

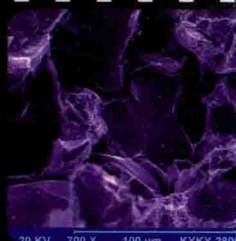
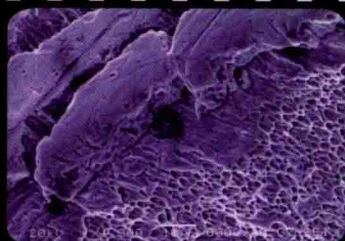
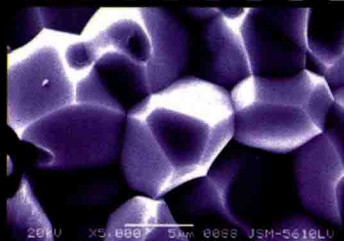
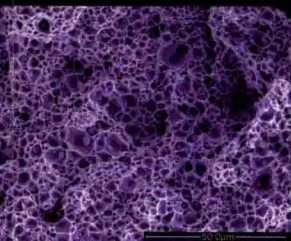


“十三五”普通高等教育本科规划教材
高等院校材料专业“互联网+”创新规划教材

材料性能学

(第2版)

付 华 张光磊 主 编



请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材
高等院校材料专业“互联网+”创新规划教材

材料性能学

(第2版)

主 编	付 华	张光磊	
副主编	吴红亚	王彩辉	蒋晓军
	王建强	秦国强	李洪义
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。全书分为三篇,共15章,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,材料的摩擦磨损性能,材料的高温蠕变性能,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、企业管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料性能学/付华,张光磊主编.—2版.—北京:北京大学出版社,2017.4

(高等院校材料专业“互联网+”创新规划教材)

ISBN 978-7-301-28180-2

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(2017)第051189号

书 名 材料性能学(第2版)

CAILIAO XINGNENGXUE

著作责任者 付华 张光磊 主编

策划编辑 童君鑫

责任编辑 黄红珍

数字编辑 刘志秀

标准书号 ISBN 978-7-301-28180-2

出版发行 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> 新浪微博:@北京大学出版社

电子信箱 pup_6@163.com

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印刷者 北京溢漾印刷有限公司

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 21.75印张 507千字

2010年9月第1版

2017年4月第2版 2017年4月第1次印刷

定 价 48.00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 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

第2版前言

材料性能是材料研究和开发的核心之一，与材料的成分、工艺及结构相互制约，构成材料科学研究的主体空间。材料性能涉及内容纷繁复杂，高等教育改革也对综合素质提出了更高的要求。《材料性能学》自2010年9月出版以来，承蒙广大读者的认可和支持，已于2015年4月第3次印刷，收到良好的教学效果。但在使用中我们也发现了书中存在的不足之处，因此，我们结合多年的教学体会，依据当今材料学科的最新发展成果对书进行全面修订，主要修订内容如下：

(1) 材料以各种工程构件、机器零件和功能器件等产品形式应用在各行业，在不同的使用环境和工作条件下，对材料所要求的性能种类繁多，主要包括材料的力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能等。本书主要介绍材料的力学性能和物理性能，而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，因此，将材料在单向静拉伸应力状态下的力学性能独立为一篇。全书由两篇调整为三篇，第一篇介绍材料在单向静拉伸应力状态下的力学性能，第二篇介绍材料在其他状态下的力学性能，第三篇介绍材料的物理性能。这使课程思路更清晰，重点和基础内容更突出。

(2) 修改了材料部分物理性能（热容、铁磁性、导电、超导等）机理的分析内容，增加了阅读材料，补充了前沿研究理论，使材料物理性能部分和力学性能部分的内容均衡。

(3) 重新编写了第15章（材料的光学性能），使其内容与全书内容更协调。

(4) 每章增加了综合分析题。

(5) 对理论性的文字进行了进一步的精简。

(6) 增加了视频和图片等二维码素材，以补充书中表达的不足。

此次修订，对书的内容进行了调整和扩充，使本书的内容更加系统、丰富，叙述更加简明、扼要。本书通过对材料多样性能的介绍，引领读者进入丰富的材料世界，帮助读者更全面地了解材料性能；激发学生学习的兴趣和主动性，全面培养学生思考问题、分析问题和解决问题等的能力，重点培养学生举一反三的能力。



【参考图文】

本书由石家庄铁道大学和北京工业大学合作编写，石家庄铁道大学付华和张光磊担任主编，北京工业大学王金淑担任主审，具体编写分工如下：付华编写第1、2章，张光磊编写第3~5章，李洪义编写第6~8章，王建强编写第9、11章，王彩辉编写第10、12章，秦国强编写第13、14章，吴红亚编写第15章，吴红亚、蒋晓军和王彩辉对部分章节内容进行重新梳理，整理了二维码素材，并补充修改了部分案例。付华和张光磊负责全书内容的统一、协调与修订。

由于编者学识所限，书中疏漏和欠妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2017年1月

第 1 版前言

“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,将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,以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五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,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“本章教学要点”表,其后有与该章内容相关的“导入案例”,每章中设有一些阅读材料,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,可拓展阅读量。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生动活泼,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、企业管理人员参考使用。

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,具体编写分工如下:付华编写第1、2章;张光磊编写第3、4、5、8章;李洪义编写第6、7章;王建强编写第9~11章,李元庆编写第12、13章;秦国强编写第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 材料在单向静拉伸应力 状态下的力学性能	1	2.3.3 抗拉强度	59
第1章 材料的弹性变形	4	2.3.4 塑性及超塑性	62
1.1 弹性变形机理	5	综合习题	64
1.1.1 金属与陶瓷的弹性 变形机理	5	第3章 材料的断裂与断裂韧性	66
1.1.2 高分子材料的弹性 变形机理	6	3.1 材料的断裂	67
1.2 弹性变形力学性能指标	9	3.1.1 断裂的类型及断裂机理	67
1.2.1 弹性模量	9	3.1.2 断口分析	72
1.2.2 比例极限与弹性极限	16	3.1.3 裂纹的形核与扩展	73
1.2.3 弹性比功	16	3.2 断裂强度	74
1.3 非理想的弹性变形	17	3.3 断裂韧性	78
1.3.1 滞弹性	18	3.3.1 缺口效应	79
1.3.2 黏弹性	18	3.3.2 线弹性条件下的断裂 韧性	81
1.3.3 伪弹性	20	3.3.3 弹塑性条件下的断裂 韧性	84
1.3.4 包申格效应	21	3.3.4 影响断裂韧性的因素	86
1.3.5 内耗	21	3.4 断裂韧性在工程中的应用	91
综合习题	22	3.4.1 材料选择	91
第2章 材料的塑性变形	24	3.4.2 安全校核	92
2.1 材料的塑性变形机理	25	3.4.3 材料开发	92
2.1.1 金属与陶瓷的塑性 变形机理	26	综合习题	93
2.1.2 陶瓷的塑性变形特点	36	第二篇 材料在其他状态下的 力学性能	95
2.1.3 高分子材料的塑性变形	39	第4章 材料的扭转、弯曲、压缩 性能	97
2.2 冷变形金属的回复与再结晶	41	4.1 应力状态软性系数	98
2.2.1 塑性变形对材料性能的 影响	41	4.2 扭转	99
2.2.2 冷变形金属的回复与 再结晶	45	4.2.1 扭转性能指标	100
2.2.3 热加工与冷加工	51	4.2.2 扭转力学性能的特点及 应用	101
2.3 塑性变形的力学性能指标	53	4.3 弯曲	101
2.3.1 屈服强度	53	4.3.1 弯曲性能指标	102
2.3.2 应变硬化指数	58	4.3.2 弯曲力学性能的特点及 应用	103



4.4 压缩	103	7.1.1 循环载荷及疲劳断裂的 特点	131
4.4.1 压缩性能指标	103	7.1.2 疲劳断口形貌及疲劳 破坏机理	132
4.4.2 压缩力学性能的特点及 应用	104	7.1.3 疲劳抗力指标	138
综合习题	104	7.1.4 影响材料疲劳强度的 因素	142
第5章 材料的硬度	106	7.2 陶瓷材料的疲劳性能	145
5.1 硬度的意义及试验方法	107	7.2.1 静态疲劳	145
5.2 布氏硬度	108	7.2.2 循环疲劳	145
5.2.1 原理	108	7.2.3 陶瓷材料疲劳特性 评价	146
5.2.2 表示方法	109	7.3 高分子材料的疲劳性能	146
5.2.3 特点及应用	109	7.3.1 高分子材料的疲劳 特点	147
5.2.4 硬度与其他力学性能的 关系	109	7.3.2 高分子材料的疲劳 断口	148
5.3 洛氏硬度	109	综合习题	148
5.3.1 原理	109	第8章 材料的摩擦磨损性能	150
5.3.2 表示方法	110	8.1 金属材料的磨损性能	153
5.3.3 特点及应用	111	8.1.1 磨损过程	153
5.4 维氏硬度	111	8.1.2 磨损的基本类型	154
5.4.1 原理	111	8.2 陶瓷材料的磨损性能	162
5.4.2 表示方法	111	8.3 高分子材料的磨损性能	164
5.4.3 特点及应用	112	8.4 磨损试验方法	165
5.5 显微硬度	112	8.4.1 磨损试验机	166
5.6 其他硬度	113	8.4.2 磨损量的测量与评定	166
5.6.1 莫氏硬度	113	综合习题	167
5.6.2 肖氏硬度	113	第9章 材料的高温蠕变性能	169
5.6.3 里氏硬度	114	9.1 高温蠕变	171
5.6.4 邵氏硬度	114	9.1.1 蠕变曲线	171
综合习题	116	9.1.2 蠕变变形机理	172
第6章 材料的冲击韧性及低温脆性 ..	118	9.1.3 蠕变断裂机理	174
6.1 冲击韧性	120	9.1.4 蠕变断口形貌	175
6.1.1 冲击载荷的能量性质	120	9.2 高温蠕变性能指标及其 影响因素	175
6.1.2 缺口冲击试验	120	9.2.1 高温蠕变性能指标	175
6.1.3 冲击韧性	122	9.2.2 影响材料高温蠕变性能的 因素	177
6.1.4 冲击力学性能的应用	123	综合习题	179
6.2 低温脆性	123		
6.2.1 材料的冷脆倾向	123		
6.2.2 韧脆转变温度	124		
6.2.3 低温脆性的影响因素	126		
综合习题	128		
第7章 材料的疲劳性能	129		
7.1 金属材料的疲劳性能	131		

第 10 章 材料在环境介质作用下的腐蚀	180	12.2 热容	217
10.1 金属材料的应力腐蚀	182	12.2.1 热容的基本概念	217
10.1.1 应力腐蚀概述	182	12.2.2 经典热容理论	218
10.1.2 应力腐蚀特点	183	12.2.3 量子热容理论	219
10.1.3 应力腐蚀断裂指标	185	12.2.4 影响热容的因素	222
10.1.4 应力腐蚀机理	186	12.2.5 热容性能的应用	224
10.1.5 预防应力腐蚀的措施	188	12.3 热膨胀	225
10.2 陶瓷材料在环境介质作用下的腐蚀	188	12.3.1 热膨胀的基本概念	225
10.3 高分子材料在环境介质作用下的腐蚀	190	12.3.2 热膨胀的机理	226
10.3.1 高分子材料的腐蚀类型	191	12.3.3 影响热膨胀的因素	227
10.3.2 高分子材料的应力腐蚀	191	12.3.4 热膨胀性能的应用	229
综合习题	193	12.4 热传导	232
第 11 章 材料的强韧化	194	12.4.1 热传导基本概念	232
11.1 金属材料强韧化	196	12.4.2 热传导的微观机理	232
11.1.1 金属材料的强化原理	196	12.4.3 影响热传导性能的因素	234
11.1.2 金属材料的韧化原理	197	12.4.4 热传导性能的应用	236
11.1.3 金属材料的强韧化常用方法举例	199	12.5 热稳定性	238
11.2 无机非金属材料的强韧化	201	12.5.1 热稳定性的定义	238
11.2.1 无机非金属材料韧化机理	201	12.5.2 影响热稳定性的主要因素	241
11.2.2 无机非金属材料强韧化方法举例	204	12.5.3 热稳定性的应用	241
11.3 高聚物的强韧化	205	综合习题	241
11.3.1 高聚物的强化原理	205	第 13 章 材料的磁学性能	243
11.3.2 高聚物的韧化原理	206	13.1 基本磁学性能	245
11.3.3 高分子材料的强韧化方法举例	208	13.1.1 磁学基本量	245
11.4 复合改性	209	13.1.2 物质的磁性分类	245
11.4.1 纤维的增强作用	210	13.2 抗磁性和顺磁性	246
11.4.2 纤维的增韧作用	210	13.2.1 原子本征磁矩	246
综合习题	211	13.2.2 抗磁性	248
第三篇 材料的物理性能	213	13.2.3 顺磁性	249
第 12 章 材料的热学性能	215	13.3 铁磁性与反铁磁性	249
12.1 晶格振动	216	13.3.1 铁磁质的自发磁化	249
		13.3.2 反铁磁性和亚铁磁性	251
		13.3.3 磁畴	251
		13.3.4 磁化曲线和磁滞回线	254
		13.4 影响材料磁性能的因素	257
		13.4.1 影响材料抗磁性与顺磁性的因素	257
		13.4.2 影响材料铁磁性的因素	258
		13.4.3 铁磁性的测量方法与应用	259



13.5 磁性材料及其应用	261	14.5.2 击穿形式	297
13.5.1 软磁材料	261	14.5.3 影响抗电强度的因素 ...	298
13.5.2 硬磁材料	263	综合习题	299
13.5.3 磁存储材料	266	第 15 章 材料的光学性能	301
综合习题	267	15.1 材料的线性光学性质	303
第 14 章 材料的电学性能	269	15.1.1 光折射	304
14.1 导电性能	270	15.1.2 光反射	305
14.1.1 导电机理	270	15.1.3 光吸收	307
14.1.2 超导电性	279	15.1.4 发光性能	310
14.1.3 影响材料导电性的 因素	282	15.1.5 光的散射	313
14.1.4 电阻测量与应用	285	15.2 材料的非线性光学性质	314
14.2 热电性能	285	15.3 光学材料及其应用	317
14.2.1 热电效应	285	15.3.1 光弹性材料	317
14.2.2 影响热电势的因素	289	15.3.2 声光材料	318
14.3 半导体导电性的敏感效应	290	15.3.3 电光材料和光全息 存储	318
14.3.1 热敏效应	290	15.3.4 激光晶体	320
14.3.2 光敏效应	290	综合习题	322
14.3.3 压敏效应	290	附录 1 试题及参考答案	324
14.3.4 磁敏效应	291	试题 1	324
14.4 介质极化与介电性能	291	试题 2	326
14.4.1 极化的基本概念	291	试题 1 答案	327
14.4.2 极化的基本形式	292	试题 2 答案	329
14.4.3 介电常数	292	附录 2 对材料性能理论做出突出 贡献的部分科学家	331
14.4.4 影响介电常数的因素 ...	293	参考文献	335
14.4.5 压电性能	293		
14.4.6 铁电性能	295		
14.5 绝缘材料的抗电强度	297		
14.5.1 强电场作用下绝缘 材料的破坏	297		

第一篇

材料在单向静拉伸应力 状态下的力学性能



材料的力学性能是指材料在不同环境(温度、介质和湿度等)下,承受各种外加载荷(拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等)时所表现出的力学特征。即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。根据载荷应力状态、温度及环境介质条件的不同,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、扭转、弯曲、压缩、硬度性能,动态载荷下的冲击韧性、疲劳性能和摩擦磨损性能,低温下的冲击韧性,高温条件下的蠕变力学性能及环境介质作用下的应力腐蚀等(表 I-1)。材料的力学性能是确定各种工程构件、机器零件的工程设计参数的主要依据。这些力学性能均需按统一试验方法和程序标准在材料试验机上测定。

室温大气环境下的单向静拉伸状态是最简单的外加载荷和试样受力状态,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(缩颈: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,而且,该状态下的基础理论和规律也可以推广到其他力学性能指标的研究中。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。本书把材料的力学性能按应力状态分为两篇。

表 I-1 力学性能的分类

状 态		性 能	
应力状态	单向静拉伸	弹性变形、塑性变形、断裂及断裂韧性	第一篇
	其他应力状态	扭转、弯曲、压缩、硬度性能	
	动态载荷	冲击韧性、疲劳性能、摩擦磨损性能	
温度	低温	低温脆性	第二篇
	高温条件	蠕变	
环境介质	应力作用	应力腐蚀,氢脆	

不同材料的力学特性有很大的不同。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;陶瓷材料有高的低温强度、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。

本书材料的力学性能部分将介绍不同材料的力学性能特点及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。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 I.1 所示为典型的低碳钢拉伸时的工程应力-应变(σ - ϵ)曲线,图 I.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%,而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。

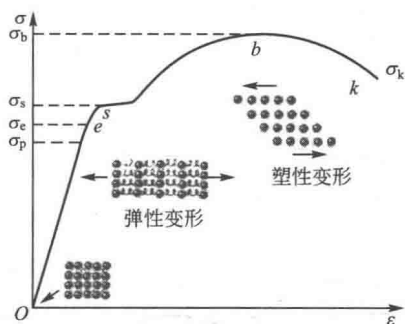


图 I.1 低碳钢拉伸工程应力-应变(σ - ε)曲线

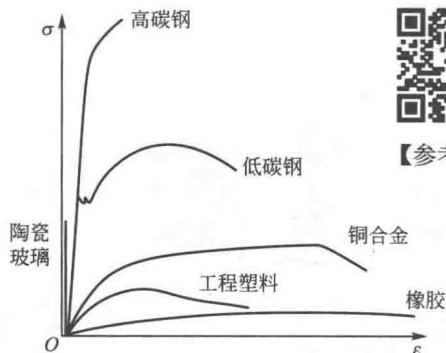


图 I.2 典型材料在室温下的 σ - ε 曲线



【参考视频】

图 I.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。

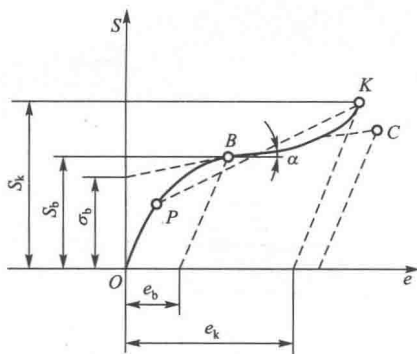


图 I.3 真应力-真应变 (S - e) 曲线

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，导致一连串连锁反应，在升空后73s时，爆炸解体坠毁（图1.01）。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（图1.02）。



【参考视频】



图 1.01 航天飞机爆炸解体



【参考图文】



图 1.02 弹簧失效

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 弹性变形机理

1.1.1 金属与陶瓷的弹性变形机理

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。



【参考动画】

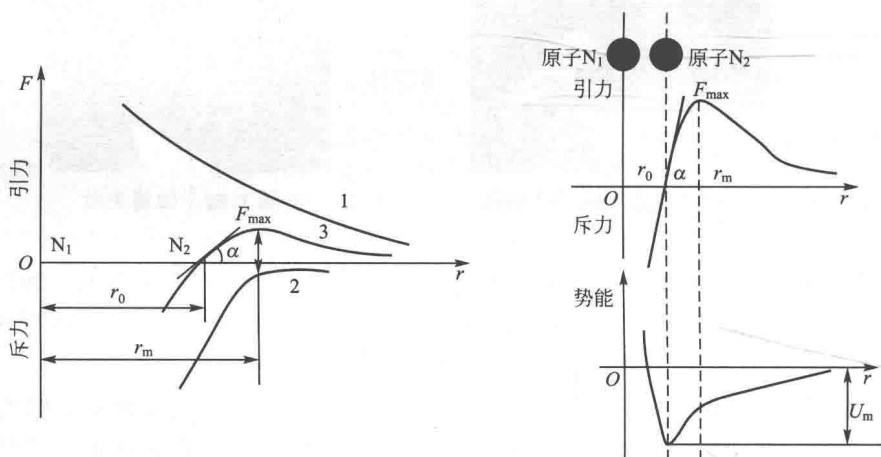


图 1.1 离子间相互作用时的受力模型

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。

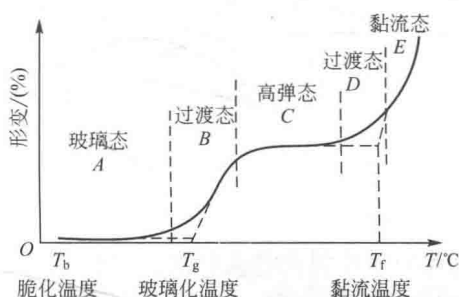


图 1.2 高聚物的力学状态

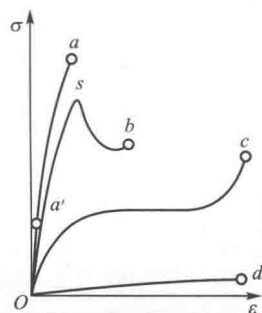


图 1.3 线性非晶态高聚物的 σ - ϵ 曲线

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，当外应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 1.3 中 Oa 段)。

在玻璃态时，聚合物分子运动的能量很低，不足以克服分子内旋转势垒，大分子链段(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(图 1.3 中 Oa' 段)；当 $T_b < T < T_g$ 时，高聚物处于软玻璃状态(图 1.3 中 Oa' 、 sb 段)。在 Oa' 以下为普弹性变形后；键角和键长发生变化[图 1.4 (a)]。 $a's$ 段为受迫高弹性变形，链段沿外力取向[图 1.4 (b)]。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)。

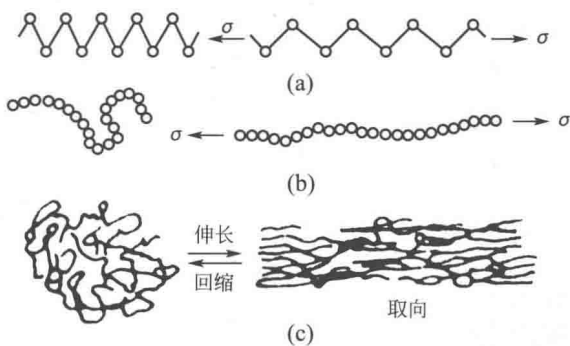


图 1.4 外力作用下高分子链的变化

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