

环境适应性设计与分析

实验室加速腐蚀环境下 7050-T7451 厚板 疲劳性能研究

张红飞, 赵连红, 王浩伟

(中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究两种应力集中系数 7050 厚板铝合金材料在腐蚀环境下的腐蚀疲劳性能。**方法** 开展 7050 厚板铝合金材料在 3.5%NaCl 盐水和油箱积水两种环境下的腐蚀疲劳实验, 采用三参数式进行 *S-N* 曲线拟合分析不同应力集中系数、不同腐蚀环境对 7050 厚板铝合金材料疲劳性能的影响。**结果** 腐蚀环境和应力集中系数都会对 7050 厚板铝合金材料的疲劳性能有影响, 3.5%NaCl 盐水和油箱积水两种腐蚀环境相较于应力集中系数对于降低材料疲劳性能的影响更大。**结论** 减少 7050 厚板铝合金应力集中系数, 加强 7050 厚板铝合金材料腐蚀防护对于提高材料抗疲劳性能有显著作用。

关键词: 7050 厚板铝合金材料; 应力集中系数; 腐蚀环境; 疲劳性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.01.015

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)01-0077-05

Fatigue Properties of 7050-T7451 Thick Plate under Accelerated Corrosion Environment in Laboratory

ZHANG Hong-fei, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei

(Structure Corrosion Protection and Control of Aviation Science and Technology Key Laboratory, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study the corrosion fatigue properties of 7050 thick plate aluminum alloy with different stress concentration coefficient under different corrosion conditions. **Methods** The corrosion fatigue experiment of 7050 thick plate aluminum alloy was carried out in 3.5% NaCl salt water and tank water. Influences of different stress concentration coefficient and different corrosion environment on fatigue performance of 7050 thick plate aluminum alloy was analyzed by *S-N* curve fitting with three parameters. **Results** Both corrosion environment and stress concentration coefficient had effects on fatigue performance of 7050 thick plate aluminum alloy. The effect of 3.5 % NaCl salt water and tank water on the fatigue performance of the material was greater than that of the stress concentration factor. **Conclusion** Reducing the stress concentration coefficient of 7050 thick plate aluminum alloy and strengthening the corrosion protection of 7050 thick plate aluminum alloy could improve the fatigue performance of the material significantly.

KEY WORDS: 7050 thick plate aluminum alloy material; stress concentration coefficient; corrosive environment; fatigue performance

7050 铝合金材料的高抗剥落腐蚀性等诸多优点^[1-2]在航空制造使用中发挥着重要作用。通常以中

厚板挤压件、自由锻件与模锻件的形式运用到飞机结构中。随着飞机在沿海地区和海域的服役机会逐渐增

多,长期的高盐雾、高湿热等严酷海洋环境极易引起7050 铝合金材料腐蚀,同时作为主承力结构的7050 厚板铝合金材料在应力和腐蚀环境双重作用易发生腐蚀疲劳损伤,导致结构腐蚀破坏,直接影响飞机安全和可靠性^[3-5]。李鸿鹏^[6]在研究铝合金腐蚀疲劳进展中指出疲劳(裂纹)损伤占飞机各类机械损伤总数的30%,飞机结构在飞机服役过程中,在承受交变载荷作用的同时,会遭受不同腐蚀因素长期腐蚀作用,使飞机结构寿命大幅度降低。目前国内学者研究LY12CZ、LC4CS 铝合金、2000 系列铝合金、7000 系列铝合金在潮湿空气、盐水、盐雾等腐蚀环境下的疲劳寿命研究^[7-12],但对于7050 铝合金材料在油箱积水环境下的疲劳性能的研究很少。文中采用不同应力集中系数($K_t=1、3$),开展7050-T7451 厚板材料在3.5%NaCl 溶液和油箱积水两种腐蚀环境下的疲劳特性研究。

1 试验方法

1.1 试验件

试样材料为7050-T7451 厚板,其化学成分见表1。试样形式采用圆形截面光滑($K_t=1$)和缺口($K_t=3$)两种试样,试验件为标准试样,每个试验点平行试样数量为4件,长度为220 mm,夹持端直径为16 mm,光滑试样试验段最小直径为7 mm,缺口试样试验段

表1 试验材料的化学成分 %

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|------|------|---------|------|---------|-----------|---------|------|----|
| 0.40 | 0.50 | 1.2~2.0 | 0.30 | 2.1~2.9 | 0.18~0.28 | 5.1~6.1 | 0.20 | 余量 |

直径为8.5 mm,如图1、图2所示。

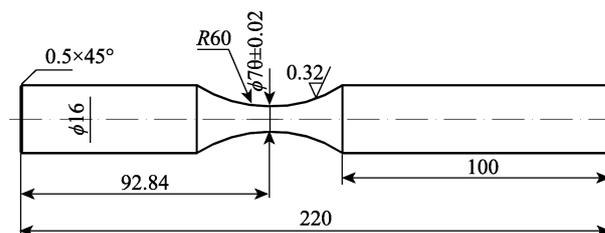


图1 圆形截面光滑试样 ($K_t=1$)

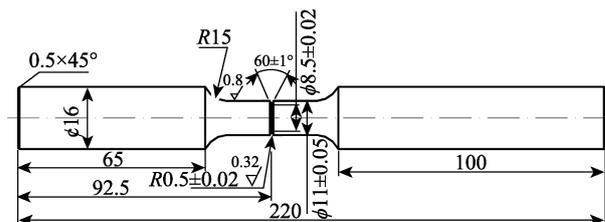
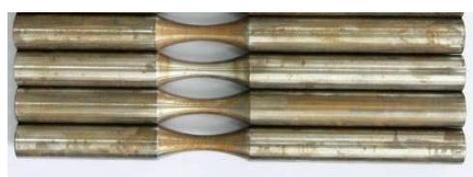


图2 圆形截面缺口试样 ($K_t=3$)

1.2 预腐蚀试验

在试验件开展疲劳实验之前,在常温常压试验环境下,试验件须在相应腐蚀溶液环境中进行预腐蚀试验,两种溶液配制要求如下:3.5%NaCl 溶液为由NaCl 和纯水配置形成的3.5%NaCl 水溶液;油箱积水溶液为采集飞机油箱底部水油混合物为母液按1:10 的稀释比例进行配比稀释形成的水溶液。

分别将试样置于以上配置的溶液中浸泡24 h,预腐蚀试验结束后取出试验件,将试验件用清水冲洗干净后常温风干,放置于干燥器皿中以备试验。经过预腐蚀的两种试验件如图3所示。



a $K_t=1$, 3.5%NaCl 预腐蚀试验件



b $K_t=3$, 3.5%NaCl 预腐蚀试验件



c $K_t=1$, 油箱积水预腐蚀试验件



d $K_t=3$, 油箱积水预腐蚀试验件

图3 7050 厚板预腐蚀试验件

1.3 腐蚀疲劳试验

正式试验需要在腐蚀环境试验盒中完成,为了便于观察及防止污染物沉积,腐蚀环境试验盒设计成由

非金属透明的腐蚀盒及潜水泵构成循环装置,实现油箱积水溶液环境下的疲劳性能测试。按GJB 1997—94《金属材料轴向腐蚀疲劳试验方法》开展腐蚀疲劳试验,试验结束后,检测记录试验数据,采用成组法测

试四级应力水平下的疲劳寿命, 载荷施加方式为应力比 $R=0.06$ 下的正弦等幅载荷, 加载频率为 10 Hz, 腐蚀溶液成分与预腐蚀配置溶液一致, 试验时温度环境为室温环境。

2 结果与分析

按照上述试验方法, 测得试验数据见表 2、表 3。根据 HB/Z 112—1986《材料疲劳试验统计分析方法》, 疲劳中值寿命要满足 95%置信度要求, 每一级应力水平为四个观测值时, 变异系数应小于 0.0314, 每种载荷下的期望 \bar{X} , 标准差 S 及变异系

数 C_v 计算见式 (1) — (3)。

$$\bar{X} = \lg N_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

每组数据计算的变异系数也记录在表 2、表 3 中。由数据可见, 变异系数最大为 0.027 34, 小于 0.0314。因此, 测试数据均满足 95%置信度要求。

表 2 7050 厚板在 3.5%NaCl 环境下的腐蚀疲劳数据

| 材料 | 品种 | d/mm | 取样方向 | 试验条件 | 频率/Hz | R | |
|---------|---------------|-------------|---------|----------------------|---------|------------|----------|
| 7050 厚板 | 棒材 | 7.000±0.020 | L | 3.5%NaCl | 10 | 0.06 | |
| K_t | σ /MPa | N/cycle | | 中值寿命 N_{50} /cycle | | 变异系数 C_v | |
| 1 | 169 | 16 766 | 23 791 | 25 972 | 27 586 | 23 121 | 0.022 16 |
| | 117 | 74 963 | 72 266 | 63 493 | 60 370 | 67 504 | 0.009 27 |
| | 94 | 171 790 | 132 512 | 109 131 | 120 293 | 131 480 | 0.016 55 |
| | 73 | 453 923 | 754 747 | 520 070 | 478 640 | 540 398 | 0.017 4 |
| 材料 | 品种 | d/mm | 取样方向 | 试验条件 | 频率/Hz | 应力比 | |
| 7050 厚板 | 棒材 | 8.500±0.020 | L | 3.5%NaCl | 10 | 0.06 | |
| K_t | σ /MPa | N/cycle | | 中值寿命 N_{50} /cycle | | 变异系数 C_v | |
| 3 | 150 | 23 517 | 14 486 | 21 575 | 23 084 | 20 295 | 0.022 97 |
| | 106 | 65 191 | 61 261 | 55 885 | 55 874 | 59 425 | 0.006 86 |
| | 85 | 131 449 | 127 639 | 151 103 | 138 361 | 136 854 | 0.006 25 |
| | 56 | 628 907 | 527 328 | 602 357 | 632 571 | 596 221 | 0.006 37 |

表 3 7050 厚板在油箱积水环境下的腐蚀疲劳数据

| 材料 | 品种 | d/mm | 取样方向 | 试验条件 | 频率/Hz | R | |
|---------|---------------|-------------|---------|----------------------|---------|------------|----------|
| 7050 厚板 | 棒材 | 7.000±0.020 | L | 油箱积水 | 10 | 0.06 | |
| K_t | σ /MPa | N/cycle | | 中值寿命 N_{50} /cycle | | 变异系数 C_v | |
| 1 | 312 | 23 981 | 37 282 | 22 052 | 19 865 | 25 016 | 0.027 34 |
| | 249 | 60 256 | 79 153 | 56 147 | 64 356 | 64 431 | 0.013 37 |
| | 192 | 166 849 | 167 330 | 133 275 | 178 952 | 160 637 | 0.010 73 |
| | 120 | 426 728 | 595 134 | 677 863 | 512 349 | 544 965 | 0.015 08 |
| 材料 | 品种 | d/mm | 取样方向 | 试验条件 | 频率/Hz | R | |
| 7050 厚板 | 棒材 | 8.500±0.020 | L | 油箱积水 | 10 | 0.06 | |
| K_t | σ /MPa | N/cycle | | 中值寿命 N_{50} /cycle | | 变异系数 C_v | |
| 3 | 159 | 17 679 | 17 737 | 14 963 | 23 562 | 18 234 | 0.019 21 |
| | 123 | 60 826 | 67 515 | 57 246 | 68 963 | 63 455 | 0.007 95 |
| | 95 | 140 409 | 97 950 | 138 992 | 187 352 | 137 566 | 0.022 43 |
| | 53 | 520 459 | 525 650 | 486 239 | 567 935 | 524 273 | 0.004 83 |

HB 5278—96《金属材料轴向加载疲劳试验方法》中, 推荐的 $S-N$ 曲线方程有 $\lg N = A + B\sigma_{\max}$, $\lg N = A + B\lg \sigma_{\max}$, $\lg N = A + B\lg(\sigma_{\max} - C)$ 及 $\lg N =$

$A + B\lg \sigma_{\max} + C$ 。通过 Origin 程序选取三参数式 $\lg N = A + B\lg(\sigma_{\max} - C)$ 对试验数据进行拟合, 四条 $S-N$ 曲线如下。

3.5%NaCl 溶液环境:

$$K_t=1 \quad \lg N=7.85 - 1.69(\lg(\sigma_{\max}-54.66))$$

$$K_t=3 \quad \lg N=10.18 - 2.77(\lg(\sigma_{\max}-17.26))$$

油箱积水环境:

$$K_t=1 \quad \lg N=24.93 - 7.46(\lg(\sigma_{\max}+252.33))$$

$$K_t=3 \quad \lg N=56.42 - 18.57(\lg(\sigma_{\max}+483.57))$$

拟合四条曲线相关系数为 0.956 95、0.977 2、0.970 9、0.978 79 具有较好的符合性, 7050 厚板试样在 3.5%NaCl 溶液与油箱积水溶液环境下的 S-N 曲线如图 5 所示。

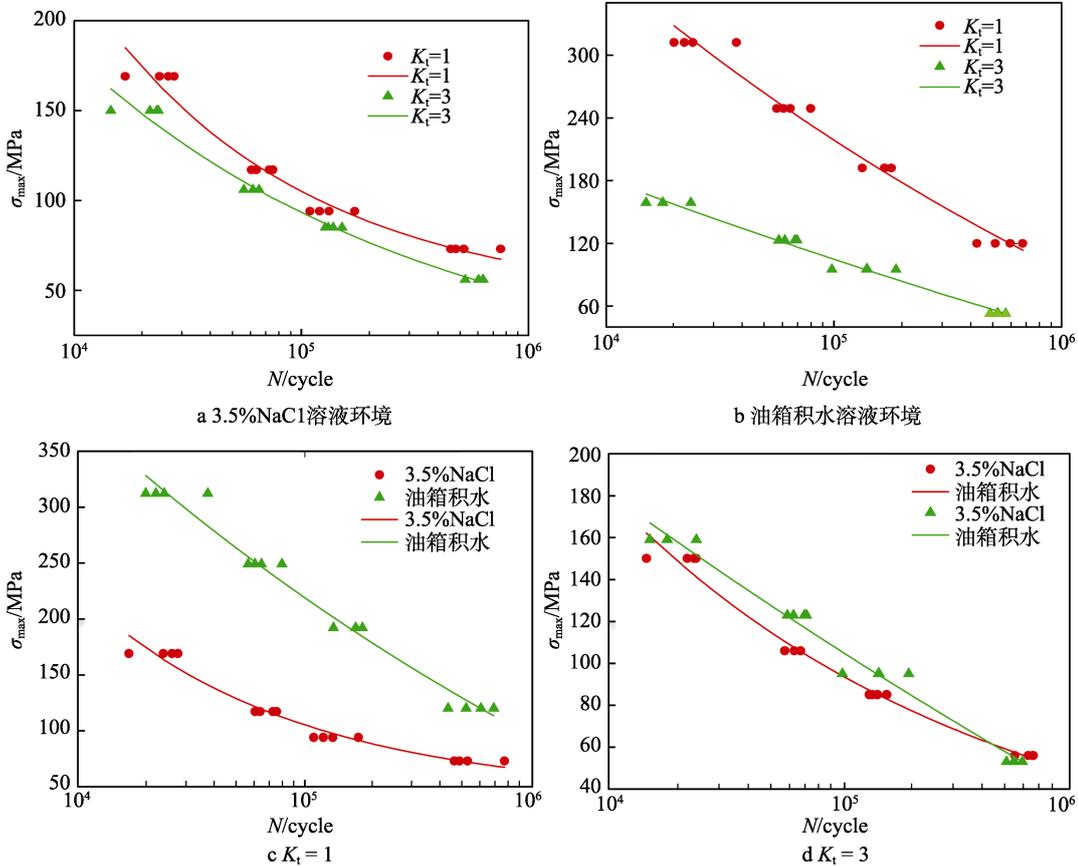


图 5 7050 厚板在不同腐蚀环境下的腐蚀疲劳曲线

由图 5 可见:

1) 在 3.5%NaCl 溶液和油箱积水环境下, 光滑试样的疲劳寿命明显高于缺口试样。这是因为缺口试样中部边缘有缺口, 存在着较大的应力集中。当施加相同应力时, 缺口试样中部所有的应力要明显大于光滑试样, 因此缺口试样的疲劳寿命比光滑试样疲劳寿命短。

2) $K_t=1$ 和 $K_t=3$ 时, 3.5%NaCl 溶液环境下试样疲劳寿命比油箱积水环境下试样低, 说明 3.5%NaCl 溶液环境比油箱积水环境更严酷。这是因为 3.5%NaCl 溶液环境中有大量的氯离子破坏了试样表面的钝化膜, 从而加速了腐蚀的进行。

3) 环境对试样疲劳寿命影响比应力集中系数影响更大, 当腐蚀环境比较恶劣时, 应力集中系数对试样疲劳寿命的影响较小。3.5%NaCl 溶液环境下, 当应力水平为 100 MPa 时, $K_t=1$ 与 $K_t=3$ 试样疲劳寿命分别为 113 739 和 73 778 次循环; 当应力水平为 150

MPa 时, $K_t=1$ 与 $K_t=3$ 试样疲劳寿命分别为 32 319 和 19 920 次循环, 试样疲劳寿命分别下降了 72% 和 73%。油箱积水溶液环境下, 当应力水平为 100 MPa 时, $K_t=1$ 与 $K_t=3$ 试样疲劳寿命分别为 850 660 和 113 150 次循环; 当应力水平为 150MPa 时 $K_t=1$ 与 $K_t=3$ 试样疲劳寿命分别为 316 093 与 24 585 次循环, 试样疲劳寿命分别下降了 63% 和 78%。

3 结论

1) 应力集中系数对材料疲劳性能同样有影响, 应力集中系数越大, 试样疲劳寿命越低。

2) 腐蚀环境使试样疲劳性能明显降低, 3.5%NaCl 溶液环境对试验疲劳寿命影响比油箱积水环境的影响更大。

3) 环境对试样疲劳寿命影响比应力集中系数影响更大, 腐蚀环境越严酷, 试样应力集中系数影响越小。

参考文献:

- [1] 贺小帆, 刘文璟, 向锦武. C-T 曲线通用性分析和试验研究[J]. 航空学报, 2005(2): 184-189.
- [2] 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.
- [3] 马少华, 回丽, 周松, 等. 腐蚀环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 91-95
- [4] 蒋金龙, 赵名洋. 预腐蚀对 LY12CZ 挤压件疲劳寿命的影响[J]. 机械强度, 1996(4): 74-75.
- [5] 王斌团, 杨庆雄. LC4CS 铝合金和 30CrMnSiNi2A 钢在大气环境预腐蚀后的疲劳曲线[J]. 机械强度, 2000(3): 222-223.
- [6] 李鸿鹏, 李锋, 马康民, 等. LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005(3): 175-177.
- [7] 马少华, 回丽, 周松, 等. 油箱积水环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2014(10): 750-754.
- [8] 叶序彬, 刘建中. 7N01-T4 铝合金腐蚀疲劳行为研究[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 115-118.
- [9] 回丽, 周松, 许良, 等. 盐水环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2012(6): 73-78.
- [10] 刘治国, 颜光耀, 吕航. 7B04 铝合金服役环境下点蚀表面损伤特征研究[J]. 环境技术, 2017, 35(5): 46-49.
- [11] 张洋洋, 上官晓峰. 7050 铝合金盐雾腐蚀疲劳性能的研究[J]. 西安工业大学学报, 2014(10): 845-850.
- [12] 冯先锋, 叶序斌, 叶笃毅, 等. 潮湿空气环境下 2024-T351 铝合金的缺口疲劳强度[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(3): 417-420.