



普通高等教育“十五”国家级规划教材

资源加工学

王淀佐 邱冠周 胡岳华 主编



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十五”国家级规划教材

资源加工学

王淀佐 邱冠周 胡岳华 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了矿产资源、非传统矿产资源和二次资源加工的基本原理。从介绍这些物料的鉴别、基本物理化学性质和表面性质出发,阐述了固体物料粉碎的基本原理;物料颗粒在流体力场中的运动特性及其在流体力场和重力场中的分选规律;颗粒的磁性、电性及在电磁力场中的分选规律;颗粒的表面物理化学性质及以其为基础的分选原理;矿物加工药剂的类型、结构和性能;物料的化学分离方法及原理;典型矿物材料的物理化学特性及超细粉体加工的基本原理;固体物料成型与固结的基本原理;矿物微生物浸出提取冶金的基本规律。

本书可作为大专院校矿物加工工程专业本科生的基础课教材,也可作为冶金、化工等专业相关人员的教学参考书,对有关科研院所的科研人员也有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

资源加工学/王淀佐等主编. —北京:科学出版社,2005

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-03-013851-1

I. 资… II. 王… III. 选矿-高等学校-教材 IV. TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079544 号

责任编辑:杨蕾萍 吴伶俐 责任校对:宋玲玲

责任印制:张春春 封面设计:陈 毅

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

*

2005年3月第一版 开本: B5(720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张: 29 3/4

印数: 1—3 000 字数: 561 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

《资源加工学》 编委会

主 编 王淀佐 邱冠周 胡岳华

编 委 (按姓氏笔画排序)

王淀佐 邓海波 冯其明 庄剑鸣

刘晓文 杨华明 杨英杰 肖金华

邱冠周 宋晓岚 范晓慧 欧乐明

胡岳华 柳建设 袁明亮 顾帼华

蒋玉仁 覃文庆

主 审 胡岳华 邓海波 陈万雄

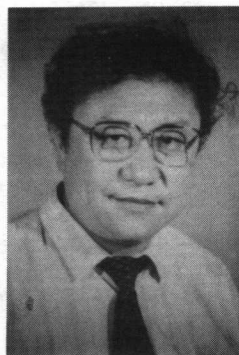
作者简介

王淀佐教授,1934年出生,1961年毕业于中南矿冶学院。中国科学院院士、中国工程院院士、美国国家工程科学院外籍院士、俄罗斯工程院外籍院士。

现任中南大学教授、北京有色金属研究总院教授,博士生导师。1998年当选中国工程院副院长。

主要研究方向:矿物浮选和浮选剂、硫化矿浮选电化学、细粒浮选、浮选溶液化学、硫化矿生物冶金等。

出版著作8部,发表论文300多篇,曾获国家自然科学基金三等奖、国家科技进步一等奖和省部级科技一等奖等。



王淀佐



邱冠周

邱冠周教授,1949年出生,1987年获博士学位,现任中南大学教授、博士生导师,入选国家有突出贡献中青年专家。

主要研究方向:铁精矿冷固结球团煤基直接还原、硫化矿生物冶金、矿物材料、硫化矿浮选电化学、细粒浮选等。

出版著作3部,发表论文200多篇,曾获国家科技进步一等奖和省部级科技一等奖等。

胡岳华教授,1961年出生,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2部,发表论文160多篇,曾获国家科技进步一等奖和省部级科技一等奖等。



胡岳华

前 言

《资源加工学》一书,作为矿物加工专业国家教改项目的成果即将出版。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,为适应矿物加工专业教学改革的需要重新编写的,创新特色体现在以下几个方面。

(1) 研究对象多样化。此领域传统的教科书主要针对矿物的基本性质及矿石的分选。人类社会经济的发展依赖于对矿物资源的开发和日益增加的消耗,矿物资源面临短缺的危机。一些以往难以利用的“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)和二次资源的加工利用变得越来越重要,国内外在这方面已有许多研究工作。本书针对资源特点的变化,把一些新的知识介绍给学生。

(2) 全新的教学思路。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)来编写教学内容的,其原理、技术、设备混在一起。本书从介绍待处理物料的基本物理化学性质出发,阐述了各种物料不同分选过程的基本原理,以理论基础和单元过程为框架,不单纯针对矿物的分选,使学生全面掌握适于不同物料分离、选别和深加工等加工过程的基本知识。有关设备、工艺流程和单元工艺操作等方面的知识内容,将在后续教材《资源加工工艺装备与技术》中阐述。

(3) 更新的教材内容。本书除保留传统矿物加工教科书中一些经典的理论外,更新了许多内容,把近10年矿物加工科学研究的新成果、新知识编进教材,如有关浮选溶液化学、电化学、矿物材料、矿物的生物浸出提取等,使学生具有更扎实的基础和更丰富的知识面。

(4) 全面系统的资源加工知识。本书系统地介绍了资源加工知识,包括:各种资源物料的鉴别和基本性质、物料的解离、物料在流体重力场和电磁力场中的分选、物料的表面物理化学分选、矿物加工药剂、化学分离、矿物粉体材料及表面改性、粉体成型与固结、矿物的生物浸出提取等。

本书由王淀佐、邱冠周、胡岳华三位在国内资源加工学领域卓有建树的教授任主编,讨论并拟定教材大纲、方向内容和编写框架。作者所在的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),刘晓文(2.1节),冯其明(2.2节,2.3节),欧乐明(第3章),杨英杰(第4章),

邓海波(5.1节,5.4节,8.1节,8.2节,8.3节),肖金华(5.2节,5.3节),顾帼华(6.1~6.5节),覃文庆(6.6节,6.7节,7.1.6节,7.1.7节),蒋玉仁(第7章,7.1.6节与7.1.7节除外),柳建设(8.4~8.6节,第12章),宋晓岚(9.1节,9.3节),杨华明(9.2节),袁明亮(9.4节),庄剑鸣(第10章),范晓慧(第11章)。全书内容由胡岳华、邓海波、陈万雄审定,邓海波负责修改、插图清绘和统稿。

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

2005年1月
长沙岳麓山下

目 录

前言

第 1 章 资源加工学概述	(1)
1.1 资源加工学的形成	(1)
1.1.1 选矿学科的形成	(1)
1.1.2 矿物加工学科的形成与发展	(3)
1.1.3 矿物加工学科面临的挑战与资源加工学科的形成	(5)
1.2 资源加工学的学科体系	(7)
1.2.1 资源加工学的研究对象	(7)
1.2.2 资源加工学科体系	(8)
1.3 资源加工在国民经济建设中的地位和作用	(10)
1.4 国内外重要的资源加工学术研究机构	(10)
1.4.1 国内	(10)
1.4.2 国外	(12)
习题	(14)
参考文献	(14)
第 2 章 物料的基本物理化学特性	(15)
2.1 物料的鉴别	(15)
2.1.1 矿物	(15)
2.1.2 岩石	(20)
2.1.3 矿石	(21)
2.1.4 二次资源及其他固体物料	(22)
2.1.5 非固体物料	(22)
2.1.6 决定物料加工工艺的基本参数	(22)
2.2 物料的物理性质	(24)
2.2.1 密度	(24)
2.2.2 物料颗粒的几何特征	(26)
2.2.3 颗粒的表面积	(29)
2.2.4 磁性	(30)
2.2.5 电性质	(41)
2.3 表面化学性质	(43)

2.3.1	晶体结构与价键类型	(43)
2.3.2	表面能	(47)
2.3.3	表面氧化与溶解	(51)
2.3.4	表面电性	(53)
2.3.5	表面润湿性	(55)
	习题	(59)
	参考文献	(60)
第3章	粉碎与分级	(61)
3.1	粉碎	(61)
3.1.1	概述	(61)
3.1.2	粉碎的工艺特征	(63)
3.1.3	粉碎方法	(69)
3.1.4	粉碎理论	(70)
3.1.5	助磨作用	(75)
3.2	分级	(78)
3.2.1	筛分分级	(79)
3.2.2	水力分级	(85)
3.2.3	气流介质分级	(86)
3.2.4	分级效果的评价	(90)
3.2.5	粉碎产品粒度特征	(93)
	习题	(100)
	参考文献	(101)
第4章	颗粒在流体中的运动	(102)
4.1	流体的基本性质	(102)
4.1.1	一般概念	(102)
4.1.2	流体的黏度	(103)
4.1.3	流体的分类	(105)
4.1.4	流体的流态、雷诺数与阻力系数	(108)
4.2	颗粒在流体中的沉降	(110)
4.2.1	流体阻力	(110)
4.2.2	自由沉降	(112)
4.2.3	干涉沉降	(115)
4.3	流体中颗粒的相互作用	(119)
4.3.1	紊流中颗粒间传质机理	(119)
4.3.2	紊流中颗粒间相互作用	(120)

4.4 气泡在流体中的运动	(121)
4.4.1 流体中气泡的形成	(121)
4.4.2 流体中气泡的运动速度	(123)
4.5 流体中气泡与颗粒的碰撞	(126)
4.5.1 黏附过程	(126)
4.5.2 碰撞速率	(127)
4.5.3 黏附概率	(128)
4.5.4 脱附概率	(130)
习题	(130)
参考文献	(131)
第5章 物理分选	(132)
5.1 重力分选	(132)
5.1.1 概述	(132)
5.1.2 重选过程的物理基础	(134)
5.1.3 重选基本原理概述	(138)
5.1.4 颗粒在介质中的沉降运动与等降比	(139)
5.1.5 物料在垂直交变介质流中按密度分层	(141)
5.1.6 斜面流分选原理	(144)
5.1.7 回转流分选原理	(152)
5.2 磁场分选	(156)
5.2.1 磁选过程	(156)
5.2.2 磁力	(158)
5.2.3 改变物质磁性的方法	(159)
5.2.4 分选磁场的磁场特性	(163)
5.3 电场分选	(173)
5.3.1 电选过程	(173)
5.3.2 电选机电场	(174)
5.3.3 带电方法和颗粒荷电量	(181)
5.3.4 电选过程中颗粒的受力与分离	(185)
5.4 复合物理场分选	(188)
5.4.1 复合物理场分选原理概述	(188)
5.4.2 复合物理场颗粒运动理论分类	(189)
5.4.3 物料加工中的复合物理场及求解方法	(190)
5.4.4 颗粒运动理论简介	(190)
5.4.5 粒群统计模型理论简介	(192)

习题	(193)
参考文献	(193)
第6章 表面物理化学分选	(194)
6.1 概述	(194)
6.2 颗粒表面润湿性与浮选	(194)
6.2.1 润湿过程	(194)
6.2.2 固体颗粒表面润湿性的度量	(196)
6.2.3 矿物表面水化作用与润湿性	(198)
6.2.4 润湿与浮选	(200)
6.3 双电层	(203)
6.3.1 双电层结构及电位	(203)
6.3.2 动电现象	(208)
6.3.3 颗粒表面电性与浮选药剂吸附	(209)
6.3.4 半胶束吸附	(210)
6.4 矿物溶解对浮选过程的影响	(211)
6.4.1 矿浆 pH 及其缓冲性质	(211)
6.4.2 矿物溶解度大小与可浮性	(212)
6.4.3 矿物溶解离子的活化作用	(212)
6.4.4 矿物溶解离子对捕收剂作用的影响	(213)
6.5 硫化物固体颗粒表面的氧化还原反应与浮选	(213)
6.5.1 硫化物固体颗粒表面的氧化	(213)
6.5.2 巯基浮选捕收剂在硫化物上的电化学反应	(217)
6.6 聚集与分散	(224)
6.6.1 基本行为	(224)
6.6.2 微粒间相互作用的 DLVO 理论	(227)
6.6.3 扩展的 DLVO 理论	(230)
6.7 泡沫	(231)
6.7.1 泡沫的形成与稳定	(231)
6.7.2 泡沫的应用	(233)
6.7.3 消泡	(234)
习题	(235)
参考文献	(235)
第7章 矿物加工药剂	(236)
7.1 低相对分子质量有机药剂	(236)
7.1.1 表面活性剂、异极性有机药剂和非极性捕收剂	(236)

7.1.2 表面活性剂的物理化学性能	(244)
7.1.3 溶液中的酸碱平衡	(251)
7.1.4 表面活性剂的表面物理化学性质	(253)
7.1.5 表面活性剂的吸附	(260)
7.2 大分子药剂	(265)
7.2.1 概述	(265)
7.2.2 大分子药剂的物理化学性质	(265)
7.2.3 大分子药剂在固体表面的吸附	(267)
7.2.4 大分子药剂的应用	(268)
7.3 无机盐类药剂	(272)
7.3.1 分类	(272)
7.3.2 溶液化学行为	(274)
7.3.3 无机盐在固体表面的作用	(274)
习题	(280)
参考文献	(281)
第8章 化学分选	(282)
8.1 化学分选概述	(282)
8.2 化学浸出	(283)
8.2.1 焙烧过程	(283)
8.2.2 浸出	(286)
8.2.3 固液分离	(292)
8.3 化学沉淀	(292)
8.3.1 离子沉淀	(292)
8.3.2 置换沉淀	(296)
8.3.3 电积沉淀	(298)
8.4 溶剂萃取	(299)
8.4.1 溶剂萃取的基本原理	(299)
8.4.2 萃取剂、稀释剂、改质剂	(307)
8.4.3 萃取方式和过程计算	(309)
8.5 离子交换法	(312)
8.5.1 离子交换原理及分类	(313)
8.5.2 离子交换过程的理论基础	(315)
8.6 膜分离过程	(319)
8.6.1 膜和膜分离过程的分类与特性	(319)
8.6.2 膜的基本理论	(322)

习题	(324)
参考文献	(324)
第9章 粉体制备	(325)
9.1 超细颗粒与纳米颗粒	(325)
9.1.1 超细颗粒与纳米颗粒的基本概念	(325)
9.1.2 纳米颗粒的纳米效应	(326)
9.1.3 超细颗粒与纳米颗粒的物理特性	(329)
9.1.4 超细颗粒与纳米颗粒的化学特性	(338)
9.1.5 超细颗粒与纳米颗粒的应用	(342)
9.2 粉体的物理制备方法	(342)
9.2.1 概述	(342)
9.2.2 机械粉碎法	(343)
9.2.3 蒸发凝聚法	(345)
9.2.4 离子溅射法	(348)
9.2.5 冷冻干燥法	(348)
9.2.6 其他物理制备方法	(349)
9.2.7 物理法制备粉体技术的发展	(349)
9.3 粉体的化学合成	(349)
9.3.1 气相法	(350)
9.3.2 液相法	(354)
9.3.3 固相法	(360)
9.4 粉体表面改性	(365)
9.4.1 表面改性定义及目的	(365)
9.4.2 表面改性的研究内容和基本方法	(367)
9.4.3 表面改性剂及作用	(371)
习题	(380)
参考文献	(380)
第10章 粉体成型	(382)
10.1 粉体成型基本方法	(382)
10.1.1 滚动成型	(382)
10.1.2 压制成型	(383)
10.2 水分在成型过程中的作用	(385)
10.2.1 吸附水的特性及其作用	(385)
10.2.2 薄膜水的特性及其作用	(386)
10.2.3 毛细水的特性及其作用	(388)

10.2.4 重力水的特性及其作用	(388)
10.3 粉体成型机理	(389)
10.3.1 细磨物料的滚动成型机理	(389)
10.3.2 粉状物料滚动成型制粒机理	(398)
10.3.3 压制成型机理	(402)
习题	(407)
参考文献	(407)
第 11 章 粉体固结	(408)
11.1 固结过程的气体力学	(408)
11.1.1 料层透气性的概念	(408)
11.1.2 厄贡方程	(408)
11.1.3 沃伊斯公式	(409)
11.1.4 料层结构主要参数与透气性的关系	(410)
11.2 固结过程的传热规律	(412)
11.2.1 基本传热规律	(412)
11.2.2 传热前沿	(413)
11.2.3 燃烧前沿	(414)
11.3 固结过程传质规律	(415)
11.3.1 气-固相反应的动力学	(416)
11.3.2 燃料的燃烧	(416)
11.3.3 分解反应	(417)
11.3.4 氧化物的氧化	(421)
11.3.5 氧化物的还原	(421)
11.3.6 固相反应	(423)
11.4 液相固结	(427)
11.4.1 液相的形成	(427)
11.4.2 液相的冷凝	(431)
11.5 固相固结	(432)
习题	(434)
参考文献	(435)
第 12 章 矿物微生物浸出	(436)
12.1 概述	(436)
12.2 浸矿微生物	(437)
12.2.1 浸矿微生物的种类、来源及生理生态特性	(437)
12.2.2 浸矿细菌的培养基	(439)

12.2.3 细菌的采集、分离和培养	(439)
12.2.4 细菌生长曲线	(441)
12.2.5 浸矿细菌驯化	(442)
12.2.6 细菌的计量	(443)
12.3 微生物浸出基本原理	(444)
12.3.1 细菌浸出直接作用	(444)
12.3.2 细菌浸出间接作用	(446)
12.3.3 细菌浸出复合作用	(447)
12.3.4 电位-pH图	(447)
12.4 细菌浸出影响因素和浸出动力学	(448)
12.4.1 细菌浸出过程的影响因素	(448)
12.4.2 细菌浸出动力学	(456)
习题	(458)
参考文献	(458)

第 1 章 资源加工学概述

1.1 资源加工学的形成

资源加工学是由传统的选矿学、矿物加工学发展演变形成的新的学科体系。在给出资源加工学的明确定义与内涵之前,让我们先来看看选矿、矿物加工的学科形成与发展。

传统选矿学、矿物加工学的研究对象均以天然矿物资源为主。选矿学是用物理、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的科学技术,其目的是为冶金、化工等行业提供合格原料。矿物加工学是在选矿学的基础上发展起来的,是用物理、化学的方法,对天然矿物资源进行加工(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。其目的已不单纯是为其他行业提供合格原料,也可利用其直接得到金属、矿物材料等。

1.1.1 选矿学科的形成

人类利用矿物资源已有数千年的历史,如自然金、自然铜、滑石、朱砂等的开采与利用。无论是公元前几千年的古埃及,还是中世纪的罗马帝国时代,或者是中国古代,由于科学技术水平整体落后,社会生产力低,人类利用的矿物资源主要是通过手工作业从天然矿石中得到的,如淘金、人工溜槽、手动跳汰筛、洗矿槽等原始重选方法及鹅毛蘸油刮取浮在水面上的金粉等原始浮选方法。我国古代将原始的重选、浮选总结为“澄、淘、飞、跌”。我国明代宋应星所著《天工开物》(1637年)一书中,对铁砂和锡砂的开采选别已有描述,见图 1-1。这些手工作业虽然有近代“表层浮选”、“重选”的影子,但还算不上是一门工业技术,这种现象一直延伸到 19 世纪中期。

19 世纪末至 20 世纪 20 年代,世界工业生产快速发展,对矿物原料的需求增大,加上 18 世纪产业革命的推动,使机械化成为可能,促使了“选矿”技术从古代的手工作业向工业技术的真正转变。近代大部分的选矿工艺与设备都属于这一时期选矿领域的技术发明,如颧式破碎机、球磨机、机械分级机,重选、电磁选的设备与工艺及浮选药剂、工艺与设备等。特别是 20 年代初,黄药、黑药在浮选硫化矿中的工业应用,使选矿技术(包括破碎、筛分、磨矿、重选、电选、磁选、浮选等)能处理大部分天然矿物原料。从那时起,选矿技术已成为一门人类从天然矿石中选别、富集



图 1-1 《天工开物》一书中的插图：淘洗锡砂和淘洗铁砂

有用矿物原料的成熟的工业技术,并得到广泛的应用。

随着选矿技术的大规模工业应用,对各种选矿工艺过程机制及基础理论的研究也随之展开。

首先,随着流体力学的发展,重选的基础研究起步较早。19世纪下半叶,奥地利人 Rittinger 提出了“等降现象”;Monroe 等进一步提出“干涉沉降”。20世纪40年代,原苏联学者施马茨柯夫提出了跳汰是在上升水流中“按悬浮体的相对密度分层”的学说;德国学者 Mayer 从床层位能降的角度解释了分层过程;英国学者 Bagnold 在50年代观察到了剪切运动下层流、斜面流中多层粒群的松散分层现象。这些学说构成了重选的理论基础。在电磁选矿方面,由于物理学的发展,人们早就认识到可用永久磁铁选别铁矿石。当电磁铁被用作磁选机的磁场并有了各种工业生产的电磁选矿机后,电磁选矿理论也已初步确立。

在浮选方面,从20世纪30年代开始,美国的 Taggart 及原苏联的 Plaksins 等先后提出了捕收剂的“化学反应假说”或“溶度积假说”,以解释重金属硫化矿的可浮性顺序。美国的 Gaudin、原苏联的 Bogdanov 及澳大利亚的 Wark 等较多地研究了矿物的润湿性与可浮性的关系、浮选剂的吸附作用机理、浮选的活化等。美国的 D. W. Fuerstenau 等系统地研究了矿物表面电性与可浮性的关系。到60年代前后,浮选的三大基本理论(润湿理论、吸附理论及双电层理论)已初步形成。

从20世纪20年代至60年代前后,经过几十年的发展,选矿已从一门纯工程技术向工程科学转化。这一时期中一些重要的著作有:美国 Taggart 的 *Handbook of Ore Dressing* (1927年第1版,1944年第2版);Gaudin 的 *Flotation* (1932年第1版,1957年第2版);澳大利亚的 Sutherland 和 Wark 的 *Principles of Flotation* (1955年第1版);原苏联 Bogdanov 的 *Theory and Technology of Flotation* (1959