

搭接结构件腐蚀疲劳试验技术

刘海燕, 王红斌, 张亚娟

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 腐蚀疲劳试验是评估腐蚀环境对结构件疲劳寿命影响的有效方法。从试验件设计、疲劳载荷谱加载方式、典型腐蚀环境的施加、试验数据的处理原则等方面对搭接结构件腐蚀疲劳试验技术进行了较全面的介绍。

关键词: 搭接件; 腐蚀; 疲劳试验; 腐蚀疲劳寿命

中图分类号: TG172.3; V216.5⁺7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0013-04

Corrosion Fatigue Test Technique of Lap Jointed Structure

LIU Hai-yan, WANG Hong-bin, ZHANG Ya-juan

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The corrosion-fatigue test is an efficient method to evaluate the influence of corrosion on structure fatigue life. The corrosion-fatigue test techniques of lap jointed structure were introduced from the aspects of specimen design, fatigue load spectrum and load mode, typical corrosion environment, and the test data processing principle.

Key words: lap jointed structure; corrosion; fatigue test; corrosion fatigue life

在机翼中, 搭接是承载结构经常采用的连接形式。因为搭接面、连接孔和材料存在不一致性, 搭接结构的疲劳寿命对环境的腐蚀非常敏感。目前, 研究腐蚀环境对搭接结构疲劳寿命影响的最可靠方法是腐蚀疲劳试验。与腐蚀、疲劳同时作用相比, 腐蚀与疲劳交替影响的作用可以忽略^[1]。

高水平的腐蚀疲劳试验技术是获得可靠试验数据的保障。试验件设计、试验载荷谱和载荷施加、腐蚀环境的施加是腐蚀疲劳试验的主要内容, 其中腐蚀环境的施加是腐蚀疲劳试验的关键技术。

1 搭接结构件的腐蚀疲劳特性

搭接件的结构形式决定了其腐蚀特性是多种类型腐蚀共存(如图1所示)^[2], 具体说明如下:

- 1) 外表面的腐蚀;
- 2) 搭接面的缝隙腐蚀;
- 3) 结构在受载时, 搭接面之间的微挫动产生的磨蚀;
- 4) 因组成材料的不同而产生的电位腐蚀;

收稿日期: 2012-08-13

作者简介: 刘海燕(1968—), 男, 陕西户县人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为飞机结构环境强度。

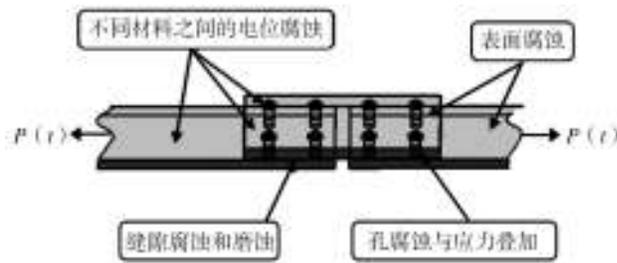


图1 搭接构件中的腐蚀类型

Fig. 1 Corrosion types of lap jointed structure

5) 孔腐蚀导致孔边应力集中系数增大。

通常,搭接件多采用“等强度”设计,当存在环境腐蚀时,各部位的疲劳品质会下降,但下降程度不同,使其成为“非等强度”结构。在不拆解结构时,结构的内部腐蚀损伤是不可检的,也就无法为计算结构腐蚀疲劳寿命提供所需的腐蚀损伤量和结构细节参数。因此,腐蚀疲劳试验成为获得结构腐蚀疲劳寿命的唯一有效途径。

2 腐蚀介质影响系数

单一腐蚀介质对结构寿命的影响程度用腐蚀介质影响系数 $C(m)$ 表征。不同的介质有不同的 $C(m)$, 定义见式(1)^[3]。

$$C(m) = N_{50}(m) / N_{50}(0) \quad (1)$$

式中: m 为疲劳试验的环境介质,如盐雾、燃油等; $C(m)$ 为单一介质 m 对疲劳寿命的影响系数; $N_{50}(m)$ 为试验件在单一介质 m 中的中值疲劳寿命,次; $N_{50}(0)$ 为试验件初始状态的中值疲劳寿命,次。

混合介质影响系数定义见式(2),按照加权法的计算见式(3)。

$$C(M) = N_{50}(M) / N_{50}(0) \quad (2)$$

$$C(M) = A_1 C(m_1) + A_2 C(m_2) + \dots + A_i C(m_i) \quad (3)$$

式中: i 为混合介质包括的介质种类数,个; $C(M)$ 为综合介质影响系数; $C(m_i)$ 为单一介质 m_i 对疲劳寿命的影响系数; A_i 为单一介质 m_i 占混合介质的百分比, %。

例如,某飞机飞行使用环境谱的介质加权系数^[4]为室温大气 $A_1=87.5\%$ 、湿热环境 $A_2=10\%$ 、盐雾环境 $A_3=1.25\%$ 、燃油环境 $A_4=0\%$ 、酸性盐雾环境 $A_5=1.25\%$ 。

严格地讲,结构通常是受混合介质作用的,对结构腐蚀寿命 $N_{50}(M)$ 的评估,需要 $C(M)$ 和 $N_{50}(0)$ 。由于 A_i 在实际情况下变化范围很大,采用固定比例的混合介质腐蚀疲劳试验获得 $N_{50}(M)$ 或 $C(M)$ 意义不大。

一般情况下,分别通过各种单一介质腐蚀疲劳试验和基准疲劳试验先获得 $N_{50}(m_i)$ 和 $N_{50}(0)$, 算出 $C(m_i)$, 然后根据混合介质的成分比例用式(3)计算出 $C(M)$ 。因此,单一介质下的腐蚀疲劳试验是评估结构腐蚀疲劳寿命的基础。

3 腐蚀疲劳试验

要通过腐蚀疲劳试验获得可靠的试验数据,试验件的设计加工、试验载荷的施加和典型腐蚀环境的施加都必须合理而且满足技术要求。其中腐蚀环境的施加是试验的难点,也是试验的关键。

3.1 试验件

在设计和加工试验件时,结构形式、材料、加工工艺、表面处理、密封形式等必须与实际结构一致。外形尺寸的截取要兼顾两点,前者优先:1)试验件包含了结构的所有疲劳细节;2)试验设备能力。

3.2 试验载荷谱

试验载荷应由结构承受的实际载荷谱按照等损伤原则简化得到。

载荷简化时,应保证载荷形式不变,如实际载荷谱为拉-压谱,简化后的试验载荷谱也应为拉-压谱。

对试验而言,载荷谱的优先顺序为:等幅谱、块谱、随机谱。为了试验平稳,建议采用正弦波等幅载荷谱。

腐蚀疲劳试验不同于普通的疲劳试验,循环载荷的应力比和频率对寿命有显著影响。频率过高,腐蚀来不及发生,只产生机械疲劳破坏;频率过低,则产生 SCC 破坏。推荐试验频率为 2.5 Hz, 应力比 $R=0.06$ ^[5]。

因为测试 $C(m)$ 的试验为对比试验,因此基准疲劳试验和腐蚀疲劳试验必须使用完全相同的载荷谱。

一般情况下,搭接件均为非对称构件。在试验机上进行试验时,施加的载荷不通过试验件型心,会

在试验段产生附加弯矩。结构在实际受载时,因为约束的存在,这种附加弯矩是没有的。因此,在试验时,为了保证受载的真实性,需要在试验件上安装专用夹具以消除附加在试验件上的弯曲效应。

弯曲效应是否得到有效消除,需要通过应变测量来检验。附加弯曲的消除方法属于力学范畴,在此不再详述。

曾经成功使用过的防弯曲试验夹具如图2所示。



图2 防弯夹具

Fig. 2 Anti-bending equipment

3.3 典型腐蚀环境施加技术

计算 $C(m)$, 需要 $N_{50}(0)$ 和 $N_{50}(m)$ 。 $N_{50}(0)$ 通过 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、干态环境的基准试验获得; $N_{50}(m)$ 通过单一腐蚀介质下的疲劳试验获得。下面介绍几种典型腐蚀疲劳试验的环境施加方法,其中包括湿热环境 m_1 、燃油环境 m_2 和酸性盐雾环境 m_3 。

3.3.1 湿热环境

湿热是典型的腐蚀环境,测试 $C(m_1)$ 的腐蚀疲劳试验湿热环境指标:

- 1) $t=(43 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- 2) 相对湿度 $>90\%$ 。

为了实现上述环境指标,需要设计具备如下功能的环境箱:

1) 环境箱足以容纳附带防弯曲夹具的试验段,试验件的夹持端可伸到环境箱外夹持在试验机上、下夹头;

2) 环境箱内布置用于加热的电加热器,在试验段布置温度传感器测量温度,外部用控温仪控制温度;

3) 环境箱设置不锈钢水槽,水槽内布置电加热器加热纯净水给箱内加湿,水槽上部布置湿球温度

传感器,并与2)中的温度传感器组合控制湿度,纯净水在环境箱外有液位显示,可从外部补水;

4) 为了保证试验件温度和环境湿度均匀,在环境箱内布置风机实现内部搅拌和循环;

5) 在环境箱底部设置排污、卸压口,以保证环境箱内不憋压、不积水;

6) 环境箱在试验件上安装完成后,用硅橡胶密封环境箱对接面、环境箱与试验件的结合面,在保证密封的同时不影响试验件变形。

试验时,需要注意以下两点:

1) 为了试验安全,对温度的控制应设置超温断电保护并自动报警;

2) 试验件破坏后,试验机缸体应回到起始位置,以免试验环境箱在缸体回到零位时被拉坏或压坏。

曾经对某搭接件成功使用的湿热环境施加设备如图3所示。



图3 湿热环境试验设备

Fig. 3 Humid-hot environmental test equipment

3.3.2 燃油环境

GJB 150A—2009 要求对有可能受流体污染的构件要进行“流体污染试验”^[6]。燃油作为典型的流体,对结构疲劳寿命的影响系数 $C(m_2)$ 需要通过试验测定。

典型燃油环境的技术指标:在试验中,试验段始终处于浸油状态;环境温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。对标准试验件,燃油环境很容易施加,如图4所示。



图4 标准试验件燃油环境施加
Fig. 4 Standard specimen in fuel

对于带消除附加弯矩的非对称结构件,环境温度指标是很容易通过室内空调实现的,试验的关键技术在于实现试验段在试验中始终处于浸油状态。

在某搭接件燃油介质腐蚀疲劳试验中,用“输液法”巧妙地施加了燃油环境。具体做法如下:

- 1) 先用毛巾均匀包裹试验件,在毛巾外包裹塑料薄膜,最后安装试验夹具;
- 2) 试验件上端4个输液器向塑料薄膜内缓慢输入燃油,待下端燃油流出时说明试验件已处于浸油状态,开始试验;
- 3) 提前在试验件下部过渡段粘接环形橡胶条,环形橡胶条向一侧倾斜,把流出的燃油导入一个容器内即可。

在燃油腐蚀疲劳试验中,禁止室内使用明火。试验实施情况如图5所示。



图5 燃油介质腐蚀疲劳试验
Fig. 5 Corrosion fatigue test in fuel

3.3.3 酸性盐雾环境

酸性盐雾是比较严酷的腐蚀环境,盐雾试验用于测试重工业污染、沿海/海洋气候等对结构的腐蚀。测定 $C(m_2)$ 的酸性盐雾腐蚀疲劳试验环境技术

指标^[6]包括:

- 1) $t=(35 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- 2) 相对湿度 $>90\%$;
- 3) $w(\text{NaCl})=5\%$, $\text{pH}=4$ 的酸性溶液喷雾,盐雾沉降量为 $1\sim 2 \text{ mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ 。

酸性盐雾腐蚀环境的施加是盐雾腐蚀疲劳试验的关键技术。设计环境施加系统时,在满足技术指标的同时,重点要解决密封问题,以避免腐蚀性气体和盐溶液腐蚀试验机并污染环境。

酸性盐雾腐蚀环境施加系统由盐雾喷雾系统、环境箱、加温控温系统组成。盐雾喷雾系统基本工作原理与标准盐雾环境箱相同。环境箱框架、顶面、两侧面和底面用不锈钢材料,前后两面用有机玻璃材料,这样既可以防腐又便于观察试验件。

环境箱内布置盐雾喷雾塔、加热器、温度传感器、搅拌风机,对温度和盐雾沉降量能够进行测量和控制。

由于试验过程中,环境箱内始终处于喷雾状态,湿度指标的要求也就得以满足,所以在试验中对湿度可以不予控制。

在环境试验箱的底部,设计了排污口,经软管将收集的酸性盐溶液排到废液回收桶内。喷雾试验中,必须有卸压措施以避免环境箱内的压力增大。为使卸出的酸性盐雾不排到空气中,避免试验机受腐蚀,必须通过排污口卸压。卸压出口置放在废液回收桶的液面以下,保证盐雾空气不排放到环境室,也不会对试验机产生腐蚀。箱体与试验件、箱体界面由硅橡胶密封,对试验件的变形不产生约束。酸性盐雾腐蚀试验情况如图6所示。



图6 搭接件酸性盐雾环境腐蚀疲劳试验
Fig. 6 Corrosion fatigue test in acidity salt-fog environment

改变盐溶液 pH 值后,中性盐雾腐蚀疲劳试验也
(下转第 20 页)

部件单片机在两种干扰信号的作用下,产生使控制指令受干扰而导致飞行器坠地的效应,如图7所示。

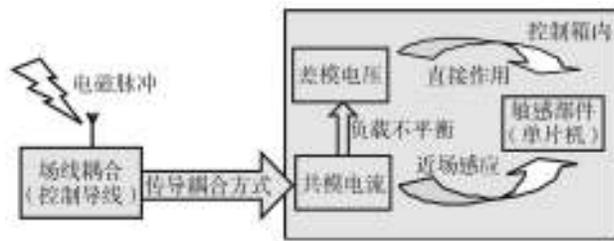


图7 EMP对控制箱的干扰机理

Fig. 7 Interference mechanism of EMP to control-box

3 装备的电磁防护方法

分析电磁脉冲的干扰机理,装备的电磁防护就具有了针对性和可实现的方法。为了提高装备防护的有效性,在防护设计中应采取多级防护和裕度防护的思想。在控制箱外端可采用控制线加屏蔽以及控制线两端加滤波器的方法;在控制箱内部,首先要从PCB设计着手,如在PCB板实际结构空间位置上将与控制导线相连接的光电耦合器件调整到结构最前端,并使板上印刷线尽量远离线缆末端,增大印刷线的间距,设计较短的地线等^[6]。

为了减少单片机的死机现象,在软件方面应采取指令冗余、看门狗、软件陷阱及自动恢复程序等方法^[7-8]。

4 结论

1)在复杂电磁环境下,控制箱发出的指令受到EMP的干扰会发生畸变,由此导致飞行器的坠毁;

2)干扰机理是,EMP通过控制线进入控制箱,从而在箱体内部形成共模电流和差模电压,两种作用使控制箱指令产生畸变;

3)装备可采用多级防护措施以及“软硬”相结合的防护方法。

参考文献:

- [1] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(1):1—5.
- [2] 常新龙,王建龙,张磊. 电磁环境下桥丝式电火工品安全性仿真研究[J]. 包装工程,2011,32(23):122—125.
- [3] 张勇强,魏光辉,刘小强,等. 控制装备卡尔曼滤波的电磁防护方法[J]. 北京理工大学学报,2009,29(2):28—30.
- [4] 刘述民,张勇强,吴杰,等. 飞行装备ARMA滤波的电磁防护方法[J]. 装备环境工程,2011,8(6):87—90.
- [5] 安霆,刘尚合,孙国至,等. 某型装备的UWB电磁脉冲效应研究[J]. 高压技术,2008,34(11):2428—2433.
- [6] 李勇明,曾孝平. 高频PCB设计中出现的干扰分析及对策[J]. 电子工艺技术,2003,24(1):13—15.
- [7] 侯民胜. 单片机的ESD,EMP效应及加固技术研究[J]. 电子工程师,2007,33(2):59—62.
- [8] 杨将新,李华军,刘东骏. 单片机程序设计及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.

(上接第16页)

可以用该系统完成。在酸性盐雾腐蚀疲劳试验中,应注意以下几点:1)喷雾系统应该置放于一个可以升降的支架上,以保证喷雾的顺畅;2)盐雾沉降量可以通过供气压力或盐溶液供给量来调节;3)及时补充纯净水和盐溶液,确保饱和器不干烧。

4 结语

通过对长期腐蚀疲劳试验的总结,提出了对非对称构件——搭接件进行典型腐蚀疲劳试验的方法。该方法包括了试验件设计、载荷谱施加原则以及作为重点的腐蚀环境施加技术,通过某项搭接件的系列腐

蚀疲劳试验证明了该方法的可行性和有效性,可以为复杂结构的腐蚀疲劳试验提供借鉴的经验。

参考文献:

- [1] 刘文斑,李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004:41.
- [2] GB 10123—88,金属腐蚀及防护术语和定义[S].
- [3] 刘文斑,李玉海,贾国荣. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命评定与监控方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(3):259—263.
- [4] 陈跃良,段成美,金平. 飞机结构局部腐蚀容限研究[J]. 强度与环境,2000(1):60—63.
- [5] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004:180—183.
- [6] GJB 150. 11A—2009,军用装备实验室环境试验方法[S].