

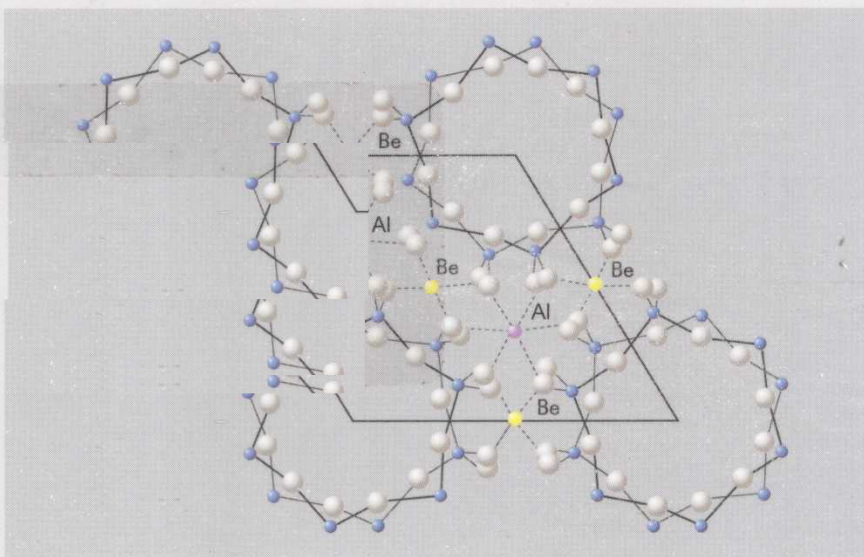
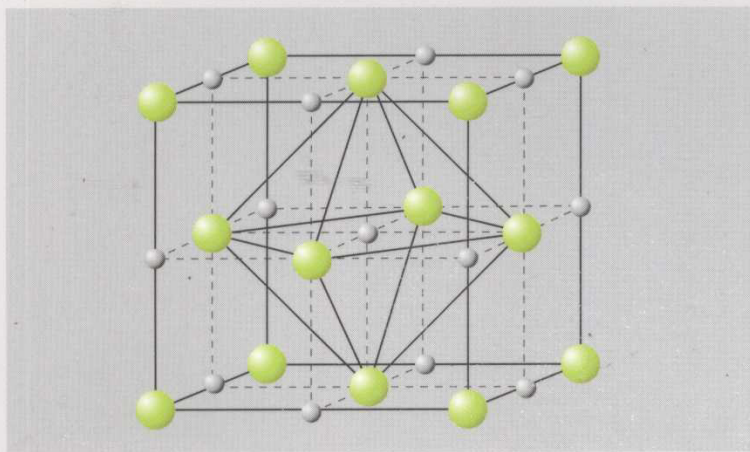


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料科学与工程学科教材系列

材料科学与工程基础

Fundamentals of Materials Science and Engineering



蔡珣 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家规划教材
材料科学与工程学科教材系列

材料科学与工程基础

Fundamentals of Materials Science and Engineering

蔡 珣 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家规划教材。本书应高等院校“材料科学与工程”学科改革而生,将材料科学和材料加工的基础理论融为一体。全书共分10章,主要包括原子结构与键合,固体结构,晶体缺陷,固态扩散,相图,材料的制取,固态相变,材料加工成形的传热过程,材料加工成形的流动现象与力学基础,以及材料的变形机理和回复、再结晶。

本书为大材料专业基础课程教材,涵盖了金属材料、陶瓷材料和高分子材料,将科学性、先进性和实用性相结合,提高学生解决材料工程实际问题的能力。本书更适合于按“材料科学与工程”一级学科进行人才培养和热加工材料专业的院校师生使用。也可以作为材料科学与工程研究人员与技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程基础/蔡珣编著. —上海:上海交通大学出版社,2010

(材料科学与工程学科教材系列)

ISBN 978-7-313-06526-1

I. ①材… II. ①蔡… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 097453 号

材料科学与工程基础

蔡 珣 编著

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

常熟市大宏印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:32.25 插页:2 字数:802千字

2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷

印数:1~5030

ISBN 978-7-313-06526-1/TB 定价:49.80元

版权所有 侵权必究

序

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。迄今,在美国几乎所有大学均已将冶金、陶瓷和高分子专业融合成材料专业,欧美和日本等一些高校也群相仿效。我国一些高校在文革后也陆续建立起材料系、院,现约达数十所之多。各高校对材料专业设置的课程体系不一,所用教材各具特色,但都包含材料科学基础和材料加工(锻、铸、焊、烧结成形等)基础。教育部设想大多学校应设“材料科学与工程基础”课程,并试组织编写教材,这一艰巨任务光荣地落到上海交通大学。蔡珣教授主讲材料科学基础多年,对教学工作刻苦钻研,已成为名师。他义无反顾,历经三载,材料科学部分在原有基础内容外,补充了固态相变等章节;同时,还撰写了有关材料的制取、传热过程、材料形变以及流体现象等,为材料加工提供基础章节,内容相当于美国麻省理工学院材料学院现行设置的“材料加工”(Materials Processing)一课的大致内容。很多学者对编写教材都有艰辛体会,他能全心投入、做出成果,实令人欣慰。当然,教材还需在教学过程中不断完善和改进。让我国材料专业的广大师生共同努力,以本教材为基础培植精良大著,不胜企望,故此为序。

蔡珣 2010年3月

前 言

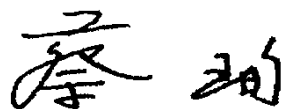
根据教育部提出拓宽专业口径,按专业大类进行人才培养的基本思路和 1997 年国务院学位办颁发的新专业目录,材料类的专业设置不再按传统分为金属材料、陶瓷材料和高分子材料。目前,国内很多工科高等院校材料类专业均按“材料科学与工程”一级学科进行人才培养,与国际上“材料科学与工程”学科接轨。为适应材料类专业的教学内容和课程体系改革的需要,近年来,尽管国内相继出版了不少有关“材料科学基础”、“材料加工原理”等教材,然融合有关材料科学和材料加工的基础理论为一体的专业基础课程教材却较少。由于材料科学与工程是一个整体,材料科学是研究材料的成分/组织结构、制备加工工艺与性能之间相互关系的科学,而材料加工工程则在材料科学指导下赋予材料一定的外形尺寸和表面状态,并可控制和决定材料变成产品后的内部组织和性能,这就是所谓材料加工的“控形、控性”。何况,材料本身的结构与性能对材料加工过程有十分重要的影响,如共晶成分的合金,由于熔点低,流动性好,最适合于铸造成形;塑性成形对固态材料的变形能力有较高的要求,陶瓷等硬脆性材料就不适宜于塑性加工,而常用烧结成形。反过来,铸造、塑性成形、焊接等材料加工过程对材料的结构与性能又有直接的,甚至是决定性的影响。因此,正如著名材料专家徐祖耀院士所说的“材料科学和材料加工工程两者是不可分的”。教育部为适应面向二十一世纪材料科学与工程学科的发展,从“材料科学与工程基础”一级学科人才培养出发,迫切需要相应的教材以解决教学之需,这就是编写“材料科学与工程基础”的出发点。

本书在广泛征求材料科学与工程专业师生的要求和意见的前提下,在多年“材料科学基础”的教学实践的基础上,参阅了国内外有关书籍、文献,经三年的努力撰写而成。它作为普通高等教育“十一五”国家规划教材,力图担负起拓宽专业口径、加强专业基础的特殊任务。“材料科学与工程基础”全书共分 10 章,主要包括以下四部分内容:①材料内部的微观结构;②材料成分、组织结构与性能之间的相互关系;③材料组织结构随化学成分、温度、载荷以及材料加工工艺变化的转变规律,并探讨在材料加工过程中改善材料组织与性能的途径和方法;④材料加工过程中的组织转变、温度场和应力场的变化以及缺陷的形成与控制,既包含了材料科学的主要基础理论知识,也包含了材料加工工程的主要基础理论知识。由于是大材料专业基础理论课程,本书编写时各部分内容特别注意尽量涵盖金属材料、陶瓷材料和高分子材料,突出材料共性化教学内容,着重于基本概念和基础理

论,通常不涉及到具体的工艺方法,力求科学性、先进性和实用性的结合,以提高学生解决材料工程的实际问题的能力。

需要说明的是该书第1、2、3和10章的内容与原上海交通大学出版社出版的《材料科学基础》的第1、2、3和5章的基本相同,仅作部分修改,故从某种程度上说,它是原《材料科学基础》的修订、扩展版。在本书的编写和修改过程中,得到了徐祖耀院士、胡赓祥教授和戎咏华教授的大力帮助和支持,特别是徐祖耀院士在百忙中拨冗认真审阅了第7章固态相变,并提出了许多宝贵的意见和建议,获益匪浅,最后徐院士还亲自为本书写了序言。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

将材料科学与工程的有关基础理论知识融合在一起,本书的编写是新的尝试过程,由于水平有限,经验不足,必然存在不少缺点和错误,敬请读者批评、指正!



2010年6月

目 录

第 1 章 原子结构与键合	1
1.1 原子结构	1
1.1.1 物质的组成	1
1.1.2 原子的结构	1
1.1.3 原子的电子结构	2
1.1.4 元素周期表	3
1.2 原子间的键合	4
1.2.1 金属键	4
1.2.2 离子键	5
1.2.3 共价键	5
1.2.4 范德华力	6
1.2.5 氢键	7
1.3 高分子链	8
1.3.1 高分子链的近程结构	8
1.3.2 高分子链的远程结构	14
中英文主题词对照	19
主要参考书目	20
第 2 章 固体结构	21
2.1 晶体学基础	21
2.1.1 空间点阵和晶胞	21
2.1.2 晶向指数和晶面指数	25
2.1.3 晶体的对称性	29
2.1.4 极射投影	33
2.1.5 倒易点阵	36
2.2 金属的晶体结构	37
2.2.1 三种典型的金属晶体结构	37
2.2.2 晶体的原子堆垛方式和间隙	41
2.2.3 多晶型性	43
2.3 合金相结构	43
2.3.1 固溶体	44
2.3.2 中间相	49
2.4 离子晶体结构	58

2.4.1	离子晶体的结构规则	59
2.4.2	典型的离子晶体结构	61
2.4.3	硅酸盐的晶体结构	66
2.5	共价晶体结构	70
2.6	聚合物的晶态结构	72
2.6.1	聚合物的晶体形态	72
2.6.2	聚合物晶态结构的模型	74
2.6.3	聚合物晶体的晶胞结构	75
2.7	准晶态结构	78
2.7.1	一维准晶	80
2.7.2	二维准晶	80
2.7.3	二十面体准晶	81
2.8	液晶态结构	81
2.8.1	近晶型结构	82
2.8.2	向列型结构	82
2.8.3	胆甾型结构	82
2.8.4	柱状型结构	83
2.9	非晶态结构	83
	中英文主题词对照	87
	主要参考书目	88
第3章	晶体缺陷	90
3.1	点缺陷	90
3.1.1	点缺陷的形成	90
3.1.2	点缺陷的平衡浓度	92
3.1.3	点缺陷的运动	93
3.2	位错	94
3.2.1	位错的基本类型和特征	94
3.2.2	伯氏矢量	97
3.2.3	位错的运动	101
3.2.4	位错的弹性性质	106
3.2.5	位错的生成和增殖	114
3.2.6	实际晶体结构中的位错	116
3.3	表面及界面	128
3.3.1	外表面	128
3.3.2	晶界和亚晶界	129
3.3.3	孪晶界	135
3.3.4	相界	135
	中英文主题词对照	138

主要参考书目	139
第 4 章 固态扩散	140
4.1 扩散的基本定律	140
4.1.1 菲克第一定律	140
4.1.2 菲克第二定律	141
4.1.3 扩散方程的解	142
4.2 扩散的微观理论	150
4.2.1 随机行走与扩散	150
4.2.2 原子的跳跃和扩散系数	151
4.3 扩散机制	154
4.3.1 交换机制	154
4.3.2 间隙机制	155
4.3.3 空位机制与柯肯达尔效应	155
4.3.4 晶界扩散及表面扩散	157
4.3.5 位错扩散	157
4.4 扩散的驱动力与上坡扩散	158
4.5 反应扩散	160
4.6 影响扩散的因素	161
4.6.1 温度	161
4.6.2 压力	161
4.6.3 化学成分	162
4.6.4 材料的结构	163
4.6.5 晶体的缺陷	164
4.6.6 应力的作用	164
4.7 离子晶体中的扩散	165
4.8 高分子材料中的扩散	167
中英文主题词对照	170
主要参考书目	171
第 5 章 相图	172
5.1 相图的热力学基础	172
5.1.1 吉布斯自由能与成分的关系	172
5.1.2 相平衡的公切线法则	174
5.1.3 相图的几何热力学作图法	175
5.2 相图的基本知识	177
5.2.1 相图的建立	177
5.2.2 相律	178
5.2.3 杠杆定律	179

5.2.4	相图的类型和结构	179
5.3	单元相图	180
5.4	二元相图	183
5.4.1	二元匀晶相图	183
5.4.2	二元共晶相图	187
5.4.3	二元包晶相图	192
5.4.4	复杂二元相图的分析方法	194
5.4.5	Fe-C 相图分析	196
5.4.6	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 相图分析	203
5.5	三元相图	206
5.5.1	三元相图的基础	206
5.5.2	固态有限互溶的三元共晶相图	212
5.5.3	包共晶型三元系相图	216
5.5.4	具有四相平衡包晶转变的三元系相图	218
5.5.5	三元相图实例	220
5.5.6	三元相图小结	225
5.6	相图计算	230
	中英文主题词对照	232
	主要参考书目	233
第 6 章	材料的制取	235
6.1	凝固	235
6.1.1	凝固的热力学条件	235
6.1.2	形核	236
6.1.3	晶体长大	242
6.1.4	结晶动力学及生长形态	245
6.1.5	凝固后的晶粒大小	248
6.1.6	合金的凝固	251
6.1.7	铸锭宏观组织与缺陷	257
6.2	烧结	261
6.2.1	烧结驱动力	262
6.2.2	烧结时的物质传递	263
6.2.3	烧结技术	265
6.2.4	影响烧结的因素	268
6.3	高分子材料的合成	270
6.3.1	聚合反应的类别	270
6.3.2	聚合反应的基本原理与特征	272
6.3.3	聚合方法	276
6.4	气相沉积	281

6.4.1	平衡蒸气压	282
6.4.2	蒸发粒子(分子、原子)的平均自由程与碰撞几率	284
6.4.3	气体放电和低温等离子体	285
6.4.4	表面扩散	294
6.4.5	薄膜形核与生长	297
	中英文主题词对照	301
	主要参考书目	302
第7章	固态相变	304
7.1	固态相变的特点	304
7.2	固态相变的分类	305
7.3	固态相变热力学	308
7.3.1	相变的驱动力	308
7.3.2	新相的形核	309
7.3.3	新相的长大	312
7.4	固态相变动力学	314
7.4.1	固态相变动力学方程和曲线	314
7.4.2	钢加热时奥氏体形成动力学	316
7.4.3	过冷奥氏体等温转变动力学	319
7.4.4	过冷奥氏体连续冷却转变动力学	322
7.5	扩散型相变	324
7.5.1	脱溶分解	324
7.5.2	调幅分解	330
7.5.3	共析转变	331
7.6	马氏体转变	333
7.6.1	马氏体的组织、结构和性能	334
7.6.2	马氏体的转变特点	338
7.6.3	马氏体的回火转变	344
7.7	贝氏体转变	351
7.7.1	贝氏体的组织形态和性能	351
7.7.2	贝氏体转变的特点	353
	中英文主题词对照	358
	主要参考书目	359
第8章	材料加工成形的传热过程	361
8.1	液态成形的传热	361
8.1.1	液态成形的传热特点	361
8.1.2	液态成形的热效率	362
8.1.3	液态成形的温度场	363

8.2	塑性成形的传热	365
8.2.1	塑性成形的传热特点	365
8.2.2	塑性成形加热过程的热效率	368
8.2.3	塑性成形的温度场	369
8.3	焊接过程的传热	370
8.3.1	焊接过程的传热特点	370
8.3.2	焊接加热过程的热效率	371
8.3.3	焊接过程的温度场	372
8.3.4	焊接的热循环	380
8.4	热加工的化学冶金现象	385
8.4.1	焊接过程中的化学冶金特点	385
8.4.2	焊接化学冶金反应区	386
8.4.3	气体与液态金属的反应	388
8.4.4	熔渣与液态金属的反应	392
	中英文主题词对照	396
	主要参考书目	397
第9章	材料加工成形的流动现象与力学基础	398
9.1	熔融液体的流动性	398
9.1.1	熔融液体的水力学特性	398
9.1.2	熔融液体的流动性	399
9.2	熔融液体的充型能力	404
9.2.1	熔融液体充型能力的计算	404
9.2.2	影响充型能力的因素	405
9.3	材料的流变行为	406
9.3.1	材料流变的有关概念和模型	406
9.3.2	材料流变的本构方程	408
9.3.3	材料的流变性能	410
9.3.4	材料的半固态加工	412
9.4	材料加工变形的力学基础	414
9.4.1	应力状态分析	414
9.4.2	应变状态分析	421
9.4.3	屈服准则	426
9.4.4	塑性变形时应力-应变关系(本构方程)	429
	中英文主题词对照	433
	主要参考书目	433
第10章	材料的变形机理和回复、再结晶	435
10.1	弹性和黏弹性	435

10.1.1	弹性变形的本质	435
10.1.2	弹性变形的特征和弹性模量	436
10.1.3	弹性的不完整性	438
10.1.4	黏弹性	439
10.2	晶体的塑性变形	440
10.2.1	单晶体的塑性变形	440
10.2.2	多晶体的塑性变形	451
10.2.3	合金的塑性变形	453
10.2.4	塑性变形对材料组织与性能的影响	459
10.3	回复和再结晶	464
10.3.1	冷变形金属在加热时的组织与性能变化	464
10.3.2	回复	466
10.3.3	再结晶	468
10.3.4	晶粒长大	475
10.3.5	再结晶退火后的组织	478
10.4	热变形与动态回复、再结晶	481
10.4.1	动态回复与动态再结晶	482
10.4.2	热加工对组织性能的影响	484
10.4.3	蠕变	485
10.4.4	超塑性	487
10.5	陶瓷材料的变形特点	489
10.6	高聚物的变形特点	491
	中英文主题词对照	494
	主要参考书目	495

元素周期表

Contents

Preface

Chapter 1	Atomic structure and interatomic Bonding	1
1.1	Atomic structure	1
1.1.1	Substance construction	1
1.1.2	Structure of atoms	1
1.1.3	Electronic structure of atoms	2
1.1.4	The Periodic Table	3
1.2	Interatomic bonding	4
1.2.1	Metallic bonding	4
1.2.2	Ionic bonding	5
1.2.3	Covalent bonding	5
1.2.4	Van der Waals bonding	6
1.2.5	Hydrogen bonding	7
1.3	Polymer chain structure	8
1.3.1	Short-range structure of polymer chains	8
1.3.2	Long-range structure of polymer chains	14
	Key words	19
	References	20
Chapter 2	Structure of solids	21
2.1	Fundamentals of crystallography	21
2.1.1	Space lattice and unit cells	21
2.1.2	Miller indices for directions and planes	25
2.1.3	Crystal symmetry	29
2.1.4	Polar projection	33
2.1.5	Reciprocal lattice	36
2.2	Metallic crystal structures	37
2.2.1	Three typical metallic crystal structures	37
2.2.2	Close-packed crystal structures and interstitial sites	41
2.2.3	Polymorphism	43
2.3	Phase structure of alloys	43
2.3.1	Solid solutions	44
2.3.2	Intermediate phases	49

2.4	Ionic crystal structures	58
2.4.1	Pauling's rule of ionic crystals	59
2.4.2	Typical ionic crystal structures	61
2.4.3	Silicate structures	66
2.5	Covalent crystal structures	70
2.6	Polymer crystals	72
2.6.1	Crystal morphology of Polymer	72
2.6.2	Structure model of polymer crystals	74
2.6.3	Unit cells of polymer crystals	75
2.7	Structure of the quasi-crystalline state	78
2.7.1	One-dimensional quasicrystal	80
2.7.2	Two-dimensional quasicrystal	80
2.7.3	Icosahedral quasicrystal	81
2.8	Structure of the liquid-crystalline state	81
2.8.1	Smactic phase structure	82
2.8.2	Nematic phase structure	82
2.8.3	Cholesteric phase structure	82
2.8.4	Columnar phase structure	83
2.9	Structure of the noncrystalline state	83
	Key words	87
	References	88
Chapter 3	Crystal defects	90
3.1	Point defects	90
3.1.1	Formation of point defects	90
3.1.2	Equilibrium concentration of point defects	92
3.1.3	Movements of point defects	93
3.2	Dislocations	94
3.2.1	Basic types and characteristics of dislocations	94
3.2.2	Burgers vector	97
3.2.3	Movements of dislocations	101
3.2.4	Elastic properties of dislocations	106
3.2.5	Formation and proliferation of dislocations	114
3.2.6	Dislocations in real crystals	116
3.3	Surface and interface	128
3.3.1	Outer surface	128
3.3.2	Grain boundaries and sub-grain boundaries	129
3.3.3	Twin boundaries	135
3.3.4	Phase boundaries	135

Key words	138
References	139
Chapter 4 Solid-state diffusion	140
4.1 Fundamental diffusion laws	140
4.1.1 Fick's first law	140
4.1.2 Fick's second law	141
4.1.3 Solutions to diffusion equations	142
4.2 Microscopic theory of diffusion	150
4.2.1 Random walk and diffusion	150
4.2.2 Atom jumping and diffusion coefficient	151
4.3 Diffusion mechanisms	154
4.3.1 Exchange mechanism	154
4.3.2 Interstitial mechanism	155
4.3.3 Vacancy diffusion mechanism and Kirkendall effect	155
4.3.4 Grain boundary diffusion and surface diffusion	157
4.3.5 Dislocation pipe diffusion	157
4.4 Driving force of diffusion and up-hill diffusion	158
4.5 Reaction diffusion	160
4.6 Factors affecting diffusion	161
4.6.1 Temperature	161
4.6.2 Pressure	161
4.6.3 Chemical composition	162
4.6.4 Structures of materials	163
4.6.5 Crystal defects	164
4.6.6 Stress effect	164
4.7 Diffusion in ionic crystals	165
4.8 Diffusion in polymer	167
Key words	170
References	171
Chapter 5 Phase diagrams	172
5.1 Fundamentals of thermodynamics of phase diagrams	172
5.1.1 Relationship between Gibbs free energy and the composition	172
5.1.2 Common tangent principle of multiphase equilibrium	174
5.1.3 Geometric construction of phase diagrams	175
5.2 Fundamental concepts of phase diagrams	177
5.2.1 Building up the phase diagrams	177
5.2.2 Phase rule	178

5.2.3	Lever rule	179
5.2.4	Classification and construction of phase diagrams	179
5.3	Phase diagrams of one-component systems	180
5.4	Binary equilibrium phase diagrams	183
5.4.1	Isomorphous binary phase diagrams	183
5.4.2	Eutectic binary phase diagrams	187
5.4.3	Peritectic binary phase diagrams	192
5.4.4	Analytical method of complicated binary phase diagrams	194
5.4.5	Analysis of the iron-carbon phase diagram	196
5.4.6	Analysis of the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase diagram	203
5.5	Ternary phase diagrams	206
5.5.1	Fundamentals of ternary phase diagrams	206
5.5.2	Ternary eutectic phase diagrams for limited solid solubility	212
5.5.3	Ternary eutectic-peritectic phase diagrams	216
5.5.4	Ternary peritectic phase diagrams containing four-phase equilibrium reactions	218
5.5.5	Example of ternary phase diagrams	220
5.5.6	Summary of ternary phase diagrams	225
5.6	Phase diagram calculation	230
	Key words	232
	References	233
Chapter 6	Materials preparation	235
6.1	Solidification	235
6.1.1	Thermodynamic conditions of solidification	235
6.1.2	Nucleation	236
6.1.3	Crystal growth	242
6.1.4	Crystallization kinetics and growth morphology	245
6.1.5	Grain size after the solidification	248
6.1.6	Solidification of alloys	251
6.1.7	Ingot macro-structures and defects	257
6.2	Sintering	261
6.2.1	Driving force of sintering	262
6.2.2	The mass transport during the sintering	263
6.2.3	The sintering technique	265
6.2.4	Factors affecting sintering	268
6.3	Syntheses of polymers	270
6.3.1	Classification of the polymerization	270
6.3.2	Basic principles and characteristics of the polymerization	272