



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 无机非金属材料工学

谢峻林 主 编  
何 峰 顾少轩 王 琦 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 无机非金属材料工学

谢峻林 主 编

何 峰 顾少轩 王 琦 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《无机非金属材料工学》是高等学校无机非金属材料专业课程体系中的专业必修课程，是材料科学与工程专业的选修课程。本教材是高等教育“十一五”国家级规划教材，是为了适应高等学校材料学科专业发展需要和材料类专业创新工程人才培养需要而编写的。

本教材以无机非金属材料工程专业专业规范中材料制备知识领域核心知识单元及知识点为教学依据，整合无机非金属材料共性基础理论知识，提炼材料制备方法与原理；除介绍玻璃、陶瓷、水泥、混凝土等传统材料制备工艺外，还试图结合最新科技成果，将粉末、薄膜等低维材料的制备知识等新材料、新理论、新工艺充实到教材内容中。

本教材可作为高等学校材料科学与工程专业、无机非金属材料工程专业本科生教学用书，也可供在材料工程领域从事科研、设计、生产的工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

无机非金属材料工学/谢峻林主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-11260-6

I. 无… II. 谢… III. 无机非金属材料-高等学校-教材 IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 088401 号

---

责任编辑: 杨 菁  
责任校对: 陈 静

文字编辑: 李 玥  
装帧设计: 杨 北

---

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$  字数 632 千字 2011 年 6 月北京第 1 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: 42.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

在科技高速发展及我国人才强国战略背景下，材料专业教育迅速发展，2001年材料类专业成为我国高教理工科排名前10名的专业。2009年全国无机非金属材料工程专业本科招生点达到89个，材料科学与工程本科专业本科招生点达到131个。与此同时，材料学科也在迅速发展，专业内涵不断丰富。为适应新形势，培养高水平材料工程技术人才，各高校积极开展课程体系改革与研究，取得了许多成果。本教材是在聆听了诸多教师心得，参考了诸多图书，翻阅了大量资料，特别是吸纳了武汉理工大学材料科学与工程学院十多年的教学改革研究的实践成果之后而完成，因此它凝聚了除编者之外更多人的心血与汗水。

《无机非金属材料工学》是无机非金属材料专业学生的核心专业课程，是材料科学与工程专业学生的选修课。应在学习完材料科学基础、材料工程基础两门课程之后，而学习无机非金属材料热工设备课程之前开设。它与材料科学基础、材料工程基础、无机非金属材料热工设备等课程之间有着密切的联系。它是对已学材料基础理论的应用，是对材料制备原理与工艺的系统描述，是今后学习热工设备类课程的基础。

本《无机非金属材料工学》教材立足无机非金属材料二级学科专业，面向材料科学与工程专业一级学科专业，构建适合工程人才培养的无机非金属材料工学课程体系。适宜作为高等学校材料科学与工程专业、无机非金属材料工程专业本科生学习用书。

本教材在吸纳了武汉理工大学林宗寿教授主编的《无机非金属材料工学》第二版部分精髓的同时，结合全国高校材料专业教学需求，以无机非金属材料工程专业专业规范中材料制备知识领域核心知识单元及知识点为依据，以整合无机非金属材料共性理论知识为特色，以原理—工艺—性能为主线，组织教学内容，同时结合新材料发展现状，对新材料、新理论、新工艺进行适度介绍。教材内容包括无机非金属材料共性基础理论知识，材料制备方法与原理，玻璃、陶瓷、水泥、混凝土等传统材料制备工艺，粉末、薄膜等低维材料的制备知识。通过该课程的学习，可使学生掌握无机非金属材料的制备原理和生产过程，工艺流程的共性和特点，使学生对无机非材料的性能、生产过程和应用有较全面的了解，同时对新材料、新工艺、新方法建立起基本概念。

本教材分为3篇15章：第1篇无机非金属材料基础理论，简明扼要地介绍了无机非金属材料组成-结构特征，晶态结构、非晶态及玻璃态结构，微观结构的演化等无机非金属材料共性基础理论；第2篇无机非金属材料制备方法及原理，系统介绍了基于液相-固相转变、基于固相-固相转变、基于气相-固相转变的材料制备方法及原理，重要内容包括晶体材料、粉末材料、薄膜材料、块状材料的制备，对玻璃、水泥熟料、陶瓷进行了制备原理及方法概述；第3篇典型无机非金属材料生产工艺，包括水泥、混凝土、陶瓷、玻璃、微晶玻璃、纳米材料的制备工艺及质量控制。

本教材由武汉理工大学谢峻林编写绪论、第5章、第6章、第7章；武汉理工大学顾少轩编写第1章、第2章、第3章、第4章；武汉理工大学何峰编写第8章、第12章、第13章、第14章；济南大学王琦编写第10章、第11章；武汉理工大学梅书霞编写第9章、第15章。顾少轩负责第1篇第1章~第4章统稿；何峰负责第3篇第8章、第9章、第12章~第14章统稿；第2篇、第3篇其他章节由谢峻林统稿，全书内容取舍及章节编排由谢峻林负责。全书由武汉理工大学文进、邢伟宏审稿。

本教材按 45~60 学时编写，各篇、章建议学时数如下：

第 1 篇 12~16 学时。其中第 1 章 1~2 学时，第 2 章 3~4 学时，第 3 章 3~4 学时，第 4 章 5~6 学时。

第 2 篇 7~10 学时。其中第 5 章 3~4 学时，第 6 章 2~3 学时，第 7 章 2~3 学时。

第 3 篇 27~34 学时。其中第 8 章 1 学时，第 9 章 2~3 学时，第 10 章 5~6 学时，第 11 章 2~3 学时，第 12 章 5~6 学时，第 13 章 2~3 学时，第 14 章 5~6 学时，第 15 章 5~6 学时。

由于教材内容广泛，编者水平所限，尽管加倍努力，但存在不足之处在所难免，恳请同行和读者批评指正。

编者

2010 年 12 月于武汉

# 目 录

绪论 .....	1
0.1 无机非金属材料的定义 .....	1
0.2 无机非金属材料在国民经济建设中的 作用和地位 .....	1
0.3 无机非金属材料工业的进展 .....	3
0.4 无机非金属材料国际发展趋势 .....	4
0.5 无机非金属材料工学的任务 .....	4

## 第 1 篇 无机非金属材料基础理论

<b>第 1 章 无机非金属材料概述</b> .....	6
1.1 无机非金属材料的结构特征 .....	6
1.1.1 无机非金属材料的结构 .....	6
1.1.2 无机非金属材料的结构特征 .....	7
1.2 水泥 .....	9
1.2.1 硅酸盐水泥 .....	9
1.2.2 快硬和特快硬水泥 .....	10
1.2.3 抗硫酸盐、中低热及道路水泥 .....	12
1.2.4 膨胀和自应力水泥 .....	14
1.2.5 油井水泥 .....	16
1.2.6 装饰水泥 .....	16
1.3 玻璃 .....	17
1.3.1 硅酸盐玻璃 .....	17
1.3.2 硼酸盐玻璃 .....	18
1.3.3 硼硅酸盐玻璃 .....	19
1.3.4 铝酸盐玻璃 .....	19
1.3.5 铝硅酸盐玻璃 .....	19
1.3.6 磷酸盐玻璃 .....	19
1.3.7 铝磷酸盐玻璃 .....	20
1.3.8 其他氧化物玻璃 .....	20
1.3.9 非氧化物玻璃 .....	21
1.4 陶瓷 .....	23
1.4.1 陶瓷的定义与分类 .....	23
1.4.2 陶瓷的组成、结构与性能 .....	24
1.4.3 日用陶瓷 .....	26
1.4.4 建筑卫生陶瓷 .....	27
1.5 混凝土 .....	28
1.5.1 混凝土的定义 .....	28
1.5.2 混凝土的分类 .....	29
1.6 耐火材料 .....	29
1.6.1 耐火材料的定义及分类 .....	29
1.6.2 硅质耐火材料 .....	30
1.6.3 镁质耐火材料 .....	31
1.6.4 熔铸耐火材料 .....	31
1.6.5 含碳耐火材料 .....	31
1.6.6 轻质耐火材料 .....	31
1.6.7 不定形耐火材料 .....	32
[思考题] .....	32
[参考文献] .....	32
<b>第 2 章 无机非金属材料晶体结构</b> .....	33
2.1 晶体学基础 .....	33
2.1.1 晶体的基本性质 .....	33
2.1.2 晶体结构与空间点阵 .....	34
2.1.3 晶胞 .....	35
2.1.4 晶系和布拉菲格子 .....	35
2.1.5 晶面指数和晶向指数 .....	36
2.1.6 晶面间距及晶带 .....	39
2.2 无机化合物晶体结构 .....	39
2.2.1 离子晶体中质点的堆积方式 .....	39
2.2.2 典型离子晶体的结构 .....	41
2.2.3 共价晶体中原子的堆积与典型共 价晶体的结构 .....	45
2.3 固溶体 .....	46
2.3.1 置换固溶体 .....	46
2.3.2 影响形成置换固溶体的因素 .....	47
2.3.3 间隙固溶体 .....	48
2.3.4 影响形成间隙固溶体的因素 .....	48
2.3.5 形成固溶体后对晶体性质的 影响 .....	49
2.4 硅酸盐晶体结构 .....	49
2.4.1 硅酸盐晶体结构类型及其特点 .....	49
2.4.2 常见硅酸盐材料中的晶体 .....	52
[思考题] .....	64
[参考文献] .....	64

<b>第 3 章 非晶态及玻璃态结构</b> .....	65
3.1 非晶态物质 .....	65
3.1.1 非晶态物质的种类 .....	65
3.1.2 非晶态物质 X 射线衍射 .....	65
3.1.3 玻璃的定义 .....	66
3.2 非晶态物质的结构 .....	66
3.2.1 织构 .....	66
3.2.2 近程结构 .....	68
3.2.3 远程结构 .....	68
3.3 玻璃的结构因素 .....	71
3.4 玻璃的通性 .....	72
3.4.1 各向同性 .....	73
3.4.2 介稳性 .....	73
3.4.3 无固定熔点 .....	73
3.4.4 性质变化的连续性和可逆性 .....	74
3.5 玻璃的性质 .....	74
3.5.1 玻璃熔体的工艺性质 .....	74
3.5.2 硅酸盐玻璃的性质 .....	76
[思考题] .....	83
[参考文献] .....	84
<b>第 4 章 无机非金属材料微观结构演变</b> .....	85
4.1 液-固转变过程中的晶体成核-生长 相变 .....	85
4.1.1 晶核形成 .....	85
4.1.2 晶体生长 .....	88
4.1.3 总结晶速率 .....	89
4.1.4 影响结晶速率的因素 .....	90
4.2 玻璃的形成与析晶 .....	91
4.2.1 玻璃的形成范围 .....	91
4.2.2 玻璃形成的热力学条件 .....	91
4.2.3 玻璃形成的动力学条件 .....	92
4.2.4 玻璃析晶 .....	94
4.3 微晶玻璃 .....	95
4.3.1 微晶玻璃的成核剂 .....	95
4.3.2 微晶玻璃的结晶化热处理 .....	95
4.3.3 微晶玻璃的结构及其与性能的关系 .....	97
4.4 玻璃的分相 .....	98
4.4.1 玻璃分相的定义 .....	99
4.4.2 玻璃分相的实质 .....	99
4.4.3 玻璃分相机理 .....	99
4.4.4 分相产物的显微结构 .....	102
4.5 玻璃的着色 .....	103
4.5.1 概述 .....	103
4.5.2 玻璃着色剂及其着色机理 .....	103
4.5.3 颜色玻璃的分类及其光谱特性 .....	108
[思考题] .....	110
[参考文献] .....	111

## 第 2 篇 无机非金属材料制备方法及原理

<b>第 5 章 基于液相-固相转变的材料制备</b> .....	112
5.1 从熔体制备单晶材料 .....	112
5.1.1 提拉法 .....	113
5.1.2 坩埚下降法 .....	113
5.1.3 区熔法 .....	114
5.1.4 液相外延 .....	114
5.2 从熔体制备非晶材料 .....	115
5.2.1 玻璃的熔制 .....	115
5.2.2 非晶材料的获得 .....	117
5.2.3 常见氧化物玻璃制品的成形 工艺 .....	118
5.3 溶液法制备材料 .....	122
5.3.1 低温溶液法 .....	122
5.3.2 高温溶液法 .....	123
5.3.3 水热法 (高温水解法) .....	125
5.3.4 沉淀法 .....	127
5.3.5 溶剂蒸发法 .....	131
5.4 溶胶-凝胶法 .....	132
5.4.1 概述 .....	132
5.4.2 溶胶-凝胶法制备材料过程 .....	132
5.4.3 粉末的制备 .....	134
5.4.4 氧化物薄膜的制备 .....	135
[思考题] .....	136
[参考文献] .....	136
<b>第 6 章 基于固相-固相转变的材料制备</b> .....	137
6.1 固相反应法制备粉末 .....	137
6.2 特种陶瓷的烧结 .....	138
6.2.1 陶瓷烧结方法的分类 .....	138
6.2.2 热压烧结 .....	139
6.2.3 其他烧结方法 .....	139
6.3 水泥熟料的烧成 .....	140
6.3.1 水泥熟料的形成 .....	140
6.3.2 水泥熟料煅烧方法 .....	141



6.4 其他材料制备方法 .....	142	[思考题] .....	143
6.4.1 固相外延 .....	142	[参考文献] .....	144
6.4.2 高压制备 .....	143		
<b>第7章 基于气相-固相转变的材料制备</b> .....			145
7.1 物理气相沉积 .....	145	7.2.1 CVD的化学反应类型 .....	153
7.1.1 真空蒸发镀膜 .....	145	7.2.2 CVD的分类 .....	154
7.1.2 溅射镀膜 .....	147	7.2.3 CVD的特点 .....	154
7.1.3 离子镀膜 .....	150	7.2.4 CVD的应用 .....	154
7.1.4 分子束外延 .....	150	[思考题] .....	155
7.2 化学气相沉积 .....	152	[参考文献] .....	155

### 第3篇 典型无机非金属材料生产工艺

<b>第8章 无机非金属材料生产中的共性与个性</b> .....			156
8.1 无机非金属材料生产过程的共性 .....	156	晶体类 .....	162
8.1.1 原料 .....	156	8.2.3 陶瓷、砖瓦、耐火材料类 .....	162
8.1.2 粉料的制备 .....	157	8.3 无机非金属材料的几种典型生产工艺	
8.1.3 原料的均化 .....	157	流程 .....	163
8.1.4 高温热处理 .....	158	8.3.1 水泥生产工艺流程 .....	163
8.1.5 成形 .....	159	8.3.2 玻璃生产工艺流程 .....	163
8.1.6 干燥 .....	160	8.3.3 陶瓷生产工艺流程 .....	166
8.2 无机非金属材料生产过程的个性 .....	161	[思考题] .....	166
8.2.1 胶凝材料类 .....	161	[参考文献] .....	166
8.2.2 玻璃、玻璃纤维、铸石、人工			
<b>第9章 原料</b> .....			167
9.1 原料的选择与预处理 .....	167	9.4.2 黏土质原料 .....	181
9.2 原料的种类和性质 .....	167	9.4.3 校正原料 .....	183
9.2.1 硅质原料 .....	167	9.4.4 辅助原料 .....	183
9.2.2 黏土类原料 .....	168	9.5 玻璃原料 .....	183
9.2.3 钙质原料 .....	173	9.5.1 主要原料 .....	184
9.2.4 长石类原料 .....	174	9.5.2 辅助原料 .....	187
9.2.5 其他原料 .....	174	9.5.3 碎玻璃 .....	189
9.3 粉末原料的制备 .....	176	9.6 陶瓷原料 .....	189
9.3.1 氮化物粉末的制备 .....	176	9.6.1 黏土类可塑性原料 .....	189
9.3.2 碳化合物粉末的制备 .....	177	9.6.2 石英类非可塑性原料 .....	191
9.3.3 硼化物粉末的制备 .....	178	9.6.3 熔剂性原料 .....	192
9.3.4 氧化铝粉末的制备 .....	178	[思考题] .....	194
9.4 水泥原料 .....	179	[参考文献] .....	194
9.4.1 石灰质原料 .....	180		
<b>第10章 硅酸盐水泥的制备</b> .....			195
10.1 硅酸盐水泥的组成设计 .....	195	10.2.2 熟料矿物组成的计算 .....	199
10.1.1 硅酸盐水泥对矿物组成的		10.2.3 熟料真实矿物组成与计算矿物	
选择 .....	195	组成的差异 .....	201
10.1.2 硅酸盐水泥的组成设计 .....	195	10.2.4 配料计算 .....	201
10.1.3 熟料中的矿物及其作用 .....	196	10.3 配合料(生料)的制备 .....	206
10.2 配料计算 .....	197	10.3.1 破碎 .....	206
10.2.1 熟料的率值 .....	197	10.3.2 粉磨 .....	207



10.4	硅酸盐水泥熟料的煅烧	210	10.5.1	熟料的储存	230
10.4.1	煅烧过程中的物理化学变化	210	10.5.2	水泥组成材料及其作用	230
10.4.2	回转窑内熟料的煅烧	219	10.5.3	水泥制成	231
10.4.3	新型干法水泥生产技术	222	[思考题]		234
10.4.4	水泥熟料的冷却	229	[参考文献]		234
10.5	水泥制成	230			
<b>第 11 章</b>	<b>混凝土</b>	235			
11.1	混凝土的组成材料	235	11.3	混凝土结构与性能	240
11.1.1	集料	235	11.3.1	混凝土结构	240
11.1.2	胶凝材料——水泥	237	11.3.2	混凝土拌和物性能	242
11.1.3	水	237	11.3.3	硬化混凝土的性能	244
11.1.4	外加剂	237	11.4	混凝土生产工艺流程	250
11.2	混凝土的配合比设计	237	[思考题]		251
11.2.1	混凝土配合比设计基本要求	237	[参考文献]		251
11.2.2	混凝土配合比设计计算步骤	238			
<b>第 12 章</b>	<b>浮法玻璃生产工艺</b>	252			
12.1	配合料及配合料制备	252	12.3.1	浮法玻璃成形过程及其对锡槽的要求	269
12.1.1	配合料制备	252	12.3.2	浮法玻璃成形原理	272
12.1.2	玻璃组成的设计和配合料计算	252	12.4	浮法玻璃的退火	274
12.1.3	与配料计算相关的参数	253	12.4.1	概述	274
12.1.4	配料计算	254	12.4.2	退火工艺制度的计算	275
12.1.5	原料的称量	257	12.4.3	钢壳体的退火窑结构	277
12.1.6	原料的混合	258	12.5	玻璃的缺陷	280
12.1.7	配合料 REDOX 控制	258	12.5.1	气泡	280
12.2	玻璃熔制	258	12.5.2	结石(结晶夹杂物)	281
12.2.1	配合料的熔化	258	12.5.3	条纹和节瘤(玻璃态夹杂物)	282
12.2.2	玻璃熔制工艺制度	263	[思考题]		282
12.2.3	浮法玻璃熔窑	266	[参考文献]		282
12.3	浮法玻璃成形及锡槽	269			
<b>第 13 章</b>	<b>微晶玻璃生产工艺</b>	283			
13.1	烧结法微晶玻璃的制备工艺	283	13.2.5	晶化	287
13.1.1	烧结法工艺的特点	283	13.2.6	微晶玻璃的切、磨、抛工艺	288
13.1.2	玻璃颗粒的烧结	283	13.3	微晶玻璃的缺陷及质量控制	289
13.2	微晶玻璃的生产过程	283	13.3.1	烧结法微晶玻璃的缺陷与控制	289
13.2.1	概述	284	13.3.2	色斑	292
13.2.2	原料制备	284	13.3.3	色差	292
13.2.3	玻璃的熔制	285	[思考题]		294
13.2.4	玻璃颗粒的储存、烘干与筛分	286	[参考文献]		294
<b>第 14 章</b>	<b>陶瓷生产工艺</b>	295			
14.1	概述	295	14.2.5	坯料性能的调整途径	304
14.2	陶瓷坯料及制备	296	14.3	陶瓷成型	305
14.2.1	确定坯料配方的原则	296	14.3.1	陶瓷的成型方法分类及特点	305
14.2.2	坯体组成的表示方法	296	14.3.2	干法成型主要方法	307
14.2.3	配料计算	297	14.3.3	塑性成型主要方法	307
14.2.4	坯料制备	299	14.3.4	浆料成型主要方法	308

14.4 釉料及色料 .....	308	14.5.1 坯、釉在烧成过程中的物理化学 变化 .....	319
14.4.1 釉的作用及分类 .....	308	14.5.2 烧成制度的制定 .....	321
14.4.2 釉层的性质 .....	309	14.5.3 烧成设备 .....	322
14.4.3 坯釉适应性 .....	311	14.5.4 烧成方式的选择 .....	325
14.4.4 釉料的组成与配料计算 .....	311	14.6 陶瓷产品的缺陷分析 .....	326
14.4.5 釉料配制原则 .....	314	14.6.1 陶瓷缺陷的分类 .....	326
14.4.6 釉料制备 .....	315	14.6.2 主要缺陷分析 .....	326
14.4.7 施釉 .....	316	[思考题] .....	329
14.4.8 陶瓷色釉料 .....	316	[参考文献] .....	329
14.5 普通陶瓷的烧成 .....	319		
<b>第 15 章 纳米材料制备技术</b> .....			330
15.1 基本概念 .....	330	15.4.2 纳米薄膜的分类 .....	351
15.1.1 纳米材料的分类 .....	330	15.4.3 纳米薄膜的制备方法 .....	351
15.1.2 纳米材料的基本效应 .....	330	15.4.4 纳米薄膜的性能 .....	352
15.2 零维纳米材料 .....	333	15.4.5 纳米薄膜的应用 .....	353
15.2.1 基本概念 .....	333	15.5 三维纳米材料 .....	355
15.2.2 纳米粒子的制备方法 .....	333	15.5.1 基本概念 .....	355
15.3 一维纳米材料 .....	341	15.5.2 纳米玻璃 .....	356
15.3.1 基本概念 .....	341	15.5.3 纳米陶瓷 .....	360
15.3.2 碳纳米管 .....	343	15.5.4 纳米复合材料 .....	364
15.4 二维纳米材料 .....	350	[思考题] .....	368
15.4.1 基本概念 .....	350	[参考文献] .....	368

# 绪 论

## 0.1 无机非金属材料定义

无机非金属材料 (inorganic nonmetallic materials) 是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料, 是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。无机非金属材料的命名是 20 世纪 40 年代以后, 随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。它与钢铁、有色冶金、有机高分子材料一起作为四大材料在我国经济建设中起着重要的作用。

一般来说, 无机非金属材料在化学组成及化学键组成上与金属材料 and 有机高分子材料明显不同。其化学键主要为离子键、共价键或离子-共价混合键。这些化学键所特有的高键能、高键强赋予这一大类材料以高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度和良好的抗氧化性等基本属性, 以及宽广的导电性、隔热性、透光性及良好的铁电性、铁磁性和压电性。但大多数无机非金属材料具有抗拉强度低、韧性差等缺点, 如将其与金属材料、有机高分子材料复合, 将有效地改善无机非金属材料的性能。

根据无机非金属材料功能与作用的不同, 可以将无机非金属材料划分为传统材料和新材料。这里的“新材料”包含两个层面的含义: 一是对传统材料的再开发, 使其在性能上获得重大突破的材料; 二是采用新工艺和新技术合成, 开发出具有各种新的和特殊功能的材料。由此可以看出, 新材料与新工艺、新技术有着密切的关系。一方面, 新工艺与新技术的使用不断地扩展了人类的技术手段, 从而使人类更加充分地开发传统材料中的各种新的性能或功能, 更重要的是, 通过新的合成工艺与技术, 使人类获得种类更多、性能更佳的材料, 如纳米材料、多相材料。另一方面, 诸多具有特殊性能材料的涌现, 推动了高新技术的快速发展。这一点, 在现代社会表现得尤为突出。可以说, 新材料已经成为高新技术的基础与先导。

传统的无机非金属材料品种繁多, 主要是指由  $\text{SiO}_2$  及其硅酸盐化合物为主要成分制成的材料, 包括陶瓷、玻璃、水泥、建筑(墙体)材料和耐火材料等。此外, 搪瓷、磨料、铸石(辉绿岩、玄武岩等)、碳素材料、非金属矿(石棉、云母、大理石等)也属于传统的无机非金属材料。新型无机非金属材料是用氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物以及各种无机非金属化合物经特殊的先进工艺制成的材料。主要包括玻璃纤维和特种玻璃纤维、玻璃钢/复合材料、特种玻璃及深加工玻璃、石英玻璃、特种陶瓷、人工晶体、特种密封材料及特种胶凝材料等。这些材料和产品具有轻质、高强、耐磨、抗腐、耐高温、抗氧化以及特殊的电、光、声、磁等一系列优异综合性能, 是其他材料难以替代的功能材料和结构材料。这些无机非金属材料中以水泥、玻璃、陶瓷与耐火材料的生产量最大, 研究与使用最为普遍, 与人们的生活质量和国民经济息息相关。

## 0.2 无机非金属材料在国民经济建设中的作用和地位

20 世纪 60 年代以来, 随着材料工程技术的迅猛发展, 材料已经不仅在种类上得到拓

展，而且在光、声、电、磁、力、超导、高塑，以及超强、超硬、耐高温等机能与性能上获得了极大的扩展与深度发掘。此类新材料的出现，推进了高技术产品的智能化与微型化，从而极大地影响着人类的现代生活、社会结构与文化价值。新材料与新能源以及新材料与新能源中的高新技术的发展，正在极大地丰富着人类的物质与精神生活。20世纪80年代出现的新技术革命把新材料、信息技术、生物技术并列为新技术革命的重要标志，对社会文明和经济发展起到了巨大的推动作用。

近年来，无机非金属材料不仅在品种上有了空前的发展，而且内涵在进一步延伸，其应用领域已由原建筑、建材、轻工、石油、化工等传统技术产业拓展到信息、航空、航天、新能源、交通、微电子、核技术、军工等高新技术产业，如图 0-1 所示。

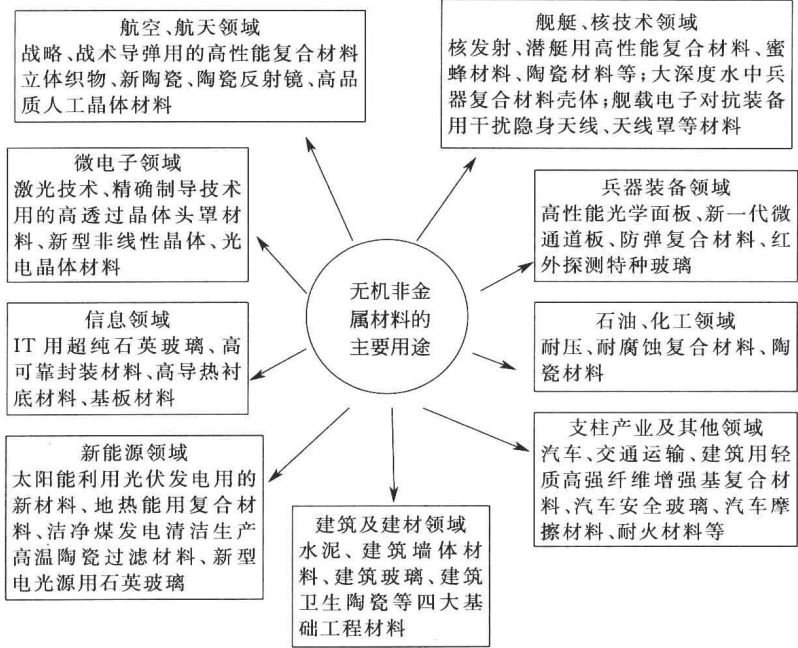


图 0-1 无机非金属材料的应用领域

在传统技术产业，传统的无机非金属材料是工业和基本建设所必需的基础材料。例如水泥是一种重要的建筑材料；建筑玻璃、建筑卫生陶瓷和建筑墙体材料三大类材料是房屋建筑材料的主体；耐火材料与高温技术，尤其与钢铁工业的发展关系密切；各种规格的仪器玻璃、普通的光学玻璃以及日用陶瓷、化工陶瓷和电瓷等与人们的生产、生活休戚相关。它们产量大，用途广。其他产品，如搪瓷、磨料（碳化硅、氧化铝）、铸石（辉绿岩、玄武岩等）、碳素材料、非金属矿（石棉、云母、大理石等）在轻工、石油、化工等领域有重要用途。

在高新技术产业，无机非金属新材料因其具有独特的性能，已成为不可缺少的关键材料。例如稀土掺杂石英玻璃广泛应用于导弹、卫星及坦克火控武器等激光测距系统，耐辐照石英玻璃应用于各种卫星及宇宙飞船的监控系统；光学纤维面板和微通道板作为增强器和微光夜视元件等在全天候兵器中得到应用；航空玻璃为中国各类军用飞机提供了关键部件。人工晶体材料中激光、非线性光学和红外等晶体，用于弹道制导、电子对抗、潜艇通信、激光武器等。特种陶瓷中，耐高温、高韧性陶瓷可用于航空、航天发动机、卫星遥感，可制作特殊性能的防弹装甲陶瓷及特种纤维及用于电子对抗等。目前已开发了近四千种高性能、多功能无机非金属新材料新品种。这些高性能材料在发展现代武器装备中起到十分重要的作用。

### 0.3 无机非金属材料工业的进展

随着人类文明和科学技术的飞速发展，无机非金属材料工业产生了巨大的飞跃，取得了重大的进展。在第一次产业革命中问世的水泥工业，一个半世纪以来，工艺和设备不断改进，间歇式的土窑烧制水泥熟料成为历史。1877年发明了用回转窑（rotary kiln）烧制水泥熟料的新技术。1910年立窑（shaft kiln）首次实现了机械化连续生产。1928年出现了较大幅度降低水泥热耗、提高窑产量的立波尔窑（Lepol kiln）。20世纪50~60年代，悬浮预热器窑（dry process kiln with suspension preheater）的出现和电子计算机在水泥工业中的应用，使水泥热耗大幅度降低，水泥制造设备也不断更新换代。特别是1971年日本开发的水泥窑外分解技术（precalcining technology），实现了水泥工业的重大突破，使干法生产的熟料质量显著提高，近10年来，水泥生产规模进一步扩大，新型干法生产取得了决定性的主导地位，生产效率显著提高，单机能力达到了日产10000t熟料的水平，熟料热耗（heat consumption of clinker）降低到3000kJ/kg熟料以下。同时，新型粉磨技术的发展，使水泥生产电耗降低到100kW·h/t以下。此外，为配合干法生产的需要，在均化、环保、自动化以及余热发电等项技术的应用方面取得了新的成就，使水泥生产条件发生了显著变化。

我国是制造陶器最早的国家之一，也是发明瓷器最早的国家。机械化的隧道窑于1899年才由法国的福基罗（Faugeron）创建成功，用于烧成陶器，其后德国用于烧成瓷器，经过逐渐改进发展成为现代化的隧道窑，并且正在向快速烧成和自动化方向发展。近代发展起来的辊道窑使建筑砖生产的热效率显著提高，窑内温度更加均匀，生产自动化水平进一步提高。

机制平板玻璃自20世纪问世以来，工艺和设备不断改进，有槽法、无槽法等成型工艺成为历史。1957年，英国人匹尔金顿（Pilkington）发明了浮法工艺（PB法），并获得了专利权。匹尔金顿公司于1959年建厂，生产出质量可与磨光玻璃相媲美的浮法玻璃，拉制速度数倍乃至数十倍于传统工艺。1963年，美国、日本等玻璃工业发达的国家，争先恐后地向英国购买PB法专利，纷纷建立了浮法玻璃生产线，在极短的时间内，浮法玻璃取代了昂贵的磨光玻璃，占领了市场。随着浮法玻璃生产成本的降低，取代了平板玻璃的传统工艺，成为世界上生产平板玻璃最先进的工艺方法。随着浮法工艺的发展，玻璃熔窑规模趋于大型化，目前平板玻璃熔窑的日熔化能力已普遍采用400~700t级，有的已达1000t级。浮法玻璃生产线生产管理的自动化程度也不断提高，许多浮法线不同程度地实现了以计算机和监视装置控制的自动化生产，有的实现了全部自动化。

我国无机非金属新材料是20世纪50年代末期为配合研制“二弹一星”而创建和发展起来的。研制和生产了玻璃纤维与特种玻璃纤维、纤维增强复合材料、特种玻璃/深加工玻璃、石英玻璃、特种陶瓷、人工晶体、特种密封材料和特种胶凝材料等八大材料上万种产品，初步形成了生产、设计、科研、教育配套的新型产业，为国防军工、高新技术产业提供了关键产品，为国民经济各部门提供了高效、节能、防腐、环境保护等新材料。

总之，无机非金属材料工业的发展经历了漫长的历史时期。生产工艺和设备已由手工操作发展为机械化程度高的自动控制；生产品种日益丰富，质量不断提高，先进的、自动化程度高的生产工艺、设备及新技术的成功应用，大大减轻了无机非金属材料工业对生态环境的污染。可以预言，随着科学技术的发展，无机非金属材料工业将不断改善其环境协调性，并且利用其对工业废弃物的巨大消化能力，成为环境保护中不可或缺的重要工业。但与国际先进制造技术发展趋势相比，我国无机非金属材料工业还存在很大的差距。

## 0.4 无机非金属材料国际发展趋势

近些年，随着科学技术的进步，无论是传统无机非金属材料，还是无机非金属新材料都有了一些新的发展趋势。

### (1) 生态与环保意识加强，建立科学的评价体系，实现可持续发展

西方发达国家在促进传统无机非金属材料产业健康、可持续发展方面采取了许多重要措施。世界发达国家十分重视建材工业的可持续发展与绿色评价。生态评价也成为世界可持续发展的一个重要手段。目前，许多国家正在进行“生态城市”的建设与实践，推广建筑节能技术材料，使用可循环材料等，改善城市生态系统状况。由此，提出了绿色建材、环保建材与节能建材的概念，并开展了大量的研究与实践工作。与西方发达国家相比，我国还存在很大的差距，特别是缺乏立法支持与技术标准的指导以及相应组织的管理与监督，使我国的传统无机非金属材料工业发展还有很大的提升空间。面对资源和环境对我国经济发展的严峻考验，国民经济的可持续发展战略显得愈加重要。

### (2) 向着节能、降耗的方向发展

传统的无机非金属材料工业是能源消耗大户，在世界能源日益短缺的今天，如何使生产节能、降耗，以及如何生产出高质量的建筑节能、保温产品是建材工业发展的重要趋势。应选择资源节约型、污染最低型、质量效益型、科技先导型的发展方式。新型墙体材料、高质量门窗、中空玻璃将大量应用。将向着提高材料性能、使用寿命的方向发展，低寿命设计、大量重复建设已经严重制约了城市建设的发展。现代化建筑需要高性能建筑材料的支持，而提高建筑的耐久性又对建筑材料的使用寿命提出了更高的要求。

### (3) 单线生产能力向大型化发展

无论是水泥工业、玻璃工业，还是陶瓷工业，单条生产线有大型化的趋势。生产线的大型化可以有效提高产品的质量，降低能源消耗。

### (4) 向着智能化方向发展

建筑的智能化需要建筑材料的支持。随着技术的进步和人们生活水平的提高，建筑材料的安全性智能诊断等智能技术将更多地应用于建筑中。

### (5) 向着复合化、多功能化方向发展

复合材料具有单一材料所无法满足的使用功能，是建筑材料的发展趋势，对建筑材料的功能要求越来越趋向于多功能化。

美国、日本、西欧等所有发达国家和地区在其科技发展战略中都把无机非金属新材料的发展放在优先发展的重要位置。例如，美国为了保持在高技术和军事装备方面的领先地位，在先后制定的《先进材料与技术计划（AMPP）》和《国家关键技术报告》中，将新材料列为六大关键技术之首，而无机非金属新材料占有相当大的比例；日本发表的《21世纪初期产业支柱》所列的新材料领域的14项基础研究计划中，其中7项涉及无机非金属新材料的研究领域。

## 0.5 无机非金属材料工学的任务

材料科学与工程的定义是：研究有关材料成分/结构、制备/合成、性能和使用效能及其关系的科学技术与生产。材料的研究要从材料合成到服役的全过程综合性进行，而且应特别



重视材料在制备过程中的重现性和材料品质的一致性等重要实际问题。关注无机非金属材料从合成到服役的全过程，如何解决无机非金属材料在制备过程中的重现性和材料品质的一致性问题，正是无机非金属材料工学课程所承担的最重要任务。

合成与制备是研究如何将原子、分子聚合起来并最终转变为有用产品的一系列连续过程，是提高材料质量、降低生产成本的关键，也是开发新材料、新器件的中心环节。在合成与制备过程中，工程性的研究固然重要，但基础研究也不应忽视。对材料合成与制备的动力学过程的研究可以揭示过程的本质，为改进制备方法、建立新的制备技术提供科学依据。

组成是指构成材料物质的原子、分子、添加物及其分布；结构则指这些组成原子、分子在不同层次上彼此结合的形式、状态和空间分布。组成与结构是材料的基本表征。它们一方面是特定的合成与制备条件的产物；另一方面又是决定材料性能与使用效能的内在因素。了解材料的组成与结构及它们同合成与制备之间、性能与使用效能之间的内在联系，长久以来一直是无机非金属材料科学与工程的基本研究内容。

性能指材料固有的物理、化学特性，是确定材料用途的依据。使用效能则是材料以特定的产品形式在使用条件下所表现出的效能，它是材料的固有性能、产品设计、工程特性、使用环境和效能的综合表现，通常以寿命、效率、可靠性、效益、成本等指标来衡量。

总之，材料科学的发展前景是从宏观到微观，从定性研究进入定量描述，为新材料的探索和最大限度地使用现有材料提供科学依据。无机非金属材料工艺学的任务就是不断利用材料科学及其他相邻学科的发展成就，实现按使用性能要求来设计和制造材料的目标，无机非金属材料的制备正处于从经验积累向材料科学型转变的阶段，必将从工艺学逐步向制备科学的方向发展。无机非金属材料生产工艺也将向节能化、大型化、自动化和环境协调化方向迅速迈进，同时将带动原料预均化技术、粉料均化技术、高功能破碎、高效粉磨技术以及为之服务的自动化技术和环境保护技术的全面配套发展，一个崭新的无机非金属材料工业即将展现在人们面前。

本教材将帮助无机非金属材料工程专业及材料科学与工程专业学生完成以下四个学习目标：

① 掌握无机非金属材料的原料的种类、组成、晶体结构及其特性，掌握各种原料在材料制备过程中的作用。掌握无机非金属材料生产对原料性质的要求。

② 掌握原料的加工、预处理的工艺技术和方法。熟悉无机非金属材料的组成以及组成与性能的关系，掌握配料计算方法和配合料的制备技术。

③ 掌握水泥、玻璃、陶瓷等典型无机非金属材料在制备过程中的物理化学变化，传统材料的制备工艺原理和技术、影响因素及控制措施。了解新材料的设计理论、制备工艺等。

④ 了解单晶生长的物理化学基础理论，了解纳米材料及各种低维材料的制备方法和工艺原理。

本书分为3篇，第1篇为基础理论，介绍无机非金属材料的共性基础理论，内容分4章，包括无机非金属材料概述，无机非金属材料晶态结构，非晶态及玻璃态结构，无机非金属材料的微观结构演变。第2篇为制备方法，内容分3章，包括基于液相-固相转变的材料制备，基于固相-固相转变的材料制备，基于气相-固相转变的材料制备，系统介绍了无机非金属材料的制备方法及原理，重要内容包括晶体材料、粉末材料、薄膜材料、块状材料的制备，对玻璃、水泥熟料、陶瓷进行了制备原理及方法概述。第3篇为典型无机非金属材料生产工艺，内容分8章，系统介绍无机非金属材料生产工艺及质量控制，包括水泥、混凝土、陶瓷、玻璃、微晶玻璃、纳米材料的制备方法及工艺。

受课程学时限制，本教材对原料、工艺设备仅做简单介绍，关于无机非金属材料热工设备详细知识，将在后续课程中学习。



# 第 1 篇

## 无机非金属材料基础理论

无机非金属材料多是离子键、共价键或离子-共价混合键，晶体的对称性较金属低，导致无机非金属材料耐磨性好且强度高，而延展性不及金属，又由于键的方向性，使其导电性通常不如金属。为更好地了解无机非金属材料的结构与性能关系，进而学习材料设计理论，本篇在回顾晶体结构、非晶态结构、析晶与成核、分相等材料科学基础知识的同时，重点归纳提炼无机非金属材料组成-结构-性能关系问题，总结无机非金属材料共性基础理论，学习无机非金属材料设计依据和微观结构的演化，了解温度、成分和时间等重要工艺变量变化对无机非金属材料结构性能的影响，掌握控制材料显微层次结构的方法等。

本篇内容分 4 章。第 1 章无机非金属材料概述，介绍无机非金属材料的定义、组成和结构的共性知识，介绍典型无机非金属材料的分类与性能等；第 2 章无机非金属材料晶体结构，在介绍典型无机化合物晶体、硅酸盐晶体、固溶体的结构的基础上，探讨无机非金属材料组成-结构-性能关系，继而学习无机非金属材料中常见矿物的结构特点和主要性能；第 3 章非晶态及玻璃态结构，介绍非晶态及玻璃态材料概念、结构特点和性质，学习玻璃结构学说、硅酸盐玻璃的结构特征，较详细地介绍玻璃的性质以及影响其组成结构因素；第 4 章无机非金属材料的微观结构演变，介绍微观结构演化的理论基础，熔体冷却过程中的结晶化和玻璃化基本原理，微晶玻璃的组成、结构和应用，玻璃分相和玻璃着色机理。

### 第 1 章 无机非金属材料概述

无机非金属材料 (inorganic nonmetallic materials) 是由某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。在生产生活中以硅酸盐材料的使用最为普遍。

从物质组成特征来看，无机非金属材料有单组分材料和多组分材料。单组分无机材料是指主要由 1 种无机化合物组成的材料，如硅质石英材料、铝质刚玉材料、碳质石墨、金刚石材料等。多组分材料则是由多种无机化合物组成的材料，水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料等是应用最为广泛的多组分无机非金属材料。

#### 1.1 无机非金属材料的结构特征

##### 1.1.1 无机非金属材料的结构

结构是指组成原子、分子在不同层次上彼此结合的形式、状态和空间分布，包括原子与

电子结构、分子结构、晶体结构、相结构、晶粒结构、表面与晶界结构、缺陷结构等。考察无机非金属材料的结构一般从原子与电子结构、原子的空间排列、相结构三个层次来描述。

(1) 第一个层次——原子与电子结构 原子中电子的排列很大程度上决定原子间的结合方式,无机非金属材料中阴离子多位于ⅦA、ⅥA、ⅤA、ⅣA族,容易得到电子,决定了无机非金属材料原子间的键合主要依靠离子键、共价键或离子键与共价键组成的混合键来结合。因此,无机非金属材料中的晶体多数属于离子晶体、共价晶体或混合键结合的晶体。此键合特征也决定了无机非金属材料具有高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度和良好的抗氧化性等基本属性,同时可以具有宽广的导电性、导热性和透光性,良好的铁电性、铁磁性和压电性。

(2) 第二个层次——原子的空间排列 如果无机非金属材料中的原子排列规则并具有严格的周期性,就形成晶态结构,反之则为非晶态结构。不同的结晶状态具有不同的性能,如石英单晶具有多种变体,各向异性, Si—O 键的强度很高,因此熔点高、硬度大、化学稳定性好,而石英玻璃无固定熔点、各向同性、性脆。原子排列中存在缺陷会使无机非金属材料性能发生显著变化,如晶体中的色心就是由于晶体中存在点缺陷而使透明晶体着色,甚至可作为激光晶体。

(3) 第三个层次——相结构 从相结构特征来看,无机非金属材料有单相材料和多相材料。单相材料有单晶材料(如石英晶体、单晶硅、单晶锗、蓝宝石、金刚石等)、多晶材料(如多晶硅)、非晶态材料(如玻璃)。大多数无机非金属材料(如水泥、微晶玻璃、陶瓷、耐火材料等)属于多相材料,晶相(单晶或多晶)与玻璃相多相共存,其中每一相都有自己独特的原子排列方式和性能,不同晶粒的原子排列不同,从而影响材料的性能,其中晶粒的种类、大小、形状、晶界起关键作用。因而控制无机非金属材料结构中相的种类、大小、分布和数量就成为控制材料性能的有效方法。

### 1.1.2 无机非金属材料的结构特征

典型无机非金属材料组成结构特征见表 1-1。

表 1-1 典型无机非金属材料组成结构特征

材料名称	物质组成特征	键合特征	结晶状态	相结构特征	性能特点
蓝宝石	单组分/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	离子键	晶体	单相	很高硬度及强度
金刚石	单组分/C	共价键	晶体	单相	高硬度,高熔点
石墨	单组分/C	层间分子间力 层内共价键	晶体单晶	单相	优越的润滑性
石英晶体	单组分/ $\text{SiO}_2$	离子键	晶体单晶	单相	高硬度,高熔点,好的光学性能
硅酸盐水泥	多组分	离子键、混合键	晶相与玻璃相	多相共存/ $\text{C}_2\text{S}$ , $\text{C}_3\text{A}$ , $\text{C}_4\text{AF}$ , 液相	胶凝性能,一定强度
硫酸盐水泥	多组分	离子键、混合键	晶相与玻璃相	晶相与玻璃相多 相共存	胶凝性能,一定强度
矿渣水泥	多组分	离子键、混合键	晶相与玻璃相	晶相与玻璃相多 相共存	胶凝性能,一定强度
石英玻璃	多组分/ $\text{SiO}_2$ 占 90%以上	混合键	非晶体	玻璃相	各向同性,高熔点
钠钙硅玻璃	多组分	混合键	非晶体	玻璃相	各向同性
硼酸盐玻璃	多组分	混合键	非晶体	玻璃相	各向同性,低熔点
磷酸盐玻璃	多组分	混合键	非晶体	玻璃相	各向同性,生物活性
陶瓷	多组分	离子键、混合键	晶相与玻璃相	晶相与玻璃相多 相共存	高熔点、高硬度、耐腐蚀、 耐磨损、脆性
耐火材料	多组分	离子键、混合键	晶相与玻璃相	晶相与玻璃相多 相共存	高熔点、高强度