

飞机铝合金结构的腐蚀疲劳研究

Study on Corrosion Fatigue of Aluminium Alloy Structure in Aircraft

衣林^① Yi Lin; 陈跃良^② Chen Yueliang

(^①海军航空工程学院研究生管理大队, 烟台 264001; ^②海军航空工程学院青岛分院, 青岛 266041)

(^①Postgraduate Team of Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

^②Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

摘要:介绍了飞机结构的腐蚀损伤形式以及腐蚀疲劳对飞机结构的影响,分析了飞机铝合金结构腐蚀疲劳的影响因素和作用机理,同时阐述了腐蚀环境下飞机结构疲劳寿命的计算方法。

Abstract: The form of corrosion on airplane structure and the hurt influence of corrosion fatigue on the airplane structure are introduced, then the impact factor and action mechanism of corrosion fatigue is analyzed, finally the calculation method how to obtain the airplane structure life is elaborated.

关键词: 海洋环境; 飞机结构; 腐蚀; 腐蚀疲劳

Key words: marine environment; aircraft structure; corrosion; corrosion fatigue

中图分类号: V25

文献标识码: A

文章编号: 1006-4311(2011)26-0037-02

0 引言

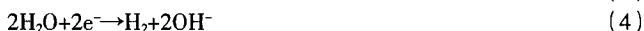
腐蚀、疲劳及两者的交互作用是飞机铝合金结构的重要损伤形式^[1]。随着飞机服役时间的不断增长,腐蚀和疲劳问题对飞行安全构成的威胁也越来越大。2008年8月20日及随后的短短20多天内,西班牙、吉尔吉斯斯坦和俄罗斯连续发生三起老龄飞机重大安全事故。与民航飞机相比,海洋环境条件下的服役飞机,受海洋气候影响特别强烈,其特点是:雾季长,温度、湿度较高而且变化大,风、雨天数多,气候变化无常。尤其是酸雨的pH值达到4.0~4.2之间,形成较强的腐蚀介质。飞机长期停放在高温、高湿、高盐雾的环境中,经常遭受盐分、飞溅海水、浪花以及持续的干湿交替循环的侵蚀,飞机铝合金结构表面会形成腐蚀性的酸性液膜^[2,3],再加上有些机场靠近城市工业区,受附近工厂排出的工业废气的影响,服役环境相当

作者简介: 衣林(1986-),男,山东栖霞人,硕士研究生,研究方向为海洋环境与飞行器性能。

恶劣,腐蚀和腐蚀疲劳问题变得广泛而严重。

1 飞机铝合金结构的腐蚀损伤形式

腐蚀是金属的氧化过程,是金属材料的化学或者电化学破坏,是飞机铝合金结构最为普遍的破坏类型之一。现役飞机金属材料的腐蚀绝大多数是电化学腐蚀,这一点已为国内外大多数学者所认同。在铝合金结构的电化学腐蚀过程中,涉及的化学反应主要包括下面几个过程:



飞机铝合金结构的腐蚀损伤形式主要有:均匀腐蚀、点蚀、晶间腐蚀、剥蚀、缝隙腐蚀、磨擦腐蚀、热腐蚀、应力腐蚀开裂以及腐蚀疲劳等^[4]。图1是常见的腐蚀损伤形态。

式中: \tilde{v} —直升机旋翼诱导速度, \tilde{V} —直升机飞行速度, α —直升机下滑角。

上式可化为一个关于 α 和 \tilde{V} 的二元方程。连续求解,即可得到完整的涡环状态边界线。通过以上比较可以发现,高-辛判据更能反映涡环状态的物理本质,求解结果与实验基本吻合,可以作为尾桨涡环的判据使用。

3 临界速度的求解

高正和辛宏在试验中发现垂直下降中,临界垂直下降率为:

$$V_{cr}(90^\circ) = 0.28 \cdot v_{hr}$$

针对尾桨涡环的飞行试验^[5]验证,上述临界速度同样适用于对尾桨垂直侧飞进入涡环状态的判断。下面对某直升机垂直侧飞和悬停回转时的速度和角速度边界进行求解。

已知某条件下的全机参数和气候条件,先计算尾桨的诱导速度。

$$\text{旋翼轴扭矩 } Q_m = \frac{1000P}{2\pi \cdot n_m / 60}$$

尾桨拉力系数

$$C_{nr} = \frac{T_r}{\frac{1}{2} \rho (\Omega_r R_r)^2 \pi R_r^2}$$

$$= \frac{Q_m / L}{\frac{1}{2} \rho (\Omega_r R_r)^2 \pi R_r^2}$$

根据滑流理论计算出悬停时的尾桨诱导速度为:

$$v_{hr} = \frac{1}{2} \sqrt{C_{nr} (\Omega_r R_r)^2} = 22.56 \text{ (m/s)}$$

由高-辛判据得到尾桨进入涡环的临界速度

$$V_{cr} = 0.28 v_{hr} = 0.28 \times 22.56 \times 3.6 \approx 23 \text{ (km/h)}$$

假设该机主旋翼为顺时针方向旋转(俯视),则尾桨吹风方向向左,据此可知:

①该直升机垂直左侧飞的最大飞行速度不超过23km/h,或者其在左向侧风中悬停时所能承受的最大风速为23km/h。

②由 $\omega_{cr} = V_{cr} / L$,该直升机沿顺时针方向悬停回转时最大角速度为44°/s。

4 尾桨涡环改出方法

扭矩平均值的变化是尾桨进入涡环状态的首要特征现象,之后是尾桨拉力和扭矩剧烈脉动,尾桨拉力也将减小。由于尾桨在偏航和滚转方向都对直升机的平衡起着重要作用,直升机将表现为自动偏转和滚转,并伴有强烈振动和高度下降。

这时,驾驶员应立即做出判断,并马上前推驾驶杆,使直升机尽快转入前飞,适当向前行桨叶方向压杆,阻止机体进一步滚转。利用前飞的相对气流将尾桨桨盘处堆积的涡流吹向后方,使气流流动恢复正常,然后向后行桨叶一方压杆纠正航向,从而改出尾桨涡环状态。

5 结束语

本文在分析已有的三种涡环边界判据的基础上,利用高-辛判据对某型直升机垂直侧飞临界速度和临界悬停回转角速度进行了计算,认为高-辛判据对于尾桨涡环状态是适用的,最后简要介绍了尾桨涡环的改出方法。但上述对尾桨涡环的分析和计算还较为浅略,在今后的研究工作中还需要考虑斜侧向飞行和斜侧风的情况,得出完整的尾桨涡环边界曲线。

参考文献:

[1] 辛宏. 旋翼非定常气动特性的理论和试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学博士论文, 1995, (5).

[2] 王适存. 直升机空气动力学[M]. 南京: 南京航空学院出版社, 1976.

[3] 汤连刚, 朱宇等. 直升机尾桨涡环飞行试验研究[J]. 飞行力学, 2008, 26(5): 63-66.

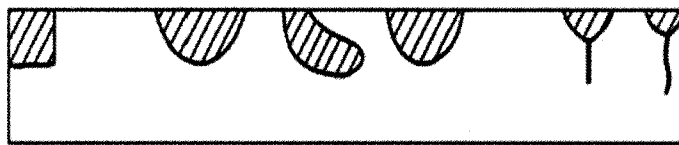


图1 常见的腐蚀损伤形态

1.1 点蚀 也称孔蚀,是飞机结构中普遍存在的腐蚀形式。金属表面因受机械或化学物质作用,其表面保护层(或腐蚀产物覆盖层)遭到破坏,出现局部穿透,致使金属直接暴露在腐蚀环境中,同时向内部深入扩展。

1.2 晶间腐蚀 是沿着多晶体金属的晶粒边界发生的一种局部腐蚀形式。当腐蚀发生时,在晶界及其附近产生严重的腐蚀,而晶粒内部的腐蚀却很小,破坏了晶粒间的结合力,从而使金属的强度和塑性大幅度降低,而且通常金属表面并不呈现破坏迹象,不易被发现,极具危险性。

1.3 剥蚀 又叫层状腐蚀,是晶间腐蚀的一种表现。在一定的腐蚀介质中,剥蚀开始于金属表面,并沿平行于表面的晶界横向发展。晶间的腐蚀产物体积膨胀,产生的楔形作用使晶粒之间逐步丧失结合力,金属表面层因腐蚀而脱落,通常表现大面积的均匀腐蚀脱落和局部的晶界腐蚀脱落两种形式。前者易发现,且向金属内部腐蚀深入的速度相对较小,构成结构破坏的危害性不大;后者通常发生在紧固孔周边等部位,对结构破坏有较大的危险性。

1.4 腐蚀疲劳 是指腐蚀介质和交变应力共同作用下,引起材料或构件抗疲劳开裂能力降低的破坏现象,通常会使得结构在很低的应力值时失效,因此具有较大的危险性。

2 腐蚀和疲劳对飞机铝合金结构的影响

在海洋环境下使用的飞机,服役过程中由于受到腐蚀和疲劳的相互作用,飞机铝合金结构的疲劳寿命明显降低。一方面,腐蚀的存在会导致疲劳裂纹萌生寿命大幅度降低;另一方面,在载荷作用下,腐蚀介质更易发生作用,加速疲劳损伤的发展,使寿命降低,由此引起结构失效事故屡见不鲜。总结各种形式的腐蚀对飞机结构产生的影响,主要体现在以下几个方面:

2.1 腐蚀损伤使得铝合金结构承力截面减小、结构细节部位从非临界状态转变为临界状态,从而改变飞机结构的危险部位和应力应变分布情况,导致局部应力集中,增加飞行安全隐患,甚至致使飞机出现重大事故。

2.2 腐蚀破坏了晶粒间的结合力,从而使材料的强度和塑性大幅降低,晶界开裂,导致主要承力构件提前生成微裂纹,显著减小裂纹形成寿命,破坏了飞机结构完整性。

2.3 腐蚀作用加速裂纹扩展,降低了材料的断裂韧性,减小了裂纹断裂的临界尺寸,裂纹扩展寿命大大减小,从而使结构使用寿命大大降低,严重威胁着飞机的结构安全。

3 飞机铝合金结构腐蚀疲劳的作用因素

影响飞机铝合金结构腐蚀疲劳的因素很多,归纳起来主要来自环境、力学和冶金三个方面。下面就铝合金腐蚀疲劳中有关环境和力学两方面的影响因素进行讨论。

3.1 腐蚀环境介质的影响 飞机铝合金结构的主要使用环境为潮湿大气、工业大气、海洋大气以及海水。其中,海洋大气和海水对飞机结构疲劳强度和寿命的影响最为强烈。铝合金在蒸馏水中的疲劳强度要低于在空气中的疲劳强度,而盐水中的疲劳强度往往又会比纯水中更低,但疲劳强度的降低并不总是随着腐蚀环境介质浓度的增加而增加的。

3.2 环境介质温度的影响 与一般疲劳相比,温度对腐蚀疲劳的影响有所不同,提高腐蚀介质的温度会使材料的耐腐蚀疲劳性能降低。但对于一般的腐蚀疲劳问题来说,如果温度改变不显著,对铝合金结构疲劳性能的影响并不大。

3.3 外加疲劳载荷的影响 对于飞机铝合金结构来说,所经受疲劳载荷的加载频率和平均应力对飞机结构的腐蚀疲劳寿命有着重要影响。普遍认为,加载频率越低,疲劳裂纹的扩展速率越大,材料的腐蚀疲劳强度越低,这同腐蚀介质与裂尖材料持续作用的时间有关。同时研究表明,不管是对空气中还是腐蚀环境下的疲劳问题,叠加在交变应力之上的平均拉应力对疲劳强度都有降低作用,而平均压应力则可使疲劳强度提高。

4 飞机铝合金的腐蚀疲劳机理研究

可以看出,影响飞机铝合金结构腐蚀疲劳裂纹萌生和扩展的因素很多,这造成了研究其腐蚀疲劳机理的复杂性。所以到现在,人们对铝合金的腐蚀疲劳机理仍有很大争议。

4.1 铝合金腐蚀疲劳裂纹形成机理 一般来说,不同的材料环境体系就可能有不同的腐蚀疲劳机理。若不考虑载荷因素的影响,在腐蚀介质中,腐蚀疲劳裂纹的形成机理被总结为如下四类:

4.1.1 点蚀理论 点蚀(或坑蚀)在疲劳中的作用目前仍尚未完全认识清楚。一般认为,有点蚀的材料对腐蚀疲劳是敏感的,通过对无点蚀与有点蚀的铝合金材料的腐蚀疲劳试验结果来看,点蚀对高周次的疲劳寿命影响很大,而对低周次的腐蚀疲劳寿命影响较小。

4.1.2 氢脆理论 近些年来的研究结果使得铝合金腐蚀疲劳的氢脆机理被越来越多的人所接受。在发生电化学反应时,阴极释放的氢原子会在位错迁移过程中扩散,可能聚集在沉淀物和基体界面上,此界面的局部变脆使得裂纹萌生变得更为容易^[9]。

4.1.3 阳极溶解理论 铝合金结构的局部变形,会导致铝合金表面氧化膜破裂,使得结构局部腐蚀电位降低,从而加速金属的腐蚀。在早期的研究中,学者们对飞机铝合金结构的腐蚀疲劳裂纹形成机理普遍倾向于阳极溶解机理。

4.1.4 环境介质的吸附作用 在腐蚀疲劳裂纹形成寿命试验中,一种常见的现象是,经过预浸泡的铝合金材料,即使不产生点蚀,抗疲劳性能也同样发生下降,而且抗疲劳性能的下降可以通过表面处理得以恢复。这种现象被称为腐蚀介质对材料的吸附作用,它使得材料的表面能降低,因而造成材料疲劳裂纹的萌生更容易。

4.2 铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展机理 与腐蚀疲劳裂纹的萌生机理相应,飞机铝合金结构的腐蚀疲劳裂纹扩展机理模型主要可分为阳极溶解模型、氢脆模型和表面能下降模型三种。一般来说,不同的材料/环境体系就可能有不同的腐蚀疲劳机理。

5 飞机铝合金结构腐蚀疲劳寿命计算

一般条件下结构疲劳寿命的分析方法很多,按疲劳寿命预测的基本假定和控制参数来分,可大致分为名义应力法、局部应力-应变法、场强法等。但是在腐蚀条件下飞机铝合金对结构的寿命进行疲劳寿命评估时,必须考虑到腐蚀损伤的影响。

如何考虑腐蚀环境产生的点蚀坑对疲劳性能的影响,学者建立了多种点蚀模型,目前点蚀模型主要分两大类:一是把腐蚀坑当作缺口来处理,然后利用应力-应变法、场强法等方法计算腐蚀后结构的疲劳寿命,此类模型一般适合于尺寸较大的蚀坑,能快速评估外场对蚀坑打磨修理后结构的剩余寿命。二是假设蚀坑形状为半球形或半椭圆形,将蚀坑作为裂纹的起始,应用断裂力学原理建立相关的数学模型,评估结构的剩余强度和寿命。由于裂纹扩展带呈现明显的半椭圆形形状,因此可以将蚀坑等效为半椭圆表面裂纹,利用断裂力学知识进行模拟分析。图2给出了腐蚀疲劳裂纹扩展的物理模型。图中, a 是腐蚀坑的深度,在进行断裂力学分析的时候,看作是初始半椭圆表面裂纹的深度。 c 是腐蚀坑的长度,在进行断裂力学分析的时候,看作是初始半椭圆表面裂纹的长度。

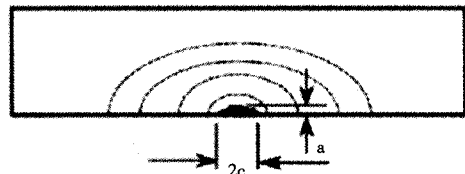


图2 腐蚀疲劳裂纹扩展物理模型

6 结束语

深入研究腐蚀疲劳损伤的形式、破坏机理、相关因素以及对飞机铝合金结构的影响,对提高飞机使用安全,延长飞机使用寿命、降低飞机维护费有着重要的意义。

参考文献:

- [1]蒋祖国.飞机结构腐蚀疲劳[M].北京:航空工业出版社,1992.
- [2]Eui W. Lee. Aircraft Carrier Exposure Testing of Aircraft Materials[R]. NAW-CADPAX/TR-2004/19. 2004.
- [3]陈跃良.腐蚀和疲劳对飞机结构的挑战及解决思路[J].航空工程进展,2011,2(1),66-69.
- [4]陈跃良等.海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [5]沈海军.高强度铝合金腐蚀疲劳机理与腐蚀疲劳全寿命工程模型[D].西安:西北工业大学,2000.