

工程力学丛书·

疲劳强度

Fatigue Strength

徐 源



高等教育出版社

· 工程力学丛书 ·

疲 劳 强 度

Fatigue Strength

徐 灏

高 等 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书包括了疲劳强度学科的主要内容,反映了疲劳强度学科的最新进展,是目前国内外较系统的一本专著。本书将材料、力学和设计三方面的知识融为一体,从微观到宏观,从理论到应用,层次清晰,叙述简明,并配有习题。本书适用于机械、航空、工程力学、土建等类的有关专业,可作为研究生和高年级大学生疲劳强度课程的教材,也可供广大教师、研究人员和设计人员参考。

责任编辑 吴 向

工程力学丛书

(Engineering Mechanics Series)

疲 劳 强 度

(Fatigue Strength)

徐 灏

(Xu Hao)

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省衡水印刷厂印装

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷 字数440 000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数0 001— 2,630

ISBN 7-04-000934-X/TB·58

定价6.30元



作者简介

徐灏，江苏江阴人，1919年生，1943年毕业于西南联合大学机械系，现职东北工学院教授、博士生导师。历任国务院学位委员会第一、二届学科评议组成员，中国科学院技术科学部机械学科组成员，中国机械设计与传动学会第一届副理事长，东北工学院机械系主任、机械工程研究所所长，辽宁省机械设计学会第一、二届理事长，《机械设计》期刊第一届编委会主任委员，《中国大百科全书》机械工程基础编写组主编。长期从事机械设计理论研究，专长结构疲劳强度理论。先后出版十余本著作，八十年代出版的著作有：《安全系数和许用应力》、《疲劳强度设计》、《机械强度的可靠性设计》、《机械设计》。

徐灏

高等教育出版社出版的“工程力学丛书”是一套深入、全面、系统地阐述工程力学各分支学科基本理论和反映学科前沿水平的书籍；各书主要作者是当前工程力学界的著名学者。本丛书既是专著，又可作高等学校研究生教学之用，也可供力学教师、研究人员和工程技术人员学习参考。本丛书的出版将有助于促进我国科学技术的发展和工程力学教育水平的提高。

前 言

飞机、船舶、汽车、矿山机械、冶金机械、动力机械、起重运输机械、石油钻进设备，以及铁路桥梁等，其主要零件和结构件，大多在循环变化的载荷作用下工作，疲劳是其主要的失效形式。因此，疲劳强度对于设计各类承受循环载荷的机械和结构，成为重要的研究内容。

疲劳强度是一门新兴的边缘学科，它涉及材料、力学和设计三个学科领域。

进行疲劳强度设计，需要有材料的疲劳性能数据。但有时虽然认为选择了合适的材料，制成零件后，使用中仍有可能发生意外的疲劳断裂事故。这可能是由于设计者在某方面的疏忽、或偶然的过载、或零件制成后使用条件有了改变所致。这些现象都说明，材料的疲劳强度不等于零件的疲劳强度，所以设计理论是重要的。

在疲劳强度研究中的力学方法，从载荷统计、应力分析到疲劳寿命估算，都与经典力学方法很不相同。例如，在传统的静强度设计中，选择某一载荷水平作为设计载荷，设计中把载荷处理成常量。事实上，完全不承受疲劳载荷的零件和构件是极少的。如果把静载荷看成是疲劳载荷中的单调加载部分，并作为疲劳载荷的一个特例来处理，那末，零件或构件承受疲劳载荷是个客观的规律。据统计，在设备的断裂事故中，约80%属于疲劳断裂，这也说明了疲劳的普遍性。在疲劳载荷中，如把等幅循环载荷视作随机载荷的特例，则随机载荷谱的采集和处理、零件或构件在随机载荷作用下危险点的确定及其应力响应的计算等，与经典力学方法是不同的。这就需要发展与疲劳相适应的载

荷统计方法、材料在循环应力-应变下的力学行为的研究和材料的疲劳累积损伤理论等。此外，在弹塑性力学中，将材料视为一个理想的无裂纹的连续体。但是许多材料、零件和构件在制造过程中就形成了裂纹和缺陷，或者在使用期的某一阶段出现了裂纹。因此，需要研究微观裂纹发展成宏观裂纹的过程、宏观初始裂纹尺寸的确定、实际零件或构件中缺陷和裂纹的检测、缺陷转化为等效设计裂纹的方法和裂纹扩展理论等。这些都是属于疲劳力学的内容，是疲劳强度设计的基础。

上面的分析，说明了材料、力学和设计在疲劳强度学科中的地位 and 相互之间的关系。因此，作者企图将这三方面融合在一起加以论述，形成疲劳强度课程的体系。

作者长期从事疲劳强度的研究和教学工作，与东北工学院机械强度研究室的成员一起，在中国生产的钢材的疲劳性能试验、载荷谱统计、常规疲劳设计方法、淡水介质下的腐蚀疲劳、零件的寿命估算方法和蒙特卡罗模拟法在疲劳强度研究中的应用等方面，都进行了工作。这些工作汇同中外学者的研究成果，写成了本书。

本书共十四章，包括了疲劳强度学科的主要内容。书中附有习题，一部分是启发性的思考题，一部分是计算题，用以加深对学习内容的理解。本书可作为硕士研究生和高年级大学生的疲劳强度课程的教材，也可作为广大教师、研究人员和设计人员的参考书。

本书第九章、第十四章和全书的习题是作者和谢里阳同志共同编写的。本书承北京航空学院高镇同教授审阅，他提出了宝贵的意见，特此表示衷心的感谢。书中采用了中外学者的数据和资料，在此一并致谢。

徐 灏

1986年

主要符号表

a	裂纹尺寸
a_0	初始裂纹尺寸
a_c	临界裂纹尺寸
A	截面面积
b	形状参数, 疲劳强度指数
B	厚度
c	疲劳塑性指数
d	直径
D	直径, 疲劳损伤
e	名义应变
E	弹性模量
$E(x)$	随机变数 x 的均值
$f(x)$	概率密度函数
F	力, 失效概率
I	截面惯性矩
K	应力强度因子
K_I	张开型应力强度因子
K_c	断裂韧性
K_{Ic}	平面应变断裂韧性
K_{Iscg}	应力腐蚀断裂韧性
ΔK	应力强度因子幅度
K_o, K_r	有效应力集中系数
K'_o	(真实)应力集中系数(局部应力除以名义应力)
K'_r	(真实)应变集中系数
M	弯矩
MTBF	平均故障间隔

MTTF	失效前平均时间
n	工作安全系数, 子样容量
$[n]$	许用安全系数
n_e	有效子样容量
N	循环次数, 寿命
N_s	特征寿命参数
N_0	循环基数, 最小寿命参数, 裂纹形成寿命
N_D	裂纹扩展寿命
P	概率, 破坏概率, 功率
q	敏性系数
Q	相对应力梯度
r	半径, 应力比
R	半径, 可靠度
R'	可靠度下限
s	名义应力, 子样标准离差
Δs	名义应力幅度
s_1	应力(载荷)的标准离差
s_s	强度的标准离差
s^2	子样的方差
t	时间
T	温度, 扭矩
u_r	标准正态偏量
W	宽度
\bar{x}	子样均值
z	可靠度系数
α	应力强度因子系数, 线胀系数
α_s, α_r	理论应力集中系数
β	表面系数, 形状参数
ϵ	应变, 真实应变, 总应变, 尺寸系数
$\Delta \epsilon$	应变幅度
ϵ_e	弹性应变, 弹性应变幅
ϵ_p	塑性应变, 塑性应变幅

- ϵ_t 单调拉伸下断裂时的真实应变
 ϵ_f^i 循环应变下断裂时的真实应变, 疲劳塑性系数
 μ 母体均值, 摩擦系数
 $\hat{\mu}$ 母体均值估计量
 ν 泊松比, 频率, 变异系数
 ρ_{xy} 互相关系数(简称相关系数)
 σ 应力, 真实应力, 母体标准离差
 $\hat{\sigma}$ 母体标准离差估计量
 $[\sigma]$ 许用应力
 $\Delta\sigma$ 应力幅度
 σ_{-1} 应力比为“-1”的疲劳极限
 σ_0 应力比为“0”的疲劳极限
 σ_s 应力幅
 σ_b 强度极限
 σ_t 单调拉伸下断裂时的真实应力
 σ_f^i 循环应变下断裂时的真实应力, 疲劳强度系数
 σ_m 平均应力
 σ_{max} 最大应力
 σ_{min} 最小应力
 σ_r 应力比为“r”的疲劳极限, 等效应力幅
 σ_s 屈服极限
 τ 切应力
 τ_{-1} 应力比为“-1”的扭转疲劳极限
 τ_0 应力比为“0”的扭转疲劳极限
 ψ 截面收缩率
 ψ_σ 正应力的不对称循环度系数
 ψ_τ 扭转应力的不对称循环度系数

目 录

主要符号表

第一章 绪论

§ 1-1 疲劳强度在工业中的地位	1
§ 1-2 疲劳强度发展史	2
§ 1-3 疲劳的分类	9
§ 1-4 疲劳破坏的三个阶段	11
§ 1-5 疲劳断口	14
习题	24

第二章 金属的循环应力和应变

§ 2-1 循环加载的迟滞回线	25
§ 2-2 循环硬化和软化	33
§ 2-3 循环应力-应变曲线的测试方法	36
§ 2-4 金属循环应变机理	42
习题	53

第三章 疲劳图

§ 3-1 材料的 $S-N$ 曲线	54
§ 3-2 频率曲线和概率密度函数	58
§ 3-3 统计分析的基础知识	62
§ 3-4 正态分布	70
§ 3-5 $P-S-N$ 曲线	79
§ 3-6 疲劳极限线图	81
§ 3-7 等寿命曲线图	86
习题	89

第四章 疲劳累积损伤理论

§ 4-1 疲劳损伤的概念	90
§ 4-2 线性疲劳累积损伤理论	91

§ 4-3	非线性疲劳累积损伤理论	95
§ 4-4	双线性疲劳累积损伤理论	101
	习题	108
第五章	影响疲劳强度的因素	
§ 5-1	应力集中和应变集中的影响	111
§ 5-2	尺寸的影响	119
§ 5-3	表面加工情况的影响	121
§ 5-4	载荷频率的影响	124
§ 5-5	工作应力波形的影响	126
	习题	129
第六章	疲劳试验	
§ 6-1	高周疲劳试验	131
§ 6-2	低周疲劳试验	146
§ 6-3	裂纹扩展试验	155
	习题	162
第七章	常规疲劳强度设计	
§ 7-1	单向应力作用下的疲劳强度设计	165
§ 7-2	单向应力作用下的疲劳寿命估算	174
§ 7-3	复合应力作用下的疲劳强度设计	175
§ 7-4	复合应力作用下的疲劳寿命估算	185
	习题	189
第八章	随机疲劳	
§ 8-1	随机过程	191
§ 8-2	随机载荷的统计处理	201
§ 8-3	随机载荷作用下的疲劳寿命估算	209
	习题	212
第九章	局部应力-应变法估算裂纹形成寿命	
§ 9-1	估算疲劳寿命的两种方法	215
§ 9-2	局部应力-应变分析	219
§ 9-3	应变-寿命曲线	226
§ 9-4	裂纹形成寿命估算和评述	233

习题	243
第十章 断裂力学方法估算裂纹扩展寿命	
§ 10-1 概述	245
§ 10-2 应力强度因子和断裂韧性	253
§ 10-3 疲劳裂纹扩展速度	274
§ 10-4 裂纹扩展寿命估算方法	281
§ 10-5 影响裂纹扩展速度的因素	284
习题	292
第十一章 环境对疲劳的影响	
§ 11-1 低温疲劳	295
§ 11-2 高温疲劳	302
§ 11-3 热疲劳	323
§ 11-4 接触疲劳	340
§ 11-5 腐蚀疲劳	354
§ 11-6 其它影响	366
习题	371
第十二章 疲劳强度的可靠性设计	
§ 12-1 可靠性的基本概念	372
§ 12-2 衡量可靠性的尺度	377
§ 12-3 正态分布函数及其代数运算	381
§ 12-4 疲劳强度的可靠性设计方法	394
§ 12-5 威布尔分布	419
§ 12-6 可靠度的置信水平	429
习题	432
第十三章 提高零件疲劳强度的方法	
§ 13-1 合理选材	434
§ 13-2 表面冷加工强化	436
§ 13-3 表面热处理强化	442
§ 13-4 改进结构	446
习题	449
第十四章 蒙特卡罗法及其在疲劳强度学科中的应用	
§ 14-1 概述	451

§ 14-2 随机数的产生和检验	458
§ 14-3 任意给定分布的随机抽样	466
§ 14-4 蒙特卡罗法在疲劳强度中的应用举例	471
习题	476
附录	477
参考文献	508
内容索引	512
外国人名译名对照表	517
英文内容提要及目录	520

绪 论

§ 1-1 疲劳强度在工业中 的地位

磨损、腐蚀和断裂是机械零件和工程构件的三种主要破坏形式，也是这些零件和构件失效的三种主要原因。在机械零部件中，因磨损和腐蚀而造成的损失都是十分可观的。但由于磨损和腐蚀进程很慢，一般可以通过定期更换零件或修理来解决，而断裂常突然发生，往往导致灾难性的设备事故和人身事故，所以断裂破坏更为工程界所重视。

造成断裂事故的原因是很多的，有过载、低温脆性、氢脆、应力腐蚀、辐脆和疲劳等。据统计，机械的断裂事故中，80%以上是由金属疲劳引起的。可以这样说，机械零件和工程构件，凡是承受的应力水平较高并循环变化，都有可能发生疲劳破坏。飞机、船舶、汽车、矿山机械、冶金机械、工程机械、动力机械和起重运输机械等，其主要零件和结构件，大多在循环变化的载荷或随机载荷作用下工作，疲劳是这些零件和构件的主要失效形式。所以，无论是新设备的设计还是设备在运行过程中所进行的强度校核，疲劳强度都是主要的计算内容。

在本世纪四十年代以前，新产品的的设计都采用静强度计算方法。考虑到零件和构件实际是在变载荷作用下工作，通常采用加大许用安全系数或降低许用应力的办法。由于静载破坏是整体

断裂，所以提高静强度必须加大整个截面的尺寸，但有时即使加大了尺寸，零件和构件仍有可能产生疲劳破坏。这是因为疲劳破坏与静载断裂是不同的，疲劳裂纹首先在零件和构件的危险点的局部区域内产生，继之裂纹扩展直至断裂。所以只要将危险点的峰值应力降下来(如加大过渡圆角半径)，或将危险点局部区域的材料强度提高(如采用辊压等强化工艺)，就能提高疲劳强度。于是可知，采用疲劳强度设计，可以使所设计的设备在不增加重量和尺寸的情况下，提高疲劳强度或延长寿命，使设备既重量轻又经久耐用。

在设备维修中，对于产生疲劳裂纹和已疲劳断裂的零件和构件，一般有两种处理方法：一种是报废换新，一种是修复后继续使用。前者需要预先计划提供备件，后者需要在大修或中修时安排检修。在设备维护工作中，失效分析很重要，它能对设备设计反馈重要的信息。从断口分析中可以摸清零件和构件疲劳断裂的原因是设计方面的还是工艺方面的，在更换零件和构件时，就可以改进备件的结构和制造工艺，以延长更换件的使用寿命。

疲劳设计现在已从无限寿命设计发展到有限寿命设计。零件、构件和设备的寿命估算，已成为疲劳强度的一个重要组成部分。产品的寿命、大修周期、大修中更换零件的目录，已成为国内外市场中产品的竞争指标。疲劳已从一个古老的概念发展成为材料科学、力学与工程设计相结合的一门新兴学科——疲劳强度。

§ 1-2 疲劳强度发展史

各种科学理论的产生和发展，都依赖于实践，疲劳强度也不例外。十九世纪初，随着铁路运输的发展，机车车轴的疲劳破坏，成为当时工程上遇到的第一个疲劳强度问题。

有记载的最早的疲劳试验是德国人 W. A. 艾伯特于 1829 年

进行的。他对矿山提升用的焊接链反复加载，在 10^5 次循环后破坏。矿用链在反复加载一段时间后的破坏及机车车轴运行一段时间后在轴肩处的破坏，与单调加载造成的破坏完全不同。1839年，法国人 J.-V. 彭赛列在他的著作中首次使用了“疲劳”这个名词。1843年，苏格兰人 W. J. M. 兰金讨论了机车车轴的破坏，认为是由于运行过程中金属性能逐渐变坏所致。他分析了车轴轴肩处尖角的有害影响，指出加大轴肩圆角的半径可以提高其疲劳强度。与此同时，英国成立了一个委员会，调查用铁作为建造铁路桥梁的材料适用性，在对铸铁梁进行了若干次试验后指出，梁在静载荷下可以承受接近破坏的载荷达四年而不破坏，但如用静破坏载荷之半使梁反复弯曲，只要 1000 次循环梁就破坏了。

第一次对疲劳强度进行系统试验的是德国人 A. 沃勒，他从 1847 年至 1889 年在斯特拉斯堡皇家铁路工作期间，完成了循环应力下的多种疲劳试验。1850 年，他设计了旋转弯曲疲劳试验机，用来进行全尺寸机车车轴的疲劳试验和在不同应力状态下的疲劳试验，认识到疲劳破坏可以在应力低于弹性极限时发生，并存在一个应力幅极限值，当应力幅小于该值时就不会发生疲劳破坏。他从应力-寿命图上指出，疲劳寿命随应力幅的增大而降低。这样，A. 沃勒首次提出了 $S-N$ 曲线及疲劳极限的概念。此外，他还研究了热处理、应力集中和叠加静载荷对疲劳的影响，他说，对疲劳来讲，应力幅要比平均应力更为重要。A. 沃勒为常规疲劳强度设计奠定了基础。

在 1870 年至 1890 年这段时期中，其他研究者验证并发展了 A. 沃勒的工作。1884 年 J. 包辛格在验证 A. 沃勒的疲劳试验时，发现了“循环软化”现象，当时并未引起人们的重视，直到 1952 年柯扬在做铜棒的疲劳试验时才被重新提出来，并被命名为“包辛格效应”。因此，J. 包辛格是首先研究循环应力-应变关系的人。

关于平均应力对疲劳寿命的影响，A. 沃勒在 1858 年就指出，在任何给定寿命下引起破坏的应力幅值，随着平均应力的增大而