

军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究

陈群志¹, 康献海¹, 刘健光², 房振乾¹, 张蕾¹

(1. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100762; 2. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 简要介绍了军用飞机使用寿命包含的主要内容。列举了近年来我国现役飞机发生的典型腐蚀故障或事故案例, 阐述了环境腐蚀对飞机的危害, 强调开展飞机腐蚀防护和日历寿命研究的重要性和紧迫性。对我国军用飞机的服役环境、使用特点和腐蚀现状进行了分析, 对当前现役飞机腐蚀和日历寿命方面存在的主要问题进行了梳理, 提出了当前应重点研究的关键技术。

关键词: 军用飞机; 结构; 服役环境; 腐蚀; 日历寿命

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)04-0001-06

Discussion About Military Aircraft Anti-corrosion and Calendar Life Research

CHEN Qun-zhi¹, KANG Xian-hai¹, LIU Jian-guang², FANG Zhen-qian¹, ZHANG Lei¹

(1. Beijing Aeronautical Research Center of Engineering and Technology, Beijing 100076; 2. Avic Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024)

Abstract: In this work, the main content for service life of military aircraft was introduced briefly, the typical corrosion cases were illustrated, and the harm of environmental corrosion to aircraft was described. It is significant and urgent to research the anti-corrosion technique and calendar life of aircraft. The service environment, application feature and corrosion status of active military aircrafts were discussed. The main existing problems for corrosion and calendar life of active aircrafts were analyzed and the key techniques that should be studied mainly now were advanced.

Key words: military aircraft; structure; service environment; corrosion; calendar life

1 军用飞机的使用寿命

军用飞机是空军、海军航空兵、陆军航空兵的主要武器装备, 是我军战斗力的重要组成部分, 具有极其重要的军事地位。飞机的使用效能能否得到充分发挥, 在很大程度上取决于其使用寿命以及寿命期内的可靠性。飞机的寿命涉及到材料、设计、制造、腐蚀防护、试验、使用维护、修理和管理等诸多环节和领域, 十分复杂, 也是国内外航空界极为关注的问题^[1,2]。

我国军用标准GJB775.1-98《军用飞机结构完整性大纲·飞机要求》中明确规定, 军用飞机的使用寿命包括疲劳寿命和日历寿命两项控制指标, 以先到者为准。这就是说, 日历寿命先到或是疲劳寿

命先到, 飞机都应大修或退役。可见, 飞机的日历寿命与疲劳寿命有着相同的重要性^[2]。

飞行小时寿命和起落次数主要取决于疲劳载荷谱、结构细节的抗疲劳品质, 属于疲劳寿命的范畴。

飞机疲劳定寿工作在国内外已开展了大量而深入的研究, 建立了较为完善的疲劳定寿方法^[3], 形成了由载荷谱实测与编制、累计损伤计算、部件级和整机疲劳试验所构成的飞机结构疲劳定寿技术体系, 为我国飞机疲劳定寿奠定了坚实的技术基础。

影响飞机机体腐蚀的因素很多, 交互作用复杂, 国内外至今没有建立一套相对完善的日历定、延寿的理论方法^[3]。对飞机日历寿命方面的一系列重大关键技术开展深入研究, 对于提高飞机的完好率和出勤率, 减少维修成本、延长使用寿命, 保障飞行安全, 降低飞行事故至关重要。

收稿日期: 2010-04-28; 修回日期: 2010-06-30

作者简介: 陈群志 (1963—), 男 (汉), 湖南临澧人, 高级工程师, 博士。

目前国际上飞机寿命通常也规定了疲劳寿命(包括起降次数、飞行时间)和日历寿命2项指标。美国从70年代中期就制订了设计规范与标准,并根据实际应用中存在的问题不断加以修订。美国民用飞机的设计日历寿命为20年,起落次数为2万次,飞行时间是6万小时。美国军用飞机原设计寿命为20~30年,但是美国空军一再延长多种机型的日历寿命,例如B-52H战略轰炸机的设计日历寿命为25年,目前已分阶段延长至49年,并计划将总日历寿命延寿至60年,延寿的核心是依靠优质的涂层体系、腐蚀修理、防腐改进等^[4]。

由于资源紧缺,一架大型军机的造价很昂贵,因此,对有使用潜力的老旧飞机延寿,是节省装备建设费的重要途径,美国这样富裕的国家也不例外^[4]。

2 腐蚀对飞机的危害

日历寿命与飞机腐蚀密切相关,属于腐蚀寿命的范畴。主要取决于结构的抗腐蚀品质、服役环境、腐蚀防护与腐蚀修理等因素。近年来针对军用飞机的腐蚀问题作者进行了大量调研,结果表明,现役各机种都存在不同程度的腐蚀现象,有些机种的重要部位、关键承力结构甚至还出现严重的腐蚀损伤。例如,某系列飞机的进气道调节板、中央翼1号大梁、外翼前梁、外翼下壁板和平尾大轴结构等还出现了较严重的腐蚀故障^[5]。可以这样说,腐蚀是目前我军各型飞机最普遍、最严重的损伤形式。

腐蚀对飞机的危害极大,严重影响和制约着飞机的安全使用、正常维护与经济修理^[1]。腐蚀和疲劳都是导致飞机产生灾难性事故的重要原因。

例如,2001年3月一架某系列飞机因42框下半框腐蚀导致断裂(如图1所示)而提前报废。若该机在飞行前未发现42框下半框完全断裂,极有可能发生重大事故。随后在上百架该系列飞机的同一结构部位发现了严重的腐蚀或腐蚀裂纹,致使大批飞机停飞,实施了大规模紧急抢修^[4]。为此,投入了大量的经费,不仅在经济上造成重大损失,而且在一段时间内极大地影响了部队的正常训练,严重削弱了部队的战斗力。

又如,2006年6月一架某型飞机全机疲劳试验中平尾大轴发生断裂,检查发现内腔表面防腐处理存在明显缺陷(如图2所示),整个内腔严重腐蚀。对断裂部位进行断口分析,未发现材料和加工缺

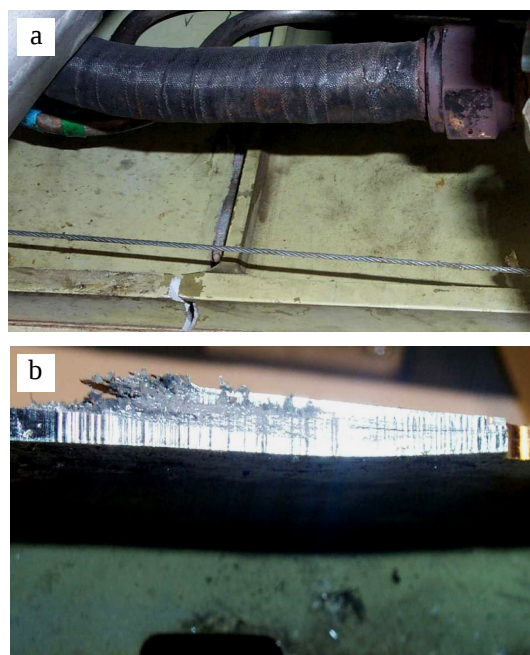


图1 某系列飞机42框下半框腐蚀断裂部位(a)及其腐蚀形貌(b)

Fig.1 Corrosion broken part (a) and its morphologist (b) of 42th frame in a certain series aircraft



图2 某型飞机平尾大轴断裂部位严重腐蚀

Fig.2 Severe corrosion part of horizontal tail's main axis of a certain type aircraft

陷。疲劳裂纹起始于定位焊点处的腐蚀坑,疲劳裂纹扩展区有大量腐蚀产物,裂纹萌生部位有明显应力腐蚀特征^[5]。计算分析表明,断裂部位应力水平远低于材料的疲劳强度,正常情况下不可能发生疲劳破坏。因此,腐蚀是导致该结构断裂的主要原因之一。随后对数十架飞机进行普查后发现,大多数平尾大轴内腔都存在不同程度的腐蚀。其中36%的飞机平尾大轴严重腐蚀,焊缝周围腐蚀更为严重,5根平尾大轴出现了腐蚀裂纹。只能全部停飞更换,严重影响了飞机飞行安全和正常训练。以往由于对飞机内腔结构腐蚀危害认识不足,未采取有效的防

腐措施,致使平尾大轴腐蚀问题成为严重影响某系列飞机特检、大修以及制造的重大问题之一。

飞机腐蚀也是世界航空界共同面临的问题,严重腐蚀损伤不仅会导致飞机腐蚀修理费用大幅度增加,而且还会诱发重大事故。例如,2002年美国一架F15战斗机由于尾翼结构腐蚀断裂导致空中解体。严重的腐蚀问题不仅极大地影响飞机正常训练飞行,还会大幅度增加腐蚀修理费用。据报道,在美空军装备的F-22A战斗机中已有三分之二的飞机出现结构腐蚀。在发生腐蚀的部件中,位于机体上方的4个活动构件的腐蚀最严重,每个构件价值约5万美元。清理飞机表面和除锈工作需耗资50万美元,更换所有部件的费用更是高达数百万美元。F-22A结构腐蚀的主要原因是结构材料、涂料和其它一些部件的材料不匹配。解决的方法是将原先的铝制构件换为钛合金构件。这样直接导致费用的大幅度增加。更严重的是,更换部件将会增加F-22A飞机的雷达波反射率,从而大幅度降低其隐身性能。

2008年10月和12月俄罗斯接连发生两起米格-29飞机坠毁事故后,俄空军对在役的近300架米格-29飞机进行全面检查发现,大约有80%的飞机尾翼存在严重腐蚀,对飞机的飞行安全构成巨大隐患。对整个机群进行全面的安全检查评估,结果约有90架飞机需要淘汰,而其中一些飞机飞行时间还不足150飞行小时。可见,腐蚀和老化问题是导致这些飞机退役的直接原因。

民航方面,1981年8月台湾一架波音747客机因机身下部结构腐蚀、蒙皮变薄,产生孔洞和裂纹导致空中解体,造成150多人遇难。2002年台湾又一架波音747客机因机体结构腐蚀在福建海域坠毁,250多人遇难。2008年8月20日及随后20多天内,西班牙、吉尔吉斯斯坦和俄罗斯连续发生3起老龄飞机重大安全事故。由此认为结构腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳是导致飞机出现事故的重要因素。

3 我国飞机的服役环境和使用情况

与美国、日本、俄罗斯等国家的环境条件相比,我国军用飞机的服役环境更加严酷,结构的腐蚀速率更快。国防科技工业自然环境试验研究中心和日本广岛工业技术中心在日本广岛和我国重庆联合进行了大气暴露对比研究,结果表明,对相同的铝合金和钢试样在我国重庆的大气腐蚀速度远高于

日本广岛^[4],如图3所示。目前我国工业废气、废水等有害介质大量排出,环境污染不断加剧的趋势还没有得到有效控制,导致服役环境对军用飞机的腐蚀呈现出增长态势,特别是沿海和内陆湿热地区服役环境更加严酷。

结构材料产生严重腐蚀需要一定的时间,我国典型材料长期暴露腐蚀数据的统计表明,在沿海和内陆湿热地区典型材料进入腐蚀快速发展阶段的时间约为6年,如图4所示。这意味着目前我军有相当数量的飞机已经或即将进入腐蚀快速发展阶段^[4]。

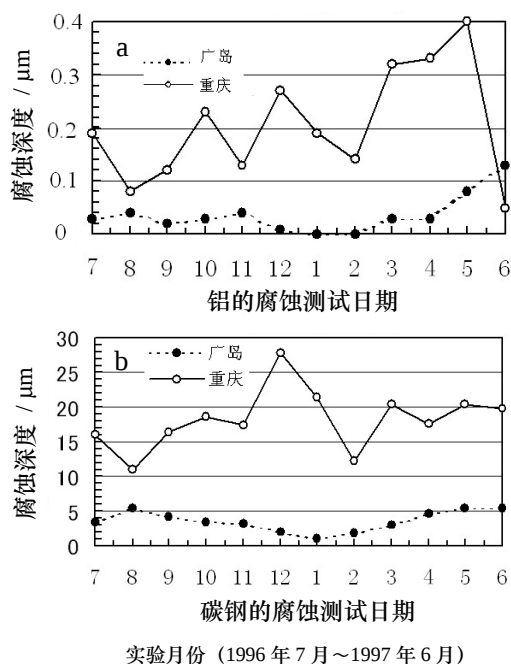


图3 铝合金(a)和钢(b)在日本广岛和中国重庆大气暴露腐蚀对比试验结果

Fig.3 The results of aluminium alloy (a) and steel exposed (b) in atmosphere in Hiroshima of Japan and Chongqing

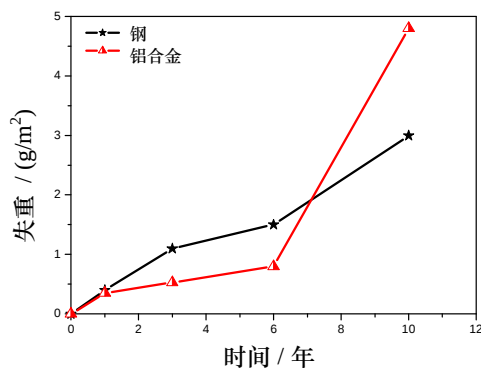


图4 我国典型环境下常用材料腐蚀失重随暴露时间的变化趋势

Fig.4 The weight-lose trendline of common materials exposed in tapical domestic environment

从我国现役飞机的使用情况看,大多数机种的年平均飞行强度相对较低,服役期间地面停放时间一般占总寿命的 97 % 以上。大量事实表明,地面停放时间越长,飞机的腐蚀情况越严重,而年平均飞行时间越多的飞机腐蚀问题相对较少。这也是军用飞机的腐蚀问题为什么比民用飞机的腐蚀问题更为突出的重要原因之一。

4 系统开展飞机腐蚀防护及日历寿命研究的重要性和紧迫性

以往我国军用飞机在腐蚀防护与日历寿命方面缺乏系统性研究,经费投入严重不足,致使现役机种的腐蚀和日历寿命问题越来越突出,已经成为影响和制约飞机安全使用、正常维修的重要因素,严重影响到我军飞机的战术技术储备和战斗力。在当前乃至今后,确定和延长日历寿命是空军现役飞机寿命体系中需要重点研究的课题,也是亟待研究解决的重大系统工程^[4]。

1972 年和 1974 年空军两架某型飞机因机翼疲劳断裂,造成飞机空中解体灾难性事故。之后,飞机疲劳问题引起各方面重视,在飞机疲劳寿命方面建立了较严格管理制度。而日历寿命方面仍没有形成完善的管理办法,现役飞机日历寿命管理工作还相对无序。通过全面、系统地开展日历寿命研究,能够促进空军现役飞机使用寿命的科学管理,提升现役飞机使用寿命的管理水平。

就当前情况看,日历延寿技术研究是现役飞机寿命体系中的首要问题,主要体现在 3 个方面:

(1) 日历延寿对于解决现役飞机严重腐蚀问题具有重要作用

飞机日历延寿的主要内容就是要全面检查评估飞机的技术状况、梳理飞机的腐蚀/老化问题、确定腐蚀影响关键结构、制定腐蚀修理方案和防腐改进措施、通过加速试验和对比分析,给出延寿结论。

首先通过全面的检查能够及时、准确地发现飞机机体结构可能存在的严重腐蚀损伤或腐蚀问题苗头;通过腐蚀修理和防腐改进能够使严重腐蚀问题可能诱发的重大故障消灭在萌芽状态;通过一系列的试验和分析,科学合理地确定延寿时间,给出腐蚀修理和腐蚀防护的配套技术措施,从而保证延寿后飞机不出现大的腐蚀问题。所以,日历延寿对于解决现役飞机严重腐蚀问题具有重要作用。

(2) 日历延寿是将部分机种维持在一定规模的重要举措

随着空军航空装备建设的发展,加快了飞机更新换代的步伐,一大批三代战斗机陆续装备部队,对提升空军的整体战斗力发挥了重要作用。然而,二代机种在相当长的一段时期在数量上仍然会占多数,是空军航空装备的主体。由于二代机的服役年限将陆续到达规定的日历总寿命,大批飞机将面临退役,但疲劳寿命还有较大富裕量,其中部分飞机存在较严重的腐蚀问题,而多数飞机总体技术状态良好,具备延长日历寿命的潜力。因此,日历延寿是将二代机种维持在一定规模的重要举措。

(3) 日历延寿是解决部分机种到寿后无替代机种的有效手段

目前有些机种的服役日历年限较长,超过原定的日历总寿命指标,通过特检或大修进行了日历延寿,但总飞行小时数很低,疲劳寿命还有很大富余。例如,某型运输机机群中飞行强度最大的飞机,总飞行小时寿命也有 60 % 的富余量。其中某型的运输机占规定疲劳寿命的 30.2 % ~ 13.7 %。某型运输机占规定疲劳寿命的 40.0 % ~ 15.1 %。这些机种近期将陆续到达延寿后规定的日历年限,如果退役,将造成很大的浪费。

由于这些运输机经过大修或特检延寿,大多数飞机的腐蚀问题得到较为有效的控制,机体结构的总体状况较好,仍具有日历延寿的潜力。因此,根据机群的技术状态,有选择地对这些运输机进行日历延寿,可有效地降低延寿风险。

5 我国现役飞机在日历寿命方面存在的突出问题

(1) 现役飞机结构的抗腐蚀品质“先天不足”,腐蚀维修技术水平相对落后

我国现役飞机的防腐设计考虑不足,缺少有效的防腐措施,结构防腐设计与防腐措施的技术水平较低,导致结构抗腐蚀品质“先天不足”。服役期间飞机腐蚀问题突显,难以保证达到较长的日历寿命。至今,在军用飞机腐蚀维护、修理和监控方面,没有开展较为系统的研究工作。目前部队缺少飞机防腐技术资料 and 基本的腐蚀维护方法;修理厂在飞机结构腐蚀修理方面也面临着一系列问题。现有的腐蚀修理措施不能很好地处理、解决出现的腐蚀问

题, 因此对于修理过程中发现的腐蚀故障, 进行处理后, 既不能保证又不能消除在服役期间重大腐蚀故障的再一次发生。例如, 一架某型飞机在延长首翻期特检中曾对左侧中央翼1号大梁下缘的腐蚀进行了修理, 但仅隔一年多时间在重新涂锌黄漆处又出现了严重腐蚀。另一型号的飞机同样出现类似情况, 1995年机翼前梁腹板发生严重腐蚀后, 经过了紧急抢修, 但2003年在原修理部位又出现多处腐蚀穿孔, 导致2架飞机提前返厂大修。

(2) 腐蚀环境下飞机的疲劳定寿结论有待修正

现有的飞机结构强度规范及定寿结论基本上是针对一般环境而言的, 未计及腐蚀环境与载荷的作用, 给出的飞行小时寿命不能直接用于沿海、湿热等腐蚀较严重地区使用的飞机, 否则将产生不安全的结果。现役多数机种的寿命通报中不得明确的规定“适用于非沿海、湿热地区”。

(3) 亟待建立合理、科学、可靠、完整日历寿命的体系

现役飞机日历寿命主要凭经验或靠部队领先飞行逐步给出, 大致有如下三种情况:

第一, 有些机种迄今没有日历寿命, 应及早给出日历首翻期、维修间隔及相应的修理方法。

第二, 在军方的强烈要求下, 研制单位凭经验给出或“暂定”了飞机的日历寿命, 缺乏与之相应的、经环境试验验证的维修方法, 科学性和可靠性均明显不足。因此, 亟待开展相应的研究工作, 以便将其调整得更科学、可靠和完整。

第三, 引进的一些机种给出的日历寿命较短, 多数机种给出的日历总寿命仅为20年。由于我军飞机的服役环境和飞行训练体制与外军存在很大差异。所以我们不能照搬国外给出的定寿结论, 应根据我军飞机的服役环境和具体使用情况确定日历寿命和日历修理间隔。

(4) 绝大多数机种的日历寿命与疲劳寿命不匹配的矛盾亟待解决

大多数机种的年平均飞行强度相对较低, 服役期间地面停放时间一般占总寿命的97%~99%。大量事实表明, 地面停放时间越长, 飞机的腐蚀越严重。大多数飞机达到日历寿命指标时, 飞行小时和起落次数寿命还有很大剩余寿命。依据日历寿命指标判定飞机到寿, 将造成巨大的浪费。现有一大批飞机的服役年限已经达到或接近日历寿命设计

指标, 但实际飞行小时和起落次数都低于其寿命指标。如何充分发挥这些老龄飞机的潜力, 使之继续安全有效地服役, 必须尽快开展日历延寿技术研究, 制定出有效的腐蚀防护与腐蚀修理措施。这样不仅可节省大量的装备采购费用, 而且对保证老龄飞机飞行使用安全十分必要。

(5) 确定新机的日历寿命迫在眉睫

当前一些新机型的定寿工作迫在眉睫, 其中重要内容之一就是合理确定或延长其日历寿命和日历修理间隔; 未来大型运输机等型号同样面临着确定日历寿命的问题。在飞机设计研制阶段军方应提出明确、合理的日历寿命指标, 并且针对设计部门采取的防腐设计技术和措施能否达到规定的日历寿命指标进行考核验证。所以, 必须建立一套考核验证飞机防腐品质及日历寿命的科学方法。

(6) 非关键承力构件和有寿件的腐蚀老化问题

一些非关键承力构件的腐蚀老化问题对飞机使用和维护同样造成了较大影响, 其中镁合金构件, 如仪器设备固定支架、管路卡箍等腐蚀问题尤为突出。这些构件腐蚀一般不会直接危及飞机安全, 但可能诱发一系列严重的问题, 增加安全隐患。如管路卡箍腐蚀后, 会引起管路系统振动加剧, 卡箍与管路接触部位严重磨损, 导致管路提前破坏。固定支架腐蚀失效后可能引起仪器设备破坏, 进而不能正常工作。所以, 镁合金等非关键承力构件的腐蚀防护也是当前亟待研究解决的重要问题之一。

现役机型的有寿件如有机玻璃、电缆等老化加快, 从而导致失效, 也成为影响飞机日历寿命的重要因素之一, 需在飞机日历寿命研究中综合考虑。

6 当前应重点研究的几个关键技术问题

(1) 应用先进防腐技术改进军机结构防腐品质
将新防腐技术应用于军用飞机结构腐蚀维护与修理中, 是目前条件下提高飞机结构抗腐蚀品质, 抑制或延缓腐蚀的重要措施之一^[4,5,7-9]。应主要针对军用飞机典型腐蚀薄弱部位或结构开展新型防腐涂层应用研究。首先通过对新型防腐涂层与现役飞机结构涂层在典型腐蚀环境下的性能进行对比试验给出评定结论; 其次, 根据修理厂和外场的实际施工条件, 对施工方法及工艺规程进行研究。

(2) 军用飞机结构腐蚀防护与修理技术研究
腐蚀防护与治理是军用飞机维护与修理中的薄

弱环节, 腐蚀维护与修理方面缺少可遵循的依据和有效措施; 修理厂所采用的腐蚀修理技术和工艺比较陈旧, 腐蚀修理质量没有保证。因此, 迫切需要编写军用飞机腐蚀防护与修理技术指南(或大纲)。

(3) 加速腐蚀试验及评定技术

开展军用飞机日历寿命及腐蚀防护研究, 需要进行大量试验。实际服役环境与载荷对飞机结构的作用是长期、缓慢复杂的过程。我国地域辽阔, 各部队服役地区的环境千差万别, 飞机的使用及维护情况也存在差异, 腐蚀损伤程度(包括腐蚀疲劳损伤)差别很大。若对服役飞机结构腐蚀损伤进行实时跟踪测量或外场试验, 所需时间、经费和人力都难以实现, 且无法解决当前面临的腐蚀问题。所以, 迫切需要建立实验室条件下的加速模拟环境试验技术及对应的理论分析方法, 为军用飞机腐蚀防护和日历寿命研究提供科学、合理的加速腐蚀试验技术。

在建立加速腐蚀试验技术的基础上, 应开展军用飞机结构防腐品质评定研究(包括抗腐蚀疲劳和抗应力腐蚀品质)与试验验证, 进而发现结构中的腐蚀薄弱环节, 以便及早采取有针对性补救或防范措施^[1-4,10], 减少或防止重大腐蚀故障发生。

(4) 军用飞机结构腐蚀程度等级与腐蚀容限评估方法研究

建立腐蚀损伤等级评定准则是对腐蚀损伤程度进行准确判断和采取有效措施的前提, 而腐蚀容限则是保证军用飞机在服役期间不出现影响飞行安全和经济修理的重大腐蚀故障的重要依据。所以, 需要开展腐蚀程度等级划分与腐蚀容限评估方法研究^[1,2,4]。

(5) 军用飞机的腐蚀监(检)测技术研究

开展军用飞机的腐蚀监(检)测, 能够及时了解和掌握腐蚀情况及发展趋势。此项工作首先要制定腐蚀控制目标, 再制定切实可行的腐蚀监控制度, 定期对军用飞机的腐蚀情况进行检查和详细记录, 分析腐蚀原因和规律^[11]。对出现的严重腐蚀损伤, 采取适当的措施及时进行处理, 从而防止影响飞机寿命和飞行安全的重大腐蚀故障。另外, 必须着手研究腐蚀损伤检测技术, 分析、判断飞机结构的腐蚀损伤形式、损伤程度以及产生的原因。主要研究金属结构腐蚀深度和损伤面积以及涂层与密封材料老化损伤及失效评定方法。

7 结 语

综上所述, 腐蚀和日历寿命问题已成为严重影

响和制约军用飞机安全使用、正常维护与经济修理的重要因素。因此, 全面系统地开展飞机腐蚀防护及日历寿命研究是当前军用飞机亟待研究的重要课题, 对于提升现役飞机使用寿命的科学管理水平, 解决严重影响和制约我军飞机安全使用和经济修理的日历寿命和腐蚀问题, 提高飞机的完好率和出勤率, 减少因飞机腐蚀而造成的巨大损失, 避免因腐蚀带来的安全隐患将发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 陈群志. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命研究现状与关键技术问题 [J]. 中国安全科学学报, 2000(4): 36-40.
- [2] 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.
- [3] 张福泽. 飞机停放日历寿命腐蚀温度谱的编制方法和相应腐蚀介质的确定 [J]. 航空学报. 2001, 22(4): 359-361.
- [4] 陈群志. 典型飞机结构日历寿命评定方法与延寿技术研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所博士后出站报告, 2005, 11: 1-20.
- [5] 陈群志, 黄卫华, 韩恩厚, 等. 典型飞机内腔结构腐蚀原因分析及防腐改进 [J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 47-49.
- [6] 陈群志, 韩恩厚, 杨蕊琴, 等. 某型飞机减速板钛合金梁断裂原因分析 [J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 26-29.
- [7] 陈群志, 韩恩厚, 李祥海, 等. IMR 纳米复合涂层与现役飞机涂层抗紫外线老化性能对比研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 17(4): 234-236.
- [8] 李祥海. 纳米复合涂层在军用飞机结构防腐中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2003.
- [9] 陈群志, 孙祚东, 陆维忠, 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.
- [10] 刘文琰, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究 [J]. 北京航空航天大学学报. 2002, 28(1): 208-211.
- [11] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.

作者地址: 北京市 9203 信箱 781 分箱

100076

Tel: (010) 6671 3597 转 8813

E-mail: cqzyang850@vip.sohu.com