

材料科学与工程系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Physical Properties of Inorganic Materials  
(Second Edition)

# 无机材料物理性能

第2版

关振铎 张中太 焦金生 编著



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

**Physical Properties of  
Inorganic Materials**  
(Second Edition)

**无机材料物理性能**  
第2版

清华大学出版社  
北京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

无机材料物理性能/关振铎,张中太,焦金生编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2011.6

(材料科学与工程系列)

ISBN 978-7-302-25854-4

I. ①无… II. ①关… ②张… ③焦… III. ①无机材料—物理性能 IV. ①TB321

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第103299号

责任编辑:宋成斌

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者:北京市人民文学印刷厂

装订者:三河市兴旺装订有限公司

经销:全国新华书店

开本:175×245 印张 19.25 字数:397千字

版次:2011年6月第2版 印次:2011年6月第1次印刷

印数:1~5000

定价:29.80元

---

产品编号:025838-01

## 第 2 版 序

本书是关振铎、张中太、焦金生三位前辈编著的《无机材料物理性能》的第 2 版。从本书的第 1 版正式出版到现在,已经过去了整整 20 年。在这 20 年间,国内众多高校都采用了本书作为无机非金属材料专业本科生和研究生的教科书或主要教学参考书。本书多次重印,总印数已经高达几万册,仍然有供不应求之势。清华大学出版社在对本书的读者群进行了深入调研的基础上,多次就出版第 2 版事宜与作者沟通协商;只是由于三位前辈或年事渐高或工作性质变化,精力和体力都无法承担起对本书进行再度修订的工作。因此,受关振铎和张中太两位前辈的委托,我们于 2007 年年末在两位前辈的指导下开始了对本书进行修订的尝试。

我们是本书第 1 版的第一批读者;确切地说,我们应该是本书最早的一批读者。20 世纪 80 年代中期,当本书刚刚开始以油印本的形式作为清华大学化工系无机非金属材料专业本科生教材使用的时候,我们就先后手捧着这本教材坐在教室里聆听过关振铎和张中太两位前辈的讲授。而后,我们又先后分别进入了关振铎教授和张中太教授的课题组,分别追随两位前辈开始了科研生涯;在此后 20 多年的工作中,这本书一直都是我们案头必备的参考书之一。

20 年来,我们也接触了国内许多高校的教师和学生。从他们的言谈之间,我们能够强烈地感受到本书在国内无机非金属材料专业的教学和科研工作中所发挥出的巨大作用。毫不夸张地说,读过本书的人无不对本书给予了极高的评价和赞赏。我们深深知道,这种极高的评价和赞赏不仅仅是因为本书是国内第一部关于无机材料物理性能的专业教科书,而且还因为本书在很大程度上反映出了作者深厚的学术功底和丰富的教学经验;深厚的学术功底决定了本书的科学性,丰富的教学经验则决定了本书的可读性。

20 年来,以高性能陶瓷为主要代表的无机材料得到了突飞猛进的发展;相应地,与无机材料物理性能的理论探索和实验研究也取得了极为丰硕的新成果。然而,当开始对本书进行修订的时候,我们发现几乎所有的新进展和新成果所依赖的基本概念、基本理论和基本实验技术在第 1 版中都或多或少地有所反映。作为一部主要面向本科生的教材,本书第 1 版无疑是成功的。

因此,与第 1 版相比,我们最终完成的第 2 版在内容上没有实质性的变化,只是为了教学上的方便,将第 1 版的第 2 章“无机材料的脆性断裂与强度”分成了两章,即第 2 版中的第 2 章“无机材料的断裂强度”和第 3 章“无机材料的断裂及裂纹扩展”。

此外,针对第1版中少量未能深入展开的内容进行了适当的扩充和完善。为了使读者在正式阅读之前对本书的内容及背景有所了解,第2版保留了第1版的前言。

正是因为与第1版相比没有实质性的变化,而我们只是做了一些力所能及的文字修订工作而已,我们认为本书的署名应该仍然维持原状,以尊重三位前辈为撰写本书所付出的心血。只是作为第2版文字的责任人,我们在这里需要说明一下:在第2版中,龚江宏承担了第1~5章的修订工作,唐子龙承担了第6~8章的修订工作。全书由龚江宏统稿。

在本书第2版交付印刷之际,我们谨向关振铎、张中太、焦金生三位前辈表示由衷的敬意,并衷心希望这个修订本的出版能够使他们感到满意和欣慰。

龚江宏 唐子龙

2011年6月 清华园

# 第1版 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8~10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。国家建筑材料工业局教材办公室随后审定“同意作为必修课教材出版”。

本书的主要内容是无机材料(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为两种: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)。

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。其他像硅酸盐工程,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 1~4 章由关振铎编著,第 5 章由张中太编著,第 6、7 章由焦金生编著。全书由关振铎统编。

书中不妥及错误之处,敬请读者指正。

作者

# 目 录

<b>第 1 章 无机材料的受力形变</b> .....	1
1.1 应力与应变 .....	1
1.1.1 应力 .....	2
1.1.2 应变 .....	2
1.2 无机材料的弹性形变 .....	4
1.2.1 各向同性体的弹性常数 .....	4
1.2.2 单晶的弹性常数 .....	6
1.2.3 弹性模量的物理本质 .....	8
1.2.4 多相材料的弹性模量 .....	8
1.2.5 弹性模量的测定 .....	9
1.3 无机材料中晶相的塑性形变 .....	10
1.3.1 晶格滑移 .....	11
1.3.2 塑性形变的位错运动理论 .....	13
1.3.3 塑性形变速率对屈服强度的影响 .....	16
1.4 高温下玻璃相的黏性流动 .....	16
1.4.1 流动模型 .....	16
1.4.2 影响黏度的因素 .....	17
1.5 无机材料的高温蠕变 .....	19
1.5.1 黏弹性与滞弹性 .....	19
1.5.2 高温蠕变曲线 .....	21
1.5.3 高温蠕变理论 .....	22
1.5.4 蠕变断裂 .....	24
1.5.5 影响蠕变的因素 .....	24
1.6 无机材料的超塑性 .....	27
习题 .....	28
<b>第 2 章 无机材料的断裂强度</b> .....	30
2.1 断裂强度的微裂纹理论 .....	30
2.1.1 固体材料的理论断裂强度 .....	30



2.1.2	Griffith 微裂纹理论 .....	32
2.2	无机材料中微裂纹的起源 .....	36
2.2.1	无机材料中本征裂纹的起源 .....	36
2.2.2	表面接触损伤及机械加工损伤 .....	39
2.3	无机材料断裂强度测试方法 .....	40
2.4	断裂强度的统计性质 .....	43
2.4.1	强度的统计分析 .....	43
2.4.2	韦伯函数中 $m$ 和 $\sigma_0$ 的求法 .....	45
2.4.3	韦伯统计的应用及实例 .....	45
2.4.4	两参数韦伯分布及其应用 .....	47
2.5	显微结构对无机材料断裂强度的影响 .....	47
2.5.1	气孔率的影响 .....	48
2.5.2	晶粒尺寸的影响 .....	48
	习题 .....	49
<b>第 3 章</b>	<b>无机材料的断裂及裂纹扩展 .....</b>	<b>50</b>
3.1	断裂力学基本概念 .....	50
3.1.1	裂纹系统的机械能释放率 .....	50
3.1.2	裂纹尖端处的应力场强度 .....	52
3.1.3	临界应力场强度因子及断裂韧性 .....	54
3.1.4	平面应变断裂韧性 .....	55
3.1.5	几何形状因子的柔度标定技术 .....	57
3.2	无机材料断裂韧性测试方法 .....	58
3.2.1	直通切口梁测试技术 .....	59
3.2.2	双扭法 .....	60
3.2.3	山形切口法 .....	61
3.3	显微结构对断裂韧性的影响 .....	63
3.3.1	裂纹偏转与裂纹偏转增韧 .....	63
3.3.2	裂纹桥接与裂纹桥接增韧 .....	65
3.3.3	微裂纹增韧与相变增韧 .....	67
3.3.4	裂纹扩展阻力曲线 .....	68
3.4	无机材料中裂纹的缓慢扩展 .....	70
3.4.1	裂纹缓慢扩展 $v \sim K_I$ 曲线 .....	71
3.4.2	裂纹缓慢扩展机理 .....	72
3.4.3	裂纹缓慢扩展行为研究方法 .....	75
3.4.4	无机材料断裂寿命预测 .....	76

3.4.5	无机材料的高温延迟断裂 .....	78
3.5	无机材料的硬度与压痕开裂的应用 .....	79
3.5.1	无机材料的硬度及其测试方法 .....	79
3.5.2	无机材料的压痕开裂及其分类 .....	81
3.5.3	压痕裂纹在断裂韧性测试中的应用 .....	83
习题	.....	86
<b>第4章</b>	<b>无机材料的热学性能 .....</b>	<b>87</b>
4.1	无机材料的热容 .....	88
4.1.1	晶态固体热容的经验定律和经典理论 .....	89
4.1.2	晶态固体热容的量子理论 .....	90
4.1.3	无机材料的热容 .....	93
4.2	无机材料的热膨胀 .....	95
4.2.1	热膨胀系数 .....	95
4.2.2	固体材料热膨胀机理 .....	97
4.2.3	热膨胀和其他性能的关系 .....	99
4.2.4	多晶体和复合材料的热膨胀 .....	101
4.2.5	陶瓷品表面釉层的热膨胀系数 .....	104
4.3	无机材料的热传导 .....	104
4.3.1	固体材料热传导的宏观规律 .....	104
4.3.2	固体材料热传导的微观机理 .....	105
4.3.3	影响热导率的因素 .....	108
4.3.4	某些无机材料的热导率 .....	116
4.4	无机材料的热稳定性 .....	117
4.4.1	热稳定性的评价方法 .....	117
4.4.2	热应力 .....	118
4.4.3	抗热冲击断裂性能 .....	120
4.4.4	抗热冲击损伤性 .....	124
4.4.5	提高抗热冲击断裂性能的措施 .....	126
4.5	无机材料的熔融与分解 .....	128
4.5.1	晶体的熔点与结合能 .....	128
4.5.2	间隙相的熔点 .....	129
4.5.3	升华与分解 .....	130
习题	.....	131
<b>第5章</b>	<b>无机材料的光学性能 .....</b>	<b>132</b>
5.1	光通过介质的现象 .....	132

5.1.1	折射 .....	132
5.1.2	色散 .....	134
5.1.3	反射 .....	135
5.2	无机材料的透光性 .....	137
5.2.1	介质对光的吸收 .....	137
5.2.2	介质对光的散射 .....	139
5.2.3	无机材料的透光性 .....	141
5.2.4	提高无机材料透光性的措施 .....	143
5.3	界面反射和光泽 .....	145
5.3.1	镜反射和漫反射 .....	145
5.3.2	光泽 .....	145
5.4	不透明性(乳浊)和半透明性 .....	146
5.4.1	不透明性 .....	146
5.4.2	乳浊剂的成分 .....	146
5.4.3	乳浊机理 .....	147
5.4.4	常用乳浊剂 .....	148
5.4.5	改善乳浊性能的工艺措施 .....	148
5.4.6	半透明性 .....	149
5.5	无机材料的颜色 .....	151
5.6	其他光学性能的应用 .....	152
	习题 .....	155
<b>第6章</b>	<b>无机材料的电导 .....</b>	<b>156</b>
6.1	电导的物理现象 .....	156
6.1.1	电导的宏观参数 .....	156
6.1.2	电导的物理特性 .....	165
6.2	离子电导 .....	167
6.2.1	载流子浓度 .....	167
6.2.2	离子迁移率 .....	168
6.2.3	离子电导率 .....	170
6.2.4	影响离子电导率的因数 .....	173
6.2.5	固体电解质 $ZrO_2$ .....	175
6.3	电子电导 .....	176
6.3.1	电子迁移率 .....	176
6.3.2	载流子浓度 .....	179
6.3.3	电子电导率 .....	184

6.3.4	影响电子电导的因素 .....	185
6.3.5	晶格缺陷与电子电导 .....	190
6.4	玻璃态电导 .....	195
6.5	无机材料的电导 .....	197
6.5.1	多晶多相固体材料的电导 .....	197
6.5.2	次级现象 .....	199
6.5.3	无机材料电导的混合法则 .....	200
6.6	半导体陶瓷的物理效应 .....	201
6.6.1	晶界效应 .....	201
6.6.2	表面效应 .....	205
6.6.3	西贝克效应 .....	207
6.6.4	p-n 结 .....	209
6.7	超导体 .....	211
6.7.1	约瑟夫孙效应 .....	211
6.7.2	超导体的应用 .....	213
	习题 .....	214
<b>第 7 章</b>	<b>无机材料的介电性能 .....</b>	<b>217</b>
7.1	介质的极化 .....	217
7.1.1	极化现象及其物理量 .....	217
7.1.2	克劳修斯-莫索蒂方程 .....	218
7.1.3	电子位移极化 .....	220
7.1.4	离子位移极化 .....	224
7.1.5	松弛极化 .....	225
7.1.6	转向极化 .....	229
7.1.7	空间电荷极化 .....	230
7.1.8	自发极化 .....	230
7.1.9	高介晶体的极化 .....	231
7.1.10	多晶多相无机材料的极化 .....	235
7.2	介质损耗 .....	240
7.2.1	介质损耗的表示方法 .....	240
7.2.2	介质损耗和频率、温度的关系 .....	244
7.2.3	无机介质的损耗 .....	245
7.3	介电强度 .....	249
7.3.1	介质在电场中的破坏 .....	249
7.3.2	热击穿 .....	250

7.3.3	电击穿	254
7.3.4	无机材料的击穿	256
7.4	铁电性	258
7.4.1	铁电体	258
7.4.2	钛酸钡自发极化的微观机理	259
7.4.3	铁电畴	261
7.4.4	铁电体的性能及其应用	263
7.5	压电性	266
7.5.1	压电效应	266
7.5.2	压电振子及其参数	270
7.5.3	压电性与晶体结构	272
	习题	276
<b>第8章</b>	<b>无机材料的磁学性能</b>	<b>277</b>
8.1	物质的磁性	277
8.1.1	磁现象及其物理量	277
8.1.2	磁性的本质	279
8.1.3	磁性的分类	282
8.2	磁畴与磁滞回线	286
8.2.1	磁畴	286
8.2.2	磁滞回线	286
8.2.3	磁导率	287
8.3	铁氧体的磁性与结构	288
8.3.1	尖晶石型铁氧体	288
8.3.2	石榴石型铁氧体	290
8.3.3	磁铅石型铁氧体	290
8.4	铁氧体磁性材料	291
8.4.1	软磁材料	291
8.4.2	硬磁材料	292
8.4.3	旋磁材料	292
8.4.4	矩磁材料	293
8.4.5	压磁材料	294
	习题	294
	<b>参考文献</b>	<b>295</b>

# 第 1 章 无机材料的受力形变

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不同的。图 1.1 给出了几种典型材料的应力-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：在外力作用下，材料的变形主要表现为弹性变形；在大多数情况下，材料发生断裂之前几乎没有塑性形变发生，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等，在受力过程中，其形变先是表现为弹性形变，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。

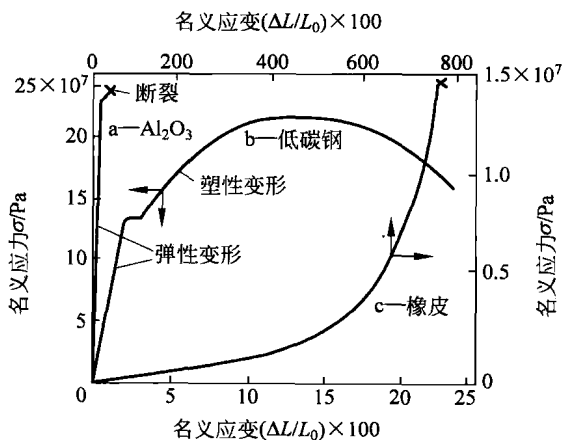


图 1.1 不同材料的拉伸应力-应变曲线

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具有重要意义。本章将讨论材料的弹性形变、塑性形变、黏性流动以及高温蠕变等一系列形变行为。

## 1.1 应力与应变

分析材料受力变形行为时通常使用应力和应变这两个基本概念。

### 1.1.1 应力

应力一般定义为材料单位面积所受的內力,即:

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

式中,  $F$  为外力;  $A$  为面积;  $\sigma$  为应力。应力的单位为 Pa,但在实际应用中经常采用 MPa 作为应力单位:  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

如果式(1.1)中面积  $A$  取材料受力前的初始面积  $A_0$ ,则  $\sigma_0 = F/A_0$  称为名义应力。如果式(1.1)中的  $A$  为受力后的真实面积,则  $\sigma$  称为真实应力。无机材料的形变总量通常很小,因此真实应力与名义应力在数值上一般相差不大,只有在材料发生了高温蠕变的情况下才有显著差别。在实际应用中一般都采用名义应力。

围绕材料内部任意一点  $P$  取一体积单元,体积元的 6 个面均垂直于坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。在这 6 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  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{zx}$  等,每个面上有一个法向应力  $\sigma$  和两个剪应力  $\tau$ ,如图 1.2 所示。

应力分量  $\sigma$ 、 $\tau$  的下标第一个字母表示应力作用面的法线方向,第二个字母则表示应力作用的方向。法向应力的正值表示拉应力,负值则表示压应力。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。

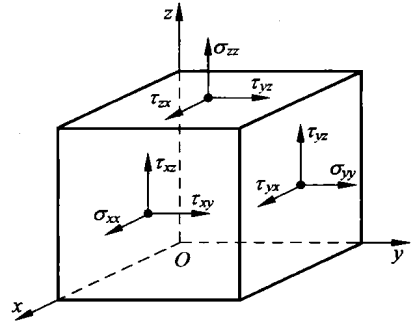


图 1.2 应力分量

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,体积元上两相对平行平面上的法向应力应该是大小相等、正负号相同,而作用在体积元上任一平面上的两个剪应力则应互相垂直。此外,根据剪应力互等定理, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,余类推。因此,材料内部任意一点处的应力状态可以由 6 个应力分量决定,即:  $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ 。对于法向应力分量。其下标可以略去一个字母,写成  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 。

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。

### 1.1.2 应变

应变描述的是在外力作用下物体内部各质点之间的相对位移,应变可分为正应变和剪切应变两类。

考虑一根长度为  $L_0$  的杆在单向拉应力作用下被拉长到  $L_1$ ,相应的正应变可以定义为

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

式中的  $\epsilon$  称为名义应变。如果式(1.2)中的分母不是杆的初始长度  $L_0$ , 而是随拉伸而变化的真实长度  $L$ , 则可以定义真实应变  $\epsilon_{\text{true}}$  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。

由式(1.2)和式(1.3)可知, 应变是一个无量纲的物理量。

材料在剪应力作用下会发生剪切应变。剪切应变定义为物体内部一体积元上的两个面元(或特征面上的两个线元)之间夹角的变化。以如图 1.3 所示垂直于  $z$  轴截面上的形变情况为例, 在剪应力作用下, 线元  $OA$  及  $OB$  之间的夹角由受力前的  $\angle AOB$  变化为受力后的  $\angle A'OB'$ , 则  $x, y$  之间的剪切应变  $\gamma_{xy}$  可以定义为

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

和研究应力状态一样, 研究物体中任意一点(如  $O$  点)的应变状态, 也需要在物体内围绕该点取出一体积元  $dx dy dz$ 。假设在外力作用下物体发生形变, 导致  $O$  点沿  $x, y, z$  方向的产生分量分别为  $u, v, w$  的位移。考虑  $x$  轴上  $O$  点邻近处的一点  $A$ 。如图 1.3 所示, 由于  $O$  点有位移  $u$ ,  $A$  点位移随  $x$  的增加而增加, 该点处的位移将是  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ , 即线元  $OA$  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)为  $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} dx / dx = \frac{\partial u}{\partial x}$ 。同理可得,  $\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$ ,  $\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$ 。

现在考查线段  $OA$  及  $OB$  之间的夹角变化。如图 1.3 所示,  $A$  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  $\angle AOB$  在变形之后变化了  $\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 。因此, 围绕  $O$  点的体积单元上各剪切应变分量分别为

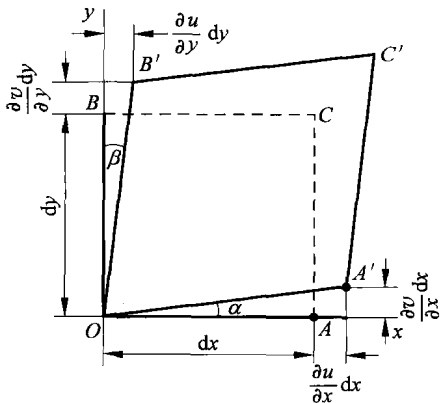


图 1.3  $z$  面上的剪应力和剪切应变



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

和一点的应力状态可由 6 个应力分量来决定一样, 一点的应变状态也可以由与应力分量对应的 6 个应变分量来决定: 即 3 个剪切应变分量  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ 、 $\gamma_{zx}$  及 3 个正应变分量  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{zz}$ 。同法向应力一样, 正应变分量的下标也可以省去一个字母, 写成  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$ 。

有了应力、应变分量就可定量地研究物体的受力形变。

## 1.2 无机材料的弹性形变

### 1.2.1 各向同性体的弹性常数

在所受应力不太高的情况下, 无机材料、金属、木材等许多重要材料在室温下通常表现为单纯的弹性形变。材料在弹性形变阶段的应力-应变关系可以用胡克定律加以描述。

如图 1.4 所示, 考虑一各棱边分别平行于坐标轴的长方体, 在垂直于  $x$  轴的两个面上受均匀分布的正应力  $\sigma_x$  作用。实验证明, 对于各向同性体, 这样的正应力不会引起长方体的角度改变, 而长方体在  $x$  轴方向上的相对伸长可以表示为:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma_x}{E} \quad (1.6)$$

即: 在弹性形变阶段应力与应变之间为线性关系。这就是胡克定律。

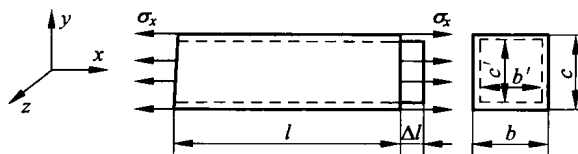


图 1.4 各向同性长方体受力形变示意图

式(1.6)中的物理量  $E$  称为材料的弹性模量(有时也称为杨氏模量)。对于各向同性体,  $E$  是一个常数。由于应变  $\epsilon$  是一个无量纲物理量, 由式(1.6)可知, 弹性模量的单位和应力一样, 也是 Pa。在实际应用中多采用 GPa 作为材料弹性模量的单位:  $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$ 。

注意到当长方体伸长时, 侧向同时也会发生横向收缩, 如图 1.4 所示。  $\sigma_x$  单独作用时, 在  $y$ 、 $z$  方向的收缩为

$$\epsilon_y = \frac{c' - c}{c} = -\frac{\Delta c}{c}$$