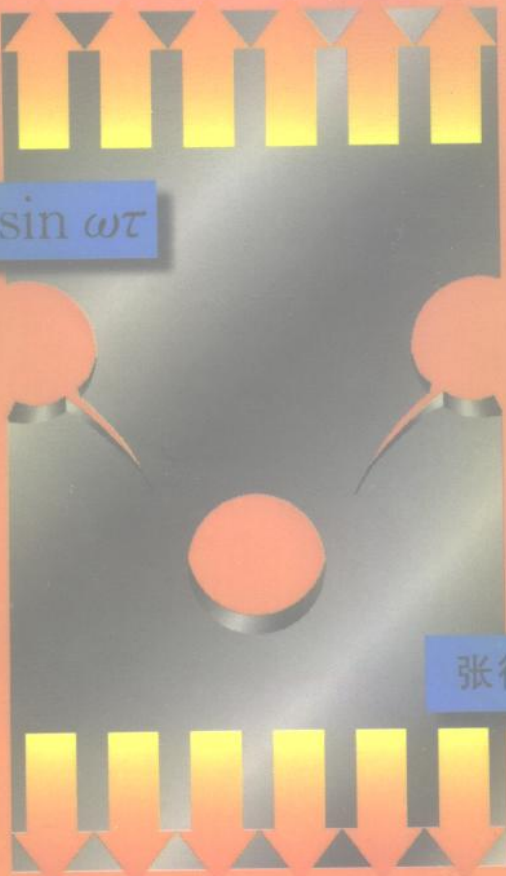


金属构件应用疲劳损伤力学

Applied Fatigue Damage Mechanics of Metallic Structural Members


$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega \tau$$

张行 赵军 著

国防工业出版社

TG113.25
Z15

428869

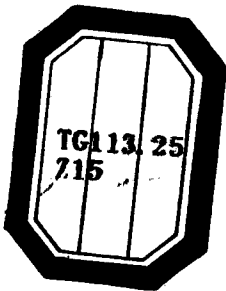
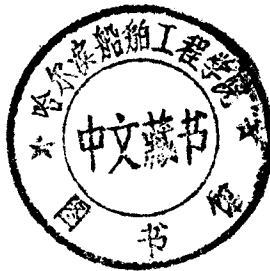
金属构件应用疲劳损伤力学

Applied Fatigue Damage Mechanics of Metallic Structural Members

张行 赵军 著



00428669



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属构件应用疲劳损伤力学/张行,赵军著. —北京:
国防工业出版社,1998.11

ISBN 7-118-01882-1

I. 金… I. ①张… ②赵… II. ①金属结构-结构
构件-疲劳力学②金属结构-结构构件-损伤(力学)-力学
IV. TG113.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 03119 号

DW39/26
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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{2}$ 183 千字

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:15.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	崔士义		
委 员	于景元	王小谟	尤子平
(以姓氏笔划为序)	冯允成	刘 仁	朱森元
	朵英贤	宋家树	杨星豪
	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果
	张均武	张涵信	陈火旺
	范学虹	柯有安	侯正明
	莫梧生	崔尔杰	

前 言

众所周知,金属构件疲劳失效已成为许多工程领域中关系到机械与结构使用安全性以及成本经济性的一个重要因素。

金属构件疲劳失效过程可分为裂纹形成与裂纹扩展两个阶段。对于裂纹形成阶段,现行分析均采用试验与统计相结合的方法。这样的方法对机械与结构定寿是完全必要、行之有效并做出重大贡献的。然而,从构件的抗疲劳设计方面看,为缩短新产品的研制周期并降低其研制成本,引入固体力学分析方法,使之与数理统计方法相结合,应是这一领域今后发展的方向。对于裂纹扩展阶段,现行分析一律采用试验与断裂力学相结合的方法。此种方法奠定了飞行器损伤容限设计的理论基础。但是,这种方法也存在若干重要问题:

- (1)它不便于解决裂纹做曲线扩展的情况;
- (2)二维裂纹扩展速率的公式不能用于三维情况;
- (3)裂纹形成与裂纹扩展被视为两个孤立的过程。

因此,迫切需要一个新的固体力学分支,它能够将疲劳裂纹形成与扩展的研究统一起来,将二维疲劳裂纹扩展与三维疲劳裂纹扩展的研究统一起来,将裂纹直线扩展与曲线扩展的研究统一起来。

固体力学的这一新分支就是损伤力学。从80年代初期到目前为止,在这方面已经出版了许多学术专著,它们对损伤力学理论基础的建立发挥了巨大作用。然而,目前还缺少系统研究金属构件疲劳问题的应用损伤力学专著。

本书第一作者与包括本书第二作者在内的各个阶段合作者,经过十余年的努力,初步形成了适用于金属构件的应用疲劳损伤力学体系,其内容包括基本理论与分析方法、裂纹形成与扩展分

析、预估疲劳寿命的闭合解法以及数值解法、各向同性与各向异性疲劳损伤力学等。

以上就是这本学术专著的基本内容。

由于疲劳损伤力学的复杂性与作者学识的有限性,在这本书中一定会存在着不少缺点,希望在这一领域工作的同行不吝指正。

这本学术专著反映的科研成果是与国家教委博士学科点基金的资助密切相关的。本专著的出版又是在国防科技图书出版基金的资助下得以实现的。借此机会,一并表示衷心感谢。

作 者

1997年12月22日

于北京航空航天大学

内 容 简 介

本书是作者从事疲劳损伤力学研究的总结,有系统的创造性与较强的应用性,包括疲劳损伤本构关系以及疲劳裂纹形成与扩展过程的分析与计算力学研究,并将疲劳裂纹形成与扩展全过程的研究统一到新兴损伤力学的高度。

本书读者对象为固体力学、各类结构以及机械设计专业的研究生、教师与科技工作者。

This academic monograph is a summary of research achievements in the field of fatigue damage mechanics of the authors. It contains fatigue damage coupled constitutive relations, analytical mechanics and computational mechanics of fatigue crack formation and growth. In this book, the analysis of fatigue crack formation and growth can be unified in the frame of developing damage mechanics.

This academic monograph is appropriate to the post graduate students, teachers, engineers and scientists in the specialities of solid mechanics, structure and machine designs.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 疲劳问题概述	1
1.2 损伤力学与疲劳建模	4
1.3 应用疲劳损伤力学	9
第二章 疲劳损伤本构关系	12
2.1 本构关系的 N 型描述	12
2.2 含内变量不可逆热力学的基本理论	15
2.3 内变量的正交流动法则	18
2.4 等效应力与应变等价原理	21
2.5 损伤耦合的弹塑性本构关系	23
2.6 本构关系的 τ 型描述	25
第三章 疲劳裂纹形成过程分析的守恒积分方法	30
3.1 含缺口板的守恒积分	31
3.2 应变变程能密度的守恒性——小范围损伤	33
3.3 高周疲劳裂纹形成过程分析的封闭解法	35
3.4 高周疲劳裂纹形成寿命预估实例	38
3.5 中低周疲劳裂纹形成过程分析的守恒积分解法	39
3.6 线性累积损伤理论	42
3.7 $p-S-N$ 概率疲劳曲线的建立	43
3.8 含键槽轴疲劳裂纹形成过程分析的守恒积分解法	45
第四章 疲劳裂纹形成过程分析的附加应变方法	52
4.1 给定损伤场下的应力与应变场分析——虚功与余虚功方法	53
4.2 计及耦合效应的损伤、应力与应变场分析——附加应变法	56
4.3 计及耦合效应的求解过程——广义时间	59
4.4 含孔板高周疲劳裂纹形成过程的损伤区特性	61
第五章 疲劳裂纹形成过程分析的附加位移法	66

5.1	基本方程、边界条件与初始条件	66
5.2	耦合问题的附加位移——虚功原理解法	69
5.3	广义时间与广义振程	74
5.4	循环加载下的弹塑性规律	80
5.5	低周疲劳裂纹形成寿命预估的计算模型	83
5.6	疲劳裂纹形成寿命预估的实例	86
第六章	疲劳裂纹扩展过程损伤分析的一般原理	93
6.1	疲劳损伤的相似性原理	94
6.2	标准状况下的渐近场	96
6.3	标准状况下物质导数的渐近主项	98
第七章	线弹性损伤下的疲劳裂纹扩展分析	102
7.1	t型描述下疲劳损伤过程区渐近分析	102
7.2	t型描述下的分析实例与结论	107
7.3	N型描述下疲劳损伤过程区渐近分析	115
7.4	N型描述下的分析实例与结论	117
7.5	线弹性损伤下的疲劳裂纹扩展速率	122
7.6	预估疲劳裂纹扩展寿命的封闭解法	126
7.7	疲劳裂纹扩展速率公式的修正	129
附录 I	关于公式(7.17)的推导	131
附录 II	关于公式(7.41)的推导	132
第八章	弹塑性损伤下的疲劳裂纹扩展分析	134
8.1	计及疲劳损伤耦合的振程型的弹塑性本构关系	134
8.2	弹塑性疲劳损伤过程区渐近分析	136
8.3	弹塑性疲劳损伤过程区分析实例	141
8.4	弹塑性损伤下的疲劳裂纹扩展速率	146
第九章	预估疲劳寿命的损伤力学—有限元法	151
9.1	疲劳问题的损伤耦合理论	152
9.2	给定损伤场时应力分析的附加载荷—有限元法	153
9.3	给定应力场的损伤分析与裂纹形成及扩展寿命预估	155
9.4	计算实例及其与实验结果的比较	158
9.5	受拉伸轴对称试件的疲劳寿命预估	165
9.6	板试件复合型疲劳裂纹形成与扩展	167

第十章 金属材料各向异性疲劳损伤力学研究	173
10.1 微结构力学模型及其元件力学性质	173
10.2 各向异性疲劳损伤本构关系的建立	175
10.3 微结构力学参数的确定	179
10.4 计及各向异性损伤的疲劳分析	181
第十一章 大范围损伤下疲劳问题的工程解法	188
11.1 一维构件疲劳问题的损伤力学—工程解法	188
11.2 二维构件疲劳问题的损伤力学—工程解法	193
11.3 三维构件疲劳问题的损伤力学—工程解法	198
11.4 疲劳应力集中系数	202
11.5 变幅加载下预估疲劳裂纹形成寿命的封闭解法	203
11.6 损伤力学—工程解法的实验验证	205
全书总结	211
参考文献	213

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Fatigue Problems—A General Review	1
1.2	Damage Mechanics and Fatigue Modelling	4
1.3	Applied Fatigue Damage Mechanics	9
Chapter 2	Constitutive Relations about Fatigue Damage	12
2.1	N-type Description of Constitutive Relations	12
2.2	Basic Theory of Irreversible Thermodynamics with Internal Variables	15
2.3	Orthogonal Flow Rules with respect to Internal Variables ...	18
2.4	Effective Stress and Principle of Strain Equivalence	21
2.5	Damage Coupled Constitutive Relations in Elasto-Plastic Range	23
2.6	t-type Description of Constitutive Relations	25
Chapter 3	Method of Conservative Integral for Fatigue Crack Initiation Analysis	30
3.1	Conservative Integral of Notched Plates	31
3.2	Conservative Property about Specific Energy of Strain Range of Variation—Small Scale Damage	33
3.3	Closed Form Solution for Analysis about Crack Initiation under High Cycle Fatigue	35
3.4	Practical Examples about Predictions of High Cycle Fatigue Crack Initiation Lives	38
3.5	Method of Solution with Respect to Crack Formation Process of Low Cycle Fatigue	39

3.6	Theory of Linear Cumulative Damage	42
3.7	Probabilistic Fatigue Curves— <i>P-S-N</i> Curves	43
3.8	The Conservative Integral Method of Solution for Analysis about The Process of Fatigue Crack Initiation with respect to A Shaft Containing A Key-way	45
 Chapter 4 Method of Additional Strains for Fatigue Crack Initiation Analysis		
4.1	Stress and Strain Field Analysis for Given Damage Field- Virtual Work and Complementary Virtual Work Method ...	53
4.2	Damage, Stress and Strain Field Analysis with Consideration of Coupling Effects-Additional Strain Method	56
4.3	Solution with consideration of Coupling Effects-Concept of Generalized Time	59
4.4	The Characteristics of Damage Zone about Crack Initiation Process of High Cycle Fatigue for A Plate Cantaining A Hole	61
 Chapter 5 Method of Additional Displacements for Fatigue Crack Initiation Analysis		
5.1	Governing Equations with Boundary and Initial Conditions ...	66
5.2	Additional Displacement-Virtual Work Method of Damage Coupled Problems	69
5.3	The Generalized Time and The Generalized Range of Variation	74
5.4	The Elasto-Plastic Laws under Cyclic Loading	80
5.5	The Computational Model for Prediction about Crack Initiation Lives of Low Cycle Fatigue	83
5.6	Practical Examples about Predictions of Low Cycle fatigue Crack Initiation Lives	86
 Chapter 6 General Principles for Damage Analysis of		

	Fatigue Crack Growth Process	93
6. 1	Principle of Similarity about Fatigue Damage	94
6. 2	Asymptotic Fields under Typical Conditions	96
6. 3	Asymptotic Predominant Terms of Material Derivatives under Typical Conditions	98
Chapter 7 Fatigue Crack Growth Analysis under The		
	Condition of Linear Elastic Damage	102
7. 1	Asymptotic Analysis of Fatigue Damage Process Zone under t-Type Description	102
7. 2	Analysis of Typical Examples and Conclusions under t-Type Description	107
7. 3	Asymptotic Analysis of Fatigue Damage Process Zone under N-Type Description	115
7. 4	Analysis of Typical Examples and Conclusions under N-Type Description	117
7. 5	Fatigue Crack Growth Rate under The Condition of Linear Elastic Damage	122
7. 6	Method of Closed Form Solution for Fatigue Crack Growth Lives	126
7. 7	Modifications about Formula of Fatigue Crack Growth Rate	129
Appendix I	Derivation about Eq. (7. 17)	131
Appendix II	Derivation about Eq. (7. 41)	132
Chapter 8 Fatigue Crack Growth Analysis under The		
	Condition of Elasto-Plastic Damage	134
8. 1	Elasto-Plastic Constitutive Relations of Range Type with Consideration of Fatigue Damage Coupling Effects	134
8. 2	Asymptotic Analysis of Elasto-Plastic Fatigue Damage Process Zone	136
8. 3	Practical Examples about Analysis of Elasto-Plastic Damage	

Process Zone	141
8.4 Fatigue Crack Growth Rate under The Condition of Elasto- Plastic Damage	146
 Chapter 9 Damage Mechanics-Finite Element Method for Predictions of Fatigue Lives	151
9.1 Damage Coupled Theory of Fatigue Problems	152
9.2 Additional Load-Finite Element Method of Stress Analysis with Given Damage Field	153
9.3 Damage Analysis with Given Damage Stress Field and Fatigue Life Prediction about Crack Initiation and Growth	155
9.4 Computational Examples and Their Comparisons with Experimental Results	158
9.5 Fatigue Life Prediction of Axially Symmetric Specimen under Tension	165
9.6 Mixed Mode Fatigue Crack Initiation and Growth of Plate Specimen	167
 Chapter 10 Research of Anisotropic Damage Mechanics for Fatigue of Metallic Materials	173
10.1 Mechanical Model of Micro-Structure and Mechanical Properties of Its Elements	173
10.2 Establishment of Anisotropic Damage Coupled Constitutive Relations for Fatigue Reseach	175
10.3 Determination of Mechanical Parameters in Micro-Stru- cture	179
10.4 Analysis of Fatigue with Consideration of Anisotropic Damage	181
 Chapter 11 Engineering Method of Solution for Fatigue Problems under The Condition of Large Scale Damage	188

11.1	Damage Mechanics-Engineering Method of Solution for Fatigue Problems about One Dimensional Structural Members	188
11.2	Damage Mechanics-Engineering Method of Solution for Fatigue Problems about Two Dimensional Structural Members	193
11.3	Damage Mechanics-Engineering Method of Solution for Fatigue Problems about Three Dimensional Structural Members	198
11.4	Stress Concentration Factors of Fatigue	202
11.5	Method of Closed Form Solution for Prediction of Fatigue Crack Initiation Lives under Loading with Variable Amplitudes	203
11.6	Experimental Verification of Damage Mechanics-Engineering Method of Solution	205
Conclusions		211
References		213