

● 中国建筑工程出版社

粉碎



29

粉 碎

[日]神保元二等 著

王少儒 孙成林 译

中国建筑工业出版社

本书是根据日本化学工业社出版的工厂操作丛书第一分册《粉碎》(1976年修订版)翻译的。书中介绍了国外近年来有关粉碎工艺理论和实践的发展。全书共分五章,每章都独立成篇,而全书又联贯一气。前四章分别阐述粉碎理论、粉碎设备及与粉碎工艺密切相关的分级技术、粒度测定等内容;第五章介绍粉碎,主要是微细粉碎在有色金属、水泥、陶瓷、颜料、染料、橡胶、树脂、非金属矿、建筑材料、食品、农药、化妆品等二十八个工业部门中的应用实践。本书对各行业中从事粉碎工作的有关人员都具有参考价值。

本书第一至第四章及第五章第一至第十节由孙成林翻译,第十一至第二十九节由王少儒翻译。全书由王少儒审校。

工場操作シリーズ 改訂 粉碎
昭和51年11月30日第1版第3刷発行
編集兼発行人 原 徹
印刷人 松田清
発行所 株式会社 化学工業社

粉 碎

[日] 神保元二等 著
王少儒 孙成林 译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市平谷县大华山印刷厂印刷(北京平谷县大华山)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 17¹/₈。字数: 415千字
1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷
印数: 1—5,800册 定价: 2.65元
统一书号: 15040·4748

目 录

一、粉碎理论的最近发展	1	五、粉碎生产作业实践	106
(一) 前言	1	(一) 碳化硅	106
(二) 粉碎理论概述	1	(二) 铁矿石	111
(三) 粉碎机理的新解析方法	3	(三) 磷矿石	116
(四) 关于细粉碎的某些问题	12	(四) 石灰石及粘土	125
(五) 结语	15	(五) 水泥工业的原料磨机	139
二、分级作业	17	(六) 陶瓷原料	144
(一) 分级效果的表示方法	17	(七) 电石	149
(二) 筛分	19	(八) 碳素及石墨	153
(三) 干式分级	20	(九) 颜料	159
(四) 湿式分级	26	(十) 金属粉的制造	162
(五) 结语	27	(十一) 硫黄	168
三、粒度测定法	29	(十二) 石棉	170
(一) 显微镜法	29	(十三) 滑石	173
(二) 沉降法	34	(十四) 橡胶	176
(三) 吸附法	37	(十五) 天然树脂	179
(四) 透过法	37	(十六) 合成树脂	182
(五) 其它方法	39	(十七) 小麦	188
(六) 测定结果的考察	40	(十八) 钛白粉	193
(七) 结语	41	(十九) 矿石	199
四、新式粉碎机的研制	42	(二十) 染料	218
(一) 粉碎机的选择	42	(二十一) 滑石粉	220
(二) 高速冲击粉碎和射流式磨机	49	(二十二) 水果和果汁	223
(三) 冲击式细粉碎机	62	(二十三) 混凝土的集料	228
(四) 振动磨	77	(二十四) 铝矾土	237
(五) 涡轮磨	89	(二十五) 膨润土	242
(六) 塔式粉磨机	94	(二十六) 铁丹及铁素体	247
(七) 干燥粉碎设备	99	(二十七) 六六六粉	261
		(二十八) 化妆品	266

一、粉碎理论的最近发展

(一) 前言

关于粉碎理论,在近一个世纪中曾提出很多,本文不能一一地加以论述。存在的问题是,在把其中许多理论运用到实际的粉碎机设计以及确定生产作业条件时,这些理论都不太起作用。当然,也有某些极为有用的理论,虽可作为大致上判定的参考,然而目前的现状大抵仍采用经验方法来进行设计。

但是,最近从与过去的粉碎理论完全不同的观点出发,开始提出了对粉碎机理的解析方法。对于这种思考方法即使还没有充分整理,不能立即在实践中有效地利用,但是这种粉碎机理的思考方法,可以说是开始展现出一套新的方向。而且这种思考方法既将在一定程度上适应生产实际的要求,同时在对经验进行解析方面也会提出新的理论依据。

此外,由于粉碎能的测定方法等作为标准规定下来,可以看到,在实际粉碎机械的设计方面取得有益进展。

另外,看到本书的内容就会了解,在化工厂目前所遇到的粉碎问题,大多是细粉碎以及超细粉碎。因此以下拟对细粉碎做为重点加以说明。

(二) 粉碎理论概述

1 粉碎功的定律

对于粉碎机械以及粉碎条件的设计和计划,首要的问题是,供给某数量的功,以完成某一数量的粉碎。换言之,就是粉碎功的效率问题。然而,这种效率依照粉碎机械、粉碎条件和被粉碎物等的不同,将受到很大影响。但因为粉碎是以减小被粉碎物的颗粒直径为目的,通常这种粉碎功的效率就以粒径的函数来表示。其通式为下列的Lewis公式:

$$dE = -C_L \frac{dx}{x^n} \quad (1-1)$$

式中,设 $n=2.0$,并加以积分,则成为:

$$E = C_R \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = C_R (S_2 - S_1) \quad (1-2)$$

按雷廷格定律,设 $n=1.5$,进行积分,则为:

$$E = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (1-3)$$

另据邦德的所谓第3法则,当 $n=1.0$ 时,则:

$$E = C_k \log x_1 / x_2 = C_k \log S_2 / S_1 \quad (1-4)$$

这也就是称作基克的定律。

上式中 E 为粉碎所需要的功的量, S 为颗粒的比表面积, x 为颗粒直径。但上述粒径的定义是指平均粒径或指代表性的粒径, 是一个相当难于规定的数值。最近由于对粉碎粒度的比表面测定方法有了很大的进展, 而这个方法与测定粒径相比, 可以提高所要求的精度, 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。其中, 田中达夫指出了带有结论性的用比表面积表示粉碎功定律的通式。田中式表明, 假定与消耗功量 (E) 相应的比表面积 (S) 的增加速度, 与临界比表面积 (S_{∞}) 和当时的比表面积之差成比例, 则:

$$dS/dE = k(S_{\infty} - S) \quad (1-5)$$

将其积分, 当 $S_{\infty} \gg S$ 时, 可以得到如下的简单公式

$$S = S_{\infty}(1 - e^{-kE}) \quad (1-6)$$

田中使用了简易的设备, 并就冲击粉碎和摩擦粉碎两者求出了 K 的值, 在设计粉碎机时, 即可参照这种原本的数据。

然而, 上述有关粉碎功定律, 即效率公式, 只能在同一粉碎条件下使用, 当条件变化时, 则要另求出常数值。另外, 最近发展到采用连续粉碎以及闭路粉碎为主的方法以后, 由于其性质是连续的粒度变化, 因而难于利用这类公式。除此之外, 对于超细粒粉碎问题, 即使 S_{∞} 是已知值, 也无法引用该公式, 此时就需要考虑将 S_{∞} 值如何加以放大或是找出产生作用的主要因素。否则也就无法直接引用上述粉碎功的定律。因此, 最近表现出的动向是, 拟从另外的观点修订粉碎理论。

2 粉碎的分布定律

分布定律是把粉碎产品的分布状态整理成简单的形式, 使其成为解析粉碎特性的一个方法。在这方面过去已提出了不同的方案。

现在日本最广泛使用的是如下的 Rosin-Rammler 的公式。

$$y = ae^{-bx^n} \quad (1-7)$$

在将 $\log(2 - \log y) \Rightarrow \log x$ 式描绘到图纸上时则成为直线, 为此, 印成有所需座标的图纸。

由于这个分布公式具有与实际很为一致的优点, 在日本, 几乎各方面的研究者大都加以引用, 这个公式还具有充分表达多种特性的优点。中条所做的球磨机粉碎的研究以及使用重锤降落式粉碎实验装置所进行的中川、松居、奥田等的研究, 提出了特别应予注意的结果。

另一方面, 这个分布公式也存在某些缺点, 如由于形式复杂, 运用上比较麻烦; 因为使用 2 次对数, 用于粗粒和用于细粒时, 相差很大, 难以比较其偏差, 从而影响其精确程度, 再者该式一般不太适用于细粒的检定, 其数值与实际不尽相符。

除 Rosin-Rammler 公式之外, 最近逐渐开始广泛使用了如下的对数正态分布公式

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log x - \log x_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1-8)$$

式中, x_0 为粒径的几何平均值, σ 为标准偏差值。除此之外, 考虑到一般的正态分布, 以及通常采用 \sqrt{x} 的形式以代替式中的 $\log x$ (例如将液滴分布归纳为 $x^{\frac{1}{2}}$)。由于最近在统计工作中盛行使用概率纸, 但应予注意的是, 当概率纸是对数概率纸时, 这些分布式则成为直线。

这种分布式的优点是, 在处理概率的现象方面, 不但具有理论依据, 还可在图上直观

地看出平均值和误差；粗粒部分和细粒部分的比例尺度大体上没有差别，另外本式也比较适用于细粉的检定。

本分布式的另一个优点是，粒数、表面积、体积（或重量）等在对数概率纸上，各累积分布曲线是按一定的间隔彼此互相平行的，如果熟练地加以利用，例如当已知粒数的分布值时，可简单地求出重量分布值，再有，还可能进行相互之间的50%粒径的比较（参考 Gebelein 的研究），著者也曾考虑到对于细粉颗粒和其他结晶颗粒，这个分布式与实际相符且便于使用，并认为随着今后从各方面进一步探讨后，将会得到广泛使用。

除此而外，常用的分布式还有 Gaudin-Schuhmann 公式：

$$y = (x/a)^n \quad (1-9)$$

其优点是比任何其他公式都简单，并且可以在坐标纸上进行描绘，尽管与实际不太相符，但还是得到广泛的利用。

另外，还有 Roller-Griffith 等公式，这些公式在数学上具有比较明确的根据，在一个时期为人所注意，但因为与实际不太相符，现在几乎已不再使用。

对于前述公式，还有究竟采用哪一种的问题，著者认为不外是适当选用最便利的公式为宜。对于分布式，曾进行过许多理论根据的研究，但难说都得到成功。并且，在现阶段理论研究所做的解释，还没有达到可以解析粉碎机理的程度，因此仍须用完全实用的观点来加以判断。

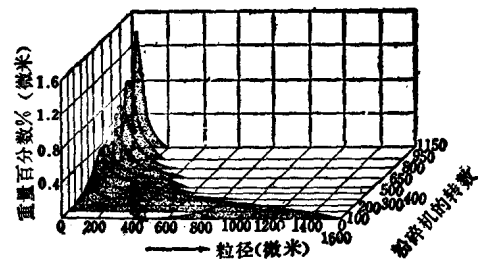


图 1-1 粉碎过程中粒度分布曲线的变化

以下，简单地介绍与上述各分布式相反的学说。其中有以 Heywood 命名的多成分分布说 (The Component Theory of Comminution)，其中提出，在粉碎过程中，分布的变化决不是连续的，而是从一个高峰向另一个高峰进行不连续地移动（图 1-1）。因此可以认为，成一直线所表示的移动只是特殊的情况，而一般的情况则是由几个分布直线组合而成。

（三） 粉碎机理的新解析方法

上节所述的粉碎理论，未考虑粉碎机种类、粉碎条件等因素，而只是表示一般的关系。但如进一步联系到微观的物理性质，对过程中的现象进行解析，则有必要从不同的观点来研究考察粉碎现象。也就是说需要新的解析方法。对这种新的设想，目前虽然尚未能充分深入开展研究，但在以下仍拟做一些介绍。

1 粉碎的能量平衡

粉碎是一种效率极低的作业，这点已为多数人的实验所证实，并广泛地得到确认（如表1-1）。这是因为加到粉碎过程中的能量的95%到99%以上都成为热而散失，如所周知，这种发热现象是种种故障的原因所在。

有关这种发热的原因是，加在粉体上的力，由于在该粉体的各层中分散开，而对每个颗粒来说所加的力并不够充分强大，达不到破坏界限，因此暂时作为固体中的应力积蓄起

粉碎机功的分配和测定值 (Anselm)

表 1-1

消耗功的种类	功 量 (千瓦·小时)	占 总 数 (%)
轴承、齿轮等的纯机械损失	57	12.3
随破碎产品散失的热量	222	47.6
从磨机筒体散发的辐射热量	30	6.4
空气带走的热量	144	31.4
其他损失	10	2.1
[粉碎介质的磨损(5千瓦·小时) 粉碎介质的加热(2千瓦·小时) 其他噪音、振动及水分的蒸发]理想的粉碎功	3	0.6
合 计	466	100.0

来，但在复原时则散发成为热。另外，也有由于颗粒之间的接触摩擦而发生摩擦热的说法，但无论如何，起因于颗粒集合体内部的粉碎力的衰减则是肯定的。

英国的 Hiorns 在假定符合雷廷格定律 (1-2 式) 和 Rosin-Rammler 的分布公式 (1-7) 的基础上，并设固体间的摩擦系数为 k_f ，导出了以下的公式：

$$W = \frac{C_R}{1 - k_f} \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (1-10)$$

式中， k_f 值越大，则粉碎所消耗的功也越大。

然而，对粉碎机理如果进一步微观地加以研究，则有必要考察变成热以外的能量是怎样能量形式消耗的。由于粉碎作业本是增加固体表面积的作业，因此能量应当消耗在产生固体表面的能——表面能方面。因而，固体表面能 (σ) 乘以生成的表面积即成为粉碎所需的能量。

$$W = \frac{\sigma}{1 - k_f} (S_2 - S_1) \quad (1-11)$$

但是，如引用物理学家所求得的面能 σ 值计算，则是过少的估计了粉碎的功。即在生成的表面能和发热的能以外，还应有能量消耗。关于这方面，虽还未曾进行过充分的研究，但有力的设想是，在粉碎过程中，不单是生成新的表面，同时存在固体表面结晶构造的变化，并且进行着化学的变化和物理化学的变化。在粉碎的机械操作过程中产生的物质化学变化称为机械化学，这种机械化学在其他领域中也可以看到，因此，在粉碎过程中，当然也应考虑由于机械化学所造成的能量差值。

苏联的 Rehbindler 和 Chodakow 把 Kick 公式 (2-4) 和田中公式 (2-5) 加以结合，进一步设想粉碎能可能消耗于表面能 σ 的增加和其后变成为热能的弹性能的储存以及固体表面的某些机械化学的结构变化 (推想可表现为塑性变形)，并提出了下式：

$$\eta_m W = k \ln \frac{S}{S_0} + [k_e + (\beta l + \sigma) S] \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} \quad (1-12)$$

式中， η_m 为粉碎的机械效率， l 为物理化学的变形层的厚度， k 为常数。

依据上述，粉碎机的能量平衡数值非常低，几乎所有的能均变成热，所以同时也不能忽视细粉集合体之间的摩擦系数和机械化学的现象。因此，特别是在细粉碎作业中，改变粉体的物理性质，对提高粉碎效率和粉碎能力是重要的因素。

2 粉碎过程的速度解析

对粉碎的过程，不是用单位时间中平均粒径的减少，或者单位时间中表面积的增加来表示，而是采用不同时间内某一规定的筛孔网目所通过的颗粒变化来表示的方法，此种方法一向被认为是简便的作法。但根据前节图 1-1 所示的粒度变化（这决非是一种例外）观察，则可以理解这种作法有时还是非常合理的。总之，粒度分布的变化并不是连续进行的，在具有某些峰值的多种成分分布的条件下进行变化时，不只是采取这些峰值的平均值，而是检察从第 1 种成分、第 2 种成分、第 3 种成分等如何一一移向第 n 种成分（即各成分之间的移动速度），也就是采用解析的方法决定速度常数。这种方法是结合化学反应和模拟的一种考虑方式，然而也是逐次反应和并列反应同时进行的一种复杂的体系。

Hütig和Sedlatschek及Bass曾提出了下列联立方程式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_1(t)}{dt} &= b_{11}M_1(t) \\ \frac{dM_2(t)}{dt} &= b_{12}M_1(t) + b_{22}M_2(t) \\ \frac{dM_i(t)}{dt} &= b_{1i}M_1(t) + b_{2i}M_2(t) + \dots + b_{ji}M_j(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

$b_{ji}(i \neq j)$ 表示，第 j 成分的颗粒经过粉碎进入第 i 成分速度， b_{ii} 表示在第 i 的成分中，经过粉碎尚仍原样存留的那一部分的比例。因此第 i 的颗粒在受到破坏后，向小的粒度成分变化速度则成分 $(1-b_{ii})$ 。

上列 (1-13) 式的解可用行列式表示，如果是以这种设想为依据，则粒度分布和其他各因子可用矢量表示，而颗粒各粒度成分之间的变化速度系数也可用矩阵来表示。因为这种设想是把粉碎速度和粉碎生成物的粒度分布结合在一起的有效的办法，以下拟对 S.R. Broadbent 和 T.G. Callcott 提出的方法加以说明。

Callcott等不是采用过去的把粒度分布只用某一分布法则进行表示的方法，而是用图 1-2 所示的，在任意的几何间隔中所取的单位 (a) 来决定粒度，并且认为 $1 \sim a$ ， $a \sim a^2$ ， $a^2 \sim a^3 \dots$ 各位置之间的频率百分比为矢量，采用下述的表示法，设定图 1-2 中的供给颗粒的分布式。

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19 \\ 31 \\ 23 \\ 9 \\ 5 \\ 2 \end{bmatrix} = \{19 \ 31 \ 23 \ 9 \ 5 \ 2\} \quad (1-14)$$

为了简化问题，可利用上述的表示法举例说明，设想用 $f = \{30 \ 20 \ 10\}$ 所表示简单的

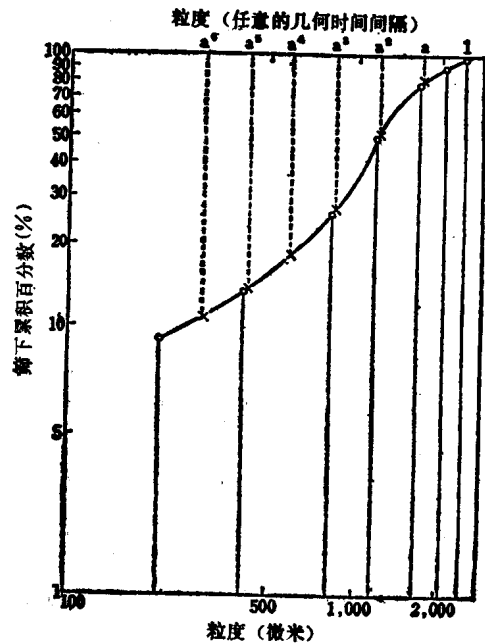


图 1-2 根据筛分累计值的矢量求法

○ 根据筛分求得值，× 矢量所表示的值

粒度分布的颗粒，而且这些颗粒完全受到粉碎。也就是说，{15 10 5}受到了粉碎力的作用。从表 1-2 可以看出，在最下面的总计栏内的粉碎前的矢量，经过粉碎后，各粒级的颗粒向更小的粒度变移，而这种变移的比例则表示在直列的栏中。例如在开始时处于 $1-a$ 之间的颗粒经粉碎后，在 $1-a$ 间残余 6，转到 $a-a^2$ 间为 3，在 a^2-a^3 间为 3，而其余的 (3) 则转入比 a^3 更小的部分。其次，原来处于 a^2-a^3 间的颗粒，经粉碎后在 $a-a^2$ 间残留 4，移到 a^2-a^3 间为 2，再进入下一粒度为 (4)。各粒度相互之间变化对最初的 {15、10、5} 的比例，可表示如下：

$$\begin{pmatrix} 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{pmatrix}$$

假设的粒度分布颗粒通过假设粉碎后的粒度分布变化的解析

表 1-2

		被粉碎物的比例				粉碎后 总计	未被粉碎 的残余部 分的比例	粉碎后 全体破碎 物的分布
		按照规定的粒度表示粉碎部分的分布						
		$1-a$	$a-a^2$	a^2-a^3	a^3-0 (筛下)			
按照规定的粒度 表示粉碎后的分布	$1-a$	6	0	0	(0)	6	15	21
	$a-a^2$	3	4	0	(0)	7	10	17
	a^2-a^3	3	2	2	(0)	7	5	12
	a^3-0 (筛下)	(3)	(4)	(3)	(20)	(30)	(20)	(50)
总计		15	10	5	(20)	50	50	100

(表中的数字，是給料颗粒的百分数)

上述情况显示了粉碎前后各粒度颗粒的变化状态，也就是粉碎的特性，如再按照矩阵方法考察。则可命名为粉碎矩阵 B 。对此，Collocott 等曾假定 B 是如下所列的阶梯矩阵。虽然他们为了简化问题，提出了这种假定，但疑问仍是存在的。

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & .0 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & b_{n-1} & b_{n-2} & \dots & b_1 \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

其次由表 1-2 可见，直列的第 5 行是受到粉碎力作用的颗粒在粉碎后的颗粒分布，其中再加入未受到粉碎力作用的，即可得最后一行所示的经过粉碎后的全体颗粒的分布。总之，经过粉碎后产生由 {30、20、10} → {21 17 14} 所示的分布的变化。

把这种过程用矩阵方法加以归纳，则可用下式表示：

$$B\pi If + (1-\pi)If = P \quad (1-16)$$

式中， π 表示受到粉碎作用的颗粒的比例，称作粉碎概率，在上例中其值为 5。另外， I 为单位矩阵

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1-17)$$

P 为粉碎产品的粒度分布的列矩阵。

一般认为矩阵法是一种非常麻烦的方法，但在上述处理范围以内，如已知下列两个公式，可对等式 (3-7) 进行简单的计算，因而就可以简单地表示出粉碎过程。

$$\pi f = \begin{bmatrix} \pi f_1 \\ \pi f_2 \\ \vdots \\ \pi f_n \end{bmatrix} \quad (1-18)$$

$$Bf = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_n & b_{n-1} & b_{n-2} & b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 f_1 \\ b_1 f_2 + b_2 f_1 \\ b_1 f_3 + b_2 f_2 + b_3 f_1 \\ \vdots \\ b_1 f_n + b_2 f_{n-1} + \dots + b_n f_1 \end{bmatrix} \quad (1-19)$$

例如，当进行反复的粉碎时，第一段的 P 变成为第二段的 f ，如假定 B 、 π 的值一定，则：

$$(\pi B + (1 - \pi)I)^2 f \quad (1-20)$$

因而，在进行几次的反复粉碎后，则成为：

$$(\pi B + (1 - \pi)I)^n f \quad (1-21)$$

按照此种设想，在粉碎的基本公式 (3-3) 中，通常 f 和 P 值虽可以求出， B 和 π 则为未知数，然而按照 Callcott 等所提出的假定，则 B 值可比较简单地求出。（其计算方法从略）。不过，在某种条件下，通过实验，也有可能求出 B 值。

以下说明当 B 值为已知时，求 π 值的方法。

将 (3-7) 式改写如下式：

$$(P - f) - \pi(B - I)f = 0 \quad (1-22)$$

另外，还必须将筛下产品部分，即

$$(P_{n+1} - f_{n+1}) - \pi\beta_{n+1} = 0 \quad (1-23)$$

包括在内。进一步进行全面地汇总，并为了方便可写成：

$$\alpha - \pi\beta = 0 \quad (1-24)$$

如将式中 α 、 β 作为累积值，则 (1-24) 式可改写为 (1-26) 式进行求解。

$$\alpha' = \{0, a_2 + \dots + a_{n+1}, a_n + a_{n+1}, a_{n+1}\} \quad (1-25)$$

$$\pi = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \alpha'_i \beta'_i}{\sum_{i=1}^{n+1} \beta'_i{}^2} \quad (1-26)$$

表1-3所示为这种计算的一个实例，这样就可以求出粉碎机内受到实际粉碎力作用的颗粒的概率。反之，如 π 为已知，当然也可能求出 B 值。再者，对于 π 的物理上的意义，有人还会提出疑问，对此，Callcott 等解释为，上述解析是对煤一类的比较脆的物质利用圆锥粉碎机的挤压力进行粉碎的实验为基础的。在这种条件下， π 值可能是必要的也是可能求出的。另外或者也可以假定 B 为一定不变的值。但在其他粉碎作业中，特别是当以冲击粉碎为主时，则不能简单地沿用这个假定。

粒度分布变化的解析实例

表 1-3

	被粉碎物的比例					粉碎后 总计	未被粉碎 的剩余部 分的比例	粉碎过程 后全体 破碎物 的分布
	采用规定的粒度表示粉碎前的分布							
	1 - a	a - a ²	a ² - a ³	a ³ - 0 (筛下)				
采用规定的粒度 表示粉碎后的分布	1 - a	4.2	0	0	(0)	4.2	10.5	14.7
	a - a ²	2.1	3.4	0	(0)	5.5	8.5	14.0
	a ² - a ³	2.1	3.4	2.8	(0)	8.3	7.0	15.3
	a ³ - 0 (筛下)	(2.1)	(1.7)	(4.2)	(24.0)	(32.0)	(24.0)	(56.0)
总计		10.5	8.5	7.0	(24.0)	50.0	50.0	100.0

Collcott等人进一步把这种粉碎概率作为颗粒直径的函数进行了解析, 此时代入系数 $w = a$, 并写成下列形式的矩阵,

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & w^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & w^n \end{bmatrix} \quad (1-27)$$

则(3-13)式可写为:

$$(P-f) - \pi(B-I)\Omega f = 0 \quad (1-28)$$

进一步求 π 和 w 值的方法则如图1-3所示, 先取适当的 w 值描绘出 $(B-I)\Omega f$ 的曲线, 另在图中绘出 $(P-f)$ 曲线, 则可通过选定与其相同形状的曲线求得 $w \doteq 0.8$, 同时计测两个曲线的间隔可求得 $\pi \doteq 0.3$.

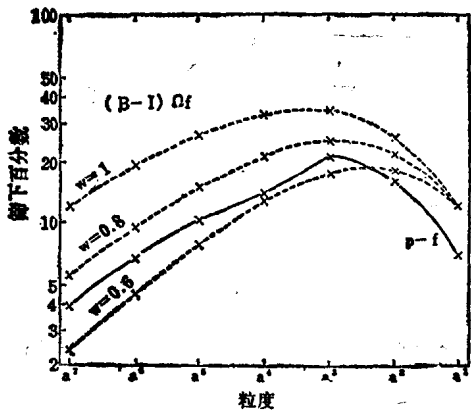


图 1-3 根据粒径查知粉碎概率的方法

以上的简要记述了 Collcott 等人的解析方法, 其后, 在粉碎速度论新的设想, 粉碎矩阵及粉碎概率(设想为粒径和时间的函数, 也称为选择矩阵)等方面, 借助电子计算机还做了许多试验, 以图通过实验进行求证。关于这方面的论说及文献内容, 可以参看田中达夫等人的综述, 但目前这些新的设想尚未达到与实用相结合的地步, 有待今后的发展。

3. 相似对比的整理方法和比例放大

现在的粉碎理论和设计方法尚未达到根据所求出的固体物料的物理常数, 就可以设计实用的粉碎机的地步。通常还是先使用标准的试验粉碎机进行粉碎试验, 然后再进行按比例放大设计。这种按比例放大方法是以相似对比的设想为基础, 这种按相似规律的整理方法, 以前在某些方面就已经被采用过, 但全面的研究似乎是开始于 Bachman-Matz 对球磨机的相似对比解析。

H. M. Andreasen 最近在很广的范围内推广了类似规律, 认为所使用的模型粉碎机的

各种参数（下标·m）和实际的粉碎机各种参数之间，具有下列长度，时间和力等关系，其式如下：

$$L=l/l_m, T=t/t_m, F=f/f_m, 1 = \frac{f}{\sigma l^2} \quad (1-29)$$

随之判明下列各种粉碎机均分别存在有类似的关系。

(1) 利用外部的机械力施以挤压力的粉碎机（辊磨机，颚式破碎机，圆锥破碎机）

$$FL^2 = 1 \quad (1-30)$$

(2) 利用重力对物质直接施以挤压力的粉碎机（轮碾机）

$$\left. \begin{aligned} F &= L^3(\rho/\rho_m) \text{ 而 } \rho/\rho_m = \frac{1}{L} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_m} \\ L &= \rho_m/\rho \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

在同一物质的情况下：

(3) 利用机械方法产生惯性力的粉碎机（锤式粉碎机）

$$\frac{L}{T} = \frac{\sigma}{\sigma_m} \sqrt{\frac{\rho_m Y_m}{\rho Y}} \quad (1-32)$$

式中，Y：弹性系数，ρ：比重（以上都是粉碎介质的值）

(4) 利用重力产生的惯性力的粉碎机（捣碎机，球磨机）

$$L = \frac{\sigma^2 \rho_m Y_m}{\sigma_m^2 \rho Y} \quad (1-33)$$

以上各式虽然存在将现象过于简化，以及所采用的标准参数的条件不够严谨等等问题，但在设计上进行大致的判断时仍是有用的。

此外，H.E.Rose提出了采用无因次项整理球磨机所需的动力和所生成表面积的方法。这一方案可能是引用搅拌所需动力的公式。Rose对影响球磨机粉碎动力P的因素列出17个并将其归纳为14个无因次项，然后对14项一一进行研究，排除掉可忽略的部分而保留可以作成为明确的函数形式的部分，其中不能求出简单关系的重要项，则进行图示实验结果，最后汇总为如下公式：

$$\begin{aligned} \left(\frac{\rho}{D^5 N^3 \rho}\right) &= \left(1 + \frac{0.4\sigma}{\rho}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \varphi_1\left(\frac{N_c}{N}\right) \cdot \varphi_2(J) \cdot \varphi\left(\frac{d}{D}\right) \cdot \varphi_3(n) \\ &\times \varphi\left(\frac{h}{D}\right) \cdot \varphi\left(\frac{b}{D}\right) \cdot \varphi_{11}(V) \end{aligned} \quad (1-34)$$

当球的转数在临界转数80%以下时，上式可改列如下，可求得近似值。

$$P = D^5 N^3 \rho (1 + 0.4\sigma/\rho) (L/D) (N_c/N)^2 \varphi_3(J) \quad (1-35)$$

例如，按图1-4所示的关系，可求出 $\varphi_3(J)$ 的大致数值。此外，根据对表面积的增加，汇总得出了下列粉碎公式。

$$\begin{aligned} S &= K \left(\frac{D^{0.5} \rho t}{E}\right) \cdot \varphi_2\left(\frac{d}{D}\right) \cdot \varphi_3\left(\frac{b}{D}\right) \\ &\times \varphi_4\left(\frac{N}{N_c}\right) \cdot \varphi\left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \cdot \varphi_7(J) \cdot \varphi_8(V) \\ &\times \varphi_{11}\left(\frac{u}{D}\right) \end{aligned} \quad (1-36)$$

根据上式可以具体地求出 φ_{2-11} 等各无因次项的关系。（L、D：球磨机的长度和直径，σ；

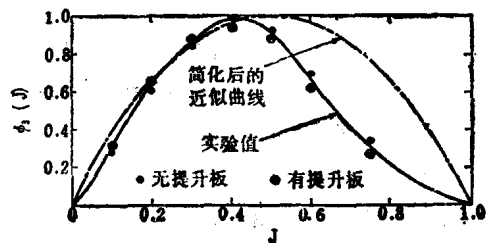


图 1-4 $\varphi_3(J)$ 的函数实验值

泥浆的比重(湿式时), b : 粒径, u : 排出口直径)。

Rose进一步对振动磨矿机也推导出与上述相同的类似公式, 但今后尚有待对 Anad-reasen 的全部设想进行具体的实验考察, 进一步对各种粉碎机推导出Rose公式一类的具有实用价值的公式。

但是, 由于影响粉碎机的因素多而复杂, 从而导致无因次式难于导出; 其中如粉碎时处理颗粒的性质的不同对各种因素间的类似关系具有很大的影响, 特别是粉碎机的主要规格(例如球磨机的胴体直径 D , 冲击式粉碎机的重锤回转直径等)以及粉碎机的动力(HP)等因素都影响极大; 因此, 在实际设计上进行按比例放大时, 对于其他次要的类似关系, 可不必作为问题来考虑。

根据上述, 通常举出下列按比例放大的公式(C 为粉碎机的处理量, L 为粉碎机的代表长度):

$$C = k(HP)^\sigma = k'(L)^{\sigma'} \quad (1-37)$$

式中 σ , σ' 称为粉碎机容量效果指数, 通常 $\sigma \geq 1.0$; 球磨机的 σ 值为1.2, 棒磨机为1.1, 冲击式粉碎机为1.5, 振动球磨机为1.0, 特殊的例子是喷射粉碎机, 其值大致是2.5。关于 σ' 的值, 球磨机为2.8~3.0, 气升式自磨机为3.7~4.0(图1-5)。上述1.2倍, 看来其影响较小, 但当马力达10倍时, 则处理量为15.8倍, 亦即效率达1.6倍; 再当100马力时, 则实际效率可提高到2.5倍, 显示 σ 值具有很大的影响。著者期望今后进而明确 σ , σ' 的理论根据。

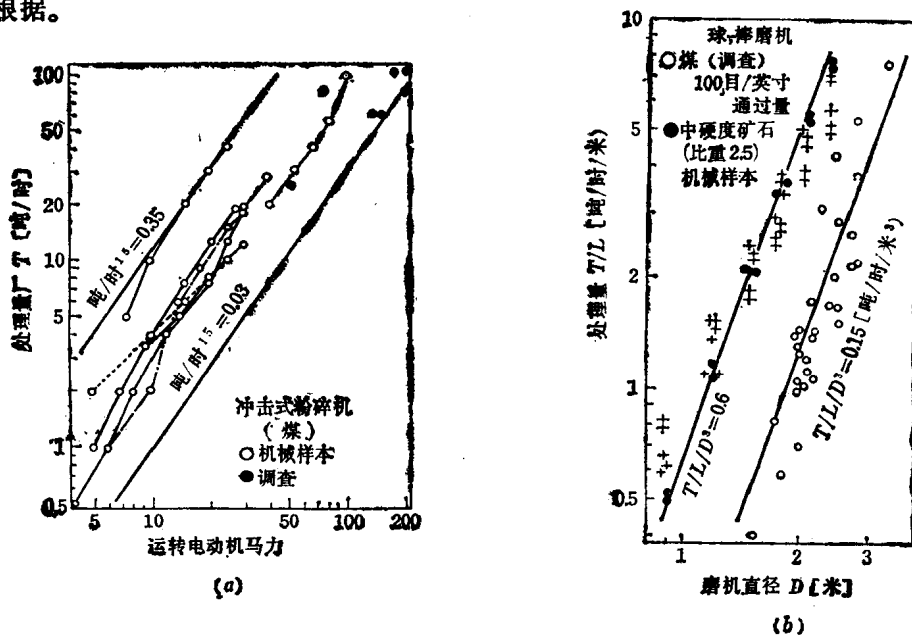


图 1-5 粉碎机处理效果指数举例(中川、松居)

(a) 球磨机的处理量与胴体直径; (b) 冲击式破碎机的运转马力与处理量

4 连续粉碎的问题

以大量生产为目的的粉碎作业多采取连续粉碎, 在连续粉碎时, 颗粒在机内的停留时间 t_r , 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, 即:

$$\frac{H}{F} = t_r \quad (1-38)$$

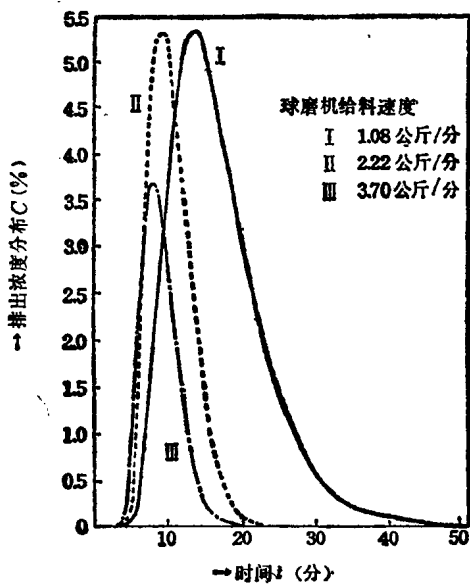
当 F 变化或 H 变化时, 均可使 t_r 随之变化。因此连续粉碎的粉碎时间也就成为不定值。加之颗粒在球磨内停留时间并不一致, 出现某些波动, 因而也就影响到产品的粒度分布, 并产生各种困难。

综上所述, 颗粒在球磨机内的停留时间是重要的因素, 根据最近的研究结果, 以函数形式表示停留时间的变化, 已可从理论上和实验上得到证实。而且, 根据山崎等人关于球磨机的解析和实验研究和作者关于振动球磨机的实验研究, 他的研究均确证这种时间变化函数 $P_e(t)$ 很符合对数正态分布。并且显示, 这些研究也能说明随着颗粒的流动所伴生的扩散现象。

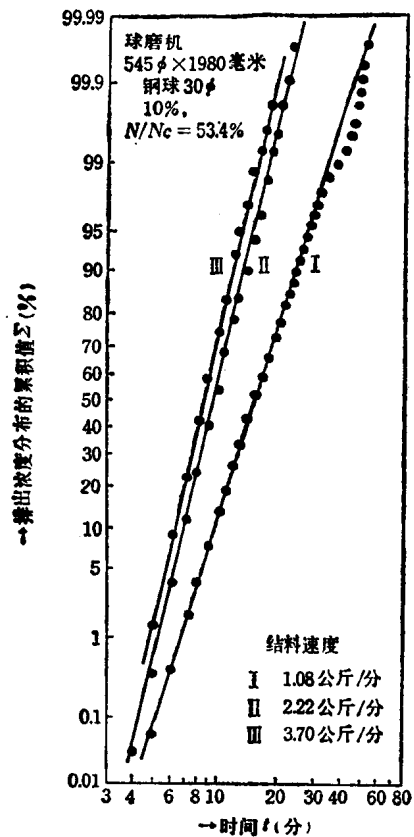
$$P_e(t) = \frac{M_0}{6t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log t - \log t_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-39)$$

(式中, t_0 为停留时间的平均值, M_0 为常数, σ 为分散)

当将上式各值描绘在对数概率纸上时, 则可得一条直线 (图1-6), 因此, 可极为容易地求得有关时间变化的各种特性值。



(a)



(b)

图 1-6 球磨机中停留时间的分布 (森、神保、山崎)

(a) 粒子停留时间的分布 (示踪原子排出浓度的分布) 的实例; (b) 用对数正态分布所表示的停留时间分布

有关连续粉碎的动态特性也有待于加以解释, 当进一步对闭路粉碎进行解析时, 要进一步对分级机的动的特性及其与破碎机彼此间相互作用的极复杂的体系进行解析。迄今为止, 虽已提出了对某些闭路粉碎的解析方法, 但今后通过继续对各种生产作业的动态特性和全部过程的解析, 以及通过最适宜的操作等, 才有可能确立更加完善的闭路粉碎理论。

(四) 关于细粉碎的某些问题

在第(三)节中所记述的新设想,虽完全是对最近的细粉碎问题提出的解答,但并不特别是为说明细粉碎机理为目的,在本节则拟对有关细粉碎一些问题加以论述。

1 粉碎力和粉碎效率

第(三)节中曾述及粉碎概率的概念,而粉碎速度又与概率成比例,这个因素又可称为粉碎的机械效率。此外决定粉碎速度的是颗粒的易碎性,又称粉碎能力,总之可认为粉碎速度(X)与粉碎的机械效率(η_m)和颗粒的粉碎能力(Γ)成比例。

$$X \propto \eta_m \Gamma \quad (1-40)$$

但在实际上,如变化 η_m (例如变更钢球的大小) Γ 也随之变化。因此,为了明确这两者之间的关系,即有关粉碎条件对粒度分布的变化,作者等进行了实验研究。

试验内容是在球磨机粉碎过程中,改变钢球的大小和比重(即重量),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1-7所示,每增加1个钢球的重量,就多生成中间粒径的颗粒。如果将粉碎产品适当地分成2份,在其粒度分布中,设 f (粗粒部分+细粉部分)/(细粉部分) $=\beta$ 称为特性值,则随着增加1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1-8所示不同粒径的颗粒 β 值与一个钢球重量 W_0 的关系。可以判明颗粒越小时,一个钢球的重量影响也越小。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)和钢球重量的关系示如图1-9,由图可见粉碎速度与粒度分布的变化趋势完全相同。

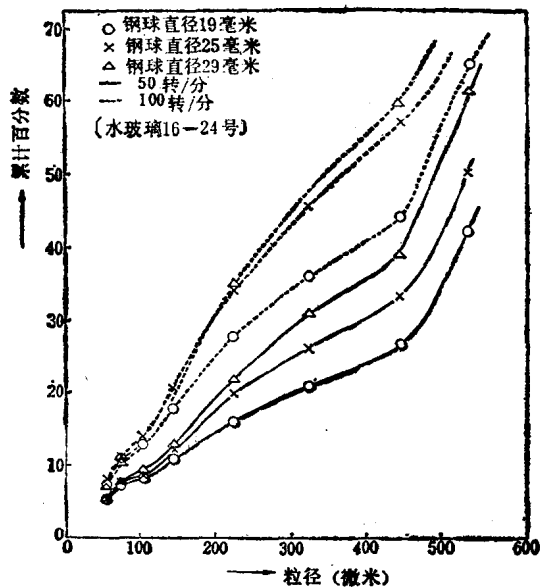


图 1-7 粒度分布与钢球直径的关系

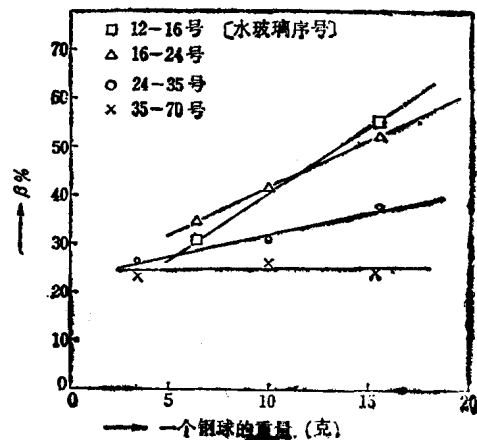


图 1-8 钢球重量与粒度分布特性变化的关系

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。对此,不能认为是由于钢球直径增大而导致粉碎机械效率(钢球的冲击比率)的增加,而应认为是颗粒的易碎性(粉碎

能力)有所增加所致。总之,粉碎力增大时,在粉碎产品中增加了中间粒径的颗粒,也就是增加了颗粒的粉碎能力。当颗粒越大时,虽然球的碰撞效率越少,但粉碎速度则加大。球的碰撞效率 P_0 大致可以下式表示:

$$P_0 = K \cdot d_b^{-m} \cdot d_p^{-n} \quad (1-41)$$

$$0 \leq m \leq 1, \quad 1 \leq n \leq 2$$

其中 d_b 、 d_p 分别表示钢球和颗粒的直径。由于颗粒越小,则钢球重量的变化对粒度分布,即对颗粒的粉碎能力和粉碎速度的影响越小,因此增加钢球的碰撞效率会产生大的影响,从而增加粉碎速度。

根据粉碎机种类的不同,颗粒加以大粉碎力的机械,其 β 值大,而小粉碎力的机械,其 β 值则有变小的趋势(图1-10)。

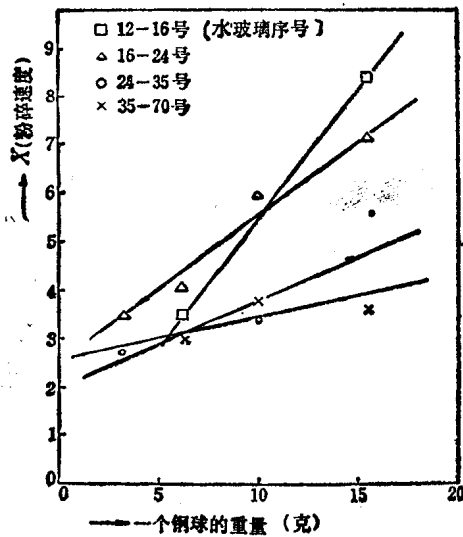


图 1-9 钢球重量与粉碎速度变化的关系

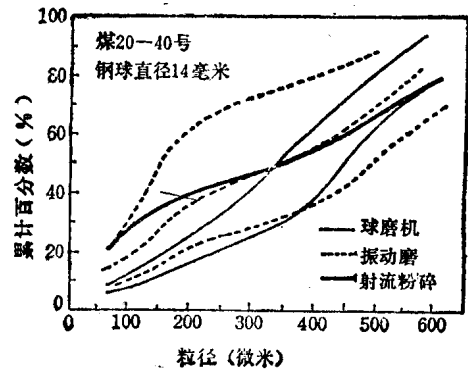


图 1-10 使用不同粉碎机时,粉碎产品的不同粒度分布

粉碎效率和粉碎力之间的关系并不只限于球磨机,其他各式粉碎机也完全相同。对于经常保持一定粉碎方式的机械(例如空气粉碎机)提高粉碎力则可提高粉碎的机械效率。在调整粉碎力时会造成粉碎能的变化,但此时如以提高机械效率为重点,则有必要牺牲粉碎能力而提高机械效率。根据此种理由,最近,在改进球磨机的作用方面,研制了形状不同的粉碎介质小的粉碎机,如依次出现的塔式磨矿机、振动球磨机和砂磨机等。同理,喷射粉碎机一类空气粉碎机,当提高动力而增大粉碎力时,也就使粉碎能力急剧提高。

2 球磨机的细粉碎问题

球磨机原属细粉碎机,但最近以来,进行了种种改进,以使其进一步发展为超细粉碎机。其中之一是降低回转速度,理由是充分降低球的冲击力即粉碎力,以便极度提高碰撞效率,从而增加粉碎速度。根据作者等人的实验结果,也证实在处理粒径小的颗粒方面,当转数远比临界转速为小时,所得到的粉碎速度值最大。

进一步的设想是减小钢球的直径。过去一向认为给料的颗粒直径和钢球直径之间大体有如下的关系(例如Perry所著Chemical Engineers' Handbook 1130页):

$$d_b^3 = K d_p \quad (1-42)$$