



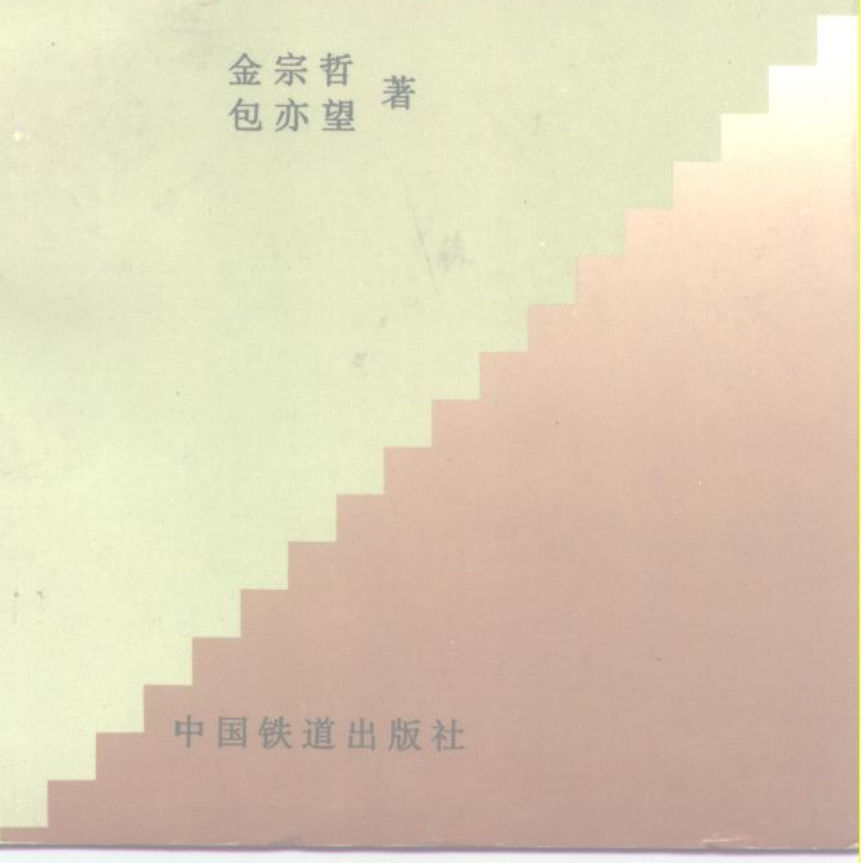
# 脆性材料力学性能 评价与设计

*Characterization of Mechanical Properties  
for Brittle Materials and Ceramics*

金宗哲 著  
包亦望



中国铁道出版社



TB39

J92

# 脆性材料力学性能 评价与设计

Characterization of Mechanical Properties  
for Brittle Materials and Ceramics

金宗哲 著  
包亦望

中 国 铁 道 出 版 社

1996年·北 京

**(京)新登字 063 号**

**图书在版编目(CIP)数据**

脆性材料力学性能评价与设计/金宗哲,包亦望著. —北京:  
中国铁道出版社,1996

ISBN 7-113-02503-X

I. 脆… II. ①金… ②包… III. ①脆性材料-力学性能-  
评估②脆性材料-力学性能-设计 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 16633 号

**脆性材料力学性能评价与设计**

金宗哲 包亦望 著

\*

中国铁道出版社出版发行

(北京市宣武区南菜园街甲 72 号)

责任编辑 傅希刚 封面设计 马 利

各地新华书店经售

北京市顺义县板桥印刷厂印刷

---

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:6.375 字数:163 千

1996 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—1500 册

---

ISBN7-113-02503-X/TU·522 定价:16.70 元

Dr. 26/61

## 内 容 简 介

本书首先论述了脆性材料力学性能评价的基本理论,包括脆性材料的脆性、破坏准则、破坏发生区、含缺陷材料的强度、微裂强度、冲击强度和疲劳强度等;其次论述了高技术陶瓷材料力学性能的特点和常用评价方法,提出了新的评价与设计方法;另外还简述了高技术陶瓷材料科学技术发展动向。

# 前言

力学性能评价的目的是为了安全地使用和合理地设计、制造材料。其评价结果,应该及时应用于材料的设计与制造工艺之中。材料设计学的发展要求我们精确地评价材料,并及时反馈给材料微观结构设计及制造工艺。所以评价与设计的关系是分不开的。为此本书起名为《脆性材料力学性能评价与设计》。

材料强度学作为一门科学来说,一般被认为是在 1638 年意大利的伽利略(G. Galileo)时期开始的。伽利略为了解决建造船只和水闸所需要的梁的问题提出了强度计算的概念。材料强度学的发展历史由铁摩辛柯(Timoshenko)作了详细说明。含裂纹材料的强度理论问题是在 1920 年英国皇家航空研究所格里菲斯(Griffith)关于玻璃强度的试验开始提出的,经过后人近 30 年的研究,1949 年,欧文(G. R. Irwin)的论文为最终建立断裂力学奠定了基础。第二次世界大战中,美国制造的大量军舰发生的断裂事故促进了断裂力学理论和评价技术的发展。以上这些研究主要用于金属材料方面,后来也用于解析陶瓷材料、岩石和混凝土等脆性材料的脆性断裂。但是,断裂力学不完全适合于脆性材料的破坏,破坏韧性  $K_{Ic}$  的物理的概念不够明确,没有准确反映出不同材料中裂纹对强度的效应的差别。

1963 年横堀武夫在他的著作中把弹性、塑性、位错、裂纹力学、宏观微观相结合的断裂力学、破坏概率论、破坏速度论等归纳为“材料强度学”,认为破坏问题是各种力学、物理材料学相联系起来的综合性科学。但是,由于问题的复杂性,使理论没有得到广泛的应用。

近 20 年来,精细陶瓷材料在科学技术领域的发展和在高新技术及工业领域中得到了广泛应用。它不仅可作为高强、高韧、高硬度、耐高温、耐磨和耐腐蚀等特殊结构材料,而且可作为能量转换、信息传递存储和处理、环境敏感和改善环境等特殊效应的功能材料。陶瓷材料的应用涉及到力、热、光、电、磁、声、化学等很多方面,都与力学性能相关。特别是在结构陶瓷中,热机、陶瓷发动机、燃气轮机的研制和材料的发展、应用及产业化,都需要建立适合陶瓷材料的性能评价技术和标准。由十八个技术先进国家制定的“先进材料及标准的凡尔赛计划”和正在逐步落实的精细陶瓷材料国际标准 ISO/TC206 的成立等都说明了陶瓷材料性能评价的重要性。同样它也在岩石工程、混凝土工程及各种建筑工程方面引起了重视,尤其是近十多年来,混凝土高强度带来的脆性破坏正受到愈来愈多的关注。因此,正确评价脆性材料力学性能的可靠性是当前亟待解决的课题。

为了解决脆性对材料强度的影响,本书中引入破坏发生区的概念,提出了强度、裂纹和破坏发生区三者关系的新理论和破坏准则,精确解析了各种不同材料的破坏现象。另外,在裂纹扩展、微裂强度、冲击强度和疲劳理论和复相陶瓷材料设计等方面都提出了新观点和评价与设计的新方法。

本书的第一部分(第 1~7 章)是脆性材料强度学理论,即脆性材料力学性能评价的基本理论。本书第二部分(第 8~10 章)讨论和介绍精细陶瓷材料力学性能特点和对其常用的评价方法,并介绍应用新理论的材料设计事例。这部分材料设计方面的内容较少,但提出了几个设计原则和例题,并简述了高技术陶瓷材料科学技术的发展动向。

本书第 1~6 章及第四章由金宗哲博士著;第 7~9 章由包亦望博士著,金宗哲博士修改完稿。

在本书的写作过程中,得到吴中伟院士的指导和帮助;在研究内容上得到李懋强博士、赵宏博士、杨宏博士、赵国军博士、马眷荣高工、黎晓瑞高工、刘忠伟高工、仇沱高工、朱文博士、罗颀博士、孙

立讲师、岳雪梅硕士、方锐硕士等的竭诚协作,在此谨向各位致以衷心的感谢。

作者水平有限,诚恳希望读者对本书中的错误和不当之处予以指正。

著 者

1996年8月20日

# 目 录

## 第一部分 脆性材料强度学基础

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第 1 章 弹性、粘性、塑性和脆性</b> ..... | 1  |
| 1.1 引 言 .....                  | 1  |
| 1.2 粘弹性力学模型 .....              | 2  |
| 1.3 非线性弹性力学模型 .....            | 3  |
| 1.4 塑性和超塑性 .....               | 6  |
| 1.5 脆 性 .....                  | 8  |
| <b>第 2 章 材料破坏准则</b> .....      | 12 |
| 2.1 引 言 .....                  | 12 |
| 2.2 经典强度理论——材料力学的破坏准则 .....    | 12 |
| 2.3 最大破损比破坏准则 .....            | 13 |
| 2.4 断裂力学的破坏准则 .....            | 17 |
| 2.5 裂纹扩展准则 .....               | 18 |
| <b>第 3 章 破坏发生区与材料强度</b> .....  | 29 |
| 3.1 引 言 .....                  | 29 |
| 3.2 破坏发生区的概念、平面破坏发生区 .....     | 29 |
| 3.3 破坏发生区与弯曲强度、抗拉强度的关系 .....   | 31 |
| 3.4 裂纹尖端和各种缺陷附近的破坏发生区 .....    | 32 |
| 3.5 受压荷载下角尖附近的破坏发生区 .....      | 35 |
| 3.6 破坏发生区破坏准则 .....            | 40 |
| <b>第 4 章 含缺陷材料的强度</b> .....    | 44 |
| 4.1 引 言 .....                  | 44 |
| 4.2 含裂纹、菱形和方形缺陷的材料强度 .....     | 45 |
| 4.3 含圆孔或含球窝的材料强度 .....         | 45 |

|            |              |     |
|------------|--------------|-----|
| 4.4        | 含缺陷材料强度图     | 47  |
| <b>第5章</b> | <b>微裂强度</b>  | 51  |
| 5.1        | 引言           | 51  |
| 5.2        | 压痕附近的应力分析    | 52  |
| 5.3        | 微裂(拉)强度      | 55  |
| 5.4        | 微压屈服极限和微压强度  | 57  |
| 5.5        | 微压弹性模量       | 59  |
| 5.6        | 压痕变形量的测试方法   | 59  |
| 5.7        | 微裂强度法准则      | 61  |
| <b>第6章</b> | <b>抗冲击强度</b> | 64  |
| 6.1        | 引言           | 64  |
| 6.2        | 冲击试验方法       | 67  |
| 6.3        | 自落冲击小球的强度试验法 | 70  |
| 6.4        | 冲击弯曲强度       | 73  |
| 6.5        | 颗粒冲击损伤       | 78  |
| 6.6        | 液滴冲击损伤与气蚀    | 84  |
| <b>第7章</b> | <b>疲劳强度</b>  | 87  |
| 7.1        | 引言           | 87  |
| 7.2        | 陶瓷疲劳的表征方法    | 88  |
| 7.3        | 经典疲劳理论       | 90  |
| 7.4        | 疲劳强度衰减理论     | 93  |
| 7.5        | 高温疲劳变形失效准则   | 104 |

## 第二部分 陶瓷材料力学性能评价与设计

|            |                 |     |
|------------|-----------------|-----|
| <b>第8章</b> | <b>陶瓷材料强度特性</b> | 107 |
| 8.1        | 引言              | 107 |
| 8.2        | 裂纹对强度的影响        | 110 |
| 8.3        | 强度的尺寸效应         | 111 |
| 8.4        | 加载速率对强度的影响      | 118 |
| 8.5        | 温度对强度的影响        | 123 |

|             |                               |            |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 8.6         | 陶瓷的疲劳特性 .....                 | 131        |
| 8.7         | 陶瓷的高温疲劳试验分析 .....             | 135        |
| <b>第9章</b>  | <b>陶瓷材料力学性能评价方法 .....</b>     | <b>143</b> |
| 9.1         | 引 言 .....                     | 143        |
| 9.2         | 抗拉强度 .....                    | 143        |
| 9.3         | 抗弯强度 .....                    | 145        |
| 9.4         | 抗压强度 .....                    | 146        |
| 9.5         | 冲击强度及冲击韧性 .....               | 146        |
| 9.6         | 弹性模量 .....                    | 147        |
| 9.7         | 断裂韧度 .....                    | 148        |
| 9.8         | 抗热震性 .....                    | 149        |
| 9.9         | 磨 损 .....                     | 151        |
| 9.10        | 硬 度 .....                     | 152        |
| 9.11        | 疲 劳 .....                     | 153        |
| 9.12        | 蠕 变 .....                     | 156        |
| 9.13        | 无损检测 .....                    | 158        |
| 9.14        | 可靠性评价及寿命预测 .....              | 161        |
| <b>第10章</b> | <b>精细陶瓷材料设计与评价技术的发展 .....</b> | <b>164</b> |
| 10.1        | 引 言 .....                     | 164        |
| 10.2        | 计算材料设计学概述 .....               | 165        |
| 10.3        | 材料强度设计 .....                  | 166        |
| 10.4        | 复相陶瓷材料设计 .....                | 168        |
| 10.5        | 热应力与残留应力计算 .....              | 173        |
| 10.6        | 纳米材料 .....                    | 176        |
| 10.7        | 协合材料 .....                    | 181        |
| 10.8        | 梯度材料 .....                    | 182        |
| 10.9        | 智能材料 .....                    | 185        |
| 10.10       | 绿色材料 .....                    | 186        |

# 第1章 弹性、粘性、塑性和脆性

## 1.1 引言

所有的固体在不同的外加荷载作用过程中,会分别或同时出现弹性、粘性、塑性以及脆性响应。一般在较低应力条件下所发生的变形(或应变)可以恢复,在较高应力条件下所发生的变形则只恢复其中的一部分。对于可恢复的变形,可在卸载后立即恢复的称弹性变形;卸载后缓慢恢复的称迟弹性或称弹性后效。对于不可恢复的变形,卸载后立即可显的部分称塑性变形,它与时间无关,只决定于加载历程;在较小应力条件下不可恢复的变形称为粘性流动,它的大小与载荷作用时间有关。通常把弹性后效和粘性流动两者统称为蠕变,把内应力随时间的推进而减少的现象称为应力松弛。外应力作用下不易察觉塑性变形或粘性流动,在塑性变形之前发生断裂的现象称为脆性破坏。有时塑性变形量很大,达到100%以上,这种现象称为超塑性。

外加应力时,固体中原子间距和内能都发生改变,从而在固体中引起弹性反应。这时在固体中应力较均匀,与原子间距相比,固体内部各处邻近原子之间的相对位移都是很小的。这时应力-应变关系是线性的,这一阶段称为近似弹性阶段。如进一步加大外加应力,在晶体材料中,晶格越过了位错运动所组成的滑移面的平移而产生塑性变形,这时原子层之间发生的平移产生了相当大的局部切变,这一阶段称为屈服阶段。在陶瓷材料中,这一屈服阶段不够明显,特别是对长程无序的玻璃态材料,其局部的切变不会象晶体那样对周围产生强烈的影响,在许多情况下它能得到局部调整而不向外扩展。一般认为,金属的塑性是由位错而产生的,陶瓷中不易产生位错而呈现为脆性。但是其脆性的本质不十分清楚。

近十年来,人们对陶瓷材料的超塑性研究产生了极大的兴趣,发现 Y-TZP,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等陶瓷材料在单向和双向拉伸或压缩时产生超塑性现象<sup>[1,2]</sup>。这种现象是晶粒细到纳米级时,由于界面的延展性而产生的。这种机制也同脆性机制一样不十分清楚。

本章中分别讨论:(1)弹性、塑性和粘性的力学关系式,即粘弹性力学模型;(2)弹性和拟塑性材料的力学关系式,即非线性弹性力学模型;(3)塑性和超塑性力学模型;(4)脆性力学模型等。

## 1.2 粘弹性力学模型

固体中的弹性变形、弹性后效、塑性变形、应力松弛和粘性流动等均与应力、温度、时间有关,这种性质在力学上概括为粘弹性。在应变很小时,应力-应变关系近似于线性,所以称为线性粘弹性。

弹性应变率  $\dot{\epsilon}_1$  为

$$d\epsilon_1/dt = \dot{\epsilon}_1 = 1/E \cdot d\sigma/dt \quad (1.1)$$

粘性应变率  $\dot{\epsilon}_2$  和应力  $\sigma$  成正比,即

$$d\epsilon_2/dt = \dot{\epsilon}_2 = \sigma/\eta \quad (1.2)$$

式中  $\eta$  为粘度,变形为热激活过程,因此  $\eta$  和温度有关,即

$$\eta = \eta_0 \exp Q_n/RT$$

式中  $\eta_0$  为常数,  $Q_n$  为粘性流动激活能,  $R$  为气体常数,  $T$  为绝对温度。

因此粘弹性应变率为

$$d\epsilon/dt = 1/E \cdot d\sigma/dt + \sigma/\eta \quad (1.3)$$

当  $E, \eta$  是常数时,就成为线性粘弹性问题;当  $\eta \rightarrow \infty$  时,就成为弹性问题。

上述关系也可用弹性变形和热运动时能量变化来表示。弹性变形时相应的热量的增量  $dQ$ , 固体内部的内能的变化  $dU$ , 单位体积熵的增量  $dS$ , 其相互关系式为

$$dU = dQ + \sigma d\epsilon$$

$$dQ = T \cdot dS$$

$$\text{因此} \quad \sigma = (\partial U / \partial \epsilon)_T - T(\partial S / \partial \epsilon)_T \quad (1.4)$$

当  $\partial S / \partial \epsilon = 0$  (常温下) 时,  $\sigma \approx (\partial U / \partial \epsilon)_T$ 。

如  $(\partial U / \partial \epsilon)_T = 0$  (低应力并高温下), 则

$$\sigma = -T(\partial S / \partial \epsilon)_T$$

$$E = -T(\partial^2 S / \partial \epsilon^2)_T$$

以上是对 Maxwell 力学模型的简要说明。陶瓷和金属材料在常温和应力不大时一般表现为弹性, 弹性是粘弹性的特殊情况。高分子材料、岩石和高温条件下的陶瓷和金属材料, 除受荷载作用时一般保持荷载与变形的线性关系之外, 还有第三个参数——时间因素。因此, 线性粘弹性力学模型常用于应变小的蠕变或长寿命预测。应力较大或温度较大时, 为非线性规律, 这时可用非线性弹性力学模型或用塑性力学模型。

### 1.3 非线性弹性力学模型<sup>[3,4]</sup>

材料或固体在受力条件下应力-应变关系的方程式称为材料本构方程式。研究和评价材料的强度或破坏时, 首先用材料的应力-应变关系分析内部应力状态, 然后选用合适的破坏准则判别其强度和破坏。这一应力应变关系与固体物质组分和组织结构等因素有关。各种固体的应力-应变曲线都不相同, 所以不同材料内部的应力状态和破坏形式也各不一样。这种关系便成为材料强度和力学性能的基本性质。

#### 1. 应力-应变曲线的非线性和非对称性

理想固体和一般的精细陶瓷材料的应力-应变关系是线性的, 其应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  的关系可用弹性模量来表示, 即

$$\sigma = E\epsilon$$

$$\text{或} \quad \{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (1.5)$$

式中的  $[D]$  为弹性矩阵。但是, 对岩石、混凝土等含孔隙的材料来说, 应力-应变关系是非线性的。它一般用非线性或弹塑性变形的增量来表示, 其矩阵表达式为

$$\{d\sigma\} = [D^p] \{\epsilon\} \quad (1.6)$$

式中 $[D^p]$ 为弹塑性矩阵。

另外,一般都没有注意到对 $\epsilon$ 轴正负应力是形状不完全相同的应力-应变关系曲线,作者把这种现象称为应力-应变关系的非对称性,这种变化用 $d\sigma/d\epsilon = E_p$ 表示。

从大理石试件单轴压缩和拉伸试验中可以看到,压应力由零增加到一定程度后,主要是受力过程中材料密度的变化, $E_p$ 是变数。有一定孔隙率的大理石试件的单轴压缩和拉伸应力-应变试验结果如图1.1所示。压应力由零逐步增加时,由于材料密度的变

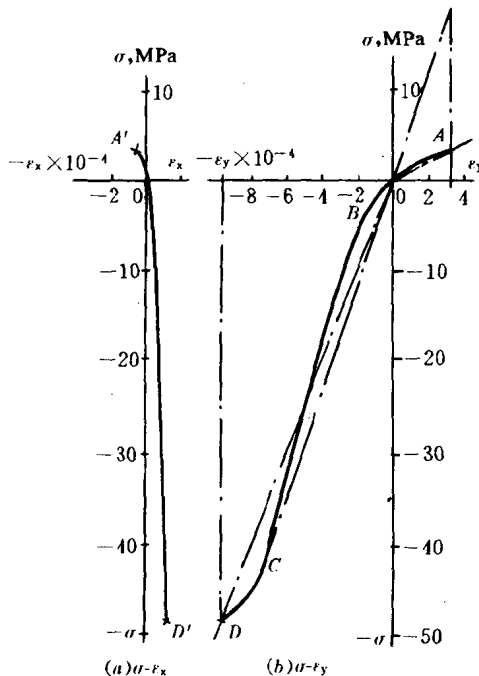


Fig. 1.1 Stress-strain response of Marble

图 1.1 大理石的应力-应变曲线

化, $E_p$ 是有所增加的趋势。当压应力接近破坏应力时有所减少,一直到破坏,没有明显的屈服点。此时把 $E$ 值的最大点定义为伪屈

服点(pseudo-yielding point)(图中  $C$  点),并把该点的切线弹性模量  $E$  作为该材料的弹性常数。

拉应力由零逐步增加时  $E_p$  逐渐减小,一直到破坏。拉应力弹性模量小于压应力弹性模量,拉强度远小于压强度,材料的孔隙率和缺陷尺寸越大,这种差别就越大。

从应力-泊松比曲线中(图 1.2)也可看到受拉引起的泊松比  $\nu_t$  小于受压时测得的泊松比  $\nu_c$ 。

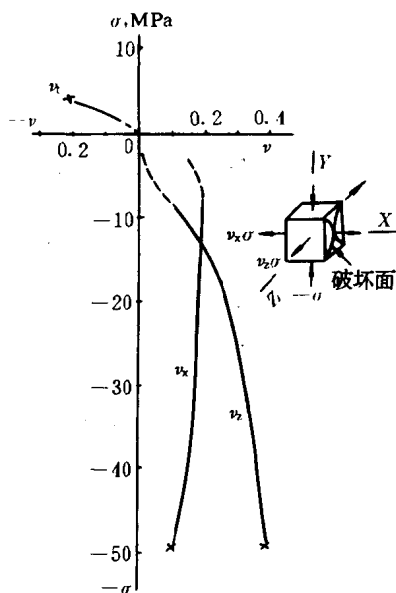


Fig. 1.2 Stress-Poisson's ratio of Marble

图 1.2 大理石的应力-泊松比曲线

## 2. 材料的弹性损伤系数

上述应力-应变曲线的非线型和非对称性是由于材料内部缺陷或损伤导致的,表现为弹性模量的变化。这种弹性模量的变化称为弹性损伤系数。

分别假定拉和压应力条件下破坏极限点的割线弹性模量为

$E_t$  和  $E_c$ , 则拉应力弹性损伤系数为

$$D_t = E_t / E \quad (1.7)$$

压应力弹性损伤系数为

$$D_c = E_c / E \quad (1.8)$$

如果把  $E$  当作理想固体的弹性模量, 则  $D_t, D_c$  表示  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线的非线性型和非对称性的程度, 并作为固体内部缺陷或损伤作用程度。理想固体和密度为 98% 以上的材料中  $D_t = D_c = 1$ 。一般情况下,  $D_t < 1, D_c < 1$  并  $D_t \leq D_c$ 。脆性材料与金属材料不同, 不易观测到很大的塑性变形。

### 3. 非线性弹性本构方程

一般来说, 含缺陷材料的应力-应变关系, 在三轴应力状态下由下式表示:

$$\text{对 } i \text{ 轴的应变为 } \epsilon_i = \sigma_i / E_i - (\nu_j \cdot \sigma_j / E_j + \nu_k \cdot \sigma_k / E_k)$$

式中  $i=1, 2, 3; j=2, 3, 1; k=3, 1, 2; i \neq j \neq k$ 。

如  $E$  和  $\nu$  是变数时, 即为非线性型、非对称性的问题时, 简化为如下三个矩阵表达式:

$$\left. \begin{aligned} -\sigma_y \leq \sigma < 0 \text{ 时, } \{\sigma\} &= [D] \{\epsilon\} \\ \sigma > 0 \text{ 时, } \{\sigma\} &= D_t [D] \{\epsilon\} \\ \sigma < -\sigma_y \text{ 时, } \{\sigma\} &= D_c [D] \{\epsilon\} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

岩石、混凝土类脆性材料中, 拉和压强度的差别很大, 并且应力-应变曲线为非线型和拉与压为非对称性, 因此, 不易用经典的本构关系解析其强度和破坏。本节中提出的用三种条件分别表示, 正确地反映出各种不同固体的破坏的实际情况。例如, 用常用的方法计算岩石内部应力时, 很多情况下得出拉应力破坏的错误结论。如用本章得到的拉弹性模量  $E_t$  小于压弹性模量  $E_c$  的结论, 拉应力值减小很多, 就可得到与实际情况相符合的结论。本章对岩石和混凝土等以及高温中使用的材料的破坏计算有实用意义。

## 1.4 塑性和超塑性

材料受力时, 应力超过屈服点后, 仍能继续变形, 而不即行断

裂。这时即使撤除了外力,仍有一部分变形不能恢复,这部分残余永久变形称为塑性变形。塑性的大小通常用拉、压试验的延伸率或断面收缩率来度量。有些纳米材料在很低的应力下显现很大的塑性变形,其变形抗力小,因此存在陶瓷材料在高温中进行塑性加工或超塑性加工的可能性。

### 1. 塑性材料的应力-应变曲线

$$\left. \begin{array}{l} \text{应力为 } \sigma = p/S_0 \\ \text{应变为 } \epsilon = (L - L_0)/L_0 \\ \text{真应变为 } \epsilon_t = \ln(L/L_0) \\ \text{真应力为 } \sigma_t = \sigma \cdot L/L_0 \end{array} \right\} \quad (1.10)$$

### 2. 塑性稳定性<sup>[5]</sup>

塑性加工时,变形阻力由下式表示:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^r \quad (1.11)$$

式中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $m$  为应变速度感应指数(应力指数的倒数),  $r$  为加工硬化系数,  $K$  为系数。

塑性变形稳定发展的条件为<sup>[6]</sup>

$$m + r \geq 1$$

当  $r \geq 0$ ,  $m \geq 0.3$  时也可产生超塑性变形。Y-TZP 陶瓷的  $m = 0.5$ , 则其必然产生超塑性变形。

据急变应变速度  $V_1, V_2$  和荷重-应变速度图可计算  $m$  值<sup>[7]</sup>。

$$m = \frac{\lg(P_A/P_B)}{\lg(V_1/V_2)} \quad (1.12)$$

用恒速拉伸试验法也可求得  $m$  值。即  $m$  值为真应力-真应变曲线图中其对数曲线的斜率。

### 3. 超塑性

材料在一定的应力和温度作用下,会产生极大的变形。变形率  $(L - L_0)/L_0 \geq 100\%$  的材料,一般称为超塑性材料。陶瓷材料的塑