

高等学校教学用书

碎矿与磨矿

冶金工业出版社

高等学校教学用书

碎矿与磨矿

昆明工学院 李启衡 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74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 14 3/4 字数 348 千字

1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷

印数00,001~6,500册

统一书号: 15062·3577 定价 1.55 元



前 言

《碎矿与磨矿》是根据1977年冶金部高等学校教材会议制订的选矿专业教学计划和《碎矿与磨矿》教学大纲编写的。本书供高等院校选矿专业作教学用，亦可供厂矿及研究机关从事碎矿和磨矿工作的工程技术人员参考。

本书系统阐述碎矿与磨矿领域内的基本理论，详细论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，简要介绍国外的发展概况和国内动向。

书中绪言、四、九、十、十一、十二、十三章、实验指导书由昆明工学院李启衡、吴明珠编写，一、二、三章由西安冶金建筑学院韩文正编写，五、六、七、八章由北京钢铁学院杨忠高编写，十四、十五章由广东矿冶学院罗绍尧编写。全书由李启衡（主编）负责校订和最后修改定稿。

在编写过程中，承蒙一些厂矿及研究机关的大力支持，在此，致以感谢。由于我们水平有限，经验不足，加之时间仓促，必然有不少缺点和错误，衷心盼望使用本书的师生及其他读者提出批评和修改意见。

编 者

1979年8月

目 录

绪 论	1
一、碎矿和磨矿在选矿厂中的重要性	1
二、碎矿——磨矿流程和其中各作业的作用	1
三、碎矿车间和磨矿车间的工作情况	3
四、碎矿和磨矿的发展趋势	4
第一章 粒度特性和筛分分析	5
第一节 粒度组成及粒度分析	5
第二节 筛分分析	7
第三节 粒度分析曲线及粒度特性方程式	10
第二章 筛分原理和筛分过程	15
第一节 筛分原理	15
第二节 筛分效率	17
第三节 筛分动力学及其应用	19
第四节 影响筛分效率的因素	23
第三章 筛分机械	28
第一节 概述	28
第二节 固定筛	28
第三节 振动筛	30
第四节 弧形筛及细筛	41
第五节 筛分机械的发展简介	45
第四章 破碎矿石的理论基础	47
第一节 碎矿和磨矿的工艺特征	47
第二节 岩矿的机械强度 可碎性和可磨性	50
第三节 破碎机械的施力情况	51
第四节 破碎耗功学说及其应用	52
第五节 破碎矿石的新方法简介	59
第五章 颞式碎矿机	61
第一节 颞式碎矿机的类型和构造	61
第二节 颞式碎矿机的工作原理和性能	67
第三节 颞式碎矿机的主要参数	68
第四节 颞式碎矿机的生产能力和功率	71
第五节 颞式碎矿机的安装操作与维护检修	74
第六节 颞式碎矿机的发展简况	76
第六章 圆锥碎矿机	78

第一节	圆锥碎矿机的类型和构造	78
第二节	圆锥碎矿机的工作原理	87
第三节	圆锥碎矿机的性能和用途	88
第四节	圆锥碎矿机的主要参数	90
第五节	圆锥碎矿机的生产能力和功率	93
第六节	圆锥碎矿机的安装操作与维护检修	97
第七节	圆锥碎矿机的发展简况	101
第七章	反击式碎矿机	102
第一节	反击式碎矿机的类型和构造	102
第二节	反击式碎矿机的工作原理性能和用途	106
第三节	反击式碎矿机的工作参数	107
第四节	反击式碎矿机的发展简况	109
第八章	辊式碎矿机	111
第一节	辊式碎矿机的简述	111
第二节	辊式碎矿机的构造	112
第三节	辊式碎矿机的主要参数	114
第四节	辊式碎矿机的使用	116
第九章	球磨机和棒磨机	117
第一节	磨矿机的类型和构造	117
第二节	性能和用途	125
第三节	磨矿机的安装、使用、维护和检修	126
第四节	磨矿机的发展情况简介	128
第十章	磨矿介质的运动学	131
第一节	作用于钢球的力和钢球的运动状态	131
第二节	球磨机的临界转速	134
第三节	钢球的运动轨迹和转速率与装球率的关系	137
第四节	决定磨机转速的方法	143
第十一章	磨矿机的有用功率、装球率和转速率	150
第一节	泻落式工作的磨机的有用功率	150
第二节	抛落式工作状态下的有用功率	154
第十二章	磨矿循环	158
第一节	磨矿循环中常用的分级设备概述	158
第二节	开路磨矿和闭路磨矿	161
第三节	磨矿动力学	164
第四节	开路磨矿的分析——磨矿动力学的应用之一	166
第五节	循环负荷的形成——磨矿动力学的应用之二	167
第六节	磨机生产率与循环负荷及分级效率的关系——磨矿动力学的应用之三	169
第十三章	磨矿机生产率计算法和影响它的因素	171

第一节	磨矿机的生产率和磨矿效率·····	171
第二节	影响磨矿机生产率的因素·····	174
第三节	磨矿机生产率算法·····	181
第四节	最初装球及合理补加钢球法·····	185
第十四章	矿石的自磨和砾磨·····	191
第一节	干式自磨·····	192
第二节	湿式自磨·····	196
第三节	自磨工艺参数与生产率的计算·····	200
第四节	砾磨·····	205
第十五章	碎矿和磨矿流程·····	209
第一节	碎矿流程·····	209
第二节	磨矿流程·····	213
第三节	自磨流程·····	217
碎矿与磨矿实验指导书·····		223

绪 论

一、碎矿和磨矿在选矿厂中的重要性

在工业生产中，碎矿和磨矿是常见的工作。例如水泥厂，就需要先用一系列破碎机械将原料粉碎，以便烧成熟料，然后再将熟料磨细成水泥。炼铁时，可以直接送入高炉冶炼的富铁矿，必须先破碎筛分成合格的粒级。即使筑路，也要破碎出合用的碎石。因此，在许多基础工业部门里，破碎物料常常是重要工序，所用的机器大都属于主要设备。

几乎没有一个选矿厂不设置碎矿机和磨矿机，而且都认真地进行这项工作，因为这是和选矿的工作性质密切相关的。大家知道，任何一种选矿方法，都是根据矿石内部的有用矿物和脉石的性质不同来进行的。但是，如果它们紧密连生着，尽管它们的性质有很大差别，就不可能进行分选。因此，让有用矿物和脉石充分解离，是采用任何选矿方法的先决条件。碎矿和磨矿的目的正在这里。在选矿厂里，碎矿筛分和磨矿分级为选别准备矿料，所以它们通常是领头的几个工序，但又必须符合以后的选别作业提出的要求。

一切选矿方法都受到粒度的限制。过粗的不能分选，因为矿石中的有用矿物和脉石还没有解离；过于细的也难回收，因为接近胶体细度的微粒用现在的选矿方法还难以控制。例如重力选矿难以回收小于19微米的矿粒，浮选对5~10微米以下的粒度也难回收。破碎矿石的目的，就是为了使矿石中紧密连生着的有用矿物和脉石充分地解离。但是，只要破碎矿石，就有产生微粒，出现过粉碎的可能。没有充分的解离和发生了严重的过粉碎，都使选矿回收率和精矿品位低，这就不难理解碎矿和磨矿是怎样地决定着选矿厂的技术指标了。因此，碎矿和磨矿就是要为选别准备好解离充分但过粉碎轻的入选物料，这就是碎矿和磨矿的基本任务。

选矿厂中碎矿与磨矿作业的生产费用大约占选厂全部费用的40%以上，碎矿和磨矿的投资约占选矿厂总投资的60%左右。碎矿和磨矿工段的设计和操作的优劣，直接影响到选矿厂的经济指标。因此，经济而且合理地完成上面提出的基本任务，是每个选矿工作者的职责。

正是由于上面讲的这些原因，选矿厂的技术指标高低和经济指标好坏，其根源常常是在碎矿和磨矿上，所以做选矿工作必须认真对待这些工序和所用的设备。

二、碎矿——磨矿流程和其中各作业的作用

在学习本课程之前，对选矿厂中的碎矿和磨矿工作的基本情况应有初步了解，便于今后分别深入研究它的各部分。下面就讲讲它的基本情况。

各个选矿厂的碎矿和磨矿工作虽然各有其特点，但它们都有共同之处。下面讲的几个共同点，反映选矿厂中的碎矿和磨矿的基本情况。

- (1) 碎矿和磨矿是分阶段进行的；
- (2) 碎矿机和筛子通常配合使用；
- (3) 磨矿机和分级设备通常配合使用；
- (4) 各作业要采用适当的设备。

碎矿和磨矿要分阶段进行的理由，主要是现在所用的设备还不能一次就把采出的巨大矿块破碎到可以入选的细粒，所以要分段破碎。即使象反击式碎矿机和矿石自磨机等新技术设备，也还是分阶段进行工作的，只不过比用颚式及圆锥碎矿机的流程的阶段少。因为所处理的矿料有大矿块和细颗粒的区别，各阶段就要用适合所处理的粒度及矿料性质的设备，所以碎矿机就有多种类型。一般说，只有碎矿而没有磨矿的选矿厂是很少见的，通常都有碎矿和磨矿两个工段。碎矿是为磨矿准备给矿，经过磨矿才能得到充分解离的入选物料。碎矿工段常常是二段或三段，小选矿厂常用二段，日处理数万吨的选矿厂有用四段碎矿的。磨矿通常是一段或二段。对于容易解离的矿石或小选矿厂，采用一段磨矿；对于难解离的矿石或大选矿厂，采用两段磨矿；钨锡矿的重选厂有用到三段磨矿的。为了保证磨矿效果好，采用的磨矿机也要适合矿料的性质和用它的磨矿段，因而磨矿机也有几种。怎样决定所需的碎矿段数和磨矿段数，要通过矿石可选性试验和选厂设计的技术经济比较，才能定出。选矿上的“段”是按所处理的矿料的粒度来划分的。因此，每一个破碎段只担负总破碎工作的一部分，整个流程才保证完成全部破碎任务。破碎流程有多种，以后将作介绍，现在只任举一个为例（如下图）说明上面讲的问题。下面的流程指出，把最大块为600毫米的原矿，破碎到0.2毫米的入选细粒，矿料的大小缩减了3000倍。采用三段碎矿和一段磨矿来完成此任务，各段只完成它的一部分，并采用了不同的破碎筛分设备。

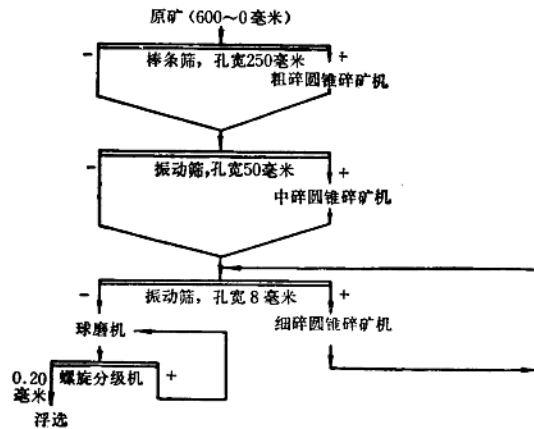


图 1

使用筛子的目的大约有四个：预先筛分、检查筛分、准备筛分和最终筛分。

预先筛分的作用，是为了把送往碎矿机的矿石中比排矿口小的矿块先筛去，从而减轻碎矿机的负荷。例如图 1 中的棒条筛和筛孔宽50毫米的振动筛，都起着预先筛分的作用。检查筛分的目的，在于把碎矿机产品中比排矿口大的矿块筛除，保证筛下产物都合规定粒度。图 1 中的筛孔宽 8 毫米的振动筛，既进行预先筛分，又作检查筛分。预先筛分和检查筛分用的筛子，与碎矿机配合，组成了碎矿流程。

准备筛分是为选别作业准备矿料，把筛得较均匀的各级别送去分选。磁选或跳汰机选矿前常用准备筛分。最终筛分是把碎矿厂的成品按用户要求筛成各粒级，作为出厂产品。选煤厂和烧结厂大都如此。

和磨矿机相联结的分级设备，有预先分级、检查分级和溢流控制分级等用途。预先分级是把勿需磨细的粒级分出，只把不合格的粗粒送去磨细，情况类似预先筛分。检查分级（如图1中的螺旋分级机）是把磨机排矿中的成品细粒分出，只让不合格的粗粒返回磨机再磨细，与检查筛分相似。溢流控制分级是把上一个分级设备的溢流再分级，以便得到更细的溢流。分级设备与磨矿机配合，组成了磨矿流程。

从上面讲的情况可知，选矿上用的碎矿机、筛子、磨矿机和分级设备的类型很多。在学习中，应当先弄清它们的构造，并在此基础上，熟悉它们的工作原理、性能、用途、用法和有关的计算。

任何一种工艺过程，都先经过长期实践，再总结成理论，然后又 在 实 践 中 对 之 作 检 验，并用以促进生产。碎矿和磨矿也不例外。因此，在学习中要重视生产知识以及从它总结出的碎矿、筛分和磨矿等工艺理论。

三、碎矿车间和磨矿车间的工作情况

碎矿车间和磨矿车间的工作情况是不相同的。由于采场不是24小时内连续供矿，碎矿机的工作时间就要与采场的供矿制度相配合；由于破碎大矿块的设备的负担沉重，需要经常检修。这些原因，使碎矿机难以在24小时内连续不断地碎矿。如果矿山是两班运出矿石，破碎车间采用两班制工作；倘若三班都有来矿，破碎车间就采用三班制。大型选矿厂采用三班制，中、小型选矿厂采用三班或二班制。两班制每班工作约6~7小时，三班制的每班约5~6小时。其余时间都用到开车、停车和设备小修上。磨矿机却不同，它除了规定的检修时间外，应当每天24小时都在运转。如果磨矿机时开时停，会使生产过程不稳定，指标波动，有用矿物流失增多。在选矿厂中，任何一个工段发生事故，都可能直接或间接地迫使磨矿机停车。所以磨矿机的年作业率 $\left(\text{设备年作业率} = \frac{\text{设备全年运转时数}}{\text{全年日历总时数}} \times 100\%\right)$

大小，反映选矿厂技术水平和管理水平。它与回收率、精矿品位及磨机利用系数共称为选矿厂的四大指标，它们都直接或间接与磨矿工作有关。

这两个车间的工作制度既然如此不同，碎矿车间就必须在生产时间内，破碎出足够供给几乎全年每天24小时都在运转的磨矿机所需的矿量。例如一个日处理5000吨的选矿厂，因为来矿的关系和检修的需要，破碎车间每周只6天生产，每天生产13小时，球磨机每周工作7天，每天24小时都运转，那么，磨矿车间的生产能力是208.3吨/时 $\left(\text{即} \frac{5000}{24}\right)$ ，而破

碎车间的生产能力应当是450吨/时 $\left(\text{即} \frac{5000 \times 7}{6 \times 13}\right)$ 。

磨矿机通常可以成列地配置在一个台阶上，比较集中，管理较为方便。碎矿机、筛子和附属设备等，常常配置在几个台阶上，较为分散。在碎矿车间中，给矿机、运输机、碎矿机、筛子和除尘器等设备互相衔接，从一个台阶到另一个台阶联成一条生产线。其中任何一台设备发生故障都会使全线停车，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。矿石运入和产品送出都要计量。车间中的操纵和控制有以下一些特点：

1) 各部机器必须按工艺过程规定的程序，以一定的间隔时间相继启动，启动次序与矿料运行方向相反。

2) 各部机器既能单独启动, 又可以成组启动; 既可以在调度室集中操纵, 又可以在工作地点操纵。

3) 停止整个生产线时, 停车的次序必须和启动的次序相反, 也就是和矿料运行方向一致。

4) 当生产线上的某一机器被迫停车时, 为了避免堵塞, 所有供给该机器矿料的其他机器也必须停止运转, 但它以后的机器可以继续工作。

此外, 应当规定出各种讯号, 以便指挥和通知分散在全车间内的工作人员。

碎矿车间和磨矿车间的设备都负担着沉重的任务, 磨损严重, 必须准备配件和材料, 有计划地经常进行检修。

碎矿和磨矿车间担负准备矿料的工作, 一旦发生事故被迫停车, 就会影响全厂停产, 因此要特别注意安全。应当熟悉车间的各种信号, 严格遵守操作规程和劳动纪律, 防止发生设备事故和人身事故。安全生产是十分重要的问题, 绝不能忽视。

虽然碎矿和磨矿分别在两个车间中进行, 它们的工作情况又有许多不同, 但碎矿既然是为磨机准备合适的给矿, 二者就有密切的关系。因此, 在考虑技术的和经济的问题时, 就不应当把它们分开来只顾一方, 必须对两个车间综合考虑, 才能使碎矿和磨矿总的效果最好。

四、碎矿和磨矿的发展趋势

在国民经济领域中, 碎矿-磨矿既然是许多基础工业部门的重要工序, 就必然受到世界各国的重视, 因而蓬勃发展。总的趋势是: 制造大型设备, 发展高效率的新型设备, 利用新器材和新技术, 研究破碎过程的机理和新的破碎方法等。

随着工业的发展, 所需的金属量增多, 采掘矿量不断增大, 采出矿石的品位日益降低, 日处理数万吨矿石的近代化选矿厂频频出现。生产规模增大, 就必然要求与之适应的大型设备。因此, 颚式碎矿机已制造了 3000×2100 型(简摆)和 2100×1670 型(复摆), 圆锥碎矿机的 2130×4400 型(旋回)和 $\phi 3048$ 型(菌型)亦已出现。 $\phi 4570 \times 6300$ 棒磨机、 5180×12900 球磨机和 $\phi 10980 \times 4560$ 自磨机皆已应用。

传统的碎矿机和磨矿机虽久经考验, 但毕竟具有笨重和效率不高的缺点。因此, 在改进它们的结构的同时, 还须设计新型高效率设备, 于是出现了冲击颚式碎矿机、无齿轮传动圆锥碎矿机和筒体上装电动机的转子而筒体周围装定子的球磨以及离心磨和喷射磨等。反击式破碎机的发展更为广泛, 除研究减少磨损的措施外, 并有适合中、细碎用的双转子复合式反击式碎矿机出现。为了解决提高筛分效率和生产率, 成功地制造出莫根逊筛; 为了解决细粒筛分的困难, 击振细筛已广泛用于磨矿回路。此外, 胡基筛和超声波筛已显示为有前途的细筛设备。

为了适应设备大型化, 就必须采用新器材和新技术, 才不致于使机体过于笨重、功率消耗太多及操作不方便, 因此碎矿机上较普遍地采用了滚动轴承和液压技术。为了减少钢铁的磨损消耗, 磨机中较广泛地应用橡胶衬里, 尼龙已采用制细筛筛网。电子计算机的自动控制, 已在磨矿循环中应用。

碎矿与磨矿必须消耗巨大的能量, 为了弄清能量消耗的规律, 评定破碎效率, 提供设计的依据和找寻节约能量的途径, 百年前已展开的破碎耗功的研究, 虽已取得不少成绩, 但仍在进行, 以求得到更完善的理论。目前所用的破碎方法, 完全是机械破碎, 其缺点是

能量转换过程中的损失较大。为了解决此种问题，仍在不断研究电热照射、液电效应及热力破碎等，但还属于初期研究。在新的破碎方法中，唯独 A. 斯奈德的减压碎矿法已完成半工业试验，可能很快获得应用。碎矿、筛分和磨矿的工艺过程，有其自身的特点。为了深刻认识这些过程，必须从实践中总结经验，建立有关的理论，再通过实践检验，并加以发展，于是有了筛分动力学、磨矿动力学与磨矿介质运动学等及其应用。

在短暂的学习过程中，将着重学习国内选矿厂采用的定型设备的构造、工作原理、性能和使用，但对国际的发展情况也应有所了解。既要熟悉工艺知识，又要明了有关的理论的内容和应用，目前已取得的成就和尚待解决的问题。应在学过选矿概论及去选矿厂作过认识实习的有利基础上，学习此课程；而学了它，又可为学其他专业课作准备。正如前面所说的，碎矿和磨矿对选矿厂的经济指标和技术指标有决定性的影响，因而碎矿和磨矿与搞好选矿工作密切相关，成为学好选矿专业知识的重要组成部分。

第一章 粒度特性和筛分分析

第一节 粒度组成及粒度分析

碎矿、磨矿和选别过程中所处理的矿石，都是尺寸大小不一、形状各式各样的松散矿料。所谓粒度，就是矿块（或矿粒）大小的量度，一般用毫米（或微米）表示。将松散矿料借用某种方法分成若干级别，这些级别叫粒级。用称量法称出各级别的重量并计算出它们的重量百分率（或累积重量百分率），从而说明这批矿料是由含量各为多少的那些粒级组成。这种资料就是矿料的粒度组成。从粒度组成可以看出各粒级在原料中的分布情况，这种确定粒度组成的试验叫做粒度分析。

选矿工艺特点之一，就是针对物料的不同粒度范围对它们采取不同的处理方法。在确定选矿工艺流程和选矿机械的效果的时候，物料的粒度组成是一个需要考虑的重要因素。常常需要对原矿和产品进行粒度分析，才能评价作业效果和分析生产过程，可见粒度组成的测定是选矿中经常遇到的一项重要工作。

一、粒度表示法

1. 单个矿块的粒度表示法

每一块矿石的形状都是不规则的，为了便于表示它的大小，习惯上用平均直径。单个矿块的平均直径，就是在三个互相垂直方向上量得的尺寸的平均值。

设平均直径为 d ，则

$$d = \frac{a + b + c}{3} \quad (1-1)$$

式中 a ——矿块长度，最长的量度；

b ——矿块宽度，次长的量度；

c ——矿块厚度，最短的量度。

这种测定方法，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。在显微镜下测定微细粒子的平均直径，也可用这种方法。

2. 粒级的表示法

大批松散矿料，如果用 n 层筛面把它们分成 $(n+1)$ 个粒度级别，确定每一级别矿粒的尺寸，通常以矿粒能透过的最小正方形筛孔宽作为该级别的粒度。如筛孔宽度为 b ，则：

$$d = b \quad (1-2)$$

如透过上层筛的筛孔宽为 b_1 ，而留在下一层筛面上的筛孔宽为 b_2 ，粒度级别按以下方法表示：

$$\begin{aligned} & -b_1 + b_2 \quad \text{或} \quad -d_1 + d_2 \\ & b_1 \sim b_2 \quad \text{或} \quad d_1 \sim d_2 \end{aligned}$$

如

$$-10 + 6 \text{ 毫米或 } 10 \sim 6 \text{ 毫米}$$

二、平均粒度和物料的均匀度

在碎矿、磨矿的研究工作中，有时要计算平均粒度，用它来说明含有各种粒级的混合物料的平均大小。

由不同的粒度级别组成的混合物料，可以看作是一个统计集体，求混合物料平均直径的方法，可以用统计上求平均值的方法。

设 r_i 表示各级别的重量百分率； D 为混合物料的平均直径； d_i 为各级别的平均直径。

计算混合物料平均粒度有下列几种方法

1. 加权算术平均法

$$\begin{aligned} D &= \frac{r_1 d_1 + r_2 d_2 + \dots + r_n d_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \\ &= \frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i} = \frac{\sum r_i d_i}{100} \end{aligned} \quad (1-3)$$

2. 加权几何平均法

$$D = (d_1^{r_1} d_2^{r_2} \dots d_n^{r_n})^{\frac{1}{\sum r_i}}$$

取对数

$$\lg D = \frac{\sum r_i \lg d_i}{\sum r_i} = \frac{\sum r_i \lg d_i}{100} \quad (1-4)$$

3. 调和平均法

$$D = \frac{\sum r_i}{\sum \frac{r_i}{d_i}} = \frac{100}{\sum \frac{r_i}{d_i}} \quad (1-5)$$

以上三种计算方法所得的结果是：

算术平均值 $>$ 几何平均值 $>$ 调和平均值

在计算混合物料的平均粒度时，如果混合物料筛分的级别越多，求得的平均值也就较准确，其代表性也较高。对于窄级别（ $\frac{d_1}{d_2}$ 大约为 $\sqrt{2}$ 以下），可以简便地用 $D = \frac{d_1 + d_2}{2}$ 计算。

平均粒度虽然反映物料的平均大小，但单有平均粒度还不能完全说明物料的粒度性质。

因为往往有这种情况，两批物料的平均粒度相等，但它们各相同粒级的重量百分率却完全不同。为了能对物料的粒度性质有完全的说明，除了平均粒度以外，还须用偏差系数 K_{σ} 来说明物料的均匀程度

偏差系数按下面公式计算。

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma}{D} \quad (1-6)$$

式中 D ——用加权算术平均法 $\left(\frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i} \right)$ 求得的平均粒度；

$$\sigma \text{——标准差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - D)^2 r_i}{\sum r_i}}。$$

通常将 $K_{\sigma} < 40\%$ 认为是均匀的； $K_{\sigma} = 40 \sim 60\%$ 叫做中等均匀的； $K_{\sigma} > 60\%$ 为不均匀的。

三、粒度分析

常用的粒度分析方法，根据物料粗细不同，可以采用下列几种方法

1. 筛分分析

是利用筛孔大小不同的一套筛子进行粒度分级。对于粒度小于100毫米而大于0.043毫米的物料，一般采用筛析法测定粒度组成。

筛析法的优点是设备简单，易于操作。一般干筛至100微米，再细的可用湿筛。近代用光刻电镀技术制造的微目筛，比织丝筛能精确测定颗粒更细的物料，可以测定细到10微米的细粒。

筛析法的缺点是受颗粒形状的影响很大。

2. 水力沉降分析

是利用不同尺寸的颗粒在水介质中沉降速度的不同而分成若干级别。它不同于筛析法，因为筛析法测得的是几何尺寸，水力沉降分析测得的是具有相同沉降速度的当量球径。此法适用于1~75微米粒度范围的测定。

3. 显微镜分析

主要用来分析细微物料，可以直接观测出颗粒尺寸和形状，常用于检查选别产品或校正水析结果，以及研究矿石的结构和构造，其最佳测量范围为0.5~20微米之间。

第二节 筛 分 分 析

一、标准筛

筛分分析用的筛子有两种：一种为非标准筛(或手筛)，现厂试验室可以自己制造。手筛用来筛分粗粒物料，筛孔大小一般为150, 120, 100, 80, 70, 50, 25, 15, 12, 6, 3, 2, 1毫米等，根据需要确定，用在破碎各段或筛分产品的粒度分析。另一种是标准套筛，多用在磨矿产品，分级产品或选别产品的粒度分析。标准套筛是由一套筛孔大小有一定比例的，筛孔宽度和筛丝直径都按标准制造的筛子组成。上层筛子的筛孔大，下层筛子的筛孔小，另外还有一个上盖(防止试样在筛析过程中损失)和筛底(用来直接接取最底层筛子的筛下产物)。

将标准筛按筛孔由大到小，从上到下排列起来，各个筛子所处的层位次序叫筛序。使用标准筛时，决不可错叠筛序，以免造成试验结果混乱。

在叠好的筛序中，每两个相邻的筛子的筛孔尺寸之比叫筛比。有些标准筛有一个作为基准的筛子叫基筛。重要的标准筛有以下几种。

1. 泰勒标准筛

这种筛制是用筛网每一英寸（25.4毫米）长度上所具有的筛孔数目作为各个筛子号码的名称。一英寸长度中的筛孔数目称为网目，简称目，如200目的筛子就是指一英寸长度的筛网上有200个筛孔。泰勒筛制有两个序列，一是基本序列，其筛比是 $\sqrt{2}=1.414$ ；另一个是附加序列，其筛比是 $\sqrt[3]{2}=1.189$ 。基筛为200目的筛子，其筛孔尺寸是0.074毫米。

表 1-1 常 见 标 准 筛

泰 勒 标 准 筛		英国标准筛(B.S)		德 国 标 准 筛		国际标准筛	上 海 标 准 筛	
网 目 (孔/英寸)	孔 (毫米)	网 目 (孔/英寸)	孔 (毫米)	网 目 (孔/厘米)	孔 (毫米)	孔 (毫米)	网 目 (孔/英寸)	孔 (毫米)
2.5	7.925	—	—	—	—	8	—	—
3	6.68	—	—	—	—	6.3	—	—
3.5	5.691	—	—	—	—	—	—	—
4	4.699	—	—	—	—	5	4	5
5	3.962	5	3.34	—	—	4	5	4
6	3.327	6	2.81	—	—	3.35	6	3.52
7	2.794	7	2.41	—	—	2.8	—	—
8	2.262	8	2.05	—	—	2.36	8	2.616
9	1.981	—	—	—	—	2	—	—
10	1.651	10	1.67	4	1.5	1.6	10	1.98
12	1.397	12	1.40	5	1.2	1.4	12	1.66
14	1.168	14	1.20	6	1.02	1.18	14	1.43
16	0.991	16	1.00	—	—	1	16	1.27
20	0.833	18	0.85	—	—	0.8	20	0.995
24	0.701	22	0.70	8	0.75	0.71	24	0.823
28	0.589	25	0.60	10	0.6	0.6	28	0.674
32	0.495	30	0.50	11	0.54	0.5	32	0.56
35	0.417	36	0.42	12	0.49	0.4	34	0.533
42	0.351	44	0.35	14	0.43	0.355	42	0.452
48	0.295	52	0.30	16	0.385	0.3	48	0.376
60	0.246	60	0.252	20	0.3	0.25	60	0.295
65	0.208	72	0.211	24	0.25	0.2	70	0.251
80	0.175	85	0.177	30	0.2	0.18	80	0.2
100	0.147	100	0.152	40	0.15	0.15	110	0.139
115	0.124	120	0.125	50	0.12	0.125	120	0.13
150	0.104	150	0.105	60	0.1	0.1	160	0.097
170	0.088	170	0.088	70	0.088	0.09	180	0.09
200	0.074	200	0.076	80	0.075	0.075	200	0.077
230	0.062	240	0.065	100	0.06	0.063	230	0.065
270	0.053	—	—	—	—	0.05	280	0.056
325	0.043	300	0.053	—	—	0.04	320	0.05
400	0.038	—	—	—	—	—	—	—

以200目的基筛为起点,对基本筛序来说,比200目粗一级的筛子的筛孔约等于 $0.074 \times \sqrt{2} = 0.104$ 毫米,即150目,更粗一级的筛子的筛孔尺寸是 $0.074 \times \sqrt{2} \times \sqrt{2}$,比0.074毫米细一级的筛孔尺寸为 $0.074/\sqrt{2}$ 毫米。一般选矿产物的筛分分析多采用基本筛序。只有在要求得到更窄的级别的产品时,才插入附加筛序(筛比 $\sqrt{2}$ 的筛子)。

2. 德国标准筛

这种筛的“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(毫米)的乘积约等于6,并规定筛丝直径等于筛孔尺寸的 $\frac{2}{3}$,各层筛子的筛网有效面积(所有筛孔的面积与整个筛面面积之比,用百分率表示)等于36%。

3. 国际标准筛

基本筛比是 $\sqrt[3]{10} = 1.259$,对于更精密的筛析,还插入附加筛比 $(\sqrt[3]{10})^0 = 1.41$ 和 $(\sqrt[3]{10})^{12} = 1.99$ 。

此外,还有英国B.S系列标准筛。各种标准筛见表1-1。

我国标准筛尚未公布,常用的上海筛类似泰勒筛,也列入表中以供参考。

二、筛分分析

确定松散物料粒度组成的筛分工作称为筛分分析,简称筛析。粒度大于6毫米物料的筛析属于粗粒物料的筛析,采用钢板冲孔或铁丝网制成的手筛来进行。其方法是用一套筛孔大小不同的筛子进行筛分,将矿石分成若干粒级,然后分别称量各粒级重量。如果原矿含泥、含水较高,大量的矿泥和细粒矿石粘附在大块矿石上面,则应将它们清洗下来,以免影响筛析的精确性。

粒度范围为6毫米至0.043毫米的物料的筛析,用实验室标准套筛进行。如果对筛析的精确度要求不甚严格,通常直接进行干法筛析即可。但如果试样含水、含泥较多,物料互相粘结时,应采用干湿联合筛析法,筛析所得到的结果才比较精确。

干法筛析是先将标准筛按顺序套好,把样品倒入最上层筛面上,盖好上盖,放到振荡机上筛分10~15分钟。然后依次将每层筛子取下,用手在橡皮布上筛分,如果一分钟内所得筛下物料量小于筛上物料量的1%,则认为已达到终点,否则就要继续进行筛析。

干湿联合筛析法是先将试样倒入细孔筛(如200目的筛子)中,在盛水的盆内进行筛分,每隔一、二分钟,将盆内的水更换一次,直到盆内的水不再混浊为止。将筛上物料进行干燥和称重,并根据称出重量和原样品重量之差,推算洗出的细泥重量。然后再将干燥后的筛上物料用干法筛析,此时所得最低层筛面的筛下物料量应与湿筛时洗出的细泥量合在一起计算。筛析结束后,将各粒级物料用工业天平(精确度0.01克)称重,各粒级总重量与原样品重量之差不得超过原样品重量的1%,否则应重做。

筛分分析所用的试样重量与试样的粒度有关,确定方法见本书附的实验一。

筛析的目的在于求得各粒级的重量百分数(产率),从而确定物料的粒度组成。可以把所有筛分级别的总重量作为100%,分别求各级别的产率及累积产率。

$$\frac{\text{某一粒级的重量}}{\text{被筛物料的总重量}} \times 100\% = \text{某粒级的产率}(\%)$$

累积产率分为筛上累积产率(又叫正累积)及筛下累积产率(又叫负累积)。筛上累积产率是大于某一筛孔的各级别产率之和,即表示大于某一筛孔的物料共占原物料的百分率。

筛下累积产率是小于某一筛孔的各级别产率之和，即表示小于某一筛孔的物料共占原物料的百分率。

筛分分析结果填入规定的表格，最常用的筛析记录如表1-2所示。

表 1-2 筛 分 分 析 结 果

粒 级 (毫米)	重 量 (公斤)	产 率		
		重 量 %	筛上累积产率 (正累积) %	筛下累积产率 (负累积) %
- 16 + 12	2.25	15	15	100
- 12 + 8	3.00	20	35	85
- 8 + 4	4.50	30	65	65
- 4 + 2	2.25	15	80	35
- 2 + 0	3.00	20	100	20
共 计	15.00	100	—	—

第三节 粒度分析曲线及粒度特性方程式

一、粒度分析曲线

为了便于根据筛析结果研究问题，常将表1-2中的数据绘成曲线，这种按筛析结果绘出的曲线，叫粒度分析曲线。它反映出被筛析物料中的任何粒级与产率之间的关系——即物料的粒度组成。根据用途的不同，粒度分析曲线有各种不同的绘制方法，一般是以产率为纵坐标，粒度为横坐标。根据各个级别的产率绘制的曲线，称为部分粒度分析曲线；根据累积产率绘制的曲线，称为累积粒度分析曲线。实际上最常用的是累积粒度分析曲线。通常有三种绘图方法，即算术坐标法、半对数坐标法和全对数坐标法。

1. 算术坐标法

是把粒度分析曲线绘制在普通的直角坐标系统上，图1-1是根据表1-2的数据绘制的粒度分析曲线。

如纵坐标表示大于某一筛孔尺寸的产率，则粒度特性是正累积曲线；如纵坐标表示小于某一筛孔尺寸的产率，则粒度特性为负累积曲线。这两条曲线是互相对称的，如果绘在一张图纸上，它们相互交于物料产率为50%的点上。在正累积粒度分析曲线上，由于大于零毫米级别的累积产率等于100%，所以曲线与纵坐标相交于100%。在负累积粒度分析曲线上由于小于零毫米级别的累积产率等于零。所以曲线与纵坐标交于零。

这种累积粒度分析曲线在生产考查和流程计算中得到广泛的应用。例如：1) 可以求出任意粒级的重量%。因为某一粒级 ($-d_1 + d_2$) 重量%，即在直径 d_1 和 d_2 时纵坐标上的差值。2) 求物料中最大块的直径。我国选矿工艺中规定用物料的95%能够通过的方筛孔宽度表示该物料的最大块直径，因此，在负累积粒度分析曲线上，与纵坐标95%相对应的筛孔尺寸即最大块的直径。3) 判别物料的粒度特性，当物料中粗粒级占多数时正累积粒度分析曲线呈凸形 (图1-2所示的曲线A)；当物料中的细粒级占多数时，正累积粒度分析曲线呈凹形 (曲线C)；如果粒度分布是粗和细的数量大致相同，则粒度分析曲线呈直线 (曲线B) 或接近于直线。

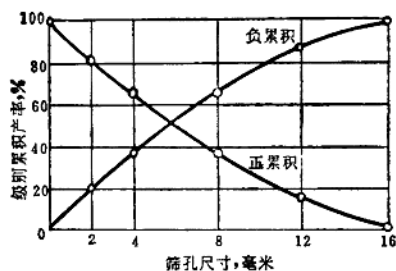


图 1-1 累积粒度分析曲线

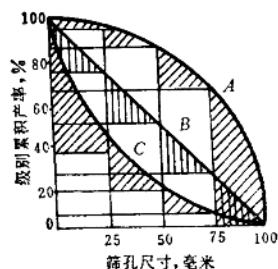


图 1-2 各种形状的累积粒度特性

用简单坐标法绘制的累积粒度分析曲线虽然广泛应用,但也有缺点。如果粒度范围很宽,由于细粒级在横坐标上的间距特别短,点很密集,曲线难于绘制和使用,因此,必须把曲线绘在很大的图纸上,制作和使用都很不方便。如果用对数坐标来表示颗粒级别的尺寸,细级别的横坐标的间距增长,可以避免细粒级各点过分密集的缺点。

2. 半对数坐标法

横坐标(粒级尺寸)用对数表示,纵坐标用算术坐标表示,作出的累积粒度分析曲线称半对数累积粒度分析曲线。

如果筛分析所用的套筛的筛比相同,绘制半对数粒度分析曲线非常简单。因为在横坐标上相邻两个筛子的筛孔之间的距离都是一样的。例如筛比为 $\sqrt{2}$ 的泰勒标准筛,各筛孔尺寸的对数差值恒等于 $\lg \sqrt{2}$,即每个筛子的孔宽都成为等分的间距。

筛孔尺寸	筛孔尺寸的对数	相邻筛子筛孔尺寸的对数差
b	$\lg b$	—
$b\sqrt{2}$	$\lg b + \lg \sqrt{2}$	$(\lg b + \lg \sqrt{2}) - \lg b = \lg \sqrt{2}$
$b(\sqrt{2})^2$	$\lg b + 2\lg \sqrt{2}$	$(\lg b + 2\lg \sqrt{2}) - (\lg b + \lg \sqrt{2}) = \lg \sqrt{2}$

图1-3是根据表1-2的数据,绘制的半对数累积粒度分析曲线。在绘制这种曲线时,值得注意的是:当 $d \rightarrow 0$ 时, $\lg d = \lg 0 = -\infty$,故曲线不能画到粒度为0之处。

3. 全对数坐标法

此法的横坐标和纵坐标都用对数表示。如图1-4就是根据表1-2的数据作出的全对数累积粒度分析曲线。

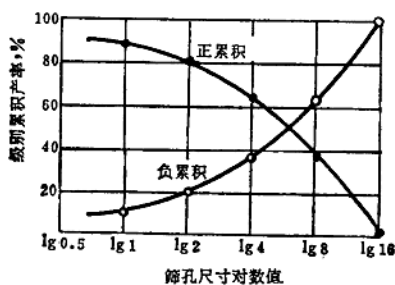


图 1-3 半对数累积粒度分析曲线

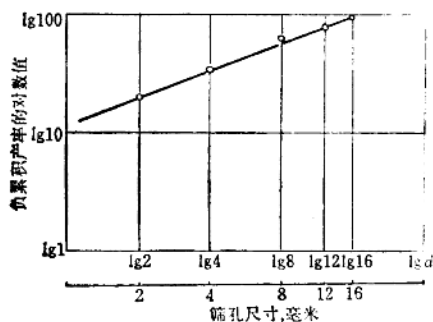


图 1-4 全对数累积粒度分析曲线