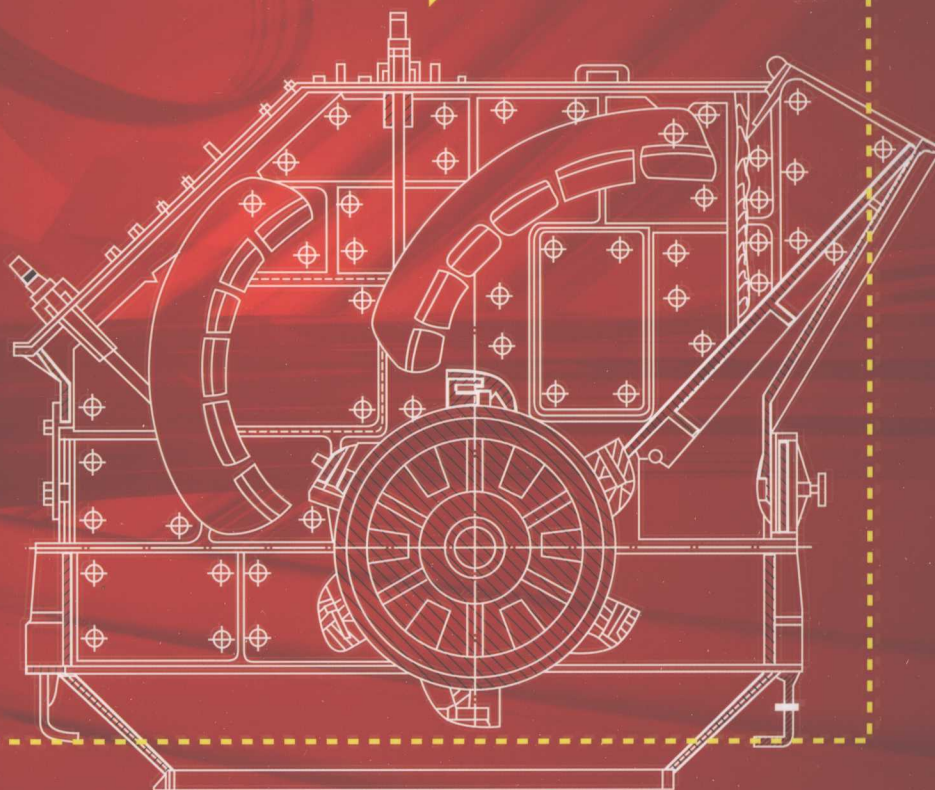


FEIJINSHU KUANGWU JIAGONG JISHU JICHU

非金属矿物 加工技术基础

王利剑 主编

田文杰 张冬阳 副主编



化学工业出版社

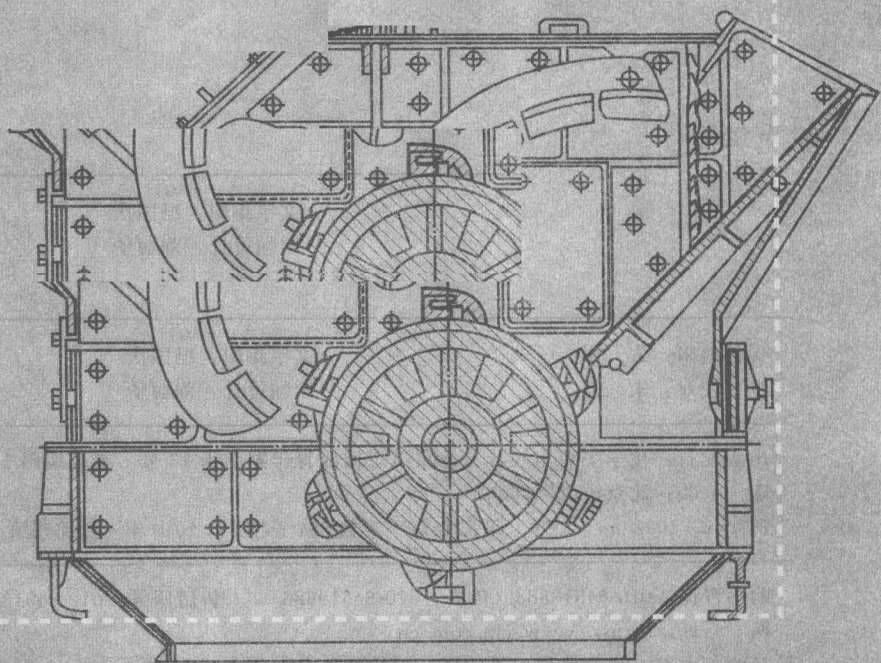
FEIJINSHU KUANGWU JIAGONG JISHU JICHU

非金属矿物

加工技术基础

王利剑 主编

田文杰 张冬阳 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

非金属矿物加工技术基础/王利剑主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.4
ISBN 978-7-122-07786-8

I. 非… II. 王… III. 非金属矿物-加工 IV. TD97

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 027751 号

责任编辑: 朱 彤

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 宋 夏

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: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 394 千字 2010 年 4 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: 45.00 元

版权所有 违者必究

● 前言

伴随人类文明的进步和科学技术的发展,非金属矿及非金属矿物材料越来越广泛地用于建材、化工、石油、冶金、轻工、机械、农业、药品等传统工业部门和以信息、航空航天、生物化工、新材料、新能源为代表的现代高新技术产业以及环境保护与生态建设领域。

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,非金属矿及非金属矿物材料的消费量与产值必然要大于金属矿及金属材料,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,也是一个经济和社会正在迅速发展与变化的世界大国,因此,未来我国高新技术产业的快速发展、传统产业的技术进步、资源节约型和环境友好型国策的全面落实将给我国非金属矿工业带来前所未有的发展机遇,紧紧抓住这一难得的历史机遇,全面提升我国非金属矿加工应用水平,将成为我国经济发展的新的增长点。

在新的形势下,为了使广大科研、生产及专业人员全面了解非金属矿物加工技术及基础理论,我们在现有国内外有关矿物材料和非金属矿物文献资料基础上,编写本书。本书较为系统地论述了非金属矿物加工技术,并详细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。全书共六章,涉及非金属矿物化学、非金属矿物选矿提纯技术、非金属矿物粉体加工技术、非金属矿物原料加工及应用实践、非金属矿物材料的检测与表征等内容。

本书由王利剑主编,田文杰、张冬阳副主编,林海燕、阳勇福、马名杰(河南理工大学)、徐国辉参加了编写。

本书在编写过程中得到了郑水林教授的指导和帮助,得到了洛阳理工学院材料科学与工程系领导的大力支持,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,疏漏和不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者
2010年2月

第1章 绪论	1
1.1 非金属矿物加工技术的重要意义	1
1.2 非金属矿物的分类与用途	3
1.3 非金属矿物加工技术的主要内容	4
1.3.1 颗粒制备与处理技术	5
1.3.2 非金属矿物材料加工技术	6
1.3.3 非金属矿物化工技术	7
1.4 非金属矿物加工技术的发展趋势	7
第2章 非金属矿物化学	10
2.1 非金属元素在元素周期表中的位置	10
2.1.1 非金属元素的原子结构及其外层电子构型	10
2.1.2 非金属元素的外层电子构型和它们在周期表中位置的关系	14
2.2 非金属元素的通性	15
2.2.1 非金属元素的氧化态	15
2.2.2 非金属元素的成键特征	16
2.2.3 非金属单质的结构	16
2.3 非金属化合物的晶体	17
2.3.1 分子间力和氢键	17
2.3.2 晶体和无定形体	19
2.3.3 非金属单质及其化合物的晶体	19
2.4 无机非金属材料化学	20
2.4.1 无机非金属材料的主要化学元素成分	20
2.4.2 无机非金属材料化学反应特点	23
第3章 非金属矿物选矿提纯技术	27
3.1 概述	27
3.2 选矿技术基础	27
3.2.1 选矿概念	27
3.2.2 选矿过程	28

3.2.3	选矿指标	28
3.2.4	非金属矿物选矿特点	29
3.3	重力分选	30
3.3.1	概述	30
3.3.2	基本原理	33
3.3.3	风力分选	37
3.3.4	跳汰分选	40
3.3.5	重介质分选	44
3.3.6	空气重介质流化床分选	54
3.3.7	摇床分选	55
3.3.8	斜槽分选	56
3.3.9	螺旋分选	56
3.4	浮选	57
3.4.1	概述	57
3.4.2	浮选基本原理	58
3.4.3	浮选药剂	63
3.4.4	浮选设备	70
3.4.5	浮选工艺过程	72
3.4.6	影响浮选过程的因素	73
3.5	磁选	78
3.5.1	基本概念	78
3.5.2	磁选基本原理	81
3.5.3	磁选设备	82
3.5.4	磁流体分选	83
3.6	电选	84
3.6.1	基本概念	84
3.6.2	基本原理	85
3.6.3	电选机	87
3.6.4	影响电选的因素	90
3.6.5	电选进展	91
3.7	其他分选方法	91
3.7.1	拣选	91
3.7.2	化选	95
3.7.3	超细分选	96
3.7.4	摩擦与弹跳分选	97
3.7.5	光电分选	98
3.7.6	微生物选矿	99

第4章 非金属矿物粉体加工技术 **101**

4.1	概述	101
4.2	粉体粒度特性与表征	101

4.2.1	粉体粒度特性	101
4.2.2	粉体的表征	102
4.3	粉体填充与堆积特性	111
4.3.1	粉体填充指标	111
4.3.2	粉体颗粒的填充与堆积	111
4.4	粉体的分散	114
4.4.1	工业生产中的粉体分散	114
4.4.2	固体颗粒在空气中的分散	116
4.4.3	固体颗粒在液体中的分散	120
4.5	粉体制备	126
4.5.1	粉碎的基本概念	126
4.5.2	被粉碎物料的基本物性	128
4.5.3	材料的粉碎机理	130
4.5.4	粉碎工艺	132
4.5.5	破碎设备	135
4.5.6	粉磨设备	141
4.5.7	超细粉碎设备	146
4.6	粉体表面改性	151
4.6.1	概述	151
4.6.2	表面改性方法	152
4.6.3	表面改性工艺与设备	154
4.6.4	表面改性剂	161
4.7	微细粉粒的燃烧和粉尘爆炸	164
4.7.1	燃烧和爆炸	164
4.7.2	防止粉尘爆炸的方法	167
4.8	粉体加工与环境保护	169
4.8.1	粉尘危害	169
4.8.2	粉尘排放限值	171
4.8.3	除尘器选型要点	171
4.8.4	除尘系统设计原则	172
第5章	非金属矿物原料加工与应用实践	174
5.1	非金属矿物原料资源的开发利用现状	174
5.2	非金属矿物原料在水泥加工中的应用	176
5.2.1	石灰质原料	176
5.2.2	黏土质原料	177
5.2.3	校正原料	178
5.3	非金属矿物原料在玻璃加工中的应用	179
5.3.1	石英类原料的种类	179
5.3.2	长石类原料	179
5.3.3	引入氧化镁的主要原料	180

5.4	非金属矿物原料在建筑陶瓷加工中的应用	180
5.4.1	建筑陶瓷用原料的分类	180
5.4.2	建筑陶瓷生产对原料的一些特殊要求	181
5.4.3	建筑陶瓷工业常用原料	181
5.5	非金属矿物原料在耐火材料加工中的应用	183
5.5.1	我国耐火材料矿物资源状况	184
5.5.2	高铝质原料	184
5.5.3	镁质原料	185
5.6	非金属矿物原料在建筑装饰材料加工中的应用	185
5.7	非金属矿物原料在环保材料加工中的应用	187
5.7.1	在节能降耗方面的作用	188
5.7.2	在“三废”处理中的应用	188
5.7.3	在资源利用及生态过程中的环保作用	189
第6章	非金属矿物材料的检测与表征	191
6.1	X射线衍射分析	191
6.1.1	X射线分析法原理	191
6.1.2	X射线衍射物相分析	193
6.2	电子显微分析	197
6.2.1	透射电子显微镜	197
6.2.2	扫描电子显微镜	198
6.2.3	电子探针显微分析	198
6.2.4	电子显微分析在无机非金属材料科学中的应用	199
6.3	热分析	201
6.3.1	差热分析	201
6.3.2	热重分析	204
6.3.3	综合热分析在非金属矿物中的应用	204
6.4	红外吸收光谱分析	206
6.4.1	红外吸收光谱的基本原理	206
6.4.2	红外吸收光谱的基本概念	207
6.4.3	红外光谱图的特征	207
6.4.4	红外分光光度计	208
6.4.5	红外吸收光谱的应用	208
6.5	光电子能谱分析	211
6.5.1	光电子能谱的基本原理	211
6.5.2	光电子能谱分析的特点	212
6.5.3	光电子能谱分析的应用	212
6.6	核磁共振分析	215
6.6.1	核磁共振原理	215
6.6.2	化学位移	215
6.6.3	核磁共振技术	216

6.6.4 核磁共振波谱技术的应用	216
6.7 比表面积分析	219
6.7.1 气体吸附法测定比表面积原理	219
6.7.2 比表面积测试方法	219
6.8 孔结构分析	221
参考文献	223



第1章

绪论

1.1 非金属矿物加工技术的重要意义

非金属矿物是与人类生产、生活密切相关的矿产资源之一，是人类利用最早的地球矿产资源。在人类发展的历史长河中，非金属矿的加工利用对人类社会文明进步的贡献不可低估。石器时代标志着人类社会有目的地使用天然非金属矿，后来虽然金属材料的使用逐渐增多而大大超过了非金属物材料的使用。但随着近代工业革命的兴起、科学技术的突飞猛进，在许多领域金属材料已不能适用，而非金属材料在高强、高温、轻质、耐磨性等方面的优异性能重新得到人们的广泛关注，非金属矿物材料的加工利用以及相关技术得到了飞速发展，甚至非金属矿产开发利用已成为衡量一个国家工业化成熟程度的重要标志。

在非金属矿的加工利用工艺技术发展中，最初是通过手工作业从天然矿石获得所需矿物，并没有形成一门工业技术，这种现象一直延伸到 19 世纪初期。随着全球工业的快速发展，对矿物原料需求大幅增加，加之 18 世纪产业革命发展的基础和巨大推动，非金属矿的加工技术真正从手工作业向现代工业技术转变，出现了选矿工艺和球磨、分级等相关加工机械设备，非金属矿的加工利用技术逐步形成了完整的学科和工艺技术体系。

非金属矿在国民经济许多行业中广为利用，许多高新技术的发展都与非金属矿的利用密切相关，新材料产业、新能源产业、航空航天技术以及现代微电子及信息技术等方面的飞速发展都和非金属矿的利用分不开，不仅如此，非金属矿的加工利用也与人们生活水平的提高密切相关。直接与人们生活相关的橡胶、塑料、涂料、建材、造纸等行业更需要大量非金属矿物原料，表 1.1 是非金属矿在各工业领域的应用，从中可见一斑。

人类在进入 21 世纪后产业结构将进行调整，以信息、生物、航空航天、海洋开发以及新材料和新能源为主的高技术和新材料产业将逐渐壮大。这些高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，石墨、云母、石英、锆英石、金红石、高岭土等与微电子及信息技术及其产业有关；氧化硅、石墨、云母、高岭土、硅灰石、硅藻土、滑石、方解石、冰洲石、硅线石、石英、红柱石、蓝晶石、石棉、菱镁矿、石膏、珍珠岩、叶蜡石、金刚石、石榴子石、蛭石、透辉石、透闪石、电气石、沸石、玄武岩、辉绿岩等与新材料技术及其产业有关；石墨、重晶石、膨润土、石英等与新能源有关；沸石、麦饭石、硅藻土、凹凸棒石、海泡石、膨润土、蛋白土、珍珠岩、高岭土等与生物技术及产业有关；石墨、石棉、云母、石英等与航空航天技术与产业有关。因此，高技术和新材料产业与非金属矿密切相关，是 21 世纪初非金属矿深加工技术和产业发展的重要机遇之一。

从化工、机械、能源、汽车、轻工、冶金、建材等传统产业上来看，进入 21 世纪，将引

表 1.1 非金属矿在各工业领域的应用

行 业 名 称	非 金 属 矿
电子行业	石墨、石棉、云母、锆英石、高岭土、金红石等
建筑材料	矾土、石膏、硅砂、石灰石、天然碱、板石、膨胀页岩、大理石、花岗岩、膨润土等
磨料	石榴石、刚玉、金刚石、珍珠岩等
绝热、耐火及保温材料	矾土、石墨、耐火黏土、蓝晶玉、叶蜡石、白云石、菱镁矿、橄榄石、石棉、云母、蛭石、珍珠岩、浮石、硅藻土等
化工行业	硅砂、石灰石、硫黄、重晶石、明矾石、锂矿石、硼砂、菱镁矿、硅灰石、锂矿石、磷矿石、蛇纹石、钠硝石、钾矿、方解石、珍珠岩、白土、高岭土、滑石、膨润土、凹凸棒土等
陶瓷	冰晶石、硼砂、叶蜡石、长石、磁石、硅灰石、粉土、白土、高岭土、滑石等
能源	重晶石、石墨、膨润土、石英等
冶金	矾土、沸石、冰晶石、石墨、硅石、石灰石、蛭石、膨润土等
生物、农业	膨润土、沸石、麦饭石、硅藻土、凹凸棒石、海泡石、蛋白土、珍珠岩、高岭土等

入新技术和使用新材料，进行技术革新和产业升级。这些技术进步与产业升级与非金属矿深加工产品密切相关。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、水镁石与氢氧化镁、氢氧化铝等功能矿物填料；汽车面漆、乳胶漆等高档涂料以及防腐蚀和辐射、道路发光等特种涂料需要大量的珠光云母、着色云母、超细和高白度碳酸钙、超细二氧化硅、针状超细硅灰石、超细和高白度煅烧高岭土、有机膨润土等非金属矿物颜料、填料和增黏剂；冶金工业的技术进步和产品结构调整需要高品质的以硅线石、红柱石、蓝晶石等高铝矿物为原料的高铝耐火材料和以镁（菱镁矿）和碳（石墨）为原料的镁碳复合材料；新型建材和防火、节能产品的发展需要大量的石膏板材和饰面板、花岗岩和大理岩板材和异型材，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、石棉制品等；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、载体以及以膨润土为原料的活性白土；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矿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、云母等功能无机填料以生产出有利于人类健康的功能纤维。因此，传统产业的技术进步和产业升级与非金属矿紧密相连，是 21 世纪初我国非金属矿深加工技术和产业发展的主要机遇之一。

环境保护和生态建设是人类 21 世纪面临的重大挑战之一，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 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。此外，大多数非金属矿都是环境友好材料，例如，在塑料薄膜中加入一定量的超细重质碳酸钙可制成降解塑料，超细水镁石用作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。因此，环保产业和生态建设是 21 世纪初我国非金属矿深加工技术和非金属矿物材料发展的另一个重要机遇。

1.2 非金属矿物的分类与用途

非金属矿种类繁多，而且许多非金属矿的化学成分复杂，其用途几乎遍及各个工业部门。在同一应用领域中，不同种类的非金属矿又可相互替代。

我国目前按非金属矿的工业用途分为 6 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。美国分为 14 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，助熔剂，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 所示是按用途对非金属矿进行的归纳分类。表 1.3 是从非金属矿物功能材料角度进行的分类。

表 1.2 主要非金属矿物和岩石的用途和分类

用 途	非金属矿物和岩石
化工原料	岩盐、芒硝、天然碱、明矾石、自然硫、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、凹凸棒石、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、蛋白土等
保温、隔热、隔音材料	石棉、石膏、石墨、蛭石、硅藻土、海泡石、珍珠岩、玄武岩、辉绿岩、浮石与火山灰等
铸石材料	玄武岩、辉绿岩、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、砂石、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
熔剂和冶金	萤石、长石、硼砂、石灰岩、白云岩
钻探工业	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、凹凸棒石、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
2	力学功能材料	石棉、石膏、石墨、花岗岩、大理岩、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、缝石、蛋白土等	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)、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

续表

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
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、皓 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
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、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
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、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
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、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
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	各种涂料、胶黏剂、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、黏土基复和黏结剂等	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、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

随着科学技术的进步，许多以往认为无价值的矿物和岩石，由于得到工业上的应用而进入非金属矿的行列。因此，非金属矿及其非金属矿物材料的用途十分广泛。

1.3 非金属矿物加工技术的主要内容

非金属矿加工利用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或化工产品以及一定尺寸、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或制品。

非金属矿加工应用技术主要包含以下三个方面。

① 颗粒制备与处理技术 主要包括矿石的粉碎与分级技术、选矿提纯技术、矿物(粉体)

的表面或界面改性技术、脱水干燥技术、造粒技术等。

② 非金属矿物材料加工技术 主要包括非金属矿物材料的原料配方技术、加工工艺与设备等。

③ 非金属矿物化工技术 主要是以非金属矿为主要原料的无机化工产品制备技术。

1.3.1 颗粒制备与处理技术

颗粒制备与处理技术是指通过一定的技术、工艺、设备生产出满足应用领域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,是非金属矿物加工利用所必需的加工技术之一。

(1) 粉碎与分级

粉碎与分级是指通过机械、物理和化学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(磨)与分级及超细粉碎(磨)与精细分级,分别用于加工大于1mm、10~1000 μm 及0.1~10 μm 等不同粒度及其分布的粉体产品。

粉碎与分级是以满足应用领域对粉体原(材)料粒度大小及粒度分布要求为目的的粉体加工技术。主要研究内容包括:粉体的粒度、物理化学特性及其表征方法;不同性质颗粒的粉碎机理;粉碎过程的描述和数学模型;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、粉碎和分级效率或能量利用率及产物粒度分布;粉碎过程力学;粉碎过程化学;粉体的分散;助磨剂的筛选及应用;粉碎与分级工艺及设备;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。

(2) 表面改性

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表面的物理化学性质,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、胶囊化改性高能处理改性等。

表面改性是以满足应用领域对粉体原(材)料表面或界面性质、分散性和与其他组分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能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。非金属矿物粉体材料的主要研究内容包括:表面改性的原理和方法;表面改性过程的化学、热力学和动力学;表面或界面性质与改性方法及改性剂的关系;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;不同种类及不同用途无机粉体材料的表面改性工艺条件及改性剂配方;表面改性剂的合成和表面改性设备;表面改性效果的检测和表征方法;表面改性工艺的自动控制;表面改性后无机粉体的应用性能研究等。它涉及颗粒学、表面或界面物理化学、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、复合材料、生物医学材料、化工原理、现代仪器分析与测试等诸多相关学科。

(3) 选矿提纯

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。

非金属矿的选矿提纯是以满足相关应用领域,如高级和高技术陶瓷、耐火材料、微电子、光纤、石英玻璃、涂料、油墨及造纸填料和颜料、密封材料、有机/无机复合材料、生物医学、环境保护等现代高新技术和新材料对非金属矿物原(材)料纯度要求的重要的非金属矿物加工技

术之一。主要研究内容包括：石英、硅藻土、石墨、金红石、硅灰石、硅线石、蓝晶石、红柱石、石棉、高岭土、海泡石、凹凸棒土、膨润土、伊利石、石榴子石、云母、氧化铝、氧化镁等无机非金属矿的选矿提纯原理和方法；微细颗粒提纯技术和综合力场分选技术；适用于不同物料及不同纯度要求的精选提纯工艺与设备；精选提纯工艺过程的自动控制等。它涉及颗粒学、流体力学、岩石与矿物学、晶体学、矿物加工、物理化学、表面与胶体化学、有机化学、无机化学、高分子化学、化工原理、机械学、现代仪器分析与测试等诸多学科。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（如膨润土的蒙脱石含量，硅藻土的无定形二氧化硅的含量、高岭土的高岭石含量）、结构（如鳞片石墨）、晶形（如云母、硅灰石）等。

（4）脱水干燥技术

脱水干燥技术是非金属矿物粉体材料的后续加工作业，是指采用机械、物理化学等方法脱除加工产品中的水分，特别是湿法加工产品中水分的技术。其目的是满足应用领域对产品水分含量的要求和便于贮存和运输。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需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）造粒技术

造粒技术是指采用机械、物理和化学方法将微细或超细非金属矿粉体加工成具有较大粒度及粒度分布的非金属矿物材料深加工技术。其目的是方便超细非金属矿物粉体材料应用，减轻超细粉体使用时的粉尘飞扬和提高其应用性能。主要研究内容包括造粒工艺和设备。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。将其造粒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。

目前，造粒方法主要有压缩造粒、挤出造粒、滚动造粒、喷雾造粒、流化造粒方法等。造粒方法的选择要依原料特性以及对产品粒度大小和分布、产品颗粒形状、颗粒强度、孔隙率、颗粒密度或容重等的要求而定。

1.3.2 非金属矿物材料加工技术

非金属矿物材料是指以非金属矿为基本或主要原料，通过物理、化学方法制备的功能性非金属矿物材料，如机械工业和航空航天工业用的石墨密封材料和石墨润滑剂、石棉摩擦材料、高温和防辐射涂料等；电子工业用的石墨导电涂料、显像管石墨乳、熔炼水晶等；用硅藻土、蛋白土、珍珠岩制备的吸附、助滤材料；以硅藻土、膨润土、海泡石、凹凸棒石、沸石等制备的吸附环保材料；以高岭土（石）为原料制备的煅烧高岭土、铝尖晶石、莫来石、赛龙、分子筛和催化剂；以珍珠岩、硅藻土、石膏、石灰石、蛭石、石棉等制备隔热保温防火和节能材料及轻质高强建筑装饰材料；以碎云母为原料生产云母纸和云母板等。其研究内容主要包括：各

种非金属矿物材料的结构和性能；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。其核心技术主要包括以下两个方面。

（1）原料配方复合技术

原料配方复合技术是指根据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、粒形非金属矿物原料的配合或复合，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；其他助剂的配合等。原材料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：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、减磨润滑材料、密封材料等）、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）、电磁功能材料（如导电材料、磁性材料、半导体材料、压电材料、介电材料、电绝缘材料等）、光功能材料（如光导材料、荧光材料、聚光材料、透光材料、感光材料、偏振材料等）、吸波与屏蔽材料、催化材料、吸附材料、流变材料、颜料、黏结材料、装饰材料、生物医学功能材料等。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、生物等，是一种多学科的综合。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题。

（2）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。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或制品工艺与设备发展的主题。

1.3.3 非金属矿物化工技术

非金属矿物化工是以非金属矿产品为原料或主要对象，通过对矿物分子结构的改变，提取某种有用元素或化合物的加工技术。如用含氟矿物萤石制备含氟酸的化合物；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；用含硅矿物石英、蛋白石、硅藻土制备硅酸钠或水玻璃、沉淀二氧化硅或白炭黑等；用含镁矿物菱镁矿、白云石生产氯化镁、硫酸镁、氧化镁、轻质碳酸镁等；用石灰石生产氧化钙、轻质碳酸钙或沉淀碳酸钙等；用明矾石制备硫酸、硫酸钾等。

非金属矿物化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。

1.4 非金属矿物加工技术的发展趋势

21 世纪非金属矿物粉体原（材）料在高技术、新材料、传统产业技术进步和产业升级、环保、生物医药等产业以及人类日常生活中的广泛应用是以该原（材）料中较高的技术含量为前提的，因此，深加工是开发利用非金属矿的必由之路，而功能化则是非金属矿物材料发展的主题。

(1) 精选提纯

由于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体现和发挥。因此, 21 世纪无论是新兴的高技术和新材料产业、生物医药、环保产业, 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。而随着非金属矿物材料纯度要求的提高, 精选提纯技术的难度也将增加, 此外, 资源的贫化和资源综合利用率要求的提高也将增加精选提纯技术的难度。因此, 为了满足相关应用领域对非金属矿物原(材)料高纯化的要求, 微细粒选矿提纯和综合力场(重力、离心力、磁力、电力、化学力)精选技术将成为未来非金属矿提纯技术的主要发展趋势, 涉及的非金属矿物将包括石墨、石英、高岭土、云母、滑石、硅藻土、锆英砂、硅灰石、重晶石、金红石、膨润土、萤石、硅线石、红柱石、蓝晶石等。

(2) 超细粉碎

由于超细粉体具有比表面积大、表面活性高、化学反应速率快、烧结温度低且烧结体强度高、填充补强性能好、遮盖率高等优良的物理化学性能, 因此, 许多应用领域要求非金属矿物原(材)料的粒度微细(微米或亚微米); 部分领域不仅要求粒度超细而且要求粒度分布范围窄。如部分高档纸张涂料要求细度小于 $2\mu\text{m}$ 的重质碳酸钙 $\geq 90\%$, 粒度分布要求最大粒度 $\leq 5\mu\text{m}$, 细度小于 $0.2\mu\text{m}$ 的重质碳酸钙占 $10\% \sim 15\%$; 再如, 降解塑料要求细度为 $6 \sim 7\mu\text{m}$ 的重质碳酸钙 $\geq 97\%$, 要求最大粒度 $\leq 8\mu\text{m}$; 功能纤维填料要求 97% 的无机非金属填料的细度 $\leq 2\mu\text{m}$, 最大粒度 $\leq 3\mu\text{m}$; 高聚物基复合材料用氢氧化镁和氢氧化铝阻燃填料要求中位径 $d_{50} \leq 1\mu\text{m}$, 97% 的粒径为 $5 \sim 6\mu\text{m}$ 。21 世纪市场对各类非金属矿超细粉体材料的需求量将显著增大。因此, 为了满足相关应用领域对非金属矿物原(材)料超细化、窄分布和大批量生产的要求, 未来粉碎与分级技术发展的重点将是超细粉碎和精细分级技术。第一, 将在现有粉碎设备基础上完善工艺配套, 开发分级粒度细、精度高、处理能力大、单位产品能耗低、磨耗小、效率高的精细分级设备; 第二, 将发展粉碎极限粒度小、粉碎比和生产能力大、单位产品能耗低、磨耗小、粉碎效率高、适用范围宽或者可用于低熔点、韧性、高硬度、高纯度、易燃易爆等特殊物料加工的超细粉碎方法和设备; 第三, 发展粒度大小和粒度分布的自动监控技术, 完善粒度检测方法和仪器。非金属矿超细粉体加工业将主要围绕方解石、大理石、白垩、滑石、叶蜡石、伊利石、石墨、高岭土、云母、硅灰石、锆英砂、金红石、重晶石、石英、石榴子石、碳化硅、氮化硼等发展。同时发展用于生产高长径比硅灰石和透闪石粉体及大径厚比湿磨云母粉的专门的粉碎、分级工艺与设备。

(3) 表面改性

许多应用领域都对非金属矿物材料的表面或界面性质有特殊要求, 如高聚物基复合材料(塑料、橡胶、胶黏剂等)、多相复合陶瓷材料、涂料、生物医学材料、功能纤维等要求非金属矿物粉体材料表面或界面与有机或无机基料(高聚物、陶瓷坯料、油性漆、水性漆、化学纤维等)及生物基体有良好的相容性; 石化工业用的沸石和高岭土催化剂或载体要有特定的孔径分布和较高的比表面积, 4A 分子筛要有一定的钙离子吸附能力, 炼油脱色用的活性白土(膨润土)以及啤酒过滤用的硅藻土要有较强的表面吸附能力; 用于水处理的硅藻精土对有机、无机污染物及重金属离子等有选择性吸附的能力等。虽然粉体材料表面改性技术的发展较晚, 但由于可提高或改善非金属矿物粉体材料与填充或复合基料的相容性、对提高现代高聚物/无机复合材料、多相复合陶瓷材料、高档或特种涂料、功能性纤维的性能等具有重要意义。因此, 为了满足相关应用领域对非金属矿物原(材)料表面和界面性质的要求, 粉体表面改性、活化和复合技术将成为非金属矿物粉体材料最主要的深加工技术之一。粉体表面改性或活化技术的针对性很强, 未来将主要发展能适应于不同用途和要求的、粉体和改性剂分散好、包覆率或活化度高、产品质量稳定、单位产品能耗少、成本低、操作简单、容易控制的工艺和相关设备, 以及针对不同用途和适应不同应用领域要求的表面改性配方技术, 特别是发展能显著改善超细粉