

# 非金属材料

FEIJINSHU KUANGWU CAILIAO

郑水林 编著



化学工业出版社

71.224  
321

# 非金属矿物材料

FEIJINSHU KUANGWU CAILIAO

郑水林 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统论述了非金属矿物材料的定义与特征、分类、用途、主要研究内容和发展趋势；对非金属矿物材料原材料的结构和性能进行了较全面的介绍；并按照材料的功能性系统论述了非金属矿物填料和颜料，非金属矿物基摩擦材料，非金属矿物基密封材料，金属矿物保温隔热材料，非金属矿物基电功能材料，非金属矿物胶凝与流变材料，非金属矿物吸附、催化与环保材料，建筑装饰材料，聚合物/黏土纳米复合材料等9大类非金属矿物材料的结构、性能、加工、应用及其加工和应用基础。全书共11章。

本书可供从事非金属矿物材料、无机非金属材料、复合材料、功能材料以及矿物加工、非金属矿深加工、化工、环境工程等专业领域的科研和工程技术人员以及大专院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

非金属矿物材料/郑水林编著. —北京：化学工业出版社，2007.5

ISBN 978-7-122-00076-7

I. 非… II. 郑… III. 非金属矿物-材料 IV. TB32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 034293 号

---

责任编辑：朱 彤

文字编辑：杨欣欣

责任校对：郑 捷

装帧设计：张 辉

---

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 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张24¼ 字数600千字 2007年5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：48.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

在现代工业和社会中随处可以见到非金属矿物材料的应用领域,从航空航天、微电子、通信等高新技术产业到建材、交通、电力、石油、化工、机械、轻工等传统产业;从节能、环保新技术领域到现代高速发展的材料工业。非金属矿物材料在现代产业和社会发展中的重要性是毋庸置疑的。非金属矿物材料源于非金属矿物和岩石,其来源广,功能性突出;在加工和应用过程中环境负荷小,污染轻。它是 21 世纪各国着力开发的新型无机非金属功能材料。非金属矿物材料开发和应用的程度和水平也从一个侧面反映了现代社会和工业的发达程度。

非金属矿物材料是从事矿物学、岩石学与结晶学以及矿物加工人员于 20 世纪 80 年代提出的。进入 21 世纪后非金属矿物材料的研究开发呈现出前所未有的热度。但什么是非金属矿物材料?它的内涵、范围及特征是什么?目前一直没有定论。在已公开出版的有关著作中,非金属矿物材料研究、开发和科研工作者,常常自觉或不自觉地将玻璃、陶瓷、耐火材料等纳入非金属矿物材料;也有一些著述中将矿物加工作为矿物材料的一部分进行论述。时至今日,虽然非金属矿物材料在国民经济各部门及社会生活中得到了广泛应用,在我国某些高等学校已作为专科或本科专业,矿物材料工程专业也已经作为一级学科矿业工程或材料科学与工程下设置的二级学科博士点和硕士点,但对于非金属矿物材料或矿物材料的定义、内涵及其特征目前尚未进行专门的讨论和规范。

本书作为一本系统论述非金属矿物材料的专著,参考国内外有关矿物材料和非金属矿物材料的论述和 2005 年非金属矿工业协会受我国科技部委托组织完成的《非金属矿物材料发展战略研究报告》,对非金属矿物材料进行了定义,并提出了非金属矿物材料的特征和主要研究内容。在此基础上,首先主要对非金属矿物材料原材料的结构和性能进行了较全面的介绍。然后,按照功能性将非金属矿物材料分为非金属矿物填料和颜料、非金属矿物基摩擦材料、非金属矿物基密封材料、非金属矿物保温隔热材料、非金属矿物基电功能材料、非金属矿物胶凝与流变材料、非金属矿物吸附、催化与环保材料、建筑装饰材料、聚合物/黏土纳米复合材料等 9 大类,分别对其结构、性能、品种、加工、应用等进行了系统论述。全书共 11 章。

本书在撰写过程中,着力考虑系统性、科学性和在研究开发及生产中的实用性。考虑到热力学性质是非金属矿物材料研究开发的重要基础数据,本书第 2 章收集整理了各种非金属矿物材料的主要热力学参数;在材料的加工技术中,尽量选择目前先进的工业化技术或中试生产技术,同时注意介绍材料的制备基础或加工原理;在加工设备中尽量介绍先进的工业化设备。另外,特别关注新技术和新材料的开发,如环境功能材料、黏土纳米复合材料等。

本书的第 1~10 章由郑水林撰写,第 11 章由杨敏撰写。在写作过程中,参考了大量前人和同行专家学者的相关著作、论文,对此,深表感谢!

非金属矿物材料是一门年轻的学科,涉及的领域较宽。许多新的品种、新的加工与制备技术及新的用途和市场还在不断开发中。与材料性能与应用相关的基础研究也在广泛开展;

与此相关的论文、专利文献浩如烟海。对这样一门新学科，虽然作者在该领域的研究开发和教学方面做了一些工作，在本文的撰写过程中也做了认真的思考、分析，提出了自己的观点，但书中肯定还存在不足之处，欢迎读者和专家学者批评斧正！

编者

2007 年 2 月

## 欢迎加入化学工业出版社读者俱乐部

您可以在我们的网站 ([www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)) 查询、购买到数千种化学、化工、机械、电气、材料、环境、生物、医药、安全、轻工等专业图书以及各类专业教材, 并可参与专业论坛讨论, 享受专业资讯服务, 享受购书优惠。欢迎您加入我们的读者俱乐部。

### 两种入会途径 (免费)

- ◇ 登录化学工业出版社网上书店 ([www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)) 注册
- ◇ 填写以下会员申请表寄回 (或传真回) 化学工业出版社

### 四种会员级别

- ◇ 普通会员      ◇ 银卡会员      ◇ 金卡会员      ◇ VIP 会员

### 化学工业出版社读者俱乐部会员申请表

|           |         |     |
|-----------|---------|-----|
| 姓名:       | 性别:     | 学历: |
| 邮编:       | 通讯地址:   |     |
| 单位名称:     | 部门:     |     |
| 您从事的专业领域: | 职务:     |     |
| 电话:       | E-mail: |     |

- 您希望出版社给您寄送哪些专业图书信息? (可多选)

☐ 化学 ☐ 化工 ☐ 生物 ☐ 医药 ☐ 环境 ☐ 材料 ☐ 机械 ☐ 电气 ☐ 安全 ☐ 能源 ☐ 农业  
☐ 轻工 (食品/印刷/纺织/造纸) ☐ 建筑 ☐ 培训 ☐ 教材 ☐ 科普 ☐ 其他 ( )

- 您希望多长时间给您寄一次书目信息?

☐ 每月 1 次    ☐ 每季度 1 次    ☐ 半年 1 次    ☐ 一年 1 次    ☐ 不用寄

- 您希望我们以哪种方式给您寄送书目? ☐ 邮寄纸介质书目 ☐ E-mail 电子书目

此表可复印, 请认真填写后发传真至 **010-64519686**, 或寄信至: 北京市东城区青年湖南街 13 号化学工业出版社发行部 读者俱乐部收 (邮编 100011)

联系方式:

热线电话: 010-64518888; 64518899    电子信箱: [hy64518888@126.com](mailto:hy64518888@126.com)

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 非金属矿物材料的定义与特征 .....  | 1  |
| 1.2 非金属矿物材料的用途与分类 .....  | 1  |
| 1.2.1 非金属矿物材料的用途 .....   | 1  |
| 1.2.2 非金属矿物材料的分类 .....   | 2  |
| 1.3 非金属矿物材料的主要研究内容 ..... | 4  |
| 1.4 非金属矿物材料的发展趋势 .....   | 4  |
| 2 非金属矿物原材料的结构与性能 .....   | 6  |
| 2.1 碳酸盐矿物 .....          | 6  |
| 2.1.1 方解石 .....          | 6  |
| 2.1.2 白云石 .....          | 8  |
| 2.1.3 菱镁矿 .....          | 10 |
| 2.2 硫酸盐矿物 .....          | 11 |
| 2.2.1 石膏 .....           | 11 |
| 2.2.2 重晶石与天青石 .....      | 18 |
| 2.2.3 明矾石 .....          | 19 |
| 2.3 碳质非金属矿物 .....        | 19 |
| 2.3.1 石墨 .....           | 19 |
| 2.3.2 金刚石 .....          | 23 |
| 2.4 层状硅酸盐矿物 .....        | 26 |
| 2.4.1 滑石 .....           | 27 |
| 2.4.2 云母 .....           | 29 |
| 2.4.3 叶蜡石 .....          | 32 |
| 2.4.4 高岭土 .....          | 35 |
| 2.4.5 膨润土 .....          | 38 |
| 2.4.6 绿泥石 .....          | 43 |
| 2.4.7 纤蛇纹石石棉 .....       | 44 |
| 2.4.8 蛭石 .....           | 46 |
| 2.4.9 伊利石 .....          | 47 |
| 2.5 链状结构硅酸盐矿物 .....      | 47 |
| 2.5.1 硅灰石 .....          | 47 |
| 2.5.2 透辉石 .....          | 50 |
| 2.5.3 透闪石 .....          | 51 |
| 2.5.4 硅线石 .....          | 52 |
| 2.5.5 凹凸棒石 .....         | 54 |
| 2.5.6 海泡石 .....          | 55 |
| 2.6 架状结构硅酸盐矿物 .....      | 56 |
| 2.6.1 石英 .....           | 56 |

|          |                         |            |
|----------|-------------------------|------------|
| 2.6.2    | 长石 .....                | 58         |
| 2.6.3    | 沸石 .....                | 62         |
| 2.7      | 岛状结构硅酸盐矿物 .....         | 65         |
| 2.7.1    | 红柱石和蓝晶石 .....           | 65         |
| 2.7.2    | 锆英石 .....               | 70         |
| 2.7.3    | 石榴子石 .....              | 72         |
| 2.7.4    | 电气石 .....               | 74         |
| 2.8      | 其他非金属矿物 .....           | 76         |
| 2.8.1    | 硅藻土 .....               | 76         |
| 2.8.2    | 水镁石 .....               | 77         |
| 2.8.3    | 三水铝石 .....              | 78         |
| 2.8.4    | 金红石 .....               | 79         |
| <b>3</b> | <b>非金属矿物填料与颜料 .....</b> | <b>81</b>  |
| 3.1      | 非金属矿物填料与颜料的作用和性能 .....  | 81         |
| 3.1.1    | 非金属矿物填料的作用和性能 .....     | 82         |
| 3.1.2    | 非金属矿物颜料的作用和性能 .....     | 90         |
| 3.2      | 非金属矿物填料与颜料的制备 .....     | 92         |
| 3.2.1    | 粉碎与分级 .....             | 93         |
| 3.2.2    | 选矿提纯 .....              | 96         |
| 3.2.3    | 超细粉碎与精细分级 .....         | 98         |
| 3.2.4    | 煅烧高岭土 .....             | 105        |
| 3.3      | 非金属矿物填料的表面改性 .....      | 109        |
| 3.3.1    | 表面改性方法 .....            | 109        |
| 3.3.2    | 表面改性设备 .....            | 110        |
| 3.3.3    | 表面改性各论 .....            | 110        |
| 3.4      | 非金属矿物颜料的表面改性 .....      | 131        |
| 3.4.1    | 颜料的有机表面改性 .....         | 132        |
| 3.4.2    | 颜料的无机表面改性 .....         | 137        |
| 3.4.3    | 珠光云母颜料的制备 .....         | 140        |
| <b>4</b> | <b>非金属矿物基摩擦材料 .....</b> | <b>143</b> |
| 4.1      | 摩擦材料的结构、组成及技术要求 .....   | 144        |
| 4.1.1    | 摩擦材料的结构与组成 .....        | 144        |
| 4.1.2    | 摩擦材料的技术要求 .....         | 147        |
| 4.2      | 石棉基摩擦材料 .....           | 148        |
| 4.2.1    | 石棉摩擦制品原料 .....          | 149        |
| 4.2.2    | 石棉摩擦材料的制备 .....         | 150        |
| 4.2.3    | 石棉摩擦材料的品种与配方 .....      | 154        |
| 4.3      | 石墨基润滑减摩材料 .....         | 158        |
| 4.3.1    | 胶体石墨 .....              | 158        |
| 4.3.2    | 石墨轴承及自润滑材料 .....        | 163        |
| <b>5</b> | <b>非金属矿物基密封材料 .....</b> | <b>164</b> |
| 5.1      | 石棉基密封材料 .....           | 164        |
| 5.1.1    | 石棉垫片 .....              | 164        |
| 5.1.2    | 石棉盘根 .....              | 169        |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 5.1.3 | 橡胶石棉垫圈               | 172 |
| 5.2   | 石墨基密封材料              | 173 |
| 5.2.1 | 可膨胀石墨                | 173 |
| 5.2.2 | 膨胀石墨                 | 175 |
| 5.2.3 | 柔性石墨密封材料             | 178 |
| 6     | 非金属矿物保温隔热材料          | 184 |
| 6.1   | 矿物纤维型保温隔热材料          | 184 |
| 6.1.1 | 岩棉及其制品               | 184 |
| 6.1.2 | 矿渣棉及其制品              | 187 |
| 6.1.3 | 矿棉吸声板                | 188 |
| 6.1.4 | 硅酸铝耐火纤维              | 189 |
| 6.2   | 石棉基保温隔热材料            | 189 |
| 6.2.1 | 石棉纺织制品               | 190 |
| 6.2.2 | 石棉保温制品               | 196 |
| 6.3   | 多孔型保温隔热材料            | 199 |
| 6.3.1 | 膨胀珍珠岩及其绝热制品          | 199 |
| 6.3.2 | 膨胀蛭石及其制品             | 205 |
| 6.3.3 | 微孔硅酸钙及其制品            | 210 |
| 7     | 非金属矿物基电功能材料          | 216 |
| 7.1   | 石墨基电功能材料             | 216 |
| 7.1.1 | 石墨电极                 | 216 |
| 7.1.2 | 显像管用石墨乳              | 219 |
| 7.1.3 | 氟化石墨                 | 221 |
| 7.2   | 云母基电功能材料             | 223 |
| 7.2.1 | 云母纸                  | 223 |
| 7.2.2 | 云母纸制品                | 228 |
| 7.3   | 石棉基电绝缘材料             | 231 |
| 7.3.1 | 绝电材料                 | 231 |
| 7.3.2 | 电解槽用功能材料             | 232 |
| 8     | 非金属矿物胶凝与流变材料         | 234 |
| 8.1   | 石膏基胶凝材料              | 234 |
| 8.1.1 | $\beta$ 型半水石膏(建筑石膏)  | 234 |
| 8.1.2 | $\alpha$ 型半水石膏(高强石膏) | 240 |
| 8.1.3 | 过烧石膏和多相石膏的生产方法与设备    | 244 |
| 8.2   | 膨润土基胶凝材料             | 246 |
| 8.2.1 | 胶体级膨润土浆料             | 246 |
| 8.2.2 | 膨润土凝胶                | 252 |
| 8.2.3 | 有机膨润土                | 253 |
| 8.3   | 其他黏土胶凝材料             | 260 |
| 8.3.1 | 凹凸棒石胶凝材料             | 260 |
| 8.3.2 | 海泡石胶凝材料              | 262 |
| 8.3.3 | 累托石胶凝材料              | 263 |
| 9     | 非金属矿物吸附、催化与环保材料      | 265 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 9.1 硅藻土基吸附、催化与环保材料·····       | 265        |
| 9.1.1 硅藻精土·····               | 265        |
| 9.1.2 硅藻土助滤剂·····             | 268        |
| 9.1.3 硅藻土催化剂载体·····           | 269        |
| 9.2 膨润土吸附、催化与环保材料·····        | 272        |
| 9.2.1 酸化膨润土（活性白土）·····        | 273        |
| 9.2.2 柱撑蒙脱石（交联蒙脱石）·····       | 277        |
| 9.2.3 钠化膨润土·····              | 279        |
| 9.2.4 锂化膨润土·····              | 283        |
| 9.2.5 膨润土防水毯和防水板·····         | 283        |
| 9.2.6 其他膨润土吸附材料·····          | 285        |
| 9.3 沸石吸附、催化与环保材料·····         | 285        |
| 9.3.1 沸石吸附、催化与环保材料的应用·····    | 285        |
| 9.3.2 活性沸石·····               | 286        |
| 9.3.3 改型与人工合成沸石·····          | 287        |
| 9.3.4 无机抗菌型除味剂·····           | 291        |
| 9.4 凹凸棒石吸附、催化与环保材料·····       | 291        |
| 9.4.1 热活化改性·····              | 291        |
| 9.4.2 界面活化改性·····             | 292        |
| 9.4.3 酸活化改性·····              | 292        |
| 9.5 海泡石吸附、催化与环保材料·····        | 294        |
| 9.5.1 酸处理·····                | 294        |
| 9.5.2 离子交换改性·····             | 295        |
| 9.5.3 有机金属配合物改性·····          | 296        |
| 9.5.4 矿物改性·····               | 296        |
| 9.5.5 热处理改性·····              | 297        |
| 9.6 高岭土基吸附与催化材料·····          | 297        |
| 9.6.1 4A 沸石·····              | 297        |
| 9.6.2 石油精炼催化剂·····            | 298        |
| 9.7 电气石基环保材料·····             | 299        |
| 9.7.1 电气石的主要应用领域·····         | 299        |
| 9.7.2 电气石的加工·····             | 300        |
| 9.8 交联累托石·····                | 302        |
| 9.9 有机插层蛭石·····               | 302        |
| <b>10 建筑装饰材料·····</b>         | <b>305</b> |
| 10.1 石膏建筑装饰材料·····            | 305        |
| 10.1.1 纸面石膏板·····             | 305        |
| 10.1.2 纤维石膏板·····             | 309        |
| 10.1.3 石膏砌块·····              | 314        |
| 10.1.4 装饰石膏板·····             | 316        |
| 10.2 天然石材·····                | 317        |
| 10.2.1 花岗岩·····               | 317        |
| 10.2.2 花岗岩建筑装饰板材的分类与技术要求····· | 319        |
| 10.2.3 大理岩·····               | 320        |

|           |                           |            |
|-----------|---------------------------|------------|
| 10.2.4    | 大理石建筑装饰板材的分类与技术要求 .....   | 321        |
| 10.2.5    | 天然石材加工工艺 .....            | 323        |
| 10.3      | 人造石材 .....                | 331        |
| 10.3.1    | 合成石的分类 .....              | 331        |
| 10.3.2    | 合成石的性能 .....              | 332        |
| 10.3.3    | 合成石原料 .....               | 333        |
| 10.3.4    | 合成石生产工艺 .....             | 334        |
| 10.3.5    | 合成石的应用及发展 .....           | 336        |
| <b>11</b> | <b>聚合物/黏土纳米复合材料 .....</b> | <b>338</b> |
| 11.1      | 聚合物/黏土纳米复合材料及其分类 .....    | 338        |
| 11.2      | 聚合物/黏土纳米复合材料的制备方法 .....   | 339        |
| 11.2.1    | 有机黏土的制备 .....             | 339        |
| 11.2.2    | 插层剂的选择 .....              | 340        |
| 11.2.3    | 插层的有机化合物 .....            | 342        |
| 11.2.4    | 原位插层聚合原理 .....            | 343        |
| 11.2.5    | 黏土插层方法 .....              | 344        |
| 11.3      | 聚酰胺/黏土纳米复合材料 .....        | 347        |
| 11.3.1    | 聚酰胺 .....                 | 348        |
| 11.3.2    | 尼龙 6/蒙脱土纳米复合材料 .....      | 349        |
| 11.3.3    | 应用及前景 .....               | 352        |
| 11.4      | 环氧树脂/黏土纳米复合材料 .....       | 353        |
| 11.4.1    | 环氧树脂 .....                | 353        |
| 11.4.2    | 环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料 .....      | 355        |
| 11.4.3    | 应用及前景 .....               | 356        |
| 11.5      | 聚烯烃/黏土纳米复合材料 .....        | 357        |
| 11.5.1    | 聚丙烯/黏土纳米复合材料 .....        | 357        |
| 11.5.2    | 聚乙烯/黏土纳米复合材料 .....        | 359        |
| 11.5.3    | 应用及前景 .....               | 361        |
| 11.6      | 聚酯/蒙脱土纳米复合材料 .....        | 361        |
| 11.6.1    | 聚酯 .....                  | 361        |
| 11.6.2    | PET/蒙脱土纳米复合材料 .....       | 362        |
| 11.6.3    | PBT/蒙脱土纳米复合材料 .....       | 365        |
| 11.6.4    | 应用及前景 .....               | 366        |
|           | <b>参考文献 .....</b>         | <b>368</b> |

## 1.1 非金属矿物材料的定义与特征

一般认为, 非金属矿物材料指以非金属矿物或岩石为基本或主要原料, 通过深加工或精加工制备的具有一定功能的现代新材料, 如功能填料和颜料、摩擦材料、密封材料、保温隔热材料、电功能材料、吸附催化材料、环保材料、胶凝与流变材料、聚合物/纳米黏土复合材料、建筑装饰材料等。

现代非金属矿物材料具有以下主要特征。

① 原料或主要组分为非金属矿物或经过选矿或初加工的非金属矿物。

② 一般来说, 与同样用非金属矿为原料生产的硅酸盐材料(水泥、玻璃、陶瓷等)以及无机化工产品(如硫化钡、氯化钡、碳酸锶、氧化铝等)不同, 非金属矿物材料没有完全改变非金属矿物原料或主要组分的物理、化学特性或结构特征。

③ 非金属矿物材料是通过深加工或精加工制备的功能性材料。因此, 非金属矿物材料具有一定的技术含量和明确的用途, 不能直接应用的原矿和初加工产品不属于非金属矿物材料的范畴。当然, 深加工或精加工是一个相对概念, 随着科学技术的发展和社会的进步, 其内涵也将发生变化。

## 1.2 非金属矿物材料的用途与分类

### 1.2.1 非金属矿物材料的用途

非金属矿物材料是人类利用最早的材料。原始人使用的石斧、石刀等就是用非金属矿物或岩石材料制备的。但是, 在现代科技革命和新兴产业发展之前的人类文明进化过程中, 基本上是以金属材料为主导。随着现代科技进步、人类生活水平的提高和环境保护意识的觉醒, 开创了应用非金属矿物材料的新时代。

目前, 非金属矿物材料广泛应用于化工、机械、能源、汽车、轻工、食品加工、冶金、建材等传统产业以及航空航天、电子信息、新材料等为代表的高新技术产业和环境保护与生态建设等领域。

以电子信息、航空航天、海洋开发、新材料和新能源为代表的高新技术产业与非金属矿物材料密切相关。例如, 石墨、云母、石英、锆英石、金红石基矿物材料等与电子信息产业有关; 石墨、重晶石、膨润土、石英基矿物材料等与新能源开发有关; 沸石、麦饭石、硅藻土、凹凸棒石、海泡石、膨润土、蛋白土、珍珠岩、高岭土基矿物材料等与生化产业有关; 石墨、石棉、云母、石英基矿物材料等与航空航天产业有关。

化工、机械、能源、汽车、轻工、冶金、建材等传统产业的技术进步与产业升级也与非金属材料密切相关。例如，造纸工业的技术进步和产品结构调整需要大量高纯、超细的重质碳酸钙、高岭土、滑石等高白度非金属矿物颜料和填料；高分子材料（塑料、橡胶、胶黏剂等）的技术进步以及工程塑料、塑钢门窗等高分子基复合材料的兴起每年需要数以百万吨计的超细和活性碳酸钙、高岭土、滑石、针状硅灰石、云母、透闪石、二氧化硅、水镁石以及氢氧化镁、氢氧化铝等功能矿物填料；汽车面漆、乳胶漆等高档油漆以及防腐蚀和辐射、道路发光等特种涂料需要大量的超细和高白度碳酸钙及超细和高白度煅烧高岭土、云母粉、珠光云母、着色云母、超细二氧化硅、针状超细硅灰石、有机膨润土等非金属材料、填料和触变剂；冶金工业的技术进步和产品结构调整需要高品质的以白云石、石灰石、菱镁矿等为主要成分的精炼渣、保护渣等辅料；新型建材和防火、节能产品的发展需要大量的石膏板材与饰面板、花岗岩和大理岩板材与异型材，以硅藻土、超细石英粉、石灰粉等为原料的微孔硅钙板、膨胀珍珠岩、硅藻土等保温隔热材料和石棉制品以及人造石材等；石化工业的技术进步和产业升级需要大量具有特定孔径分布、活性和选择性好的沸石与高岭土催化剂、载体以及以膨润土、凹凸棒石、海泡石等为原料的活性白土、有机黏土及胶凝材料；机电工业的技术进步需要以碎云母为原料制造的云母纸和云母板绝缘材料、高性能的柔性石墨密封材料、石墨盘根、石棉基板材和垫片；汽车工业的发展需要大量以石棉、石墨、针状硅灰石等非金属材料为基料的摩擦材料以及以滑石、云母、硅灰石、透闪石、超细碳酸钙等为无机填料的工程塑料和底漆。化学纤维工业的发展需要超细电气石、二氧化硅、云母等无机功能填料以生产出有利于人类健康的功能纤维。

环境保护和生态建设直接关系到人类的生存和经济社会的可持续发展，环保产业将成为21世纪最重要的新兴产业之一。许多非金属矿，如硅藻土、沸石、膨润土、凹凸棒石、海泡石、电气石、麦饭石等经过加工具有选择性吸附有害及各种有机和无机污染物的功能，而且具有原料易得、单位处理成本低、本身不产生二次污染等优点，可以用来制备新型环境保护材料；膨润土、珍珠岩、蛭石等还可用于固沙和改良土壤；超细水镁石用于高聚物基复合材料的阻燃填料不仅可以阻燃，而且不产生可致人死命的毒烟。

1.2.2 非金属材料分类

非金属矿种类繁多，因此非金属材料种类也很多。本文采用两种分类方法：①按矿物原料的化学成分和结构进行分类（见表1.1）；②按材料功能进行分类（见表1.2）。

表 1.1 非金属材料分类

| 材 料 名 称     | 矿 物 原 料 名 称                   |
|-------------|-------------------------------|
| 碳酸盐基矿物材料    | 方解石、冰洲石、石灰石、白云石、菱镁矿等          |
| 硫酸盐基矿物材料    | 石膏、重晶石、天青石、明矾石等               |
| 单质非金属矿物材料   | 石墨、金刚石等                       |
| 层状结构硅酸盐矿物材料 | 滑石、云母、叶蜡石、高岭土、膨润土、蛭石、蛇纹石(石棉)等 |
| 链状结构硅酸盐矿物材料 | 硅灰石、透辉石、透闪石、硅线石、锂辉石、凹凸棒石、海泡石等 |
| 架状结构硅酸盐矿物材料 | 石英、长石、沸石等                     |
| 岛状结构硅酸盐矿物材料 | 红柱石、蓝晶石、锆石、石榴子石、电气石等          |
| 硅藻土基矿物材料    | 硅藻土                           |
| 水镁石基矿物材料    | 水镁石                           |
| 水铝石基矿物材料    | 一水铝石、二水铝石、多水铝石等               |
| 金红石基矿物材料    | 金红石                           |
| 岩石材料        | 珍珠岩、黑曜岩、松脂岩、玄武岩、辉绿岩、花岗岩、大理石等  |

表 1.2 非金属矿物材料的类型及其应用

| 序号 | 材料类型    | 非金属矿物原料                                                                                                 | 非金属矿物材料或制品品种                                                                                                                             | 应用领域                                             |
|----|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1  | 填料和颜料   | 方解石、大理石、白垩、滑石、叶蜡石、伊利石、石墨、高岭土、地开石、云母、硅灰石、透辉石、硅藻土、膨润土、皂石、海泡石、凹凸棒土、金红石、长石、锆英砂、重晶石、石膏、石英、石棉、水镁石、沸石、透闪石、蛋白土等 | 细粉(10~1000 $\mu\text{m}$ )、超细粉(0.1~10 $\mu\text{m}$ )、超微细粉或一维、二维纳米粉(0.001~0.1 $\mu\text{m}$ )、表面改性粉体、高纯度粉体、复合粉体、高长径比针状粉体、大径厚比片状粉体、多孔隙粉体等 | 塑料、橡胶、胶黏剂、化纤、油漆、涂料、陶瓷、玻璃、耐火材料、阻燃材料、胶凝材料、造纸、建材等   |
| 2  | 力学功能材料  | 石棉、石膏、石墨、花岗岩、大理石、石英岩、锆英砂、高岭土、长石、金刚石、铸石、石榴子石、云母、滑石、硅灰石、透闪石、石灰石、硅藻土、燧石、蛋白土等                               | 石棉水泥制品、硅酸钙板、纤维石膏板、石料、石材、金刚石(刀具、钻头、砂轮、研磨膏)、磨料、衬里材料、制动器衬片、闸瓦、刹车带(片)、石墨轴承、垫片、密封环、离合器面片、润滑剂(膏)、汽缸垫片、石棉橡胶板、石棉盘根等                              | 建材、建筑、机械、电力、交通、农业、化工、轻工、航空、航天、石油、微电子、地质勘探、冶金、煤炭等 |
| 3  | 热学功能材料  | 石棉、石墨、石英、长石、金刚石、蛭石、硅藻土、海泡石、凹凸棒石、水镁石、珍珠岩、云母、滑石、高岭土、硅灰石、沸石、金红石、锆英砂、石灰石、白云石、铝土矿等                           | 石棉布、石棉片、石棉板、岩棉、玻璃棉、矿棉吸声板、泡沫石棉、泡沫玻璃、蛭石防火隔热板、硅藻土砖、膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、微孔硅钙板、保温涂料、耐火材料、碳/石墨复合材料、储热材料等                                                | 建材、建筑、冶金、化工、轻工、机械、电力、交通、航空、航天、石油、煤炭等             |
| 4  | 电磁功能材料  | 石墨、石英、水晶、金刚石、蛭石、硅藻土、云母、滑石、高岭土、金红石、电气石、铁石榴子石、沸石等                                                         | 碳-石墨电极、电刷、胶体石墨、氟化石墨制品、电极糊、沸石电导体、热敏电阻、非线性电阻、云母电容器、云母纸、云母板等                                                                                | 电力、微电子、通讯、计算机、机械、航空、航天、航海等                       |
| 5  | 光功能材料   | 石英、水晶、冰洲石、方解石等                                                                                          | 偏光、折光、聚光镜片、滤光片、偏振材料、荧光材料等                                                                                                                | 通讯、电子、仪器仪表、机械、航空、航天、轻工等                          |
| 6  | 吸波与屏蔽材料 | 金红石、电气石、石英、高岭土、石墨、重晶石、膨润土、滑石等                                                                           | 氧化钛(钛白粉)、纳米二氧化硅、氧化铝、核反应堆屏蔽材料、护肤霜、防护服、保暖衣、消光剂等                                                                                            | 核工业、军工、化妆(护肤)品、民(军)用服装、农业、涂料、皮革等                 |
| 7  | 催化材料    | 沸石、高岭土、硅藻土、海泡石、凹凸棒石、地开石等                                                                                | 分子筛、催化剂、催化剂载体等                                                                                                                           | 石油、化工、农药、医药等                                     |
| 8  | 吸附材料    | 沸石、高岭土、硅藻土、海泡石、凹凸棒石、地开石、膨润土、皂石、珍珠岩、蛋白土、石墨、滑石等                                                           | 助滤剂、脱色剂、干燥剂、除臭剂、杀(抗)菌剂、水处理剂、空气净化剂、油污处理剂、核废料处理剂、固沙剂等                                                                                      | 啤酒、饮料、食用油、食品、工业油脂、制药、化妆品、环保、家用电器、化工等             |
| 9  | 流变材料    | 膨润土、皂石、海泡石、凹凸棒石、水云母等                                                                                    | 有机膨润土、触变剂、防沉剂、增稠剂、凝胶剂、流平剂、钻井泥浆等                                                                                                          | 各种油漆、涂料、黏合剂、清洗剂、采油、地质勘探等                         |
| 10 | 黏结材料    | 膨润土、海泡石、凹凸棒石、水云母、碳酸钙、石英等                                                                                | 团矿黏结剂、硅酸钠、胶黏剂、铸模材料、黏土基复合黏结剂等                                                                                                             | 冶金、建筑、铸造、轻工等                                     |
| 11 | 装饰材料    | 大理石、花岗岩、岫石、云母、叶蜡石、蛋白土、水晶、石榴子石、橄榄石、玛瑙石、玉石、辉石、孔雀石、冰洲石、琥珀石、绿松石、金刚石、月光石、磷灰石等                                | 天然装饰石材(大理石、花岗岩板材和异型材)、人造石材(人造大理石、花岗石等)、珠光云母、彩石、各种宝玉石、观赏石等                                                                                | 建筑、建材、涂料、皮革、化妆品、珠宝业、观光业等                         |
| 12 | 生物功能材料  | 沸石、麦饭石、高岭土、硅藻土、海泡石、凹凸棒石、膨润土、皂石、珍珠岩、蛋白土、滑石、电气石、碳酸钙等                                                      | 药品及保健品、药物载体、饲料添加剂、杀(抗)菌剂、吸附剂、化妆品添加剂等                                                                                                     | 制药业、生物化学工业、农业、畜牧业、化妆品等                           |

## 1.3 非金属矿物材料的主要研究内容

非金属矿物材料的研究内容主要包含以下五个方面。

### (1) 非金属矿物材料物理化学

包括非金属矿物材料及其原料的物理性质、化学性质、热力学性质，材料加工或制备过程的物理化学原理等。

### (2) 非金属矿物材料的结构与性能

包括非金属矿物材料的物相、微观结构、孔结构、颗粒大小与形状、比表面积以及材料的热、电、磁、声、力、化、流变等性能；材料结构与性能（包括使用性能）的关系；材料结构与性能的特征等。

### (3) 非金属矿物材料加工工艺与装备

包括非金属矿物材料的加工工艺和设备，原料配方、原料性质及工艺条件对非金属矿物材料结构和性能的影响；非金属矿物材料制备过程的自动控制等。其核心技术主要是原料配方复合技术和加工工艺与设备。追求功能化、环境友好或无害化是非金属矿物材料配方技术的主要研究内容；而追求工艺性能和操作参数的优化及降低能耗、物耗等是非金属矿物材料加工工艺与设备研发的主要内容。

### (4) 非金属矿物材料的应用

应用技术是非金属矿物材料最重要的研究内容之一。虽然非金属矿物材料是一种传统基础材料，但在现代高新技术领域中也是一种新型的功能材料，其应用性能和应用技术有待于通过应用研究去挖掘、完善和提高。通过应用研究还可以反过来促进非金属矿物材料加工技术的进步。非金属矿物材料应用研究的主要内容包括应用性能、应用配方、相关应用工艺与设备以及检测、评价技术与标准及检测设备等。

### (5) 非金属矿物材料的环境服役行为与失效机理

包括材料损伤、失效的诊断和检测的原理与方法；材料损伤、失效过程的环境影响因素，各影响因素的作用规律，失效过程的动力学；控制材料损伤、失效演化过程的物化原理及实用技术；材料使用可靠性、寿命预测和评价的方法和技术；材料实际服役环境的实验模拟技术方法等。

非金属矿物材料涉及结晶学与矿物学、矿物加工、材料学、材料加工、材料物理化学、固体物理、结构化学、高分子化学、有机化学、无机化学、化工、环保、生物、机械、电子、自动控制、现代仪器分析与测试等学科。

## 1.4 非金属矿物材料的发展趋势

非金属矿物材料是现代高温、高压、高速工业的基础原材料，也是支撑现代高新技术产业的原辅材料和多功能环保材料。因此，非金属矿或非金属矿物材料工业是现代社会的朝阳工业之一。中国是全球非金属矿产资源品种较多、储量较为丰富的国家之一，许多非金属矿种，如石墨、滑石、菱镁矿、重晶石、萤石等的储量和年产量居世界前列。根据工业发达国家发展的经验，在经济和社会发展到一定程度后，非金属矿及非金属矿物材料的消费量和产值将大于金属矿及金属材料。中国是一个经济和社会正在迅速发展和变化的世界大国，高新

技术产业的快速发展、传统产业的技术进步、环保国策的全面落实以及在未来 20 年全面建设小康社会发展目标的实施将给非金属矿物材料工业带来前所未有的发展机遇。适逢这一难得的历史机遇,中国的非金属矿物材料将在未来一段时间以较快的速度持续发展。在未来的发展过程中将逐步提升行业的工艺和装备水平,提高产品的档次和技术含量,特别是根据高技术、新材料发展的需要生产适用性好的非金属矿物材料或深加工产品;根据环境保护和循环经济发展的要求提高资源的综合利用率;通过技术、标准等要素促进产品质量的提高和稳定。同时,在国家产业政策的引导和行业协会的推动下,加快集约化经营的步伐,通过协作和竞争催生具有较强自主研发能力、自主知识产权、竞争力较强的大型企业集团。

现代高新技术和新材料的发展是以较高的科技含量、较低的环境负荷和更适应社会发展的需要为前提的,非金属矿物材料也不例外。只有能够满足相关应用领域技术进步和产业发展要求和环保要求的非金属矿深加工产品或非金属矿物材料才有可能赢得稳定的市场。因此,未来非金属矿加工技术的发展趋势将是交叉、融合矿物学、矿物加工、化工、材料、机械、电子、信息以及相关应用领域的不同学科,通过采用超细粉碎、精细分级、提纯、改性、改型、复合等深加工或精加工技术,发掘和提升非金属矿物材料或深加工产品的功能和应用性能。

功能化是未来非金属矿物材料的主要发展趋势。为了满足相关应用领域对功能化非金属矿物材料的要求,将重点发展与航空航天、海洋开发、生物化工、电子信息、节能节水、环境保护、生态建设、新型建材、新能源开发、特种涂料、快速交通工具等相关的功能性非金属矿物材料,如石墨密封材料、石墨润滑材料、石墨导电材料、摩擦材料、石墨插层化合物、高纯超细石墨粉、云母珠光颜料、高温润滑材料、辐射屏蔽材料、催化材料、高性能吸附材料、增强填料、抗菌填料、阻燃填料等。其中与高新技术产业相关的高纯超细石墨粉( $\leq 1\mu\text{m}$ )、石墨密封和润滑材料、石墨导电涂料、石墨插层化合物、黏土层间化合物与黏土/高聚物复合材料、云母珠光与改性颜料、辐射屏蔽材料、催化材料等;与环境保护(废气与废水处理)相关的以硅藻土、蛋白土、膨润土、海泡石、凹凸棒石、沸石等具有高比表面积和选择性吸附活性材料为基料的新型非金属矿物环保材料;以非金属矿物为基料的道路标志、防酸雨、抗氧化、防火、耐候、防污、保温隔热等特种涂料;新型轻质、保温、防火、阻燃、节能建材、异型装饰石材和人造石材;具有耐高温、耐冻、耐磨等功能的路面沥青改性填料;与快速交通工具相关的非金属矿(如石棉和石墨等)基高性能摩擦材料等具有广阔的发展前景。

# 非金属矿物原材料的结构与性能

## 2.1 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物主要包括方解石、石灰石、冰洲石、白云石和菱镁矿等。碳酸盐矿物材料主要是用于塑料、橡胶、涂料、油墨、造纸的填料和颜料以及耐火材料的原料，无色透明的方解石（冰洲石）因其具有极强双折射率和偏光性能，还可制成各种光学材料，如偏光显微镜的棱镜、偏光仪、光度计、化学分析用的比色计、测距仪等的光学器件。碳酸盐矿物材料在现代产业发展中起重要作用。目前，国内仅塑料、橡胶、涂料、油墨、造纸的填料和颜料的用量就达到每年 200 多万吨，而且每年以 8% 左右的速度增长。

### 2.1.1 方解石

方解石的主要化学成分是  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ 。其理论组成为  $\text{CaO}$  56.03%， $\text{CO}_2$  43.97%，但常含有少量的  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}$  等杂质。这些杂质不仅直接影响方解石基矿物填料的白度指标，而且对方解石基填料的应用性能有重要影响。

方解石属三方晶系，其晶体结构（图 2.1）可以与  $\text{NaCl}$  结构对比。如果将  $\text{NaCl}$  的单位晶胞沿三次轴压缩，并将三次轴直立起来，将  $\text{Na}^+$  代之以  $\text{Ca}^{2+}$ ，将  $\text{Cl}^-$  代之以  $[\text{CO}_3]^{2-}$  即形成方解石的结构。 $[\text{CO}_3]^{2-}$  阴离子团三角四平面皆垂直于三次轴，使整个结构中  $\text{O}^{2-}$  亦成

层分布，在相邻的层中  $[\text{CO}_3]^{2-}$  的三角形方向相反。 $\text{Ca}$  的配位数为 6。这样与  $\text{NaCl}$  型结构相比，所选取的晶胞呈纯菱面体状，但它不是方解石的单位晶胞。从图 2.1 可见，垂直  $[\text{CO}_3]$  平面通过对称中心和这种菱面体晶胞的角顶连接图中的 1' 和 4 的直线，不难看出，它将依次贯穿两个方向相反的  $[\text{CO}_3]^{2-}$ ，点 1 和点 4 体现了这个方向的重复周期，而连接纯菱面体状晶胞角顶的线段，只相当于该重复周期的一半。因此，这个纯菱面体不是方解石的真正的单位晶胞。而以点 1、4 为角顶的菱面体才是方解石的单位晶胞。

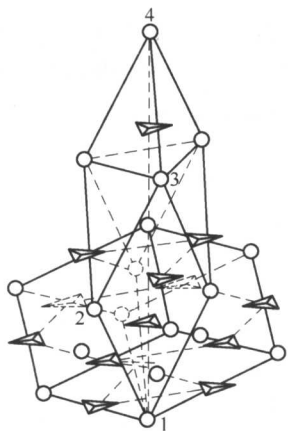


图 2.1 以菱面体晶胞表示的方解石的晶体结构

方解石的晶体结构决定了它具有  $(10\bar{1}1)$  的完全解理，因为这一方向与  $\text{NaCl}$  的  $(100)$  电性中和面相类似。

方解石的晶体形态多种多样，不同的聚形多达 600 种以上。常见的单形有平行双面  $c(0001)$ 、六方柱  $m(10\bar{1}0)$ ，菱面体  $r(10\bar{1}1)$ 、 $e(01\bar{1}2)$ 、 $f(02\bar{2}1)$ 、 $M(40\bar{4}1)$ ，复三方偏三角体  $v(21\bar{3}1)$  和  $t(21\bar{3}4)$  等（图 2.2）。方解石常依  $(0001)$  形成接触双晶，依  $(01\bar{1}2)$  形成聚片双晶（图 2.3）。