

• 中等专业学校教学用书 •

粉碎工程

冶金工业出版社

ONGDENG ZHUANYE
EXIAO JIAOXUE YONGSHU

中等专业学校教学用书
粉碎工程
长沙有色金属专科学校 雷季纯 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街崇文门东大街39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16印张 13 字数 306 千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数00,001~3,000册

ISBN 7-5024-0774-X

TD·131 (课) 定价2.35元



前 言

本书是根据一九八六年冶金系统召开的采矿、选矿专业中专教材编写会议所制订的选矿专业教学计划和“粉碎工程”教学大纲编写的。它适合中专选矿专业作为教材使用，亦可供建材、化工、煤炭等部门从事粉碎工作的工程技术人员参考。

本书系统论述了国内选矿生产中常用的粉碎、筛分和分级设备的构造、工作原理和工艺性能，以及常见的碎磨工艺流程类型、考查方法和设备的选择计算。在原中专教材的基础上增加了粉碎基本理论，并简要介绍了国内外近年来探索新的粉碎方法和研制新型高效粉碎设备的概况。

全书共分八章，书中绪言、七、八章由南宁有色金属工业学校刘子瑶编写，一、三、四、五章由昆明冶金专科学校吴承启编写，二、六章及实验指导书由长沙有色金属专科学校雷季纯编写。全书由雷季纯主编。

在编写本书的过程中，得到了太原冶金工业学校、福建冶金工业学校以及铜陵有色金属工业学校等有关同志的大力支持。同时，得到了中南工业大学徐秉权副教授的指导，在此，一并致以诚挚的谢意。

由于我们水平有限，经验不足，加之时间仓促，书中必然存在不少缺点和错误，衷心盼望读者批评指正。

编 者

1989年7月

目 录

绪 论	1
第一章 筛分分析	4
第一节 粒度组成及粒度分析	4
第二节 筛分分析	6
第三节 粒度特性曲线	10
复习思考题	14
第二章 筛分过程与筛分机械	15
第一节 概述	15
第二节 筛分过程与筛分概率	16
第三节 筛分效率	18
第四节 筛分动力学及其应用	20
第五节 固定筛	22
第六节 振动筛	24
第七节 其他筛分机械	36
第八节 影响筛分作业的因素	41
第九节 提高筛分工艺指标的措施	46
复习思考题	48
第三章 粉碎矿石的理论基础	50
第一节 粉碎过程的基本概念	50
第二节 岩矿的机械强度 可碎性与可磨性	52
第三节 粉碎机械的施力情况	53
第四节 粉碎功耗学说	54
第五节 粉碎矿石新方法简介	57
复习思考题	59
第四章 破碎机械	60
第一节 破碎机的分类	60
第二节 颚式破碎机	60
第三节 圆锥破碎机	69
第四节 辊式破碎机	84
第五节 反击式破碎机	86
第六节 破碎机生产能力的计算	88
第七节 影响破碎机工作指标的因素	91
复习思考题	94
第五章 破碎筛分流程	96
第一节 破碎筛分流程的结构	96
第二节 常见的破碎筛分流程	98
第三节 破碎筛分流程的考查与分析	99
第四节 破碎筛分设备的操作与维护	103

复习思考题	104
第六章 磨矿机和磨矿理论	106
第一节 概述	106
第二节 球磨机	107
第三节 棒磨机	112
第四节 磨矿过程的基本理论	113
第五节 磨矿机的有用功率	122
第六节 矿石的自磨和砾磨	125
第七节 磨矿机的安装操作与维护检修	133
第八节 磨矿机的发展及超细磨设备简介	136
复习思考题	145
第七章 磨矿循环	146
第一节 概述	146
第二节 磨矿循环中常用的分级设备	146
第三节 闭路磨矿循环的返砂和返砂比	153
第四节 常规磨矿机磨矿分级流程	155
第五节 矿石自磨流程	158
第六节 磨矿动力学基本方程式及其应用	160
复习思考题	168
第八章 影响磨矿机工作效果的因素	169
第一节 磨矿机的主要工作指标	169
第二节 影响磨矿效果的因素	171
第三节 磨矿机计算	181
复习思考题	192
粉碎工程实验指导书	194
参考文献	200

绪 论

一、破碎和磨碎作业在选矿过程中的任务和意义

由矿山开采出来的矿石,除少数富含有用矿物的富矿外,大多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,直接用来冶炼提取金属,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,在冶炼之前必须把矿石首先经过分选或富集,以抛弃绝大部分脉石,使有用矿物富集到符合要求的质量标准。

在选矿工艺过程中,有两个最基本的工序:一个是解离,就是将大块矿石破碎和磨碎(统称粉碎),使矿石中的各种有用矿物粒子碎散解离出来;一个是分选,就是将已解离开了的矿物颗粒按其物理化学性质差异选分为不同的产品。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,如果不首先使各种矿物或成分彼此解离开来,即使它们的性质有再大的差别,也无法进行分选。因此,通过外力作用将有用矿物从矿石中充分碎散解离出来的粉碎作业,是采用任何选别方法都必不可少的先行环节,也是分选效果好坏的关键所在。

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,分选效果固然不好,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,目前就还不能很好回收。所以,选矿厂中的破碎和磨碎作业不仅要为选别作业制备有用矿物与脉石充分解离的入选物料,而且这种物料的粒度要适合于所采用的选别方法,过粉碎微粒应尽可能少。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,这都将导致整个选矿厂技术经济指标的下降。

要把巨大的矿块粉碎成细粒的粉料,必须要有坚固的大型粉碎设备,并要消耗很大的能量。因此,在选矿厂中破碎和磨碎作业的基建投资、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%,电耗占50~65%,钢耗约占50%以上。故破碎和磨碎设备的计算选择及操作管理的好坏,也在很大程度上决定着选矿厂的经济效益。每个选矿工作者都必须认真对待碎磨工序所用的设备,尽可能降低能耗和钢耗,为选别作业生产出尽可能多的合乎质量要求的入选物料。

二、破碎和磨碎工艺的一般特点

由于进入选矿厂的原矿块度通常都很大,有的达到1500mm,而入选的矿料粒度一般又比较细(譬如浮选粒度通常在0.3mm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入选细度。因此,矿石粉碎只能分阶段逐步地进行,破碎和磨碎就是粉碎过程中的两个大阶段。根据粉碎产物的粒度大小,破碎阶段还分为粗碎段(碎到350~100mm)、中碎段(碎到100~40mm)和细碎段(碎到25~6mm),磨碎阶段也分为粗磨段

(磨到1~0.3mm)和细磨段(磨到0.1~0.074mm)。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,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内才能高效率地工作。实际生产所需要的破碎和磨碎段数,要根据矿石性质和所要求的最终磨碎产物粒度来确定。

为了控制破碎和磨碎产物的粒度,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。

三、破碎和磨碎技术的发展概况

破碎和磨碎不仅在选矿厂中是一个重要的工序,而且在建材、冶金、化学、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。据不完全统计,七十年代末期经过粉碎加工的矿石和岩石数量,平均每年接近30亿吨,粉碎这些物料所需的能耗占整个工业能耗的3~4%,钢耗约为五百多万吨。粉碎物料数量之多,能耗和钢耗之大,十分令人瞩目。因而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,降低粉碎的能耗和钢耗,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,已有一百多年历史,取得不少成绩,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,仍是机械破碎法。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。研究已有一定进展,但多处于初期阶段,距实际应用尚远。只有美国斯奈德的减压破碎法已完成了半工业试验,可望不久能在工业上获得应用。

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着。因此,对粉碎设备的改进和创新也很受到重视。近年来,新型的碎磨设备不断问世,如冲击颚式破碎机、超细碎破碎机、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。如破碎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马达,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,减少有用矿物的过磨碎,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,已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),效果颇佳。

为了掌握破碎、筛分和磨碎工艺过程的规律,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,这些理论对于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今后工作打下基础。

第一章 筛 分 分 析

第一节 粒度组成及粒度分析

粉碎以及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，却都有一定的规律性。粒度就是矿块的大小，一般以mm为单位。将矿粒混合物，借用某种方法按粒度分成若干级别，这些级别叫做粒级。用称量法称出各级别的重量并计算出其重量百分率（或累计重量百分率），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，同时物料不同的粒度范围，应采取不同的选别方法，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。根据物料粒度的不同，可以采用下列几种方法。

(1) 筛分分析 筛分分析（简称筛析）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100mm~0.043mm的物料。

(2) 水力沉降分析 当物料的粒度为0.043mm~0.005mm时，则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，这种分析方法，称为水力沉降分析（简称水析）。

(3) 显微镜分析 主要用来分析微细物料，其最佳测定粒度范围为0.04~0.001mm。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”课程中介绍。

一、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. 单个矿块的粒度表示法

对于单个矿块，为了表示它的大小，习惯上用平均直径。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，则可再加测矿块的高度，取长、宽、高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

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

式中 l ——矿块长度；
 b ——矿块宽度；
 h ——矿块高度；

对粒度细小的矿块可以用等值直径 d_p 来表示它的大小。所谓等值直径就是与矿块等体积的球体直径。设矿块的体积为 V ，其重量为 G ，密度为 δ ，而球的体积为 $\pi d^3/6$ ，在等体积的条件下，其等值直径为

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = 1.24\sqrt[3]{V} = 1.24\sqrt[3]{\frac{G}{\delta}} \quad (1-2)$$

2. 粒级的表示法

最常用的粒度表示法是“上下限表示法”。物料进行筛分时，通过筛孔为 a_1 的筛面而留在筛孔为 a_2 的筛面上的矿粒，其粒度表示为：

$$\begin{aligned} & -a_1 + a_2 \text{ 或 } -d_1 + d_2 \\ & a_1 \sim a_2 \text{ 或 } d_1 \sim d_2 \end{aligned}$$

“-”表示小于，“+”表示大于。

二、平均粒度与物料的均匀度

在破碎和磨矿过程中所遇到的矿石都是含有各种粒级的混合物料，而这些混合物料的平均直径对于了解物料的特性，研究粉碎理论，检查破碎磨矿设备的操作指标等，都有重要意义。

平均直径的计算方法，大致可以用于两种情况，一种是粒度范围窄的混合物料，一种是粒度范围宽的混合物料。现分述如下。

1. 粒度范围窄的混合物料

对于这种混合物料，可以用“上下限表示法”并计算其平均直径。即根据混合物料中已知的最小粒度及最大粒度来计算。如上所述物料通过筛孔为 a_1 的筛面而留在筛孔为 a_2 的筛面上的这部分物料的平均直径可以用算术平均值表示

$$d_p = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (1-3)$$

或采用几何平均值 $d_p = \sqrt{a_1 a_2}$ (1-4)

2. 粒度范围宽的混合物料

对于这种混合物料，可首先进行筛析，求出粒度组成后采用统计学求平均值的方法计算平均直径。如已知混合物料中各窄粒级的平均直径分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 …，其产率分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 、…，则该物料平均粒度可用下列几种方法计算

(1) 加权算术平均法

$$d_p = \frac{d_1 r_1 + d_2 r_2 + d_3 r_3 + \dots}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots} = \frac{\sum d_i r_i}{\sum r_i} = \frac{\sum d_i r_i}{100} \quad (1-5)$$

(2) 加权几何平均法

$$d_p = \sum r_i \sqrt{d_1^{r_1} \cdot d_2^{r_2} \cdot d_3^{r_3} \dots} = \sqrt{\sum r_i \cdot d_1^{r_1} \cdot d_2^{r_2} \cdot d_3^{r_3} \dots}$$

取对数

$$\lg d_p = \frac{r_1 \lg d_1 + r_2 \lg d_2 + r_3 \lg d_3 + \dots}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots} = \frac{\sum r_i \lg d_i}{\sum r_i} = \frac{\sum r_i \lg d_i}{100} \quad (1-6)$$

(3) 调和平均法

$$d_p = \frac{\sum r_i}{\sum \frac{r_i}{d_i}} = \frac{100}{\sum \frac{r_i}{d_i}} \quad (1-7)$$

以上三种方法计算所得的结果是

算术平均值 > 几何平均值 > 调和平均值

平均直径虽反映了混合物料的平均粒度，但还不能全面说明物料的粒度性质。因为可能有这种情况，即两批物料的平均直径相等，但它们各相同粒级的产率不同，也可能它们的最大和最小粒度不同。为了能对物料的粒度性质有全面的说明，除平均粒度外，还要用偏差系数 K_p 来说明物料的均匀程度。其计算公式如下

$$K_p = \frac{\sigma}{d_p} \quad (1-8)$$

式中 d_p ——用加权算术平均法 ($\sum r_i d_i / 100$) 求得的平均粒度；

σ ——标准差 $\sigma = \sqrt{\sum (d_i - d_p)^2 r_i / 100}$ 。

通常认为 $K_p < 40\%$ 为均匀的； $K_p = 40\% \sim 60\%$ 为中等均匀的； $K_p > 60\%$ 为不均匀的。

第二节 筛 分 分 析

一、筛分分析所使用的筛子

进行筛分分析，为了分出各种粒级的产品，需要若干个不同筛孔的筛子，常用的筛子有两种，一种是标准套筛，另一种是非标准套筛（又称手筛）。

1. 标准筛

标准筛是筛析的主要工具，多用于磨矿、分级和选别产品的粒度分析。它是一套特制的筛子，在一套筛子中，从上到下，其筛孔大小和筛丝直径都按标准制造，其相邻两个筛子的筛孔大小也有规定的比例。各个筛子按筛孔的绝对尺寸从大到小依次重叠起来，上面有一上盖（防止在筛析过程中试样中微细粒飞扬损失），最下有一底盘（用来承接最下层筛的筛下产物）。

标准筛筛框是圆形的，用塑料或黄铜制成，直径在150~450mm之间，深度为25~50mm，筛网用金属丝编制而成，筛孔大的也有用冲孔筛板的。

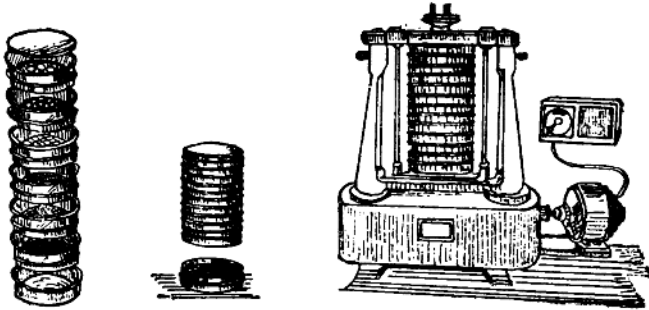


图 1-1 标准筛及震筛器

筛析所用的标准筛及震筛器如图1-1所示。

标准筛的筛制由两个参数决定：(1) 筛比，即相邻两个筛子筛孔尺寸之比；(2) 基筛，是作为基准的筛子。根据筛比和基筛筛孔大小的不同，有各种不同筛制的标准筛。

重要的标准筛有以下几种：

(1) 泰勒标准筛 它是用每一英寸(25.4mm)筛网长度上所具有的筛孔数目作为各号筛子的名称。每一英寸筛网长度上的筛孔数目称为网目，简称“目”。例如每一英寸长的筛网上有200个筛孔，此筛子就叫200号筛(或200目筛)。泰勒标准筛有两个系列，一是基本序列，其筛比为 $\sqrt{2}=1.414$ ，一是附加序列，其筛比为 $\sqrt[3]{2}=1.189$ ，基筛是200目的筛子，其筛孔尺寸为 $0.07366\approx 0.074\text{mm}$ 。

以200目的基筛为起点，对于基本筛序而言，比它粗一级筛子的筛孔为 $0.074\times\sqrt{2}=0.104\text{mm}$ ，即150目，更粗一级的筛子，其筛孔尺寸为 $0.074\times\sqrt{2}\times\sqrt{2}=0.147\text{mm}$ ，即100目的筛子，如此类推。比 0.074mm 细一级筛子的筛孔尺寸为 $0.074/\sqrt{2}=0.053\text{mm}$ ，即270目的筛子。一般选矿产物的筛析，只采用基本筛序，如果要求更窄的粒度，才插入附加筛序(筛比为 $\sqrt[3]{2}$)的筛子。

(2) 德国标准筛 这种筛子的“目”是一厘米长的筛网上的筛孔数，或一平方厘米面积上的筛孔数。特点是筛号与筛孔尺寸(单位mm)的乘积约等于6，并规定筛丝直径等于筛孔尺寸的 $2/3$ ，各层筛子的筛网有效面积(所有筛孔的面积与整个筛面的面积之比，用百分数表示)，为36%。

(3) 国际标准筛 这种筛子的基本筛比是 $\sqrt[10]{10}=1.259$ ，对于更精密的筛析，还插入两个附加筛比 $(\sqrt[10]{10})^6=1.41$ 和 $(\sqrt[10]{10})^{12}=1.99$ 。

我国标准筛的筛制尚未公布，常用的上海筛类似泰勒筛。

各种标准筛见表1-1，我国常用的上海筛也列入表中以供参考。

2. 非标准筛

非标准筛是各个厂矿对粒度大的物料(如原矿，或各段破碎机的产物)进行粒度分析，而自行制造的套筛，它没有一定的标准，筛孔要求也不太严格，又多为手工操作，所以叫非标准筛或手筛。筛孔大小根据需要确定。一般为150、120、100、80、70、50、25、12、8、6、3mm等，由于它不是通用的，筛孔尺寸也没有统一规定，筛子的大小也各有不同，可以根据各厂矿的需要自行制造。

近代用光刻电镀技术制造的微目筛，能比丝织筛更精确的测定颗粒更细的物料，它最细的筛孔可达 0.005mm ，用来测定 0.15mm 以下的物料。但由于价格极为昂贵，故极少使用。

二、筛分分析的操作方法

筛析的方法有：干式筛析法，干湿联合筛析法，快速筛析法。一般含泥含水少的物料用干式筛析法。当物料含泥含水多，而且要求筛析的精确度高时，则应采用干湿联合筛析法。快速筛析法常用在生产现厂快速检查磨矿产品或分级产品的粒度。现分别介绍如下。

进行筛析首先应取得有代表性的试样，为了使试样有代表性且重量又最少，其取样方法与化学分析取样方法相同。样品的最小重量与试样中的最大粒度有关，可参照表1-2确定。

1. 干式筛析

表 1-1 常 见 标 准 筛

泰 勒 标 准 筛		德 国 标 准 筛		国 际 标 准 筛	上 海 标 准 筛	
网目(孔/in)	孔径(mm)	网目(孔/cm)	孔径(mm)	孔径 (mm)	网目(孔/in)	孔径(mm)
2.5	7.925	—	—	8	—	—
3	6.680	—	—	6.3	—	—
3.5	5.691	—	—	—	—	—
4	4.699	—	—	5	4	5
5	3.962	—	—	4	5	4
6	3.327	—	—	3.35	6	3.52
7	2.794	—	—	2.8	—	—
8	2.262	—	—	2.36	8	2.616
9	1.981	—	—	2	—	—
10	1.651	4	1.5	1.6	10	1.98
12	1.397	5	1.2	1.4	12	1.66
14	1.168	6	1.02	1.18	14	1.43
16	0.991	—	—	1.0	16	1.27
20	0.833	—	—	0.8	20	0.995
24	0.701	8	0.75	0.71	24	0.823
28	0.589	10	0.6	0.6	28	0.674
32	0.495	11	0.54	0.5	32	0.56
35	0.417	12	0.49	0.4	34	0.533
42	0.351	14	0.43	0.355	42	0.452
48	0.295	16	0.385	0.3	48	0.376
60	0.246	20	0.3	0.25	60	0.295
65	0.208	24	0.25	0.2	70	0.251
80	0.175	30	0.2	0.18	80	0.2
100	0.147	40	0.15	0.15	119	0.129
115	0.124	50	0.12	0.125	120	0.13
150	0.104	60	0.1	0.1	160	0.097
170	0.088	70	0.088	0.09	180	0.09
200	0.074	80	0.075	0.075	200	0.077
230	0.062	100	0.06	0.063	230	0.065
270	0.053	—	—	0.05	280	0.056
325	0.043	—	—	0.04	320	0.05
400	0.038	—	—	—	—	—

注：in—英寸，每一英寸为25.4毫米。

一般粒度大于6mm的粗粒物料，采用非标准筛（手筛）进行筛析，根据需要选用筛孔大小不同的一套筛子，依次将矿石筛分成若干级别，然后分别称出并记录各粒级的重量。

粒度小于6mm的物料，可以在实验室中利用标准筛进行筛析。

由于标准筛的筛网面积小和能承受的重量有限，每次筛析重量为100~250g，如果试样的重量大于250g，则应分成几次进行筛析。

在筛析前，根据物料粒度选择好套筛的筛孔尺寸，并做好记录。把各个筛子按筛孔大小依次套好，最下面放好底盘，将试样倒入最上层筛内，并加筛盖。然后将盛有试样的套筛装在震筛器上并固定牢靠以后，开动震筛器（同时记时间）进行筛分。筛分时间越长，筛析结果越精确。但过长的筛分时间，将增加筛网的磨损，对于脆性矿石还会产生一定的

表 1-2 试样最小重量与试样中最大粒度的关系

矿块最大粒度 (mm)	0.1	0.3	0.5	1	3	5	10	20
试样最小重量 (kg)	0.05	0.10	0.25	0.5	0.9	2.5	5	20

破碎，改变了试样的粒度特性。因此一般筛分时间为15到20分钟。筛分完后将套筛从震筛器上取下，为了判定筛分是否达到终点，将最下层筛子放在铺有橡胶布，塑料布或光面纸等一类具有光滑表面的物件上进行手筛，如果在一分钟内通过筛孔的物料重量不超过留在筛上物料重量的1%，即认为筛分已达到终点，否则还要继续进行筛分，筛分完后，将各粒级物料分别用工业天平称重，并将所得重量填入筛析结果记录表中。

筛析也可以用手进行，用手筛时，从粗筛开始，逐个筛分，其方法是使筛子作平面的往复摇动，同时用手拍击筛框，如此几次，再将筛子转一角度，再摇再拍，直至达到筛分终点。

为了检查筛析过程的精确度，各粒级产物重量的总和，应基本与原试样的重量相等，一般要求损失量不超过1~2%，否则就应重做。在允许范围内的损失量，可以认为是由于操作过程中微粒飞扬而引起的，故可将损失量加到最细级别中，以便和试样原重量相等。

2. 干湿联合筛析

当物料中含泥含水高或要求筛析较精确时，则采用干湿联合筛析法。这种方法是先将干式筛析中所选定最细孔筛（一般为200目筛）放在装有适量水的盆内，将试样（应少于100克，如多于100克，应分批加入）倒入筛中，进行湿筛。每隔一定时间，将盆内水更换一次，直到水不再混浊时为止。为了湿筛能顺利进行，或缩短湿筛时间，应先将试样倒入盛有适量水的盆内洗涤，洗涤后的混浊水，用最细孔的筛隔去。如此反复，直至水不再混浊时，再将试样分批倒入最细孔筛，进行湿筛。这种方法对含泥量越高的物料越是适用。湿筛后，将筛上物烘干，称量，并按前述的干式筛析法进行筛分（此时套筛应包括湿筛时用过的最细孔筛），而且所得最下层筛的筛下产物量，应与湿筛所得的筛下产物量合并计算。湿筛的筛下产物，如还要进行更细的粒度分析（如水析），则应将其过滤、烘干并与干筛的最下层筛的筛下产物合并，称量，再进行更细的粒度分析。如不需再进行更细的粒度分析，则可将它倒去。可用湿筛筛上物烘干后的重量与原试样重量之差，推算出其重量。

3. 快速筛析法

在现厂生产中，为了及时了解磨矿机、分级机工作的好坏，常常要快速测定磨矿机的排矿，分级机溢流和返砂的粒度，以便及时调节闭路磨矿过程的操作条件，为此需采用快速筛析法。快速筛析只要知道某一特定粒级（如-200目）的产率（%）即可，不必进行全面筛析。

快速筛析的方法如下：用容积为 V (mL)，重量为 P (g) 的矿浆壶，先装满矿浆试样，并称重，得出矿浆和壶的总重为 G_1 ；再将矿浆倒入指定检查粒级的筛（如200目筛）上，进行湿筛（其方法与干湿联合筛析法中的湿筛方法相同），筛完后将筛上矿石倒回至壶中，并加清水至原来装矿浆时同一刻度处，再称出筛上物、清水及壶的总重为 G_2 ，则筛

上余留物粒级 (+200目) 的产率 $\gamma_{+200\text{目}}$ 为

$$\gamma_{+200\text{目}} = \frac{G-P-V}{G_1-P-V} \times 100\% \quad (1-9)$$

故筛下粒级 (-200目) 的产率为

$$\gamma_{-200\text{目}} = 100\% - \gamma_{+200\text{目}} \quad (1-10)$$

为了推导公式(1-9), 设矿石的密度为 δ , 筛分前壶中矿砂重为 Q_0 , 筛分后壶中矿砂重为 Q_1 , 根据产率的定义, 则

$$\gamma_{+200\text{目}} = Q_1/Q_0 \times 100\% \quad (1-11)$$

筛分前壶中的清水重为

$$G_1 - P - Q_0 = (V - Q_0/\delta) \times 1$$

所以

$$Q_0 = (G_1 - P - V) \times \delta / (\delta - 1) \quad (1-12)$$

筛分后壶中的清水重为

$$G - P - Q_1 = \left(V - \frac{Q_1}{\delta} \right) \times 1$$

同理

$$Q_1 = (G - P - V) \times \delta / (\delta - 1) \quad (1-13)$$

将式(1-12)和(1-13)代入式(1-11), 则可得公式(1-9), 这一计算方法, 是在假设筛分前、后矿石的密度相同而得出的, 如果矿石筛分前、后的密度相差很大, 则此计算得出的结果仅为一个近似值。

在选矿厂中往往根据公式(1-9)和各种不同的 G_1 和 G 的数值计算出 $\gamma_{+200\text{目}}$ 并列成表格, 只要称出 G_1 和 G 的重量数值, 很快就能查出 $\gamma_{+200\text{目}}$ 的数值, 运用极为方便。

第三节 粒度特性曲线

为了便于根据筛析结果研究问题, 应将筛析数据按一定的表格加以整理、计算并绘制成粒度特性曲线。常用的筛析记录表如表1-3所示。

一、筛析结果的计算

由筛析得到的数据, 可求出试样中各粒级的重量百分数(即产率)和累积重量百分数(即累积产率), 从而确定物料的粒度组成。各粒级的产率(通常以 γ 表示)可以用下列公式计算。

$$\text{某粒级的产率}(\%) = \frac{\text{某粒级的重量}}{\text{被筛析试样的总重量}} \times 100\% \quad (1-14)$$

由公式(1-14)计算的产率, 因为是由各个级别的重量分别计算出的, 所以又叫“个别产率”。将个别产率从上往下逐级相加, 就得到了相应的“正累积产率”, 用它来表示大于某一级别的所有粒级的重量百分数。到最后一级的累积产率为100%。

下面以表1-3所列的筛析记录格式和计算结果为例, 说明个别产率(γ)和累积产率($\Sigma\gamma$)的计算。

被筛试样的总重量为20kg, 用标准筛从9.423mm至0.074mm共15个筛子, 分为16个级别, 其中每一级别的重量列入表1-3的第三栏中, 其产率分别用公式(1-14)计算, 所得结果记录在表中第四栏内。

如 +9.423mm级别的产率 $\gamma_1 = 0.668/20 \times 100\% = 3.34\%$

-9.423 + 6.68mm级别的产率 $\gamma_2 = 4.682/20 \times 100\% = 23.41\%$

表 1-3 筛析结果记录表

粒 级		重 量 (kg)	产 率		
网 (孔/in)	筛 孔 尺 寸 (mm)		个 别 (%)	正 累 积 (%)	负 累 积 (%)
1	2	3	4	5	6
—	+9.423	0.668	3.34		100.00
+3	-9.423 +6.680	4.682	23.41	26.75	96.66
-3 +4	-6.680 +4.699	4.024	20.12	46.67	73.55
-4 +6	-4.699 +3.327	3.668	18.34	65.21	53.13
-6 +8	-3.327 +2.362	2.210	11.05	76.26	34.79
-8 +10	-2.362 +1.651	1.426	7.13	83.39	23.74
-10 +14	-1.651 +1.168	0.966	4.83	88.22	16.61
-14 +20	-1.168 +0.833	0.666	3.33	91.55	11.78
-20 +28	-0.833 +0.589	0.460	2.30	93.85	8.45
-28 +35	-0.589 +0.417	0.342	1.71	95.56	6.15
-35 +48	-0.417 +0.295	0.266	1.33	96.89	4.44
-48 +65	-0.295 +0.208	0.188	0.94	97.83	3.11
-65 +100	-0.208 +0.147	0.140	0.70	98.53	2.17
-100 +150	-0.147 +0.104	0.104	0.52	99.05	1.47
-150 +200	-0.104 +0.074	0.066	0.33	99.38	0.95
-200 +0	-0.074 +0	0.124	0.62	100.00	
合 计	—	20.00	100.00		

依此类推，可计算出其它各粒级的个别产率。

正累积产率表示大于某一粒级所有产率之和。可由各个别产率从上往下逐级相加得出。例如+6.68mm级别的累积产率，就是大于6.68mm的两个级别（即+9.423mm和-9.423+6.68mm两个级别）相加的和，即 $3.34\% + 23.41\% = 26.75\%$ ；又如+4.699级别的累积产率，就是大于+4.699的三个级别（即+9.423mm和-9.423+6.68mm和-6.68+4.699三个级别）相加的和，即 $3.34\% + 23.41\% + 20.12\% = 46.87\%$ 。依此类推，并将计算结果记录在表中第五栏中。

负累积产率表示小于某一粒级所有产率之和。可由各级别产率由下往上逐级相加得出。如表中第六栏。

二、粒度特性曲线的绘制和应用

将筛析结果计算得出的数据，绘制成为曲线，称为该物料的粒度特性曲线。它反映出被筛析的物料中任何粒级与产率之间的关系。根据用途的不同，有各种不同的绘制方法，但都是以产率为纵坐标，粒度为横坐标。用各粒级的个别产率作纵坐标，称为部分产率粒度特性曲线，以累积产率为纵坐标绘制的曲线，称为累积产率粒度特性曲线。实际上应用得最多的是累积产率粒度特性曲线，它的作法与数学中函数图象的作法一样。所使用的坐标图纸有三种：即一般的算术坐标图纸；以纵坐标为算术坐标，横坐标为对数坐标的图纸；纵横坐标都用对数坐标的图纸。以不同的坐标图纸绘制的粒度特性曲线，如果纵坐标取累积产率，则分别称之为累积产率粒度特性曲线，半对数累积产率粒度特性曲线和全对数累积产率粒度特性曲线。现分述如下：

1. 累积产率粒度特性曲线

如图1-2所示。它是正累积产率为纵坐标，以粒度为横坐标，根据筛析所得的数据

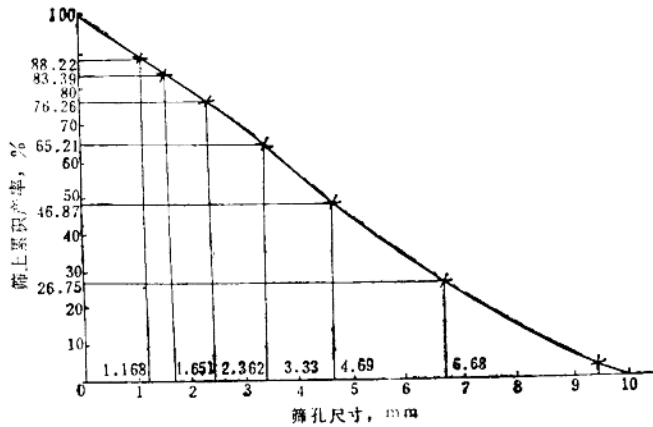


图 1-2 累积产率粒度特性曲线

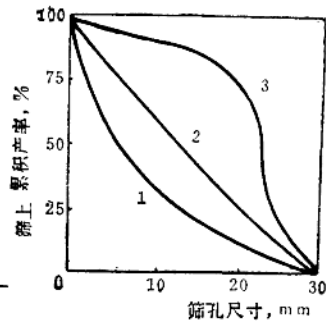


图 1-3 不同形状累积产率粒度特性曲线

(即表 1-3 中第二和第五栏的数值) 在坐标中找出一一对应的点, 然后将它们连接成平滑的曲线。因为粒度大于零 (mm) 的累积产率等于 100%, 所以曲线与纵坐标轴相交于 100%。

这种曲线的用途较为广泛, 可以归纳为如下几点:

根据此曲线可查得任何指定粒级相应的累积产率, 相反, 也可以由规定的累积产率查得相应的粒级。

由此曲线还可以查出任何级别的个别产率, 在该曲线上某一级别 ($d_1 \sim d_2$) 的产率, 就是 d_1 和 d_2 对应纵坐标的差值。

根据曲线的形状, 可以判定物料的性质和粒度组成特点, 如图 1-3 所示为三种不同形状的累积产率粒度特性曲线。凹形的曲线 1 表示物料中细粒级含量较高 (属于易碎性矿石); 凸形的曲线 3 表示物料中粗粒含量较高 (属于难碎性矿石); 如果曲线近于直线, 如曲线 2, 则表示物料粗细较均匀 (属中等可碎性矿石)。

由曲线可以求出物料的最大粒度。我国选矿工艺中规定用物料的 95% 能够通过的方形筛孔宽度表示该物料的最大块直径, 因此, 在筛上累积产率粒度特性曲线上, 与纵坐标 5% 相对应的筛孔尺寸即物料的最大块的直径。

在使用累积产率粒度特性曲线时应注意: 从曲线上直接查出的累积产率是大于该粒级的累积产率。如果要求的是小于该粒级的累积产率时, 要用 100% 减去大于该粒级的累积产率。或者是在读数时, 以纵坐标 100% 处当作 0 从上往下读数亦可。

累积产率粒度特性曲线的优点是绘制简单, 应用方便, 缺点是细粒级部分的点过于密集, 不适宜于表示粒度范围很宽的物料的筛析结果。

2. 半对数累积产率粒度特性曲线

半对数累积产率粒度特性曲线, 是以累积产率为纵坐标, 以粒度尺寸取常用对数 (以 10 为底的对数) 的值为横坐标绘制的, 它可以较清晰地看出粒度范围很窄的物料的粒度组成及特性。如果筛析用筛为标准筛, 而标准筛的筛比都有一定值, 所以在横坐标上相邻两个筛子的筛孔尺寸取对数后, 它们之间的距离都是相等的。如泰勒标准筛的筛比为 $\sqrt{2}$, 各筛孔尺寸的对数差值恒等于 $\lg \sqrt{2}$, 即相邻两筛子的筛孔尺寸在对数坐标上的间距都是相等