

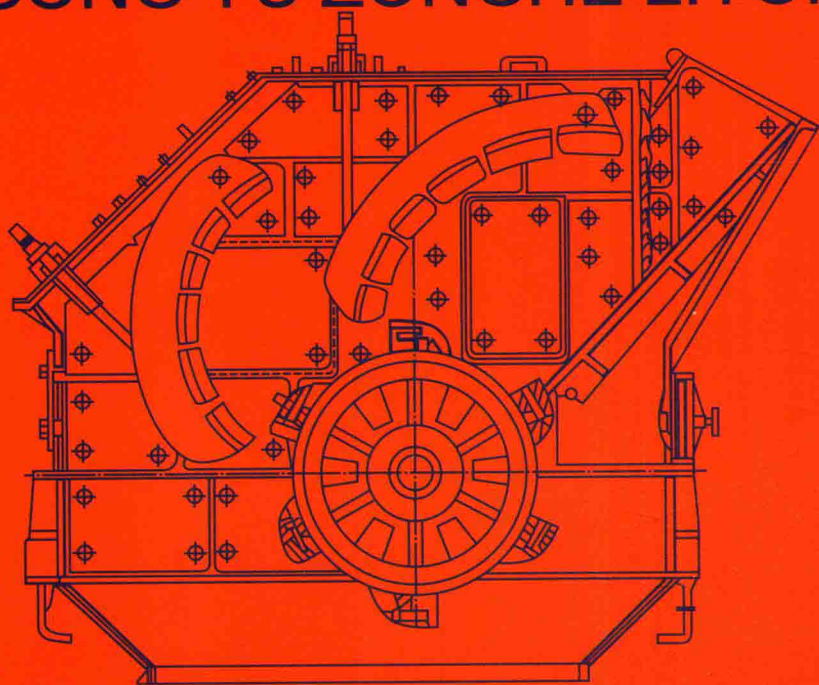
非金属矿物

加工与综合利用

杜春芳 欧阳静 苏毅国 编著

FEIJINSHU KUANGWU

JIAGONG YU ZONGHE LIYONG



化学工业出版社

++++++
++++++
++++++

非金属矿物 加工与综合利用

● 杜春芳 欧阳静 苏毅国 编著 ●

FEIJINSHU KUANGWU
JIAGONG YU ZONGHE LIYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

中国是世界上非金属矿产资源品种较多、储量较为丰富的国家之一。发达国家发展的经验表明：非金属矿及非金属材料的消费量与产值必然大于金属矿及金属材料；一个国家非金属矿物加工利用的水平往往会反映这个国家现代工业发达的程度。

本书以非金属矿物的精细化加工与综合利用为主线，主要内容包括非金属矿物选矿提纯技术（包括选矿技术基础、重力选矿、浮力选矿、电力选矿、磁力选矿、湿法化学提纯技术、其他选矿提纯技术等）、非金属矿物粉体加工技术（包括超细粉碎助剂、超微细粉碎技术、超细分级技术、超细微粒分选技术、粉尘危害与防护等）、非金属矿物粉体的表面改性（包括表面改性的方法、表面改性工艺、表面改性剂等）、特殊形态非金属矿物的晶形保护（包括颗粒整形技术、非金属矿物的晶形保护、非金属矿物的特殊处理等），还介绍了大量非金属矿物加工与应用实例。

本书内容丰富，兼具系统、科学、实用性强的特点。本书可供从事矿物材料、化工、轻工、建材、冶金机械、电子、环保、新材料等领域的工程技术人员、管理人员及大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

非金属矿物加工与综合利用/杜春芳, 欧阳静, 苏毅国
编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-122-29879-9

I. ①非… II. ①杜…②欧…③苏… III. ①非金属
矿物-加工②非金属矿物-综合利用 IV. ①TD97

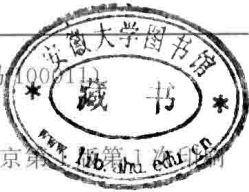
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 128315 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 王 静

文字编辑: 孙凤英
装帧设计: 刘丽华

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: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13 3/4 字数 371 千字 2018 年 1 月北京第 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: 59.00 元

版权所有 违者必究

非金属矿物是人类赖以生存和发展的重要矿产资源之一。在人类发展的历史长河中，非金属矿物的加工利用对人类社会文明进步的贡献是不可低估的。从最开始人类使用的石斧、石刀到现在以非金属矿物为原料制备的多种非金属矿物新材料，人类在利用非金属矿物原（材）料方面走过了从简单利用到初步加工后利用，再到深加工和综合利用的漫长历程。采用现代加工技术生产的非金属矿物材料是现代高温、高压、高速工业体系的重要基础材料，也是支撑现代高新技术产业的原辅材料和节能、环保、生态建设的功能性材料。与传统无机材料相比，非金属矿物材料更加重视矿物本身的结构和性质，以最大程度发挥天然矿物材料的性能优势为目的。伴随着经济、科技和社会的迅猛发展，综合和高效利用非金属矿产资源已成为经济和社会发展的必然要求。

本书以非金属矿物的精细化加工与综合利用为主线，详细系统介绍了非金属矿物加工技术的基础理论知识，在撰写过程中，着力考虑系统性、科学性、先进性及在研究开发或生产中的实用性。全书共6章，内容涉及非金属矿物选矿提纯技术、超细粉碎与分级技术、表面改性技术、非金属矿物晶形保护及非金属矿物在这些技术方面的加工及应用实例。

本书由杜春芳、欧阳静、苏毅国编著。全书由杜春芳统稿，负责全书的整理与修改工作。

本书可供广大从事非金属矿物材料、无机非金属材料、复合材料以及矿物加工、非金属矿物深加工和化工、环境工程等科研技术人员参考，也可供大专院校无机非金属材料或相关专业师生使用和参考。

由于我们水平有限，疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者
2017年8月

第 1 章 绪论 / 001

1.1 非金属矿物的定义及分类	001
1.2 非金属矿物与社会产业发展	003
1.3 非金属矿物加工的主要内容	005
1.3.1 粉体的制备与处理技术	005
1.3.2 材料的加工与复合技术	006
1.4 非金属矿物加工特点	007
1.5 非金属矿物加工发展趋势	008
参考文献	009

第 2 章 非金属矿物选矿提纯技术 / 010

2.1 概述	010
2.2 选矿技术基础	010
2.2.1 选矿概念	010
2.2.2 选矿作业过程	010
2.2.3 选矿技术指标	012
2.2.4 非金属矿物选矿特点	012
2.3 重力选矿	013
2.3.1 概述	013
2.3.2 基本概念	013
2.3.3 基本原理	016
2.3.4 影响重选技术指标的主要因素	025
2.3.5 重力选矿方式	028
2.4 浮力选矿	037
2.4.1 概述	037
2.4.2 基本概念	037
2.4.3 浮选过程	037
2.4.4 基本原理	038
2.4.5 浮选药剂	052

2.4.6 影响浮选技术指标的主要因素	065
2.5 电力选矿	073
2.5.1 概述	073
2.5.2 基本概念	074
2.5.3 基本原理	078
2.5.4 影响电选的主要因素	079
2.6 磁力选矿	081
2.6.1 概述	081
2.6.2 基本概念	081
2.6.3 基本原理	083
2.6.4 影响磁选的主要因素	085
2.7 湿法化学提纯技术	086
2.7.1 概述	086
2.7.2 酸法、碱法和盐溶法	086
2.7.3 氧化-还原法	090
2.8 其他选矿提纯技术	093
2.8.1 磁流体选矿	093
2.8.2 摩擦洗矿	094
2.8.3 拣选	095
2.8.4 摩擦与弹跳分选	097
2.8.5 微生物选矿	098
2.8.6 高温煅烧提纯技术	100
参考文献	103

第3章 非金属矿物粉体加工技术 / 106

3.1 概述	106
3.2 粉体的粒度特征	107
3.2.1 粒径	107
3.2.2 粒度分布	108
3.2.3 粉体的比表面积	109
3.3 粉体颗粒的种类	109
3.4 超细粉碎助剂	110
3.4.1 概述	110
3.4.2 助磨剂	111
3.4.3 分散剂	112
3.4.4 助磨剂和分散剂的选择	115
3.4.5 影响助磨剂和分散剂作用效果的因素	115
3.5 超微细粉碎技术	117
3.5.1 基本概念	117
3.5.2 粉碎作用原理	121

3.5.3	粉碎工艺	123
3.5.4	影响超微细效果的各种因素	128
3.6	超细分级技术	132
3.6.1	概述	132
3.6.2	基本概念	132
3.6.3	分级原理	134
3.6.4	超细分级的重要性	136
3.6.5	超细分级的关键问题	137
3.7	超细粉体的分散	138
3.7.1	概述	138
3.7.2	固体颗粒在空气中的分散	138
3.7.3	固体颗粒在液体中的分散	141
3.7.4	超细粒子的分散稳定机理	144
3.7.5	颗粒在液体中的分散调控	146
3.8	超细微粒分选技术	149
3.8.1	概述	149
3.8.2	超细颗粒分选技术分类	149
3.8.3	疏水聚团分选	149
3.8.4	高分子絮凝分选	151
3.8.5	复合聚团分选	154
3.9	粉尘危害与防护	155
3.9.1	概述	155
3.9.2	粉尘爆炸的定义	156
3.9.3	粉尘爆炸的条件	156
3.9.4	粉尘爆炸的机理	156
3.9.5	粉尘爆炸的特点	157
3.9.6	影响粉尘爆炸的因素	158
3.9.7	粉尘爆炸的预防及防护措施	159
参考文献		160

第 4 章 非金属矿物粉体的表面改性 / 162

4.1	概述	162
4.2	表面改性的目的及影响因素	162
4.2.1	表面改性的目的	162
4.2.2	表面改性的影响因素	163
4.3	表面改性的方法	165
4.3.1	概述	165
4.3.2	表面包覆改性	165
4.3.3	表面化学改性	167
4.3.4	沉淀反应改性	167

4.3.5	接枝改性	168
4.3.6	机械化学改性	168
4.3.7	湿法化学改性	169
4.3.8	其他表面改性方法	169
4.4	表面改性工艺	171
4.4.1	概述	171
4.4.2	干法改性工艺	171
4.4.3	湿法改性工艺	171
4.4.4	复合改性工艺	172
4.5	表面改性剂	172
4.5.1	偶联剂	172
4.5.2	表面活性剂	174
4.5.3	不饱和有机酸及有机低聚物	176
4.5.4	超分散剂	176
4.5.5	金属化合物	178
	参考文献	178

第 5 章 特殊形态非金属矿物的晶形保护 / 179

5.1	概述	179
5.2	基本概念	179
5.2.1	颗粒的形状分析	179
5.2.2	颗粒形状的图像分析	181
5.3	颗粒整形技术	181
5.4	非金属矿物的晶形保护	182
5.4.1	层状非金属矿物的晶形保护	182
5.4.2	纤维状非金属矿物的晶形保护	183
5.4.3	天然多孔非金属矿物的晶形保护	184
5.4.4	其他非金属矿物的晶形保护	186
5.5	非金属矿物的特殊处理	186
	参考文献	186

第 6 章 非金属矿物加工与应用实例 / 187

6.1	概述	187
6.2	非金属矿物选矿提纯加工实例	187
6.2.1	非金属矿物选矿加工实例	187
6.2.2	非金属矿物提纯加工实例	189
6.3	非金属矿物超细粉碎及表面改性实例	195
6.3.1	非金属矿物超细粉碎加工实例	195
6.3.2	非金属矿物表面改性加工实例	195

6.4 非金属矿物在各行业的应用实例	197
6.4.1 非金属矿物在塑料工业中的应用实例	197
6.4.2 非金属矿物在橡胶工业中的应用实例	199
6.4.3 非金属矿物在造纸工业中的应用实例	200
6.4.4 非金属矿物在涂料工业中的应用实例	203
6.4.5 非金属矿物在能源环保中的应用实例	204
6.4.6 非金属矿物在农牧业中的应用实例	207
6.4.7 非金属矿物在医药行业中的应用实例	208
参考文献.....	209

第1章

绪论

1.1 非金属矿物的定义及分类

非金属矿物是指以非金属矿物和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，如环保材料、电功能材料、保温隔热材料、摩擦材料、建筑装饰材料、吸附催化材料、功能填料和颜料等。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。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，是人类最早利用的材料。原始人使用的石斧、石刀等都是用无机非金属矿物或者岩石材料制备的。总的来说，非金属矿物包含三大部分：①大量用于工业矿物原料的金刚石、蓝晶石等宝石矿物；②某些金属矿石也可以作为某种利用其技术和物理特性而不是利用其来冶炼金属元素的工业原料，如用于耐火材料和吸附剂的铝土矿，用于染料的赤铁矿等也在此范围内；③有些文献还把一些人工产物也归入非金属矿物之中，如水泥、石灰、工业副产品磷石膏、人造金刚石、人造云母、矿棉等。

非金属矿物种类繁多，许多非金属矿物的化学成分又十分复杂，而且每一矿种的成因一般有多种，一种矿物常具有多种用途，不同矿种又可相互代用，因此要提出一种妥善的分类方法就较为困难。下面介绍几种近年来常用的非金属矿物分类方法。

- (1) 根据非金属矿物材料的定义和加工改造特点进行分类
- ① 天然非金属矿物材料 直接利用其本身的物理、化学性质而应用到各行业领域的非金属矿物。主要是天然非金属矿物，也包括一些金属矿物或岩石，如用于功能材料的矿物晶体和用于建筑材料的花岗岩、大理岩等。
- ② 深加工非金属矿物材料 将非金属矿物岩石进行超细、超纯改型、改性等优化加工改造后直接加以利用的矿物材料，如超细石英粉、云母粉、高纯超细的高能石墨乳、改性高塑膨润土等。
- ③ 复合及合成非金属矿物材料 以一种或数种天然非金属矿物或岩石为主要原料与其他有机或无机材料按所需配比进行烧结、胶凝、粘接等复合及合成加工改造获得的材料，如耐火材料和由多种矿物制成的保温材料等。

(2) 根据化学成分和结构进行分类 根据其化学成分和结构对非金属矿物进行分类，分类情况见表 1-1。

表 1-1 非金属矿物的分类

材 料 名 称	非 金 属 矿 物 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
层状硅酸盐矿物材料	滑石、高岭土、云母、叶蜡石、膨润土、蛭石、蛇纹石(石棉)等

续表

材 料 名 称	非金属矿物名称
链状硅酸盐矿物材料	硅灰石、透辉石、透闪石、硅线石、锂辉石、凹凸棒石、海泡石等
架状硅酸盐矿物材料	石英、长石、沸石等
岛状硅酸盐矿物材料	红柱石、蓝晶石、锆英石、石榴石(也叫石榴子石)、电气石等
碳质非金属矿物材料	石墨、金刚石等
复合非金属矿物材料	麦饭石、浮石、火山灰、铝土矿
岩石材料	珍珠岩、玄武岩、辉绿岩、花岗岩、大理石等
其他非金属矿物材料	萤石、金红石、钛铁矿、磷矿、硼矿、钾矿、水镁石等

(3) 根据非金属矿物的工业用途分类 按照目前非金属矿物的工业用途，我国将非金属矿物分为六类：化工原料、建筑材料、冶金工业辅助原料、轻工原料、电气及电子工业原料、宝石类及光学材料。美国则分为十四类：磨料、陶瓷原料、化工原料、建筑材料、电子及光学材料、肥料矿产、填料、过滤物质及矿物吸附剂、助溶剂、铸型原料、玻璃原料、矿物颜料、耐火原料、钻井泥浆原料。表 1-2 是按工业用途对非金属矿物进行的分类。表 1-3 则是从非金属矿物功能材料的角度进行分类。

表 1-2 主要非金属矿物和岩石的分类和用途

用 途	非金属矿物和岩石
化工原料	岩盐、芒硝、天然碱、明矾石、自然碱、磷灰石、重晶石、天青石、萤石、石灰石等
光学原料	冰洲石、光学石膏、方解石、水晶、光学石英、光学萤石等
电力、电子	石墨、云母、石英、水晶、电气石、金红石等
农肥、农药	磷灰石、钾盐、钾长石、芒硝、石膏、高岭土、地开石、膨润土等
磨料	金刚石、刚玉、石榴子石、石英、硅藻土等
工业填料和颜料	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、透闪石、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、透辉石、蛋白土等
吸附、助滤和载体	沸石、高岭石、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、蛋白石等
保温、隔热、隔声材料	石棉、石膏、石墨、蛭石、硅藻土、海泡石、珍珠岩、玄武岩、灰绿石、浮石与火山灰等
铸石材料	玄武岩、灰绿岩、安山岩等
建筑材料	石棉、石膏、花岗岩、大理岩、石英岩、石灰石、硅藻土、沙石、黏土等
玻璃	石英砂和石英岩、长石、霞石正长岩、脉石英等
陶瓷、耐火材料	高岭土、硅灰石、滑石、石英、长石、红柱石、蓝晶石、硅线石、叶蜡石、电气石、透辉石、石墨、菱镁矿、白云石、铝土矿、陶土
溶剂和冶金	萤石、长石、硼砂、石灰岩、白云岩
钻探专业	重晶石、石英砂、膨润土、海泡石、凹凸棒土等

表 1-3 非金属矿物的类型及其应用

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
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(10~1000μm)、超细粉(0.1~10μm)、超微细粉或一维、二维纳米粉(0.001~0.1μm)、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、涂料、陶瓷、玻璃、耐火材料、阻燃材料、胶凝材料、造纸、建材等

续表

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
力学功能材料	石棉、石膏、石墨、花岗岩、大理岩、石英岩、锆英岩、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、蛋白石等	石棉水泥制品、硅酸钙板、纤维石膏板、石料、石材、结构陶瓷、无机/聚合物复合材料(上下水管、塑钢门窗等)、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)、气缸垫片、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
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、片、板及岩棉、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、玻璃微珠、保温涂料、耐火材料、镁碳砖、碳/石墨复合材料、储热材料、莫来石、堇青石、氧化锆陶瓷等	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
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、电池、非线性电阻、陶瓷半导体、石榴子石型铁氧体、压电材料(压电水晶、自动点火元件等)、云母电容器、云母纸、云母板、电瓷、封装陶瓷等	电力、微电子、通信、计算机、机械、航空航天、航海等
光功能材料	石英、水晶、冰洲石、方解石等	偏光、折光、聚光镜片，光学玻璃，光导纤维，滤光片，偏振材料，荧光材料等	通信、电子、仪器仪表、机械、航空航天、轻工等
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、塑料薄膜、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
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
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、油污染处理剂、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
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	各种涂料、胶黏剂、清洗剂、采油、地质勘探等
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、黏土基复合黏结剂等	冶金、建筑、铸造、轻工等
装饰材料	大理石、花岗岩、岫石、云母、叶蜡石、蛋白石、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	装饰石材、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
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

1.2 非金属矿物与社会产业发展

非金属矿同金属矿一样，是人类最早利用的地球矿产资源，同时也是与人类生产、生活密切相关的矿产资源之一。非金属矿在人类社会文明进步的历史长河中扮演着极其重要的角色。从最初使用的石斧、石刀到现在以各种非金属矿物为原料制造的无机非金属材料、复合材料等当代新材料，人类在利用非金属矿物资源方面走过了从简单利用到初步加工后利用再到深加工

和综合利用的漫长历程。虽然，在很长一段时期内金属材料的使用逐渐增多，而且大大超过了非金属材料。但是随着近代工业革命的兴起、科学技术的迅猛发展，金属材料在许多领域的使用受到了限制，而非金属材料因其自身具有的优良性能，如高强度、耐高温、质轻、耐磨性等再次受到人们的关注，并广泛应用到社会中各个行业领域。发达国家发展的经验表明，在经济和社会发展到一定程度后，非金属矿及非金属材料的消费量与产值必然大于金属矿及金属材料。曾有专家指出：一个国家非金属矿物加工利用的水平反映了这个国家现代工业发达的程度。

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以航空航天、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。

在科技快速发展的当代社会，一些传统产业，如冶金、建材、机械、化工、轻工、能源产业等要想在竞争中立于不败之地，必须大量引进新技术和新材料，进行技术革新和产业升级。这些技术革新和产业升级与非金属矿物的精细化加工产品密不可分。如高分子材料（塑料、纤维、橡胶等）的技术进步以及功能性高分子基复合材料的兴起需要大量超细高岭土、活性碳酸钙、滑石、云母、针状硅灰石、二氧化硅等功能填料；造纸工业的技术进步则需要数以百万吨计的高纯、超细的重质碳酸钙、滑石、高岭土等高白度非金属矿物颜料和填料；石化工业的技术进步和产业升级需要大量具有优良活性和选择性及特定孔径分布的沸石和高岭土催化剂、载体以及以膨润土为原料的活性白土；新型建材和环保、节能产品的开发需要高纯度、高品质的石膏板材、花岗岩、大理岩板材以及以石棉、硅藻土、珍珠岩、蛭石等为原料的泡沫石棉、硅藻土、膨胀珍珠岩、膨胀蛭石等石棉制品和保温隔热材料等；机电工业的技术革新和汽车工业的产品升级需要大量高品质的柔性石墨密封材料、石棉基板材和垫片、石墨盘根，以针状硅灰石、海泡石、石棉、水镁石纤维等非金属矿为基料的摩擦材料。因此，传统产业的技术进步和产业升级是未来我国非金属矿物深加工技术和产业发展的主要机遇之一。

随着新材料及新技术的不断开发和使用，以信息、能源、生物、电子、航空航天、海洋开发为主的高新技术产业将不断发展壮大。这些高新技术和新材料产业与非金属矿物原料或矿物材料密切相关。例如，微电子及信息技术产业需要高品质的石英、锆英石、石墨、云母、高岭土、金红石等非金属矿物；新能源开发需要大量的石墨、重晶石、膨润土、石英等；生物领域方面则与硅藻土、凹凸棒石、珍珠岩、高岭土、沸石、膨润土、蛋白土、麦饭石、海泡石等密切相关；航空航天新技术及新产品开发需要石墨、石棉、云母等；而硅线石、石英、氧化硅、石榴石、蛭石、蓝晶石、石膏、珍珠岩、石棉、硅灰石、硅藻土、叶蜡石、金刚石、石墨、云母、高岭土、滑石、方解石、红柱石、菱镁矿等与新材料技术及其产业有关。因此，新材料及高新技术的开发是非金属矿物深加工技术和产业发展的另一重要机遇之一。

环境保护和生态建设是人类未来生活面临的两个重大挑战，它直接关系到人类的生存和经济社会的可持续发展。随着人类环保意识的增强和全球环保标准及要求的提高，环保产业将成为未来社会发展最重要的新兴产业之一。应用研究发现，一些矿物材料具有环境修复（如大气、水污染治理等）、环境净化（如杀菌、消毒、分离等）和环境替代（如替代环境负荷大的材料）等功能。许多非金属矿物，如沸石、硅藻土、海泡石、膨润土、凹凸棒石、坡缕石、蛭石等经过加工（选矿提纯、表面改性和复合整形）具有选择性吸附有害及各种有机和无机污染物的功能，而且这些非金属矿物原料易得、单位处理成本低、本身不产生二次污染，故在环境治理和改善生态平衡方面得到了越来越多的关注和使用。因此，环保产业是我国非金属矿物深加工技术和产业发展的第三个重要机遇。

1.3 非金属矿物加工的主要内容

非金属矿物加工的目的是通过一定的技术、工艺、设备生产出满足市场要求的具有一定粒度大小和粒度分布、纯度或化学成分、物理化学性质、表面或界面性质的粉体材料以及一定尺寸、形状、力学性能、物理性能、化学性能、生物功能等的功能性产品。

非金属矿物加工的内容主要包括两个方面：①粉体的制备与处理技术；②材料的加工与复合技术。

1.3.1 粉体的制备与处理技术

粉体的制备与处理技术是指通过一定的技术、工艺、设备生产出满足市场要求的具有一定粒度大小和粒度分布、纯度或化学成分、物理化学性质、表面或界面性质的非金属矿物粉体材料或产品。

(1) 选矿提纯技术 选矿提纯是指利用矿物之间或矿物与脉石之间密度、粒度和形状、磁性、电性、颜色（光性）、表面润湿性以及化学反应特性的不同对矿物进行分选和提纯的加工技术。根据分选原理的不同，可分为重力分选、磁选、电选、浮选、化学选矿、光电拣选等。

绝大多数非金属矿物只有选矿提纯以后其物理化学特性才能充分发挥。非金属矿的选矿提纯目的在于满足其在相关领域的应用，如耐火材料、石英玻璃、涂料、油墨及造纸填料和颜料、有机/无机复合材料、高技术陶瓷、微电子、生物医学、环境保护、光纤、密封材料等现代高技术和新材料。主要研究内容包括：①无机非金属矿的选矿提纯原理和方法，涉及的非金属矿物包括金红石、硅灰石、云母、氧化铝、石英、蓝晶石、红柱石、硅藻土、石墨、膨润土、伊利石、石榴子石、氧化镁、硅线石、石棉、高岭土、海泡石、凹凸棒土等；②微细颗粒提纯技术和综合力场分选技术；③适用于不同物料及不同纯度要求的精选提纯工艺与设备；④精选提纯工艺过程的自动控制等。它涉及矿物加工、晶体学、流体力学、颗粒学、高分子化学、表面与胶体化学、无机化学、有机化学、化工原理、岩石与矿物学等诸多学科。

非金属矿物材料选矿提纯的一个重要特点是，其纯度除了化学元素和化学成分要求外，部分矿物还要考虑其矿物成分（如硅藻土的无定形二氧化硅的含量、高岭土的高岭石含量、膨润土的蒙脱石含量）、结构（如鳞片石墨）、晶形（如云母、硅灰石）等。

(2) 粉碎分级技术 粉碎与分级是指通过机械、物理和化学的方法使非金属矿石粒度减小和具有一定粒度分布的加工技术。根据粉碎产物粒度大小和分布的不同，可将粉碎与分级细分为破碎与筛分、粉碎与分级、超细粉碎与精细分级，分别用于加工 $>1\text{mm}$ 、 $10\sim1000\mu\text{m}$ 及 $0.1\sim10\mu\text{m}$ 等不同粒度及粒度分布的粉体产品。

粉碎与分级是满足应用领域对粉体原（材）料粒度大小及粒度分布要求的粉体加工技术。主要研究内容包括：①粉体的粒度、物理化学特性及其表征方法；②不同性质颗粒的粉碎机理；③粉碎过程的描述和数学模型；④物料在不同方法、设备及不同粉碎条件和粉碎环境下的能耗规律、粉碎及分级效率或能量利用率及产物粒度分布；⑤粉碎过程力学；⑥粉碎过程化学；⑦粉体的分散；⑧助磨剂的筛选及应用；⑨粉碎与分级工艺及设备；⑩粉碎及分级过程的粒度监控和粉体的粒度检测技术等。它涉及颗粒学、力学、固体物理、化工原理、物理化学、流体力学、机械学、岩石与矿物学、晶体学、矿物加工、现代仪器分析与测试等诸多学科。

(3) 表面改性技术 表面改性是指用物理、化学、机械等方法对矿物粉体进行表面处理，根据应用的需要有目的地改变粉体的表面物理化学性质，如表面组成、结构和官能团、表面润湿性、表面电性、表面光学性质、表面吸附和反应特性等。根据改性原理和改性剂的不同，表

面改性方法可分为物理涂覆改性、化学包覆改性、沉淀反应改性、机械力化学改性、胶囊化改性等。

表面改性是满足应用领域对粉体原（材）料表面性质及分散性和与其他组分的相容性要求的粉体材料深加工技术。对于超细粉体材料和纳米粉体材料表面改性是提高其分散性和应用性能的主要手段之一，在某种意义上决定其市场的占有率。非金属矿物粉体材料的表面改性技术主要研究内容包括：①表面改性的原理和方法；②表面改性过程的化学、热力学和动力学；③表面或界面性质与改性方法及改性剂的关系；④表面改性剂的种类、结构、性能、使用方法及其与粉体表面的作用机理和作用模型；⑤不同种类及不同用途的无机粉体材料的表面改性工艺条件及改性剂配方；⑥表面改性剂的合成和表面改性设备；⑦表面改性效果的表征方法；⑧表面改性工艺的自动控制；⑨表面改性后无机粉体的应用性能研究等。它涉及复合材料、生物医学材料、胶体化学、有机化学、无机化学、高分子化学、无机非金属材料、高聚物或高分子材料、化工原理、颗粒学、表面或界面物理化学、现代仪器分析与测试等诸多相关学科。

（4）脱水干燥技术 非金属矿物粉体处理的后续加工作业，是指采用机械、物理化学等方法脱除加工产品中的水分，特别是脱除湿法加工产品中水分的技术。

脱水干燥技术的目的是满足应用领域对产品水分含量的要求和便于储存和运输。因此，脱水干燥技术也是非金属矿物材料必需的加工技术之一。脱水干燥包括机械脱水（离心、压滤等）和热蒸发（干燥）脱水两部分。非金属矿物粉体材料干燥脱水的特点是，部分黏土矿物材料（如膨润土、高岭土、海泡石、凹凸棒土、伊利石等）及超细非金属矿物材料水分含量高、机械脱水难度大、干燥后团聚现象严重。因此，常规的机械脱水方式难以有效脱水，一般采用压力脱水方式，特别是对于酸洗或漂白后的非金属矿物材料还必须在压滤过程中进行洗涤。为解决干燥后粉体材料，尤其是超细粉体材料的团聚问题，一般采用流态化干燥方式或在干燥设备中或干燥后设置解聚装置。非金属矿物粉体材料脱水干燥技术的发展趋势是提高效率、降低能耗、减少污染和恢复原级粒度或提高粉体粒度还原率（降低团聚率）。

（5）产品成型技术 产品成型技术是指采用机械、物理和化学的方法将微细或超微细非金属矿物粉体加工成具有一定形状、一定大小且粒度分布均匀的非金属矿物产品的深加工技术。其目的是方便超细非金属矿物粉体材料的应用，减轻超细粉体使用过程中的粉尘飞扬和提高其应用性能。主要研究内容包括成型工艺和设备。对于非金属矿物粉体材料，尤其是微米级和亚微米级的超细粉体材料直接在塑料、橡胶、化纤、医药、环保、催化等领域应用时，不同程度地存在分散不均、扬尘、服用不便、难以回收等问题。将其成型后使用是解决上述应用问题的有效方法之一，尤其适用于用作高聚物基复合材料（塑料、橡胶等）填料的非金属矿物粉体材料，如碳酸钙、滑石、云母、高岭土等，一般做成与基体树脂相容性好的各种母粒。

1.3.2 材料的加工与复合技术

（1）加工技术 非金属矿物材料的加工技术主要包括两种：物理加工技术和化学加工技术。物理加工技术的内容包括：各种非金属矿物材料的结构与性能；非金属矿物材料的制备工艺和设备；原（材）料配方、制备工艺等与非金属矿物材料结构和性能的关系；非金属矿物材料制备工艺的自动控制等。它涉及材料学、材料加工、材料物理与化学、固体物理、结构化学、高分子化学、有机化学、无机化学、电子、生物、环保、机械、自动控制、现代仪器分析与测试等学科。

非金属矿物材料的化学加工技术是以非金属矿产品为原料或主要对象，通过改变矿物分子的结构，提取某种有用元素或化合物的加工技术。如用含钡矿物重晶石生产钡盐系列产品；用

含铝矿物铝土矿、高岭土等生产氯化铝、硫酸铝、氧化铝等；用含硅矿物如石英、硅藻土制备白炭黑、沉淀二氧化硅和硅酸钠等。

非金属矿物材料的化学加工技术一般包括热化学加工、湿法分解或浸取、过滤分离、溶液精制、结晶、干燥、粉碎等工序。热化学加工可分为煅烧、焙烧、熔融等；湿法分解或浸取是利用酸、碱、盐类溶液在水热条件下提取固体物料中有用组分的过程，一般伴有化学反应。

(2) 复合技术 复合技术是指根据最终产品功能需要的原料配方或配制技术，包括不同化学组成、结构、颗粒形状的非金属矿物之间的配合或复合，即无机/无机复合；非金属矿物原料与有机物或有机高聚物的复合，即有机/无机复合等。复合技术，又称为物料配方复合技术，是非金属矿物材料或制品的核心技术之一。非金属矿物材料或制品种类繁多，涉及的领域非常广泛，按其功能可分为：热学功能材料（如保温节能材料、高温耐火材料、隔热和绝热材料、导热材料等）、光功能材料（如光导材料，荧光材料，聚光、透光、感光、偏振材料等）、电磁功能材料（如光导材料、磁性材料、半导体材料、压电材料、介电材料、电绝缘材料等）、结构或力学功能材料（如新型建材、高级陶瓷结构材料、高级磨料、摩擦材料、减摩润滑材料、密封材料等）、催化材料、吸附材料、吸波与屏蔽材料、颜料、黏结材料、生物医学功能材料、流变材料、装饰材料等。不同材料的原（材）料配方不同，因此，非金属矿物材料配方技术涉及广泛的学科面，如矿物加工、材料加工、无机非金属材料、高分子材料、新型建材、化工工程、机械、电子等，是一种多学科的综合。以功能化为核心，以环境友好为导向将是非金属矿物材料配方技术发展的方向。

(3) 加工工艺与设备 加工工艺与设备是指非金属矿物材料或制品的成型、固化、煅烧、表面修饰等工艺与设备，是制备非金属矿物材料或制品的关键技术之一。非金属矿物材料或制品的种类很多，一般来说，不同种类和不同用途的非金属矿物材料或制品的生产方法不同，工艺也是千差万别，较为共性的加工技术有成型、固化和煅烧技术。提高工艺性能、优化操作参数、降低设备能耗是非金属矿物材料或制备工艺与设备未来发展的主要方向。

1.4 非金属矿物加工特点

由于非金属矿物应用的多样性，与金属矿物及燃料矿物的加工相比，非金属矿物精细化加工具有以下特点。

① 非金属矿物选矿的技术指标在很多情况下，不是其中的某种有用元素，而是某种化学成分或矿物成分，如膨润土的蒙脱石含量、硅藻土的无定形二氧化硅含量、高岭土的高岭石含量、石墨的晶质（固定）碳含量、蓝晶石的氧化铝含量等。

② 结构特性是非金属矿物的重要性能和应用特性之一，在加工中应尽量保护矿物的天然结晶特性和晶形结构。如鳞片石墨、云母的片晶要尽可能地少破坏，因为在一定纯度下，颗粒直径越大或径厚比越大，价值越高；硅灰石粉体的长径越大，价值越高；海泡石和石棉纤维越长，价值越高等。

③ 非金属矿物的磨矿分级不仅仅是选矿的预备作业，它还包括直接加工成满足用户粒度和颗粒形状要求的粉磨分级作业以及超细粉碎和精细分级作业。

④ 表面和界面改性是非金属矿物加工最主要的特点之一。它是改善和优化非金属矿物的应用性能，提高其附加值的主要深加工技术之一。

⑤ 非金属矿物粉体材料脱水的特点是，部分黏土矿物材料（如膨润土、高岭土、海泡石、凹凸棒石、伊利石等）及超细非金属矿物材料的水分含量高，机械脱水难度大，干燥后团聚现象严重。因此，常规的机械脱水方式难以有效脱水，一般采用压力脱水方式，特别是对于酸洗

或漂白后的非金属矿物材料还必须在压滤过程中进行洗涤。为解决干燥后粉体材料，尤其是超细粉体材料的团聚问题，一般要在干燥设备中或干燥设备后设置解聚装置。

1.5 非金属矿物加工发展趋势

随着非金属矿物在人类生产与生活中扮演着越来越重要的角色，要求非金属矿物的深加工更加精细化，包括超细化、高纯化、晶体化、功能及复合化、特殊形态化。可以说，深加工是开发利用非金属矿物的必经之路，而功能化则是非金属矿物材料发展的主题。

(1) 超细化 非金属矿物的超细化是非金属矿物深加工的重要组成部分。矿物颗粒的大小直接影响其使用效果，这是因为随着非金属矿物粒度的减小，矿物的比表面积增大，其表面活性得到改善，使得非金属矿物的功能特性得到充分发挥。非金属矿物的超细化能促使矿物活性增高，从而加快各项物化反应，增强颗粒之间的结合力，加快矿物颗粒之间的融合，有利于复合材料的增强，拓宽其应用领域。表 1-4 列出了矿物颗粒加工深度与应用范围的关系。

表 1-4 非金属矿物颗粒加工深度及应用范围

产物粒级	超细粉碎(<10μm)	胶体材料(<1μm)	超微颗粒(<0.1μm)
应用范围	优质填料、涂料、矿物颜料、填充料、化工、陶瓷材料、悬浮体材料	催化剂、高性能涂料及颜料、矿物胶黏材料、精细陶瓷、活性材料	精细陶瓷、磁性、电子、光学材料、催化剂、生物材料、传感器材料

近年来对非金属矿物超细化的研究已从微米级逐步进入纳米级。纳米粒度范围的非金属矿物由于纳米效应而具有一些特殊的功能特性，使得非金属矿物颗粒应用领域渗透到高新技术产业中，如微电子信息、航空航天、生物、环保等领域。

以非金属矿物为原料制备纳米材料，体现高新技术与传统产业的结合，对促进我国传统非金属矿物产业结构的调整，提高行业整体水平，改善企业的经济效益具有十分重要的意义。

(2) 高纯化 任何一种非金属矿物都有其特定的矿物晶相和化学组成，膨润土主要矿物晶相为蒙脱石，理论结构式为 $(1/2\text{Ca}, \text{Na})_x(\text{H}_2\text{O})_4\{\text{Al}_{2-x}\text{Mg}_x[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$ ，高岭土主要矿物晶相为高岭石，理论结构式为 $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ 。但由于在原岩形成过程中其他元素渗入及后期受热液蚀变及风化作用的影响，非金属矿除含有主要晶相矿物成分外，还含有如石英、氧化铁等杂质，这样使得非金属矿的物理化学特性不能充分体现，势必会影响其应用效果。因此，非金属矿的精选提纯是其深加工的一项重要内容。在未来社会发展中，无论是新兴的高技术和新材料产业，还是传统产业，都将对非金属矿物材料的纯度提出更高的要求，那么非金属矿物的精选提纯技术难度也将随之增加。两种或多种综合力场精选提纯技术（重力、离心力、磁力、电力、化学力等）的结合将是未来非金属矿物高纯化的主要发展趋势，涉及的非金属矿物包括石英、高岭土、膨润土、滑石、云母、硅藻土、金红石、硅线石、硅灰石、海泡石、伊利石、凹凸棒石、蓝晶石、红柱石、萤石、石墨等。

非金属矿物的高纯化除了能提高其本身的物理化学特性外，还可以扩宽应用领域及产生巨大增值。纯度为 99.98% 的 ZrO_2 的价格为普通耐火材料用 ZrO_2 的 300 多倍，是电子材料用 ZrO_2 的 50 多倍。 BaSO_4 含量 >99% 的重晶石可以广泛应用于导电塑料、导电橡胶和导电涂料等，同时在航空航天、通信技术及精密电子等高新技术领域也得到应用。

(3) 晶体化 在合适的地质背景下（一定的温度、压力状态，一定的化学组分浓度），自然环境条件允许（拥有溶洞和裂缝）的情况下，就有可能发育成矿物晶体。纯的矿物晶体将充分发挥其物理化学特性，并广泛应用于社会的各个行业领域中。所以单晶化的作用，能够实现各种矿物特有的声、光、电、磁、热等特性，使之在工农业及军事高新技术领域中发挥巨大的作用。天然矿物晶体是不可再生的宝贵资源，故在实际使用过程中常因原料资源匮乏而受到限