

腐蚀环境下 2024-T3 铝合金疲劳裂纹扩展和 剩余强度实验研究

Experimental Study on Fatigue Crack Growth and Residual Strength of
Aluminium Alloy 2024-T3 Under Mixed Corrosive Environments

秦剑波, 王生楠, 刘亚龙, 刘一兵, 周岳泉
(西北工业大学 飞机结构强度研究所, 西安 710072)

QIN Jian-bo, WANG Sheng-nan, LIU Ya-long, LIU Yi-bing, ZHOU Yue-quan
(Institute of Aircraft Structure Strength, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 对 2024-T3 铝合金在 5 种典型实验室环境和 3 种组合环境下的疲劳裂纹扩展和剩余强度进行了实验研究。通过实验获得的裂纹扩展数据, 对 Paris 公式进行条件拟合, 得到各种环境下的裂纹扩展常数, 并作了对比分析。结果表明, 腐蚀环境的参与使 2024-T3 铝合金的疲劳裂纹扩展速率明显加快, 不同腐蚀环境对疲劳裂纹扩展速率的影响程度不同, 其影响的严重程度由重到轻依次为: 油箱结构区、厨房与厕所、油箱积存水、盐水、潮湿空气、高空环境、干燥空气。实验数据还进一步表明, 腐蚀介质对临界裂纹长度的影响很小, 说明环境对剩余强度能力无直接影响。

关键词: 腐蚀环境; 2024-T3 铝合金; 实验; 裂纹扩展速率; 剩余强度

中图分类号: TG172.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)03-0014-04

Abstract: The effects of five single and three mixed corrosive environments on the fatigue crack growth and residual strength of aluminium alloy 2024-T3 were experimentally studied. The crack growth rates in corrosive environments, obtained by using Paris equation, were compared with crack growth rate in lab air. The results showed that the interactions of aggressive environments with fatigue loads caused the accelerations of fatigue crack growth rates in aluminium alloy 2024-T3. But the effects of various environments on the fatigue crack growth rate are different. Among the environments the most detrimental one was oil-box zone, followed by cookroom&washroom, tank seeper, 3.5% NaCl, moist air, high altitude and dried air. Also, the test data show the less effects of various corrosive environments on critical crack length, that is, no direct influence of corrosive environments on residual strength capability dominated by fracture toughness.

Key words: corrosive environment; 2024-T3 alloy; test; fatigue crack growth; residual strength

在过去的 30 年里, 金属材料的腐蚀疲劳裂纹扩展, 一直受到全世界研究人员的广泛注意^[1]。腐蚀损伤的初期特征是点蚀, 点蚀发展到临界尺寸使应力强度因子达到腐蚀疲劳开裂门槛值, 则可能引起铝合金的疲劳断裂^[2]。对于飞机来说, 腐蚀常见于货舱、客舱以及油箱等较密闭的区域, 因腐蚀疲劳已造成多起飞机失事。随着现代飞机结构耐久性和可靠性要求的日益提高, 就要求加强对飞机材料的腐蚀疲劳性能研究。

民机遭受大气环境及局部环境是多样的, 根据国内外的经验, 把民机结构遭受的主要环境归纳为 8 种典型实验室环境^[3], 以便在实验室取得基本数据, 为工程问题的分析和决策提供基础。国外已对常用航空金属材料在 8 种典型环境中进行了大量实验。国内对一些航空材料(如 LY12-CZ 和 LC4-CS 等铝合金)在单

一环境下(典型的如实验室空气、潮湿空气、盐溶液等)的疲劳裂纹扩展速率也作过研究实验^[4], 取得了一些数据, 但对于组合环境(如油箱结构区、高空环境区、厨房与厕所结构区等)却没有研究。

2024-T3 是一种高强度、高纯度的铝合金材料, 它被广泛应用于航空工业中。本工作采用 GB-6398 和 ASTM E647 标准实验方法, 对 2024-T3 铝合金分别在 5 种典型实验室环境和 3 种组合环境下的疲劳裂纹扩展和剩余强度进行了实验研究。

1 实验程序

1.1 材料和试样

试样为中心裂纹拉伸试样(CCT), 长度 280mm,

宽度 70mm, 厚度 3mm, 中心线切割缺口长度 $2a_0 = 4\text{mm}$, 试样取向为 T-L, 材料基本力学性能见表 1(详见文献[3])。

表 1 2024-T3 基本力学性能

| Table 1 Basic mechanical properties of 2024-T3 | | | |
|--|---------------|--------------------------|--------------------------|
| Elastic modulus / MPa | Poisson ratio | Yielding stress / MPa | Ultimate stress / MPa |
| 72500 | 0.33 | 290 | 442 |

1.2 实验设备与实验条件

实验在 MTS810±10T 液压伺服疲劳试验机上进行, 实验环境装置有环境盒、玻璃三通、加湿器、塑料导管、42 号腻子、干燥皿、湿度温度计, 裂纹测量装置为 50 倍显微图像显视仪表, 加载精度 ±1%, 实验载荷谱型取等幅谱, 正弦波型, 峰值载荷 $\sigma_{\max} = 110\text{MPa}$, 应力比 $R = 0.06$, 加载频率为 5Hz。

1.3 腐蚀环境成分

(1) 实验室空气环境

温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $\text{RH} = 20\% \sim 70\%$ 。

(2) 潮湿空气环境

在环境盒中放入适量的水饱和棉球, 以保证盒中的相对湿度 $\text{RH} \geq 90\%$ 。

(3) 干燥空气环境

在环境盒内放入一定数量的变色硅胶, 以保证盒中的相对湿度 $\text{RH} \leq 10\%$ 。

(4) 盐水环境

在环境盒内加入 3.5% (质量分数, 下同) NaCl 溶液, 它的配置按质量计算在 96.5 份蒸馏水溶解 3.5 (±0.5) 份盐。溶液液面要超出水平裂纹高度, 保证盐溶液介质完全淹没裂纹开裂表面。

(5) 油箱积存水环境

按表 2 中的成分与含量配置腐蚀介质溶液, 将配置好的溶液注入环境盒中。腐蚀介质溶液液面要超出水平裂纹高度, 保证溶液介质完全淹没裂纹开裂表面。

表 2 油箱积存水成分

| Table 2 Component of tank seeper | | | |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Component | Content / 10 ⁻⁶ | Component | Content / 10 ⁻⁶ |
| CaCl ₂ | 50 | CrCl ₃ ·6H ₂ O | 1 |
| CdCl ₂ | 1000 | CuCl ₃ ·2H ₂ O | 1 |
| MgCl ₂ | 50 | FeCl ₃ | 5 |
| NaCl | 100 | MnCl ₂ ·4H ₂ O | 5 |
| ZnCl | 10 | NiCl ₂ ·6H ₂ O | 1 |
| PbCl | 1 | Distilled water | Remaining |

(6) 高空环境区

在环境盒中放入一定数量的变色硅胶, 并同时放入若干吸有 3.5% NaCl 溶液的潮湿棉球。在保证有效干燥度的同时, 有适量的盐份子发散介质作用裂纹开裂表面。

(7) 厨房与厕所环境区

环境盒中注入 57% 的油箱积存水溶液与 43% 的 3.5% NaCl 溶液混合而成的腐蚀介质溶液。腐蚀介质溶液液面要超出水平裂纹高度, 保证溶液介质完全淹没裂纹开裂表面。

(8) 油箱结构环境区

在环境盒中注入适当的油箱积存水介质溶液, 同时再注入适量的航空煤油液体, 由于密度的不同, 两种液体不能充分混合, 形成有不同腐蚀液体的接触界面。将实验件水平穿透裂纹面刚好置于这两种腐蚀液体的接触界面, 以保证裂纹面能受到这两种不同腐蚀介质液体的共同作用。

2 实验数据处理

由于环境条件下裂纹扩展机理的复杂性, 较难用准确公式表示, 为适应工程需要, 一般用表征实验室空气环境下实验拟合的 Paris 公式:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

(1)

对飞机各部位的具体结构, 由于遭遇到的腐蚀环境不同, 不能直接引用公式(1) 计算寿命。需要针对各部位结构的材料、载荷和多种腐蚀介质, 用标准实验件进行裂纹扩展实验。在实验数据处理时, 仍然仿照公式(1) 的模式, 假设 n 值保持不变, 进行有条件的实验拟合, 得到该结构部位在环境条件下的 Paris 公式:

$$\frac{da}{dN} = C_{si}(\Delta K)^n$$

(2)

式中 C_{si} 是该部位选择的材料在遭受第 i 种腐蚀介质的综合效应和相应的应力谱作用下的裂纹扩展特性常数。一般来说有 $C_{si} > C$, 表示环境对裂纹扩展的加速作用。

本研究依据实验获得的 $a-N$ 数据集, 采用七点递增多项式法^[5] 获取 $da/dN-\Delta K$ 数据集, 在双对数坐标上绘制 $da/dN-\Delta K$ 实验点, 并对 Paris 公式进行条件拟合(取 $n = 3.9^{[3]}$), 得到各种环境下的裂纹扩展常数 C_{si} 。

3 实验结果与分析

实验结果以实验室空气环境作为参考标准, 并用此标准来衡量其余腐蚀环境对材料疲劳裂纹扩展速率

影响的大小。图 1 给出了不同腐蚀环境下的疲劳裂纹扩展速率, 表 3 给出了不同腐蚀环境下拟合的 Paris

方程常数 C_{si} 值以及与标准环境值的比值, 按腐蚀环境对疲劳裂纹扩展速率影响的严重程度由重到轻排列。

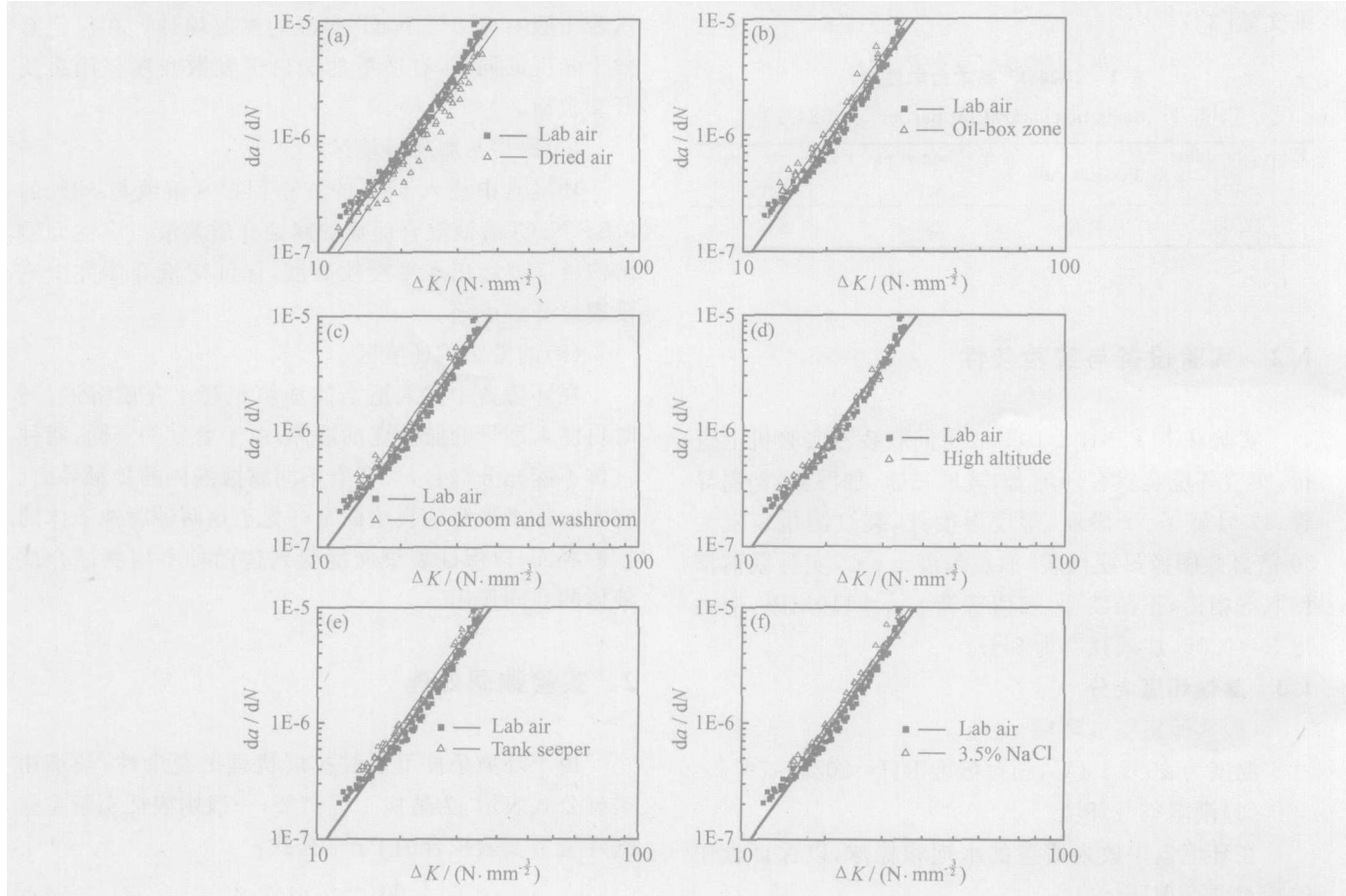


图 1 不同腐蚀环境下裂纹扩展速率实验对比

(a) 实验室空气与干燥空气; (b) 实验室空气与油箱结构区; (c) 实验室空气与厨房厕所环境;
(d) 实验室空气与高空环境; (e) 实验室空气与油箱积水; (f) 实验室空气与盐水
Fig. 1 Experimental comparison of crack propagation rates under different corrosive environments
(a) lab air and dried air; (b) lab air and oil box zone; (c) lab air and cook room and wash room; (d) lab air and high altitude; (e) lab air and tank seep; (f) lab air and 3.5% NaCl

表 3 不同腐蚀环境下 Paris 方程常数 C_{si} 的拟合值

| Table 3 Constant C_{si} in Paris equation under different corrosive environments | | | |
|--|-----------------------|---------------------------|--------------------------|
| No. | Corrosive environment | $C_{si}(\times 10^{-11})$ | $C_{si}/C_{si,lab\ air}$ |
| 1 | Lab air | 0.97422 | 1 |
| 2 | Oil box zone | 1.19870 | 1.23042 |
| 3 | Cookroom& washroom | 1.19360 | 1.22519 |
| 4 | Tank seep | 1.17370 | 1.20476 |
| 5 | 3.5% NaCl | 1.14250 | 1.17273 |
| 6 | Moist air | 1.06420 | 1.09236 |
| 7 | High altitude | 0.98196 | 1.00794 |
| 8 | Dried air | 0.73801 | 0.75754 |

实验结果表明:

(1) 干燥空气环境下的 C_{si} 值明显小于实验室空气环境下的 C 值, 如图 1a 所示, 这说明与实验室空气环境相比, 干燥空气环境延缓了材料裂纹扩展的速率。

实验中, 干燥空气环境下的疲劳裂纹扩展循环次数大于实验室空气下的循环次数, 也验证了这一点。

(2) 其余单一环境(如潮湿空气、盐水、油箱积水)下的 C_{si} 值都不同程度上大于实验室空气环境下 C 值, 说明与实验室空气环境相比, 这些腐蚀环境对疲劳裂纹扩展速率有加速作用, 这一点也能通过比较实验循环次数来加以验证。

(3) 3 种组合环境下如图 1b, c, d 所示, 高空环境下的 C_{si} 值与实验室空气环境下的 C 值差不多, 说明在高空大气环境下疲劳损伤主要是由飞行载荷造成的。而油箱结构区环境、厨房与厕所环境区对疲劳裂纹扩展速率的影响比实验室空气环境要大得多, 说明油箱区结构受发动机燃油、油箱积存水的直接作用和厨房、盥洗室及排水结构受盐溶液、污水等环境强烈影响, 加速了疲劳裂纹扩展。

(4) 各种腐蚀环境对疲劳裂纹扩展速率的影响程度是不同的, 这 and 材料本身对不同介质的抗腐蚀能力的大小有直接的关系。各种环境对疲劳裂纹扩展速率的影响程度由重到轻依次为: 油箱结构区、厨房与厕所、油箱积存水、盐水、潮湿环境、高空环境和干燥空气。

4 腐蚀介质对剩余强度的影响

从实验结果可以统计出材料在不同环境下, 在同一幅载荷作用下的临界裂纹长度 a_c 的平均值, 如表 4 所示。值得注意的是, 虽然腐蚀介质各异, 但并不影响各自的临界裂纹长度, 则说明腐蚀介质不影响 a_c 值, 即环境对剩余强度无直接影响。其原因在于, 介质虽然能对裂纹扩展加速, 各种介质下的应力腐蚀门槛值 K_{SCC} 也不同, 但控制最终裂纹失稳扩展的是 K_{IC} 值。

表 4 不同腐蚀介质下的临界裂纹长度 a_c 值

| Table 4 Critical crack lengths a_c under different corrosive environments | |
|---|------------|
| Corrosive environment | a_c / mm |
| Lab air | 24.5 |
| Moist air | 24.2 |
| 3.5% NaCl | 24.5 |
| Oil box zone | 25.1 |
| Dried air | 24.1 |
| Tank seeper | 24.2 |
| Cookroom & washroom | 24.5 |
| High altitude | 24.9 |

5 结论

(1) 腐蚀介质的参与, 使 2024-T3 铝合金的疲劳裂

纹扩展速率不同程度上加速, 证实了环境因素是飞机损伤容限设计中不可缺少的部分, 裂纹扩展分析时, 应当考虑环境的影响。

(2) 不同的腐蚀介质对疲劳裂纹扩展速率影响程度不一样, 严重程度依次为: 油箱结构区、厨房厕所、油箱积存水、盐水、潮湿空气、高空环境、干燥空气, 这与民机结构环境分类原则是一致的^[3]。

(3) 腐蚀疲劳因腐蚀介质不同其裂纹扩展速率变化极大, 但裂纹失稳扩展仍受同一个 K_{IC} 控制, 因此腐蚀疲劳问题不影响剩余强度分析方法。在环境条件下剩余强度分析与实验室空气下的剩余强度分析方法相同, 但要注意到一般腐蚀会削减结构件承载净面积, 从而降低结构静强度。

参考文献

[1] 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.
[2] 何建平. NaCl 电解液薄层下 LC4CS 铝合金腐蚀疲劳性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(4): 412– 416.
[3] 郑晓玲. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册(下册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003. 6
[4] 苏晓燕. LY12-CZ 和 LC4-CS 铝合金在多种环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展[J]. 材料工程, 1991, (1): 48– 51.
[5] 何玉怀, 李聘, 刘绍伦, 等. GH4169 合金疲劳裂纹扩展性能的实验研究[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2004, 17(4): 5– 8.

收稿日期: 2005-05-16; 修订日期: 2005-08-20
作者简介: 秦剑波(1981–), 男, 硕士研究生, 主要研究领域: 飞机结构疲劳断裂/损伤容限. 联系地址: 陕西省西安市西北工业大学 118 号信箱 (710072)。

(上接第 13 页)

of filled carbon nanotubes and nanoparticles using polycyclic aromatic hydrocarbon molecules[J]. Carbon, 1998, 36: 721– 723.
[5] EBBESEN T W. Wetting, filling and decorating carbon nanotubes[J]. J Phys Chem Solids, 1996, 57: 951– 955.
[6] KOGA K, GAO G T, TANAKA H, et al. Formation of ordered ice nanotubes inside carbon nanotubes[J]. Nature, 2001, 412: 802– 805.
[7] MONTIHOUX M. Filling single-wall carbon nanotubes[J]. Carbon, 2002, 40: 1809– 1823.
[8] AJAYAN P M, SUMIL I. Capillarity-induced filled of carbon nanotubes[J]. Nature, 1993, 361: 333– 334.
[9] HSIN Y L, HWANG K C. Production and in-situ metal filling of carbon nanotubes in water[J]. Adv Mater, 2001, 13: 11– 14.
[10] SINHA ANIL K, HWANG D W. A novel approach to bulk synthesis of carbon nanotubes filled with metal by a catalytic chemical vapor deposition method[J]. Chem Phys Lett, 2000, 332(5, 6): 455– 460.
[11] YOSHIDA N. Improvement of MFM tips using Fe-alloy-capped carbon nanotubes[J]. Physica B, 2002, 323: 149– 150.

[12] WU H Q, WEI X W, SHAO M W, et al. Preparation of Fe-Ni alloy nanoparticles inside carbon nanotubes via wet chemistry[J]. J Mater Chem, 2002, 12: 1919– 1921.
[13] HWANG H J, KWON O K, KANG J W. Copper nanocluster diffusion in carbon nanotube[J]. Solid State Communications, 2004, 129: 687– 690.
[14] 杨美华, 张荣斌, 李凤仪, 等. 碳纳米管的填充及其在催化中的应用[J]. 江西科学, 2004, 22: 1– 5.
[15] YUGE R, ICHIHASHI T, SHIMAKAWA Y, et al. Preferential deposition of Pt nanoparticles inside single-walled carbon nanohorns[J]. Adv Mater, 2004, 16: 16– 19.

基金项目: 北京市科技新星计划资助项目(H020821280120); 中国博士后科学基金资助项目
收稿日期: 2005-04-01; 修订日期: 2005-09-12
作者简介: 李霞(1980–), 女, 硕士研究生, 主要从事纳米复合材料的研 究, 联系地址: 北京化工大学碳纤维及复合材料研究所(100029)。