

材料的变形 与断裂

钱志屏 编著

同济大学出版社

材料的变形与断裂

钱志屏 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书内容包括材料的变形和断裂两部分。

在材料的变形部分中,包括材料的拉伸应力-应变曲线、晶体中位错理论的基础及晶体的滑移等内容,通过拉伸应力-应变曲线反映晶体材料的不同变形特征,应用晶体位错理论阐明晶体中的缺陷-位错对材料变形性能的影响。

在材料的断裂部分中,包括材料的脆性与断裂、线弹性断裂力学、结构对断裂韧性的影响、环境促使裂纹、循环应力和应变疲劳、疲劳裂纹的扩展速率及交聚物的疲劳失效等内容。对材料的断裂形式和显微断裂机理作了简要介绍,重点讨论材料中缺陷引起的低应力脆性断裂,应用线弹性断裂力学原理确定材料的断裂韧性及环境和循环加载情况下裂纹的扩展和最后失效。

本书可供高等院校材料专业本科生及研究生作为教材或教学参考书,也可供从事材料研究、生产及工程设计的广大工程技术人员参考与使用。

责任编辑 吴雄伟 曹炽康

封面设计 王肖生

材料的变形与断裂

钱志屏 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

发行所 上海发行所

浙江上虞汤浦印刷厂排版

上海中行印刷厂常熟分厂印刷

开本 850×1163 1/32 印张 11.375 字数 284千字

1989年12月第1版

1989年12月第1次印刷

印数: 1—3,000

定价: 6.40元

ISBN 7-5603-0447-0/TP·16

序

材料科学的任务,总的说来是研究材料的组分、结构与性能之间的关系,以求指导合理使用传统材料,并逐步达到按指定性能设计材料,开拓新型材料的目的。材料的性能按其主要使用目的,可以是力学性质的,亦可以是非力学性质的,如光性、电性、磁性等。但力学性质通常是最基本的,因为一种材料的存在,总是以具有确定的力学性能为先决条件,而且在使用中,力学性能和其他使用性能,例如电线的抗拉强度和导电性能,往往处于同等重要地位。

材料“力学行为”(Mechanical Behavior)的涵义比材料“力学性能”(Mechanical Properties)的涵义更完整、更广泛,指的是在力的作用下,在一定的环境中,材料发生的变形和断裂的全部现象,而“力学性能”则往往被理解为其中的一个方面的性质。因此把各种条件下施加于材料上的力及其所发生的变形与断裂及其相关的全部特性和过程,联系到材料的组分和结构,加以系统的阐述,便构成了材料力学行为全部研究课题的内容,而“材料的变形与断裂”课程内容,就是其中最为典型和基础的部分。

在材料科学与工程类专业独立设置以前,上述内容大部分分散于不同专业的不同课程中。这一新专业的教学要求,是使学生获得材料力学行为的系统而又简明的基础知识,因此有独立设课的必要。同济大学材料科学与工程系在学科更新、教材改革的试点中,为这类新专业开设“界面物理化学”、“材料科学导论”和“材料的变形与断裂”等系列新课程,以介于基础课与专业课之间作为桥梁。经五年以上的实践,效果良好,达到了预期的教学要求,现在继续试行,以求得精益求精。

“材料的变形与断裂”课程的教材,由编者在引用、消化国外教

材的基础上,根据本人多年教学实践经验,将讲义逐年修改、补充与更新,内容日趋完善。教材取材合理,理论简明,行文清晰,篇幅适当,用之教学效果显著。当此教材在定稿付印出版之际,我乐为之作序,以誌我国在材料科学与工程类专业的教材建设中,又一页新篇章的展开。

黄蕴元

1987年8月

前 言

本书根据 Richard W. Hertzberg 所著“Deformation and fracture mechanics of engineering materials”一书的主要章节并参考了 D. Hull 和 D. J. Bacon “Introduction to dislocation”(第三版) 和 Robert M. Caddell “Deformation and fracture of solids”等书的有关章节编著而成,作为工程材料类专业本科生的技术基础课教材。

原书内容丰富,叙述简洁,由浅入深。全书突出材料的变形与断裂宏观力学性能与其结构之间的关系。应用晶体位错理论阐明晶体中的缺陷-位错对材料变形性能的影响。应用断裂理论分析材料的断裂强度。重点讲述材料中缺陷引起的低应力脆性断裂。根据线弹性断裂力学原理确定材料的断裂韧性及环境影响和循环加载情况下裂纹的扩展和最后失效。对材料的断裂形式和显微断裂机理作简要介绍。

全书共十章包括材料的变形与断裂两部分,在材料的变形部分中,包括材料的拉伸应力-应变曲线、晶体中位错理论的基础和晶体的滑移等内容。在材料的断裂部分中,包括材料的脆性与断裂、线弹性断裂力学、结构对断裂韧性的影响、环境促使裂纹、循环应力和应变疲劳、疲劳裂纹的扩展速率及高聚物的疲劳失效等内容。

本书可供高等院校工程材料类专业本科生和研究生作为教材或教学参考书,也可供从事材料研究、生产及工程设计的广大工程技术人员参考使用。

本书在编著过程中,曾得到黄蕴元教授的指导,并在百忙中为

本书写序,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1987 年 1 月

目 录

第一编 材料的变形

第一章 材料的拉伸应力-应变曲线(1)

- 第一节 应力和应变的定义 (1)
- 第二节 第Ⅰ种应力-应变曲线 (6)
 - 1.2.1 广义虎克定律
 - 1.2.2 弹性应变能
- 第三节 第Ⅱ种应力-应变曲线 (25)
 - 1.3.1 塑性不稳定和颈缩
 - 1.3.2 均匀应变范围
 - 1.3.3 材料的强度级
 - 1.3.4 韧性
- 第四节 第Ⅲ种应力-应变曲线 (39)
- 第五节 第Ⅳ种应力-应变曲线 (41)
- 第六节 第Ⅴ种应力-应变曲线 (42)
- 第七节 温度和应变速率对材料拉伸力学性能的影响 (44)

第二章 晶体中位错理论的基础(47)

- 第一节 晶体结构 (47)
 - 2.1.1 晶体结构的周期性 晶胞
 - 2.1.2 晶面与晶面指数
 - 2.1.3 点阵方向与方向指数
 - 2.1.4 点阵中格点位置
- 第二节 晶系 布喇菲晶胞 (52)

第三节	简单晶体结构	(54)
第四节	结合力的类型与晶体分类	(62)
第五节	完整晶体的屈服强度	(65)
第六节	晶体中的缺陷	(71)
第七节	晶体中的位错	(74)
第八节	泰勒位错模型	(77)
第九节	晶体中位错的形式	(83)
	2.9.1 刃型位错	
	2.9.2 螺型位错	
第十节	柏氏回路与柏氏矢量	(91)
第十一节	柏氏矢量的守恒性	(94)
第十二节	混合型位错	(95)
第十三节	位错的运动	(97)
	2.13.1 刃型位错的运动	
	2.13.2 螺型位错的运动	
	2.13.3 混合型位错的运动	
第十四节	位错的密度	(107)
第十五节	位错的观测	(108)
第十六节	派-纳应力	(110)
第十七节	位错取向对派-纳应力的影响	(117)
第十八节	位错的弹性性能	(119)
	2.18.1 位错的应力场	
	2.18.2 位错的应变能	
第十九节	位错上的力	(129)
	2.19.1 位错线上的滑移力	
	2.19.2 位错的线张力	
第二十节	位错间的弹性交互作用	(132)
	2.20.1 位错之间的作用力	
	2.20.2 位错群的塞积	

第二十一节	位错-位错的交截	(140)
第二十二节	含割阶螺型位错的运动	(146)
第二十三节	F-R 源位错的增殖	(152)

第三章 晶体的滑移(157)

第一节	晶体的择优滑移系	(157)
3.1.1	面心立方结构晶体	
3.1.2	体心立方结构晶体	
3.1.3	密堆六方结构晶体	
第二节	滑移几何学	(163)
第三节	单晶体材料的应力-应变曲线	(170)
第四节	单晶体和多晶体材料应力-应变曲线之间的关系	(172)

第二编 材料的断裂

第四章 材料的脆性与断裂(177)

第一节	概述	(177)
第二节	材料的断裂形式	(178)
第三节	材料显微断裂机理	(181)
第四节	固体的最高理论结合强度	(186)
第五节	宏观缺陷对构件的影响	(190)
第六节	含裂纹材料的韧性	(195)
第七节	格列菲斯断裂理论	(196)
第八节	格列菲斯公式的修正	(198)
4.8.1	奥罗万修正	
4.8.2	欧文修正	
第九节	裂纹扩展的能量率 G	(201)

第五章 线弹性断裂力学(208)

第一节	概述	(108)
第二节	I 型裂纹尖端附近的应力场	(110)
第三节	几种不同构型裂纹的应力强度因子 K_I 的计算式	(215)
第四节	裂纹尖端塑性区尺寸的估算	(226)
第五节	裂纹尖端塑性区尺寸及应力强度因子的修正	(234)
第六节	D-M 带状塑性区模型	(239)
第七节	G_I 和 K_I 的关系	(241)
第八节	裂纹扩展阻力 (R 曲线)	(245)
第九节	平面应变断裂韧性和平面应力断裂韧性的比较	(250)
第十节	平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试	(255)
第十一节	部分合金材料的平面应变断裂韧性 K_{IC} 值	(261)

第六章 结构对断裂韧性的影响(264)

第一节	晶体结构对材料平面应变断裂韧性的影响	(264)
第二节	构型对断裂韧性的提高	(265)
第三节	变形材料断裂韧性的各向异性	(267)
第四节	晶粒细化提高材料的断裂韧性	(269)
第五节	材料的平面应变断裂韧性与其它力学性能之间的关系	(270)
第六节	部分工程材料平面应变断裂韧性 K_{IC} 值	(274)

第七章 环境促使裂纹(278)

第一节	应力腐蚀裂纹	(278)
第二节	环境促使裂纹的断裂力学试验	(280)
第三节	环境促使裂纹的裂纹扩展速率 da/dt	(285)

第八章 循环应力和应变疲劳(288)

- 第一节 疲劳断裂断口形貌·····(288)
- 第二节 循环应力控制疲劳·····(290)
 - 8.2.1 平均应力对疲劳寿命的影响
 - 8.2.2 应力波动和累积损伤
 - 8.2.3 疲劳极限 σ_{-1}
- 第三节 循环应变控制疲劳·····(300)
- 第四节 循环加载对材料应力-应变曲线的影响·····(301)
- 第五节 循环应变-疲劳寿命曲线·····(306)
- 第六节 疲劳裂纹的成核·····(312)
- 第七节 疲劳损伤预防·····(313)

第九章 疲劳裂纹的扩展(315)

- 第一节 疲劳裂纹的扩展机理·····(315)
- 第二节 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与循环应力和
裂纹长度的关系·····(316)
- 第三节 疲劳寿命估算·····(319)
- 第四节 疲劳断口显微特征·····(322)
- 第五节 疲劳条痕与应力强度因子范围的关系·····(323)
- 第六节 ΔK_I 极端情况下疲劳裂纹的扩展·····(324)
- 第七节 影响疲劳裂纹扩展速率的因素·····(328)
 - 9.7.1 平均应力 σ_m 的影响
 - 9.7.2 载荷波动的影响
 - 9.7.3 不同加载程序的影响
 - 9.7.4 其它因素的影响
- 第八节 载荷间交互影响的模型·····(334)
- 第九节 疲劳断纹扩展速率 da/dN 的测试原理·····(334)

第十章 高聚物的疲劳裂纹扩展(342)

- 第一节 循环频率对高聚物疲劳裂纹扩展的影响·····(342)

第二节 高聚物疲劳断口显微特征……………(344)

**附表 工程常用计量单位换算为标准国际单位(SI)的
换算系数**

第一编 材料的变形

第一章 材料的拉伸应力-应变曲线

在设计构件时，必须考虑合理地选用材料的问题。因此，我们有研究材料性质的必要性，当然材料性质是多方面的，而在构件的强度和刚度的设计中最为重要的是材料的力学性质。所谓力学性质，是指在外力作用下材料强度与变形方面表现出来的性能。

拉伸试验是一种表征材料力学性质最基本的、也是最重要的试验方法。从拉伸试验可以获得材料的许多力学性质，如弹性模量、弹性应变能、变形的特征和范围、屈服强度、拉伸强度和韧性等。

拉伸试验是将试件两端夹入试验机夹头内，开动机器，对试件加上拉力，力的大小从试验机测力装置读出，载荷从零缓慢增加，试件逐渐伸长，试件标距长度内的伸长量可用测量变形的仪表测得，将试体整个拉伸过程中的载荷和对应的伸长量值记录下来，在坐标纸上绘出载荷-伸长量曲线，它描述了试件拉伸过程中载荷和变形发展。为了消除试件尺寸的影响，真实反映拉伸过程中材料性质的变化，以试件承受的正应力作纵坐标，以试件产生的应变作横坐标，绘出应力-应变曲线。不同性质材料的应力-应变曲线是不同的。

第一节 应力和应变的定义

在讨论不同性质材料的应力-应变曲线之前，先要解释两种

应力和应变的定义。

如图 1-1(a)所示，试件长度为 l_0 ，截面积为 A_0 ，试件上作用一拉伸载荷由零缓慢增加到 P 值，试件长度由 l_0 逐渐伸长到 l_f 。此时，试件上所承受的应力和产生的应变，可表示为

$$\sigma_e = \frac{P}{A_0} = \frac{\text{载荷}}{\text{初始截面积}} \tag{1-1}$$

$$\varepsilon_e = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\text{最终长度} - \text{初始长度}}{\text{初始长度}} \tag{1-2}$$

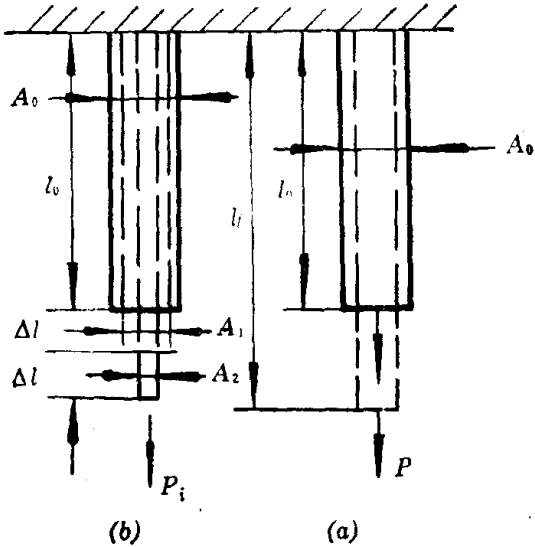


图 1-1 试件拉伸

上述公式在工程计算中普遍使用。我们定义：工程应力用 σ_e 表示，工程应变用 ε_e 表示。工程应力和工程应变是把试件拉伸过程中试件的截面积看作始终不变。事实上，随着载荷的增加，试件长度伸长的同时，其截面积有相应减小。因此，工程应力和工程应变不能真实地反映试件拉伸过程中应力和应变的变化关系。

如果将试件的拉伸过程分成若干个阶段，每个阶段中试件的

伸长量都是相等的。如图 1-1(b) 所示, 试件初始长度为 l_0 , 初始截面积为 A_0 ; 拉伸载荷由零缓慢增加到 P_1 值, 测得试件伸长量为 Δl , 截面积为 A_1 。此时, 试件承受的拉伸应力和产生的应变可表示为:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{A_1}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}$$

继续增加载荷至 P_2 , 测得试件伸长量为 Δl , 截面积为 A_2 。此时, 试件承受的拉伸应力和产生的应变可表示为:

$$\sigma_2 = \frac{P_2}{A_2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_0 + \Delta l}$$

按上述加载方式, 一直加载到载荷值为 P_n 值止, 试件相应的长度为 l_n , 每一阶段试件承受的拉伸应力和产生的应变可表示为:

$$\sigma_3 = \frac{P_3}{A_3}, \dots, \sigma_n = \frac{P_n}{A_n}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta l}{\Delta l + 2 \Delta l}, \dots, \varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0 + (n-1) \Delta l}$$

试件拉伸过程中试件承受的拉伸应力值随试件的伸长而增大。试件在某一瞬时承受的拉伸应力, 我们定义为试件的真实应力, 可表示为:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} = \frac{\text{瞬时载荷}}{\text{试件瞬时截面积}} \quad (1-3)$$

试件拉伸过程中试件产生的应变值随试件伸长而减小, 试件加载到 P_n 值时, 所产生的总应变可表示为:

$$\epsilon_t = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \cdots + \epsilon_n = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (1-4)$$

如果拉伸过程中，每个阶段试件伸长量为一微小增量 dl ，则试件由初始长度 l_0 伸长至 l_n ，试件的总应变可表示为：

$$\epsilon_t = \int_{l_0}^{l_n} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_n}{l_0} = \ln \frac{\text{试件最终长度}}{\text{试件初始长度}} \quad (1-5)$$

我们把 ϵ_t 定义为真实应变。

工程应力和真实应力，工程应变和真实应变是两种不同的应力和应变定义。真实应力和真实应变考虑了试件变形过程中试件长度与截面积之间的相互变化，能真实地反映试件变形过程中随应变量的增大试件材料性质的变化。

关于工程应力和真实应力，工程应变和真实应变之间的不同性质及其相互关系说明如下：

(1) 同一试件在相等伸长量情况下，试件的真实应变变量小于工程应变变量，伸长量愈大，两者差别愈大。在伸长量小于 15% 情况下，两者差别不大，见表 1-1 a。

表 1-1 a

试件伸长量(mm)	1	5	10	15	20	50
工程应变变量	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	0.50
真实应变变量	0.0099	0.0488	0.0953	0.1398	0.1823	0.4054

注：试件初始长度为 100 mm

(2) 一个试件分几次进行拉伸，各次的拉伸工程应变变量之和不等于一次拉伸的工程应变变量。

一次拉伸的工程应变变量 ϵ'_e 为：

$$\epsilon'_e = \frac{l_2 - l_0}{l_0}$$