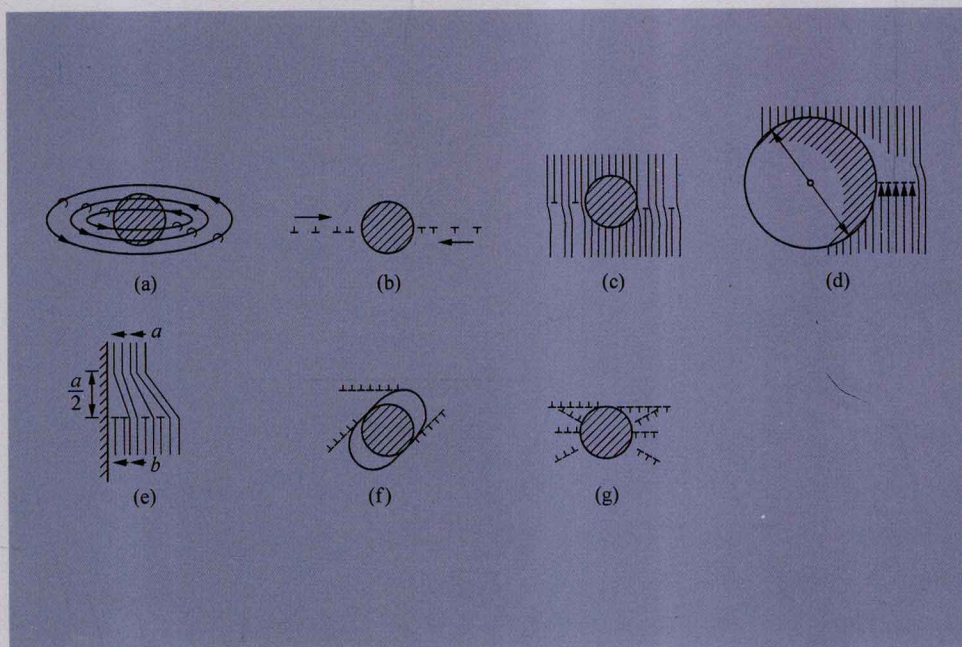


材料科学与工程学科系列教材

# 材料强韧学基础

Strengthening and Toughening of Materials



主编 王 磊 涂善东

主审 周 玉



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

材料科学与工程学科系列教材

# 材料强韧学基础

主编 王 磊 涂善东  
主审 周 玉



上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

材料的强度和韧性是衡量结构材料优劣的首要指标,准确认知材料的强度、韧性与其微观组织结构状态的变化规律,科学地将其运用于工程实际,是材料设计与制造、机械设计和制造工作者之历史使命。本书将传统的金属、陶瓷、高分子等三大材料以及复合材料有机地融为一体,将材料力学行为的微细观物理本质与力学行为的宏观规律有机结合,既强调材料强度与韧性的经典理论,又介绍本学科相关的一些新成就。本书可作为高等院校材料科学与工程及相关专业教材,亦可作为材料与机械相关领域工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料强韧学基础/王磊,涂善东主编. —上海:上海交通大学出版社,2012  
材料科学与工程学科教材系列  
ISBN 978-7-313-08232-9

I. ①材… II. ①王…②涂… III. ①材料强度—韧性—高等学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 043464 号

## 材料强韧学基础

王 磊 涂善东 主编

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海亿顺印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18 字数: 424 千字

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1~3030

ISBN 978-7-313-08232-9/TB 定价: 38.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系  
联系电话: 021-56889281

# 编委会名单

## 顾问委员会

- 主任：徐祖耀 上海交通大学
- 委员：周尧和 上海交通大学  
潘健生 上海交通大学  
吴人洁 上海交通大学  
涂善东 华东理工大学
- 张立德 中科院固体物理所  
姜茂发 东北大学  
李春峰 哈尔滨工业大学

## 编委会

- 主任：林栋樑 上海交通大学
- 副主任：吴毅雄 上海交通大学  
蔡珣 上海交通大学  
王敏 上海交通大学
- 冯吉才 哈尔滨工业大学  
赵升吨 西安交通大学

### 委员(按姓氏笔画为序)：

- 王磊 东北大学  
孔向阳 上海交通大学  
李强 上海交通大学  
李建国 上海交通大学  
陈世朴 上海交通大学  
戎咏华 上海交通大学  
金学军 上海交通大学
- 金朝晖 上海交通大学  
钱苗根 上海交通大学  
黄永昌 上海交通大学  
张建旗 内蒙古科技大学  
顾剑锋 上海交通大学  
赵震 上海交通大学  
唐新华 上海交通大学

# 总 序

材料是当今社会物质文明进步的根本性支柱之一,是国民经济、国防及其他高新技术产业发展不可或缺的物质基础。材料科学与工程是关于材料成分、制备与加工、组织结构与性能,以及材料使用性能诸要素和他们之间相互关系的科学,是一门多学科交叉的综合性学科。材料科学的三大分支学科是材料物理与化学、材料学和材料加工工程。

材料科学与工程专业酝酿于20世纪50年代末,创建于60年代初,已历经半个世纪。半个世纪以来,材料的品种日益增多,不同效能的新材料不断涌现,原有材料的性能也更为改善与提高,力求满足多种使用要求。在材料科学发展过程中,为了改善材料的质量,提高其性能,扩大品种,研究开发新材料,必须加深对材料的认识,从理论上阐明其本质及规律,以物理、化学、力学、工程等领域学科为基础,应用现代材料科学理论和实验手段,从宏观现象到微观结构测试分析,从而使材料科学理论和实验手段迅速发展。

目前,我国从事材料科学研究的队伍规模占世界首位,论文数目居世界第一,专利数目居世界第一。虽然我国的材料科学发展迅速,但与发达国家相比,差距还较大:论文原创性成果不多,国际影响处于中等水平;对国家高技术和国民经济关键科学问题关注不够;对传统科学问题关注不够,对新的科学问题研究不深入等等。

在这一背景下,上海交通大学出版社组织召开了“材料学科学及工程学科研讨暨教材编写大会”,历时两年组建编写队伍和评审委员会,希冀以“材料科学及工程学科”系列教材的出版带动专业教育紧跟科学发展和技术进步的形势。为保证此次编写能够体现我国科学发展水平及发展趋势,丛书编写、审阅人员汇集了全国重点高校众多知名专家、学者,其中不乏德高望重的院士、长江学者等。丛书不仅涵盖传统的材料科学与工程基础、材料热力学等基础课程教材,也包括材料强化、材料设计、材料结构表征等专业方向的教材,还包括适应现代材料科学研究需要的材料动力学、合金设计的电子理论和计算材料学等。

在参与本套教材的编写的上海交通大学材料科学与工程学院教师和其他兄弟院校的共同努力下,本套教材的出版,必将促进材料专业的教学改革和教材建设事业发展,对中青年教师的成长有所助益。

林栋樑

# 序

材料的强度和韧性是衡量结构材料优劣的首要指标,准确认知材料的强度、韧性与其微观组织结构状态的变化规律,科学地将其运用于工程实际,是材料设计与加工、机械设计和制造工作者之历史使命;亦是实现材料高效、安全、低耗及环境友好利用的基础。作为材料科学与工程专业的必修课程教材,无论是让学生充分认知材料的强度与韧性,还是培养学生科学分析问题的能力均十分重要。王磊教授与涂善东教授主编的《材料强韧学基础》为相关教学与科研人员提供了一部高水准的教材。

该教材将传统的金属、陶瓷、高分子等三大材料以及复合材料有机地融为一体,将材料力学行为的微细观物理本质与力学行为的宏观规律有机结合,既强调材料强度与韧性的经典理论,又结合实际应用介绍本学科相关的一些新成就。这无疑对材料科学工作者或机械设计人员都大有裨益,换言之,通过本教材的学习不但可以深入了解材料的强化与韧化,而且由此开启材料设计及机械设计的材料力学行为分析方法。特别是本教材各章给出了思考题和相关的参考文献,这对于读者巩固所学知识、深入思考材料力学行为问题具有参考价值。

本教材的作者王磊教授与涂善东教授在材料的强韧化领域已经从事近三十年的研究,王磊教授在材料的强韧性评价与材料设计、制造/加工相结合的材料研究方面发表了近两百篇学术论文;涂善东教授在材料变形与断裂及结构完整性研究方面,尤其在高温结构设计与寿命预测理论、先进能源材料与装备的研发方面取得了多项重要研究成果。同时,两位教授一直在教学第一线从事材料力学行为相关的教学,积累了丰富的教学经验。两位教授倡导教学与科研互动,将自己的教学体会与科学研究成果有机结合,又吸取了全国十余所高校专家的建议,编著成此教材。可以相信,此教材的出版,对材料与机械专业的学生以及相关的工程技术人员全面理解材料的力学行为,深入了解材料强韧化的意义和方法,对于研发新的材料和充分挖掘现有材料的潜力,以及保证结构材料的使用安全均具有重要的意义。

鉴于以上理由,我深信该教材的出版将在材料与机械学科培养专门人才方面,特别是培养复合型人才方面将发挥良好的作用。本人乐为之序并向读者推荐!

中国工程院院士、哈尔滨工业大学教授

 2011年7月

# 前 言

本书是根据我国高等理工科院校的材料科学与工程专业的教学需要、根据2008年11月由教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会主办的材料科学与工程专业精品教材编写研讨会决议组织编写的。编写大纲经相关院校组织了多次研讨,几经修订而成。在教学计划中,材料的强韧学是一门材料科学与工程专业必修课。从学科角度讲,材料的力学性能主要研究力或力与其他外界条件共同作用下的材料的变形和断裂的本质及其基本规律。其目的在于研究各种力学性能指标的物理意义、各种条件的影响及其变化规律,从而为从材料的设计、制备出发,研制新材料、改进或创新工艺提供依据;为机械设计和制造过程中正确选择与合理使用各种材料指明方向,并为机器零件或构件的失效分析奠定一定基础。

本书是考虑到学生已修完诸如《材料科学基础》、《工程力学》等课程,为进一步加强材料科学与工程有关结构材料的知识而编写的。力求将材料力学行为的微细观物理本质与力学行为的宏观规律有机结合,既强调材料强度与韧性的基本概念,又尽可能介绍本学科相关的一些新成就。全本由8章构成。第1章简要介绍材料的发展史及其强韧性的重要性;第2、3章介绍材料的基本力学性能及弹性变形、塑性变形、断裂及断裂韧性的基本概念;第4章系统叙述材料的强化与韧化基本原理、方法等,这是本书的特色所在;第5、6、7章分别介绍材料在特定加载方式或外界环境下的力学行为,即材料的疲劳、高温及环境下的材料力学性能、材料的磨损和接触疲劳;第8章结合最新的研究成果,简要介绍材料强韧学的应用与未来。本书可作为40~60学时课程的教材,讲授时可依据不同专业的要求,讲授一部分,其余留给学生自学。

本书由东北大学王磊教授(第1、2、3、4、8章)、华东理工大学涂善东教授(第5、6、7章)执笔编写,思考题由东北大学刘杨博士编写。全书由王磊教授统稿,周玉院士主审。在编写中参考和引用了一些单位及作者的资料、研究成果和图片,在此谨致谢意。本书的编写得到了相关兄弟院校同行们的鼓励与支持,上海交通大学出版社有关人员为本书的出版做了大量的工作,在此一并致以谢忱。

由于编者学术水平和客观条件所限,书中存在的疏漏和不妥之处,诚恳希望读者批评指正。

作 者

2010年12月于沈阳

# 目 录

## 第 1 章 绪论

1.1	材料在人类历史中的作用及发展趋势 .....	1
1.2	各种材料的特性 .....	2
1.3	材料的损伤与断裂 .....	4
1.4	断裂力学的发展与材料的强韧化 .....	8
1.5	本书的构成 .....	11
	参考文献 .....	11
	思考题 .....	12

## 第 2 章 材料的静载力学行为

2.1	材料的拉伸性能 .....	13
2.1.1	拉伸曲线和应力—应变曲线 .....	13
2.1.2	脆性材料的拉伸性能 .....	20
2.1.3	塑性材料的拉伸性能 .....	21
2.1.4	高分子材料的拉伸性能 .....	22
2.1.5	复合材料的拉伸性能 .....	26
2.2	材料在其他静载荷下的力学性能 .....	27
2.2.1	加载方式与应力状态图 .....	28
2.2.2	扭转 .....	30
2.2.3	弯曲 .....	33
2.2.4	压缩 .....	34
2.3	材料的弹性变形 .....	36
2.3.1	弹性变形的基本特点 .....	36
2.3.2	弹性变形的物理本质 .....	36
2.3.3	虎克定律 .....	37
2.3.4	弹性模量的意义 .....	39



2.3.5	弹性模量的影响因素	40
2.3.6	弹性比功	41
2.3.7	包辛格效应	41
2.3.8	弹性后效	42
2.3.9	弹性滞后环	42
2.4	材料的塑性变形	43
2.4.1	塑性变形的基本特点	44
2.4.2	塑性变形的物理过程	44
2.4.3	单晶体与多晶体材料塑性变形的特点	47
2.4.4	形变织构和各向异性	48
2.5	屈服	48
2.5.1	屈服现象及唯象理论	48
2.5.2	屈服强度及其影响因素	49
2.5.3	屈服判据	54
	参考文献	54
	思考题	54

## 第 3 章 断裂与断裂力学基础知识

3.1	材料的断裂	57
3.1.1	断裂的分类	57
3.1.2	断口的宏观特征	60
3.1.3	晶体的理论断裂强度	61
3.1.4	材料的实际断裂强度	62
3.1.5	脆性断裂机理	64
3.1.6	脆性断裂的微观特征	68
3.2	韧性断裂	69
3.2.1	韧性断裂机理	69
3.2.2	韧性断裂的微观特征	71
3.3	复合材料的断裂	72
3.3.1	纵向拉伸破坏	73
3.3.2	横向拉伸破坏	73
3.4	缺口与温度效应	74
3.4.1	缺口对应力分布的影响	74
3.4.2	缺口敏感性及其表示方法	75
3.4.3	缺口试样弯曲冲击及冲击韧性	76
3.4.4	材料的低温脆性现象	77
3.4.5	材料的韧脆转变温度及其影响因素	78
3.5	材料的断裂韧性	80
3.5.1	断裂韧性的基本概念	81

3.5.2	裂纹尖端附近的应力场 .....	85
3.5.3	裂纹尖端塑性区的大小及其修正 .....	86
3.5.4	裂纹扩展的能量释放率 $G_I$ .....	91
3.5.5	断裂韧性的影响因素 .....	92
3.5.6	平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的测试方法 .....	95
3.5.7	弹塑性状态的断裂韧性 .....	97
3.5.8	动态载荷与典型环境下的断裂韧性 .....	100
	参考文献 .....	101
	思考题 .....	102

## 第 4 章 材料的强化与韧化

4.1	金属及合金的强化与韧化 .....	105
4.1.1	均匀强化 .....	106
4.1.2	非均匀强化 .....	112
4.1.3	细晶强化与韧化 .....	117
4.1.4	形变强化 .....	120
4.1.5	第二相强化 .....	124
4.1.6	其他强化方法 .....	133
4.2	陶瓷材料的强化与韧化 .....	139
4.2.1	陶瓷材料的强度特点 .....	139
4.2.2	陶瓷材料的强化及方法 .....	140
4.2.3	陶瓷材料的韧化及方法 .....	141
4.2.4	影响陶瓷材料强度的主要因素 .....	142
4.2.5	影响陶瓷材料韧性的主要因素 .....	143
4.3	高分子材料的强化与韧化 .....	148
4.3.1	高分子材料的强度特点 .....	148
4.3.2	高分子材料的强化方法 .....	149
4.3.3	高分子材料的韧化方法 .....	150
4.4	复合材料的强化与韧化 .....	151
4.4.1	复合强化原理 .....	151
4.4.2	复合韧化原理与工艺 .....	152
4.5	材料强韧化过程的力学计算 .....	153
4.5.1	宏、细观平均化算法 .....	154
4.5.2	层状结构的细观模拟算法 .....	154
4.5.3	强度的统计算法 .....	155
4.5.4	宏、细、微观三层嵌套模型 .....	155
	参考文献 .....	156
	思考题 .....	156

## 第 5 章 材料的疲劳

5.1 疲劳现象 .....	158
5.1.1 变动载荷 .....	158
5.1.2 疲劳断裂的特点 .....	159
5.1.3 疲劳宏观断口 .....	159
5.2 金属疲劳断裂过程及其机理 .....	160
5.2.1 疲劳裂纹的萌生 .....	160
5.2.2 疲劳裂纹的扩展 .....	162
5.2.3 疲劳短裂纹 .....	163
5.2.4 疲劳裂纹扩展机制与疲劳断口微观特征 .....	166
5.3 疲劳裂纹扩展速率与门槛值 .....	167
5.4 疲劳强度指标 .....	172
5.4.1 $S-N$ 曲线与疲劳极限 .....	172
5.4.2 过载持久值与过载损伤界 .....	173
5.4.3 疲劳缺口敏感度 .....	174
5.5 影响疲劳性能的因素 .....	175
5.5.1 载荷因素 .....	175
5.5.2 表面状态 .....	175
5.5.3 组织因素 .....	175
5.6 低周疲劳 .....	176
5.6.1 低周疲劳及 $\Delta\epsilon-N$ 曲线 .....	176
5.6.2 循环硬化与循环软化 .....	177
5.7 其他材料的疲劳 .....	180
5.7.1 高分子材料疲劳特点 .....	180
5.7.2 陶瓷材料疲劳特点 .....	182
5.7.3 复合材料疲劳特点 .....	184
参考文献 .....	186
思考题 .....	188

## 第 6 章 材料的高温力学性能

6.1 材料的蠕变及高温力学性能 .....	191
6.1.1 材料的蠕变现象 .....	191
6.1.2 材料的高温力学性能指标 .....	194
6.2 蠕变变形、损伤与断裂的物理机制 .....	195
6.3 蠕变特性的描述与参数外推 .....	199
6.3.1 蠕变特性的描述 .....	199
6.3.2 蠕变性能的参数外推方法 .....	200

6.4	材料在高温下的韧性 .....	202
6.5	材料的应力松弛特性 .....	205
6.6	材料的高温疲劳性能 .....	207
6.6.1	高温疲劳的概念 .....	207
6.6.2	高温疲劳—蠕变的交互作用 .....	207
6.7	影响材料高温力学性能的因素 .....	211
6.7.1	材料的成分与制造工艺的影响 .....	211
6.7.2	材料使用环境的影响 .....	212
6.7.3	载荷性质的影响 .....	213
	参考文献 .....	213
	思考题 .....	214

## 第 7 章 材料的磨损

7.1	摩擦与磨损的基本概念 .....	218
7.1.1	摩擦及类型 .....	218
7.1.2	磨损及类型 .....	218
7.2	金属磨损机制及影响磨损抗力的因素 .....	219
7.2.1	磨料磨损 .....	219
7.2.2	粘着磨损 .....	222
7.2.3	疲劳磨损 .....	225
7.2.4	冲蚀磨损 .....	228
7.2.5	腐蚀磨损 .....	231
7.2.6	微动磨损 .....	232
7.3	金属材料磨损试验方法 .....	235
7.3.1	试验方法分类 .....	235
7.3.2	磨损试验机 .....	235
7.3.3	耐磨性及磨损率的测量方法 .....	237
7.4	非金属材料的磨损性能 .....	243
7.4.1	陶瓷材料的磨损及机理 .....	243
7.4.2	高分子材料的磨损及机理 .....	245
7.4.3	人工关节材料的磨损性能 .....	246
	参考文献 .....	248
	思考题 .....	249

## 第 8 章 材料强韧学的应用及其展望

8.1	三大材料强度与塑性的比较 .....	251
8.1.1	压头引起的表面变形 .....	252

8.1.2	表面变形的能量理论 .....	253
8.1.3	机械加工损伤抗力 .....	255
<b>8.2</b>	<b>三大材料断裂韧性的比较 .....</b>	<b>256</b>
8.2.1	三大材料的断裂特点及机制 .....	256
8.2.2	三大材料的韧性比较 .....	258
<b>8.3</b>	<b>材料强韧学与强韧化 .....</b>	<b>261</b>
8.3.1	材料设计 .....	261
8.3.2	显微组织控制 .....	264
8.3.3	纳米技术与晶界控制 .....	266
<b>8.4</b>	<b>材料强韧性评价与标准问题 .....</b>	<b>267</b>
	参考文献 .....	268
	思考题 .....	269

# 第 1 章

## 绪 论

(Introduction)

本章简述材料的作用与特性、损伤与断裂的概念、材料强韧化的学科基础。

### 1.1 材料在人类历史中的作用及发展趋势

(Development and the effect of materials in mankind's history)

人类历史进入 20 世纪 80 年代后,在国际材料界“先进材料”或者“尖端材料”的提法逐渐成为潮流。材料领域一改由金属材料占绝对统治地位的传统,各种各样的新材料层出不穷。人们开始寻求将自然界存在的物质经过加工,以某种形式加以利用,由此获得将物质变为材料的地位。伴随科学技术的飞速发展,对各种材料的要求日趋苛刻是不可避免的。然而,将诸如陶瓷、金属间化合物以及复合材料等真的推向实用绝非轻而易举之事。当然,亦有人认为以钢铁为代表的黑色金属材料,是强度与韧性兼备,且廉价的材料,对这种材料,恐怕也不能抱有过高的期待。

图 1-1 给出的是材料在人类历史长河中相对重要度的粗略变化过程。在公元前 2 000 年,人类仅仅以石器为切削工具。那时人类并没有使用金属,而是以树枝、动物皮毛等为主要材料。直到公元 1500 年,人类才开始学会使用青铜。到公元 1850 年前后开始使用钢材,直到那时才使得金属在材料中的重要程度显著增加,可以说这种重要程度在 20 世纪 60 年代达到了顶峰。但是,这种状况在 20 世纪 80 年代出现了变化,再次出现了以传统三大材料(金属、陶瓷、高分子)以及复合材料共存的格局。

图 1-2 给出的是材料市场的成熟度示意图。可见,传统金属材料已经趋于饱和,而高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及新的金属材料将在未来有较大的增幅。即使在金属材料领域,对轻量化、高强度化、高耐热性的要求愈来愈苛刻。尤其是近年,从考虑全球环境出发,环境友好材料(ecomaterials)愈来愈受注目。

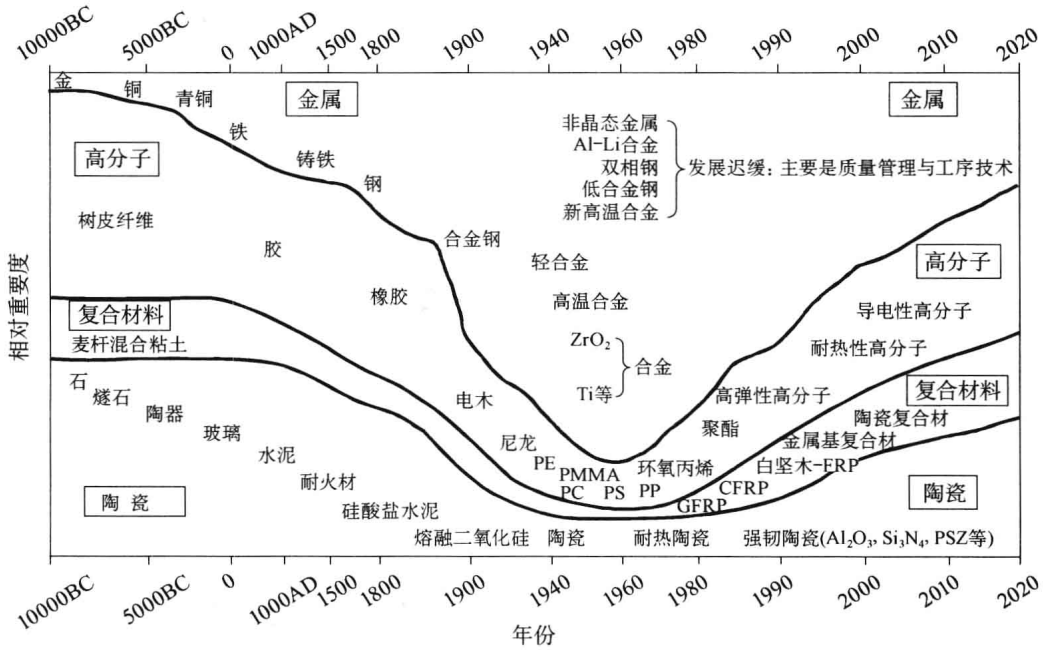


图 1-1 机械与建筑工业用材料的发展中各种材料的相对重要度变化示意图

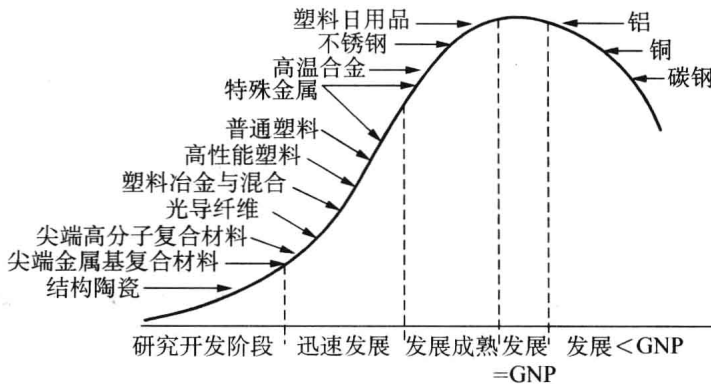


图 1-2 各种材料的成熟度与经济增长之间的关系

## 1.2 各种材料的特性

(Characteristics of various kinds of materials)

对于传统的三大材料,除材料组成上的区别外,更多的应该由其原子结合方式来加以区分。高分子材料主要以共价键(covalent bond)和范德华键/力(Van der Waals bond)相结合;陶瓷材料则以共价键和离子键(ionic bond)的方式相结合;金属材料则以金属键(metallic bond)构成(见图 1-3,在此,半导体材料分类没有明确)。一般说,离子键、共价键的结合能相对较大,而分子间的范德华结合能却很小。金属键的结合能与离子键和共价键的结合能大小相近,但由于其具有无方向性的结合特征,同时具有较大的配位数和密度,由此使金属呈现出优良的可加工特性。

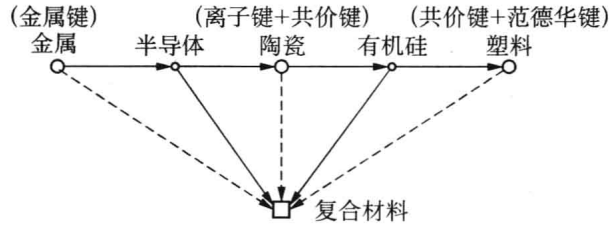


图 1-3 各类材料的相关关系

除复合材料外的三大传统材料的分类,原则上是依据原子的排列方式来区分的。如图 1-4 所示,金属原子尽最大可能致密充填其空间,如具有面心立方结构的金属,其原子按照 ABC、ABC……的次序有序地排列在空间。具有这样原子排列的晶胞结晶后构成一个晶粒,通常的金属材料大多都是由很多这样的结构在不同方向排列的晶粒所构成,称其为多晶结构(Polycrystal)。几乎所有的金属晶体,都可以通过最密排原子面上位错的容易运动特点,使金属材料呈现良好的延展特性。

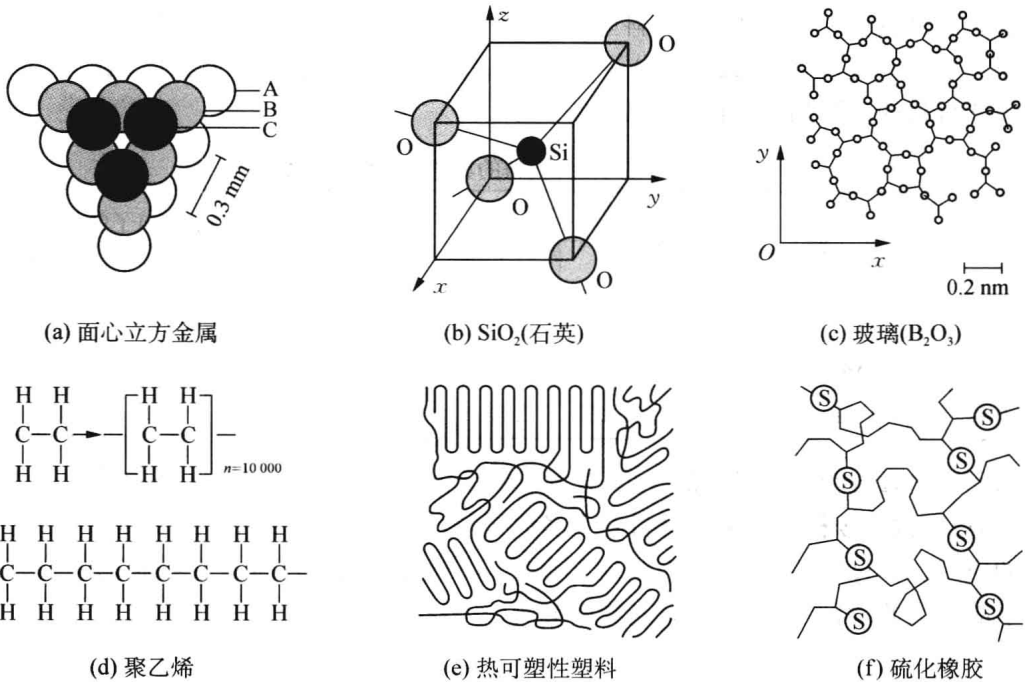


图 1-4 各类材料的原子与分子结构

陶瓷材料多为共价键与离子键共存的,其中氧化物陶瓷材料由金属与氧结合而成。如图 1-4(b)所示,二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )陶瓷中,Si 原子位于四面体的中心,各个顶角处则由 O 原子占据,这种排列形式在三维空间的规则重复构成了石英结构。陶瓷材料中原子未能像金属原子那样致密地充填,因此可以在空间排列成层网形式,但由熔融状态急冷后可以变成非晶结构,即转变成图 1-4(c)所示的石英玻璃。

以塑料为代表的高分子材料,归根结底是以 C 原子与 H、Cl、F、O、N 等原子组成的一个巨大分子链,其原子的充填密度非常有限。高分子的分子结构可以分为两种基本类型:第一种



是线型结构,具有这种结构的高分子化合物称为线型高分子化合物(如图 1-4(d)所示的为简单的聚乙烯),当然这样的线型链在范德华力的作用下,很容易形成具有非晶结构的弯折共存结构,如图 1-4(e)所示)。第二种是体型结构,具有这种结构的高分子化合物称为体型高分子化合物。此外,有些高分子是带有支链的,称为支链高分子,也属于线型结构范畴。有些高分子虽然分子链间有交联,但交联较少,这种结构称为网状结构,属体型结构范畴,如图 1-4(f)示意。

在线型结构(包括带有支链的)高分子物质中有独立的大分子存在,这类高聚物的溶剂中或在加热熔融状态下,大分子可以彼此分离开来。而在体形结构(分子链间大量交联的)的高分子物质中则没有独立的大分子存在,因而也没有相对分子质量的意义,只有交联度的意义。交联很少的网状结构高分子物质也可能以分离的大分子存在(犹如一张张“鱼网”仍可以分开一样)。

两种不同的结构,表现出相反的性能。线型结构(包括支链结构)高聚物由于有独立的分子存在,故具有弹性、可塑性,在溶剂中能溶解,加热能熔融,硬度和脆性较小的特点。体型结构高聚物由于没有独立大分子存在,故没有弹性和可塑性,不能溶解和熔融,只能溶胀,硬度和脆性较大。因此从结构上看,橡胶只能是线型结构或交联很少的网状结构的高分子,纤维也只能是线型的高分子,而塑料则两种结构的高分子都有。或许正是由于高分子材料中的原子填充密度很有限,致使高分子材料表现出不同于其他材料的特性。表 1-1 给出了三大传统材料的典型晶体结构与密度的数据。

表 1-1 三大传统材料的典型晶体结构与密度

材 料	实 例	晶格常数/ $\text{\AA}$			单位晶格中的 原子数	原子或离子的 填充比/%	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>			
金 属	$\alpha$ -Fe	2.87	—	—	Fe:2	67.8	7.87
陶 瓷	MgO	4.21	—	—	Mg:4, O:4	68.1	3.58
聚合物	PE	7.40	4.93	2.53	C:4, H:8	9.2	1.01

简而言之,即使在 21 世纪的今天,金属材料仍然未失去其强韧性兼备的综合优势地位。然而,不得不说当今称之为尖端材料的大多数材料,均由于其脆性而严重限制了它作为结构材料的应用。不过,回顾金属材料的应用历史,仍可发现发生过很多与材料的损伤、断裂相关的事。为此,将在 1.3 节中简述典型案例。

### 1.3 材料的损伤与断裂

(Damage and fracture of materials)

在汉语里有关材料的失效有多种称呼,为了不引起歧义,在此先就材料的损伤与断裂给予适当的解释。一般认为由于材料的显微缺陷或局部屈服导致的功能降低称为“损伤”(Damage),如果材料的功能丧失则称为“失效”(Failure),如材料发生全面屈服。将在材料中由于裂纹(Crack)形核、扩展导致的功能丧失称为“断裂”(Fracture),如果材料完全分开(如一分二)则常称为破断(Rupture)。

在过去发生的与金属材料相关的事里,最有名的应该属第二次世界大战中发生的全