

中国人民解放军总装备部专项基金资助出版

材 料 的 疲 劳

(第 2 版)

[美] S. Suresh 著

王中光 等译

国防工业出版社

·北京·

著作合同登记 图字:军—1999—008 号

图书在版编目(CIP)数据

材料的疲劳/王中光等译. - 2 版. - 北京:国防工业出版社, 1999.5

书名原文:Fatigue of Materials

ISBN 7-118-02071-0

I. 材… II. 王… III. 工程材料-疲劳理论 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03327 号

Fatigue of Materials - 2nd, Subra Suresh, Cambridge, 1998

© Subra Suresh, All Rights Reserved.

本书中文版由英国剑桥大学出版社授予中国国防工业出版社独家专有出版发行权, 版权所有, 侵权必究。

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 787×1092 1/16 印张 31½ 714 千字

1999 年 5 月第 2 版 1999 年 5 月北京第 2 次印刷

印数:3001~4500 册 定价:58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

译者的话

由美国麻省理工学院(MIT)Suresh 教授撰写的《材料的疲劳》一书的英文第1版,1990年由英国剑桥大学出版社出版。由于本书内容丰富,有不同于同类著作的许多特点,出版后在世界范围内产生了广泛的反响。我们曾将本书译成中文,于1993年由国防工业出版社出版。

根据广大读者的要求和材料疲劳研究的新发展,作者最近对本书首版进行了重大修订和补充,提供了更多的实际案例分析,使本书由原来的科研专著性质拓宽到教科书性质,更适合于各类读者的需求。本书英文版第2版于1998年9月由英国剑桥大学出版社出版。在国防科技翻译图书出版基金的资助下,我们将本书第2版译成中文,由国防工业出版社出版。

本书由中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室的科技人员翻译。第9章由李守新翻译,第8章和第16章由臧启山翻译,第7章由艾素华翻译,第10章由于维成翻译,第13章由夏月波翻译,第2章由胡运明翻译,第5章和第11章由张广平翻译,其余各章和序由王中光翻译。最后由王中光校对了全部译文,并由赵忠输入计算机磁盘。

由于译者水平有限,错误之处在所难免,敬希广大读者多加指正。

译者

一九九八年十一月

中文第2版译序

由美国麻省理工学院 Suresh 教授撰写、英国剑桥大学出版社 1990 年出版的《Fatigue of Materials》一书,把力学原理与微观机制结合起来,系统地总结了金属、无机非金属和有机高分子等各类材料的疲劳研究成果,并尽可能把基本概念应用于实际存在的疲劳问题,被认为是本领域中的经典之作,在世界范围内产生了巨大的反响。在出版后的几年里,本书曾翻印四次,被一百多所大学用作研究生教材;还有许多工业部门用作短期训练班课程的教材。中国科学院金属研究所“材料疲劳与断裂国家重点实验室”的科技人员在王中光教授的主持下,曾将本书译成中文,于 1993 年由国防工业出版社出版,收到良好的效果。

根据广大读者的要求和为适应材料疲劳研究的发展和工程应用的需要,应英国剑桥大学出版社之邀,作者最近在保持本书首版基本特点的基础上,对本书首版做了重要修订和补充:(1) 增加一些章节介绍微动疲劳、接触疲劳和先进材料疲劳等重要领域,使非金属和复合材料的疲劳在第 2 版中占较大篇幅;(2) 每章增加自 1990 年首版完成以来发表的最新研究成果,其中包括中国疲劳学者的研究成果;(3) 每章增加了例题和案例研究,用基本原理对一些工程实际问题进行讨论和分析,这对材料疲劳的深入理解和提高解决实际问题的能力有重要作用。此外,第 2 版比首版增加了约 25% 的篇幅,更为合理地反映了材料疲劳研究领域当前的进展情况。因此,再次将本书译为中文是十分必要的。

本书第 2 版仍由“材料疲劳与断裂国家重点实验室”的科技人员进行翻译,由国防工业出版社出版。感谢本书作者 Suresh 教授和剑桥大学出版社给予中国学者翻译和出版权,感谢国防工业出版社的大力支持,使本书第 2 版能及时问世。

邵 3 稿
1998年6月

中文第 2 版序

长期以来,中华人民共和国的研究人员在国际疲劳研究集体中起着积极的作用。自 80 年代以来,随着中国和亚洲其它国家经济和基础设施的迅速发展,中国同事在全球疲劳研究和工程团体中的领导作用在不断增强,这方面的一个明显例子是他们组织将于 1999 年在北京召开的国际疲劳大会(ICF)。

自从我的《材料的疲劳》一书英文第 1 版发表以来,我有机会同中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室前主任、1999 年国际疲劳大会联合主席王中光教授进行了广泛的交往。1993 年,中国科学院金属研究所的王中光和他的同事们把我的书翻译成中文出版。本书中文第 1 版受到了从事疲劳研究的中国学生和研究人员良好的反响,这是对他们翻译中所付出的辛勤劳动和所表现的热心的回报。

在《材料的疲劳》第 2 版的准备过程中,王中光教授和他的同事们继续对我提供了帮助,他们也决定将本书第 2 版译成中文。第 2 版的翻译工作是由沈阳金属研究所的许多同事完成的。他们是李守新教授(第 9 章)、臧启山教授(第 8 章和第 16 章)、艾素华教授(第 7 章)、于维成教授(第 10 章)和夏月波教授(第 13 章),以及胡运明博士(第 2 章)和张广平博士(第 5 章和第 11 章)。王中光教授本人翻译了所有其余章节,他并且是整个翻译工作的组织者。对于王中光教授和他的合作者在翻译中所表现出的热心、博学和内行,我表示衷心的感谢,我也感谢中文版的责任编辑杜豪年教授。中国工程科学院前任副院长和中国科学院金属研究所名誉所长师昌绪教授为本书中文第 2 版写了译序,我对他表示最真挚的感谢。此外,我感谢中国国防工业出版社在本书中文版的出版工作中所做的努力和感谢剑桥大学出版社允许将本书第 2 版翻译成中文。

美国麻省理工学院(MIT)

材料科学与工程系

Subra Suresh

R.P. Simmons 教授

第1版序

材料的疲劳指的是材料在循环载荷作用下所发生的性能变化。有关材料疲劳形变和断裂的研究可追溯到19世纪。长期以来,这方面的工作主要集中于探寻提高疲劳裂纹萌生抗力和疲劳破坏抗力的工程设计方法。但是在最近的几十年中,伴随着“材料科学”和“断裂力学”的发展,关于材料疲劳的研究已发展成为科学研究和应用研究中的一个主要领域,它涉及众多的学科,诸如材料科学(包括金属、陶瓷、高分子和复合材料各学科)、机械、土木、航空工程、生物力学、应用物理和应用数学。由于对先进材料的重视程度日益增长,疲劳研究的范围正加快步伐继续拓宽。

撰写这本书的目的在于提出材料循环形变和疲劳断裂的原理。为此书中把重点放在阐明科学概念和机制上。但由于许多工程应用领域都极其关注材料的疲劳问题,因此只要可能,就把基本概念向实际情况推广延伸。

在撰写的过程中,我力图实现下列目标:

- (1) 尽可能用定量的语言对循环形变、疲劳裂纹萌生和扩展在力学、物理和微观机制上作完整的处理;
- (2) 提供一个了解金属、非金属和复合材料疲劳行为的统一科学基础;
- (3) 通过对各种处理疲劳问题方法的意义和局限性进行认真分析,对这些方法的前景作出合理的评价。

疲劳研究发展到今天,使得我们在交代本书要讨论哪些问题时可以不作任何说明。书中第1章将详细介绍整本书所包含的内容。对于其中的某些问题,为便于后面叙述,这里也提供了一些有关的背景材料。这本书可以作为对材料疲劳行为感兴趣的研究人员的参考指南和研究生疲劳课程的教材,书中的有关章节也可用作机械工程、材料科学和其它相关领域中的高年级大学本科生和一年级研究生的导论性课程的教材,或者用作实习工程师的短期疲劳课程的教材。上材料力学行为课或断裂力学课的高年级大学本科生和研究生会发现,这本专著是他们的教科书的有用补充。

关于材料的疲劳已有大量资料发表,它们跨越一百多年的时间跨度,因此一本专著不可能覆盖这个学科的全部论题和结果。疲劳是一个存在大量经验性规律和矛盾观点的研究领域,这一事实使情况进一步复杂化。因此,为了使前面提到的撰写本书的目标能够均衡得到照顾,在挑选论题和参考资料时,我不得不依靠我自己的判断。我对于这一研究领域的认识是在过去12年中通过与许多美国和外国同事的合作、讨论和交往形成的;全书正文和参考文献目录中都引用了同事们的贡献。

在组织本书的各个章节时,我没有像许多材料科学专著的作者通常所做的那样,根据材料体系的成分或组织结构分类叙述。相反,对于类别广泛不同的材料,我提出对疲劳的统一处理方法,与此同时,指出组织结构在影响循环形变和疲劳断裂中的重要作用。前面

几章主要针对延性纯金属和合金,讨论疲劳机制和与疲劳有关的力学问题。后面几章把这些概念推广到脆性固体(例如陶瓷和陶瓷复合材料),以及半晶体和非晶固体(例如高分子和有机复合材料)。

我感谢向我提供了资料和原始照片的许多同事,他们是 R.W. Hertzberg, H. Kobayashi, T.C. Lindley, T. Nicholas, T. Ogawa, C.M. Rimnac, R.O. Ritchie 和 M.T. Takemori。我也感谢 J.R. Brokenbrough, C. Laird, M. Miller, H. Mughrabi, P. Neumann, R.M.N. Pelloux 和 A.K. Vasudevan, 他们阅读了各章的手稿,并提出了有帮助的意见。我要向 A.S. Argon 和 C.H. Shih 表示特别的谢意,前者对于基本概念的表述提供了有见识的建议,而后者热情地阅读了讨论断裂力学的所有章节的手稿。

多年以来,我的疲劳研究工作一直得到美国能源部、国家基金委员会和海军研究机构的资助,我非常感谢它们的支持。我在布朗(Brown)大学工程分部固体力学与材料科学小组的同事和学生通过提供富有启发性的和友好的学术环境,对于我的研究工作作出了巨大贡献。

写这本书的计划是在 R.W. Cahn 的鼓励和支持下萌发的。在准备手稿的整个过程中,他的热情和对这一工作的兴趣给我提供了强大的动力。还应当特别提到剑桥大学出版社的 R. Bentley, S. Capelin 和 I. Pizzie, 他们对手稿进行了有效的编辑,对我的询问和担心总能及时做出反应。T. Judd 在帮我准备图稿中,技术娴熟。

我要向我的妻子 Mary 表达我的深切感谢之情,感谢她在工作中的支持、献身和耐心。我们的小女儿 Nina 和 Meera 在我许多小时专心工作的间隙中与我作伴,使我可以获得令人开心的短暂休息。

最后,我愿意把这本书献给我母亲 Lakshmi 的六十岁生日。她为我的教育做出了无数牺牲,对此我衷心表示感谢。

S. Suresh

第2版序

本书第1版是剑桥大学出版社固态科学丛书中的一本研究专著,首次出版以来,在学生、工程师和研究人员中间赢得了广大读者,其范围大大超出了最初的设想。为适应这一情况,现在有必要准备本书的第2版,对第1版进行修订,包括增补一些新近的资料、例题、案例研究和习题。为了在纳入这些新的内容的时候有最大的灵活性,本书第2版将不再以固态科学丛书的一本研究专著出版,而是以剑桥大学出版社的独立著作出版。

在第2版的撰写中,我遵循了第1版前言中所提出的目标。为了把新增加的内容有机地组合起来,本书做了如下安排。第1章介绍了疲劳研究的内容和历史发展过程,以及一些必要基础的背景资料,然后,本书分为四篇。第1篇广泛介绍了延性固体、脆性固体和半晶或非晶固体的循环形变和疲劳裂纹萌生;第2篇接着对疲劳设计的应力方法和应变方法进行了讨论;然后在第3篇中分章介绍了断裂力学原理,以及延性固体、脆性固体和半晶或非晶固体疲劳裂纹扩展的特性;第4篇包含一些新近的问题,除分章介绍恒幅和变幅下的裂纹扩展阻滞、疲劳小裂纹和环境作用以外,还开辟新的一章讨论接触疲劳。本书的每一章都包含有最新的资料和参考文献,以及案例研究和实际问题。

本书第1版发行以来,许多国家的众多学生、研究人员和工程师提供了有价值的信息反馈,提出了建设性的批评和建议。在中国科学院的资助下,本书第1版被译成中文。中国沈阳的材料疲劳与断裂国家重点实验室的王中光及其同事们的工作值得给予特别的感谢,他们辛勤地翻译了本书的第1版,并提出了许多有益的建议。在保持撰写本书的主要目标的同时,我尽可能在第2版中采纳来自各方面的建议。我也曾将本书的第1版和第2版的手稿作为麻省理工学院、哈佛大学和布朗大学的研究生教材使用。

我感谢向我提供了资料和原始照片的许多同事,他们是 H. Azimi, U. Essmann, W. Milligan, T. Nakamura, A. Pineau, R.O. Ritchie 和 D.F. Socie。有些同事,特别是 J. Dominguez, T.C. Lindley, F.A. McClintok, T. Nicholas 和 L. Pruitt,热情地阅读了一些章节的手稿,并提出了有帮助的意见。在第2版的准备过程中,我曾有幸与 A.E. Giannakopoulos, L.P. Kubin, H. Mughrabi 和 C.F. Shih 四位同事频繁交往,他们在关键参考文献的选择、实际问题的求解和内容表述的改进等诸多方面提出了有帮助的批评和建议,我衷心感谢他们博学的指点和对本书的强烈兴趣。

我还要感谢剑桥大学出版社的 S. Capelin,他对撰写本书的计划给予了有力的和持续的支持,并允许我有较大的准备手稿的灵活性。特别值得提出的是 K. Greene, D. LaBonte, C.-T. Lin 和 L. Ward,他们热情地帮助我准备了图稿和参考文献。

多年以来,我的疲劳研究工作一直得到美国能源部、海军研究机构、空军科学研究机构和国家基金委员会的资助,我非常感谢它们的支持。麻省理工学院(MIT)材料科学与工程系,通过授予我 R.P. Simmons 基金设立的教授职位,给我提供了撰写第2版的自由

和时间,我对此表示感谢。此外,我要感谢瑞典科学研究委员会,它在斯德哥尔摩的皇家工学院(KTH)给我提供了1996—1998年度瑞典国家工程讲座的位置,第2版中大部分新内容是利用这个机会写成的。我要向瑞典皇家工学院(KTH)固体力学和材料科学与工程系的同事们表示感谢,感谢他们对我在斯德哥尔摩工作期间所给予的热情款待。

最后,我要向我的妻子 Mary 和我们的女儿 Nina 和 Meera 表达我的深切感激之情,感谢他们在本书的整个写作过程中的耐心和支持,没有他们的关心、亲情和理解,本书的写作计划是不可能完成的。

Suresh

1997年10月

内 容 简 介

本书在首版的基础上,在结构和内容方面进行了较大的修改、调整和补充,更合理地反映了材料疲劳领域的研究和应用成果。

本书从微观和连续介质概念两方面讨论了材料的循环形变以及疲劳裂纹的萌生和扩展的基本过程和机制。它从延性纯金属和合金入手,同时也广泛涉及脆性固体、半晶和非晶固体、层状和复合材料等先进材料。书中对上述大量的、门类各不相同的材料的疲劳现象作了综合分析,强调微观组织结构对循环形变和疲劳断裂的重要影响,并指出现有各种宏微观疲劳模型的局限性和优缺点。为尽可能把科学概念推广用来说明实际问题,每章都有例题和疲劳失效的典型案例分析。各章最后都附有习题。

本书可供从事材料及其相关领域工作的,特别是材料疲劳学科工作的教学、科研及工程技术人员阅读,并可作为有关专业的研究生和大学本科生的教科书或课外参考书。

目 录

第1章 引言和综述	(1)
1.1 研究内容及其历史发展过程	(1)
1.1.1 案例研究:疲劳和彗星号客机	(5)
1.2 疲劳设计方法	(8)
1.2.1 总寿命法	(8)
1.2.2 损伤容限法	(9)
1.2.3 不同方法的比较	(10)
1.2.4 “安全-寿命”和“失效-安全”概念	(10)
1.2.5 案例研究:目标退役	(11)
1.3 机理性基础知识的重要性	(12)
1.4 连续介质力学	(13)
1.4.1 线弹性原理	(14)
1.4.2 应力不变量	(15)
1.4.3 塑性原理	(16)
1.4.4 线性粘弹性原理	(19)
1.4.5 粘塑性和粘性蠕变	(21)
1.5 延性单晶体的形变	(21)
1.5.1 分解切应力和切应变	(22)
习 题	(24)
第1篇 循环形变和疲劳裂纹萌生	
第2章 延性固体的循环形变	(26)
2.1 单晶体的循环应变硬化	(27)
2.2 单晶体的循环饱和	(28)
2.2.1 单向与循环塑性应变的比较	(30)
2.3 循环硬化的不稳定性	(31)
2.3.1 例题:活动滑移系的确定	(32)
2.3.2 位错脉络的形成	(34)
2.3.3 脉络结构的基本尺度	(36)
2.4 沿驻留滑移带的形变	(36)
2.5 驻留滑移带的位错结构	(37)

2.5.1 复合模型	(40)
2.5.2 例题:位错偶极子和循环形变	(41)
2.6 驻留滑移带非弹性行为的本构模型	(42)
2.6.1 一般特征	(42)
2.6.2 驻留滑移带的硬化	(43)
2.6.3 驻留滑移带与自由表面相交部位的硬化	(43)
2.6.4 卸载和再加载	(43)
2.6.5 空位的产生	(44)
2.7 驻留滑移带的形成	(45)
2.7.1 电子显微镜观察	(45)
2.7.2 静态或能量模型	(45)
2.7.3 自组织位错结构的动态模型	(48)
2.8 迷宫结构和胞结构的形成	(49)
2.8.1 例题:多滑移	(50)
2.9 晶体取向和多滑移的影响	(51)
2.10 案例研究:工业用面心立方合金晶体	(53)
2.11 面心立方晶体中单向形变与循环形变的比较	(56)
2.12 体心立方单晶体的循环形变	(57)
2.12.1 体心立方晶体在疲劳过程中的形状变化	(57)
2.13 六方密堆单晶体的循环形变	(59)
2.13.1 钛单晶体的基本特征	(59)
2.13.2 钛单晶体的循环形变	(59)
习 题	(60)
第3章 延性多晶固体的循环形变	(61)
3.1 晶界和多滑移效应	(61)
3.1.1 面心立方金属单晶体与多晶体的比较	(62)
3.1.2 织构效应	(63)
3.2 面心立方双晶体的循环形变	(63)
3.2.1 例题:独立滑移系的数目	(64)
3.3 多晶体的循环硬化和软化	(65)
3.4 合金化、交滑移和层错能的影响	(67)
3.5 沉淀效应	(69)
3.6 Bauschinger 效应	(69)
3.6.1 术语	(70)
3.6.2 机制	(70)
3.7 适应现象	(72)
3.8 单轴疲劳和多轴疲劳的连续介质模型	(72)
3.8.1 并联亚单元模型	(74)
3.8.2 加工硬化模量场	(76)

3.8.3 循环塑性的双表面模型	(78)
3.8.4 其它方法	(80)
3.9 循环蠕变或棘齿效应	(81)
3.10 金属基复合材料的热循环	(82)
3.10.1 热弹性形变	(82)
3.10.2 热疲劳的特征温度	(83)
3.10.3 热循环过程中的塑性应变累积	(85)
3.10.4 基体应变硬化的影响	(86)
3.10.5 例题:金属基复合材料热疲劳的临界温度	(87)
3.11 层状复合材料的热循环	(88)
3.11.1 双层材料的热弹性形变	(89)
3.11.2 薄膜极限:Stoney 公式	(91)
3.11.3 热疲劳的特征温度	(91)
习 题	(93)
第4章 延性固体的疲劳裂纹萌生	(95)
4.1 表面粗糙度和疲劳裂纹萌生	(95)
4.1.1 早期的观察和观点	(95)
4.1.2 电子显微镜观察	(97)
4.2 空位偶极子模型	(99)
4.3 裂纹沿驻留滑移带的萌生	(102)
4.4 表面在裂纹萌生中的作用	(103)
4.5 裂纹萌生的计算模型	(103)
4.5.1 空位扩散	(103)
4.5.2 数字模拟	(104)
4.5.3 例题:空位效应	(104)
4.6 环境对裂纹萌生的影响	(106)
4.7 循环滑移的运动学不可逆性	(107)
4.8 裂纹沿晶界和孪晶界的萌生	(107)
4.9 工业合金中的裂纹萌生	(110)
4.9.1 夹杂和气孔近旁的裂纹萌生	(110)
4.9.2 微观力学模型	(112)
4.10 环境对工业合金疲劳裂纹萌生的影响	(112)
4.11 应力集中部位的裂纹萌生	(113)
4.11.1 远场循环压缩中的裂纹萌生	(114)
习 题	(117)
第5章 脆性固体的循环形变和裂纹萌生	(119)
5.1 脆性的分级	(119)
5.2 脆性固体的循环形变模式	(120)
5.3 高脆性固体	(121)

5.3.1 机制	(121)
5.3.2 本构模型	(122)
5.3.3 循环载荷作用的可能影响	(126)
5.3.4 高温行为	(127)
5.4 半脆性固体	(129)
5.4.1 位错塞积引起的裂纹形核	(129)
5.4.2 例题:形成不可滑位错的 Cottrell 机制	(129)
5.4.3 循环形变	(131)
5.5 相变增韧陶瓷	(133)
5.5.1 现象学	(133)
5.5.2 本构模型	(135)
5.6 远场循环压缩中的疲劳裂纹萌生	(137)
5.6.1 例题:远场循环压缩中的裂纹萌生	(140)
习 题	(141)
第 6 章 非晶固体的循环形变和裂纹萌生	(143)
6.1 半晶固体和非晶固体的形变特征	(143)
6.1.1 形变的基本特点	(143)
6.1.2 银纹化和剪切带的形成	(143)
6.1.3 晶体材料与非晶体材料循环形变的比较	(145)
6.2 循环应力-应变响应	(146)
6.2.1 循环软化	(146)
6.2.2 热效应	(147)
6.2.3 例题:滞后加热	(148)
6.2.4 温升的实验观察	(149)
6.2.5 破坏模式的影响	(150)
6.3 应力集中部位的疲劳裂纹萌生	(151)
6.4 案例研究:膝盖整体替代件的压缩疲劳	(153)
习 题	(155)
第 2 篇 疲劳设计的总寿命法	
第 7 章 应力-寿命法	(157)
7.1 疲劳极限	(158)
7.2 平均应力对疲劳寿命的影响	(160)
7.3 累积损伤	(162)
7.4 表面处理的影响	(163)
7.5 统计分析	(165)
7.5.1 例题:表面处理的影响	(167)
7.6 案例研究:飞机涡轮发动机的高周疲劳	(167)

7.7 聚合物的应力-寿命响应	(169)
7.7.1 一般描述	(169)
7.7.2 机制	(170)
7.8 有机复合材料的疲劳	(170)
7.8.1 非连续增强复合材料	(170)
7.8.2 连续纤维增强复合材料	(171)
7.9 应力集中效应	(172)
7.9.1 对称循环载荷作用	(172)
7.9.2 缺口和平均应力的综合影响	(173)
7.9.3 不扩展的拉伸疲劳裂纹	(173)
7.9.4 例题:缺口效应	(174)
7.10 多轴循环应力	(175)
7.10.1 比例和非比例载荷作用	(175)
7.10.2 多轴疲劳载荷的有效应力	(176)
7.10.3 拉伸与扭转共同作用的应力-寿命法	(177)
7.10.4 临界平面法	(178)
习题	(181)
第8章 应变-寿命法	(182)
8.1 基于应变的总寿命法	(182)
8.1.1 低周疲劳寿命与高周疲劳寿命的区分	(182)
8.1.2 过渡寿命	(183)
8.1.3 例题:金属基复合材料的热疲劳寿命	(184)
8.2 缺口件的局部应变法	(186)
8.2.1 Neuber 分析	(186)
8.3 变幅循环应变和循环计数	(188)
8.3.1 例题:循环计数	(188)
8.4 多轴疲劳	(190)
8.4.1 有效应变的量度	(190)
8.4.2 案例研究:临界破坏平面	(191)
8.4.3 多轴疲劳的不同开裂模式	(193)
8.4.4 例题:多轴加载破坏的临界平面	(194)
8.5 非同相加载	(197)
习题	(198)
第3篇 疲劳设计的损伤容限法	
第9章 断裂力学原理及其在描述疲劳中的应用	(199)
9.1 Griffith 断裂理论	(199)
9.2 能量释放率和裂纹扩展驱动力	(200)

9.3 线弹性断裂力学	(202)
9.3.1 断裂的宏观模式	(202)
9.3.2 平面问题	(203)
9.3.3 K 控制的条件	(208)
9.3.4 断裂韧性	(209)
9.3.5 疲劳裂纹扩展的描述	(209)
9.4 C 和 K 的等效性	(210)
9.4.1 例题:双悬臂梁试样的 C 和 K	(210)
9.4.2 例题:鼓包试验中的应力强度因子	(212)
9.5 单向加载的塑性区尺寸	(213)
9.5.1 Irwin 近似	(213)
9.5.2 Dugdale 模型	(214)
9.5.3 Barenblatt 模型	(215)
9.6 循环加载的塑性区尺寸	(215)
9.7 弹-塑性断裂力学	(217)
9.7.1 J 积分	(217)
9.7.2 Hutchinson-Rice-Rosengren(HRR)奇异场	(218)
9.7.3 裂纹顶端张开位移	(218)
9.7.4 J 控制条件	(219)
9.7.5 例题:试样尺寸的要求	(220)
9.7.6 疲劳裂纹扩展的描述	(221)
9.8 裂纹顶端场的双参数描述	(223)
9.8.1 小范围屈服	(224)
9.8.2 大范围屈服	(225)
9.9 复合型断裂力学	(225)
9.10 延性固体的 I-II 复合型断裂	(226)
9.11 裂纹偏折	(228)
9.11.1 分叉弹性裂纹	(229)
9.11.2 裂纹偏折引起的多轴断裂	(230)
9.12 案例研究:飞机机身的损伤容限设计	(231)
习 题	(232)
第 10 章 延性固体的疲劳裂纹扩展	(234)
10.1 裂纹扩展的描述	(234)
10.1.1 断裂力学方法	(234)
10.1.2 疲劳寿命计算	(236)
10.2 疲劳裂纹扩展的微观阶段	(237)
10.2.1 第 I 阶段疲劳裂纹扩展	(237)
10.2.2 第 II 阶段疲劳裂纹扩展	(237)
10.2.3 疲劳辉纹的形成模型	(238)