

海军飞机结构腐蚀控制 及强度评估

HAIJUN FEIJI JIEGOU FUSHI KONGZHI
JI QIANGDU PINGGU

陈跃良◎等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到国家自然科学基金(50675221)、总装“十一
项目(51327030104)和航空科学基金(2008ZH85001)资助

海军飞机结构腐蚀控制 及强度评估

陈跃良 金 平 林典雄 著
郁大照 卞贵学 张 勇

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

海军飞机结构腐蚀控制及强度评估 / 陈跃良等著.

—北京:国防工业出版社,2009.12

ISBN 978-7-118-06675-3

I. ①海… II. ①陈… III. ①海军飞机-防腐-结构设计 ②海军飞机-防腐-强度-评估 IV. ①V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 036401 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 250 千字

2009 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

腐蚀对飞机结构完整性的影响越来越受到重视,飞机结构腐蚀与控制的重要意义已被广大航空技术人员和管理人员所认识。飞机结构腐蚀控制与强度评估是保证飞行安全的前提之一。

本书在对飞机结构主体材料腐蚀基本概念和基础理论阐述的基础上,参考国内外大量文献,结合作者及研究小组多年研究成果,系统介绍了沿海环境下使用的军用飞机结构腐蚀的类型、特征、机理、影响因素,重点介绍了海军飞机结构典型腐蚀损伤形态,腐蚀环境谱的编制方法,点蚀、多处损伤、枕垫效应等对飞机结构强度的影响分析;提出了针对铝合金构件的基于初始不连续状态的飞机结构全寿命工程评估方法;较为系统地分析了外场飞机结构腐蚀预防方法;简要介绍了本研究小组近 10 年来,将微弧氧化技术应用到飞机结构铝、镁合金腐蚀控制的研究结论。

本书具有以下特点:将腐蚀控制与强度评估有机结合起来,对飞机结构完整性、耐久性分析具有较好的参考作用;对飞机腐蚀控制具有一定的指导作用。

参加本书编写的人员有海军航空工程学院青岛分院的陈跃良(第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 11 章)、金平(第 1 章、第 9 章、第 10 章)、郁大照(第 5 章、第 6 章)、卞贵学(第 7 章)、张勇(第 11 章),海军航空工程应用所林典雄(第 8 章、第 10 章)。全书由陈跃良负责统稿。

本书在编著过程中得到了海军飞机与发动机寿命可靠性研究

中心诸多人员的大力协助,特别是得到了该中心结构腐蚀疲劳专家段成美教授、西北工业大学吕国志教授的指导和帮助;出版工作得到了国家自然科学基金(50675221)、总装“十一五”预研项目(51327030104)、航空科学基金(2008ZH85001)的支持,在此表示诚挚的感谢!本书的完成,是本研究小组全体人员,包括毕业的研究生共同努力的结果,由于篇幅有限,具体人员不再一一列出,在此深表谢意。还要指出的是,本书的出版得到了国防工业出版社的大力支持,我们在此也表示衷心的感谢。书中的许多资料来自国内外文献及已出版的各种手册,在此对这些作者一并致谢。

由于编著者业务水平和工作经验所限,书中存在的疏漏和不足之处,热忱希望广大读者、同行惠予指正。

编 者
2009 年 11 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 海军飞机易腐蚀的部位、材料和主要腐蚀类型	1
1.1.1 海军飞机腐蚀的一般规律	1
1.1.2 海军飞机易腐蚀的部位和结构形式	2
1.1.3 海军飞机易受腐蚀的材料	3
1.1.4 主要的腐蚀类型	3
1.2 腐蚀的一般机理及影响因素	14
1.2.1 腐蚀的定义	14
1.2.2 腐蚀的一般机理	15
1.2.3 腐蚀的影响因素	16
1.3 研究海军飞机结构腐蚀控制与防护的重要性	18
1.4 飞机腐蚀防护与控制及发展趋势	20
第 2 章 海军飞机的使用环境谱	22
2.1 地面停放环境谱的编制	22
2.1.1 选取环境要素	22
2.1.2 建立环境数据库	23
2.1.3 环境要素的筛选	23
2.1.4 编制地面停放环境谱	25
2.2 典型结构地面局部环境谱的编制	27
2.2.1 局部环境谱的定义	27
2.2.2 局部环境谱的编制	28
2.3 空中飞行环境谱的编制	30

2.3.1	空中腐蚀环境要素随高度变化规律	30
2.3.2	飞行中飞机结构的热环境	32
2.3.3	空中飞行环境谱	33
2.4	停放—飞行—停放环境谱和载荷/环境谱	33
2.4.1	停—飞—停环境谱	34
2.4.2	载荷/环境谱	34
第3章	海军飞机结构腐蚀检测与监控	37
3.1	飞机结构腐蚀的重点检查部位	37
3.2	腐蚀的检查方法	40
3.2.1	基本检测方法	40
3.2.2	无损检测方法	44
3.3	腐蚀的 NDI 能力评估	48
3.3.1	腐蚀度量	48
3.3.2	腐蚀试样的选择和设计	49
3.4	海军飞机结构腐蚀数据库	49
3.4.1	腐蚀数据库的建立	49
3.4.2	监控网络的建立与管理	53
第4章	含蚀孔损伤飞机结构剩余强度分析	55
4.1	含蚀孔飞机结构腐蚀容限分析方法	55
4.1.1	腐蚀容限定义	55
4.1.2	静强度腐蚀容限	56
4.1.3	疲劳寿命要求对应的腐蚀损伤容限	58
4.1.4	机翼前梁腐蚀损伤容限	60
4.2	含多蚀孔飞机机翼前梁结构剩余强度分析	60
4.2.1	计算模型与方法	60
4.2.2	不同蚀孔位置对梁剩余强度的影响	63
4.2.3	蚀孔间距对梁剩余强度的影响	66
4.2.4	蚀孔的不同排列顺序对梁剩余强度的影响	67
4.2.5	多孔蚀对飞机结构剩余强度的影响规律	71

4.3	含蚀孔飞机蒙皮搭接件结构应力变化分析	71
4.3.1	有限元计算模型	71
4.3.2	计算结果分析	72
4.3.3	含半球形蚀孔分析	74
4.3.4	含椭球形蚀孔分析	75
4.3.5	蚀孔对飞机搭接结构完整性影响分析	76
4.4	蚀孔损伤飞机结构强度评估结论	77
第5章	含多处损伤飞机结构应力强度因子有限元分析	78
5.1	MSD 对飞机结构完整性的影响	78
5.2	多裂纹应力强度因子的研究方法	80
5.3	单加筋平板结构有限元分析	82
5.3.1	结构模型	82
5.3.2	有限元模型与网格的划分	83
5.3.3	材料属性	84
5.3.4	最佳组合的确定	85
5.4	含 MSD 双筋条加筋板结构有限元分析	87
5.4.1	研究对象与有限元模型	87
5.4.2	算法的有效性	90
5.4.3	平板 MSD 裂纹对 SIF 的影响	91
5.4.4	腐蚀对 SIF 的影响	92
5.4.5	铆钉与孔间干涉配合对 SIF 的影响	93
5.4.6	铆钉材料和直径对 SIF 的影响	94
5.4.7	筋条刚度及其 MSD 对平板裂纹 SIF 的影响	95
5.5	基于 SIF 数值结果的三筋条加筋板剩余强度计算	96
5.6	含 MSD 搭接件结构有限元分析	98
5.6.1	结构模型	98
5.6.2	有限元模型与网格划分	99
5.6.3	计算结果与分析	99
5.6.4	基于力学的 MSD 裂纹检测方法	103

5.6.5 基于 SIF 数值结果的含 MSD 搭接结构剩余 强度计算	104
5.7 MSD 对飞机结构应力强度因子的影响分析	105
第 6 章 枕垫效应对飞机腐蚀搭接件完整性的影响	107
6.1 搭接件腐蚀机理分析	108
6.2 枕垫效应数学模型	110
6.2.1 基本假设	110
6.2.2 数学模型的推导	110
6.3 有限元模型	111
6.3.1 有限元模型尺寸的确定	111
6.3.2 有限元模型枕垫应力的确定	113
6.4 多铆钉搭接件枕垫应力分析	114
6.4.1 结构模型与研究对象	114
6.4.2 有限元模型与网格的划分	114
6.4.3 应力强度因子的计算	115
6.4.4 计算结果与分析	116
6.5 搭接件枕垫应力算例分析	122
6.6 枕垫效应对搭接件完整性影响分析	125
第 7 章 飞机腐蚀结构疲劳全寿命工程评估	127
7.1 初始不连续状态	130
7.1.1 初始不连续状态的计算	131
7.1.2 初始不连续状态分布规律	133
7.2 飞机腐蚀结构全寿命评估	134
7.2.1 点蚀模型	136
7.2.2 缝隙腐蚀模型	144
7.2.3 剥蚀模型	146
7.3 全寿命工程评估主要结论	149
第 8 章 海军飞机结构腐蚀与防护	150
8.1 海军飞机结构腐蚀防护选择原则	150

8.2	防护体系	151
8.2.1	金属材料件防护体系	151
8.2.2	非金属材料件防护体系	163
8.2.3	舰载飞机防护体系	168
8.3	其他表面改性技术的选用	181
8.3.1	喷丸强化	181
8.3.2	孔挤压强化	182
8.3.3	激光表面淬火	182
8.3.4	表面扩散渗入	183
8.3.5	离子注入	184
8.3.6	微弧氧化表面处理	185
8.4	飞机防腐蚀涂料的要求和主要品种	185
8.4.1	飞机防腐蚀涂料的要求	185
8.4.2	军用飞机防腐蚀涂料的主要品种	187
8.5	飞机整机涂装	188
8.5.1	铝合金表面的阳极化处理	188
8.5.2	头道底漆的喷涂	189
8.5.3	中间底漆的喷涂	189
8.5.4	面漆的喷涂	191
第9章	海军飞机结构腐蚀修理	192
9.1	腐蚀修复的原则与要求	192
9.1.1	飞机腐蚀损伤修复的要求	192
9.1.2	腐蚀损伤修复准则和要求	192
9.1.3	飞机腐蚀损伤分类	193
9.1.4	飞机腐蚀损伤修复设计	193
9.2	腐蚀修复的一般工作程序	194
9.2.1	腐蚀区域修复前的准备	194
9.2.2	清洁被处理区域	195
9.2.3	估计腐蚀损坏状况	195
9.2.4	机械法和化学法去除腐蚀产物	195

9.2.5	修整区域的光顺和融合	201
9.2.6	修整测量	202
9.2.7	确定损伤是否彻底清除	202
9.2.8	喷丸强化和冷加工紧固件孔	202
9.2.9	制件表面抛光、清洁并干燥	204
9.2.10	恢复原有表面涂镀层	204
9.3	金属结构腐蚀修理技术	206
9.3.1	去除飞机金属结构腐蚀产物	206
9.3.2	可修理损伤的补强修理	209
9.3.3	结构腐蚀损伤的修理设计	214
9.4	复合材料结构腐蚀修补技术	215
9.4.1	修补分析	215
9.4.2	修理设计	217
9.4.3	修补材料和工艺、设备、环境条件	220
9.4.4	修补验证	221
9.4.5	战伤修理	222
9.5	某型海军飞机结构的腐蚀修复	224
9.5.1	概述	224
9.5.2	腐蚀的检验	225
9.5.3	去腐蚀产物	226
9.5.4	表面修整后无损检测	227
9.5.5	测量腐蚀深度	227
9.5.6	化学氧化处理	227
9.5.7	涂漆	229
第 10 章 预防海军飞机结构腐蚀的外场维护方法		230
10.1	清除飞机结构表面的污染物	230
10.1.1	飞机的冲洗	230
10.1.2	汞(水银)的去除	231
10.1.3	酸、碱的清除	231
10.1.4	燃烧产物的清除	232

10.2	飞机排水、防潮和通风	232
10.3	保持飞机涂层和密封剂的完整	233
10.3.1	保持飞机涂层的完整	233
10.3.2	保持密封剂(胶)的完整	234
10.4	加强润滑	234
10.5	保持飞机结构表面光洁	235
10.6	去除整体油箱中微生物沉积物	235
10.7	涂层的去除及返修与涂敷	237
10.7.1	飞机涂层的去除及返修	237
10.7.2	飞机蒙皮的涂层涂敷	238
第 11 章	微弧氧化技术在飞机结构腐蚀控制中的应用	239
11.1	微弧氧化机理	240
11.2	试件微弧氧化处理	242
11.2.1	微弧氧化设备	242
11.2.2	微弧氧化电解液	243
11.2.3	膜厚测量	243
11.2.4	膜层尺寸变化规律	243
11.3	铝合金试件微弧氧化的耐腐蚀性能	244
11.3.1	中性盐雾腐蚀试验	244
11.3.2	耐腐蚀试验结果与分析	246
11.4	光滑铝合金试件微弧氧化疲劳性能	248
11.4.1	试样尺寸与材料	248
11.4.2	拉伸试验	248
11.4.3	疲劳试验结果	249
11.5	应力集中铝合金试件微弧氧化后疲劳性能	253
11.5.1	试样尺寸与材料	253
11.5.2	试验结果	254
11.6	镁合金试件微弧氧化后的耐蚀性能	254
11.6.1	耐腐蚀试验	254
11.6.2	耐腐蚀试验现象与结果分析	256

11.7 镁合金试件微弧氧化的疲劳性能	259
11.7.1 微弧氧化对 AZ91D 镁合金未腐蚀件疲劳性能的影响	260
11.7.2 微弧氧化对 AZ91D 镁合金预腐蚀疲劳性能的影响	260
参考文献	262

第 1 章 概 述

1.1 海军飞机易腐蚀的部位、材料和主要腐蚀类型

民航飞机飞行强度大,飞行区域范围大,机场停留时间相对较短,一般是进口飞机;空军飞机一般在内陆较多,海军飞机大多在沿海,军用飞机与民用飞机相比腐蚀相对严重。海军飞机比空军飞机腐蚀相对严重。生活中有这样的情况,一辆崭新的自行车,若一直停放在青岛海边,很快就会腐蚀,钢圈会锈得面目全非;同样的地点若是经常使用的自行车,腐蚀就会轻些。

1.1.1 海军飞机腐蚀的一般规律

(1) 沿海使用的飞机腐蚀比内陆的严重,离海岸越近越严重;大气污染严重地区的飞机腐蚀比其他的地区严重;南方沿海的飞机腐蚀比其他沿海地区的严重。例如,某型飞机,南方和东部沿海地区发生严重腐蚀的飞机分别占被检查飞机的 46.7% 和 40.3%,而北方沿海地区的仅有一些老旧飞机发生了腐蚀。

(2) 飞机在多雨水、多盐雾或空气湿度大、温度高的地区腐蚀比较严重。例如,某型飞机,其中两处机场虽然大气污染较严重,但空气比较干燥,飞机表面漆层仅轻微脱落,而另外在某地区(盐雾天气较多的盐碱地区)服役的飞机表面漆层均有程度不同的脱落。

(3) 服役日历年限长的飞机腐蚀比服役时间短的严重。

(4) 连续停放时间长的飞机腐蚀比经常使用和维护的严重。例如,有的×型飞机连续停放时间最长达 8 年之久,腐蚀相当严重,如图 1-1 所示。

(5) 机翼腐蚀比机身、尾翼严重。机翼的腐蚀主要集中在一些主要受力构件上,梁缘条、梁腹板、长桁、对接型材和上/下翼面蒙皮、安

装搭铁的固定支座等发生严重腐蚀,并且起落架舱、油箱舱内的结构件腐蚀最普遍。

(6) 构件下部腐蚀比上部严重。沿海机场相对湿度大,机体下表面离地面比较近,受地面潮气影响大。构件内部积聚的水分一般在下表面,不易蒸发,所以构件下部容易出现缝隙腐蚀,而且比上表面严重。某型水上飞机某部位腐蚀,如图 1-2 所示。

(7) 密封不良,机体内部腐蚀比外部严重。机体内部尤其是日常维护不到的部位,一般通风不良,冷凝水排不出来,因而造成结构腐蚀严重。

(8) 表面防腐层质量差的结构腐蚀较普遍、严重。



图 1-1 某型飞机的某部位腐蚀



图 1-2 某型水上飞机的某部位腐蚀

1.1.2 海军飞机易腐蚀的部位和结构形式

(1) 异种金属接触部位,存在结构缝隙的部位。例如,配重连接部位、钢连接件等,因缺少必要的防护措施或防护不当等导致发生程度不同的腐蚀。

(2) 紧固件和紧固孔周围,不密封或密封质量差的连接结构。例如,铆接结构和螺接结构。

(3) 制造死角、易积水/排水条件差、维护困难的部位。

(4) 装配加工部位、表面防护层质量差/受到损伤的部位。例如,装配钻孔、镗窝、切割/锉修、对接和搭接接缝处的加工端面等,在加工后没有采取相应的防护措施或防护层受到损伤后没有补充施加防护层。

(5) 腐蚀集中的结构部位。

① 机翼——主起落架舱区。

② 机身——减速板舱内、前起落架舱内。

③ 尾翼——蒙皮与配重连接区。

④ 蒙皮外表面防护层(特别是下表面蒙皮)。

⑤ 活动部位(×型飞机襟翼滑轨轮缘处、副翼根部轴承及根部轴处磨蚀)。

1.1.3 海军飞机易受腐蚀的材料

(1) 镁合金构件易产生不同程度的腐蚀。

(2) 铝合金 LY12 和 LC4 对晶间腐蚀和剥蚀非常敏感,易发生腐蚀。主轮舱区机翼前梁(LC4)和蒙皮(油箱下壁板,LY12CZ)发生剥蚀和晶间腐蚀。

(3) 30CrMnSiA 钢件,尤其是紧固件,均发生不同程度的锈蚀。

(4) 早期服役的飞机,其外表面蒙皮涂层系统抗老化、耐蚀性和附着力较差,几乎每架被检查飞机外表面蒙皮漆层均有不同程度的脱落。

1.1.4 主要的腐蚀类型

飞机的腐蚀破坏有多种形式,其主要类型有均匀腐蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀、晶间腐蚀、磨蚀、应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳等。飞机的金属材料到底以哪种形式发生腐蚀破坏,取决于材料的成分和组织、构件的形式以及外部的环境条件等各种因素。各种腐蚀破坏形式有其自己的特征和腐蚀破坏机理,但是它们之间总是有着或多或少的联系。有时,在同一个金属构件上,往往同时发生几种类型的腐蚀破坏。

1. 均匀腐蚀

均匀腐蚀是最常见的一种腐蚀破坏类型,又称全面腐蚀。其特征是:化学反应或电化学反应在整个或绝大部分金属表面上均匀地进行,腐蚀的结果使金属构件厚度均匀变薄,直到最后发生破坏。例如,金属构件在大气中的腐蚀,在酸、碱等电解溶液中的腐蚀,往往表现为

均匀腐蚀;金属的氧化,也多表现为均匀腐蚀。

如果飞机零件或部件表面没有涂层,或不合理地施用保护性涂层和密封层,或保护性涂层由于机械磨损而破坏,都会导致均匀腐蚀的产生。

均匀腐蚀影响外观,例如,飞机机身外表呈现无光泽的灰色和条纹,表面粗糙。在运输机内部,厨房和厕所的溢出物常使邻近区域发生均匀腐蚀,均匀腐蚀也常出现在地板结构区域。如不及时将其去除,腐蚀将进一步发展而导致点状腐蚀和晶间腐蚀,这类腐蚀会导致飞机结构件强度大大减弱,因此,根据腐蚀程度的大小,需要进行修理或更换部件。

通常,采用合适的材料及合适的保护性覆盖层,使用缓蚀剂以及及时冲掉腐蚀产物和恢复保护性涂层,就会抑制腐蚀速率。从军用飞机服役期间金属构件所发生的腐蚀情况来看,均匀腐蚀的危害性比其他腐蚀类型要小,腐蚀部位还比较容易发现,易于修理和采取必要的腐蚀控制措施。

2. 电偶腐蚀

在腐蚀性介质中,金属与电位更正的另一种金属或非金属导体(如石墨和碳纤维复合材料)相互接触时而引起的加速腐蚀,称为电偶腐蚀。电偶腐蚀又称为不同金属的接触腐蚀。两种电位不同的金属,当它们单独处于电解质环境中时,这两种金属都会发生程度不同的腐蚀。但当它们通过导体连接或直接连接时,电位较正的金属其腐蚀速率变小甚至不发生腐蚀,而电位较负的金属其速率将增大几倍甚至几十倍,我们所说的“引起的加速腐蚀”,就是这个意思。电偶腐蚀也可能出现在铝—镍—青铜衬套与铝的组装件上(或不锈钢衬套与铝的组装)。

电偶腐蚀主要发生在两种不同金属接触的边缘附近,而在远离接触边缘的区域,其腐蚀的程度要轻得多。此种腐蚀类型常以白色或灰色的粉状颗粒出现在金属制件上为特征。如果不同金属的接触面有缝隙并存留电解液时,还将会遭到缝隙腐蚀和电偶腐蚀的联合作用,其破坏性更大。

在双金属电偶中,保持阳极面积一定时,电偶腐蚀程度与阴极面