

关振铎 张中太 焦金生 编

无机材料 物理性

清华

无机材料物理性能

关振铎 张中太 焦金生 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述无机非金属材料的力学性能(包括受力形变、断裂与强度)、热学、光学、导电、介电、磁学等性能及其发展和应用,介绍各种重要性能的原理及微观机制,性能的测定方法以及控制和改善性能的措施,各种材料结构与性能的关系,各性能之间的相互制约与变化规律。本书在无机材料的断裂力学及缺陷电导的应用方面的阐述均有特色,这些是当前无机非金属材料研究中的重要方向。

本书可作为无机非金属材料专业,包括传统陶瓷与新型陶瓷、玻璃、半导体、晶体、石墨和金刚石、耐火材料以及建筑材料等专业的大学生和研究生教材。对从事材料科学的研究、生产、管理、开发和新技术推广等的科技人员也是一本合适的参考书。

(京)新登字 158 号

无机材料物理性能

关振铎等 编著

☆

清华大学出版社出版

(北京 清华园)

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 13 字数: 338 千字

92年3月第1版 1992年3月第1次印刷

印数: 0001—5000

ISBN 7-302-00955-4/O·125

定价: 4.00 元

目 录

前 言	1
第一章 无机材料的受力形变	3
§ 1.1 无机材料的应力、应变及弹性形变	3
一、应力	4
二、应变	5
三、无机材料的弹性变形行为	7
§ 1.2 无机材料中晶相的塑性形变	17
一、晶格滑移	18
二、塑性形变的位错运动理论	21
三、塑性形变速率对屈服强度的影响	24
§ 1.3 无机材料的高温蠕变	25
一、高温蠕变的位错运动理论	27
二、扩散蠕变理论	27
三、晶界蠕变理论	27
四、影响蠕变的因素	27
§ 1.4 高温下玻璃相的粘性流动	27
一、流动模型	27
二、影响粘度的因素	27
习题	36
第二章 无机材料的脆性断裂与强度	
§ 2.1 脆性断裂现象	
一、弹、粘、塑性形变	
二、脆性断裂行为	
三、突发性断裂与裂纹的缓慢生长	
§ 2.2 理论结合强度	

§ 2.3	Griffith 微裂纹理论	42
§ 2.4	应力场强度因子和平面应变断裂韧性	47
	一、裂纹扩展方式	47
	二、裂纹尖端应力场分析	48
	三、应力场强度因子及几何形状因子	50
	四、临界应力场强度因子及断裂韧性	51
	五、裂纹扩展的动力与阻力	52
	六、柔度标定法求几何形状因子	53
	七、线弹性计算公式对试件尺寸的要求	54
	八、断裂韧性的测试方法	57
§ 2.5	裂纹的起源与快速扩展	68
	一、裂纹的起源	68
	二、裂纹的快速扩展	70
	三、防止裂纹扩展的措施	71
§ 2.6	无机材料中裂纹的亚临界生长	71
	一、应力腐蚀理论	72
	二、高温下裂纹尖端的应力空腔作用	73
	三、亚临界裂纹生长速率与应力场强度因子的关系	74
	四、根据亚临界裂纹扩展预测材料寿命	77
	五、蠕变断裂	80
§ 2.7	显微结构对材料脆性断裂的影响	81
	一、晶粒尺寸	81
	二、气孔的影响	82
§ 2.8	无机材料强度的统计性质	83
	一、无机材料强度波动的分析	83
	二、强度的统计分析	84
	三、求应力函数的方法及韦伯分布	86
	四、韦伯函数中 m 及 σ_0 的求法	86
	五、有效体积的计算	87
	六、韦伯统计的应用及实例	88
	七、两参数韦伯分布及其应用	90
§ 2.9	提高无机材料强度改进材料韧性的途径	92
	一、微晶、高密度与高纯度	92

二、提高抗裂能力与预加应力	93
三、化学强化	94
四、相变增韧	95
五、弥散增韧	95
§ 2.10 复合材料	96
一、连续纤维单向强化复合材料的强度	97
二、短纤维单向强化复合材料	99
§ 2.11 无机材料的硬度	101
一、测定材料硬度的技术	101
二、Vicker 压痕法测定无机材料的断裂韧性	103
习题	106
第三章 无机材料的热学性能	108
§ 3.1 无机材料的热容	110
一、晶态固体热容的经验定律和经典理论	111
二、晶态固体热容的量子理论回顾	112
三、无机材料的热容	116
✓ § 3.2 无机材料的热膨胀	119
一、热膨胀系数	119
二、固体材料热膨胀机理	121
三、热膨胀和其他性能的关系	124
四、多晶体和复合材料的热膨胀	126
五、陶瓷制品表面釉层的热膨胀系数	130
§ 3.3 无机材料的热传导	131
一、固体材料热传导的宏观规律	131
二、固体材料热传导的微观机理	132
三、影响热导率的因素	137
四、某些无机材料的热导率	149
§ 3.4 无机材料的热稳定性	150
一、热稳定性的表示方法	150
二、热应力	151
三、抗热冲击断裂性能	154
四、抗热冲击损伤性	159
五、提高抗热冲击断裂性能的措施	162

§ 3.5* 无机材料的熔融与分解	164
一、晶体的熔点与结合能	164
二、间隙相的熔点	167
三、升华与分解	167
习题	169
第四章 无机材料的光学性能	170
§ 4.1 光通过介质的现象	170
一、折射	170
二、色散	174
三、反射	176
§ 4.2 无机材料的透光性	178
一、介质对光的吸收	178
二、介质对光的散射	182
三、无机材料的透光性	184
四、提高无机材料透光性的措施	189
§ 4.3 界面反射和光泽	191
一、镜反射和漫反射	191
二、光泽	192
§ 4.4 不透明性(乳浊)和半透明性	193
一、不透明性	193
二、乳浊剂的成分	194
三、乳浊机理	194
四、常用乳浊剂	196
五、改善乳浊性能的工艺措施	197
六、半透明性	198
§ 4.5 无机材料的颜色	200
§ 4.6 其它光学性能的应用	203
一、荧光物质	203
二、激光器	204
三、通讯用光导纤维	205
四、电光及声光材料	206
习题	207
第五章 无机材料的电导	208

§ 5.1 电导的物理现象	208
一、电导的宏观参数	208
二、电导的物理特性	213
§ 5.2 离子电导	216
一、载流子浓度	216
二、离子迁移率	217
三、离子电导率	220
四、影响离子电导率的因素	225
五、固体电解质 ZrO_2	227
§ 5.3 电子电导	229
一、电子迁移率	229
二、载流子浓度	234
三、电子电导率	240
四、影响电子电导的因素	242
五、晶格缺陷与电子电导	250
§ 5.4 玻璃态电导	256
§ 5.5 无机材料的电导	260
一、多晶多相固体材料的电导	260
二、次级现象	263
三、无机材料电导的混合法则	265
§ 5.6 半导体陶瓷的物理效应	266
一、晶界效应	266
二、表面效应	271
三、西贝克效应	275
四、 $p-n$ 结	277
§ 5.7 超导体	281
一、Josephson 效应	281
二、超导体的应用	282
习题	283
第六章 无机材料的介电性能	287
§ 6.1 介质的极化	288
一、极化现象及其物理量	288
二、克劳修斯-莫索蒂方程	289

三、电子位移极化	292
四、离子位移极化	297
五、松弛极化	299
六、转向极化	304
七、空间电荷极化	306
八、自发极化	306
九、高介晶体的极化	307
十、多晶多相无机材料的极化	315
§ 6.2 介质损耗	321
一、介质损耗的表示方法	321
二、介质损耗和频率、温度的关系	327
三、无机介质的损耗	329
§ 6.3 介电强度	335
一、介质在电场中的破坏	335
二、热击穿	336
三、电击穿	342
四、无机材料的击穿	345
§ 6.4 铁电性	347
一、铁电体	347
二、钛酸钡自发极化的微观机理	350
三、铁电畴	353
四、铁电体的性能及其应用	356
§ 6.5 压电性	361
一、压电效应	361
二、压电振子及其参数	367
三、压电性与晶体结构	369
四、压电陶瓷的预极化及其性能稳定性	371
五、压电材料及其应用	374
习题	377
第七章 无机材料的磁学性能	378
§ 7.1 物质的磁性	378
一、磁性	378
二、磁性的本质	381

三、磁性的分类·····	382
§ 7.2 磁畴与磁滞回线·····	387
一、磁畴·····	387
二、磁滞回线·····	388
三、磁导率·····	389
§ 7.3 铁氧体的磁性与结构·····	391
一、尖晶石型铁氧体·····	391
二、石榴石型铁氧体·····	394
三、磁铅石型铁氧体·····	395
§ 7.4 铁氧体磁性材料·····	396
一、软磁材料·····	396
二、硬磁材料·····	396
三、矩磁材料·····	398
习题·····	399
参考文献·····	400
附录 1 常用重要公式·····	402
附录 2 性能分类、典型材料和应用举例·····	404

前 言

无机非金属材料类专业教材编审委员会“材料科学基础理论”教材编审小组,在1990年度工作会议(1990年10月8日—10日于天津大学)上,对“无机材料物理性能”教材进行了审查,同意列为全国统编教材。并经国家建筑材料工业局教材办公室审定“同意作为必修课教材出版”。

本书的主要内容是研究无机材料(指无机非金属材料,包括陶瓷、玻璃、耐火材料、建筑材料等)的各种物理性能,不牵涉到化学性能(如耐腐蚀等)。所研究的性能包括无机材料的变形与力学性能、脆性断裂与强度以及热学、光学、电导、介电、压电和磁学等性能。这些性能基本上都是各个领域在研制和应用无机非金属材料中,对它们提出来的一系列技术要求,即所谓材料的本征参数。因此,首先要掌握上述各类本征参数的物理意义和单位以及这些参数在实际问题中所处的地位。其次,要搞懂这些性能参数的来源,即性能和材料的组成、结构和构造的关系。也就是说,掌握这些性能参数的物质规律,从而为判断材料优劣,正确选择和使用材料,改变材料性能,探索新材料、新性能、新工艺打下理论基础。为了全面地掌握材料的结构,对无机材料的原料和工艺也应有所认识,以取得分析性能的正确依据。

书中安排了较多的实验内容,从验证性能参数、掌握检验技术、学习科研方法和分析手段等方面加强学习效果。

本书的先修内容为:材料力学、物理化学、固体材料结构基

础、微观分析方法、硅酸盐工艺等。

无机材料物理性能的研究方法可以分成两种：一种是经验方法，在大量占有实验数据的基础上，经过对数据的分析处理，整理为经验方程，来表示它们的函数关系；另一种是从机理着手，即从反映本质的基本关系（如原子间的相互作用、点阵振动的波形方程等）出发，按照性能的有关规律，建立物理模型，用数学方法求解，得到有关理论方程式。通过以上两种方法的相互验证促进了材料科学的发展。

在材料的性能研究过程中，为了阐明材料的宏观构造和微观结构，在各种性能实验的同时，常常进行材料的金相显微镜形貌、偏光、扫描电镜微观构造以及X射线衍射等微观分析，以取得物质结构和成分的宏观及亚微观方面的直观验证。

在本书的一些章节中，介绍了最近发表的科研成果，特别是新型材料和新型工艺下获得的高性能机理（例如超导材料性能机理）。为便于统计运算，个别章节列出了专用程序。

本书适用于无机非金属材料中的新型陶瓷、传统陶瓷、玻璃、晶体、半导体、石墨、薄膜、复合材料以及耐火材料等专业。其它像硅酸盐工程，包括水泥与混凝土材料、建筑及装饰材料等专业也可参考。

本书第一、二、三、四章由关振铎编著，第五章由张中太编著，第六、七章由焦金生编著。全书由关振铎统编。

目录中打星号（*）者，可视为拓宽及加深知识面的内容，不作为基本学习要求。

书中不妥及错误之处，敬请读者指正。

作者

1991年2月于清华园

第一章 无机材料的受力形变

§ 1.1 无机材料的应力、应变及弹性形变

各种材料在外力作用下,发生形状和大小的变化,称为形变。不同材料的变形行为是很不同的,如图 1.1 所示。

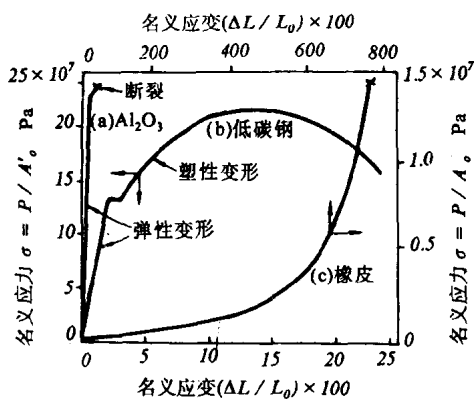


图 1.1 不同材料的拉伸应力-应变曲线

绝大多数无机材料的变形行为如图中曲线(a)所示,即在弹性变形后没有塑性形变(或塑性形变很小),接着就是断裂,总弹性应变能非常小,这是所有脆性材料的特征。对于延性材料,如低碳钢,开始为弹性形变,接着有一段弹塑性形变,然后才断裂,总变形能

很大,如图中曲线(b)所示。橡皮这类高分子材料具有极大的弹性形变,如图中曲线(c)所示,是没有残余形变的材料,称为弹性材料。

无机材料的形变是重要的力学性能,与材料的制造、加工和使用都有密切的关系。因此,研究无机材料在受力情况下产生形变的规律是有重要意义的。

一、应力

在分析形变时通常用应力的概念。应力的定义为单位面积上所受的内力

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

式中 F 为外力, σ 为应力,应力的单位为 Pa, A 为面积。如果材料受力前的初始面积为 A_0 ,则 $\sigma_0 = F/A_0$ 叫名义应力。实用上一般都用名义应力。如果 A 为受力后的真实面积,则 σ 叫真实应力。但对于形变总量很小的无机材料,二者数值上相差不大,只在高温蠕变情况下,才有显著差别。围绕材料内部一点 P 取一体积单元,体积元的六个面均垂直于坐标轴 x, y, z 。在这六个面上的作用应力可分解为法向应力 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 和剪应力 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 等,如图 1.2。每个面上有一个法向应力 σ 和两个剪应力 τ 。应力分量 σ, τ 的下标第一个字母表示应力作用面的法线方向,第二个字母表示应力作用的方向。法向应力若为拉应力则规定为正;若为压应力则规定为负。剪应力分量的正负规定如下:如果体积元任一面上的法向应力与坐标轴的正方向相同,则该面上的剪应力指向坐标轴的正方向者为正;如果该面上的法向应力指向坐标轴的负方向,则剪应力指向坐标轴的负方向者为正。根据上述规定,图 1.2 上所表示的所有应力分量都是正的。

根据平衡条件,体积元上相对的两个平行平面上的法向应力

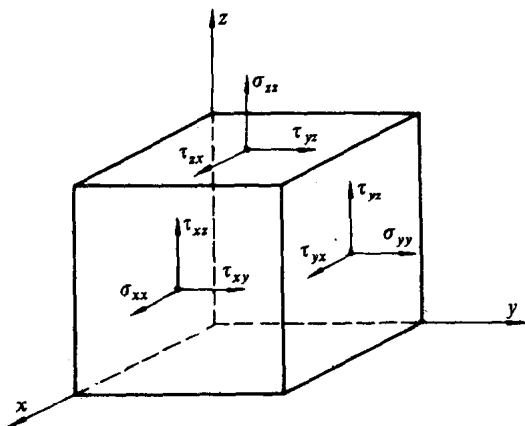


图 1.2 应力分量

应该是大小相等、正负号一样。作用在体积元上任一平面上的两个剪应力应互相垂直。根据剪应力互等定理， $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ，余类推。故一点的应力状态由六个应力分量决定，即 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 。

法向应力导致材料的伸长或缩短，剪应力引起材料的剪切畸变。

二、应变

应变是用来描述物体内部各质点之间的相对位移的。如果材料是理想刚体，就不会有相对位移，物体也就不会发生形变。实际材料为非刚体，在受力之下材料内部各质点之间会发生相对位移。一根长度为 L_0 的杆，在单向拉应力作用下被拉长到 L_1 ，则应变的定义为：

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.2)$$

e 叫名义应变。如果上式中分母不是原来的长度 L_0 ，而是随拉

伸而变化的真实长度 L , 则真实应变定义为

$$\epsilon_{\text{true}} = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad (1.3)$$

通常为了方便起见都用名义应变。

在剪应力作用下发生剪切形变。剪应变的定义为物体内部一体积元上的二个面元(或特征面上的二个线元)之间的夹角的变化。

如图 1.3, 考察 z 面上的剪应变。形变未发生时线元 oA 及 oB 之间的夹角 $\angle AoB$ 形变后为 $\angle A'oB'$, 则 x, y 间的剪应变定义为

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta \quad (1.4)$$

研究物体中一点(如 o 点)的应变状态, 也和研究应力一样, 在物体内围绕该点取出一体积元 $dx dy dz$, 如图 1.3 所示

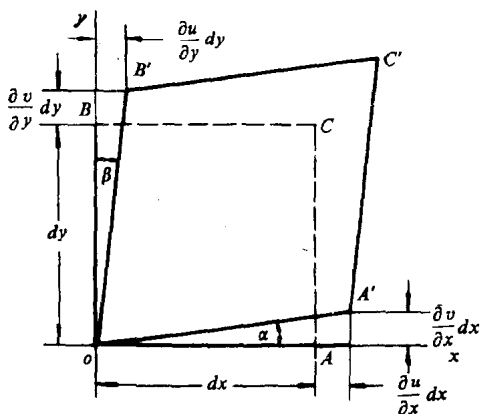


图 1.3 - z 面上的剪应力和剪应变

如果该物体发生形变, o 点沿 x, y, z 方向的位移分量为 u, v, w , 那么 x 轴上 o 点邻近的一点 A , 由于 o 点有位移 u , A 点位移随 x 的增加而增加, A 点位移将是 $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$, 则 oA 的长度增加了 $\frac{\partial u}{\partial x} dx$ 。因

此,在 o 点处沿 x 方向的正应变(单位伸长)是 $\frac{\partial u}{\partial x} dx/dx = \frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_{xx}$ 。同

理 $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$, $\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$ 。

现在考察线段 oA 及 oB 之间的夹角变化, A 点沿 y 方向的位移为 $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$, B 点沿 x 方向的位移为 $u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$ 。由于这些位移, 线段 oA 的新方向 $o'A'$ 与其原来的方向之间的畸变夹角为 $(v + \frac{\partial v}{\partial x} dx - v) \times \frac{1}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x}$ 。同理, oB 与 $o'B'$ 之间的畸变夹角为 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 。由此可见, 线段 oA 与 oB 之间原来的直角 $\angle AoB$ 减少了 $\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 。因此, 平面 xz 与 yz 之间的剪应变为

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

和一点的应力状态可由六个应力分量来决定一样, 一点的应变状态也由与应力分量对应的六个应变分量来决定: 即三个剪应变分量 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 及三个伸长应变分量 $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ 。对于法向应力分量及单位伸长应变分量也可以省去一个下标, 写成 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 及 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 。有了应力、应变分量就可定量地研究物体的受力形变。

三、无机材料的弹性变形行为

1. 广义虎克定律

无机材料、金属、木材等许多重要材料, 在正常温度下, 当应力不大时其变形是单纯的弹性变形, 应力与应变之间的关系已由实验建立, 就是下面要介绍的虎克定律。设想一长方体, 各棱边平行于坐标轴, 在垂直于 x 轴的两个面上受有均匀分布的正应力 σ_x , 如