3 结论

1) 试样分别经过室内加速腐蚀试验 2 个周期和西沙自然暴露试验 2 年后，其表面光泽度、色差、宏观腐蚀形貌等演化规律相一致，腐蚀产物成分基本一致。室内加速腐蚀试样的腐蚀程度介于户外和棚下暴露试样之间，与加速环境谱编制所考虑的主要因素相一致，也表明加速试验环境谱的正确性。

2) 试样在加速腐蚀试验 2 个周期和户外暴露 2 年后，疲劳寿命无显著差异，疲劳断口的韧窝和孔洞数量没有发生明显的变化。室内加速腐蚀可以很好地模拟飞机实际工作环境对试样疲劳性能造成的

影响。

参考文献：

- [1] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Evaluating Technology for the Calendar Life of Aircraft Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [2] 刘文琰, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112
- [3] 常红, 韩恩厚, 王俭秋, 等. 飞机蒙皮涂层对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳寿命的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 34-36.
CHANG Hong, HAN En-hou, WANG Jian-qiu, et al. Influence of Coating of Covering of Airplane on Corrosion Fatigue Life of Aluminium Alloy LY12CZ[J]. Journal of Chinese society for Corrosion and Protection, 2006, 26(1): 34-36.
- [4] 刘道庆, 吴超, 陈亮. 飞机腐蚀疲劳典型部位地面停放局部环境谱及当量折算[J]. 飞机设计, 2011, 31(5): 15-17.

- LIU Dao-qing, WU Chao, CHEN Liang. Ground Parking Local Environment Spectrum & Equivalence Converting of Aircraft Typical Parts[J]. Aircraft Design, 2011, 31(5): 15-17.
- [5] JACQUES L F E. Accelerated and Outdoor/Natural Exposure Testing of Coatings[J]. Progress in Polymer Science, 2000, 25(9): 1337-1362.
- [6] 苏艳, 舒畅, 罗来正, 等. 航空有机涂层的老化失效规律和电化学表征[J]. 表面技术, 2011, 40(6): 18-22.
SU Yan, SHU Chang, LUO Lai-zheng, et al. Weathering Mechanism and Electrochemical Characterization of Aircraft Coating[J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 18-22.
- [7] 胡建军, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 900-904.
HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Corrosion of Aircraft Structure Material in Accelerated Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(11): 900-904.
- [8] 金涛, 何卫平, 廖圣智, 等. 2024-T62 铝合金涂层外场腐蚀环境下电化学性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 8-14.
JIN Tao, HE Wei-ping, LIAO Shen-zhi, et al. Electrochemical Property for 2024-T62 Aluminum Alloy Surface Protective Coating in the Presence of Outfield Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 8-14.
- [9] 杨小奎, 张伦武, 胡滨, 等. 7475 高强铝合金在海洋和乡村大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 275-280.
YANG Xiao-kui, ZHANG Lun-wu, HU Bin, et al. Corrosion Behavior of 7475 High-strength Aluminium Alloy in Marine and Rural Atmosphere Environments[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 275-280.
- [10] 蔡健平, 刘明, 罗振华, 等. 航空铝合金大气腐蚀加速试验研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(5): 262-265.
CAI Jian-ping, LIU Ming, LUO Zhen-hua, et al. Study on Accelerated Tests for Aluminum Alloy Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(5): 262-265.
- [11] 穆志韬, 柳文林, 于战樵. 飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(3): 301-304.
MU Zhi-tao, LIU Wen-lin, YU Zhan-qiao. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Conversion Method of Aircraft Service Environment[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(3): 301-304.
- [12] 刘成臣, 王浩伟, 鲁国富. 2A12 铝合金当量加速腐蚀试验[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(5): 458-461.
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, LU Guo-fu. Equivalent Accelerated Corrosion Test of 2A12 Aluminum[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(5): 458-461.
- [13] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 50-58.
- JIANG Xue-long, YANG Xiao-hua. Review on the Research Methods of Equivalent Accelerated Relationship in Accelerated Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 50-58.
- [14] 刘金和, 张雅琴, 刘慕懿, 等. 有机涂层在模拟沙漠大气环境下的加速试验研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 64-67.
LIU Jin-he, ZHANG Ya-qin, LIU Mu-yi, et al. Study on Accelerated Test of Organic Coating in Desert Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 64-67.
- [15] ROBERT N M, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4): 17-21.
- [16] 刘文斑, 蒋冬滨. 飞机结构关键危险部位加速腐蚀试验环境谱研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 435-438.
LIU Wen-ting, JIANG Dong-bin. Study on Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum for Critical Area[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 435-438.
- [17] 陈跃良, 段成美, 金平, 等. 飞机结构局部环境加速腐蚀当量谱[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3): 338-341.
CHEN Yue-liang, DUAN Cheng-mei, JIN Ping, et al. Local Environmental Equivalent Spectrum for Accelerated Corrosion of Aircraft Structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, 1999, 31(3): 338-341.
- [18] 宋恩鹏, 刘文斑, 杨旭. 飞机内部腐蚀关键部位加速试验环境谱研究[J]. 航空学报, 2006, 27(4): 646-649.
SONG En-peng, LIU Wen-ting, YANG Xu. Study on Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum for Internal Aircraft Structure[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(4): 646-649.
- [19] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 18-24.
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, YANG Xiao-hua. Study of Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Different Materials in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 18-24.
- [20] 王振尧, 于国才, 韩薇. 钢的大气暴露腐蚀与室内模拟加速腐蚀的相关性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(2): 70-73.
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, HAN Wei. Investigation on Interrelation of Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure Corrosion of Steels[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(2): 70-73.
- [21] 苏艳, 胡秉飞, 舒畅, 等. 涂层“三防性能”与实际服役环境适应性对比研究[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 16-18.
SU Yan, HU Bing-fei, SHU Chang, et al. The Contrast Research on Tri-proof Property of Coating and Its In-service Environmental Worthiness[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 16-18.

- 2009, 38(6): 16-18
- [22] 张晓东, 陶友季, 王俊, 等. 海南自然暴晒试验与人工加速光老化试验的相关性研究[J]. 汽车工艺与材料, 2012(9): 43-44.
ZHANG Xiao-dong, TAO You-ji, WANG Jun, et al. Study on the Correlation between Artificial Accelerated Light Aging Test and Natural Exposure Test in Hainan Province[J]. Automobile Technology Material, 2012(9): 43-44.
- [23] 张勇, 丁文勇, 陈跃良, 等. 有机涂层户外暴晒与加速试验对比研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 14-17.
ZHANG Yong, DING Wen-yong, CHEN Yue-liang, et al. Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 14-17.
- [24] 刘治国, 李旭东, 穆志韬. 基于腐蚀等级的航空铝合金腐蚀当量关系[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(5): 403-406.
LIU Zhi-guo, LI Xu-dong, MU Zhi-tao. Equivalent Relation of Aero Aluminum Alloy Corrosion Based on Corrosion Grade[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(5): 403-406.
- [25] 骆晨, 蔡健平, 许广兴, 等. 航空有机涂层在户内加速试验与户外暴露中的损伤等效关系[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1750-1758.
LUO Chen, CAI Jian-ping, XU Guang-xing, et al. Equivalent Degradation of Aviation Organic Coating during Indoor Accelerated Testing and Outdoor Exposure[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1750-1758.
- [26] 丁冬冬, 凤仪, 黄晓晨, 等. 430 不锈钢室内加速腐蚀与大气暴露的相关性研究[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 56-61.
DING Dong-dong, FENG Yi, HUANG Xiao-chen, et al. Correlativity on Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure of 430 Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2016, 45(7): 56-61.
- [27] 毋玲, 孙秦, 郭英男. 高强度铝合金盐雾加速腐蚀试验研究[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 138-140.
WU Ling, SUN Qin, GUO Ying-nan. Accelerated Corrosion Tests of High Strength 7075 Aluminum Alloy in Salt Water Spray[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 138-140.
- [28] 陈群志, 李喜明, 周希沅, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 31-35.
CHEN Qun-zhi, LI Xi-ming, ZHOU Xi-yuan, et al. Investigation of Corrosion Equivalent Relationships between the Accelerated Environment and the Typical Service Environment of Aircraft Structures[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 31-35.
- [29] 朱作涛, 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.
ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Corrosion Equivalent Converting Relation Study Based on Median Life and Characteristic Life Equality[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2): 253-257.
- [30] 陈朝轶, 杨京, 李军旗, 等. 模拟海洋大气环境下 Cl⁻质量分数对 3003 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 116-121.
CHEN Chao-yi, YANG Jing, LI Jun-qi, et al. Effect of Chloride Ion Concentration on Corrosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 116-121.
- [31] 邓景辉, 陈平剑, 付裕. 用于预腐蚀航空铝合金材料疲劳寿命分析的腐蚀坑当量裂纹的抛物线模型[J]. 航空学报, 2018, 39(2): 221421.
DENG Jing-hui, CHEN Ping-jian, FU Yu. Equivalent Crack Approach for Predicting Fatigue Life of Pre-corroded Aluminum Alloys in Helicopter[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2018, 39(2): 221421.
- [32] 赵永翔, 王金诺, 高庆. 估计三种常用疲劳应力-寿命模型 P-S-N 曲线的统一经典极大似然法[J]. 应用力学学报, 2001, 18(1): 83-90.
ZHAO Yong-xiang, WANG Jin-nuo, GAO Qing. Unified Classical Maximum Likelihood Method for Estimating P-S-N Curves of Three Common Fatigue Stress-Life Models[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2001, 18(1): 83-90.
- [33] 陈晓平, 俞小莉, 张鹏伟, 等. 利用极大似然法测定曲轴弯曲疲劳性能曲线[J]. 内燃机工程, 2010, 31(6): 81-84.
CHEN Xiao-ping, YU Xiao-li, ZHANG Peng-wei, et al. Study on Crankshaft Bent Fatigue Property Curve by Maximum Likelihood Estimation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(6): 81-84.