

# 功能材料学

## 概论

马如璋 蒋民华 徐祖雄 主编

Gongnengcailiaoxue  
Gailun

冶金工业出版社

# 功能材料学概论

马如璋 蒋民华 徐祖雄 主编

北 京  
冶金工业出版社  
1999

## 内 容 简 介

本书是由材料领域各分支有关专家集体编写而成的学术专著,内容包括金属的、陶瓷的、有机的和复合的功能材料,此外还涉及若干新型或特殊功能材料,如功能晶体和玻璃材料、电子材料、半导体材料、超导体材料、减振材料、形状记忆材料、非晶材料、纳米材料、生物医学材料、智能材料等等。本书着重阐明材料的功能原理,兼顾特殊的工艺、典型品种及其应用,并有图表简洁地介绍了若干重要资料。本书的特点在于把功能材料作为一门科学分支阐述,论述严谨,系统性强,反映了“功能材料学”的最新面貌,是使用“功能材料学”作为书名的第一批书籍之一。

本书适于材料、机械、信息工程、汽车制造、电子及自动化、生物医学材料、航空航天、冶金、智能公路、固体物理和化学等领域的学者、工程师、研究生和本科生阅读,特别是对于与“大材料科学”有关的教师、工程技术人员有重要的参考应用价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

功能材料学概论/马如璋等编著. —北京:冶金工业出版社,1999.9

ISBN 7-5024-2299-4

I. 功… II. 马… III. 工程材料,功能性 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 38299 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王雪涛 美术编辑 熊晓梅 责任校对 刘倩 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 9 月第 1 版,1999 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;38.25 印张;926 千字;592 页;1-2500 册

72.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 前 言

20世纪80年代我国开始引入高技术一词,1986年初制定的《高技术研究发展计划纲要》评选列入的新材料技术中,新的功能材料占据重要地位。随着高技术的进展,一些具有特殊功能的材料,如新型电子材料、光学材料、磁性材料、智能材料、隐身材料、能源材料和生物材料等日益受到重视并快速发展,成为新材料的研究开发重点。不少人在不少地方提到过功能材料,但还没有提出“功能材料学”的论点。我们觉得,把功能材料作为高技术的一个分支来较深入地阐述,提出“功能材料学”是学科发展的必然趋势,具有很高的学术意义和应用价值。

“功能材料学”作为一门学科尚在形成过程之中。提出“功能材料学”,除了基于“功能材料”的快速发展和日益受到重视外,还基于这一领域的学者日益自觉或不自觉地认识到它是多学科、多种新技术和新工艺交叉融合的产物。例如,智能材料就被认为是多种学科和技术(纳米技术、生物技术、信息技术、神经网络学、微致动器技术、光子学、物理学、化学、仿生学等等)的集成化和融合化的结果。近年来,有关新材料特别是新功能材料的书籍频频出版,说明功能材料学作为专著编撰出版是很有必要的。

我国过去专业教育面窄。为了适应知识经济的发展和科学技术发展中的各学科的融合穿插,拓宽并提高科技人员、大学生和研究生的知识面是十分必要的。为此,作者编撰了《功能材料学概论》,它是包容金属、无机非金属、有机、复合等多种类型功能性材料的学术专著。本书所包含的功能材料从化学键性质来说涵盖了:金属的、无机非金属的、有机高分子的、多种复合的等。另外,对具有特种结构的新兴功能材料如纳米材料、智能材料、生物医学材料等特殊功能材料也做了介绍。全书分为6篇24章,邀请了有关专家撰写,各章包括功能原理、主要性能参数、典型品种、应用和展望等几部分内容。本书是“大材料学科”方面的新著作,适于广大的科技工作者、大学本科生及研究生阅读。

本书各章的作者为:马如璋(绪论、第23章),平爵云、马如璋(第1章),周寿增、高学绪(第2章),李阳、王耘波(第3章),张正义(第4章),殷声(第5章),邵宗书(第6章),马纪东、马如璋(第7章),张秋禹(第8、9、10章),蒋民华、王继扬、邵宗书(第11章),王继扬、蒋民华、邵宗书(第12章),蒋民华、王继扬、邵宗书(第13章),王继扬、邵宗书、蒋民华(第14、15章),肖耀福(第16章),徐祖雄(第17章),刘涛、徐祖雄(第18章),陈洪、徐祖雄(第19章),王燕斌(第20章),吴杏芳(第21章),马如璋、鲁燕霞(第22章),孙福玉(第24章)。

有关功能材料学图书的编撰本书可说是首次尝试,故难免存在这样那样的问题和缺点,尚望读者和有关专家提出宝贵意见,以便今后修改提高。

马如璋、蒋民华、徐祖雄

1998年11月

0802/19

## 目 录

绪论	1
参考文献	6

### 第 1 篇 功能金属材料

<b>1 电性材料</b>	9
1.1 金属的电导理论	9
1.1.1 固体中的电子	9
1.1.2 金属中的电子输运	14
1.1.3 霍耳效应	16
1.2 金属的热电性	17
1.3 电学性能与微观结构之间的关系	19
1.3.1 纯金属的电阻	20
1.3.2 固溶体的电阻	22
1.3.3 金属间化合物、中间相及多相合金的电阻率	26
1.4 一些电性材料	27
1.4.1 导电材料	27
1.4.2 电阻材料	27
1.4.3 电热材料	28
1.4.4 热电材料	29
1.5 广义“金属”电性材料的某些进展	30
1.5.1 超高纯铜(UHPC)的生产和应用	31
1.5.2 高电导率高机械强度合金	31
1.5.3 用于电子设备的金属碳化物、氮化物和硼化物	33
1.5.4 导电性 $\text{MoSi}_2$ 的开发和应用	34
1.5.5 光透明导电膜材料	34
1.5.6 磁场引起的电导率变化及 CMR 材料的应用	36
1.6 结束语	37
参考文献	37
<b>2 磁性材料</b>	39
2.1 铁磁性理论基础	39
2.1.1 磁学量定义与单位	39
2.1.2 原子磁性	41
2.1.3 自发磁化理论要点	41
2.1.4 铁磁体中的磁自由能与磁畴结构	45
2.1.5 技术磁化与反磁化过程	49
2.1.6 磁性材料的技术磁参量	52

2.2	金属软磁材料	58
2.2.1	电工纯铁和低碳电工钢	58
2.2.2	Fe-Si 软磁合金(简称硅钢或电工钢)	59
2.2.3	Ni-Fe 系软磁合金	63
2.2.4	Fe-Al 系和 Fe-Co 系软磁合金	65
2.3	金属永磁材料	66
2.3.1	马氏体磁钢	67
2.3.2	$\alpha/\gamma$ 相变的铁基永磁材料	67
2.3.3	铁镍铝和铝镍钴系铸造永磁合金	68
2.3.4	Fe-Cr-Co 可加工永磁合金	71
2.3.5	Mn 基和 Pt 基永磁合金	72
2.3.6	钴基稀土永磁合金	72
2.3.7	铁基稀土永磁合金(Nd-Fe-B 系永磁合金)	75
2.4	磁致伸缩材料	80
2.4.1	概述	80
2.4.2	稀土超磁致伸缩材料的发展及其晶体结构与内禀特性	81
2.4.3	Tb-Dy-Fe 合金的制造方法和晶体生长	83
2.4.4	磁畴结构、技术磁化与磁致伸缩曲线	84
2.4.5	Tb-Dy-Fe 合金成分、组织、工艺与性能的关系	85
2.5	铁氧体磁性材料	86
2.5.1	引言	86
2.5.2	铁氧体的晶体结构和内禀磁特性	87
2.5.3	铁氧体磁性材料的制造工艺	89
2.5.4	硬磁铁氧体材料	89
2.5.5	软磁铁氧体材料	90
2.6	磁学中常用的单位制及其物理量数值的换算	91
2.6.1	SI 制单位与 CGS 制单位的公式	91
2.6.2	磁学量在国际单位制(SI)和绝对电磁单位制(CGS-e. m. u)间的换算	92
	参考文献	93
3	超导材料	95
3.1	超导体的基本性质	95
3.1.1	超导电性的发现	95
3.1.2	超导体的基本物理性质	95
3.1.3	传统超导体的超导电性理论	96
3.2	两类超导体的基本特征	100
3.3	超导隧道效应	102
3.3.1	正常电子隧道效应	102
3.3.2	约瑟夫森隧道电流效应	103
3.4	超导材料的发展	103
3.4.1	常规超导体	104
3.4.2	高温超导体	106

3.4.3 其他类型的超导材料 .....	113
3.5 超导材料的应用 .....	114
3.5.1 低温超导材料的应用 .....	115
3.5.2 高温超导体的应用及进展 .....	116
参考文献 .....	118
<b>4 膨胀材料和弹性材料 .....</b>	<b>120</b>
4.1 膨胀合金 .....	120
4.1.1 金属与合金的热膨胀特性 .....	120
4.1.2 低膨胀合金 .....	122
4.1.3 定膨胀合金 .....	124
4.1.4 热双金属 .....	130
4.2 弹性合金 .....	133
4.2.1 金属与合金的弹性 .....	133
4.2.2 高弹性合金 .....	136
4.2.3 恒弹性合金 .....	139
<b>第 2 篇 功能无机非金属材料</b>	
<b>5 功能陶瓷 .....</b>	<b>147</b>
5.1 概述 .....	147
5.2 绝缘陶瓷 .....	148
5.2.1 绝缘性 .....	148
5.2.2 绝缘陶瓷的分类和性质 .....	149
5.2.3 普通电瓷 .....	150
5.2.4 氧化铝瓷 .....	151
5.2.5 镁质瓷 .....	152
5.2.6 基片材料和高导热陶瓷 .....	154
5.3 介电、铁电陶瓷 .....	155
5.3.1 介电性质 .....	155
5.3.2 高频介质瓷 .....	157
5.3.3 微波介质瓷 .....	158
5.3.4 多层电容器陶瓷 .....	159
5.3.5 半导体电容器陶瓷 .....	161
5.3.6 铁电陶瓷 .....	162
5.3.7 反铁电陶瓷 .....	164
5.4 压电、热释电陶瓷 .....	164
5.4.1 压电性、热释电性 .....	164
5.4.2 压电陶瓷材料 .....	166
5.4.3 热释电陶瓷 .....	170
5.5 热敏陶瓷 .....	171
5.5.1 概述 .....	171

5.5.2	PTC 热敏电阻陶瓷 .....	172
5.5.3	NTC 热敏电阻陶瓷 .....	173
5.5.4	临界温度电阻陶瓷 .....	174
5.6	压敏陶瓷 .....	175
5.6.1	概述 .....	175
5.6.2	氧化锌压敏陶瓷 .....	176
5.6.3	压敏 ZnO 半导体陶瓷的导电机制 .....	177
5.7	气敏陶瓷 .....	178
5.7.1	概述 .....	178
5.7.2	氧化锡系陶瓷 .....	180
5.7.3	氧化锌系陶瓷 .....	181
5.7.4	氧化铁系陶瓷 .....	181
5.7.5	氧化钛系陶瓷 .....	182
5.8	湿敏陶瓷 .....	182
5.8.1	概述 .....	182
5.8.2	湿敏陶瓷材料 .....	183
5.8.3	湿敏机制 .....	185
5.9	导电陶瓷 .....	186
5.9.1	陶瓷的导电性 .....	186
5.9.2	快离子导体 .....	187
5.9.3	电热、电极陶瓷 .....	188
5.10	多功能化和智能化 .....	188
5.10.1	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -TiO <sub>2</sub> 气湿敏陶瓷 .....	189
5.10.2	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -MgO 温湿敏陶瓷 .....	189
5.10.3	BaTiO <sub>3</sub> -SrTiO <sub>3</sub> 温湿敏陶瓷 .....	190
5.10.4	集成化多功能敏感陶瓷 .....	191
5.10.5	智能化气体传感器 .....	191
5.10.6	有源可调柔顺性装置 .....	191
	参考文献 .....	191
<b>6</b>	<b>功能玻璃材料 .....</b>	<b>194</b>
6.1	光学玻璃材料 .....	195
6.1.1	无色光学玻璃 .....	196
6.1.2	滤色玻璃 .....	199
6.1.3	耐辐照玻璃 .....	200
6.1.4	光色玻璃 .....	200
6.2	电介质玻璃材料 .....	201
6.2.1	电容器玻璃 .....	201
6.2.2	半导体玻璃 .....	202
6.2.3	超离子导体玻璃 .....	205
6.3	光电子功能玻璃材料 .....	205

6.3.1 激光玻璃 .....	205
6.3.2 声光玻璃 .....	209
6.3.3 磁光玻璃 .....	210
6.3.4 玻璃光纤材料 .....	214
参考文献 .....	219
<b>7 半导体材料 .....</b>	<b>220</b>
7.1 引言 .....	220
7.1.1 物质的导电性和半导体材料 .....	220
7.1.2 半导体材料的分类 .....	220
7.2 半导体材料的结构与键合 .....	222
7.2.1 金刚石结构 .....	222
7.2.2 闪锌矿和纤锌矿结构 .....	224
7.2.3 氯化钠结构 .....	226
7.2.4 四面体共价键与轨道杂化 .....	226
7.3 半导体材料的物理基础 .....	228
7.3.1 导电特性 .....	228
7.3.2 能带结构 .....	228
7.3.3 载流子的散射与迁移率 .....	231
7.3.4 非平衡载流子 .....	233
7.3.5 p-n 结 .....	235
7.3.6 半导体表面和界面 .....	239
7.3.7 异质结和超晶格 .....	241
7.3.8 半导体的光、热、电、磁性质 .....	244
7.4 半导体材料中的杂质 .....	247
7.4.1 杂质的种类 .....	247
7.4.2 杂质对半导体材料电学性能的影响 .....	249
7.5 半导体中的缺陷 .....	250
7.5.1 点缺陷 .....	250
7.5.2 位错 .....	250
7.5.3 堆垛层错 .....	251
7.5.4 化合物半导体中的缺陷 .....	252
7.6 典型半导体材料及应用 .....	252
7.6.1 硅材料 .....	252
7.6.2 锗材料 .....	255
7.6.3 砷化镓材料 .....	256
7.6.4 镓砷磷材料 .....	256
7.6.5 薄膜半导体材料 .....	256
7.6.6 非晶半导体和非晶超晶格材料 .....	257
7.7 结束语 .....	260
参考文献 .....	261

## 第 3 篇 功能高分子材料

<b>8 光功能高分子材料</b> .....	265
8.1 感光性高分子材料 .....	265
8.1.1 光化学反应过程 .....	265
8.1.2 感光性高分子分类 .....	267
8.1.3 重要的感光性高分子 .....	267
8.2 光致变色高分子材料 .....	277
8.2.1 光致变色高分子材料的定义和分类 .....	277
8.2.2 光致变色高分子的变色机理 .....	279
8.2.3 光致变色高分子材料的应用 .....	280
8.3 塑料光导纤维 .....	281
8.3.1 概述 .....	281
8.3.2 塑料光纤材料的组成及其制备 .....	281
8.3.3 塑料光纤的性能 .....	282
参考文献 .....	285
<b>9 电功能高分子材料</b> .....	286
9.1 导电高分子材料 .....	286
9.1.1 概述 .....	286
9.1.2 复合型导电高分子材料 .....	286
9.1.3 结构型导电高分子 .....	289
9.2 光电导高分子材料 .....	295
9.2.1 概述 .....	295
9.2.2 光电导机理 .....	295
9.2.3 典型的高分子光电导体 .....	297
9.2.4 光电导高分子的应用 .....	298
9.3 高分子压电材料 .....	299
9.3.1 概述 .....	299
9.3.2 高分子压电材料 .....	299
9.3.3 应用 .....	302
9.4 高分子超导体 .....	302
9.5 结构型高分子磁性材料 .....	304
9.5.1 二炔烃类衍生物的聚合物 .....	304
9.5.2 热解聚丙烯腈 .....	304
9.5.3 三氨基苯 .....	304
9.5.4 电荷转移络合物 .....	304
9.5.5 金属有机高分子磁性体 .....	304
参考文献 .....	305
<b>10 化学功能高分子材料及其他功能高分子</b> .....	306

10.1 化学功能高分子材料	306
10.1.1 离子交换树脂	306
10.1.2 高吸水性树脂	309
10.2 高分子液晶	312
10.2.1 高分子液晶的分类及特点	312
10.2.2 主链型高分子液晶	314
10.2.3 侧链型高分子液晶	315
10.2.4 高分子液晶材料的应用	318
10.3 高分子分离膜材料	320
10.4 医用高分子	321
参考文献	321

## 第 4 篇 功能晶体材料

<b>11 光学晶体</b>	325
11.1 光学晶体分类	325
11.1.1 金属卤化物晶体	325
11.1.2 氧化物和含氧酸盐晶体	326
11.1.3 IV 族与 III-VI 族化合物半导体晶体	327
11.2 光学晶体性质和应用	329
11.2.1 透过光谱	329
11.2.2 折射率和双折射	330
11.2.3 色散	330
11.2.4 偏光器件	330
11.3 人造宝石晶体	333
11.3.1 宝石的评价和表征	333
11.3.2 宝石的分类	336
11.3.3 重要的人造宝石晶体	337
参考文献	342
<b>12 非线性光学晶体</b>	343
12.1 引言	343
12.2 非线性晶体光学基础	344
12.2.1 激光频率转换的参量过程	344
12.2.2 非线性光学过程的位相匹配	345
12.2.3 非线性光学系数	347
12.3 探索新的非线性光学晶体的理论模型及途径	349
12.3.1 非线性光学晶体应具备的性质	350
12.3.2 非线性光学晶体计算的几个经典理论模型	350
12.3.3 阴离子基团理论	351
12.3.4 双重基元结构模型	352
12.3.5 探索非线性光学新晶体的途径	352

12.4 激光频率转换晶体	354
12.4.1 强激光频率转换晶体	355
12.4.2 低功率激光频率转换晶体	355
12.4.3 参量振荡晶体	357
12.4.4 超短脉冲激光频率转换晶体	357
12.5 几种重要的无机非线性光学晶体	357
12.5.1 三硼酸锂( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , LBO)晶体	357
12.5.2 三硼酸锂铯( $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ , CLBO)晶体	358
12.5.3 磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , KDP)和磷酸二氘钾( $\text{KD}_2\text{PO}_4$ , DKDP)晶体	358
12.5.4 偏硼酸钡( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , BBO)晶体	359
12.5.5 $\alpha$ -碘酸锂( $\alpha\text{-LiIO}_3$ )晶体	359
12.5.6 磷酸钛氧钾( $\text{KTiOPO}_4$ , KTP)晶体	360
12.5.7 铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ , LN)晶体	360
12.5.8 铌酸钾( $\text{KNbO}_3$ , KN)晶体	361
12.6 红外非线性光学晶体	361
12.6.1 单质晶体	361
12.6.2 二元化合物晶体	362
12.6.3 三元化合物晶体	362
12.7 有机非线性光学晶体	362
12.7.1 有机晶体分类、结构特点和生长方法	363
12.7.2 有机物晶体	363
12.7.3 有机盐类晶体	365
12.7.4 有机金属络合物晶体	366
12.8 结束语	366
参考文献	366
<b>13 激光晶体</b>	<b>367</b>
13.1 激光物理基础	367
13.1.1 光的受激发射	367
13.1.2 固体激光器	370
13.2 激光晶体分类	373
13.2.1 掺杂型激光晶体	373
13.2.2 自激活激光晶体	375
13.2.3 色心激光晶体	375
13.2.4 半导体激光器	376
13.3 激光晶体的现状和发展趋势	378
13.3.1 高平均功率密度激光晶体	378
13.3.2 可调谐激光晶体	378
13.3.3 新波长激光晶体	380
13.3.4 半导体激光器和小型固体激光器用激光晶体	380
13.4 新型激光晶体的探索	381

13.4.1	激活离子和基质晶体 .....	381
13.4.2	探索新型激光晶体的若干方面 .....	384
	参考文献 .....	387
<b>14</b>	<b>电光和光折变晶体 .....</b>	<b>388</b>
14.1	引言 .....	388
14.2	电光效应 .....	388
14.2.1	电光效应的基本原理 .....	388
14.2.2	线性电光效应(Pockels 效应) .....	389
14.2.3	$\bar{4}2m$ 晶类的线性电光效应 .....	389
14.2.4	二次电光效应(Kerr 效应) .....	391
14.3	电光器件 .....	392
14.3.1	电光开关 .....	392
14.3.2	电光调制器 .....	393
14.3.3	电光偏转器 .....	393
14.4	电光晶体 .....	393
14.4.1	实用电光晶体应具备的性质 .....	393
14.4.2	几种实用的电光晶体 .....	393
14.5	光折变效应的基本概念 .....	395
14.5.1	光折变效应的定义和特点 .....	395
14.5.2	光折变效应的机理 .....	395
14.5.3	光折变晶体中的光束耦合 .....	397
14.5.4	光折变材料的基本性能和参数 .....	397
14.6	光折变效应的应用 .....	400
14.6.1	光学位相共轭器件 .....	400
14.6.2	光折变自泵浦位相共轭器的应用 .....	401
14.6.3	光折变二波耦合的应用 .....	401
14.6.4	光折变四波混频的应用 .....	401
14.6.5	光存储 .....	402
14.7	光折变晶体及其性能 .....	403
14.7.1	铁电体氧化物光折变晶体 .....	403
14.7.2	非铁电氧化物光折变晶体 .....	407
14.7.3	半导体光折变晶体 .....	408
14.7.4	量子阱光折变材料 .....	409
14.7.5	有机光折变晶体聚合物 .....	409
14.8	应用中光折变晶体的选择 .....	410
	参考文献 .....	411
<b>15</b>	<b>其他交互效应功能晶体 .....</b>	<b>412</b>
15.1	晶体在外场作用下的交互效应 .....	412
15.2	压电晶体 .....	412

15.2.1	压电效应	412
15.2.2	水晶	413
15.2.3	其他压电晶体	414
15.2.4	压电晶体及压电材料的应用	415
15.3	声光晶体	416
15.3.1	声光效应	416
15.3.2	几种典型声光晶体	417
15.3.3	声光晶体的应用	418
15.4	磁光晶体	419
15.4.1	磁光效应	419
15.4.2	几种磁光晶体	420
15.4.3	磁光晶体的应用	421
15.5	热释电晶体	422
15.5.1	热释电效应	422
15.5.2	几种典型热释电晶体	422
	参考文献	424

## 第 5 篇 功能复合材料

<b>16</b>	<b>功能复合材料(Functional composite materials)</b>	427
16.1	功能复合材料基础	427
16.1.1	复合材料的分类	427
16.1.2	功能复合材料的复合效应	428
16.1.3	功能复合材料的设计	428
16.2	磁性复合材料(Magnetic composite materials)	429
16.2.1	永磁复合材料	429
16.2.2	软磁复合材料	429
16.2.3	磁记录复合材料	430
16.2.4	磁流体	433
16.3	电性复合材料(Electric composite materials)	434
16.3.1	金属填充材料的导电特性	434
16.3.2	电磁屏蔽复合材料	435
16.3.3	复合材料压电性能	436
16.3.4	超导复合材料	437
16.4	梯度功能复合材料(Functionally gradient materials)	437
16.4.1	梯度功能材料的概念	437
16.4.2	梯度功能材料的应用	438
16.4.3	梯度功能材料的制造方法	438
16.5	隐身复合材料	440
16.5.1	隐身复合材料	440
16.5.2	抗声的复合材料	441

16.6 其他功能复合材料	442
16.6.1 抗X射线辐射复合材料	442
16.6.2 仿生复合材料	442
16.6.3 摩擦功能复合材料	443
16.6.4 透光复合材料	443
16.6.5 热性能复合材料	443
参考文献	444

## 第6篇 具有特殊结构的功能材料

<b>17 非晶态合金</b>	449
17.1 绪论	449
17.2 金属玻璃的分类	450
17.3 制备方法	450
17.3.1 熔体急冷法	450
17.3.2 气相沉积法	451
17.3.3 化学法	451
17.3.4 固态反应法	451
17.3.5 大块非晶合金的制备	451
17.4 结构弛豫和晶化	451
17.5 性能	453
17.5.1 磁性	453
17.5.2 化学性质	456
17.5.3 电学性质	457
17.5.4 热学性质	457
17.5.5 力学性能	458
17.6 应用和展望	458
17.6.1 磁性器件	458
17.6.2 非晶态光存储薄膜	461
17.6.3 非晶态硅(a-Si)	461
参考文献	462
<b>18 纳米结构材料</b>	464
18.1 引言	464
18.2 合成与制备	465
18.2.1 气相冷凝法	465
18.2.2 非晶晶化法	466
18.2.3 高能球磨法	466
18.2.4 溶胶-凝胶法	467
18.3 纳米材料的微结构	467
18.3.1 界面结构	467
18.3.2 晶粒结构	468

18.3.3	结构弛豫和晶界偏聚	468
18.3.4	热稳定性	469
18.4	纳米材料的性能	470
18.4.1	热学性能	470
18.4.2	磁学性能	471
18.4.3	纳米陶瓷的超塑性	474
18.4.4	纳米颗粒膜和颗粒合金的磁电输运性质	475
18.5	应用和展望	476
	参考文献	477
<b>19</b>	<b>储氢材料</b>	<b>480</b>
19.1	绪论	480
19.2	金属氢化物	480
19.3	储氢合金的分类	481
19.3.1	镁系合金	481
19.3.2	稀土系合金	482
19.3.3	钛系和锆系合金	482
19.4	应用	484
19.4.1	氢的贮存、净化和回收	484
19.4.2	氢燃料发动机	484
19.4.3	热-压传感器和热液激励器	484
19.4.4	氢同位素分离和核反应堆中的应用	484
19.4.5	空调、热泵及热贮存	485
19.4.6	加氢及脱氢反应催化剂	486
19.4.7	氢化物-镍电池	486
	参考文献	489
<b>20</b>	<b>薄膜功能材料</b>	<b>491</b>
20.1	薄膜材料制备方法简介	491
20.1.1	物理气相沉积	491
20.1.2	化学气相沉积	493
20.2	薄膜材料的特点	494
20.2.1	二维材料的特点	494
20.2.2	薄膜制备过程决定的特点	495
20.2.3	薄膜制备方法能够实现的特点	495
20.3	主要薄膜功能材料	496
20.3.1	半导体薄膜	496
20.3.2	电学薄膜	498
20.3.3	信息记录用薄膜	499
20.3.4	敏感薄膜	502
20.3.5	光学薄膜	503

参考文献	504
<b>21 形状记忆材料</b>	<b>505</b>
21.1 形状记忆效应及原理	505
21.1.1 形状记忆效应	505
21.1.2 形状记忆效应机理	508
21.2 形状记忆材料及性能	512
21.2.1 TiNi 形状记忆合金	512
21.2.2 铜基形状记忆合金	515
21.2.3 铁基形状记忆合金	518
21.3 形状记忆合金的应用	520
21.3.1 工业应用	521
21.3.2 医学上的应用	522
21.4 陶瓷和树脂中的形状记忆效应	523
21.4.1 形状记忆效应机理的多样性	523
21.4.2 陶瓷中的形状记忆效应	523
21.4.3 树脂中的形状记忆效应	525
参考文献	528
<b>22 智能材料与结构</b>	<b>530</b>
22.1 引言	530
22.1.1 材料的分类和术语	530
22.1.2 智能材料是多学科融合化的结果	532
22.2 关于智能材料的概念	533
22.2.1 智能材料的初级功能	534
22.2.2 材料固有的智能	534
22.2.3 从人类观点看的材料智能	534
22.2.4 结构材料和功能材料	535
22.3 智能(机敏)结构和系统中的材料	535
22.3.1 敏感器材料、致动器材料和机敏材料	535
22.3.2 制作工艺和材料复合	538
22.3.3 杂化材料(hybrid materials)	540
22.3.4 电流变体	540
22.4 机敏材料和结构	542
22.4.1 被动敏感机敏结构	543
22.4.2 仅有致动器的机敏结构	544
22.4.3 受控结构(被动型智能结构)	545
22.4.4 智能皮肤	546
22.5 结束语	547
参考文献	549