

飞机结构的腐蚀防护与腐蚀疲劳研究的发展趋势*

张 勇, 孙 强, 卞贵学, 李 岩

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘 要:介绍了飞机结构腐蚀监控与防护、腐蚀疲劳和腐蚀防护用品应用等方面的国内、外研究现状及发展趋势。重点阐述了防腐蚀用品(CPCs, 主要是缓蚀剂)的应用及其对飞机结构疲劳寿命及疲劳裂纹扩展影响的研究现状, 并预测了其发展趋势。

关键词:飞机结构; 腐蚀疲劳; 腐蚀防护

中图分类号:V 250.2 **文献标志码:**A

Research on Development Trend of Corrosion Protection and Corrosion Fatigue of Aircraft Structures

ZHANG Yong, SUN Qiang, BIAN Guixue, LI Yan

(Qingdao Branch, Naval Aeronautics Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract: The current status and development trend of corrosion inspection and protection, corrosion fatigue and application of corrosion preventive compounds to aircraft structures in domestic and abroad were presented. Several key techniques were discussed including the effects of corrosion preventive compounds(CPCs, mainly inhibitors) on the fatigue life and the effects of CPCs on the growth of cracks. It's development trends were predicted.

Key words: aircraft structure, corrosion fatigue, corrosion protection

腐蚀会严重影响飞机结构的完整性, 并增加飞机维修或维护的费用。飞机在海洋环境中长时间服役, 其金属结构必将比在常规环境中遭受更加严重的损伤^[1-2]。飞机的大梁、桁条、隔框和蒙皮大多由高强度铝合金制成。由于飞机的蒙皮接缝、紧固件孔洞和襟翼等处容易形成积水区和排水不畅区, 当飞机长时间在沿海机场环境中停放或海上飞行归来, 就有可能使海水溶液或盐分进入结构缝隙或凹槽中, 导致搭接部位缝隙产生腐蚀。目前, 缓蚀剂被广泛应用于飞机金属结构腐蚀的预防、延缓和控制, 在减少飞机结构腐蚀、降低生命周期和维护成本方面起着重要作用^[3]。

本文介绍了飞机腐蚀监控与防护研究以及飞机结构腐蚀和疲劳机理研究的发展趋势, 重点阐述了

缓蚀剂在飞机结构上的应用、需要解决的问题及研究发展趋势。

1 飞机结构腐蚀监控与防护研究的发展趋势

开展飞机对海洋腐蚀环境的适应性研究, 为飞机的“三防”(防湿热、防盐雾和防霉菌)设计及飞机结构抗腐蚀设计提出技术要求和理论依据, 是海军飞机腐蚀与控制的重要研究内容。目前的研究还不能完全适应现役海军飞机, 特别是舰载飞机结构所面临的严峻腐蚀形势, 这一领域的关键技术还有待进一步拓展研究^[4]。目前, 已经相继研究出高性能电镀、阳极化、化学处理、缓蚀防锈、去污清洗和补充防护等一系列表面防护技术, 正在向综合性能优异、可靠性高和节能环保的新一代防护技术发展, 如开

用单向流固耦合方法, 将再热蝶阀内部流场计算所得的结果加载到固体结构中, 得到了其内部的温度和变形分布情况, 揭示了其工作过程中内部的变化规律。提出了对再热蝶阀保温, 使其冷启动过程预热, 避免冷启动的方法, 可以防止卡阀。再热蝶阀数值解析的可视化结果为后续设计与结构优化提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 张俊杰, 石朝夕, 袁军, 等. 亚临界 600MW 机组汽轮机主汽阀关闭异常原因分析和消除[J]. 热力发电, 2008, 37(2): 43-47.

- [2] 刘性全, 徐海, 毕传萍, 等. 应用流固耦合理论研究套损机理[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 129-132.

- [3] 时兵, 鲍劲松, 金烨, 等. 一种汽轮机再热主汽阀门机构的动力学建模与虚拟样机仿真[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(7): 1085-1089.

- [4] 李诗久. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.

作者简介: 张守印(1978-), 男, 工程师, 主要从事游乐设备流体传动与控制等方面的研究。

收稿日期: 2013-12-30

责任编辑 郑练

发高性能水基环氧底漆、聚氨酯弹性底漆、无毒缓蚀底漆和抗雨蚀涂层等^[5]。

腐蚀检测也是腐蚀防护与控制的一个重要环节,宏观检查只能大概地判断金属件的腐蚀损伤情况,如点蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹等,因此,还需要借助一些专门仪器进行检查。在腐蚀检修时,要视具体结构情况选择相应的检测方法。目前,大修中使用的主要方法有光学法、渗透法、电阻法、磁探法、超声波检测与X光照相技术。海军飞机经常暴露在严重的盐雾潮湿环境中,极易发生腐蚀,如果腐蚀现象出现后未及时发现,就会导致维修费用的大幅度攀升;因此,需要寻找一种快速检测方法,做到早期发现,实施早期处理,将大幅度减少维修费用。国外已采用声发射检测、激光全息摄影、视频成像技术以及电磁、红外热像等技术,可以测量涂层厚度,以便及早发现腐蚀缺陷。目前,在我军现役飞机结构防腐修理中,这些方法的使用还处在探索阶段^[6]。最近,F-35开发团队选择了BAe系统公司(英国航空航天公司和马可尼电子系统公司合并)开发的新型sentinel(在线)腐蚀监测系统,用于飞机结构的腐蚀监控,而我国同步在飞机腐蚀监测系统开发方面的研究尚不多见。

针对当前飞机的腐蚀损伤评估模式,在理论研究上构建一种可将全寿命阶段飞机结构,可能遭受的各种腐蚀形态、多处损伤(multiple site damage,简称MSD)、枕垫效应(腐蚀产物的膨胀致使金属接触面间好像有枕木作用,故称为枕垫效应)和结构材料性能随时间的退化,作为变量纳入到一个框架的腐蚀管理全寿命分析模型,为新机设计的防腐控制控制和老龄飞机防腐腐蚀疲劳及延寿提供技术支持^[7]。另外,在飞机结构的防腐修理中,应采用先进的修理方法和工艺,以消除或减轻腐蚀环境的影响。目前,在军用飞机的腐蚀损伤修理方面,该修理胶补修理技术已开始应用于飞机金属结构腐蚀损伤的修理领域,是一种外场腐蚀修理方法,非常适用于战时的快速抢修。该修理技术用于修理飞机金属结构,虽然在国际上已是一项成熟的新技术,但国内在这个方面的研究还处于起步阶段;用激光熔覆技术来修理军用飞机腐蚀损伤也在研究之中;对腐蚀损伤部位进行喷丸强化或者激光强化,可以提高该部位的抗腐蚀疲劳能力;微弧氧化技术在飞机结构腐蚀防护与控制中的应用也得到了进一步研究^[8]。

2 飞机结构的腐蚀和疲劳机理研究的发展趋势

关于腐蚀和疲劳研究的综述很多^[9-13],本文主

要介绍以腐蚀和疲劳交互为主的相关研究及发展趋势。人们开展了大量关于腐蚀环境中飞机铝合金结构损伤形成与演化破坏的试验和理论研究。在国外,北大西洋公约组织(NATO)、美国空军和海军、瑞典宇航院、澳大利亚国防科技部和加拿大国防部等相关研究机构,已对飞机铝合金的腐蚀及腐蚀疲劳开展了较大规模的研究,要求从飞机设计开始,就把腐蚀环境及腐蚀对结构完整性和损伤容限的影响考虑进去,颁布了JSSG-2006《飞机结构联合使用指南》和MIL-STD-1530C《飞机结构完整性大纲》。概括起来主要为:1)铝合金材料实验室环境腐蚀试验、随舰暴晒试验,获得铝合金腐蚀损伤发展规律;2)退役飞机结构拆毁检查及剩余强度试验,获得环境与载荷综合作用的损伤数据和剩余强度;3)环境与载荷的交互研究。

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、力学和材料3个方面。腐蚀和疲劳的交互作用主要有如下4种:1)腐蚀疲劳,在腐蚀环境中受交变载荷作用导致损伤破坏的现象,是力学因素与化学因素交互、协调作用的结果;2)腐蚀成核疲劳,即通常所说的预腐蚀后疲劳,结构的腐蚀损伤加速了疲劳裂纹的形成,这是一种腐蚀和疲劳的相互作用;3)先疲劳一再腐蚀一后疲劳的交替(交互)作用,即先疲劳后的结构遭受了腐蚀成核疲劳;4)腐蚀引起载荷传递的疲劳,由于腐蚀损伤造成了载荷的传递或者转移,从而引起应力和应变的变化,导致了疲劳裂纹(如搭接件腐蚀搭接面的腐蚀特点)。到目前为止,考虑腐蚀对寿命影响分析主要集中在对预腐蚀疲劳的研究上,特别是点蚀和剥蚀所引起的腐蚀成核疲劳。

美国和加拿大目前正在发展全寿命评估方法(HLAM)和整体结构完整性过程(HOLSIP)的评估方法,结合铝合金损伤演化过程,将腐蚀损伤处裂纹成核和微裂纹扩展纳入到寿命预测公式中,发展了三阶段、四阶段和七阶段预测模型^[14]。国内从20世纪70年代末开始,结合飞机结构铝合金的服役环境和破坏特点,在国内航空院校和有关场所进行了试验和理论研究。其中,周希沅^[15]通过试验得到了飞机结构典型材料的环境当量折算系数;张福泽^[16]提出了基于温度的腐蚀损伤累积日历寿命计算模型;刘文珽^[17]提出了基于预腐蚀与疲劳性能的C-T曲线方法,建立了地面停放腐蚀对飞机结构使用寿命的影响关系;姚卫星和杨晓华等^[18]研究了腐蚀累积损伤理论,进行了腐蚀和疲劳的交替作用试验,同时研究了飞机结构日历寿命;陈跃良^[19]等通过对退

役飞机铝合金试件的疲劳试验,得到了细节疲劳额定值(detail fatigue rating,简称 DFR)随服役时间下降的结论,同时探讨了将腐蚀坑当量为表面裂纹的可行性,采用断裂力学方法对含坑结构的剩余寿命进行了分析;李荻和穆志韬等^[20]进行了飞机铝合金腐蚀动力学规律研究。

从上述国内外文献资料看,西方国家对材料腐蚀和疲劳的研究起步较早,在环境对飞机结构寿命影响规律、腐蚀环境下寿命预测方法、结构的腐蚀控制以及结构模拟件试验室加速腐蚀技术等方面,进行了许多卓有成效的研究,技术手段先进,微观机理探究深入。国内在研究腐蚀环境下飞机金属结构损伤时,主要考虑了材料表象的宏观行为。从微观层次上讲,腐蚀和疲劳交替(交互)影响飞机铝合金材料疲劳微观断裂机制,以及疲劳性能退化规律的模型和方法尚不多见。国内的研究与国外相比,无论是研究广度还是深度,都有待于进一步深入。

3 飞机结构腐蚀防护用品研究的发展趋势

20 世纪 70 年代,美国空军就开始重视缓蚀剂在飞机金属结构上的应用研究。美国空军航空材料实验室针对飞机结构材料,用电化学方法以及全浸腐蚀试验方法,考察了多种预防腐蚀或减缓腐蚀的化合物和混合物。据报道,这些缓蚀剂由硼酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐、硅酸盐和磷酸盐等组成。这些缓蚀剂不仅对高强度铝合金、铜和高强度钢等多种金属的腐蚀有良好的抑制作用,也可以减少高强度钢和高强度铝合金在水溶液中的裂纹扩展速率^[21-22]。为了提高舰载机的腐蚀防护能力,国外在这方面开展了大量卓有成效的研究,不断总结经验教训,出版了缓蚀剂相关军用标准,如美国海军的 NAVAIR 01-1A-509 技术手册《飞机武器系统的清洗及腐蚀控制》是美国陆海空三军通用文件,其中规定了几种水置换型缓蚀剂在易腐蚀区或涂层损伤区的使用方法。

2001 年,Trzaskoma-Paulette 和 Lambrakos 开始对飞机用高强度铝合金的 CPCs 进行了较多的研究。这些实验结果为 CPCs 在铝合金和钢结构件中的应用提供了依据。美国海航发展中心重点研究了 CPCs 对海洋环境下,飞机结构材料的应力腐蚀和腐蚀疲劳性能的影响,据报道,DNBM 配方使在潮湿空气中高强度钢 4340 的腐蚀疲劳裂纹扩展速率降低至原速率的 1/5。随着 CPCs 在易腐蚀搭接部位的使用,CPCs 对搭接件疲劳失效机理的影响、对搭接件疲劳寿命的影响和对搭接件裂纹扩展影响的问题逐渐显现出来,成为当前亟待解决的问题^[23-25]。

澳大利亚航空实验室(ARL)针对缓蚀剂,对机体结构材料在各种环境下的耐腐蚀能力和使用寿命,作了大量的室内实验和外场应用研究,分析了 6 种常用牌号的缓蚀剂对铝合金 7075-T651 和 2024-T6 的缓蚀效果。结果表明,在氯化钠溶液中无论是在试样浸入前使用缓蚀剂,还是浸入后加入缓蚀剂都具有一定的缓蚀效果,特别是某些缓蚀剂对抑制铝合金的裂纹扩展也有效果。英国海军飞机发动机清洗后,采用 Ardrex3961 和 Ardrex 3140/3302(Ardrex3961 用于短期防腐蚀,Ardrex 3140/3302 用于长期防腐蚀)缓蚀剂作为发动机清洗后的防腐蚀措施。

Shankar K 等^[26]研究了 CPCs 对试验件疲劳性能的影响,主要针对的是飞机简单的搭接结构,缺少 CPCs 对疲劳裂纹扩展过程影响的研究。Lee EU 和 Wahab MA 等研究认为,CPCs 对搭接件的疲劳寿命有着不利的影响。CPCs 使疲劳寿命减少的主要原因是 CPCs 的润滑性减小了接触面的摩擦力,从而改变了搭接处的载荷传递路径。Shankar K 指出,CPCs 导致搭接件的疲劳寿命降低并不是因为摩擦力减少产生的影响,而是在载荷转移过程中摩擦的作用微乎其微,可能是由于 CPCs 的使用影响了裂纹闭合,进而减少了疲劳寿命;而另外一些研究表明,使用 CPCs 对疲劳寿命略有增加。CPCs 对搭接件疲劳寿命的影响程度目前仍存在很大争议。M. A. Wahab 研究认为,这可能和应力水平、应力比以及试验频率等很多因素有关。Craig Purry 等在研究 CPCs 对 CT 试验件单边缺口裂纹扩展影响的同时,考察了其对疲劳裂纹扩展寿命的影响。另外,外场维护中力矩扳手施加不同的螺栓预紧力,对接触面的摩擦力有很大影响,同时 CPCs 的使用对搭接接触面起润滑作用,又减少了摩擦力;所以,不同的螺栓预紧力和 CPCs 的使用组合,对疲劳寿命的影响也是应该考察的一个重点。

我国对 CPCs 在飞机金属结构中的应用研究起步较晚。目前,北京航空材料研究院在飞机表面水清洗剂和缓蚀剂等方面,开展了大量的研究工作。张晓云和李斌等采用电化学筛选、半浸腐蚀试验和全浸试验等方法,筛选出了用于飞机表面防腐蚀的用品,能有效地抑制钢和铝等金属的腐蚀。目前,国内对 CPCs 抑制铝及其合金的腐蚀已经做了大量工作,主要集中在对防腐蚀用品种类及减缓腐蚀或者预防腐蚀机理的研究上。国内有关 CPCs 对搭接件的疲劳失效机理及裂纹扩展行为基础性的研究报道甚少。美国海军航空兵等部门已经开展了大量的相关研究;但是由于技术保密的原因,真正涉及使用 CPCs 对军

用飞机结构性能产生影响方面的内容很少见诸报道。

综上所述,国外对 CPCs 在飞机结构上的应用研究起步较早,且已经进行了 CPCs 对简单的搭接试验件疲劳寿命影响的相关研究;但是,很少考虑 CPCs 对搭接件紧固孔处裂纹扩展的影响。国内有关 CPCs 对搭接件疲劳失效机理、疲劳寿命及裂纹扩展力学行为的研究很少,无论是理论还是实践,都需要开展进一步的相关研究。

4 结语

腐蚀防护是一项与大自然作斗争的长期而艰苦的工作,还需要不断探索、积累和总结。随着我国海洋活动的日益增多,研究腐蚀和疲劳的交互作用对飞机结构的影响也愈显重要。腐蚀防护与控制要贯穿设计、制造、生产和使用的全生命周期。除了要加强腐蚀与疲劳交互作用理论和试验研究之外,更为重要的是,要考虑外场维护(防腐蚀用品的使用)在载荷作用下对疲劳寿命及裂纹扩展的影响,让现有的研究成果在实际中得以应用,为进一步考虑环境(腐蚀)、载荷(疲劳)和维护(CPCs 的使用)三者交互或者交替作用对飞机结构性能的影响打下基础,更为符合海军飞机服役状况,为维护周期、腐蚀防护和外场修理方法的制订提供指导。

参考文献

- [1] 陈跃良,张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. 航空工程进展,2010(4):311-316.
- [2] 卞贵学,陈跃良,张丹峰. 基于 IDS 的铝合金预腐蚀疲劳寿命研究[J]. 航空学报,2008,29(6):1526-1530.
- [3] 张晓云,李斌,熊家锦. 用电化学极化方法研究缓蚀剂对高强度钢氢脆性能的影响[J]. 腐蚀与防护,2000(2):67-69.
- [4] 陈跃良. 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] 张大全,高立新,周国定. 国内外缓蚀剂研究开发与展望[J]. 腐蚀与防护,2009,30(9):604-610.
- [6] 陈群志,房振乾,康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程,2011,8(2):72-78.
- [7] 陈跃良,卞贵学,郁大照. 腐蚀环境下飞机结构全寿命模型研究[J]. 机械强度,2012,34(1):37-143.
- [8] 张勇,张虹,陈跃良. 微弧氧化技术在航空领域的应用及存在问题[J]. 材料保护,2008,41(9):43-48.
- [9] 陈跃良,段成美,吕国志. 军用飞机日历寿命预测技术研究现状及关键技术[J]. 中国工程科学,2002,4(4):69-74.
- [10] 张丹峰,谭晓明,陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲劳研究现状[J]. 装备环境工程,2009,6(2):5-10.
- [11] 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.
- [12] 穆志韬,谭晓明,刘治国. 海军现役飞机的腐蚀损伤失效分析及腐蚀防护[J]. 装备环境工程,2009,6(1):43-49.
- [13] Liao M, Bellinger N C, Komorowski J P, et al. Corrosion fatigue prediction using holistic life assessment methodology[C]. Stockholm: Cradleg Heath Emas., 2002.
- [14] Liao M, Renaud G, Bellinger N. Probabilistic modeling of short-crack growth in airframe aluminum alloys[J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(4):1105-1111.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李玉海,刘文琰. 腐蚀条件下飞机结构疲劳寿命评定技术研究[J]. 飞机设计, 2002(4):1-10.
- [18] 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论研究与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.
- [19] 张丹峰,陈跃良. 海洋环境下飞机结构疲劳性能退化规律研究[J]. 强度与环境, 2009, 36(5):39-42.
- [20] 穆志韬. 海军飞机结构腐蚀损伤规律研究及使用寿命研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2001.
- [21] 崔美红,牟宗刚. 缓蚀剂的研究进展[J]. 山东化工, 2011, 40(4):40-43.
- [22] 李斌,张晓云,汤智慧. 飞机表面清洗剂配方研制过程中的快速试验方法探讨[J]. 洗净技术, 2003(2):31-36.
- [23] Jaya I, Tiong U, Mohammed R, et al. Corrosion treatments and the fatigue of aerospace structural joints[J]. Procedia Engineering, 2010(2):1523-1529.
- [24] Boni L, Lanciotti A. Fatigue behaviour of double lap riveted joints assembled with without interlay sealant[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2010, 34:60-71.
- [25] Jones R, Krishnapillai M, Cairns K. et al. Application of infrared thermography to study crack growth and fatigue life extension procedures[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2010, 33(12):871-884.
- [26] Purry C, Fien A, Shankar K. The effect of corrosion preventative compound on fatigue crack growth properties of 2024-T351 aluminium alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25:1175-1180.

* 国家自然科学基金资助项目(50675221, 51075394)
航空科学基金资助项目(2008ZH8501)

作者简介:张勇(1981-),男,讲师,硕士,主要从事飞机结构腐蚀防护与控制等方面的研究。

通信作者:张勇

收稿日期:2013-10-22

责任编辑 吕菁