

不同腐蚀环境对 7475-T7351 铝合金疲劳性能及裂纹扩展速率的影响

Effects of Different Corrosion Environments on Fatigue Property and Crack Growth Rate in 7475-T7351 Aluminum Alloy

宫玉辉, 刘 铭, 张 坤, 黄 敏, 伊琳娜, 戴圣龙
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

GONG Yu-hui, LIU Ming, ZHANG Kun, HUANG Min, YI Lin-na, DAI Sheng-long
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用轴向加载疲劳和疲劳裂纹扩展速率性能测试方法, 研究了不同腐蚀环境对 7475-T7351 铝合金厚板疲劳及裂纹扩展性能的影响。结果表明: 腐蚀环境对 7475 铝合金的疲劳性能有较大影响, 油箱积水和 3.5% (质量分数, 下同) NaCl 溶液中光滑试样的疲劳强度较室温下降约 68%, 油箱积水和 3.5% NaCl 溶液环境对材料疲劳强度的影响程度基本相同; 不同环境腐蚀(空气和 3.5% NaCl) 和不同温度(室温和 125℃) 对材料的低周疲劳性能影响不大; 腐蚀环境对裂纹扩展有较明显的加速作用, 油箱积水和 3.5% NaCl 溶液环境对裂纹扩展的加速规律基本一致。

关键词: 7475 铝合金; 腐蚀环境; 疲劳性能; 疲劳裂纹扩展速率

中图分类号: TG146.2⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)09-0071-03

Abstract: The fatigue damage resistance to different corrosion environments in 7475-T7351 aluminum alloy was investigated. It was carried out by axial load fatigue test, fatigue crack growth rate test under different environments. The results show that corrosive environment affects the fatigue resistance of 7475-T7351 aluminum alloy dramatically, and the fatigue strength of smooth specimen in fuel tank or in 3.5% (mass fraction) NaCl solution decreases by 68% in comparison to room temperature, and the influence of different environments including water in fuel tank and 3.5% NaCl solution on the fatigue strength of materials is almost the same. The different corrosion environments and different temperature on low cycle fatigue in 7475-T7351 are less effective. The corrosive environment accelerates strongly the rate of fatigue crack propagation. The water in fuel tank and 3.5% NaCl solution all accelerate fatigue crack propagation by almost the same pattern.

Key words: 7475 aluminum alloy; corrosion environment; fatigue property; fatigue crack propagation rate

疲劳损伤和腐蚀损伤是两类最主要的飞机结构的损伤形式^[1,2], 而疲劳损伤又多半在腐蚀环境中产生^[3], 腐蚀环境对材料疲劳性能的影响是飞机结构设计使用的关键问题^[4]。航空铝合金材料大量用于飞机结构件, 腐蚀环境的存在会加速形成疲劳裂纹并扩展^[5-8], 从而影响飞机结构疲劳寿命及其剩余强度, 对飞机使用及安全产生威胁^[9]。国内外 7475 厚板疲劳性能已开展研究工作^[10-13], 但不同环境对 7475 铝合金疲劳性能的影响鲜有报道。本工作采用国产 7475-T7351 铝合金厚板, 开展不同腐蚀环境下轴向疲劳性能及疲劳裂纹扩展实验, 研究材料在不同腐蚀环境下的疲劳行为, 为国产 7475-T7351 铝合金厚板的工程应用提供技术基础。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料为 $\delta 17\text{mm}$ 厚的 7475-T7351 厚板, 化学成分(质量分数/%) 如下: 5.89 Zn, 2.48 Mg, 1.59 Cu, 0.0017 Mn, 0.22 Cr, 0.017 Ti, 0.056 Fe, < 0.03 Si, 余量 Al。

1.2 实验方法

低周疲劳性能实验按 GB/T 15248—94《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》, 在 10T 液压伺服疲劳试验机上进行。采用等截面试样, 直径 $d=6.5\text{mm}$, 标距长度 10mm, 试样表面纵向磨光。轴向加载应变

速率 $4 \times 10^{-3} (\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1})/\text{s}$, 三角波。

轴向疲劳性能实验按 HB 5287—96《金属材料轴向加载疲劳试验方法》进行, 取样方向为 LT 向, 应力比 $R = 0.06$, 测定光滑试样 ($K_t = 1$) 和缺口试样 ($K_t = 3$), 在室温空气环境、3.5% (质量分数, 下同) NaCl 溶液、油箱积水三种不同腐蚀环境下的疲劳寿命 $S-N$ 曲线。

疲劳裂纹扩展速率按 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》进行, 实验频率为 10Hz, 采用 C(T) 试样, $R = -1, 0.06, 0.5$, 测定室温空气环境、3.5% NaCl 溶液、油箱积水三种腐蚀环境下的疲劳裂纹扩展速率。

2 实验结果及分析

2.1 不同环境下合金的轴向疲劳性能

不同环境(空气和 3.5% NaCl 溶液)与不同温度(室温和 125℃)的低周疲劳曲线对比分别见图 1 和图 2。从图 1 可以看出, 3.5% NaCl 溶液环境的低周疲劳曲线稍低于室温空气环境的低周疲劳曲线, 说明腐蚀环境对材料的低周性能影响并不明显; 图 2 表明高温 125℃ 的低周疲劳曲线略低于室温, 说明 125℃ 对材料的低周性能影响不大。

室温空气、3.5% NaCl 溶液和油箱积水环境下不同应力集中系数的疲劳 $S-N$ 曲线对比见图 3。可以看出, 腐蚀环境对材料的疲劳性能有较大影响, 对应 5×10^5 循环次数, $K_t = 1$ 试样腐蚀环境与空气环境的疲劳强度相比降低了约 68%, $K_t = 3$ 试样腐蚀环境的疲劳强度降低约 36%。两种腐蚀环境相比较, 油箱积水和

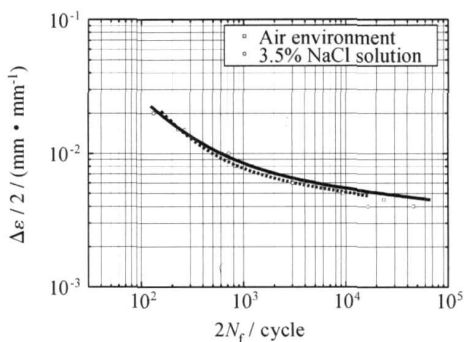


图 1 7475-T7351 铝合金厚板空气与 3.5% NaCl 溶液环境应变-寿命曲线对比

Fig. 1 Comparison of fatigue strain-life under air environment and 3.5% NaCl solution in 7475-T7351 aluminum alloy

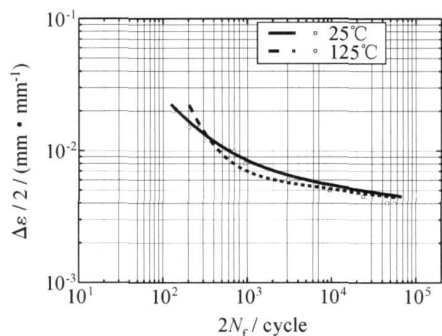


图 2 7475-T7351 铝合金厚板室温与高温应变-寿命曲线对比

Fig. 2 Comparison of fatigue strain-life between room temperature (25°C) and high temperature (125°C) in 7475-T7351 aluminum alloy

3.5% NaCl 溶液环境的疲劳曲线基本重合, 说明这两种腐蚀环境对材料疲劳强度的影响程度基本相同。

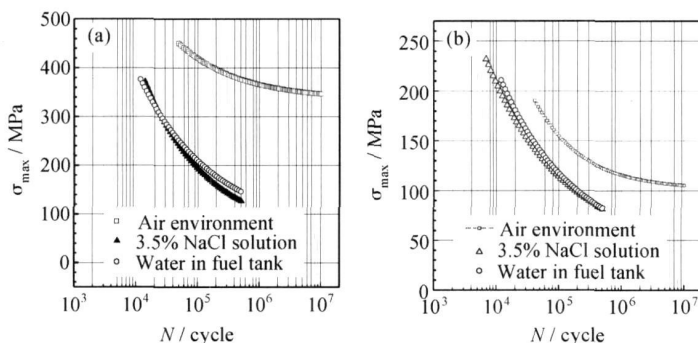


图 3 7475-T7351 铝合金厚板三种环境下的疲劳 $S-N$ 曲线对比

(a) $K_t = 1, R = 0.06$; (b) $K_t = 3, R = 0.06$

Fig. 3 Comparison of fatigue $S-N$ curves under three kinds of environments in 7475-T7351 aluminum alloy

(a) $K_t = 1, R = 0.06$; (b) $K_t = 3, R = 0.06$

2.2 不同腐蚀环境下合金的疲劳裂纹扩展速率

7475-T7351 厚板室温空气和 3.5% NaCl 溶液腐

蚀环境下不同应力比的 $da/dN-\Delta K$ 曲线见图 4。两种环境下的疲劳裂纹扩展曲线对比可以看出在腐蚀环境

下疲劳裂纹扩展速率明显加快,说明腐蚀环境对裂纹扩展有较明显的加速作用。三个应力比($R=0.5, 0.06, -1$)下,腐蚀环境对裂纹扩展的加速规律基本一致。即在低应力强度因子作用下空气与腐蚀环境下的裂纹扩展速率差别不大,随着应力强度因子的提高,腐

蚀环境与空气环境裂纹扩展速率的差异逐渐加大,腐蚀环境的加速作用逐渐增强。三个应力比下,对应 1×10^{-3} 循环次数,相同应力强度因子水平下,3.5% NaCl 溶液腐蚀环境比空气环境的裂纹扩展速率提高了 1 倍。

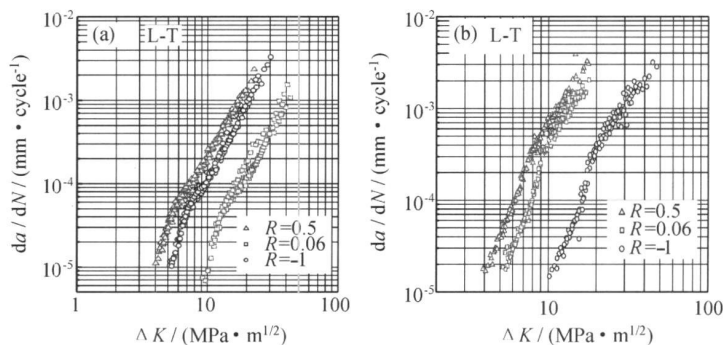


图 4 7475-T7351 铝合金不同应力比下的裂纹扩展速率对比

(a) 空气环境; (b) 3.5% NaCl 溶液

Fig. 4 Comparison of fatigue crack growth rate curves at different stress ratio in 7475-T7351 aluminum alloy

(a) air environment; (b) 3.5% NaCl solution

3 结论

(1) 腐蚀环境对 7475-T7351 铝合金的高周疲劳性能有较大影响,对应 5×10^5 循环次数, $K_{Ic}=1$ 时试样腐蚀环境与空气环境的疲劳强度相比降低了约 68%, $K_{Ic}=3$ 时试样腐蚀环境的疲劳强度降低约 36%;油箱积水和 3.5% NaCl 溶液环境对材料疲劳强度的影响程度基本相同。

(2) 3.5% NaCl 溶液的腐蚀环境对 7475-T7351 铝合金的低周疲劳性能影响并不明显,而 125℃高温对其低周疲劳性能影响也不大。

(3) 腐蚀环境对三个应力比($R=0.5, 0.06, -1$)下的裂纹扩展有较明显的加速作用,腐蚀环境对裂纹扩展的加速规律基本一致。

参考文献

- [1] ROBERT P WEI. Corrosion and Corrosion Fatigue of Airframe Materials [M]. Washington, D. C.: Available through the National Technical Information Service, 2000.
- [2] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992. 39-40.
- [3] 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): 548-550.
- [4] SHIPILOV S A. 腐蚀疲劳裂纹扩展的机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(6): 321-333.
- [5] ZAMBER J E, HILLBERRY B M. A probabilistic approach to predicting fatigue lives of corroded 2024-T3[J]. AIAA, 1999, 37

(10): 1311-1317.

- [6] 杨胜, 易丹青, 杨守杰, 等. 腐蚀环境下 2E12 航空铝合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 材料工程, 2007, (12): 26-29.
- [7] 秦剑波, 王生楠, 刘亚龙, 等. 腐蚀环境下 2024-T3 铝合金疲劳裂纹扩展和剩余强度试验研究[J]. 材料工程, 2006, (3): 14-17.
- [8] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 腐蚀环境下 LC4 铝合金疲劳损伤累积规律研究[J]. 航空材料学报, 2003, 24(3): 234-236.
- [9] ASTM STP1298, pitting corrosion and fatigue crack nucleation, effects of the environment on the initiation of crack growth [S].
- [10] LAROUCHES, BERNAD M, BUI-QUOC T, et al. Influence of cold working and interference fit on fatigue life of 7475-T7351 aluminum alloy fastener hole [A]. Design for Durability in the Digital Age vol II- 21st Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF 2001) [C]. Toulouse, France: ICAF, 2001. 681-698.
- [11] 刘铭, 张坤, 黄敏, 等. 7475-T7351 铝合金抗疲劳性能研究[J]. 稀有金属, 2009, 33(5): 626-630.
- [12] KASSIM S, AL-RUBAIEEMERSON K L, BARROSOLEONARDO B. Fatigue crack growth analysis of pre-stained 7475-T7351 aluminum alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2006, (28): 934-942.
- [13] KIM SANG TAE, TADJIEV DAMIR, YANG HYUN TAE. Fatigue life prediction under random loading conditions in 7475-T7351 aluminum alloy using the RMS model[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2006, 15(1): 89-102.

收稿日期: 2009-04-13; 修订日期: 2010-03-22

作者简介: 宫玉辉(1981—), 女, 助理工程师, 从事铝合金专业, 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095), E-mail: kaola@yahoo.cn