

矿物加工 颗粒学

曾凡 胡永平 编著

K

KUANGWU JIAGONG
KELIXUE

中国矿业大学出版社

TD91
z-311

矿物加工颗粒学

曾凡 胡永平 编著

中国矿业大学出版社

830954

(苏)新登字第 010 号

内 容 提 要

本书是全面、系统介绍矿物加工领域理论与应用研究新进展情况的专著。全书共 18 章,第 1~10 章为基础篇,论述颗粒及其集合体在几何特征、堆积、物理、界面化学、机械力化学、流体力学和流态化等方面的性质及变化规律;第 11~18 章为应用篇,总结和介绍矿物加工方面的新技术、新理论、新设备,包括细粒、微细粒矿物和物料的制备、分选、分离与回收利用,高浓度水煤浆及超纯煤的制备,流化床干法选煤,矿物表面处理、改性等。本书可供从事颗粒或粉粒体技术及矿物深加工技术研究、生产、设计人员参考,也可作上述专业高等教育教学参考书。

技术设计 许秀荣

责任校对 崔永春

矿物加工颗粒学

曾凡 胡永平 编著

责任编辑 黎强

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州中国矿业大学内)

江苏省新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 32.25 字数 784 千字

1995 年 8 月第一版 1995 年 8 月第一次印刷

印数 1~1000 册

ISBN 7 - 81040 - 264 - 1

TD·17

定价:48.00 元

序

作为一门新兴的综合性技术科学,颗粒学及颗粒技术日益受到人们的重视,并在许多工程技术及国民经济领域中得到富有成效的应用。近些年来,国外陆续出版了一批颗粒学及颗粒技术的专著及手册,有的业已翻译成中文。然而,迄今为止,我国自己编写的既系统论述颗粒学基本原理、又紧密联系工业实际的著作却很少见。《矿物加工颗粒学》的出版填补了这一空白,非常及时。

《矿物加工颗粒学》一书在系统阐述颗粒学的基本原理的基础上,联系矿物加工工程实际,侧重总结了矿物深加工领域近年来的新进展,对细粒、微细粒矿物的制备、分选及加工,洁净煤技术,高浓度水煤浆,流化床干法分选技术等均作了独到的阐述,可以说本书是作者长期从事矿物加工教学及科研工作所积累的知识及经验的系统总结,同时又反映了作者对矿物加工专业教学改革的新观点、新思路。本书内容丰富,取材新颖,理论与实际紧密结合,对颗粒技术及矿物加工的研究和应用具有重要的参考价值。该书的出版堪称中国颗粒学及颗粒技术发展的产物及见证,必将对颗粒学及颗粒技术的发展起到重要的促进作用。

卢寿慈

1995年5月

前 言

随着科学技术和经济的迅速发展以及各工程技术领域的互相渗透,近几年来矿物加工(mineral processing)方面的研究与应用范围已大为拓宽,从原来的有用矿物分选向深加工方向发展,发展的方向是矿物颗粒细化、超细化、纯化、功能化和品种系列化。其中亚微米级以下颗粒是研究及应用的重点。

矿物颗粒细化后不仅发生外形尺寸减小、比表面积增大等几何特征的变化,更为主要的是在细化、超细化作用后,颗粒及其集合体在物理、化学、力学等诸多方面,将产生不同于块状固体性质的变化。变化的规律是什么?如何检测与评定?怎样控制和应用这些变化?怎样使这些变化有利于科学技术的提高和生产的发展,以便创造更高的经济和社会效益?这些都是亟待解决的工程技术问题。

近年来,颗粒技术不仅在世界范围内备受关注,在国内的化工及材料工程等领域里的研究与应用也很活跃,但在矿物加工工程方面的颗粒技术研究则相对起步较晚。撰写此书的目的是试图围绕上述问题,在搜集、整理和研究有关资料的基础上,系统总结本领域国内外已有的最新科研成果、工业成就,同时介绍作者近年来的研究成果。

全书共 18 章(章、节序号均用数字标注法,如第一章标为 1,第二章第三节标为 2.3),分为两大部分。第 1 至第 10 章为基础篇,论述颗粒及其集合体在几何特征、堆积、物理、界面化学、机械力化学、力学、流体力学和流态化等方面的性质及变化,描述了这些变化的规律及基本原理,介绍颗粒特性的测量技术;第 11 至第 18 章为应用篇,总结矿物加工领域中,近几年来重点发展的新技术,内容可分三部分:①针对廿一世纪人类面临三大问题中的资源、环境问题,在第 11 至第 13 章和第 17 章中,介绍细粒、微细粒矿物和物料的制备、分选、分离与回收利用方面的新理论、新设备和新工艺;②洁净煤技术是九十年代能源方面全球性的重点研究项目。在第 14 至第 16 章中,根据作者及同事多年的研究,结合国内外的新成果,总结了高浓度水煤浆、超纯精煤制备、流化床干法选煤三项新技术的基本原理、工艺流程和关键技术等内容;③矿物表面处理是当今天然矿物深加工方面发展最快的技术之一,据专家们预测,今后几年内,无机矿物的处理,主要是通过表面改性来满足新材料、新技术发展的需要。第 18 章论述了矿物表面改性的原理、方法、应用和改性效果的评定。

本书是国内第一本全面、系统论述矿物颗粒科学和颗粒技术的论著,也是作者的一种尝试。由于水平和条件的限制,缺点和错误在所难免,敬请同行专家和其他读者不吝指教。希望本书的出版,有助于同行加深和拓宽对颗粒学这门多学科、跨

行业的新兴综合性科学的兴趣和研究,希望本书能起到这种抛砖引玉的作用。

本书的编著者有曾凡(编写前言,第1、2、4、5.2~5.5、6、7、14、16、18章),胡永平(编写第5.1、11~13、17章),杨毅(编写第10、15章),任守政(编写第8、9章),杨玉芬(编写第3章)。前三位分别负责审稿,全书由曾凡定稿。

本书得以问世,首先应感谢王祖訥教授,是他富有远见的建议,才有矿物加工颗粒学课程多年的教学实践和本书的编写,还要感谢中国工程院院士陈清如教授,他对本书的编写一直非常关心;同时承蒙中国矿业大学北京研究生部的大力支持,卢寿慈、张荣曾两位教授的多方指导及黎强编辑的真诚合作,谨在此一并致谢。

作者

1994年11月于北京

目 录

序	(I)
前言	(I)

基础篇

1 绪论	(1)
1.1 颗粒与颗粒学	(1)
1.2 颗粒的分类	(1)
1.2.1 按成因分类	(1)
1.2.2 按粒度大小分类	(2)
1.3 颗粒学的应用	(2)
参考文献	(3)
2 颗粒几何特征	(4)
2.1 颗粒的大小	(4)
2.1.1 粒径和粒度	(4)
2.1.2 粒度分布	(8)
2.2 颗粒的形状	(16)
2.2.1 颗粒形状的定性分析	(17)
2.2.2 颗粒形状的定量分析	(17)
2.2.3 形状系数的应用	(23)
2.3 颗粒表面	(25)
2.3.1 颗粒表面的形貌	(25)
2.3.2 颗粒的比表面积与理论计算	(29)
参考文献	(31)
3 颗粒测量	(33)
3.1 测量方法的分类	(33)
3.2 测量方法的选择	(33)
3.3 采样与处理	(35)
3.3.1 取样规则	(36)

3.3.2	大量物料中的取样	(36)
3.3.3	悬浮液取样	(37)
3.3.4	试样的制备	(38)
3.3.5	被测物料的分散处理	(42)
3.4	颗粒粒度的测定	(45)
3.4.1	粒度测量方法分类	(45)
3.4.2	粒度测定方法	(46)
3.5	比表面积测定	(62)
3.5.1	气体吸附法	(63)
3.5.2	气体渗透法	(66)
3.5.3	压汞法	(67)
3.6	孔径大小的测定	(68)
3.6.1	孔尺寸分类	(68)
3.6.2	显微照相法	(68)
3.6.3	压汞法	(69)
3.6.4	气体吸附法	(70)
3.7	颗粒在线分析	(71)
3.7.1	HIAC 颗粒计数器	(71)
3.7.2	超声波衰减测定	(71)
	参考文献	(73)
4	颗粒堆积	(75)
4.1	典型的堆积参数	(75)
4.2	球体的堆积	(76)
4.2.1	等径球体的有规则排列	(76)
4.2.2	等径球体的随意堆积	(76)
4.2.3	异径球体的堆积	(77)
4.3	颗粒的堆积	(78)
4.3.1	不连续尺寸颗粒的堆积	(78)
4.3.2	连续尺寸颗粒的堆积	(81)
4.3.3	空隙率的理论计算	(82)
4.4	颗粒紧密堆积理论	(83)
4.4.1	Horsfield 和 Fuller 的紧密堆积理论	(83)
4.4.2	Alfred 方程	(84)
4.4.3	隔级堆积理论	(85)
4.4.4	紧密堆积的经验	(85)
4.5	影响颗粒堆积的因素	(86)
4.6	堆积理论的应用	(88)
4.6.1	指导流程和设备选择	(88)

4.6.2	指导研究和生产	(88)
4.6.3	控制工艺和产品质量	(88)
	参考文献	(89)
5	颗粒物理	(91)
5.1	颗粒的磁性	(91)
5.1.1	物质的磁性	(91)
5.1.2	矿物颗粒的磁化	(96)
5.1.3	颗粒体的堆积率与磁性	(98)
5.1.4	超微细磁性颗粒的应用实例	(99)
5.2	颗粒的光学性质	(99)
5.2.1	光在分散体系中的传播	(99)
5.2.2	光的散射	(100)
5.2.3	光的反射	(103)
5.2.4	光的吸收	(103)
5.2.5	光的衰减	(105)
5.3	颗粒的电性	(105)
5.3.1	颗粒的带电现象	(105)
5.3.2	颗粒带电的机理	(106)
5.3.3	颗粒带电量的测量	(108)
5.3.4	颗粒体的电性	(109)
5.4	颗粒的热学性质	(112)
5.4.1	能量分析和热力学关系	(112)
5.4.2	颗粒的熔点和溶解度	(114)
5.4.3	热容	(116)
5.5	颗粒的其它物理性质	(118)
	参考文献	(119)
6	颗粒的界面化学	(121)
6.1	表面现象和表面能	(121)
6.1.1	表面现象	(121)
6.1.2	固体的表面能和表面应力	(121)
6.1.3	固体表面能的估算	(122)
6.1.4	固体表面能的实验测定	(124)
6.1.5	表面活性	(127)
6.2	颗粒界面的吸附特性	(128)
6.2.1	概述	(128)
6.2.2	颗粒对气体和水蒸汽的吸附	(128)
6.2.3	颗粒在溶液中的吸附	(130)

6.3	矿粒表面的润湿性	(136)
6.3.1	润湿的物理意义和宏观判别指标	(136)
6.3.2	矿物的亲水性和疏水性	(137)
6.3.3	颗粒润湿性的测量	(138)
6.4	颗粒的分散与凝聚	(141)
6.4.1	状态及类型	(142)
6.4.2	气体中粒子的凝聚	(142)
6.4.3	液体中颗粒的分散与凝聚	(147)
	参考文献	(151)
7	颗粒的机械力化学	(153)
7.1	机械力化学的概念	(153)
7.2	机械力诱发矿物结构的变化	(153)
7.2.1	晶体矿物的结构变化	(153)
7.2.2	非晶体矿物结构的变化	(161)
7.3	物理化学性质的变化	(161)
7.3.1	分散度	(161)
7.3.2	溶解度和溶解速率	(162)
7.3.3	密度	(165)
7.3.4	电性	(166)
7.3.5	颗粒表面的吸附能力	(167)
7.3.6	离子交换和置换能力	(169)
7.3.7	表面自由能	(170)
7.4	机械力化学反应	(170)
7.4.1	断裂形变伴随的化学现象	(171)
7.4.2	机械力化学分解反应	(172)
7.4.3	相间机械化学反应	(173)
	参考文献	(176)
8	颗粒力学	(178)
8.1	概述	(178)
8.2	颗粒接触点上的间力	(178)
8.2.1	固体表面间的摩擦力	(178)
8.2.2	颗粒间的内聚力	(178)
8.3	颗粒体的摩擦角特性	(180)
8.3.1	内摩擦角	(180)
8.3.2	安息角	(181)
8.3.3	壁摩擦角和滑动摩擦角	(182)
8.3.4	运动角	(182)

8.3.5	空隙率对颗粒体角特性的影响	(183)
8.4	颗粒体的剪切强度和剪切试验	(185)
8.5	颗粒体的抗拉强度	(188)
8.5.1	颗粒体抗拉强度的测量	(188)
8.5.2	抗拉强度分析	(191)
8.6	颗粒体的压制	(193)
8.6.1	颗粒体的压制机理	(193)
8.6.2	颗粒体容积随压制压力的变化	(194)
8.6.3	压制状态下颗粒体的密度分布	(196)
	参考文献	(197)
9	颗粒与流体混合物的流动	(199)
9.1	颗粒在流体中运动的基本概念	(199)
9.1.1	微细颗粒在流体中的扩散	(199)
9.1.2	流体对颗粒运动的阻力	(203)
9.1.3	颗粒的沉降速度	(204)
9.2	颗粒悬浮液的流变学	(209)
9.2.1	牛顿流体和粘度	(209)
9.2.2	非牛顿流体按流变特点的分类	(209)
9.2.3	与时间无关的非牛顿流体	(210)
9.2.4	与时间有关的非牛顿流体	(212)
9.2.5	流变特性测量和数据解析	(212)
9.3	颗粒与流体混合物管道流动的基本概念	(214)
9.3.1	颗粒物料管道输送概述	(214)
9.3.2	机械能量平衡和压力降的关系	(216)
9.3.3	流动型态和转变速度	(217)
9.4	水平管流动流型的转变速度	(218)
9.4.1	固—液混合物不对称悬浮流速 V_{m2}	(219)
9.4.2	固—气混合物不对称悬浮流速 V_{m2}	(220)
9.5	水平管流动中的压力降	(220)
9.5.1	压降的一般表达式	(220)
9.5.2	对称悬浮流动的压降 ($V_m > V_{m1}$)	(222)
9.5.3	不对称悬浮流动的压降 ($V_{m2} < V_m < V_{m1}$)	(223)
9.6	非牛顿流体在圆管内的流动	(225)
9.6.1	过渡流速的确定	(226)
9.6.2	层流的摩阻损失	(227)
9.6.3	紊流的摩阻损失	(229)
	参考文献	(232)

10	颗粒的流态化	(234)
10.1	概述	(234)
10.2	气—固流化状态	(234)
10.2.1	气—固流化床的基本装置	(234)
10.2.2	气流通过床层的状态	(235)
10.3	流化床的似流体特性	(236)
10.4	流化床的基本参数	(238)
10.4.1	临界流化速度与终端流化速度	(238)
10.4.2	流化床的特征数	(239)
10.4.3	流化床的空隙率	(240)
10.4.4	流化床的压降	(240)
10.4.5	流化床的密度	(241)
10.5	流态化的分类与判别	(244)
10.5.1	流态化的分类	(244)
10.5.2	流化状态的判别	(245)
10.6	流化床中的气泡行为及不稳定现象	(246)
10.6.1	气—固流化床的物相组成	(246)
10.6.2	流化床中气泡的产生与合并	(247)
10.6.3	流化床中的几种不稳定现象	(249)
	参考文献	(251)

应 用 篇

11	超细粉碎设备及工艺	(253)
11.1	概述	(253)
11.2	冲击式超细粉碎设备及工艺	(253)
11.2.1	高速机械冲击式磨机	(253)
11.2.2	气流磨	(255)
11.3	磨介运动式磨机	(262)
11.3.1	搅拌磨	(262)
11.3.2	振动磨	(263)
11.4	无磨介运动式磨机	(265)
11.4.1	雷蒙磨	(266)
11.4.2	胶体磨	(266)
11.4.3	高压辊磨机	(267)
11.4.4	行星磨	(268)
11.5	微细分级设备及工艺	(269)
11.5.1	概述	(269)
11.5.2	干式分级机	(269)

11.5.3	湿式分级机	(271)
11.6	超微粉碎与分级设备的选择及应用	(273)
11.6.1	工艺设备的选择	(273)
11.6.2	微细粒粉碎及分级设备的应用	(273)
11.7	助磨剂	(276)
11.7.1	概述	(276)
11.7.2	助磨剂的分类及应用	(277)
11.7.3	助磨剂的作用机理	(279)
	参考文献	(281)
12	磁选新技术在细粒物料分离中的应用	(283)
12.1	概述	(283)
12.2	高梯度磁分离技术的原理	(284)
12.3	高梯度磁分离设备	(286)
12.3.1	周期式高梯度磁分离机	(286)
12.3.2	连续式高梯度磁分离机	(287)
12.3.3	高梯度磁分离机的发展	(287)
12.4	高梯度磁分离技术的应用	(289)
12.4.1	弱、顺磁性矿物的分选	(289)
12.4.2	钢铁工业用水的 HGMS 处理	(289)
12.4.3	电厂用水的处理	(290)
12.4.4	HGMS 在化学工业中的应用	(292)
12.4.5	HGMS 在医学方面的应用	(292)
12.5	磁絮凝分选法	(293)
12.5.1	强磁性矿物粒子的磁絮凝分选	(293)
12.5.2	弱磁性矿物微粒的磁絮凝分选	(294)
12.6	磁种分选法	(298)
12.6.1	磁种分选法基本原理	(298)
12.6.2	磁种的类型及其制备	(300)
12.6.3	磁种分选法的应用	(301)
	参考文献	(303)
13	微细粒难选矿物及物料的分选技术	(305)
13.1	概述	(305)
13.2	选择性疏水聚团分选法	(305)
13.2.1	选择性疏水聚团分选的基本原理	(305)
13.2.2	选择性疏水聚团工艺的特点及应用	(306)
13.3	剪切絮凝浮选	(309)
13.4	载体浮选	(311)

13.5	双液分离分选法	(314)
13.6	特殊浮选	(317)
13.6.1	特殊浮选的基本原理	(317)
13.6.2	特殊浮选的应用	(320)
13.7	微生物冶金技术	(323)
13.7.1	微生物冶金技术在矿物工程中的应用	(323)
13.7.2	微生物在工业废水处理中的应用	(327)
	参考文献	(327)
14	超纯煤的制造工艺	(330)
14.1	概述	(330)
14.2	化学深度脱灰法	(330)
14.2.1	氢氟酸法	(330)
14.2.2	常规酸碱法	(332)
14.2.3	熔融碱沥滤法(MCL)	(338)
14.2.4	化学煤	(339)
14.3	物理化学深度脱灰法	(342)
14.3.1	油团聚脱灰法	(342)
14.3.2	油团聚脱灰机理及工艺因素	(346)
14.4	两种深度脱灰法的对比	(356)
	参考文献	(357)
15	流态化分离技术	(359)
15.1	概述	(359)
15.2	流态化分离的基本原理	(360)
15.2.1	提高干法选煤效果的有效途径	(360)
15.2.2	矿物颗粒在气—固流化床中的受力分析	(361)
15.3	流化状态的控制及实验研究方法	(363)
15.3.1	矿物分选对流化床的要求	(363)
15.3.2	流化床实验研究系统	(364)
15.4	高密度稳定流化床技术及静态分离	(365)
15.4.1	气—固两相流化床散式化的途径	(365)
15.4.2	分布器	(365)
15.4.3	加重质及混合技术	(366)
15.4.4	流化气速与压力的选择	(368)
15.4.5	流化床均匀稳定性测试	(368)
15.4.6	影响流化床的其它因素	(370)
15.4.7	流化床模型静态分离试验研究	(371)
15.5	流化床连续分选设备	(372)

15.5.1	流化床分选机研究设计概况	(373)
15.5.2	大型流化床的均匀稳定	(377)
15.5.3	连续分选的实现	(379)
15.5.4	流化床分选机工艺参数的合理选择	(380)
15.6	流化床选煤工艺系统及计算方法	(381)
15.6.1	流化床选煤工艺流程	(381)
15.6.2	流化床分选产品计算原则	(384)
15.6.3	介质系统计算原则	(385)
15.7	分选过程的动态稳定性与操作	(386)
15.7.1	分选过程动态稳定性分析	(386)
15.7.2	流化床选煤过程中的操作	(388)
15.7.3	流化床密度与床高的测控	(388)
15.8	评价与展望	(391)
15.8.1	50t/h 流化床选煤系统的效果	(391)
15.8.2	评价	(391)
15.8.3	展望与发展	(393)
	参考文献	(394)
16	高浓度水煤浆的制备	(396)
16.1	水煤浆的发展概况	(396)
16.2	水煤浆的特性及影响因素	(397)
16.2.1	流动性	(397)
16.2.2	稳定性	(407)
16.2.3	燃烧性	(410)
16.3	水煤浆的制备	(412)
16.3.1	煤种的选择	(412)
16.3.2	级配	(414)
16.3.3	添加剂	(417)
16.3.4	制备工艺	(426)
16.4	我国发展水煤浆的前景	(430)
	参考文献	(430)
17	颗粒物料的脱水——固液分离技术	(433)
17.1	概述	(433)
17.2	固液分离过程及分离效率	(433)
17.2.1	固液分离过程	(433)
17.2.2	固液分离效率	(434)
17.3	颗粒物料脱水方法及流程分类	(438)
17.3.1	颗粒物料中水分的性质	(438)

17.3.2	脱水方法与脱水流程	(438)
17.4	聚沉和絮凝	(439)
17.4.1	聚沉和絮凝的作用效果	(439)
17.4.2	无机凝聚剂和絮凝剂	(440)
17.4.3	影响絮凝的因素	(440)
17.5	沉降浓缩	(441)
17.5.1	重力沉降浓缩的基本原理	(442)
17.5.2	重力沉降浓缩的新设备	(443)
17.5.3	离心沉降浓缩	(445)
17.6	过滤	(448)
17.6.1	概述	(448)
17.6.2	过滤理论	(449)
17.6.3	过滤机的分类及选择	(450)
17.6.4	新型过滤设备	(452)
17.7	电凝聚 电过滤	(457)
17.7.1	电凝聚	(457)
17.7.2	电过滤	(458)
17.8	助滤剂	(460)
17.8.1	表面活性剂型助滤剂及助滤机理	(460)
17.8.2	絮凝剂型助滤剂及助滤机理	(462)
17.8.3	固体颗粒型助滤剂	(463)
	参考文献	(464)
18	矿物表面改性	(465)
18.1	概述	(465)
18.1.1	矿物表面改性的目的	(465)
18.1.2	表面改性剂	(465)
18.2	偶联剂	(466)
18.2.1	硅烷偶联剂	(466)
18.2.2	钛酸酯偶联剂	(471)
18.2.3	铝酸酯偶联剂	(475)
18.3	其它矿物表面改性剂	(478)
18.3.1	表面活性剂改性剂	(478)
18.3.2	聚合物改性剂	(479)
18.3.3	无机物改性剂	(480)
18.4	矿物表面改性的方法与装置	(481)
18.4.1	矿物表面改性的方法	(481)
18.4.2	表面改性装置	(484)
18.5	表面改性效果的评定	(486)

18.5.1 润湿性.....	(487)
18.5.2 分散性.....	(488)
18.5.3 红外光谱(IR)	(489)
18.5.4 X光衍射.....	(490)
18.5.5 热分析.....	(490)
18.5.6 表面分析新技术.....	(491)
参考文献.....	(493)