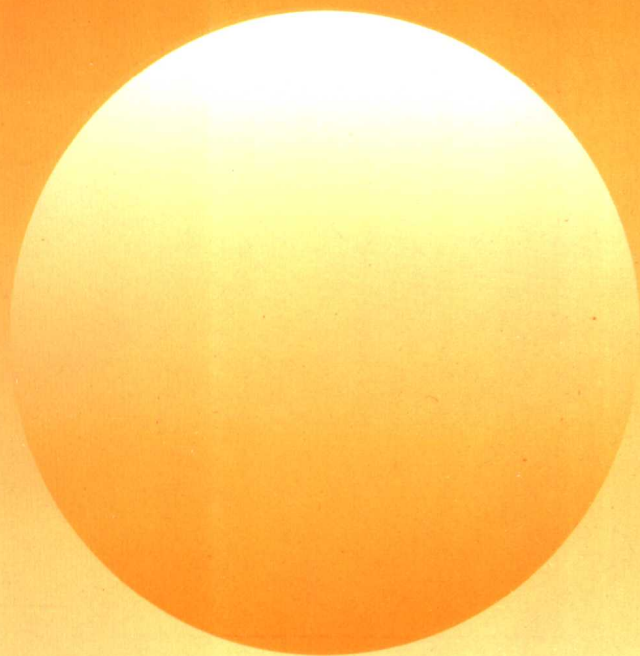


● 研 究 生 用 书 ● FRACTURE MECHANICS AND  
FRACTURE PHYSICS

华中科技大学出版社



赵建生

43

# 断裂力学及断裂物理

# 断裂力学及断裂物理

赵建生

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

断裂力学及断裂物理/赵建生

武汉:华中科技大学出版社,2003年2月

ISBN 7-5609-2875-7

I. 断…

II. 赵…

III. 断裂-理论-研究生-教材

N. O346.1

断裂力学及断裂物理

赵建生

责任编辑:章咏霓

封面设计:刘 卉

责任校对:张兴田

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社 武昌喻家山

邮编:430074 电话:(027)87542624

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:湖北恒吉印务有限责任公司

开本:860×1168 1/32 印张:10 插页:2

字数:235 000

版次:2003年2月第1版 印次:2003年2月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-2875-7/O·277

定价:16.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 内 容 简 介

本书包括三部分内容:第一部分简要地讲述了线弹性力学的理论要点及处理问题的方法,为后续的断裂过程中的应力分析与求解、断裂基本模型与基本概念的建立奠定基础;第二部分以断裂力学的产生与发展为线索,较为系统地介绍了线弹性与弹塑性断裂力学基本概念建立的思想方法,讨论了材料断裂抗力的评定指标及其物理涵义,性能试验方法及应用背景等,从而使读者对断裂力学问题有较为完整的理解;第三部分则从材料断裂的宏观现象出发,从微观的角度讨论了断裂过程中材料结构缺陷与断裂的内在联系,介绍了断裂过程中裂纹萌生的微观模型,讨论了不同条件下裂纹扩展的规律,使读者了解断裂的过程的物理图像。全书虽内容较多,但整体编排上前后连贯,由浅入深,系统性强。

本书可作为材料学科硕士研究生教学用书,也可作为材料工程及材料科学工作者科研参考用书。

### Abstract

This book discusses fracture mechanics and fracture mechanism of materials in macroscopic and microscopic aspects. It is divided into three sections. Section one is devoted to describing elastic mechanics, which is the solid foundation of other contents to be discussed.

From the origin and growth procession of fracture mechanics, fundamental concepts of elastic and elastic-plastic fracture mechanics were introduced systematically in section two. The means to evaluate fracture resistance of a material, the test methods of fracture characteristic and applications were mentioned in this section to make the reader have a full understanding of the principles of fracture mechanics.

In the third section, the connection between structure defects of materials and fracture procession are discussed. Several microscopic models of crack nucleation and the principles of crack propagation are suggested. Here, the emphasis is focused on the physical image of fracture procession.

This book is suitable as a textbook for graduate students in material science and engineering, and mechanical engineering. In addition, it could also be useful to the engineers who are working on the field of materials.

# 前 言

断裂是材料或构件最危险的失效形式,在很多情况下可能造成灾难性的后果。因此研究材料或构件断裂的机理及规律,控制和减少断裂事故的发生一直是工程技术人员和材料科学工作者的重要课题之一。

材料的断裂是一个很复杂的过程,受很多因素,如材料本身的性质、环境因素、工作应力状态、构件的形状及尺寸、材料的结构及缺陷等控制,常是多种因素综合作用的结果,这使得对断裂过程的分析增加了更多的不确定因素,增加了断裂控制的难度。但是随着科学技术的进步与发展,人们对断裂问题认识的加深,断裂过程的控制仍然是有规律可循的。特别是近几十年来对材料断裂问题的研究已经取得令人瞩目的进展,如断裂力学的产生和发展、材料断裂问题微观机理分析及理论的发展都标志着断裂学科的研究工作进入了一个比较成熟的阶段。

本书讲述了材料断裂力学及断裂物理的内容。考虑到弹性力学是断裂的宏观应力分析与微观结构模型应力分析的重要基础,所以在本书的第一部分用了一定的篇幅简要介绍了弹性力学理论的主要内容。这对本书后续部分的理解和掌握是十分重要的。

在材料的断裂力学部分,介绍了断裂力学的产生与发展过程;应力场强度因子概念的引入及断裂韧性概念的提出;线弹性断裂韧性及弹塑性断裂韧性的分析方法;各指标的物理涵义、应用背景及试验方法等,使读者对断裂的力学问题有较为全面的理解。在断裂物理部分,讲述了断口宏观及微观特征与金属材料本身性能及应力状态的关系;介绍了不同条件下断裂过程中裂纹的形核、扩展的物理模型,分析了常见的疲劳断裂过程中的应力条件与断裂规

律等,使读者比较深入地了解断裂过程的物理图像。

鉴于本书的主要目的是用作教学用书,所以在内容的编排上注重前后的逻辑联系,注意说明基本概念的物理意义,断裂机理的解释与各种模型均采用较为成熟或为大多数人所公认的理论。如需进一步了解本学科进展情况,可参考其他文献。

该书稿成形之后已在材料学专业硕士研究生的教学中使用了多届,学生普遍反映本书条理清晰,概念明确,内容前后贯通,循序渐进,易懂易学。当然,由于编者水平有限,书中编排不当之处或错漏之处一定在所难免,恳请热心的读者提出宝贵意见。

最后编者向支持和鼓励本书编写及出版的单位与个人表示衷心的感谢。

编者

2002年9月20日

# 目 录

## 第一篇 弹性力学基础

<b>第一章 弹性力学的研究内容及方法</b> .....	(1)
1.1 弹性力学的研究内容及方法 .....	(1)
1.2 基本假设 .....	(2)
1.3 外力、内力及应力 .....	(4)
1.4 通用的记号与正负号 .....	(6)
思考题与练习题 .....	(11)
<b>第二章 应力分析</b> .....	(12)
2.1 平衡微分方程 .....	(12)
2.2 任意斜面上的应力和应力边界条件 .....	(16)
2.3 坐标变换 .....	(19)
2.4 主平面主应力和主方向 .....	(21)
思考题与练习题 .....	(23)
<b>第三章 应变分析</b> .....	(25)
3.1 位移和位移分量 .....	(25)
3.2 应变分量及几何方程 .....	(27)
3.3 转动分量 .....	(31)
3.4 一点的应变状态 .....	(34)
3.5 坐标变换 .....	(40)
3.6 体积应变 .....	(42)
3.7 相容方程(变形连续方程) .....	(43)
思考题与练习题 .....	(45)

<b>第四章</b>	<b>应力和应变的关系</b>	(47)
4.1	广义虎克定律	(47)
4.2	弹性应变能函数	(48)
4.3	弹性矩阵	(53)
4.4	各向同性体的虎克定律	(57)
	思考题与练习题	(61)
<b>第五章</b>	<b>弹性力学问题的求解</b>	(62)
5.1	弹性力学的基本方程	(62)
5.2	边界条件	(64)
5.3	弹性力学问题的求解	(65)
5.4	圣维南原理	(73)
5.5	线性叠加原理	(74)
5.6	解的唯一性定理	(75)
	思考题与练习题	(75)
<b>第六章</b>	<b>平面问题</b>	(76)
6.1	平面应变问题及基本方程	(76)
6.2	平面应变问题的按应力求解	(81)
6.3	平面应力问题及基本方程	(82)
6.4	平面应力问题的按应力求解	(85)
6.5	Airy 应力函数与双调和方程	(86)
	思考题与练习题	(89)

## 第二篇 断裂力学

<b>第七章</b>	<b>断裂的基本概念</b>	(91)
7.1	断裂力学的产生与发展	(91)
7.2	复变函数的基本知识	(93)
7.3	裂纹及类型	(96)
7.4	完整晶体的理论强度	(98)



7.5	Griffith 裂口理论 .....	(101)
	思考题与练习题 .....	(105)
<b>第八章</b>	<b>线弹性断裂力学——应力场</b>	
	<b>强度因子断裂理论</b> .....	(106)
8.1	断裂力学平面问题的求解 .....	(106)
8.2	Westergaard 应力函数 .....	(108)
8.3	双向拉伸的 I 型裂纹问题 .....	(112)
8.4	单向拉伸条件下 I 型裂纹顶端的应力与应变 .....	(121)
8.5	应力场强度因子 $K_I$ 及裂纹体断裂韧性 $K_{Ic}$ .....	(124)
8.6	I 型裂纹顶端塑性区及 $K_I$ 的塑性修正 .....	(130)
8.7	II 型、III 型裂纹的应力场及应力场强度因子 .....	(143)
	思考题与练习题 .....	(149)
<b>第九章</b>	<b>线弹性断裂力学——能量平衡断裂理论</b> .....	(151)
9.1	裂纹扩展的能量(释放)率 .....	(151)
9.2	$G_I$ 与 $K_I$ 的关系 .....	(158)
9.3	$G_I$ 的力学标定 .....	(162)
	思考题与练习题 .....	(163)
<b>第十章</b>	<b>弹塑性断裂力学——裂纹顶端</b>	
	<b>张开位移 COD</b> .....	(164)
10.1	大范围屈服问题与裂纹顶端张开位移 COD .....	(164)
10.2	线弹性条件下的裂纹顶端张开位移 .....	(166)
10.3	弹塑性条件下的裂纹顶端张开位移 .....	(169)
10.4	COD 判据的工程应用 .....	(176)
	思考题与练习题 .....	(178)
<b>第十一章</b>	<b>弹塑性断裂力学——<math>J</math> 积分理论</b> .....	(179)
11.1	$J$ 积分的回路积分定义 .....	(179)
11.2	$J$ 积分的守恒性 .....	(181)
11.3	裂纹顶端应力、应变场与 $J$ 积分判据 .....	(186)
11.4	$J$ 积分的形变功率率定义 .....	(189)

11.5	$J$ 积分的物理意义	(197)
	思考题与练习题	(199)
<b>第十二章 断裂韧性的测试原理</b> (200)		
12.1	平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的测试原理	(200)
12.2	裂纹顶端张开位移 $\delta_c$ 的测试原理	(209)
12.3	$J_{Ic}$ 的测试原理	(213)
	思考题与练习题	(215)

### 第三篇 金属材料的断裂物理

<b>第十三章 断裂类型</b> (217)		
13.1	材料的断裂问题	(217)
13.2	断裂的分类	(218)
13.3	理论断裂强度与 Griffith 裂口理论	(222)
	思考题与练习题	(224)
<b>第十四章 断口分析</b> (225)		
14.1	断口分析的意义与方法	(225)
14.2	金属材料的宏观断口分析	(228)
14.3	金属断口的微观形貌特征——解理断裂与沿晶断裂	(232)
14.4	金属断口的微观形貌特征——剪切断裂	(239)
	思考题与练习题	(244)
<b>第十五章 裂纹的形成及扩展的断裂理论</b> (245)		
15.1	断裂的应力条件	(245)
15.2	裂纹在承受应力情况下的位错模拟	(247)
15.3	Bilby-Cottrell-Swinden 模型	(250)
15.4	解理裂纹形成的位错塞积理论	(256)
15.5	解理裂纹的形成及扩展的位错反应理论	(258)
15.6	脆性裂纹的失稳扩展	(263)
15.7	裂纹扩展途径	(268)

思考题与练习题 .....	(271)
<b>第十六章 疲劳断裂</b> .....	<b>(272)</b>
16.1 疲劳断裂现象 .....	(272)
16.2 高周疲劳与低周疲劳 .....	(275)
16.3 疲劳断口形貌特征 .....	(280)
16.4 构件疲劳过程中的组织结构变化 .....	(284)
16.5 疲劳裂纹的萌生 .....	(286)
16.6 疲劳裂纹的扩展 .....	(290)
16.7 疲劳裂纹的扩展速率 .....	(294)
16.8 恒幅应力循环疲劳裂纹扩展寿命的估算 .....	(300)
16.9 累积损伤理论与变幅循环疲劳寿命 .....	(302)
思考题与练习题 .....	(305)
<b>参考文献</b> .....	<b>(306)</b>

# 第一篇 弹性力学基础

## 第一章 弹性力学的研究内容及方法

### 1.1 弹性力学的研究内容及方法

任何物体均具有弹性性质,即在外力的作用下物体的形状、尺寸会发生变化,只要外力在一定的限度以内,当外力取消后,物体就会恢复到原来的形状和尺寸。物体的这种性质称为弹性性质,物体的这种变形称之为弹性变形。

物体发生变形,便一定有内力的作用,而且外力一定时,其内力是按一定的规律分布的,人们试图找出物体中内力的分布规律,于是就形成了一门学科,在早期,这便是材料力学。

材料力学是研究杆状物体在弹性范围内应力和变形的一门学科。但是,随着人类生产实践活动的发展,人类制备构件复杂程度的提高,在实际工程中还有许多其他类型的问题是材料力学所无法解决的,如受静水压力的堤坝问题,非圆截面的扭转问题,圆孔附近的应力集中问题,两个弹性体之间的接触应力问题及无限大弹性体中的应力分布问题等。于是人们就采用比材料力学更普遍、更精确的一种研究方法来处理这些问题,并逐渐形成了一门学科,这就是弹性力学。

从学科的性质和任务方面来看,弹性力学与材料力学并无本质上的差别。与材料力学一样,它也是研究弹性体在外部因素(载

荷,温度变化等)作用下产生内部应力和变形的一门学科。与材料力学不同的是,弹性力学研究的内容更加广泛,研究的方法更为严密,因而解决工程问题也就更为有力。

利用经典的数学物理方程对问题求解是弹性力学的基本方法。即使用一组偏微分方程分别表示弹性体中外力、内力、位移、变形之间的关系,这些关系包括力的平衡关系,由广义虎克定律描述的形变与内力之间的关系及由物体形状决定的几何关系;然后根据不同的问题建立边界条件和初始条件,再对问题进行求解。

在问题的求解过程中,根据问题的性质,可以将上述方程综合简化为以应力为基本未知函数的偏微分方程或以位移为基本未知函数的偏微分方程。一般来说,只要问题的边界条件可以描述出来,就可以对此类问题进行求解,但由于问题的复杂性,求解不一定总是很容易的,对于复杂的实际问题,往往采用差分法、变分法、有限元法等。

作为一门学科,弹性力学的产生和发展已有 100 多年的历史,是一门发展得很成熟的学科。在自然科学中,弹性力学理论已成为许多学科的理论基础,如断裂力学、位错的应力场、实践应力分析等;在工程应用中,弹性力学发挥了极大的作用,飞机、潜艇、人造卫星、火箭、水坝、桥梁等设计中均离不开弹性力学。

## 1.2 基本假设

弹性力学在处理问题上比材料力学更为严密,这并不意味着弹性力学不需要最基本的假设条件,因为弹性力学研究不同材料、物体在弹性变形阶段应力、应变与位移的关系,而客观存在的物体及材料性质是多种多样的,所以在研究与处理问题时有必要根据主要、次要因素对研究的问题进行科学的抽象,抓住主要矛盾,便于有效地解决问题。

弹性力学中基本假设如下:

### 1. 连续性假设

这一假设认为,物体内部由连续介质构成,其中没有间隙。这一假设给问题的求解带来极大的方便,物体中的应力、形变、位移等物理量在数学上可用坐标的连续函数来描述它们的变化规律。

从近代物质结构理论来看,构成物质的原子之间并不连续,仍有一定的距离,但是弹性力学进行的是宏观研究,分子、原子的大小及其之间的距离与物体的宏观尺寸相比是很微小的,所以实际上并不需要考虑物体内部的原子构造。大量的研究表明,根据这个假设所得出的解析结果与实践结果是吻合的。

## 2. 线弹性假设

其意义为物体受力后,应力与应变之间存在单值函数关系,当外力去除后,物体完全恢复原来的形状。物体的这种性质称为理想弹性或完全弹性。由于理想弹性性质,物体中的应力、应变服从虎克定律。应当说明,具有理想弹性性质的物体是不存在的,但是在变形不大的情况下,可以认为大部分工程材料都可以足够精确地满足虎克定律。

## 3. 匀质和各向同性假设

物体是匀质的,这说明物体内各点的力学性质是完全相同的;物体是各向同性的,说明物体内各点的力学性质在各个方向上都相同。应当注意的是,匀质性与连续性是两个不同的概念;两种不同的材料紧密地粘合或焊接在一起可以认为它们是连续的,但不是匀质的;表面淬火的轴,齿部淬火的齿轮是连续的,但不是匀质的。同时还应当注意到,有些情况下,匀质的概念还与研究对象的体积有关,当体积足够大时,可以把混凝土结构作为匀质体处理,但是当研究对象尺寸小到可以与混凝土中鹅卵石的尺寸相比时,就不能看成是匀质的。

匀质与各向同性也是两个不同的概念,如木材或压延成型的金属材料可以认为是匀质的,但不一定是各向同性的。还应指出,由众多晶粒构成的金属材料可以认为是各向同性的,但若以单个金属晶粒作为研究对象时,它又是各向异性的。

#### 4. 小变形假设

该假设认为,在外加载荷的作用下,物体因变形而产生的位移与物体的尺寸相比是很微小的,因此在研究物体受力后的平衡问题时,可以不考虑物体尺寸的改变而仍按原来的尺寸和形状进行计算。这一假设带来的另一好处是在研究物体的变形和位移时,可以将它们的乘积略去不计,使弹性力学中的微分方程都能简化成线性微分方程。

上述假设中,小变形假设属于几何假设,其余的属于物理假设。

应当说明的是,这些基本假设与材料力学的基本假设基本一致,但是在材料力学中除上述基本假设以外,对不同的问题还引用一些有关变形的假设,使问题得到简化,所以,其结论的精确程度与适用范围均受到一定的限制。还应说明的是,在弹性力学中上述各假设的重要性并不是一样的,连续性假设是带有根本性的,它是弹性理论,也是连续介质力学的理论基石,解除这个假设将引起思维体系和数学手段的根本改变;小变形假设和线弹性假设的解除都会引起非线性,在数学上就要复杂得多,非弹性问题是近几十年来十分活跃的研究领域。

### 1.3 外力、内力及应力

按其作用方式的不同,作用在物体上的外力可以分为体力和面力,若外力直接对物体中每个质点起作用,即外力分布在物体的体积内或作用于弹性体质量上的力,称为体积力,简称体力。这种类型外力的特点是,它与物体的质量成正比,如重力、磁力及运动物体的惯性力等。

一般物体内各点的体力是不同的,所以体力是位置的函数。物体中任意一点的体力可用该体力在坐标轴上的分量来表示,如设物体中过  $M$  点单位体积内的体力为  $F$ ,则其在三个坐标轴上的体力分量分别为  $X, Y, Z$ ,这三个量称为物体在该点的体力分量,并

且规定力的方向沿坐标轴正向为正,反之为负。由体积力的含义可知,其单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ 。

面力是指作用在物体表面上的力,所以也称为表面力,如作用在水坝侧面的静水压力、两固体之间的接触力、加在梁上的载荷等。

作用于物体表面上任意一点处单位面积上的面力也可用其在坐标轴上的投影来表示,分别记为  $X_v, Y_v, Z_v$ , 其中  $V$  为作用面的法线方向。由面力的含义可知,其单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ , 这是一个具有专门名称的导出单位,叫帕斯卡,简称帕(Pa)。

图 1-1(a)表示一平衡力系作用下的物体。现用一平面  $C$  将弹性体分成  $A, B$  两个部分。若将  $B$  移走,并将  $B$  对  $A$  的作用用一相当的力  $F$  来代替,使  $A$  仍然处于平衡状态,则这个相当的力就称为内力。

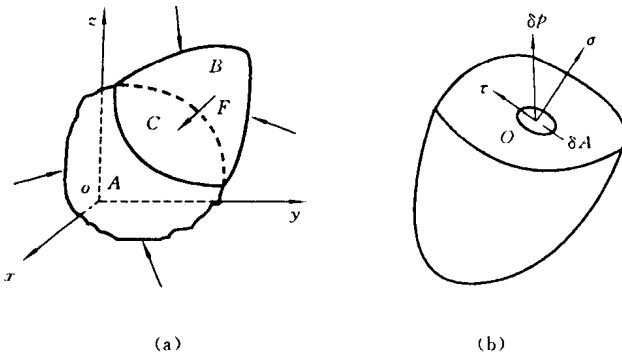


图 1-1 内力及应力

下面讨论内力是如何表示的。如图 1-1(b)所示,欲求平衡力系作用下的弹性中某一点  $O$  处的内力,可过  $O$  点作一截面,围绕  $O$  点取一面积元  $\delta A$ ,若其上作用的力为  $\delta p$ ,则

$$p = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta p}{\delta A} \quad (1-1)$$



即为弹性体中  $O$  点的应力。所以,应力的数值表示了截面上某点处内力的强烈程度。在同一面上的不同点处往往有不同的应力,在一般情况下,  $p$  不垂直于  $\delta A$ , 为了方便,常将  $p$  按  $\delta A$  法线方向及  $\delta A$  平面切线方向进行分解,前者称为正应力,用  $\sigma$  表示,后者称为剪应力,用  $\tau$  表示。

可以看出,即使对于物体内同一个点,当通过该点所作的截面方位不同时,应力也是不相同的,即应力不仅与考察点的位置有关,还与所作截面的方位有关。

#### 1.4 通用的记号与正负号

在各种书籍和文献中,应力、应变及位移的符号有多种表示方式,下面约定本书中的表示方法。

为了描述物体中一点的应力状态,可以围绕该点取出一个无穷小的正六面体(或称为单元体),在直角坐标系内,其六个面分别平行于三个坐标面,如图 1-2 所示,取其棱边长分别为  $dx, dy, dz$ ; 当单元体的边长趋于零时,相对平行的两个面就代表了同一面元的正负两侧,其应力的大小是相同的,方向则相反,于是该单元体三对面元上的应力就表示了一点处 3 个相互正交方向上的应力。

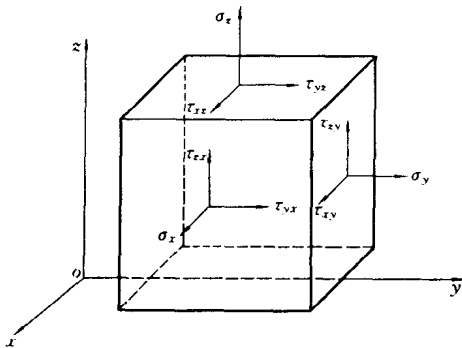


图 1-2 物体中一点的应力