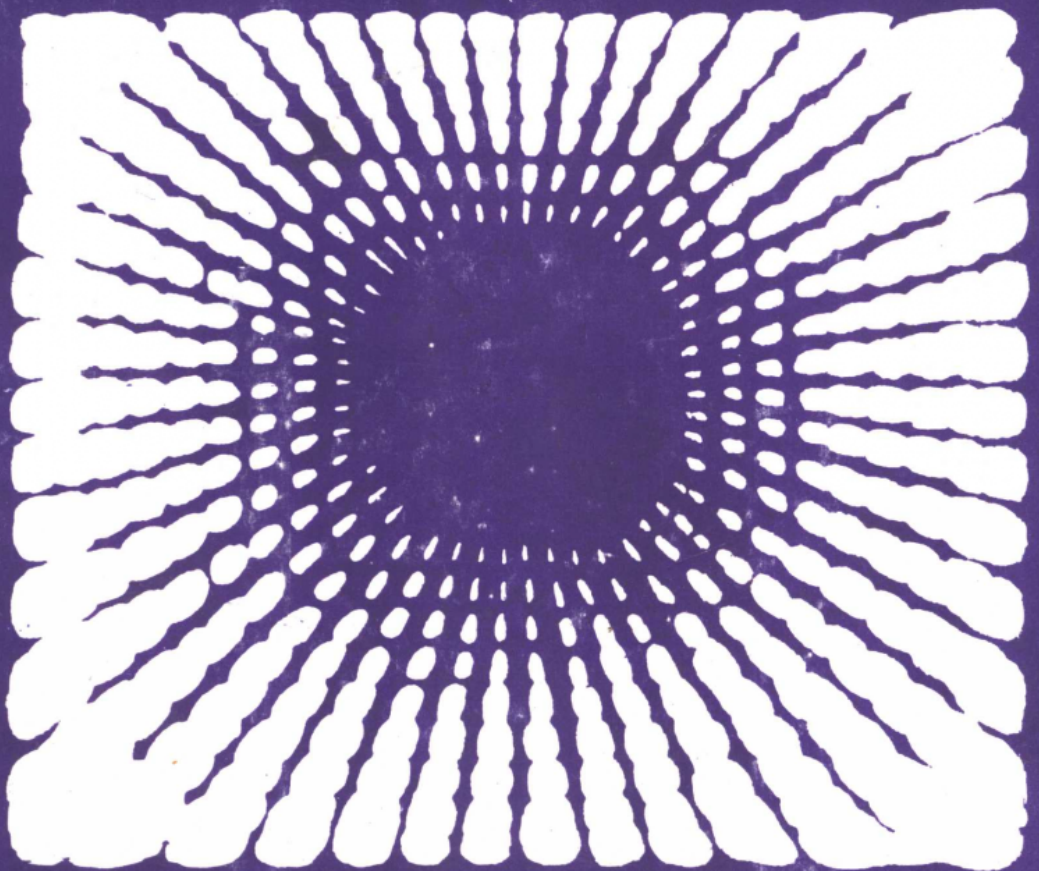


高等学校试用教材

硅酸盐工业机械过程 及设备

(上册)

潘孝良 主 编



武汉工业大学出版社

硅酸盐工业机械过程及设备

(上册)

主 编 潘孝良

武汉工业大学出版社

鄂新登字 13 号

内 容 提 要

本书共八章:粉碎、筛分、颗粒流体力学基础、流态化与气力输送、收尘、混合、机械输送、贮料与加料。着重介绍水泥厂、玻璃厂、陶瓷厂共有的单元生产操作的机械过程原理,简要介绍机械设备的类型、构造、工作原理、性能、应用,以及典型机械设备的选型计算方法等。

本书是为全国高等工科院校无机非金属材料与硅酸盐工程专业本科生编写的必修课程教材;也可供有关专业的研究生以及科研、设计、生产部门的有关技术人员参考。

硅酸盐工业机械过程及设备 (上册)

◎主 编 潘孝良

责任编辑 韩瑞根

※

武汉工业大学出版社出版发行

(武昌珞狮路 14 号 邮政编码 430070)

新华书店湖北发行所经销

核工三〇九印刷厂印刷

※

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 356 千字

1993 年 7 月第 1 版 1993 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—3000

ISBN 7—5629—0757—9/TQ·76

定价 7.40 元

前 言

本书系全国高等学校无机非金属材料与硅酸盐工程专业本科生的必修教材。它是根据高等学校无机非金属材料工程专业教材编审委员会制订的并于1983年通过的“硅酸盐工业机械过程及设备教学大纲”编写的。

《硅酸盐工业机械过程及设备》分上、下两册。上册为硅酸盐工业生产中共有的单元生产操作。下册分为《硅酸盐工业机械过程及设备》(下,水泥);《硅酸盐工业机械过程及设备》(下,玻璃);《硅酸盐工业机械过程及设备》(下,陶瓷)。

本书共分八章;第一章粉碎,第二章筛分,第三章颗粒流体力学基础,第四章流态化与气力输送,第五章收尘,第六章混合,第七章机械输送,第八章贮存与加料。合计五十六学时。书中着重介绍硅酸盐工业中共有的单元生产操作的机械过程原理,简要介绍机械设备的类型、构造、工作原理、性能、应用,以及典型机械设备的选型计算方法等。

主编是山东建筑材料工业学院潘孝良。编写分工:潘孝良第一、二、七章;华东化工学院扬伦第四、六、八章;南京化工学院潘新章第三、五章。

1988年7月在济南召开了审稿会。主审是华南理工大学魏诗榴教授。参审是同济大学陆厚根副教授,山东建筑材料工业学院李兆钰副教授。参加审稿会的有本书水泥分册主编武汉工业大学杨志谦教授,陶瓷分册主编华南理工大学陈帆副教授,江苏盐城工业专科学校张进韶副教授,哈尔滨建筑工程学院刘福汉讲师,武汉工业大学崔亚伟讲师,武汉工业大学出版社韩瑞根编辑,国家建材局人才开发司职业技术教育处张志江等。会上提出了许多宝贵的修改意见。

本书在编写过程中得到有关高校、科研设计和生产单位的大力支持,陆厚根副教授提出了书面修改意见,李兆钰副教授和张进韶副教授提供了部分参考资料,在此一并致谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正!

编 者

1988年9月

目 录

第一章 粉碎	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 粒度分布	(7)
§ 1.3 粉碎理论	(14)
§ 1.4 粉碎过程速度解析概述	(18)
§ 1.5 颚式破碎机	(21)
§ 1.6 锥式破碎机	(27)
§ 1.7 辊式破碎机	(29)
§ 1.8 锤式破碎机	(31)
§ 1.9 反击式破碎机	(35)
§ 1.10 轮碾机	(39)
§ 1.11 笼式粉碎机	(43)
§ 1.12 球磨机	(44)
第二章 筛分	(50)
§ 2.1 概述	(50)
§ 2.2 筛分机理及影响筛分效率因素	(54)
§ 2.3 筛分速度方程及其应用	(56)
§ 2.4 筛分机械	(59)
§ 2.5 筛分流程及其计算	(66)
第三章 颗粒流体力学基础	(69)
§ 3.1 颗粒流体力学的基本概念	(69)
§ 3.2 颗粒的重力沉降	(72)
§ 3.3 颗粒在流体中的抛射运动	(81)
§ 3.4 颗粒在旋转流体内的运动	(83)
第四章 流态化与气力输送	(85)
§ 4.1 流态化与固定床内的气体流动	(85)
§ 4.2 流态化机理与计算	(88)
§ 4.3 气力输送的类型与特点	(92)
§ 4.4 进料装置	(96)
§ 4.5 栓流气力输送	(98)
§ 4.6 管内气固两相流原理	(101)
§ 4.7 低压压送与低真空吸送的计算	(104)
§ 4.8 高压压送与高真空吸送的计算	(110)
§ 4.9 栓流气送的损失	(113)
§ 4.10 空气槽的计算	(116)
第五章 收尘	(122)
§ 5.1 概述	(122)
§ 5.2 旋风收尘器	(129)
§ 5.3 袋式收尘器	(138)

§ 5.4 颗粒层收尘器	(145)
§ 5.5 电收尘器	(146)
§ 5.6 收尘系统及其设计计算	(155)
第六章 混合	(160)
§ 6.1 概述	(160)
§ 6.2 混合程度	(160)
§ 6.3 混合原理	(163)
§ 6.4 重力式混合机	(169)
§ 6.5 强制式混合机	(171)
§ 6.6 气力混合	(174)
§ 6.7 连续混合	(176)
第七章 机械输送	(180)
§ 7.1 抓斗桥式起重机	(180)
§ 7.2 带式输送机	(183)
§ 7.3 皮带秤	(195)
§ 7.4 斗式提升机	(198)
§ 7.5 螺旋输送机	(206)
§ 7.6 其它输送机	(211)
第八章 贮料与加料	(218)
§ 8.1 贮料的分类与作用	(218)
§ 8.2 填充性质与休止角	(219)
§ 8.3 仓内粉体的重力流动	(222)
§ 8.4 料仓计算	(227)
§ 8.5 粉体压力	(229)
§ 8.6 分料	(231)
§ 8.7 起拱与助流	(233)
§ 8.8 加料装置的要求与类型	(238)
§ 8.9 电磁振动式加料机	(241)

第一章 粉碎

§ 1.1 概述

一、粉碎的定义和分类

粉碎是一种使大块物料变成小块物料并产生新表面的过程。这是用外力(人力、机械力、电力、化学能、原子能或其它方法等)施加于被粉碎的物料上,克服物料分子间的内聚力,使大块物料分裂的过程。

由于粉碎物料时采用的方法和粉碎设备类型的不同,因而按粉碎前后物料粒度的大小把粉碎分为破碎和粉磨两类。破碎又分为粗碎、中碎和细碎三种。粉磨又分为粗磨、细磨和超细磨三种。按粉碎前后物料粒度大小,对上述分类可大致划分如下:

粗碎——粉碎前物料粒度为 1500~300mm,粉碎后物料粒度为 350~100mm;

中碎——粉碎前物料粒度为 350~100mm,粉碎后物料粒度为 100~20mm;

细碎——粉碎前物料粒度为 100~50mm,粉碎后物料粒度为 15~5mm;

粗磨——将物料粉磨到 0.1mm 左右;

细磨——将物料粉磨到 60 μ m 左右;

超细磨——将物料粉磨到 5 μ m 或更小。

二、粉碎意义

在水泥、玻璃、陶瓷等工业生产过程中需要的粉料粒度,一般在数十微米乃至 1 微米以下。这就需要将块状物料进行粉碎。粉碎过程所消耗的能量在整个生产过程中占有很大的比例,如在水泥生产中粉碎需要的电能约占总电能的 70%左右。

将块状物料粉碎成粉粒状物料的意义如下:

1) 增快反应速度 在硅酸盐生产过程中都必须经过高温烧成过程,以制得成品或半成品。这一过程是固体物料的多相反应过程,其反应速度与固体物料粒子面的接触表面积有很大的关系,接触表面积越大,反应速度也就越快。

2) 有利于原料混合均化 硅酸盐产品的质量,在很大程度上与原料混合均化的程度有关。原料在粉碎过程中是在不断地混合均化,同时粉粒料在输送、贮存和混合等过程中,由于粒度越小,物料的流动性就越好,也有利于原料的混合均化。

3) 可以改善物料的工艺性能 如在陶瓷生产中可以改善原料的可塑性、结合性、料浆的悬浮性等。

4) 便于不同组成的分离 如在玻璃、陶瓷生产中为了剔除某些有害的氧化铁组成,必须在粉碎后才能进行分离操作。

5) 便于输送和贮存 小块料和粉粒料可以采用不同类型的输送机械输送,粉粒料还可进行气力输送。粉粒料的贮存操作是简单方便的。

三、粉碎比

粉碎前物料尺寸与粉碎后物料尺寸的比值称为粉碎比,对破碎来说称为破碎比。它表示经过粉碎后原物料尺寸减小的倍数。由于粉碎机械的功率消耗和生产率等都与粉碎比有关,所以它是衡量粉碎机械性能的重要指标。

由于物料粉碎前后颗粒形状的不规则性和组成的不均一性,而对物料尺寸计算采用不同的基准。通常粉碎比用以下几种计算方法。

(一)用物料最大直线尺寸计算的粉碎比

$$i = \frac{D_{\text{最大}}}{d_{\text{最大}}} \quad (1-1)$$

式中 i ——粉碎比; $D_{\text{最大}}$ ——粉碎前物料的最大直线尺寸(mm); $d_{\text{最大}}$ ——粉碎后物料的最大直线尺寸(mm)。

(二)用颗粒平均尺寸计算的粉碎比

$$i = \frac{D_{\text{平均}}}{d_{\text{平均}}} \quad (1-2)$$

式中 $D_{\text{平均}}$ ——粉碎前物料的平均直径(mm); $d_{\text{平均}}$ ——粉碎后物料的平均直径(mm)。

此种方法的测量和计算都比较麻烦,但能够较真实地反映粉碎程度,因而理论研究中多采用它。

(三)用 95% 物料(或 80% 物料)尺寸(即正方形筛孔的一边)计算的粉碎比

$$i = \frac{D_{95}}{d_{95}} \quad (1-3a)$$

式中 D_{95} ——粉碎前 95% 物料能通过的正方形筛孔的宽度; d_{95} ——粉碎后 95% 物料能通过的正方形筛孔的宽度。

$$i = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (1-3b)$$

式中 D_{80} ——粉碎前 80% 物料能通过的正方形筛孔的宽度; d_{80} ——粉碎后 80% 物料能通过的正方形筛孔的宽度。

由于各国的技术习惯不同,英、美取式(1-3b)进行计算,我国和苏联取式(1-3a)进行计算。

(四)公称破碎比

$$i = \frac{B}{s} \quad (1-4)$$

式中 B ——破碎机加料口的最大宽度(mm); s ——破碎机出料口的最大宽度(mm)。

(五)有效破碎比

$$i = \frac{0.85B}{s} \quad (1-5)$$

式中的 B 和 s 的意义同上。因为喂入破碎机的最大物料直径应当比破碎机的宽度约小 15%, 才能被破碎机钳住。

(六)总粉碎比

$$i_{\text{总}} = i_1 i_2 \cdots i_n \quad (1-6)$$

$i_1, i_2, \cdots, i_n$ 分别为物料依次经过各级粉碎机的粉碎比。总粉碎比为各级粉碎比之乘积。

四、被碎物料的主要物理性质

物料在粉碎机内粉碎时需要施加的机械作用力,与被碎物料的硬度、机械强度、脆性与韧性以及物料的含水量等有关。因此在选择粉碎机时必须注意与物料的物理性质相适应。

(一)硬度 硬度为固体物料坚硬之程度。硬度是以莫氏(Mohs)指数作标准来划分的,数值大者硬度大,反之硬度小。莫氏硬度的基准是以滑石为1,金刚石为10。有关物料的莫氏硬度见表1-1。

物料的莫氏硬度

表 1-1

硬 度	物 料 名 称	简 易 测 试 方 法
1	滑石、高岭土	易用指甲刻痕
1~1.5	粘土、叶蜡石	能以指甲划破表面
2	芒硝、石膏	
2.5	褐煤、岩盐	易用小刀划破表面
3	重晶石、云母、方解石、水泥熟料	
3~3.5	石棉、无水石膏	
3.5~4	白云石	
4	萤石	
4~4.5	菱苦土矿	不能刻划玻璃,不能以小刀划破表面
5	磷灰石	
5.5	玻璃、石灰石、霞石	
6	长石	稍硬于玻璃
6~6.5	硫化铁矿	
7	砂岩、石英	能划破玻璃表面
8	黄玉	
9	刚玉、金刚砂	能切割玻璃
10	金刚石	

依硬度大小,可将物料分成硬质物料、中等硬质物料、软质物料三种。一般莫氏指数7~10称为硬质物料,4~6称为中等硬质物料,1~3称为软质物料。硬质物料粉碎较难,软质物料粉碎较易。

(二)脆性与韧性 脆性为固体物料所能承受冲击力之特性。脆性物料在冲击力的作用下易于粉碎。韧性与脆性相反,韧性物料能够抵抗冲击力而不易粉碎。

(三)机械强度 物料的机械强度是指在静载下测定的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗弯强度。抗压强度大,抗剪强度次之,抗弯强度较小,抗拉强度最小。物料的坚固性分类常用普氏系数 f 表示。普氏系数的值约为抗压强度的1%。根据普氏系数可将物料按坚固性分为10级, f 值由0.3到20。一般小块物料抗压强度较大,这是由于小块物料存在的宏观和微观裂缝比大块物料少,因而物料越小越难磨。矿物按普氏系数的分类见表1-2。

矿物按普氏系数的分类

表 1-2

级别	坚硬程度	矿 物 名 称	普氏系数 f
I	最硬的岩石	最硬最致密和韧性最大的石英岩和玄武岩,其它极硬的岩石	20
II	很硬的岩石	很硬的花岗岩,石英斑岩,硬质页岩,较上项硬度系数小些的石英岩,最硬的砂岩和石灰岩	15

续表 1-2

级别	坚硬程度	矿物名称	普氏系数 f
Ⅰ	硬岩石	花岗岩(致密的)和花岗质岩石,很硬的砂岩和石灰岩,石英质矿脉,硬砾石,很硬的铁矿石	10
Ⅱ	硬岩石	石灰石(硬的),不硬的花岗岩,硬砂岩,硬大理岩,硬白云岩,硬黄铁矿石	8
Ⅲ	相当硬的岩石	砂质页岩,页岩质砂岩	5
Ⅳ	中等硬度岩石	硬泥质页岩,不硬的砂岩和石灰岩,软砾岩	4
Ⅴ	中等硬度岩石	各种页岩(不硬的),致密泥灰岩	3
Ⅵ	相当软的岩石	软页岩,很软的石灰岩,白垩岩,岩盐,石膏,冻结土,无烟煤,普通泥灰岩,破碎的砂岩,胶结的砾石和卵石,石质土壤	2
Ⅵ ₁	相当软的岩石	碎石质土壤,破碎的页岩,凝结成块的砾石和碎石,硬质煤,硬化的粘土	1.5
Ⅶ	软岩石	粘土(致密的),软质煤,硬表土粘土质土壤	1
Ⅶ ₁	软岩石	轻砂质粘土,黄土、砾石	0.8
Ⅷ	土质岩石	腐质土,泥煤,轻砂质土壤,湿砂	0.6
Ⅸ	松散性岩石	砂,岩屑,细砾石,松土,采下的煤	0.5
X	流动性岩石	流砂,沼泽土,含水黄土及其它含水土壤	0.3

(四)易碎性和易磨性

易碎性和易磨性反映物料被粉碎的难易程度。对破碎来说称为易碎性,对粉磨来说称为易磨性。

易碎性和易磨性不仅与物料的机械强度和硬度有关,而且还与物料的粒度、粉碎设备和工艺流程等有关。不少学者提出了易碎性的各种表示方法,下面介绍其中的两种方法。

1. 哈德哥若夫(Hardgrove)粉碎能指数

这是美国材料试验学会于 1951 年正式采用的标准。其测定方法采用环球磨测定仪,如图 1-1 所示。8 只直径 1 英寸的球在顶转圆环和底座固定环腔内滚动。加入预先经 16~30 目(ASTM—美国材料试验学会规定的标准筛制)筛分过的物料 50g,顶转圆环回转 60 转后,测定 200 目(ASTM)筛的物料通过量 W 克,则哈德哥若夫粉碎能指数 GI 由下式计算

$$GI = 13 + 6.93W \quad (1-7)$$

GI 值越大,易碎性越好。 GI 值的倒数称为粉碎阻力。

2. 邦德(Bond)粉碎功指数

邦德粉碎功指数有球磨测定法、棒磨测定法、冲击测定法。下面仅介绍球磨测定法。

采用有效内径和有效长度皆为 305mm 的标准球磨机,内装钢球情况如表 1-3 所示。钢球共

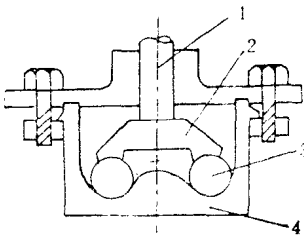


图 1-1 哈德哥若夫易磨性测定仪
1—驱动轴;2—顶转圆环;
3—钢球;4—固定底座。

钢球组成 表 1-3

球径(mm)	英制规格(英寸)	个数
36.5	1 $\frac{7}{16}$	43
30.2	1 $\frac{3}{16}$	67
25.4	1	10
19.1	3/4	71
15.9	5/8	94
合计		285

285 个, 19.5kg(下限值), 磨内加入粒度小于 3360 μ m 的物料 700cm³ 为 M_P 克。驱动轴以 70r/min 速度转动, 粉碎一定时间后, 将粉碎产物在 D_{P1} 微目网目筛进行筛分。称量筛余物料量为 W 克, 筛下量为 $(M_P - W)$ 克。求出磨机 1 转的筛下量 G_{SP} 克, 然后取与筛下量相等的新试料和筛余料混合, 重新加入磨内。预测下一次的循环负荷率[(重复粉碎物料重量/ D_{P1} 网目筛筛下物料重量) $\times 100\%$]为 250% 时的磨机回转次数, 这样的操作反复进行。使循环负荷率稳定在 250% 左右, 求出最后 3 次的 G_{SP} 的平均值 $\bar{G}_{SP}$ 。3 次中的 G_{SP} 的最大值和最小值之差要在平均值 $\bar{G}_{SP}$ 的 3% 以内。此时的 $\bar{G}_{SP}$ 即为易磨性值。如以 D_{P80} 微米表示试料 80% 通过量的筛网孔径, D_{P80} 微米表示产品 80% 通过量的筛网孔径, 则邦德粉碎功指数 W_i (kW $\cdot$ h/t) 可由下式求出

$$W_i = \frac{44.5 \times 1.10}{D_{P1}^{0.23} \times \bar{G}_{SP}^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{D_{P80}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{F80}}} \right)} \tag{1-8}$$

在表示 W_i 时要同时记下 D_{P1} , 例如 $W_i = 16.6 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ($D_{P1} = 149\mu\text{m}$)。 W_i 值大表示难磨, 反之则易磨。 W_i 值列于表 1-4。

粉碎功指数

表 1-4

物 料	密 度	功指数 W_i kW $\cdot$ h/t	物 料	密 度	功指数 W_i kW $\cdot$ h/t
安 山 岩	2.84	20.08	镍 矿	3.28	15.02
亚 铅 矿	3.64	12.72	铅 矿	3.35	13.09
长 石	2.59	11.88	亚 铅 矿	3.36	12.02
铜 矿	3.02	14.00	砾 岩	2.66	17.67
泥 板 岩	2.63	17.42	菱苦土矿	3.06	12.24
重 晶 石	4.50	4.81	磷 矿	2.74	10.91
玄 武 岩	2.91	18.81	硫 矿	4.06	9.82
玻 璃	2.58	13.54	卵 石	3.52	12.46
白 云 石	2.74	12.40	水泥熟料	3.15	17.80
火 打 石	2.65	28.78	水泥原料	2.67	11.56
片 麻 岩	2.71	22.14	煤	1.40	14.30
焦 炭	1.31	16.64	闪 绿 岩	2.82	22.99
金 刚 砂	3.48	62.37	石 膏	2.69	7.40
铬 铁	6.66	8.40	赤 铁 矿	3.53	14.12
硅 铁	4.41	11.01	石 灰 石	2.66	14.01
萤 石	3.01	9.80	石 英	2.65	14.93
金 矿	2.81	16.42	石 板	2.57	15.73
花 岗 岩	2.66	16.64	锡 矿	3.95	11.99
石 墨	1.75	47.92	铁 燧 石	2.20	9.66
钾 矿	2.40	8.86	铁 燧 石 矿	3.54	16.06
硅 石	2.68	10.54	钛 矿	4.01	13.56
金 红 石	2.80	13.95	硫黄铁矿	4.04	10.53
硅 砂	2.67	15.51	油母页岩	1.84	17.42
矿 渣	2.74	11.26	碳 化 硅	2.75	28.46
黑花岗岩	2.73	14.44	黝 辉 石	2.79	11.41
锰 矿	6.32	9.13	磁 铁 矿	3.88	10.97
粘 土	2.51	6.93			

GI 和 W_i 的关系为

$$W_i = \frac{435}{GI^{0.91}} \tag{1-9}$$

但是最近又提出如下的关系

$$W_i = \frac{1622}{GI^{1.08}} \quad W_i > 8.5 \quad (1-10)$$

(五)含水量 一般物料含水会降低抗压强度。在粉磨作业中,湿磨效率比干磨高,但在干磨中,物料含水量的增加反而会降低粉磨效率,这是由于物料含水后,会产生粘结现象,阻碍了物料的粉磨。

五、粉碎方法及粉碎机械的分类

(一)粉碎方法

粉碎过程总是先对被粉碎的物料施加机械作用力,使物料表面产生裂纹,并使之不断扩大最后导致物料破裂产生新的表面。由于对物料施加作用力的方法不同,归纳起来主要有以下几种粉碎方法。

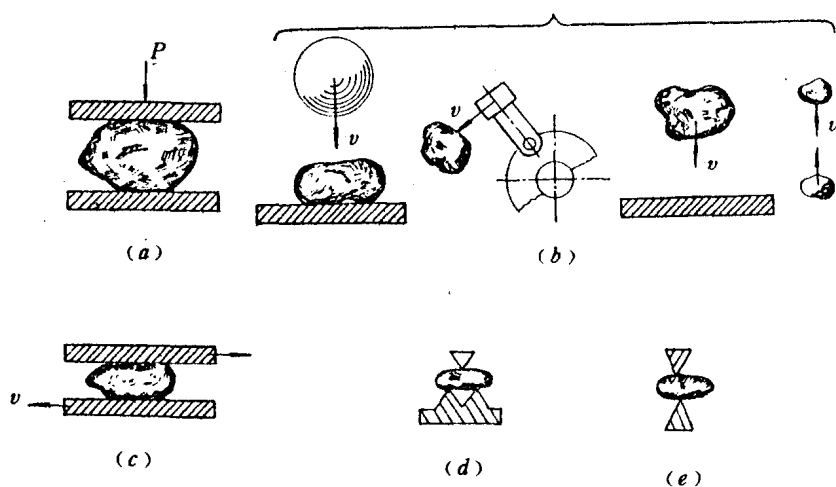


图 1-2 粉碎方法

1. 压碎 如图 1-2(a) 所示物料由于受到挤压的作用而破碎。主要用在粗、中、细碎,适用于硬质料和大块料的破碎。

2. 击碎 如图 1-2(b) 所示,物料由于受到冲击作用而粉碎。冲击力的产生是由于:运动的工作体对物料的冲击;高速运动的工作体向悬空物料的冲击;高速运动的物料向固定的工作面冲击;高速运动的物料互相冲击。主要用在粗、中、细碎及粉磨,适用于脆性物料的粉碎。

3. 研磨 如图 1-2(c) 所示,物料由于受到工作面的研磨作用或物料之间的研磨作用而粉碎。主要用在粉磨,对物料的性质适用较广。

4. 弯曲 如图 1-2(d) 所示,物料由于受到弯曲作用而破碎。主要用于粗、中碎,适用于坚硬的物料。

5. 劈碎 如图 1-2(e) 所示,物料由于受到尖劈作用而粉碎。主要用于中、细碎,适用于韧性或脆性的物料。

除上述用机械方法进行粉碎外,还有爆炸、电水锤、超声波和低声波、热力破碎和等离子破碎等粉碎方法,但目前尚未大规模使用。

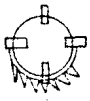
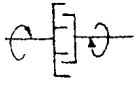
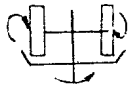
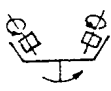
物料在粉碎机内粉碎时多数是受到几种方法的联合作用,如物料在圆锥破碎机内破碎时就受到挤压、弯曲和研磨的联合作用。

(二)粉碎机械的分类

根据粉碎机的主要作用原理不同,其分类如表 1-5 所示。

粉碎机的类型

表 1-5

序号	图 示	机 名	粉碎方法	运动方式	粉碎比	适 用	范围
1		颚 式 破碎机	压碎为主	往 复	4~6 中碎最 高达到 10 左右	粗 碎 中 碎	硬质料 中硬料
2		圆 锥 破碎机	压碎为主	回 转	粗碎 4~6 中碎 3~17	粗 碎 中 碎	硬质料 中硬料
3		对 辊 破碎机	压碎为主	旋转(慢速)	3~8	中 碎 细 碎	硬质料 软质料
4		锤 式 破碎机	击 碎	旋转(快速)	单转子式:10~15 双转子式:30~40	中 碎	硬质料
						细 碎	中硬料 软质料
5		反击式 破碎机	击 碎	旋转(快速)	10 以上最高可达 40	中 碎	中硬料
6		笼 式 粉碎机	击 碎	旋转(快速)	数百	细 碎	软质料
7		轮碾机	压碎+研磨	自 转 公 转	数十	细 碎	湿 粘 质 料
8		辊磨机	压碎+研磨	自 转 公 转	数百以上	细 碎 磨 碎	中硬料 软质料
9		球磨机	击碎+研磨	旋转(慢速)	数百以上	磨 碎	硬质料 中硬料
10		自磨机	击碎+研磨	旋转(慢速)	数百至数千	细 碎 磨 碎	硬质料

§ 1.2 粒度分布

一、粒径

工程上采用的物料形状是不规则的。这就需要按一定方法确定和表达其尺寸大小,以便从事计算和分析。

较简单的情况是球形单颗粒,其直径也就是粒径。对形状不规则的单颗粒,可以由各个

方向不一致的尺寸加以平均,得到“平均径”或是以在同一物理现象中与之有相同效果的规则体直径表示,即等效径。而对一堆形状不规则大小不同的颗粒群,除算出单颗粒的平均径外,还要将不同大小的单颗粒粒径再加以平均,确定一个能代表全部颗粒的粒群平均粒径。

(一)单颗粒粒径 将颗粒放在平面上,当处于稳定静止状态下,设在成垂直的三个方向尺寸分别为:长径 L 、短径 b 和厚度 h ,也就是颗粒的外接立方体的三边尺寸,则单颗粒粒径的各种计算方法如表 1-6 所示。

单颗粒粒径的计算方法 表 1-6

名 称	计算公式
长轴径	L
短轴径	b
定向径	$L \sim b$
二轴平均径	$(L + b)/2$
三轴平均径	$(L + b + h)/3$
二轴几何平均径	$(L \cdot b)^{1/2}$
三轴几何平均径	$(L \cdot b \cdot h)^{1/3}$
二轴调和平均径	$2 / \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{b} \right)$
三轴调和平均径	$3 / \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right)$
三轴表面积平均径	$\sqrt{(2Lb + 2bh + 2hL)/6}$
体面积平均径	$3L \cdot b \cdot h / (Lb + bh + hL)$
圆形等效径	$(4A/\pi)^{1/2}$
球体等效径	$(6V/\pi)^{1/3}$
等效径(斯托克斯径)	$\sqrt{18\mu u_0 / (\rho_s - \rho)g}$

注: A —颗粒投影面积; V —粒子体积; μ —流体粘度; u_0 —粒子沉降速度; ρ_s —粒子密度; ρ —流体密度; g —重力加速度。

(二)粒群平均粒径 粒群平均粒径的计算方法如表 1-7 所示。

颗粒群平均粒径的计算方法 表 1-7

平均粒径的名称	计算公式	物理意义
算术平均径	$\bar{d}_n = \sum nd / \sum n$	单一粒径的算术平均值
几何平均径	$\bar{d}_g = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n}$	几个粒径乘积的几次方根
调和平均径	$\bar{d}_h = \sum n / \sum (n/d)$	各粒径的调和平均值
体面积平均径	$\bar{d}_{os} = \sum nd^3 / \sum nd^2$	全部粒子的体积除以总表面积
质量平均径	$\bar{d}_m = \sum nd^4 / \sum nd^3$	质量等于总质量,数目等于总个数的等粒子粒径
面积平均径	$\bar{d}_s = (\sum nd^2 / \sum n)^{1/2}$	将总表面积除以总个数取其平方根
体积平均径	$\bar{d}_v = (\sum nd^3 / \sum n)^{1/3}$	将总体积除总个数取其立方根
比表面积径	$d_s = \varphi / \rho_s S_m$	由比表面积 S_m 计算的粒径
中位径	d_{50}	粒径分布的累积值为 50% 时的粒径
多数径	d_{n04}	粒径分布中含量最高的粒径

注: φ —比表面积形状系数

从表 1-7 可以看出粒群平均粒径有多种表示方法,采用不同的颗粒测定方法,得到不同的平均粒径。就同一测定数据,由于应用目的不同,采用不同的计算方法其结果也不相同。这是由于要把一群不规则形状颗粒用一个所谓有代表性的“定性尺寸”的平均粒径来表示是有一定困难的。各种平均径的具体应用,要结合测定方法与生产操作过程而定。例如破碎能量消耗计算用几何径,粉磨用调和径;有关传热传质化学反应用调和径、面积平均径和比表面积径;气力输送用调和径、比表面积径、体积平均径和等效径;散粒层流体阻力用比表面积径;分离、分级装置性能表示用中位径。

二、粒度分布曲线

为了研究粉碎产品中物料的任何粒级的粒度组成,常将粉碎产品的测定数据绘制成曲线,称为粒度分布曲线。有累积分布和频率分布两种。

以表 1-8 所列数据说明上述两种粒度分布曲线的绘制方法。

某物料粒度测量值

表 1-8

项 目 \ 级 别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粒径 $\Delta d(\text{mm})$	0.6 ~ 1.0	1.0 ~ 1.4	1.4 ~ 1.8	1.8 ~ 2.2	2.2 ~ 2.6	2.6 ~ 3.0	3.0 ~ 3.4	3.4 ~ 3.8	3.8 ~ 4.2
平均颗粒尺寸 $d_0(\text{mm})$	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0
每一级别颗粒数 $N(\text{个})$	370	1110	1660	1510	1190	776	470	187	48
每一级别颗粒质量 $\Delta D_i(\text{g})$	0.1	1.0	3.55	6.35	8.6	8.9	8.05	4.55	1.6
每一级别颗粒相对质量 $\Delta D(\%)$	0.23	2.35	8.3	14.95	20.1	20.85	18.8	10.65	3.77
相对频率 $\Delta D/\Delta d(\%/ \text{mm})$	0.58	5.88	20.8	37.4	50.3	52.1	47.0	26.6	9.6
筛上累积 $R(\%)$	100	99.77	97.42	89.12	74.17	54.07	33.22	14.42	3.77
筛下累积 $D(\%)$	0	0.23	2.58	10.88	25.83	45.93	66.78	85.58	96.23

颗粒尺寸的频率分布和累积分布常描绘在直角坐标上,横坐标为颗粒级别的间隔。图 1-3(a) 的纵坐标为颗粒数;图 1-3(b) 的纵坐标为相对频率 $\Delta D/\Delta d$ 的百分数;图 1-3(c) 的纵坐标为筛余累积 R 和筛下物累积 D 。以每一级别的颗粒数作矩形(图 1-3(a)),将各个矩形顶部中点连线,即为颗粒数频率分布曲线。由于测定颗粒数不够方便,故常用相对频率分布。将 $\Delta D/\Delta d$ 的值标绘在图 1-3(b) 上,作出各个矩形,将各个矩形的中点连线,即为相对频率分布曲线。将各个级别的筛余累积 R 和筛下物累积 $D = 100 - R$ 的值分别标绘在图 1-3(c) 上分别将各个矩形顶点连线,即得筛余累积曲线 R 和筛下物累积曲线 D 。

频率分布曲线比较明显地反映出各个级别的组成情况。累积分布曲线则较明显地反映出某一级别的筛上累积含量或筛下物累积含量。

分布曲线间的数学关系结合图 1-4 说明如下。

由于

$$R + D = 100 \quad (1-11)$$

$$D = \int_{d_{\min}}^d dD \quad (1-12)$$

式中 d ——筛下累积颗粒的最大直径(近似等于网目筛孔尺寸)。

$$R = \int_d^{d_{\max}} dR = 100 - \int_{d_{\min}}^d dD \quad (1-13)$$

相对频率用

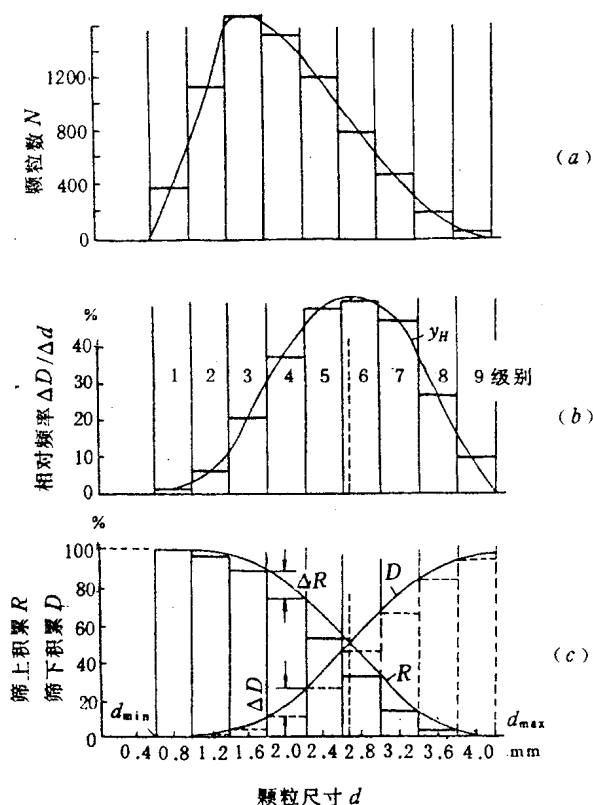


图 1-3 颗粒尺寸的频率分布和累积分布

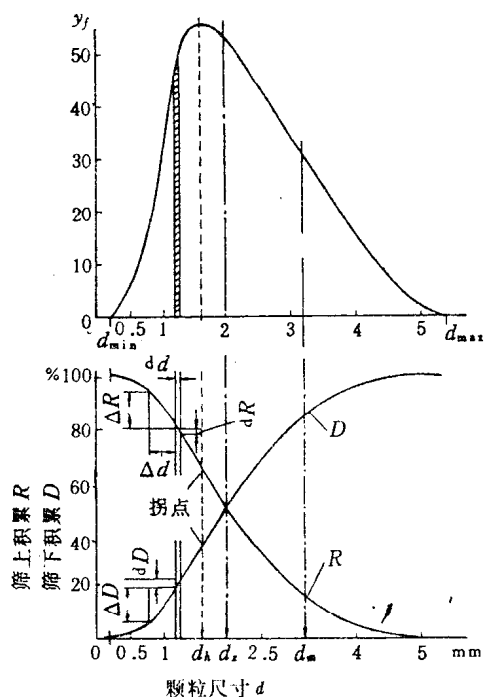


图 1-4 频率分布和累积分布之间的关系

$$y_f = \frac{dD}{dd} = -\frac{dR}{dd}$$

表示,于是得到:

$$R = 100 - \int_{d_{\min}}^d y_f dd \quad (1-14)$$

频率曲线最大值的横坐标值 d_k 为有最大频率的颗粒尺寸(图 1-4)。作一与纵坐标平行的线。使频率曲线下面围成的面积分为两个面积相等的部分,即通过 R 和 D 累积曲线交点作一与纵坐标平行的线交 x 轴于 d_z , d_z 即为平均颗粒尺寸,相应于 d_z 的累积值 $R = D = 50\%$ 。

由于频率曲线下面所围成的面积为 1 或 100%, 中值颗粒尺寸 d_m 可用求频率曲线对纵坐标的重心方法求出:

$$d_m = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^k d_{mi} \Delta D_i \quad (1-15)$$

或

$$d_m = \frac{1}{100} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d \cdot y_f dd \quad (1-16)$$

破碎机的产品粒度特性是用筛余累积曲线说明的,见图 1-5。凹形曲线 1 表明破碎产品有较多

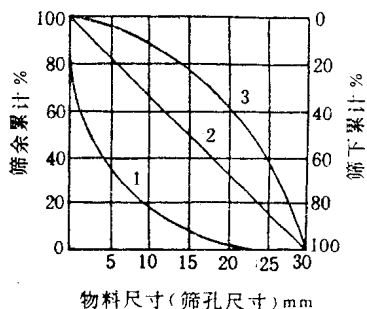


图 1-5 粒度组成特性曲线

的细粒级;凸形曲线 3,表明破碎产品中有较多的粗粒级;直线 2 表明破碎产品中的粗细粒级大致相同。

若粉碎产品的粒度范围很宽,由于细粒级在直角坐标的横坐标上的间距特别小,点很密集,曲线就难于绘制和使用。此时用半对数坐标法就比较便于应用。所谓半对数坐标法,就是粒级尺寸在横坐标上用对数表示,纵坐标仍用数轴表示。

对于粉磨产品还有用全对数坐标描绘累积分布曲线的,即纵坐标和横坐标值皆用对数表示。如图 1-6 所示。粉磨产品的筛下物累积与粒度的关系,常常近似于直线。令这根直线的方程为

$$\lg y = k \lg x + \lg A \quad \text{或} \quad y = Ax^k$$

式中 k 为直线的斜率, A 为直线的截距。在直线上取相距较远的两点 $(x_1, y_1; x_2, y_2)$, 斜率即为

$$k = \frac{\lg y_1 - \lg y_2}{\lg x_1 - \lg x_2}$$

将 k 代入上面方程式,然后由上面选定的一个点(例如 x_2, y_2)求截距 A 为

$$y_2 = Ax_2^k \quad \text{或} \quad A = \frac{y_2}{x_2^k}$$

使用全对数坐标绘制累积分布曲线的目的是寻找曲线的数学解析式。

三、粒度分布方程式

如果知道粉粒体的粒度分布方程式,就可以根据几个筛析数据来推断出整个粒度分布的规律。用以表达粉粒体粒度分布的方程式有数个,下面只介绍有普遍意义和常用的三个粒度分布方程式。

(一)对数正态分布方程式

在实际粉料中,尤经粉碎后,在普通坐标上的分布曲线往往朝粒度较小的一侧倾斜,如图 1-7 上部所示。这就不便于使用。对于这种情况,若采用对数正态分布为宜,即它的横坐标为粒度的对数值。分布曲

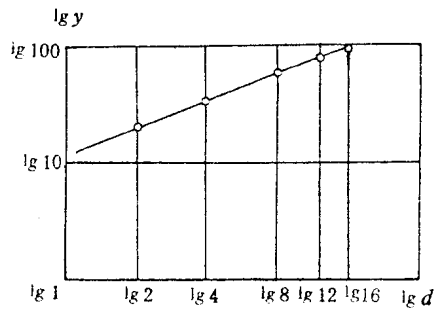


图 1-6

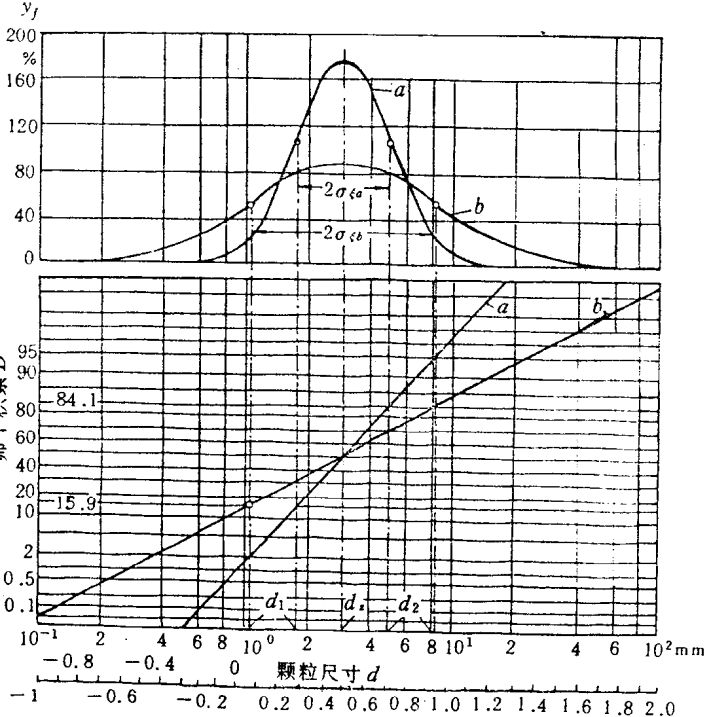
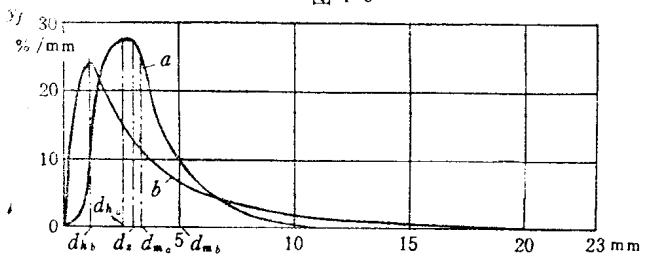


图 1-7 对数正态分布