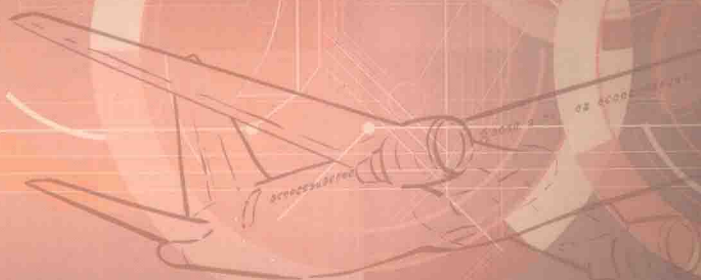




国防科技图书出版基金



Long-life Design and Test Technology
for Typical Structures of Aircraft

典型飞机结构 长寿命设计及试验技术

刘军 耿小亮 王富生 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

典型飞机结构长寿命 设计及试验技术

Long-life Design and Test Technology for
Typical Structures of Aircraft

刘 军 耿小亮 王富生 编著
温世峰 闫五柱 岳珠峰

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

典型飞机结构长寿命设计及试验技术/刘军等编者.
—北京:国防工业出版社,2016.5
ISBN 978-7-118-10768-5

I. ①典… II. ①刘… III. ①飞机-结构设计②飞机-
结构寿命-试验 IV. ①V221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 054661 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)
三河市众誉天成印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 8¼ 字数 142 千字
2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 46.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

当今,航空技术正以前所未有的速度向前发展,飞机结构不断向大型化、复杂化、轻巧化及精密化发展,飞机结构的服役环境也越发恶劣。发展方向将越来越注重提高其使用的可靠性和经济性,即在满足结构强度要求的前提下提高安全性和寿命。结构抗疲劳设计和制造,已成为飞机可靠性和经济性的关键。随着我国大型客机和运输机型号项目的启动,飞机典型结构设计和相关试验验证出现了新的技术问题,这些关键技术的解决有助于提高国内飞机设计和试验技术水平,进而提升飞机的综合性能,已显得尤为重要。

在所承担的国防科技民机专项项目、材料国产化项目、国家自然科学基金项目(50805118,50375124,11102163)、航空科学基金项目(2013ZA53010)和西北工业大学基础研究基金项目(JC20110260)等项目的资助下,本书总结了课题组近年来在飞机典型结构抗疲劳设计、分析和相关试验验证领域中探索和实践取得的一些成果。本书紧贴工程实际问题,具有较高的工程应用价值,部分成果技术已成功应用于飞机多个型号工程的结构设计、分析和试验。

全书内容共分为6章。

第1章概述,介绍了在飞机结构抗疲劳设计和分析中经常用到的一些基本概念和知识。第2章分析了孔的表面质量,如表面缺陷和加工质量,对疲劳寿命的影响。第3章研究了孔的抗疲劳强化技术,如冷挤压、压印和锤击强化,对孔边残余应力分布和疲劳寿命的影响。第4章讨论了喷丸不同参数,如喷丸介质、表面粗糙度、靶材性能等,对板件残余应力场和寿命的影响。第5章针对飞机典型的三种连接方式(单剪斜搭接、双剪连接和反向双犬骨连接件)进行了钉传载荷和寿命评估。第6章对盒段典型结构进行了疲劳试验和寿命评定分析,验证了结构的抗疲劳分析技术的精度,确定其抗疲劳特性。

在相关预研和型号项目的完成过程中,邵小军博士、康建雄博士生、元辛博士生、刘勇俊硕士、章刚硕士、徐红炉硕士、王晓森硕士、杨仕超硕士、张治国硕士生、王星硕士生等人以及西北工业大学先进材料与结构测试中心的姚世乐工程师、魏晓明工程师、韩喆工程师等人也承担了一定课题任务。书中有关内容采纳或参考了以上人员的相关论文和工作报告,在此一并表示感谢。同时,书中还引用了国内外其他专家学者的研究成果,由于疏忽或遗漏,可能没有标明出处,在此也表示由衷的歉意。

本书的完成还得到国家国防科工局、中国航空工业集团公司相关厂所等单位的有关领导和工程技术人员的大力支持,在此一并表示感谢。

本书特点是内容系统、全面、工程实用性强,同时反映了近年来国内外在该领域的最新研究成果,可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

由于编著者水平有限,书中不妥之处在所难免,希望读者不吝批评指正。

编著者

2015. 10. 10

目 录

绪论	1
第 1 章 疲劳与断裂力学概述	3
1.1 疲劳基本概念	3
1.1.1 疲劳定义及破坏特征	3
1.1.2 交变应力	3
1.1.3 $S-N$ 曲线	4
1.1.4 等寿命曲线	5
1.1.5 应力疲劳与应变疲劳	6
1.1.6 线性疲劳累计损伤理论	7
1.2 影响结构疲劳性能的主要因素	7
1.2.1 载荷谱的影响	7
1.2.2 应力集中的影响	7
1.2.3 尺寸的影响	8
1.2.4 表面粗糙度、残余应力的影响	8
1.3 金属疲劳破坏机制、扩展与断口分析	9
1.3.1 疲劳破坏机制	9
1.3.2 疲劳裂纹扩展理论	9
1.3.3 断口分析	10
1.4 疲劳寿命预测方法	12
1.4.1 名义应力法	12
1.4.2 局部应力-应变法	12
1.4.3 多轴疲劳理论	13
参考文献	15
第 2 章 孔的表面质量对寿命的影响	16
2.1 表面缺陷对开孔疲劳性能的影响	16
2.1.1 划痕	16
2.1.2 空穴	21
2.1.3 夹杂	24
2.2 孔的加工质量对开孔疲劳性能的影响	28

2.2.1	粗糙度	28
2.2.2	垂直度	31
2.2.3	圆柱度	34
2.2.4	圆度	36
2.2.5	孔的加工质量与经验公式	38
2.3	制孔工艺对开孔疲劳性能的影响	38
2.3.1	试样尺寸及加载方式	39
2.3.2	疲劳试验结果	39
	参考文献	40
第3章	孔的抗疲劳强化技术	42
3.1	冷挤压工艺对开孔疲劳性能的影响	42
3.1.1	直接芯棒挤压工艺及其参数	43
3.1.2	表面残余应力测试	44
3.1.3	疲劳试验结果及断口分析	47
3.1.4	有限元分析	48
3.2	压印对开孔疲劳性能的影响	50
3.2.1	压印工艺	50
3.2.2	压头尺寸对残余应力分布的影响	50
3.2.3	不同因素对压印强化孔边残余应力的影响	53
3.2.4	三开孔试样压印强化疲劳试验	55
3.3	锤击对开孔疲劳性能的影响	56
3.3.1	锤击及疲劳试验	56
3.3.2	锤击有限元分析	59
3.3.3	断口分析	61
	参考文献	62
第4章	喷丸强化技术	63
4.1	喷丸强化机理及其研究现状	63
4.2	不同喷丸介质对疲劳的影响	64
4.2.1	疲劳试验	64
4.2.2	疲劳试验数据对比分析	64
4.2.3	疲劳断口分析	67
4.2.4	不同喷丸介质下的喷丸数值模拟	67
4.3	表面粗糙度对喷丸残余应力场的影响	70
4.3.1	有限元模型	70
4.3.2	残余应力分布特征	71
4.3.3	表面粗糙度对喷丸残余应力的影响	72

4.3.4	考虑表面粗糙度时弹丸尺寸对残余应力的影响	73
4.3.5	考虑表面粗糙度时喷丸速度对残余应力的影响	74
4.4	靶材力学性能对喷丸能量转化的影响	76
4.4.1	动能与变形能之间的转化	76
4.4.2	有限元模型	77
4.4.3	模型验证	78
4.4.4	靶材杨氏模量的影响	79
4.4.5	靶材屈服强度的影响	80
4.4.6	应变硬化率的影响	80
	参考文献	81
第5章	连接件抗疲劳设计与分析	83
5.1	单剪斜搭接	83
5.1.1	疲劳试验	83
5.1.2	钉传载荷影响因素分析	86
5.1.3	孔边应力分析	89
5.2	双剪大过盈连接	91
5.2.1	过盈量对钉传载荷的影响	91
5.2.2	疲劳试验及分析	94
5.3	反向双犬骨连接	98
5.3.1	钉传载荷试验	98
5.3.2	疲劳试验	100
5.3.3	最大主应力分析	101
5.4	多轴疲劳理论在连接件寿命评估的应用	102
5.4.1	铝合金反向双犬骨试件的寿命预测	102
5.4.2	单剪斜搭接寿命预估	104
	参考文献	104
第6章	盒段抗疲劳试验与分析	105
6.1	盒段疲劳试验	105
6.1.1	试验件	105
6.1.2	加载方式及试验结果	105
6.2	盒段寿命评估	108
6.2.1	盒段模型及结果	108
6.2.2	初始缺陷的形态和尺寸	109
6.2.3	疲劳裂纹扩展解析程序	110
6.2.4	评估结果	111
	参考文献	113

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Outline of Fatigue and Fracture Mechanics	3
1. 1 Basic Concepts of Fatigue	3
1. 1. 1 The Definition and Failure Characteristics of Fatigue	3
1. 1. 2 Alternating Stress	3
1. 1. 3 $S - N$ Curves	4
1. 1. 4 Constant – life Fatigue Diagram	5
1. 1. 5 Stress Fatigue and Strain Fatigue	6
1. 1. 6 Fatigue Damage Linearly Cumulative Theory	7
1. 2 Factors Affecting Fatigue Performance of Structures	7
1. 2. 1 Effect of Loading	7
1. 2. 2 Effect of Stress Concentration	7
1. 2. 3 Effect of Size	8
1. 2. 4 Effect of Surface Roughness and Residual Stress	8
1. 3 Mechanism of Fatigue Failure, Crack Propagation and Fracture Analysis of Metals	9
1. 3. 1 Mechanism of Fatigue Failure	9
1. 3. 2 Fatigue Crack Propagating Theory	9
1. 3. 3 Fractographic Analysis	10
1. 4 Fatigue Life Prediction Methods	12
1. 4. 1 Nominal Stress Approach	12
1. 4. 2 Local Stress – strain Approach	12
1. 4. 3 Multi – axial Fatigue Theory	13
References	15
Chapter 2 Effect of Surface Quality on Fatigue Life of Open Holes	16
2. 1 Effect of Surface Defects on Fatigue Performance of Open Holes	16
2. 1. 1 Scratch	16
2. 1. 2 Cavity	21

2. 1. 3	Inclusion	24
2. 2	Effect of Manufacturing Quality on Fatigue Performance of Open Holes	28
2. 2. 1	Surface Roughness	28
2. 2. 2	Verticality	31
2. 2. 3	Cylindricity	34
2. 2. 4	Roundness	36
2. 2. 5	Manufacturing Quality of Fasten Holes and Empirical Formula ...	38
2. 3	Effect of Drilling on Fatigue Performance of Open Holes	38
2. 3. 1	Specimen Size and Loading	39
2. 3. 2	Fatigue Test Results	39
	References	40
Chapter 3	Anti – fatigue Enhancement Technology of Open Holes	42
3. 1	Effect of Cold Working on Fatigue Performance of Open Holes	42
3. 1. 1	Direct Mandrel Expansion Technique and Its Parameters	43
3. 1. 2	Surface Residual Stress Test	44
3. 1. 3	Fatigue Test Results and Analysis of Fracture Surfaces	47
3. 1. 4	Finite Element Analysis	48
3. 2	Effect of Indentation on Fatigue Performance of Open Holes	50
3. 2. 1	Indentation Technique	50
3. 2. 2	Effect of Indenter Size on Residual Stress Distribution	50
3. 2. 3	Effect of Different Factors on Residual Stress Distribution around Holes	53
3. 2. 4	Fatigue Test of Three Open Hole Specimens with Indentation Treatment	55
3. 3	Effect of Hammer Peening on Fatigue Performance of Open Holes ...	56
3. 3. 1	Hammer Peening and Fatigue Test	56
3. 3. 2	Finite Element Analysis of Hammer Peening	59
3. 3. 3	Fractographic Analysis	61
	References	62
Chapter 4	Shot Peening Technology	63
4. 1	Mechanism of Shot Peening and Status of Art	63
4. 2	Effect of Shot Materials on Fatigue Performance	64
4. 2. 1	Fatigue Test	64
4. 2. 2	Comparative Analysis of Fatigue Test Results	64
4. 2. 3	Fractographic Analysis	67

4. 2. 4	Numerical Simulation of Shot Peening with Different Shot Materials	67
4. 3	Effect of Surface Roughness on Residual Stress Field	70
4. 3. 1	Finite Element Model	70
4. 3. 2	Characteristics of Residual Stress Distribution	71
4. 3. 3	Effect of Surface Roughness on Residual Stress Distribution	72
4. 3. 4	Effect of Shot Size on Residual Stress Considering Surface Roughness	73
4. 3. 5	Effect of Shot Velocity on Residual Stress Considering Surface Roughness	74
4. 4	Effect of Target Materials on Energy Tranformation during Shot Peening Process	76
4. 4. 1	Transformation between Kenitic Energy and Deformation Energy	76
4. 4. 2	Finite Element Model	77
4. 4. 3	Model Verification	78
4. 4. 4	Effect of Young' s Modulus	79
4. 4. 5	Effect of Yield Stress	80
4. 4. 6	Effect of Strain Hardening Rate	80
	References	81
Chapter 5	Anti – fatigue Design and Analysis of Joints	83
5. 1	Single Shear Lap Joints	83
5. 1. 1	Fatigue Test	83
5. 1. 2	Factors Affecting Load Transmitting Ratio	86
5. 1. 3	Stress Analysis around Holes	89
5. 2	Double Shear Interference Fit Joints	91
5. 2. 1	Effect of Interference Fit Levels on Load Transmitting Ratio	91
5. 2. 2	Fatigue Test and Analysis	94
5. 3	Reverse Double Dogbone Joints	98
5. 3. 1	Load Transmitting Ratio Test	98
5. 3. 2	Fatigue Test	100
5. 3. 3	Maximum Principal Stress Analysis	101
5. 4	Application of Multi – axial Fatigue Theory on Fatigue Life Prediction of Joints	102
5. 4. 1	Fatigue Life Prediction of Aluminum Alloy Reverse Double Dogbone Joints	102

5.4.2	Fatigue Life Prediction of Single Shear Lap Joints	104
	References	104
Chapter 6	Faigue Test and Analysis of Wingbox	105
6.1	Faigue Test of Wingbox	105
6.1.1	Specimen	105
6.1.2	Loading and Test Result	105
6.2	Fatigue Life Prediction of Wingbox	108
6.2.1	Wingbox Model and Results	108
6.2.2	Shape and Size of Initial Flaws	109
6.2.3	Fatigue Crack Propagation Analysis Program	110
6.2.4	Prediction Results	111
	References	113

绪 论

当今,国际航空科学技术正以前所未有的速度向前发展,飞机结构不断向大型化、复杂化、轻巧化及精密化发展,机械零构件的服役条件也越来越恶劣,使得重大疲劳失效事故层出不穷。因而对作为关键主承力构件提出了高承载、长寿命、高可靠使用、抗恶劣环境等要求。同时,越来越注重提高飞机使用的可靠性和经济性,即在满足结构强度要求的前提下提高安全性和寿命,这更促进了疲劳研究的迅速发展。抗疲劳设计和制造,已成为飞机结构可靠性的关键。

飞机结构设计方法经历了静强度设计、安全寿命设计、损伤容限设计和耐久性设计方法等不同阶段^[1]。早期飞机的静强度设计下,其静强度储备较大,飞机使用应力水平很低,疲劳问题被掩盖。20 世纪 50 年代以来,航空业得到了全面的发展,为了使飞机具有高速度和良好飞行性能,就要求重量要尽量轻,飞机的静强度储备越来越少,疲劳问题开始暴露。1954 年英国喷气式客机“彗星”-I 号因连接区铆钉边缘出现疲劳裂纹而连续两次坠毁,使人们把注意力放在飞机的疲劳强度设计上^[2]。60 年代后期,F-111 飞机的失事以及其他疲劳问题构成了 70 年代 B-1 轰炸机研制规划中要求应用断裂力学概念的依据。美国空军于 1975 年颁布了 MIL-STD-1530A,对新型军用飞机的设计规定了损伤容限要求。

飞机的损伤容限设计主要针对飞行安全结构,重点问题是在该使用期中的结构具有足够的剩余强度。但是,损伤容限设计原则在寿命预估中未考虑裂纹形成阶段,而常自某一初始裂纹记起。又由于该初始裂纹长度及其形态属于随机变量,取决于制造工艺和检测水平等,因此存在一定的局限性;飞机的耐久性设计针对飞机主要、次要承力结构,是保证飞机结构长寿命、高可靠性、高经济性和保证飞机持续战斗力的重要方法。现代飞机结构设计已进入以结构完整性为中心的耐久性/损伤容限设计阶段,现代飞机结构设计的主要设计准则是将耐久性设计和损伤容限设计相结合,是当今最先进的设计方法^[3,4]。

随着我国大型客机和运输机型号项目的启动,飞机关键结构设计和相关试验验证出现了新的技术问题,这些关键技术的解决有助于改进飞机结构设计,提高飞机综合性能,使得飞机结构设计和相关试验技术水平提升到一个新台阶。

紧固孔的疲劳开裂是服役飞机中损伤最普遍的形式之一。因此,在设计、选材和制造中,如何尽可能减小紧固孔应力集中的影响,改善飞机结构的抗疲劳性

能,延长使用寿命,确保飞机结构的可靠性和安全性,是飞机设计、材料和工艺研究者的重要研究课题。

工程实践中,通常对紧固孔和壁板进行表面强化处理来提高飞机的寿命。强化处理是指在不改变零部件材料和截面尺寸的前提下,通过强化处理改变材料的组织及应力分布状态达到提高结构疲劳寿命的目的。紧固孔强化技术主要有冷挤压、过盈配合、压印等技术;板件主要有喷丸强化及成型、激光强化、滚压等技术^[7]。如何优化强化工艺参数,最大限度提高构件抗疲劳能力是面临的最主要问题。

飞行器结构中存在大量连接件,而结构的不连续性和复杂的传力形式使这些连接件成为疲劳破坏的主要部位。连接件的匹配材料、螺接或铆接的连接方式、钉的材料和钉孔位置、板的搭接形式等细节均会对连接件的钉转载荷和应力分布产生较大的影响,进而改变结构的抗疲劳能力。

目前,飞机设计已进入耐久性和损伤容限设计阶段。对于主要承力构件,例如机身框或机翼盒段,如何通过疲劳试验确定构件薄弱部位的原始疲劳质量,选择有效的损伤容限评定方法,合理地设定结构的检测周期和维修技术,进而结合耐久性设计方法,确定构件的经济寿命。

在寿命预估技术方面,针对基础不同的疲劳机理和假设,国内外学者已提出多种疲劳寿命预估方法或理论,如:单轴疲劳中的名义应力法、局部应力-应变法、线弹性断裂力学等;多轴疲劳中的能量法、等效应力-应变法和临界平面法等。由于这些理论和方法基于一定的假设和基本条件,同时由于疲劳寿命本身具有很大的分散性,导致理论预测结果和试验结果具有一定的差异。如何根据结构的承载状态和应力-应变分布,合理、有效地选择疲劳预测技术,尽可能得到较为准确的保守解,为飞机设计、选材和工艺提供参考。

现代飞机普遍采用机翼结构整体油箱设计,整体油箱是利用密闭的机翼盒段作为储油空间。由于整体油箱兼具结构承力和储存燃油两种功能,因此其设计既要满足结构的强度、刚度要求,还要满足密封性的要求。而整体油箱的抗腐蚀疲劳特性和不同温度下的密封性是影响飞机安全性和可靠性的重要隐患。如果结构产生严重漏气或者漏油现象,将会危及飞机的飞行安全。需要合理地确定试验方案,验证其抗腐蚀疲劳特性和密封性满足设计要求。

多年来,课题组在飞机结构抗疲劳技术和相关试验验证等方面做了大量的工作。本书是作者及其所在课题组研究工作的总结,针对结构设计在实际工程中面临的问题开展飞机关键结构件抗疲劳设计、分析及其试验技术的研究。