

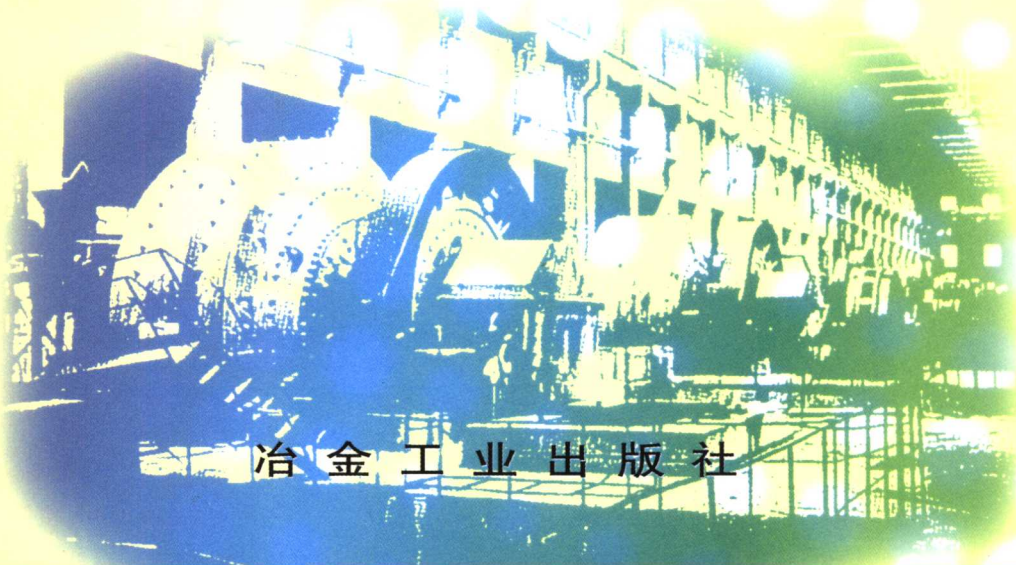


劳动和社会保障部培训就业司推荐  
冶金行业职业教育培训规划教材

# 碎矿与磨矿技术

SUIKUANG YU MOKUANG JISHU

杨家文 主编



冶金工业出版社

劳动和社会保障部培训就业司推荐  
冶金行业职业教育培训规划教材

# 碎矿与磨矿技术

杨家文 主编

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2006

## 内 容 提 要

本书为冶金行业职业技能培训教材,是参照冶金行业职业技能标准和职业技能鉴定规范,根据冶金企业的生产实际和岗位群的技能要求编写的,并经劳动保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过。

书中在系统阐明碎矿与磨矿技术的基本理论和基本知识的同时,注重理论知识的应用、实践技术的训练以及分析解决问题和创新创业能力的提高,分别介绍了碎矿与磨矿的基本概念,碎矿筛分和磨矿分级的基本原理,典型碎矿、筛分、磨矿、分级设备的性能及其操作维护,常用的碎矿与磨矿流程及实践,常用碎矿与磨矿试验技术操作等。

本书也可作为职业技术院校相关专业的教材或工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

碎矿与磨矿技术/杨家文主编. —北京:冶金工业出版社,  
2006.10

冶金行业职业教育培训规划教材

ISBN 7-5024-3995-1

I. 碎… II. 杨… III. ①原矿—破碎—技术培训—教材  
②磨矿—技术培训—教材 IV. TD921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 072591 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 宋 良 美术编辑 王耀忠

责任校对 侯 珏 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴顺印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006 年 10 月第 1 版,2006 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;13.5 印张;353 千字;201 页;1—3000 册

35.00 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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 冶金行业职业教育培训规划教材

## 编辑委员会

主任 王子林 中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会  
主任委员;唐山钢铁公司 副总经理

曹胜利 冶金工业出版社 社长

副主任 董兆伟 河北工业职业技术学院 院长

鲁启峰 中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会  
副主任委员;中国钢协职业培训中心 副主任

顾问 北京科技大学 曲 英 王筱留 袁 康 施东成  
委 员

|            |     |     |         |     |
|------------|-----|-----|---------|-----|
| 首钢总公司      | 舒友珍 | 何智广 | 宝山钢铁公司  | 杨敏宏 |
| 太原钢铁公司     | 贾宝林 | 孟永钢 | 武汉钢铁公司  | 孙志桥 |
| 马鞍山钢铁公司    | 王茂龙 | 陈 宣 | 本溪钢铁公司  | 张春雨 |
| 唐山钢铁公司     | 宋润平 | 冯柄晓 | 江苏沙钢公司  | 黄国刚 |
| 济南钢铁公司     | 陈启祥 | 赵树俭 | 天津天铁公司  | 王金铭 |
| 南京钢铁联合公司   | 陈龙宝 | 朱朝全 | 钢协培训中心  | 宋 凯 |
| 承德钢铁公司     | 魏洪如 | 高 影 | 济源钢铁公司  | 靳沁萍 |
| 石家庄钢铁公司    | 侯 敏 | 冷学中 | 滦河集团公司  | 王爱民 |
| 首钢迁安钢铁公司   | 王宝军 | 王 蕾 | 河北冶金研究院 | 彭万树 |
| 邯郸钢铁公司     | 张晓力 | 李 阳 | 河北冶金设计院 | 周建宏 |
| 宣化钢铁公司     | 张聪山 | 李豪杰 | 港陆钢铁公司  | 赵福桐 |
| 淮阴钢铁公司     | 刘 瑾 | 王灿秀 | 邯钢衡水薄板厂 | 魏虎平 |
| 邢台钢铁公司     | 张力达 | 孙汉勇 | 半壁店钢铁公司 | 刘春梅 |
| 纵横钢铁公司     | 王建民 | 阚永梅 | 鹿泉钢铁公司  | 杜会武 |
| 河北工业职业技术学院 | 袁建路 | 李文兴 | 河北立国集团  | 郭志敏 |
| 山西工程职业技术学院 | 王明海 | 史学红 |         |     |

冶金工业出版社 宋 良(010-64027900,3ba@cnmip.com.cn)

# 序

吴溪淳

改革开放以来,我国经济和社会发展取得了辉煌成就,冶金工业实现了持续、快速、健康发展,钢产量已连续数年位居世界首位。这期间凝结着冶金行业广大职工的智慧 and 心血,包含着千千万万产业工人的汗水和辛劳。实践证明,人才是兴国之本、富民之基和发展之源,是科技创新、经济发展和社会进步的探索者、实践者和推动者。冶金行业中的高技能人才是推动技术创新、实现科技成果转化不可缺少的重要力量,其数量能否迅速增长、素质能否不断提高,关系到冶金行业核心竞争力的强弱。同时,冶金行业作为国家基础产业,拥有数百万从业人员,其综合素质关系到我国产业工人队伍整体素质,关系到工人阶级自身先进性在新的历史条件下的巩固和发展,直接关系到我国综合国力能否不断增强。

强化职业技能培训工作,提高企业核心竞争力,是国民经济可持续发展的重要保障,党中央和国务院给予了高度重视。在2003年的全国人事工作会议上,中央再一次明确了人才立国的发展战略,同时国家已开始着手进行终身学习法的制定调研工作。结合《职业教育法》的颁布实施,职业教育工作将出现长期稳定发展的新局面。

为了搞好冶金行业职工的技能培训工作,河北工业职业技术学院同冶金工业出版社和中国钢协职业培训中心密切协作,联合有关的冶金企业和职业技术学院,编写了这套冶金行业职业教育培训规划教材,并经劳动和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过,给予推荐。河北工业职业技术学院的各级领导和教师在时间紧、任务重的情况下,克服困难,辛勤工作,在有关单位的工程技术人员和教师的积极参与和大力支持下,出色地完成了前期工作,为冶金行业的职业技能培训工作的顺利进行,打下了坚实的基础。相信本套教材的出版,将为企业生产一线人员的理论水平、操作水平和管理水平的进一步提高,企业核心竞争力的不断增强,起到积极的推进作用。

随着近年来冶金行业的高速发展,职业技能培训也取得了巨大的成绩,

大多数企业建立了完善的职工教育培训体系,职工素质不断提高,为我国冶金行业的发展提供了强大的人力资源支持。我个人认为,今后的培训工作重点,应注意继续加强职业技能培训工作者的队伍建设,继续丰富教材品种,加强对高技能人才的培养,进一步加强岗前培训,加强企业间、国际间的合作,开辟新的局面。

展望未来,任重而道远。希望各冶金企业与相关院校、出版部门进一步开拓思路,加强合作,全面提升从业人员的素质,要在冶金企业的职工队伍中培养一批刻苦学习、岗位成才的带头人,培养一批推动技术创新、实现科技成果转化的带头人,培养一批提高生产效率、提升产品质量的带头人;不断创新,不断发展,力争使我国冶金行业职业技能培训工作跨上一个新台阶,为冶金行业持续、稳定、健康发展,做出新的贡献!

# 前 言

---

本书是按照劳动和社会保障部的规划,受中国钢铁工业协会和冶金工业出版社的委托,在编委会的组织安排下,参照冶金行业职业技能标准和职业技能鉴定规范,根据冶金企业的生产实际和岗位群的技能要求编写的。书稿经劳动和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过,由劳动和社会保障部培训就业司推荐作为冶金行业职业技能培训教材。

本书以培养具有较高选矿职业素质和较强职业技能、适应选矿厂生产及管理需要的高级技术应用型人才为目标,贯彻理论与实际相结合的原则,力求体现职业教育的针对性强、理论知识的实践性强、培养应用型人才的特点。

全书共分9章。第1、5、6、7、8章由昆明冶金高等专科学校杨家文编写;第2、9章由昆明冶金研究设计院张曙光编写;第3、4章由昆明冶金高等专科学校陈斌编写。全书由杨家文任主编,张曙光任副主编。昆明理工大学戈保桢和昆明冶金设计研究院王少东对全稿作了审订。

在编写的过程中,参考了大量的文献,谨向各位作者、出版社致以诚挚的谢意!

由于编者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
2006年3月

## 冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名              | 作 者          | 定 价      |
|------------------|--------------|----------|
| 中国冶金百科全书·选矿卷     | 编委会 编        | 140.00 元 |
| 中国冶金百科全书·采矿卷     | 编委会 编        | 180.00 元 |
| 矿产资源开发与可持续发展     | 科技部农社司 编     | 50.00 元  |
| 选矿厂设计            | 冯守本 主编       | 36.00 元  |
| 选矿概论             | 张 强 主编       | 12.00 元  |
| 碎矿与磨矿(第2版)       | 段希祥 主编       | 30.00 元  |
| 工艺矿物学(第2版)       | 周乐光 主编       | 36.00 元  |
| 矿石学基础(第2版)       | 周乐光 主编       | 32.00 元  |
| 可持续发展的环境压力指标及其应用 | 顾晓薇 等著       | 18.00 元  |
| 安全原理(第2版)        | 陈宝智 编著       | 20.00 元  |
| 系统安全评价与预测        | 陈宝智 编著       | 20.00 元  |
| 固体矿产资源技术政策研究     | 陈晓红 等编       | 40.00 元  |
| 矿床无废开采的规划与评价     | 彭怀生 等著       | 14.50 元  |
| 矿物资源与西部大开发       | 朱旺喜 主编       | 38.00 元  |
| 冶金矿山地质技术管理手册     | 中国冶金矿山企业协会 编 | 58.00 元  |
| 金属矿山尾矿综合利用与资源化   | 张锦瑞 等编       | 16.00 元  |
| 矿业权估价理论与方法       | 刘朝马 著        | 19.00 元  |
| 矿山事故分析及系统安全管理    | 山东招金集团有限公司 编 | 28.00 元  |
| 矿山环境工程           | 韦冠俊 主编       | 22.00 元  |
| 矿业经济学            | 李祥仪 等编       | 15.00 元  |
| 矿浆电解原理           | 杨显万 等著       | 22.00 元  |
| 常用有色金属资源开发与加工    | 董 英 等编著      | 88.00 元  |
| 矿山工程设备技术         | 王荣祥 等编       | 79.00 元  |



# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>1 绪论</b>           | 1  |
| 1.1 碎矿与磨碎作业在选矿中的重要性   | 1  |
| 1.2 碎矿与磨矿工艺的一般特点      | 1  |
| 1.3 碎矿与磨矿技术的发展        | 2  |
| <b>2 粒度特性与筛分理论</b>    | 3  |
| 2.1 粒度组成及粒度分析         | 3  |
| 2.1.1 粒度分析方法          | 3  |
| 2.1.2 粒度的表示方法         | 3  |
| 2.1.3 平均粒度与物料的均匀度     | 4  |
| 2.2 筛分分析              | 5  |
| 2.2.1 筛分分析所使用的筛子      | 5  |
| 2.2.2 筛分分析的方法         | 7  |
| 2.3 粒度特性曲线            | 8  |
| 2.3.1 筛析结果的计算         | 8  |
| 2.3.2 粒度特性曲线的绘制和应用    | 9  |
| 2.4 筛分原理              | 12 |
| 2.4.1 筛分作业与筛分过程       | 12 |
| 2.4.2 筛分概率            | 13 |
| 2.5 筛分效率及筛分动力学        | 14 |
| 2.5.1 筛分效率            | 14 |
| 2.5.2 筛分动力学及其应用       | 16 |
| 本章小结                  | 19 |
| 复习思考题                 | 20 |
| <b>3 筛分设备</b>         | 21 |
| 3.1 概述                | 21 |
| 3.2 固定筛               | 21 |
| 3.3 振动筛               | 23 |
| 3.3.1 惯性振动筛           | 23 |
| 3.3.2 自定中心振动筛         | 28 |
| 3.3.3 直线振动筛           | 30 |
| 3.3.4 共振筛             | 31 |
| 3.3.5 振动筛的安装、操作、维护与检修 | 32 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 3.3.6 振动筛生产能力的计算 .....       | 33        |
| 3.4 其他筛分机械 .....             | 34        |
| 3.4.1 弧形筛 .....              | 34        |
| 3.4.2 细筛 .....               | 35        |
| 3.4.3 概率筛 .....              | 38        |
| 3.5 影响筛分作业的因素 .....          | 39        |
| 3.5.1 物料的性质 .....            | 39        |
| 3.5.2 筛面种类及工作参数 .....        | 41        |
| 3.5.3 操作条件 .....             | 43        |
| 3.6 提高筛分工艺指标的措施 .....        | 44        |
| 3.6.1 湿法筛分 .....             | 44        |
| 3.6.2 电热筛网 .....             | 44        |
| 3.6.3 等值筛分 .....             | 44        |
| 3.6.4 采用辅助筛网 .....           | 45        |
| 3.6.5 等厚筛分法 .....            | 45        |
| 3.6.6 用橡胶筛面 .....            | 46        |
| 本章小结 .....                   | 46        |
| 复习思考题 .....                  | 47        |
| <b>4 粉碎矿石的理论基础</b> .....     | <b>48</b> |
| 4.1 粉碎过程的基本概念 .....          | 48        |
| 4.1.1 解离度和过粉碎 .....          | 48        |
| 4.1.2 阶段破碎和破碎比 .....         | 48        |
| 4.2 岩矿的机械强度、可碎性与可磨性 .....    | 50        |
| 4.2.1 岩矿的机械强度 .....          | 50        |
| 4.2.2 矿石的可碎性系数和可磨性系数 .....   | 50        |
| 4.3 粉碎设备的施力情况 .....          | 51        |
| 4.4 粉碎功耗学说 .....             | 52        |
| 4.4.1 三个主要的粉碎功耗学说 .....      | 52        |
| 4.4.2 三个学说的应用和比较 .....       | 53        |
| 4.4.3 功耗指标(功指数)的测定 .....     | 54        |
| 4.5 粉碎矿石新方法简介 .....          | 55        |
| 本章小结 .....                   | 56        |
| 复习思考题 .....                  | 56        |
| <b>5 碎矿设备</b> .....          | <b>58</b> |
| 5.1 碎矿设备的分类 .....            | 58        |
| 5.2 颞式碎矿机 .....              | 58        |
| 5.2.1 颞式碎矿机的类型及破碎矿石的过程 ..... | 58        |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 5.2.2 简单摆动颚式碎矿机 .....             | 59        |
| 5.2.3 复杂摆动颚式碎矿机 .....             | 62        |
| 5.2.4 液压颚式碎矿机 .....               | 63        |
| 5.2.5 颚式碎矿机的工作原理和性能 .....         | 65        |
| 5.2.6 颚式碎矿机的安装操作与维护检修 .....       | 66        |
| 5.2.7 颚式碎矿机的发展方向与概况 .....         | 68        |
| 5.3 圆锥碎矿机 .....                   | 69        |
| 5.3.1 圆锥碎矿机的分类及工作原理 .....         | 69        |
| 5.3.2 粗碎圆锥碎矿机 .....               | 69        |
| 5.3.3 中、细碎圆锥碎矿机 .....             | 73        |
| 5.3.4 圆锥碎矿机的性能和用途 .....           | 80        |
| 5.3.5 圆锥碎矿机的安装操作与维护检修 .....       | 82        |
| 5.3.6 圆锥碎矿机的发展概况 .....            | 86        |
| 5.4 辊式碎矿机 .....                   | 87        |
| 5.4.1 辊式碎矿机分类及工作原理 .....          | 87        |
| 5.4.2 辊式碎矿机构造 .....               | 87        |
| 5.5 反击式碎矿机 .....                  | 89        |
| 5.6 碎矿机生产能力的计算 .....              | 91        |
| 5.7 影响碎矿机工作指标的因素 .....            | 93        |
| 5.7.1 矿石的物理机械性质 .....             | 93        |
| 5.7.2 碎矿机的工作参数 .....              | 93        |
| 5.7.3 操作条件 .....                  | 96        |
| 本章小结 .....                        | 96        |
| 复习思考题 .....                       | 97        |
| <b>6 磨矿设备与磨矿理论 .....</b>          | <b>98</b> |
| 6.1 概述 .....                      | 98        |
| 6.2 球磨机 .....                     | 99        |
| 6.2.1 溢流型球磨机 .....                | 99        |
| 6.2.2 格子型球磨机 .....                | 102       |
| 6.2.3 格子型球磨机与溢流型球磨机的性能和用途比较 ..... | 103       |
| 6.3 棒磨机 .....                     | 105       |
| 6.4 自磨机和砾磨机 .....                 | 106       |
| 6.4.1 干式自磨机 .....                 | 106       |
| 6.4.2 湿式自磨机 .....                 | 107       |
| 6.4.3 自磨机的工作原理 .....              | 108       |
| 6.4.4 自磨工艺参数 .....                | 109       |
| 6.4.5 砾磨机 .....                   | 111       |
| 6.5 其他类型磨矿机 .....                 | 112       |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 6.5.1 离心磨矿机              | 112        |
| 6.5.2 塔式磨矿机              | 113        |
| 6.5.3 振动磨矿机              | 114        |
| 6.5.4 辊式磨矿机(盘磨机)         | 116        |
| 6.5.5 喷射磨矿机              | 117        |
| 6.6 磨矿基本理论               | 118        |
| 6.6.1 钢球运动状态和受力分析        | 118        |
| 6.6.2 球磨机的临界转速           | 119        |
| 6.6.3 磨矿机的工作转速           | 120        |
| 6.6.4 磨矿机的有用功率           | 122        |
| 6.7 磨矿机的安装、操作及维修         | 124        |
| 6.7.1 磨矿机的安装             | 125        |
| 6.7.2 磨矿机的操作             | 125        |
| 6.7.3 磨矿机的维修             | 126        |
| 6.8 磨矿设备的发展概况            | 127        |
| 6.8.1 磨矿机规格大型化           | 127        |
| 6.8.2 衬板的改进              | 128        |
| 6.8.3 磨矿介质形状和材质          | 129        |
| 6.8.4 磨矿设备新的结构           | 130        |
| 6.8.5 磨矿机组的自动控制          | 130        |
| 本章小结                     | 130        |
| 复习思考题                    | 131        |
| <b>7 磨矿循环与影响磨矿效果的因素</b>  | <b>133</b> |
| 7.1 概述                   | 133        |
| 7.2 磨矿循环中常用的分级设备         | 133        |
| 7.2.1 分级的基本概念和分级效果的评定    | 133        |
| 7.2.2 螺旋分级机              | 135        |
| 7.2.3 水力旋流器              | 138        |
| 7.2.4 细筛                 | 140        |
| 7.3 磨矿循环的返砂和返砂比          | 140        |
| 7.3.1 只带检查分级作业的一段闭路磨矿循环  | 141        |
| 7.3.2 预先分级与检查分级合一的闭路磨矿循环 | 141        |
| 7.4 磨矿动力学基本方程式及其应用       | 142        |
| 7.4.1 磨矿动力学基本方程式         | 143        |
| 7.4.2 磨矿动力学的应用           | 144        |
| 7.5 磨矿机的主要工作指标           | 149        |
| 7.5.1 磨矿机的生产率            | 149        |
| 7.5.2 磨矿效率               | 150        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.5.3 磨矿机作业率 .....            | 151        |
| 7.5.4 粒度合格率 .....             | 151        |
| 7.6 影响磨矿效果的因素 .....           | 151        |
| 7.6.1 矿石性质、给料粒度和产品粒度的影响 ..... | 151        |
| 7.6.2 磨矿机结构的影响 .....          | 153        |
| 7.6.3 磨矿操作条件的影响 .....         | 154        |
| 7.7 磨矿机计算 .....               | 160        |
| 7.7.1 磨矿机常用的计算方法 .....        | 160        |
| 7.7.2 磨矿机两种计算方法的比较 .....      | 168        |
| 本章小结 .....                    | 170        |
| 复习思考题 .....                   | 171        |
| <b>8 碎矿与磨矿流程 .....</b>        | <b>173</b> |
| 8.1 碎矿流程的结构 .....             | 173        |
| 8.1.1 碎矿段及碎矿段数的确定 .....       | 173        |
| 8.1.2 筛分作业的设置 .....           | 174        |
| 8.1.3 开路碎矿和闭路碎矿 .....         | 175        |
| 8.1.4 循环负荷 .....              | 175        |
| 8.2 常见的碎矿流程 .....             | 175        |
| 8.2.1 两段碎矿流程 .....            | 175        |
| 8.2.2 三段碎矿流程 .....            | 175        |
| 8.2.3 带洗矿作业的碎矿流程 .....        | 176        |
| 8.3 碎矿流程的考查与分析 .....          | 176        |
| 8.3.1 碎矿流程考查的内容 .....         | 176        |
| 8.3.2 破碎流程考查的方法和步骤 .....      | 176        |
| 8.3.3 碎矿流程考查的计算 .....         | 178        |
| 8.3.4 碎矿流程考查结果的分析 .....       | 180        |
| 8.4 常用的磨矿流程 .....             | 180        |
| 8.4.1 磨矿段数的确定 .....           | 180        |
| 8.4.2 一段磨矿流程 .....            | 181        |
| 8.4.3 两段磨矿流程 .....            | 182        |
| 8.5 矿石自磨流程 .....              | 183        |
| 8.5.1 一段自磨流程 .....            | 183        |
| 8.5.2 两段自磨流程 .....            | 183        |
| 8.6 磨矿流程的考查与分析 .....          | 185        |
| 8.6.1 磨矿流程考查的内容 .....         | 185        |
| 8.6.2 磨矿流程考查的方法和步骤 .....      | 186        |
| 8.6.3 磨矿流程考查的计算 .....         | 187        |
| 8.6.4 磨矿流程考查结果的分析 .....       | 188        |

---

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 本章小结 .....                 | 189        |
| 复习思考题 .....                | 189        |
| <b>9 碎矿与磨矿试验操作技术 .....</b> | <b>191</b> |
| 9.1 矿样的采取和制备 .....         | 191        |
| 9.1.1 矿床试样的采取 .....        | 191        |
| 9.1.2 选矿厂取样 .....          | 192        |
| 9.1.3 试样的制备 .....          | 193        |
| 9.2 筛分分析和绘制筛分分析曲线 .....    | 196        |
| 9.2.1 试验的目的和要求 .....       | 196        |
| 9.2.3 试验操作顺序与方法 .....      | 196        |
| 9.2.3 试验记录与结果分析 .....      | 196        |
| 9.3 测定振动筛的筛分效率 .....       | 197        |
| 9.3.1 试验的目的和要求 .....       | 197        |
| 9.3.2 试验操作顺序与方法 .....      | 197        |
| 9.3.3 试验记录及结果分析 .....      | 198        |
| 9.4 测定碎矿机的产品粒度组成 .....     | 198        |
| 9.4.1 试验的目的和要求 .....       | 198        |
| 9.4.2 试验操作 .....           | 198        |
| 9.4.3 试验记录与结果分析 .....      | 199        |
| 9.5 测定矿石的可磨性并验证磨矿动力学 ..... | 199        |
| 9.5.1 试验的目的和要求 .....       | 199        |
| 9.5.2 快速筛析法 .....          | 199        |
| 9.2.3 试验操作顺序与方法 .....      | 199        |
| 9.2.4 实验记录及结果分析 .....      | 200        |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>201</b> |

# 1 绪 论

## 1.1 碎矿与磨碎作业在选矿中的重要性

由矿山开采出来的矿石,除少数富含有用矿物的富矿外,绝大多数是含有大量脉石的贫矿。对冶金工业来说,这些贫矿由于有用成分含量低,矿物组成复杂,若直接用来冶炼提取金属,则能耗大、生产成本高。为了更经济地开发和利用低品位的贫矿石,扩大矿物原料的来源,矿石在冶炼之前必须先经过分选或富集,以抛弃绝大部分脉石,使有用矿物的含量达到冶炼的要求。

在选矿工艺过程中,有两个最基本的工序:一是解离,就是将大块矿石进行破碎和磨细,使各种有用矿物颗粒从矿石中解离出来;二是分选,就是将已解离出来的矿物颗粒按其物理化学性质差异分选为不同的产品。由于自然界中绝大多数有用矿物都是与脉石紧密共生在一起,且常呈微细粒嵌布,如果不先使各种矿物或成分彼此分离开来,即使它们的性质有再大的差别,也无法进行分选。因此,让有用矿物和脉石充分解离,是采用任何选别方法的先决条件,而碎矿与磨矿的目的就是为了使矿石中紧密连生的有用矿物和脉石充分地解离。

粉碎过程就是使矿块粒度逐渐减小的过程。各种有用矿物粒子的解离正是在粒度减小的过程中产生的。如果粉碎的产物粒度不够细,有用矿物与脉石没有充分解离,分选效果不好;而粉碎产物的粒度太细了,产生过粉碎的微粒太多,尽管各种有用矿物解离得很完全,但分选的指标也不一定很好。这是因为任何选别方法能处理的物料粒度都有一定的下限,低于该下限的颗粒(即过粉碎微粒)就难以有效分选。例如,浮选法对于  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  以下的矿粒,重选法对于  $19\ \mu\text{m}$  以下的矿粒,目前还不能很好回收。所以,选矿厂中碎矿和磨碎的基本任务就是要为选别作业制备好解离充分且过粉碎程度较轻的人选物料,而且这种物料的粒度要适合于所采用的选别方法。若粉碎作业的工艺和设备选择不当,生产操作管理不好,则粉碎的最终产物或者解离不充分,或者过粉碎严重,都将导致整个选矿厂技术经济指标的下降。

在选矿厂中,碎矿和磨碎作业的设备投资、生产费用、电能消耗和钢材消耗往往所占的比例最大:设备费用占 60% 左右,生产费用占 40%~60%;电能消耗占 50%~65%,钢材消耗约占 50% 以上。故破碎和磨碎设备的计算选择及操作管理的好坏,在很大程度上决定着选矿厂的经济效益。

综上所述,选矿厂的技术指标高低和经济指标好坏,其根源常常在于碎矿和磨矿,所以每个选矿工作者都必须认真对待碎磨工序和所用的设备,尽可能降低碎矿和磨矿的成本。

## 1.2 碎矿与磨矿工艺的一般特点

通常进入选矿厂的原矿块度都很大,有的达到 1500 mm,而入选的矿料粒度一般又比较细(譬如浮选粒度通常在 0.3 mm 以下),现有碎磨设备还不能一次就把巨大的矿块粉碎到符合要求的人选细度。因此,矿石粉碎只能分阶段逐步地进行,碎矿和磨矿就是粉碎过程中的两个大阶段。根据粉碎产物的粒度大小,碎矿阶段还分为粗碎段(碎到 350~100 mm)、中碎段(碎到 100~40 mm)和细碎段(碎到 25~6 mm),磨矿阶段也分为粗磨段(磨到 1~0.3 mm)和细磨段(磨到 0.1~0.074 mm)。这些“段”是按所处理的物料粒度或者按物料经过碎磨机械的次数来划分的。

不同的碎磨阶段要使用不同的设备,例如粗碎段用颚式碎矿机或旋回碎矿机,中细碎段则分别用标准型圆锥碎矿机和短头型圆锥碎矿机,粗磨段用格子型球磨机,细磨段用溢流型球磨机等。因为一定的设备只有在适宜的粒度范围下才能高效率地工作。实际生产所需要的碎矿和磨矿段数,要根据矿石性质和所要求的最终产物粒度来确定。

为了控制碎矿和磨矿产物的粒度,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,使碎磨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碎磨工艺流程。

### 1.3 碎矿与磨矿技术的发展

碎矿和磨矿不仅在选矿厂中是一个重要的工序,而且在建材、冶金、化工、煤炭、陶瓷和食品等许多工业部门生产中,也是一个不可缺少的重要环节。在碎矿和磨矿中电耗、钢耗及原材料的消耗极其巨大,例如,水泥厂碎磨作业费用约占生产成本的30%以上,碎磨机械的电耗量约占全厂总耗电量的70%;有色金属选矿厂碎磨每吨原矿的平均电耗约为 $16\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,占选厂总耗电量的40%左右,钢耗平均约为 $1.5\text{ kg/t}$ 。因此,寻求改善粉碎过程的方法,改进设备的工艺性能以及研制新型高效设备,降低粉碎的能耗,成为许多领域中广大研究工作者的共同目标,受到世界各国的重视。

粉碎过程中,粉碎机械必须以巨大的作用力施加在物料颗粒上,克服物料各质点间的内聚力后,才能发生碎散,这就需要输入一定的能量。为了更有效地利用输入的能量和找寻节能的途径,提高粉碎机械的工作效率,必须弄清楚物料粉碎过程中能量消耗的规律,即粉碎功耗理论。这方面的研究已有100多年历史,取得不少成果,但直到现在粉碎理论还不太完善,仍需继续探讨。

目前应用于工业生产的粉碎方法,仍以机械破碎法为主。这种方法的能量利用率很低,输入的能量大部分以热的形式散失掉。据介绍,破碎机械的电能利用率约为30%,而球磨机真正用于磨碎物料产生新生表面的表面能仅占总能耗的0.6%,被粉碎物料和气流带走的热却占了78.6%。因此,探索非机械力作用的新的粉碎方法就成了粉碎领域中一个重要的研究课题。目前人们正致力于研究的新方法有:超声破碎、热力破碎、高频电磁波破碎、水电效应破碎以及减压破碎等。

对于传统的机械粉碎方法,虽有效率不高和设备笨重等弊端,但毕竟还在广泛应用。因此,对粉碎设备的改进和创新也很受重视。近年来,新型的碎磨设备不断问世,如冲击颚式碎矿机、超细碎碎矿机、离心磨矿机、辊磨机、多筒球磨机、射流磨机等,促进了粉碎技术的发展。在创新的同时,人们也致力于采用新技术、新材料以及新制造工艺等,对传统的碎磨机械加以改进,以提高其可靠性和耐久性,改善其工艺性能和工作效率,降低其重量和金属消耗,方便操作和维修。如碎矿机采用液压技术和大型滚动轴承,球磨机采用橡胶衬板、角螺旋衬板、矿层磁性衬板以及可以调整转速的环形电动机,筛网采用尼龙材料,等等。为了提高磨矿回路中分级设备的效率,减少有用矿物的过粉碎,各种新型细筛相继出现,如高频振动筛、湿法立式圆筒筛、旋流细筛等,开始应用于工业生产以取代原有的分级机械(如螺旋分级机),效果很好。目前,碎矿与磨矿设备除了向大型化、高效化、可靠化和节能化发展外,人们还更加注意了机电一体化和电子控制技术的同步发展。

为了掌握碎矿、筛分和磨矿工艺过程的规律,提高过程效率,人们也注意了对工艺过程的研究,并建立了筛分动力学、磨矿动力学及磨矿介质运动学等有关理论。实践证明,这些理论对指导工业生产很有实际意义。

通过学习本课程,要使学生懂得碎矿和磨矿的基本理论及工艺知识,并能初步用以分析碎磨过程中的工艺问题,了解主要设备的构造、工作原理、工艺性能、使用维修和选择计算,以及粉碎领域目前存在的主要问题及发展趋势,为学好其他专业课和以后的工作提供帮助。

## 2 粒度特性与筛分理论

### 2.1 粒度组成及粒度分析

碎矿、磨矿和选别过程所处理的矿石,都是大小形状各异的各种矿粒的混合物。从外表看“杂乱无章”,但按其粒度分布情况看,都有一定的规律性。粒度就是矿块(或矿粒)大小的量度,一般以 mm(或  $\mu\text{m}$ ) 为单位。借用某种方法将矿粒混合物分成若干级别,这些级别叫做粒级。用称量法称出各级别的质量并计算出其质量百分率(或累计质量百分率),也就是求出了各粒级的相对含量,矿粒混合物中各粒级的相对含量叫做粒度组成,从粒度组成可以看出各粒级在矿粒混合物中的分布情况,这种测定粒度组成的试验叫做粒度分析。

在选矿生产过程中,物料的粒度、形状及其分布规律对各作业指标有重大影响,针对物料的不同粒度范围应采取不同的处理方法,在确定选矿工艺流程和选矿设备时,物料的粒度组成是需要考虑的一个重要因素。因此粒度分析是选矿中经常遇到的一项重要工作。

#### 2.1.1 粒度分析方法

常用的粒度分析方法,根据物料粗细不同,可以采用下列三种方法:

(1) 筛分分析(简称筛析)。它是利用筛孔大小不同的一套筛子进行粒度分析。一般用于粒度为  $100\sim0.043\text{ mm}$  的物料。

(2) 水力沉降分析(简称水析)。它是利用不同尺寸的颗粒在水中的沉降速度不同而分成若干级别的分析方法。一般用于粒度为  $0.043\sim0.005\text{ mm}$  的物料。

(3) 显微镜分析。它主要用来分析微细物料,其最佳测定粒度范围为  $0.04\sim0.001\text{ mm}$ 。一般用来校正水析。

在选矿生产和试验研究中,经常采用的粒度分析方法是筛析和水析。本课程只介绍筛析,水析将在“重力选矿技术”课程中介绍。

#### 2.1.2 粒度的表示方法

矿块(或矿粒)一般都具有不规则的形状,因此它的真实粒度是很难测定的,通常用近似的方法表示。根据研究对象和目的的不同,一般采用以下三种表示方法:

(1) 平均直径表示法。对于单个矿块,为了表示它的大小,习惯上用平均直径表示。当矿块的粒度很大时,一般是直接进行测量,测出矿块的长度和宽度,然后取二者的算术平均值,即为其平均直径。如果要求准确度较高,或矿块的形状更不规则,则可再加测矿块的厚度,取长、宽、厚三者的算术平均值为其平均直径。

设矿块的平均直径为  $d_p$ , 则

$$d_p = \frac{l+b}{2} \quad \text{或} \quad d_p = \frac{l+b+h}{3} \quad (2-1)$$

式中,  $l$  为矿块长度;  $b$  为矿块宽度;  $h$  为矿块厚度。

这种方法常用来测定大矿块,如选矿厂用来测定碎矿机的给矿和排矿中的最大块的粒度。