

现代 XIANDAI

选矿 XUANKUANG

技术 JISHU

手册 SHOUCHE

张泾生 主编

第1册

破碎筛分与磨矿分级

张国旺 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

现代选矿技术手册

张泾生 主编

第 1 册

破碎筛分与磨矿分级

张国旺 主编

冶金工业出版社

2016

内 容 简 介

本书围绕选矿过程中的破碎筛分与磨矿分级进行编写,内容主要包括粉碎理论基础、破碎与筛分、磨矿与分级,重点介绍了国内外先进的破碎筛分、磨矿分级设备,破碎磨矿工艺流程,同时也介绍了近年来国内外破碎磨矿技术的发展。

本书可供从事选矿工作及相关专业的科研、管理人员以及高等院校相关专业师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代选矿技术手册. 第1册, 破碎筛分与磨矿分级/张泾生主编;
张国旺分册主编. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 3
ISBN 978-7-5024-7175-0

I. ①现… II. ①张… ②张… III. ①选矿—技术手册 ②破碎—筛分—技术手册 ③磨矿—分级—技术手册 IV. ①TD9-62
②TD921-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 044400 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmip.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 杨秋奎 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7175-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京画中画印刷有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版, 2016 年 3 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 37 印张; 892 千字; 571 页

138.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

《现代选矿技术手册》

编辑委员会

高级顾问 余永富

主任委员 张泾生

副主任委员 谢建国

委 员 (按姓氏笔画排列)

朱俊士 李明德 李茂林 肖松文

张国旺 陈 雯 周光华 周岳远

黄 丹 黄晓燕 程建国 曾子高

阙煊兰

秘 书 刘洪萍

《现代选矿技术手册》

各册主编人员

- | | | |
|-----|-----------|-----|
| 第1册 | 破碎筛分与磨矿分级 | 张国旺 |
| 第2册 | 浮选与化学选矿 | 张泾生 |
| 第3册 | 磁电选与重选 | 周岳远 |
| 第4册 | 黑色金属选矿实践 | 陈 雯 |
| 第5册 | 有色金属选矿实践 | 谢建国 |
| 第6册 | 稀贵金属选矿实践 | 肖松文 |
| 第7册 | 选矿厂设计 | 黄 丹 |
| 第8册 | 环境保护与资源循环 | 肖松文 |

《现代选矿技术手册》前言

进入新世纪以来，国民经济的快速发展，催生了对矿产资源的强劲需求，也极大地推动了选矿科学技术进步的步伐。选矿领域中新工艺、新技术、新设备、新药剂大量出现。

为了提高我国在选矿科研、设计、生产方面的水平和总结近十年选矿技术进步的经验，推动选矿事业的进一步发展，冶金工业出版社决定出版《现代选矿技术手册》，由中国金属学会选矿分会的挂靠单位——长沙矿冶研究院牵头组织专家编写。参加《现代选矿技术手册》编写工作的除长沙矿冶研究院的专业人士外，还邀请了全国知名高校、科研院所、厂矿企业的专家、教授、工程技术人员。整个编写过程，实行三级审核，严格贯彻“主编责任制”和“编辑委员会最终审核制”。

《现代选矿技术手册》全书共分8册，陆续出版。第1~8册书名分别为：《破碎筛分与磨矿分级》、《浮选与化学选矿》、《磁电选与重选》、《黑色金属选矿实践》、《有色金属选矿实践》、《稀贵金属选矿实践》、《选矿厂设计》以及《环境保护与资源循环》。《现代选矿技术手册》内容主要包括金属矿选矿，不包括非金属矿及煤的选矿技术。

《现代选矿技术手册》是一部供具有中专以上文化程度选矿工作者及有关人员使用的工具书，详细阐述和介绍了较成熟的选矿理论、方法、工艺、药剂、设备和生产实践，相关内容还充分考虑和结合了目前国家正在实施的有关环保、安全生产等法规和规章。因此，《现代选矿技术手册》不仅内容丰富先进，而且实用性强；写作上文字叙述力求简洁明了，希望做到深入浅出。



《现代选矿技术手册》的编写以1988年冶金工业出版社陆续出版的《选矿手册》为基础，参阅了自那时以来，尤其是近十年来的大量文献，收集了众多厂矿的生产实践资料。限于篇幅，本书参考文献主要列举了图书专著，未能将全部期刊文章及企业资料一一列举。在此，谨向文献作者一并致谢。由于时间和水平的关系，本书不当之处，欢迎读者批评指正。

《现代选矿技术手册》的编写出版得到了长沙矿冶研究院、冶金工业出版社及有关单位的大力支持，在此，表示衷心的感谢。

《现代选矿技术手册》编辑委员会

2009年11月

《现代选矿技术手册》各册目录

第1册 破碎筛分与磨矿分级

- 第1章 概述
- 第2章 粉碎理论基础
- 第3章 破碎与筛分
- 第4章 磨矿与分级

第2册 浮选与化学选矿

第1篇 浮选

- 第1章 浮选基本原理
- 第2章 浮选工艺
- 第3章 浮选新工艺及特种浮选技术
- 第4章 浮选药剂
- 第5章 浮选设备

第2篇 化学选矿

- 第6章 概论
- 第7章 矿物原料焙烧
- 第8章 矿物原料的浸出与分离
- 第9章 浸出净液中金属的分离回收

第3册 磁电选与重选

第1篇 磁选

- 第1章 概论
- 第2章 磁选理论基础
- 第3章 磁化焙烧
- 第4章 磁选设备
- 第5章 磁选工艺流程



第2篇 电选

- 第6章 概论
- 第7章 电选理论基础
- 第8章 电选设备
- 第9章 电选工艺流程

第3篇 重选

- 第10章 概论
- 第11章 重选理论基础
- 第12章 重选设备
- 第13章 重选工艺流程

第4册 黑色金属选矿实践

- 第1章 铁矿石选矿
- 第2章 锰矿石选矿
- 第3章 铬铁矿石选矿

第5册 有色金属选矿实践

- 第1章 铜矿选矿
- 第2章 铅锌多金属矿选矿
- 第3章 镍矿选矿
- 第4章 锡矿选矿
- 第5章 钨矿选矿
- 第6章 钼矿选矿
- 第7章 铋矿选矿
- 第8章 铝土矿选矿

第6册 稀贵金属选矿实践

- 第1章 铍矿选矿
- 第2章 钽铌矿选矿
- 第3章 钛锆石选矿
- 第4章 稀土矿选矿
- 第5章 金银矿选矿
- 第6章 铂族金属选矿

第7册 选厂设计

- 第1章 设计阶段
- 第2章 设计基础资料及选矿试验
- 第3章 工艺流程及工艺设备选择原则
- 第4章 厂房布置、设备配置及辅助设施
- 第5章 技术经济
- 第6章 节能
- 第7章 环境保护
- 第8章 劳动安全与工业卫生

第8册 环境保护与资源循环

- 第1章 矿山(区)环境保护与可持续发展总论
- 第2章 选矿产品脱水与水循环利用
- 第3章 矿山(选厂)废水处理与循环利用
- 第4章 选矿尾矿的综合回收利用
- 第5章 尾矿堆存与尾矿库管理
- 第6章 选厂清洁生产与生态矿山(区)建设
- 第7章 资源循环与二次资源分选回收

《破碎筛分与磨矿分级》编写委员会

(按姓氏笔画排列)

主 编 张国旺

编 委 丁亚卓 王化军 王玛斗 王泽红 王跃林

龙 渊 叶恒棣 印万忠 刘培坤 李茂林

杨松荣 肖庆飞 肖 骁 吴彩斌 张 仪

张光烈 陈典助 陈毅琳 欧乐明 赵礼兵

黄礼龙 曹亦俊 葛新建 童 雄 雷存友

樵永锋

《破碎筛分与磨矿分级》前言

由冶金工业出版社出版，中国金属学会选矿分会挂靠单位长沙矿冶研究院牵头组织编写的《现代选矿技术手册》（共8册）陆续出版，本书为该手册的第1册《破碎筛分与磨矿分级》。

本书分为4章，包括概述、粉碎理论基础、破碎与筛分和磨矿与分级等内容。尽量完整阐述破碎筛分和磨矿分级的历史发展、最新的技术进步以及在选矿厂的工业应用实践。

作为工具书，本书在编写时，力求内容的系统全面和数据的准确可靠，特别注意反映自第一部《选矿手册》出版发行20多年来破碎筛分与磨矿分级技术所取得的巨大进步。在编写上注意文字表述尽量简洁明了，尽力做到深入浅出。本书可供具有中专以上文化程度的选矿工作者及有关专业技术人员参考使用。

本书除主编外，参加编写的还有长沙矿冶研究院有限责任公司李茂林教授、王跃林教授、肖骁博士、黄礼龙博士和龙渊硕士，北京科技大学王化军教授，中国矿业大学曹亦俊教授，江西理工大学吴彩斌教授，昆明理工大学童雄教授，山东科技大学刘培坤教授，华北理工大学赵礼兵博士，中国黄金集团建设有限公司杨松荣教授级高工，中冶北方工程技术有限公司张光烈教授级高工，中冶长天国际工程有限责任公司叶恒棣教授级高工，中国瑞林工程技术有限公司雷存友教授级高工，长沙有色冶金设计研究院有限公司陈典助教授级高工，马钢集团设计研究院有限责任公司葛新建教授级高工，成都利君实业股份有限公司丁亚卓博士，甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司选烧厂陈毅琳教授级高工，金川集团股份有限公司选矿厂王玛斗高工，云南迪庆矿业开发有限责任公司张仪教授级高工，丹东东方测控技术股份有限公司樵永锋高工等。中南大学欧乐明教授，东北大学印万忠教授、王泽红博士，昆明理工大学肖庆飞博士仔细审阅了全部书稿。

由于时间和编写人员水平所限，书中存在的不当之处，敬请读者批评指正。

《破碎筛分与磨矿分级》目录

1 概述	1
1.1 破碎筛分与磨矿分级的定义	1
1.2 破碎筛分与磨矿分级的目的和任务	2
1.3 破碎筛分与磨矿分级的研究内容	2
1.4 破碎筛分与磨矿分级的工业应用	3
1.4.1 分选前共生矿物中 useful 矿物的解离	3
1.4.2 原料制备	3
1.4.3 增加物料比表面积	3
1.4.4 粉体材料	3
1.4.5 环境保护	4
1.5 破碎筛分与磨矿分级的发展历史	4
1.6 破碎筛分与磨矿分级的发展趋势	6
1.6.1 多碎少磨技术	6
1.6.2 选择性矿物解离技术	7
1.6.3 设备大型化、智能化和绿色化	7
1.6.4 节能降耗新技术和装备	8
1.6.5 耐磨材料、橡胶衬板和磁性衬板	9
1.6.6 料层粉磨技术及高压辊磨机	9
1.6.7 细磨和超细磨技术与装备	9
2 粉碎理论基础	10
2.1 粒度与粒度分布	10
2.1.1 单个颗粒的粒度	10
2.1.2 粒度分布	12
2.1.3 粒度分布函数表达公式	15
2.1.4 颗粒的形状	17
2.2 粒度分析方法	18
2.2.1 筛析法	19
2.2.2 显微镜法	19
2.2.3 电阻法(库尔特法)	20
2.2.4 激光法	20
2.2.5 沉降法	21
2.2.6 颗粒形状测量	22

2.2.7	在线粒度分析	22
2.3	矿物的力学性质	27
2.3.1	矿物的强度	27
2.3.2	矿物的硬度	28
2.3.3	矿物的脆性和延展性	29
2.3.4	矿物的弹性和挠性	30
2.4	矿物的解离	30
2.4.1	矿物的嵌布粒度	30
2.4.2	矿物的嵌布均匀性	32
2.4.3	矿物的连生体类型	32
2.4.4	矿物的解离方式	34
2.4.5	矿物解离数学模型	35
2.4.6	矿物单体解离度的测定	42
2.5	颗粒断裂力学	43
2.5.1	晶体破碎理论	43
2.5.2	裂纹扩展理论	44
2.5.3	比表面及晶格键能	46
2.5.4	格里弗斯强度理论	48
2.5.5	单颗粒粉碎	49
2.5.6	料床粉碎	49
2.5.7	施力方式与能量利用率	49
2.6	粉碎-能量关系	50
2.6.1	能耗学说	50
2.6.2	矿物易碎/易磨性及其测定	52
3	破碎与筛分	63
3.1	破碎	63
3.1.1	破碎的概述	63
3.1.2	破碎的基本方式	63
3.2	破碎机的分类和用途	65
3.3	破碎设备	69
3.3.1	颚式破碎机	69
3.3.2	旋回破碎机	97
3.3.3	圆锥破碎机	114
3.3.4	锤式破碎机	139
3.3.5	反击式破碎机	151
3.3.6	辊式破碎机	169
3.3.7	高压辊磨机	178
3.3.8	柱磨机	186

3.4 筛分	187
3.4.1 影响物料筛分的因素	188
3.4.2 筛分动力学	189
3.4.3 筛面	192
3.5 筛分设备的分类、工作原理及用途	196
3.5.1 筛分设备分类	197
3.5.2 筛分设备的工作原理	198
3.5.3 筛分设备的用途	199
3.6 筛分设备	200
3.6.1 固定筛	200
3.6.2 振动筛	200
3.6.3 高频振动细筛	207
3.6.4 其他筛分设备	211
3.7 破碎筛分工艺流程和设备选型计算	215
3.7.1 破碎筛分工艺流程	216
3.7.2 破碎筛分设备选型计算	224
3.7.3 典型金属矿山选厂的破碎筛分流程应用	239
4 磨矿与分级	252
4.1 概述	252
4.1.1 磨矿的重要性	252
4.1.2 磨矿过程的影响因素	252
4.1.3 磨矿分级流程	253
4.1.4 磨矿分级设备的发展	254
4.2 磨矿理论	254
4.2.1 球磨机中研磨介质的运动规律	254
4.2.2 球磨机的临界转速和工作转速	259
4.2.3 研磨介质的填充量	262
4.2.4 球磨机的功率	265
4.2.5 球磨机生产能力的计算	273
4.2.6 磨矿动力学	275
4.2.7 磨矿数值模拟	277
4.2.8 磨矿矿浆流变性和助磨剂	297
4.3 磨矿设备	304
4.3.1 概述	304
4.3.2 磨矿设备分类和用途	304
4.3.3 球磨机	306
4.3.4 棒磨机	324
4.3.5 管磨机	328



4.3.6	自磨机和半自磨机	334
4.3.7	砾磨机	347
4.3.8	辊式磨机	348
4.3.9	搅拌磨机	357
4.3.10	离心磨机	382
4.3.11	行星磨机	385
4.3.12	振动磨机	386
4.3.13	胶体磨机	393
4.3.14	气流磨机	396
4.4	分级设备	403
4.4.1	概述	403
4.4.2	螺旋分级机	404
4.4.3	水力旋流器	410
4.4.4	圆锥水力分级机	419
4.4.5	螺旋式离心分级机	425
4.4.6	干式分级设备	426
4.5	磨矿介质及衬板	432
4.5.1	磨矿介质	432
4.5.2	磨机衬板	447
4.6	磨矿设备选型计算和操作维护	464
4.6.1	磨矿设备的选择	464
4.6.2	磨机的操作	500
4.6.3	磨机的维护	502
4.6.4	磨机的安装	505
4.7	磨矿分级工艺流程	506
4.7.1	磨矿分级工艺流程的类型及应用	506
4.7.2	磨矿分级工艺流程选择	515
4.7.3	磨矿分级工艺流程计算	522
4.7.4	典型金属矿山选厂的磨矿分级流程应用	529
4.8	磨矿分级的自动控制	541
4.8.1	磨矿分级自动控制的意義和方向	541
4.8.2	磨矿分级控制系统组成	542
4.8.3	磨矿分级过程检测仪表	545
4.8.4	磨矿分级控制策略	551
4.8.5	典型矿山的磨矿分级自动控制	554
	参考文献	566

1 概 述

1.1 破碎筛分与磨矿分级的定义

粉碎 (commiuntion, size reduction) 是依靠外力 (人力、机械力、电力等) 将大块物料粒度变小的过程。大块物料破成小块, 称为破碎; 将小块物料磨成细粉, 称为磨矿。根据物料粉碎过程中形成的产品粒度特征和在此过程中粉碎设备施力方式的差别, 可将物料粉碎分为四个阶段: 破碎 (crushing)、磨矿 (grinding)、细磨矿 (fine grinding)、超细磨矿 (superfine grinding)。在破碎或磨矿后的粒度集合混合物料分成若干不同粒度级别的过程, 称为筛分 (screening) 和分级 (classification)。

粉碎各个阶段的产品粒度特征见表 1-1。

表 1-1 粉碎各个阶段的产品粒度特征

阶 段		给料最大粒度/mm	产品最大粒度/mm
破 碎	粗 碎	1500 ~ 300	350 ~ 100
	中 碎	350 ~ 100	100 ~ 40
	细 碎	100 ~ 40	30 ~ 5
磨 矿	第一段磨矿	30 ~ 10	1 ~ 0.3
	第二段磨矿	1 ~ 0.3	0.1 ~ 0.075
	细磨矿	0.1	0.045 ~ 0.010
	超细磨矿	0.075	0.010 ~ 0.005 或更细

由于细磨和超细磨应用于不同领域, 产品粒度特征至今还没有统一的划分。目前较认同和较合理的划分是: (1) 细粉碎: 粒径为 $10 \sim 45 \mu\text{m}$; (2) 微米粉碎: 粒径为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$; (3) 亚微米粉碎: 粒径为 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$; (4) 纳米粉碎: 粒径为 $0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$ (即 $1 \sim 100 \text{nm}$)。亚微米粉碎和纳米粉碎主要用于新材料领域, 本书不作详细介绍。

不同的粉碎阶段要使用不同的粉碎设备, 例如粗碎段用颚式破碎机或旋回破碎机, 中细碎段则分别用标准型圆锥破碎机和短头型圆锥破碎机, 或液压圆锥破碎机; 粗磨段用格子型球磨机, 细磨段用溢流型球磨机或塔磨机, 超细磨段用立式搅拌磨机或艾萨磨机等。因为一定的设备只有在适宜的粒度范围内才能高效率地工作, 实际生产所需要的破碎和磨矿段数, 要根据矿石性质和所要求的最终产物粒度来确定。

为了控制破碎和磨矿产物的粒度, 并将那些已符合粒度要求的物料及早分出, 以减少不必要的粉碎, 使破碎磨矿设备能更有效地工作, 破碎机常与筛分机械配合使用, 磨矿机常与分级机配合使用。它们之间不同形式的配合组成了各种各样的破碎磨矿工艺流程。