

(京)新登字 177 号

内 容 提 要

《粉体工程》是以粉体物料为对象,研究其性质,加工处理技术的一门工程科学,全书共分八章。主要内容包括粉粒体的基本性质、粉碎过程的基本理论和设备、分离的基本理论及单元操作、分级原理及设备、均化机理和装置、储存装置及仓内物料流动理论、粉体的输送以及粒化等。

该书可供从事冶金、矿山、化工、食品、医药、建材、轻工、生物工程、耐火材料等行业的生产、设计研究工程技术人员参考,亦可作为本科生、研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程/张少明等编著. —北京:中国建材工业出版社, 1994. 8

ISBN 7-80090-317-6

I. 粉… I. 张… III. ①粒状物料②粉末技术 IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 10123 号

粉体工程

张少明 翟旭东 刘亚云

*

中国建材工业出版社出版

(北京百万庄国家建材局内

邮政编码:100831)

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京 建教印刷厂印刷

开本:787×1092

1/16 印张:17.5 字数:430千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数:1—4000册

定价:22.00元

§ 1 粉体的基本性质

粉体是粉体工程学研究的基本对象。工业生产单元操作过程中所处理的物料，因其物质种类千差万别，粒子的形成方式不同，所以其各种性质也不相同。而这些性质与有关的单元操作过程密切相关，直接影响这些过程的正常进行，且直接影响原料、半成品及成品的质量。因此，在研究粉体工程学所涉及的各个单元操作过程前，必须对粉体的基本性质有所了解。

粉体的基本性质通常分成三个方面，即：(1)粉体的几何形态性质。包括粉体粒子的大小、粒度分布、粒子形状以及堆积状态等。(2)粉体的力学性质。力学性质又分为静力学性质和动力学性质。包括粉体的摩擦角、粉体压力、流动性以及在流体中的运动性质等。(3)粉体的其他物理化学性质。包括粉体的电、磁、光、声、热学性质，以及粘附性、吸附性、凝聚性、湿润性、爆炸性等。本章仅就本书所涉及的各有关单元操作过程，介绍主要的共性的粉体基本性质，其他的粉体性质，将结合具体的单元操作过程分别加以介绍。

§ 1-1 粒 径

粒径是用来表示粉体颗粒尺寸大小的几何参数，它是粉体诸性质中最重要和最基本的。粒径又称粒度。粒径的定义和表示方法由于颗粒的形状、大小和组成的不同而不同，同时，又与颗粒的形成过程、测试方法和工业用途有密切联系。通常将粒径分为单个颗粒的单一粒径和颗粒群体的平均粒径。

§ 1-1-1 单个颗粒的单一粒径

对于单一的球形颗粒，其直径即为粒径。但对于大多数情况中的非球形单颗粒，可由该颗粒不同方向上的不同尺寸按照一定的计算方法加以平均，得到单颗粒的平均直径，或是以在同一物理现象中与之有相同效果的球形颗粒直径来表示，即等效粒径，或叫当量径。

当对一个颗粒作三维测量时，设有一最小体积的直方体（其三维尺寸如图 1-1 所示）恰好包围住颗粒，则根据这个外接直方体的尺寸，单颗粒的平均粒径的各种计算方法列于表 1-1 中。表中还同时列出了几种常用的等效粒径计算公式。

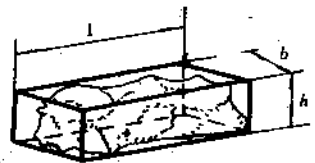


图 1-1 颗粒的外接直方体

§ 1-1-2 颗粒群的平均径

实际生产过程中所处理的粉体是由许多粒径大小不一的颗粒组成的分散系统。若已知粒径为 d 的颗粒个数为 n ，或质量比率为 W ，则颗粒群的平均粒径按个数基准和质量基准的计算公式列于表 1-2 中。

表 1-1 单一粒径的计算方法

名称	计算公式	名称	计算公式
长轴径	l	表面积平均径	$(2lb+2bh+2hl)/6$
短轴径	b	体面积平均径	$3bh/(lb+bh+hl)$
二轴算术平均径	$(l+b)/2$	等体积立方体当量径	$V^{1/3}$
三轴算术平均径	$(l+b+h)/3$	等体积球体当量径	$(6V/\pi)^{1/3}$
二轴几何平均径	$(lb)^{1/2}$	投影圆当量径	$(4A/\pi)^{0.5}$
三轴几何平均径	$(lbh)^{1/3}$	等表面积球当量径	$(s/\pi)^{0.5}$
二轴调和平均径	$2/[(1/l)+(1/b)]$	等沉降速度球当量径 (斯托克斯粒径)	$[18\mu_0/(\rho_p-\rho)g]$
三轴调和平均径	$3/(1/l)+(1/b)+(1/h)$		

注: V —颗粒体积; A —颗粒投影面积; S —颗粒表面积; μ —流体粘度; u_0 —颗粒沉降速度; ρ_p —颗粒密度; ρ —流体密度; g —重力加速度。

表 1-2 平均粒径的计算方法

名称	计算公式		
	个数基准	质量基准	
加 权 径	个数(算术)平均粒径 $d_1(da)$	$\frac{\sum(nd)}{\sum n}$	$\frac{\sum(W/d^2)}{\sum(W/d^3)}$
	长度平均径 d_2	$\frac{\sum(nd^2)}{\sum(nd)}$	$\frac{\sum(W/d)}{\sum(W/d^2)}$
	面积平均径 d_3	$\frac{\sum(nd^3)}{\sum(nd^2)}$	$\frac{\sum W}{\sum(W/d)}$
	体积(质量)平均径 $d_4(dm)$	$\frac{\sum(nd^4)}{\sum(nd^3)}$	$\frac{\sum(Wd)}{\sum W}$
平均表面积径 d_s	$\frac{\sum(nd^2)}{\sum(n)}$	$\frac{\sum(W/d)}{\sum(W/d^2)}$	
平均体积径 d_v	$\frac{\sum(nd^3)}{\sum n}$	$\frac{\sum W}{\sum(W/d^2)}$	
几何平均径 d_g	$\frac{\sum(nld)}{\sum n}$	$\frac{\sum[(W/d^3)\ln d]}{\sum(W/d^3)}$	
调和平均径 d_h	$\frac{\sum n}{\sum(n/d)}$	$\frac{\sum(W/d^3)}{\sum(W/d^4)}$	
比表面积径 d_s	ϕ/S_v	$\phi/\rho_p S_m$	
中位径 d_{50}	粒度分布的累积值为 50% 时的粒径		
多数径 d_{mod}	粒度分布中含量最高的粒径		

注: d_s 物理意义见“颗粒形状”一节; d_{50} 、 d_{mod} 物理意义见“粒度分布”一节。

若颗粒较粗的话(一般 1~20mm),则平均粒径 d 可按下式计算,由:

$$m = n \times \frac{\pi}{6} \times (d)^3 \times \rho_p$$

由

$$d = \sqrt[3]{\frac{6m}{n\pi\rho_p}} = 1.24 \sqrt[3]{\frac{m}{n\rho_p}} \quad (1-1)$$

式中 m 为颗粒群总质量; n 为颗粒数,一般 $n \geq 200$ 粒; ρ_p 为颗粒密度。

上表中个数基准和质量基准的平均粒径换算公式为

$$\left\{ \frac{\sum (nd^q)}{\sum (nd^3)} \right\}^{\frac{1}{p-q}} = \left\{ \frac{\sum (wd^{q-3})}{\sum (wd^{p-3})} \right\}^{\frac{1}{p-q}} \quad (1-2)$$

应当指出的是,上述单一粒径和平均粒径的计算是为着不同的实际单元操作过程或某一粉体研究需要服务的,譬如一些平均粒径所适用的有关物理化学过程见表 1-3。

表 1-3 不同物理化学过程所采用的平均粒径

符 号	平均粒径名称	适用的机械、物理、化学过程
d_z	算术平均径	蒸发、各种尺寸的比较(筛分析)
d_m	体面积平均径	传质、反应、粒子充填层的流体阻力
d_m	质量平均径	气力输送、质量效率、燃烧、物料平衡
d_s	平均面积径	吸收、粉磨
d_D	平均体积径	光的散射、喷射的质量分布比较、破碎
d_s	比表面积径	蒸发、分子扩散
d_{50}	中位径	分离、分级装置性能表示
d_s	Stokes 粒径	气力输送、沉降分析

由于日常生活和生产过程所见到的颗粒状物质的粒度范围相差很大(图 1-2),需要采用不同的粒度测定方法(表 1-4),所得原始数据也不相同,用这些原始数据计算平均粒径必然会得出不同结果,即使同一原始数据,若采用不同的计算方法,所得结果也会相去甚远。因此,在进行平均粒径的具体计算时,首先要根据具体的生产单元操作过程和粒度范围、粒度应用目的等选择颗粒在过程中最有代表性的粒度测定方法和计算方法,否则会得出不正确的或是完全错误的结果。例如,对于分离操作系统的颗粒,最好选用重力沉降或离心沉降方法测定颗粒的斯托克斯(Stokes)粒径,即等沉降速度球当量径。

表 1-4 粒度测定方法

测定方法	粒度范围(μm)	测定方法	粒度范围(μm)
筛析法	>40	吸附法(气相)	10~0.001
光学显微镜法	500~0.5	吸附法(液相)	10~0.001
电子显微镜法	10~0.001	润湿热法	10~0.001
通过细孔法	500~0.5	渗透法	100~0.5
沉降法(液相)	500~0.5	反应速度法	50~0.1
风筛法(气相)	100~1	散射法(光线)	10~0.001
离心力法	5~0.01	散射法(X光)	0.05~0.001
扩散法	0.5~0.001		

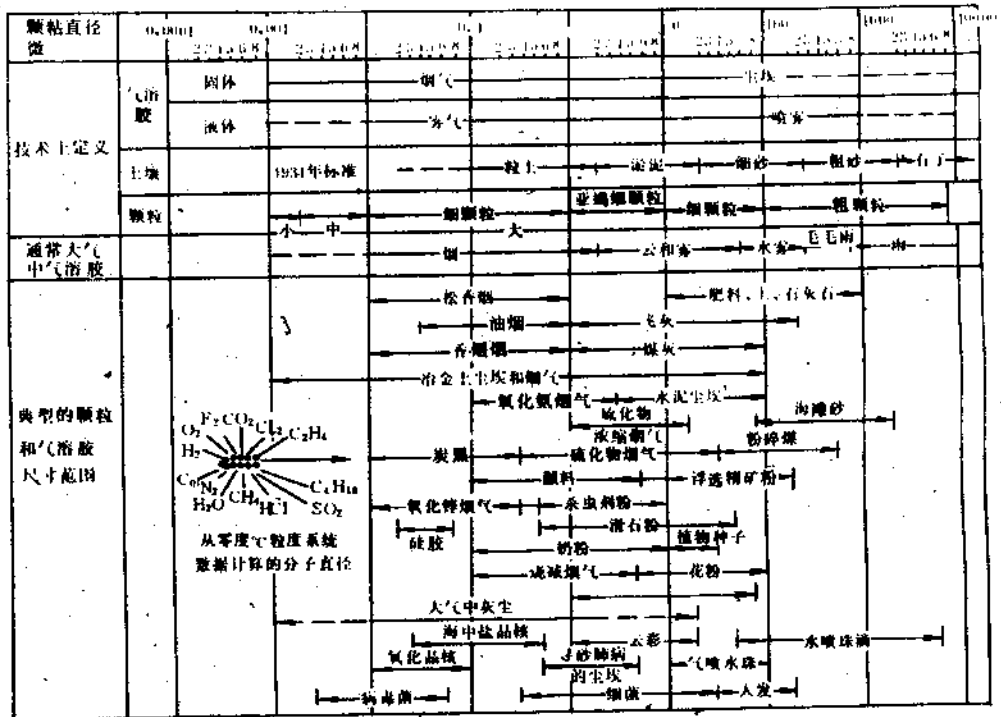


图 1-2 典型颗粒的尺寸范围

§ 1-2 粒度分布

对于颗粒群,除了平均粒径指标外,我们通常更关心的是其中大小不同的颗粒所占的分量,或者说颗粒群的粒度组成情况,即粒度分布。

所谓粒度分布是指将颗粒群以一定的粒度范围按大小顺序分为若干级别(粒级),各级别

粒子占颗粒群总量的百分数。显然,若颗粒群总量分别用个数和质量表示的话,则粒度分布相应有个数基准和质量基准两种。同一种颗粒群,不同基准的粒度分布差别甚大。工业上一般采用质量基准。

§ 1-2-1 粒度分布的表示方式

按照粒度分布与粒度 d 的函数关系,通常将粒度分布分成频率与累积分布两种,后者又有筛上与筛下两种累积分布,即:

$$\text{频率分布} \quad f = f_1(d) \quad (1-3)$$

$$\text{筛上累积分布} \quad R = f_2(d) \quad (1-4)$$

$$\text{筛下累积分布} \quad D = f_3(d) \quad (1-5)$$

下面分别叙述之。

1. 频率分布, 设粒级范围为 Δd (平均粒径为 d_i 可近似由算术平均径求得) 内的颗粒质量占颗粒群总质量 W 的百分数为 ΔW_i , 则 $(W_i/W)/\Delta d$ 为频率 $f(\%/\Delta d)$ 。表 1-5 为一频率分布示例。通常取各粒级的 Δd 相等。频率分布能比较直观地表示颗粒的组成特性。但若改变 Δd , 则会得到不同的频率分布。

表 1-5 频率分布

粒 级 (μm)	平均粒径 (μm)	质量频率 ($\%/\Delta d$)	个数频率 ($\%/\Delta d$)	粒 级 (μm)	平均粒径 (μm)	质量频率 ($\%/\Delta d$)	个数频率 ($\%/\Delta d$)
<20	~10	6.5	19.5	35~40	37.5	14.3	7.6
20~25	22.5	15.8	25.6	40~45	42.5	8.8	3.6
25~30	27.5	23.2	24.1	>45		7.5	2.4
30~35	32.5	23.9	17.2				

2. 累积分布, 用大于或小于某一粒径 d 的颗粒质量 ΣW_i 占颗粒群总质量 W 的百分数来表示筛余累积百分数 ($R, \%$) 或筛下累积百分数 ($D, \%$)。表 1-6 为一累积分布的例子。显然, $D = 1 - R\%$

表 1-6 累积分布

粒 级 (μm)	质 量 累 积 (%)		个 数 累 积 (%)	
	$R(\%)$	$D(\%)$	$R(\%)$	$D(\%)$
<20	100.0	6.5	100.0	19.5
20~25	93.5	22.3	80.5	45.1
25~30	77.7	45.5	54.9	69.2
30~35	54.5	69.4	30.8	86.4
35~40	30.6	83.4	13.6	94.0
40~45	16.3	92.5	6.0	97.6
>45	7.5	100.0	2.4	100.0

在进行累积分布计算时,通常 R 值对应于粒级的下限, D 值对应于粒级的上限。

工业中多习惯采用筛余累积的表示方法,如在粉磨作业中,由筛余累积分布的测定可知还

有多少物料未达到合格产品细度而仍为粗粉。

§ 1-2-2 粒度分布的表达形式

粒度分布数据有三种表达形式,即:粒度表格、粒度分布曲线和粒度分布方程。

1. 粒度表格

多用于筛析法测定粒度分布的数据纪录中,是表示粒度分布的最简单的形式,也是粒度分布其他两种形式的原始形式,如表 1-5 与 1-6 所示。

2. 粒度分布曲线

为了更直观方便地反映和比较颗粒组成特性,通常更多地是采用作图法来绘制粒度分布曲线。作图法分为直方图法和曲线图法。对应前述的频率分布和累积分布,粒度分布曲线也分成两种。现举例说明。表 1-7 为由长石粉料的筛析数据制得的累积分布粒度表格。由此绘制出筛上和筛下累积分布曲线,如图 1-3 所示。同样根据频率分布粒度表格亦可绘制出频率分布图(图 1-4)。但往往筛析法所使用的套筛并不能将颗粒群分成相等 Δd 的粒级,使用中甚感不便,所以,实用中常常是由累积分布曲线换算得到频率分布曲线。

表 1-7 长石粉料的筛析粒度表格

筛目 (孔/m)	孔径 (mm)	筛上物 (g)	筛上物累积 (g)	R(%)	D(%)
+28	0.63	0.25	0.25	0.2	99.8
+35	0.50	7.00	7.25	5.8	94.2
+45	0.40	11.27	18.52	14.8	85.2
+55	0.32	15.77	34.29	27.4	72.6
+75	0.20	24.86	59.15	47.3	52.7
+120	0.13	48.60	107.75	86.2	13.8
-120		17.25	125.00	100.0	0

表 1-8 长石粉料的频率分布

粒度 (mm)	平均粒度 (mm)	W_i (%/0.05mm)	粒度 (mm)	平均粒度 (mm)	W_i (%/0.05mm)
0	0.025	0	0.40	0.425	5.5
0.05	0.075	3	0.45	0.475	4.5
0.10	0.125	8	0.50	0.525	3.5
0.15	0.175	15	0.55	0.575	3
0.20	0.225	20.5	0.60	0.625	2.5
0.25	0.275	15.5	0.65		
0.30	0.325	10.5	0.70	0.675	1.5
0.35	0.375	7			

仍以长石粉料为例。取粒度范围 Δd 为 0.05mm,从图 1-3 中的 R 曲线查得 $\Delta R/\Delta d$ (%/0.05mm) 即 f ,制成频率分布粒度表格 1-8,然后绘制直方图,最后光滑连结各矩形顶部中点而成 $\Delta d=0.05\text{mm}$ 时的频率分布曲线,如图 1-4 所示。显然,只有当 Δd 足够小时,获得的曲线才

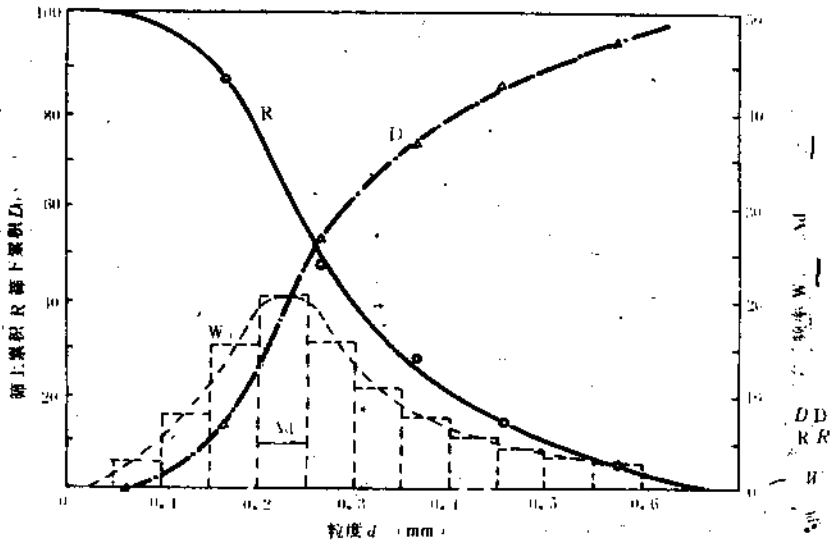


图 1-3 长石粉料的粒度分布曲线

有意义。此时,可不做直方图,直接用粒级平均粒径绘制频率分布曲线。

由累积分布曲线,可直接读出 $R=D=50\%$ 时所对应的中位径 d_{50} ,以及任何两个粒度之间的颗粒百分含量 ΔR ;由频率曲线,亦可直接读出对应于曲线最高点即颗粒含量最多的多数径 d_{mod} 以及颗粒群个数平均径或质量平均径 d :

$$d = \sum_{i=1}^n (f_i \times d_i) \quad (1-6)$$

式中 n 是粒级数目; d_i 是各粒级平均直径; f_i 是对应粒级频率。

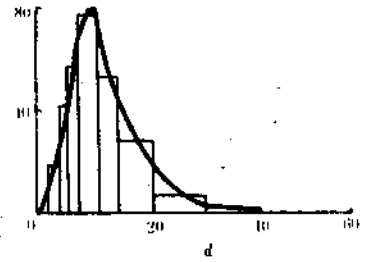


图 1-4 频率分布直方图

累积分布与频率分布有如下关系:当 $\Delta d \rightarrow 0$ 时,有 $f = d_R/d_d$,则在同一横坐标条件下,筛余累积分布曲线上各粒径点之切线斜率 d_R/d_d ,即为频率分布曲线上对应粒径点之频率值,逐点作切线求斜率,即逐点求微分,可得频率分布,故又称频率分布为累积分布的微分形式, f 曲线为微分曲线;而在频率分布曲线上以各粒径 d 为中心, d_d 为粒级宽度,对应频率 f 为高度,则各直方体面积为 $f \times d_d = d_R$,即各粒级质量百分数,逐点作直方体并求面积和,即逐点求积分,即得筛余(筛下)累积分布,故又称累积分布为频率分布的积分形式, $R(D)$ 曲线为积分曲线。综上所述,可用下式表示两种分布的关系:

$$R = \int_d^{d_{max}} f d_d = \int_d^{d_{max}} \frac{dR}{d_d} d_d \quad (1-7a)$$

$$D = \int_{d_{min}}^d f d_d = \int_{d_{min}}^d \frac{dD}{d_d} d_d \quad (1-7b)$$

显然, $R+D = \int_{d_{min}}^d f d_d + \int_d^{d_{max}} f d_d = \int_{d_{min}}^{d_{max}} f d_d = 100$,即为 f 曲线下所包含的全部面积。

粒度分布曲线的另一优点是,可在由有限个粒度分布测定数据作出的光滑曲线上,读出粒群中未能给出的任意一个粒级的颗粒百分含量。

当粒度分布较宽时,利用算术坐标绘制粒度分布曲线,此时,往往因为细粒级间隔很小而不易精确绘出,可采用半对数坐标进行,即取横坐标为对数坐标绘制,纵坐标仍为算术坐标。

3. 粒度分布方程

曲线形式虽然直观,但是制作仍较繁复,而且并不能很好地反应出具有相同或相似粒度分布特性的颗粒群的共性规律。对粒度分布最精确最简便的描述是用数学方程,即粒度分布方程。用它不仅可以表示粒度的分布规律,而且,还可用解析法求取各种平均粒径、比表面积等粉体特性参数 ϕ ,以及进行各种基准换算。另外,在实际测定时,还能减少决定分布所需的测定次数,即只需根据几个测定数据就可推断出整个粒度分布的规律。

粒度分布方程有很多种,其适用粉体种类和粒度范围均有一定限制,计算结果与实际也有一定误差,这里仅就研究得最多和应用最广泛的三种典型分布方程作一介绍。

(1) 正态分布

在自然现象中,“随机事件”的出现具有偶然性,但就其总体而言,却总具有必然性,即这类事件出现的频率总是有统计规律地在某个一定的常数附近摆动。这种频率分布规律就是正态分布。图 1-5 所示即为正态分布曲线,系由正态分布概率密度函数(或叫频率分布函数)给出:

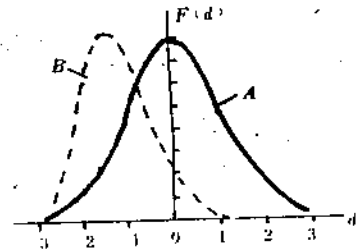


图 1-5 正态分布曲线

$$F(d) = \frac{d_R}{d_A} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(d-\bar{d})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-8)$$

$F(d)$ 为双参数函数,由两个统计参数,即平均值 \bar{d} 和标准偏差 σ 加以定义。后者是分布宽度的一种量度,用以表达分布曲线的胖瘦程度,即分布范围的宽窄。

当 $\bar{d}=0, \sigma=1$ 时,称为标准正态分布,其曲线是一条钟形对称曲线(图 1-5 中的 A 曲线):

$$F(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{d^2}{2}\right) \quad (1-9)$$

在正态概率纸上绘出的正态分布是一直线。正态概率纸是经特殊设计的坐标纸,其横坐标为算术坐标,纵坐标则按正态分布规律分度刻划。将表 1-7 的粒度分布数据在该纸上标绘所得曲线近乎为一条直线(在直线的两端处稍有弯曲),如图 1-6 所示。利用正态概率纸标绘正态分布曲线和求取决定曲线和 \bar{d} 和 σ 值非常方便。平均粒径 $\bar{d}=d_{50}$ (中位径),由概率论:

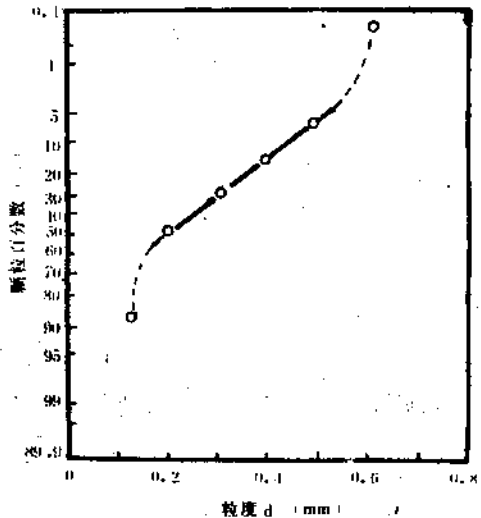


图 1-6 在正态概率纸上的正态分布

$$\sigma = d_{50} - d_{84.1} = d_{15.9} - d_{50}$$

$d_{84.1}$ 与 $d_{15.9}$ 分别是 $R=84.1\%$ 和 $R=15.9\%$ 时对应的粒径。

除了自然界中的植物花粉的粒度分布符合正态分布外,工程上,大多数颗粒粒度分布曲线是非对称的,很少符合正态分布。

(2) 对数正态分布

生产中,粉碎产品的粒度分布曲线往往因为细粉偏多粗颗粒较少而向细粒一侧倾斜,粗粒

一侧则形成长下摆,如图 1-5 中 B 曲线所示。如果将横座标的算术座标改为对数座标,则原非对称分布就成为近似的标准正态分布,即对数正态分布。以 $\ln d, \ln \sigma'$ 分别代替式 1-8 中的 d, σ , 便可得对数正态分布方程式:

$$F(d) = \frac{1}{\ln \sigma' \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln \bar{d})^2}{2 \ln^2 \sigma'} \right] \quad (1-10)$$

式中 σ' 为对数标准偏差。

该式应用很广,一般认为,它对于用结晶或粉碎方法得到的粉体适用,在对数概率纸上标绘出的亦是一条直线;可由图中方便地求出 $\bar{d}(d_{50})$ 和 σ 两个参数。仍以表 1-7 中的数据绘制曲线(如图 1-7 所示),与图 1-6 相比较,其线性更好。

(3) Rosin-Rammler 分布方程

粉碎后细粉料、粉尘等粒度分布范围很宽的粉体在前述对数概率纸上作粒度分布所得的直线偏差仍很大。

Rosin, Rammler 和 Sperling 等人通过对煤粉、水泥等物料粉碎实验的概率和统计理论的研究,归纳出用指数函数表示粒度分布的关系式,即 RRS 方程:

$$R(d) = 100 \exp(-bd^n) \quad (1-11)$$

后经 Bennet 研究,取上式中的 $b=1/d_a^n$,则指数一项改写成无因次项,即得 RRB 方程:

$$R(d) = 100 \exp \left[-\left(\frac{d}{d_a} \right)^n \right] \quad (1-12)$$

式中 $R(d)$ 为大于某一粒径 $d(\mu\text{m})$ 的累积筛余质量百分数; d_a 为特征粒径 (μm), 表示颗粒群宏观上的粗细程度,对一种粉碎产品颗粒群, d_a 为常数, b 为系数,其物理意义相当于 $1/d_a^n$, n 为均匀性指数,表示粒度分布范围的宽窄,与粉体物料性质及粉碎设备有关,对一种粉碎产品 n 为常数,对于粉碎产物及粉尘,往往 $n \leq 1$ 。

几种常见粉体的 b 和 n 值如下:

物 料	b	n	$d_a(\mu\text{m})$
水 泥	0.029	1.03	31.104
砂、粘土	0.028	0.95	43.109
粉煤灰	0.415	0.42	8.117

当 $d=d_a$ 时, $R(d=d_a) = 100e^{-1} = 36.8\%$, 亦即 d_a 为 $R=36.8\%$ 时的粒径。

将式(1-12)取重对数得下式:

$$\lg \lg \frac{100}{R(d)} = n \lg d - n \lg d_a + \lg e = n \lg d + c \quad (1-13)$$

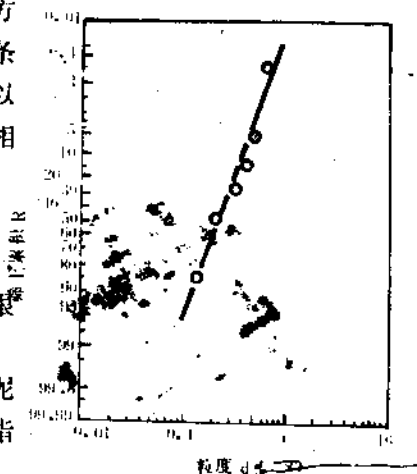


图 1-7 在对数概率纸上的正态分布

式中 $n = \frac{1}{\lg e} \frac{d_0}{d} \frac{d_0}{d}$ 。在 $\lg \lg 100/R(d) \sim \lg d$ 座标系中,式(1-13)为一直线,其斜率即为均匀性指数(系数) n ,该线与 $R(d) = 36.8\%$ 的水平线交点处的粒径即为特征粒径 d_0 。这种重对数座标图叫做 RRB 图。表 1-7 粒度分布在 RRB 图上的情形见图 1-8 所示。由图可见,该粒度分布的 $n > 1$,故近似于对数正态分布。

由于 RRB 方程比较好地反应了工业粉磨产品的粒度分布特性,故在粉碎过程中被广泛使用,并据此可以近似计算粉磨产品的比表面积。当 $n = 0.85 \sim 1.2$ 时,有安塞姆(Anselm)公式:

$$S_m = \frac{36.8 \times 10^4}{d_0 \rho_p} \quad (1-14)$$

式中: S_m 为质量基准比表面积(cm^2/g); ρ_p 为颗粒密度(g/cm^3); d_0 为特征粒径(μm)。

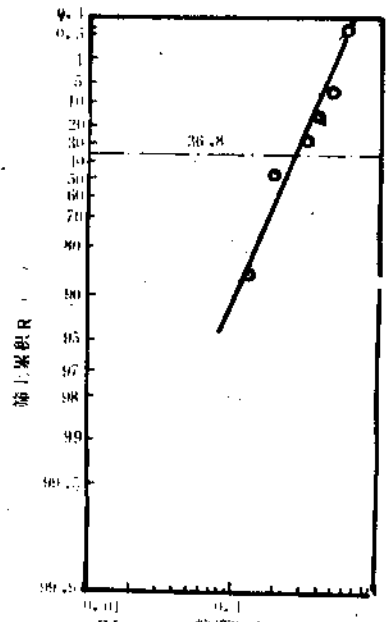


图 1-8 RRB 图

§ 1-3 颗粒形状

颗粒形状是指一个颗粒的轮廓边界或表面上各点所构成的图象。

自然界中和工业生产中遇到的颗粒并非理想的规则体,如球形,而形状是千差万别的。表 1-9 列出了描述颗粒形状的常用术语。颗粒形状直接影响粉体的其他特性,如流动性、填充性等,亦直接与颗粒在混合、贮存、运输、烧结等单元过程中的行为有关。工程中,根据不同的使用目的,人们对颗粒的形状有不同的要求。例如,用作砂轮的研磨料,要求颗粒形状具有棱角,表面粗糙;高速干压法成型的墙地砖坯粉,要求在模具中充填迅速、排气顺畅,故以球形粒子为宜;混凝土集料则要求强度高和紧密的填充结构,因此碎石的形状希望是正多面体。反过来,颗粒形状因形成的过程不同而不同,例如,简单摆动式颚式破碎机会产生较多的片状产物;喷雾干燥制备的粉料则多为球形颗粒。因此,对各种颗粒形状需要定量加以描述,以示区别。

表 1-9 颗粒形状的定义

针状	针形体	片状	板状体
多角状	具有清晰边缘或有粗糙的多面形体	粒状	具有大致相同量纲的不规则形状
结晶状	在液体介质中自由发展的几何形体	不规则状	无任何对称性的形体
枝状	树枝状结晶	模状	具有完整的,不规则形体
纤维状	规则的或不规则的线状体	球状	圆球形体

另一方面,在理论研究和工程实际中,往往将形状不规则的颗粒假定为球形,以方便计算粒径,实验结果也容易再现。正因如此,从而成为理论计算与实际出入很大的主要原因之一。所以一般需将有关理论公式中的颗粒尺寸乘以表示外形影响的系数加以修正。

描述和阐明颗粒形状及特性的参数有:形状指数、形状系数和粗糙度系数。



§ 1-3-1 形状指数

表示单一颗粒外形的几何量的各种无因次组合称为形状指数。根据不同的使用目的,先作出理想形状的图象,然后将理想形状与实际形状进行比较,找出二者之间的差异并指数化。常用的形状指数有:

1. 均齐度,根据三轴径 b, l, h 之间的比值可导出下面的指数:

$$\text{长长度} = \text{长径} / \text{短径} = l/b \quad (\geq 1) \quad (1-15)$$

$$\text{扁平度} = \text{短径} / \text{高度} = b/h \quad (\geq 1) \quad (1-16)$$

当 $l=b=h$ 时,即立方体的上述两指数均等于 1。这些指数在地质学中早已得到了应用。

2. 体积充满度 f_v , 又称容积系数,表示颗粒的外接直方体体积与颗粒体积 V_p 之比,即:

$$f_v = lbh/V_p \quad (\geq 1) \quad (1-17)$$

f_v 的倒数可看作颗粒接近直方体的程度,极限值为 1,在表示磨料颗粒抗碎裂方面,常应用该指数。

3. 面积充满度 f_s , 又称外形放大系数,表示颗粒投影面积 A 与最小外接矩形面积之比,即:

$$f_s = A/lb \quad (\leq 1) \quad (1-18)$$

这个指数常用于粉末冶金方面。

4. 球形度 Ψ_0 , 表示颗粒接近球体的程度。

$$\Psi_0 = \frac{\text{与颗粒体积相等的球体的表面积}}{\text{颗粒的表面积}} \quad (\leq 1) \quad (1-19)$$

对于形状不规则的颗粒,当测定其表面积困难时,可采用实用球形度,即:

$$\Psi_0' = \frac{\text{与颗粒投影面积相等的圆的直径}}{\text{颗粒投影的最小外接圆的直径}} \quad (\leq 1) \quad (1-20)$$

图 1-9 中列举了几种规则形状颗粒的球形度 Ψ_0 。

一些粉体物料颗粒的球形度 Ψ_0 值见表 1-10。

表 1-10 实际颗粒的球形度 Ψ_0

物料名称	Ψ_0	物料名称	Ψ_0
砂粒(李伐)	0.600, 0.861	碎 块	0.63
铁催化剂	0.578	砂粒(白井)	0.534~0.628
烟 煤	0.625	石 英 砂	0.554~0.628
硅藻土圆柱体	0.861	煤 粉	0.696

球形度常常用于颗粒的流动性的讨论中。

5. 圆形度 Ψ_c , 又称轮廓比,表示颗粒的投影与圆接近的程度,如图 1-10 所示。

$$\Psi_c = \frac{\text{与颗粒投影面积相等的圆的周长}}{\text{颗粒投影面积周长}} \quad (\leq 1) \quad (1-21)$$

除在粒度测定的显微镜法和图象分析中有着广泛的应用,还用于沉淀物的水力输

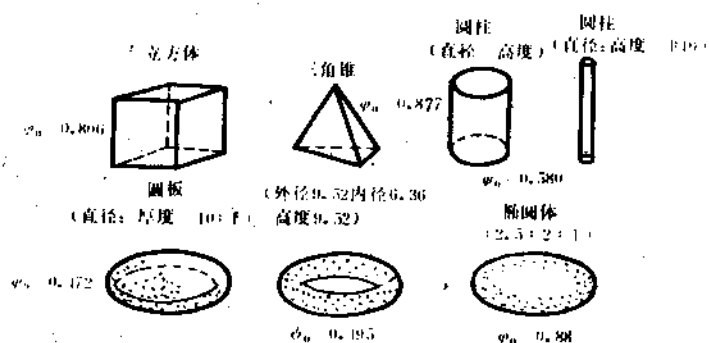


图 1-9 规则形状颗粒的球形度 ψ 。



图 1-10 圆形度

§ 1-3-2 形状系数

形状系数不同于形状指数，后者仅是对单一颗粒本身几何形状的指数化，而前者则是在表示颗粒群性质和具体物理现象（如沉降过程等）函数关系时，把与颗粒形状有关的诸因素概括为一个修正系数加以考虑，该修正系数即称为形状系数。实际上，形状系数是用来衡量实际颗粒形状与球形颗粒不一致程度的比较尺度。将颗粒的粒径与其实际的体积、表面积和比表面积关联，可以定义出以下几种最常见的形状系数：

1. 表面积形状系数

$$\phi_s = \frac{\text{颗粒的表面积}}{(\text{平均粒径})^2} = \frac{S}{d_p^2} \quad (> 1) \quad (1-22)$$

2. 体积形状系数

$$\phi_v = \frac{\text{颗粒的体积}}{(\text{平均粒径})^3} = \frac{V}{d_p^3} \quad (\leq 1) \quad (1-23)$$

3. 比表面积形状系数

$$\phi = \frac{\text{表面积形状系数}}{\text{体积形状系数}} = \frac{\phi_s}{\phi_v} \quad (> 1) \quad (1-24)$$

对于球形颗粒，上述三个形状系数分别为：

$$\begin{aligned} \phi_s &= \pi d_0^2 / d_0^2 = \pi \\ \phi_v &= \pi d_0^3 / 6 d_0^3 = \pi / 6 \\ \phi &= \phi_s / \phi_v = 6\pi / \pi = 6 \end{aligned}$$

对于其他形状颗粒，其值列于表 1-11 中。

表 1-11 颗粒的形状系数

形 状	ϕ_s	ϕ_v	ϕ
球形 $l=b=h=d$	π	$\pi/6$	6
圆锥 $l=b=h=d$	0.81π	$\pi/12$	9.7

续表

形 状	ϕ_c	ϕ_c	ϕ
圆板 $l=b, h=d$	$3\pi/2$	$\pi/4$	6
$l=b, h=0.5d$	π	$\pi/8$	8
$l=b, h=0.2d$	$7\pi/10$	$\pi/20$	14
$l=b, h=0.1d$	$3\pi/5$	$\pi/40$	24
立方体 $l=b=h$	6	1	6
方柱体及方板 $l=b$			
$h=b$	6	1	6
$h=0.5b$	4	0.5	8
$h=0.2b$	2.8	0.2	14
$h=0.1b$	2.4	0.1	24

4. 卡门(Carman)形状系数:

在研究流体通过颗粒层等颗粒流体力学问题时,常用到卡门形状系数,其定义为:

$$\phi_0 = 6/\phi \quad (\leq 1) \quad (1-25)$$

显然,球形颗粒 $\phi_0=1$ 。根据定义式,可计算表 1-11 中所列各形状颗粒的卡门形状系数。

卡门形状系数与颗粒的比表面积,即单位体积颗粒的比表面积 S_v 和单位质量颗粒的比表面积 S_w 关系如下:

$$\begin{aligned} \text{对球形颗粒:} \quad S_w &= \frac{6\pi d_0^2}{\pi d_0^3} & (1-26) \\ S_w &= \frac{6}{d_0 \rho_p} \end{aligned}$$

式中 ρ_p 为颗粒密度。

对非球形颗粒,若用表 1-2 中的比表面积径 d_s 代替 d_0 ,则有:

$$\begin{aligned} S_v &= \frac{s}{v} = \frac{\phi_c ds^2}{\phi_c ds} = \frac{\phi_c}{ds} = \frac{6}{\phi_c ds} \\ S_w &= \frac{s}{w} = \frac{\phi_c}{ds \rho_p} = \frac{6}{\phi_c ds \rho_p} \end{aligned}$$

表 1-12 颗粒群的卡门形状系数 ϕ_c

颗粒名称	颗粒形状	ϕ_c	颗粒名称	颗粒形状	ϕ_c
砂(平均)		0.75	细煤粉		0.75
型砂	精选	0.65	自然煤粉	<9.5mm	0.65
型砂	精选、片状	0.43	烟 尘	熔 基	0.55
砂	有棱角	0.70~0.75	烟 尘	熔基球形	0.85
砂	球 形	0.83	纤维尘		0.30
焦 炭		0.55~0.70	云 母	片 状	0.28

当 $S_w=S_v, S_{w0}=S_v$ 时,联立(1-26)与(1-27)可得 $d_0=\phi_c ds$ 。这是形状系数在实际应用中的一个典型例子。

对不同物料的卡门形状系数,可由流体阻力实验求得的比表面积 S_v 和由筛析法确定的几何平均粒径 d_s 来计算。一些常见物料的计算结果见表 1-12。

必须指出的是,由于颗粒的粒径表示方法很多,因此采用不同的粒径表示方法可以定义出不同的形状系数。另外,粒径值又与粒径测量方法有关,因此形状系数的数值亦随测量方法不同而异。所以,在使用形状系数时,一定要注意颗粒粒径的具体表达形式。

§ 1-3-3 粗糙度系数

前述的形状系数是个宏观量。如果微观地考察颗粒,会发现粒子表面往往是高低不平的,有着许多微小裂纹和孔洞。其表面的粗糙程度用粗糙度系数 R 来表示:

$$R = \frac{\text{粒子微观的实际表面积}}{\text{表观视为光滑粒子的宏观表面积}} \quad (> 1) \quad (1-28)$$

颗粒的粗糙程度直接关系到颗粒间和颗粒与固体壁面间的摩擦、粘附、吸附性、吸水性以及孔隙率等颗粒性质,也是影响单元操作设备工作部件被磨损程度的主要因素之一。因此,粗糙度系数是一个不容忽视的参数。

§ 1-4 颗粒群的堆积性质

单个固体颗粒的集合体称为颗粒群或粉体层。单元生产过程中常见的成型坯体、袋式收尘器滤袋表面的粉尘层、料仓中的粉料、流化床中的料层等等均是粉体层。粉体层(填充层)中的颗粒(填充物)以某种空间排列组合形式构成一定的堆积状态,并表现出诸如空隙率、容积密度、填充物的存在形态、空隙的分布状态等堆积性质。

堆积性质由粉体的物理性质所决定,它与粉体层的压缩性、粉体的流动性、填充层内的流体流动等粉体特性密切相关,并直接影响到单元操作过程参数和成品及半成品质量,如流体通过料层阻力。料仓贮存粉料时的“起拱”现象、砖瓦混凝土等建筑材料和陶瓷制品的强度、铸造砂型的透气性和强度等等。

§ 1-4-1 空隙率

填充层中未被颗粒占据的空间体积与包含空间在内的整个填充层表观体积之比称为空隙率,以 ϵ 表示即:

$$\epsilon = \frac{V - V_D}{V} = \frac{V_C}{V} \quad (1-29)$$

式中 V 、 V_D 、 V_C 分别表示填充层表观体积、颗粒所占据的体积和空隙体积。与空隙率相对应的是填充率,用 ϕ 表示即:

$$\phi = \frac{V_D}{V} = 1 - \epsilon \quad (1-30)$$

需要指出的是,空隙率不同于通常所说的孔隙率。我们知道,颗粒在形成过程中,有可能产生内部封闭孔和与颗粒表面相通的外孔。一般空隙率中的颗粒体积是指不包括颗粒的外孔在内的,而孔隙率中的颗粒体积则是内外孔均不包括。

空隙率与颗粒群的堆积状态有关。

1. 等径球形颗粒的排列

对于等径球形颗粒的规则排列,有两种基本的平面排列形式,如图 1-11 所示。在此基础上,又可以组成六种形式的空间排列,其基本单元体见图 1-12,表 1-13 则给

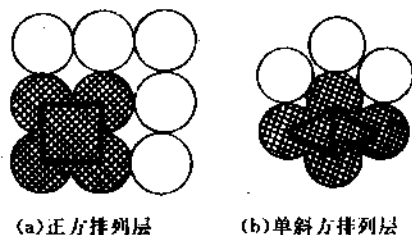


图 1-11 平面基本排列形式

出了相应排列的堆积性质。其实,若将排列2回转90°即成排列4,排列3回转125°16'则成为排列6,其堆积性质相同,因此,六种排列实际上只有四种。其中立方体为最松填充,属不稳定排列;菱面体为最密填充,属最稳定排列。

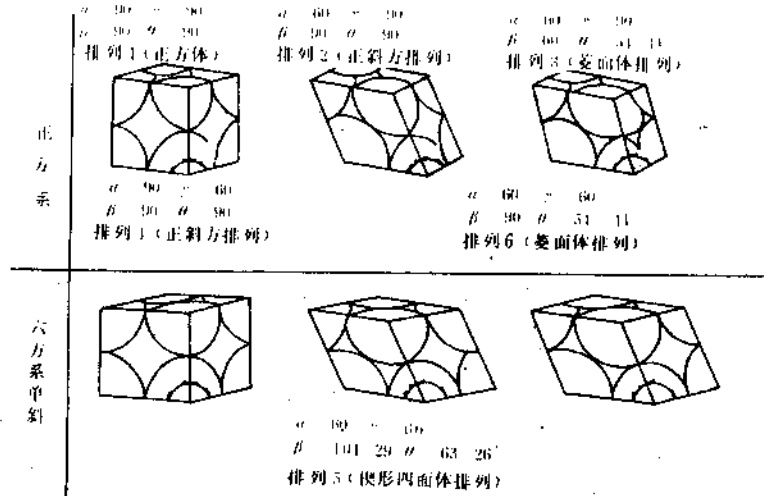


图 1-12 空间排列基本单元体

表 1-13 单元体的堆积性质

排列号 NO.	单元体积	空隙体积	空隙率	配位数 N_c
1	1	0.4764	0.4764	6
2	$\sqrt{3}/2$	0.3424	0.3954	8
3	$1/\sqrt{2}$	0.1834	0.2594	12
4	3/4	0.2264	0.3019	10
5	$1/\sqrt{2}$	0.1834	0.2595	12

与一个球相接触的球数称为配位数。一般而言,随着排列变形程度的增加,空隙率将减小,而配位数将增加。

等径球粒的随机填充与颗粒的特性、填充方式、容器的尺寸和器壁的表面性质有关。对于相当大的球体,如铁珠、圆砂粒和玻璃球等,在重力作用下填充时,其总的空隙度一般接近0.39,而配位数大约为8。对直径为3mm的球体,在不同的密度和表面摩擦的情况下,其最松随机填充时的空隙度为0.393~0.409。不考虑器壁效应时,随机松填充和密填充时的空隙度分别为0.399和0.363。

2. 异径球形颗粒的填充

在等径球形颗粒规则排列的空隙中,填充进较小直径的球形颗粒,可以得到更高密度的填充层。如仅用一种小直径的球体填充到大球空隙中时,其小球的直径和堆积性质列于表1-14中。如能仿此逐次地将更小直径的球嵌入等径球最密填充体的空隙中,则从理论上讲,无论装多少,都能提高填充率。

表 1-14 一次填充后的堆积性质

类别	空隙率	小球的直径	混合物空隙率	小球的体积比
立方体	0.4764	$0.723dp$	0.271	0.391
正斜方体	0.3954	$0.528dp$	0.307	0.147
菱面体	0.2595	$0.225dp$ $0.414dp$	0.190	0.019 0.070

表 1-15 Horsfield 填充

球序	球体半径	球数	空隙率
1次球 E	r_1		0.260
2次球 J	$0.414r_1$	1	0.807
3次球 K	$0.225r_1$	2	0.190
4次球 L	$0.177r_1$	8	0.158
5次球 M	$0.116r_1$	8	0.149
最后填充球	极小	极多	0.039

以菱面体的填充为例,有所谓的“Horsfield 填充”。如图 1-13 所示,在菱面体排列中,既有六个球围成的四角孔空隙,也有四个球围成的三角孔空隙。若基本的等径球为 1 次球 E,填入四角孔中的最大球为 2 次球 J,填入三角孔中的球为 3 次球 K,其后再填入 4 次球 L,5 次球 M,最后以更微小的等径球填于残留的空隙中,从而构成了单斜方系的最密填充。其填充性质列于表 1-15。

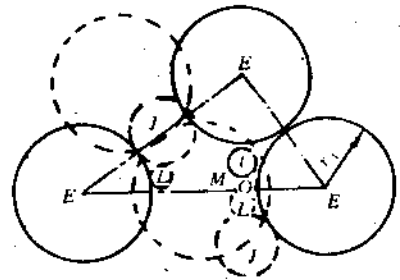


图 1-13 Horsfield 填充

3. 非球形颗粒的随机填充

非球形颗粒堆积时的空隙率在实际应用中更有意义。

仅在重力作用下,容器中颗粒填充的空隙率,随着容器直径的减小和颗粒床层高度的增加而变大。一般而言,随着颗粒球形度的增加,空隙率会减小。颗粒表面的粗糙度的增大,会使空隙率增大。由于细粉粒具有粘结性,因此呈现出较高的空隙率形成松填充。

具有粒度分布的粉体,趋于产生较紧密的堆积,实际上难以从理论上计算,图 1-14 给出了在双粒度颗粒系统中,粗颗粒所占比例对空隙率影响的实验关系,图 1-15 则表示的是平均粒度与空隙率体积的关系。

振动的频率与振幅对粉体层的空隙率有较大影响。但是同样频率与振幅的水平振动和垂直振动对堆积状态无影响。图 1-16 所示为粒径 $0.05 \sim 0.5\text{mm}$ 的干砂在不同频率下,其堆积空隙率与振幅之间的关系。

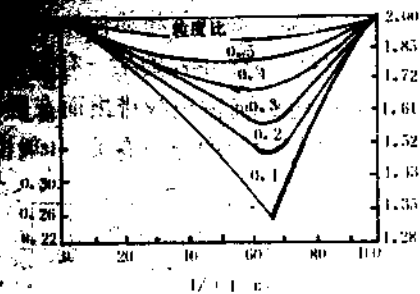


图 1-14 双粒度系统粒度组成与空隙率的关系(单一粒子的 $\epsilon=0.5$)

§ 1-4-2 容积密度

容积密度 ρ_v 又称松密度,系指在一定填充状态下,包括颗粒间全部空隙在内的整个填充层单位体积中的颗粒质量,它与颗粒物料的密度 ρ_p 和空隙率 ϵ 有如下关系:

$$\rho_v = (1 - \epsilon)\rho_p \quad (1-31)$$

显然,容积密度不是定值,随空隙率变化而变化。它与颗粒形状、大小级配及填充状态等有关。当在填充过程中施以压力或进行振动时,容积密度通常要比松散填充时增大 10~20%。

严格地说,由于颗粒间空隙和颗粒本身的孔隙存在,颗粒的密度根据条件有不同定义。现简述如下:

真密度 ρ_s 系指颗粒的质量除以不包括内外孔在内的颗粒真体积,即所谓的“物质密度”;
表现密度 ρ_a 系指颗粒的质量除以不包括外孔在内的颗粒体积。如果颗粒无内孔时,则 $\rho_a = \rho_s$;
松装密度 ρ_v 即前述的容积密度,颗粒质量除以填充容器的体积;
振实密度 ρ_{vz} 系指颗粒的质量除以振动后颗粒的表现体积;
颗粒密度 ρ_p 系指颗粒的质量除以包括内外孔在内的颗粒的表现体积。一般这五种颗粒的密度值有如下关系:

$$\rho_s \geq \rho_a \geq \rho_p \geq \rho_{vz} \geq \rho_v$$

§ 1-5 粉体的摩擦性质

所谓粉体的摩擦性质是指粉体中固体粒子之间以及粒子与固体边界表面因摩擦而产生的一些特殊的物理现象,以及由此表现出的一些特殊的力学性质。摩擦性质是粉体力学的基础。粉体的静止堆积状态、流动特性及对料仓壁面的摩擦行为和滑落特性等粉体基本性质,粉体单元生产过程中的粉粒料的堆放、贮存、移动(包括加料、卸料与运输)、压缩等,都将涉及摩擦性质。它对设计粉体加工设备来说将是十分重要的参数。表示该性质的物理量是摩擦角(或摩擦系数)。但是,由于在不同的原始条件下和不同的测定方法中所获得的摩擦角数值总有差别,因此,摩擦角有不同的表达方法。常用的摩擦角有休止角、内摩擦角、壁摩擦角和滑动角。

§ 1-5-1 休止角

休止角(又称堆积角、安息角) ϕ 是指粉体自然堆积时的自由表面在静止平衡状态下与水平

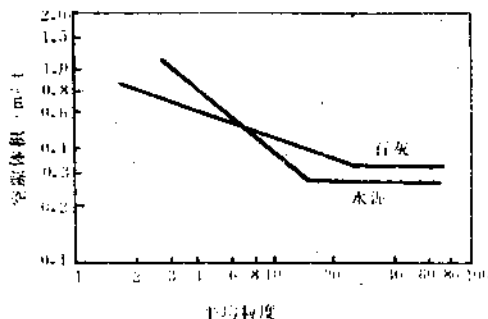


图 1-15 平均粒度与空隙体积的关系

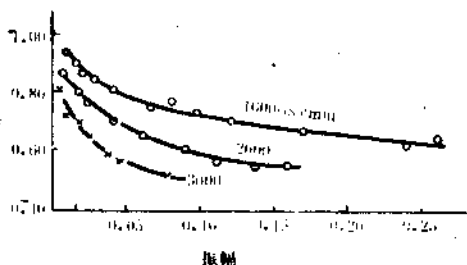


图 1-16 砂粒堆积空隙率与振动特性的关系

休止角。休止角常用来衡量和评价粉体的流动性。因此，往往将该角度视作粉体的流动性指标。

有两种形式的休止角，一种称为注入角（堆积角），是在某一高度下将粉体注入到一理论上无限大的平板上所形成的休止角；另一种称为排出角，是将粉体注入到某一有限直径的圆板上，当粉体堆积到圆板边缘时，如再注入粉体，则多余粉体将由圆板边缘排出而在圆板上形成的休止角，如图 1-17 所示。两种休止角是有差别的，它与粉体的粒度分布有关。一般说，粒度

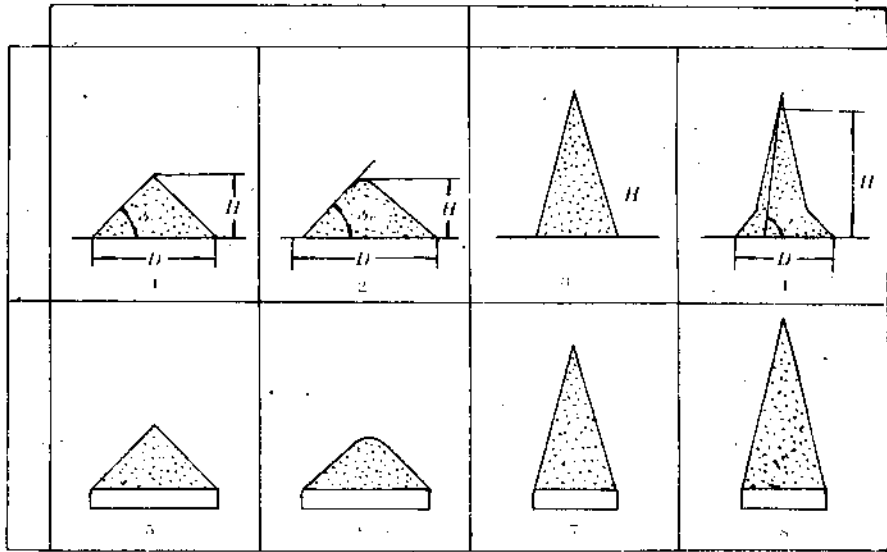


图 1-17 休止角的两种形式

分布均匀的颗粒所形成的两种休止角基本相同，但对于粒度分布宽的粉料，排出角高于注入角。

休止角的测定方法有多种，如图 1-18 所示。图中(a)为火山口法，(b)为排出法，(c)为残留圆锥法，(d)为等高注入法，(e)为容器倾斜法，(f)为回转圆筒法。(c)、(d)两法相对于其他方法干扰因素较少，但圆锥体的高度与底部直径对休止角的测定均有一定的影响。对较粗的粉粒料在堆积时，易出现分料现象，使堆积料的粒度分布不均匀。对粘性料，粘附力对其流动性的影响较大，故只宜采用(c)、(d)两方法测定其注入角。(a)、(b)两方法对粘性料测定来说，其排出角测定值一般较注入角为大。(e)、(f)两法因料层受容器限制，测定值偏大，但对充气性粉体尤为适宜。

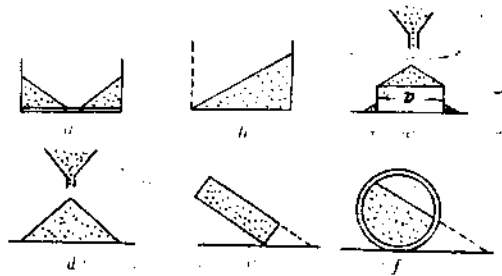


图 1-18 休止角的测定方法

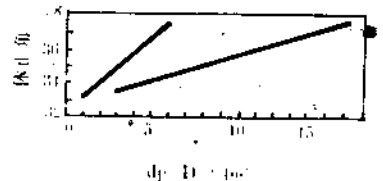


图 1-19 休止角与 d_p/D 的关系

影响休止角的因素除上述测定方法外还有很多。例如，用方法(c)时，若粒度相同，料堆底圆直径 D 愈大，测得的休止角愈小。而图 1-20 所示为用方法(a)时粒径对休止角的影响关系。在 0.2mm 以下，粒度

愈小而休止角愈大,这是由于微细粒子间粘附性增大导致流动性降低的缘故。一般颗粒球形度越大,休止角越小。堆积状态对休止角的影响如图 1-21 所示。对于大多数粉料而言,松散填充时的空隙率 e_{max} 与休止角之间,具有如下的关系:

$$\phi = 0.05(100e_{max} + 15)^{1.57} \quad (1-33)$$

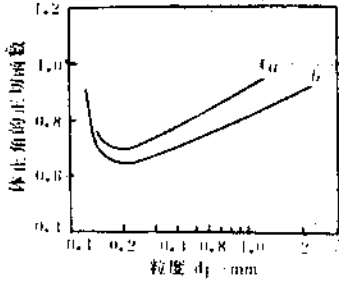


图 1-20 粒径与休止角的关系
a 玻璃珠 b 硅砂

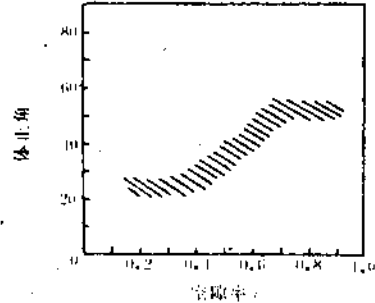


图 1-21 堆积状态对休止角的影响

当其他条件一定时,对一般的粉料进行冲击、振动等外部干扰时,则休止角减小,流动性增加,生产中常借此来解决贮料仓中的下料困难问题。同样,往粉料内通以压缩空气使之松动,休止角亦会明显减小,从而使流动性大大提高。

另外,堆积角有静态之分。前述堆积角均为粉体在静止承载面上形成的,故称之为静积角 ϕ_s ,而在运动承载面上,如运行中的胶带输送机胶带上所形成的则叫做动堆积角 ϕ_d ,一般 $\phi_d = (0.65-0.80)\phi_s$,常取 ϕ_d 为 ϕ_s 的 70%。

§ 1-5-2 内摩擦角

粉体与液体不同,其活动的局限性很大,这主要是粉体内部粒子相互间存在着摩擦力所致。在如图 1-22 所示的单面直接剪断试验中,当施以水平剪力将粉粒料层沿内部某一断面(其断面面积为 A)刚好切断产生滑动时,作用于此面的剪切应力 $\tau = \left(\frac{F}{A}\right)$ 与垂直应力 $\sigma = \left(\frac{W}{A}\right)$ 满足 $\tau = \mu \cdot \sigma$ 的关系式,式中 μ 为内摩擦系数,而内摩擦角 ϕ 被定义为:

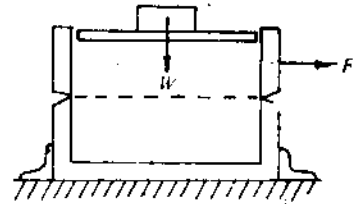


图 1-22 单面直剪法

$$\phi = \arctg \mu = \arctg \frac{\tau}{\sigma} = \arctg \frac{F}{W} \quad (1-34)$$

因为粉体层中粒子的相互啮合是产生切断阻力的主要原因,所以内摩擦角受到颗粒表面的粗糙度、附着水分粒度分布以及空隙率等内部因素和粉料静止存放时间及振动等外部因素的影响。对同一种粉体,内摩擦角一般随空隙率的增加大致成线性关系减小。

在粉料不含水分的情况下,粉体内部粒子层的摩擦特性可用(1-34)式表示。但是,假如粉料含有水分,即使将其存放一段时间后水分对其活动性仍有显著影响。可见考察粉体内摩擦特性时应充分考虑到静止时粒子之间的附着力(凝聚力),即:

$$\tau = \sigma \phi_0 + \tau_0 \quad (1-35)$$

此式称为库仑(Coulomb)定律。式中 τ_0 表示初抗剪强度或附着力,非粘性粉体 $\tau_0 = 0$,其流动性十分良好。否则,即属于粘性粉体。在图 1-23 上,满足式(1-35)的粉体 1 与 2 为直线,这种

粉体称为库仑粉体,而粉体3是非库仑粉体。工业生产所处理的大多数无机非金属粉体近似为库仑粉体。

测定内摩擦角的最基本的方法是测定粉体层内部的应力—应变关系,工程中常用单面或双面直剪仪和三轴剪力仪等来进行测量。

§ 1-5-3 壁摩擦角与滑动角

在工业生产中,还经常碰到粉体与各种固体材料壁面直接接触以及相对运动的情况。如在料仓中,粉料流动时与仓壁的摩擦。粉体层与固体壁面之间的摩擦特性用壁摩擦角 ϕ_w 表示,而滑动角 ϕ ,则表示的是单个粒子与壁面的摩擦。壁摩擦角在粉料贮存料仓设计和密相气力输送阻力计算中,是个很重要的参数。

壁摩擦角的测定可在内摩擦角测定的有关仪器如直剪仪等中进行,此时只需将其下部粉体层换成与所测固体器壁相同材料的平板即可。如图 1-24 所示,则壁摩擦系数 μ_w 为:

$$\mu = \frac{F}{W_s W_w W_o} \quad (1-35)$$

因此,壁摩擦角被定义为:

$$\phi_w = \arctg \mu_w \quad (1-36)$$

式中 F 为水平力, W_w 砝码的重力, W_s 粉料的重力, W_o 容器的重力。

壁摩擦角的影响因素有颗粒的大小和形状,壁面的粗糙度,颗粒与壁面的相对硬度,壁表面上的水膜形成情况,粉料静置存放时间等等。

滑动角的测量是将载有粉体的平板逐渐倾斜,当粉体开始滑动时,平板与水平面的夹角即为滑动角,由于粉体全部滑落时的滑动角通常比刚开始滑动时的角度大 10° 以上,加之某些个别附着力特别大的细粉粒子,其滑动角甚至可能大于 90° ,因此,实际上规定滑落时的角度的 90% 为滑动角。

单个粒子的滑动角在工程中应用不多,通常是用滑动角来表示粉体与倾斜固体壁面之间的摩擦特性。如在研究捕集于旋风分离器集料斗中的颗粒沿锥壁下降的摩擦行为时将用到此角。

一般来讲,粉体的各摩擦角间有一定的关系。如 $\phi_s > \phi_w$; 对无粘附性的粉料, $\phi > \phi_w$; $\phi_s > \phi$; 当壁面粗糙度等于或超过粉料粒度时,等式成立,如混凝土与粉料之间的壁摩擦角近似等于粉料的内摩擦角;流动性良好的粉料的休止角几乎等于其内摩擦角,而流动性较差的粘性粉料的休止角则要比其内摩擦角大。当不明某种壁面与一定的粉料间的壁摩擦系数,而只知另一种材料的壁摩擦系数时,可用下式作概略换算:

$$\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 : \mu_4 = 15 : 16 : 17 : 20 \quad (1-37)$$

式中, μ_1 为钢与粉料之间的壁摩擦系数的相对值;同此 μ_2 为木材与粉料之间、 μ_3 为橡胶与粉料之间的壁摩擦系数的相对值; μ_4 为粉料内摩擦系数的相对值。

值得指出的是,粉体摩擦角的影响因素非常复杂和繁多。虽然各种摩擦角都有其一定的定义,但由于测定方法不同,所得摩擦角亦不同;即使同一种物料也会因生产加工处理情况不同

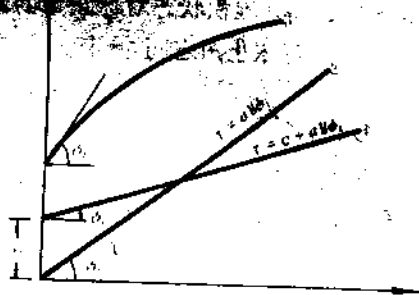


图 1-23 粉体的应力图

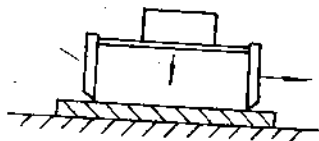


图 1-24 壁摩擦角的测定

而导致摩擦角改变。例如,颗粒粒变度小,粘附性、吸水性增加,都会使摩擦角增大;反之,颗粒表面光滑成球形,空隙率大,对粉料充气等,摩擦角变小。所以实际应用时除应查有关手册外,必要时应实测确定之。

§ 2 粉 碎

§ 2-1 概 述

§ 2-1-1 定义与意义

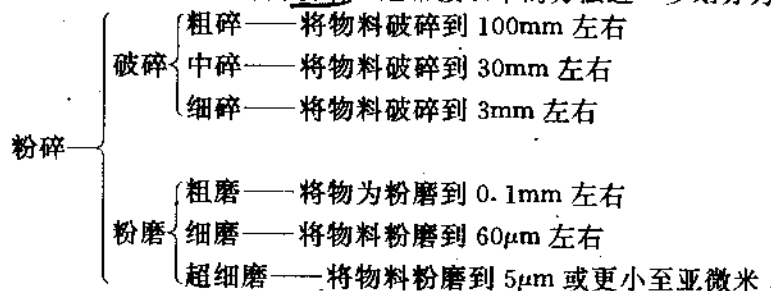
固体物料在外力作用下,克服内聚力,从而使颗粒的尺寸减小,比表面积增大的过程称为粉碎。

施加外力的方法可用人力、机械力、电力或是采用爆破等方法。矿山采石多用爆破的方法,而将大块的物料碎裂为小块多采用机械的方法。

随着粉碎过程的进行,物料的比表面积不断地增加。固体物料碎裂成小块或细粉之后,可以提高物理及化学作用的反应速度。几种不同的固体物料的混合,也必须在细粉状态下,方能得到均匀的效果。

在许多工业生产部门,如化工、冶金、建材、轻工、能源、食品等,大量的固体原料、燃料、半成品和成品等都需要经过粉碎。如水泥厂,每生产1吨水泥,需要粉碎的物料量约4吨以上,而用于粉碎的电费占总电费的70%左右。同时粉碎作业的情况还直接关系到产品的质量。可见研究粉碎操作的过程,在技术上和经济上都具有重要的意义。

生产中所需要的原料,有的细至粉末,有的粒度大于1米以上。工厂中对原料或半成品必须进行不同程度的粉碎,使其粒度达到要求的大小,以便于进行再加工。因处理物料尺寸大小的不同,可将粉碎分为破碎和粉磨两个阶段。将大块物料碎裂成小块的过程称为破碎,将小块物料粉碎为粉料的过程称为粉磨。通常按以下的方法进一步划分为:



§ 2-1-2 方法与分类

虽然粉碎机械类型繁多,但按施加外力的方法不同,可以归纳为下述几种方法:

(1)挤压法,如图 2-1(a),由于冲击力 P 作用,使夹在两块工作面之间的物料粉碎。

(2)冲击法,如图 2-1(b),由于冲击力作用使物料粉碎。冲击力的产生是由于运动着的工作体对物料的冲击;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;高速运动的工作体向悬空的物料冲击。

(3)磨剥法,如图 2-1(c),靠运动的工作面对物料摩擦时所施的剪切力,或者靠物料之间摩擦时的剪切作用而使之粉碎。

(4)劈裂法,如图 2-1(d),物料因楔形工作体的作用而粉碎。

不同型式的粉碎机械,粉碎物料的方法各不尽同。在一台粉碎机中,也不是单纯使用一种方法,而是往往使用两种或两种以上的方法结合起来进行粉碎的。根据物料的性质,粒度以及需要粉碎程度来选用适当的粉碎方法。对于强度大的物料的粗、中碎,宜用挤压法;对于脆性和软质物料的破碎,宜用冲击法,或劈裂法;粉磨时,大都使用磨剥法和冲击法,对粘湿物料采用磨剥法或配以挤压法。冲击法应用范围较广,可用于破碎和粉磨。

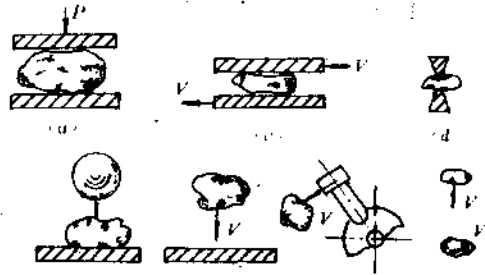


图 2-1 常用的几种粉碎方法

根据处理物料的粒度不同,粉碎机械可以粗略地分为破碎机 and 粉磨机两大类。破碎机又可分为粗碎机、中碎机和细碎机。按照结构及工作原理不同,破碎机械可以分为:颚式破碎机、锥式破碎机、辊式破碎机、锤式破碎机和反击式破碎机等。

目前,在破碎作业中,常用的粗碎机械是颚式破碎机、粗碎圆锥式破碎机和颚旋式破碎机等,常用的中、细碎机械有锤式、反击式、细碎圆锥式和辊式破碎机等。在粉磨作业中,最常用的粉磨机械是各种类型的球磨机。

§ 2-1-3 粉碎比

若原始物料粒度为 D ,经过某台粉碎机械粉碎后的粒度为 d ,则比值 $i = D/d$,被称为粉碎比。对破碎而言,称为破碎比。近来有把粉碎比与产量的乘积称作质量系数,把它作为对破碎机技术评价和对比的指标之一。

粉碎机械工作的基础技术经济指标是单位电耗(单位质量粉碎产品的能量消耗)和粉碎比。

单位电耗用以判别粉碎机械的动力消耗是否经济,粉碎比用来说明粉碎过程的特征及鉴定粉碎质量。

通常所说的粉碎比系指平均粉碎比,即粉碎前后物料的平均直径之比。它是用来表明物料粉碎前后粒度变化程度的指标,并能近似地反映出机械的作业情况。为了简易地表示和比较各种破碎机械的这一主要特征,也可用破碎机的最大进料口宽度与最大出料口宽度之比来作为粉碎比,并称为公称粉碎比。破碎机的平均粉碎比一般都较公称粉碎比低,这在破碎机选型时应特别注意。

每一种粉碎机械所能达到的粉碎比有一定的限度。破碎机的粉碎比一般为 3~100;粉磨机的粉碎比较大,一般可达 500~1000。

由于破碎机的破碎比较小,如果要求达到的破碎比超过上述范围,就得把两台或更多台破碎机串联使用,这种串联几台破碎机进行破碎作业叫做多级破碎,破碎机串联的台数叫做破碎级数。这时原始物料的粒度与最后破碎产品的粒度之比叫做总破碎比。在多级破碎时,各级破碎比 i_1, i_2, \dots, i_n 与总破碎比 i_0 有如下关系:

$$i_0 = i_1 i_2 \dots i_n \tag{2-1}$$

如果已知破碎机的破碎比,即可根据要求的总破碎比求得所需破碎机的级数。

§ 2-2 粉碎理论概述

§ 2-2-1 裂缝与断裂的基本理论

在理想的情况下,假如所施加的力没有超过材料的应变极限,则材料被压缩而作弹性变形,当此负荷取消时,材料又恢复原状而未被粉碎。实际上,在上述情况下,材料虽未破裂,没有增加新的表面,却生成了若干裂缝,特别是扩展了原来已有的小裂缝。另外,由于局部薄弱的环节存在(如不均质性的解理面,原有的大裂缝),或因为粒子的形状的不规则,遂使施加的力首先作用在粒子表面的突出点上,即所谓应力集中。这些原因,都会促使少量表面生成。如图 2-2 所示的是物料被粉碎阶段的情况。虚线为真实状况,实线为理想状况。当施加的能量超过应变极限时,表面积理论上成上升直线增加。但由于粉碎后,粒子数目骤然增加,必然伴随产生粒子的移动和粒子相互间的摩擦。这方面的能量损失将使其粉碎效率降低。

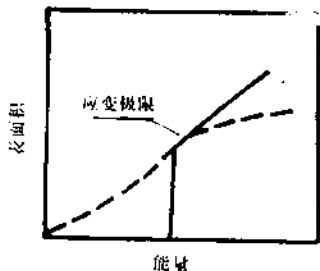


图 2-2 粉碎能量与表面积增加的关系

近几十年来形成的断裂方面的理论,即断裂力学也有助于我们认识固体颗粒的破碎过程。所谓断裂力学是固体力学的一个分支。它是研究带裂缝材料的裂缝结构强度以及裂缝扩展的规律。主要内容包括:研究带裂缝材料在外力作用下应力与应变的规律;材料抗断裂性能的指标;建立断裂破坏的条件;提出具有缺陷构件的强度计算方法等。

一条裂缝在外力作用下,随着外力的增加裂缝逐渐扩展,直至断裂。扩展可分为稳定扩展和失稳扩展。稳定扩展是指在一次加载过程中,裂缝随载荷的逐渐上升而相应地延长的缓慢过程,其速度取决于加载速度,荷载停止上升,裂缝也停止扩展,当外力达到一定程度以致某些断裂力学参量(如应力强度因子)超过其临界值时,裂缝即以音速增长,直至断裂,此即所谓裂缝失稳扩展。

英国科学家葛里菲斯(A. A. Griffith)对玻璃等材料进行了一系列试验后,于 1920 年提出脆性材料的断裂理论:脆性材料的断裂破坏是由于已经存在的裂缝扩展的结果,断裂强度取决于施加载荷前就存在的裂缝的大小,或者说,断裂强度取决于使其中的裂缝失稳扩展的应力。当外力所作的功(应变能)刚刚大于裂缝扩展形成新表面所需的表面能时,裂缝将自动扩展而断裂。据此,他对一个受均匀拉伸的无限大弹性板中的一个贯穿椭圆裂缝,导出如下公式

$$\sigma_f = \left[\frac{2Er}{\pi a} \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

式中: σ_f ——断裂应力;
 E ——弹性模量;
 a ——裂缝长度之半;
 r ——表面能。

该公式成功地解释了为什么实际晶体的强度远低于理论强度。由于许多表观脆性材料在断裂前裂缝顶端均已产生了显著的塑性变形,而为此所消耗的功远大于裂缝产生新表面需要的表面能 r ,于是欧文和奥罗万对葛氏公式进行了修正,各自独立地提出了下式:

$$\sigma_f = \left[\frac{2E(r+P)}{\pi a} \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

式中: P ——裂缝扩展单位面积所需的塑性变形功。

葛里非斯、欧文——奥罗万理论是断裂力学发展的基础。

§ 2-2-2 粉碎功定律

对于粉碎机械和粉碎条件的设计和选择,首要的问题是要确定需要供给多少数量的功,才能完成某一数量的粉碎。换言之,即粉碎功的效率问题。然而,粉碎的过程是一个相当复杂的过程。粉碎功的效率不仅由于粉碎机械、被粉碎的物料的不同,将受到很大的影响;而且粉碎条件也将影响到粉碎功效率。例如,能量利用效率与能量施加的速率十分有关,因为在达到最大负荷与引起粉碎之间通常有一个时间上的滞后。因此,若在保持有充分作用时间的前提下,一个较小的力将会导致粒子的粉碎。施加速率愈快,则能量的利用效率愈低。又如,对于微粉碎,常采用添加助磨剂、加热粉碎或低温粉碎等措施来改变被粉碎物料物性,以提高粉碎数量。

根据对粉碎过程的分析,不难推断,供给粉碎机的能量不外乎消耗在下列几个方面:

- (1) 在粉碎发生前颗粒本身产生的弹性变形;
- (2) 产生非弹性变形而导致粉碎;
- (3) 使粉碎机械本身发生弹性扭变;
- (4) 克服粒子间以及粒子与机件之间的摩擦阻力;
- (5) 粉碎中产生的噪音、发热和机械振动;
- (6) 粉碎机械运转部分的摩擦损失。

根据估计,大约只有不到 10% 左右的功被有效地利用。因此,如何提高粉碎过程中的能量利用率,这是研究粉碎过程机理的目的。

由于粉碎是以减小被粉碎物料的粒度为目的的,通常把有效利用的功用粒径的函数来表示。其通式为下列的列维斯(Lewis)公式:

$$dE = -C_L \frac{d(d)}{d^n} \quad (2-4)$$

式中: 设 $n=2.0$ 并加以积分,则成为:

$$E = C_R \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) = C_R' (s_2 - s_1) \quad (2-5)$$

式(2-5)即为雷廷格(Ritinger P. R)定律(1867年),设 $n=1.5$,并加以积分,则成为:

$$E = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) \quad (2-6)$$

式(2-6)即为邦德(Bond. F. C)理论(1952)。

设 $n=1.0$ 时,则:

$$E = C_K \log(d_1/d_2) = C_K' \log s_2/s_1 \quad (2-7)$$

式(2-5)被称为基克(Kick. F)定律(1885)。

上式中: E ——粉碎所需的功;

d_1, d_2 ——颗粒被粉碎前后的粒径;

s_1, s_2 ——颗粒被粉碎前后比表面积;

C_L, C_R, C_B, C_K ——物料物性系数;

n ——能量修正指数。

上述的粒径的定义是指平均粒径或指代表性的粒径。近来,由于对粉碎产品的比表面积测定方法有了很大的进展,与测定粒径相比,前者能更好地与裂纹功耗原理结合,因此,应用比表

面积来表示粉碎过程的方法,开始被积极采用。为此,日本的田中达夫于1954年提出,用比表面积表示粉碎功定律的通式为:

$$\frac{dS}{dE} = k(S_{\infty} - S) \quad (2-8)$$

E ——消耗功的量;

S ——比表面积;

S_{∞} ——临界比表面积;

K ——系数,表示物料的脆性。

当 $S_{\infty} \gg S$ 时,将其积分,可以得到如下简单的公式:

$$S = S_{\infty}(1 - e^{-K E}) \quad (2-9)$$

该式相当于式(2-4), $n > 2$ 的情形;即适用于微粉碎过程。

田中达夫使用了简易的设备,就冲击粉碎和摩擦粉碎两者求出了 K 的值,并参照这种原本的数据来设计粉碎机械的。

然而,上述有关粉碎功定律,只能在同一粉碎条件下使用,此时 C, K 与 n 值均视为常数,当条件变化时,则要另求出常数值。

§ 2-2-3 物料停留时间的分布

以大量生产为目的的粉碎作业多采取连续粉碎,颗粒在机内的平均停留时间 t_r ,亦即粉碎时间,是根据颗粒给料速度 F 和粒子在粉碎机内的停留量 H 决定的,即:

$$t_r = \frac{H}{F} \quad (2-10)$$

当 F 变化或 H 变化时,均可使 t_r 随之变化。因此连续粉碎时间也就成为不定值。例如颗粒在粉碎机内停留时间并不一致,出现某些波动,因而也就影响到产品的粒度分布。因此,颗粒在粉碎机内的停留时间是一个重要的因素。颗粒的停留时间分布函数 $Pe(t)$ 可以用对数正态分布表示:

$$Pe(t) = \frac{M_0}{6t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log t - \log t_r)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-11)$$

式中: t_r ——停留时间的平均值;

M_0 ——常数;

σ ——物料的分散度。

当将上式各值描绘在对数概率纸上时,则可得到一条直线(见图 2-3)。

§ 2-2-1 粉磨过程的速度分析

为了控制物料在磨机中的粉磨过程和选择磨机的最优工作条件,必须探讨在整个粉磨时间内,随粉磨时间的增加粒度减小的问题,也就是粉磨速率问题,即粉磨动力学。

有人分析了在间歇球磨机中,理想情况下,可以假定粉磨速度(某一粒级含量的减少速度) $(-dR/dt)$ 与该瞬间球磨机中未磨好的粗粒级别的含量成正比,用数学式表达如下:

$$\frac{dR}{dt} = -K_1 R \quad (2-12)$$

式中: R ——粉磨 t 时间后,某一粒级的筛余百分数;

t ——粉磨时间;

K_1 ——粉磨速度常数;

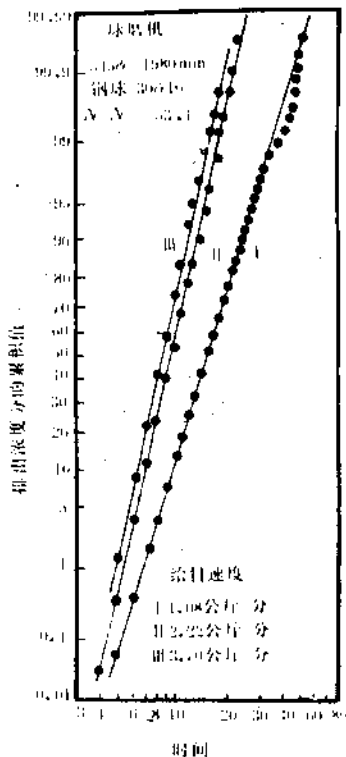
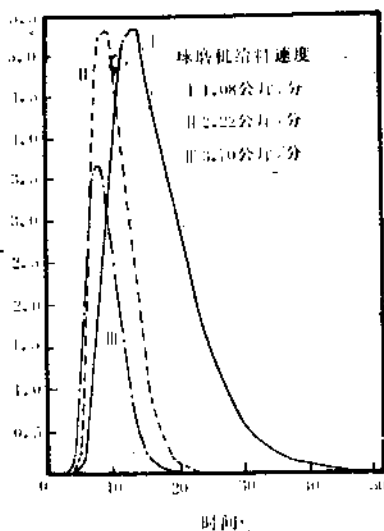


图 2-3 球磨机物料停留时间的分布(示踪原子排出浓度的分布)

“—”表示 R 随时间之增加而减少。

对式(2-12)积分得：

$$\ln R = Kt + C$$

当 $t=0$ 时, $C = \ln R_0$ 。

将 C 代入并整理得：

$$R = R_0 e^{-Kt} \quad (2-13)$$

将 $R_0 = 100\%$ 时, 式(2-13)就变成以下形式：

$$R = 100e^{-Kt} \quad (2-14)$$

式(2-13)和(2-14)就是球磨机粉磨动力学方程式。但是, 用实验来验证这些公式时, 发现上述公式并不完全符合实际情况。实际上粉磨过程不可能是理想情况, 多半是重复粉磨, 并且也未考虑许多粉磨条件(如进料粒度, 硬度等)的不同和研磨条件(研磨介质情况不同)等。因此, 考虑实际情况, 对式(2-13)修正如下：

$$R = R_0 e^{-Kt^{n'}} \quad (2-15)$$

式中: n' 是时间修正指数, 决定于物料性能和粉磨机械。同样, 若 $R_0 = 100\%$ 时, 式(2-15)就变成以下形式：

$$R = 100e^{-Kt^{n'}} \quad (2-16)$$

式(2-15)和(2-16)可以看作是式(2-13)和式(2-14)在 $n' = 1$ 时的一个特例。

对式(2-16)取两次对数并整理得：

$$\log \log \frac{100}{R} = n' \log t + (\log K + \log \log e)$$

此式在 $\log\log - \log$ 座标纸上, 是一条直线。 n' 为该直线的斜率。 $(\log K_i + \log\log e)$ 为该直线和纵轴的截距。

n' 由直线与横座标轴夹角的正切决定:

$$n' = \frac{\log\log \frac{100}{R_2} - \log\log \frac{100}{R_1}}{\log t_2 - \log t_1} \quad (2-17)$$

式中: R_1, R_2 —— 分别表示在 t_1, t_2 时刻的筛余百分数。

$$K_i = \frac{\log \frac{100}{R}}{t^n \log e} = \frac{\ln \frac{100}{R}}{t^n} \quad (2-18)$$

上述粉磨速度方程式虽然是对间歇球磨机粉磨过程的描述, 但对于连续性的粉磨机, 在达到平衡以后, 如果假定通过管磨机的物流流速是均匀的, 则粉磨时间就可用距磨头的距离来表示。通过实验的证实, 它是较为符合实际情况的。因此, 也可作为连续性粉磨机的粉磨速度方程式。

在 $\log\log \frac{100}{R} \sim \log L$ 座标系中, 绘制式(2-16)的筛析曲线图, 如图 2-4 所示。利用该图可以评价一个多仓管磨机的工作好坏。多仓磨各个仓的粉磨能力平衡是最好的操作, 反映在粉磨曲线上各个仓的 n' 值应该一致。如果不一致, 则说明某一仓的工作效率不高。应当分析各仓仓位、配球以及篦子板、衬板等是否合理。其次, 利用粉磨速度方程式, 也可很方便地说明粉磨细度对磨机产量的影响, 即利用粉磨细度系数来修正磨机的产量。

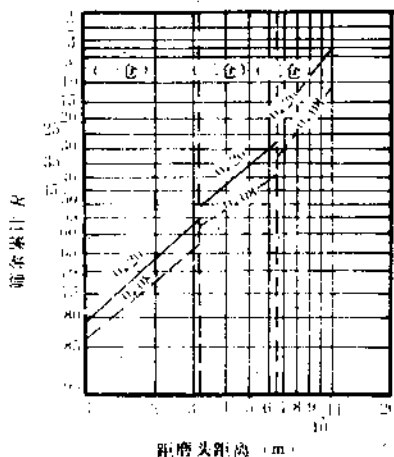


图 2-4 筛析曲线图

因为磨机产量反比于磨内通过的时间, 即:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-19)$$

式中 Q_1, Q_2 分别为细度 R_1 和 R_2 时的磨机产量。

又:
$$R_1 = 100e^{-k_1 t_1^n} \quad (2-20)$$

$$R_2 = 100e^{-k_2 t_2^n} \quad (2-21)$$

对于在一定粉磨条件下, 一定的粉磨物料, K_i 和 n' 的值都是不变的, 所以:

$$\frac{t_1}{t_2} = \left[\frac{\log \frac{100}{R_1}}{\log \frac{100}{R_2}} \right] \frac{1}{n'} \quad (2-22)$$

即:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{t_1}{t_2} = \left[\frac{\log \frac{100}{R_1}}{\log \frac{100}{R_2}} \right] \frac{1}{n'} \quad (2-23)$$

如果令 Q_1 为某一粒级筛余 10% 时的产量, 称 $K_f = Q_2/Q_1$ 为细度系数, 则:

$$K_f = \frac{1}{\left(\log \frac{100}{R_2}\right)^{1/n}} \quad (2-24)$$

另外,当我们已知一个磨机各仓的长度和要求的成品细度时,利用粉磨速度方程式可以决定各仓最合理的粉磨细度。如一个三仓磨,各仓长分别为 L_1, L_2, L_3 , 总长为 L , 成品细度要求为 R_3 。

如将式(2-16)中的 t 以仓的长度代换, 则:

$$R_1 = 100e^{-k_t L_1^n} \quad (2-25)$$

$$R_2 = 100e^{-k_t (L_1 + L_2)^n} \quad (2-26)$$

$$R_3 = 100e^{-k_t L^n} \quad (2-27)$$

式中: R_1, R_2 为出一、二仓的细度, 故:

$$\frac{\log \frac{100}{R_1}}{\log \frac{100}{R_3}} = \left(\frac{L_1}{L}\right)^n \quad (2-28)$$

$$\frac{\log \frac{100}{R_2}}{\log \frac{100}{R_3}} = \left(\frac{L_1 + L_2}{L}\right)^n \quad (2-29)$$

若已知 n' 的值, 即可求出一、二仓最合理的粉磨细度 R_1 和 R_2 。

§ 2-2-5 粉碎力

在球磨机粉碎过程中, 改变钢球的大小和比重, 以检定粒度分布的变化和粉碎速度的变化。钢球对粒度分布的影响如图 2-5 所示。每增加一个钢球的重量, 就多生产一些中间粒径的颗粒。如果将粉碎产品适当地分成两份, 在其粒度分布中, 设:

$$\frac{\text{粗粒部分} + \text{细粉部分}}{\text{细粉部分}} = \beta (\text{称为特性值})$$

随着增加一个钢球的重量, β 值就增大; 反之, 如重量减少, 则 β 值也就减少。图 2-6 所示不同粒径的颗粒 β 值与一个钢球重量 W_s 的关系。可以判明颗粒越小时, 一个钢球的重量的影响也越小。此外, 粉碎速度 X (表示给料中最小颗粒与破碎后所生成的更小的颗粒的比率) 和钢球重量的关系如图 2-7, 由图可见粉碎速度与粒度分布的变化趋势完全相同。

从以上的结果可见, 增加球重以便加大粉碎力时, 则在粉碎产品的分布中, 中间粒径急剧增加, 即 β 值增大; 与此同时, 粉碎速度也急剧增加。总之, 粉碎力增大时, 在粉碎产品中增加了中间粒径的颗粒, 也就是增加了对颗粒的粉碎能力。当颗粒越大时, 虽然球的碰撞几率越少, 但粉碎速度则增大。球的碰撞几率 P_s 大致可以下式表示:

$$P_s = K d_s^{-m} d_p^{-n} \quad (2-31)$$

式中: $0 \leq m \leq 1, \quad 1 \leq n \leq 2$ 。

d_s, d_p 分别表示钢球和颗粒的直径。

由于颗粒越小, 使钢球重量的变化对粒度分布, 即对颗粒的粉碎速度的影响越小。因此, 增加钢球的碰撞几率对增加小颗粒的粉碎速度会产生较大的影响。

球磨机原理属细粉碎机, 但百余年来, 进行了种种改进, 以使其发展成为一种超细粉碎机械。其中措施之一是降低回转速度。其原理就是充分降低球的冲击力即粉碎力, 而提高碰撞几率, 从而提高细磨速度。经过实际试验, 当处理粒径小的颗粒时, 转速远比临界转速为小, 但所

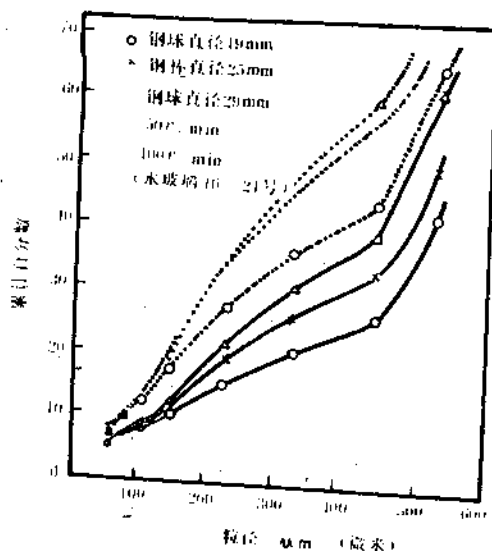


图 2-5 粒度分布与钢球直径的关系

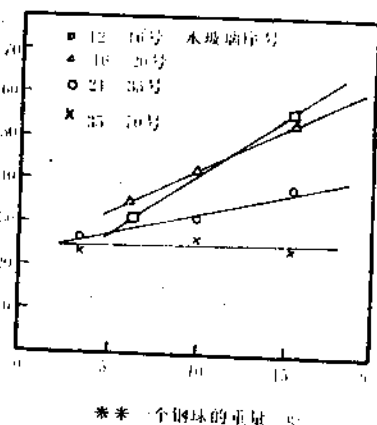


图 2-6 钢球重量与粒度分布特性变化的关系

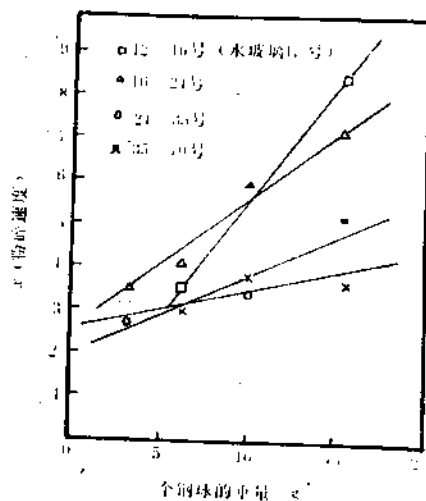


图 2-7 钢球重量与粉碎速度变化的关系

得到的粉碎速度变大。

另一措施是减小钢球的直径。给料的颗粒直径和钢球直径之间大体有如下关系：

$$d_b^2 = Kd_p \quad (2-32)$$

日本的田中达夫提供了如下关系式：

$$d_b = 5.6d_p^{0.70} \text{ (cm)} \quad (2-33)$$

此外, Olewski 等, 把粉碎生成物的粒径考虑在内, 提出了下列公式：

$$d_b = b(\log d_k) \sqrt{d_p} \text{ (cm)} \quad (2-34)$$

式中: d_k ——产品粒径(μm);

d_b, d_p ——mm。

除此之外, 使用钢段来代替钢球, 以提高球料的碰撞概率, 即提高细磨速度, 这在实际中亦

是被广泛采用的。

§ 2-2-6 选择和断裂两函数的概念

由于对粉碎过程不断地研究,特别是计算机在科学技术领域的广泛采用,人们已不满足用单位时间中平均粒径的减小,或者单位时间中比表面积的增加来表示,而是力求用数学的方法较精确地描述整个粉碎过程。目前这种方法已取得了较大的进展。

对于物料在粉碎前后粒度的变化,可用下表表示:

粒度尺寸区间	粉碎前的物料	粉碎后的产品
1	f_1	p_1
2	f_2	p_2
3	f_3	p_3
4	f_4	p_4
⋮	⋮	⋮
$\frac{n}{n+1}$	$\frac{f_n}{f_{n+1}}$	$\frac{p_n}{p_{n+1}}$

表中: f_i 表示粉碎前物料在*i*区间内的尺寸质量数;

p_i 表示粉碎产品在*i*尺寸区间内的质量数。

在粉碎过程中,所有尺寸区间内的颗粒都有某种几率被粉碎。同时也有这种可能,即某一区间内较大的颗粒受到了较轻微的粉碎,但粉碎后的颗粒尺寸不比原来的尺寸区间中的小颗粒小,这样,在粉碎过程中,就存在一个质量的平衡问题。下表就表示物料在粉碎前后的质量平衡:

尺寸区间	粉碎前	粉碎后					
1	f_1	$p_{1,1}$	0	0	⋮	0	0
2	f_2	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	0	⋮	0	0
3	f_3	$p_{3,1}$	$p_{3,2}$	$p_{3,3}$	⋮	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\frac{n}{n+1}$	$\frac{f_n}{f_{n+1}}$	$\frac{p_{n,1}}{p_{n+1,1}}$	$\frac{p_{n,2}}{p_{n+1,2}}$	$\frac{p_{n,3}}{p_{n+1,3}}$	⋮	$\frac{p_{n,n}}{p_{n+1,n}}$	$\frac{0}{p_{n+1,n+1}}$

表中第一列尺寸区间1表示物料最大尺寸区间,区间2表示尺寸比区间1的尺寸小一级,依次类推,产品中的每个组元均可用形式 $p_{i,j}$ 来表示,*i*来表示组元尺寸所在的区间,*j*表示该组元部分是以*j*尺寸区间中粉碎而来的。如 $p_{3,2}$ 说明这部分尺寸在区间3的颗粒是从区间2粉碎而来的。这样,产品在某一尺寸区间的颗粒含量要将这一行的所有部分加起来,若 $\sum_1^{n+1} f_i$ 代表粉碎前的总质量*F*,则表示粉碎产品颗粒的某组元 $p_{i,j}$ 亦可写成:

$$p_{i,j} = X_{i,j} f_j \quad (2-35)$$

式中: $X_{i,j}$ ——粉碎前第*j*个尺寸区间的颗粒被粉碎而进入第*i*个尺寸区间的质量分数。

这样,粉碎过程中的各产品的组元可用粉碎前的粒度、质量含量来表示。见下表:

$X_{1,1} \cdot f_1$	0	0	...	0
$X_{2,1} \cdot f_1$	$X_{2,2} \cdot f_2$	0	...	0
$x_{3,1} \cdot f_1$	$X_{3,2} \cdot f_2$	$X_{3,3} \cdot f_3$...	0
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
$X_{n,1} \cdot f_1$	$X_{n,2} \cdot f_2$	$X_{n,3} \cdot f_3$...	$X_{n,n} \cdot f_n$

如果粉碎前后的颗粒尺寸可以用 $n \times I$ 和矩阵来表示,那么粉碎过程可用简单的矩阵方程来表示:

$$P = X, f \quad (2-36)$$

这个简单的矩阵方程就可表示一个粉碎过程。若写成一般的矩阵形式见下式:

$$\begin{pmatrix} x_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x_{2,1} & x_{2,2} & 0 & \dots & 0 \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \dots & 0 \\ x_{4,1} & x_{4,2} & x_{4,3} & \dots & 0 \\ x_{5,1} & x_{5,2} & x_{5,3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ x_{n,1} & x_{n,2} & x_{n,3} & \dots & x_{n,n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} x_{1,1} \cdot f_1 + 0 \dots \dots \dots + 0 \\ x_{2,1} \cdot f_1 + x_{2,2} \cdot f_2 + 0 \dots \dots \dots + 0 \\ x_{3,1} \cdot f_1 + x_{3,2} \cdot f_2 + x_{3,3} \cdot f_3 + 0 \dots \dots \dots + 0 \\ x_{4,1} \cdot f_1 + x_{4,2} \cdot f_2 + x_{4,3} \cdot f_3 + x_{4,4} \cdot f_4 + 0 \dots \dots \dots + 0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_{n,1} \cdot f_1 + x_{n,2} \cdot f_2 + x_{n,3} \cdot f_3 + x_{n,4} \cdot f_4 + x_{n,5} \cdot f_5 + \dots \dots + x_{n,n} \cdot f_n \end{pmatrix}$$

从上面的矩阵方程可以看出,这是粉碎过程的一个真实状态。如果我们能知道 X 的值,我们就可准确地将粉碎过程的粒度变化情况计算出来。遗憾的是 X 的值是很难求得的。它不但与粉碎时间有关,而且与粉碎机械和粉碎条件有关,因此,必须考虑把 X 分解成有关的因素,使问题便于解决些。

进入粉碎过程的所有尺寸的颗粒都有一定的几率被粉碎,并且这个几率随着颗粒尺寸的变化可能发生改变,这种在粉碎过程中,有的物料被粉碎了而有的未被粉碎的选择性规律,若用一定的函数式来表示,我们就称之为粉碎过程中的选择函数。

如果 S_i 是表示在最大的尺寸区间中被粉碎的比例,那么在该区间内被粉碎的颗粒质量为 $S_i f_i$,同理,在第 n 个尺寸区间内被粉碎的颗粒质量为 $s_n f_n$ 。这样就可写出下列粉碎过程的选择矩阵方程。

$$s \cdot f = \begin{vmatrix} s_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} s_1 \cdot f_1 \\ s_2 \cdot f_2 \\ s_3 \cdot f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_n \cdot f_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_n \end{vmatrix} \quad (2-37)$$

上式中的 s 就称为选择函数。那么被粉碎的颗粒质量为 $s \cdot f$ ，剩下的颗粒虽然通过了粉碎过程，而未被粉碎。这样在第 n 个尺寸区间中未被粉碎的那部分为 $(1-s_n) \cdot f_n$ 。经过粉碎过程而未被粉碎的颗粒的总质为 $(1-s) \cdot f$ 。

在粉碎过程中，按一定的几率被粉碎物料的粒度分布规律怎样，这是断裂函数要解决的问题。用一定的数学模型对单一粉碎过程的产品加以描述，这被称为断裂函数。经过大量的试验研究表明，任何粉碎过程，必须考虑粉碎机械特性和被粉碎物料特性对粉碎前后物料粒度分布的影响。同时也观察到，对于特有的物料，粉碎以后产品粒度的分布曲线具有一定的形状。除了式(2-36)的矩阵方程形式，还有其他的一些表达式如：

Broadbent 和 Callcott(1956年)认为，Rosin-Rammler 方和可以修正改写成：

$$B(x, y) = (1 - e^{-x/y}) / (1 - e^{-1}) \quad (2-39)$$

这是粉碎以后的颗粒分布的较简便的形式。函数 $B(x, y)$ 表示粉碎以后，在尺寸区间中比 x 小的颗粒所占初始尺寸 y 的颗粒质量的分。

Kelsall(1964年)在球磨机中用石英砂来进行粉碎试验，用脉冲示踪的方法得出了瞬时断裂函数：

$$B(x, x_0) = \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \quad (2-40)$$

上式适用于尺寸小于 $590\mu\text{m}$ 的颗粒， n 值为 $0.9 \sim 0.95$ 。 x_0 表示初始尺寸区间， x 表示产品的粒度。

不可能把在各种条件下的断裂函数都介绍出来，以上仅是具有代表性的例子。如果我们知道了在一定条件下某种物料的选择函数和断裂函数，我们就能把粉碎过程用数学的方法较为准确地描绘出来，即建立起粉碎过程的数学模型。

§ 2-3 破碎设备

§ 2-3-1 颚式破碎机

1. 工作原理及类型

颚式破碎机是广泛应用的一种粗碎和中碎破碎机。现有的颚工破碎机按动颚的运动特征可分为简单摆动型、复杂摆动型和综合摆动型三种型式。

图 2-8a 为简单摆动型颚式破碎机工作示意图。颚式破碎机有两块颚板，定颚 1 和动颚 2。定颚固定在机架的前壁上，动颚则悬挂在轴 6 上可作左右摆动。当偏心轴 5 旋转时，带动连杆 4 作上下往复运动，从而使两块推力板 3 亦随之作往复运动，通过推力板的作用，推动悬挂轴 6 上的动颚作左右往复摆动。当动颚摆向定颚时，落在颚腔的物料主要受到颚板的挤压作用而粉碎。当动颚摆离定颚时，已被粉碎的物料在重力的作用下，经颚腔下部的出料口自由卸出。因

而颚式破碎机工作是间歇性的,粉碎和卸料过程在颚腔内交替进行。这种破碎机工作时,动颚上各点均以悬挂轴 6 为中心,单纯作圆弧摆动。由于运动轨迹比较简单,故称为简单摆动型颚式破碎机(简称简摆颚式破碎机)。

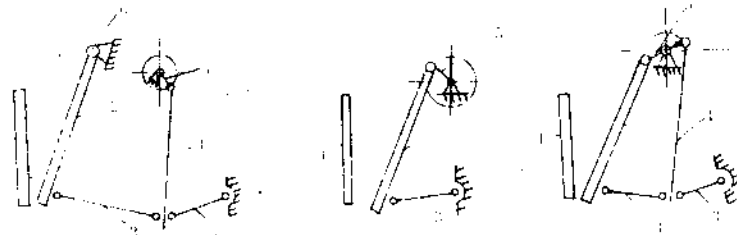


图 2-8 颚式破碎机的主要类型

1—定颚;2—动颚;3—推力板;4—连杆;5—偏心轴;6—悬挂轴

由于动颚作弧线摆动,摆动的距离上面小,下面大,以动颚底部(出料口处)为最大。分析动颚的运动轨迹可知,颚板上部(进料口处)的水平位移和垂直位移,都只有下部的 1/2 左右,进料口处动颚的摆动距离小是不利于对喂入颚腔的大块物料的夹持和破碎的,因而不能向摆幅较大、破碎作用比较强烈的颚腔底部供应充分的物料,这就限制了破碎机的生产能力的提高。另外,颚板的最大行程在下部,而且卸料口宽度在破碎机运转中是随时变动的,因此卸出物料的粒度不均匀,但是简摆颚式破碎机的偏心轴承受的作用力较小;由于动颚垂直位移很小,破碎时过粉碎现象少,物料对颚板的磨损小,所以简摆式可做成大、中型,主要用于坚硬物料的粗、中碎。

复杂摆动型颚式破碎机如图 2-8b 所示,动颚直接悬挂在偏心轴 5 上,受到偏心轴的直接驱动。动颚的底部用一块推力板 3 支撑在机架的后壁上。当偏心轴转动时,动颚一方面对定颚作往复摆动,另一方面还顺着定颚作很大程度的上、下运动,动颚上的每一点的运动轨迹并不一样,如图 2-9 所示,顶部的运动受到偏心轴的约束,运动轨迹接近于圆形;底部的运动受到推力板的约束,运动轨迹接近于圆弧,在动颚的中间部分,运动轨迹介于上述两者之间而成为椭圆曲线,愈靠近下方椭圆愈偏长。由于这类破碎机工作时,动颚各点上的运动轨迹比较复杂,故称为复杂摆动型颚式破碎机(简称复摆颚式破碎机)。

与简摆型相反,它在整个行程中,动颚顶部的水平摆幅约为下部的 1.5 倍,而垂直摆幅稍小于下部,就整个动颚而言,垂直摆幅为水平摆幅的 2~3 倍。由于动颚上部的水平摆幅大于下部,保证了颚腔上部的强烈粉碎作用,大块物料在上部容易得到破碎,整个颚板破碎作用均匀,有利于生产能力的提高。同时,动颚向定颚靠拢在挤压物料过程中,顶部各点还顺着定颚向下运动,又使物料能更好地夹持在颚腔内,并促使破碎的物料尽快

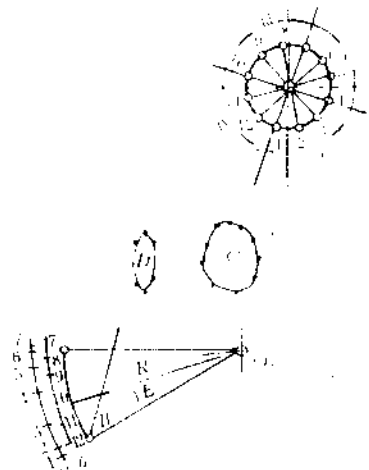


图 2-9 复摆颚式破碎机动颚上各点的运动轨迹

地排出。因此,在相同条件下,这类破碎机的生产能力较筒摆颚式破碎机高约 20~30%。

由于动颚往复摆动的同时,能将破碎的物料翻动,卸出的物料多为立方体块状粒,大大减少了象筒摆式破碎机中所产生的片状产品的现象,这类破碎机带有强制性卸料,故可用于粉碎一些稍微粘湿的物料。但是,由于动颚的垂直行程较大,物料不仅受到挤压作用,还受到部分的磨剥作用,加剧了物料过粉碎现象,增加了能量消耗,产生粉尘较大,颚板比较容易磨损。另外破碎物料时,动颚受到巨大挤压力,直接作用到偏心轴上,所以目前这类破碎机一般都制成中、小型。

和筒摆颚式破碎机相比,结构比较简单,轻便紧凑,因此,目前中、小型工厂大都采用这类破碎机。

为了改进上述两种颚式破碎机动颚的缺点,曾制造过综合摆动型颚式破碎机,如图 2-8c。破碎机的动颚 2 与连杆 4 共同悬挂在偏心轴 5 上,连杆装在偏心轴的中部,而动颚的两个轴壳则安装于连杆头的两侧。两个推力板 3 仍然支承在动颚和连杆的下端,以及机架的后壁上,动颚各点的运动轨迹均为椭圆。其长轴向着卸料方向倾斜。于是,无论是动颚的顶部或底部,在动颚向定颚靠拢的行程中,其运动都有利于对物料的夹持和破碎,并将物料推向出料口,因而改善了卸料条件,提高了破碎机的生产能力。同时动颚底部的水平摆幅与垂直摆幅之比为 1:0.8,这又比复摆颚式机合理,可使工作零件的磨损降低。但是由于动颚与连杆都悬挂在偏心轴上,这就使偏心轴及其轴承受力恶化,容易损坏。同时,构造也比较复杂。因此这种破碎机只适用于制造小型的。

颚式破碎机的规格用进料口的宽度和长度来表示,例如 PEJ1500×2100 颚式破碎机,即进口宽度为 1500mm,长度为 2100mm 的筒摆颚式破碎机。

近年来,由于工厂规模不断扩大,并对破碎产品的粒度要求减小,要求制造生产能力高的大型颚式破碎机。随着大型化的发展,加高了破碎腔,使破碎比增大,故破碎机的质量系数也在不断地提高。目前已能生产 2100×3000 和 1830×2430 颚式破碎机,它们的喂料口尺寸分别为 1800 和 1500mm,生产能力分别为 1100 和 760t/h,为了降低产品粒度,目前又出现了细碎颚式破碎机。图 2-10 表示的是复摆颚式破碎机。

2. 工作参数的确定

(1) 钳角

颚式破碎机动颚与定颚间的夹角 α 称为钳角,如图 2-11。减小钳角可使破碎机的生产能力增加,但会导致破碎比的减小;相反增大钳角,虽可增加破碎比,但会降低生产能力,同时落在颚腔内的物料不易夹牢,有被推出机外的危险。因此,破碎机的钳角应有一定的范围。钳角的大小可以通过物料的受力分析来确定。

设夹在颚腔内的球形物料的质量为 G ,见图 2-11(a),由 G 产生的重力比物料的破碎力小很多,可以忽略不计,在颚板间物料接触处,颚板对物料的作用力为 P_1 和 P_2 ,两者均与颚板垂直,由这两个力所引起的摩擦力为 fP_1 和 fP_2 ,其方向向下。其中 f 为物料与颚板之间的摩擦系数。

当物料能夹牢在颚腔内,不致被推出机外时,这几个力应互相平衡。在 x 、 y 方向的分力之和应分别等于零,于是:

$$\begin{aligned}\sum x &= 0, P_1 - P_2 \cos \alpha - fP_2 \sin \alpha = 0 \\ \sum y &= 0, -fP_1 - fP_2 \cos \alpha + P_2 \sin \alpha = 0\end{aligned}\quad (2-41)$$

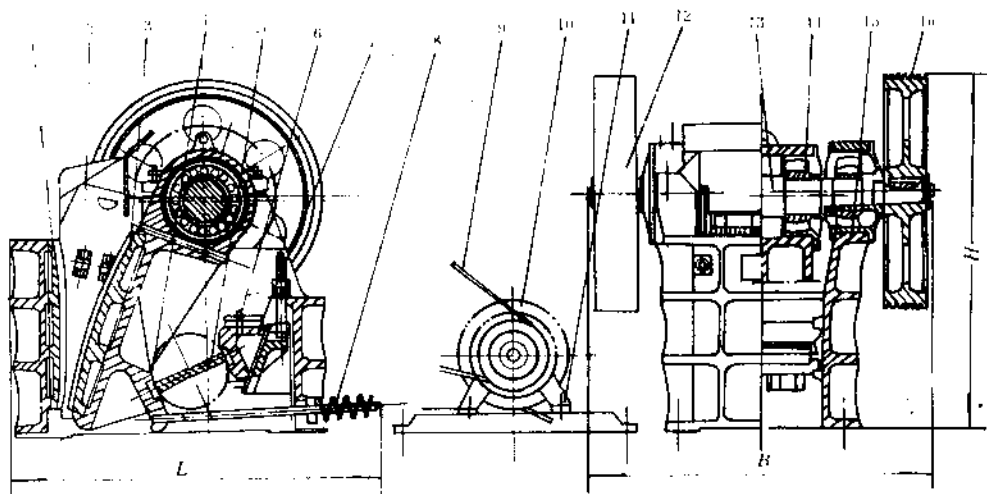


图 2-10 复摆颚式破碎机

- 1—定颚衬板；2—侧壁衬板；3—动颚衬板；4—推力板座；5—推力板；
6—推力板座；7—调节座；8—拉紧装置；9—三角胶垫；10—电动机；
11—导轨；12—飞轮；13—偏心轴；14—动颚；15—机架；16—胶垫轮

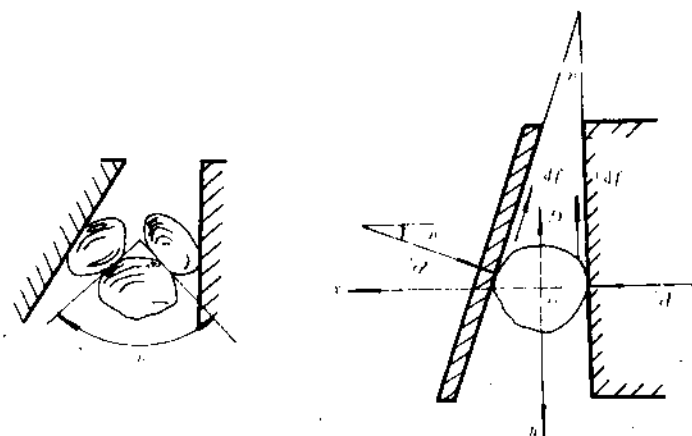


图 2-11 颚式破碎机的钝角

将第一式乘以摩擦系数 f 之后，与第二式相加，消去 P_1 ，得：

$$-2f\cos\alpha + (1 - f^2)\sin\alpha = 0$$

即：

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{2f}{1 - f^2} \quad (2-42)$$

因摩擦系数 f 与摩擦角 ϕ 的关系为：

$$f = \operatorname{tg}\phi$$

则：

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{2\operatorname{tg}\phi}{1 - \operatorname{tg}^2\phi} = \operatorname{tg}2\phi \quad (2-42')$$

为了使破碎机工作可靠，必须令：

$$\alpha \leq 2\phi$$

(2-43)

即钳角应小于物料与颚板之间的摩擦角的二倍。

一般摩擦系数 $f=0.2\sim 0.3$, 则钳角的最大值为 $22^\circ\sim 33^\circ$, 实际上, 当破碎机喂料粒度相差很大时, 虽然 $\alpha < 2\phi$, 仍有可能产生物料被挤出的情况, 这是由于大块物料楔塞在两个小块物料之间, 如图 2-11b, 这时物料的钳角必须大于两倍物料间的摩擦角, 所以一般颚式破碎机的钳角取为 $18^\circ\sim 22^\circ$ 。

(2) 偏心轴转速

偏心轴转一圈, 动颚往复摆动一次, 前半圈为破碎物料, 后半圈为卸出物料。为了获得最大的生产力, 破碎机的转速 n 应该根据这样的条件确定: 当动颚后退时, 破碎后物料应在重力作用下全部卸出, 而后动颚立即返回破碎物料。转速过高或过低都会使生产能力不能达到最大值。

由于颚板较长, 摆幅不大, 因此, 可设动颚摆动时, 钳角 α 值不变, 亦即动颚作平行摆动, 令出料口宽度为 e , 动颚行程为 s , 破碎后的物料在颚腔内堆积成一梯形如图 2-12, BC 线以下的物料尺寸皆小于出料口宽度, 因而每次所能卸出的物料高度为 h 。

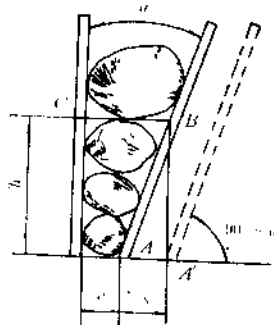


图 2-12 偏心轴转速计算

$$h = \frac{S}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (2-44)$$

物料在重力的作用下, 自由落下。破碎后物料高度应为:

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

则要使高度 h 的梯形体物料全部自由卸出所需时间为:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (\text{s}) \quad (2-45)$$

式中 g 为重力加速度。为了保证已达到要求尺寸的物料能及时地全部卸出, 卸出时间 t 应等于动颚空间行程经历的时间 t' , 而

$$t' = \sqrt{\frac{60}{2n}} = \frac{30}{n} \quad (\text{s}) \quad (2-46)$$

则:

$$\frac{2h}{g} = \frac{30}{n}$$

即:

$$n = \frac{30}{\frac{\sqrt{2h}}{\sqrt{g}}} = \frac{30}{\frac{\sqrt{2s}}{\sqrt{g\operatorname{tg}\alpha}}} = 665 \frac{\sqrt{\operatorname{tg}\alpha}}{\sqrt{s}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-47)$$

式中: n —— 偏心轴转速 (r/min);

s —— 动颚行程 (cm);

α —— 钳角 ($^\circ$)。

实际上, 由于在动颚空回行程的初期, 物料由于弹性变形, 仍处于压紧状态, 不能立即落下, 因此, 偏心轴的转速应比上式算出的值低 30% 左右。于是:

$$n = 470 \frac{\sqrt{\operatorname{tg}\alpha}}{\sqrt{s}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-48)$$

上式未考虑到物料性质和破碎机类型等因素的影响。因此,只能用来粗略地确定颚式破碎机的转速。一般对于破碎坚硬物料,转速应取小些;对于破碎脆性材料,转速可取大些;对于较大规格的破碎机,转速应当适当降低,以减小惯性振动,节省动力消耗。

偏心轴的转速还可用下述经验公式确定:

当进料口宽度 $B \leq 1200\text{mm}$ 时

$$n = 310 - 145B(\text{r/min}) \quad (2-49)$$

当进料口宽度 $B > 1200\text{mm}$ 时

$$n = 160 - 42B(\text{r/min}) \quad (2-50)$$

式中 B 为进料口宽度(m)。

(3) 生产能力

破碎机的生产能力与被破碎物料性质(物料强度、解理、喂料粒度组成等)、破碎机的性能和操作条件(送料情况和出料口大小)等因素有关,目前还没有把这些因素包括进去的理论计算方法,还必须广泛采用实际资料和经验公式。

可采用下面经验公式计算颚式破碎机的生产能力:

$$Q = K_1 K_2 K_3 q e \quad (\text{t/h}) \quad (2-51)$$

式中: q ——标准条件下(指开路破碎容积密度为 1.6t/m^3 的中等硬度物料)的单位出口宽度的生产能力($\text{t/mm} \cdot \text{h}$)见表 2-1;

e ——破碎机出料口宽度(mm);

K_1 ——物料相对易碎性系数,见表 2-2;

K_2 ——物料容积密度修正系数,

$$K_2 = \frac{\rho_s}{1.6} \rho_s \text{ 为容积密度}(\text{t/m}^3);$$

K_3 ——进料粒度修正系数,见表 2-3。

表 2-1 颚式破碎机单位出料口宽度的生产能力 q

规格 (mm)	250×400	400×600	600×900	900×1200	1200×1500	1500×2100
q ($\text{t/mm} \cdot \text{h}$)	0.4	0.65	0.95~1.0	1.25~1.3	1.9	2.7

表 2-2 物料相对易碎性系数 K_1

物料强度	抗压强度 (MPa)	K_1
硬质物料	157~196	0.9~0.95
中硬物料	79~157	1.0
软质物料	<79	1.1~1.2

表 2-3 进料粒度修正系数 K_3

进料最大粒度 D_{\max} 和进料口宽度 B 之比 $a = \frac{D_{\max}}{B}$	0.85	0.60	0.40
K_3	1.0	1.1	1.2

上述公式并未考虑到破碎机工作特性对生产能力的影响。事实上,复杂摆动型和综合摆动型颚式破碎机的生产能力比之简单摆动型的分别提高 20~30% 和 90~95% 左右。

(4) 功率

颚式破碎机需要的功率,可按体积假说或破碎物料时需要的破碎力来推算。因影响功率的因素很多,至今用上述理论计算方法所确定的功率与实际情况相差较远。因此,也还使用一些经验公式,同时还需要与实际数据相对比。

下面介绍由破碎力推算功率的方法。

通过实验测定得知,破碎单块不规则形状的花岗岩时需要的破碎力与其纵断面面积成正比,劈裂面上的破碎应力 $\sigma = 10.8 \text{ MPa}$ 。

在颚式破碎机中破碎单块物料所需的破碎力 P 为:

$$P = \sigma b h \quad (\text{MN}) \quad (2-52)$$

式中: b ——料块的纵向长度(m);

h ——料块的厚度(m)。

为了计算方便,假设颚式破碎机在工作时整个颚膛内充满物料,且沿颚膛长度 L 方向成平行圆柱体排列,如图 2-13。

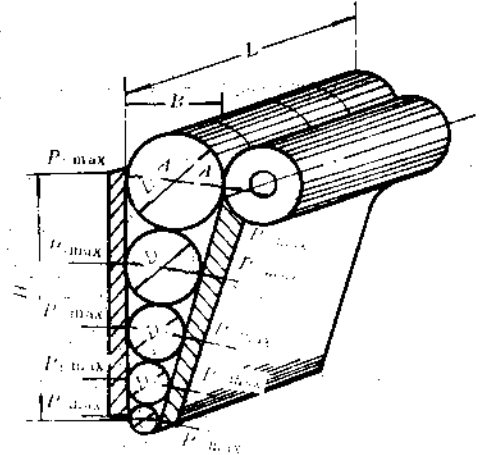


图 2-13 在颚式破碎机中物料劈裂图

根据 2-52 式,每个圆柱体沿作用力方向劈开时所需破碎力为:

$$P_1 = \sigma D_1 L$$

$$P_2 = \sigma D_2 L$$

$$P_3 = \sigma_3 L$$

.....

破碎整个颚膛内的物料所需的总破碎力 P_0 , 则为:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_1 + P_2 + P_3 + \dots P_n \\ &= PL(D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n) \end{aligned}$$

但因: $D_1 + D_2 + D_3 + \dots D_n = H$

于是: $P_0 = \sigma J H \text{ (MPa)}$ (2-53)

式中: L ——颚口的长度(m);

H ——颚膛的高度(m)。

实际上,由于物料形状的不规则,颚板表面并非完全与物料接触,而只是颚板的一部分承受破碎力。因此,上式还需乘以颚板利用系数 f_0 。这样,实际上最大破碎力为:

$$P_{\max} = \sigma f_0 L H \text{ (MN)} \quad (2-54)$$

一般认为 $f_0 = 0.25$, 则:

$$P_{\max} = 10.8 \times 0.25 L H \text{ (MN)} \quad (2-55)$$

在动颚每一工作循环期间,动颚对物料所施加的作用力是变化的,动颚摆向定颚破碎物料时,作用力从零逐渐增大,及至物料发生破碎的瞬间增至最大值 P_{\max} , 然后又降至零。因此,每一转中颚板对物料的平均作用力 P_m 为:

$$P_m = \beta P_{\max} \quad (2-56)$$

根据实验测得： $\beta=0.20\sim0.21$

颚式破碎机破碎物料时每一转需要的破碎功为：

$$A = P_m S' \quad (\text{MJ}) \quad (2-57)$$

式中： S' ——平均作用力合力的着力点行程(m)。

颚式破碎机破碎物料时需要的功率为：

$$N = \frac{P_m S' n}{1000 \times 60 \eta} \quad (\text{kW}) \quad (2-58)$$

式中： n ——偏心轴转速(r/min)； η ——机械效率，一般 $\eta=0.60\sim0.75$ 。其它符号的意义同前。

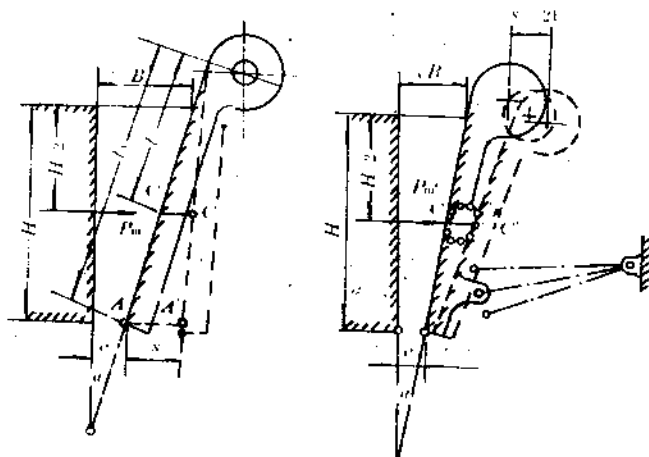


图 2-14 确定结构参数 m 的图形

通过实验得知 S' (图 2-14) 为：

$$S' \approx CC' = \frac{L_c}{L_A} \cdot S = mS \quad (2-59)$$

式中： $m = \frac{L_c}{L_A}$ ，为颚式破碎机的结构参数。对于简摆式破碎机 $m=0.56\sim0.60$ ，取 $m=0.57$ ， $\eta=0.75$ ， $\beta=0.2$ 。

$P_m = \beta P_{\max} = 0.2 \times 2.7LH = 0.54LH$ (MN)，将上述各值代入到式(2-58)，得到简摆颚式破碎机破碎物料时需要的功率为：

$$N = \frac{0.2 \times 2.7LH S_c \times 0.57 \times 10^6}{1000 \times 60 \times 0.75} = 6.8LH S n \quad (\text{kW}) \quad (2-60)$$

对于复摆颚式破碎机：

$$S' \approx CC' = mS = m \cdot 2r, \quad m = 0.5$$

式中： r ——偏心轴的偏心距(m)，

$$\text{则：} \quad S' = 0.5 \times 2r = r \quad (2-61)$$

于是复摆颚式破碎机破碎物料时需要的功率为：

$$N = \frac{0.22 \cdot 7LH \cdot n \times 10}{1000 \times 60 \times 0.75} = 12LH r n \quad (\text{kW}) \quad (2-62)$$

至于颚式破碎机需要的电动机功率，考虑到破碎物料时可能过载以及启动的需要，一般应

有50%的储备功率。

对于简摆颚式破碎机的电动机功率 N_M ：

$$N_M = 1.5 \times 6.8LHS_n = 10.2LHS_n (\text{kW}) \quad (2-63)$$

对于复摆颚式破碎机的电动机功率 N_M ：

$$N_M = 1.5 \times 12HL_m = 18LH_m (\text{kW}) \quad (2-64)$$

确定颚式破碎机电动机功率的经验公式为：

$$N_M = CBL (\text{kW}) \quad (2-65)$$

式中： L ——进料口的长度(cm)；

B ——进料口宽度(cm)；

C ——系数，对于 $250 \times 400\text{mm}$ 以下的， $C = \frac{1}{60}$ 。

对于 $250 \times 400 \sim 900 \times 1200\text{mm}$ 的， $C = \frac{1}{100}$ ；对于 $900 \times 1200\text{mm}$ 以上的， $C = \frac{1}{120}$ 。

§ 2-3-2 圆锥破碎机

1. 工作原理及类型

在圆锥破碎机中，破碎料块的工作部件是两个截头圆锥体，见图 2-15。动锥（又称内锥）1

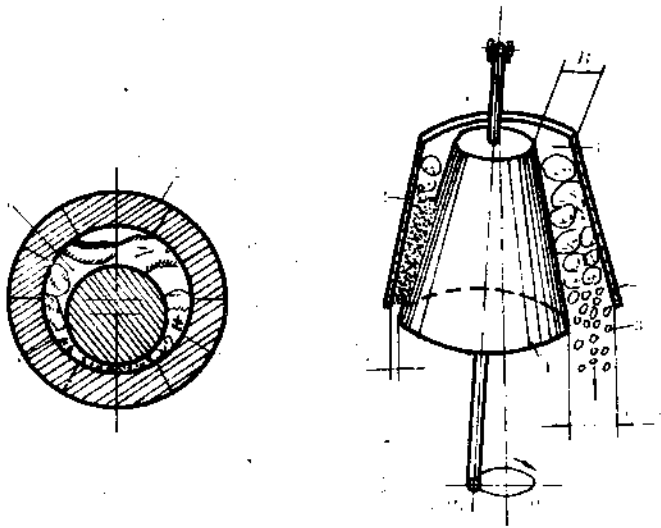


图 2-15 圆锥破碎机工作示意图

固定在主轴上，定锥（又称外锥）2 是机架的一部分，是静置的。主轴的中心线 O_1O_1 与定锥的中心线 O_2O_2 于点 O 相交成 β 角。主轴悬挂在交点 O 上，轴的下方则活动地插在偏心衬套中，衬套以偏心距 r 绕着 O_2O_2 旋转，使得动锥沿着定锥的内表面作偏旋运动，靠拢定锥的地方，该处的物料就受到动锥的挤压和弯曲的作用而破碎。偏离定锥的地方，已经破碎的物料由于重力的作用就从锥底落下。因为偏心衬套连续转动，动锥也就连续旋转。故破碎过程和卸料过程也就沿着定锥的内表面连续依次进行。

在破碎物料时，由于破碎力的作用，在动锥表面上产生了摩擦力，其方向与动锥运动方向相反。因为主轴上下都是活动连接的，这一摩擦力对于 O_1O_1 所形成的力矩，使动锥在绕 $O'O$ 作偏旋运动的同时，还作方向相反的自转运动，这种自转运动，可促使产品粒度更加均匀，并使动锥表面的磨损亦均匀。

由上述可知,圆锥破碎机的工作原理与颚式破碎机有相似之处,即对物料都是施予挤压力,破碎后自由卸料。不同之处在于圆锥破碎机的工作过程是连续进行的,物料夹在两个锥面之间同时受到弯曲力的剪切力的作用而破碎,故破碎较易进行。因此其生产能力较颚式破碎机大,动力消耗低。

圆锥破碎机按用途可分为粗碎和中细碎两种;按结构又可分为悬挂式和托轴式两种。

用作粗碎的圆锥破碎机,又称旋回破碎机,如图 2-16 所示。因为要处理尺寸较大的料块,要求进料口宽大,因此动锥 1 是正置的,而定锥 2 是倒置的,旋回破碎机的规格以进料口的最大宽度 B 和卸料口的最大宽度 $(e+s)$ 来表示。

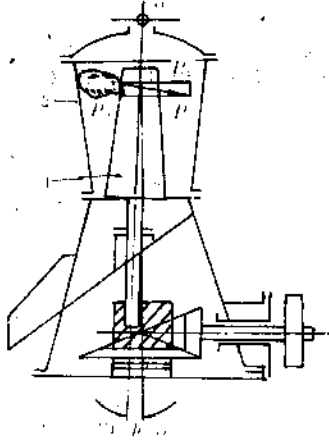


图 2-16 旋回破碎机示意图

1—动锥;2—定锥

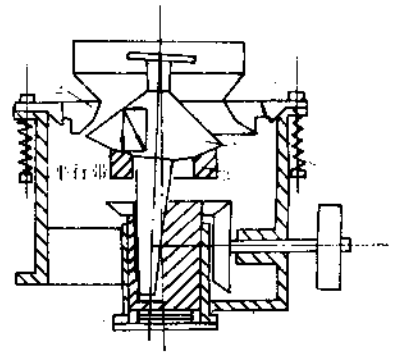


图 2-17 菌形圆锥破碎机示意图

1—动锥;2—定锥;3—球面座

用作中细碎的圆锥破碎机,又称菌形破碎机,如图 2-17 所示。处理的是经过初次破碎后的料块,故进料口不必很大,但要求加大卸料范围,以提高生产能力,且要求破碎产品具有比较均匀的粒度,所以动锥 1 和定锥 2 都是正置的,动锥制成菌形,在卸料口附近,动、定锥之间有一段距离相等的平行带,以保证卸出物料的粒度均匀。这类破碎机因为动锥表面斜度较小,卸料时物料是沿锥斜面滚下。因此,卸料就会受到斜面的摩擦阻力作用,同时也会受到锥体偏转、自转时的离心惯性力的作用。故这类破碎机并非自由卸料的,因而工作原理和计算上与粗碎圆锥破碎机有些不同。中细碎圆锥破碎机的规格用镶衬板的动锥底部直径 D 来表示。

由于破碎力对动锥的反力方向不同,这两种破碎机动锥的支承方式也不相同。旋回破碎机反力的垂直分力 P_2 不大,故动锥可以用悬吊方式支承,支承装置在破碎机的顶部。因此,支承装置的结构比较简单,维修也比较方便,菌形圆锥破碎机反力的垂直分力 P_2 较大,故用球面座 3 在下方将动锥支托起来。支承面积较大,可使压强降低。不过这种支承装置正处于破碎室的下方,粉尘较大,要有完善的防尘装置。因而构造比较复杂,维修也比较困难。

2. 粗碎圆锥破碎机工作参数的确定

粗碎圆锥破碎机与颚式破碎机相比,虽然构造不同,但破碎与卸料过程基本相同,故在计算上有许多相似之处。

(1) 钳角

为了简化计算,设两锥体的几何中心线互相平行(图 2-18),对于旋回破碎机来说,由于

动、定锥中心线夹角 β 很小,一般为 $2^\circ \sim 3^\circ$,视作两中心线平行,误差不大。

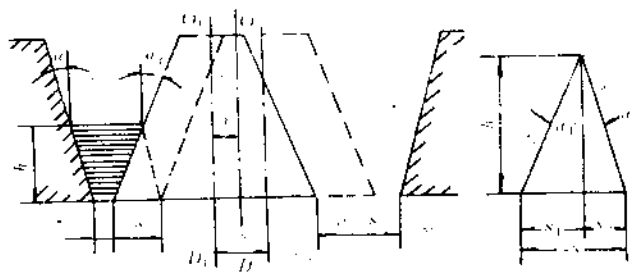


图 2-18 粗碎圆锥破碎机有钝角

如果动锥母线有倾角为 α_1 ,定锥母线的倾斜角为 α_2 ,则两锥面间的夹角 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$,称为粗碎圆锥破碎机的钝角。破碎机工作时,动锥向定锥靠拢,将夹紧的料块压碎,这与颚式破碎机动颚摆向定颚时的情况相同。根据同样力学分析,要使料块能牢固夹在破碎腔中,也必须满足以下条件:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \leq 2\phi \tag{2-66}$$

即两锥间的钝角 α 应小于两倍物料与锥面的摩擦角 ϕ 通常取 $\alpha = 21^\circ \sim 23^\circ$ 。

(2) 动锥转速

在粗碎圆锥破碎机的纵截面,破碎物料的过程有如颚式破碎机。因此,可以按确定颚式破碎机偏心轴转速的方法,把粗碎圆锥破碎机动锥的转速算出,粗碎圆锥破碎机动锥转速的计算公式为:

$$n = 235 \frac{\sqrt{\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2}}{\sqrt{r}} \quad (\text{r/min}) \tag{2-67}$$

式中 r 为在出料口平面上动锥的偏心距(cm)。此式与目前破碎机制造厂用以确定转速的经验公式计算结果极为接近。其经验公式为:

$$n = 160 - 42B \quad (\text{r/min}) \tag{2-68}$$

式中 B 为进口宽度(m)。

(3) 生产能力

旋回破碎机的生产能力可按经验公式(2-51)计算。但破碎机单位出料口宽度的生产能力 q 值按下表查出。

表 2-4 旋回破碎机 q 值

规格(mm)	500/75	700/130	900/160	1200/180	1500/180	1500/300
$q(\text{t/mm} \cdot \text{h})$	2.5	3.0	4.5	6.0	10.5	13.5

(4) 功率

粗碎圆锥破碎机的功率计算方法,与颚式破碎机相似,也可以用体积假说估算。粉碎同受压物料的体积成正比,亦即同动锥表面积 F 与动锥平均偏心距 r_m 的乘积成正比。于是功率消耗:

$$N = 9.7Fr_m n \quad (\text{kW}) \tag{2-69}$$

式中: F ——动锥的表面积(m^2);

r_m ——动锥中部的摆动偏心距(m);

n ——动锥转速(r/min)。

考虑到应该有 50% 的储备功率, 破碎机的电动机功率

$$N_m = 14.6Fr_m n \quad (\text{kW}) \quad (2-70)$$

电动机功率还可用下述经验公式估算:

$$N_m = 85D^2K \quad (\text{kW}) \quad (2-71)$$

式中: D ——动锥下端的最大直径(m);

K ——修正系数, 当进料口宽度 $B=500, 700, 900\text{mm}$ 时, 取 $K=1.0$;

$B=1200\text{mm}$ 时, 取 $K=0.91$; $B=1500\text{mm}$ 时, $K=0.85$ 。

3. 中细碎圆锥破碎机工作参数确定

(1) 钳角

为了提高破碎效率, 对于标准型和中间型圆锥破碎机, 两锥各段的钳角 α (图 2-19) 都必须小于两倍物料与衬板的摩擦角 ϕ , 即 $\alpha = \gamma_2 - \gamma_1 \leq 2\phi$, γ_1, γ_2 为定锥和动锥各自与水平线的夹角, 一般 $\gamma_1 = 38^\circ \sim 41^\circ$ 。对于短头破碎机则无需考虑钳角, 一般都能满足 $\alpha \leq 2\phi$ 。

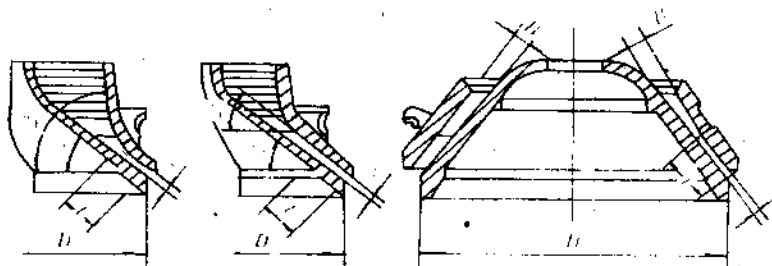


图 2-19 中细碎圆锥破碎机的类型

(2) 动锥转速

动锥的转速即偏心衬套的转速, 与粗碎圆锥破碎机不同, 它是根据另一种原则算出的。因为这类破碎机用于物料的中细碎, 为了保证产品粒度的均匀性, 使卸出料块的尺寸都小于出料口宽度, 工作时应该使每块物料在平行带上起码能够受到一次破碎作用, 亦即物料经过平行带的时间应不少于动锥偏转一次所需的时间。

由于内锥母线的倾斜角较小, 近出料口处, 定、动锥之间又有一平行带 (图 2-19), 所以料块卸下时, 是沿着动锥斜面滑下。因此不免要受到动锥斜面摩擦阻力以及动锥偏转和自转的离心惯性力的影响, 但因为离心惯性力较小, 故可以忽略不计。由于摩擦阻力的作用, 物料沿动锥斜面滑下时的加速度 a 必定小于重力加速度 g 。

物料在锥体平行面的情况可看作物料在斜面运动, 如图 2-20 所示。设料块所受重力为 G , 动锥底部倾角为 γ , 则与斜面垂直的分力为 $G\cos\gamma$ 。沿斜面方向的分力为 $G\sin\gamma$ 。此外, 沿斜面与料块运动相反的方向作用有摩擦力为: $fG\cos\gamma$ 。故使料块沿斜面下滑之力为:

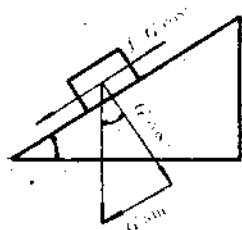


图 2-20 料块在动锥上的作用力分析

$$P = \frac{G}{g}a = G\sin\gamma - fG\cos\gamma$$

$$\text{即: } a = g(\sin\gamma - f\cos\gamma) \quad (2-72)$$

式中: f ——物料与锥面间的摩擦系数,一般取 $f=0.35$ 。

γ ——动锥母线与水平面方向之夹角。

设平行带长度为 L , 物料从平行带的起点滑下时, 初速为零, 则物料通过平行带的时间 t 可依下式求出:

$$L = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}gt^2(\sin\gamma - f\cos\gamma)$$

$$t = \sqrt{\frac{2L}{g(\sin\gamma - f\cos\gamma)}} \quad (\text{s}) \quad (2-73)$$

另一方面, 设动锥每分钟的转速为 n , 则每转所需时间为:

$$t' = \frac{60}{n} \quad (\text{s}) \quad (2-74)$$

为了使卸出料块的尺寸都小于破碎机的出料口宽度 e , 就必须使料块通过平行带的时间不少于动锥每转所需的时间, 即:

$$t \geq t' \\ n \geq 133 \sqrt{\frac{\sin\gamma - f\cos\gamma}{L}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-75)$$

式中, L 为平行带的长度(m)。

为了简化计算, 亦常采用下述经验公式来估算:

$$n = 340 - 66D \quad (\text{r/min}) \quad (2-76)$$

式中: D 为动锥锥底直径(m), 也就是破碎机的规格尺寸。

(3) 生产能力

中细碎圆锥破碎机的生产能力也可按经验公式(2-51)计算, 但破碎机单位出料口宽度的生产能力 q 按下表 2-5 查出。

表 2-5 圆锥破碎机 q 值

规格		φ600	φ900	φ1200	φ1650	φ1750	φ2100	φ2200
q t/mm·h	标准型	1.0	2.5	4.0~4.5	7.0~8.0	8.0~9.0	13.0~13.5	14.0~15.0
	中间型							
	短头型		4.0	6.5	12.0	14.0	21.0	24

当出料口宽度小时, q 取高值, 出料口大时, 取低值; 硬质物料 q 取低值, 软质物料取高值。上表为开路流程时的生产能力, 当采用闭路流程时, 一般还需乘以修正系数 1.15~1.4。

(4) 功率

中细碎圆锥破碎机有功率消耗, 可按下式进行计算

$$N = 6Fr_m n \quad (\text{kW}) \quad (2-77)$$

式中各符号的意义同式(2-69)。

考虑到中细碎圆锥破碎机的尖峰负荷较大, 故电动机的功率为:

$$N_m = 3N = 18Fr_m n \quad (\text{kW}) \quad (2-78)$$

电动机功率也可以用下述经验公式来估算：

$$N_M = 50D^2 \quad (\text{kW}) \quad (2-79)$$

式中 D 为动锥锥底直径(m)。

§ 2-3-3 辊式破碎机

1. 双辊破碎机工作原理、构造及性能

常用的一种辊式破碎机是双辊破碎机，它的破碎机构是一对圆柱形辊子，如图 2-21 所示。辊子互相平行水平安装在机架上，前辊 1 和后辊 2 作相向旋转。物料加入到喂料箱 16 内，落在转辊的上面，在辊子的表面摩擦力作用下，被扯进转辊之间，受到辊子的挤压而粉碎。粉碎后的物料被转辊推出，向下卸落。因此，破碎机是连续操作的，且有强制性卸料的作用，粉碎粘湿的物料也不致堵塞。

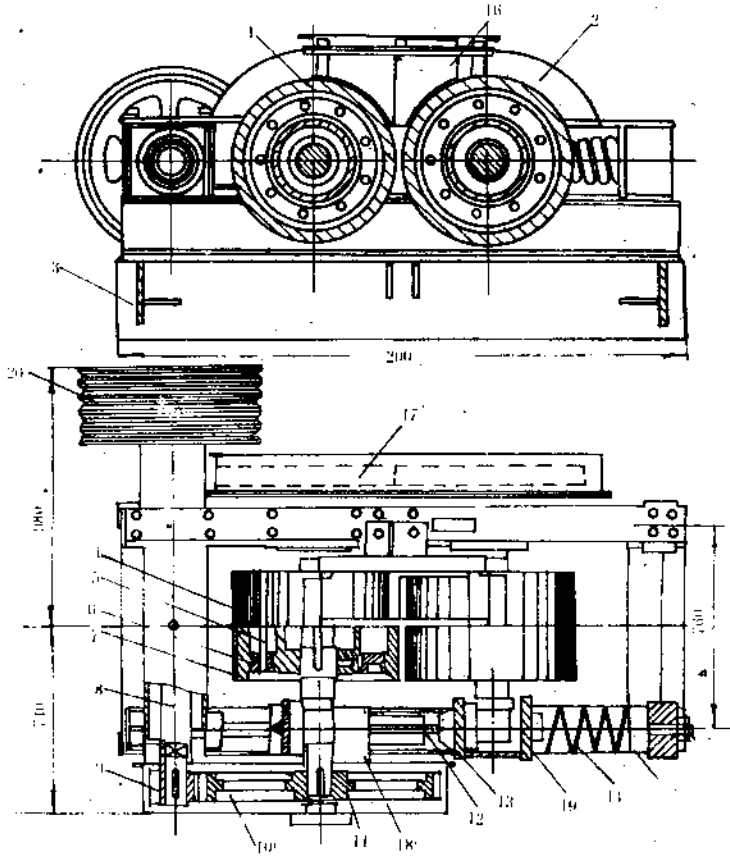


图 2-21 双辊破碎机

辊子安装在焊接的机架 3 上，由安装在轴 11 上的辊芯 4 以及套在辊芯上的辊套 7 组成。两者之间通过锥形环 6，用螺栓 5 拉紧，以使辊套紧套在辊芯上。当辊套的工作表面磨损时，容易拆换。前辊的轴安装在滚柱轴承中，轴承座 18 固定安装在机架上。后辊的轴承 19 则安装在机架的导轨中，可以在导轨上前后移动。此时轴承用强力弹簧 14 或用液压装置压紧在顶座 12 上。当转辊之间落入难碎物时，弹簧被压缩，后辊后移一定的距离，让硬物落下，然后在弹簧张力作用下，又恢复原来位置。弹簧的压力可用螺母 15 调整。通过更换不同厚度的钢垫片 13，可以调节两转辊的间距。辊式破碎机的规格用辊子直径和长度 $D \times L$ mm 来表示。因为辊子表面

磨损得不均匀,因此,辊子的长度 L 应小于辊子的直径 D ,一般取 $L=(0.3\sim 0.7)D$ 。

辊式破碎机的主要优点是:结构简单,机体不高,紧凑轻便,造价低廉,工作可靠,调整破碎比方便,能粉碎粘湿物料。其主要缺点是:生产能力低,要求将物料均匀连续地喂到辊子全长上,否则辊子磨损不均,且所得产品粒度不易均匀,需要经常修理。

辊式破碎机可用来破碎石灰石、硬质粘土、煤块、泥灰岩、白垩和页岩等。在破碎作业中,往往用作第二级或第三级的破碎机械。

2. 双辊破碎机工作参数的确定

(1) 钳角

物料与两辊子接触点的切线夹角 α 称为辊式破碎机的钳角(见图 2-22)。

与颚式破碎机一样,为了能钳住物料进行破碎,要求辊式破碎机有一定的钳角,钳角的极限值可以从作用力的平衡关系求得。

为了简化计算,设料块为球形,作用在料块上的外力有:料块所受的重力 G ,辊子对料块的作用力 P 以及由它所引起的摩擦力 fP 。其中 f 为料块和辊子间的摩擦系数。由于重力 G 较之作用力 P 小得多,故可忽略不计。

将作用力 P 及摩擦力 fP 分解为垂直和水平方向的分力。为了能将物料钳进转辊间隙,必须使向下拉扯物料的力大于排挤物料的力,即必须满足以下条件。

$$2fP\cos\frac{\alpha}{2} \geq 2P\sin\frac{\alpha}{2} \quad (2-80)$$

$$f \geq \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} \quad (2-81)$$

物料与辊面间的摩擦角为 ϕ 。

$$\operatorname{tg}\phi = f,$$

则:

$$\alpha \leq 2\phi \quad (2-82)$$

即钳角应小于或等于物料与辊子之间的摩擦角的两倍。

干硬物料(石灰石、砂岩等)在金属表面上的摩擦系数 $f=0.3$;湿软物料(粘土等)的摩擦系数 $f=0.45$;与此相应的最大钳角分别见图 2-22 辊式破碎机的钳角为 $33^{\circ}20'$ 和 $48^{\circ}40'$ 。实际上采用的钳角要小些。

为了使钳角能满足式(2-82)的关系,喂入破碎机的物料尺寸 d 与辊子直径之比值大小应受一定的限制(如图 2-22)。

$$\left(\frac{D}{2} \cdot \frac{d}{2}\right) \cos\frac{\alpha}{2} = \left(\frac{D}{2} + \frac{e}{2}\right) \quad (2-83)$$

以 $\frac{d}{2}$ 除全式,整理得:

$$\frac{D}{d} = \frac{\cos\frac{\alpha}{2} - \frac{e}{2}}{1 - \cos\frac{\alpha}{2}} \quad (2-84)$$

辊式破碎机的破碎比一般为 $i=4$,故 $\frac{e}{d}=0.25$ 。并将前述 α 的极限值代入上式,可知,对于

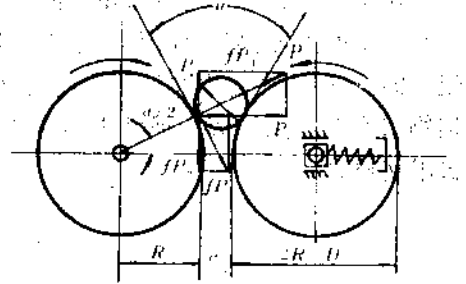


图 2-22 辊式破碎机的钳角

干硬物料 $\frac{D}{d}=17$; 对于湿软物料 $\frac{D}{d}=7.5$ 。实际上, 为了使破碎机可靠地进行工作, $\frac{D}{d}$ 的数值还必须加大 20~25%, 此时辊子直径要比物料尺寸大 9~22 倍。可见光面双辊破碎机用作粗碎是不恰当的, 否则破碎机要做得非常庞大笨重, 制造使用都不方便。

(2) 辊子转速

从生产能力公式可以看出, 提高辊子的转速, 可使生产能力提高, 但事实上, 转速的提高, 应有一定的限度, 超过此限度, 落在转辊上的料块在较大的离心惯性力作用下, 就不易钻进转辊之间。这时生产能力非但不能提高, 反而引起电耗增加, 辊子表面的磨损和机械振动增大。根据物料在辊子上的离心惯性力与各作用力的平衡条件, 可得出当 $i=4$ 时, 光面辊式破碎机的极限转速为:

$$n_{\max} = 616 \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{\rho d D}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-85)$$

式中: f ——物料与辊子表面的摩擦系数;

ρ ——物料的密度 (kg/cm^3);

d ——喂入破碎机的物料直径 (cm);

D ——辊子直径 (cm)。

实际上, 为了降低破碎机的振动与辊子表面的磨损, 取:

$$n = (0.4 \sim 0.7)n_{\max} \quad (\text{r/min}) \quad (2-86)$$

光面辊子取得上限值, 槽面和齿面辊子则取下限值。辊子的合理转速一般通过实验确定。目前使用的辊式破碎机, 辊子圆周速度多在 0.5~3m/s 之间。对于硬质物料, 取 1~2m/s; 而对软质物料可达 6~7m/s。

(3) 生产能力

假设物料连续均匀地填满整个辊子长度, 则破碎后物料构成一连续扁带从破碎机卸出。料带的宽度等于辊子长度 L , 厚度等于辊子的间距 e , 卸出速度等于圆周速度, 因此, 破碎机的体积生产能力为:

$$Q_v = 3600Lev \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (2-87)$$

实际上, 喂入物料并不能布满整个长度, 同时卸出物料是松散的, 故必须乘上系数 K 加以修正, 因为辊子的圆周速度:

$$v = \frac{\pi Dn}{60}$$

$$\text{则: } Q_v = 188KLeDn \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (2-88)$$

$$\text{或: } Q = 188KLeDn\rho \quad (\text{t/h}) \quad (2-89)$$

式中: D ——辊子直径 (m);

L ——辊子长度 (m);

e ——卸料口宽度 (m);

n ——辊子转速 (r/min);

K ——利用率系数, 对于干硬物料, $K=0.2\sim0.3$; 对于湿软物料, $K=0.4\sim0.6$;

ρ ——物料容积密度 (t/m^3)。

当粉碎硬质物料时, 在破碎力的作用下, 后辊弹簧受压缩, 使转辊之间距增大, 通常间距约增大 1/4, 故:

$$Q_v = 188KL(e + 0.25e)Dn = 235KLDen \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (2-90)$$

(4) 功率

目前尚无可靠的理论公式计算辊式破碎机功率,一般采用经验公式来估算。粉碎中硬物料时,破碎机所需功率:

$$N = 0.794KLV \quad (\text{kW}) \quad (2-91)$$

式中: V ——辊子圆周速度(m/min);

L ——辊子长度(m);

K ——系数,等于 $0.6 \frac{d}{d_i} + 0.15$, 其中 d 与 d_i 是喂料和卸料粒度。

粉碎煤时:

$$N = 0.1iQ \quad (\text{kW}) \quad (2-92)$$

式中 i 为破碎比; Q 为生产能力(t/h)。

粉碎煤用的齿面辊式破碎机的功率可按下式计算:

$$N = KLDn \quad (\text{kW}) \quad (2-93)$$

式中: D ——辊子直径(m);

L ——辊子长度(m);

n ——辊子转速(r/min);

K ——系数,破碎煤时, $K=0.85$ 。

为了准确地估算辊式破碎机的电动机功率,有时也采用从实际测得的单位功率消耗的数据。表 2-6 和表 2-7 列出了每种产品的功率消耗,以及辊子直径和出口口宽度对它的影响。从表中可以看出,当产品粒度为 6~8mm,光面辊子直径为 600~750mm 时,消耗的能量比较少。

表 2-6 辊式破碎机破碎不同物料时的单位功率消耗

物 料	辊子间距 (mm)	每破碎一吨物料的功率 (kW/t)
硬质物料	30~100	0.92~1.36
硬质石灰石,矿渣,水泥熟料等	5~6	1.47~2.23
粗碎粘土(用齿辊)	8~10	0.55~0.66
石膏,白垩,焦炭	5~6	0.88~1.03
细碎粘土	2~3	0.66~0.92

表 2-7 辊式破碎机的单位功率与辊子间距及辊子直径的关系

辊子间距 (mm)	辊 子 直 径 (mm)			
	400	600	750	1000
单 位 功 率 消 耗 (kW/t)				
6	2.33~1.76	1.63~1.47	1.63~1.57	2.45~1.84
8	0.81~0.66	0.52~0.29	0.46~0.27	0.74~0.33

§ 2-3-4 锤式破碎机

1. 工作原理及类型

锤式破碎机的主要工作部件为带有锤子的转子。通过高速旋转的锤子对料块的冲击进行粉碎。由于各种脆性材料的抗冲击性差,因此,在作用原理上这种破碎机是比较合理的。

锤式破碎机的种类很多,可以按照下述结构特征进行分类:

按转子的数目,分为单转子和双转子两类;

按转子的回转方向,分为不可逆式及可逆式两类;

按锤子的排列方式,分为单排式和多排式两类;

按锤子在转子上的连续方式,还可分为固定式和活动式两类。固定锤式主要用于软质物料的细碎和粉磨。用于粉磨的称为锤磨机。

锤式破碎机的规格用转子的直径和长度表示。例如 $\phi 2000 \times 1200$ 锤式破碎机,即转子直径 2000mm,转子长度 1200mm。锤式破碎机类型如图 2-23 所示。

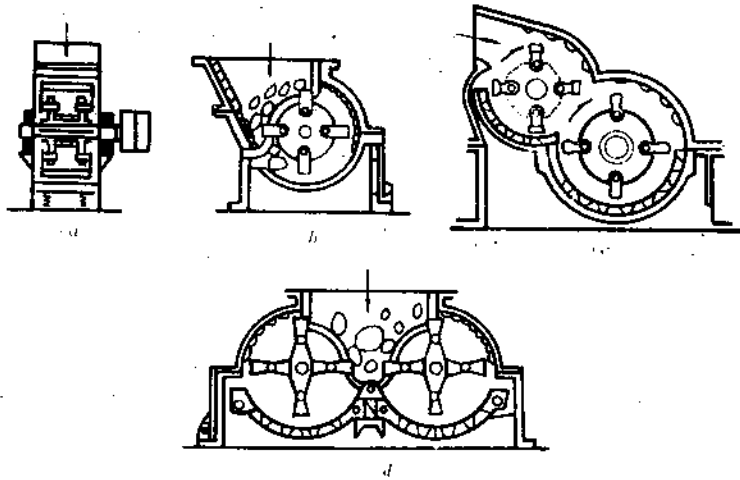


图 2-23 锤式破碎机的类型

2. 工作参数的确定

(1) 转子的转速

转子圆周速度的大小与破碎机尺寸、产品粒度和物料的性质有关。随着圆周速度的增加可使破碎比及产品中细粒级含量增加。但是圆周速度过大,将显著地增加消耗功率,同时会引起锤子、篦条和衬板的强烈磨损。破碎脆性物料时,转子速度应比粉碎粘性物料大 40%。欲得到均匀的中等尺寸的产品,转速应低些,锤子数目应少些。欲使破碎产品粒度愈小,转子的速度应愈大,锤子的数目也应愈多。

转子的圆周速度,一般在 30~50m/s。因而,转子的直径为 300~600mm 的锤式破碎机,转子转速 $n=1000 \sim 3000$ r/min; 转子直径为 600~1000mm 的锤式破碎机, $n=600 \sim 1500$ r/min; 转子直径为 1000~3000mm 的锤式破碎机, $n=300 \sim 1000$ r/min。通常把圆周速度大于 30m/s 的称为快速锤式破碎机,小于 30m/s 的称为慢速锤式破碎机。

(2) 功率

至今仍无比较准确的公式可用于计算锤式破碎机的功率消耗。在选配电机时,可以根据以下经验公式来估算:

$$N_M = KD^2Ln(kW) \quad (2-94)$$

式中: L ——转子长度(m);

D ——转子直径(m);

n ——转子转速(r/min);

K ——系数, $K=0.1\sim 0.15$ 。

(3) 生产能力

为了确定锤式破碎机的生产能力,假设当锤子扫过卸料篦条筛面时,从所有篦条间隙同时卸出已粉碎的物料体积为:

$$V = Led, Z\mu(m^3) \quad (2-95)$$

式中: L ——卸料篦条间隙长度(m);

e ——卸料篦条间隙宽度(m);

d_s ——产品粒度(m);

Z ——卸料篦条间隙数目;

μ ——物料松散及卸料不均匀系数,一般取 $0.015\sim 0.07$,小型破碎机取较小值,大型破碎机取较大值。

为了避免篦条筛堵塞,两篦条间的已粉碎物料通过间隙所需时间,应等于锤子扫过两排锤子间弧长所需的时间 t ,即:

$$t = \frac{\frac{2\pi R}{K}}{\frac{\pi R n}{30}} = \frac{60}{Kn} \quad (s) \quad (2-96)$$

式中: K ——转子圆周方向的锤子排数,一般 $K=3\sim 6$;

n ——转子转速(r/min);

R ——转子中心到锤子顶端的半径(m)。

因此,破碎机的生产能力为:

$$Q_v = 3600 \frac{V}{t} = 60ZLed, \mu Kn \quad (m^3/h) \quad (2-97)$$

或:

$$Q = 60ZLed, K\mu\rho_p \quad (2-98)$$

式中: ρ_p ——破碎产品的容积密度(t/m^3)。

事实上,锤式破碎机的生产能力与破碎机的规格、转速、卸料篦条间隙的宽度、喂料情况(喂料的均匀程度)以及物料的性质等因素有关。用理论方法推导的公式计算较麻烦,计算结果比实际产量低。一般多采用经验公式计算。当破碎中硬石灰石的粒度到 $15\sim 25mm$ 时,单转子锤式破碎机的生产能力可用下式计算:

$$Q = DLe \quad (t/h) \quad (2-99)$$

式中: D, L ——分别为转子的直径和长度(m); e ——卸料篦条间隙宽度(mm)。粉碎煤时,生产能力可按式计算:

$$Q = \frac{KLD^2n^2}{3600(i-1)} \quad (2-100)$$

式中: D, L ——分别为转子的直径和长度(m); n ——转子转速(r/min);

i ——破碎比; K ——系数,对于煤 $K=0.12\sim 0.22$ 。

§ 2-3-5 反击式破碎机

1. 工作原理及类型

反击式破碎机是在锤式破碎机的基础上发展起来的。反击式破碎机的工作部件为带有板锤 2 的高速旋转的转子 1(图 2-24), 喂入机内料块, 在转子回转范围内(即锤击区)内受到板锤冲击, 并被高速抛向反击板 3, 再次受到冲击, 然后又从反击板反弹到板锤, 继续重复上述过程。在往返途中, 物料还有互相碰击作用。由于物料受到板锤的打击, 与反击板的冲击以及物料相互之间的碰撞, 物料不断产生裂缝, 松散而致粉碎。当物料粒度小于反击板与板锤之间的缝隙时, 就被卸出。

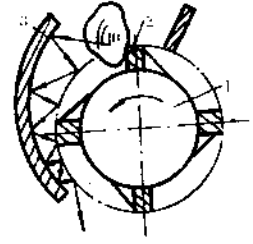


图 2-24 物料在破碎腔内运动示意图

从上述可见, 反击式破碎机的破碎作用, 主要分为下述三个方面:

(1) 自由破碎。进入破碎腔内的物料, 立即受到高速板锤的冲击, 以及物料之间相互撞击, 同时还存在板锤与物料及物料之间的摩擦作用。在这些外力的作用下, 使破碎腔内物料受到粉碎。

(2) 反弹破碎。被破碎的物料, 实际上并不是无限制地分散的, 而是被集中在箱形体区里。由于高速旋转的转子上的板锤冲击作用, 使物料获得很高的运动速度, 然后撞击到反击板上, 使物料得到进一步的破碎。这种破碎作用叫做反弹破碎。

(3) 铣削破碎。经上述两种破碎作用仍未破碎的大于出料口尺寸的物料, 在出料口处被高速旋转的锤头铣削而破碎。

实践表明, 其中以物料受板锤的冲击作用为最大。

反击式破碎机按其结构特征可分为单转子和双转子两大类, 其结构如图 2-25 和图 2-26 所示。反击式破碎机的规格用转子直径和长度表示。

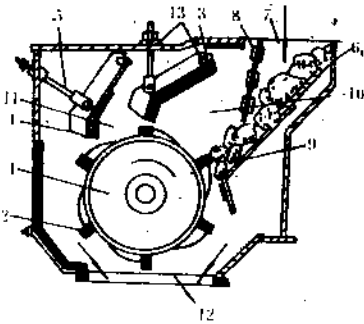


图 2-25 单转子反击式破碎机

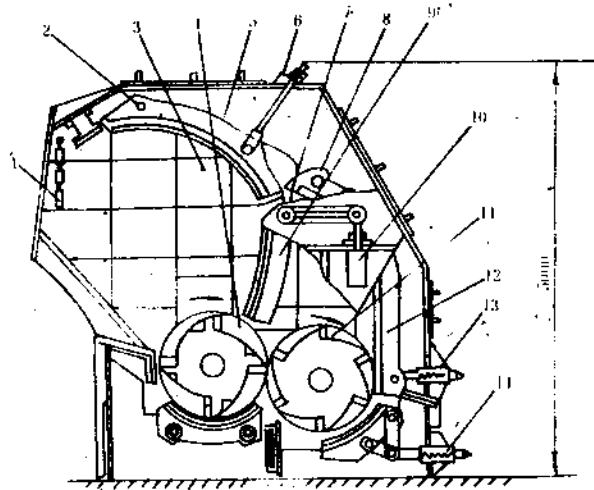


图 2-26 双转子反击式破碎机

2. 工作参数的确定

(1) 转子的直径与长度

反击式破碎机主要是用带有数个板锤的转子, 高速冲击物料进行破碎的。冲击破碎物料的

能量与转子质量有关。为了使破碎机具有足够大的冲击能量,转子体应具有足够大的质量,尤其是要具有足够大的转子直径。转子的直径与加入的物料粒度之间的关系可按下列经验公式来确定:

$$d = 0.54D - 60 \quad (2-101)$$

式中: d ——喂入料块尺寸(mm); D ——转子直径(mm)。

上式用于单转子机计算时,其计算结果还得乘以 $2/3$ 。

转子体的长度主要视破碎机的生产能力的大小而定。转子体长度与直径的比值 L/D 一般取 $0.5 \sim 1.2$ 。

(2) 转子的转速

转子的圆周速度对破碎机的生产能力、产品粒度和破碎比影响很大。而转子的圆周速度又随破碎机的结构、物料性质和破碎比等因素的变化有所不同。

质量为 m 的料块进入锤击区后,受到板锤的冲击作用,获得了切向分速度 C_t 和径向分速度 C_r 。在这两种分速度的作用下,物料以实际反击速度 C_s 冲击到反击面上被粉碎。部分被粉碎了的物料被反击面反弹出去,以平均的绝对剩余速度 C_s 进入自由空间。破碎物料的动能 $0.5m(C_s^2 - C_K^2)$ 主要转化为破碎功和热量,实际上,只是在超过一定的能量界限时,才开始破碎的,此时相应的临界速度为 C_K ,亦即是物料破碎时所需的最小冲击速度。

物料的粉碎粒度与反弹时的破碎特性、喂料粒度,反击强度以及平均反击次数等因素有关,实践表明,转子圆周速度愈大,细颗粒的成分也愈多。粉碎单位物料的表面积 S 与反击速度的关系如下:

$$S = (\lambda a^2)^{0.65} \cdot \alpha \left(C_s - \frac{C_K}{a} \right)^{1.3} \quad (\text{m}^2/\text{kg}) \quad (2-102)$$

式中: λ ——物料被冲击次数;

a ——破碎机结构常数;

α ——物料特性常数 ($\text{m}^{0.7} \text{s}^{1.3} / \text{kg}$);

C_s ——转子的线速度 (m/s);

C_K ——物料的临界破碎速度 (m/s)。

式(2-102)称为反击式破碎机的“速度方程式”。

比表面积 S 可根据表面积假说按下式求得:

$$S = K \left(\frac{1}{d_{90}} - \frac{1}{D_{90}} \right) \quad (2-103)$$

式中: D_{90} ——90%喂料通过相应筛孔时的当量粒度;

d_{90} ——90%产品通过相应筛孔时的当量粒度;

K ——系数, $K=1$ 。

临界破碎速度, C_K 值大小因物料的性质差异而各不相同。临界破碎速度 C_K/a 的数值可以根据试验所得的 $S=f(C_s)$ 曲线(图 2-27),利用外插法,令 $S=0$ 时,近似地推算求得。冲击次数 λ , 结构常数 a 以及物料特性常数 α 亦需试验确定,试验得到的各项数据见表 2-8。

表 2-8 反击式破碎机反击常数

破 碎 物 料	a	C_K	C_K/a	α	ρ	λ	$(\lambda a^2)^{0.65} \cdot \alpha$
		m/s	m/s	$\text{m} \cdot \text{s} / \text{kg}$	kg / m^3		
煤	0.7	7	10	24.1×10^{-5}	1400	18	99×10^{-3}
石灰石	0.7	11.5	16.5	14.2×10^{-5}	2500	18	58.5×10^{-3}

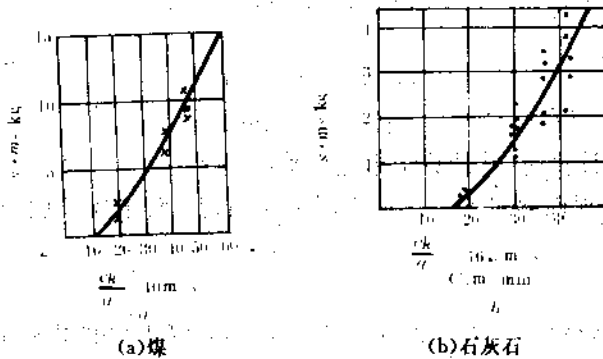


图 2-27 临界破碎速度 C_c 的试验测定

式 2-102 考虑了物料性质、破碎比以及破碎机结构等主要因素的影响,是比较完善的计算公式。然而,式中一系列数值必须通过试验获得,故使用时不甚方便。目前一些制造厂主要是根据用户要求,将所需破碎的物料通过试验以求得所需的合理的线速度。

从式(2-102)可知,转子的圆周速度随破碎机的结构、物料性质和破碎比等因素的变化而有所不同,变动范围很大,通常粗碎时转子圆周速度取 $15 \sim 40 \text{ m/s}$; 细碎时则取 $40 \sim 80 \text{ m/s}$ 。转速愈高,产品中细粒级含量愈多,破碎比愈大。

(3) 板锤数目

确定板锤数目的原则,应是能确保喂入机内料块借自由落体重力加速度或沿喂料导板下滑的速度,尽可能地深入锤击区,而又不与转子体表面接触。板锤数目少了,可能造成转子体表面的磨损;反之,物体冲击效果显著下降,并增加板锤不应有的磨损。

转子运转时,两个相邻板锤通过喂料点的间隔时间 t ,可由下式计算:

$$t = \frac{\pi D - Z(\delta_1 + \delta_2)}{\pi D n Z} \quad (\text{s}) \quad (2-104)$$

式中: Z ——板锤数目;

δ_1 ——板锤厚度(cm);

δ_2 ——板锤座厚度(cm), 嵌入式和楔块压紧板锤时, $\delta_2 = 0$;

n ——转子转速(r/min);

D ——转子直径,是指作用圆的直径(cm)。

物料在 t 时间内,应深入锤击区 h 深度(即板锤露出转子体高度),故:

$$t = \frac{h}{\sqrt{2gh}} \quad (\text{s}) \quad (2-105)$$

式中 h 为料块落下的高度(cm)。物料若是沿 45° 导板滑下,则应乘以系数 1.7。同时考虑到料块与导板的摩擦,还得乘以系数 1.2。

将式(2-105)代入式(2-104)并经整理,即可求得板锤数目的计算式:

$$Z = \frac{1}{\frac{hn}{60\sqrt{2gh}} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{\pi D}} \quad (2-106)$$

从上式可见,板锤数目与转子直径有关,转子直径 D 不大时,板锤数目可以少些。通常转子直径小于 1m 时,可以只装设 3 个板锤。直径为 $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 时,可以装设 4~6 个;直径为 1.5

~2m 时可以装设 6~10 个。对于硬质物料和破碎比较大时,板锤数目应该多些。

(4) 生产能力

反击式破碎机的生产能力,可以根据下述方法确定(图 2-28)。物料被板锤拨动通过转子与反击板之间的间隙时,物料带的宽度等于转子的长度 L , 物料带的高度等于板锤的高度 h 加上转子与反击板之间的间隙 e , 物料的厚度等于物料破碎后的粒度 d_c 。

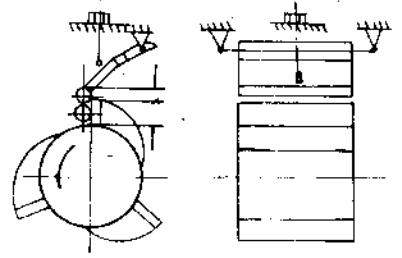


图 2-28

因此,转子每转一周每一板锤所拨动的物料体积为:

$$V = (h + e)Ld_c \quad (\text{m}^3) \quad (2-107)$$

式中: h 、 e 、 L 和 d_c 的单位均为 m。该转子上共有 Z 个板锤,则破碎机的生产能力为:

$$Q = 60(h + e)Ld_c Z n K \rho \quad (\text{t/h}) \quad (2-108)$$

式中: n ——转子的转速(r/min);

K ——修正系数,一般取 0.1;

ρ_c ——物料的容积密度(t/m^3)。

实际上,影响反击式破碎机生产能力的因素很多,除了转子的尺寸、转子的圆周速度外,物料的性质(种类、尺寸、粒度分布及含水量)及破碎比等也具有较大的影响。目前,虽然还有许多计算公式,但计算结果与实际都有些出入。

(5) 功率

反击式破碎机所需功率大小与物料的性质、破碎比和生产能力等有关。而影响破碎比和生产能力的因素很多,诸如转子的转速、物料对板锤的深入深度、反击腔的形式以及喂料粒度等等。由于物料破碎过程情况复杂,目前在理论上尚无比较完善的公式,通常是利用经验公式或根据实测的单位电耗来确定。

根据单位电耗确定反击式破碎机的公式如下:

$$N = EQ \quad (\text{kW}) \quad (2-109)$$

式中: E ——破碎单位物料需要的电耗($\text{kW} \cdot \text{h/t}$),视破碎物料性质与破碎比而定,对于中等硬度的石灰石,粗碎时 $E=0.5 \sim 1.2$;细碎时 $E=1.2 \sim 2$;

Q ——破碎机的生产能力(t/h)。

反击式破碎机所需功率亦可按下式计算:

$$N = 0.0102 \frac{Q}{g} C_c^2 \quad (\text{kW}) \quad (2-110)$$

式中: Q ——开路破碎的生产能力(t/h);

g ——重力加速度;

C_c ——转子的圆周速度(m/s)。

§ 2-3-6 转碾机

1. 轮碾机的工作原理和构造

轮碾机是利用碾轮和碾盘的相对运动将碾盘上的物料进行反复碾压的粗磨和细碎机械,同时起物料的混合作用。

实现轮碾和碾盘的相对运动有两种方法,碾轮相对于碾盘作回转运动和碾盘相对于碾轮

作回转运动。因此,轮碾机有两种基本形式:轮转式轮碾机和盘转式轮碾机,如图 2-29。

构成轮碾机的主要部分是碾轮、碾盘、动力驱动装置、刮板装置等。由于这些部分的不同组合,产生了轮碾机的各种结构形式:

(1) 依据动力驱动装置的布置,分为上传动和下转动。上传动将传动装置摆在上方,下转动则摆在下方。

(2) 按操作工艺分有干式轮碾机和湿式轮碾机。

(3) 依碾轮材料分有铁轮和石轮。

(4) 依进料方式分有连续式和间隙式。

(5) 依主要用途分有粉碎用轮碾机和混合机。

轮转式的轮碾机碾轮既绕主轴作公转运动,又绕横轴作自转运动。为达到动力平衡,往往二轮的大小相同,回转半径 $R_1 = R_2$ 。少数情况下,为了扩大碾面,二轮是不对称布置的,通常取 $\frac{R_1}{R_2} = 1.2$,这时二个轮的重量就不相同了。

盘转式的碾轮,只是由于摩擦力的作用作绕横轴的自转,碾盘则由驱动装置带动作等速的回转。

2. 轮碾机主要参数的决定

(1) 结构尺寸

轮碾机规格通常以碾轮的外直径 D 和宽度 B 的毫米数来表示。为了使轮碾机结构紧凑、有效面积大、功耗较小,轮碾机的主要结构尺寸,可按下列经验式取值:

$$\frac{\text{碾轮直径}(D)}{\text{碾轮宽度}(B)} \approx 3.5 \sim 4.5 \quad (2-111)$$

$$\text{碾轮的平均回转半径 } r_m \approx (1.2 \sim 2)B \quad (2-112)$$

$$D_0 \approx (4 \sim 5)B \quad (2-113)$$

(2) 入料块度尺寸

物块能被钳住的条件,应满足钳角 $\alpha \leq$ 摩擦角的两倍 (2ϕ), 设碾轮轮径为 D , 物块平均尺寸为 d , 则:

$$\frac{1}{2}(D - d) = \frac{1}{2}(D + d)\cos\alpha \quad (2-114)$$

经整理得:

$$d = \frac{1 - \cos\alpha}{1 + \cos\alpha} D \quad (2-115)$$

(3) 转速

对于盘转式轮碾机用筛板控制出料的,其转速以物料不致甩向外缘为依据,即设物料质量为 M , 物料与盘间的摩擦系数为 f , 物料的回转速度取为:

$$V = \frac{\pi r_m^2}{30} \quad (\text{m/s}) \quad (2-116)$$

$$Mgf \geq M \frac{V^2}{r_m}$$

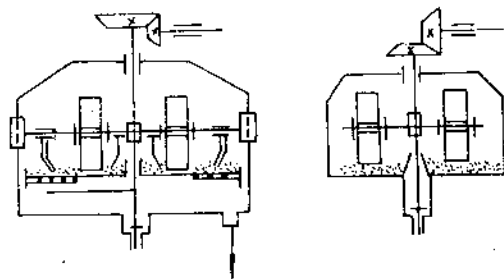


图 2-29 轮碾机的两种基本形式

$$n \leq 30 \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{r_m}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-117)$$

式中： r_m 的单位用 m，对于干硬料， $f=0.3$ ，得 $n \leq \frac{16.5}{\sqrt{r_m}}$ ；对湿料， $f=0.45$ ，得： $n \leq \frac{20}{\sqrt{r_m}}$ 。生产实际取为：

$$n \leq \frac{15 \sim 20}{\sqrt{r_m}} \quad (\text{r/min}) \quad (2-118)$$

对于轮转式轮碾机，通常考虑到碾轮转动时间的动力载荷、惯性离心力等的影响，其转速比盘转式的低些。

(4) 功率

轮碾机的功率主要用来克服碾轮和碾盘间的相对运动阻力和刮板阻力，下式可作概略计算：

$$N = K \frac{GBnZ}{24\eta} \left(\frac{f_1}{D} + \frac{f_2}{16} \right) \quad (\text{kW}) \quad (2-119)$$

式中： G ——每个碾轮质量，t； n ——主轴转速，r/min； B ——碾轮宽度，m；

Z ——碾轮个数； D ——碾轮直径，m； f_1 ——滚动摩擦系数，常取 0.01~0.03m；

f_2 ——滑动摩擦系数，常取 0.3~0.45； η ——总效率，常取 0.6~0.8； K ——校正系数，常取 1.1~1.5。

(5) 生产能力

影响轮碾机生产能力的因素很多，例如碾轮质量、刮板设置、加料方式、加料部位、出料粒度、物料特性、主轴转速等。目前只有一些参考公式，例如当粉碎硬质或中硬物料（如石英、长石、石灰石）时，产量计算式：

$$Q = \frac{nGD_0}{28} \quad (\text{t/h}) \quad (2-120)$$

式中： D_0 ——碾盘直径，m； n ——转速，r/min； G ——每个碾轮质量，t。

§ 2-3-7 笼式粉碎机

1. 作用原理与分类

笼式粉碎机又称笼型碾，其作用原理如图 2-30 所示，物料由料斗进入两个彼此交错相嵌的而作相反方向回转的笼子的中心，料块碰到内笼第一圈高速回转的钢杆即被击碎，接着在切线方向的打击力和重力的作用下，物料被抛到下圈相反方向回转的钢杆上继续把它击碎。如此反复进行，直到物料通过两只笼子的所有各圈进行粉碎而被卸出为止。

由于物料在笼式粉碎机内受钢杆多次反复打击，所以它的粉碎比也比较大，一盘为 30~40 左右。

笼式粉碎机根据笼子的转动情况可分为双转式和单转式两种。

笼式粉碎机的主要结构如图 2-31 所示。

笼式粉碎机的规格以转笼的最外圈直径和长度来表示。

2. 主要参数和性能

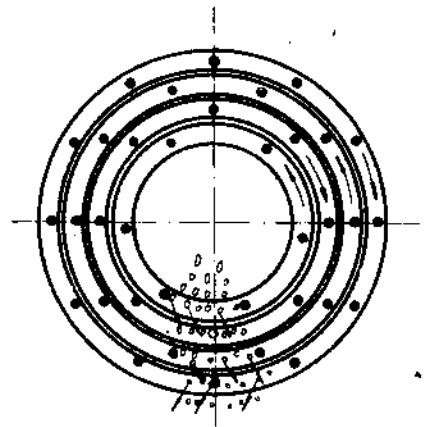


图 2-30 笼式粉碎机作用原理

若要减小笼式粉碎机的产品粒度,可由增加钢杆圈数或笼子的转速来达到。当转速增加时,与粒度减小的同时,在一定范围内,生产能力也会增加。但是当转速很大时,由于物料不容易从中心移到周边去,因而生产能力反而会急剧降低。

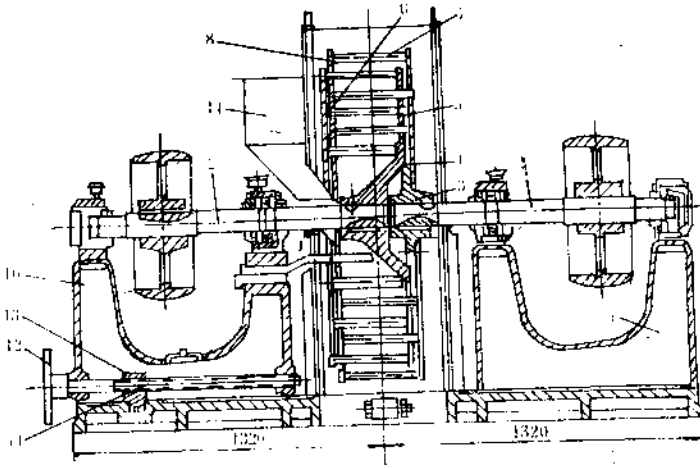


图 2-31 笼式粉碎机

1,2—主动轴;3,4 轮壳;5,6 圆盘;7 钢杆;8 圆环;
9,10 支座;11—螺杆;12 手轮;13 螺母;14—加料漏斗。

总的来讲,笼式粉碎机的生产能力与笼子的直径、长度、转速、物料性质、进料的粒度与均匀性都有关系。据实际调查,笼子直径为 1000~1250mm 时,产量为 4~14t/h。另外,钢杆的磨损与更新也引起生产能力的周期波动。一般进料粒度为笼子长度的 1/4~1/3。

笼子的圆周速度为 25~40m/s。

笼式粉碎机具有下列优点:体积小、质量轻、结构简单、容易密闭、维修方便、生产能力大、对湿度变化的反应较小,以及便于清洗。但是部件磨损大,尤其是钢杆的使用寿命短。笼式粉碎机适合于粉碎较软的物料,如煤、砂岩等。

§ 2-4 球 磨 机

§ 2-4-1 球磨机的工作原理、特点及类型

物料经过破碎设备破碎后的粒度大多在 20mm 左右,在生产过程中,如要达到生产工艺所要求的细度,还必须经过粉磨设备的磨细。粉磨是许多工业生产中的一个重要过程,其中使用面广、量大的一种粉磨机械是球磨机。

球磨机的主要工作部分为一回转的圆筒,靠筒内装入的各种材质和不同形状的研磨介质的冲击和研磨作用使物料粉碎、磨细。球磨机的规格用筒体的内径和长度表示。

1. 工作原理

当磨机以不同转速回转时,筒体内的研磨体可能出现三种基本情况,如图 2-32 所示。图 2-32(a)表示转速太快,研磨体与物料贴附筒体上一道运转,称为“周转状态”,研磨体对物料起不到冲击和研磨作用。图 2-32(b)表示转速太慢,研磨体和物料因摩擦力被筒体带到等于摩擦角的高度时,研磨体和物料就下滑,称为“倾泻状态”。对物料有研磨作用,但对物料没有冲击作

用,因而使粉磨效率不佳。图 2-32(c)表示转速比较适中。研磨体提升到一定高度后抛落下来,称为“抛落状态”。研磨体对物料有较大的冲击和研磨作用,粉磨效果较好。

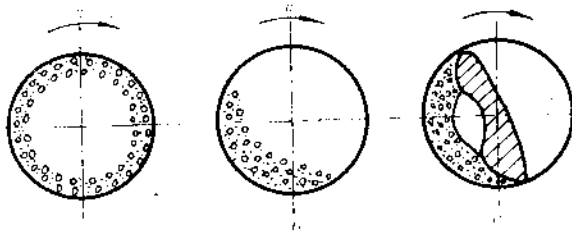


图 2-32 筒体转速与研磨体运动的关系

实际上,研磨体的运动状态是很复杂的,有贴附在磨机筒壁上的运动;有沿筒壁和研磨体层向下的滑动;有类似抛射体的抛落运动及滚动等。所谓研磨体对物料的基本作用,正是上述各种运动对物料综合作用的结果,其中主要的可以归结为冲击和研磨作用。分析研磨体粉碎物料的基本作用,目的是为了确定研磨体的合理运动状态,这是正确选择与计算磨机的适宜工作转速、需用功率、生产能力以及磨机机械计算的依据。

2. 特点

球磨机不仅在建材工业中大量应用,而且冶金、选矿、电力、轻工、化工等工业中的应用也很普遍,这是因为它具有较突出的优点。

- (1) 对物料的适应性强,能连续生产,生产能力大,可满足现代大规模工业生产要求。
- (2) 粉碎比大,可达 300 以上,并易于调整粉磨产品的细度。
- (3) 可适应各种不同情况下的操作,既可干法作业也可湿法作业,还可以把干燥和粉磨合并一起同时进行。对被粉磨的混合物料还有均化作用。
- (4) 结构简单、坚固,操作可靠,维护管理简单,能长期连续运转。
- (5) 有很好的密封性,可以负压操作。

其缺点是:

- (1) 工作效率低。据有些科学家测定,球磨机所消耗的功,真正用于粉碎物料的只占 2% 左右,其余绝大部分电能转变为热量而消失。
- (2) 体型笨重。大型磨机总重可达几百吨,必然地使初次投资巨大。
- (3) 由于筒体转速很低,一般在 15~30r/min 左右,如用普通的电动机驱动,则需要配备昂贵的减速装置。
- (4) 研磨体和内衬的消耗量很大,例如粉磨每吨水泥的钢铁消耗量为 1kg 左右。
- (5) 操作时噪音大。

3. 类型

球磨机按照不同的分类方法,可得到多种类型的球磨机。

(1) 按筒体的长度与直径之比分:

- ① 短磨机:长径比在 2 以下时为短磨,俗称球磨机。一般为单仓。
- ② 中长磨机:长径比在 3 左右时为中长磨机。
- ③ 长磨机:长径比在 4 以上时为长磨机,可称管磨机。中长磨和长磨,其内部一般分成 2~4 个仓。

(2) 按磨内装入的研磨介质形状分:

①球磨机:磨内装入的研磨介质主要是钢球或钢段。这种磨机使用最普遍。

②棒球磨机:这种磨机通常具有2~4个仓。在第一仓内装入圆柱形钢棒作为研磨介质,以后各仓装入钢球或钢段。

棒球磨的长径比以 $L/D=5$ 为宜,棒仓长度与磨机有效直径之比应在1.2~1.5之间,棒长较棒仓长度应短100mm左右为宜,以利于钢棒平行排列,防止交叉和乱棒。

棒球磨主要用于湿法磨,在干法磨中的应用正在研究之中。

③砾石磨:磨内装入的研磨介质为砾石、卵石、瓷球等。用花岗岩、瓷料等做内衬。用于生产白色或彩色水泥以及玻璃陶瓷工业的粉磨作业中等。

(3) 按卸料方式分:

①尾卸式磨机:欲磨物料由磨机的一端加入,由另一端卸出,称为尾卸式磨机。

②中卸式磨机:欲磨物料由磨机的两端加入,由磨体中部卸出,称为中卸式磨机。相当于球磨机两台串联使用,这样设备紧凑,简化流程。

(4) 按传动方式分:

①中心传动磨机:电动机通过减速机带动磨机主轴而驱动磨体回转,减速机的主轴与磨机的中心线在同一条直线上。

②边缘传动磨机:电动机通过减速机带动固定在磨机筒体上的大齿轮而驱动磨体回转。

(5) 其它分类

按工艺操作又可分为干法磨机或湿法磨机、间歇磨机或连续磨机。

§ 2-4-2 球磨机的构造概述

球磨机的类型比较多,结构也不同,现以 $\phi 2.4 \times 10$ m连续式管磨机为例将构造概述如下(图2-33)。该磨是边缘传动、中间卸料、带烘干仓的循环磨。磨筒体1的两端是进料漏斗2,该处装有直径为1m的进风管3,可从磨体两端同时鼓进热风。物料由密闭的喂料设备经进料漏斗喂入进料螺旋筒4中,与热风一起进入磨体的烘干仓。进料螺旋筒用螺栓与中空轴5的法兰连接并随磨机筒体一起回转。整个回转部分依靠两个中空轴支承在两个主轴承6上,两个主轴承由压力润滑系统进行润滑和冷却。一般采用水冷却。

磨机由电机通过减速机9和小齿轮13带动固定在卸料端的大齿轮转动,驱动磨机筒体回转。

磨筒体由A₃钢板焊制而成,其上有两个磨门。筒体内分为烘干仓和粗磨仓、细磨仓。在粗磨仓和细磨仓之间用出料篦板分隔成卸料仓。要烘干仓中装设有三段长各为500mm的扬料板,第三段扬料板末端有强制排料的扬料装置。

为了适应不同性质和含水量的物料,提高磨机的热效率和粉磨效率,可按实际需要来调整烘干仓和粗磨仓的长度。调整的长度为250mm的整数倍。

筒体两端焊接有A₃钢板的平端盖,用螺栓分别与中空轴的法兰联接。在磨机两端盖上分别用螺栓连接上磨头衬板。

在卸料仓筒体上开设卸料孔10。为保证该段筒体强度,该段采用40mm厚的钢板,其余各段采用25mm厚的钢板。卸料孔均被料罩所封闭,出料罩上部用管道与收尘器相连接。下部装有锁风装置再与输送设备相接,否则会影响磨机的卸料。

磨机工作时,进入烘干仓的物料被扬料板提升淋散,并与进入烘干仓的热气流接触而被烘干。烘干后的物料由扬料装置强制喂入粗磨仓中。装在粗磨仓中的研磨体随筒体回转而运动,

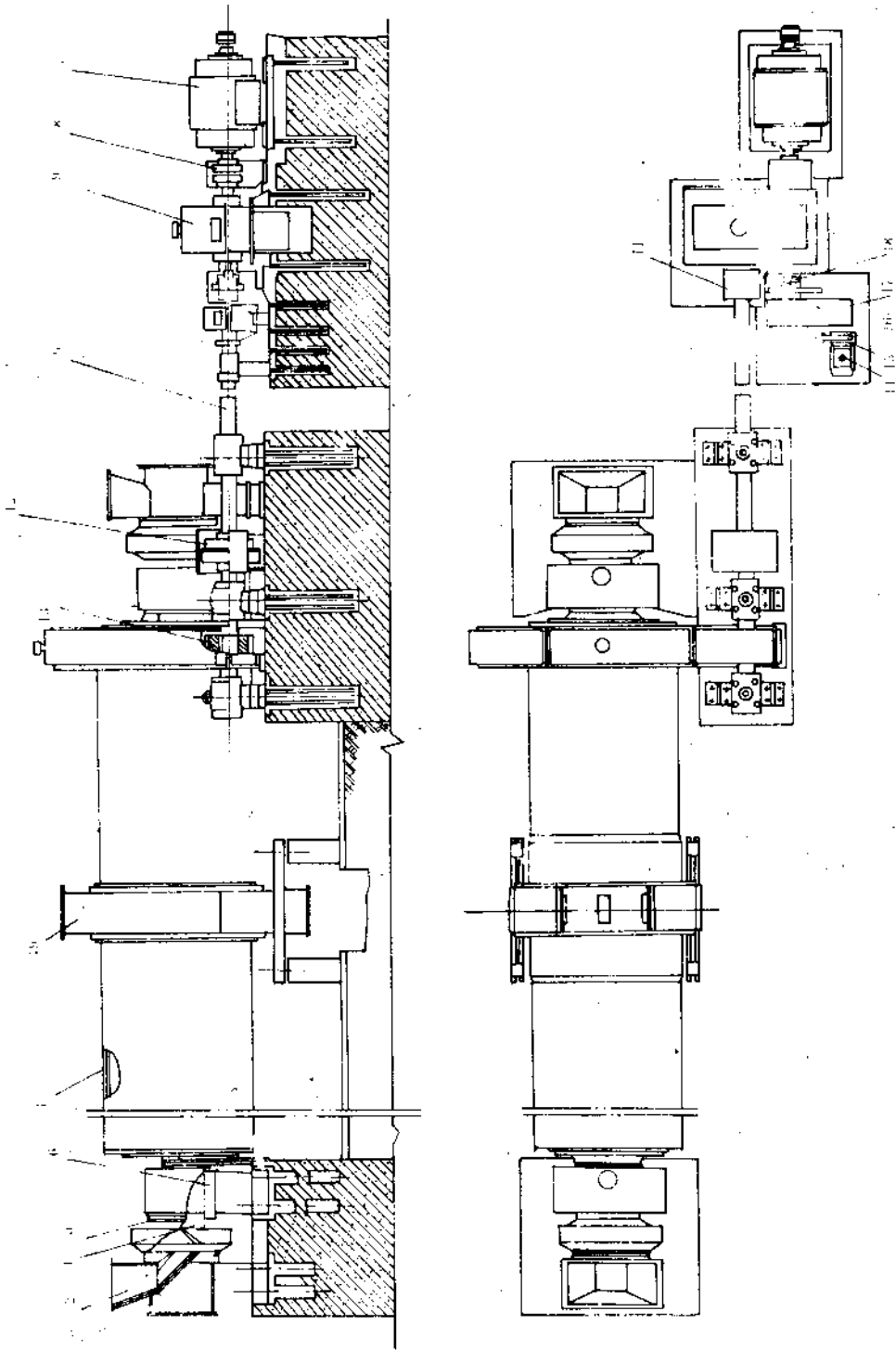


图 2-33 $\phi 2.4 \times 10\text{m}$ 球磨机

进行粉磨作用。粗磨后的物料通过出料篦板、卸料口、锁风装置和输送设备进入选粉机，合格的粉料送入原料库。粗粒进入回料端进料漏斗和回料螺旋筒进入细磨仓中再粉磨。经细磨后的物料循上述路径进行选粉和储存，从而组成了二级闭路循环粉磨系统。

间歇磨在玻璃陶瓷工业中使用较为普遍，它的长径比较小，物料加进磨腔以后，再从磨门卸出。通常为湿法磨机。其筒体结构如图 2-34 所示。

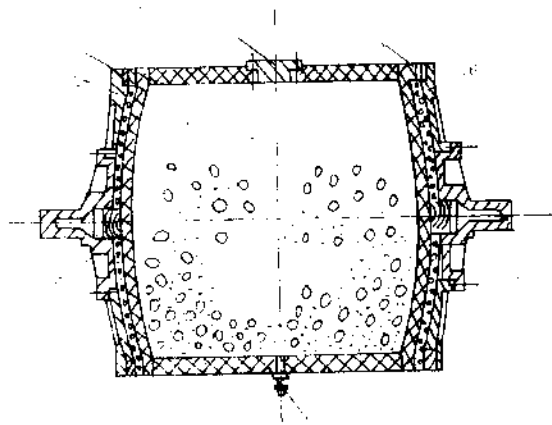


图 2-34 间歇式球磨机筒体剖面图
1 筒身；2—左端盖；3 轴盘；4—加料口及人孔；
5 内衬层；6 右端盖；7—放料旋塞。

§ 2-4-3 研磨体运动分析

为了确定磨机的适宜工作转速、需要功率、研磨体最大装填量的界限，以及对磨机进行机械计算等，必须对动态研磨体的运动规律作较为详细的分析。

由前述已知研磨体的运动状态是很复杂的，为了使分析问题简单化，通过观察研磨体的实际运动状态后，作如下几点假设：

(1) 当磨机在正常操作时，研磨体在磨机筒体内，按其所在位置一层一层地进行循环运动。如图 2-35 所示，图中 AD、BC 等封闭曲线代表各层研磨体中心的运动轨迹。

(2) 研磨体在磨机筒体内的运动轨迹只有两种：一种是一层一层地以磨机筒体横断面几何中心为圆心，按同心圆弧的轨迹随着筒体回转作向上的运动；另一种是一层一层地按抛物线轨迹降落下来。按照这处假设，各层研磨体在循环运动中互不干涉。

(3) 研磨体与磨机筒壁间及研磨体层与层之间的相对滑动极小，具体计算时可忽略不计。

(4) 磨机筒体内物料对于研磨体运动的影响忽略不计。

下面我们根据以上四个基本假设来讨论动态研磨体的运动规律。

1. 研磨体运动的基本方程式

为使问题便于研究，把问题简单化，我们把磨机筒体里装

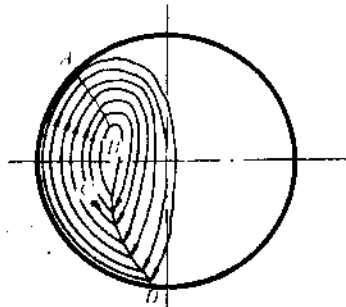


图 2-35 研磨体层示意图

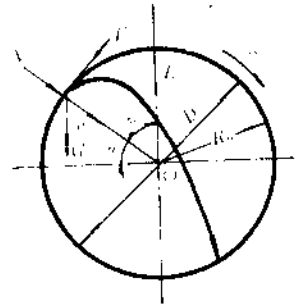


图 2-36 动态研磨体运动分析