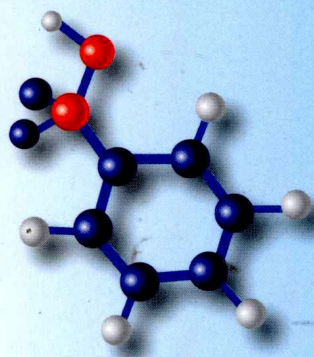




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

材料性能学

主 编 付 华 张光磊
主 审 王金淑

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

材料性能学

主 编 付 华 张光磊
副主编 李洪义 王建强 李元庆 秦国强
主 审 王金淑



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

材料科学研究的核心是材料的结构与性能的关系,材料的性能是材料研究的根本目标和最终目的。本书系统介绍了材料的力学性能和物理性能的基本概念、物理本质、变化规律及相应性能指标的工程意义。全书共 15 章,分为两篇,内容包括材料的弹性变形,材料的塑性变形,材料的断裂与断裂韧性,材料的扭转、弯曲、压缩性能,材料的硬度,材料的冲击韧性及低温脆性,材料的疲劳性能,材料的磨损性能,材料的高温力学性能,材料在环境介质作用下的腐蚀,材料的强韧化,材料的热学性能,材料的磁学性能,材料的电学性能和材料的光学性能。

本书可作为材料科学与工程类一级学科专业公共课“材料性能学”或二级学科专业(教育部新的学科专业目录)的教材或主要教学参考书,也可供研究生及有关工程技术人员、企业管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料性能学/付华,张光磊主编. —北京:北京大学出版社,2010.9

(21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-17695-5

I. ①材… II. ①付… ②张… III. 工程材料—结构性能—高等学校—教材 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 163800 号

书 名:材料性能学

著作责任者:付华 张光磊 主编

责任编辑:董君鑫

标准书号:ISBN 978-7-301-17695-5/TG·0012

出版者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱:pup_6@163.com

印刷者:三河市北燕印装有限公司

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 441 千字

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价:34.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“材料性能学”属于材料科学与工程类一级学科必修专业课。其任务是使学生在学完材料科学导论、材料科学基础等有关课程后，通过学习材料性能学，使材料工程理论与实践相结合，进一步掌握材料各种主要性能的基本概念、物理本质、变化规律及性能指标的工程意义，了解影响材料性能的主要因素，掌握材料性能与其化学成分、组织结构之间的关系，基本掌握提高材料性能指标、充分发挥材料性能潜力的主要途径，了解材料性能的测试原理、方法及仪器设备，培养学生具有初步的材料失效分析、合理选材、用材及开发新型材料的技能。

近年来，随着高等教育改革的不断深入，一方面教育部要求加强基础理论知识教育，实现培养高素质的研究型人才和工程型技术专家的双重人才培养目标；另一方面，教育部也在大力调整各学科体系，拓宽专业面。

目前，材料学科体系以材料科学与工程类一级学科进行专业教育的模式已成为一种发展趋势，许多院校都将原来分属不同系别的相关材料专业进行整合重组，在教学体系及教学内容上进行大幅度改革。

材料科学与工程研究有关材料组织、结构、制备工艺与材料固有性能和使用(服役)性能的关系。材料的固有性能包括材料本身所具有的物理性能(电、磁、光、热等性能)、化学性能(抗氧化和抗腐蚀、聚合物的降解等)和力学性能(如强度、塑性、韧性等)。材料的使用性能是把材料的固有性能和产品设计、工程应用能力联系起来，综合考量材料寿命、速度、能量利用率、安全可靠程度和成本等因素。材料的优异使用性能是材料研究的最终目标。

金属材料最早采用组织、结构、制备工艺、固有性能和使用性能这 5 大要素来表达材料的结构。有关金属的基础理论也最成熟，关于研究金属的思路和方法，甚至一些理论，也正在移植或渗透到其他学科中去，也同样适用于其他材料。

以前各材料类专业开设的有关材料性能学方面的课程往往只局限于某一类材料或某一方面性能，在新的趋势下，课程内容及相关教材已难以适应新的需求。另外专业面拓宽以后，理论课教学时数并未增加，反而有相应缩减的趋势。因此编写一本适应新形势需要的综合性教材已成为当务之急。

本书内容属于材料科学与工程类一级学科范围，涵盖了金属材料、无机非金属材料和高聚物材料的力学性能和材料的物理性能两大部分内容，将原先分属不同类的各二级学科课程内容(金属材料力学性能、金属物理性能分析、无机材料物理性能、高分子材料力学性能、金属腐蚀与防护等)及近年来一些有关材料性能方面的研究成果进行综合优化，突出各类材料性能的基本概念和共性特点，适当削减金属材料并增加无机非金属材料和高聚物材料的理论与应用。

全书共分 15 章，第 1~11 章为材料的力学性能，主要介绍材料在静载条件下的弹性变形、塑性变形和断裂过程，介绍材料的硬度、冲击韧性、断裂韧性、疲劳性能、磨损性



能,材料的高温力学性能及材料的强韧化方法等;第12~15章为材料的物理性能,主要介绍材料的热学性能、磁学性能、电学性能和光学性能。

本书采用新的内容编排形式,每章章首设置一个“本章教学要点”表,添加一个和该内容相关的“导入案例”,每章中添加一些阅读材料,拓展阅读量,介绍相关的前沿研究技术方法、相关试验方法和设备仪器等。此外,每章提供多类型的习题,使读者在学完知识点后通过习题得到练习提高。新的编排模板使教材更加活泼生动,体现教材的时代性和新颖性,激发读者的阅读兴趣。

本书可作为材料科学与工程类一级学科专业公共课“材料性能学”或二级学科专业(教育部新的学科专业目录)的教材或主要教学参考书,也可供研究生及有关工程技术人员、企业管理人员参考。

本书由石家庄铁道大学和北京工业大学合作编写。石家庄铁道大学的付华和张光磊担任主编,北京工业大学的李洪义和石家庄铁道大学的王建强、李元庆、秦国强担任副主编,北京工业大学王金淑教授担任主审。编写分工如下:付华(第1、2章);张光磊(第3、4、5、8章);李洪义(第6、7章);王建强(第9、10、11章),李元庆(第12、13章);秦国强(第14、15章)。全书由付华和张光磊负责统稿。

编者在编写本书时参考和引用了一些学者的书籍资料,学生王英娜、吕珊、张玉等为本书稿件的整理、校对等做了大量工作,在此一并致以谢意。

由于编者学识水平所限,书中疏漏和欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者
2010年7月

目 录

第一篇 材料的力学性能	1	2.3 塑性变形的力学性能指标	52
第1章 材料的弹性变形	3	2.3.1 屈服强度	52
1.1 材料的弹性变形机理	4	2.3.2 应变硬化指数	57
1.1.1 金属与陶瓷材料的弹性 变形机理	4	2.3.3 抗拉强度	58
1.1.2 高分子材料的弹性变形 机理	5	2.3.4 塑性与超塑性	61
1.2 弹性变形力学性能指标	8	综合习题	63
1.2.1 弹性模量	8	第3章 材料的断裂与断裂韧性	65
1.2.2 比例极限与弹性极限	15	3.1 材料的断裂	66
1.2.3 弹性比功	15	3.1.1 断裂的类型及断裂机理	66
1.3 非理想的弹性变形	16	3.1.2 断口分析	71
1.3.1 滞弹性	17	3.1.3 裂纹的形核与扩展	72
1.3.2 黏弹性	17	3.1.4 断裂强度	73
1.3.3 伪弹性	19	3.2 断裂韧性	77
1.3.4 包申格效应	20	3.2.1 缺口效应	78
1.3.5 内耗	20	3.2.2 线弹性条件下的断裂 韧性	80
综合习题	21	3.2.3 弹塑性条件下的断裂 韧性	83
第2章 材料的塑性变形	23	3.2.4 影响材料断裂韧性的 因素	85
2.1 材料的塑性变形机理	24	3.3 断裂韧性在工程中的 应用	90
2.1.1 金属与陶瓷晶体的塑性 变形机理	25	3.3.1 材料选择	90
2.1.2 陶瓷材料的塑性变形 特点	35	3.3.2 安全校核	91
2.1.3 高分子材料的塑性变形	38	3.3.3 材料开发	91
2.2 冷变形金属的回复与再结晶	40	综合习题	92
2.2.1 塑性变形对材料性能的 影响	40	第4章 材料的扭转、弯曲、压缩 性能	94
2.2.2 冷变形金属的回复与 再结晶	44	4.1 应力状态软性系数	95
2.2.3 材料的热加工与冷加工	50	4.2 扭转	96
		4.2.1 扭转试验	97
		4.2.2 扭转试验的特点及应用	98



4.3 弯曲	98	6.2 低温脆性	119
4.3.1 弯曲试验	99	6.2.1 材料的冷脆倾向	119
4.3.2 弯曲试验的特点及 应用	100	6.2.2 韧脆转变温度	120
4.4 压缩	100	6.2.3 低温脆性的影响因素	122
4.4.1 压缩试验	100	综合习题	124
4.4.2 压缩试验的特点及 应用	101	第7章 材料的疲劳性能	125
综合习题	101	7.1 金属材料的疲劳性能	127
第5章 材料的硬度	103	7.1.1 循环载荷及疲劳断裂的 特点	127
5.1 硬度的意义及试验方法	104	7.1.2 疲劳断口形貌及疲劳 破坏机理	128
5.2 布氏硬度	105	7.1.3 疲劳抗力指标	134
5.2.1 原理	105	7.1.4 影响材料疲劳强度的 因素	138
5.2.2 表示方法	106	7.2 陶瓷材料的疲劳性能	141
5.2.3 特点及应用	106	7.2.1 静态疲劳	141
5.2.4 硬度与其他力学性能的 关系	106	7.2.2 循环疲劳	141
5.3 洛氏硬度	106	7.2.3 陶瓷材料疲劳特性 评价	142
5.3.1 原理	106	7.3 高分子材料的疲劳性能	142
5.3.2 表示方法	107	7.3.1 高分子材料的疲劳	143
5.3.3 特点及应用	107	7.3.2 高分子材料的疲劳 断口	144
5.4 维氏硬度	108	综合习题	144
5.4.1 原理	108	第8章 材料的磨损性能	146
5.4.2 表示方法	108	8.1 金属材料的磨损性能	148
5.4.3 特点及应用	108	8.1.1 磨损过程	148
5.5 显微硬度	108	8.1.2 磨损的基本类型	149
5.6 其他硬度	109	8.2 陶瓷材料的磨损性能	157
5.6.1 莫氏硬度	109	8.3 高分子材料的磨损性能	159
5.6.2 肖氏硬度试验	110	8.4 磨损试验方法	160
5.6.3 里氏硬度	110	8.4.1 磨损试验机	160
5.6.4 邵氏硬度	111	8.4.2 磨损量的测量与评定	161
综合习题	113	综合习题	162
第6章 材料的冲击韧性及低温脆性	114	第9章 材料的高温力学性能	163
6.1 冲击韧性	116	9.1 材料的高温蠕变	165
6.1.1 冲击载荷的能量性质	116	9.1.1 蠕变曲线	165
6.1.2 缺口冲击试验	116		
6.1.3 冲击韧性	118		
6.1.4 冲击试验的用途	119		

9.1.2 蠕变变形机理	166	11.3 高聚物的强韧化	197
9.1.3 蠕变断裂机理	168	11.3.1 高聚物的强化原理	197
9.1.4 蠕变断口形貌	169	11.3.2 高聚物的韧化原理	198
9.2 高温力学性能指标及其影响		11.3.3 高分子材料的强韧化	
因素	169	方法举例	201
9.2.1 高温力学性能指标	169	11.4 复合改性	202
9.2.2 影响材料高温力学性能的		11.4.1 纤维的增强作用	202
因素	171	11.4.2 纤维的增韧作用	202
综合习题	173	综合习题	203
第 10 章 材料在环境介质作用下的		第二篇 材料的物理性能	205
腐蚀	174	第 12 章 材料的热学性能	207
10.1 金属材料的应力腐蚀	175	12.1 晶体的点阵振动	208
10.1.1 金属的应力腐蚀概述	176	12.2 热容	209
10.1.2 金属的应力腐蚀特点	177	12.2.1 热容的基本概念	209
10.1.3 应力腐蚀断裂的评定		12.2.2 经典热容理论	210
指标	178	12.2.3 固体热容的量子理论	211
10.1.4 应力腐蚀机理	180	12.2.4 影响热容的因素	214
10.1.5 防止金属发生应力腐蚀的		12.2.5 材料热容性能的应用	215
措施	181	12.3 热膨胀	216
10.2 陶瓷材料在环境介质作用下的		12.3.1 热膨胀的基本概念	216
腐蚀	182	12.3.2 热膨胀的机理	217
10.3 高分子材料在环境介质作用下的		12.3.3 影响热膨胀的因素	218
腐蚀	183	12.3.4 材料热膨胀性能的	
10.3.1 高分子材料的腐蚀		应用	220
类型	184	12.4 热传导	220
10.3.2 高分子材料的应力		12.4.1 材料的热传导	220
腐蚀	184	12.4.2 热传导的微观机理	221
综合习题	186	12.4.3 影响材料热传导性能的	
第 11 章 材料的强韧化	187	因素	222
11.1 金属材料强韧化	189	12.4.4 材料热传导性能的	
11.1.1 金属材料的强化原理	189	应用	224
11.1.2 金属材料的韧化原理	190	12.5 热稳定性	225
11.1.3 金属材料强韧化常用		12.5.1 热稳定性的定义	225
方法举例	192	12.5.2 影响抗热震的主要	
11.2 无机非金属材料的强韧化	194	因素	228
11.2.1 无机非金属材料的		12.5.3 材料热学稳定性能的	
韧化机理	194	应用	228
11.2.2 无机非金属材料的		综合习题	229
强韧化方法举例	196		



第 13 章 材料的磁学性能 230

- 13.1 基本磁学性能 231
 - 13.1.1 磁学基本量 231
 - 13.1.2 物质的磁性分类 232
- 13.2 抗磁性和顺磁性 233
 - 13.2.1 原子本征磁矩 233
 - 13.2.2 抗磁性 235
 - 13.2.3 顺磁性 236
- 13.3 铁磁性与反铁磁性 236
 - 13.3.1 铁磁质的自发磁化 236
 - 13.3.2 反铁磁性和亚铁磁性 ... 237
 - 13.3.3 磁畴 238
 - 13.3.4 磁化曲线和磁滞回线 ... 239
- 13.4 影响材料磁性能的因素 242
 - 13.4.1 影响材料抗磁性与顺磁性的因素 242
 - 13.4.2 影响材料铁磁性的因素 243
 - 13.4.3 铁磁性的测量方法与应用 244
- 13.5 磁性材料及其应用 246
 - 13.5.1 软磁材料 246
 - 13.5.2 硬磁材料 248
 - 13.5.3 磁存储材料 250
- 综合习题 251

第 14 章 材料的电学性能 252

- 14.1 导电性能 253
 - 14.1.1 导电机理 253
 - 14.1.2 超导电性 258
 - 14.1.3 影响材料导电性的因素 259
 - 14.1.4 电阻测量与应用 261
- 14.2 热电性能 262
 - 14.2.1 热电效应 262
 - 14.2.2 影响热电势的因素 265
- 14.3 半导体导电性的敏感效应 266
 - 14.3.1 热敏效应 266

- 14.3.2 光敏效应 266
- 14.3.3 压敏效应 266
- 14.3.4 磁敏效应 267
- 14.4 介质极化与介电性能 267
 - 14.4.1 极化的基本概念 267
 - 14.4.2 极化的基本形式 268
 - 14.4.3 介电常数 268
 - 14.4.4 影响介电常数的因素 ... 269
 - 14.4.5 压电性能 269
 - 14.4.6 铁电性能 271
- 14.5 绝缘材料的抗电强度 273
 - 14.5.1 强电场作用下绝缘材料的破坏 273
 - 14.5.2 击穿形式 273
 - 14.5.3 影响抗电强度的因素 ... 274
- 综合习题 275

第 15 章 材料的光学性能 277

- 15.1 光与固体的作用 279
 - 15.1.1 材料的光折射 279
 - 15.1.2 材料的光反射 280
 - 15.1.3 材料的光吸收 281
 - 15.1.4 光的散射 283
- 15.2 材料的不透明性与半透明性 ... 283
 - 15.2.1 材料的不透明性 283
 - 15.2.2 材料的乳浊 284
 - 15.2.3 材料的半透明性 285
 - 15.2.4 材料的着色 285
- 15.3 光学材料及应用 287
 - 15.3.1 荧光材料 287
 - 15.3.2 激光材料 287
 - 15.3.3 光弹性材料 289
 - 15.3.4 声光材料 289
 - 15.3.5 电光材料和光全息存储 290
 - 15.3.6 光导纤维 291
- 综合习题 292

参考文献 293

第一篇

材料的力学性能

材料的力学性能主要研究的是在受载过程中材料变形和断裂的规律。根据受载条件的不同，主要研究内容包括：材料在静载下的弹性变形、塑性变形、断裂及断裂韧性、硬度、扭转、弯曲、压缩性能；在动载下的冲击韧性、疲劳性能和摩擦磨损性能；在高温条件下的力学性能及应力腐蚀等。

不同材料的力学特性有很大的差别。一般地，金属材料有良好的塑性变形能力和较高的强度，易加工成各种形状的产品；陶瓷材料有高的耐高温强度、耐磨性能和抗腐蚀性能，但陶瓷材料很脆，很难加工成形，阻碍了其应用范围；高分子材料在玻璃化温度 T_g 以下是脆性的，在 T_g 以上可以加工成形，但其强度很低。各种材料在力学性能上的差别主要取决于结合键和结构。

本部分将介绍不同材料的力学性能特点及其基本力学性能指标的物理概念和工程意义，讨论材料力学行为的基本规律及其与材料组织结构的关系，探讨提高材料性能指标的途径和方向。这些性能指标既是材料的工程应用、构件设计和科学研究等方面的计算依据，也是材料评定和选用及加工工艺选择的主要依据。

材料的单向静拉伸试验采用光滑圆柱试样在缓慢加载和低的变形速率下进行的。图 0.1 所示是典型的低碳钢拉伸时的工程应力-应变(σ - ϵ)曲线。单向静拉伸试验可以揭示材料在静载作用下的应力应变关系及弹性变形、塑性变形(屈服变形、均匀塑性变形)、断裂(颈缩：不均匀集中塑性变形)3个阶段的特点和基本规律，可评定材料的基本力学性能指标，如屈服强度、抗拉强度、伸长率和断面收缩率等。因此，单向静拉伸试验是工业生产和材料科学研究中应用最广泛的材料力学性能试验方法。

不同材料或同一材料在不同条件下都具有不同类型的拉伸曲线。图 0.2 所示为几种典型材料在室温下的 σ - ϵ 曲线。高碳钢的工程应力-应变曲线，只有弹性变形、少量的均匀塑性变形；铜合金的工程应力-应变曲线，有弹性变形、均匀塑性变形和不均匀塑性变形；陶瓷、玻璃类材料只有弹性变形而没有明显的塑性变形；橡胶类材料的弹性变形量可高达 1000%，且只有弹性变形而不产生或产生很微小的塑性变形；工程塑料的应力-应变曲线，有弹性变形、均匀塑性变形和不均匀集中塑性变形。这主要是由材料的键合方式、化学成分和组织状态等因素决定的。

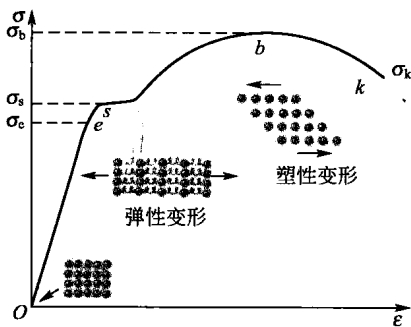


图 0.1 低碳钢拉伸工程应力-应变(σ - ϵ)曲线

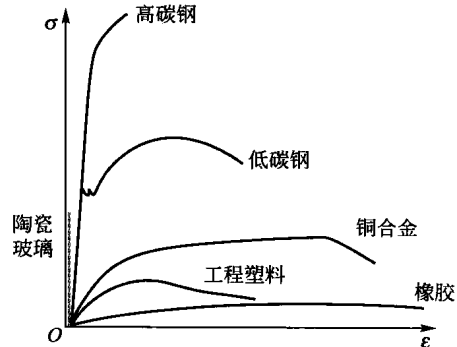


图 0.2 典型材料在室温下的 σ - ϵ 曲线

图 0.3 所示为真应力-真应变(S - e)曲线。与工程应力-应变曲线相比较，在弹性变形阶段，由于试样的伸长和截面收缩都很小，两曲线基本重合，真实屈服应力和工程屈服应力在数值上非常接近，但在塑性变形阶段，两者的差异显著。在工程应用中，多数构件的变形量限制在弹性变形范围内，两者的差别可以忽略。工程应力和应变便于测量和计算，因此，工程设计和材料选用中一般以工程应力、工程应变为依据。但在材料科学研究中，真应力与真应变具有重要意义。

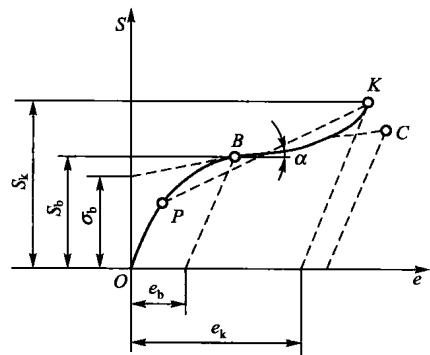


图 0.3

第 1 章

材料的弹性变形



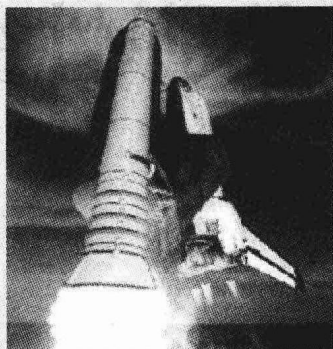
本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
弹性变形机理	掌握无机非金属材料(陶瓷)、金属材料和高分子材料弹性变形的机理(物理本质)	无机非金属材料(陶瓷)、金属材料和高分子材料的结构与结合键的特点
弹性变形力学性能指标	掌握弹性模量、比例极限、弹性极限和弹性比功等基本概念的意义; 了解广义胡克定律的意义; 了解无机非金属材料(陶瓷)、金属材料和高分子材料弹性模量的特点及影响因素	无机非金属材料(陶瓷)、金属材料和高分子材料的结构、成形工艺及组织特点
非理想弹性变形	掌握非理想弹性变形的概念及类别; 了解滞弹性、黏弹性、伪弹性、包申格效应和内耗的基本概念	无机非金属材料(陶瓷)、金属材料和高分子材料的结构、成形工艺及组织特点



导入案例

“挑战者”号航天飞机是美国正式使用的第二架航天飞机，在1986年1月28日进行第10次太空任务时，因为右侧固态火箭推进器上的一个O形环失效，导致一连串的连锁反应，在升空后73s时，爆炸解体坠毁。机上的7名宇航员在该次意外中全部丧生。O形环是一种依靠密封件发生弹性变形的积压形密封，但是由于O形环的低温硬化失效，未能及时发生弹性变形产生密封效果，而导致了一场悲剧。



2007年10月21日，在深圳南山湾F1摩托艇世界锦标赛深圳大奖赛决赛的比赛中，F1天荣摩托艇招商银行队的中国选手彭林武在出发情况非常好的情况下未能走完55圈，在第28圈时因为他的一次急切操作导致赛艇的后盖整个掀飞，不得不退出了比赛。原因为赛艇的两个固定艇罩的弹簧被过度拉伸而失去了弹性。

材料受到外力作用时，首先发生弹性变形，即受力作用后产生变形，卸除载荷后，变形消失。若应力和应变服从胡克定律，称为理想弹性(完全弹性)变形。在材料力学中，通常把构件简化为发生理想弹性变形的变形固体，即弹性变形体。

衡量材料弹性变形能力的力学性能指标有弹性模量 E 、比例极限 σ_p 、弹性极限 σ_e 和弹性比功 a_e 等。其中弹性模量是衡量材料弹性变形能力的一个重要指标，是结构设计的重要参数。不同材料的弹性变形特点有很大不同，这主要取决于原子(分子)间的结合力。

本章将从金属、陶瓷和高分子材料的弹性变形机理入手，分析不同材料弹性变形的物理本质，从而进一步分析弹性模量等性能指标的工程意义、变化规律及影响因素，了解材料的弹性性能与成分、结构、组织等内在因素及温度、加载条件等外在因素之间的关系，掌握提高材料弹性性能指标及发挥材料潜力、开发新材料的主要途径。

此外，本章还将介绍另一类弹性变形——非理想弹性变形的变形特点、机理及工程应用。

1.1 材料的弹性变形机理

1.1.1 金属与陶瓷材料的弹性变形机理

弹性变形的特点是具有可逆性，即只要外力去除后，变形消失而恢复原状的变形为弹

性变形。金属和陶瓷材料弹性变形的微观过程可用双原子模型解释。在正常状态下，晶格中的离子在其平衡位置附近做微小的热振动，是受离子之间的相互作用力控制的结果。一般认为，正离子和自由电子间的库仑力产生引力，离子之间因电子壳层应变产生斥力，引力和斥力都是离子间距的函数。

图 1.1 所示为离子间相互作用时的受力模型，在离子的平衡位置(N_1 、 N_2)合力为零。当外力对离子作用时，合力曲线的零点位置改变，离子的位置调整，即产生位移，离子位移的总和在宏观上表现为材料的变形。当外力去除后，离子依靠彼此间的作用力又回到原来的平衡位置，宏观变形消失，表现出弹性变形的可逆性。

根据双原子模型导出的离子间相互作用力与离子间弹性位移的关系是抛物线关系，并非胡克定律描述的直线关系。另外，合力曲线有最大值 F_{\max} ，如果外加拉应力略大于 F_{\max} ，可以克服离子间的引力而使它们分离。因此， F_{\max} 是材料在弹性状态下的理论断裂抗力，此时相应的离子弹性变形量 $r_m - r_0$ 可达 25%。实际上，它们都是理论值，因为实际应用的工程材料中，不可避免地存在着各种缺陷、杂质、气孔或微裂纹，所以实际断裂抗力远远小于 F_{\max} 时，材料就产生了塑性变形或发生断裂。实际材料的弹性变形只相当于合力曲线的起始阶段，因此胡克定律所表示的外力-位移线性关系是近似正确的。

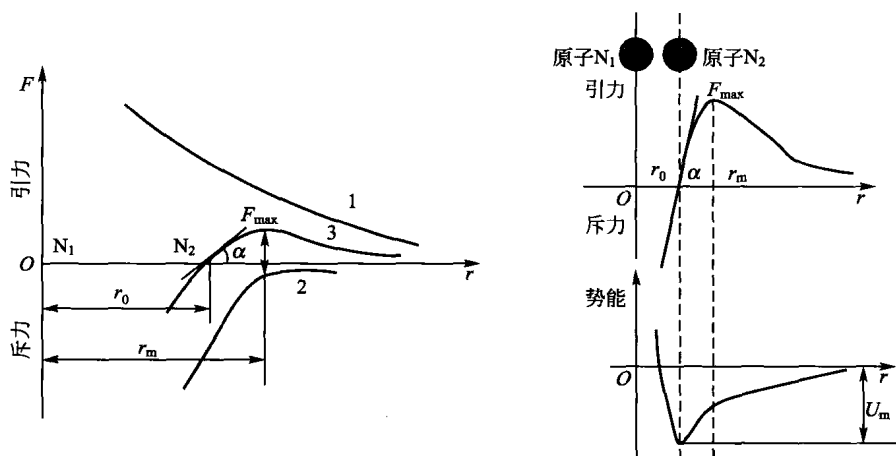


图 1.1 离子间相互作用力模型

1—引力；2—斥力；3—合力

因此，无论变形量大小和应力与应变是否呈线性关系，弹性变形都是可逆变形。金属和陶瓷晶体的弹性变形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。即材料产生弹性变形的本质，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。

1.1.2 高分子材料的弹性变形机理

高分子聚合物的可变范围最宽，包括从液体、软橡胶到刚性固体，其变形行为与其结构特点有关。聚合物由大分子链构成，这种大分子链一般都具有柔性，但柔性链易引起黏性流动，可采用适当交联保证弹性。高分子聚合物除了整个分子的相对运动外，还可实现分子不同链段之间的相对运动。与金属材料相比，高分子材料的运动依赖于温度和时间，



具有明显的松弛特性，引起了聚合物变形的一系列特点。

1. 非晶态聚合物的力学状态及其变形机理

非晶态聚合物在不同的温度下，呈现玻璃态、高弹态和黏流态三种不同状态(图 1.2)，主要差别是变形能力不同、模量不同，因而称作力学性能三态，是聚合物分子微观运动特征的宏观表现。玻璃态聚合物在升高到一定温度时可以转变为高弹态，这一转变温度称为玻璃化转变温度，简称玻璃化温度，常以 T_g 表示。高弹态到黏流态的转变温度称为黏流温度，常以 T_f (或 T_m)表示。不同状态下的应力-应变曲线特点如图 1.3 所示。

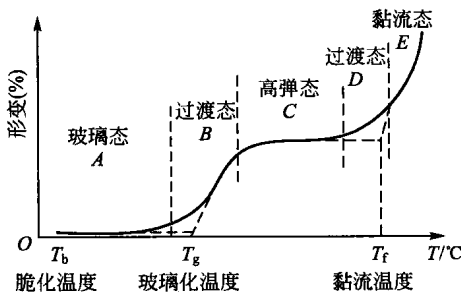


图 1.2 高聚物的力学状态

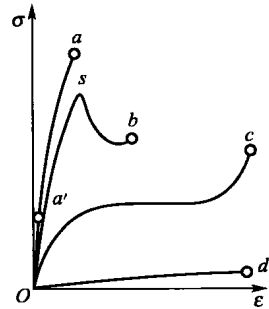


图 1.3 线性非晶态高聚物的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

1) 玻璃态

拉伸试验时，弹性变形量很小，且形变与外力的大小成正比，符合胡克定律，外力除去后，形变能立即回复，无弹性滞后，弹性模量比其他状态下的弹性模量都要大，当外力超过弹性极限时发生脆性断裂，试件的延伸率很小，断口与拉力方向垂直。因此，将这种弹性变形称普弹性变形(图 1.3Oa 段)。

在玻璃态时，聚合物分子运动的能量很低，不足以克服分子内内旋转势垒，大分子链段(约由 40~50 个链节组成)和整个分子链的运动是冻结的，或者说松弛时间无限大，只有小的运动单元可以运动。此时，聚合物的力学性质和玻璃相似，因此称为玻璃态。室温下处于玻璃态的高聚物称为塑料。当 $T < T_b$ 时，高聚物处于硬玻璃态；当 $T_b < T < T_g$

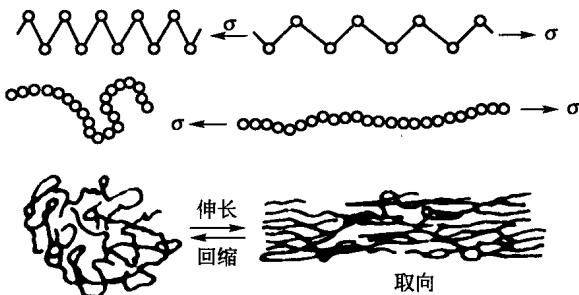


图 1.4 外力作用下高分子链的变化

时，高聚物处于软玻璃状态(图 1.3Oa'、sb 段)。Oa' 以下为普弹性变形后；键角和键长的变化。a's 段为受迫高弹性变形，链段沿外力取向(图 1.4)。在外力除去后，受迫高弹性变形被保留下来，成为“永久变形”，其数值可达 300%~1000%。这种变形在本质上是可逆的，但只有加热到 T_g 以上，变形的回复才有可能(与橡胶弹性的区别)。

2) 高弹态

高弹态下大分子已具有足够的能量，链段已开始运动，但整个大分子尚不能运动。在外力作用下，大分子链可以通过链段的运动改变构象。分子在受外力拉伸时，可以从卷曲的线团状态变为伸展的状态，表现出很大的形变，约 1000%。当外力去除后，大分子链又

通过链段的运动回复到卷曲的线团状态。在外力作用下这种大的且逐渐回复特征的形变，称为高弹性(图 1.3Oc 段)。高分子材料具有高弹态是它区别于低分子材料的重要标志。

高聚物在高弹态的物理力学性能是极其特殊的，它有稳定的尺寸，在小形变时，其弹性响应满足胡克定律，像固体；但它的热膨胀系数和等温压缩系数又与液体有相同的数量级，表明高弹态时高分子间相互作用又与液体的相似；另外，高弹态时的形变应力随温度增加而增加，又与气体的压强随温度升高而增加有相似性。就力学性能而言，高弹态具有以下特点：①可逆弹性形变大，可高达 1000%，即拉长十倍之多，而一般金属材料的弹性形变不超过 1%，典型的是 0.2% 以下；②弹性模量小，高弹模量约为 10^5 Pa，而一般金属材料弹性模量可达 $10^{10} \sim 10^{11}$ Pa；③高聚物高弹模量随绝对温度的升高而增加，而金属材料的弹性模量随温度的升高而减小；④形变时有明显的热效应，当把橡胶试样快速拉伸(绝热过程)，温度升高(放热)，回缩时，温度降低(吸热)，而金属材料与此相反。

高聚物的高弹性本质上是一种熵弹性，而金属等材料的普弹性本质上是能量的弹性。研究表明，由相对分子质量足够高的柔性链组成并经过轻微交联的高聚物在宽阔的温度范围内具有典型的高弹性。实际应用中研究最多的是橡胶的高弹性。

橡胶的柔性、长链结构使其卷曲分子在外力作用下通过链段运动改变构象而舒展开来，除去外力又恢复到卷曲状态。橡胶的适度交联可以阻止分子链间质心发生位移的黏性流动，使其充分显示高弹性。交联可以通过交联剂(硫黄、过氧化物等)与橡胶反应来完成。

室温下处于高弹态的高分子材料称为橡胶($T_g < \text{室温}$)。对于橡胶态的高分子聚合物，弹性变形量较大，应力和应变之间不呈线性关系。橡胶类材料弹性变形的本质是卷曲分子链在力的作用下通过链段的运动沿受力方向产生的伸展。

具有高弹性的必要条件：分子链应有柔性。C—C 键内旋转，引起链段运动(图 1.5)。但柔性链易由于链间滑动，引起非弹性的黏性流动。可采用分子链间的适当交联防止滑动，保证高弹性(图 1.6)。

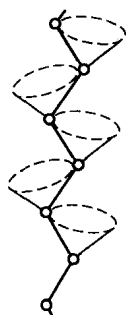


图 1.5 C—C 键内旋转

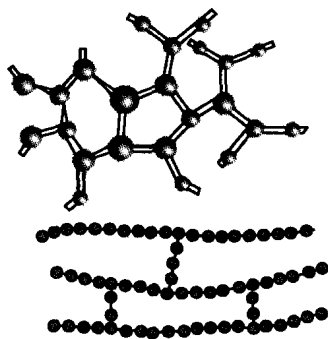


图 1.6 分子链间的交联

3) 黏流态

在黏流态分子具有很高的能量，不仅链段能够运动，而且整个大分子链都能运动。或者说，不仅链段运动的松弛时间缩短，而且整个大分子链运动的松弛时间也缩短。聚合物在外力作用下呈现黏性流动，分子间发生相对滑动。这种形变和低分子液体的黏性流动相似，是不可逆的。当外力撤除时，形变不能回复(图 1.3Od 段)。



2. 晶态聚合物的变形

完全结晶的高聚物内部为折叠分子链。结晶区链段无法运动，弹性变形量较小，应力和应变之间可以看成具有单值线性关系，不存在高弹性。图 1.7 所示为晶态聚合物的典型应力-应变曲线。

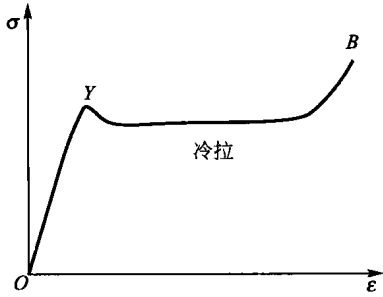


图 1.7 晶态聚合物典型应力-应变曲线

晶态聚合物与非晶态聚合物相比，相同点是都经历弹性变形、屈服、高弹形变以及应变硬化等阶段，高弹形变在室温时都不能自发回复，而加热后会产生回复，该现象通常称为“冷拉”。不同点是：①产生冷拉的温度范围不同，玻璃态聚合物的冷拉温度区间是 $T_b \sim T_g$ ，而结晶聚合物则为 $T_g \sim T_f$ ；②玻璃态聚合物在冷拉过程中聚集态结构的变化比晶态聚合物简单得多，它只发生分子链的取向，并不发生相变，而晶态聚合物包含有结晶的破坏、取向和再结晶等过程。

影响晶态聚合物 $\sigma-\epsilon$ 曲线的因素有温度(与玻璃态聚合物相似)、应变速率(与玻璃态聚合物相似)、结晶度和球晶尺寸等(图 1.8)。

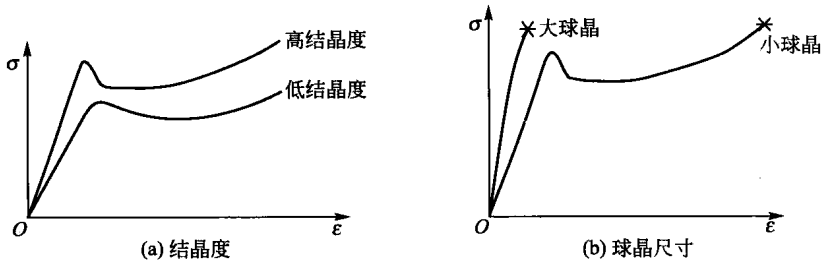


图 1.8 不同因素对晶态聚合物 $\sigma-\epsilon$ 曲线的影响

1.2 弹性变形力学性能指标

表征弹性变形阶段的力学性能指标主要有弹性模量(或弹性系数、弹性模数)、比例极限、弹性极限与弹性比功(弹性比能、应变比能)。

1.2.1 弹性模量

1. 广义胡克定律

对具有普弹性的材料及变形量不太大的高弹性材料，在弹性范围内，当变形较小时，应力和应变间的关系普遍服从胡克定律。若用正应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 和切应力 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 这 6 个应力分量代表作用在弹性体内某一点的应力状态，由此产生的物体的弹性应变可表示为：正应变(长度的改变) ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 、 ϵ_{zz} 和切应变(两坐标轴间夹角的改变) γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 。根据力的叠加原理：作用在弹性体上的合力产生的位移等于各分力产生的位移之和。应力分量和应变分量间的线性关系即为胡克定律，有 6 个如下关系式：