



Pilao Duanlie
Yu Sunshang

疲劳、断裂 与损伤

张安哥 朱成九 陈梦成 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

疲劳、断裂与损伤

张安哥 朱成九 陈梦成 编著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

疲劳、断裂与损伤 / 张安哥, 朱成九, 陈梦成编著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2006.2
ISBN 7-81104-188-X

I. 疲... II. ①张...②朱...③陈... III. ①疲劳
—分析②断裂力学③损伤 (力学) IV. 0346

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 126651 号

疲劳、断裂与损伤

张安哥 朱成九 陈梦成 编著

责任编辑 孟苏成

责任校对 韩松云

封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 140 mm×203 mm 印张: 4.687 5

字数: 158 千字 印数 1—3 000 册

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-188-X / V · 008

定价: 12.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

内 容 简 介

本书主要介绍“疲劳分析”、“断裂力学”和“损伤力学”三门课中所涉及的基本概念、基本理论和基本分析方法。首先介绍了疲劳图和疲劳损伤积累等内容，然后重点讲解了裂纹类型与断裂韧性、应力强度因子、裂纹张开位移和 J 积分等概念以及断裂力学的分析方法，最后介绍了损伤变量、有效应力和损伤门槛值等概念，并简单地叙述了损伤力学与断裂力学的关系。

本书既可以作为结构或机械类专业的研究生和大学本科高年级学生使用，也可以作为相关研究人员的参考书。

前 言

十年前，我们在为本校（华东交通大学）的研究生新开设一门称之为“疲劳损伤和断裂”的课程时遇到了没有现成教材的困难。一方面，交叉学科、分支学科愈来愈多，并很快地应用到工程实用领域，如近几十年兴起的“断裂力学”、“损伤力学”等，这就需要学生了解这些相关课程的知识；另一方面，在大学有限的学时内，只可能要求学生掌握一些最基本的概念和原理，为学生结合今后的工作需要开展进一步的学习和研究奠定基础。为此，我们尝试将原属三门课程的内容压缩成一门新课——“疲劳、断裂与损伤”，并编写了相应的讲义。经过几年的教学实践，在逐步完善的基础上形成了今天所见到的教材。

本书主要介绍“疲劳分析”、“断裂力学”和“损伤力学”等三门课中所涉及的基本概念、基本理论和基本分析方法。考虑到“疲劳分析”是经典学科，相对来说比较简单，且便于自学；“损伤力学”理论性较强，但目前工程应用不多，故本教材将主要篇幅放在工程应用已很广泛的“断裂力学”方面。

本书适用于结构或机械类专业的研究生，也可作为已学过“弹性力学”的本科生的选修课程。参考学时为 54 学时。

由于编者水平有限，书中难免有错误或不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 11 月

主要符号表

σ_{\max}	最大应力
σ_{\min}	最小应力
$\Delta\sigma$	应力变程
σ_m	平均应力
S, σ_s	应力幅
r	不对称系数 (或循环特性)
N	循环周次
N_f	疲劳寿命
σ_r	疲劳极限 (或持久极限)
a	裂纹尺寸
K_I	I型裂纹的应力强度因子
K_{II}	II型裂纹的应力强度因子
K_{III}	III型裂纹的应力强度因子
ΔK	应力强度因子幅度
K_{Ic}	I型裂纹材料的断裂韧性 (或断裂韧度)
K_{IIc}	II型裂纹材料的断裂韧性
K_{IIIc}	III型裂纹材料的断裂韧性
P_Q	裂纹临界扩展载荷
δ	裂纹尖端的张开位移
δ_c	临界张开位移

J	J 积分 (或 Rice 积分)
J_{1c}	临界 J 积分
σ_{ij}	应力张量
ε_{ij}	应变张量
$\frac{da}{dN}$	裂纹扩展速率
ΔK_{th}	疲劳裂纹扩展门槛值
D	损伤变量
D_c	损伤变量的临界值
ψ	连续度
$\tilde{\sigma}$	有效应力
\tilde{A}	有效承载面积
E	弹性模量
G	剪切弹性模量
μ	泊松比
\tilde{E}	损伤材料的弹性模量
ε_{pD}	损伤开始时的塑性应变
$\bar{f}_x, \bar{f}_y, \bar{f}_z$	在直角坐标系中的面力分量
f_x, f_y, f_z	在直角坐标系中的体力分量
u, v, w	在直角坐标系中的位移分量

目 录

第 1 章 疲劳分析

1.1 概述	1
1.1.1 疲劳强度的基本概念	1
1.1.2 结构疲劳失效的特征	1
1.1.3 结构疲劳的类型及疲劳设计程序	2
1.2 疲劳图	4
1.2.1 $S-N$ 曲线	4
1.2.2 $P-S-N$ 曲线 (概率 $S-N$ 曲线)	6
1.2.3 $S-N$ 曲线关系式 (经验公式)	7
1.2.4 疲劳极限线图	8
1.3 疲劳损伤积累	12
1.3.1 损伤积累的线性公式	13
1.3.2 损伤积累的指数公式	15
1.3.3 应变循环疲劳	19
1.4 复杂应力状态下的疲劳分析	20
思考题与习题	21

第 2 章 断裂力学

2.1 概述	23
--------	----

• 疲劳、断裂与损伤 •

2.2	裂纹类型与断裂韧性、应力强度因子的概念	25
2.2.1	裂纹类型	25
2.2.2	应力强度因子和断裂韧性(度)	27
2.3	裂纹尖端附近的应力、应变场	29
2.3.1	弹性力学场方程及边界条件	30
2.3.2	弹性力学的解法——位移求解法和应力求解法	33
2.3.3	复变函数的基础知识	35
2.3.4	威斯特葛尔德 (Westergaard) 应力函数解法	40
2.4	应力强度因子计算	51
2.4.1	应力强度因子 K 的一般定义	52
2.4.2	迭加法求解应力强度因子	55
2.4.3	裂纹尖端塑性区及修正	57
2.5	平面应变断裂韧性 K_{IC} 及测试原理	68
2.5.1	K_{IC} 的定义及典型试样的 K_I 表达式	69
2.5.2	K_{IC} 的测试原理	72
2.5.3	$P-V$ 曲线分析	76
2.6	裂纹张开位移 (COD) 原理和方法	80
2.6.1	简述	81
2.6.2	COD 原理和 D-M 模型	81
2.7	J 积分原理	88
2.7.1	J 积分定义	88
2.7.2	J 积分的守恒性证明	90
2.7.3	线弹性条件下 J 积分与 K_I 的关系 及应变能释放率概念	93
2.7.4	J 积分的断裂判据	97
2.8	断裂力学在疲劳裂纹扩展中的应用简介	99

2.8.1 疲劳裂纹	100
2.8.2 疲劳裂纹扩展速率	102
2.8.3 疲劳裂纹扩展寿命估算	105
2.8.4 应变疲劳	106
思考题与习题	107

第 3 章 损伤力学

3.1 概述	110
3.2 损伤的力学表示	112
3.2.1 一维损伤变量	112
3.2.2 有效应力的概念	114
3.2.3 应变等效原理	116
3.2.4 应变与损伤的耦合、断裂判据和损伤门槛值	116
3.3 损伤力学的基本方程	120
3.3.1 质量守恒定律	120
3.3.2 动量守恒方程	121
3.3.3 能量守恒定律	122
3.3.4 力学函数和内部状态变量	123
3.3.5 热力学第二定律和 Clausiu-Duhem 不等式	125
3.4 损伤与断裂	128
3.4.1 损伤力学与断裂力学的关系	128
3.4.2 损伤材料的 Dugdale 模型	131
思考题与习题	136
参考文献	138

第1章

疲劳分析

1.1 概 述

1.1.1 疲劳强度的基本概念

载荷值随时间作周期性或非周期性变化的载荷称为交变载荷，大多数承载的机械构件都在这种交变载荷作用下工作。由于载荷的变化，使试件或构件的材料内产生随时间变化的交变应力与交变应变。经足够的应力或应变循环作用后，损伤累积可使试件或结构材料产生裂纹，并使裂纹扩展，直至小片脱落或断裂的过程称为疲劳破坏。构件因发生疲劳破损而使其丧失正常工作性能的现象称为疲劳失效。试件抵抗疲劳失效的能力称为材料疲劳强度；构件抵抗疲劳失效的能力称为结构疲劳强度。

1.1.2 结构疲劳失效的特征

为正确分析机械构件的失效原因，必须区分疲劳失效与

• 疲劳、断裂与损伤 •

静强度失效的特征：

(1) 载荷的交变性：疲劳失效的构件，在其材料内部必定作用有交变应力与交变应变。

(2) 失效过程的渐变性：疲劳破坏是一个累积损伤的过程，从加载至失效需要经历一定的时间历程及应力与应变的循环过程。实践证明，不论何种疲劳，其失效过程都经历裂纹萌生、扩展和瞬时断裂三个阶段。

(3) 断口的脆性和断裂的突然性：不论构件使用脆性材料还是塑性材料，其疲劳破坏在宏观上常表现为无明显塑性变形的突然断裂，断口为脆性断口，因此疲劳失效具有很大的危险性。

(4) 应力与应变的缺口敏感性：构件在交变荷载作用下，材料内产生的应力或应变峰值会受材料本身缺陷或几何形状突变的影响产生局部增大，这种现象称为缺口敏感性，也叫应力集中或应变集中。结构疲劳失效多发生在局部高应力区域，在设计或加工中应采取相应措施来减小局部高应力的产生。

(5) 疲劳断口的独特性：疲劳断口可以看到明显的裂纹源、裂纹扩展区（光滑断面）和瞬时断裂区（粗糙断面），而其他断口无这种明显特征。

1.1.3 结构疲劳的类型及疲劳设计程序

1.1.3.1 结构疲劳的类型

(1) 按设计寿命长短分为无限寿命设计和有限寿命设计。在有限寿命设计中，寿命大于 10^5 周的称为高周疲劳，小于 10^5 周的称为低周疲劳。

(2) 按引起疲劳的载荷特性分为冲击疲劳、接触疲劳、摩擦疲劳与磨损疲劳。

(3) 按受力方式分为拉压疲劳、弯曲疲劳、扭转疲劳和复合疲劳。

(4) 按应力与时间是否有确定的函数关系分为定常疲劳和随机疲劳。

(5) 按环境温度分为常温疲劳、高温疲劳和热疲劳。

(6) 按有无腐蚀性介质作用分为一般疲劳和腐蚀疲劳，即在腐蚀环境（化学、风雨、空气等）下的疲劳。

1.1.3.2 结构疲劳强度设计的一般程序

结构疲劳强度设计程序一般分以下两步：

(1) 疲劳计算。机械构件的结构设计包括几何形状设计和结构强度设计。根据规定的运动规律完成几何设计之后，再按照整机的规定寿命、构件的工作载荷、工作环境等情况选择适当的疲劳理论、材料和必要的参数，对构件特征尺寸进行计算；或者先根据静强度理论确定特征尺寸，然后再进行寿命估算，并将计算结果与规定寿命相比较，通过对其特征尺寸、材质、加工工艺等的调整直至最后使计算寿命满足规定寿命为止。

(2) 结构疲劳试验。对无限寿命设计类型中的一般机械，由于尺寸较大，便于在运行中检测疲劳裂纹的萌生与扩展情况，并且单件失效不会造成重大事故时，可只做疲劳计算而不做疲劳试验。

对重要的机械，从确保安全可靠出发，考虑到疲劳数据的分散性和疲劳理论与构件实际使用情况之间的种种差异，还必须在疲劳计算之后再对构件做模拟疲劳试验。特别重要

• 疲劳、断裂与损伤 •

的机械，还应对构件直至整机做实物疲劳试验。

1.2 疲劳图

在实验基础上建立的疲劳载荷与疲劳寿命的关系曲线图称为疲劳图。

1.2.1 S-N 曲线

1.2.1.1 符号定义

在材料力学中，我们学习了交变应力（见图 1.1）的一些基本概念，为了便于大家学习，下面给出有关符号的定义：

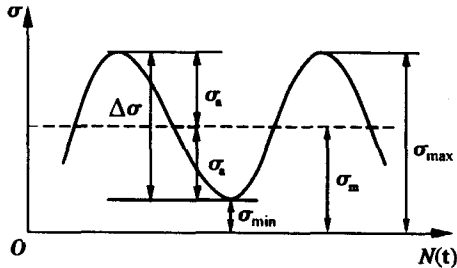


图 1.1

(1) 最大（小）应力： σ_{\max} (σ_{\min})，即循环应力中的最大值（最小值）。

(2) 应力变程： $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ，即最大与最小应力之差。

(3) 平均应力: $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$, 即最大与最小应力之和的一半。

(4) 应力幅值: $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, 即最大与最小应力之差的一半, 也可以用 τ 表示切应力疲劳等。一般情况下, 用 S 表示应力幅值。

(5) 不对称系数: $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, 也称为交变应力的循环特性。

上述 6 个数据 (σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 σ_a 、 σ_m 、 r 、 $\Delta\sigma$) 中, 只有 2 个量是完全独立的。

(6) 循环周次 (代替时间 t) N : 指应力循环的次数, 而循环应力的每一个周期变化称为一个应力周期。

(7) 疲劳寿命 N_f : 在循环加载下, 产生疲劳破坏所需的应力或应变的循环周次。

(8) 疲劳极限 (或持久极限) σ_r : 当应力幅值 σ_a 小于某一极限值 σ_r 时, 试件可经受无限次应力循环而不破坏, 该极限值 σ_r 称为疲劳极限 (或持久极限), 即 σ_a 的极限值。

1.2.1.2 S-N 曲线

将试验材料制成直径为 6~10 mm 的标准试件, 按国标规定分别在旋转弯曲、拉压、扭转材料疲劳试验机上进行试验。在给定的平均应力 σ_m 的情况下, 若按不同的应力幅 S 加载, 每组按同一标准 (如断裂或出现同尺寸的裂纹) 记录循环次数, 将试验结果画在应力幅值 S (或疲劳强度) 为纵坐标, 疲劳寿命 N_f 为横坐标的图上, 所得出的曲线称为 S - N 曲线, 而以正应力 σ 为纵坐标的称为 σ - N 曲线, 以切应力 τ 为纵坐

• 疲劳、断裂与损伤 •

标的称为 $\tau-N$ 曲线，如图 1.2 所示。

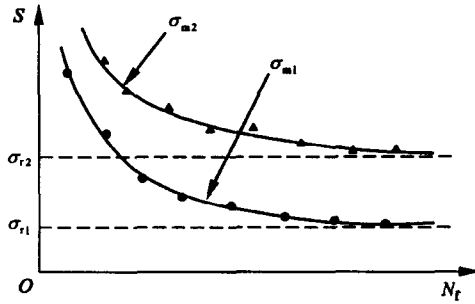


图 1.2

当应力幅 S 低于一定值时，不出现疲劳破坏，此时对应 S 的值 σ_r 称为疲劳极限（或持久极限）。对高周疲劳，一般定义 $N_r = 10^7$ （对金属材料而言）。

工程中最常见的 $S-N$ 曲线是在对称循环实验条件下的，即此时 $\sigma_m = 0$ ， $r = -1$ 。通常此时，疲劳极限的数值为最小。

1.2.2 $P-S-N$ 曲线（概率 $S-N$ 曲线）

由于试件材料的微观力学性能具有统计特征，加之加工工艺以及试验条件上的差异，即使在同一应力幅的作用下，试验所得的数据也会有一定的离散性和分布规律。实验表明，其分布大部分属于正态分布（或韦布尔 Weibull 分布）。因此，对一个应力幅而言，靠单根试件试验所得的疲劳寿命不能反映这种材料在该应力幅作用下的真正寿命。要获得具有代表性的数值，通常用一组试件在同一应力幅 S 作用下试验，获得一组 N_f 的数据，再用概率统计的方法求出该数据组的概率

分布。据此，若把试验结果按不同的概率 P 整理在 S 为纵坐标、 N_f 为横坐标的图上，即可以绘出 P - S - N 曲线，如图 1.3 所示。正态分布时，曲线 AB 为破坏概率 $P = 50\%$ 的疲劳曲线； CD 是破坏概率 $P = 1\%$ 的疲劳曲线； EF 是破坏概率 $P = 10\%$ 的疲劳曲线。工程上一般给出的 S - N 曲线，可理解为破坏概率 $P = 50\%$ 的情况，也就是图中的 AB 曲线。

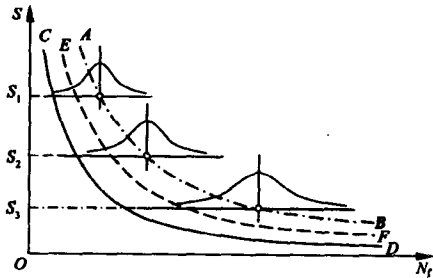


图 1.3

1.2.3 S - N 曲线关系式 (经验公式)

S - N 曲线 (见图 1.4 (a)) 关系式一般可以采用回归曲线办法得到，工程中常用的有指数型的经验关系式，如设

$$N_f = CS^a$$

其中 C 和 a 为待定常数。若对上式两边取对数，则有

$$\lg N_f = \lg C + a \lg S$$

如果以 $\lg N_f$ 为横坐标，以 $\lg S$ 为纵坐标，则上式可表示成一条直线，如图 1.4 (b) 所示，即在双对数坐标中，由实验所得的数据按线性回归的方法可得出疲劳极限的经验公式。