



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

新编选矿概论

魏德洲 高淑玲 刘文刚 编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

新编选矿概论

东北大学 魏德洲 高淑玲 刘文刚 编

北京
冶金工业出版社
2012

内 容 提 要

本书系统介绍了有关矿石分选的基本概念、基本原理、主要设备和常见的分选工艺。全书共分为6章,较为详细地介绍了选矿试验研究和工业生产过程所涉及的基本知识;矿石给入分选作业前对其进行破碎筛分和磨矿分级处理所涉及的粒度分析原理和仪器设备,破碎设备、筛分机械、磨矿机和分级机的类型、主要构造、工作原理和性能;矿物的磁性和电性,利用矿物的磁性或电性对其进行分选的原理、设备、工艺和影响因素;矿物颗粒在介质中的沉降运动规律,依据矿物密度的差异对其进行分选的主要方法、主要设备的工作原理和特点,重选的主要应用场合;矿物颗粒表面的性质,依据矿物颗粒表面性质的差异对其进行分选的基本原理,浮选药剂的分类和性能,主要浮选设备的特点和工艺特性;选矿生产过程所涉及的主要辅助作业和尾矿的处置方法。本书旨在使选矿过程所涉及的概念、理论、设备和工艺成为统一的有机整体。

本书可作为采矿工程、冶金工程等与矿物加工工程关系密切专业的本科生产选修课教材,也可作为矿业领域科学研究、技术开发和工程设计技术人员的工具书,还可供能源、冶金、化工、环境、建筑、农业等部门从事与固体物料分选有关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新编选矿概论/魏德洲,高淑玲,刘文刚编. —北京:冶金工业出版社,2012.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6045-7

I. ①新… II. ①魏… ②高… ③刘… III. ①选矿—高等学校—教材 IV. ①TD9

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第224532号

出版人 谭学余

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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 王 优 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6045-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2012年10月第1版,2012年10月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;13.75印张;327千字;208页

26.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着地壳中矿产资源不断地被开发利用，禀赋好的固体矿产资源日趋枯竭，为了满足经济发展和国家建设的需要，越来越多的难选冶矿石必须被加工利用，这就给选矿工作者带来了一个接一个的严峻挑战。面对矿石贫、细、杂等日益突出的客观实际，选矿工作者不得不迎难而上，探索新途径，研究新方法，开发新工艺，借以实现不可再生资源的高效、合理利用，为国民经济的可持续发展提供支持。在这样的大环境下，为了更好地普及选矿知识，满足从事或即将从事矿业工程及相关领域工作的工程技术人员对选矿基本知识的需求，我们在吸纳相关书籍的精髓和总结研究成果的基础上编写了本书，以期对相关人士有所裨益。

本书由东北大学魏德洲、高淑玲、刘文刚合作编写，其中第1章和第6章由魏德洲编写，第2章和第3章由高淑玲编写，第4章和第5章由刘文刚编写。东北大学韩聪、王倩倩、崔宝玉、朴正杰、张瑞洋、卢涛、李明阳等参加了本书资料收集和文字录入工作。魏德洲对全书做了统一整理和修改。在编写过程中，参考了大量的相关资料，对其著作权人和出版社给予的帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平所限，书中不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编 者
2012年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 选矿的任务及发展简史	1
1.2 常用的选矿方法	1
1.3 选矿的基本过程及常用术语	2
复习思考题	5
2 破碎与磨矿	6
2.1 碎散物料的粒度组成及分析	6
2.1.1 粒度组成及粒度分析	6
2.1.2 筛分分析	8
2.2 工业筛分及筛分机械	11
2.2.1 筛分过程及其评价	11
2.2.2 筛分机械	12
2.2.3 筛分过程的影响因素及筛分机生产能力计算	19
2.3 矿石的破碎	21
2.3.1 概述	21
2.3.2 破碎设备	22
2.3.3 破碎过程的影响因素及破碎机生产能力计算	30
2.4 磨矿	32
2.4.1 磨矿作业的评价指标	32
2.4.2 钢球在磨机内的运动及其磨矿作用	33
2.4.3 球磨机和棒磨机	35
2.4.4 自磨机和砾磨机	43
2.4.5 磨机生产率计算	47
2.5 破碎与磨矿流程	49
2.5.1 破碎流程	49
2.5.2 磨矿流程	49
2.5.3 自磨和砾磨流程	51
复习思考题	53
3 磁选与电选	54
3.1 磁选的基本原理	54

3.1.1	磁选的物理基础	54
3.1.2	磁性颗粒在非均匀磁场中所受的磁力	57
3.1.3	磁选过程所需要的磁力	58
3.2	矿物的磁性	60
3.2.1	强磁性矿物的磁性	60
3.2.2	弱磁性矿物的磁性	63
3.2.3	弱磁性铁矿物的磁性转变	64
3.2.4	矿物的磁性对磁选过程的影响	66
3.3	磁分离空间的磁场特性	67
3.3.1	磁选机的磁系	67
3.3.2	开放磁系的磁场特性及其影响因素	68
3.3.3	闭合磁系的磁场特性	69
3.4	磁选设备	76
3.4.1	弱磁场磁选设备	77
3.4.2	中磁场磁选设备	85
3.4.3	强磁场磁选设备	86
3.5	电选	92
3.5.1	电选的基本原理	93
3.5.2	电选机	98
3.5.3	电选过程的影响因素	101
	复习思考题	103
4	重选	104
4.1	颗粒在介质中的沉降运动	105
4.1.1	介质的性质及其对颗粒运动的影响	105
4.1.2	球形颗粒在介质中的自由沉降	109
4.1.3	颗粒在悬浮粒群中的干涉沉降	110
4.2	水力分级	114
4.2.1	水力分析	115
4.2.2	多室及单槽水力分级机	117
4.2.3	螺旋分级机	121
4.2.4	水力旋流器	123
4.2.5	分级效果的评价	125
4.3	重介质分选	127
4.3.1	重悬浮液的性质	128
4.3.2	重介质分选设备	130
4.4	跳汰分选	135
4.4.1	物料在跳汰机内的分选过程	136
4.4.2	跳汰机	140

4.4.3 影响跳汰分选的工艺因素	146
4.5 溜槽分选	147
4.5.1 粗粒溜槽	147
4.5.2 扇形溜槽和圆锥选矿机	148
4.5.3 螺旋选矿机和螺旋溜槽	150
4.5.4 离心选矿机	152
4.6 摇床分选	153
4.6.1 摇床的分选原理	154
4.6.2 摇床的类型	157
4.6.3 摇床分选的影响因素	161
复习思考题	161
5 浮选	162
5.1 浮选理论基础	162
5.1.1 固体表面的润湿性及可浮性	162
5.1.2 两相界面的双电层	164
5.1.3 矿物颗粒表面的吸附	168
5.2 浮选药剂	169
5.2.1 浮选药剂的分类与作用	169
5.2.2 捕收剂	171
5.2.3 起泡剂	178
5.2.4 调整剂	179
5.3 浮选设备	184
5.3.1 浮选机的分类	184
5.3.2 自吸气机械搅拌式浮选机	185
5.3.3 充气机械搅拌式浮选机	188
5.3.4 气升式浮选机	189
5.3.5 詹姆森浮选槽	192
5.4 浮选工艺	192
5.4.1 粒度对浮选过程的影响	192
5.4.2 浮选药剂制度	193
5.4.3 矿浆浓度及其调整	194
5.4.4 浮选泡沫及其调节	194
5.4.5 浮选流程	195
复习思考题	198
6 选矿产品脱水及尾矿处置	199
6.1 选矿产品脱水	199
6.1.1 浓缩	199

6.1.2 过滤	201
6.1.3 干燥	203
6.2 选矿厂尾矿处置	204
6.2.1 尾矿的贮存	204
6.2.2 尾矿水的循环使用	205
复习思考题	206
参考文献	207

1 绪 论

1.1 选矿的任务及发展简史

选矿通常是指对固体矿产资源（矿石和煤炭），依据其所包含的不同组分之间某些性质的差异进行分离的过程。其目的在于更合理、更充分地开发利用矿产资源。例如，对于低品位的铁矿石，如果不进行分选富集，则会由于技术或经济原因而无法将其用来炼铁，从而使之成为一种不能合理利用的含铁岩石。又如，开采出来的原煤如果不进行分选提纯和除杂，一方面，会因矸石含量太高而使运输费用和灰分上升、热值下降；另一方面，还会因硫含量过高致使其燃烧时产生大量的二氧化硫污染环境，所有这些都使得煤炭的利用价值大幅度下降，尤其是一些高硫煤，甚至因缺乏技术上合理、经济上可行的分选工艺而无法被开采利用。由此可见，对固体矿产资源进行合理而有效的分选，是最大限度地利用自然资源、促进技术发展和经济进步的必要步骤。

最简单而古老的选矿方法是人工拣选，即人们凭借直接观察、感觉和判断，对矿石中的不同组分进行分选。尽管无法探究人工拣选和重选究竟哪一种首先被人们所掌握以及何时、何地被人们首次利用，但第一种实现机械化生产的分选方法无疑是重选。

起初，人们在日常生活中逐渐掌握了依据固体物料中不同组分的密度差异，借助于水流或空气流的作用（流体动力作用）对其按密度进行分类的技术（如淘米、扬场等），这就是典型的重选方法。后来，由于冶金技术的发展，为了满足生产需要，人们在将人工拣选技术用于分选金属矿石的同时，又将所掌握的重选技术应用到了金属矿石的分选过程中，从而宣告了重选工艺的正式问世。当然，那时的生产技术十分落后，处理的大都是砂矿或仅经过人工破碎、成分比较简单的金属矿石。

随着冶金工业的进一步发展和多金属复合矿石的开发利用，尽管重选方法已于19世纪30~40年代进入机械化生产的历史阶段，但仅利用单一的重选方法仍远远不能满足实际生产的需要。于是，人们经过大量的试验研究，又于20世纪初相继将浮选和磁选方法成功地应用到选矿工业生产中，从而开始了3种选矿方法鼎立并存的历史。

1.2 常用的选矿方法

依据矿石（煤炭）中各组分之间密度的差异进行的分选称为重选。依据矿石（煤炭）中各组分之间磁性的差异进行的分选称为磁选。依据矿石（煤炭）中各组分之间电学性质的不同进行的分选称为电选。依据矿石（煤炭）中各组分之间颗粒表面润湿性的差异进行的分选称为浮选。依据矿石（煤炭）中各组分之间颜色、光泽、放射性等的差异进行的分选称为拣选。分选可利用的物料性质及常用的分选方法如表1-1所示。

表 1-1 分选可利用的物料性质及常用的分选方法

物料性质	分选方法	工 艺
密度	重选	洗矿、分级、重介质分选、跳汰分选、摇床分选、溜槽分选、风力分选、磁流体分选等
磁性	磁选	弱磁场磁选、强磁场磁选等
导电性	电选	高压电选
润湿性	浮选	泡沫浮选、表层浮选、油浮选、油球团分选、台浮、液-液分离、离子浮选、油膏分选等
颜色、光泽、放射性等	拣选	手选、光电拣选、X 射线激发检测拣选、放射性检测拣选、中子吸收检测拣选、红外扫描热体拣选等

选矿方法的应用可大致归纳为如下 7 个方面：

(1) 将待选原料按照一定的要求分选成不同的产品，以满足生产需要或增加其使用价值。例如，火力发电厂产出的粉煤灰中含有一些空心微珠，其可用作生产防火涂料的原料，而其他组分则可用作制砖原料，应用重选方法将这两种组分分选开，分别用于满足不同的生产目的，以增加粉煤灰的利用价值。

(2) 将矿石中有价成分富集起来，使之达到冶炼或其他工业上规定的要求，以便合理地、经济地、有效地利用矿产资源。例如，通常开采出的钼矿石其钼含量仅有千分之几或万分之几，对于如此低的钼含量，无论采用什么样的冶炼技术也无法对其直接进行冶炼，必须首先进行富集，分选出钼含量达 40% 以上的钼精矿，然后方能进行冶炼。

(3) 除去矿石中所含的有害杂质，使之易于或能够被利用。例如，一些铁含量较高的高岭土矿石，如果不利用某些分选方法有效地脱除其中的大部分铁，它就不能被用来生产陶瓷制品或用作工业填料和涂料。

(4) 将矿石中多种有用矿物分选成各种精矿产品，以利于分别加工利用。例如，含铜、铅、锌的多金属硫化物矿石，在用来冶炼提取金属铜、铅、锌之前必须将其分选成铜精矿、铅精矿和锌精矿，否则冶炼过程将无法进行。

(5) 从废物、废渣（如城市固体垃圾、冶炼炉渣、电解泥等）中回收有价成分，以解决废物利用问题。例如，生产铁合金的冶炼炉渣中含有一些铁颗粒，如果不将其中的铁分选出来，不仅会造成资源的大量浪费，这些炉渣也无法用于其他目的。

(6) 从废液或工业废水中回收有价成分或净化排放污水，以保护自然环境。例如，工业废水中常常含有不同性质的固体悬浮物，根据这些悬浮物的具体性质，可利用浮选、重选或磁选方法予以回收，既充分利用了资源，又达到了净化工业废水的目的。

(7) 从空气或废气中分离出粉尘，以控制大气污染。在工业生产过程中往往会产生一些粉尘扩散到周围的大气中，由于粉尘颗粒与空气之间存在着明显的密度差异，可利用重选或过滤的方法将粉尘回收，达到净化空气的目的。

1.3 选矿的基本过程及常用术语

从对待选物料进行分选的依据中可以看出，无论采用哪种分选方法，保证分选过程有效进行的前提都是待分选物料中各组分之间存在并能表现出某些物理及化学性质方面的差异。因此，在对固体物料进行分选之前，必须使各种组分（或其中的一部分）基本上呈

单体状态,也就是说,给入分选作业的物料在粒度符合选别作业要求的同时,还必须是包含具有不同物理及化学性质颗粒的碎散物料粒群,这样才能实现有效的分选。正是由于这一实际要求,在对固体物料进行分选之前,一般都需经过破碎、筛分和磨矿、分级作业,以制备出符合分选作业要求的给矿。所以,选矿过程大都包括破碎与磨矿、分选作业和产品处理3个基本环节。

在选矿试验研究和工业生产实践中经常遇到的术语如下:

(1) 原矿(原煤),即指矿山开采出的、没有进行过加工的矿石(煤炭),也就是给入选矿厂(选煤厂)的待分选矿石(煤炭)。

(2) 给料(给矿),即指给入某一个选别回路或者分选设备的物料。

(3) 高密度产物(重选精矿),即指经过重选而得到的、主要由高密度颗粒组成的产品。

(4) 低密度产物(重选尾矿),即指经过重选而得到的、主要由低密度颗粒组成的产品。

(5) 磁性产物(磁选精矿),即指经过磁选而得到的、主要由磁性颗粒组成的产品。

(6) 非磁性产物(磁选尾矿),即指经过磁选而得到的、主要由非磁性颗粒组成的产品。

(7) 疏水性产物(浮选泡沫),即指经过浮选而得到的、主要由疏水性颗粒组成的产品。

(8) 亲水性产物(槽内产物),即指经过浮选而得到的、主要由亲水性颗粒组成的产品。

(9) 导体产物,即指经过电选而得到的、主要由导体颗粒组成的产品。

(10) 非导体产物,即指经过电选而得到的、主要由非导体颗粒组成的产品。

(11) 中矿,即指分选过程产出的、需要进一步处理的中间产品。

(12) 精矿,即指分选作业或选矿厂得出的、富含一种或几种欲回收成分的产物,如铁精矿(富含铁的产物)、铜精矿(富含铜的产物)、铜铅混合精矿(富含铜和铅的产物)。

(13) 尾矿,即指分选作业或选矿厂得出的、主要由脉石矿物组成的产物。

(14) 品位,即指给料或产物中某种成分(如元素、化合物或矿物等)的质量分数,常用单位为%或 g/t 、 g/m^3 。

(15) 产率,即指某一产物与给料或原料的质量之比,常用字母 γ 表示。

(16) 回收率,即指产物中某种成分的质量与给料或原料中同一成分的质量之比。在工业生产实践中,回收率又细分为理论回收率和实际回收率两种。理论回收率是利用给料和产物的化验品位,基于质量平衡原理计算出来的。对于一个两种产物的分选过程,若给料和两种产物的质量分别为 Q_0 、 Q_1 和 Q_2 ,相应的某种成分的品位分别为 α 、 β 和 θ ,则有:

$$Q_0\alpha = Q_1\beta + Q_2\theta \quad (1-1)$$

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (1-2)$$

由式(1-1)和式(1-2)得: $Q_0(\alpha - \theta) = Q_1(\beta - \theta)$

亦即：

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta} \quad (1-3)$$

根据回收率的定义，得到该成分在产物 Q_1 中的理论回收率 ε 为：

$$\varepsilon = \frac{Q_1 \beta}{Q_0 \alpha} \times 100\% = \frac{\beta(\alpha - \theta)}{\alpha(\beta - \theta)} \times 100\% \quad (1-4)$$

式(1-4)即为理论回收率的计算式。根据定义，产物 Q_1 的产率 γ 的计算式为：

$$\gamma = \frac{Q_1}{Q_0} \times 100\% = \frac{\alpha - \theta}{\beta - \theta} \times 100\% \quad (1-5)$$

因此，理论回收率的计算式又可以表示为：

$$\varepsilon = \frac{\beta}{\alpha} \gamma \quad (1-6)$$

对于实际回收率，则是直接对给矿和产物进行计量和品位化验，并根据所得数据直接计算出的回收率，亦即：

$$\varepsilon_{\text{实际}} = \frac{Q_1 \beta}{Q_0 \alpha} \times 100\% \quad (1-7)$$

(17) 选矿比，即指选得 1t 最终精矿所需原矿的吨数。

(18) 富集比，即指产物中某种成分的品位与给料中同一成分的品位之比。

(19) 选矿工艺流程图，即指表示分选过程的作业顺序及产品流向的线路图，见图 1-1。其中，A、B、C 3 个部分又分别称为破碎流程、磨矿流程和分选流程。

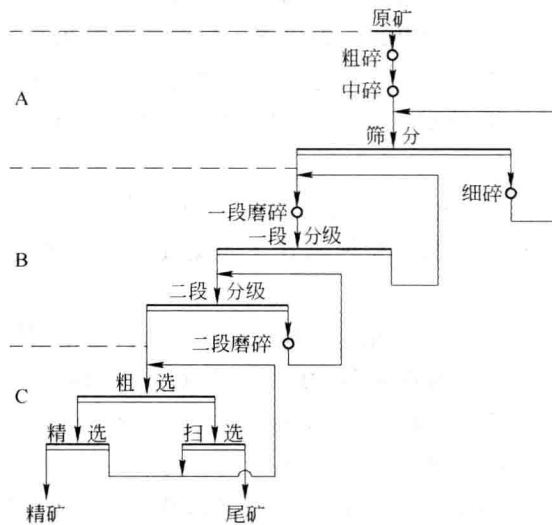


图 1-1 选矿工艺流程图

(20) 单体颗粒，即指仅含有一种化学成分（组分）或物质的颗粒。

(21) 连生体颗粒，即指含有两种或两种以上组分或物质的颗粒。

(22) 单体解离度，即指给料或分选所得的产物中，某种组分呈单体颗粒存在的量占给料或产物中该组分总量的百分数。

复习思考题

- 1-1 选矿的主要任务是什么？
- 1-2 对矿石进行分选的依据有哪些，相应的分选方法是什么？
- 1-3 选矿涉及的主要术语有哪些，它们的具体定义是什么？

2 破碎与磨矿

破碎与磨矿是对矿石进行分选前的准备环节，包括破碎、筛分和磨矿、分级等作业，其目的就是为分选作业制备适宜的给料。

2.1 碎散物料的粒度组成及分析

如前所述，选矿过程处理的都是碎散物料，给料和产物的粒度组成情况是评价这些作业情况的一项重要技术指标。为了准确而客观地评价它们的作业效果，规范碎散物料粒度组成的表示方法和分析方法是必要的。

2.1.1 粒度组成及粒度分析

2.1.1.1 粒度及其表示方法

所谓粒度，简言之，就是颗粒或粒子大小的量度。它表明物料（矿石）粉碎的程度，一般用 mm 或 μm 作单位。在实际工作中，粒度通常借用“直径”一词来表示，记为 d 。例如，球形颗粒的直径用球的直径表示，立方体颗粒的直径用其边长表示。对于这些形状规则的颗粒，表示它们的粒度的确是一件非常容易的事情，然而遗憾的是，碎散物料的颗粒形状大都是不规则的，若要表示它们的粒度，则需要测定出它们的长（ a ）、宽（ b ）、厚（ c ）3 个垂直方向的尺寸，用其平均值表示它们的直径（ d ），亦即：

$$d = (a + b + c) / 3 \quad (2-1)$$

对于单个颗粒，用粒度表示它们的尺寸大小就足够了；但对于包含众多颗粒的碎散物料来说，测定出每一个颗粒的尺寸不但不实际，而且也无法确定用哪一个颗粒的粒度来描述它们的集体尺寸特征。由此可见，仅用粒度的概念根本无法清楚表示碎散物料的尺寸特征。为了弥补这一缺欠，人们又建立了粒级、粒度组成和平均粒度的概念，以便从不同的方面准确描述物料的尺寸特征。

采用某种分级方法（如筛分）将粒度范围较宽的碎散物料分成粒度范围较窄的若干个级别，这些级别即称为粒级。粒级通常以它们的上限尺寸（ d_1 ）和下限尺寸（ d_2 ）表示，如 $d_1 \sim d_2$ 、 $-d_1 + d_2$ 、 $d_2 \sim d_1$ 等。

粒度组成是记录碎散物料中各个粒级的质量分数或累计质量分数的文字资料。它表明物料的粒度构成情况，是对碎散物料粒度分布特征的一种数字描述。

平均粒度是碎散物料中颗粒粒度大小的一种统计表示方法。单一粒级的平均粒度（ d ）是其上限尺寸（ d_1 ）和下限尺寸（ d_2 ）的算术平均值，亦即：

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad (2-2)$$

由多个粒级组成的物料可以看做是一个统计集合体，其平均粒度一般用统计学中求平均值的方法来计算。依据采用的计算方法，又可将计算出的平均粒度细分为加权算术平均

粒度 ($d_{算}$)、加权几何平均粒度 ($d_{几}$) 及调和平均粒度 ($d_{调}$)。若用 d_i 表示物料中某一粒级的平均粒度, 用 γ_i 表示平均粒度为 d_i 的粒级在物料中的质量分数, 则上述 3 种平均粒度的计算式分别为:

$$d_{算} = \sum (\gamma_i \cdot d_i) / \sum \gamma_i = \sum (\gamma_i \cdot d_i) \quad (2-3)$$

$$d_{几} = (d_1^{\gamma_1} d_2^{\gamma_2} \cdots d_n^{\gamma_n}) / \sum \gamma_i = d_1^{\gamma_1} d_2^{\gamma_2} \cdots d_n^{\gamma_n} \quad (2-4)$$

或 $\lg d_{几} = \sum (\gamma_i \cdot \lg d_i) \quad (2-5)$

$$d_{调} = \sum \gamma_i / \sum (\gamma_i / d_i) = 1 / \sum (\gamma_i / d_i) \quad (2-6)$$

对于同一碎散物料, 用不同统计计算方法计算出的平均粒度一般也是不相同的。其数值的大小顺序为: $d_{算} > d_{几} > d_{调}$, 而且计算时粒级分得越多, 这 3 种平均粒度的数值就越接近, 计算出的结果也越准确。基于这一情况, 在实践中, 当每个粒级的上限粒度与下限粒度之比不大于 $\sqrt{2}$ 时, 常采用加权算术平均粒度表示碎散物料的平均粒度。

平均粒度虽然反映了碎散物料中颗粒粒度的平均大小, 从一个侧面描述了物料的粒度特征, 但它并不能全面地说明物料的粒度特征。例如, 尽管两种碎散物料的加权算术平均粒度都是 10mm, 但其中一种的上限粒度为 30mm、下限粒度为 0mm, 而另一种的上限粒度为 15mm、下限粒度为 6mm。又如, 尽管两种碎散物料的平均粒度相同, 但它们各个相同粒级的质量分数却完全不同。因此, 为了更充分地描述物料的粒度特征, 在实际工作中除采用平均粒度外, 还引入了偏差系数 ($K_{偏}$) 来描述物料中颗粒粒度的均匀程度。偏差系数的计算式为:

$$K_{偏} = \frac{\sigma}{d_{算}} \times 100\% \quad (2-7)$$

式中, σ 为标准差, 亦即:

$$\sigma = \sqrt{\sum (d_i - d_{算})^2 \gamma_i} \quad (2-8)$$

一般认为, $K_{偏} < 40\%$ 的物料是粒度均匀物料, $K_{偏} = 40\% \sim 60\%$ 的物料是粒度中等均匀物料, 而 $K_{偏} > 60\%$ 的物料则是粒度不均匀物料。

2.1.1.2 粒度分析方法

如前所述, 对于单个颗粒, 通过线测法可以直接测出它的粒度, 但这只能在一些特殊的情况下才能采用; 对于一种大吨位的碎散物料, 只能借助于粒度分析方法来测定它的粒度组成情况。所谓粒度分析, 就是确定物料粒度组成的试验。目前, 在实际工作中常采用的粒度分析方法主要有筛分分析法、水力沉降分析法、显微镜分析法和激光粒度分析仪分析法。

筛分分析法通常简称为筛析法, 即指利用筛孔大小不同的一套筛子对物料进行粒度分析的方法。采用 n 层筛子可把物料分成 $n+1$ 个粒级, 每个粒级的粒度上限是该粒级中所有颗粒都能通过的 (也就是上面一层筛子的) 方形筛孔的边长 (b_1), 而它的粒度下限则是其中所有颗粒都不能通过的 (也就是下面一层筛子的) 方形筛孔的边长 (b_2)。因此, 两层筛子之间的这一粒级的粒度就可表示为 $-b_1 + b_2$ 或 $b_1 \sim b_2$ 。筛分分析适用的物料粒度范围为 0.01 ~ 100mm, 其中粒度大于 0.1mm 的物料多采用干筛, 而粒度在 0.1mm 以下的物料则常采用湿筛。这种粒度分析方法的优点是设备简单、操作容易, 其缺点是颗粒形状对分析结果的影响较大。

水力沉降分析法通常简称为水析法, 即指利用不同粒度颗粒在水中沉降速度的差异,

将物料分成若干粒度级别的分析方法。它与筛析法的区别在于,测得的结果是具有相同沉降速度的颗粒的当量直径,而不是颗粒的实际尺寸。此外,这种分析方法的测定结果既受颗粒形状的影响,又受颗粒密度的影响。因此,当被分析的物料中包含不同密度的颗粒时,通过水析法得到的各个粒级中都将包含高密度的小颗粒和低密度的大颗粒;当被分析的物料中包含密度相同而形状不同的颗粒时,通过水析法得到的各个粒级中又将包含形状规则的小颗粒和形状不规则的大颗粒。水析法适用于对粒度范围为 $1 \sim 75 \mu\text{m}$ 的物料进行粒度分析。

显微镜分析法即指在显微镜下对颗粒的尺寸和形状直接进行观测的一种粒度分析方法。它常用来检查分选作业的产品或校正用水析法所得到的分析结果,其最佳测定粒度范围为 $0.25 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

激光粒度分析仪分析法即指采用激光粒度分析仪对微细粒级物料的样品进行粒度组成测定的分析方法。这种粒度分析方法的优点是节省时间,检测结果使用方便, $1 \sim 2 \text{min}$ 即可完成一个样品的检测,而且检测结果不需要进行任何数据处理。只是该法每次检测使用的样品非常少(小于 1g),为了保证测定结果真实可靠,需要平行测定3次以上,采用测定结果的算术平均值作为最终测定结果。

粒度分析是选矿试验研究及工业生产中的一项重要工作。首先,分选工艺的重要特点之一就是针对不同粒度范围的物料,采用不同的分选方法对其进行分选。其次,在确定分选工艺流程和选择分选设备时,待分选物料的粒度组成是一个必须考虑的重要因素。再次,在评价分选作业的实际工作效果和分析生产过程时,也常常需要对给料和产物进行粒度分析。因此,对于选矿过程,粒度分析是分析问题的一个基本手段,是技术工作中的一项基本操作方法。

2.1.2 筛分分析

筛分分析是最古老的粒度分析方法之一,也是目前试验研究和生产实践中应用最多的粒度分析方法。这种方法实质上就是让已知质量的物料(试样)连续通过筛孔逐层减小的一套筛子,从而把物料分成不同的粒度级别。

2.1.2.1 筛分分析的工具

筛分分析根据待分析物料的粒度范围不同,可采用不同的筛分工具。对于粗粒物料,多采用手筛进行人工筛析;而对于粒度在几毫米以下的物料,则需要采用标准筛在振筛机上进行筛析。

手筛就是把筛网固定在筛框上而构成的筛子,这种筛子可以根据需要随时加工。而标准筛则是一套筛孔尺寸有一定比例、筛孔大小和筛丝直径均按照标准制造的筛子。在使用标准筛时,需要按照筛孔的大小从上到下依次将各个筛子排列起来,这时各个筛子所处的层位次序称为筛序。在叠好的筛序中,相邻两个筛子的筛孔尺寸之比称为筛比。

筛号以前主要以网目命名。所谓网目,就是筛网上每英寸(25.4mm)长度内所具有的方形筛孔的个数。这种筛号的命名方法连续使用了很长时间。近年来广泛采用的筛号命名方法是直接以筛孔的尺寸来命名,与采用网目命名的方法相比,这种命名方法更加直观、准确。

2.1.2.2 筛分分析的方法

用标准筛对物料进行粒度分析时,根据具体情况,可采用干筛,也可以采用干筛和湿筛联合的方式。当物料含水、含泥较少,对分析结果的要求又不是很严格时,可以直接进行干筛;但当物料黏结严重、对分析结果的要求又比较严格时,则需要采用干筛和湿筛联合的方式进行筛分。

干筛一般需要在振筛机上进行 10~30min。判断筛分是否达到终点,需要对每层筛子进行人工筛分检查。当 1min 内筛出的筛下物料质量不大于筛上物料质量的 1% 或不大于所筛物料总质量的 0.1% 时,方可认为筛分达到了终点;否则筛分应继续进行,直到符合上述要求为止。干筛完成后,将筛得的各个粒级分别计量。

干-湿联合筛分是先用标准筛中筛孔尺寸最小的筛子对物料进行湿筛,然后再将所得到的筛上物料烘干、计量,筛上物料的质量与物料原来质量的差值就是经过湿筛筛出的最细一个粒级的质量,最后将筛上物料在振筛机上用全套标准筛进行干筛。筛分结束后,将所得到的各个粒级分别计量,其中干筛所得的最细一个粒级的质量加上湿筛所得的该粒级的质量,即为筛分分析所得到的最细一个粒级的质量。

为了保证筛析结果具有足够的可信度,通过筛析所得到的各个粒级的质量之和与物料原来质量的差值不能超过物料原来质量的 1%,否则筛析结果应视为无效,必须重新进行筛分分析。另外,欲得到准确可靠的筛分分析结果,则筛析试样的质量必须达到有代表性的最小质量。在实际工作中,根据待筛析物料中最大颗粒的粒度,一般按表 2-1 所示选取试样的最小质量。

表 2-1 筛分试样的最小质量

最大颗粒粒度/mm	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	20.0
试样最小质量/kg	0.025	0.05	0.1	0.2	0.5	2.0	5.0	20.0

2.1.2.3 筛分分析结果的处理

当筛析过程的物料质量损失不超过 1% 时,就可以把各个粒级的质量之和作为 100% 来计算。在此基础上,可以采用表格法或曲线法对筛分分析所得的结果进行处理。

所谓表格法,顾名思义,就是把筛析结果填入规定的表格内。常用的表格形式如表 2-2 所示。

表 2-2 筛分分析结果

粒级/mm	质量/kg	个别产率/%	筛上(正)累计产率/%	筛下(负)累计产率/%
-16+12	2.25	15.00	15.00	100.00
-12+8	3.00	20.00	35.00	85.00
-8+4	4.50	30.00	65.00	65.00
-4+2	2.25	15.00	80.00	35.00
-2+0	3.00	20.00	100.00	20.00
合计	15.00	100.00		

表 2-2 中的第 1 栏是粒级,也就是在筛分分析试验中采用的每两个相邻筛子的筛孔