

盐水环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响

回丽, 周松, 许良, 马少华, 王岩, 张莹莹

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

摘要: 采用预腐蚀 7XXX 铝合金 $K_t = 1$ 和 $K_t = 3$ 试件进行了实验室空气环境和盐水环境下的疲劳寿命实验, 研究了盐水环境对预腐蚀 7XXX 铝合金疲劳性能的影响. 结果表明, 盐水环境显著降低了预腐蚀 7XXX 铝合金的疲劳性能, 在实验室空气环境中疲劳寿命的分散性变大, 应力水平越低越分散. $K_t = 1$ 时在高应力水平上, 盐水环境下疲劳寿命降低不多, 是空气环境疲劳寿命的 22.71%, 而在低应力水平上盐水环境的疲劳寿命降低显著, 是其空气环境疲劳寿命的 2.22%. $K_t = 3$ 时的盐水疲劳寿命在不同应力水平上的降低几乎相当。

关键词: 预腐蚀; 盐水环境; 疲劳; 腐蚀疲劳; 铝合金

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.3.013

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2012)03-0073-06

飞机在实际使用中会遇到各种各样的有害环境, 如潮湿空气、海水、盐雾、大气中的工业污染以及来自机舱内的污染等^[1, 2]。大量飞机失效、破坏、灾难实例分析的结果表明, 腐蚀损伤和疲劳损伤是两类最主要的飞机损伤形式, 而疲劳损伤又多半在腐蚀环境中产生^[2, 3, 12]。

近年来, 国外对以飞机结构损伤为背景的疲劳及腐蚀疲劳做了大量的研究^[4-9], 如北大西洋公约组织在 70 年代后期就对典型飞机结构连接件展开了温度、湿度、盐雾、盐雾 + SO₂ 等典型环境对疲劳寿命影响的系统研究, 包括单一环境或其组合的预腐蚀后的疲劳试验、单一或组合环境与载荷谱共同作用的腐蚀疲劳试验, 以及预腐蚀后的腐蚀疲劳试验等。国内关于腐蚀对铝合金材料疲劳寿命的影响做了大量的研究^[10-12, 3], 但是在预腐蚀损伤对材料疲劳寿命影响的研究方面很少, 只有对几种典型材料经过预腐蚀后的腐蚀疲劳寿命的研究, 如张有宏^[4]、匡林^[13]等对 LY12CZ 铝合金预腐蚀后疲劳和腐蚀疲劳试验, 得出 S-N 曲线, 初步建立了腐蚀损伤与疲劳寿命降低之间的关系。

本工作研究了航空金属材料 7XXX 铝合金预腐蚀后在实验室空气环境和盐水环境下的疲劳寿命试验, 研究盐水环境对疲劳寿命和疲劳强度及其分散

性的影响。

1 试验过程

1.1 试样

轴向疲劳试件, L 方向取样, 光滑试样 ($K_t = 1$) 和缺口试样 ($K_t = 3$)。试样由 $\phi < 22\text{mm}$ 棒材加工而成, 为了便于在腐蚀环境下进行试验, 选用漏斗形试样 (见 GJB1997—94), 其形状如图 1 所示。化学成分见表 1, 部分力学性能见表 2。

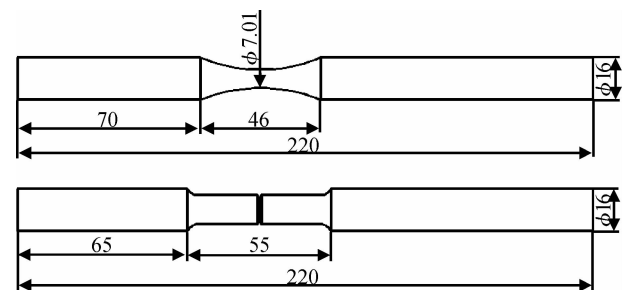


图 1 $K_t = 1$ 和 $K_t = 3$ 的低周疲劳试样形状图

Fig. 1 the shape of specimens ($K_t = 1$ and $K_t = 3$) under low cycle fatigue

1.2 试验环境

(1) 实验室空气: 温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 湿度小于 50%。

(2) 盐水环境: 含 3.5% NaCl 去离子水, 试验段完全浸没于盐水溶液中, 溶液为连续循环。

收稿日期: 2010-09-20; 修订日期: 2011-02-02

作者简介: 回丽 (1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事钛合金激光快速成形及航空材料疲劳技术研究, (E-mail) sghuili@126.com。

表1 7XXX 铝合金棒材化学成分含量(质量分数/%)

Table 1 The chemical composition of 7XXX Aluminum alloy bar (mass fraction/%)

Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
5.9~6.9	2.0~2.7	1.9~2.5	0.08~0.15	0.15	0.12	0.10	0.04	0.06	Bal.

表2 7XXX 铝合金棒材的部分力学性能

Table 2 Part of mechanical properties of 7XXX aluminum alloy bar

E/GPa	σ_b/MPa	$\psi/\%$	E_c/GPa	$\sigma_{pe0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_{e0.7}/\text{MPa}$
70.8	590.2	17.92	68.8	555.8	578.4

1.3 试验内容

试验在 MTS 810-100KN 电液伺服材料疲劳试验机上进行,其静态拉向示值相对误差为 $\pm 0.20\%$,动态拉向示值相对误差为 $\pm 1.86\%$ (试验机满足 HB5287 的要求),腐蚀疲劳试验的加载频率为 10Hz,加载波形为正弦波,应力比为 0.5。腐蚀装置为自制介质盒,保证试验数据分散在 4~5 级应力水平上,试件个数要满足由变异系数确定的最少试件

数,中值疲劳寿命区间 $10^4 \sim 5 \times 10^5$ 。

2 试验结果与分析

2.1 寿命曲线的对比

7XXX 铝合金疲劳寿命结果如表 3 所示。其宏观断口形貌如图 2 所示。

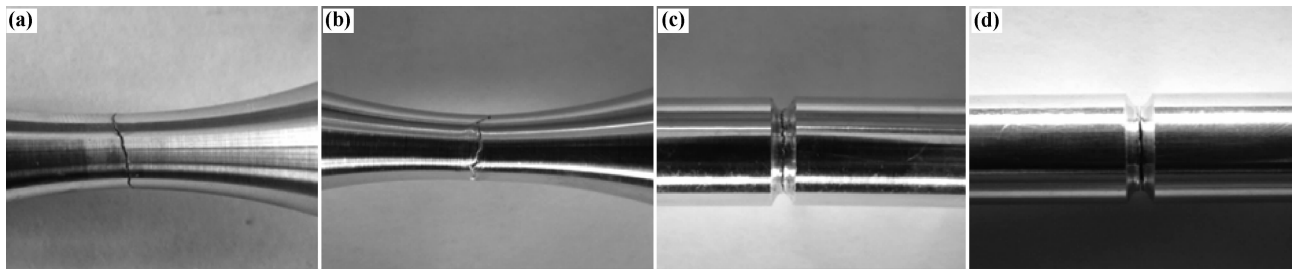


图2 7XXX 铝合金疲劳宏观断口形貌

Fig.2 macro-fracture surface of 7XXX aluminum alloy (a) $K_1 = 1, R = 0.5$, salt water environment;(b) $K_1 = 1, R = 0.5$, wet air environment; (c) $K_1 = 3, R = 0.5$, salt water environment;(d) $K_1 = 3, R = 0.5$, wet air environment

用小子样数据估计母体参数,根据表 3 数据及式(1),(2),(3)分别计算盐水环境、实验室空气环境下子样的平均值 \bar{x} 、标准差 s 和子样变异系数 C_v ,结果如表 3。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i = \hat{\mu} = \log \hat{N}_{50} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n-1}} = \sigma \quad (2)$$

$$C_v = \frac{\delta_{\max} \sqrt{n}}{t_r} \geq \frac{s}{\bar{x}} \quad (3)$$

其中 $\hat{\mu}$, σ 分别为母体平均值、母体标准差的估计量, δ_{\max} 为误差限,一般情况下可取 $\delta_{\max} = 5\%$ [14], t_r 是概率密度函数,可依据子样的观测值个数 n 查表获得。

在本研究的试验中,疲劳试验子样的个数并不很多,未能满足测定具有一定可靠度和置信度的安全疲劳寿命和安全疲劳强度所需的试验个数的要求

(只满足置信度 95%,误差限 5%),此时可借助单侧容限因数 k ,给出具有置信度 γ 和可靠度 P 的安全疲劳寿命或安全疲劳强度。

假设对数疲劳寿命遵循正态分布,可靠度 P 的对数安全寿命可表示为

$$\hat{x}_p = \hat{\mu} + u_p \hat{\sigma} = \bar{x} + u_p \beta s \quad (4)$$

式中 β 是正态母体标准差修正系数,可表示为 $\beta = \sqrt{\frac{n-1}{2} \frac{\Gamma[(n-1)/2]}{\Gamma(n/2)}}$, u_p 是可靠度 P 对应的标准

正态偏量。需要说明的是,用 $\bar{x} + u_p \beta s$ 估计出的对数安全寿命可能大于真值 $\mu + u_p \sigma$ 也可能小于真值。为保证估计出的安全寿命不超过真值,采用一个因数 k 取代 u_p 。单侧容限因数 k 由下式给出

$$k = \frac{u_p - u_\gamma \sqrt{\frac{1}{n} \left| 1 - \frac{u_\gamma^2}{2(n-1)} \right|} + \frac{u_p^2}{2(n-1)}}{1 - \frac{u_\gamma^2}{2(n-1)}} \quad (5)$$

表 3 7XXX 铝合金疲劳寿命试验结果
Table 3 Fatigue life experiment results of 7XXX Aluminum alloy

Environment	Stress concentration factor	Maximum stress	Loading cycles	\bar{x}	s	C_v	β	k	\hat{x}_p
3.5. % (mass fraction) NaCl solution	$K_1 = 1$	480	11252, 12183, 12447, 13244, 12850	4.092594	0.026906	0.006574	1.063	-5.750	3.928138
		250	112201, 140879, 114330, 106281, 120320	5.072759	0.046696	0.009205	1.063	-5.750	4.787343
		210	217840, 220150, 189277, 239468, 209850	5.331822	0.037084	0.006955	1.063	-5.750	5.105157
		170	443722, 473409, 500570, 503433, 416529	5.66868	0.035237	0.006216	1.063	-5.750	5.453301
Lab air	$K_1 = 1$	600	8960, 18097, 16260, 9378, 11432	4.090254	0.138415	0.033840	1.063	-5.750	3.244225
		500	160464, 82636, 98651, 107058, 74435, 64520	4.97129	0.13976	0.028113	1.051	-5.025	4.233177
		450	183581, 196452, 203487, 204395, 215624, 233256	5.312937	0.035409	0.006665	1.051	-5.025	5.125932
		420	518399, 644974, 872785, 476500, 372492, 499494	5.735471	0.12633	0.022026	1.051	-5.025	5.068288
3.5 % (mass fraction) NaCl solution	$K_1 = 3$	280	9015, 11154, 10202, 9589, 10860	4.005737	0.038094	0.009510	1.063	-5.750	3.772897
		150	99689, 103981, 102276, 105858, 108640	5.017218	0.014222	0.002835	1.063	-5.750	4.93028
		105	347256, 453888, 351576, 440717, 380420	5.593608	0.054348	0.009716	1.063	-5.750	5.261419
		102	474667, 494096, 525868, 542174, 536530	5.710962	0.02486	0.004353	1.063	-5.750	5.559012
Lab air	$K_1 = 3$	340	16128, 17462, 16894, 17559, 16760	4.229236	0.014951	0.003535	1.063	-5.750	4.137851
		240	108511, 90841, 63787, 96819, 76820	4.933985	0.090348	0.018311	1.063	-5.750	4.381752
		180	231342, 261040, 265420, 286475, 324200, 361320	5.455114	0.069817	0.012799	1.051	-5.025	5.08639
		160	559178, 210940, 804809, 439097, 388292	5.641824	0.214762	0.038066	1.063	-5.750	4.329148

式中 u_p 和 u_γ 分别是与可靠度和置信度 γ 相关的标准正态偏量, 可由 P 查表获得 u_p , 在置信度 γ 为 95% 时, $u_\gamma = 1.645$ 。

在上述基础上, 具有置信度 γ 和可靠度 P 的安全对数寿命有下式计算

$$\hat{x}_p = \bar{x} + k\beta s \tag{6}$$

这里 $\hat{x}_p = \log \hat{N}_p$ 或 $\hat{N}_p = \log^{-1} \hat{x}_p$ 。对本研究的试验测试结果,依据式(6)计算可靠度为99%、置信度为95%的安全疲劳寿命,计算结果见表3。

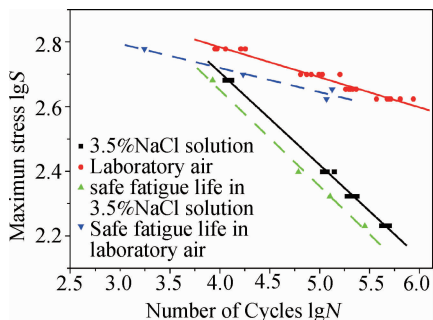


图3 7XXX 铝合金 ($K_1 = 1$) 疲劳寿命

Fig.3 Fatigue life of 7XXX aluminum alloy ($K_1 = 1$)

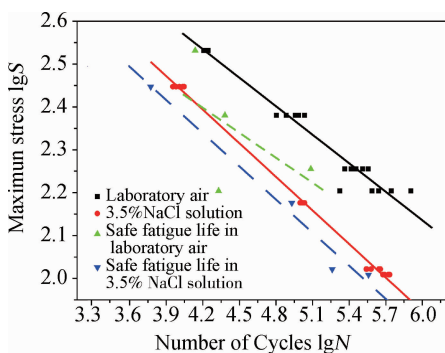


图4 7XXX 铝合金 ($K_1 = 3$) 疲劳寿命

Fig.4 Fatigue life of 7XXX Aluminum alloy ($K_1 = 3$)

预腐蚀 7XXX 铝合金在盐水环境和实验室空气环境下的疲劳试验结果、中值疲劳寿命、安全疲劳寿命如图3($K_1 = 1$)和图4($K_1 = 3$)所示。从图3和图4对中值疲劳寿命的比较可以看出,7XXX 铝合金在盐水环境下的疲劳寿命明显低于在空气环境下的疲劳寿命,而在空气环境下子样的疲劳寿命数据比较分散,应力水平越低越分散。 $K_1 = 1$ 时在高应力水平上,盐水环境下疲劳寿命降低不多,是空气环境疲劳寿命的22.71%,而在低应力水平上盐水环境的疲劳寿命降低显著,是其空气环境疲劳寿命的2.22%。 $K_1 = 3$ 时的盐水疲劳寿命在不同应力水平上的降低几乎相当,是其空气环境疲劳寿命的20.25%。

2.2 断口形貌

利用 KYKY-2800B 扫描电子显微镜对不同实验环境下的疲劳断口形貌进行了观察,如图5所示。由图5可知,试样在盐水环境中腐蚀疲劳裂纹萌生部位与空气中疲劳裂纹萌生部位位置基本上一致,均在表面点蚀处,如图中箭头所示。这说明预腐蚀损伤对其寿命的长短起很大影响,腐蚀坑加剧了试样的应力集中,盐水环境只是改变了裂纹的萌生时间,但对应力集中点的改变却不明显,盐水环境只是加剧了这种应力集中效应,从而引起疲劳寿命的改变。从图中可以观察到疲劳断口上多呈解理、准解理形貌,以疲劳源为中心向一方辐射的放射台阶和条纹,放射台阶和条纹与裂纹扩展的方向一致。通常情况下, $K_1 = 1$ 的试样

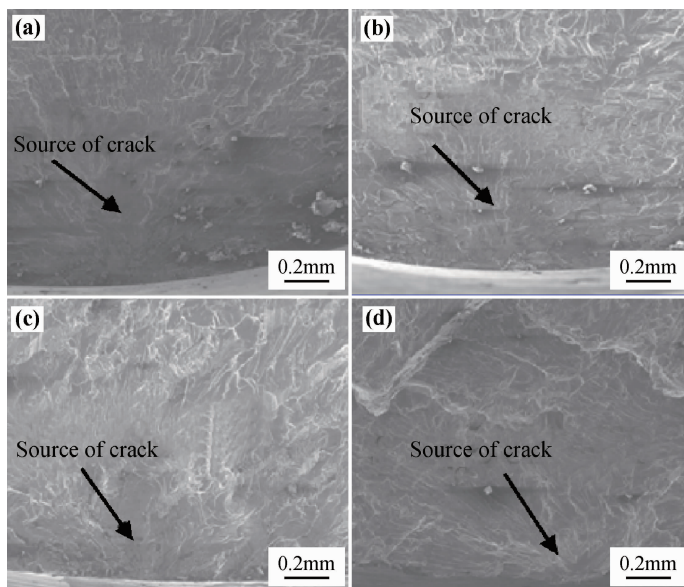


图5 7XXX 铝合金疲劳显微断口形貌

Fig.5 The micro fracture appearance of 7XXX aluminum alloy fatigue

(a) $K_1 = 1, R = 0.5$, salt water environment; (b) $K_1 = 1, R = 0.5$, wet air environment; (c) $K_1 = 3, R = 0.5$, salt water environment; (d) $K_1 = 3, R = 0.5$, wet air environment;

在两种环境下疲劳源数目为一个(图 5a,d),而 $K_1 = 3$ 的试样在两种环境下疲劳源数目不止一个,有两个或两个以上,图 5c,d 中只给出其中的一处疲劳源。

3 结论

(1)得到可靠度为 50% 的预腐蚀 7XXX 铝合金在盐水环境和实验室空气环境下的中值疲劳寿命曲线和在可靠度为 99%、置信度为 95% 时的安全疲劳寿命曲线。

(2)预腐蚀 7XXX 铝合金在盐水环境下的中值疲劳寿命低于空气环境下的疲劳寿命。空气环境下子样的疲劳寿命数据比较分散,应力水平越低越分散。

(3) $K_1 = 1$ 时在高应力水平上,盐水环境下疲劳寿命降低不多,是空气环境疲劳寿命的 22.71%,而在低应力水平上盐水环境的疲劳寿命降低显著,是其空气环境疲劳寿命的 2.22%。 $K_1 = 3$ 时的盐水疲劳寿命在不同应力水平上的降低几乎相当,是其空气环境疲劳寿命的 20.25%。

参考文献:

[1] 郭洪全,杨永安,吴有金. LC4CS 高强铝合金腐蚀疲劳行为研究[J]. 材料工程, 1995(4): 42-44.
(GUO H Q, YANG Y A, WU Y J. A study on corrosion fatigue behavior in high strength aluminum alloy LC4CS [J]. Journal of Materials Engineering, 1995 (4): 42-44.)

[2] DU M L, CHIANG F P, KAGWADE S V. Damage of Al 2024 alloy due to sequential exposure to fatigue, corrosion and fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20 (10): 743-748.

[3] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京:航空工业出版社,1992: 39-43.
(JIANG Z G. Corrosion fatigue of plane structure [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992: 39-43.)

[4] 张有宏. 飞机结构的腐蚀损伤及其对寿命的影响[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
(ZHANG Y H. The corrosion damage and its effect on life of aircraft structure [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.)

[5] KIMBERLI Jones, HOEPPNER DAVID W. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy [J]. Corrosion Science, 2006, 48(10): 3109-3122.

[6] 贾斯克 C E 海洋工程中的腐蚀疲劳[M]. 吴荫顺. 北京:冶金工业出版社,1989.
(JASK C E. Corrosion fatigue in marine engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.)

[7] DUQUESNAY D L, UNDERHILL P R, BRITT H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 371-377.

[8] JONES Kimberli, SHINDE Sachin R, CLARK Paul N. *et al.* Effect of prior corrosion on short crack behavior in 2024-T3 aluminum alloy [J]. Corrosion Science, 2008, 50 (9): 2588-2595.

[9] MENAN Frederuc, HENAFF Gilbert. Influence of frequency and exposure to a saline solution on the corrosion fatigue crack growth behavior of the aluminum alloy 2024 [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11): 1684-1695.

[10] 施翔晶. A4 铝合金锻件腐蚀环境低周疲劳性能试验研究[D]. 南昌:南昌大学, 2007.
(SHI X J. Study on low cycle fatigue properties of A4 aluminum alloy forging in corrosive environments [D]. Nanchang: Nanchang University. 2007.)

[11] 沈海军. 高强度铝合金腐蚀疲劳机理与腐蚀疲劳全寿命工程模型[D]. 西安:西北工业大学, 2000.
(SHEN H J. Corrosion fatigue mechanism of high strength aluminum alloy and full-life engineering model for corrosion fatigue [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.)

[12] 鲍蕊,张建宇,费斌军. 潮湿空气环境对 2024-T3 铝合金疲劳性能的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(5): 547-550.
(BAO R, ZHANG J Y, FEI B J. The influence on fatigue performance of 2024-T3 aluminum alloy in damp air environment [J]. Journal of Materials Research, 2007, 21 (5): 547-550.)

[13] 匡林,杨晓华,张玓,等. 预腐蚀铝合金腐蚀疲劳累积损伤规律研究[J]. 强度与环境, 2008, 35(4): 51-55.
(KUANG L, YANG X H, ZHANG D, *et al.* Research on corrosion fatigue cumulative damage rules of pre-corrosive aluminum [J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(4): 51-55.)

[14] 高镇同,蒋新桐,雄峻江. 疲劳性能试验设计和数据处理——直升机金属材料疲劳性能可靠性手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1999.
(GAO Z T, JIANG X T, XIONG J J. Fatigue performance test design and data processing——The fatigue performance reliability manual of metal material used on helicopter [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 1999.)

Influence of Saline Environment on Fatigue Property of Pre-Corroded Aluminum Alloy

HUI Li, ZHOU Song, XU Liang, MA Shao-hua, WANG Yan, ZHANG Ying-ying

(State key laboratory for Aviation digital manufacturing process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The influence of saline environment on fatigue property of pre-corroded 7XXX aluminum alloy were investigated by means of fatigue life experiments of pre-corroded 7XXX aluminum alloys ($K_1 = 1$ and $K_1 = 3$) in laboratory air environment and saline environment. The results showed that saline environment significantly reduces fatigue property of pre-corroded 7XXX aluminum alloy. Laboratory air environment enlarges the dispersivity of fatigue life which becomes larger with the lower stress level. Fatigue life ($K_1 = 1$) is little reduced at a high stress level in saline environment and is 22.71% of that in air environment. However, it is significantly deduced at a low stress level in saline environment and is 2.22% of that in air environment. In addition, fatigue life ($K_1 = 3$) is smoothly reduced at different stress level in saline environment.

Key words: pre-corrosion; saline environment; fatigue; corrosion fatigue; aluminum alloy