

# 飞机结构日历寿命研究现状及关键问题

石 荣<sup>1</sup> 李郑琦<sup>2</sup> 王学德<sup>3</sup> 范超华<sup>3</sup>

(1. 中科院上海微系统与信息技术研究所 EDA 与网络信息中心 上海 200050;

2. 中国飞行试验研究院机务处 西安 710038; 3. 空军工程大学工程学院 西安 710038)

**摘要:** 介绍了飞机日历寿命研究的技术背景和国内外同类研究概况以及存在的问题。重点对腐蚀环境下飞机结构加速腐蚀试验技术、防腐涂层腐蚀损伤评定技术、腐蚀当量关系和日历寿命理论分析方法等几个关键问题及其技术途径进行了阐述和探讨。

**关键词:** 腐蚀环境 飞机结构 日历寿命

**中图分类号:** V216.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537 (2008) 06-0381-06

## 1 飞机结构日历寿命研究的背景

目前,国内外飞机的使用寿命一般指机体结构的寿命,有三个指标:飞行小时数,起落次数和日历寿命,这三个指标先到者为退役控制指标。这种管理体制是将飞机结构的疲劳寿命和日历寿命分别控制,忽视了两者的相互联系。实际上,随着飞机服役日历年限的延长,环境因素对飞机的疲劳寿命产生重要影响。比如飞机结构服役日历时间越长,由于腐蚀环境作用,其结构疲劳品质降低越多,对应的实际疲劳寿命值越短;同样,飞机结构的疲劳行为也会加速飞机结构件表面防护层的失效并促进结构件中基体材料腐蚀作用的发生。造成这种结果的原因是以前的定寿依据主要考虑载荷损伤,而没有考虑到环境(腐蚀)造成的潜在损伤,而实际结构的服役环境条件与实验室相比差距较大。

我国航空设计尤其是制造工艺水平比发达国家落后,而且飞机的使用特点是飞行强度相对国外飞机小,地面停放时间相当长,腐蚀环境的长期作用导致防腐涂层较快地失效。按目前的飞行强度推算,当达到飞机出厂时规定的使用日历年限时,其达到的疲劳寿命(以飞行小时记)值还远未达到规定的疲劳寿命值。也就是说飞机不是使用到寿而是停放到寿的。所以,制约飞机使用寿命指标的主要是日历寿命。这就要求我国飞机的定寿应有自己的特点,充分考虑地面停放腐蚀环境和空中飞行腐蚀环境对飞机寿命的影响,做到飞行小时数与日历寿命指标相统一。

总之,日历寿命是综合考虑飞行强度、使用环境、飞行载荷诸多因素后的一个衡量飞机寿命的综合指标。飞行强度不同,而其它因素相同,其日历寿命也不同。日历寿命的研究涉及到冶金、材料、力学、电化学等诸多学科的交叉,其复杂度是显而易见的。日历寿命起关键作用的因素应为研究重

点,循序渐进,争取突破。

## 2 国内外同类研究概况及存在的问题

### 2.1 国外飞机日历寿命研究现状

环境对飞机结构的影响受到高度重视。20 世纪后期和 21 世纪初期,美军标准中明确要求,设计制造商在飞机设计过程中要考虑热、化学和气候环境对飞机结构耐久性、损伤容限分析及试验验证的影响,并先后制定了与腐蚀相关的一系列标准和规范,包含军方使用规范,如 MIL-A-008866B、MIL-A-87721MIL-A-8860B(AS)MIL-F-7179MIL-STD-1568、MIL-HDBK-5、MIL-HDBK-729、MIL-HDBK\_1530B(USAF)、MIL-STD-810E(对飞机环境试验增加了可靠性要求)和 JSSG-2006。20 世纪 70 年代后,北大西洋公约组织对飞机的腐蚀及腐蚀疲劳问题开展了较大规模的试验研究。文献[1]讨论了腐蚀对飞机结构完整性和损伤容限的挑战,提出必须全面改进原有的设计原则,把腐蚀对结构完整性和损伤容限的影响充分考虑进去,从设计一开始就考虑腐蚀疲劳问题。20 世纪 80 年代末,美、英等国在老龄飞机评估方面进行了大量的研究,开展了大量的加速腐蚀试验研究。从国外有关文献分析,他们主要的研究包括:(1)暴露于环境中的材料表面性能、表面蚀坑密度与尺寸、体积减少量<sup>[2-5]</sup>、坑蚀损伤对疲劳寿命的影响<sup>[6-11]</sup>、剥蚀损伤对疲劳寿命的影响<sup>[12-19]</sup>等随时间的统计试验研究。采用的方法有数理统计、随机过程、神经网络等;(2)环境疲劳研究<sup>[20-27]</sup>;(3)环境作用疲劳/环境疲劳交替作用研究<sup>[28,29]</sup>。

关于腐蚀对结构寿命影响的研究,各家观点差异较大,腐蚀对飞机结构的影响是仍未完全了解的,这是因为各种不同的因素,例如载荷谱、结构位置以及与不同剥蚀及坑蚀水平对应的复杂的断裂机理问题均未完全解决。总体上,与腐蚀寿命研究的大量文献形成鲜明的对比,目前较少见到国外有关飞机日历寿命的研究文献。“日历寿命”的提法在技术发达国家很少见到报道。而一般使用“服役寿命”,究其原因,一是从词义上,日历寿命易被理解为“腐蚀等环境作用+时间”的单纯环境作用历程,与实际情况不符,因而在国

定稿日期:2007-03-15

基金资助:国防预研基金(51327050)

作者简介:石荣,男,1969 年生,副研究员,博士,研究方向为微系统的可靠性

联系作者:范超华,imfch@163.com

外较少使用;二是技术发达国家十分注重防腐研究及飞机结构的防腐设计,相对疲劳寿命而言,日历寿命问题不突出;三是发达国家飞机的飞行强度较高,疲劳寿命与日历寿命指标相匹配,疲劳寿命是控制飞机结构使用寿命的主要指标<sup>[30]</sup>。

## 2.2 国内飞机日历寿命研究现状

近年来国内对日历寿命和腐蚀疲劳问题的研究日益增多。发展了飞机日历寿命确定的区域定寿法<sup>[31]</sup>,即将我国飞机的使用环境划分成若干个区域,凡在同一区域内的各型飞机都按同一环境谱进行腐蚀环境下的寿命评定。在基于动态 S-N 曲线的累积损伤结构日历寿命确定方法中<sup>[32]</sup>,指出材料的 S-N 曲线是随着腐蚀介质和腐蚀时间变化的。根据实验得到随时间变化的动态 S-N 曲线,凭借这一曲线就可以评定腐蚀环境下结构的寿命。杨晓华等<sup>[33]</sup>研究了材料在腐蚀环境下疲劳损伤累积规律,周希沅等<sup>[34]</sup>提出利用不同材料的环境当量折算曲线(COE)和环境试验结果来反映日历寿命;用于评定日历年限的环境腐蚀当量关系和当量环境谱的研究也有进展<sup>[35-39,15-18]</sup>。文献[40,41]提出了基于腐蚀损伤曲线累积假设的有关金属机体腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法。文献[42]提出用腐蚀谱做构件腐蚀试验来测定腐蚀速度,再根据构件的腐蚀损伤容限来估算,以确定飞机结构的日历寿命。文献[43]提出了一种对无环境腐蚀介质影响下修正的模型,用于计算有环境介质影响的飞机结构服役日历寿命的方法。文献[44]提出了腐蚀环境下评定寿命的 DFR(detail fatigue rating)法,找到了 DFR 值与腐蚀时间  $\Delta t$  之间的关系,然后利用 DFR 法和线性疲劳累积损伤理论进行腐蚀环境下的寿命评定;在文献[44]的基础上,文献[45]针对不同的环境提出了不同的 DFR 值与腐蚀时间  $\Delta t$  之间的关系式。文献[46~48]研究了常用航空材料大气腐蚀后的疲劳性能劣化规律。文献[49,50]研究了 LY12CZ 在 EXCO 溶液中的腐蚀动力学统计规律。从以上文献看,可分为两类,一类是基于疲劳的观点,另一类是基于腐蚀的观点,而且其研究内容主要是基于材料预腐蚀后展开的,很少有实际服役条件下的研究结果<sup>[30]</sup>。

另外,文献[51]在十几年航空预研及型号应用成果基础上,吸收国内外先进技术,加以总结、归纳和提高,较为系统地阐述了飞机结构日历寿命体系评定技术的理论、方法、实验技术及实施途径。

通过广大科技工作者多年的不懈努力,我国的飞机日历寿命研究取得了一些成绩。但就总体而言,由于起步较晚,腐蚀损伤对结构寿命影响的研究仍然需要大力开展。应该为实际应用提供方便的预测腐蚀损伤试验件寿命的工具和理论体系,对腐蚀损伤对结构承载能力进行定量分析,而不仅仅是定性描述。

## 3 日历寿命研究的关键问题及技术途径

飞机结构日历寿命是由疲劳失效关键件和腐蚀失效关键件决定的,应综合考虑服役环境、飞行强度、结构形式、材料及防腐技术、维修大纲与措施等因素确定。日历寿命研究涵盖面广,主要包括加速腐蚀试验技术及腐蚀当量关系、腐蚀环境下飞机结构腐蚀损伤及疲劳寿命变化规律及分析方

法、防腐涂层腐蚀损伤程度的描述及发展规律、腐蚀损伤检测及维修技术、日历寿命评定技术等。现介绍其中几个关键问题、基本研究思路及技术途径。

### 3.1 腐蚀过程加速再现及环境谱的编制

环境与载荷对飞机结构的作用十分漫长而复杂,而且我国地域辽阔,各种军机服役地区的环境、使用及维护等情况差别很大,无法对飞机结构腐蚀损伤及疲劳性能进行与日历年限(一般为几十年)等时间的测试或试验。只能采用加速模拟腐蚀试验,缩短腐蚀历程,使试验周期和费用可接受,但必须强调再现飞机在服役过程中出现的腐蚀损伤形式及特征。对于金属结构应着重考虑湿度、温度及溶液浓度等主要有毒因素,并将其加重,忽略次要因素的影响。对于非金属材料如涂层,则应考虑紫外线、热冲击、低温疲劳和盐雾等因素的作用<sup>[52]</sup>。因此,如何综合考虑环境因素,合理制定加速环境谱或载荷/环境谱是实现飞机结构腐蚀损伤再现的核心问题,是加速腐蚀试验研究的关键。

根据已有的研究结果<sup>[51]</sup>,对于我国的战斗机而言,可以认为地面停放腐蚀影响占主导地位。军用飞机地面使用环境谱的编制,首先是分析飞机的使用环境状况,选取有代表性的若干个机场,取其近十年左右的气象资料和大气成分,经过数据筛选,删除环境因素中对结构腐蚀、老化影响小的参数与作用时间,保留影响大的参数。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、频次,均为统计值;凝露则根据相对湿度和飞机结构的温差来计算。在大气污染情况分析中,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有关,有害介质取其平均值,用各种风向占全年的百分比进行修正。在具体的实验谱编制过程中,可以借鉴已在工程技术领域被广泛使用的实验设计 DOE(design of experiment)技术<sup>[53,54]</sup>来合理选取试验中应重点考虑的腐蚀环境影响因素和具体含量,并可以对试验结果数据进行科学有效地统计分析。

### 3.2 建立加速腐蚀当量关系

加速腐蚀当量关系是实验室试验与服役过程之间架设的一座“桥梁”,是目前国内外学者关心的一个技术难题。当量关系的建立需具备两个条件:一方面必须获得大量的加速模拟试验数据及典型服役地区飞机结构腐蚀损伤等方面的测试数据与统计结果;另一方面需要选择合理的准则,经理论推导,建立数学模型。在腐蚀环境下,无论飞机结构腐蚀损伤或疲劳寿命变化过程都可抽象为一种随机过程,需要运用概率论、随机过程理论建立分析模型<sup>[55]</sup>。对于腐蚀失效关键结构,应采用腐蚀损伤等效准则;对于疲劳失效关键结构,宜采用疲劳强度(或疲劳寿命)等效准则<sup>[36,56]</sup>。

### 3.3 防腐涂层的加速腐蚀试验及失效分析

防腐涂层对防止环境对飞机结构的腐蚀十分重要,但随着日历年限的增加,由于湿热、热冲击、紫外线、盐雾、低温疲劳载荷及外来物(如砂尘)撞击等因素的作用,涂层本身的物理和化学性质将不断坏,老化失效,对金属基体的防腐功能不断下降。因此,对飞机涂层进行腐蚀条件下的试验研究、分析其失效规律、建立合理的寿命计算模型均十分重要

要<sup>[57,58]</sup>。具体试验设计及结果分析也可以借鉴 DOE 技术。

### 3.4 飞机结构腐蚀损伤检测技术

对飞机结构损伤形式、损伤程度以及产生的原因进行分析非常重要。因此,发展损伤检测技术是进行日历寿命研究要解决的关键技术之一。比如,美国波音公司采用声发射技术和涡流测试技术进行腐蚀损伤监测,其具体思路是,采用超声波和涡流技术测出腐蚀面积和深度并将测试信号直接转化为电压值,再转化为图象,直观地在显示屏上展现腐蚀部位地损伤面积和深度,其特点是直观而准确。

### 3.5 腐蚀环境下飞机结构日历寿命分析方法

在腐蚀环境下进行飞机结构日历寿命研究,不仅需要大量的试验,获得飞机结构腐蚀损伤或疲劳寿命发展过程的一般规律;而且需要在试验的基础上,建立相应的理论分析方法。与常规疲劳寿命理论分析方法相比,腐蚀环境下的日历寿命分析方法涉及的内容更多、考虑的因素更复杂。陈群志<sup>[56,59]</sup>借鉴常规环境下的疲劳寿命分析方法,提出了腐蚀环境下飞机疲劳失效关键件的日历寿命分析方法,计算结果与试验结果符合较好。其主要技术途径包含两个方面:其一,通过建立飞机结构腐蚀影响修正系数  $C_c(t)$  曲线,并以此为依据,获得腐蚀环境下的疲劳 S-N 曲线族;其二,将常规环境下依据 Miner 理论建立的疲劳寿命分析方法,推广到腐蚀环境下进行日历寿命计算。

另外,何宇廷<sup>[60]</sup>提出了飞机结构寿命包线的概念,并给出了飞机结构寿命包线建立的基本方法。飞机结构寿命包线是飞机结构安全服役使用的寿命范围,它反映了飞机结构疲劳寿命与日历寿命的相互影响。何宇廷<sup>[61-63]</sup>在此基础上,探讨了在不同飞行强度下飞机结构单机寿命监控的方法与措施,既能充分利用飞机结构的寿命潜力,又可合理地安排飞机返厂大修。

## 4 小结

(1) 加速模拟环境试验是确定飞机结构日历寿命的主要依据,必须注重再现服役过程中结构的主要腐蚀损伤形式及特征;制定加速环境谱或载荷/环境谱是实现飞机结构腐蚀损伤过程再现的关键。

(2) 腐蚀损伤或疲劳寿命变化过程都可抽象为一种随机过程,可运用概率论、随机过程理论建立分析模型。对于腐蚀关键结构和疲劳关键结构,宜分别采用腐蚀损伤和疲劳寿命等效准则,建立腐蚀当量关系。

(3) 在飞机结构涂层加速试验的基础上,应用模糊理论可综合评定涂层腐蚀损伤,从而可定量描述涂层腐蚀损伤发展规律。

(4) 对于飞机疲劳关键结构,通过建立腐蚀影响修正系数  $C_c(t)$  曲线,可获得腐蚀环境下疲劳 S-N 曲线族;可将常规环境下依据 Miner 理论建立的疲劳寿命分析方法推广到腐蚀环境下进行日历寿命计算。

(5) 要充分发挥飞机结构的性能,挖掘飞机结构的寿命潜力,可以建立飞机结构寿命包线来反映飞机结构疲劳寿命与日历寿命的相互影响,并可在此基础上,实现飞机结构

在不同飞行强度条件下的单机寿命监控。

## 参考文献

- [1] Simpson D L, Brooks C L. Tailoring the structural integrity process to meet the challenges of aging aircraft[J]. *Fatigue*, 1999, (21): s1-s14
- [2] Harlow D G, We R P. A probability model for the growth of corrosion pits in aluminum alloys induced by constituent particles [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 1998, 59(3): 305-325
- [3] Leifer J, Mickalonis J I. Prediction of aluminum pitting in natural waters via artificial neural network analysis[J]. *Corrosion*, 2000, 56(6): 563-571
- [4] Hong H P. Application of the stochastic process to pitting corrosion [J]. *Corrosion*, 1999, 55(1): 10-16
- [5] Engelhardt G, Strehblow H H. The determination of the shape of developing corrosion pits[J]. *Corros. Sci.*, 1994, 36(10): 1711-1725
- [6] Pantelakis Sp G, Daglaras P G, Apostolopoulos Ch Alk. Tensile and energy density properties of 2024, 6013, 8090 and 2091 aircraft aluminum alloy after corrosion exposure[J]. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2000, 33: 117-134
- [7] Evan J, Dolley J. Chemically short-crack behavior of the 7075-T6 aluminum alloy [D]. Pennsylvania, Lehigh University, 1999
- [8] Sankaran K K, Perez R, Jata K V. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: modeling and experimental studies[J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2001, A297(1): 223-229
- [9] DuQuesnay D L, Underhill P R, Britt H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminum alloy under aircraft loading[J]. *Int. J. Fatigue*, 2003, 25(5): 371-377
- [10] Groner D J, Nieser D E. U.S. Air force aging aircraft corrosion [J]. *Can. Aeronaut. Space J.*, 1996, 42(2): 63-67
- [11] Wei P P, Harlow D G. Corrosion and corrosion fatigue of aluminum alloys—an aging aircraft issue[A]. *Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress*[C]. Beijing: Higher Education Press, 1999, 3: 2197-204
- [12] Liao M, Renaud G, Bellinger N C. Effects of exfoliation corrosion on static and fatigue behavior of aircraft materials and structures – testing and modeling studies [A]. *Proceedings of the 8th joint NASA/FAA/DoD conference on aging aircraft*[C]. USA(CA): Palm Springs, 2005
- [13] Liao M, Bellinger N C, Komorowski J P. Modeling the effects of prior exfoliation corrosion on fatigue life of aircraft wing skins [J]. *Int. J. Fatigue*, 2003, 25(9): 1059-1067
- [14] Liao M, Renaud G, Backman D. Modeling of prior exfoliation corrosion in aircraft wing skins[A]. *Proceeding of the 2nd International Conference on Environment Induced Cracking of Metals* [C]. Banff. Alta., Canada, 2004
- [15] Liao M, Renaud G, Bellinger N C. Fatigue modeling for aircraft structures containing natural exfoliation corrosion [J]. *Int. J. Fatigue*, 2007, 29(4): 677-686
- [16] Sharp P K, Mills T, Russo S. Effects of exfoliation corrosion on the fatigue life of two high-strength aluminum alloys [A]. *Proceedings of the 4th Joint DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft*[C]. St. Louis, MO, USA, 2000
- [17] Mills T, Honeycutt K, Brooks C L. Demonstration of an holistic structural integrity process using corrosion/fatigue interactions from laboratory experiments and field experience [A]. *Proceedings of*

- the 6th International Aircraft Corrosion Workshop[C]. Solomons, MD, USA, 2004
- [18] DuQuesnay D L, Underhill P R, Bright H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminum alloy under aircraft loading [J]. *Int. J. Fatigue*, 2003, 25 (5): 371-377
- [19] Kumar B, Widener C, Jahn A. Review of the Applicability of FSW Processing to Aircraft Applications[R]. AIAA Paper 2005-2000; 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Austin, TX, USA, 2005, 1-18
- [20] Panasyuk Y Y, Ratych L V. The methodology of estimating inhibitor effectiveness in corrosion fatigue crack propagation [J]. *Corros. Sci.*, 1995, 37(3): 391-412
- [21] Sivaprasada S, Tarafdera S, Ranganathb V R. Corrosion fatigue crack growth behaviour of naval steels [J]. *Corros. Sci.*, 2006, 48 (8): 1996-2003
- [22] Ruschau J J. Complete fatigue crack growth rate curves for aluminum alloy 2124-T851 including typical crack growth models[R]. Report No. AD-Ao81653, AFML-TR-78-155, 1978, 36
- [23] Petroyiannis P V, Kermanidis AL Th, Akid R. Analysis of the effects of exfoliation corrosion on the fatigue behaviour of the 2024-T351 aluminum alloy using the fatigue damage map [J]. *Int. J. Fatigue*, 2005, 27(7): 817-827
- [24] Kujawski D. A new  $(\Delta K + K_{th})^{0.5}$  driving force parameter for crack growth in aluminum alloys [J]. *Int. J. Fatigue*, 2001, 23(8): 733-740
- [25] Sadananda K K, Vasudevan A K. Crack tip driving forces and crack growth representation under fatigue [J]. *Int. J. Fatigue*, 2004, 26 (1): 39-47
- [26] Liaw P K, Logsdon W A. Fatigue crack growth behavior in Inconel 706 at 297 K and 4.2 K [J]. *Acta Metall.*, 1988, 36(7): 1731-1744
- [27] King J E. Surface damage and near-threshold fatigue crack growth in a Ni-base superalloy in vacuum [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1982, 5(2): 177-188
- [28] Zheng X L, Wang R. Overload effects on corrosion fatigue crack initiation life and life prediction of aluminum notched elements under variable amplitude loading [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 1999, 63: 557-572
- [29] Sunder R, Porter W J, Ashbaugh N E. The role of air in fatigue load interaction[J]. *Fatigue Fract. Eng. Master. Struct.*, 2003, 26: 1-16
- [30] Chen Y L, Duan C M, Lv G Z, et al. Current status and key technique of predictive technique for calendric life of military aircraft[J]. *Eng. Sci.*, 2002, 4(4): 69-74  
(陈跃良, 段成美, 吕国志等. 军用飞机日历寿命预测技术研究现状及关键技术问题[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(4): 69-74)
- [31] Zhang F Z. Method of area determination of an aircraft calendar life[J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 2001, 22(6): 549-552  
(张福泽. 飞机日历寿命确定的区域定寿法 [J]. *航空学报*, 2001, 22(6): 549-552)
- [32] Yang X H, Yao W X, Chen Y L, et al. Research of structural calendar life considering the effects of calendar environments[J]. *Chin. J. Appl. Mech.*, 2002, 19(3): 157-159  
(杨晓华, 姚卫星, 陈跃良等. 考虑日历环境影响的结构日历寿命研究[J]. *应用力学学报*, 2002, 19(3): 157-159)
- [33] Yang X H, Yao W X, Duan CH M, et al. Research on fatigue damage cumulative rule under corrosion environment [J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 2003, 24(3): 234-236  
(杨晓华, 姚卫星, 段成美等. 腐蚀环境下 LC4 铝合金疲劳损伤累积规律研究[J]. *航空学报*, 2003, 24(3): 234-236)
- [34] Zhou X Y. Equity environmental spectrum and speed test spectrum for air craft structure[J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 1996, 17(5): 613-616  
(周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. *航空学报*, 1996, 17(5): 613-616)
- [35] Dong D K, Wang J Y. Equivalent environment spectrum research on service calendar time for fighter aircraft[J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 1998, 19(4): 451-455  
(董登科, 王俊扬. 关于军用飞机服役日历年限评定用的当量环境谱[J]. *航空学报*, 1998, 19(4): 451-455)
- [36] Chen Q ZH, Li X M, Zh X Y, et al. Investigation of corrosion equivalent relationships between the accelerated environment and the typical service environments of aircraft structures [J]. *Acta Aeronaut. Et Astronaut. Sin.*, 1998, 19(4): 414-418  
(陈群志, 李喜明, 周希沅等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. *航空学报*, 1998, 19(4): 414-418)
- [37] Liu W T, Jiang D B. Study on accelerated corrosion test environment spectrum for critical area [J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 1998, 19(4): 435-438  
(刘文琨, 蒋冬滨. 飞机结构关键危险部位加速腐蚀试验环境谱研究[J]. *航空学报*, 1998, 19(4): 435-438)
- [38] Chen Y L, Duan C M, Jin P. Local environmental equivalent spectrum for accelerated corrosion of aircraft structure[J]. *J. Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut.*, 1999, 31(3): 338-341  
(陈跃良, 段成美, 金平. 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)
- [39] Chen Y L, Yang X H, Lv G Z. Comparative study of quantitative predictive method of corrosion damage for engineering components [J]. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.*, 2003, 23(1): 52-55  
(陈跃良, 杨晓华, 吕国志. 结构腐蚀损伤定量预测方法对比研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2003, 23(1): 52-55)
- [40] Zhang F Z. A New Method to Determinate Aircraft Calendar Life [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000  
(张福泽. 飞机日历寿命确定的新方法研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000)
- [41] Zhang F Z. Calculation model and determination method of corrosion damage calendar life of metal parts[J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 1998, 20(1): 30-37  
(张福泽. 金属机件腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法[J]. *航空学报*, 1998, 20(1): 30-37)
- [42] Zhang D. Accelerated corrosion test of the aircraft structure under equivalent environment spectrum and the computing method for the calendar life[J]. *Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin.*, 2000, 21 (3): 196-201  
(张栋. 飞机结构件在当量环境谱下加速腐蚀试验和日历寿命计算方法[J]. *航空学报*, 2000, 21(3): 196-201)
- [43] Dong D K, Wang J Y, Xue J C. The correction method of aircraft structural calendar service life under corrosion environment medium[J]. *J. Mech. Strength*, 1999, (2): 45-50  
(董登科, 王俊扬, 薛景川. 考虑环境腐蚀试验和日历使用寿命修正方法[J]. *结构强度研究*, 1999, (2): 45-50)
- [44] Ye B. Study on evaluation of A/C structure corrosion fatigue life [J]. *Hongdu Sci. Technol.*, 2003, (2): 45-50  
(叶彬. 飞机结构腐蚀疲劳寿命预估工程方法研究[J]. *洪都科技*, 2003, (2): 45-50)
- [45] Yang Y G, Xue J C, Jiao K F, et al. DFR method in corrosive

- fatigue analysis of aircraft structure[J]. J. Mech. Strength, 2004, 26(5): 1-3  
(杨玉恭, 薛景川, 焦坤芳等. 飞机结构腐蚀疲劳分析中的 DFR 法[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 1-3)
- [46] Wang B T, Yang Q X. S-N curves for LC4CS aluminum alloy and 30CrMnSiNi2A steel pre-corroded in atmospheric environment[J]. J. Mech. Strength, 2000, 22(2): 222-225  
(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, 22(2): 222-225)
- [47] Xie W J, Li D, Hu Y L, et al. Statistical study of corrosion kinetics law for LY12CZ and 7075T7351 aluminum alloy in EXCO solution[J]. Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin., 1999, 20(1): 30-34  
(谢伟杰, 李 获, 胡艳玲等. LY12CZ 和 7075T7351 铝合金 EXCO 溶液中的腐蚀动力学的统计研究 [J]. 航空学报, 1999, 20(1): 30-34)
- [48] Cai J P, Liu M, Luo Z H, et al. Study on accelerated tests for aluminum alloy atmospheric corrosion [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2005, 25(5): 262-266  
(蔡健平, 刘明, 罗振华等. 航空铝合金大气腐蚀加速试验研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(5): 262-266)
- [49] Wang B T, Fan J H, Yang Q X. Fatigue property of metals pre-corroded in atmospheric environment[J]. Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin., 1999, 35(11): 1163-1166  
(王斌团, 范建华, 杨庆雄. 金属材料大气环境静态腐蚀老化的疲劳性能[J]. 金属学报, 1999, 35(11): 1163-1166)
- [50] Hu Y L, Li D, Guo B L. Statistical study of corrosion dynamics law and method to predict calendar life of LY12CZ aluminum alloy[J]. Acta Aeronaut. et Astronaut. Sin., 2000, 21(supl): 553-557  
(胡艳玲, 李获, 郭宝兰. LY12CZ 铝合金型材的腐蚀动力学统计规律研究及日历寿命预测方法探讨[J]. 航空学报, 2000, 21(增刊): 553-557)
- [51] Liu W T, Li Y H. Evaluation Technology of Aircraft Structural Calendar Life System[M]. Beijing: China Aviation Industry Press, 2004  
(刘文廷, 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)
- [52] Robert C E. Structural health monitoring of composite plates under ambient and cryogenic conditions[A]. Proceeding of 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Center, Austin, Texas, USA, 2005: 18-21
- [53] Liu W Q. Design of Experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005  
(刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- [54] Wang Y, Sui S L, Wang A Q. Mathematical Statistics and Engineering Data Analysis in Matlab[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006  
(王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006)
- [55] Yu D Y, Chen Y L, Duan C M. Statistical study on corrosion damage distribution of aircraft structure based on neural network [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2006, 26(1): 19-21  
(郁大有, 陈跃良, 段成美. 基于神经网络的飞机结构腐蚀损伤统计研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 19-21)
- [56] Chen Q Z. Research of aircraft structural calendar life technology system under corrosive environment[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 1999  
(陈群志. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命技术体系研究[D]. 北京: 北京航空航天大学博士学位论文, 1999)
- [57] Chen Q Z, Sun Z D, Lu W Z, et al. Comprehensive evaluation for anticorrosive properties of heavy-duty coating SEBF/SLF applied to typical aircraft structures[J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2005, 25(6): 365-368  
(陈群志, 孙祚东, 陆维钟等. SEBF/SLF 重腐蚀防护涂层应用于典型飞机结构中防腐性能综合评定[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(6): 365-368)
- [58] Chang H, Han E H, Wang J Q, et al. Influence of coating of covering airplane on corrosion fatigue life of aluminum alloy LY12CZ[J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2006, 26(1): 34-36  
(常红, 韩恩厚, 王俭秋等. 飞机蒙皮涂层对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳寿命的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 34-36)
- [59] Chen Q Z, Xu X F. Evaluation of calendar life and service life of JLx aircraft under corrosive environment (final report)[R]. 1998  
(陈群志, 徐晓飞. JLx 飞机典型结构腐蚀环境下服役日历年限与使用寿命评定技术研究 (总结报告)[R]. 中航总公司第 623 研究所, 320 厂, 1998.4)
- [60] He Y T. Establishment of aircraft structural life envelope[J]. J. Air Force Eng. Univ. (Nat. Sci.), 2005, 6(6): 1-3  
(何宇廷. 飞机结构寿命包线的建立 [J]. 空军工程大学学报, 2005, 6(6): 1-3)
- [61] He Y T. Service life supervision for individual aircraft structural system based on aircraft structural life envelope [J]. Eng. Sci., 2006, 8(6): 23-27  
(何宇廷. 基于飞机结构寿命包线的飞机结构单机寿命监控[J]. 中国工程科学, 2006, 8(6): 23-27)
- [62] He Y T, Fan C H, Zhang H X, et al. Fatigue life supervision of aircraft structures under corrosive conditions[J]. Key Eng. Mater. 2006, 9
- [63] He Y T, Fan C H. Determination of aircraft structural life envelope[J]. J. Air Force Eng. Univ. (Natural Sci.), 2006, 6(6): 1-3  
(何宇廷. 飞机结构寿命包线的确定方法研究[J]. 空军工程大学学报, 2006, 6(6): 1-3)

## CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT OF CALENDAR LIFE OF AIRCRAFT STRUCTURE

SHI Rong<sup>1</sup>, LI Zhengqi<sup>2</sup>, WANG Xuede<sup>3</sup>, FAN Chaohua<sup>3</sup>

(1. EDA and Network Information Center, Shanghai Institute of Microsystem And Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050; 2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710038; 3. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

**Abstract:** The technical background, the current status and existing problems of the same subject both at home and abroad in the research field of the calendar life of the military aircraft were presented. Several key problems and their technical settlements were expounded emphatically, such as the accelerated corrosion test technique for aircraft structure under laboratory conditions, the evaluation technique for corrosion damage of anticorrosive coats, the corrosion equivalent relationship between the accelerated environment and the service environment, and the methods for theoretical analysis of the calendar life.

**Key words:** corrosive environment, aircraft structure, calendar life