

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、轻工等传统行业；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专业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

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
3	非金属矿物填料与颜料	81
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
4	非金属矿物基摩擦材料	143
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
5	非金属矿物基密封材料	164
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	β 型半水石膏（建筑石膏）	234
8.1.2	α 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
10 建筑装饰材料	305
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
11	聚合物/黏土纳米复合材料	338
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
	参考文献	368

1

绪 论

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矿物材料密切相关。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矿物颜料、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 非金属矿物材料的分类

非金属矿种类繁多，因此非金属矿物材料的种类也很多。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 非金属矿物材料的分类

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 非金属材料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 μm)、超细粉(0.1~10 μm)、超微细粉或一维、二维纳米粉(0.001~0.1 μm)、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、蛋白石等	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；材料结构与性能表征等。

(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 CaO 和 CO_2 。其理论组成为 CaO 56.03%， CO_2 43.97%，但常含有少量的 MgO 、 SiO_2 、 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 NaCl 结构对比。如果将 NaCl 的单位晶胞沿三次轴压缩，并将三次轴直立起来，将 Na^+ 代之以 Ca^{2+} ，将 Cl^- 代之以 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 即形成方解石的结构。 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 阴离子团三角四面体皆垂直于三次轴，使整个结构中 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。 Ca 的配位数为 6。这样与 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。

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 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）。

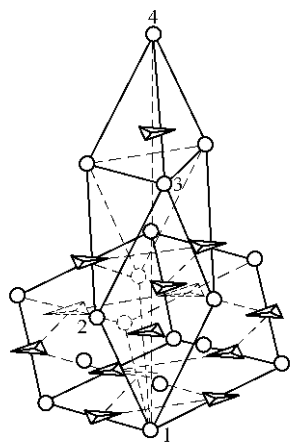


图 2.1 以菱面体晶胞表示的方解石的晶体结构

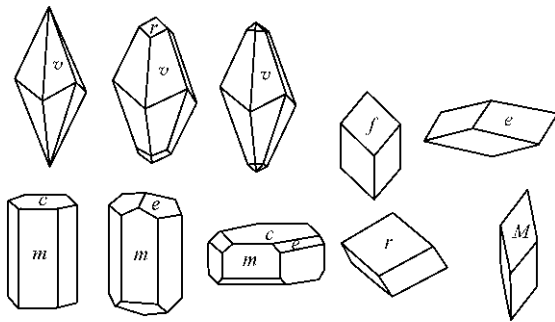


图 2.2 方解石的晶体形态

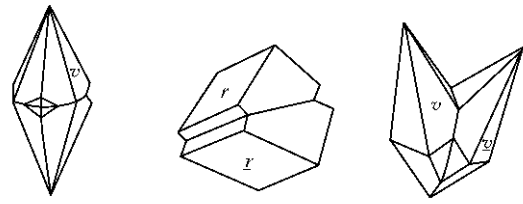
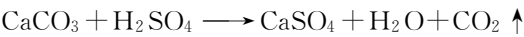


图 2.3 方解石双晶

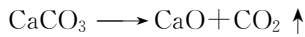
方解石的集合体形态也是多种多样的。有片状（板状）或纤维状的方解石，呈平行或近似平行的连生体，还有致密块状（石灰岩）、粒状（大理岩）、土状（白垩）、多孔状（石灰华）、钟乳状和鲕状、豆状、结核状、葡萄状等。

方解石一般为无色或白色，有些被 Fe、Mn、Cu 等元素或杂质染成浅黄、浅红、紫、褐黑色；莫氏硬度为 3，密度为 2.6~2.9g/cm³。

方解石不耐酸腐蚀，遇酸分解为 CO₂、水和盐，以硫酸为例，其反应式如下：



方解石在 800℃ 以上的高温下煅烧分解为 CaO 和 CO₂。



方解石的主要高温热力学性质如表 2.1 所列。图 2.4 所示为方解石及其他碳酸盐矿物的差热分析曲线。

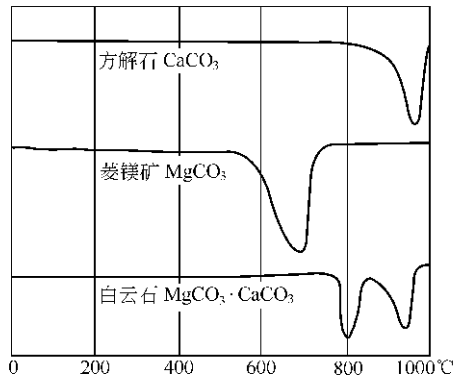


图 2.4 方解石及其他碳酸盐矿物的差热分析曲线

表 2.1 方解石的主要高温热力学性质

温 度 /K	H_T-H_{298} /kJ	S_T	$\frac{-(G_T-H_{298})}{T}$	由元素生成化合物		
				$\Delta H_{f,T}^\ominus$	$\Delta G_{f,T}^\ominus$	$\lg K_T$
		/[J/(K·mol)]		/(kJ/mol)		
298.15	0.000	91.710	91.710	—1207.469	—1129.000	197.796
400	9.288	118.510	95.288	—1206.490	—1102.351	143.952
500	19.288	140.823	102.247	—1205.279	—1076.480	112.459
600	30.125	160.581	110.373	—1203.795	—1050.869	91.486
700	41.380	177.930	118.817	—1202.402	—1025.497	76.523
800	52.969	193.401	127.195	—1201.235	—1000.329	65.315
900	64.852	207.402	135.344	—1199.971	—975.286	56.604
1000	77.111	220.318	143.207	—1198.785	—950.371	49.642
1100	89.747	232.361	150.773	—1197.620	—925.370	43.954
1200	102.717	243.647	158.049	—1203.762	—900.370	39.192
1300	115.558	153.926	165.034	—1201.693	—875.134	35.163
1400	128.825	263.757	171.739	—1199.270	—850.144	31.719

注： $H_T - H_{298}$ 为温度 T 时的热焓； S_T 为温度 T 时的标准熵； $-(G_T - H_{298})/T$ 为温度 T 时自由能函数之负值； $\Delta H_{f,T}^\ominus$ 为温度 T 时的标准生成热； $\Delta G_{f,T}^\ominus$ 为温度 T 时的标准生成自由能； $\lg K_T$ 为温度 T 时以 10 为底的生成反应的平衡常数的对数值，量纲为 1（以下同）。

2.1.2 白云石

白云石是一种含钙、镁高的碳酸盐岩。较纯的白云石的颜色一般为白色或灰白色，含铁者呈灰色~暗褐色。其主要物理化学性质详见表 2.2。

表 2.2 白云石的主要物理化学性质

化学式	理论化学成分 /%	烧失量 /%	与冷盐酸反应	晶体结构	颜色	光泽	密度 /(g/cm³)	硬 度
CaMg(CO ₃) ₂	CaO 30.4 MgO 21.7 CO ₂ 47.9	44.5~47.0	缓慢反应	菱面体	灰白色	玻璃光泽	2.8~2.9	3.5~4.0

白云石属三方晶系，晶体结构与方解石类似，不同点在于 Ca、Mg 沿着三次轴交替排列，因此使白云石对称型比方解石降低。白云石晶体常呈菱面体状，晶面常弯曲成马鞍形，有时成柱状或板状（图 2.5）集合体常呈粒状和致密块状。菱面体 $r(10\bar{1}1)$ 最发育，有时出现菱面体 $m(40\bar{4}1)$ 、六方柱 $a(11\bar{2}0)$ 及平行双面 $c(0001)$ 。

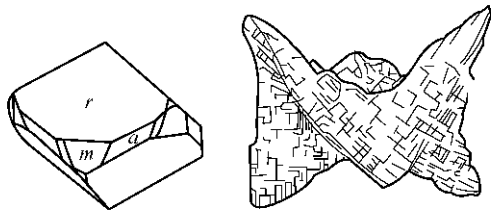
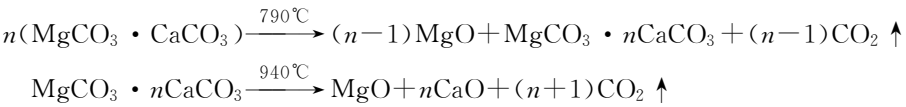


图 2.5 白云石的晶体

白云石受热时分解，逸出 CO₂。分解分两阶段进行：790℃左右白云石中的 MgCO₃ 首先分解；940℃左右 CaCO₃ 和残存的 MgCO₃ 分解，其反应式如下：



由于白云石在化学组成、结晶状态与岩石构造上的差别，不同白云石的分解温度不完全一致。900~1000℃之间白云石的分解产物为游离的 CaO 和 MgO，此种分解产物称为轻烧白云石或苛性白云石。其外观为白色粉块，结构疏松，气孔率大于 50%，密度较低，仅为 1.45g/cm³ 左右；其中的 CaO 和 MgO 晶格缺陷较多，化学活性很高，在空气中极易吸潮水解生成 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂。煅烧温度进一步升高，轻烧白云石发生以下物理化学变化：①方镁石 (MgO)、方钙石 (CaO) 晶格缺陷得到校正，晶格发育长大；②MgO、CaO 与白云石中的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 发生一系列反应形成新的矿物；③出现液相，促进白云石的烧结。

在 MgO-CaO 二元系统中，无化合物形成，只有一个温度很高的共熔点 (2370℃)，如图 2.6 所示，在高温下 MgO 与 CaO 彼此固溶度很小，1600℃时 CaO 溶入 MgO 和 MgO 溶入 CaO 之量大约分别为 1% 和 2%；低共熔点温度时，彼此的固溶度最大，分别为 7%CaO 和 17%的 MgO。因而随白云石的煅烧温度的提高，方钙石和方镁石各自发生聚集再结晶，在 1200℃ 以上时，晶体生长速度更快。

白云石的主要高温热力学性质如表 2.3 所列。

白云石分解后，CaO 的活性比 MgO 大，因而在烧结过程中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 等杂质主要与 CaO 反应形成一系列化合物。在 900~1000℃时，Al₂O₃ 与 CaO 反应形成铝酸钙 CaO·Al₂O₃，Fe₂O₃ 与 CaO 反应形成铁酸二钙 2CaO·Fe₂O₃；至 1200℃ 以上时生成

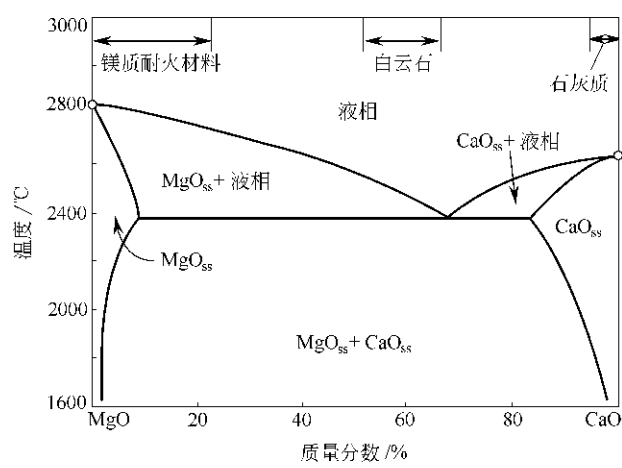


图 2.6 MgO-CaO 系统

表 2.3 白云石的主要高温热力学性质

温 度 /K	$H_T - H_{298}$ /kJ	S_T /[J/(K · mol)]	$\frac{-(G_T - H_{298})}{T}$ /[kJ/mol]	由元素生成化合物		
				$\Delta H_{f,T}^\ominus$	$\Delta G_{f,T}^\ominus$	$\lg K_T$
298.15	0.000	155.185	155.185	-2324.480	-2161.783	378.735
400	17.364	205.284	161.875	-2323.614	-2106.362	275.063
500	36.531	248.166	175.004	-2323.781	-2052.304	214.408
600	57.533	286.376	190.479	-2319.283	-1998.643	173.997
700	80.002	321.004	206.715	-2316.246	-1945.454	145.171
800	103.751	352.716	223.027	-2312.869	-1892.763	123.585
900	128.486	381.850	239.087	-2309.041	-1840.453	106.817
1000	153.804	408.525	254.721	-2314.308	-1787.850	93.388

$2\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ；1300℃ 以上时生成 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，并且开始出现液相。 SiO_2 与 CaO 的固相反应开始于 1100~1200℃，初期产物是 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ；1400℃ 以上生成 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。

1400℃ 以上，一定数量的液相促进方钙石和方镁石的晶体长大，加速烧结作用，约 1600℃ 时，气孔率从轻烧白云石的 50% 下降到了 15% 左右，体积密度达 3.0g/cm^3 。白云石煅烧过程中的体积密度及耐压强度变化如图 2.7 所示。1800℃ 以上的煅烧，可使 CaO 几乎全部形成方钙石，不含或极少含游离 CaO ，且方钙石、方镁石晶粒较大，体积稳定，活性

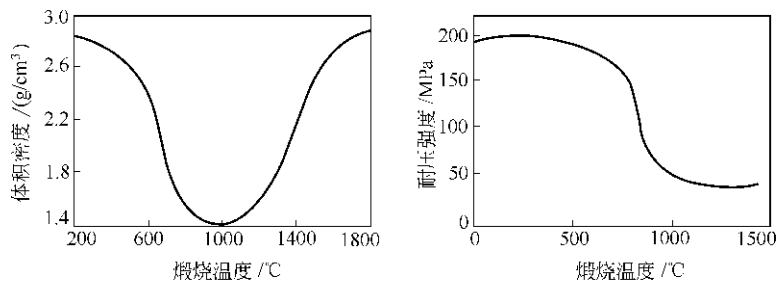


图 2.7 白云石煅烧过程中性能的变化