

无机非金属材料性能

贾德昌 宋桂明 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

无机非金属材料性能

贾德昌 宋桂明 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从材料学和材料物理的角度出发,系统介绍了无机非金属材料力学性能、热学性能和抗热震性、电学性能、磁学性能、光学性能、功能的耦合与转换特性以及敏感特性等,内容涉及传统陶瓷与先进陶瓷材料、玻璃、半导体、晶体、碳素材料(碳纤维、石墨和金刚石)、耐火材料以及建筑材料等,并且吸纳了相关领域,尤其是纳米无机非金属材料方面的新近科研成果。

本书可作为高等学校材料学科相关专业的本科生和研究生教材或教学参考书,也可以供从事无机非金属材料科学研究、生产开发以及科技管理等方面的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料性能/贾德昌等编著. —北京:科学出版社, 2008
ISBN 978-7-03-020076-1

I. 无… II. 贾… III. 无机材料: 非金属材料-性能 IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 006486 号

责任编辑: 牛宇锋 于宏丽/责任校对: 邹慧卿

责任印制: 刘士平/封面设计: 耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

丽 源 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 1 月第一次印刷 印张: 27 3/4

印数: 1—3 000 字数: 543 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

前言

无机非金属材料是材料领域的四大支柱(金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料)之一。无机非金属材料的类别繁多,涉及传统陶瓷、先进陶瓷材料、玻璃、半导体、晶体、碳素材料(碳纤维、石墨、金刚石、富勒烯和碳纳米管等)、耐火与建筑材料等;结构形态千差万别,晶态上有非晶和晶态(又分单晶和多晶),形貌上有量子点/线、颗粒、晶须、纤维、薄膜、块体和阵列等;功能特性千奇百怪,力学上具有优良的耐高温特性、耐磨、耐腐蚀和高比强与高比刚度等优点,物理和化学性能上则具有优异的热、电、磁、光、物理性能耦合与转换特性及敏感特性等;应用领域宽广无限,从人们日常生活与休闲消费到传统的能源、交通、机械、冶金、化工和建筑等工业领域,再到尖端的航空航天航空、电子信息、生物医学和军事国防等领域,都扮演着极其重要的角色。面对21世纪能源短缺、环境污染等日益突出问题,基于人们追求生活品质与可持续发展的战略,无机非金属材料这一古老而又新兴学科领域的发展正面临着严峻挑战 and 良好机遇,相关的科研与教学工作也受到越来越广泛的重视。

为满足高等学校高年级本科生、高校与科研院所研究生学习,以及科研院所和厂矿企业等相关专业领域的科研、生产工程技术人员参考查阅之需,同时为促进无机非金属材料科学的发展,加强材料科学工作者之间的交流,作者在来自自编“无机材料性能”讲义的基础上,结合自己在教学与科研工作中的体会,对章节布局进行了部分调整,对内容做了大幅度补充完善,编撰成了这本《无机非金属材料性能》。

本书从材料学和材料物理的角度出发,较为系统全面地讲述了无机非金属材料的力学性能、热学性能和抗热震性、电学性能、磁学性能、光学性能、功能的耦合与转换特性以及敏感特性等,内容涉及传统陶瓷与先进陶瓷材料、玻璃、半导体、晶体、碳素材料(碳纤维、石墨和金刚石)、耐火材料以及建筑材料等。但由于篇幅所限,本书未将占有重要地位的化工和医学领域的无机材料化学和生物学等方面的功能特性,以及力学性能中的摩擦磨损与接触疲劳等性能纳入其中。

本书章节按无机非金属材料的功能特性来划分,各类特性均直接涉及其在实际工程中的具体应用。对于延伸阅读内容,采用楷体字与主体内容区别开来,以便不同层次学生学习参考和教师合理安排教学内容。本书引用了大量原理性示意图、数据曲线图、数据表和材料显微组织照片等,以利于读者理解基本概念、总结基本规律、认识基本机理和查阅相关数据等。本书在各章后附有思考题和习

题,使读者易于进一步消化理解基本知识点,也便于对本书内容进行学习和归纳。本书在最后附加了“本书常用单位”、“符号表”和“英文专业词汇索引”,以便于学习查阅。

本书共计7章,由贾德昌教授承担本书整体结构设计和内容规划,并负责最后的统稿定稿。编写具体分工为:第1章(除1.7和1.8节外)、第2章、第5章、第6章(除6.3节外)、附录和各章前图片及其介绍由贾德昌编写;第4章、第6章中6.3节和第7章由宋桂明编写;第3章(除3.3节外)由柯华编写;第3章3.3节由王文编写;第1章1.7和1.8节由段小明编写。

西北工业大学乔生儒教授和哈尔滨工业大学宋学孟教授审阅了本书,并提出许多宝贵意见和建议,进一步提高了本书质量,在此向两位老师表示衷心的感谢。刘利盟、郭亚平、李玉峰、张太全和杨治华等参加了成稿初期的文字校对或插图的处理,徐倩参加了部分插图的扫描,王玉金参加了初校样的校对,对他们的辛勤劳动在此一并致谢。

本书编撰过程中,引用了大量国内外相关文献,在此对所引文献的作者致以诚挚的谢意。

感谢教育部新世纪优秀人才基金(NCET-04-0327)、哈尔滨工业大学优秀科技创新团队基金和哈尔滨工业大学“十一五”重点图书出版基金、材料科学与工程学院教学项目的资助。

由于学识和经验所限,书中疏漏及不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

于哈尔滨工业大学

2007年5月

目 录

前言

第 1 章 力学性能	1
1.1 弹性性能	2
1.1.1 弹性模量的概念、物理意义及特性	3
1.1.2 弹性模量与熔点和原子体积的关系	6
1.1.3 弹性模量与温度的关系	6
1.1.4 弹性模量与气孔率的关系	8
1.1.5 复合材料的弹性模量	9
1.1.6 滞弹性	11
1.2 硬度	13
1.2.1 硬度的种类及其测试方法	13
1.2.2 硬度的影响因素及其与其他性能的关系	17
1.3 断裂强度	18
1.3.1 陶瓷材料的理论断裂强度	19
1.3.2 Griffith 脆性断裂理论	21
1.3.3 强度的影响因素	24
1.3.4 强度的统计性质	31
1.3.5 联合强度理论和脆性材料的优化使用	35
1.3.6 复合材料的强度	37
1.4 断裂韧性和断裂功	45
1.4.1 应力强度因子和断裂韧性	45
1.4.2 断裂韧性的影响因素	52
1.4.3 断裂功	61
1.4.4 裂纹的起源与扩展	64
1.5 塑性和超塑性	65
1.5.1 塑性变形行为的一般规律	66
1.5.2 塑性变形的位错理论	70
1.5.3 塑性变形的影响因素	73
1.5.4 超塑性的分类与机制	75
1.5.5 超塑性的影响因素	78
1.6 蠕变	80
1.6.1 陶瓷材料蠕变的一般规律	80

1.6.2 蠕变机理	81
1.6.3 蠕变的影响因素	83
1.7 疲劳性能	85
1.7.1 静态疲劳(亚临界裂纹扩展)	86
1.7.2 循环疲劳	90
1.8 冲击性能	95
1.8.1 冲击性能的一般特征	95
1.8.2 表征材料冲击性能的特征参数	96
1.8.3 冲击性能的影响因素	98
1.8.4 冲击损伤机理	100
1.8.5 冲击性能的研究方法	102
思考题和习题	106
参考文献	107
第2章 热学性能和抗热震性	110
2.1 热学性能	111
2.1.1 熔点	111
2.1.2 比热容	113
2.1.3 热膨胀系数	115
2.1.4 热导率	124
2.2 热应力	139
2.2.1 热应力的分类	139
2.2.2 第二类热应力的计算	140
2.3 抗热震性	143
2.3.1 抗热震性评价理论	143
2.3.2 热震剩余强度的预测	150
2.3.3 抗热震性的影响因素及其改善途径	151
思考题和习题	163
参考文献	164
第3章 电学性能	166
3.1 基本概念和基本规律	167
3.1.1 电偶极矩	167
3.1.2 宏观介质中的电磁运动规律	168
3.1.3 复介电常数	171
3.1.4 欧姆定律	172
3.2 介电性能	172
3.2.1 电介质的极化	172
3.2.2 介质弛豫和德拜方程	180

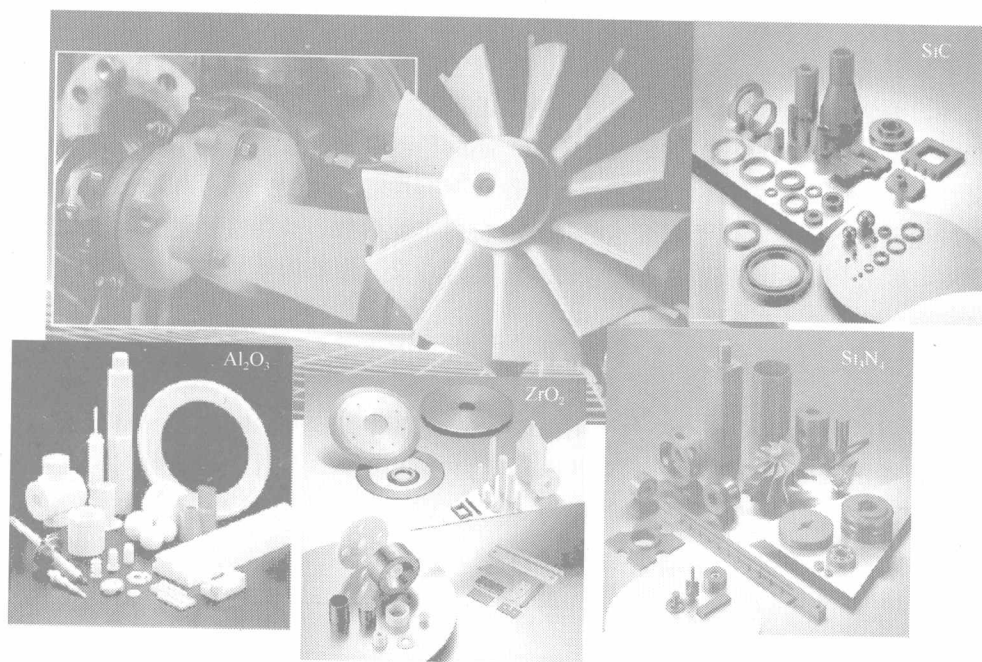
3.2.3 介质损耗的影响因素	182
3.2.4 介电强度	183
3.2.5 典型介电材料的介电特性及其应用	184
3.3 铁电与反铁电特性	188
3.3.1 铁电体的基本特性	188
3.3.2 铁电体自发极化的微观机理	192
3.3.3 铁电体的电畴和极化反向	195
3.3.4 铁电体分类	198
3.3.5 铁电体的应用	200
3.3.6 反铁电体的基本特性和微观结构	202
3.4 离子电导	206
3.4.1 载流子浓度	206
3.4.2 离子迁移率	207
3.4.3 离子电导率	209
3.4.4 扩散与离子电导	210
3.4.5 影响离子电导率的因素	212
3.5 半导体的电学性能	216
3.5.1 半导体的能带解释	216
3.5.2 半导体中的电子电导	217
3.5.3 典型半导体材料及其应用	229
3.6 超导电性和超导材料	231
3.6.1 超导体的电磁学基本特征	231
3.6.2 超导电性的宏观电磁学规律	234
3.6.3 超导材料的分类及典型材料	237
3.6.4 超导材料的应用	241
思考题和习题	243
参考文献	244
第4章 磁学性能	245
4.1 磁性本质与磁性分类	247
4.1.1 磁性的表征参数	247
4.1.2 磁性的本质	248
4.1.3 磁性的分类	249
4.2 磁畴和交换作用	253
4.2.1 磁畴	253
4.2.2 交换作用	256
4.3 磁滞回线、磁导率和磁致损耗	262
4.3.1 磁滞回线	262

4.3.2 磁导率	263
4.3.3 最大磁能积	263
4.3.4 损耗系数和品质因数	263
4.4 铁氧体的磁性与结构	264
4.4.1 尖晶石型铁氧体	264
4.4.2 石榴石型铁氧体	266
4.4.3 磁铅石型铁氧体	266
4.5 磁性陶瓷及其应用	267
4.5.1 软磁铁氧体	267
4.5.2 硬磁铁氧体	268
4.5.3 旋磁铁氧体	269
4.5.4 矩磁铁氧体	270
4.5.5 压磁铁氧体	272
4.5.6 磁泡铁氧体	273
4.5.7 磁记录材料	273
4.5.8 磁性复合材料	274
思考题和习题	276
参考文献	276
第5章 光学性能	277
5.1 光的折射、反射、吸收、散射和透射特性	278
5.1.1 光折射特性——折射率和色散	278
5.1.2 光反射特性与光导纤维	282
5.1.3 光吸收与散射特性——吸收系数和散射系数	287
5.1.4 无机材料的透光性	292
5.2 漫反射和表面光泽	296
5.3 不透明性和半透明性	298
5.3.1 不透明性和乳浊化	298
5.3.2 半透明性	302
5.4 无机材料的显色机理与陶瓷颜料	303
5.5 荧光与荧光物质	305
5.5.1 荧光及其产生机理	305
5.5.2 荧光物质的主要类别	306
5.6 激光和激光器基质材料	310
5.6.1 激光及其产生条件	310
5.6.2 对固体激光器基质材料的性能要求	310
5.6.3 固体激光器基质材料的种类及特性	311
5.7 红外透过材料及其特性	318

5.7.1 红外技术的起源和应用	318
5.7.2 红外系统对红外透过材料的性能要求	319
5.7.3 红外透过材料的种类及特性	320
5.8 非线性光学效应	325
5.8.1 线性光学与非线性光学	325
5.8.2 非线性光学材料	326
思考题和习题	327
参考文献	327
第6章 功能的耦合与转换特性	329
6.1 力-热-电功能转换图——Heckmann 图	330
6.2 压电效应	332
6.2.1 压电效应及其产生机理	332
6.2.2 表征压电效应的特性参数	333
6.2.3 压电材料的应用	339
6.3 压磁效应与压磁材料	344
6.3.1 压磁效应的概念	344
6.3.2 描述压磁效应的特性参数	344
6.3.3 压磁材料的种类、性质及其应用	345
6.4 热释电效应与逆热释电效应	348
6.4.1 热释电效应	348
6.4.2 热释电效应产生的条件和机理	349
6.4.3 热释电材料的特性参数和优值	349
6.4.4 热释电材料及其应用	350
6.4.5 逆热释电效应	352
6.5 热电效应与热电材料	354
6.5.1 热电效应	354
6.5.2 热电材料性能的优值参数及实现高优值的途径	355
6.5.3 热电材料的应用	357
6.6 电-光和光-弹功能转换特性	361
6.6.1 电光效应和电光材料	361
6.6.2 光弹效应	364
6.7 磁光效应与磁光材料	364
6.7.1 磁光效应	364
6.7.2 磁光材料及其应用	366
6.8 声光效应和声光材料	368
6.8.1 声光效应	368
6.8.2 声光材料及其应用	369

思考题和习题	370
参考文献	371
第7章 敏感特性	372
7.1 力敏特性	373
7.1.1 力敏特性参数及影响因素	373
7.1.2 力敏材料及其特性	374
7.2 热敏特性	376
7.2.1 热敏特性机理	377
7.2.2 热敏特性的影响因素	379
7.2.3 热敏材料及其应用	381
7.3 光敏特性	392
7.3.1 光敏特性机理	392
7.3.2 光敏材料及其性质	393
7.4 压敏特性	395
7.4.1 压敏特性机理	396
7.4.2 压敏材料及其应用	398
7.5 气敏特性	400
7.5.1 气敏特性机理	401
7.5.2 气敏材料及其应用	402
7.6 湿敏特性	409
7.6.1 湿敏特性的表征参数	409
7.6.2 湿敏特性机理	410
7.6.3 湿敏材料特性及其应用	410
7.7 磁阻效应	414
7.7.1 磁阻效应	415
7.7.2 磁阻材料及其性质	415
思考题和习题	418
参考文献	418
附录1 本书常用单位	420
附录2 符号表	421
附录3 英文专业词汇索引	425

第1章 力学性能



1977年,美国福特汽车公司率先用 Si_3N_4 和 SiC 陶瓷制造了一台全陶瓷燃气轮机,其燃气入口温度达 1230°C ,转速为 5 万转/分,成功运转了 25 小时。1982年,日本京都陶瓷公司(Kyocera Corp.)研制成功全陶瓷发动机小汽车。同年,瑞典沃尔沃公司和联合公司共同研制的燃气轮机,首次在世界上成功进行了乘用车实际行驶,其涡轮工作温度为 1100°C ,转速为 5 万转/分,成功运转了 10 小时。

1986年,我国开始执行“先进结构陶瓷与绝热发动机”的 5 年研究计划,将 6105 增压柴油机活塞顶、缸盖等关键部件换为陶瓷材料。通过 400 小时的无水冷台架试验,并于 1991 年装在一台 45 座大客车上,成功地京沪间往返行驶了 3200 千米,使我国成为世界上第三个进行无水冷陶瓷发动机装车路试的国家。

图为 Kyocera Corp. 生产的一些 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 和 SiC 等陶瓷零部件照片。

力学性能(mechanical property)是指在机械力(包括静载荷和动载荷)作用下材料发生形变或断裂破坏过程中所表现的行为特性,主要包括弹性、塑性、断裂性能、蠕变、疲劳和冲击性能等。其中弹性、塑性、断裂性能和蠕变等均是在静载荷作用下的特性,疲劳和冲击性能则为动载荷作用下的特性。无机非金属材料化学键大多为离子键或共价键,键能高且键的方向性明显。与一般的金属材料相比,其晶体结构复杂且表面能小,所以其弹性、塑性、断裂和冲击行为特性与金属材料相比差异显著。对于大多数无机材料尤其是以利用其力学性能为主的结构型无机材料来说,力学性能是工程应用需要首先考虑的因素之一,所以掌握力学性能特点及其影响因素,对于新材料的优化设计、新产品的研制开发及其推广应用均具有重要意义。本章主要讲述无机材料的弹性、塑性、断裂性能、蠕变、疲劳和冲击性能及相关理论或机理,以及用于表征这些特性的材料本征参数,如弹性模量、硬度、断裂强度、断裂韧性、断裂功、冲击韧性等的物理意义、影响因素和评价方法等。

1.1 弹性性能^[1~3]

材料的形状和尺寸因外力作用而改变的现象称为**变形**(deformation)。通常,弹性即指该变形在外力去除后立即恢复的力。材料种类不同,其变形行为也各不相同,图 1.1 为 3 种典型材料的应力-应变曲线。

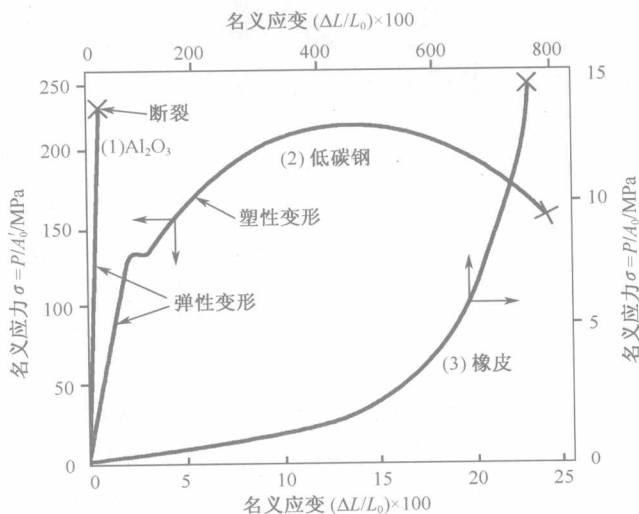


图 1.1 3 种典型材料的应力-应变曲线

(1)、(2)用左纵轴和下横轴轴标,(3)用右纵轴和上横轴轴标

在常温常压条件下,绝大多数无机材料的变形行为如图 1.1 中曲线(1)所示,即在弹性变形(elastic deformation)后,几乎不产生塑性变形(plastic deformation)。

tion)就产生脆性断裂(brittle fracture),弹性应变能很小,这是所有脆性材料的特征。对于典型的金属材料,如低碳钢,首先要经历弹性变形,接着发生屈服(yielding),继而产生明显的塑性变形,最后才断裂,总变形能很大,如图1.1中曲线(2)所示。橡皮这类高分子材料承载后则产生极大的弹性变形,如图1.1中曲线(3)所示,而不产生残余变形,即在撤掉外力后能完全恢复原来的形状,故称为弹性材料。弹性模量是表征材料弹性性能的核心指标,也是本节主要议题。

1.1.1 弹性模量的概念、物理意义及特性

常温条件下,无机材料同金属材料和木材等许多固体材料一样,其弹性变形可用胡克定律(Hooke's law)来描述,即拉伸变形时,应力 σ 与应变 ϵ 的关系满足

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.1)$$

式中, E 为拉伸弹性模量或称为杨氏模量(Young's modulus)。对于图1.1中的 Al_2O_3 来说, E 即为曲线(1)的斜率。

剪切变形时,其剪切应力 τ 与剪切应变 γ 之间的关系为

$$\tau = G\gamma \quad (1.2)$$

式中, G 为剪切弹性模量(shear modulus)(简称切变模量)。受静水压力(等静压)压缩时,其压缩应力 σ 与体积应变 ϵ_v 之间的关系为

$$\sigma = K\epsilon_v \quad (1.3)$$

式中, K 为体积弹性模量(bulk modulus)(简称体积模量)。对于各向同性材料来说,剪切弹性模量 G 和体积弹性模量 K 与拉伸弹性模量 E 存在如下关系:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1.5)$$

式中, ν 为泊松比(Poisson's ratio),它与 E 、 G 和 K 等均为表征材料弹性性质的重要特征参数。

对于一受轴向拉伸应力的各向同性圆柱体来说,在轴向伸长时,横向要发生收缩(如图1.2(a)所示),此时,泊松比即为横向收缩率($\epsilon_r = \Delta d/d$)与轴向伸长率($\epsilon_l = \Delta l/l$)的比值

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_l} \quad (1.6)$$

由于陶瓷材料试样难以进行拉伸测试,常采用单向压缩实验来测定材料的泊松比(如图1.2(b)所示)。此时,泊松比即为横向膨胀率($\epsilon_r = \Delta d/d$)与轴向压缩率($\epsilon_l = \Delta l/l$)的比值,表达式与式(1.6)相同。当试样为正方柱体时,泊松比的求法与此也非常类似。

一般情况下,金属材料的泊松比多在0.29~0.33,而大多数陶瓷材料的泊松比则为0.2~0.25,例如, AlN 的为0.24, Al_2O_3 的为0.24, Sialon 的为

0.25;但也有例外,如 SiC 的偏低,为 0.14,玻璃陶瓷(Macor)的偏高,为 0.29。对于氧化物来说,泊松比一般随其理论密度的增大而增大(如图 1.3 所示)。

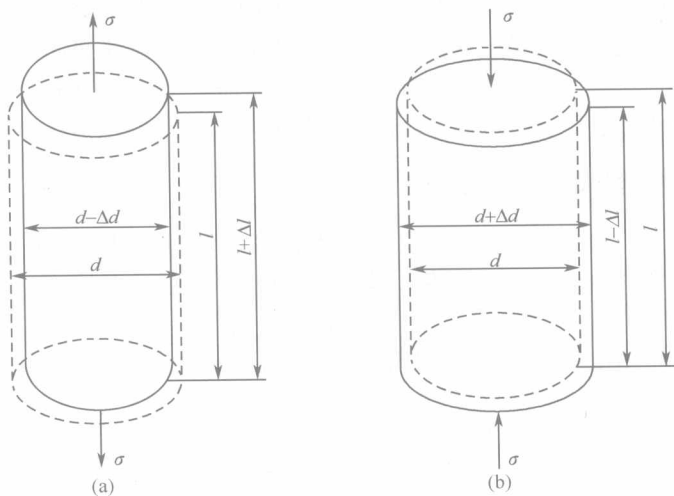


图 1.2 圆柱体的受力变形示意图

(a) 轴向拉伸; (b) 轴向压缩

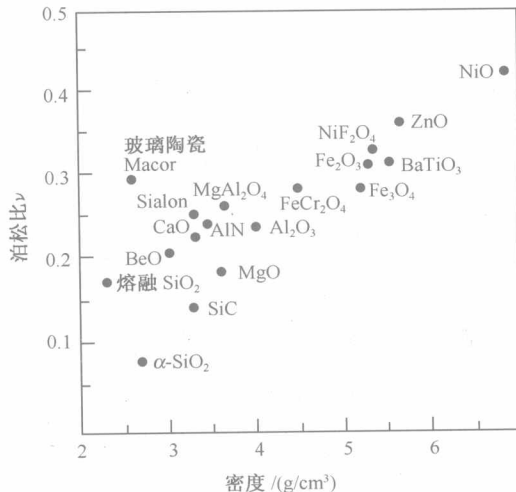


图 1.3 一些典型陶瓷材料的泊松比与其理论密度的关系

对于各向同性材料,四个弹性常数 E 、 G 、 K 和 ν 之间存在的相互关系如表 1.1 所示。

综上所述,弹性模量在宏观上指示材料抵抗外力作用下发生弹性变形能力的高低。在微观上,弹性模量实际则是原子结合强度的一个标志,反映的是原子间距产生微小变化所需要外力的大小,这是由于材料的弹性变形实质上是在外力作

表 1.1 各向同性材料弹性常数之间的关系

	E, ν	G, ν	E, G	G, K
拉伸弹性模量 E	E	$2(1+\nu)G$	E	$\frac{9KG}{3K+G}$
剪切弹性模量 G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	G	G	G
体积弹性模量 K	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{GE}{3(3G-E)}$	K
泊松比 ν	ν	ν	$\frac{E}{2G}-1$	$\frac{3K-2G}{6K+2G}$

用下原子由平衡位置产生了很小位移的结果。无机非金属材料所容许的这个原子位移很小，超过某个临界值，在常温常压下，键就会发生断裂，在足够高的温度下，则会产生因原子面之间滑移而导致的塑性变形。

固体材料中两个原子间的引力和斥力可用著名的 Condon Moase 曲线来描述(如图 1.4 所示)。弹性模量反映了两原子从平衡间距 d_0 离开或靠近时所需的外力，即曲线在 d_0 处的斜率。虽然原子间距所容许的弹性变形范围很小(0.1%~0.2%)，但所需的外力却很大，即弹性模量对原子间距的弹性变化很敏感。

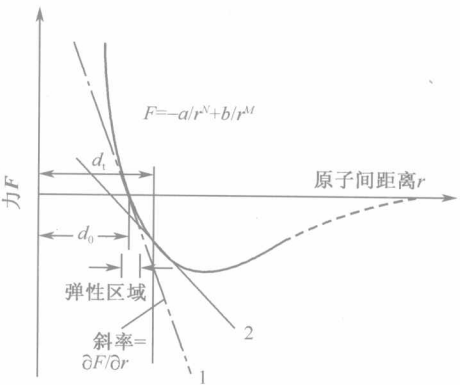


图 1.4 原子间结合力示意图

表 1.2 给出了一些无机非金属材料室温下的拉伸弹性模量，简称弹性模量(后文中若未作特殊说明，弹性模量均指拉伸弹性模量)。不同种类的陶瓷材料弹性模量大体上符合关系：碳化物>硼化物≈氮化物>氧化物。

表 1.2 一些无机非金属材料室温下的弹性模量

材 料	E/GPa	材 料	E/GPa
晶态碳纳米管	1000	h-BN	84
金刚石	1000	AlN	310~350
石墨纤维(轴向)	400~650	Si ₃ N ₄	220~320
碳纤维(轴向)	200~450	BeO	380
3D C/C	130~152 (z 向) 62~69 (x-y 向)	MgO	310
多晶石墨	10	Al ₂ O ₃	400
WC	400~650	熔融 SiO ₂	60~75
TaC	310~550	MgAl ₂ O ₄	270
B ₄ C	450~470	MgO · SiO ₂	90
WC-Co	400~530	3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ (莫来石)	145
SiC	450	TiO ₂	29
TiC	379	ZrO ₂	160~241
NbC	340~520	ThO ₂	250
TiB ₂	570	玻璃	35~45
		NaCl, LiF	15~68

对于晶体材料,由于其化学键具有明显的方向性,加之某些晶体在不同的晶体学方向上化学键类型不同,弹性模量往往会呈现明显的各向异性(anisotropy),高对称性的单晶体更是如此。表 1.3 给出了 MgO 和石墨单晶弹性模量各向异性的实例。其中, C 为刚度系数(描述各向异性的弹性模量常数以刚度系数表示), S 为弹性柔度(elastic compliance)系数。对各向同性材料, $S_{11} = 1/E$, $S_{12} = -\gamma/E$, $S_{44} = 2(S_{11} - S_{12}) = 1/G$ 。另外,对于组织具有各向异性的材料,如具有织构的材料或具有明显方向性的复合材料,弹性模量也会随方向不同而不同。

表 1.3 MgO 和石墨单晶的弹性常数

	刚度系数 C/GPa					柔度系数 $S/(10^{-3}\text{GPa}^{-1})$				
	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	S_{11}	$-S_{12}$	$-S_{13}$	S_{33}	S_{44}
石墨单晶	1060 ± 20	180 ± 20	15 ± 5	36.5 ± 1.0	4.5	0.98 ± 0.03	0.16 ± 0.06	0.33 ± 0.08	27.5 ± 1.0	240
MgO (25℃)	289.2	88.0	—	—	154.9	4.03	0.94	—	—	6.47
	晶向	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	晶向	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$		
	E/GPa	248.2	316.4	348.9	G/GPa	154.6	121.9	113.8		

1.1.2 弹性模量与熔点和原子体积的关系

物质熔点的高低反映了其原子间结合力的大小,这与弹性模量反映原子间结合力的大小相似。因此,一般说来,弹性模量与熔点成正比例关系。例如,在 300K 下,弹性模量 E 与熔点 T_m 之间满足如下关系:

$$E = \frac{100kT_m}{V_a} \quad (1.7)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数; V_a 为原子或分子的体积。图 1.5 为一些物质的弹性模量 E 与 kT_m/V_a 之间的关系,可见,二者符合良好的线性关系。

理论计算表明,等静压力下无机材料的体积弹性模量与原子对体积的 $4/3$ 次方成反比。图 1.6 给出了一些无机材料体积弹性模量的实测值和理论值与原子对体积之间的关系,二者符合很好的线性关系。

1.1.3 弹性模量与温度的关系

由于原子间距及结合力随温度的变化而改变,弹性模量对温度变化也较为敏感。当温度升高时,原子间距增大,例如,由图 1.4 所示的 d_0 增至 d_1 , d_1 处的曲线斜率(对应切线 2)较 d_0 处的斜率(对应切线 1)减小,即弹性模量降低。因此,固体材料的弹性模量一般随温度的升高而降低。少数材料如石墨和 C/C 复合材料却例外,尤其是 C/C 复合材料,弹性模量在 $500 \sim 1400^\circ\text{C}$ 反而大幅度增