

企业工艺革新快报

## 不同环境下 2D70 铝合金低周疲劳性能的研究

施翔晶, 马 华

(洪都航空工业集团, 江西 南昌, 330024)



施翔晶

**摘 要:** 对 2D70 Al 合金在试验室空气、湿空气、盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 4 种环境下进行低周疲劳试验, 对比 4 种环境下的循环  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线及应变-寿命曲线, 得出结论: 相同应变下, 2D70 Al 合金随腐蚀环境增强, 循环应力降低; 相同应变下, 2D70 Al 合金在盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 2 种环境下低周疲劳寿命相近, 并且随着腐蚀环境的增强, 低周疲劳寿命降低; 腐蚀环境越强, 材料疲劳损伤程度越大。研究结果, 为预测飞机不同环境的低周疲劳寿命及对飞机腐蚀防护及耐久性设计提供参考。

**关键词:** 低周疲劳; 湿空气; 盐雾; 盐雾 + SO<sub>2</sub>

**中图分类号:** TG457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)10-0047-04

## Study on Low Cycle Fatigue Performances of 2D70 Aluminum Alloy in Different Environments

SHI Xiangjing, MA Hua

(HongDu Aviation Industry Group Corporation, Nanchang 330024, China)

**Abstract:** Having done a series of low cycle fatigue tests to 2D70 aluminum alloy under different environments which include laboratory air, moist air, NaCl fog and NaCl fog + SO<sub>2</sub>. Compare the cyclic stress versus strain curves and the strain versus life curves in four circumstances respectively which they can be obtained by above experiments. The conclusion will be made: Under the same strain, the circulation stress of 2D70 aluminum alloy reduces along with the corrosion environment strengthens; Under the same strain, the low cycle fatigue life in NaCl fog is close to the life in NaCl fog + SO<sub>2</sub> of 2D70 aluminum alloy, and the low fatigue life reduces along with the corrosion environment strengthens. The corrosion environment is stronger, the fatigue damage of materials is bigger. The studies provide the reference to forecast low cycle fatigue lifes of airplane under different environments, and have important meaning on corrosion protection and durable design of airplane.

**Key words:** low cycle fatigue; moist air; NaCl fog; NaCl fog + SO<sub>2</sub>

### 1 前 言

通常依据实验室空气环境下材料的低周疲劳性能数据来估算飞机疲劳寿命。然而, 飞机构件在服役期内会受到工业废气、潮湿天气等腐蚀, 实际所处环境与实验室是不同的<sup>[1]</sup>。研究不同环境对金属材料低周疲劳行为的影响, 对飞机结构的安全性和耐久性设计具有重要的意义。2D70 Al 合金是航空工业重要的难变形材料, 在航空领域应用广泛。目前国内外对 2D70 力学性能的研究, 集中在拉伸性能<sup>[2-3]</sup>、持久蠕变性能<sup>[4]</sup>以及应力腐

蚀敏感性<sup>[5]</sup>, 对 2D70 在腐蚀环境的疲劳性能未见报道, 对其它金属材料在腐蚀环境的疲劳性能研究也很少, 仅限于湿空气和盐雾环境对疲劳裂纹扩展的影响<sup>[6-7]</sup>、硫化氢环境疲劳试验的自动测控系统研制<sup>[8]</sup>、腐蚀装置的设计<sup>[9]</sup>。本文通过对 2D70 Al 合金在空气、湿空气、盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 4 种环境进行低周疲劳试验, 探讨了金属材料在腐蚀环境下低周疲劳试验方法, 并研究了不同环境对 2D70 Al 合金低周疲劳性能的影响。该研究成果已被设计部门用于预测飞机在腐蚀环境的低周疲劳寿命。

### 2 实 验

#### 2.1 实验方法和材料

在实验室空气、湿空气(R. H.  $\geq 90\%$ )、3.5% NaCl

收稿日期: 2012-05-07

第一作者及通信作者: 施翔晶, 女, 1976 年生, 硕士, 高级工程师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2012.10.08

盐雾和 3.5% NaCl 盐雾 + SO<sub>2</sub> 4 种环境对 2D70 Al 合金进行低周疲劳试验, 参照 GB/T15248-1994、ASTM B117-85 及相关标准进行。加载方式为轴向应变控制(应变比  $R = -1$ ), 循环波形为三角波, 应变速率  $4 \times 10^{-3}$  (mm/mm)/s。每条应变-寿命曲线做 6 个应变水平, 每个应变水平置信度达到 90%。试验结束后, 在双对数坐标纸上绘制  $\Delta\epsilon_c/2 - 2N_f$  曲线、 $\Delta\epsilon_t/2 - 2N_f$  曲线、 $\Delta\epsilon_p/2 - 2N_f$  曲线及  $\Delta\sigma/2 - \Delta\epsilon_p/2$  曲线, 计算出参量, 拟合得到循环  $\sigma-\epsilon$  曲线及应变-寿命曲线。

试验材料为 2D70 铝合金, 板厚 40 mm, 热处理状态 T6 态, 取样方向 L 向, 性能参数见表 1。试样采用直径分别为 7 mm 和 6 mm 等截面试样, 标距 10 mm。

表 1 材料性能

Table 1 Properties of 2D70 alloy

$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$E$ /GPa	Def. Str. FAC/MPa	Def. Str. Ind.
423	310	13	18	70	550	0.0918

## 2.2 实验装置

试验装置包括 MTS810 液压伺服疲劳试验机, 引伸计, 腐蚀盒, 保鲜膜, 加湿器及 SO<sub>2</sub> 气瓶, 气管。

腐蚀盒参考吴宝娟等人的设计<sup>[9]</sup>, 用 3 mm 厚有机玻璃加工成圆柱形盒子, 底部通过法兰连接试样, 但上盖并未采用有机玻璃, 而是使用保鲜膜用橡皮筋密封, 这样有效解决了腐蚀盒中试样上安装引伸计难的难题。为了在实验室中制出盐雾 + SO<sub>2</sub> 介质环境, 运用了医用吊针, 吊针针头扎在进气管上, 吊针皮管则与 SO<sub>2</sub> 气瓶连接, 腐蚀盒及进气管的连接如图 1 所示。

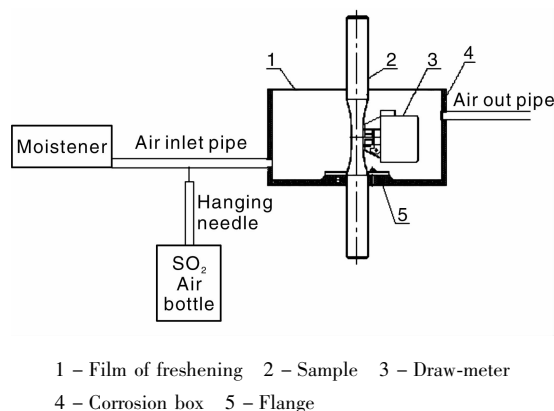


图 1 腐蚀盒及进气管的连接示意图

Fig. 1 Sketch of the corrosion box connected with air inlet pipe

## 2.3 引伸计的安装

由于是低周疲劳实验, 采用的是引伸计应变控制方式。在对每根试样进行实验时, 发现因引伸计失稳, 造成应变控制失效, 最终实验失败的问题较严重。经过分

析, 得出几点原因: ①引伸计上、下两刀口分别通过橡皮筋固紧在试样上, 如果两根橡皮筋固紧力相差较大, 实验中引伸计极易失稳; ②腐蚀环境中, 引伸计刀口固紧在试样上一段时间后, 试样固紧处易过早出现疲劳损伤, 造成应变控制失效; ③引伸计刀口在腐蚀环境长期实验后, 易产生缺口, 使得实验中引伸计滑动。针对以上影响因素, 通过大量实验摸索, 我们想出了可行的解决办法: ①引伸计刀口固紧在试样上时, 调整两根橡皮筋固紧力一致。②在试样与引伸计固紧处贴上透明胶带, 使引伸计刀口不直接接触试样表面, 防止试样过早破坏。③引伸计使用一段时间后, 取下引伸计刀口, 用金相砂纸打磨后再继续使用, 或者更换刀口。避免因刀口损伤造成的应变控制失效。

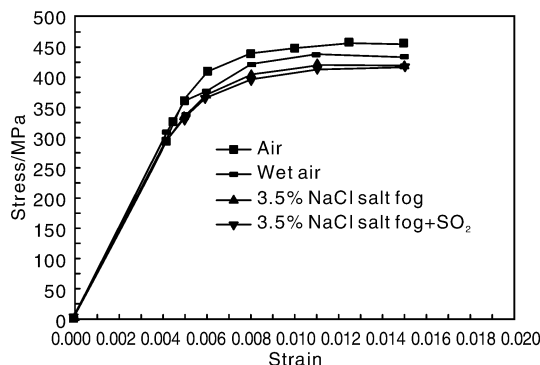
## 2.4 腐蚀介质的流通

实验环境包括湿空气、盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 3 种腐蚀环境, 实验时间一长, 湿空气在连接管中冷凝成水, 盐雾堵塞加湿器, 造成腐蚀介质流通不畅, 影响实验。为此, 在实验过程中须经常观察腐蚀介质的流通状况, 经常清洁加湿器易堵塞处, 并经常疏通连接管。另外, 在盐雾 + SO<sub>2</sub> 环境中, 因 SO<sub>2</sub> 气体有毒, 一定要将门窗打开, 将 SO<sub>2</sub> 气体随时排出。

## 3 结果及分析

4 种环境实验得到的循环  $\sigma-\epsilon$  曲线及应变-寿命曲线分别见图 2、图 3。

由图 2, 在同一坐标对比 4 种环境 2D70 的循环  $\sigma-\epsilon$  曲线, 可看出, 应变相同时, 循环应力大小为: 空气 > 湿空气 > 盐雾 > 盐雾 + SO<sub>2</sub>。由图 3, 在同一坐标对比 4 种环境 2D70 的应变-寿命曲线, 可看出, 应变相同时, 低周疲劳寿命大小为: 空气 > 湿空气 > 盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub>, 盐雾和盐雾 + SO<sub>2</sub> 环境下 2D70 的低周疲劳寿命相近并为最低。

图 2 4 种环境循环的  $\sigma-\epsilon$  曲线Fig. 2  $\sigma-\epsilon$  curves under four conditions

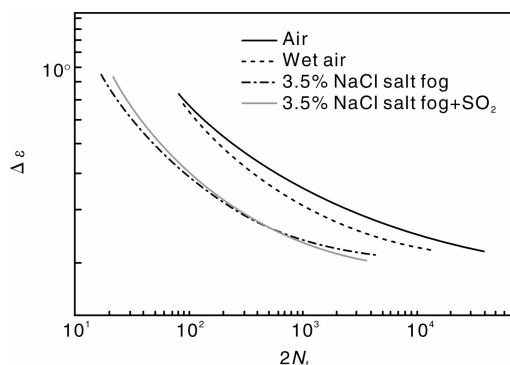


图 3 4 种环境应变-寿命曲线

Fig. 3 Strain-life curves under four conditions

空气环境低周疲劳试样断口见图 4、图 5。由图 4 知，空气环境低周疲劳断口高差较大，裂纹起始于试样表面，由图 5 可见明显二次裂纹，并出现疲劳条带、韧窝，多为塑性条带。

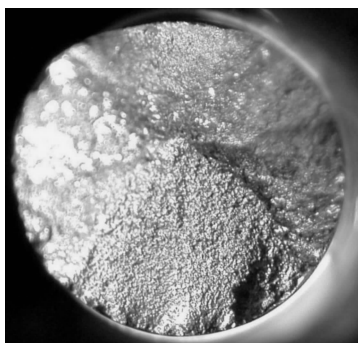


图 4 空气环境断口宏观组织

Fig. 4 Macrostructure fracture in normal air

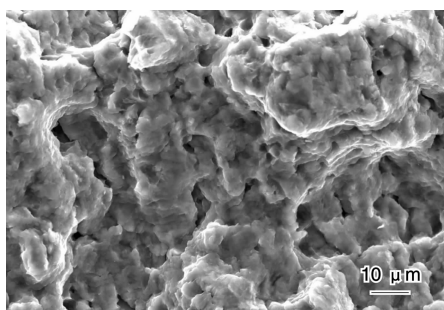


图 5 空气环境断口显微组织

Fig. 5 Microstructure of fracture in normal air

腐蚀环境低周疲劳试样断口见图 6、图 7。在图 6 和图 7 中，肉眼无法辨别腐蚀环境低周疲劳断口的疲劳源和裂纹扩展区，经 200ml:80gCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O 的溶液清洗后微观观察，断裂起始于试样表面，断口呈沿晶特征，脆性条带较多。腐蚀环境由于含有水蒸汽，与铝合金试样表面反应生成氯，易导致氢脆。若腐蚀介质中有

NaCl 盐雾，则会加速氢脆的发生。这也就印证了 4.1 的结果分析。

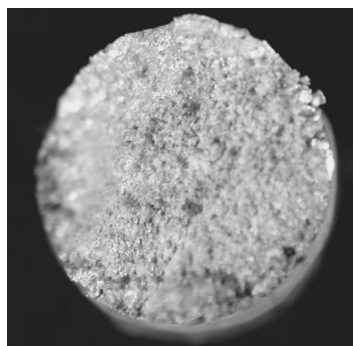


图 6 腐蚀环境断口宏观组织

Fig. 6 Macrostructure of fracture in corrosive air

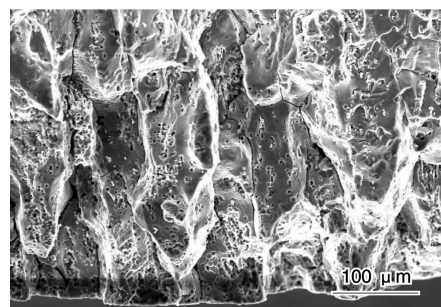


图 7 腐蚀环境断口的显微组织

Fig. 7 Microstructure of fracture in corrosive air

## 4 结 论

在实验室空气、湿空气、盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 4 种环境，当应变相同时，随腐蚀环境增强，2D70 Al 合金的循环应力降低；当应变相同时，2D70 Al 合金在盐雾及盐雾 + SO<sub>2</sub> 2 种环境下低周疲劳寿命相近，并且随腐蚀环境增强，低周疲劳寿命降低；随腐蚀环境增强，材料疲劳损伤程度越大。

## 参考文献 References

- [1] Li Zhiyi (李志义), Ding Yinwei (丁信伟). 金属材料的腐蚀疲劳[J]. *Chemical Engineering Mechanics* (化工机械), 1995, 22(4): 239-242.
- [2] Wang Guojun (王国军), Lü Xinyu (吕新宇), Jin Longbing (金龙兵). 控制 2D70 铝合金热挤压棒材截面粗晶和力学性能的研究[J]. *Aluminium Work* (铝加工), 2008(3): 26-29.
- [3] Wang Guojun (王国军), Xiong Baiqing (熊柏青), Zhang Yonggan (张永安), et al. 固溶热处理对 2D70 合金挤压棒材组织与性能的影响[J]. *Metallic Heat Treatment* (金属热处理), 2010(3): 37-42.
- [4] Yang Shoujie (杨守杰), Huang Min (黄敏), Zhu Na (朱娜), et al. 2D70 铝合金热稳定性研究[J]. *Journal of Air*

- Material*(航空材料学报), 2003, (S1): 73-77.
- [5] Zhang Xiaoyun(张晓云), Huo Qianming(霍乾明), Sun Zhihua(孙志华), et al. 高强铝合金在不同环境下的应力腐蚀行为[J]. *Science Bulletin*(科学通报), 2008(23): 2 860-2 864.
- [6] Shih T T, Clark W G. An Evaluation of Environment Enhanced Fatigue Crack Growth Rate Testing as an Accelerated Static Load Corrosion Test[J]. *Environment Sensitive Fracture*, 2009: 470-483.
- [7] Fabis T R. Computer-Controlled Fatigue Crack Growth Rate Testing on Bend Bars in a Corrosive Environment[J]. *Environment Sensitive Fracture*, 2007: 325-339.
- [8] Dong Yanjun(董延军), Zhang Yiliang(张亦良), Zhang Wei(张伟). 低周腐蚀疲劳试验自动测控系统的研制[J]. *Engineering Mechanics*(工程力学), 2003(Suppl.): 169-172.
- [9] Wu Baojuan(吴宝娟), Yu Xiaochun(於孝春). 疲劳机上腐蚀装置的设计[J]. *Piped Technique and Equipment*(管道技术与设备), 1995(6): 10-12.

## 中科院金属所制备出能全谱吸收可见光的红色二氧化钛光催化材料

光催化可实现太阳能到化学能的转化(如光催化分解水制氢),是获得新能源的一个重要途径。发展可有效吸收可见光(波长为 400~700 nm)的光催化材料是实现高效太阳能光催化转化的前提,然而多数稳定的光催化材料的可见光吸收低。掺杂能够缩小光催化材料的带隙,是增加光催化材料可见光吸收的基本手段。锐钛矿  $\text{TiO}_2$  是研究最为广泛的光催化材料,目前利用掺杂手段在一定程度上增加了该材料的可见光吸收,但仍无法实现全谱强吸收。

2004 年以来,中科院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室一直致力于解决宽带隙光催化材料的可见光全谱强吸收的难题。前期的系列研究揭示,掺杂原子的空间分布是决定掺杂能否缩小带隙的根本因素,即表面掺杂只能在带隙中引入局域化能级,体相掺杂可缩小带隙。同时,提出利用层状结构来实现掺杂原子在体相的均相分布的思路,增加光催化材料的可见光吸收。然而,如何在非层状结构材料如  $\text{TiO}_2$  中实现掺杂原子的体相掺杂一直未获突破。

最近,该实验室提出利用间隙原子弱化金属原子与氧(M-O)的键合实现替代晶格氧的掺杂原子进入体相的新机制,获得了梯度掺杂的锐钛矿  $\text{TiO}_2$ ,实现了可见光全谱强吸收,将  $\text{TiO}_2$  光电解水产氢的活性光响应范围拓展至 700 nm。

掺杂阴离子难以进入金属氧化物体相本质上是由 M-O 键的高键能以及掺杂离子与替代晶格离子间的电荷差异造成的。研究人员通过先期发展的“掺杂剂与前驱体合而为一”的特色制备思路,以  $\text{TiB}_2$  晶体为前驱体,通过水热及后续的热处理过程获得了间隙硼掺杂的锐钛矿  $\text{TiO}_2$  微米球,并且硼在从球表面至体相厚约 50 nm 的范围内呈现梯度分布。理论研究表明,间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  ( $\sigma \leq 3$ ) 离子可有效弱化周围的 Ti-O 键,使得 N 替代弱化后的 Ti-O 键的晶格氧所需的能量显著降低,且间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  的存在提高了 N 掺杂  $\text{TiO}_2$  的稳定性。实验发现,在氨气气氛下热处理梯度间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  掺杂的锐钛矿  $\text{TiO}_2$ ,不仅  $\text{N}^{3-}$  可有效替代晶格氧,而且  $\text{N}^{3-}$  的空间分布与间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  保持一致,呈现类似的梯度分布,表明间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  对 N 掺杂的空间分布起到了关键的导向作用。其根源在于  $\text{B}^{\sigma+}$  对周围的 Ti-O 键的弱化,使得  $\text{N}^{3-}$  选择性替代体相中被弱化的 Ti-O 键中的氧。同时,间隙  $\text{B}^{\sigma+}$  贡献出的额外电子可有效补偿  $\text{N}^{3-}$  与  $\text{O}^{2-}$  之间的电荷差异。

研究获得的 B/N 梯度共掺杂锐钛矿  $\text{TiO}_2$  材料呈现出独特的红色,在可见光全谱范围内具有高的吸光率。光催化性能研究表明,此材料的光电解水产氢活性响应范围接近 700 nm。该结果预示有可能利用  $\text{TiO}_2$  基光催化材料来实现高效可见光分解水制氢。

该工作如何基于掺杂实现宽带隙光催化材料的可见光吸收提供了一种新思路,可用于发展高性能可见光光催化材料。研究结果已发表在《Adv Funct Mater》(2012, 22, 3 233-3 238)、《Energy & Environmental Science》(2012, DOI: 10.1039/C2EE22930G)。

该工作得到了国家自然科学基金委重大项目、科技部 973 项目和中科院“太阳能行动计划”的资助。

(来源:中科院金属研究所)