海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制

孙志华，汤智慧，李斌
（中航工业北京航空材料研究院，北京 100095）

摘　要：从结构设计、材料筛选、表面处理、有机防护体系、防锈剂的应用、维护/维修、人员培训等方面，分析了国外海洋服役飞机的腐蚀防护与控制的发展状况。从腐蚀与防护系统工程的角度，提出了我国海洋服役飞机全面腐蚀控制的发展建议，主要包括加强细节的密封防水设计、应用先进高性能防护技术、加强维护/维修中技术与产品的研发和应用等几个方面。最终建立起海洋服役飞机表面防护研究体系，保证了海洋服役飞机的研制、生产和使用的顺利进行，全面提高了海洋服役飞机的使用寿命。

关键词：海军飞机；腐蚀防护与控制；密封设计；防护技术；维护/维修
DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.006
中图分类号：TG174　　　**文献标识码**：A
文章编号：1672-9242(2014)06-0035-05

Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft

SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin
(AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The development in corrosion prevention and control of abroad naval aircraft was comprehensively analyzed from the aspects of structure design, material selection, surface treatment, organic protective system, rust inhibitor application, maintenance/repair, personnel training, etc. From the view of corrosion and protection system engineering, the development research directions of overall corrosion control of our aircraft serviced in marine environment was put forward, including sealing and waterproof design, applying advanced high-performance protective technology, enhancing the application and development of maintenance/repair techniques and products. Finally, a surface protection research system for naval aircraft can be established, to ensure the development, production and usage of naval aircraft, and then improve the service lifetime.

KEY WORDS: naval aircraft; corrosion prevention and control; sealing design; protective technology; maintenance/repair products

与内陆大气环境相比，海洋大气潮湿，盐雾重，海面风浪大，远洋航行温差大，这些直接影响海洋服

收稿日期：2014-09-03；修订日期：2014-10-26
Received：2014-09-03；**Revised**：2014-10-26

作者简介：孙志华(1969—)，女，河北人，博士，研究员，主要研究方向为飞机环境适应性研究与寿命评价、铝合金防护技术等。

Biography: SUN Zhi-hua(1969—), Male, from Hebei, Ph. D., Researcher, Research focus: aircraft environmental adaptability research and service life evaluation, aluminum alloy protection technology.

役飞机操稳性能。飞机的服役环境恶劣,受到海浪冲刷、盐雾腐蚀、霉菌腐蚀、高温辐射、高温水蒸气等的环境作用,会造成金属件腐蚀、非金属件老化、油液易污染变质等[1—3]。这些问题的出现,轻者增加维修工作的难度和工作量,重者则危及飞行安全。据资料[4]统计美国 1994 年至 2004 年的 10 年间,每年约 1 亿平均维修工时用于解决腐蚀及腐蚀检查工作。平均 7.6 维修小时/飞行小时,占整个检查维修时间的 36%;引发安全事故 224 件,涉及飞机 227 架,经济损失达 10 亿美元/年。美国各型舰载机因腐蚀造成多次故障发生,如 F-18 主起落架失效、F-14 发动机安装支座裂纹、P-3 腐蚀和疲劳裂纹、EA-6B 起落架腐蚀等。亚丁湾护航任务是我国海军迄今为止深入海洋最远、时间最久的任务,多种直升机在此任务中暴露出了严重的腐蚀问题[5],飞机不得不提前进入大修,因腐蚀所带来的经济损失达上千万。对于经常处于湿热海洋腐蚀环境中的飞机,腐蚀问题成为决定其寿命、保证技战术水平的关键因素。

文中从结构设计、材料筛选、表面处理、有机防护体系、防锈剂的应用、维护/维修、人员培训等方面,分析了国外海洋服役飞机的腐蚀防护与控制的发展状况,从腐蚀与防护系统工程的角度,提出了我国海洋服役飞机全面腐蚀控制的发展司思路和建议。

1 国外海洋环境服役飞机腐蚀控制技术发展现状

英、美等国空军、海军从第三代战斗机开始,改变了以往以修理为主的被动应对飞机腐蚀问题的观念,将飞机腐蚀控制研究发展为防护系统工程学,内容涵盖合理设计、正确选材、精心装配施工、先进的综合防护体系、科学的腐蚀评价和检测方法、有效的腐蚀维护与修理技术以及对相关人员进行多方位培训等,在飞机方案论证、设计、选材、制造、维护的全寿命期内贯彻和体现积极的腐蚀预防与控制理念,形成系统的防腐蚀技术体系[6]。针对长期在海洋湿热环境下服役的飞机,国外在腐蚀控制技术领域的研究成果主要体现在以下几个方面。

1.1 合理的结构设计

在结构设计中注意密封和选用合适密封剂,增加贴合面密封,采用聚硫密封剂做贴合面密封作为加强防护(如图 1 所示),以及采用湿装配[7](如图 2 所示)。避免雨水或清洗水从缝隙、沟槽、搭接部位流入或渗入机内;注重通风(设计通风口盖、通气孔)和排水(设计排水孔及排水螺栓),使污水、积水尽快排除,防止潮气滞留机内,侵蚀结构和设备;在结构中不允许有电偶腐蚀倾向的金属或镀层或复合材料之间相互接触。折叠机翼的折翻机构在结构设计时尽可能简单,易于折翻,同时考虑到应力腐蚀控制,所有转角均应圆滑过渡。折翻机构由锻件加工而成,应合理选择锻件分模面,减少或消除流线末端外露,使主应力、流线方向和分模面匹配,提高锻件的抗应力腐蚀能力和承载能力。

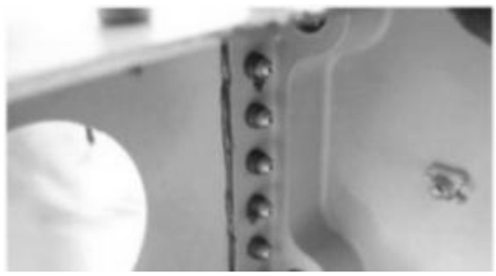

图 1 贴合面密封

Fig. 1 Faying surface sealing

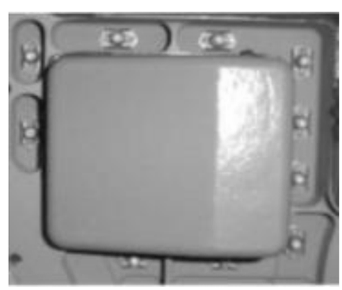

图 2 采用湿装配

Fig. 2 Wet installation of fasteners

1.2 发展综合性能优良的耐蚀材料

采用全面综合(强度、断裂韧性、耐腐蚀性、经济性等)的选材原则[8],尤其是在满足战术技术性能的前提下,尽可能选用耐蚀材料。从设计、选材等角度即把腐蚀控制技术纳入飞机结构耐久性设计中。建立分级的腐蚀性能评估方法供设计选材使用,重要结构材料都有比较全面的腐蚀性能数据,如高强度材料,英、美等国具有比较完备的应力腐蚀强度门槛值体系。

1.3　新型表面处理技术

基本所有的航空金属制件都要采用镀层、覆盖层或沉积层,以提高材料制件的耐蚀性,以及达到耐磨、导电、减摩、隔热、装饰等目的。近年来,在传统的技术基础上,飞机表面处理技术的发展方向主要是提高材料综合防护性能及适应环保需求。如替代钢结构件、紧固件镀镉和钛合金阳极化的离子镀铝技术、替代高强度钢松孔镀镉的电镀锌-镍合金工艺,替代电镀硬铬的高速火焰喷涂技术[9]、替代六价铬的铝合金化学转化膜工艺、替代铬酸阳极化的硼酸-硫酸阳极化工艺[10]等。

1.4　新型防护涂层体系

现代海军飞机蒙皮涂层体系多数为双层防护体系,即底漆采用结合力和耐蚀性能良好的环氧聚酰胺涂层,面漆使用耐候性、耐化学介质及耐久性较好的脂肪族聚氨酯涂层。近年来,欧、美海军发展的飞机防护涂层主要向环保型、柔韧型、单层体系、多功能等方向发展,如发展高性能水基环氧底漆、聚氨酯弹性底漆、无毒缓蚀底漆、自底漆面漆、抗雨蚀涂层等。

1.5　脱水防锈剂的应用

美海军航空工程部门研究表明,海军飞机的大部分腐蚀是从结构连接处开始的,因此在飞机装配后,将脱水防锈剂喷洒在易于凝露的区域,尤其是结构连接处。由于脱水防锈剂具有较强的渗透性,可以进入极小的缝隙和孔内,溶剂挥发后将结构表面的水分和盐分置换出来,并覆盖一层具有防腐蚀作用的膜层[11]。美海军于 1997 年和 2000 年分别对部署在波斯湾某航母上的 7 架 ES-3A 型反潜机和大西洋舰队、太平洋舰队的几十架 S-3B 型反潜机使用了 ACF-50 脱水防锈剂(如图 3 所示),飞机腐蚀率大大降低。

图 3　喷涂防锈剂

Fig. 3 Spraying water displacing rust inhibitor

1.6　先进的腐蚀维护修理新技术

飞机飞行和停放过程中易沉积腐蚀性介质,加速腐蚀过程。针对这些问题,国外将飞机的清洗、缓蚀、去湿、腐蚀修复等作为使用维护过程中控制腐蚀发生发展的关键技术。广泛采用飞机专用清洗剂[12](如图 4 所示)、脱水防锈剂、去湿防腐剂。在维护中采用多种腐蚀修复技术,如铝合金阿洛丁(Alodine)化学氧化;镁合金铬酸盐化学氧化;碳钢磷化等。近年来,飞机腐蚀修复技术主要有如下几个方面发展:高速火焰喷涂(HVOF)代铬技术、电刷镀技术和电刷阳极化技术对零件的损伤镀层进行原位修理,有效降低维修费用,缩短装备停用时间。如低氢脆刷镀镉用于飞机起落架镀镉零部件修理。美海军正在进行电刷镀锌-镍和锌-钴技术以及电刷硫酸阳极化、铬酸阳极化、硼酸-硫酸阳极化等技术的研究。

图 4　飞机的定期清洗

Fig. 4 Regular cleaning of aircraft with cleaners

1.7　针对机载电子设备的腐蚀控制技术

针对机载电子设备腐蚀问题,美海航指挥系统制订了机载电子设备腐蚀预防及控制计划,采用注射成形增强聚合材料制作电子设备罩和箱体材料,替代不锈钢和石墨复合材料、金属基复合材料,避免接触腐蚀。以硅烷偶联剂为主要成分的热固型凝胶和热塑型凝胶用于电子元器件和壳体表面防护,隔绝湿气和腐蚀性介质的侵入,同时可避免电镀工艺对环境的污染。研制机载电子设备专用清洗剂、腐蚀缓蚀剂及相应的设备和方法,有效清除污染物及腐蚀产物,确保电子设备的固有性能。应用 3M 氧化剂吸收纸有效吸收环境中 H_2S, SO_2, NO_2, O_3, HCl, Cl_2 等腐蚀性介质,保障电子产品的

存贮稳定性。

1.8 飞机材料及防护体系腐蚀监检测、环境适应性评价及日历寿命评定

随着新型结构材料在海军航空装备上的大量应用,飞机腐蚀控制工作也面临极大挑战。新材料从研制到服役,周期较短。在材料实际应用前,不可能进行大范围的飞行考核或长期的环境暴露试验。因此,必须建立具有良好模拟性、加速性、相关性的试验室加速试验方法,科学地评价新材料、结构件及防护体系的耐蚀性能,进行整机环境适应性评价和日历寿命的研究。美军在佛罗里达州暴晒场进行了大量的材料、构件的户外暴露试验,如图 5 所示。美军标 MIL-STD-810F 规定了环境试验的通用要求及 20 多个试验方法[13],使试验质量和可靠性得到极大提高,并且发展出质量更高、用途更广的试验设备。如综合了多种环境因素的多因子循环复合腐蚀试验机,使环境试验从对现象的模拟向对本质规律的模拟发展。此外,发展飞机腐蚀损伤及腐蚀环境的原位监测技术,一方面搜集宏观环境数据,另一方面通过原位检测飞机的腐蚀损伤及其主要影响因素。综合两方面信息对飞机腐蚀损伤进行预测和评估,将以往的“发现腐蚀-进行修复”的模式转变为“预测腐蚀-进行管理”的模式,根据预测结果决定飞机维护和管理策略。

图 5 ATLAS 佛罗里达州暴晒场

Fig. 5 Atlas Exposure station in Florida

1.9 注重飞机腐蚀数据积累及相关人员的技术培训

20 世纪 90 年代,美国海军航空培训部门开发了用于指导海军飞机维护人员进行腐蚀控制技术培训的计算机辅助训练软件(Computer-based training for corrosion control,简称 CBT)。CBT 软件在 Windows 系统下运行,综合了文字、动画、声音、图形等多媒体形式,训练课程包括腐蚀控制基础、机载设备的腐蚀控制、涂镀层、腐蚀产物去除及表面处理、紧急情况的处理、海军飞机的防护、材料的毒性等,与普通的课堂教学比较,多媒体软件教学所需时间短、信息量大、培训效果好。

2 海洋服役飞机全面腐蚀控制研究总体思路及建议

2.1 海洋服役飞机全面腐蚀控制研究总体思路

海洋服役飞机的腐蚀与防护是一个系统工程,贯穿设计、研制、生产、使用全过程,完善顶层管理,以指导海洋服役飞机全面腐蚀控制的研究,确保腐蚀控制系统工程的全面贯彻执行质量保证。加强结构设计,使海洋服役飞机的结构设计更适应海洋服役环境的需要,提高整机的防腐蚀能力。根据海洋服役的结构设计和选材需求,进行材料研制、腐蚀性能检测与评价和表面防护技术研究。加强使用中的维护/维修,共同开展生产过程、使用过程中的腐蚀控制技术和维修维护技术研究与应用。最终建立起海洋服役飞机表面防护研究体系,保证海洋服役飞机的研制、生产和使用的顺利进行,全面提高海洋服役飞机的使用寿命。

2.2 海洋服役飞机全面腐蚀控制研究重点发展方向及建议

1)建立完善的顶层管理制度。应成立腐蚀防护与控制办公室或腐蚀防护联合攻关团队,确立责任制,完善机制管理,制定控制文件,建立飞机腐蚀控制管理体系、完善的飞机腐蚀控制文件体系以及飞机腐蚀控制人员培训系统。由设计所、应用研究单位、生产厂以及使用单位相关人员共同组成,随型

号进度解决腐蚀防护难点问题,为机关和腐蚀控制决策提供技术支持。

2) 加强细节密封防水设计。针对不同结构特点,进行细节的密封和防水设计,并采用先进的阻蚀密封材料和密封剂精细密封施工工艺,控制关键部件和结构的服役环境,将海洋环境的影响降低到最小程度。

3) 采用先进表面处理和防护涂层技术。大幅度推进先进的表面处理和防护涂层技术的应用,如高强度钢、钛合金高速火焰喷涂、爆炸喷涂代镀铬技术;离子镀铝、铝涂料替代镀镉用于钢、钛合金零件及紧固件防护;钛合金溶胶-凝胶表面处理提高与漆层及胶粘剂的结合力等。

4) 防锈缓蚀剂的系列化发展及应用。在前期研究硬膜缓蚀剂(如 YTF-1)、软膜缓蚀剂(如 TSN-5)等产品的基础上,发展系列化的防锈缓蚀剂,如使用舰上使用的高闪点硬膜缓蚀剂、软膜缓蚀剂以及电子产品用缓蚀剂等,实现不同部位的补充防护,进一步提高整机的腐蚀防护能力。

5) 应用先进的腐蚀控制维护/维修技术。应重视使用过程中的腐蚀控制,加强维护/维修技术的研发和应用,如定期清洗飞机和发动机,及时清除表面的盐分和油污等。并发展和应用快速的维护/维修技术,以控制腐蚀的发生和发展,及时进行修理,减少维修成本比,避免重大的安全事故的发生,保障战斗力和使用寿命。

3　结语

腐蚀问题已成为决定海洋环境服役飞机寿命、保证技战术水平的关键因素,其因腐蚀防护与控制是一个系统工程,贯穿设计、研制、生产、使用全过程。文中从结构设计、材料筛选、表面处理、有机防护体系、防锈剂的应用、维护/维修、人员培训等方面,分析了国外海洋服役飞机的腐蚀防护与控制的发展状况。从腐蚀与防护系统工程的角度,提出了我国海洋服役飞机全面腐蚀控制的发展建议,主要包括加强细节的密封防水设计、应用先进高性能防护技术、加强维护/维修中技术与产品的研发和应用等几个方面,最终建立起海洋服役飞机表面防护研究体系,保证海洋服役飞机的研制、生产和使用的顺利进行,全面提高海洋服役飞机的使用寿命。

参考文献:

[1] 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—8.
ZHANG Dan-feng,TAN Xiao-ming,CHEN Yue-liang. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009,6(2):5—8.

[2] 胡建军,陈跃良,卞贵学,等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护,2011,32(11):900—904.
HU Jian-jun,CHEN Yue-liang,BIAN Gui-xue,et al. Corrosion of Aircraft Structure Material in Accelerated Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion and Protection,2011,32(11):900—904.

[3] 陈亚莉. 舰载机材料的特殊要求与选择特点[J]. 国际航空,2011(11):35—38.
CHEN Ya-li. Selecting suitable materials for carrier-based aircraft[J]. International Aviation,2011(11):35—38.

[4] Air Force Corrosion Prevention and Control Office Corrosion Program[R]. AD A568549.

[5] 李玲,苏洪斌,范兴,等. 浅谈舰载机的海水腐蚀问题[J]. 科学时代,2010(11):5—8.
LI Ling,SU Hong-bin,FAN Xing,et al. Seawater Corrosion Problem of Carrier-based Aircraft [J]. Science Times,2010(11):5—8.

[6] MATTHEW K,U S Marine Corps Corrosion Prevention and Control (CPAC) Program Status[R]. AD A508954,2009.

[7] GUILLEMETTE R, LUCHENTA R. Enhanced Corrosion Protection for the H-60 Helicopter[R]. AD A532642, 2009.

[8] MENDOZA R. In Service Corrosion Issues in Sustainment of Naval Aircraft[R]. AD A580875,2012.

[9] BROWN A S,ELIZABETH B. Cadmium Alternatives for High-Strength Steel[R]. AD A575286,2011.

[10] HANDSY I C,DAN N,SCOTT P. Replacement for Cadmium Plating and Hexavalent Chromium on Fasteners and Electrical Connectors[R]. AD A532612,2010.

[11] 李斌,张晓云,汤智慧,等. 飞机硬膜脱水防锈剂 YTF-1 的研制[J]. 材料工程,2000(10):33—35.
LI Bin,ZHANG Xiao-yun,TANG Zhi-hui,et al. Development of a Hard Film YTF-1 with Displacing Corrosion Preventive Properties for Aircraft[J]. Journal of Materials Engineering,2000(10):33—35.

[12] 李斌,张晓云,汤智慧,等. 飞机表面水基清洗剂对金属材料腐蚀及氢脆性能影响研究[J]. 材料工程,2007(6):55—60.

(下转第 123 页)

铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2010,30(2):93—96.
ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, MA Li, et al. Alumilum Pitting Corrosion Damage Rule under Service Environment[J]. Journal of Chinese society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2):93—96.

[2] 穆志涛,熊玉平. 飞机结构主体材料腐蚀损伤特点分析[J]. 材料保护,2001,34(12):203—208.
MU Zhi-tao, XIONG Yu-ping. Analysis of Corrosion Damage Characteristics for Principal Parts of Aircraft Structure [J]. Materials Protection, 2001, 34(12):203—208.

[3] 刘文珽,李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Precision Measurement Methods for the Calendar Life of Aircraft Structure System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[4] 李久青,杜翠薇. 腐蚀试验方法及监测技术[M]. 北京:中国石化出版社,2007.
LI Jiu-qing, DU Cui-wei. Measurement Methods and Monitoring Techniques for Corrosion Tests[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.

[5] 刘贵民,马丽丽. 无损检测技术[M]. 第 2 版. 北京:国防工业出版社,2010.
LIU Gui-min, MA Li-li. NDT Technology [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defence Industry Press ,2010.

[6] 田慧,栗保明. CR 成像技术在弹道实验中的应用[J]. 电子元器件应用,2009,11(10):47—49.
TIAN Hui, LI Bao-ming. Applications of CR Technology in Ballistic Test[J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 11(10):47—49.

[7] 李艳红,张存林,金万评,等. 碳纤维复合材料的红外热波检测[J]. 激光与红外,2005,35(4):262—264.
LI Yan-hong, ZHANG Cun-lin, JIN Wan-ping, et al. IR Thermalwave Nondestructive Inspection of Carbon Fiber Composite Material[J]. Last & Infrared, 2005, 35(4):262—264.

[8] 王迅,金万评,张存林,等. 红外热波无损检测技术及其进展 [J]. 无损检测,2004,26(10):497—501.
WANG Xun, JIN Wan-ping, ZHANG Cun-lin, et al. Actuality and Evolvement of Infrared Thermal Wave Nondestructive Imaging Technology [J]. NDT, 2004, 26(10):497—501.

[9] MARINETTI S, VAVILOV V. IR Thermographic Detection and Characterization of Hidden Corrosion in Metals: General Analysis[J]. Corrosion Science, 2010, 52:865—872.

[10] LI Yan-hong, Study on Pulsed Phase Analysis of Depth Measurement for Infrared Thermal Wave Nondestructive Evaluation[C]//Photonics Asia 2007 Conference and Exhibition. Proceeding of the SPIE 2008, 2008.

[11] ZHANG Yan, FENG Li-chun, LI Yan-hong, et al. Pulsed Phase Thermography for Defect Detection of Honeycomb Structure[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2009.

[12] CHEN Da-peng, ZHANG Cun-lin, ZENG Zhi, et al. Active Infrared Thermal Imaging Technology to Detect the Corrosion Defects in Aircraft Cargo Door[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2009.

[13] TAKAHIDE S, SHIRO K. Applications of Pulse Heating Ther-mography and Lock-in Thermography to Quantitative Nondestructive Evaluations[J]. Infrared Physics & Technology, 2002(43):211—218.

[14] EVA B, VASCO P. de F. Evaluation of Building Materials Using Infrared Thermography[J]. Construction and Building Materials, 2007(21):218—224.

[15] WANG Xun. Pulse-echo Thermal Wave Imaging of Metals and Composite[D]. Detroit: Wayne State Univ, 2001.

[16] 金国锋,张炜,杨正伟,等. 涂层下金属腐蚀损伤的红外热波检测与评估[J]. 腐蚀科学与防护技术,2013,25(1):58—62.
JIN Guo-feng, ZHANG Wei, YANG Zheng-wei, et al. Detection and Evaluation of Corrosion Damage under Coating by Infrared Thermal Wave Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(1):58—62.

(上接第 39 页)

LI Bin, ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, et al. Effect of Water-based Cleaning Compound for Aircraft Exterior Surface on Metals Corrosion and Hydrogen Embrittlement [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(6):55—60.

[13] ROBERT N M, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coating in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(4):17—21.