

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

固体物料分选学

(第2版)

魏德洲 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

固体物料分选学

(第2版)

东北大学 魏德洲 主编

北 京
冶金工业出版社
2009

内 容 提 要

本书客观而系统地介绍了固体物料分选的基本概念、基本原理、主要设备和常见分选工艺,并力求涵盖所有固体物料的分选。全书共分为六篇:选前准备、磁选和电选、重选、浮选、其他分选方法、分选工艺及辅助作业,旨在使固体物料分选过程所涉及的概念、理论、设备和工艺成为统一的有机整体。

本书可作为矿物加工工程专业本科生的专业课教材也可作为从事选矿领域科学研究、技术开发和工程设计的技术人员的工具书,还可作为能源、冶金、化工、环境、建筑、农业等部门从事与固体物料分选有关的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

固体物料分选学/魏德洲主编.—2版,—北京:冶金工业出版社,2009.9
高等学校规划教材
ISBN 978-7-5024-4634-5

I. 固… II. 魏… III. 选矿—高等学校—教材
IV. TD91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 164075 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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 章秀珍 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4634-5

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 9 月第 1 版,2009 年 9 月第 2 版,2009 年 9 月第 2 次印刷

787 mm×1092 mm 1/16;27.25 印张;726 千字;415 页;2001-4000 册

59.00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

第 2 版 前 言

《固体物料分选学》一书于 2000 年出版以来,受到了矿物加工领域的关注,被多所大专院校选作矿物加工工程专业本科生的专业课教材和研究生入学考试的参考书。随着矿物加工及相关技术领域的不断发展,涌现出的新科研成果使固体物料分选过程的理论、工艺和设备逐渐丰富和完善。基于这一客观实际,参考第 1 版读者的修改意见和建议,我们在第 1 版书稿的基础上,对内容进行了全面的修订,以体现科学技术的发展、满足矿物加工及相关技术领域教育教学、科学研究和生产实践的需要。

参加本书修订工作的有魏德洲(绪论、第 1 篇和第 4 篇)、高淑玲(第 3 篇和第 6 篇)、刘文刚(第 2 篇和第 5 篇),代淑娟、贾春云、韩聪、柳青、崔宝玉、杨海龙、孟娜、王玉娟、周南、曹亮、梁广泉等参加了资料收集和文字输入工作,魏德洲担任主编,对全书作了统一整理和修改。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

《固体物料分选学》这次修订出版工作纳入了东北大学“十一五”教材建设规划,学校在编写工作和出版经费方面给予了大力支持和帮助;修订工作还得到了东北大学资源与土木工程学院、特别是矿物工程研究所相关领导和老师们的支持和帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

编 者

2009 年 5 月

第 1 版 前 言

本书是根据原冶金工业部的“九五”教材出版规划的安排,从矿物加工工程学科的发展和各种分选方法的应用范围不断扩大这一客观事实出发,为了使矿物加工工程专业本科生的培养跟上科学技术发展的步伐,在原有多种教材的基础上编写而成的。

为了适应“加强基础、淡化专业”这一培养本科生的总体指导思想,本书的编写立足于介绍固体物料分选的基本概念、基本原理、主要设备和常见分选工艺,并力求涵盖所有固体物料的分选。书中的内容既包含了原来的《碎矿与磨矿》、《磁电选矿》、《重力选矿》和《浮选》4本教材的内容,还增加了“其他分选方法”和“分选工艺及辅助作业”2篇,旨在使固体物料分选过程所涉及的概念、理论、设备和工艺,在本书中成为统一整体。

参加本书编写工作的有魏德洲(绪论、第一篇和第三篇),连相泉(第二篇和第五篇)、刘慧纳(第四篇和第六篇),魏德洲担任主编,对全书作了统一整理和修改。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

在本书编写过程中,北京科技大学的卢寿慈教授、中国矿业大学的赵跃民教授和东北大学的张维庆教授对书稿进行了认真审阅,提出了许多宝贵意见,在此一并致以诚挚的谢意。

编 者

1999年7月

目 录

绪论	1
----------	---

第1篇 选前准备

1 碎散物料的粒度组成及分析	5
1.1 粒度组成及粒度分析	5
1.1.1 粒度及其表示方法	5
1.1.2 粒度分析方法	6
1.2 筛分分析	7
1.2.1 筛分分析的工具	7
1.2.2 筛分分析方法	8
1.2.3 筛分分析结果的处理	8
1.3 粒度特性方程	10
2 工业筛分及筛分机械	11
2.1 筛分过程及其评价	11
2.1.1 筛分过程	11
2.1.2 筛分作业的评价	11
2.2 筛分机械	12
2.2.1 固定筛	12
2.2.2 振动筛	13
2.2.3 细筛	19
2.2.4 其他筛分设备	21
2.3 筛分过程的影响因素及筛分机生产率计算	23
2.3.1 影响筛分过程的因素	23
2.3.2 筛分机生产率计算	24
3 物料的破碎	26
3.1 概述	26
3.1.1 破碎过程的技术指标	26
3.1.2 物料的机械强度	27
3.2 物料破碎的功耗学说	27

3.2.1 面积学说	28
3.2.2 体积学说	28
3.2.3 裂缝学说	28
3.3 破碎设备	29
3.3.1 粗碎破碎机	29
3.3.2 中碎和细碎破碎机	36
3.4 破碎过程的影响因素及破碎机生产能力计算	42
3.4.1 破碎过程的影响因素	42
3.4.2 破碎机生产能力计算	43
4 物料的磨碎过程	46
4.1 磨碎作业的评价指标	46
4.2 钢球在磨机内的运动及其磨碎作用	46
4.2.1 磨机内钢球的运动状态	46
4.2.2 抛落运动状态下钢球的运动分析	47
4.2.3 超临界转速运转及其磨碎作用	49
4.3 钢球在磨机内的运动轨迹和磨矿作业条件的确定	49
4.3.1 钢球作抛落运动时的运动轨迹方程	49
4.3.2 磨机转速的确定	50
4.4 磨碎过程的能耗	51
4.4.1 钢球作泻落运动时的功率计算	51
4.4.2 钢球作抛落运动时的功率计算	53
5 磨碎机械	55
5.1 球磨机和棒磨机	55
5.1.1 基本类型和构造	55
5.1.2 球磨机和棒磨机的工艺性能及用途	59
5.1.3 球磨机和棒磨机磨碎过程的影响因素	61
5.2 自磨机和砾磨机	63
5.2.1 自磨机	64
5.2.2 砾磨机	67
5.2.3 自磨过程的影响因素	67
5.3 超细粉碎设备	68
5.3.1 超细粉碎机	69
5.3.2 分级研磨机	69
5.3.3 喷射粉磨机	70
5.3.4 气流磨	70
5.3.5 振动磨	71
5.3.6 搅拌磨	72

5.3.7 胶体磨	72
5.3.8 雷蒙磨	73
5.3.9 离心磨	73
5.4 磨碎设备的生产率计算	74
5.4.1 球磨机和棒磨机的生产率计算	74
5.4.2 自磨机和砾磨机的生产率计算	75
6 破碎和磨碎流程	77
6.1 破碎流程	77
6.2 磨碎流程	77
6.3 自磨和砾磨流程	79

第2篇 磁选和电选

7 磁选的基本原理	81
7.1 磁选的物理基础	81
7.1.1 磁学的概念	81
7.1.2 磁场的基本定律	84
7.1.3 在磁介质中有关物理量之间的关系	85
7.2 磁性颗粒在非均匀磁场中所受的磁力	86
7.3 磁选过程所需要的磁力	87
7.3.1 磁选分离的基本条件	87
7.3.2 回收磁性颗粒所需要的磁力	88
8 矿物的磁性	91
8.1 物质按磁性分类	91
8.1.1 物质磁性的起因	91
8.1.2 物质按磁性分类	91
8.2 强磁性矿物的磁性	93
8.2.1 强磁性矿物的结构和磁性之间的关系	93
8.2.2 强磁性矿物的磁性	95
8.2.3 影响强磁性矿物磁性的因素	97
8.3 弱磁性矿物的磁性	102
8.4 弱磁性铁矿物的磁性转变	103
8.4.1 磁化焙烧的原理和分类	103
8.4.2 铁矿物磁化焙烧图	104
8.4.3 焙烧炉	105
8.5 物料的磁性对磁选过程的影响	107

9 磁分离空间的磁场特性	110
9.1 磁选机的磁系	110
9.2 磁选设备中常用的磁性材料及其磁特性	111
9.2.1 铁磁性材料的磁特性	111
9.2.2 软磁材料	112
9.2.3 硬磁材料	113
9.3 开放磁系的磁场特性及其影响因素	115
9.3.1 开放磁系的磁场特性	115
9.3.2 极宽 b 与极隙宽 a 的比值对磁场特性的影响	116
9.3.3 极距对磁场特性的影响	117
9.4 闭合磁系的磁场特性	119
9.4.1 单层感应磁极对的磁场特性	119
9.4.2 多层聚磁感应介质的磁场特性	123
10 磁选设备	127
10.1 弱磁场磁选设备	127
10.1.1 永磁筒式磁选机	127
10.1.2 磁滑轮(磁滚筒)	132
10.1.3 磁力脱水槽	134
10.1.4 磁团聚重力选矿机	136
10.1.5 磁选柱和磁场筛选机	137
10.1.6 干式弱磁场磁选设备	138
10.1.7 预磁器和脱磁器	140
10.2 中磁场磁选设备	142
10.3 强磁场磁选设备	143
10.3.1 干式强磁场磁选机	143
10.3.2 琼斯型湿式强磁场磁选机	147
10.3.3 萨拉转环式高梯度强磁场磁选机	148
10.3.4 SLon 立环脉动高梯度磁选机	149
10.3.5 DLS 系列立环高梯度磁选机	150
10.3.6 MCH 型电磁环式强磁场磁选机	151
10.3.7 电磁感应辊式强磁场磁选机	152
11 其他磁分离技术	154
11.1 磁流体分选	154
11.1.1 磁流体分选概述	154
11.1.2 磁流体静力分选的基本原理	155
11.1.3 磁流体静力分选机	156
11.2 超导技术在磁选中的应用	157

11.2.1 超导现象及超导体的基本性质	157
11.2.2 低温的获得和保持	159
11.2.3 超导材料	160
11.2.4 超导磁选机	161
11.3 磁种分选法	163
11.3.1 选择性磁种分选技术的理论基础	163
11.3.2 磁种分选法的分类	164
11.3.3 磁种的类型与制备方法	164
12 电选	165
12.1 电选的基本原理	165
12.1.1 矿物的电性质	165
12.1.2 颗粒在电场中带电的方法	167
12.1.3 电选的基本条件	169
12.1.4 电选的作用机理	171
12.2 电选机	172
12.2.1 $\phi 120 \times 1500$ 双辊筒电选机	172
12.2.2 DX-1 型高压电选机	173
12.2.3 筛板式电选机	176
12.3 电选过程的影响因素	176
12.3.1 电场参数	176
12.3.2 机械因素	177
12.3.3 物料性质	178

第 3 篇 重 选

13 颗粒在介质中的沉降运动	181
13.1 介质的性质及对颗粒运动的影响	181
13.1.1 介质的密度和黏度	181
13.1.2 介质对颗粒的浮力和阻力	181
13.2 颗粒在介质中的自由沉降	184
13.2.1 球形颗粒在静止介质中的自由沉降	184
13.2.2 非球形颗粒在静止介质中的自由沉降	185
13.3 颗粒在悬浮粒群中的干涉沉降	187
13.3.1 颗粒在干涉沉降过程中的运动特点	187
13.3.2 颗粒的干涉沉降速度计算公式	187
13.3.3 物料沿垂向的重力分层及干涉沉降等降比	189
14 水力分级	192
14.1 水力分析	193

14.1.1 重力沉降法	193
14.1.2 上升水流法	194
14.2 多室及单槽水力分级机	195
14.2.1 云锡式分级箱	195
14.2.2 机械搅拌式水力分级机	196
14.2.3 筛板式槽型水力分级机	196
14.2.4 分泥斗	197
14.2.5 倾斜浓密箱	197
14.3 螺旋分级机	198
14.4 水力旋流器	201
14.4.1 水力旋流器的分级原理	202
14.4.2 水力旋流器的工艺计算	203
14.4.3 影响水力旋流器工作的因素	204
14.4.4 水力旋流器的应用和发展	204
14.5 分级效果的评价	206
14.5.1 粒度分配曲线	206
14.5.2 分级效率的计算公式	207
15 重介质分选	208
15.1 重悬浮液的性质	208
15.1.1 重悬浮液的黏度	208
15.1.2 悬浮液的密度	209
15.1.3 悬浮液的稳定性	210
15.1.4 影响悬浮液性质的因素	211
15.2 重介质分选设备	211
15.2.1 圆锥型重介质分选机	211
15.2.2 鼓型重介质分选机	212
15.2.3 重介质振动溜槽	212
15.2.4 重介质旋流器	213
15.2.5 重介质涡流旋流器	214
15.2.6 荻纳型和特拉伊-费洛型重介质涡流旋流器	214
15.2.7 三产品重介质旋流器	215
15.2.8 斜轮重介质分选机和立轮重介质分选机	216
15.3 重介质分选工艺流程	217
16 跳汰分选	219
16.1 物料在跳汰机内的分选过程	220
16.1.1 跳汰分选原理	220
16.1.2 颗粒在跳汰分选过程中的运动分析	221

16.1.3 偏心连杆机构跳汰机内水流的运动特性及物料的分层过程	222
16.1.4 跳汰周期曲线	224
16.2 跳汰机	225
16.2.1 旁动型隔膜跳汰机	225
16.2.2 下动型圆锥隔膜跳汰机	226
16.2.3 侧动型隔膜跳汰机	227
16.2.4 圆形跳汰机和锯齿波跳汰机	228
16.2.5 无活塞跳汰机	230
16.2.6 动筛跳汰机	232
16.2.7 离心跳汰机	232
16.3 影响跳汰分选的工艺因素	233
16.3.1 冲程和冲次	233
16.3.2 给矿水和筛下补加水	234
16.3.3 床层厚度和人工床层	234
16.3.4 筛板落差	234
16.3.5 给料性质和给料量	234
17 溜槽分选	235
17.1 斜面水流的运动特性	235
17.1.1 层流斜面水流的水力学特性	235
17.1.2 湍流斜面水流的水力学特性	236
17.2 粗粒溜槽的分选原理	237
17.3 细粒溜槽的分选原理	238
17.3.1 固体颗粒对液流流态的影响	238
17.3.2 固体浓度及流速沿槽深的分布	239
17.3.3 层流流态下粒群松散机理	239
17.3.4 不同密度颗粒在细粒溜槽中的分层	240
17.4 粗粒溜槽	242
17.5 扇形溜槽和圆锥选矿机	242
17.5.1 扇形溜槽	243
17.5.2 圆锥选矿机	244
17.6 螺旋选矿机和螺旋溜槽	245
17.6.1 螺旋选矿机和螺旋溜槽的分选原理	246
17.6.2 螺旋选矿机和螺旋溜槽的影响因素	247
17.7 沉积排料型溜槽	248
17.7.1 皮带溜槽	248
17.7.2 40层摇动翻床	249
17.7.3 横流皮带溜槽	250
17.7.4 振摆皮带溜槽	250

17.8 离心溜槽	251
17.8.1 卧式离心选矿机	251
17.8.2 SL型射流离心选矿机	253
17.8.3 离心盘选机和离心选金锥	254
18 摇床分选	256
18.1 摇床的分选原理	256
18.1.1 颗粒在床条沟中的松散分层	256
18.1.2 颗粒在床面上的运搬分带	257
18.2 摇床的类型	260
18.2.1 6-S摇床	260
18.2.2 云锡式摇床	261
18.2.3 弹簧摇床	262
18.2.4 悬挂式多层摇床	263
18.2.5 台浮摇床	264
18.3 摇床分选的影响因素	265
18.3.1 床面构成	265
18.3.2 冲程和冲次	265
18.3.3 冲洗水和床面横向坡度	265
18.3.4 物料入选前的准备及给料量	265
19 风力分选和洗矿	266
19.1 风力分选	266
19.1.1 沉降箱	266
19.1.2 离心式分离器	266
19.1.3 风力跳汰机和风力摇床	268
19.1.4 风力尖缩溜槽	269
19.2 洗矿	269
19.2.1 圆筒洗矿筛	270
19.2.2 水力洗矿筛	270
19.2.3 圆筒(滚筒)洗矿机	271
19.2.4 槽式洗矿机	271

第 4 篇 浮 选

20 浮选理论基础	275
20.1 固体表面的润湿性及可浮性	275
20.1.1 润湿现象	275
20.1.2 润湿性的度量	275

20.1.3 黏着功	276
20.1.4 固体表面的水化层	277
20.2 矿物的晶体结构与可浮性	279
20.2.1 矿物的晶格结构与键能	279
20.2.2 矿物颗粒的表面键能与天然可浮性	280
20.2.3 颗粒表面的不均匀性与可浮性	281
20.3 颗粒表面的氧化和溶解与可浮性	285
20.3.1 颗粒表面的氧化	285
20.3.2 物料的溶解	286
20.4 两相界面的双电层	287
20.4.1 固液界面荷电的起因	287
20.4.2 双电层的结构及电位	289
20.4.3 颗粒表面的电性与可浮性	292
20.5 固体颗粒表面的吸附	292
20.5.1 分子吸附和离子吸附	292
20.5.2 胶粒吸附和半胶束吸附	293
20.5.3 双电层内层吸附和双电层外层吸附	294
21 浮选药剂	295
21.1 浮选药剂的分类与作用	295
21.2 捕收剂	296
21.2.1 捕收剂的结构与分类	296
21.2.2 硫代化合物类捕收剂	297
21.2.3 黄药类捕收剂与硫化物矿物的作用机理	304
21.2.4 有机酸类捕收剂和胺类捕收剂	308
21.2.5 有机酸类捕收剂和胺类捕收剂的作用机理	313
21.2.6 非极性油类捕收剂	316
21.2.7 两性捕收剂	316
21.3 起泡剂	317
21.3.1 起泡剂的结构和种类	317
21.3.2 起泡过程及起泡剂的作用	318
21.4 调整剂	321
21.4.1 抑制剂及其作用机理	321
21.4.2 活化剂及其活化作用机理	324
21.4.3 pH 值调整剂及 pH 值对浮选过程的影响	325
21.4.4 絮凝剂及其他类浮选药剂	326
22 浮选设备	328
22.1 概述	328

22.1.1 对浮选机的基本要求	328
22.1.2 浮选机的分类	329
22.2 自吸气机械搅拌式浮选机	329
22.2.1 SF 型浮选机	330
22.2.2 维姆科浮选机	331
22.2.3 JJF 型浮选机	333
22.2.4 XJM-KS 型浮选机	333
22.3 充气机械搅拌式浮选机	334
22.3.1 KYF 型浮选机	334
22.3.2 XCF 型浮选机	335
22.3.3 RCS 型浮选机	337
22.4 气升式浮选机	337
22.4.1 KYZ-B 型浮选柱	338
22.4.2 旋流-静态微泡浮选柱	339
22.5 詹姆森浮选槽	340
23 浮选工艺	342
23.1 给料粒度	342
23.1.1 粒度对浮选的影响	342
23.1.2 粗粒浮选	342
23.1.3 微细颗粒浮选	342
23.2 浮选药剂制度	343
23.2.1 药剂的种类选择及用量	344
23.2.2 药剂的配制及提高药效的措施	344
23.2.3 药剂的添加	344
23.2.4 药剂最佳用量的控制与调节	345
23.3 矿浆浓度及其调整	345
23.3.1 矿浆浓度	345
23.3.2 调浆	346
23.4 浮选泡沫及其调节	346
23.4.1 浮选泡沫及对泡沫的要求	346
23.4.2 泡沫稳定性的影响因素	347
23.4.3 “二次富集作用”及调节	347
23.5 浮选流程	347
23.5.1 浮选流程的段数	348
23.5.2 选别顺序及选别循环	348
23.5.3 浮选流程的内部结构	349
23.5.4 浮选流程的表示方法	350
23.6 其他浮选工艺因素	351

23.6.1 水质及矿浆的液相组成	351
23.6.2 温度	351
23.6.3 浮选时间与浮选速度	352

第5篇 其他分选方法

24 摩擦与弹跳分选	355
24.1 概述	355
24.2 摩擦与弹跳分选机	356
24.2.1 固定式斜面分选机	356
24.2.2 带式筛	357
24.2.3 反流筛	357
25 拣选	359
25.1 概述	359
25.2 拣选分类和拣选过程	359
25.2.1 拣选分类	359
25.2.2 拣选过程	361
25.3 拣选设备	361
25.3.1 YG-40 激光光电拣选机	362
25.3.2 GXJ-II 型金刚石 X 光拣选机	362
25.3.3 GFJ-3 型高频拣选机	363
25.3.4 X 射线选矿分选机(PPC)	363
26 油膏分选	366
26.1 油膏	366
26.2 油膏分选机	367
26.2.1 振动台式油膏分选机	367
26.2.2 带式油膏分选机	368
26.2.3 振动带式油膏分选机	369

第6篇 分选工艺及辅助作业

27 黑色金属矿石的分选工艺	371
27.1 铁矿石的分选工艺	371
27.1.1 铁矿石工业类型的划分	371
27.1.2 磁铁矿石的分选	371
27.1.3 赤铁矿石的分选	371

27.1.4 复合铁矿石的分选	374
27.2 锰矿石的分选工艺	377
28 有色金属和贵金属矿石的分选工艺	379
28.1 多金属硫化物矿石的分选工艺	379
28.1.1 硫化铜与硫化铁矿物的分选工艺	379
28.1.2 矽卡岩型铜矿石的分选工艺	379
28.1.3 硫化铜矿物与辉钼矿的分选工艺	380
28.1.4 硫化铜矿物与硫化镍矿物的分选工艺	381
28.1.5 方铅矿与闪锌矿的分选工艺	381
28.1.6 硫化铜矿物与硫化锌矿物的分选工艺	381
28.1.7 黄铜矿与方铅矿的分选工艺	381
28.1.8 铜铅锌多金属硫化物矿石的分选工艺	381
28.2 有色金属氧化物矿物矿石的分选工艺	382
28.2.1 氧化铜矿石的分选	382
28.2.2 氧化铅矿石的分选工艺	382
28.2.3 氧化锌矿石的分选工艺	383
28.2.4 铅锌混合矿石的分选工艺	383
28.3 贵金属矿石的分选工艺	383
28.3.1 金矿石的分选	383
28.3.2 银矿石的分选	384
29 非金属矿石的分选工艺	385
29.1 金刚石的分选工艺	385
29.2 石墨的分选工艺	386
29.3 黏土矿物的分选工艺	387
29.3.1 高岭土的分选工艺	387
29.3.2 膨润土的分选工艺	388
29.4 萤石的分选工艺	389
29.5 蓝晶石族矿物的分选工艺	390
29.6 硅灰石的分选工艺	392
30 煤炭与固体废弃物的分选工艺	393
30.1 煤炭的分选工艺	393
30.2 选矿厂尾矿的再选工艺	394
30.2.1 铁矿石选矿厂尾矿的再选工艺	394
30.2.2 选锡尾矿的再选工艺	395
30.2.3 铅锌浮选尾矿的再选工艺	395
30.3 其他固体废弃物的分选工艺	395
30.3.1 废机动车辆和城市固体垃圾的分选工艺	395