

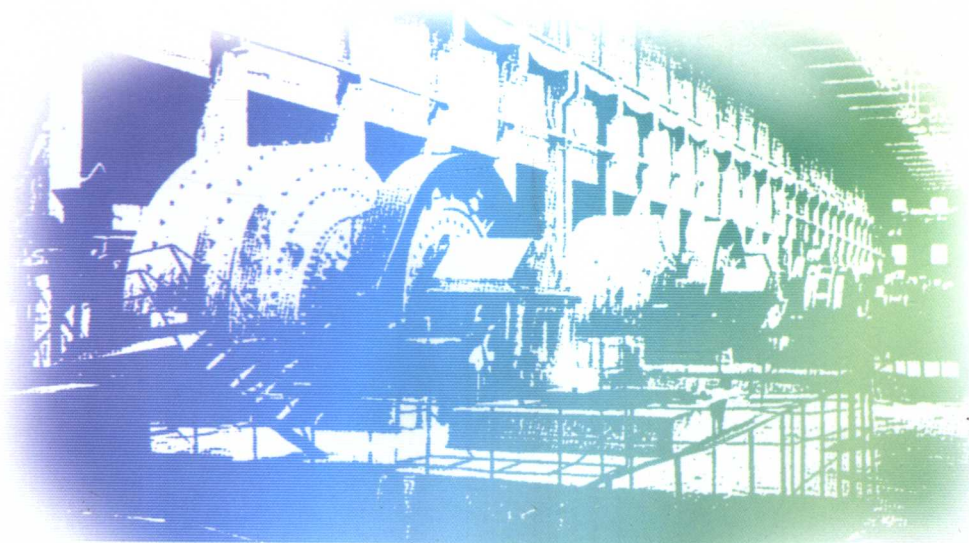
高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

# 碎矿与磨矿

(第2版)

段希祥 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

# 碎矿与磨矿

(第2版)

昆明理工大学 段希祥 主编

江苏工业学院图书馆  
藏书章

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

## 内 容 提 要

本书系统阐述了碎矿与磨矿方面的基本理论,详述了国内选矿厂采用的定型设备的构造、工作原理、性能和应用环境,同时尽可能多地介绍了国外性能优越的碎磨设备,对近年来国内外碎磨技术的发展及新成果也作了系统的总结介绍。各章都附有复习思考题,便于读者自学。

本书为高等学校教学用书,本书也可作为各级职业技术学院教材,也可供相关的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

碎矿与磨矿/段希祥主编.—2版.—北京:冶金工业出版社,2006.8

高等学校规划教材

ISBN 7-5024-4017-8

I. 碎… II. 段… III. ①原矿—破碎—高等学校—教材 ②磨矿—高等学校—教材 IV. TD921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 083312 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 杨 敏 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 白 迅 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1980 年 7 月第 1 版,2006 年 8 月第 2 版,2006 年 8 月第 9 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15 印张; 395 千字; 231 页; 24801~28300 册

30.00 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)

# 前 言

原昆明工学院李启衡教授主编的《碎矿与磨矿》出版已逾二十年，其内容远不能适应目前的需要。按照冶金院校“十一五”教材出版规划，受冶金工业出版社的委托，对第1版进行了较大的修改，我们编写了本书。鉴于客观原因及现时条件，第2版的修订工作由昆明理工大学的老师完成。

在编写工作中，我们保持了第1版的特色，系统阐述碎矿与磨矿领域的基本理论，详述国内选矿厂采用的定型设备的构造、工作原理、性能和使用。同时，尽可能多地介绍国外性能优越的碎磨设备，因为国内已相当多地引进了这些设备。另外，对20世纪80年代以来国内外碎磨技术的发展及新成果也进行了系统的总结介绍。

书中概论、3.1及3.6节、4.1~4.7节由段希祥教授编写，2.1~2.4节由戴惠新副教授编写，3.2~3.5节由周平副教授编写，3.7、4.8节及实验指导书由杨波副教授编写，全书的复习思考题由段希祥统一提出。书稿的打字及校对工作由昆明理工大学博士生罗春梅、郭永杰、石贵明和肖庆飞完成。段希祥负责全书的最后修改定稿和校订。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，衷心希望读者提出批评和修改意见。

在此向对本书的编写工作给予支持和帮助的单位及个人致以衷心的感谢！

编 者  
2006年6月

## 冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名              | 作 者          | 定价(元)  |
|------------------|--------------|--------|
| 中国冶金百科全书·选矿卷     | 本书编委会 编      | 140.00 |
| 中国冶金百科全书·采矿卷     | 本书编委会 编      | 180.00 |
| 矿产资源开发与可持续发展     | 科技部农社司 编     | 50.00  |
| 选矿厂设计            | 冯守本 主编       | 36.00  |
| 选矿概论             | 张 强 主编       | 12.00  |
| 工艺矿物学(第2版)       | 周乐光 主编       | 32.00  |
| 矿石学基础(第2版)       | 周乐光 主编       | 32.00  |
| 可持续发展的环境压力指标及其应用 | 顾晓薇 等著       | 18.00  |
| 安全原理(第2版)        | 陈宝智 编著       | 20.00  |
| 系统安全评价与预测        | 陈宝智 编著       | 20.00  |
| 固体矿产资源技术政策研究     | 陈晓红 等编       | 40.00  |
| 矿床无废开采的规划与评价     | 彭怀生 等著       | 14.50  |
| 矿物资源与西部大开发       | 朱旺喜 主编       | 38.00  |
| 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  |
| 金属矿山尾矿综合利用与资源化   | 张锦瑞 等编       | 16.00  |
| 矿业权估价理论与方法       | 刘朝马 著        | 19.00  |
| 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  |
| 矿山环境工程           | 韦冠俊 主编       | 22.00  |
| 矿业经济学            | 李祥仪 等编       | 15.00  |
| 矿浆电解原理           | 杨显万 等著       | 22.00  |
| 常用有色金属资源开发与加工    | 董 英 等编著      | 88.00  |
| 矿山工程设备技术         | 王荣祥 等编       | 79.00  |
| 重力选矿技术(技师培训教材)   | 周小四 主编       |        |
| 磁电选矿技术(技师培训教材)   | 陈 斌 主编       |        |
| 浮游选矿技术(技师培训教材)   | 王 资 主编       |        |
| 碎矿与磨矿技术(技师培训教材)  | 杨家文 主编       |        |

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1 概论 .....               | 1  |
| 1.1 碎矿和磨矿的目的及任务 .....    | 1  |
| 1.2 碎矿和磨矿的地位及重要性 .....   | 1  |
| 1.3 碎矿和磨矿的阶段及流程 .....    | 2  |
| 1.4 碎矿车间和磨矿车间的工作制度 ..... | 2  |
| 1.5 碎矿和磨矿的发展趋势 .....     | 3  |
| 复习思考题 .....              | 4  |
| 2 筛分 .....               | 5  |
| 2.1 筛分原理 .....           | 5  |
| 2.1.1 筛分的定义及原理 .....     | 5  |
| 2.1.2 筛分效率及影响因素 .....    | 7  |
| 2.1.3 级别筛分效率与总筛分效率 ..... | 12 |
| 2.2 物料的粒度组成及粒度分析 .....   | 12 |
| 2.2.1 粒度组成及粒度分析方法 .....  | 12 |
| 2.2.2 筛分分析 .....         | 15 |
| 2.2.3 粒度特性及粒度特性方程式 ..... | 17 |
| 2.3 筛分过程 .....           | 23 |
| 2.3.1 筛分动力学 .....        | 23 |
| 2.3.2 筛分动力学运用 .....      | 25 |
| 2.4 筛分机械 .....           | 27 |
| 2.4.1 筛分机械分类 .....       | 27 |
| 2.4.2 固定筛 .....          | 27 |
| 2.4.3 振动筛 .....          | 28 |
| 2.4.4 其他筛子 .....         | 35 |
| 2.4.5 筛子生产能力计算 .....     | 41 |
| 2.4.6 筛子的使用与维护 .....     | 45 |
| 复习思考题 .....              | 46 |
| 3 碎矿 .....               | 47 |
| 3.1 碎矿的理论及工艺 .....       | 47 |
| 3.1.1 碎矿的基本概念 .....      | 47 |
| 3.1.2 机械破碎法及破碎施力情况 ..... | 49 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3.1.3 岩矿的力学性质及对破碎的影响 .....    | 50  |
| 3.1.4 破碎耗功学说与应用 .....         | 51  |
| 3.1.5 破碎矿石的其他方法 .....         | 58  |
| 3.1.6 破碎机械分类 .....            | 59  |
| 3.2 颚式破碎机 .....               | 59  |
| 3.2.1 颚式破碎机的类型构造及工作原理 .....   | 59  |
| 3.2.2 颚式破碎机的性能及主要参数 .....     | 64  |
| 3.2.3 破碎机产品的典型粒度特性曲线及应用 ..... | 68  |
| 3.2.4 颚式破碎机的生产能力计算 .....      | 68  |
| 3.2.5 颚式破碎机的使用与维护 .....       | 71  |
| 3.3 圆锥破碎机 .....               | 74  |
| 3.3.1 圆锥破碎机的类型构造及工作原理 .....   | 74  |
| 3.3.2 圆锥破碎机的性能及主要参数 .....     | 82  |
| 3.3.3 圆锥破碎机的生产能力计算 .....      | 88  |
| 3.3.4 粗碎破碎机的性能比较及选择 .....     | 90  |
| 3.3.5 圆锥破碎机的使用与维护 .....       | 91  |
| 3.4 反击式破碎机 .....              | 96  |
| 3.4.1 反击式破碎机的构造及工作原理 .....    | 96  |
| 3.4.2 反击式破碎机的性能及用途 .....      | 99  |
| 3.4.3 反击式破碎机的生产能力计算 .....     | 100 |
| 3.4.4 反击式破碎机的使用与维护 .....      | 102 |
| 3.4.5 其他类型的冲击式破碎机 .....       | 103 |
| 3.5 辊式破碎机 .....               | 107 |
| 3.5.1 辊式破碎机的类型构造及工作原理 .....   | 107 |
| 3.5.2 辊式破碎机的性能及用途 .....       | 109 |
| 3.5.3 辊式破碎机的生产能力计算 .....      | 109 |
| 3.5.4 辊式破碎机的使用与维护 .....       | 111 |
| 3.5.5 其他类型的辊式破碎机 .....        | 112 |
| 3.6 破碎机械的发展与超细碎破碎机 .....      | 114 |
| 3.6.1 多碎少磨技术方案的提出及应用 .....    | 114 |
| 3.6.2 超细碎的概念 .....            | 115 |
| 3.6.3 常见的几种超细碎破碎机 .....       | 115 |
| 3.7 碎矿流程 .....                | 116 |
| 3.7.1 碎矿流程 .....              | 116 |
| 3.7.2 常用破碎流程 .....            | 120 |
| 复习思考题 .....                   | 122 |
| 4 磨矿 .....                    | 124 |
| 4.1 磨矿的理论与工艺 .....            | 124 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 4.1.1 磨矿基本概念 .....             | 124 |
| 4.1.2 磨矿作业评价的工艺指标 .....        | 124 |
| 4.1.3 磨机内钢球的运动状态与磨矿作用 .....    | 126 |
| 4.1.4 磨矿机的分类 .....             | 127 |
| 4.2 磨矿机 .....                  | 128 |
| 4.2.1 球磨机和棒磨机的构造 .....         | 128 |
| 4.2.2 球磨机和棒磨机的工作原理及应用范围 .....  | 137 |
| 4.2.3 自磨机和砾磨机的构造 .....         | 138 |
| 4.2.4 自磨机和砾磨机的工作原理及应用范围 .....  | 140 |
| 4.2.5 磨矿机的安装使用与维护 and 检修 ..... | 141 |
| 4.2.6 磨矿机的发展情况简介 .....         | 143 |
| 4.3 磨矿介质的运动理论与磨矿作用 .....       | 147 |
| 4.3.1 钢球的受力和运动状态 .....         | 147 |
| 4.3.2 球磨机的临界转速 .....           | 148 |
| 4.3.3 棒磨机中棒的运动与磨矿作用 .....      | 149 |
| 4.3.4 钢球泻落式运动与磨矿作用 .....       | 150 |
| 4.3.5 钢球做抛落式运动下的运动学 .....      | 150 |
| 4.3.6 钢球抛落运动理论的运用 .....        | 156 |
| 4.4 磨矿机的功率 .....               | 164 |
| 4.4.1 磨矿过程的力学实质 .....          | 164 |
| 4.4.2 泻落式工作的磨机有用功率 .....       | 165 |
| 4.4.3 抛落式工作状态下的有用功率 .....      | 169 |
| 4.5 磨矿分级循环 .....               | 172 |
| 4.5.1 开路磨矿与闭路磨矿 .....          | 172 |
| 4.5.2 闭路磨矿中常用的分级设备 .....       | 176 |
| 4.5.3 磨矿动力学原理 .....            | 179 |
| 4.5.4 磨矿动力学原理的应用 .....         | 181 |
| 4.6 影响磨矿过程的因素分析 .....          | 186 |
| 4.6.1 入磨原料的影响 .....            | 186 |
| 4.6.2 磨机结构及转速和装球率的影响 .....     | 188 |
| 4.6.3 操作因素的影响 .....            | 190 |
| 4.6.4 装补球方法的影响 .....           | 195 |
| 4.7 磨矿机生产率计算方法 .....           | 198 |
| 4.7.1 单位容积生产率计算法 .....         | 199 |
| 4.7.2 磨机生产率的功指数计算法 .....       | 202 |
| 4.8 磨矿流程 .....                 | 207 |
| 4.8.1 磨矿流程的选择及确定 .....         | 207 |
| 4.8.2 一段磨矿流程 .....             | 209 |
| 4.8.3 两段磨矿流程 .....             | 210 |

---

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 4.8.4 自磨流程 .....                 | 212        |
| 复习思考题 .....                      | 218        |
| <b>碎矿与磨矿实验指导书 .....</b>          | <b>221</b> |
| 实验1 筛分分析和绘制筛分分析曲线 .....          | 221        |
| 实验2 振动筛的筛分效率和生产率测定 .....         | 223        |
| 实验3 测定破碎机的产品粒度组成和找出它的粒度特性方程..... | 225        |
| 实验4 测定矿石的可磨性并验证磨矿动力学 .....       | 227        |
| <b>参考文献 .....</b>                | <b>231</b> |

# 1 概 论

## 1.1 碎矿和磨矿的目的及任务

在选矿厂的整个工艺过程中，碎矿和磨矿承担着为后续的选别作业提供入选物料的任务。从采矿送入选矿厂的原矿是上限粒度 1500 ~ 1000mm（露天采矿）至 600 ~ 400mm（井下采矿）的松散混合粒群，而选矿要求的人选粒度通常是 0.2 ~ 0.1mm 或更细，这就表明，碎矿和磨矿要将进入选矿厂的原矿在粒度上减小至原来的数千分之一甚至上万分之一，碎矿和磨矿过程就是一个减小粒度的过程。碎矿和磨矿既是为后续选别作业提供物料，就必然要按选别作业的要求来生产原料。

矿石中的有用矿物（待回收矿物）及脉石矿物（待抛弃矿物）紧密嵌生在一起，将有用矿物与脉石矿物及各种有用矿物之间相互解离开来是选别的前提条件，也是磨矿的首要任务。因此，选矿前的磨矿在性质上属解离性磨矿。没有有用矿物的充分解离就没有高的回收率及精矿品位。有用矿物与脉石矿物呈连生体状态时不容易回收，即使回收起来品位也低。因此，选矿对磨矿的首要要求就是磨矿产品有高的单体解离度，这也是判别磨矿产品质量的首要标准。

各种选矿方法均受粒度限制，均有一定的合适粒度，过粗的人选粒度选不起来，过细的粒级也难以回收。因此，为选别提供粒度合适的原料是磨矿的第二个任务。值得注意的是，磨矿产品中过粗的粒度还有再被磨细的机会（如果是闭路磨矿或两段以上磨矿），而过度粉碎的矿物则没有再回收的机会。可以说，过粉碎既增加磨矿过程中的电耗及钢材消耗，又恶化选别过程并造成矿物资源的浪费，在磨矿过程中应尽量降低过粉碎粒级的产生。

综上所述，碎矿和磨矿的目的及任务是，使矿石中的有用矿物充分单体解离及粒度适合选别要求，并且过粉碎尽量轻，产品粒度均匀。

## 1.2 碎矿和磨矿的地位及重要性

碎矿和磨矿是选矿厂的重要组成部分，除了个别处理海滨砂矿的选矿厂外，任何一个选矿厂均设置碎矿和磨矿作业。碎矿和磨矿是选矿厂的领头工序，选矿厂生产能力的大小实际上是由磨矿决定的。

选矿厂中的碎矿和磨矿的投资占全厂总投资的 60% 左右，磁选厂甚至达 75% 以上，电耗也占选矿的 50% ~ 60%；生产经营费用也占选厂的 40% 以上。同时，磨矿作业产品质量的高低也直接影响着选矿指标的高低。因此，碎矿和磨矿工段设计及操作的好坏，直接影响到选矿厂的技术经济指标，经济而合理的完成碎矿和磨矿的基本任务，是每个选矿工作者的职责。

除了金属选矿厂中设置碎磨作业外，冶金、化工、建材、煤炭、火电等若干国民经济基础行业中均设置有碎磨作业，而且设备也是生产中的主机。特别是磨矿作业，对国民经济影响较大，全国每年有上百亿吨矿料需要破碎，全国每年的发电量约有 5% 以上消耗于磨矿，约有上百万吨钢材消耗于磨矿，因此，碎磨作业的增效降耗具有十分重要的意义。

### 1.3 碎矿和磨矿的阶段及流程

前已述及,将采矿来的矿石破碎及磨碎到入选粒度时,原矿粒度要减小至原来的几千分之一甚至上万分之一,这么艰巨的破碎任务不可能在一台破碎机械中一次完成,而只能分阶段串联起来完成。大的方面分为碎矿和磨矿两个阶段,其阶段粒度划分大致是5mm,碎矿的产品粒度大于5mm,而且破碎力以压碎为主。磨矿的给矿粒度为5mm以下,破碎力以冲击及磨剥为主。碎矿中又进一步分为粗碎、中碎及细碎,磨矿中又进一步分为粗磨和细磨。

为了提高主机的工作效率,并在电耗高和材料消耗高的碎磨作业中尽量避免“不必要的破碎”,破碎机常常与筛子联合作业,磨矿机必须与分级机联合作业。

在碎矿段中设置预先筛分,可将原料中不需此段破碎的物料预先筛除,可减少进入破碎机的给矿量及减少不必要的破碎。而在碎矿以后设置的检查筛分则可将粒度达不到要求的不合格粒级返回本段破碎机再破碎,检查筛分的设置可以严格控制破碎产品粒度。设置检查筛分不仅增加筛子及返矿设备,也增加场地及建设费用,所以通常只在粒度有严格要求的细碎作业中才采用。粗碎及中碎中通常只设预先筛分,如果粗碎机及中碎机的生产能力富余,可以不设预先筛分,因预先筛分的设备也要增加设备费用并损失空间高度。

磨矿的粒度比碎矿要求更严,而且磨矿机自身没有产品粒度的控制能力(棒磨机有一定的粒度控制能力,可以开路磨矿),因此,在磨机外面必须设置分级机来控制磨矿粒度,即闭路磨矿。

在图1-3-1中列出三段一闭路的碎矿流程及两段闭路的磨矿流程为示范。

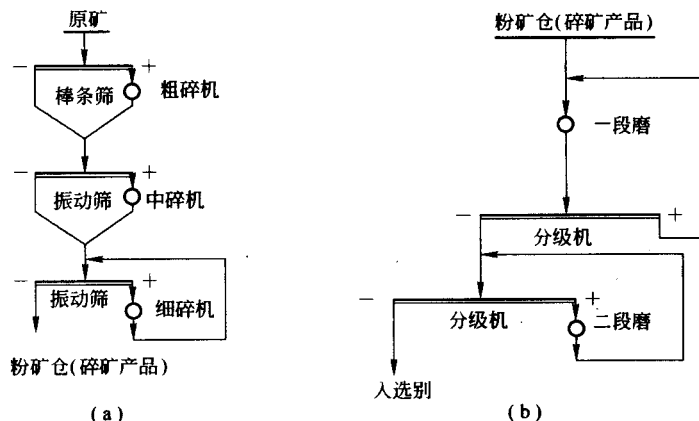


图 1-3-1 碎矿及磨矿的典型流程

(a) 三段一闭路碎矿流程; (b) 两段闭路磨矿流程

### 1.4 碎矿车间和磨矿车间的工作制度

碎矿车间的工作有其特殊性,在工作制度确定时要充分考虑到这些特殊性。

碎矿车间直接接受采矿场来的原矿,采矿与碎矿之间最多只设置一个缓冲矿仓,因此,破碎机的工作时间就要与采矿场的供矿制度相配合,采场不是24h连续供矿,碎矿也就不必24h连续工作。破碎机破碎坚硬的巨大矿块,机器受力沉重,磨损严重,每班工作中均应留足机器检修时间。因此,如果采场两班出矿,碎矿车间就两班工作;若三班均出矿,碎矿车间就三班工作。通常,大型选矿厂均是三班工作制,中小型选矿厂两班或三班工作制。两班制的每班工

作 6~7h, 三班制的每班工作 5~6h, 其余时间用在开车、停修及设备小修上。

碎矿车间中, 各段破碎机、筛子和附属设备等常常是配置在几个台阶上, 较为分散, 每个碎矿段中给矿机、运输机、破碎机、筛子及除尘器等设备互相衔接成一条生产线, 各个破碎台阶连成生产线。这种设备配置特点就要求有与之相适应的操作管理制度。这种生产线上, 其中任何一台设备发生故障都会使全线停产, 启动和停车时的任何一个错误操作都会造成事故, 因此要注意调度控制、操纵和讯号。矿石运入及送出都要计量。碎矿车间的操纵和控制有以下特点: (1) 各台机器必须按工艺过程设计的程序, 以一定的时间间隔相继启动, 启动次序与矿料运行方向相反, 即逆向启动。(2) 各台机器既能单独启动, 又可以成组启动; 既可以在调度室集中操作, 又可在工作地点操纵。(3) 停止整个生产线时, 采用正向停车, 即和逆向启动相反, 也就是和矿料运行方向相同。(4) 当生产线上的某一台设备被迫停车时, 为避免堵塞, 它前面的机器都必须停车, 它后面的机器可以继续工作。(5) 应该规定出各种讯号, 以便指挥分散在全车间内的工作人员。

磨矿车间和碎矿车间不同, 磨矿机时开时停会使生产不稳定, 选别指标波动, 并增加矿物流失, 因此, 磨矿机是每天 24h 连续工作, 每月除计划的检修停车外, 均在工作。

磨矿车间磨矿机通常配置在一个台阶上, 比较集中, 管理较为方便, 碎矿车间操纵控制的要点在磨矿车间原则上适用。

由于碎矿车间与磨矿车间工作制度不相同, 碎矿车间的小时生产率就应比磨矿车间的大, 就是说, 碎矿车间在  $3 \times 6h = 18h$  的时间内要碎出磨机 24h 磨矿的量。这样, 在碎矿车间和磨矿车间之间就必须设置一个粉矿仓装碎矿的最终产品并供给磨矿机原矿。粉矿仓通常能装磨机一天的处理量, 矿山供矿情况良好时, 粉矿仓也可以小一些。

破碎机及磨矿机均是工作部件与坚硬矿石相接触, 故磨损严重, 必须有计划地准备配件和材料, 并经常进行检修。

碎矿及磨矿虽然分在两个车间, 而且工作情况不尽相同, 但碎矿和磨矿均属矿料的粉碎, 而且碎矿为磨矿准备给矿, 故两者关系密切, 在考虑技术经济问题时, 就不应该把它们分开来只顾一方, 必须对两个车间综合考虑, 才能使碎矿与磨矿总的效果最好。

## 1.5 碎矿和磨矿的发展趋势

碎矿和磨矿是国民经济中许多基础行业的重要工序, 它们必须受到应有的重视, 随着世界经济技术的发展, 矿业也得到了大的发展, 作为破碎及磨碎矿料的碎矿和磨矿也随之出现了大的发展, 总的发展趋势是: 研制及应用大型碎矿和磨矿设备, 发展高效率的新型碎磨设备, 将新技术新材料引入碎磨设备, 研究碎磨过程的机理及提高过程效率的途径, 以及研究新的碎磨方法等。

二次世界大战后, 各国都在恢复及发展经济, 金属材料及矿物材料的需求剧增, 故新建大型选矿厂及老选矿厂改建扩建, 这种矿业发展态势促进设备向大型化发展, 因为大型设备具有大的生产能力、低的投资及运营成本。颚式破碎机的规格已达  $2100mm \times 3000mm$ , 旋回破碎机达  $2130mm \times 4400mm$ , 圆锥破碎机达  $3048mm$ , 棒磨机直径达  $4.5m$ , 球磨机直径达  $6m$ , 自磨机直径达  $12m$  等。但是, 设备大型化的发展也是有止境的, 而且受资源条件及相关技术经济发展的限制。20 世纪 60、70 年代设备大型化发展迅速, 80 年代大型化基本止步。值得注意的是, 球磨机规格愈大, 工作效率愈低, 这与碎矿设备是不同的。

碎矿及磨矿设备中, 大部分是 19 世纪中出现及在工业生产中应用, 经上百年的工业生产应用, 一方面证实这些设备性能是可靠的, 具有生命力, 另一方面也暴露了它们的工作效率低

及消耗高,有待改进提高。20 世纪 80 年代初,世界性的经济危机导致矿业不景气,矿业要生存就必须以效率为中心进行改造。因此,这时期人们把注意力集中到碎磨设备的研制及改进上,这种情况下新设备及老设备的改进陆续出现,如冲击式颚式破碎机、超细碎机,无齿轮圆锥破碎机,各种反击式破碎机、环形电机传动磨矿机、塔式磨等。

在传统设备的改进及新设备的研制中,逐步将新技术新材料引入应用。大型滚动轴承应用于碎磨设备中,高压油悬浮应用于磨机主轴承,聚氨酯耐磨材料应用于筛网以延长寿命,高强度金属材料在碎磨设备零件中的应用,橡胶衬板及磁性衬板的应用,以及自动化技术应用于碎磨设备机组的控制中等。

碎磨过程耗费的能量巨大,材料消耗也高,为了提高过程效率,选矿工作者不断地研究能耗规律及寻找节能降耗的途径,在磨矿领域开辟诸如选择性磨矿这样的领域以提高磨矿效率,开展球磨机介质的工作理论等的研究进一步提高磨矿效率等等,总之,围绕增效、节能降耗等目标开展各种研究,取得了不少显著的成绩。

破碎方法中仍然是机械破碎法占统治地位,机械破碎法的缺点是能量转换效率低及产品的解离度特性不够好。因此,新的破碎方法的研究工作一直未停止过,如电热照射、液电效应、热力破碎方法的研究工作,但这些研究均属初期研究。

### 复习思考题

- 1-1 碎矿和磨矿的目的及任务是什么?
- 1-2 碎矿和磨矿在选矿厂的地位如何?
- 1-3 碎矿车间及磨矿车间的工作有何特点?
- 1-4 碎矿及磨矿的阶段怎么划分?
- 1-5 碎矿及磨矿的发展趋势如何?

## 2 筛 分

### 2.1 筛分原理

#### 2.1.1 筛分的定义及原理

##### 2.1.1.1 筛分的定义

筛分就是将颗粒大小不同的混合物料，通过单层或多层筛子分成若干个不同粒度级别的过程。矿物在经过破碎后，常常以各种粒度不同的物料混合存在，有的物料甚至还含有水分、黏土或其他杂质，所以需通过筛分以满足生产工艺及操作过程的要求。筛分可分为干法和湿法两种，一般用干法，但对于潮湿物料，特别是潮湿并夹带泥质的物料进行干法筛分很困难，这种物料在筛分时，需要在筛面上喷水，将细粒及泥质冲洗掉。还有一种特殊的湿法筛分，将筛面及物料浸在水面以下。

筛分作用概括起来有分级、脱水、脱泥、脱介，其中分级是最为常用的。筛分是按几何粒度进行分级的，一般用于粗颗粒的分级，不用作细粒物料的分级。细粒物料通常用水力分级。

##### 2.1.1.2 筛分原理

松散物料的筛分过程，可以看做两个阶段组成：

- (1) 易于穿过筛孔的颗粒通过不能穿过筛孔的颗粒所组成的物料层到达筛面；
- (2) 易于穿过筛孔的颗粒透过筛孔。

要使这两个阶段能够实现，物料在筛面上应具有适当的运动，一方面使筛面上的物料层处于松散状态，物料层将会产生析离（按粒度分层），大颗粒位于上层，小颗粒位于下层，容易到达筛面，并透过筛孔。另一方面，物料和筛子的运动都促使堵在筛孔上的颗粒脱离筛面，有利于颗粒透过筛孔。

实践表明，物料粒度小于筛孔  $3/4$  的颗粒，很容易通过粗粒物料形成的间隙，到达筛面，到筛面后它就很快透过筛孔。这种颗粒称为“易筛粒”。物料粒度大于筛孔  $3/4$  的颗粒，通过粗粒组成的间隙比较困难，这种颗粒的直径愈接近筛孔尺寸，它透过筛孔的困难程度就愈大，因此，这种颗粒称为“难筛粒”。下面用矿粒通过筛孔的概率理论来作说明。

矿粒通过筛孔的可能性称为筛分概率，一般来说，矿粒通过筛孔的概率受到下列因素影响：(1) 筛孔大小；(2) 矿粒与筛孔的相对大小；(3) 筛子的有效面积；(4) 矿粒运动方向与筛面所成的角度；(5) 矿料的含水量和含泥量。

由于筛分过程是许多复杂现象和因素的综合，使筛分过程不易用数学形式来全面地描述，这里仅仅从颗粒尺寸与筛孔尺寸的关系进行讨论，并假定了某些理想条件（如颗粒是垂直地投入筛孔），得到颗粒透过筛孔的概率的公式。

松散物料中粒度比筛孔尺寸小得多的颗粒，在筛分开始后，很快就落到筛下产物中，粒度与筛孔尺寸愈接近的颗粒，透过筛孔所需的时间愈长。所以，物料在筛分过程中通过筛孔的速度取决于颗粒直径与筛孔尺寸的比值。

研究单颗矿粒透过筛孔的概率如图 2-1-1 所示。假设有一个由无限细的筛丝制成的筛网，

筛孔为正方形，每边长度为  $L$ 。如果一个直径为  $d$  的球形颗粒，在筛分时垂直地向筛孔下落。可以认为，颗粒与筛丝不相碰时，它就可以毫无阻碍地透过筛孔。换言之，要使颗粒顺利地透过筛孔，在颗粒下落时，其中心应投在绘有虚线的面积  $(L-d)^2$  内（图 2-1-1a）。

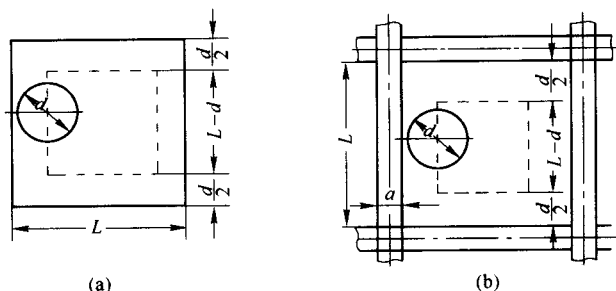


图 2-1-1 颗粒透过筛孔示意图

由此可见颗粒透过筛孔或者不透过筛孔是一个随机现象。如果矿粒投到筛面上的次数有  $n$  次，其中有  $m$  次透过筛孔，那么颗粒透过筛孔的频率就是：

$$\text{频率} = \frac{m}{n}$$

当  $n$  很大时，频率总是稳定在某一个常数  $p$  附近，这个稳定值  $p$  就叫做筛分概率。因此筛分概率也就客观地反映了矿粒透筛可能性的大小。

$$p = \frac{m}{n}$$

既然概率是某事件出现的可能性的的大小，它也就永远不会小于零，也不会大于 1，总是在 0 与 1 之间，即： $0 \leq p \leq 1$ 。

可以设想有利于颗粒透过筛孔的次数，与面积  $(L-d)^2$  成正比，而颗粒投到筛孔上的次数，与筛孔的面积  $L^2$  成正比。因此，颗粒透过筛孔的概率，就决定于这两个面积的比值

$$p = \frac{(L-d)^2}{L^2} = \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 \quad (2-1-1)$$

颗粒被筛丝所阻碍，使它不透过筛孔的概率之值等于  $(1-p)$ 。

当某事件发生的概率为  $p$  时，使该事件以概率  $p$  出现如需要重复  $N$  次， $N$  值与概率  $p$  成反比，即：

$$p = \frac{1}{N}$$

这里所讨论的  $N$  值就是颗粒透过筛孔的概率为  $p$  时必须与颗粒相遇的筛孔数目。由此可见，筛孔数目越多，颗粒透过筛孔的概率越小，当  $N$  值无限增大时， $p$  愈接近于零。

取不同的  $\frac{d}{L}$  比值计算出的  $p$  和  $N$  值，见表 2-1-1。利用这些数据可画出图 2-1-2 的曲线。

曲线可大体划分为两段，在颗粒直径  $d$  小于  $0.75L$  的范围内，曲线较平缓，随着颗粒直径的增大，颗粒透过筛面所需的筛孔数目有所增加。当颗粒直径超过  $0.75L$  以后，曲线较陡，颗粒直径稍有增加，颗粒透过筛面所需的筛孔数目就需要很多。因此，用概率理论可以证明，在筛分实践中，把  $d < 0.75L$  的颗粒称为“易筛粒”和  $d > 0.75L$  的颗粒称为“难筛粒”是有道理的。

表 2-1-1 颗粒透过筛孔的概率与颗粒及筛孔相对尺寸的关系

| $\frac{d}{L}$ | $p$   | $N = \frac{1}{p}$ | $\frac{d}{L}$ | $p$      | $N = \frac{1}{p}$ |
|---------------|-------|-------------------|---------------|----------|-------------------|
| 0.1           | 0.810 | 2                 | 0.7           | 0.090    | 11                |
| 0.2           | 0.640 | 2                 | 0.8           | 0.040    | 25                |
| 0.3           | 0.490 | 2                 | 0.9           | 0.010    | 100               |
| 0.4           | 0.360 | 3                 | 0.95          | 0.0025   | 400               |
| 0.5           | 0.250 | 4                 | 0.99          | 0.0001   | 10000             |
| 0.6           | 0.160 | 7                 | 0.999         | 0.000001 | 100000            |

若考虑筛丝的尺寸（图 2-1-1b），与上面所讨论的原理一样，得到颗粒透过筛面的概率公式：

$$p = \frac{(L - d)^2}{(L + a)^2} = \frac{L^2}{(L + a)^2} \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2 \tag{2-1-2}$$

式中  $a$ ——筛丝直径；  
 $L$ ——方形筛孔的边长。  
上式说明，筛孔尺寸愈大，筛丝和颗粒直径愈小，则颗粒透过筛孔的可能性愈大。

2.1.2 筛分效率及影响因素

2.1.2.1 筛分效率  
在使用筛子时，既要求它的处理能力大，又要求尽可能多地将小于筛孔的细粒物料过筛到筛下产物中去。因此，筛子有两个重要的工艺指标：一个是它的处理能力，即筛孔大小一定的筛子每平方米筛面面积每小时所处理的物料吨数( $t/(m^2 \cdot h)$ )，它是表明筛分工作的数量指标。另一个是筛分效率，它是表明筛分工作的质量指标，反映筛分的完全程度。

在筛分过程中，按理说比筛孔尺寸小的细级别应该全部透过筛孔，但实际上并不是如此，它要根据筛分机械的性能和操作情况以及物料含水量、含泥量等而定。因此，总有一部分细级别不能透过筛孔成为筛下产物，而是随筛上产品一起排出。筛上产品中，未透过筛孔的细级别数量愈多，说明筛分的效果愈差，为了从数量上评定筛分的完全程度，要用到筛分效率这个指标。

所谓筛分效率，是指实际得到的筛下产物质量与入筛物料中所含粒度小于筛孔尺寸的物料的质量之比。筛分效率用百分数或小数表示。

$$E = \frac{C}{Q \cdot \frac{\alpha}{100}} \times 100\% = \frac{C}{Q\alpha} \times 10^4\% \tag{2-1-3}$$

式中  $E$ ——筛分效率，%；  
 $C$ ——筛下产品质量；  
 $Q$ ——入筛原物料质量；

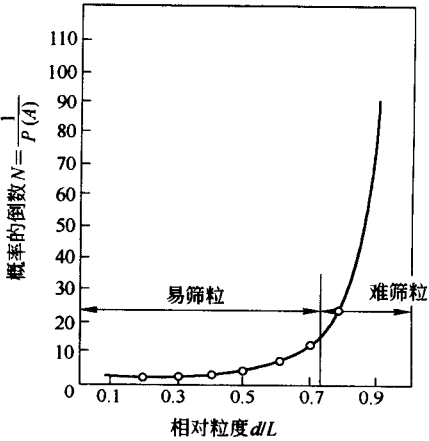


图 2-1-2 颗粒透过筛面的概率的倒数与颗粒和筛孔相对尺寸的关系

$\alpha$ ——入筛原物料中小于筛孔的级别的含量, %。

式 2-1-3 是筛分效率的定义式, 但实际生产中要测定  $C$  和  $Q$  是比较困难的, 因此必须改用下面推导出的计算式来进行计算。

按图 2-1-3 所示, 假定筛下产品中不含大于筛孔尺寸的颗粒, 就可以组成两个方程式

(1) 原料质量应等于筛上和筛下产物质量之和, 即

$$Q = C + T \quad (2-1-4)$$

(2) 原料中小于筛孔尺寸的粒级的质量, 等于筛上产物与筛下产物中所含有的小于筛孔尺寸的物料的质量之和。

$$Q\alpha = 100C + T\theta \quad (2-1-5)$$

式中  $T$ ——筛上产物质量;

$\theta$ ——筛上产物中所含小于筛孔尺寸粒级的含量, %。

将公式 (2-1-4) 代入公式 (2-1-5), 得

$$Q\alpha = 100C + (Q - C)\theta$$

$$C = \frac{(\alpha - \theta)Q}{100 - \theta} \quad (2-1-6)$$

按照公式 (2-1-3) 表示的筛分效率的定义, 将公式 (2-1-6) 代入公式 (2-1-3) 中, 得到

$$E = \frac{C}{Q\alpha} \times 10^4 = \frac{\alpha - \theta}{\alpha(100 - \theta)} \times 10^4 \% \quad (2-1-7)$$

必须指出, 上式是指筛下产物中不含大于筛孔尺寸的颗粒的条件下列出的物料平衡方程式, 公式中的  $\alpha$ 、 $\theta$  必须用百分数的分子代入。由于实际生产中, 筛网常常被磨损, 部分大于筛孔尺寸的颗粒总会或多或少的透过筛孔进入筛下产物, 如果考虑这种情况, 筛分效率应按下式计算:

$$E = \frac{\beta(\alpha - \theta)}{\alpha(\beta - \theta)} \times 100\% \quad (2-1-8)$$

式中,  $\beta$  为筛下产物中所含小于筛孔级别的含量, %。

筛分效率的测定方法如下: 在入筛的物料流中和筛上物料流中每隔 15 ~ 20min 取一次样, 应连续取样 2 ~ 4h, 将取得的平均试样在检查筛里筛分, 检查筛的筛孔与生产上用的筛子的筛孔相同。分别求出原料和筛上产品中小于筛孔尺寸的级别的百分含量  $\alpha$  和  $\theta$ , 代入公式 (2-1-7) 中可求出筛分效率。如果没有与所测定的筛子的筛孔尺寸相等的检查筛子时, 可以用套筛作筛分分析, 将其结果绘成筛析曲线, 然后由筛析曲线图中求出该级别的百分含量  $\alpha$  和  $\theta$ 。

有时用全部小于筛孔物料来计算筛分效率, 这样算得的结果称为总筛分效率。有时只对其中的几个粒级作计算, 算得的结果称为部分筛分效率。全部小于筛孔的物料, 包含易筛粒和难筛粒, 所以总筛分效率就是这两类粒子的筛分效率组成的。倘若部分筛分效率是用易筛粒求得的, 它必然比总筛分效率大; 如果是用难筛粒算出的, 它比总筛分效率小。

因为有以上讲的这些情况, 在遇见筛分效率时, 就要注意是用什么公式算的, 是总筛分效率还是部分筛分效率, 否则就会对所研究的问题认识不清。

### 2.1.2.2 影响筛分效率的因素

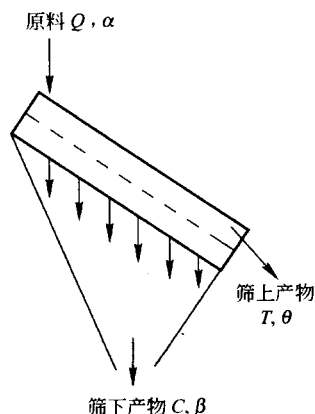


图 2-1-3 筛分效率的测定