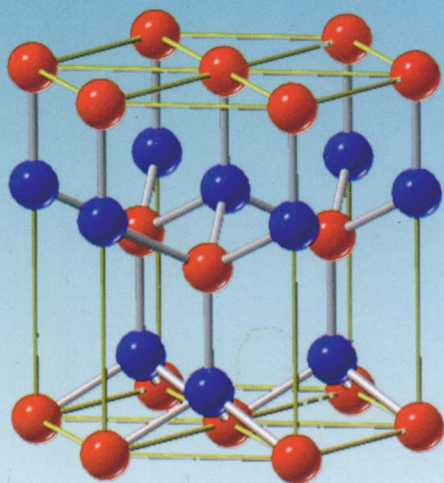


WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

# 材料物理性能

陈文 吴建青 许启明 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

TB303  
7400

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

# 材料物理性能

主 编 陈 文 吴建青 许启明

武汉理工大学出版社

## 【内容简介】

本书介绍了材料的力学、电学、光学、热学、磁学和声学性能的基本概念、物理性质、变化规律以及性能表征,论述了材料的性能与材料组成、结构之间的关系以及影响材料性能的主要因素,探讨了提高材料各种物理性能的途径和机理,介绍了表征物理性能主要参量的测试方法,以及具有特殊物理效应的重要功能材料在材料科学与工程中的应用。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业、材料物理、材料化学、冶金工程等专业的教材,也可供有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料物理性能/陈文,吴建青,许启明主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.1  
ISBN 978-9-5629-3010-5

I. ① 材…

II. ① 陈… ② 吴… ③ 许…

III. ① 工程材料-物理性能-高等学校-教材

IV. ① TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 003964 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>(理工图书网)

E-mail:tiandaoquan@126.com

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:19.25

字 数:493 千字

版 次:2010 年 1 月第 1 版

印 次:2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

## 出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和支持下,经过大量的调研,组织国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

**教材体系体现人才培养目标**——本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的人才培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程类专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合后,组成了一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学需要,又便于学生自学。

**教材内容反映教改成果**——本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程类专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

**教材出版实现立体化**——本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为一套开创性的系列教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

## 前 言

材料性能是构成材料的四要素之一,也是材料得到应用的前提。近年来,随着材料科学与工程学科的迅速发展,许多院校在材料类专业的教学内容及教学体系上进行了大幅度的调整,以适应材料学科体系的形成及对材料类专业人才培养的要求。目前,《材料物理性能》已成为高等院校材料科学与工程类专业课“材料物理性能”的教材或主要教学参考书。本书旨在使学生尽可能地从物理效应和微观机理角度掌握固体材料的物理性能,弄清影响材料物理性能的各种主要因素,寻求提高材料物理性能的各种途径,了解特殊物理效应的功能材料在工程上的应用,从而培养学生具有开发新型功能材料必要的基础知识和基本技能。

本书主要涉及材料的力学、电学、光学、热学、磁学和声学等物理性能。全书共分六章,第1章介绍材料力学性能指标的物理意义,讨论材料形变与断裂行为的基本规律及其与材料组成和结构之间的关系,探讨提高材料力学性能的途径和机理;第2章讨论材料产生电学性能的机理、影响材料电学性能的因素,介绍材料各类电学性能参数的测量方法以及重要电学材料的应用;第3章介绍材料光学性能的基本概念,揭示光子与材料相互作用产生各种光学现象的物理本质,讨论影响材料光学性质的各种因素以及重要光学材料的应用;第4章介绍固体材料的热容理论,材料热学性能的一般规律,主要测试方法及其在材料研究中的应用;第5章介绍材料磁学性能的本质,影响材料磁学性能的各种因素,材料磁学性能的特征以及磁性材料的应用;第6章介绍声波的产生和传播机理,声波与材料相互作用的机理以及几种典型声学材料的应用。

本书由武汉理工大学陈文、华南理工大学吴建青和西安建筑科技大学许启明编写。具体编写分工如下:武汉理工大学陈文编写第2章、第4章、第5章、第6章;华南理工大学吴建青编写第1章;西安建筑科技大学许启明编写第3章。全书由武汉理工大学陈文负责统稿及思考题与习题的择选。

鉴于编者水平有限,书中难免有不当之处,希望使用本教材的老师 and 同学及其他读者提出宝贵意见,以便我们以后加以改进。同时,本书在编写过程中,参考了许多同类教材和著作,其中部分列入了书末的参考文献,在此表示真诚的感谢。

编 者

2009.7

# 普通高等学校材料科学与工程类专业 新编系列教材编审委员会

顾 问：郭景坤    袁润章    范令惠    杨南如

胡道和    王民权    岳文海    曹文聪

主任委员：张联盟

副主任委员：徐德龙    郑治祥    雷绍锋

委 员：（以姓氏笔画为序）

万发荣    马保国    王国梅    王培铭    文梓芸

叶卫平    叶枝荣    叶 菁    田道全    曲祖元

刘亚云    刘 军    孙成林    吴建青    吴建锋

陈 文    宋晓岚    林宗寿    杨长辉    姜洪舟

钱觉时    钱春香    高建明    徐秋林    陶珍东

黄佳木    黄学辉    蒋 阳    程晓敏    程 新

谢峻林    曾令可    葛 勇    潘 伟    薛理辉

秘 书 长：田道全

总责任编辑：徐秋林

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 1 材料的力学性能 .....                | (1)  |
| 1.1 材料的形变 .....                | (1)  |
| 1.1.1 应力与应变 .....              | (1)  |
| 1.1.2 弹性形变 .....               | (3)  |
| 1.2 材料的塑性、蠕变性与超塑性 .....        | (7)  |
| 1.2.1 材料的塑性 .....              | (7)  |
| 1.2.2 材料的蠕变性 .....             | (10) |
| 1.2.3 材料的超塑性 .....             | (12) |
| 1.3 材料的断裂与机械强度 .....           | (13) |
| 1.3.1 理论断裂强度 .....             | (13) |
| 1.3.2 Griffith 断裂理论与断裂强度 ..... | (15) |
| 1.3.3 材料的显微结构与强度的关系 .....      | (16) |
| 1.3.4 断裂力学与材料的断裂韧性 .....       | (19) |
| 1.3.5 材料的硬度 .....              | (25) |
| 1.4 材料的摩擦与磨损 .....             | (27) |
| 1.4.1 摩擦和磨损的概念 .....           | (27) |
| 1.4.2 摩擦和磨损的类型 .....           | (28) |
| 1.4.3 磨损方式 .....               | (29) |
| 1.4.4 磨损实验方法 .....             | (31) |
| 1.5 材料的增强与增韧 .....             | (33) |
| 1.5.1 材料增强和增韧的基本原理 .....       | (33) |
| 1.5.2 材料增强与增韧的途径 .....         | (34) |
| 思考题与习题 .....                   | (41) |
| 2 材料的电学性能 .....                | (42) |
| 2.1 导体、绝缘体和半导体的划分 .....        | (42) |
| 2.1.1 能带的基本概念 .....            | (42) |
| 2.1.2 宏观电导率及与温度的相关性 .....      | (44) |
| 2.2 金属的导电性 .....               | (46) |
| 2.2.1 金属导电的理论 .....            | (47) |
| 2.2.2 影响金属导电性的因素 .....         | (48) |
| 2.2.3 固溶体的电阻率 .....            | (50) |
| 2.2.4 化合物、中间相、多相合金电阻率 .....    | (53) |
| 2.2.5 金属导电性能的测量及应用 .....       | (54) |
| 2.3 半导体的电学性能 .....             | (58) |

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 2.3.1 | 霍尔效应及其应用                 | (58)  |
| 2.3.2 | 半导体陶瓷及物理性能               | (62)  |
| 2.4   | 电介质材料及其介电性能              | (67)  |
| 2.4.1 | 电极化机制                    | (67)  |
| 2.4.2 | 电介质材料物理性能                | (70)  |
| 2.4.3 | 复介电常数的测量                 | (78)  |
| 2.5   | 压电材料及其物理性能               | (79)  |
| 2.5.1 | 压电效应                     | (79)  |
| 2.5.2 | 压电材料的物理性能参数与测量           | (81)  |
| 2.5.3 | 压电铁电材料的应用                | (86)  |
| 2.6   | 热释电材料及其性能                | (91)  |
| 2.6.1 | 热释电效应                    | (91)  |
| 2.6.2 | 热释电参数及测量                 | (92)  |
| 2.6.3 | 热释电材料及应用                 | (96)  |
| 2.7   | 铁电材料及其物理性能               | (98)  |
| 2.7.1 | 铁电效应                     | (99)  |
| 2.7.2 | 铁电材料的性能及应用               | (101) |
| 2.7.3 | 铁电性、压电性、热释电性之间的关系        | (103) |
| 2.8   | 热电材料及其物理性能               | (104) |
| 2.8.1 | 温差电效应(汤姆逊效应、帕尔帖效应、塞贝克效应) | (104) |
| 2.8.2 | 热电势的测量和影响因素              | (105) |
| 2.8.3 | 常用热电材料及应用                | (108) |
| 2.9   | 超导材料及超导电性                | (109) |
| 2.9.1 | 超导现象及其物理性能               | (109) |
| 2.9.2 | 超导体的分类                   | (111) |
| 2.9.3 | 超导材料的应用                  | (112) |
|       | 思考题与习题                   | (114) |
| 3     | 材料的光学性能                  | (115) |
| 3.1   | 光学材料的一般知识                | (115) |
| 3.1.1 | 光学材料的一般概念                | (115) |
| 3.1.2 | 光学材料测试中常见的一般光学仪器         | (117) |
| 3.2   | 电光效应及电光晶体材料              | (119) |
| 3.2.1 | 电光效应                     | (119) |
| 3.2.2 | 电光器件                     | (121) |
| 3.2.3 | 电光晶体                     | (122) |
| 3.3   | 声光效应及声光晶体材料              | (124) |
| 3.3.1 | 声光效应                     | (124) |
| 3.3.2 | 几种典型声光晶体                 | (125) |
| 3.3.3 | 声光晶体的应用                  | (127) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 3.4 磁光效应及磁光晶体材料 .....     | (128) |
| 3.4.1 磁光效应 .....          | (128) |
| 3.4.2 磁光材料的特点 .....       | (129) |
| 3.4.3 几种磁光晶体 .....        | (130) |
| 3.4.4 磁光晶体的应用 .....       | (130) |
| 3.5 光折变效应及光折变晶体 .....     | (131) |
| 3.5.1 光折变效应的概念 .....      | (131) |
| 3.5.2 光折变效应的特点 .....      | (132) |
| 3.5.3 光折变效应的机理 .....      | (132) |
| 3.5.4 光折变材料的基本性能和参数 ..... | (133) |
| 3.5.5 光折变效应的应用 .....      | (135) |
| 3.5.6 光折变晶体及其性能 .....     | (138) |
| 3.5.7 光折变晶体的选择 .....      | (145) |
| 3.6 光致变色效应与光致变色材料 .....   | (146) |
| 3.6.1 光致变色效应 .....        | (146) |
| 3.6.2 光致变色高分子的变色机理 .....  | (147) |
| 3.6.3 光致变色高分子材料的应用 .....  | (148) |
| 3.7 光电导效应与光电导材料 .....     | (149) |
| 3.7.1 光电导效应 .....         | (149) |
| 3.7.2 光电导机理 .....         | (149) |
| 3.7.3 光电导材料 .....         | (150) |
| 3.7.4 光电导高分子的应用 .....     | (150) |
| 3.8 光学纤维材料与非线性光学晶体 .....  | (151) |
| 3.8.1 玻璃光学纤维材料 .....      | (151) |
| 3.8.2 塑料光学纤维 .....        | (156) |
| 3.8.3 晶体的非线性光学材料 .....    | (160) |
| 思考题与习题 .....              | (166) |
| 4 材料的热学性能 .....           | (167) |
| 4.1 热容 .....              | (167) |
| 4.1.1 固体热容理论 .....        | (167) |
| 4.1.2 影响材料热容的因素 .....     | (171) |
| 4.1.3 热分析及其应用 .....       | (172) |
| 4.2 材料的热膨胀性 .....         | (181) |
| 4.2.1 热膨胀及热膨胀系数 .....     | (181) |
| 4.2.2 热膨胀系数的影响因素 .....    | (182) |
| 4.2.3 热膨胀的应用 .....        | (186) |
| 4.2.4 热膨胀的测量 .....        | (189) |
| 4.3 材料的热传导 .....          | (192) |
| 4.3.1 热传导的物理机制 .....      | (192) |

---

|       |                    |       |
|-------|--------------------|-------|
| 4.3.2 | 热传导的影响因素 .....     | (194) |
| 4.3.3 | 热传导的应用 .....       | (198) |
| 4.3.4 | 热导率及热阻的测量 .....    | (200) |
| 4.4   | 材料的热稳定性 .....      | (206) |
| 4.4.1 | 热稳定性的表征 .....      | (206) |
| 4.4.2 | 热应力 .....          | (206) |
| 4.4.3 | 抗热冲击性能 .....       | (208) |
|       | 思考题与习题 .....       | (213) |
| 5     | 材料的磁学性能 .....      | (215) |
| 5.1   | 磁性的宏观特征 .....      | (215) |
| 5.1.1 | 材料的磁化现象和磁畴结构 ..... | (216) |
| 5.1.2 | 磁化率与磁导率 .....      | (220) |
| 5.2   | 硬磁性与软磁性 .....      | (221) |
| 5.2.1 | 硬磁性 .....          | (221) |
| 5.2.2 | 软磁性 .....          | (226) |
| 5.3   | 磁致伸缩效应和磁弹性能 .....  | (232) |
| 5.3.1 | 磁致伸缩效应 .....       | (232) |
| 5.3.2 | 磁弹性能 .....         | (237) |
| 5.4   | 射频铁氧体及其性能表征 .....  | (240) |
| 5.4.1 | 概述 .....           | (240) |
| 5.4.2 | 射频铁氧体性能表征 .....    | (241) |
| 5.5   | 矩磁材料及其性能表征 .....   | (243) |
| 5.5.1 | 矩磁材料的特征 .....      | (243) |
| 5.5.2 | 矩磁材料 .....         | (244) |
| 5.5.3 | 矩磁材料的应用 .....      | (247) |
| 5.6   | 铁磁材料及其表征 .....     | (249) |
| 5.6.1 | 铁磁性的基本特点 .....     | (249) |
| 5.6.2 | 铁磁材料的性能表征 .....    | (251) |
| 5.7   | 巨磁电阻材料及应用 .....    | (255) |
| 5.7.1 | 巨磁电阻 .....         | (255) |
| 5.7.2 | 自旋电子学相关概念 .....    | (256) |
| 5.7.3 | 巨磁电阻材料 .....       | (257) |
| 5.7.4 | 巨磁电阻材料的应用 .....    | (262) |
|       | 思考题与习题 .....       | (264) |
| 6     | 材料的声学性能 .....      | (265) |
| 6.1   | 声波的产生与传播 .....     | (265) |
| 6.1.1 | 声波的产生 .....        | (265) |
| 6.1.2 | 声波的传播 .....        | (268) |
| 6.2   | 吸声材料 .....         | (270) |

---

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 6.2.1 吸声材料及其吸声机理 ..... | (271) |
| 6.2.2 吸声系数、声阻抗 .....   | (276) |
| 6.3 水声材料 .....         | (279) |
| 6.3.1 水声材料及声学特性 .....  | (279) |
| 6.3.2 水声材料声学性能特点 ..... | (283) |
| 6.4 电声换能材料 .....       | (284) |
| 6.4.1 电声换能机理 .....     | (284) |
| 6.4.2 电声转换材料 .....     | (287) |
| 6.4.3 换能器声学性能参数 .....  | (288) |
| 思考题与习题 .....           | (290) |
| 参考文献 .....             | (291) |

# 1 材料的力学性能

当一个部件的基本作用是承受载荷时,力学性能就是材料最重要的性能。事实上,即使对于非结构的应用,力学性能也是很重要的。在各种材料的力学行为中,弹性、断裂和塑性是其中标志性的力学特性。材料力学的主要任务就是研究材料在受力作用时的形变和断裂规律(对于脆性材料来说,断裂往往是瞬时的、不可预见的和灾难性的)。介绍材料的力学性能及其与材料的组成和结构的关系,为材料和部件的设计及使用提供指导,是本章的目的。

本章将主要介绍材料力学性能指标的物理意义,讨论材料形变与断裂行为的基本规律及其与材料组成和结构之间的关系,并在此基础上探讨提高材料力学性能的途径和机理,同时,对材料力学性能的测试方法也作了简单的介绍。

## 1.1 材料的形变

### 1.1.1 应力与应变

当材料受到载荷作用时会发生形状和尺寸的变化,即产生形变。形变与时间有关。形变是材料的重要力学行为,与材料的加工和使用有密切的关系。单向静应力试验是材料力学性能研究中最基本的试验方法。不同类型的材料力学行为有明显的差异,图 1.1 所示为金属、陶瓷、橡胶三类不同材料在单向静张应力作用下典型的应力-应变关系曲线。

#### 1.1.1.1 应力

决定材料形变行为的不是总的作用力,而是单位面积所承受的作用力。在力学分析中,通常使用应力和应变的概念代替作用力和位移。应力定义为材料单位面积上所受到的内力。

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

(1.1) 图 1.1 三类不同材料的应力-应变曲线示意图

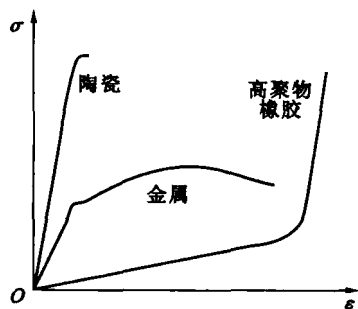
式中  $F$ ——外力;

$\sigma$ ——应力;

$A$ ——受力面积。

在国际单位制中,应力的单位为 Pa,即  $\text{N/m}^2$ 。如果材料在受力前的横截面面积为  $A_0$ ,则  $\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$  称为名义应力,也称工程应力;如果材料受力后某时刻的面积为  $A$ ,则  $\sigma_t = \frac{F}{A}$  称为真实应力。对于脆性材料,如无机材料,由于常温下形变量很小,两者差别不大,习惯上多使用名义应力。

对于直角坐标系,应力一般按下式定义:



$$\sigma_{xx} = \frac{x \text{ 方向上的作用力}}{\text{垂直于 } x \text{ 轴的截面面积}} \quad (1.2)$$

式中  $\sigma_{xx}$ ——在  $x$  方向  $x$  面上的应力。

如果把坐标轴  $xyz$  标记为  $x_1, x_2, x_3$ , 则应力可标记为  $\sigma_{ij}$ ,  $i$  代表作用力的方向,  $j$  代表与受力面垂直的坐标轴。对于  $i=j$ , 得到  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$  和  $\sigma_{zz}$  三个正应力, 正值为张应力, 负值为压应力; 对于  $i \neq j$ , 由于剪切应力互等,  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ , 得到  $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}$  和  $\sigma_{zx}$  三个独立的剪切应力。为了区别, 剪切应力一般写为  $\tau_{xy}, \tau_{yz}$  和  $\tau_{zx}$ 。因此, 直角坐标系中任意一点的应力可以用一个应力矩阵来表达:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

式中,  $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。

#### 1.1.1.2 应变

应变表示材料内部质点在应力作用下产生的相对位移, 在宏观上表现为材料的相对形变量。如图 1.2 所示, 对于单向受张, 在长度方向上的张应变为:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.4)$$

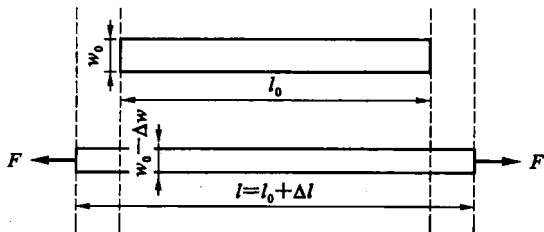


图 1.2 长棒体拉伸形变示意图

由上述表达式定义的应变又称为工程应变。应变和泊松比都是无量纲的。由于在受力过程中某一时刻相对于另一时刻, 起始长度  $l_0$  是不同的, 定义真实应变为:

$$\epsilon_L = \int_{l_0}^l \frac{dL}{L} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1.5)$$

工程应变与真实应变之间的关系为:

$$\epsilon = e^{\epsilon_L} - 1 \quad (1.6)$$

在受拉长度增加的同时, 侧向会发生横向收缩:

$$\epsilon_w = \frac{w - w_0}{w_0} = - \frac{\Delta w}{w_0} \quad (1.7)$$

横向的应变与长度方向的应变之比称为泊松比  $\nu$ :

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_w}{\epsilon_L} \right| = - \frac{\epsilon_w}{\epsilon_L} \quad (1.8)$$

材料在受到平行于截面的大小相等、方向相反的一对剪切应力作用时, 产生的相对形变称为剪切应变。如图 1.3 所示, 在剪切应力的作用下, 材料发生偏斜, 偏斜角  $\theta$  的正切就定义为剪切应变:

$$\gamma = \tan\theta \quad (1.9)$$

小剪切应变时,  $\gamma \approx \theta$ 。

与应力状态一样,在直角坐标系中,一点的应变状态是由六个独立的应力分量对应的六个应变分量所决定,包括三个张应变分量  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{zz}$  和三个剪切应变分量  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ 、 $\gamma_{zx}$ 。直角坐标系中任意一点的应变也可以用一个应变矩阵来表达:

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \epsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

式中,  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ ,  $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ ,  $\gamma_{zx} = \gamma_{xz}$ 。对于正应力分量和正应变分量,双下标可简写成单下标,即写成  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  和  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$ 。

### 1.1.1.3 应力-应变曲线

图 1.4 为脆性材料的应力-应变曲线,其行为特点是应变与应力呈线性关系,直至断裂只发生弹性形变,不发生塑性形变,在最高载荷点处断裂,断口附近无颈缩。应力-应变曲线与横轴夹角的大小表示材料对弹性形变的抗力,用弹性模量  $E$  表示:

$$E = \tan\theta \quad (1.11)$$

大多数玻璃、陶瓷、岩石、淬火状态的高碳钢和普通灰铸铁等均具有此类应力-应变曲线。通常这些材料的断裂应变都很小。

图 1.5 是典型的金属塑性材料的应力-应变曲线,包括弹性形变、塑性形变和断裂三个阶段。图中  $\sigma_p$  为比例极限,应力超过  $\sigma_p$  时,应力-应变关系偏离线性,是产生屈服的开始;  $\sigma_e$  为弹性极限,是材料卸载后能够完全恢复、不产生残留永久形变的最高应力值;  $\sigma_{ys}$  为屈服应力,通常以产生 0.2% 残留应变的应力为屈服应力;  $\sigma_u$  为抗拉强度,是最大的张应力,对应于应力-应变曲线的最高点;  $\sigma_f$  为断裂强度,此时材料发生断裂。

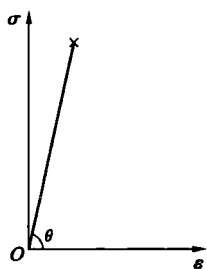


图 1.4 脆性材料的应力-应变曲线

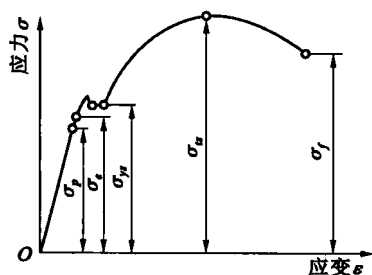


图 1.5 塑性材料的应力-应变曲线

根据拉伸试验可以判断材料呈宏观脆性还是塑性,塑性的大小,对弹性形变和塑性形变的抗力等。对于金属、陶瓷和结晶态高聚物,在弹性形变范围内,应力和应变之间可以看成是线性关系,弹性形变量都较小。对于橡胶类高聚物,在弹性形变范围内,应力和应变之间不呈线性关系,弹性形变量较大。

### 1.1.2 弹性形变

对于弹性形变,在去除外力后形变会消失,材料恢复原来的形状,因此弹性形变具有可逆

性的特点。无论变形量大小和应力与应变是否呈线性关系,凡弹性形变都是可逆形变。因此,材料产生弹性形变的本质,概括说来,都是构成材料的原子(离子)或分子自平衡位置产生可逆位移的反映。金属、陶瓷类晶体材料的弹性形变是处于晶格结点的离子在力的作用下在其平衡位置附近产生的微小位移。而橡胶类材料的弹性形变则是呈卷曲状的分子链在力的作用下通过链段的运动沿受力方向的伸展。

金属、陶瓷类材料弹性形变的微观过程可用双原子模型解释。在平衡状态下,晶格中的原子(或离子)在其平衡位置附近做微小的热振动,原子之间的作用力——吸引力和排斥力是平衡的,原子之间保持着一定的平衡距离。一般认为,吸引力是由正离子和自由电子间的库仑引力所产生,而排斥力源自离子之间以及同性电子之间的排斥作用。原子间作用力  $F$  随原子间距  $r$  的变化而变化的关系为:

$$F(r) = -\frac{nA}{r^{n+1}} + \frac{mB}{r^{m+1}} \quad (1.12)$$

式中  $m, n, A, B$ ——与原子本性和晶格类型有关的常数。

式中第一项为吸引力,第二项为排斥力。该式表明原子间作用力与原子间距并不呈线性关系,而是抛物线关系。

在弹性范围内,物体在单相应力状态下应力与应变之间的关系可用虎克定律  $\sigma = E\varepsilon$  描述,它表明各向同性体在单向应力作用下应力与应变之间为线性关系,  $E$  为弹性模量。除了在拉伸方向伸长外,在横向必然会产生收缩。对于复杂应力状态以及各向异性体的弹性形变,需要用广义虎克定律来描述。

在三向应力状态下,受力体中任一单元体的应力状态可用三个正应力分量  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  和三个剪切应力分量  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  描述。相应的,应变状态也有六个独立的应变分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 。每个应变分量都可表示成六个应力分量的线性函数:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{13}\sigma_z + S_{14}\tau_{xy} + S_{15}\tau_{yz} + S_{16}\tau_{zx} \\ \varepsilon_y &= S_{21}\sigma_x + S_{22}\sigma_y + S_{23}\sigma_z + S_{24}\tau_{xy} + S_{25}\tau_{yz} + S_{26}\tau_{zx} \\ \varepsilon_z &= S_{31}\sigma_x + S_{32}\sigma_y + S_{33}\sigma_z + S_{34}\tau_{xy} + S_{35}\tau_{yz} + S_{36}\tau_{zx} \\ \gamma_{xy} &= S_{41}\sigma_x + S_{42}\sigma_y + S_{43}\sigma_z + S_{44}\tau_{xy} + S_{45}\tau_{yz} + S_{46}\tau_{zx} \\ \gamma_{yz} &= S_{51}\sigma_x + S_{52}\sigma_y + S_{53}\sigma_z + S_{54}\tau_{xy} + S_{55}\tau_{yz} + S_{56}\tau_{zx} \\ \gamma_{zx} &= S_{61}\sigma_x + S_{62}\sigma_y + S_{63}\sigma_z + S_{64}\tau_{xy} + S_{65}\tau_{yz} + S_{66}\tau_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

式(1.13)就是广义虎克定律,式中  $S_{ij} (i, j=1, 2, \dots, 6)$  是应变分量和应力分量之间的比例系数,称为柔度系数。同样也可将任一应力分量写成应变分量的线性函数关系式,比例系数用  $C_{ij}$  表示,称为刚度系数。它们都属于弹性常数。根据式(1.13),刚度系数共有 36 个,但由于  $S_{ij} = S_{ji}$  和  $C_{ij} = C_{ji}$ , 独立的柔度系数只有 21 个。同样,独立的刚度系数也只有 21 个。此外,独立弹性常数的数目与晶体的对称性有关,随着晶体对称性的提高,21 个系数中有的彼此相等或为零,独立的弹性常数数目减少。在对称性最高的各向同性体中,独立的弹性常数只有 2 个。表 1.1 列出了各晶系独立弹性常数的数目。

表 1.1 晶体结构与独立弹性常数的数目

| 晶体结构  | 独立弹性常数的数目 |
|-------|-----------|
| 三斜晶系  | 21        |
| 单斜晶系  | 13        |
| 斜方晶系  | 9         |
| 四方晶系  | 6         |
| 六方晶系  | 5         |
| 立方晶系  | 3         |
| 各向同性体 | 2         |

许多金属材料和非金属材料(陶瓷、玻璃、高聚物等)在很多情况下都可看成各向同性体,只有 2 个独立的弹性常数,定义如下:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{1}{S_{11}} \\ \nu &= \frac{S_{12}}{S_{11}} \\ G &= \frac{1}{2(S_{11} - S_{12})} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

由式(1.13)和式(1.14)得出各向同性体的广义虎克定律为:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz} \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

可以证明,  $E$ 、 $G$ 、 $\nu$  之间有以下关系:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.16)$$

在单向拉伸的情况下,虎克定律可简写为:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}\sigma_x \\ \epsilon_y = \epsilon_z &= -\frac{\nu}{E}\sigma_x \end{aligned}$$

弹性模量  $E$  是一个重要的材料常数,它表征材料对弹性形变的抵抗力,也称为材料的刚

度。其值越大,则在相同应力下产生的弹性形变就越小。弹性模量是原子间结合强度的一个标志,它与原子间结合力曲线上任一受力点的斜率有关。原子间结合力弱,曲线斜率较小,弹性模量也就较小;反之,原子间结合力强,曲线斜率较大,弹性模量也就大。无机非金属材料主要由共价键、离子键结合,结合力强,弹性模量大。金属及其合金为金属键结合,弹性模量也较大。高聚物主要由结合力弱的分子键结合,弹性模量较低。改变原子间距离将影响弹性模量。例如压应力使原子间距离变小,曲线上该受力点的斜率增大,因而弹性模量将增大;张应力使原子间距离增大,因而弹性模量下降;温度升高,因热膨胀使原子间距变大,弹性模量降低。表 1.2 列出了一些常见材料在室温下的弹性模量。

表 1.2 一些常见材料在室温下的弹性模量

| 材料名称   | $E(\text{GPa})$ | 材料名称 | $E(\text{GPa})$ |
|--------|-----------------|------|-----------------|
| 低碳钢    | 200             | 氧化铝  | 390             |
| 奥氏体不锈钢 | 190~200         | 氧化锆  | 220             |
| 铜合金    | 100~130         | 尖晶石  | 260             |
| 铝合金    | 60~75           | 石英玻璃 | 73              |
| 金刚石    | 1040            | 尼龙   | 25~32           |
| 碳化硅    | 435             | 聚乙烯  | 1.8~4.3         |
| 氮化硅    | 300             | 橡胶   | 0.002~0.078     |

单晶材料的弹性模量在不同的结晶学方向上呈各向异性,沿原子排列最紧密的晶向上弹性模量较大。如  $\text{MgO}$  晶体在室温下沿  $[111]$  晶向  $E = 348 \text{ GPa}$ ,而沿  $[100]$  晶向则  $E = 248 \text{ GPa}$ 。随机取向的多晶体(如陶瓷)的弹性模量在宏观上表现为各向同性。非晶态材料(如玻璃)的弹性模量也是各向同性的。

陶瓷材料的弹性模量与物相组成、晶粒大小、气孔率等有关,但相对来说,弹性模量对显微结构较不敏感。陶瓷材料中常常含有气孔,气孔可看成是一个弹性模量为零的相,气孔的影响与其形状有关,对于分布于连续基体中的闭口气孔,可用以下经验公式计算材料的弹性模量:

$$E = E_0(1 - 1.9p + 0.9p^2) \quad (1.17)$$

式中  $E_0$ ——无气孔时材料的弹性模量;

$p$ ——气孔率。

可见,随着气孔率的增大,材料的弹性模量下降。

在两相系统中,总弹性模量处于高弹性模量相和低弹性模量相的两者的弹性模量之间。可采用简化模型来估算两相系统的弹性模量。对于两相互平行的层状复合体,假定两相的泊松比相同,两相的弹性模量和体积分数分别为  $E_1$ 、 $E_2$  和  $V_1$ 、 $V_2$ ,当平行于层面施加张应力时,各层的应变相等,复合体的弹性模量为:

$$E_{//} = E_1V_1 + E_2V_2 \quad (1.18)$$

当垂直于层面施加张应力时,各层的应力相等,复合体的弹性模量为:

$$E_{\perp} = \frac{V_2}{E_2} + \frac{V_1}{E_1} \quad (1.19)$$

两式中  $E_{//}$ ——两相复合材料弹性模量的最高值;