

## · 经验交流 ·

## 飞机结构主体材料腐蚀损伤特点分析

海军航空工程学院青岛分院(266041) 穆志韬

船舶系统工程部(北京 100841) 熊玉平

**[摘要]** 通过对现役飞机腐蚀损伤状况的统计分析,研究了现役飞机结构主体材料在环境腐蚀介质中的疲劳损伤特征和基本破坏失效模式,阐述了今后现役军用飞机在腐蚀环境下疲劳使用寿命和日历寿命研究的相关内容,并对现役军用飞机腐蚀疲劳研究的发展提出一些看法。

**[关键词]** 飞机结构; 腐蚀疲劳; 腐蚀环境谱; 腐蚀控制

**[中图分类号]** TG172.9

**[文献标识码]** B

**[文章编号]** 1001-1560(2001)12-0049-02

近20年来,随着现役飞机服役时间的增长,特别是20世纪90年代以后,军用飞机使用中由于腐蚀或腐蚀疲劳造成的损伤越来越多。如螺钉锈蚀、蒙皮脱落、变薄、长桁或翼梁缘条发生剥蚀,紧固件及飞机结构上一些重要承力构件出现腐蚀疲劳裂纹等,沿海的海军飞机这类问题更为突出。尤其是海军的特种飞机如水上飞机、舰载机等常遇到海水、盐雾、潮湿等腐蚀性更强的自然环境,飞机结构在交变载荷和腐蚀环境交互作用下,防腐蚀保护层加速失效,抗疲劳能力降低,飞机的疲劳寿命显著缩短。

## 1 现役飞机的使用环境特点

飞机结构在使用中经常遭到化学介质、热和气候因素的侵蚀、严重地影响飞机的使用寿命。然而,目前装备部队的现役飞机由于当时技术条件的限制,设计时往往忽视了这些重要的环境因素,导致不少结构件在日历使用期内发生腐蚀疲劳破坏。

飞机使用环境特点研究及环境谱的编制,应首先分析飞机的使用环境状况,选取有代表性的若干个机场,经过数据筛选,将环境因素中对结构材料腐蚀、涂层老化影响小的参数与作用时间删除,保留影响大的部分。重点选取的参数是温度、相对湿度、盐雾、凝露、雨、pH值及工业废气等。其中温度、湿度、雾时及频次、雨时及雨量等要用机场实际环境统计结果。在分析大气污染情况时,应考虑到机场大气污染与其所处地理位置,周围污染源方位及风向等因素。编制的机场使用环境谱是飞机预计的真实环境,它可用于大气暴露试验的环境选择和比较,也可用作某些单纯的环境模拟试验的基础,但不能直接用于载荷谱和环境谱同时作用下的环境模拟试验。要进行试验,必须把真实的使用环境谱转换成当量环境谱,并形成用于疲劳试验的载荷/环境谱。

## 2 飞机结构主体材料的腐蚀失效形式及特征

机体结构材料在海洋大气环境条件下受到盐雾、潮湿、霉菌和工业废气的侵袭,所发生的腐蚀破坏主要是电化学腐蚀,包括液膜下的电化学腐蚀和局部浸泡在电解质溶液内的电化学腐

蚀。军用飞机地面停放时间长,空中飞行时间短,环境腐蚀效应在地面比空中严重得多,受环境条件的影响性大,随机性大,腐蚀类型广泛,且众多的影响因素相互作用。在飞机上不同的部位所产生的腐蚀失效类型,主要有均匀腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳等多种形式<sup>[1]</sup>。

飞机结构件发生腐蚀的形式取决于材料的成分和组织、构件的构造形式以及所处的环境条件和受力状态等。上述几种腐蚀形式交互作用,一般性的腐蚀会增加应力腐蚀的敏感性,并导致飞机结构耐腐蚀疲劳性能降低。我军现役飞机结构的主体材料主要有LY12CZ、LC4CS、LD5、30CrMnSiA、镁合金等。调查表明,易发生腐蚀的材料主要是铝合金、镁合金和高强度钢,其中以铝合金最为普遍和严重,特别是对晶间腐蚀敏感的LY12CZ和LC4CS型材。在某型轰炸机的腐蚀普查中机体结构腐蚀件中铝合金占75%以上,这些结构件表面一般都涂有防腐蚀涂层,但在使用过程中由于腐蚀介质的侵袭,部分防护涂层失效。当环境相对湿度超过70%(温度 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ )以后,就会达到或接近金属腐蚀的临界湿度,结构件腐蚀加剧,在飞机的不同部位或材料的表面相继产生腐蚀损伤,其腐蚀部位表现出的腐蚀外观特征为:

(1) 铝合金件 铝合金件在飞机上大多用作承力构件的型材及蒙皮。蒙皮的腐蚀一般是漆层大面积脱落、鼓泡、产生点蚀。腐蚀严重部位集中于紧固孔周围、接缝部位及其他件连接的结合面、蒙皮内表面与缘条、长桁、隔框接触的部位。通常机身、机翼和尾翼的下表面蒙皮比上表面蒙皮腐蚀严重。用作承力构件的铝合金型材,腐蚀损伤后缘条鼓起,严重时出现层状剥离外观,腐蚀产物呈灰暗或灰白色的磷片状产物。

(2) 钢合金件 飞机结构中使用较多的合金钢件材料是30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A、40CrNiMoA等以及一些钢铸件、紧固件。钢件腐蚀后轻者出现红褐色锈层,重者出现蚀坑、疲劳裂纹等。合金钢的强度越高,耐蚀能力越差,对应力腐蚀的敏感性就越大。

(3) 镁、钛合金件 飞机结构中使用镁或钛合金材料相对比较少。钛合金件的电极电位较高( $\geq +0.1\text{V}$ ),一般不易发生腐蚀。镁合金材料电极电位较低,在海洋环境条件下容易产生电化学腐蚀,腐蚀后出现一块块白粉,擦掉则露出蚀坑。如飞机上常见的ZM-5合金框架,对应力腐蚀的敏感性比较大。

(4) 铜合金件 在飞机上使用也较少,它具有较高的抗蚀

性,但在某些特定条件下易产生“冷脆”、“季脆”、“氢脆”等缺陷。

(5) 复合材料件 复合材料作为新型材料,在飞机上的使用范围正逐步扩大,从最初的次要受力构件到现在的主要受力构件。在使用环境及工作应力联合作用下,复合材料结构件会产生溶胀、溶解、化学裂解、渗透、开裂与老化等。这主要是在酸碱等介质的浸蚀作用下引起的高分子化学键的破坏与裂解。

### 3 飞机结构件的腐蚀疲劳损伤模式及特点

据统计,导致飞机结构材料腐蚀的主要环境介质为高温潮湿空气、盐雾、工业废气、海水、油箱积水以及结构内局部环境积水(据海军飞机使用环境谱统计,潮湿空气即相对湿度 $\geq 75\%$ 所占比例为全年时间的20%左右,盐雾及凝露占25%)。上述介质可分为腐蚀气体和液体两大类,对飞机结构来说,腐蚀疲劳研究主要是针对材料及结构件在这两类腐蚀介质中的疲劳和裂纹扩展特征。文献[2]统计表明,飞机疲劳受载时间不到日历时间的1%,99%以上均处于停放状态,且飞行受载过程的腐蚀环境对疲劳强度的直接影响比较小;停放期间环境对飞机结构的腐蚀程度影响极大。因而,这就决定了我军现役飞机结构腐蚀疲劳的基本模式是:腐蚀 $\rightarrow$ 疲劳 $\rightarrow$ 再腐蚀 $\rightarrow$ 再疲劳,直至破坏。严格地说,腐蚀与疲劳的纯交替作用几乎是不存在的。表面上的腐蚀-疲劳交替作用,常为两种因素的交互作用创造了条件。如先腐蚀后疲劳,在腐蚀损伤处不仅形成小孔和坑斑,也同时积聚有腐蚀介质,随后的疲劳即使结构总体环境是非腐蚀性的,在损伤处因有局部腐蚀环境的协同作用,仍具有腐蚀疲劳的性质。为了研究问题的方便,可视飞机结构的腐蚀疲劳模式为地面腐蚀加飞行中疲劳的交互作用,使飞机结构腐蚀疲劳研究大为简单化。

结构件的腐蚀疲劳特性与材料成分等有关。在同一种腐蚀介质下,不同材料的腐蚀疲劳特点会有显著不同。腐蚀疲劳的最大特点就是交变应力和腐蚀环境的协同作用,二者同时作用于构件并互相促进。一般来说,在腐蚀介质中,绝大部分结构件的疲劳寿命降低,裂纹扩展速率增加。腐蚀介质同时作用时造成材料材质的退化,微观分析表明,腐蚀介质一方面在材料表面造成很多小的蚀坑,使结构件表面光洁度下降,造成局部损伤,形成大量的疲劳源、加速疲劳裂纹的形成,引起疲劳强度降低;另一方面腐蚀介质随裂纹侵入材料内部,在裂尖处高应力区对结构件造成进一步破坏而使裂纹扩展加快,裂纹扩展速率加快现象表现在全裂纹扩展曲线中段(即常说的II区)<sup>[3]</sup>。因而若把腐蚀与疲劳分开作用于结构,得到的寿命并不是真正的腐蚀疲劳寿命。

此外,在飞机的日历服役寿命期内,绝大部分时间飞机处于机场停放状态。停机时,飞机结构的应力水平很低,并且没有交变载荷作用。因而,研究疲劳寿命时一般不考虑停放时受载。而对腐蚀疲劳而言,虽停放时飞机不承受疲劳载荷,但此时腐蚀介质可以充分进入疲劳裂纹,当飞行时在交变载荷作用下,裂纹扩展速率明显加快。因此,研究飞机结构的腐蚀疲劳必须考虑日历使用时间,而不仅是空中飞行时间。

腐蚀疲劳在外观上表现出与常规疲劳不同的特征。在腐蚀疲劳条件下,往往同时有多条疲劳裂纹形成(常规疲劳裂纹常只

有一条),并沿垂直于拉应力方向扩展<sup>[4]</sup>。腐蚀疲劳断口的源区与疲劳扩展区一般均有腐蚀产物。腐蚀疲劳断裂一般起源于飞机结构件表面腐蚀损伤处(包括孔蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀等),大多数腐蚀疲劳断裂的源区及扩展区可见到明显的腐蚀损伤特征,腐蚀疲劳断口呈穿晶及沿晶混合型,断裂表面颜色灰暗、无金属光泽,疲劳条带呈解理脆性特征。

### 4 现役飞机防腐蚀控制的研究方向

现役飞机结构的腐蚀疲劳及防腐蚀控制研究,目前还仅限于部分机型、部分关键结构件和有限的几种典型材料,今后应全面开展对其他型号飞机腐蚀疲劳寿命的评估。为了更好地实现防腐蚀控制,今后需进一步加强如下几个方面的研究:

(1) 在现有成果的基础上,补测更多腐蚀环境条件下的材料性能数据,提高腐蚀疲劳试验的技术水平,逐步引入断裂力学的最新研究成果,探索实现从裂纹萌生到临界裂纹长度的全寿命评估手段,发展谱载与环境谱协同作用下的寿命预测方法;

(2) 腐蚀环境对现役飞机结构寿命的影响很大,但在现有条件下不可能对全机进行腐蚀疲劳实验,如何用材料典型结构件的腐蚀疲劳试验结果来更好地修正全机的使用寿命尚有待进一步研究。评定内容包括低周、高周腐蚀疲劳和谱载腐蚀疲劳以及腐蚀环境谱的当量化折算研究、环境谱与载荷谱的匹配等;

(3) 加强现役飞机的腐蚀疲劳机理和理论模型研究,探索总结飞机主体结构材料的腐蚀损伤规律与评估技术;

(4) 重点开展腐蚀环境条件下现役飞机的日历寿命和腐蚀损伤容限研究,不仅给出飞机的服役寿命,同时还给出日历寿命及最大允许腐蚀修复程度,确保现役老旧飞机的飞行训练安全<sup>[5]</sup>;

(5) 飞机结构的腐蚀不仅与飞机的设计、选材、制造工艺、使用环境等有关,而且还和外场的维护紧密相连。因此,应建立有效的“现役飞机腐蚀状况监控网络”,以连续地跟踪所有飞机的腐蚀发展情况,进而建立现役军用飞机腐蚀数据库;

(6) 引进国外近几年先进的防腐蚀手段、材料、工艺,结合我国现役飞机的特点,加强利用复合材料胶补修理金属腐蚀损伤部位新工艺,研究采用激光仪器强化腐蚀疲劳部位,优化飞机结构的涂层防护体系,尽快制定现役飞机防腐蚀控制维修大纲和规范,加快现役飞机的腐蚀疲劳研究及全寿命跟踪监控,使现役军用飞机在恶劣的腐蚀环境下具有长寿命、高的可靠性。

#### [参 考 文 献]

- [1] 穆志韬,段成美.飞机结构的腐蚀修理及防护控制技术[J].飞机制造工程,1995(10):16~18
- [2] 陈跃良.飞机结构局部环境加速腐蚀当量谱[J].南京航空航天大学学报,1999,31(3):338~341
- [3] 蒋祖国.飞机结构腐蚀疲劳[M].北京:航空工业出版社,1992.
- [4] Sakai T, Rarouli M, Suzuki M. Temperature and Humidity Effects on Fatigue Life Distribution of Carbon Steel[J]. Int J Fatigue, 1991, 87(3): 56~59
- [5] 张福泽.金属机件腐蚀日历寿命的计算模型和确定方法[J].航空学报,1999,20(1):75~79

(责任编辑 魏兆军)