



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 矿物资源加工技术与设备

胡岳华 冯其明 主编

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 矿物资源加工技术与设备

胡岳华 冯其明 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了矿物资源加工的主要工艺技术与设备。全书共九章,以介绍矿物资源加工技术的发展历史和前景为起点,逐一详细地阐述了矿物资源加工各个分支领域的主要工艺技术与设备,包括矿物资源加工技术及其发展、物料粉碎加工、重选和复合物理场分选、磁电选、浮选、化学分选、固液分离、粉体造块、矿物粉体材料等。

本书是为适应矿物加工专业教学改革需要而编写的新教材,力求适应新规划的学科体系所确定的人才培养目标。在教学思路、教材的编排形式等方面作了一些探索与创新;教材内容力求全方位地反映本学科技术与设备的现状和最新发展方向。

本书可用作高等院校矿物加工工程专业学生的专业课教材,也可作为冶金、化工等专业的教学参考书,对有关科研院所的科研人员和厂矿工程技术人员也有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿物资源加工技术与设备 / 胡岳华,冯其明主编. 北京:科学出版社,2006

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-03-017470-4

I. 矿… II. ①胡… ②冯… III. ①选矿-高等学校-教材 ②选矿机械-高等学校-教材 IV. ①TD9 ②TD45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 067801 号

责任编辑:杨向萍 赵晓霞 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 9 月第一次印刷 印张: 35 1/2

印数:1—3 500 字数: 674 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

# 《矿物资源加工技术与设备》

## 编委会

主 编 胡岳华 冯其明

编 委 (按姓氏笔画排序)

王毓华 邓海波 冯其明

刘玉生 庄剑鸣 杨华明

肖金华 宋晓岚 范晓慧

胡岳华 柳建设 姜 涛

顾帼华

## 主编简介

胡岳华,1962年生,1989年获博士学位,现任中南大学教授、博士生导师。中国青年科技奖及国家杰出青年基金获得者,入选教育部长江学者奖励计划——特聘教授。

主要研究方向:浮选溶液化学、硫化矿浮选电化学、氧化矿反浮选、硫化矿生物冶金等。出版著作4部,发表论文271篇,其中SCI、EI收录129篇。曾获国家科技进步一、二等奖和省部级科技一、二等奖。



胡岳华



冯其明

冯其明,1962年生,1989年获博士学位,现任中南大学教授、博士生导师。中国青年科技奖获得者。

主要研究方向:硫化矿浮选电化学、复杂细粒矿分选新技术、化学提取及矿物材料加工技术、环境工程。出版著作2部,发表论文105篇。曾获国家科技进步二等奖和省部级科技一等奖。

## 前 言

《矿物资源加工技术与设备》是中南大学国家重点学科矿物加工工程专业申报获得的国家级教改项目成果的组成部分。本书是在《矿物加工学》、《烧结球团学》、《矿物加工材料学》等教材的基础上,为适应矿物加工工程专业教学改革的需要而编写的新教材,在以下几个方面体现创新特色。

(1) 研究对象多样化。这一领域的传统教科书,主要针对矿物的基本性质及矿石的分选。由于社会经济的发展,人类对矿物资源的开发和日益增加的消耗,正面临矿物资源短缺的危机。一些以往难于利用的“贫、细、杂”矿产资源、非传统矿产资源(如海洋矿产资源、工业灰渣等)和二次资源的加工利用变得越来越重要。国内外在这方面已开展了许多研究工作。本书针对矿物资源特点的变化,把一些新的知识介绍给学生。

(2) 改革教学思路。传统的矿物加工教科书,是按照矿物加工流程(如破碎-磨矿-重选-磁电选-浮选、烧结-球团等)来编写教学内容,原理、技术、设备混在一起。本书与“普通高等教育‘十五’国家级规划教材”《资源加工学》(科学出版社,2004)相结合,试图以单元过程为框架,介绍矿物资源加工的工艺与设备,使学生全面掌握适合于不同物料分离、选别和深加工等加工过程的基本原理、设备、工艺流程和单元工艺操作等方面的知识内容。

(3) 更新教学内容。本书除保留传统矿物加工教科书中一些经典的工艺与设备外,更新了许多内容,把近十年来矿物加工的科学研究和技术进展的新工艺、新设备、新成果、新知识编进了教材,使学生有更扎实的基础和更丰富的知识面。

(4) 系统介绍矿物资源加工工艺技术与设备知识。本书系统地介绍了矿物资源加工知识,包括:矿物资源加工技术及其发展、物料粉碎加工、重选及复合物理场分选、磁电选、浮选、化学分选、固液分离、粉体造块、矿物粉体材料等。

胡岳华教授、冯其明教授拟定本书大纲和编写框架,并任主编,中南大学资源加工与生物工程学院学术梯队的众多同志参加了编写工作,具体分工为:胡岳华(第1章),刘玉生(第2章),邓海波(第3章,6.1节,6.4节),肖金华(第4章),王毓华、冯其明(第5章),姜涛(6.2节),柳建设(6.3节),顾幅华(第7章),庄剑鸣(8.1节,8.2节),范晓慧(8.3节,8.4节),杨华明(9.1节),宋晓岚(9.2节,9.3节)。全书内容由冯其明、邓海波审定,邓海波负责修改和插图清绘,胡岳华审阅全书并最终定稿。

限于篇幅,本书参考文献主要列举了图书专著,大量的学术期刊文章和企业网页资料未能一一列举,在此向文献作者一并致谢。由于时间和水平关系,书中难免存在不当之处,欢迎读者批评指正。

作者

2006年8月

于长沙岳麓山

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 矿物资源加工技术及其发展</b> .....	(1)
1.1 概述 .....	(1)
1.2 矿物资源加工技术的发展 .....	(2)
1.2.1 古代的矿物加工 .....	(2)
1.2.2 近代的矿物加工工业 .....	(5)
1.2.3 新中国的矿物加工工业 .....	(6)
1.2.4 矿物资源加工技术应用领域的扩展 .....	(14)
1.3 矿物资源加工基本过程与基本概念.....	(17)
1.3.1 矿物、矿石性质与矿物加工 .....	(17)
1.3.2 矿物资源加工基本过程 .....	(22)
1.3.3 矿物资源加工常用的术语、工艺指标及计算 .....	(24)
习题 .....	(26)
参考文献 .....	(26)
<b>第 2 章 粉碎技术与设备</b> .....	(27)
2.1 概述.....	(27)
2.2 破碎与筛分.....	(29)
2.2.1 粗碎破碎机 .....	(29)
2.2.2 中、细碎破碎机 .....	(34)
2.2.3 筛分设备.....	(42)
2.2.4 影响破碎机和筛分机工作过程的因素 .....	(46)
2.2.5 破碎工艺流程 .....	(48)
2.2.6 破碎筛分工艺设备配置 .....	(50)
2.3 磨矿与分级.....	(51)
2.3.1 球磨机 .....	(51)
2.3.2 棒磨机 .....	(55)
2.3.3 自磨机 .....	(56)
2.3.4 砾磨机、离心磨机、行星磨机、振动磨机和螺旋搅拌磨机 .....	(57)
2.3.5 螺旋分级机 .....	(58)
2.3.6 水力旋流器 .....	(60)



---

2.3.7 细筛 .....	(62)
2.3.8 复式流化分级机 .....	(64)
2.3.9 影响磨矿分级过程的因素 .....	(65)
2.3.10 磨矿分级工艺流程 .....	(72)
习题 .....	(77)
参考文献 .....	(78)
<b>第3章 重选及复合物理场分选设备与工艺 .....</b>	<b>(79)</b>
3.1 重选设备 .....	(79)
3.1.1 水力分级 .....	(79)
3.1.2 重介质分选 .....	(81)
3.1.3 跳汰分选 .....	(85)
3.1.4 溜槽分选 .....	(93)
3.1.5 摇床分选 .....	(100)
3.1.6 洗矿 .....	(106)
3.1.7 风力分选 .....	(107)
3.2 复合物理场分选方法与设备 .....	(110)
3.2.1 概述 .....	(110)
3.2.2 磁流体分选 .....	(111)
3.2.3 空气重介质流化床分选 .....	(113)
3.2.4 磁团聚分选 .....	(114)
3.2.5 重力浮选 .....	(114)
3.2.6 摩擦弹跳分选 .....	(115)
3.2.7 涡流分选 .....	(116)
3.2.8 光电捡选 .....	(117)
3.3 重选工艺 .....	(117)
3.3.1 重选生产过程 .....	(117)
3.3.2 锡矿的重选 .....	(118)
3.3.3 黑钨矿的重选 .....	(120)
3.3.4 钛矿的重选 .....	(122)
3.3.5 稀土砂矿的重选 .....	(123)
3.3.6 稀散金属矿的重选 .....	(123)
3.3.7 含金冲积砂矿的重选 .....	(124)
3.3.8 铝土矿的重选 .....	(125)
3.3.9 铁矿的重选 .....	(126)
3.3.10 锰矿的重选 .....	(127)

3.3.11 化工及非金属矿的重选 .....	(128)
3.3.12 煤的洗选 .....	(129)
3.3.13 固体废弃物中二次资源的重选和重选在其他领域的应用 .....	(131)
习题 .....	(134)
参考文献 .....	(134)
<b>第4章 磁电选设备与工艺</b> .....	<b>(135)</b>
4.1 磁选机概述 .....	(135)
4.2 弱磁选机 .....	(136)
4.2.1 磁力滚筒(磁滑轮) .....	(136)
4.2.2 湿式永磁圆筒磁选机 .....	(137)
4.2.3 磁力脱泥槽 .....	(139)
4.2.4 磁选柱 .....	(140)
4.2.5 磁场筛选机 .....	(141)
4.2.6 预磁器和脱磁器 .....	(141)
4.2.7 干选永磁筒式磁选机 .....	(143)
4.3 强磁选机 .....	(144)
4.3.1 强磁选机的磁系与结构 .....	(144)
4.3.2 圆盘式强磁选机 .....	(144)
4.3.3 感应辊式强磁选机 .....	(146)
4.3.4 琼斯式强磁选机 .....	(147)
4.3.5 环式强磁选机 .....	(149)
4.4 高梯度磁选机 .....	(151)
4.4.1 周期式高梯度磁选机 .....	(151)
4.4.2 连续式高梯度磁选机 .....	(153)
4.4.3 脉动高梯度磁选机 .....	(153)
4.5 超导磁选机 .....	(155)
4.5.1 往复列罐式超导电选机 .....	(155)
4.5.2 圆筒式超导磁选机 .....	(157)
4.6 磁选工艺应用 .....	(157)
4.6.1 黑色金属矿的磁选 .....	(157)
4.6.2 有色金属重选粗精矿的强磁精选 .....	(161)
4.6.3 非金属矿和煤的强磁选 .....	(162)
4.7 电选机 .....	(163)
4.7.1 鼓筒型高压电选机的电极结构, .....	(163)
4.7.2 DXJ $\Phi$ 320mm $\times$ 900mm 高压电选机 .....	(165)

4.7.3	YD型高压电选机	(166)
4.7.4	卡普科高压电选机	(167)
4.8	电选实际应用	(168)
4.8.1	金属矿石的电选	(168)
4.8.2	非金属矿物及其他物料的电选	(171)
4.8.3	电收尘	(172)
	习题	(173)
	参考文献	(173)
<b>第5章</b>	<b>浮选工艺与设备</b>	<b>(175)</b>
5.1	浮选药剂	(175)
5.1.1	捕收剂	(175)
5.1.2	起泡剂	(185)
5.1.3	调整剂	(186)
5.2	浮选流程	(196)
5.2.1	浮选原则流程的选择	(196)
5.2.2	浮选流程内部结构	(200)
5.2.3	浮选流程图	(201)
5.2.4	浮选流程指标计算	(202)
5.3	浮选工艺影响因素	(203)
5.3.1	矿石性质	(203)
5.3.2	粒度	(203)
5.3.3	矿浆浓度(质量分数 $w_B$ )	(205)
5.3.4	矿浆酸碱度、水质、温度和调浆	(206)
5.3.5	浮选药剂的使用与调节	(208)
5.3.6	调泡	(213)
5.4	浮选新工艺及选择	(215)
5.4.1	选择性絮凝	(215)
5.4.2	分支浮选工艺	(216)
5.4.3	载体浮选	(218)
5.4.4	硫化矿电化学浮选工艺	(219)
5.4.5	闪速浮选	(220)
5.4.6	团聚浮选	(221)
5.4.7	微泡浮选	(221)
5.5	浮选机	(222)
5.5.1	浮选机性能的基本要求	(222)

5.5.2	浮选机充气搅拌原理	(222)
5.5.3	浮选机分类	(224)
5.5.4	浮选机的发展	(234)
5.5.5	浮选辅助设备	(235)
5.5.6	浮选车间设备配置	(237)
5.6	有色金属硫化矿浮选生产实践	(239)
5.6.1	硫化铜矿浮选分离实践	(239)
5.6.2	硫化铅锌矿浮选分离实践	(247)
5.6.3	复杂多金属硫化铜铅锌矿浮选分离实践	(250)
5.6.4	硫化钼矿浮选分离实践	(253)
5.6.5	硫化镍矿浮选分离实践	(255)
5.6.6	硫化锑矿浮选分离实践	(257)
5.6.7	含金、银贵金属硫化矿物的浮选	(258)
5.6.8	砷、铋、汞、钴、铁硫化矿浮选分离实践	(259)
5.7	有色金属氧化矿浮选实践	(262)
5.7.1	氧化铜矿的浮选	(263)
5.7.2	氧化铅、锌矿的浮选	(266)
5.7.3	锡矿的浮选	(268)
5.7.4	钨矿的浮选	(270)
5.7.5	铝土矿浮选	(272)
5.7.6	锂矿浮选	(273)
5.7.7	铍矿浮选	(275)
5.7.8	钽铌矿浮选	(276)
5.8	黑色金属矿浮选实践	(277)
5.8.1	铁矿浮选	(277)
5.8.2	锰矿浮选	(281)
5.9	非金属矿、能源矿产浮选实践和浮选在其他领域中的应用	(282)
5.9.1	磷矿浮选	(282)
5.9.2	萤石浮选	(283)
5.9.3	石英浮选	(285)
5.9.4	长石浮选	(286)
5.9.5	可溶性盐浮选	(287)
5.9.6	煤泥浮选	(288)
5.9.7	浮选在其他领域中的应用实践	(289)
	习题	(292)

---

参考文献	(293)
<b>第6章 化学分选工艺与设备</b>	<b>(294)</b>
6.1 化学分选过程与设备	(294)
6.1.1 化学分选过程	(294)
6.1.2 焙烧作业设备	(302)
6.1.3 浸出作业设备	(304)
6.1.4 固液分离与洗涤作业设备	(307)
6.1.5 分离净化与富集作业设备	(307)
6.1.6 制取化合物或金属作业设备	(310)
6.2 金矿石的化学分选	(314)
6.2.1 金的矿物与矿石类型	(314)
6.2.2 金矿石的分选富集	(316)
6.2.3 金矿的氰化浸出提取	(316)
6.2.4 难浸金矿的预处理和强化浸出	(326)
6.2.5 含氰废水的处理	(332)
6.3 难选低品位铜矿石的化学分选	(334)
6.3.1 概述	(334)
6.3.2 难选氧化铜矿及低品位铜矿石的浸出-萃取-电积工艺	(336)
6.4 其他矿物原料的化学分选	(343)
6.4.1 黑色金属矿物原料和海洋锰结核的化学分选	(343)
6.4.2 难选有色金属矿石和中矿的化学选矿	(346)
6.4.3 稀土金属矿石原料的化学分选	(350)
6.4.4 稀有金属锂、铍、铌、钽、铟、铼的化学分选和提取	(353)
6.4.5 含钒原料的化学分选	(353)
6.4.6 铀矿石原料的化学分选	(356)
6.4.7 非金属矿原料的化学分选	(358)
习题	(360)
参考文献	(361)
<b>第7章 固液分离</b>	<b>(362)</b>
7.1 固液分离概述	(362)
7.1.1 液相和固相性质及对固液分离的影响	(363)
7.1.2 固液分离工艺	(365)
7.2 重力沉降浓缩	(367)
7.2.1 非均相混合物中颗粒的实际沉降过程	(367)

7.2.2 沉降池 .....	(372)
7.2.3 耙式浓缩机 .....	(373)
7.2.4 高效浓缩机 .....	(374)
7.2.5 深锥浓缩机 .....	(375)
7.2.6 多层倾斜板浓缩机 .....	(376)
7.3 过滤 .....	(378)
7.3.1 过滤的基本概念 .....	(378)
7.3.2 过滤理论 .....	(384)
7.3.3 真空过滤机 .....	(385)
7.3.4 压滤机 .....	(392)
7.3.5 加压过滤机 .....	(394)
7.3.6 陶瓷过滤机 .....	(395)
7.4 干燥 .....	(399)
7.4.1 圆筒干燥机 .....	(399)
7.4.2 流化床干燥器 .....	(402)
7.5 尾矿堆存 .....	(403)
7.5.1 尾矿堆存的意义 .....	(403)
7.5.2 尾矿库 .....	(404)
7.5.3 尾矿水的循环使用 .....	(407)
习题 .....	(408)
参考文献 .....	(408)
<b>第8章 粉体造块工艺与设备</b> .....	<b>(409)</b>
8.1 粉体造块基础 .....	(409)
8.1.1 造块的基本概念 .....	(409)
8.1.2 烧结球团法的发展 .....	(411)
8.1.3 烧结球团造块法比较 .....	(413)
8.1.4 烧结球团原料 .....	(414)
8.1.5 造块工艺的技术经济指标 .....	(422)
8.2 烧结工艺 .....	(428)
8.2.1 烧结工艺与分类 .....	(428)
8.2.2 烧结原料准备与配料 .....	(431)
8.2.3 烧结料的混合与制粒 .....	(436)
8.2.4 混合料烧结 .....	(440)
8.2.5 烧结矿处理 .....	(451)

8.2.6	烧结矿工艺的发展	(455)
8.3	球团生产工艺	(455)
8.3.1	球团生产工艺概述	(455)
8.3.2	球团原料的准备	(458)
8.3.3	配料、混合、造球、筛分和布料设备	(459)
8.3.4	竖炉法焙烧球团矿	(462)
8.3.5	带式焙烧机法焙烧球团矿	(470)
8.3.6	链篦机-回转窑法焙烧球团矿	(477)
8.3.7	球团矿生产发展方向	(486)
8.4	其他球团方法和球团矿直接还原	(489)
8.4.1	其他球团方法	(489)
8.4.2	铁精矿冷固球团回转窑直接还原新工艺	(490)
	习题	(492)
	参考文献	(492)
<b>第9章</b>	<b>矿物粉体材料</b>	(493)
9.1	粉体物理制备方法与设备	(493)
9.1.1	粉体制备概述	(493)
9.1.2	超细粉碎设备	(494)
9.1.3	气体蒸发法超细粉体制备方法与设备	(498)
9.1.4	超细粉体的分级设备	(502)
9.1.5	超细粉体的集料收尘设备	(505)
9.1.6	超细粉碎工艺类型	(506)
9.1.7	超细粉碎工艺应用	(507)
9.2	粉体化学合成方法与设备	(510)
9.2.1	粉体化学合成反应器	(510)
9.2.2	气相化学反应法	(511)
9.2.3	气相化学反应工艺技术	(516)
9.2.4	液相化学反应法	(517)
9.2.5	液相化学反应工艺技术	(520)
9.2.6	粉体制备技术的研究与发展	(522)
9.3	矿物粉体材料表面改性	(524)
9.3.1	概述	(524)
9.3.2	矿物粉体材料表面改性设备	(525)
9.3.3	矿物粉体材料表面改性工艺	(530)

---

9.3.4 矿物粉体材料表面改性应用实例 .....	(536)
9.3.5 水煤浆生产 .....	(548)
习题 .....	(549)
参考文献 .....	(550)



# 第 1 章 矿物资源加工技术及其发展

## 1.1 概 述

人类文明的发展,是建立在人类利用其智慧及所创造的工具对周围的自然资源进行开发利用的基础之上的,其中对矿产资源的开发利用尤为重要。从人类发展初期的石器时代,到早期的青铜时代、铁器时代,近代的钢铁时代和现代的新材料时代,一个个里程碑式的文明时代命名充分地说明了矿产资源开发对人类文明发展的推动作用。图 1-1 为湖南衡阳出土的商代(公元前 1600~前 1046 年)青铜牛尊。



图 1-1 湖南衡阳出土的商代青铜牛尊

今天,有色金属及黑色金属矿产工业为我们提供了制造各种工具、机器和生活用器的金属材料;能源矿产工业为我们提供了必需的能源如煤、石油、铀等;非金属矿产工业为我们提供了建设家居的水泥材料和化工化肥生产所需要的原料等。可以说,矿产开发与矿物加工工程行业在国民经济发展中具有极重要的基础地位。

矿物资源加工,是用物理、化学的方法对天然矿物资源和其他资源进行加工(包括分离、富集、提纯、提取、深加工等),以获取有用物质的科学技术。矿物资源加工包括四大学科领域:矿物加工(mineral processing);矿物材料加工(mineral material processing);二次资源加工(secondary material processing);金属提取加工(metal metallurgical processing),可简称为 4-MP。

(1) 矿物加工。用物理、化学的方法,对天然矿物资源(通常包括金属矿物、非金属矿物、煤炭等)进行选别、分离、富集其中的有用矿物,其目的是为冶金、化工等行业提供合格原料。主要选矿技术方法包括破碎、磨矿、重选、磁电选、浮选、化学分选、特殊分选、固液分离等。

(2) 矿物材料加工。通过提纯、超细粉碎、表面改性、掺杂等物理和化学方法,对天然及非传统矿物资源进行分离、纯化、改性、复合等加工,制备矿物材料、矿物复合材料、矿物-聚合物复合材料、功能矿物材料等。

(3) 金属提取加工。金属提取加工是根据矿物加工、冶金工程、化学工程、生