

第二版

WUJI CAILIAO HECHENG

无机材料合成

刘海涛 杨 郦 林 蔚 编著



化学工业出版社

第二版

WUJI CAILIAO HECHENG

无机材料合成

刘海涛 杨丽 林蔚 编著



化学工业出版社

·北京·

无机材料包括了除有机高分子和复合材料以外的所有材料，其“家族庞大，地位显赫”，在国民经济发展中占有重要地位，是材料科学工作者十分关注的重要方面之一，其合成（制备）方法的研究与应用成为材料科学技术的重点。

本书从无机材料合成的科学基础出发，对无机材料合成的主要技术、方法、应用及前沿领域进行了较为详尽的论述，反映了当今无机材料合成的主要研究动态。本书涉及软化学和极端条件下的合成等诸多领域，着重论述了无机材料合成过程中经常应用的如高温、低温、高压、真空、气体净化、气氮控制、分离纯化等实验技术。对气相沉积、溶胶-凝胶、水热与溶剂热合成、自蔓延高温合成、微波与等离子体、微重力、超重力、仿生等合成方法以及新型合金材料、先进陶瓷、新型碳材料、发光材料、无机抗菌材料、催化材料、隐身材料、新能源材料等前沿领域进行了较为详尽的论述，代表了当代无机材料合成的技术水平。

本书可作为高等院校材料科学与工程学科各专业学生的教科书，也可供从事相关学科领域的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

无机材料合成/刘海涛, 杨邴, 林蔚编著. —2 版
北京: 化学工业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-122-10484-7

I. 无… II. ①刘…②杨…③林… III. 无机材料-
合成 IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 014719 号

责任编辑: 仇志刚
责任校对: 陈 静

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京市兴顺印刷厂
850mm×1168mm 1/32 印张 21½ 字数 595 千字
2011 年 5 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

《无机材料合成》(第一版)自2003年8月经化学工业出版社出版至今已有七年多的时间了,在这七年多的时间里,无机材料合成领域发生了巨大的变化,具有特殊功能的新型无机材料不断涌现,新型的无机材料合成技术与方法及其研究的前沿领域也有了很大的变化。尤其是近年来随着人们环境生态意识的增强,环境及新能源材料的研发受到了空前的重视。

《无机材料合成》(第二版),保留了第一版的结构体系,对原有部分内容进行了适当的取舍、修改和完善,如删掉了第一版第一篇中的第5章“无机材料的表(界)面”和第四篇中的第20章“配位化合物的合成”。在第一版的基础上,增加了有关发光、抗菌、催化、隐身及新能源材料方面的内容,保留下来的第一版的部分章节也做了适当的修订,力争使本书能够做到“与时俱进”。

无机材料的合成是指通过一定的途径,从气态、液态或固态的各种不同原材料中得到化学上及性能上不同于原材料的无机新材料。无机材料的合成包括两方面的内容,一方面是研究新型无机材料的合成,另一方面是研究已知无机材料的新合成方法及新合成技术。随着当前相关学科研究的迅猛发展,迫切要求无机材料合成能够更多地提出新的行之有效的合成方法、合成技术,制订节能、洁净、经济的合成路线以及开发新型结构和新型功能的无机材料。

本书从无机材料合成的科学基础出发,详细介绍了无机材料合成的主要技术、方法及应用。在编写过程中,考虑到本书面对的不同读者群,在合成科学基础理论上作了较为详尽的论述,在将金属材料 and 无机非金属材料两大学科的基础理论合理综合编排方面做了一次尝试,此外,在合成技术、方法及应用方面,在兼顾传统的同时,力求能反映当代的最新研究成果。

本书分四篇，共包含 27 章。第一篇是无机材料合成科学基础部分，共分为 4 章，即第 1 章至第 4 章，介绍了与无机材料合成相关的一些基础知识如无机材料结构、热力学、扩散、固相反应与烧结等方面的理论。第二篇是无机材料合成实验技术，共分 6 章，即第 5 章至第 10 章，介绍了无机材料合成实验中经常应用的如高温、低温、高压、真空、气体净化、气氛控制、分离纯化等技术。第三篇是无机材料现代合成方法及应用，共分 8 章，即第 11 章至第 18 章，介绍了气相沉积合成、溶胶-凝胶合成、水热与溶剂热合成、自蔓延高温合成、微波与等离子体合成、微重力合成、超重力合成、仿生合成等技术。第四篇是无机材料合成前沿领域，共分 9 章，即第 19~27 章，介绍了新型合金材料、先进陶瓷、人工晶体、新型碳材料、发光材料、无机抗菌材料、催化材料、隐身材料、新能源材料等领域的研究及发展状况。

全书由第一版的 24 章修订为新版的 27 章，修订内容占本书总篇幅的 1/2 左右。

七年多的时间，本书得到了广大读者的持续关注，并被国内部分高校选作教材使用，至 2010 年 1 月已经先后五次印刷。在此期间，通过编辑部转来了一些热心读者的阅读感言，对书中的部分内容提出了自己的见解和意见，希望我们再版时予以考虑。在此第二版即将出版之际，向给此书予以关注的读者表示谢意，同时也希望广大的读者能够继续将阅读中的一些感想反馈给我们，以便在下次再版的时候可以进一步的完善。

在本书编写过程中，参考并引用了一些国内外相关文献的有关内容，在此笔者表示由衷的感谢（由于参考文献数量较多、来源广泛，可能在标注时会有挂万漏一之处，请原文作者发现后通知我们）。限于笔者水平，书中还会存在某些不足，恭请各位同行及读者批评指正，以便本书再版时能进行完善。

编者

2011 年 3 月

第一版前言

无机材料的合成是指通过一定的途径，从气态、液态或固态的各种不同原材料中得到化学上及性能上不同于原材料的无机新材料。无机材料的合成包括两方面的内容，一方面是研究新型无机材料的合成，另一方面是研究已知无机材料的新合成方法及新合成技术，随着当前相关学科研究的迅猛发展，越来越要求无机材料合成能够更多地提出新的行之有效的合成方法、合成技术，制定节能、洁净、经济的合成路线以及开发新型结构和新型功能的无机材料。

本书从无机材料合成的科学基础出发，详细介绍了无机材料合成的主要技术、方法及应用。在编写过程中，考虑到本书面对的不同读者群，在合成科学基础理论上作了较为详尽的论述，在将金属材料 and 无机非金属材料两大学科的基础理论合理综合编排方面做了一次尝试，此外，在合成技术、方法及应用方面，在兼顾传统的同时，力求能反映当代的最新研究成果。

本书分四篇，共包含 24 章，第一篇是无机材料合成科学基础，介绍了与无机材料合成相关的一些基础理论如无机材料结构、无机材料表界面、扩散、固相反应及烧结等方面的理论。第二篇是无机材料合成实验技术，介绍了无机材料合成实验中经常应用的如高温、低温、高压、真空、气体净化、气氛控制、分离纯化等技术。第三篇是无机材料现代合成方法及应用，介绍了化学气相沉积、溶胶—凝胶、水热与溶剂热合成、

自蔓延高温合成、微波与等离子体、微重力、超重力、仿生合成等技术。第四篇是无机材料合成前沿领域，介绍了配位化合物的合成、新型合金材料、高技术陶瓷、富勒烯及碳纳米管等领域的研究及发展状况。

本书在编写过程中，参考并引用了一批国内外相关文献的有关内容（本书内容除另有注明外，均来源于参考文献，在书中不再另注明）。

限于编者水平，书中还会存在很多不足，恭请各位同行及读者批评指正，以便本书再版时能进行完善。

编者

2003年4月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 无机材料合成科学基础

第1章 无机材料结构	8
1.1 晶体化学基础	8
1.1.1 原子结构	8
1.1.2 原子半径和离子半径	11
1.1.3 球体紧密堆积原理	12
1.1.4 配位数和配位多面体	14
1.1.5 离子极化	15
1.1.6 电负性	16
1.1.7 鲍林规则	17
1.2 晶体的类型	21
1.2.1 离子晶体	21
1.2.2 分子晶体	22
1.2.3 共价晶体	22
1.2.4 金属晶体	23
1.2.5 氢键晶体	23
1.3 典型晶体结构类型	24
1.3.1 典型无机化合物晶体的结构	24
1.3.2 典型金属结构	34
1.3.3 晶体结构模型	36
1.3.4 晶体结构变异	37
1.4 准晶态	48
1.4.1 准晶态的概念	48

1.4.2	准晶态的空间格子	51
1.4.3	准晶生长	52
1.4.4	无公度调制结构	53
1.4.5	准晶和 Penrose 拼砌	53
1.5	非晶质体	55
1.5.1	玻璃化转变	55
1.5.2	位置无序的统计描述	59
1.5.3	无机玻璃	60
第2章	晶体结构缺陷	64
2.1	缺陷化学基础	64
2.1.1	点缺陷	64
2.1.2	线缺陷	68
2.1.3	面缺陷	70
2.1.4	缺陷反应表示法	71
2.1.5	点缺陷的平衡和浓度	77
2.2	晶体缺陷对材料性能的影响及应用	80
2.2.1	晶体缺陷与活性烧结	80
2.2.2	晶界对烧结的促进作用	82
2.2.3	气氛的控制与材料致密度提高	82
2.2.4	工艺控制形成介稳材料	83
第3章	热力学及其应用	84
3.1	热效应	84
3.1.1	热容	84
3.1.2	热效应、生成热	85
3.1.3	溶解热、水化热	86
3.1.4	相变热	87
3.2	化学反应过程的方向性	88
3.3	过程产物的稳定性和生成序	89
3.4	热力学应用实例	90
第4章	扩散、固相反应与烧结	93
4.1	扩散基本理论	93

4.1.1	固体中质点扩散的特点	93
4.1.2	扩散动力学方程	94
4.1.3	扩散推动力	97
4.1.4	扩散微观结构及其扩散系数	99
4.1.5	扩散系数的测定	101
4.1.6	影响扩散的因素	102
4.2	固相反应概论	109
4.2.1	固相反应的特点	110
4.2.2	固相反应机理	110
4.2.3	固相反应动力学方程	116
4.2.4	影响固相反应的因素	123
4.3	烧结	128
4.3.1	烧结的特点与烧结过程	128
4.3.2	烧结推动力与烧结模型	129
4.3.3	固相烧结动力学	131
4.3.4	晶粒生长与二次再结晶	133
4.3.5	液相烧结和热压烧结	136
4.3.6	影响烧结的因素	137

第二篇 无机材料合成实验技术

第5章	高温技术	145
5.1	高温的获得	145
5.1.1	高温炉	145
5.1.2	自蔓延燃烧	147
5.1.3	激光加热	147
5.2	电热体	147
5.2.1	Ni-Cr 和 Fe-Cr-Al 合金电热体	147
5.2.2	Pt 和 Pt-Rh 电热体	148
5.2.3	Mo、W、Ta 电热体	149
5.2.4	碳化硅 (SiC) 电热体	150
5.2.5	碳质电热体	150

5.2.6	二硅化钼 (MoSi_2) 电热体	151
5.2.7	氧化物电热体	151
5.3	高温反应受热容器	152
5.4	高温测量	154
5.4.1	温标	154
5.4.2	温度测量方法	156
5.4.3	常用高温测量仪表	156
第6章	低温技术	159
6.1	获得低温的方法	159
6.2	低温源	160
6.3	低温测量	160
6.3.1	低温热电偶	161
6.3.2	电阻温度计	162
6.3.3	红外辐射温度计	162
6.3.4	新型低温温度传感器的测量成果	163
6.4	温度传感器的发展趋势	163
6.5	低温的控制	164
第7章	高压技术	166
7.1	高压合成定义	166
7.2	高压合成技术	167
7.2.1	静高压合成技术	167
7.2.2	动态高压合成技术	168
7.3	高压的测量	169
第8章	真空技术	171
8.1	概述	171
8.2	真空的获得和真空泵简介	171
8.2.1	真空的获得	171
8.2.2	真空泵简介	172
8.3	真空的测量	177
8.3.1	麦氏真空规 (McLeod gauge)	177
8.3.2	热偶真空规	179

8.3.3	热阴极电离真空规	179
8.3.4	冷阴极磁控规	180
8.4	真空管道的连接	180
8.5	真空清洁	181
8.6	超高真空系统	181
8.7	真空检漏	182
8.7.1	静态实验	182
8.7.2	易产生漏气的部位	183
8.7.3	检漏工具	183
第9章 气体净化及气氛控制技术		185
9.1	气体净化的方法	185
9.1.1	吸收	185
9.1.2	吸附	185
9.1.3	化学催化	186
9.1.4	冷凝	186
9.2	气体净化剂	187
9.2.1	干燥剂	187
9.2.2	脱氧剂和催化剂	188
9.2.3	吸附剂	189
9.3	气体流量的测定	189
9.3.1	转子流量计	189
9.3.2	毛细管流量计	190
9.4	定组成混合气体的配制	190
9.4.1	静态混合法	190
9.4.2	动态混合法	191
9.4.3	平衡法	192
9.5	使用气体时应注意的一些技术问题	192
9.5.1	气体连接管道	192
9.5.2	装置中气体的切换	192
第10章 物质的分离与纯化技术		194
10.1	分离与纯化方法的分类及特征	194

10.1.1	平衡分离过程	195
10.1.2	速率分离过程	198
10.2	吸附分离技术	199
10.2.1	概述	199
10.2.2	吸附机理	204
10.2.3	吸附分离工艺简介	205
10.3	吸收分离技术	210
10.3.1	吸收分离	210
10.3.2	吸收剂的选择原则	211
10.3.3	物理吸收和化学吸收	211
10.3.4	气体吸收工业应用	212
10.3.5	吸收塔与解吸塔	213
10.3.6	其他吸收	214
10.4	膜分离技术	216
10.4.1	膜的定义	217
10.4.2	膜的分类	218
10.4.3	传统膜分离技术	218
10.4.4	几种新型的膜分离技术	219
10.4.5	无机膜制备	222

第三篇 无机材料现代合成方法及应用

第11章	气相沉积法	229
11.1	化学气相沉积法	229
11.1.1	化学气相沉积法的化学反应	230
11.1.2	化学气相沉积法的技术装置	234
11.1.3	化学气相沉积法合成梯度功能材料	242
11.2	物理气相沉积法	242
11.2.1	真空蒸镀	243
11.2.2	溅射镀	246
11.2.3	离子镀	254
第12章	溶胶-凝胶合成法	258

12.1	基本原理和技术特点	258
12.2	溶胶-凝胶工艺	259
12.2.1	无机盐的水解-聚合反应	259
12.2.2	金属有机分子的水解-聚合反应	261
12.3	溶胶-凝胶法主要反应设备	262
12.3.1	原料计量设备	262
12.3.2	反应容器	263
12.3.3	混合分散装置	263
12.3.4	陈化干燥设备	263
12.3.5	热处理反应设备	263
12.4	溶胶-凝胶法在无机材料合成中的应用	263
12.4.1	高纯超细粉体的合成	263
12.4.2	纤维材料的合成	267
12.4.3	薄膜材料	267
12.4.4	块体材料	269
12.4.5	复合材料	269
第13章	水热与溶剂热合成法	271
13.1	水热与溶剂热反应化学类型	272
13.2	水热与溶剂热合成装置	274
13.2.1	等静压外热内压力容器	275
13.2.2	等静压冷封自紧式高压容器	275
13.2.3	等静压锥封内压力容器	275
13.2.4	等静压外热外压力容器	276
13.2.5	等静压外热外压摇动反应器	276
13.2.6	等静压内加热高压容器	276
13.3	水热与溶剂热合成程序	277
13.4	水热与溶剂热合成实例	278
13.4.1	水热合成法制备磁性记忆材料	278
13.4.2	介孔材料的合成	279
13.4.3	特殊结构、凝聚态与聚集态的制备	279
13.4.4	复合氧化物与复合氟化物的合成	280

13.4.5	PZT 粉体的水热合成	280
13.4.6	半导体材料的溶剂热合成	281
第14章	自蔓延高温合成方法	284
14.1	自蔓延高温合成法 (SHS) 发展简史	284
14.2	自蔓延高温合成法的原理	285
14.2.1	化学反应原理	285
14.2.2	自蔓延传播原理	286
14.3	自蔓延高温合成法反应类型	287
14.3.1	固态-固态反应	287
14.3.2	气态-固态反应	287
14.3.3	金属间化合物型的燃烧合成	288
14.3.4	复合相型的合成	288
14.4	自蔓延高温合成法 (SHS) 材料制备的特点及相应技术	289
14.4.1	自蔓延高温合成法 (SHS) 材料制备法的特点	289
14.4.2	自蔓延高温合成法 (SHS) 材料制备法的相应技术	289
14.5	SHS 法的工艺与设备概况	291
14.6	自蔓延高温合成法 (SHS) 技术应用	292
14.6.1	耐高温材料的 SHS 合成	292
14.6.2	自蔓延高温合成法 (SHS) 涂层技术	295
14.6.3	SHS 功能梯度材料技术	295
第15章	微波与等离子体合成	297
15.1	微波与材料的相互作用	298
15.1.1	材料分类	298
15.1.2	相互作用	298
15.2	微波等离子体的特点	300
15.3	等离子反应过程	301
15.4	产生微波等离子体的装置	302
15.5	微波与等离子体合成及应用实例	304
15.5.1	沸石分子筛的微波合成	304

15.5.2	微波烧结	305
15.5.3	微波辐射法制备无机物	305
第16章	微重力合成	308
16.1	微重力及其特点	308
16.2	微重力条件下的材料实验系统	310
16.2.1	地面模拟系统	310
16.2.2	轨道实验系统	313
16.3	微重力研究历史	313
16.4	微重力技术应用	314
16.4.1	微重力环境下玻璃的熔化技术	315
16.4.2	高温氧化物晶体的生长	316
16.4.3	砷化镓单晶的等效微重力生长	318
第17章	超重力合成方法	320
17.1	超重力合成技术及工作原理	320
17.2	超重力装置	321
17.2.1	超重机的特点	321
17.2.2	应用超重力技术的旋转填料床	322
17.3	超重力反应沉淀法合成纳米材料及其应用	323
17.3.1	纳米碳酸钙	323
17.3.2	纳米氢氧化铝	324
17.3.3	纳米碳酸钡	324
17.3.4	纳米碳酸锂	325
17.3.5	纳米碳酸铯	325
第18章	无机材料的仿生合成	327
18.1	仿生合成技术简介及理论基础	327
18.1.1	仿生合成技术简介	327
18.1.2	仿生合成过程中分子作用的机理	328
18.2	典型的生物矿物材料	330
18.2.1	骨材料	331
18.2.2	珍珠层材料	331
18.2.3	纳米磁铁矿晶体	331

18.3	无机晶体形成的模板	332
18.4	纳米材料仿生合成	333
18.4.1	纳米微粒的仿生合成	333
18.4.2	仿生陶瓷薄膜和陶瓷薄膜涂层	334
18.4.3	复杂结构无机材料的仿生合成	335

第四篇 无机材料合成前沿领域

第19章	新型合金材料	337
19.1	非晶态合金	337
19.1.1	非晶态合金的结构特点	337
19.1.2	非晶态材料的制备	339
19.1.3	非晶态合金的制备方法	340
19.1.4	非晶态合金的性能及其应用	342
19.2	记忆合金	344
19.2.1	记忆合金的马氏体相变原理	344
19.2.2	形状记忆合金	346
19.2.3	形状记忆材料的应用	347
19.3	贮氢合金	349
19.3.1	贮氢合金的贮氢原理	349
19.3.2	贮氢合金的分类	350
19.3.3	贮氢合金的应用	353
第20章	先进陶瓷	357
20.1	结构陶瓷	357
20.1.1	结构陶瓷分类	358
20.1.2	氧化物陶瓷	358
20.1.3	非氧化物陶瓷	359
20.2	功能陶瓷	364
20.2.1	功能陶瓷分类	364
20.2.2	几种典型的功能陶瓷	365
第21章	人工晶体	444
21.1	晶体生长理论	444