

盐雾环境对军用飞机高强螺栓疲劳极限的影响

杨祎¹, 赵俊军², 杨小奎¹, 王辉¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.重庆嘉陵特种装备有限公司, 重庆 400032)

摘要: **目的** 研究军用飞机高强螺栓在模拟海洋大气环境下的疲劳极限变化。**方法** 采用中性盐雾试验对30CrMnSiA 高强螺栓进行预腐蚀试验, 试验持续时间为360 h, 而后再进行96 h CASS 试验。腐蚀后对样品进行疲劳试验, 并与未腐蚀的样品进行 *S-N* 曲线对比分析, 并分析其疲劳断口形貌变化。**结果** 在进行盐雾试验后螺栓发生腐蚀, 疲劳极限降低28.4%。**结论** 军用飞机用高强螺栓在模拟海洋大气环境下易发生腐蚀, 疲劳极限出现明显降低现象, 其主要原因为疲劳试验有效面积减少。

关键词: 高强螺栓; 盐雾; 疲劳极限; *S-N* 曲线; 断口形貌

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.03.011

中图分类号: TJ85; TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)03-0057-03

Effects of Salt-fog Environment on Fatigue Limit of High Strength Bolt for Military Airplane

YANG Yi¹, ZHAO Jun-jun², YANG Xiao-kui¹, WANG Hui¹

(1.Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2.Chongqing Jialing Special Equipment Co. Ltd, Chongqing 400032, China)

ABSTRACT: Objective To research the change of fatigue limit of high strength bolt for military airplane exposed to simulated marine atmosphere environment (salt-fog environment). **Methods** The high strength bolt was proceed with pre-corrosion test by 360 hours of neutral salt-fog test followed by 96 hours of CASS test. The fatigue test was performed after the corrosion test. The corroded sample was compared with the uncorroded by virtue of the *S-N* curve and fracture morphologies. **Results** The bolt was corroded after salt-fog test and the fatigue limit of high strength bolt decreased by 28.4%. **Conclusion** High strength bolt for military airplane is likely to be corroded in the simulated marine atmosphere environment and its fatigue limit decreases evidently. Its main reason is the reduction of effective fatigue test area due to serious corrosion.

KEY WORDS: high strength bolt; salt-fog; fatigue limit; *S-N* curve; fracture morphology

30CrMnSiA 高强度螺栓以其强度高、耐腐蚀性能强等特点被广泛应用于航空航天领域, 通常用于起落架等承力部位。军用飞机在使用过程中, 承力部件除了在常规环境中使用, 也需要在海洋环境气候下长期服役, 比如舰载飞机会长时间处于高湿和高盐雾等恶劣的海洋大气环境中, 并受大风、海雾、潮汐、海水飞溅等多种环境因素的影响, 使舰载飞机各部位零部件极易发生腐蚀, 致使其各项性能在长期服役过程中

发生变化, 从而直接影响舰载飞机的飞行安全, 降低其服役期限, 同时还会给机务维修工作带来很大负担和昂贵的维护费用^[1-3]。目前, 军用飞机螺栓疲劳性能测试大多未考虑到腐蚀环境因素, 因而尚不能正确评估其在海洋环境中的疲劳极限。因此, 研究海洋环境腐蚀对军用飞机螺栓疲劳极限和疲劳断口形貌的影响是当前军用飞机服役寿命研究领域中的重要课题, 并具有重要的理论意义和实践意义。

收稿日期: 2016-07-27; 修订日期: 2016-08-04

作者简介: 杨祎(1988—), 女, 重庆人, 主要从事金属材料疲劳寿命研究。

$S-N$ 曲线是描述材料疲劳性能的基本数据, S 代表应力水平, N 代表疲劳寿命。 $S-N$ 曲线拟合的本质是由疲劳寿命和疲劳极限的试验点预测真实值, 是对疲劳试验信息规律的提炼和总结。 $S-N$ 曲线的拟合问题已有大量研究, 普遍采用的是最小二乘法 $S-N$ 曲线可以由疲劳试验获得, 通常使用成组法测定中短寿命区的 $S-N$ 曲线, 升降法用于测定某一给定寿命下的疲劳极限^[4-10]。文中采用成组法测定样品腐蚀前后的疲劳极限, 采用最小二乘法拟合 $S-N$ 曲线。利用腐蚀前后疲劳极限的对比分析, 讨论海洋环境腐蚀对军用飞机螺栓疲劳极限的影响。

1 试验

选用材质为 30CrMnSiA, 尺寸为 $M10\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的航空用高强螺栓作为试验样品, 螺栓表面进行镀铬钝化处理 (试样件数: 15 件, 平行试样件数: 15 件)。先对样品进行预腐蚀试验, 腐蚀试验选用模拟海洋大气腐蚀的盐雾试验, 腐蚀时间为中性盐雾 360 h, CASS 试验 96 h。腐蚀后再对样品进行疲劳试验, 与平行试样进行 $S-N$ 曲线及疲劳极限对比分析, 并分析其疲劳断口形貌变化。

中性盐雾试验箱温度为 $35.0\sim 35.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用 24 h 连续喷雾, 盐水溶液质量浓度为 $49\sim 51\text{ g/L}$ (密度: $1.0322\sim 1.0332\text{ g/cm}^3$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 溶液 pH 值为 $6.72\sim 6.82$ 。CASS 试验箱温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用 24 h 连续喷雾, 盐水溶液质量浓度为 49 g/L (密度: 1.0324 g/cm^3 , $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 加入密度为 0.26 g/L 的 $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 再用适量冰乙酸调节 pH 值至 3.16。

疲劳试验方法参照 GJB 715.30A—2002《紧固件试验方法拉伸疲劳》以及 GB/T 13682—92《螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验方法》, 疲劳试验设备采用 MTS322 电液伺服疲劳试验系统。试验采用正弦波加载, 循环应力比 $R=0.1$, 频率为 30 Hz , 试验循环基数为 5×10^6 次。疲劳断口形貌采用 FEI-Quanta 200 环境扫描电镜进行分析。

2 结果与讨论

2.1 疲劳试验结果

腐蚀前后 30CrMnSiA 高强螺栓疲劳试验对比结果见表 1。根据 GB/T 24176—2009《金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法》中最小二乘法公式计算二者疲劳极限, 利用线性的数学模型分析 $S-N$ 关系: $x=b-ay$, 取 $x=\lg N$, a 和 b 为常数, a 由公式 (1) 计算, b 由公式 (2) 计算。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$b = \bar{x} + a\bar{y} \quad (2)$$

可计算出腐蚀前的 $S-N$ 曲线为: $\lg N=10.115\ 27-0.009\ 55S$, 如图 1a 所示。当 $N=5\times 10^6$ 时, 可得螺栓腐蚀前疲劳极限为 $S=357.7\text{ MPa}$ 。同理可得腐蚀后 $S-N$ 曲线为: $\lg N=8.881\ 13-0.008\ 52S$, 如图 1b 所示。当 $N=5\times 10^6$ 时, 可得螺栓腐蚀后疲劳极限为 $S=256.1\text{ MPa}$ 。由此可知, 腐蚀后疲劳极限 S 比腐蚀前降低了 28.4%。

表 1 腐蚀前后疲劳试验结果

序号	腐蚀前最大 应力值/MPa	腐蚀前疲劳寿 命/周次	腐蚀前最大 应力值/MPa	腐蚀后疲劳 寿命/周次
1	517	155 489	448	106 486
2	517	121 827	448	195 280
3	517	213 520	448	92 588
4	483	339 005	414	211 769
5	483	213 661	414	159 368
6	483	396 037	414	238 538
7	448	1 104 512	379	578 012
8	448	504 511	379	491 954
9	448	477 750	379	303 745
10	414	1 335 258	345	940 439
11	414	1 904 388	345	1 183 771
12	414	5 000 000	345	792 577
13	379	5 000 000	310	1 354 375
14	379	5 000 000	310	1 725 210
15	379	5 000 000	310	5 000 000

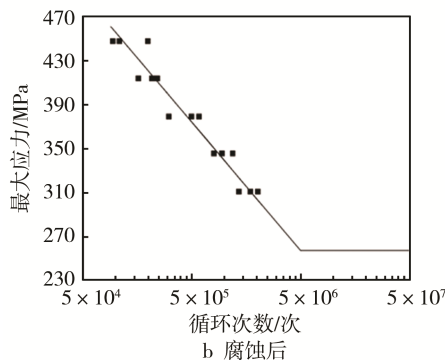
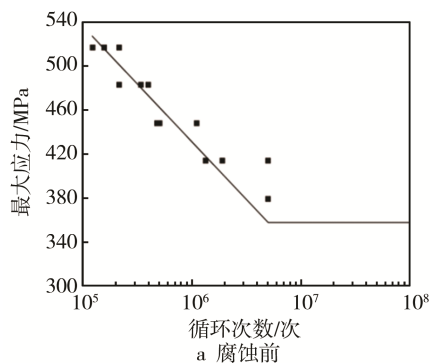


图 1 $S-N$ 曲线

2.2 疲劳断口 SEM 分析

对疲劳断裂样品进一步进行断口形貌分析, 由图 2a 宏观断口可以看出, 疲劳裂纹起源于螺纹根部, 有多点裂纹源。由图 3b 可知, 疲劳裂纹源有裂纹扩展相遇形成的台阶纹, 未发现原始裂纹、非金属夹

杂、折叠等原始缺陷。由图 3c 裂纹扩展区断口形貌可以看出此为准解理断裂, 有典型的疲劳贝壳纹, 最后断裂区断口为韧窝的韧性断裂。由图 4 腐蚀试验后的螺栓断口形貌可知, 试样边缘发生严重腐蚀并形成腐蚀产物, 较试样内部裂纹扩展区更加光滑, 可以证明腐蚀后疲劳裂纹源有所增加。

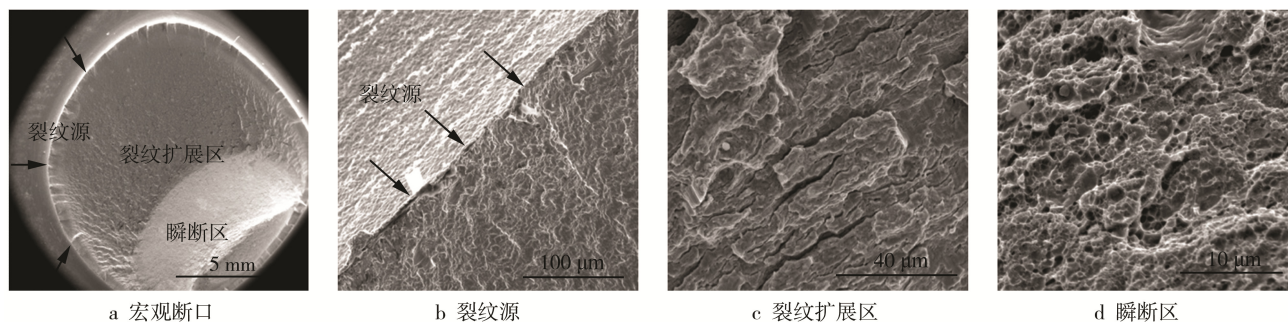


图 3 腐蚀前断口分析图片

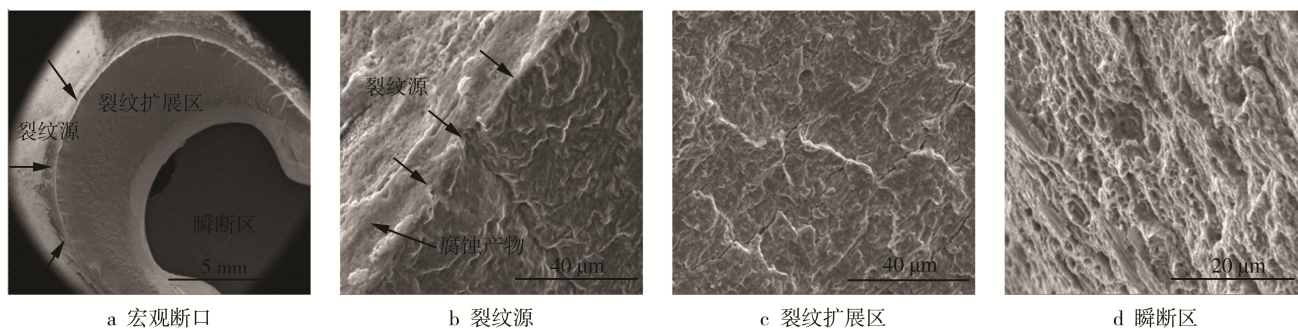


图 4 腐蚀后断口分析图片

3 结论

1) 由试验可知腐蚀试验后的螺栓疲劳极限下降了 28.4%。其主要原因在于盐雾使 30CrMnSiA 高强螺栓试样发生了严重的腐蚀, 生成腐蚀产物, 造成疲劳试验有效面积减少, 导致其疲劳极限下降。

2) 由断口形貌分析表明, 经盐雾试验后螺栓的腐蚀损伤程度增加, 这些损伤源在疲劳加载过程中易形成较多的疲劳裂纹扩展源, 加速疲劳失效。

3) 飞机在海洋环境使用过程中需做好螺栓的防护。例如对螺栓表面进行涂镀、喷塑等处理; 同时要对螺栓周围环境进行保洁, 尽可能减少螺栓与大气中腐蚀介质的接触, 减少螺栓的腐蚀。

参考文献:

- [1] CHEN Jie-jong, SHIH Yan-Shin. A Study of the Helical Effect on the Thread Connection by Three Dimensional Finite Element Analysis[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191(2): 109—111.
- [2] 朱若燕, 李厚民. 高强度螺栓的预紧力及疲劳寿命[J]. 湖北工学院学报, 2004, 19(3): 135—136.

- [3] FUKUOKA T. Evaluation of the Method for Lowering stress Concentration at the Thread Root with Modification of Nut Shape[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu a Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part A, 1997, 119(1): 1—9.
- [4] 陈晓尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012: 72—76.
- [5] 李聘, 张国栋, 许超, 等. 确定高周应力疲劳 $S-N$ 曲线的方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(2): 39—43.
- [6] 罗国权. 螺栓疲劳破坏分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(增): 39—42.
- [7] HONG Gang-lei. The Expert Treatment System of Fatigue Loading Spectrum for Large-span Grid Structures[J]. Proceedings of Sixth Pacific Structural Conference, 2001, 3(2): 944—949.
- [8] 谢金标, 姚卫星. 疲劳 $S-N$ 曲线拟合的双加权最小二乘法[J]. 宇航学报, 2010, 31(6): 1661—1665.
- [9] 马群, 佟晓君, 武春亭. P-S-N 曲线的处理与比较[J]. 工程力学, 2002(增): 676—679.
- [10] 田杰, 商高高, 周建兵, 等. 高强度连杆螺栓的疲劳寿命分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(5): 77—79.