

高 职 高 专 规 划 教 材

XUANKUANG YUANLI YU GONGYI

选矿原理与工艺

于春梅 闻红军 主编



冶金工业出版社

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

高职高专规划教材

选矿原理与工艺

主 编 于春梅 闻红军
副主编 陈国山

北 京
冶金工业出版社
2008

内 容 提 要

本书系统地介绍了重力选矿、浮游选矿、磁力选矿等各种选矿工艺的基本理论及操作技术,并介绍了选矿试验与检查等内容。

本书既可作为高职高专选矿专业的教材,也可用于选矿技师、高级技师的培训,同时还可供从事选矿生产和管理工作的工程技术人员和操作工人参考。

图书在版编目(CIP)数据

选矿原理与工艺/于春梅,闻红军主编. —北京:冶金工业出版社, 2008. 5

高职高专规划教材

ISBN 978-7-5024-4458-7

I. 选… II. ①于… ②闻… III. 选矿—高等学校:技术学校—教材 IV. TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 072758 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 马文欢 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4458-7

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

2008 年 5 月第 1 版, 2008 年 5 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 13.75 印张; 360 千字; 208 页; 1-3000 册

28.00 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)

前 言

本书为高职高专选矿专业教材，是根据教育部高等职业教育的指导思想和高等职业教育选矿课程的教学特点与教学需要编写而成的。

本书系统地介绍了重力选矿、浮游选矿、磁力选矿及试验与检查等方面的基本理论和基础知识，并着重实际操作部分的介绍。本书既可作为高等职业技术教育的选矿专业的教学用书，也可用于选矿技师、高级技师的培训，同时还可供从事选矿生产和管理工作的工程技术人员和操作工人参考。

参加本书编写工作的有吉林电子信息职业技术学院于春梅、闻红军、陈国山、尹江艳、蓝蓝，以及吉林省舒兰市国土资源局于涛。本书由于春梅副教授、闻红军副教授担任主编，陈国山副教授担任副主编。本书共分5章，1~3章由于春梅编写，其他各章节分别由闻红军、陈国山、尹江艳、蓝蓝、于涛编写。

在编写过程中参考了大量的文献资料，并得到了吉林电子信息职业技术学院韩配津老师和同行的大力支持，在此谨向各位文献作者和同行致以诚挚的谢意！

由于编者水平所限，书中有疏漏、不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007年10月

目 录

1 选矿概述	1
1.1 选矿的目的及作用	1
1.2 选矿的方法及选矿过程	1
1.2.1 选前的准备作业	1
1.2.2 选别作业	1
1.2.3 选后的脱水作业	2
1.3 选矿的工艺指标	2
复习思考题	3
2 重力选矿	4
2.1 概述	4
2.1.1 重力选矿的基本概念	4
2.1.2 重力选矿的原理	5
复习思考题	8
2.2 水力分级	8
2.2.1 概述	8
2.2.2 分级效率	10
2.2.3 分级设备——水力旋流器	11
复习思考题	14
2.3 跳汰选矿	14
2.3.1 概述	14
2.3.2 常用的跳汰机	16
2.3.3 影响跳汰过程的因素	21
2.3.4 跳汰机的操作与维护	24
复习思考题	26
2.4 摇床选矿	26
2.4.1 概述	26
2.4.2 摇床的构造及选别原理	27
2.4.3 影响摇床选矿过程的因素	39
2.4.4 8YC、9YC型悬挂式多层摇床	42
复习思考题	43
2.5 离心选矿	43
2.5.1 概述	43
2.5.2 离心机的构造及工作原理	44
2.5.3 SL型连续排矿射流离心选矿机	46

2.5.4 影响离心选矿的因素	47
2.5.5 离心机的操作及维护	49
复习思考题	50
2.6 溜槽选矿	50
2.6.1 概述	50
2.6.2 溜槽选矿的分类及工作原理	50
2.6.3 影响溜槽选矿的因素	62
复习思考题	67
2.7 重介质选矿	67
2.7.1 概述	67
2.7.2 重悬浮液的性质及悬浮质的选择	68
2.7.3 重介质选矿机	71
复习思考题	74
2.8 重力选矿实践	75
2.8.1 概述	75
2.8.2 钨矿石的重选实例	75
2.8.3 铁矿石的重选实例	79
2.8.4 砂金的重选实例	81
复习思考题	84
3 浮游选矿	85
3.1 浮选的基本原理	85
3.1.1 矿物、水和空气的性质	85
3.1.2 矿物的电现象与可浮性	87
3.1.3 矿粒吸附在气泡上的机理	90
复习思考题	92
3.2 浮选药剂	92
3.2.1 浮选药剂的作用及分类	92
3.2.2 氧化矿浮选常用的几种药剂	114
复习思考题	122
3.3 浮选机械	122
3.3.1 概述	122
3.3.2 机械搅拌式浮选机	124
3.3.3 浮选柱	132
复习思考题	132
3.4 浮选工艺及实践	132
3.4.1 铁矿石的浮选	132
3.4.2 有色金属硫化矿的浮选	135
3.4.3 含金矿石的浮选	147
复习思考题	148

4 磁力选矿	149
4.1 磁选的理论基础	149
4.1.1 磁选过程及矿粒分选的基本条件	149
4.1.2 矿物的磁性	149
复习思考题	150
4.2 强磁性矿石的磁选	151
4.2.1 铁矿石的工业类型	151
4.2.2 弱磁场磁选机	152
复习思考题	161
4.3 弱磁性矿石的磁选	161
4.3.1 磁化焙烧	161
4.3.2 强磁场磁选机	168
复习思考题	176
4.4 磁选工艺及实践	176
4.4.1 强磁性矿石的磁选实例	176
4.4.2 弱磁性矿石的磁选实例	183
复习思考题	191
5 试验与检查	192
5.1 选矿厂取样	192
5.1.1 静置料堆的取样	192
5.1.2 流动物料的取样	192
5.2 试样的制备	194
5.2.1 矿样的破碎缩分计算	194
5.2.2 试样的加工操作	195
5.3 选矿工艺参数的测定	197
5.3.1 生产能力的测定	197
5.3.2 浮选时间的测定	198
5.3.3 矿浆相对密度、浓度和 pH 值的测定	198
5.3.4 药剂浓度和用量的测定	200
5.4 选矿厂工艺流程考查	201
5.4.1 选矿厂流程考查的目的和分类	201
5.4.2 流程考查的工作内容	201
5.4.3 流程考查中试样的采取及试样的处理	202
5.4.4 流程计算	204
5.4.5 产品分析	206
5.5 选矿厂金属平衡表的编制	207
5.5.1 理论金属平衡表的编制	207
5.5.2 实际金属平衡表的编制	207
参考文献	208

1 选矿概述

1.1 选矿的目的及作用

选矿是利用矿物的物理性质或物理化学性质的差异，借助各种选矿设备将矿石中的有用矿物和脉石矿物分离，并达到使有用矿物相对富集的过程。选矿学是研究矿物分选的学问，是涵盖分离、富集、综合利用矿产资源的一门技术学科。

自然界蕴藏着极为丰富的矿产资源。但是，除少数富矿外，一般品位都较低。这些矿石若直接冶炼，技术上有困难，经济上也不合理。因此，冶金生产对矿石的品位有一定的要求。例如，铁矿石中铁的品位不得低于45%~50%，铜矿石中铜的品位不得低于3%~5%。为此，对低品位的贫矿石，必须在冶炼前进行分选。其次，矿石中往往都含有多种有用成分，必须事先用选矿方法将它们分离成单独的精矿才能进一步利用。此外，矿石中除了有用成分外，往往含有有害杂质，如铁矿石中有害杂质为硫、磷等。必须在冶炼前尽可能用选矿方法除去这些有害杂质，否则将会使冶炼过程复杂化和影响冶炼产品的质量。

1.2 选矿的方法及选矿过程

选矿过程是由选前的矿石准备作业、选别作业和选后的脱水作业所组成的连续生产过程。

1.2.1 选前的准备作业

为了从矿石中选出有用矿物，首先必须将矿石粉碎，使其中的有用矿物和脉石达到单体解离。有时为了达到后继作业对物料粒度的特殊要求，也需在中间加入一定的粉碎作业。选前的准备工作通常分为破碎筛分作业和磨矿分级作业两个阶段。破碎机和筛分机多为联合作业，磨矿机与分级机常组成闭路循环。它们分别是组成破碎车间和磨选车间的主要机械设备。

1.2.2 选别作业

选别作业是通过适当的手段将已经单体解离的矿石中的有用矿物和脉石分选的工序。最常用的方法有：

(1) 浮游选矿法（简称浮选法）。浮选是根据矿物表面的润湿性的不同，添加适当药剂，在浮选机中分选矿物的方法。它应用广泛，可用来处理绝大多数矿石。

(2) 磁力选矿法（简称磁选法）。磁选是根据矿物磁性的不同，在磁选机中进行分选的方法。主要用来处理黑色矿石和稀有金属矿石。

(3) 重力选矿法（简称重选法）。重选是根据密度不同的矿物在介质（水、空气或重介质）中运动速度和运动轨迹的不同，而达到分选的方法。它被广泛应用于选别钨、锡、金和铁、锰等矿石。其他有色金属、稀有金属和非金属矿石的选别也常用重选法。重选是在各种类型的重选设备中进行的。

另外，还有根据矿物的导电性、摩擦系数、颜色和光泽等不同而进行选矿的方法，如电选法、摩擦选矿法、光电选矿法和手选法等。

在选矿厂中，磨矿分级作业和选别作业通常构成磨选车间。

1.2.3 选后的脱水作业

绝大多数的选矿产品都含有大量的水分，这对于运输和冶炼加工都很不利。因此，在冶炼以前，需要脱除选矿产品中的水分。脱水作业常常按下面几个阶段进行：

(1) 浓缩。浓缩是在重力或离心力作用下，使选矿产品中的固体颗粒发生沉淀，从而脱去部分水分的作业。浓缩通常在浓缩机中进行。

(2) 过滤。过滤是使矿浆通过一透水而不透固体颗粒的间隔层，达到固液分离的作业。过滤是浓缩以后的进一步脱水作业，一般在过滤机上进行。

(3) 干燥。干燥是脱水过程的最后阶段。它是根据加热蒸发的原理减少产品中水分的作业。但只有在脱水后的精矿还需要进行干燥时才用。干燥作业一般在干燥机中进行，也有采用其他干燥装置的。

由浓缩、过滤、干燥等工序构成的辅助车间称为脱水车间。

1.3 选矿的工艺指标

选矿的工艺指标有品位、产率、选矿比、富矿比、回收率等。

(1) 品位。品位是指产品中金属或有用成分的重量与该产品重量之比，常用百分数表示。例如，铜精矿品位为 15%，即 100t 干精矿中含有 15t 金属铜。

(2) 产率。产品重量与原矿重量之比称为该产品的产率，以 γ 表示。例如，选矿厂每昼夜处理原矿石重量 ($Q_{\text{原矿}}$) 为 500t，获得精矿重量 ($Q_{\text{精矿}}$) 为 30t，则精矿产率 ($\gamma_{\text{精矿}}$) 为：

$$\gamma_{\text{精矿}} = \frac{Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% = \frac{30}{500} \times 100\% = 6\% \quad (1-1)$$

尾矿产率 ($\gamma_{\text{尾矿}}$) 为：

$$\gamma_{\text{尾矿}} = \frac{Q_{\text{原矿}} - Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% = \frac{500 - 30}{500} \times 100\% = 94\% \quad (1-2)$$

或 $\gamma_{\text{尾矿}} = 100\% - \gamma_{\text{精矿}} = 100\% - 6\% = 94\%$

(3) 选矿比。选矿比即原矿重量与精矿重量之比值。用它可以决定获得 1t 精矿所需处理原矿石的吨数。以上例数值为例，则：

$$\text{选矿比} = \frac{Q_{\text{原矿}}}{Q_{\text{精矿}}} = \frac{500}{30} = 16.7 \quad (1-3)$$

(4) 富矿比。富矿比或称富集比，即精矿中有用成分含量 (β) 的百分数和原矿中该有用成分含量 (α) 的百分数之比值，常以 i 表示。它表示精矿中有用成分的含量比原矿中该有用成分含量增加的倍数。如上例中，原矿中铜的品位为 1%，精矿中铜的品位为 15%，则其富矿比为：

$$i = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{15\%}{1\%} = 15 \quad (1-4)$$

(5) 回收率。精矿中金属的重量与原矿中该金属的重量之比的百分数，称为回收率，常用 ε 表示。回收率可用下式计算：

$$\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{100\alpha} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 ε ——回收率，%；

α ——原矿品位, %;

β ——精矿品位, %;

γ ——精矿产率, %。

金属回收率是评定分选过程（或作业）效率的一个重要指标。回收率越高，表示选矿过程（或作业）回收的金属越多。所以，选别过程中应在保证精矿质量的前提下，力求提高金属回收率。



复习思考题

- 1-1 试述选矿的概念及作用。
- 1-2 选矿的工艺过程是怎样的？
- 1-3 选矿的各工艺指标有什么意义？

2 重力选矿

2.1 概述

重力选矿（简称为重选）是一种历史悠久的选矿方法。在浮游选矿法出现之前，它在矿物选别生产中，起着重要的作用。和其他选矿方法一样，其任务是将矿石中的有用矿物和脉石矿物分开，以得到符合冶炼要求或便于下一步加工的产品。

2.1.1 重力选矿的基本概念

2.1.1.1 重力选矿的定义

重力选矿是根据各种矿物的密度和粒度不同来进行分选的，在一定程度上与矿物的颗粒形状有关。

重力选矿过程是在介质中进行的。作为介质的有水、空气、重液和重悬浮液。以空气为介质而进行选别的方法叫做风力选矿；以重液和重悬浮液为介质的选矿叫做重介质选矿。大多数情况下，是以水为介质进行选别的。

2.1.1.2 重力选矿的分类

根据重力选矿法所用设备及作用原理的不同，重力选矿可分成以下几类：

(1) 洗矿。利用机械力、水流冲力使黏土质分散后，按沉降速度（或粒度）不同进行分离，它是重力选矿辅助作业。在原矿中含泥（ -0.074mm ）较高（10%以上）时，常需要洗矿。

(2) 水力分级。利用匀速运动的水流，使矿物按沉降速度（或粒度）分成不同级别，以使各粒级单独进行分选。它也是重力选矿辅助作业。一般给矿粒度在 3mm 以下。

(3) 跳汰选矿。利用垂直脉动介质流使矿粒群松散、密集，并按密度分层，达到不同密度矿物相互分离。一般给矿粒度为 20mm 以下（指金属矿石，下同）。

(4) 溜槽选矿。利用沿斜面流动的脉动水流，使不同密度矿物相互分离。一般给矿粒度为 $40\sim 0.019\text{mm}$ 。

(5) 摇床选矿。利用床面往复运动所产生的惯性力和斜面薄水层的脉动水流冲力，使不同密度的矿物互相分离。一般给矿粒度为 $3\sim 0.037\text{mm}$ 。

(6) 重介质选矿。利用浮沉原理使不同密度的矿物在重液或重悬浮液中互相分离。有时在选别作业前用此法除去大量（40%~50%）的脉石，以提高生产能力。一般给矿粒度在 75mm 以下。

上述各种选矿方法，都是以密度不同为主要依据的。但必须指出，在其他条件相同时，随着矿粒粒度减小，按密度分离的困难程度将增大。因此，为了使矿粒尽可能地按密度分离，物料在选别之前应脱除细粒级，或分级成粒度范围较窄的级别。

由于颗粒的质量较小，因而在重力场中按密度或粒度分离的速度和精确性大大降低，造成细粒级金属流失。为提高金属回收率，可采用以离心力场为原理的重力选矿设备，以及多种力综合作用的重力选矿设备，如离心选矿机、重介质旋流器、螺旋选矿机和螺旋溜槽、旋转螺旋

溜槽等。

2.1.1.3 矿粒相对密度测定方法

矿粒的相对密度可以用称量法（粗粒）或比重瓶法（细粒）来测定。

称量法是分别称量矿粒在空气中和在水中的质量，根据阿基米德原理，可按式（2-1）计算：

$$\delta = \frac{G}{G - G_0} \quad (2-1)$$

式中 G ——矿粒在空气中的质量；

G_0 ——矿粒在水中的质量；

δ ——矿粒的相对密度。

比重瓶法是用特制的比重瓶（或用小量筒、量杯），分别称量 A_1 、 A_2 、 A_3 ，然后按式（2-2）计算：

$$\delta = \frac{A_2}{(A_1 + A_2) - A_3} \quad (2-2)$$

式中 A_1 ——比重瓶加满水时，瓶加水的总质量；

A_2 ——矿粒在空气中的质量；

A_3 ——先将矿粒装于瓶中，然后将比重瓶装满水时，瓶、水及矿粒的总质量；

$(A_1 + A_2) - A_3$ ——与该矿粒同体积的水的质量。

2.1.2 重力选矿的原理

2.1.2.1 矿粒及介质的性质

在重力选矿中，除矿粒的密度和粒度外，矿粒的形状对其亦有影响。由于不同形状的矿粒与介质发生相对运动时所受的阻力不同，所以它们在介质中的运动速度也不相同。球形的矿粒比薄板形的矿粒在水中沉降得要快。矿粒形状上的差异用形状系数 χ 表示。鉴于在各种形状的物体中，以球体的外观最规整，因此，通常取球形作为衡量矿粒的标准，其他形状的矿粒（密度、体积同球体）沉降速度与球体的沉降速度之比，称为形状系数。各种形状的矿粒形状系数见表 2-1。

表 2-1 各种形状的矿粒形状系数

矿粒形状	球 形	浑圆形	多角形	长方形	扁平形
形状系数 χ	1.0	0.72 ~ 0.91	0.67 ~ 0.83	0.59 ~ 0.72	0.48 ~ 0.59

与重力选矿有关的介质的性质，主要是介质的密度和黏度。若用悬浮液选矿，则悬浮液的稳定性对重力选矿过程亦有影响。重力选矿中所使用的介质主要是水和悬浮液。

重力选矿是一种古老的选矿方法，我国在两千多年以前的汉代就曾用重力选矿法处理锡矿石。该法的特点是简单实用，成本低廉，所以至今仍然被广泛采用。目前处理钨、锡矿石及煤仍以重力选矿为主。在选别某些有色金属矿石及黑色金属矿石方面，也逐渐采用重力选矿法或重力选矿法与其他选矿方法的联合流程，以提高选矿厂的处理能力和实现有用矿物的综合回收。常见矿物的相对密度列于表 2-2 中。

表 2-2 常见矿物的相对密度

矿物	分子式	硬度 (摩氏)	相对密度
石棉	$\text{Ca}(\text{MgFe})_3(\text{SiO}_4)_3$	5~6	2.9~3.4
蓝铜矿	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	3.5~4	3.8
金刚石	C	10	3.5
硫酸铅矿	PbSO_4	3	6.12~6.39
磷灰石	$(\text{Cl}, \text{F})\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	5	3.17~3.23
重晶石	BaSO_4	3~3.5	4.3~4.6
黑云母	$(\text{H}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	2~3	2.7~3.1
铝矾土	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2~3	2.25
斑铜矿	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS} \cdot \text{FeS}$	3.5	4.5~5.4
自然铋	Bi	2.5	9.8
辉铋矿	Bi_2S_3	2.0~2.5	6.4~6.5
铋华	Bi_2O_3	2.0~2.5	4.36
赤铁矿	Fe_2O_3	5.5~6.5	4.9~5.3
石榴石	$\text{R}_2\text{R}_3(\text{SiO}_4)_3$	6.5~7.5	3.5~4.3
白云石	$\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$	3.5~4	2.8~2.9
自然金	Au(混有 Ag、Fe、Cu)	2.5~3	15.6~19.3
钛铁矿	FeTiO_3	5~6	4.5~6
异极矿	$(\text{ZnOH})_2\text{SiO}_3$	5	3.4~3.5
方解石	CaCO_3	3	2.7
高岭土	$\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$	2~2.5	2.6
石英	SiO_2	7	2.6
辰砂	HgS	2.25	8~8.2
铜蓝	CuS	1.5~2	4.6~4.65
赤铜矿	Cu_2O	3.5~4	5.85~6.15
褐铁矿	$\text{Fe}_3(\text{OH})_6\text{FeO}_3$	5~5.5	3.6~4
磁铁矿	Fe_3O_4	5.5~6.5	4.9~5.2
孔雀石	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	3.5~4	3.9~4
白铁矿	FeS_2	6~6.5	4.6~4.9
辉铜矿	Cu_2S	2.5~3	5.5~5.8
辉钼矿	MoS_2	1~1.5	4.7~4.8
独居石	$(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4$	5~5.5	4.9~5.3
白云母	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	2~2.5	2.8~3
氧化铋	BiO_3	2~2.5	4.36
锡石	SnO_2	6~7	6.8~7.1
正长石	KAlSi_3O_8	6~6.5	2.5~2.6
黄铁矿	FeS_2	6~6.5	4.95~5.10
软锰矿	MnO_2	1~2.5	4.7~4.8
磁黄铁矿	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$	3.5~4.5	4.5~4.6
自然铂	Pt(Fe)	4~4.5	14~19
斜长石	$n\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot m\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	5~7	2.6~2.7
硬锰矿	$\text{MnO}_2 \cdot \text{BaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$	5~6	4.5~5
雌黄	As_2S_3	1.5~2	3.4~3.6
雄黄	AsS	1.5~2	5.9~6.1
金红石	TiO_2	6~6.5	4.1~4.2
方铅矿	PbS	2.5	7.4~7.6
自然硫	S	1.5~2.5	2~2.1
辉银矿	Ag_2S	2~2.5	7.4~7.8
蛇纹石	$\text{H}_4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_9$	3~4	2.5~2.6

续表 2-2

矿物	分子式	硬度(摩氏)	相对密度
菱铁矿	FeCO_3	3.5~4	3.8~3.9
菱锌矿	ZnCO_3	5	4.3~4.5
锂辉石	$\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$	6.5~7	3.1~3.2
黄锡矿	$(\text{Cu}, \text{Sn}, \text{Fe})\text{S}$	4	4.5
辉锑矿	Sb_2S_3	2	4.5
自然锑	$\text{Sb}(\text{Ag}, \text{Fe})$	3~3.5	6.6~6.8
滑石	$\text{H}_2\text{Mg}_3(\text{SiO}_3)_4$	1~1.5	2.5~2.9
黑铜矿	CuO		6
黝铜矿	$\text{Cu}_3\text{Sb}_2\text{S}_7$	3~4.5	4.5~5.1
电气石	$\text{R}_{12}\text{B}_2(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{19}$	7~7.5	2.98~3.2
煤	$\text{C} + \text{O} + \text{N} + \text{H}$		1.2~1.8
萤石	CaF_2	4	3~3.3
黄铜矿	CuFeS_2	3.5~4.1	4.1~4.3
硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2~4	2~2.3
铬铁矿	FeCr_2O_4	5.5	4.3~4.6
白铅矿	PbCO_3	3~3.5	6.5~6.6
闪锌矿	ZnS	3.5~4	3.9~4.2
红锌矿	ZnO	4~4.5	5.4~5.7
锆石	ZrSiO_4	7.5	4.7
白钨矿	CaWO_4	4.5~5	5.9~6.1
黑钨矿	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$	4.5~5	7.2~7.5
硫砷铜矿	CuAsS_4	3	4.4
磷钇矿	YPO_4		4.53~4.72
钽铌铁矿	$(\text{FeMn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$		4.4~5.1
毒砂	FeAsS	6	6.0
胆矾	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2.2	2.5
自然银	Ag	10~11	2.5~3
绿柱石	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$	2.63~2.91	7.5~8
水锌矿	$\text{ZnCO}_3 \cdot 2\text{Zn}(\text{OH})_2$	2~2.5	2.58~3.8

2.1.2.2 矿粒在介质中的运动规律

在真空中,不同性质的矿粒,不论其密度、粒度和形状如何,若都从静止开始沉降,它们都以重力加速度 g 下落,不会出现运动上的差异,也就不可能产生分选作用。但是矿粒在介质中运动则不然,不仅受到重力的作用,还要受到介质的浮力和介质阻力的作用。由于介质作用在不同性质矿粒上的浮力和阻力大小不同,就会出现运动的差异,才使分选成为可能。

矿粒处于介质之中,其所受到的重力是指矿粒在介质中的重量,其值等于矿粒在真空中的重力减去浮力,其值随着矿粒体积(粒度)、矿粒密度的增大而增大,而随介质的密度的增大却减小。

矿粒对介质做相对运动时,作用于矿粒上并与矿粒的相对运动方向相反的力称为介质阻力。

矿粒在介质中运动时受到的介质阻力 R ,可以从日常的生活经验中知道,是与矿粒的粒度 d 和形状 χ 、介质的密度 Δ 和黏度 μ 、矿粒与介质的相对运动速度 v ,以及矿粒运动的取向 Φ 有关的。

2.1.2.3 自由沉降和干涉沉降

在重力选矿实践过程中, 介质内存在大量的矿粒, 即矿浆浓度有的高、有的低。当矿浆浓度较低时(容积浓度小于3%), 矿粒在其中沉降除受到介质阻力外, 周围矿粒和器壁对其直接的干涉(即机械阻力)很小, 可忽略不计。这种沉降称作自由沉降。当矿浆浓度增大后, 矿粒受到周围矿粒的直接摩擦和碰撞, 以及它们间接通过介质而来的干涉增大, 而且浓度愈大, 机械阻力愈大, 干涉作用愈强。此时的沉降称为干涉沉降。

矿粒在静止介质中沉降时, 只受到重力和介质阻力的作用。当矿粒在重力作用下开始沉降时, 重力大于阻力, 加速度方向与重力方向相同且较大, 因而速度渐增, 阻力也随之增大, 矿粒所受的合力减小, 加速度也减小。当矿粒的沉降速度达到某一定值时, 阻力与重力相平衡, 这时加速度等于零, 矿粒等于不受外力的作用, 速度将不发生变化, 矿粒一直以这一速度沉降下去。此沉降速度称作矿粒自由沉降末速, 通常以 v_0 表示。

由于矿粒的自由沉降末速与矿粒的密度、粒度和形状有关, 因而在同一介质中, 密度、粒度和形状不相同的矿粒, 在特定条件下, 可以有相同的自由沉降末速。这类矿粒称为等降粒, 这种现象称为等降现象。等降现象在重力选矿中具有重要的意义。对于由不同密度组成的矿粒群, 在水力分级方法测定其粒度组成时, 可以看到, 同一级别中轻矿物颗粒普遍比重矿物粒度要大些, 轻矿物粒度与重矿物粒度之比值应等于等降比。

由于性质不同的矿粒群在干涉沉降时的规律目前还不太清楚, 因此在后面讨论各个过程中矿粒的运动时, 仍不能不以矿粒自由沉降规律以及简单形成的干涉沉降规律作为认识复杂现象的基础。

复习思考题

- 2.1-1 重力选矿过程分哪些部分?
- 2.1-2 如何测定矿粒的相对密度?
- 2.1-3 什么是自由沉降和干涉沉降?

2.2 水力分级

2.2.1 概述

2.2.1.1 矿粒在三种运动形式的介质中的分级

水力分级是根据矿粒在运动介质——水中沉降速度不同, 将宽级别矿粒群分为若干个粒度不同的窄级别的过程。

在分级作业中, 介质大致有三种运动形式: 垂直上升的、接近水平的和回转运动的。在上升水流中, 不同粒度的矿粒, 则根据其自由沉降或干涉沉降速度与上升水流速度之差, 或者向上运动, 或者向下运动。沉降速度大于上升水流速度的粗颗粒, 将沉积到容器底部, 作为沉砂排出。沉降速度小于上升水流速度的矿粒, 则向上运动由容器上端排出, 成为溢流, 如图 2-1(a) 所示。如果要得到多个粒级产物, 则可将第一次分出的溢流(或沉砂)在流速依次减小(或增大)的上升水流中继续沉降分离。

在接近于水平流动的水流中进行分级时, 矿粒在水平方向运动的速度, 与水流速度大致相同。而在垂直方向则依粒度、密度、形状不同而有不同的沉降速度, 粗矿粒较早地沉降下来落

在槽底成为沉砂，细矿粒则随水流流出槽外成为溢流。分级过程仍按矿粒沉降速度差进行，如图 2-1(b) 所示。

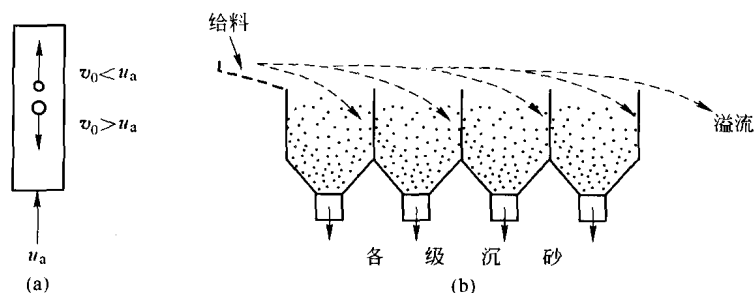


图 2-1 矿粒在垂直上升或接近水平流动的水流中分级

(a) 垂直流；(b) 水平流

v_0 —矿粒沉降速度； u_a —上升水流速度

在回转流中，矿粒是按径向的速度差分离的，水流的向心流速是决定分级粒度的基本因素。水流的向心流速即相当于上述的垂直上升流速，离心沉降速度大于水流向心流速的粗矿粒将进入沉砂，离心沉降速度小于水流向心流速的细矿粒则进入溢流。

2.2.1.2 水力分级与筛分产物的区别

生产实践中，水力分级的给矿是由粒度、密度及形状均不相同的矿粒群组成的。而矿粒的沉降速度不仅和粒度有关，而且和密度、形状以及沉降条件(干涉条件)有关。因此分级产物和筛分产物不同，不是粒度均匀的颗粒，而是沉降速度相同的等降颗粒，即相对密度大的粒度小，相对密度小的粒度大。

筛分多用于处理粒度大于 2~3mm 的物料。由于细粒物料用筛分进行分级时的生产率和筛分效率很低，筛网不易制造，筛面强度亦不够，因此，对小于 2~3mm 的物料常采用水力分级。

2.2.1.3 分级的界限尺寸

分级产物的粒度同样以该粒级最大与最小颗粒的尺寸度量，例如 $-1+0.2\text{mm}$ 。这里的粒度通常用筛分法测定，并以通过 95% 矿量的筛孔尺寸表示。而对微细粒级则用水析法测量。此外，产物的粒度亦可用某特定粒级(例如 -0.074mm)的含量表示。但是这些度量方法，只能来说明分级产物的粒度范围，而不能表示出分级的界限尺寸，这与筛分法不同。分级的界限尺寸可有两种方法衡量。一是按分级的水流速度条件，以沉降速度等于该上升水流速度的标准矿物(我国常用石英 $\delta = 2.65\text{g/cm}^3$)的粒度代表界限粒度，称为分级粒度。而粒度等于分级粒度的矿粒，叫临界矿粒。大于分级粒度的矿粒将进入沉砂，小于分级粒度的矿粒将进入溢流。但是由于计算上的误差以及水流速度很难保持稳定，这种分级粒度常与实际的界限尺寸有某些偏差。第二种比较科学的评定分级界限尺寸的方法是对分级产物进行筛分或水析，以沉砂和溢流中分配率各占 50% 的极窄级别的粒度作为界限尺寸，称作分离粒度。后一种方法符合概率论原理，且是实际界限尺寸，但只能在分级后查定。

2.2.1.4 分级作业用途

分级作业的用途有：

(1) 重力选矿前的准备作业，用来减少粒度对选别的影响；

- (2) 与磨矿机联合工作, 控制磨矿产品粒度;
- (3) 对原矿或选别产物进行脱泥、脱水;
- (4) 测定微细粒物料(多为 -0.074mm)的粒度组成。

2.2.2 分级效率

水力分级过程的精确度可用分级效率来表示。将混合物料分成粗细两级时, 分级效率表示细粒级分到细产品(溢流)中的完全程度。

常用的评定分级效率的方法有两种。第一种是以细级别在溢流中的回收率来计算的分级效率。此分级效率只反映出分级过程中量的变化关系, 称作分级量效率, 以 $E_{\text{量}}$ 表示; 第二种是以有效分出的细级别在溢流中的回收率来计算的分级效率, 此分级效率才真正反映出分级过程的质的好坏, 称作分级质效率, 以 $E_{\text{质}}$ 表示。

2.2.2.1 分级的量效率 $E_{\text{量}}$

根据分级物料的相对质量(产率)的平衡关系有:

$$\gamma_0 = \gamma + \gamma_c \quad (2-3)$$

式中 γ ——分级时溢流的产率, %;

γ_0 ——给矿产率, 对作业 $\gamma_0 = 100$, %;

γ_c ——沉砂产率, %。

由式(2-3)移项可得沉砂产率:

$$\gamma_c = \gamma_0 - \gamma = 100 - \gamma \quad (2-4)$$

分级时细粒级物料平衡方程式为:

$$100\alpha = \gamma\beta + (100 - \gamma)\theta \quad (2-5)$$

式中 α ——给矿中小于分离粒度的细粒级含量, %;

β ——溢流中小于分离粒度的细粒级含量, %;

θ ——沉砂中小于分离粒度的细粒级含量, %。

解式(2-5)得:

$$\gamma = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta} \times 100 \quad (2-6)$$

则分级量效率为:

$$E_{\text{量}} = \frac{\gamma\beta}{100\alpha} \times 100 = \frac{\beta(\alpha - \theta)}{\alpha(\beta - \theta)} \times 100, \% \quad (2-7)$$

2.2.2.2 分级的质效率 $E_{\text{质}}$

式(2-7)只有当溢流中不含大于分离粒度的矿粒时才是合理的。事实上分级机所得的溢流中要混入一部分粗粒。显然, 如果分级时使全部给矿都进入溢流, 即细粒级全部回收到溢流中, 按式(2-7)计算所得分级量效率 $E_{\text{量}}$ 为 100%, 但实际上等于没有分级, 分级效率应为零。为了确切反映分级的好坏, 则要采用分级质效率, 即在确定分级效率时, 不应考虑分级时进入细粒产物的全部细粒量, 而只考虑分级过程中有效分出的细粒量。所谓有效分出的细粒量等于进入细粒产物中的全部物料减去其中混入的粗粒以及与这一部分粗粒构成和给矿有相同粒度组成所需要的细粒量。如图 2-2 所示。