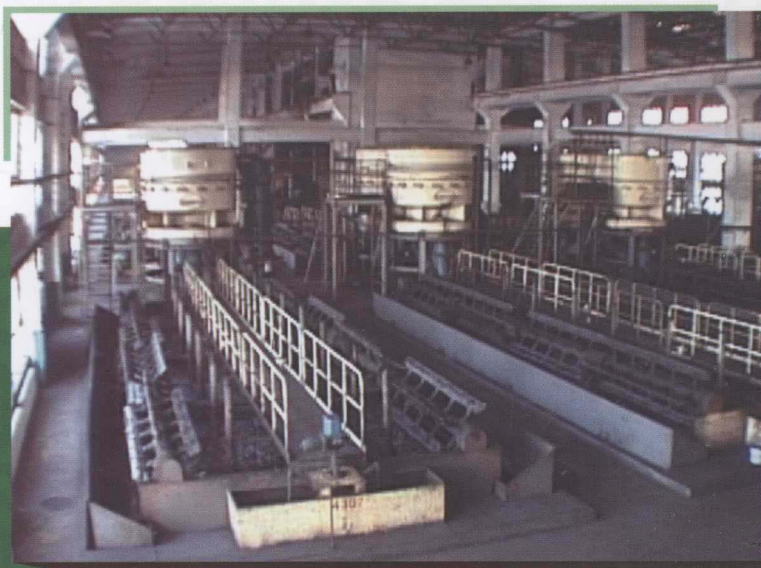


煤炭分选加工技术丛书

煤泥浮选技术

MEINI FUXUAN JISHU

黄 波 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 简 介

浮选是细粒煤分选和煤炭深度分选的有效方法,本书系统地叙述了煤泥浮选的理论基础,浮选药剂的分类、作用机理及煤泥浮选药剂制度,煤泥浮选的影响因素及工艺流程,机械搅拌式浮选机、喷射式浮选机、浮选柱以及煤泥调浆和药剂乳化装置的工作原理与应用,煤泥浮选工业生产实践的操作、技术检查与工艺效果评定,浮选精煤和尾煤的处理,浮选生产过程的自动检测与控制,微细煤泥的分选技术以及煤炭浮选脱硫技术。

本书内容丰富,理论和实践并重,实用性强,吸收了国内外煤泥浮选领域的科研和生产中最新成果,反映了煤泥浮选技术的最新进展。本书内容深入浅出,详略得当,突出了煤泥浮选的新技术、新工艺和新设备。

本书可作为高等学校矿物加工工程专业的教学用书和选煤厂技术人员学习参考书,也可作为选煤厂管理及技术人员培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤泥浮选技术/黄波编著. —北京:冶金工业出版社,
2012. 3

(煤炭分选加工技术丛书)

ISBN 978-7-5024-5788-4

I. ①煤… II. ①黄… III. ①煤泥—浮游选矿

IV. ①TQ520. 61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238722 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5788-4

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 3 月第 1 版, 2012 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.25 印张; 339 千字; 213 页

39.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010) 65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《煤炭分选加工技术丛书》序

煤炭是我国的主体能源，在今后相当长时期内不会发生根本性的改变，洁净高效利用煤炭是保证我国国民经济快速发展的重要保障。煤炭分选加工是煤炭洁净利用的基础，这样不仅可以为社会提供高质量的煤炭产品，而且可以有效地减少燃煤造成的大气污染，减少铁路运输，实现节能减排。

进入 21 世纪以来，我国煤炭分选加工在理论与技术诸方面取得了很大进展。选煤技术装备水平显著提高，以重介选煤技术为代表的一批拥有自主知识产权的选煤关键技术和装备得到广泛应用。选煤基础研究不断加强，设计和建设也已发生巨大变化。近年来，我国煤炭资源开发战略性西移态势明显，生产和消费两个中心的偏移使得运输矛盾突出，加大原煤入选率，减少无效运输是提高我国煤炭供应保障能力的重要途径。

《煤炭分选加工技术丛书》系统地介绍了选煤基础理论、工艺与装备，特别将近年来我国在煤炭分选加工方面的最新科研成果纳入丛书。理论与实践结合紧密，实用性强，相信这套丛书的出版能够对我国煤炭分选加工业的技术发展起到积极的推动作用！

是为序！

中国工程院院士
中国矿业大学教授



2011 年 11 月

《煤炭分选加工技术丛书》前言

煤炭是我国的主要能源，占全国能源生产总量70%以上，并且在相当长一段时间内不会发生根本性的变化。

随着国民经济的快速发展，我国能源生产呈快速发展的态势。作为重要的基础产业，煤炭工业为我国国民经济和现代化建设做出了重要的贡献，但也带来了严重的环境问题。保持国民经济和社会持续、稳定、健康的发展，需要兼顾资源和环境因素，高效洁净地利用煤炭资源是必然选择。煤炭分选加工是煤炭洁净利用的源头，更是经济有效的清洁煤炭生产过程，可以脱除煤中60%以上的灰分和50%~70%的黄铁矿硫。因此，提高原煤入选率，控制原煤直接燃烧，是促进节能减排的有效措施。发展煤炭洗选加工，是转变煤炭经济发展方式的重要基础，是调整煤炭产品结构的有效途径，也是提高煤炭质量和经济效益的重要手段。

“十一五”期间，我国煤炭分选加工迅猛发展，全国选煤厂数量达到1800多座，出现了千万吨级的大型炼焦煤选煤厂，动力煤选煤厂年生产能力甚至达到3000万吨，原煤入选率从31.9%增长到50.9%。同时随着煤炭能源的开发，褐煤资源的利用提到议事日程，由于褐煤含水高，易风化，难以直接使用，因此，褐煤的提质加工利用技术成为褐煤洁净高效利用的关键。

“十二五”是我国煤炭工业充满机遇与挑战的五年，期间煤炭产业结构调整加快，煤炭的洁净利用将更加受到重视，煤炭的分选加工面临更大的发展机遇。正是在这种背景下，受冶金工业出版社委托，组织编写了《煤炭分选加工技术丛书》。丛书包括：《重力选煤技术》、《煤泥浮选技术》、《选煤厂固液分离技术》、《选煤机械》、《选煤厂测试与控制》、《煤化学与煤质分析》、《选煤厂生产技术管理》、《选煤厂工艺设计与建设》、《计算机在煤炭分选加工中的应用》、《矿物加工过程Matlab仿真与模拟》、《煤炭开采与洁净利用》、《褐煤提

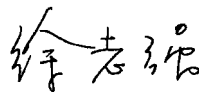
质加工利用》、《煤基浆体燃料的制备与应用》，基本包含了煤炭分选加工过程涉及的基础理论、工艺设备、管理及产品检验等方面内容。

本套丛书由中国矿业大学（北京）化学与环境工程学院组织编写，徐志强负责丛书的整体工作，包括确定丛书名称、分册内容及落实作者。丛书的编写人员为中国矿业大学（北京）长期从事煤炭分选加工方面教学、科研的老师，书中理论与现场实践相结合，突出该领域的新工艺、新设备、新理念。

本丛书可以作为高等院校矿物加工工程专业或相近专业的教学用书或参考用书，也可作为选煤厂管理人员、技术人员培训用书。希望本丛书的出版能为我国煤炭洁净加工利用技术的发展和人才培养做出积极的贡献。

本套丛书内容丰富、系统，同时编写时间也很仓促，书中疏漏之处，欢迎读者批评指正，以便再版时修改补充。

中国矿业大学（北京）教授



2011年11月

前 言

浮选技术是最为经济有效的微细煤泥分离方法，也是煤炭深度分选的重要方法。随着采煤机械化程度的提高，选煤厂原料煤中的粉煤量越来越多，浮选作业变得越来越重要。而且，浮选作业也是选煤厂煤泥水处理系统中的重要环节，对实现选煤厂洗水闭路循环和环境保护具有重要作用。

近 10 多年来，随着国民经济的持续快速发展，煤炭工业发展十分迅猛，2010 年我国煤炭产量已达 32 亿吨。这期间煤泥浮选在基础理论研究、设备大型高效、工艺优化和自动控制等方面取得了长足发展。本书以理论→工艺→实践为主线，有机整合了煤泥浮选的基础理论、浮选工艺、浮选设备和浮选工业生产实践的相关内容。吸收补充了近年来煤泥浮选领域的科研和生产中的最新成果，如气泡矿化微观过程的理论分析，FCSMC 旋流微泡浮选柱、Jameson 浮选柱和喷射式浮选机的工作原理和应用，煤炭浮选脱硫技术和微细煤泥深度分选技术。本书内容丰富，深入浅出，详略得当，突出了煤泥浮选新技术、新工艺和新设备，反映了煤泥浮选技术的最新进展。

全书共分 11 章，其中第 1~2 章介绍煤、水和空气的结构与性质，煤炭表面的润湿与吸附，气泡矿化途径及其理论分析，煤泥可浮性的评定，浮选药剂的分类、作用机理和储存，煤泥浮选的药剂制度；第 3~4 章介绍影响煤泥浮选的主要因素，煤泥浮选的工艺流程和我国典型的浮选流程；第 5 章介绍机械搅拌式浮选机、喷射式浮选机和浮选柱的工作原理及其应用，煤泥浮选调浆与药剂乳化装置；第 6~9 章介绍煤泥浮选的工业生产实践、浮选作业的技术检查与效果评定，浮选精煤和尾煤的处理，煤泥浮选生产过程的自动检测与控制；第 10 章介绍微细煤泥的分选技术，包括选择性絮凝分选、选择性聚团分选、载体浮选和油团聚分选的原理及工艺；第 11 章介绍煤炭的浮选脱硫技术，包括煤中硫的赋存及煤系黄铁矿的可浮性，强化黄铁矿浮选脱硫的方法，煤炭微生物浮选脱硫技术，煤的脱硫效率评价。

本书第 1~6 章、第 10~11 章由黄波编写，第 7~8 章由解维伟编写，第 9

章由王卫东编写，全书由黄波统稿。

本书的编写过程中，我们得到了中国矿业大学（北京）矿物加工系老师和实验人员的大力支持，在此表示衷心感谢。同时，本书引用了国内外相关文献的一些内容和实例，在此谨向这些作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月

目 录

1 煤泥浮选的理论基础	1
1.1 煤泥浮选各相结构与性质	1
1.1.1 固相的结构与性质	2
1.1.2 水的结构与性质	6
1.1.3 气相的结构与性质	8
1.2 煤炭表面的润湿现象	9
1.2.1 接触角	9
1.2.2 润湿热	10
1.2.3 润湿阻滞	11
1.3 浮选体系中的吸附现象	11
1.3.1 液-气界面吸附	11
1.3.2 固-液界面吸附	11
1.3.3 液-液界面吸附	12
1.4 浮选矿浆中的气泡矿化	12
1.4.1 气泡矿化途径	12
1.4.2 矿化气泡的形式	17
1.5 浮选泡沫层	18
1.6 浮选过程	19
1.7 煤泥的可浮性评定	19
2 煤泥浮选药剂	21
2.1 浮选药剂的分类	21
2.2 捕收剂	21
2.2.1 非极性烃类油的特性	22
2.2.2 非极性烃类油的作用机理	22
2.2.3 非极性烃类油的捕收作用	23
2.2.4 非极性烃类油中杂极性物质的作用	24
2.2.5 非极性烃类油组成对捕收作用的影响	25
2.2.6 非极性烃类油馏分对分选的影响	26
2.2.7 提高非极性烃类油浮选活性的途径	26
2.2.8 常用的非极性烃类油	27
2.2.9 捕收剂的选择	28

2.3 起泡剂	28
2.3.1 起泡剂组成及其对起泡性能的影响	29
2.3.2 起泡剂的作用	31
2.3.3 起泡剂的选择	33
2.3.4 常用的起泡剂	33
2.4 调整剂	36
2.4.1 pH 值调整剂	36
2.4.2 分散剂	37
2.4.3 絮凝剂	38
2.5 煤泥浮选的药剂制度	38
2.5.1 浮选药剂的种类	39
2.5.2 加药方式和地点	39
2.5.3 药剂消耗与油比	40
2.6 煤泥浮选药剂的储存	40
2.6.1 防火、防爆	40
2.6.2 卫生防护工作	40
3 影响煤泥浮选的主要因素	42
3.1 原煤性质	42
3.1.1 煤的变质程度	42
3.1.2 煤的孔隙度	42
3.1.3 煤的密度组成	43
3.1.4 煤岩组分	43
3.1.5 煤表面的氧化程度	44
3.1.6 煤中矿物质组成	44
3.2 煤粒粒度	45
3.2.1 不同粒级煤的可浮性	45
3.2.2 改善粗粒煤浮选的技术措施	47
3.2.3 改善细粒煤浮选的技术措施	47
3.2.4 粗煤泥回收工艺	48
3.3 煤浆浓度	48
3.4 搅拌、充气和刮泡	49
3.4.1 搅拌作用	49
3.4.2 浮选机充气	49
3.4.3 刮泡	49
3.5 煤浆液相组成	50
3.5.1 无机盐离子	50
3.5.2 残余浮选药剂	51
3.5.3 残余絮凝剂	52

3.6 煤浆的温度和酸碱度	52
3.6.1 煤浆的温度	52
3.6.2 酸碱度	52
4 煤泥浮选工艺流程	53
4.1 煤泥浮选原则流程	53
4.1.1 浓缩浮选	53
4.1.2 直接浮选	54
4.1.3 半直接浮选	55
4.2 煤泥浮选流程	56
4.2.1 一次浮选流程（粗选流程）	56
4.2.2 精煤再选	56
4.2.3 中煤再选	57
4.2.4 三产物浮选流程	58
4.3 我国几种典型的浮选流程	58
5 浮选机与辅助设备	61
5.1 浮选机的基本作用及要求	61
5.1.1 浮选机的基本作用	61
5.1.2 浮选机的基本要求	61
5.2 机械搅拌式浮选机	62
5.2.1 机械搅拌式浮选机的结构	63
5.2.2 常用的机械搅拌式浮选机	65
5.3 喷射式浮选机	76
5.3.1 XPM 喷射（旋流）式浮选机	76
5.3.2 FJC 型喷射式浮选机	80
5.4 浮选柱	82
5.4.1 传统浮选柱	83
5.4.2 静态浮选柱	84
5.4.3 微泡浮选柱	85
5.4.4 Jameson 浮选柱	86
5.4.5 FXZ 静态浮选柱	87
5.4.6 FCSMC 型旋流-静态微泡浮选柱	88
5.4.7 FCSMC 型旋流-静态微泡浮选床	92
5.4.8 XFZ-8 型浮选柱	93
5.5 浮选机的辅助装置	95
5.5.1 给药装置	95
5.5.2 调浆设施	96
5.5.3 药剂乳化装置	101

5.6 浮选机的发展趋势	102
5.6.1 浮选机大型化	102
5.6.2 无搅拌机构类型浮选机迅速发展	103
5.6.3 采用压气式	103
5.6.4 采用直流式给料	103
5.6.5 采用浅槽	104
5.6.6 改进转子-定子系统结构	104
6 煤泥浮选的生产实践	105
6.1 浮选操作工应具备的基本素质	105
6.2 入浮煤浆浓度的测定和调整	106
6.2.1 入浮煤浆浓度的确定	106
6.2.2 入浮煤浆浓度的调整方式	107
6.2.3 入浮煤浆浓度的测定	108
6.2.4 入浮煤浆浓度的检查和观察	110
6.3 入浮煤浆流量的测定和调整	111
6.3.1 入浮煤浆流量的测定	112
6.3.2 入浮煤浆流量的调整 and 观察	116
6.4 浮选药剂的添加和控制	117
6.4.1 浮选药剂的用量	117
6.4.2 浮选药剂添加量的控制	118
6.5 浮选机的操作调节	119
6.5.1 充气量的调整	119
6.5.2 循环孔面积	120
6.5.3 搅拌机构的间隙	121
6.5.4 导向叶片和稳流板的相对位置	121
6.5.5 刮泡与液面的调整	122
6.6 浮选产品质量指标波动的分析	123
6.6.1 精煤灰分超标的原因	123
6.6.2 尾煤灰分偏低的原因	124
6.6.3 过滤机滤饼变化的原因	124
6.7 保证浮选产品质量的措施	124
6.8 浮选机的安装与维护	126
6.8.1 机械搅拌式浮选机的安装与维护	127
6.8.2 喷射式浮选机的安装与维护	129
6.8.3 浮选柱的安装、维护与操作	130
7 浮选作业的技术检查与工艺效果评定	133
7.1 浮选机单机检查取样和计量点	133

7.1.1 吸入式浮选机的检查	134
7.1.2 直流式浮选机的检查	134
7.2 单机检查计划	135
7.3 试验数据的检验	135
7.4 浮选机的生产性能	136
7.4.1 处理能力	137
7.4.2 电耗	138
7.4.3 浮选机充气性能	138
7.4.4 药剂消耗	139
7.4.5 计算各室精煤产率	139
7.4.6 逐槽试验结果分析	139
7.5 煤泥浮选工艺效果评定	140
7.5.1 浮选精煤数量指数	140
7.5.2 浮选完善指标	142
7.6 浮选单机检查及工艺效果评价实例	142
7.6.1 浮选机单机逐室检查	142
7.6.2 浮选工艺效果评定	144
8 浮选产品的处理	146
8.1 浮选精煤的脱水	146
8.1.1 过滤脱水	146
8.1.2 压滤脱水	158
8.1.3 沉降过滤离心脱水	160
8.2 浮选尾煤的处理	161
8.2.1 浮选尾煤的处理工艺	162
8.2.2 浮选尾煤的浓缩澄清设备	163
8.2.3 浮选尾煤的脱水设备	169
9 浮选生产过程的自动检测与控制	173
9.1 浮选过程参数的检测	174
9.1.1 入浮煤浆流量检测	174
9.1.2 浮选药剂流量检测	177
9.1.3 入浮煤浆浓度检测	180
9.1.4 液位检测	183
9.1.5 煤浆灰分检测	184
9.2 浮选过程参数的自动控制	185
9.2.1 入料量控制	185
9.2.2 入料浓度控制	186
9.2.3 药剂自动添加系统	187

9.2.4 浮选机液位控制	188
9.3 浮选自动控制系统	189
9.4 煤泥浮选测控系统实例	190
9.4.1 浮选生产主要工艺参数的在线检测	191
9.4.2 浮选工艺参数测控系统设计	191
10 微细煤泥的分选技术	194
10.1 煤炭的选择性絮凝分选	194
10.1.1 选择性絮凝分选工艺	195
10.1.2 煤炭的选择性絮凝	195
10.1.3 煤炭选择性絮凝分选的影响因素	196
10.2 煤炭的选择性聚团分选	197
10.2.1 影响选择性聚团分选的因素	198
10.2.2 非极性烃类油的作用	198
10.3 载体分选	199
10.4 油团聚分选	200
11 煤炭浮选脱硫	203
11.1 煤中硫的赋存形态	203
11.2 煤中黄铁矿的嵌布粒度	205
11.3 煤系黄铁矿的可浮性	205
11.4 强化黄铁矿浮选脱硫的方法	206
11.4.1 添加黄铁矿抑制剂	207
11.4.2 超声波强化预处理	208
11.4.3 电化学强化预处理	208
11.5 煤炭微生物浮选脱除	209
11.5.1 微生物的种类与性质	209
11.5.2 微生物浮选脱硫效果	209
11.6 煤的脱硫效率评价	210
参考文献	211

1 煤泥浮选的理论基础

浮选是处理小于 0.5mm 的细粒煤最广泛、最有效的分选方法。通常，煤泥量约占原煤的 10% ~ 30%，我国炼焦煤选煤厂中浮选处理量约占 20%。随着煤炭开采机械化程度的不断提高，原煤中的煤粉也将不断增加，煤泥入浮比例必然会增大。

煤泥浮选是依靠煤粒与矸石表面性质的差异进行分选，疏水的煤颗粒黏附在气泡上并随气泡上升到泡沫层，经机械刮泡或自流进入泡沫收集槽成为最终浮选精煤，亲水的矸石则留在煤浆中成为尾煤，从而实现煤与矸石的分离。图 1-1 为机械搅拌式浮选机煤泥浮选示意图。

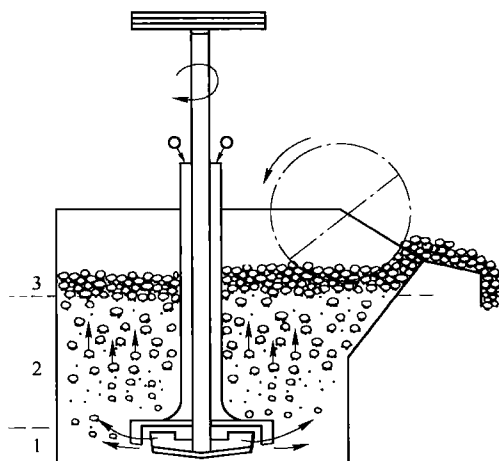


图 1-1 煤泥浮选示意图

1—搅拌区；2—分离区；3—泡沫区

煤泥浮选过程包括以下几个单元：

- (1) 使煤浆处于湍流状态以保证煤粒悬浮并以一定动能运动，悬浮通常是不均匀的，粒度较大的煤粒趋向于保持在浮选槽较低的位置。
- (2) 悬浮煤粒与浮选药剂（捕收剂）作用，增强煤粒表面的疏水性。
- (3) 浮选槽中产生气泡并弥散。
- (4) 煤粒与气泡的接触碰撞，煤粒和气泡表面的水化膜薄化、破裂，形成三相润湿接触周边，煤粒黏附在气泡上，即形成矿化气泡。
- (5) 矿化气泡的浮升，在浮选槽液面聚集形成泡沫层。
- (6) 泡沫经机械刮泡或自流进入泡沫收集槽成为最终浮选精煤。

1.1 煤泥浮选各相结构与性质

煤泥浮选是一种多相非均匀体系，固相、气相和液相的性质以及相界面性质是决定煤

泥浮选的关键所在。

1.1.1 固相的结构与性质

煤泥浮选中的固相主要是煤和矽石，其中矽石为晶体矿物，煤为非晶体矿物，两者的结构和性质具有较大差异。

1.1.1.1 矿物的晶体结构

晶体的分布非常广泛，自然界的固体物质中，绝大多数是晶体。晶体是由原子或分子在空间按一定规律周期重复地排列构成的固体物质，图 1-2 为典型的晶体结构。

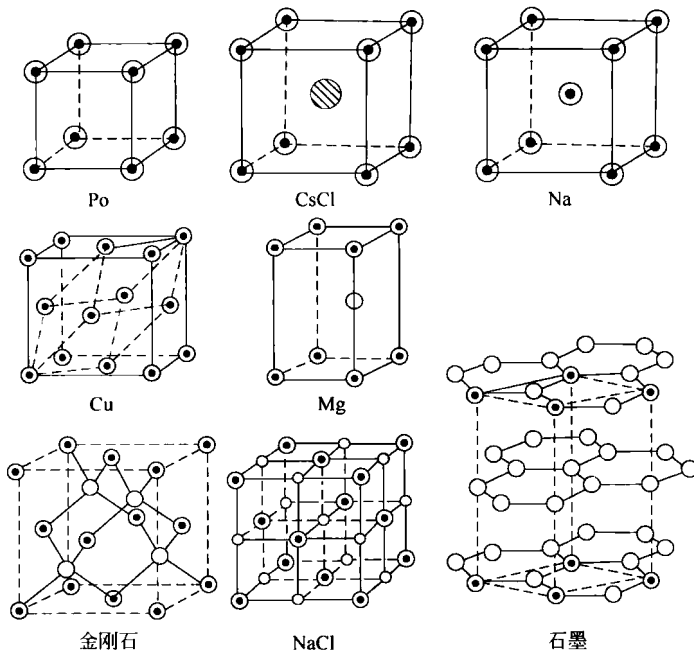


图 1-2 典型矿物的晶体结构

晶体内部原子或分子按周期性规律排列的结构，使晶体具有以下共同的性质。

(1) 均匀性。晶体内部各个部分的宏观性质是相同的，如相同的密度、相同的化学组成等。这主要是由于在晶体各个不同部分单位体积内的质点种类、数量、分布规律是一样的，晶体中原子排列的周期性很小，宏观观察分辨不出微观的不连续性。

(2) 各向异性。在晶体中不同的方向上具有不同的物理性质。例如，在不同的方向上具有不同的电导率、不同的线膨胀系数、不同的折光率以及不同的强度等。这种特性主要是由晶体内部原子的周期性排列所决定的。在周期性结构中，不同方向上原子或分子的排列是不相同的，因而在物理性质上具有异向性。

(3) 自限性。晶体在生长过程中自发地形成晶面，晶面相交成为晶棱，晶棱会聚成顶点，使晶体具有多面体外形的特点。这主要是由于晶体的周期性结构，是其内部格子结构的外在反映。

(4) 对称性。晶体的理想外形和晶体内部结构都具有特定的对称性，晶体的对称性和晶体的性质关系非常密切。

(5) 稳定性。晶体对于气体或液体来说，处于最稳定的状态，因而具有一定的外形，甚至具有规则多面体形态。晶体才是真正的固体，而固态非晶质体只能称作过冷液体。非晶质体往往有自发转变为晶体的趋势。

(6) 最小内能。在相同的热力学条件下，晶体与同种物质组成的气态、液态以及非晶体固态物体相比其内能（动能和势能）最小。

(7) 对 X 射线的衍射。晶体结构的周期大小和 X 射线的波长相当，可作为三维光栅，使 X 射线产生衍射。非晶体物质没有周期性结构，只能产生散射效应，得不到衍射图像。

1.1.1.2 矿物的晶体类型

根据晶体内部质点和化学键的性质可将矿物晶体分为离子晶体、原子晶体、金属晶体和分子晶体。不同类型的晶体，其物理性质有明显的差异，而晶体类型相同的晶体，物理性质往往很相似。

A 离子晶体

离子键是由阴、阳离子通过静电引力而形成的化学键，由离子键构成的晶体称为离子晶体，典型的离子晶体矿物有岩盐（ NaCl ）、萤石（ CaF_2 ）、闪锌矿（ ZnS ）和方解石（ CaCO_3 ）等。离子键的两端分别是阴离子和阳离子，形成两个极，具有很强的极性。由于阴、阳离子的电子云分布为球形对称，可以在空间各个方向上吸引相反电荷的离子。因此，离子键没有方向性。阴离子一般作最紧密堆积，具有较高的配位数。为保持电价平衡，异号离子间常保持一定的数量比例。此外，一个离子可以与几个电荷相反的离子结合，没有饱和性。如氯化钠晶体中，一个 Na^+ 周围有六个 Cl^- ，一个 Cl^- 周围有六个 Na^+ ，这样层层包围，形成一颗颗肉眼看得见的石盐颗粒。

在物理性质方面，由于晶体中的电子皆属于一定的离子，质点间电子密度极小，对光的吸收少。因而，离子晶体常为透明或半透明，具有非金属光泽；由于不存在自由电子，离子晶体一般不导电，但熔化后可导电；又由于离子键键力较强，故线膨胀系数小。但离子晶体的熔点、硬度有很大的变化范围。

B 原子晶体

共价键（原子键）是原子间通过共用电子对形成的化学键，由共价键构成的晶体称为原子晶体，自然界单纯以共价键结合的原子晶体较少见，最典型如金刚石。多数晶体为离子键和共价键的混合键型，如石英（ SiO_2 ）和锡石（ SnO_2 ）。

原子间形成共用电子对时，都是由两个原子中自旋方向相反的未成对电子相互配对成键，成键后的电子对不能再与第三个电子配对。因此，共价键具有饱和性。此外，在形成共价键时，成键电子的电子云互相重叠，重叠越多，键力越牢固。因此，要形成稳定的共价键，电子云必须沿密度最大的方向重叠，这就是共价键的方向性。原子晶体中的原子往往不能作最紧密堆积，配位数偏低，一般不超过 4。

共价键也是一种较强的键，故原子晶体具有较大的硬度和较高的熔点；原子晶体不导电，其熔体也不导电；光学性质表现为透明至半透明，玻璃光泽至金刚光泽。

C 金属晶体

金属原子一般倾向于丢失电子。在金属晶体中，包含着中性原子、带正电荷的金属阳离子和从原子上脱落下来的电子。依靠流动的自由电子使金属原子与阳离子联系起来的键，称为金属键。由金属键结合形成的晶体称为金属晶体，如自然金、自然铜。

金属键不具饱和性和方向性，金属晶体中原子的配位数较强，可看作由金属原子作最紧密堆积而成。

金属晶体受光线照射时，自由电子全部吸收了可见光，晶体表现为不透明。当其吸收能量而使被激发的电子跃回能级时，又把各种波长的光都放射出来，具有特殊的金属光泽。此外，金属晶体的导电和导热性能较好，而且密度大。

D 分子晶体

分子晶体中的构造单位是分子，其内部的原子通常为共价结合，而分子之间则为分子键相连。典型的分子晶体有石墨、辉钼矿。

在分子晶体结构中，由于分子键无饱和性和方向性，分子之间可作最紧密堆积。分子键比其他类型的键力小1~2个数量级。因此，分子晶体一般硬度小、熔点低。此外，分子晶体可压缩性大，线膨胀率大，热导率小，大多数为绝缘体，透明，玻璃光泽至金刚石光泽。

有些晶体的结构中，只存在单纯的一种键力，如自然金的结构中只有金属键，金刚石的结构中只有共价键；有些晶体的结构中，则是某种过渡型键，如闪锌矿的共价—离子键、石墨的共价—金属键；前者为带离子键性质的共价键，后者为带金属键性质的共价键；还有一些晶体，结构中存在两种明显不同的键，如方解石的晶体结构中，C—O之间以共价键为主，Ca—O之间则以离子键为主，这种晶体称为多键型晶体。晶体结构中化学键的过渡性及多键性都会影响到晶体的物理性质。

1.1.1.3 矿物晶体的表面性质

矿物晶体受到外加机械力的作用，连续质点的部分键力受到破坏，产生断裂面，如图1-3所示。可以看到：晶体内部的任一质点A由于周围分布的相邻质点相互作用，使键力处于平衡饱和状态，称为饱和键力；而位于晶体表面，如面心附近的任一质点B，则除了在此平面内以及朝向立方体内部的键力因与相邻质点相互作用得到饱和外，在朝向空间的这个方向，质点B的键力则没有得到补偿（如图中虚线所示），处于未饱和状态，称为不

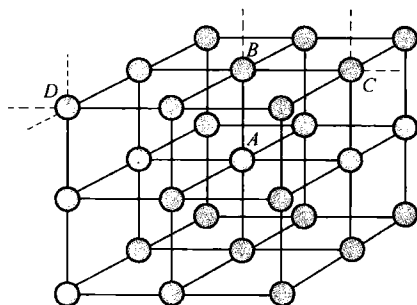


图1-3 矿物晶体内部饱和键与表面不同位置不饱和键示意图