

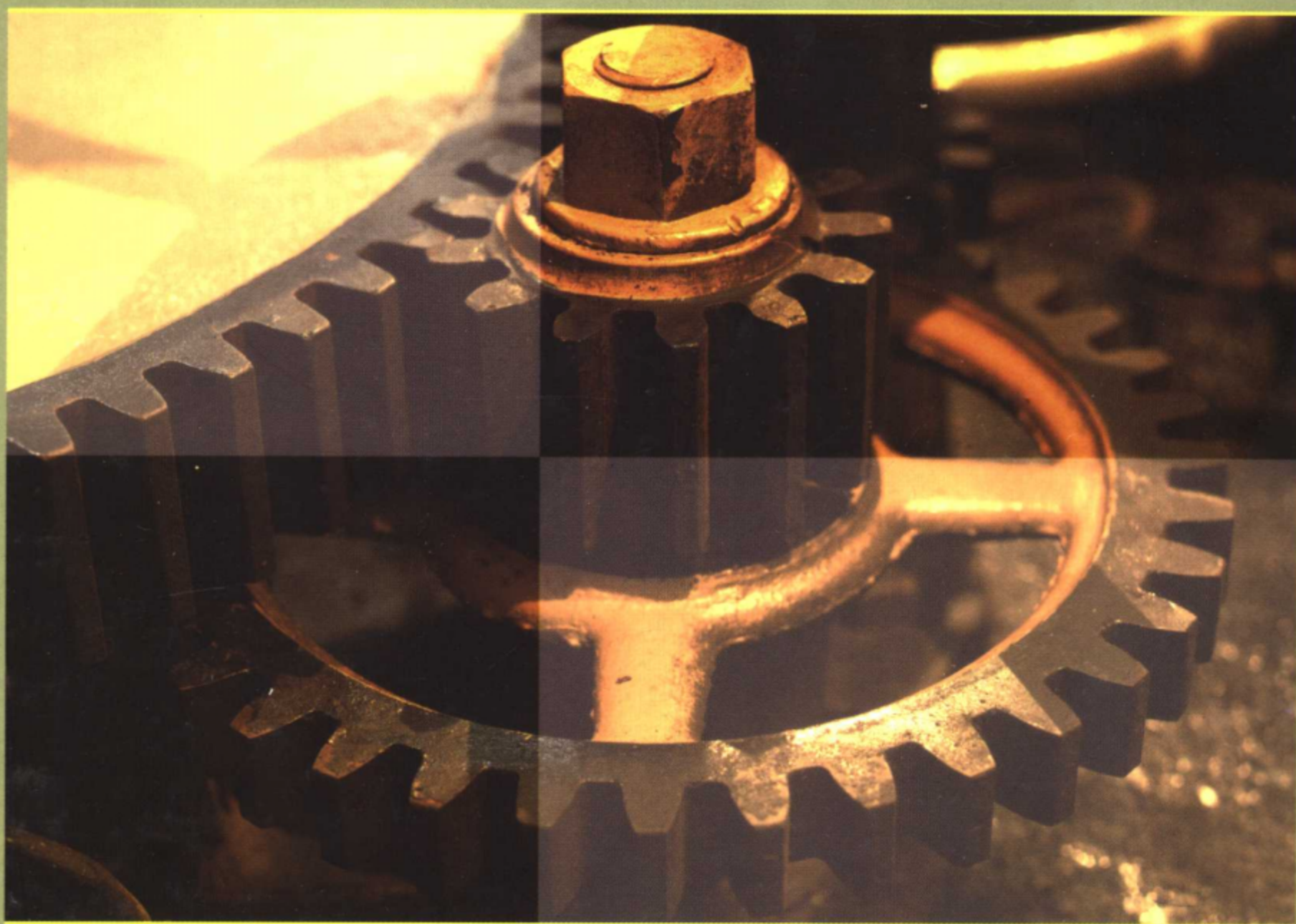


北京工业大学

“211工程”资助出版

# 多轴疲劳强度

尚德广 王德俊 © 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

(TH-0215.0101)

科学出版社

电话: 010-64019417

E-mail: gcjs@mail.sciencep.com

销售分类建议: 机械

ISBN 978-7-03-018324-8



9 787030 183248 >

定价: 36.00 元

TH114  
344  
1=



北京工业大学  
“211 工程”资助出版

# 多轴疲劳强度

尚德广 王德俊 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书结合力学、机械学和材料学等学科,从理论到试验阐述多轴疲劳强度理论。主要内容包括:绪论,多轴疲劳力学基础,材料的多轴循环应力应变特性,多轴疲劳裂纹扩展机理与断口特征,多轴循环应力应变关系,多轴疲劳损伤参量,多轴疲劳损伤累积模型,多轴疲劳寿命预测方法,变幅多轴疲劳,缺口多轴疲劳,高温多轴疲劳及有限元分析在多轴疲劳中的应用。本书是一本论述多轴疲劳强度理论和反映机械疲劳强度学科内容的书籍,书中大部分内容为作者从事多轴疲劳研究的相关成果,同时穿插介绍了国内外多轴疲劳研究领域的一些最新进展。

本书可作为机械、航空、固体力学等专业研究生的参考书,也可供相关专业的高校教师、工程设计人员和科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

多轴疲劳强度/尚德广,王德俊著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018324-8

I. 多… II. ①尚… ②王… III. 机械疲劳理论 IV. TH114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 010679 号

责任编辑:沈 建/责任校对:邹慧卿

责任印制:安春生/封面设计:高海英

**科 学 出 版 社 出 版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年2月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1—3 000 字数:296 000

**定价:36.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 总 序

“211工程”是我国建国以来教育领域唯一的国家重点建设工程，面向21世纪重点建设一百所高水平大学，使其成为我国培养高层次人才，解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地，形成我国高等学校重点学科的整体优势，增强和完善国家科技创新体系，跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛，尤其是1400所地方高校已经占全国高校总数的90%，成为我国高等教育实现大众化的重要力量，成为为区域经济和社会发展服务的重要生力军，“211工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用。

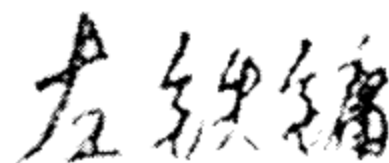
在北京市委市政府的高度重视和大力支持下，1996年12月我校通过了“211工程”部门预审，成为北京市属高校唯一进入国家“211工程”重点建设的百所大学之一，2001年6月以优异成绩通过国家“211工程”一期建设验收，2002年10月顺利通过国家“211工程”二期建设可行性论证。我校紧紧抓住这一难得的历史性发展机遇，根据首都经济和社会发展的需要，坚持“科学定位，找准目标，发挥优势，办出特色”的办学方针和“立足北京，融入北京，辐射全国，面向世界”的定位指导思想，以学科建设为龙头，师资队伍建设为关键，重点建设了电子信息、新材料、光机电一体化、城市建设与交通、生物医药、环境与能源、经济与管理类学科，积极发展了人文社会科学类学科，加强了基础类学科，形成了规模、层次及布局合理的学科体系，实现了从工科大学向以工为主，理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学转变，从教学型大学向教学研究型大学的转变。

我校现有9个博士后站，6个一级博士点，25个二级博士点，55个硕士点。教师中有院士6人，博士生导师150人，教授230人，专任教师有博士学位的达到30%。我校年科研经费达到23000万元，年获国家自然科学基金项目近40项，材料学科获百篇优秀博士学位论文奖，抗震减灾学科与交通学科2002年分别获得国家科技进步二等奖，计算机学科2003年获得国家科技进步二等奖，光电子学科在新型高效高亮度半导体发光二极管、新医药与生物工程学科在国家P3实验室建设和抗HIV药物的研制、环境与能源工程学科在奥运绿色建筑标准与大气环境治理、光学学科在大功率激光器研制、管理科学与工程学科在国家中长期能源规划等方面取得了特色鲜明的科研成果。

为了总结和交流北京工业大学“211工程”建设的科研成果，学校设立“211工程”专项资金，资助出版系列学术专著，这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北工大未来，我们任重而道远。我坚信，只要我们珍惜“211工程”建设和奥运羽毛球馆建设这两大机遇，构建高层次学科体系，营造优美的大学校园，我校在建设成为国内一流大学的进程中就一定能够为“新北京、新奥运”的宏伟蓝图做出自己应有的贡献。

北京工业大学校长  
中国科协副主席  
中国工程院院士

Handwritten signature in black ink, reading '左铁镛' (Zou Taofu).

2004年3月

## 前 言

实际应用中的机械结构多在循环载荷下工作，其载荷模式可能为单轴循环加载，也可能为多轴循环加载，其主要失效形式之一为疲劳断裂。1982年美国联邦政府调查结果表明，因机械设备疲劳寿命设计不当造成的事故损失占国民经济总产值的4.4%，由疲劳断裂引起的事故占机械结构失效破坏总数的95%。由此可见，开展复杂结构寿命预测设计理论及方法的研究已成为国内外机械工程设计中的重要研究课题。这对于提高产品设计水平，降低生产成本，延长使用寿命，取得可观的经济效益等方面都具有重要的意义，也是我国机械产品在世界机电市场上提高竞争力必不可少的设计手段之一。

尽管疲劳断裂的研究有一百多年的历史，但疲劳断裂事故仍未得到完全的控制。其主要原因之一是过于简化集中研究简单的单轴疲劳问题。服役中的各种航空航天飞行器、压力容器、核电站、发电厂以及交通运输工具中的各种主要零部件并不单单承受简单的单轴疲劳循环载荷作用，而通常是承受复杂的多轴循环载荷作用。目前结构抗疲劳设计和寿命分析中广泛使用的单轴疲劳理论已积累了丰富的材料性能数据和使用经验。但由于实际工程结构和设备中的重要结构零部件，大多数在复杂的多轴载荷作用下服役，传统的单轴疲劳理论远远满足不了高科技产品强度和寿命等设计方面的需要。因而近些年来国际疲劳界对更为符合实际的多轴疲劳研究普遍重视起来，并已成为疲劳研究的热点。

从1982年起相继在美国、英国、德国、波兰以及葡萄牙等国家多次召开了多轴疲劳国际学术会议，近几届国际疲劳大会也将多轴疲劳研究设了几个重要的研究专题。从这几次国际多轴疲劳会议及国际疲劳大会上的论文内容可以看出，多轴疲劳研究从80年代初由单纯的比例与非比例加载下材料的疲劳行为发展到现在如何针对工程实际载荷情况进行结构多轴疲劳损伤及寿命预测方面上来。如何完善多轴疲劳理论，准确预测疲劳寿命，是每个科技工作者和工程设计人员所要努力解决的重要问题之一。

近年来，国内一些高校、科研院所也先后开展了多轴疲劳的研究工作。本书是基于作者近年来在国家自然科学基金、高等学校博士点基金、北京市自然科学基金等资助下的部分研究成果而形成的。为了保持全书的完整性，书中也穿插介绍了国内外多轴疲劳研究的一些新的进展。

本书共包括12章内容：第1章绪论部分首先介绍了疲劳研究的历史和多轴疲劳研究的发展现状；第2章介绍了多轴疲劳力学基础，它是正确理解和解决多

轴疲劳问题的基础；第3章着重介绍了多轴循环载荷下的应力应变特性；第4章针对拉扭薄壁管，详细介绍了多轴疲劳裂纹扩展机理与断口特征；第5章介绍了多轴循环应力应变关系，为多轴疲劳损伤的计算和寿命的预测打下基础；第6章以拉扭薄壁管为研究对象，介绍了基于临界面法的多轴疲劳损伤参量的确定方法；第7章在单轴非线性疲劳损伤模型的基础上建立了多轴非线性疲劳损伤模型；第8章介绍了多轴疲劳寿命预测方法；第9章介绍了国内外变幅多轴疲劳的研究成果；第10章介绍了缺口多轴疲劳问题；第11章介绍了高温多轴疲劳；第12章介绍了有限元分析在多轴疲劳中的应用。全书由北京工业大学尚德广教授完成初稿的撰写工作，最后由东北大学王德俊教授完成全书的修改和审定工作。

作者在研究多轴疲劳过程中，曾得到了北京航空航天大学高镇同院士、东北大学徐灏教授、中国科学院金属研究所王中光研究员、清华大学俞新陆教授、北京机械强度研究中心阎楚良研究员、北京科技大学唐俊武教授、南京航空航天大学姚卫星教授、孙良新教授、王鑫伟教授、美国 ALABAMA 大学 M. E. Barkey 教授等人的支持与帮助，特表示衷心的感谢。

感谢国家自然科学基金（59775030，10172010，50575004，50135010）、北京市自然科学基金（3042003）、北京市高校拔尖创新人才等项目的资助。

感谢博士研究生孙国芹、王瑞杰、贾冠华，硕士研究生刘克格、蔡能、陈建华、丁雷、沈通、李立森、邓静、李承山、马新平等。他们在本书打印、插图、校对和整理资料过程中付出了辛勤的劳动，本书的部分内容的形成也得益于他们的贡献。

在与国内外同行专家的学术交流中得到了很多帮助和有用的信息资料，丰富了本书的内容，特向他们表示感谢。

多轴疲劳是一个新的研究课题，本书仅包括一些有限的多轴疲劳研究内容。由于作者的研究内容还不够广泛和深入，加之水平有限和时间仓促，书中的错漏之处在所难免，敬请广大同行和读者批评指正。

作者

2006年11月于北京



# 目 录

总序

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 疲劳研究的发展简史 .....	1
1.2 多轴疲劳的概念 .....	1
1.3 多轴疲劳研究发展简况 .....	2
1.3.1 多轴疲劳试验技术简介 .....	2
1.3.2 多轴疲劳理论的发展 .....	5
参考文献.....	8
<b>第 2 章 多轴疲劳力学基础</b> .....	10
2.1 应力状态分析.....	10
2.1.1 一点的应力状态 .....	10
2.1.2 主应力与应力主方向 .....	11
2.1.3 平面问题中的主应力 .....	12
2.1.4 应力不变量 .....	13
2.1.5 等倾斜面上的正应力与剪应力 .....	14
2.1.6 静水应力.....	15
2.1.7 应力张量的分解 .....	16
2.2 应变状态分析.....	18
2.2.1 应变及几何方程 .....	18
2.2.2 主应变 .....	21
2.2.3 应变张量的分解 .....	22
2.2.4 等效应变.....	22
2.3 弹性应力应变关系.....	23
2.4 弹塑性应力应变关系.....	24
2.4.1 各种常用的理想化材料模型的本构方程 .....	24
2.4.2 屈服条件.....	26
2.4.3 塑性本构关系 .....	29
参考文献 .....	34

<b>第 3 章 材料的多轴循环应力应变特性</b> .....	35
3.1 单轴循环应力-应变特性 .....	35
3.1.1 工程应力应变与真应力应变 .....	35
3.1.2 真应力(应变)与工程应力(应变)之间的关系 .....	35
3.1.3 材料的循环应力-应变曲线 .....	36
3.1.4 材料的 Masing 特性 .....	38
3.1.5 材料的记忆特性 .....	38
3.1.6 载荷顺序的影响 .....	38
3.1.7 循环硬化和循环软化 .....	40
3.2 多轴循环应力应变关系测试 .....	42
3.2.1 试验材料与机械性能 .....	42
3.2.2 多轴疲劳试样 .....	42
3.2.3 试验方法及条件 .....	42
3.2.4 多轴循环应力应变关系试验 .....	43
3.3 多轴循环应力-应变曲线 .....	44
3.3.1 多轴循环加载下材料的滞回线特性 .....	44
3.3.2 比例加载下循环应力-应变曲线 .....	46
3.3.3 非比例加载下循环应力-应变曲线 .....	46
3.4 多轴循环硬化/软化特性 .....	48
3.4.1 多轴低周疲劳试验 .....	48
3.4.2 平均应变对多轴循环特性及疲劳寿命的影响 .....	50
3.5 加载路径对多轴循环特性的影响 .....	51
参考文献 .....	57
<b>第 4 章 多轴疲劳裂纹扩展机理与断口特征</b> .....	59
4.1 多轴疲劳裂纹萌生与扩展 .....	59
4.1.1 多轴疲劳裂纹的萌生 .....	59
4.1.2 多轴疲劳裂纹扩展 .....	60
4.2 表面多轴疲劳裂纹观测 .....	60
4.2.1 多轴疲劳裂纹萌生位向 .....	60
4.2.2 多轴疲劳裂纹扩展特性 .....	63
4.3 多轴加载下的疲劳断口特征 .....	65
4.3.1 多轴比例加载下的断口特征 .....	66
4.3.2 非比例加载条件下多轴疲劳断口特征 .....	67
4.4 非比例加载下的循环附加强化行为 .....	69
参考文献 .....	72

<b>第 5 章 多轴循环应力应变关系</b> .....	73
5.1 循环变形基础知识 .....	73
5.1.1 等向强化 .....	73
5.1.2 随动强化 .....	74
5.1.3 非比例循环强化 .....	76
5.2 多轴循环塑性模型 .....	77
5.2.1 屈服函数 .....	77
5.2.2 流动法则 .....	78
5.2.3 硬化法则 .....	80
5.3 多轴比例循环加载下循环应力应变关系 .....	80
5.4 多轴非比例循环加载下循环应力应变关系 .....	82
5.5 基于临界面法的多轴非比例加载下循环应力应变关系 .....	86
参考文献 .....	88
<b>第 6 章 多轴疲劳损伤参量</b> .....	90
6.1 多轴疲劳破坏准则 .....	90
6.1.1 基于应力的疲劳破坏准则 .....	90
6.1.2 基于应变的疲劳破坏准则 .....	91
6.1.3 循环塑性功的疲劳破坏理论 .....	91
6.1.4 临界平面法 .....	92
6.2 基于临界面法的多轴疲劳损伤参量 .....	93
6.2.1 比例加载下的应力应变状态与非比例加载下的应变分析 .....	94
6.2.2 临界面上应变参数的确定 .....	97
6.2.3 多轴疲劳损伤参量的确定 .....	98
参考文献 .....	104
<b>第 7 章 多轴疲劳损伤累积模型</b> .....	107
7.1 单轴非线性疲劳损伤累积模型 .....	107
7.2 多轴疲劳损伤累积模型 .....	110
7.2.1 比例加载下多轴疲劳损伤累积模型 .....	110
7.2.2 非比例加载下多轴疲劳损伤累积模型 .....	112
7.3 多轴疲劳损伤累积模型在多级加载下的应用 .....	113
7.3.1 两级加载条件 .....	113
7.3.2 多级加载条件 .....	114
7.4 试验验证 .....	115
参考文献 .....	117

<b>第 8 章 多轴疲劳寿命预测方法</b> .....	118
8.1 基于静强度准则的多轴疲劳寿命预测方法 .....	118
8.1.1 比例加载下的多轴疲劳寿命预测方法 .....	118
8.1.2 非比例加载下的寿命估算方法 .....	120
8.2 多轴疲劳寿命预测的能量方法 .....	121
8.3 多轴疲劳寿命估算的临界平面法 .....	122
8.3.1 比例加载下的临界平面法 .....	122
8.3.2 非比例加载下的临界面法 .....	123
8.4 能量法与临界面法的组合法 .....	124
8.5 几种多轴疲劳寿命预测方法的比较 .....	124
参考文献.....	128
<b>第 9 章 变幅多轴疲劳</b> .....	130
9.1 多轴循环计数方法 .....	130
9.2 变幅多轴疲劳损伤模型 .....	137
9.2.1 基于正应变或剪应变的多轴疲劳损伤模型 .....	137
9.2.2 Bannantine 模型 .....	138
9.2.3 Fatemi-Socie 模型 .....	138
9.2.4 Wang-Brown 模型 .....	138
9.2.5 统一型多轴疲劳损伤模型 .....	139
9.3 变幅多轴疲劳寿命预测方法 .....	140
9.3.1 Bannantine-Socie 方法 .....	140
9.3.2 Wang-Brown 方法 .....	141
9.3.3 权值平均最大剪应变临界面方法 .....	143
9.3.4 统一型多轴疲劳损伤参量临界面方法 .....	143
参考文献.....	146
<b>第 10 章 缺口多轴疲劳</b> .....	147
10.1 多轴加载下缺口应力应变分析.....	149
10.1.1 比例加载下缺口多轴应力应变分析方法 .....	149
10.1.2 非比例加载下缺口多轴应力应变分析方法 .....	155
10.2 多轴加载下缺口构件的寿命预测方法的比较.....	161
10.3 多轴非比例加载下缺口件疲劳寿命预测的临界面法.....	164
10.3.1 剪切形式的多轴疲劳损伤参量 .....	164
10.3.2 多轴加载下缺口件疲劳寿命预测 .....	165
10.3.3 试验验证 .....	166
参考文献.....	167

<b>第 11 章 高温多轴疲劳</b> .....	169
11.1 高温疲劳研究概况 .....	169
11.1.1 单轴高温疲劳研究 .....	169
11.1.2 高温多轴疲劳研究 .....	174
11.2 非比例加载下高温多轴疲劳行为 .....	176
11.2.1 高温多轴疲劳试验 .....	176
11.2.2 高温非比例加载下循环应力应变响应行为 .....	177
11.2.3 高温多轴循环加载下材料的循环硬化软化特性 .....	179
11.2.4 高温非比例加载下的循环附加强化行为 .....	181
11.3 变幅多轴加载下高温疲劳特性 .....	183
11.3.1 高温变幅多轴疲劳试验 .....	183
11.3.2 纯扭循环载荷下的材料疲劳特性 .....	185
11.3.3 非比例变幅多轴循环载荷块下的材料疲劳特性 .....	185
11.3.4 混合多轴循环加载块下的材料疲劳特性 .....	186
11.3.5 高温变幅多轴加载下疲劳寿命结果分析 .....	188
11.3.6 高温非比例加载下疲劳断口形貌 .....	189
11.4 高温比例与非比例对称加载下多轴疲劳寿命预测方法 .....	191
11.4.1 多轴疲劳损伤的计算 .....	191
11.4.2 高温多轴蠕变-疲劳寿命预测模型 .....	198
11.4.3 试验验证 .....	199
参考文献 .....	202
<b>第 12 章 有限元分析在多轴疲劳中的应用</b> .....	205
12.1 拉扭循环加载下弹塑性有限元分析方法 .....	205
12.1.1 多轴疲劳试验 .....	205
12.1.2 三维有限元建模 .....	205
12.1.3 边界条件和加载 .....	207
12.1.4 光滑薄壁管有限元计算结果 .....	208
12.1.5 缺口件多轴循环弹塑性有限元分析 .....	208
12.2 随机循环加载下弹塑性有限元分析方法 .....	211
12.2.1 随机循环加载下的弹塑性有限元分析基本原理 .....	211
12.2.2 随机加载下弹塑性有限元分析程序的编制 .....	215
12.2.3 程序算例 .....	217
12.3 基于有限元分析的局部等效应力应变场强度寿命预测法 .....	218
12.3.1 缺口局部等效应力应变场强度 .....	218
12.3.2 缺口局部疲劳损伤场范围的确定 .....	221

---

12.3.3	等效应力应变场强度疲劳寿命预测方法的步骤 .....	223
12.3.4	基于等效场强度原理的疲劳寿命预测结果的比较 .....	223
12.4	基于有限元分析的车轮多轴疲劳强度计算实例 .....	225
12.4.1	车轮的载荷工况 .....	226
12.4.2	有限元建模 .....	227
12.4.3	有限元计算结果 .....	228
12.4.4	车轮多轴疲劳安全系数的计算 .....	233
12.4.5	疲劳安全系数计算结果 .....	234
	参考文献 .....	234

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 疲劳研究的发展简史

疲劳是指材料或零件在循环载荷作用下,经过一段时间发生突然脆性断裂的现象。

1829 年德国人 Albert 首先对疲劳进行研究,他对铁质的矿山升降机焊接链条进行了反复加载实验,发现在一定的反复加载次数下,焊接链条发生了破坏现象<sup>[1]</sup>。

1839 年,法国人 Poncelet 首先使用了“疲劳”的概念来描述反复加载过程中材料或零件发生破坏的现象<sup>[2]</sup>。继这之后,德国人 Wöhler 于 1850 年设计了第一台疲劳试验机,并在 1871 年发表的论文中,系统地论述了疲劳寿命与循环应力之间的关系,提出了 S-N 曲线和疲劳极限的概念,奠定了金属疲劳研究的基础。

1870~1899 年, Gerber, Goodman 等提出了常规疲劳设计用的疲劳极限线图<sup>[3,4]</sup>。1881 年 Bauschinger 发现了循环软化现象<sup>[5]</sup>,1952 年被命名为 Bauschinger 效应,为后来研究循环应力应变关系奠定了基础。

1903 年, Ewing 和 Hunphrey 在 Wöhler 和 Bauschinger 工作的基础上发表了“金属在反复交变应力作用下的断裂”的经典论文<sup>[6]</sup>。

1923 年,英国人 Gough 在研究疲劳破坏机理时发现:金属材料在循环应力作用下,由于应变硬化的影响,所产生的反复塑性变形会随循环数的增加而变小。在应力幅低于疲劳极限的情况下,塑性变形将不会发生。在应力幅高于疲劳极限时,应变硬化达到一个极限值,将导致裂纹的形成,并于 1926 年出版了第一本疲劳专著<sup>[7]</sup>,为以后的疲劳研究做出了很大的贡献。

1924~1945 年 Palmgren-Miner 提出线性累积损伤理论。1954 年 Coffin 和 Manson 先后提出了应变寿命方程<sup>[8,9]</sup>,1961 年以后,逐步发展为局部应力-应变法。1977 年美国 SAE 出版了《复杂载荷下的疲劳》<sup>[10]</sup>,介绍了局部应力-应变法原理及其在实际工程中的应用,使局部应力-应变法得到了广泛的应用。

1935 年 Gough 研究了交变组合载荷下金属的强度问题,以后陆续开展了多轴疲劳方面的研究<sup>[11]</sup>。

## 1.2 多轴疲劳的概念

如果单纯从所受应力状态来分析,则疲劳大体上可分为单轴疲劳和多轴疲劳。

单轴疲劳是指材料或零件在单向循环载荷作用下所产生的失效现象,这时零件只承受单向正应力(应变)或单向切应力(应变),如只承受单向拉-压循环应力、弯曲循环应力或扭转循环应力。

多轴疲劳是指多向应力或应变作用下的疲劳,也称为复合疲劳。多轴疲劳损伤发生在多轴循环加载条件下,加载过程中有两个或三个应力(或应变)分量独立地随时间发生周期性变化。这些应力(应变)分量的变化可以是同相位的,按比例,也可以是非同相、非比例的。

服役中的各种航空航天飞行器、压力容器、核电站、发电厂以及交通运输工具中的一些主要零部件通常是承受复杂的多轴比例与多轴非比例交互循环载荷的作用。早期处理复杂应力状态下的多轴疲劳问题时,将多轴问题利用静强度理论等效成单轴状态,然后利用单轴疲劳理论处理复杂的多轴疲劳问题,这样的处理方法在处理比例加载下的多轴疲劳问题时是有效的。但实际工程结构和设备的重要结构零部件,很多是在非比例多轴加载作用下服役。由于非比例加载下的疲劳行为远不同于单轴或比例多轴疲劳加载下的特性,尤其在非比例变幅加载下,不能像单轴加载情况那样进行简单的循环计数,因此单纯利用传统的单轴疲劳理论来预测其疲劳损伤将会产生很大的困难。

### 1.3 多轴疲劳研究发展简况

疲劳理论发展到现在,在单轴疲劳方面,人们进行了全面、深入的研究,得到了比较成熟的理论和模型。但对于多轴疲劳,由于试验条件的限制,发展一直比较缓慢。直到20世纪50年代研制出闭环控制的电液伺服疲劳试验机,从而促进了疲劳试验技术的提高,进而推动了疲劳的研究发展。从20世纪70年代后期以来,人们认识到多轴疲劳的重要性,从事材料、力学以及机械工程等研究人员对材料在多轴循环加载下的本构关系和多轴疲劳的研究逐渐开展起来。

#### 1.3.1 多轴疲劳试验技术简介

近些年来,由于电液伺服多轴疲劳试验机的出现,使零构件在实际服役中所受的复杂载荷历史得到再现,为多轴疲劳研究提供了有力的手段,从而使人们能够深入地研究多轴疲劳机制,寻找提高多轴疲劳抗力的途径及精确地预测多轴疲劳寿命的方法,使多轴疲劳研究得到了很大的发展。目前比较典型的多轴疲劳试验机主要有三种,即拉-扭多轴疲劳试验机、弯-扭多轴疲劳试验机和双向拉压多轴疲劳试验机。这三种多轴疲劳试验机均采用较为先进的液压伺服系统,可以进行拉-扭(可加内压)、弯-扭、双轴拉压等多轴疲劳试验。

对于拉-扭多轴疲劳,一般采用薄壁管试件或带环型缺口的圆棒试件进行多轴



疲劳试验。试验过程中可单独施加同步或不同步的拉扭循环载荷。典型的拉-扭多轴疲劳试验机为 MTS809、MTS858 和 Instron1343 等。MTS809 电液伺服疲劳试验系统如图 1.1 所示,加载波形可以任意选择,可做对称循环和非对称循环拉扭多轴疲劳试验。该试验机与电子计算机配合,可以实现加载的自动控制,其电液伺服拉扭控制系统的工作原理如图 1.2 所示。

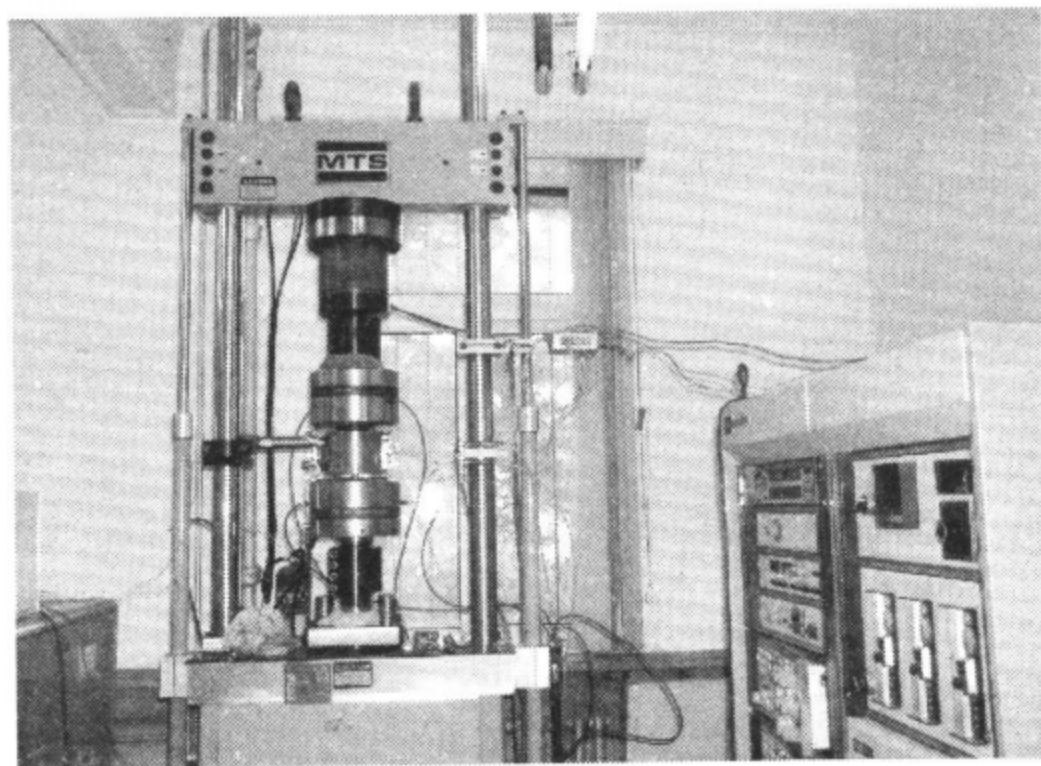


图 1.1 MTS809 电液伺服疲劳试验系统

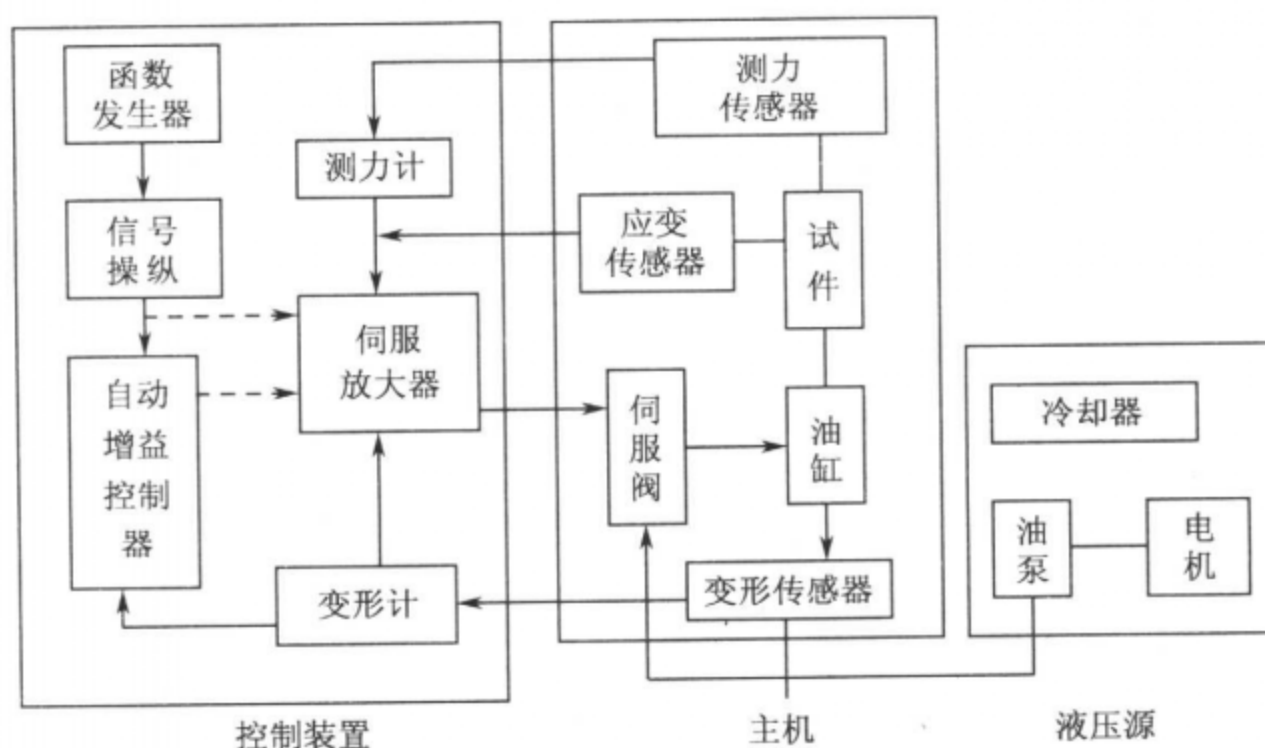


图 1.2 电液伺服拉扭疲劳试验系统原理图

试验系统的闭环控制过程为:在试验机操作过程中感测受控参量,并把这个信息传递给控制器;控制器把参量的瞬时值同参量的给定值进行比较,控制器自动调