第一篇　食品粉碎、造粒新技术

第一章　微粉碎和超微粉碎

粉碎操作在食品工业中占有非常重要的地位，主要表现在：

（1）迎合某些食品消费和生产的需要，如面粉是以粉末形式使用的，巧克力等很多食品的生产需将各种配料粉碎至足够细小的颗粒才能保证物料的均匀分布和终产品的品质；

（2）增加固体表面积以利于后道处理的顺利进行，如果蔬干燥前和玉米湿加工前需将大块物料粉碎成小块物料；

（3）工程化食品和功能性食品的生产需要，各种配料粉碎后才能混合均匀，粉碎的好坏对终产品的质量影响很大。

随着现代食品工业的不断发展，普通的粉碎手段已开始不足适应生产的需要，于是出现了超微粉碎手段，并得到了迅猛的发展。在功能性食品生产上，某些微量活性物质（如硒）的添加量很小，如果颗粒稍大，就可能带来毒副作用。这就需要非常有效的超微粉碎手段将之粉碎至足够细小的粒度，加上有效的混合操作才能保证它在食品中的均匀分布。又如膳食纤维一个重要的生理功能是通过促进排便，达到防治便秘与结肠癌的目的，功能的发挥与纤维的持水力、膨胀力有很大的相关关系，而持水力、膨胀力又与纤维的比表面积（粒度）有一定的关系；粒度越小比表面积越大，持水力与膨胀力就相应增大，这同样需要有效的超微粉碎手段。当然，比表面积仅是影响纤维持水力、膨胀力众多因素中的一个。就以传统的巧克力产品来说，浆料精磨后的粒度对终产品的质构和口感特性有决定性的影响，而精磨操作实际上就是一种超微粉碎过程。

因此，超微粉碎技术已成为现代食品加工的重要新技术之一。因为在超微粉碎过程中能量的利用率很低，目前对该技术本身的研究集中在如何提高能量的利用率上。例如，大型球磨机粉碎过程中的能量利用率仅0.6%，其余99.4%以摩擦、热量和噪音等形式损失掉，而气流式超微粉碎机的能量利用率也仅2%左右。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一节　粉碎理论

一、有关粉碎的基本概念

粉碎是用机械力的方法来克服固体物料内部凝聚力达到使之破碎的单元操作。习惯上有时将大块物料分裂成小块物料的操作称为破碎；将小块物料分裂成细粉的操作称为磨碎或研磨，两者又统称粉碎。

物料颗粒的大小称为粒度，它是粉碎程度的代表性尺寸。对于球形颗粒来说，其粒度即为直径。对于非球形颗粒，则有以面积、体积或质量为基准的各种名义立度表示法。有关这方面的详细内容，将于本章第四节讨论。

根据被粉碎物料和成品粒度的大小，粉碎可分为粗粉碎、中粉碎、微粉碎和超微粉碎四种：

（1）粗粉碎　原料粒度在 40～1500mm 范围内，成品颗粒粒度约 5～50nm；

（2）中粉碎　原料粒度 10～100mm，成品粒度 5～10mm；

（3）微粉碎（细粉碎）原料粒度 5～10mm，成品粒度 100μm 以下；

（4）超微粉碎（超细粉碎）原料粒度 0.5～5mm，成品粒度在 10～25μm 以下。

粉碎前后的粒度比称为粉碎比或粉碎度，它主要指粉碎前后的粒度变化同时近似反映出粉碎设备的作业情况。一般粉碎设备的粉碎比为 3～30，但超微粉碎设备可远远超出这个范围，达到 300～1000 以上。对于一定性质的物料来说，粉碎比是确定粉碎作业程度、选择设备类型和尺寸的主要根据之一。

对于大块物料粉碎成细粉的粉碎操作，如要通过一次粉碎完成则粉碎比大，设备利用率低，故通常分成若干级，每级完成一定的粉碎比。这时可用总粉碎比来表示，它是物料经几道粉碎步骤后各道粉碎比的总和。

粉碎操作有好几种方法，每种方法有其特定的适用场合。这些方法包括开各粉碎、自由粉碎、滞塞进料粉碎和闭路粉碎 4 种。

开路粉碎是粉碎设备操作中最简单的一种，它不用振动筛等附属分粒设备，故设备投资费用低。物料加入粉碎机中经过粉碎作用区后即作为产品卸出，粗粒不作再循环。由于有的粗粒很快通过粉碎机，而有的细粒在机内停留时间很长，故产品的粒度分布很宽，能量利用不充分。

自由粉碎法中，物料在作用区的停留时间很短。当与开路磨碎结合时，让物料借重力落入作用区，限制了细粒不必要的粉碎，因而减少了过细粉末的形成。此法在动力消耗方面较经济，但由于有些大颗粒迅速通过粉碎区，导致粉碎物的粒度分布较宽。

滞塞进料粉碎法在粉碎机出口处插入筛网，以限制物料的卸出。对于给定的进料速率，物料滞塞于粉碎区直至粉碎成能通过筛孔的大小为止。因为停留时间可能过长，使得细粒受到过度粉碎，且功率消耗大。滞塞进料法常用于需要微或超微粉碎的场合，以一台设备操作可获得很大的粉碎比。

闭路粉碎是从粉碎机出来的物料流先经分粒系统，分出过粗的料粒后重新回入粉碎

机。在这种情况下，粉碎机的工作只是针对颗粒较大的，物料的停留时间短，所以动力消耗可以降低。所采用的分粒方法根据送料的形式而定，如采用重力法加料或机械螺旋送料时常用振动筛作为分粒设备，当用水力或气力输送时则常用旋风分离器。

粉碎操作除了上述所谓干法之外，还有湿法。后者是将原料悬浮于载体液流（常用水）中进行粉碎。此法可克服粉尘飞扬问题，并可采用淘析、沉降或离心分离等水力分级方法分离出所需的产品。在食品加工上，粉碎经常作为浸出的预备操作，使组分易于溶出，故颇适于湿法粉碎法，例如玉米淀粉的制造。

实践证明，湿法操作一般消耗能量较干法操作的大，同时设备的磨损也较严重。但湿法比干法易获得更微细的粉碎物，故在超微粉碎中应用甚广。

二、粉碎理论

（一）粉碎力的种类与形式

物料粉碎时所受到的作用力包括挤压力、冲击力和剪切力（摩擦力）三种。根据施力种类与方式的不同，物料粉碎的基本方法包括压碎、劈碎、折断、磨碎和冲击破碎等形式，如图 1-1 所示。

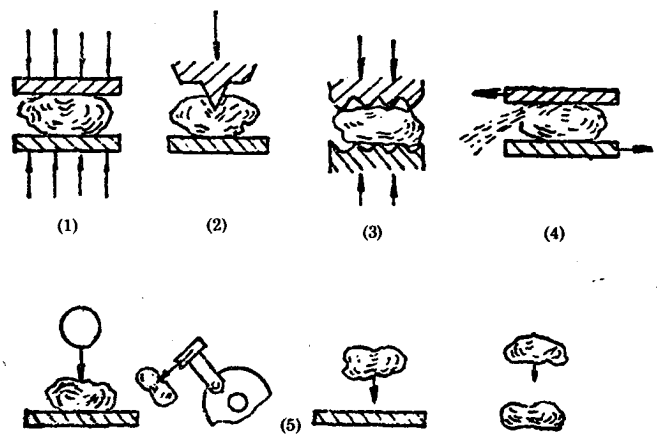


图 1-1　粉碎的基本方法

（1）压碎　（2）劈碎　（3）折断　（4）磨碎　（5）冲击破碎

（1）压碎　物料置于两个粉碎面之间，施加压力后物料因压应力达到其抗压强度极限而被粉碎。

（2）劈碎　用一个平面和一个带尖棱的工作表面挤压物料时，物料沿压力作用线的方向劈裂，这是由于劈裂平面上的拉应力达到或超过物料拉伸强度极限。

（3）折断　被粉碎的物料相当于承受集中载荷的两支点或多支点梁，当物料内的弯曲应力达到物料的弯曲强度极限时而被折断。

（4）磨碎　物料与运动的表面之间受一定的压力和剪切力作用，当剪应力达到物料

的剪切强度极限时，物料就被粉碎。

（5）冲击破碎　物料在瞬间受到外来的冲击力而粉碎，它对于粉碎脆性物料最有利。

（二)物料的力学性质

物料的力学性质与所要选择的粉碎方式有很大的关系。根据物料应变与应力的关系以及极限应力的不同。其力学性质包括以下 4 种：

（1）硬度　它是根据物料弹性模量大小来划分的性质，有硬与软之分。硬度越高表明物料抵抗弹性变形的能力越大。物料的硬度是确定粉碎作业程序、选择设备类型和尺寸的主要依据。

（2）强度　它是根据物料弹性极限应力的大小来划分的性质，有强与弱之分，强的材料抵抗塑变的能力越大。

（3）脆性　它是根据物料塑变区域长短来划分的性质，有脆性和可塑性之分。

（4）韧性　它是一种抵抗物料裂缝扩展能力的特性，韧性越大，则裂缝末端的应力集中就越容易得到缓解。

对一种具体的物料来说，上述 4种力学特性之间有内在的联系，导致物料综合性质的复杂化，这些对粉碎时所需的变形力均有影响。总的来说，凡是强度越强、硬度越小、脆性越小而韧性越大的物料，其所需的变形能就越多。

选择粉碎方法时，须视被粉碎物料的物化性质与所要求的粉碎比而定，尤其是物料的机械性质影响更大，其中物料的硬度和破裂性更居首要地位。对于特别坚硬的物料用挤压和冲击很有效，对于韧性物料用研磨和剪切较好，而对于脆性物料则以劈裂、冲击为宜。

实际上，任何一种粉碎机都不是单纯利用上述某种方法进行粉碎，而是结合利用两种或两种以上的粉碎方法实现的，例如压碎和折断，冲击和磨碎等。

（三）物料在粉碎过程中的变化

目前，人们对粉碎机理的认识尚不彻底。通常认为物料受到各种不同粉碎力作用后，首先要产生相应的应变，并以变形内能形成积蓄于物料内部。当局部积蓄的变形能超过某临界值时，裂解就发生在脆弱的断裂线上。从这一角度分析，粉碎至少需要两方面的能量：一是裂解发生前的变形能，这部分能量与颗粒的体积有关；二是裂解发生后出现新表面所需的表面能，这部分能量与新出现表面积的大小有关。

到达临界状态（未裂解）的变形能与颗粒的体积有关，这是因为脆弱的断裂线和疵点对于粒度愈大的颗粒存在的可能性就愈大。大颗粒所需的临界应力就较小颗粒小，因而消耗的变形能也就较少。这就是粉碎操作为什么随着粒度减小而变得更加困难的原因。

在粒度相同情况下，由于物料的力学性质不同所需的临界变形能也不相同。物料受到应力作用时，在弹性极限应力以下则发生弹性变形；当作用的应力在弹性极限应力以上时就会出现永久变形，直至应力达到屈服应力。在屈服应力以上，物料开始流动，经历塑变区域直至达到破坏应力而断裂。

对于任何一个颗粒来说，都存在着一个临界粉碎能量。但粉碎条件纯粹是偶然的，许多颗粒受到的冲击不足以使其粉碎，而是在一些特别有力的猛然冲击下才粉碎的。因此，最有效的磨碎机只利用了不到 1％的能量去粉碎颗粒和产生新表面。其余的能量则消耗

于以下几个方面：①未破碎颗粒的弹性变形；②物料在粉碎室内的来回运转；③颗粒之间的摩擦；④颗粒和磨碎机之间的摩擦；⑤发热；⑥振动的噪音；⑦传动机件和电动机的无效能耗。

假如作用力没有超过物料的弹性极限，物料就被迫变形或受到应力。当此力除去时，颗粒即恢复其原来的状态，而变形颗粒中的应力机械能以热的形式表现出来。当作用力超过弹性极限时，颗粒就会被粉碎。颗粒表面一般是不规则，所以表面上高出的那部分先受到力的作用，这样可能在物料的局部地区产生高的应力和温度。当粉碎发生时力的作用点就转移，释放出的应力能量一部分供给了新产生的表面，超过的部分表现为热。

颗粒中的裂纹隙在结构上总是脆弱的，在应力作用下它可以发展成为裂缝。粉碎过程中的有用功与所产生新裂缝的长度成正比。颗粒吸收应变能并在剪切力或压应力作用下发生变形，直至能量超过最弱的裂纹隙，从而引起颗粒的破碎或开裂。粉碎需要的应变能与已形成裂缝的长度成正比，因为扩大裂缝至粉碎所需的补充能是由周围的剩余能量流向裂缝的能量来提供。

颗粒中最弱的裂纹隙决定着颗粒的粉碎强度，并决定粉碎所产生颗粒的数量。具有最弱裂隙的颗粒最容易被粉碎，并产生最大的颗粒，但与同样粒度且有较强的最弱裂隙颗粒比较起来，它们需要多经过几次粉碎，所以要把它们粉碎至特定的粒度并不一定更容易。

研磨的直接目的是形成裂缝，并通过消耗应变能使颗粒变形从而扩大裂缝产生粉碎。有用功正比于新的表面积，并且因为裂缝长度是比例于所产生的新表面积的平方根，有用功仅比例于原料直径的平方根减去产物直径的平方根。产生新表面消耗的能量 E' 是：

$$E' = E\left(\frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_1} - \sqrt{d_2}}\right) \tag{1-1}$$

式中 d_1 ——进入粉碎机中物料的直径

d_2 ——从粉碎机中排出产物的直径

E ——输入的能量

三、粉碎的能耗假说

物料粉碎时，当作用力超过颗粒之间的结合力时产生粉碎，外力做的功称为粉碎能耗或简称粉碎能。粉碎能消耗于以下几方面：

（1）粉碎机械传动中的能耗；

（2）颗粒在粉碎发生之前的变形能；

（3）粉碎产品新增加表面积的表面能；

（4）颗粒表面结构发生变化所消耗的能，如产生表面活性点、表面形成无定形层或氧化物层；

（5）晶体结构发生变化所消耗的能；

（6）磨介之间的摩擦、振动及其它能耗。

人们曾对球磨机的能耗进行测定分析，发现输入的能量大部分以热的形式散失，如

需要全本请访问 www.ertongbook.com

表 1-1 所示。

表 1-1　　粉碎能耗的分析

能　耗　类别	P/kW	占总能耗的百分数／%
(1) 轴承、齿轮等机械传动的损失能耗	57	12.3
(2) 单位时间内粉碎产品带走的热	222	47.6
(3) 单位时间内筒体辐射的热	30	6.4
(4) 单位时间内气流带走的热	144	31.0
(5) 单位时间新生表面的表面能	3	0.6
(6) 其它损耗：		
磨介的摩擦	5	2.1
磨介温升散热	2	
振动、水分蒸发及其它	3	
总　计	466	100.0

由于粉碎过程比较复杂，受影响的因素较多，且这些因素在不同条件下又有不同的变化，诸如物料的性质、形状、粒度大小与分布、粉碎机的类型和操作方法等，都将直接影响粉碎时的能量消耗。因此，已有的粉碎理论尚未发展到能够对一给定物料减小粒度所需要的能量作精确定量计算的程度。

尽管如此，近百年来的研究积累已提出了数种能耗假说，其中比较著名的有表面积假说、体积假说和裂缝假说三种。它们在一定程度上反映了粉碎过程的各种变化，具有一定的概括性和指导意义。

(一)表面积假说

表面积假说由 P. R. Rittinger 最早提出。它的物理基础是，组成任何纯粹性晶体物质质点之间具有恒定的分子吸引力，粉碎所消耗的能量与用来拆开分子间吸引力产生新表面所需的能量有一定的关系。鉴于粉碎后产品的比表面大大增加，输入的粉碎能量越多，产品的粒度越细，则比表面越大，故 Rittinger 提出所谓‘表面积假说”粉碎能耗与粉碎后物料的新生表面积成正比，或粉碎单位重量物料的能耗与新生的比表面成正比。用式子表示即：

$$E \propto \Delta S = C_1 \Delta S = C_1(S_2 - S_1) = \frac{C_1 C_2}{\delta}\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right) = K_1\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right)$$

即：

$$E = K_1\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}\right) \tag{1-2}$$

式中　E ——粉碎物料所消耗的能量

ΔS——物料粉碎后所增加的表面积

δ ——物料密度

d_1，d_2——物料颗粒粉碎前后的粒度

C_1，C_2，K_1——比例常数

Rittinger假说认为粉碎能耗与物料在粉碎时的表面积增加呈正比关系，但这不意味着粉碎能耗等于粉碎产品新生面积的表面能。实际上，新生面积的表面能只占全部粉碎能耗一个很小的比例。但物料粉碎时消耗的表面能、变形功、摩擦损失功、颗粒表面结构和内部结构变化所消耗的能，以及噪音、热能等的总和，与物料粉碎后表面积的增加成正比关系。

（二）体积假说

体积假说由 F. Kick 等人提出，认为物料粉碎所消耗的能量与颗粒的体积成正比，粉碎后物料颗粒粒度也呈正比例减小。据此推导出的计算式子为：

$$E = K_2 \ln \frac{d_1}{d_2} \tag{1-3}$$

式中 E ——粉碎物料所消耗的能量

K_2——比例常数

d_1，d_2 —— 物料颗粒粉碎前后的粒度

在实际应用时，上述两种假说的计算结果可能相差很大，而且常与实际不完全相符。但实践又证明，Rittinger 假说对微粉碎和超微粉碎的能耗计算还是比较适用的。而对粉碎物粒度大于 10mm 的粗碎和中碎来说，Kick 假说的计算式子比较适用。这是因为粉碎产品的粒度较大表面积的增大不显著，导致表面能、表面及颗粒内部结构变化等消耗的能相对较少，局部粉碎作用也属次要的，而消耗于物料变形和粉碎机传动机构的摩擦等能耗，都与颗粒体积成正比，故可用体积假说来计算粉碎能耗。

（三）裂缝假说

如上所述，表面积假说适用于微粉碎与超微粉碎，体积假说适合于粗中碎。但界于两者之间的粉碎物粒度在 1～10mm 范围内的，按两种假说计算的误差都较大。为此，F. C. Bond 提出了裂缝假说，较适合于这一粒度范围内粉碎操作的能耗计算。

粉碎发生之前，外力对物料颗粒所作的变形功聚集在颗粒内部的裂纹附近，产生应力集中使裂纹扩展形成裂缝，而当裂缝发展到一定程度时颗粒即被粉碎。因此，裂缝假说认为粉碎能耗与裂缝长度成正比。由于颗粒的裂缝长度既与颗粒的体积有关，也与颗粒的面积有关。经推导可得本假说的计算式为：

$$E = K_3\left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}}\right) \tag{1-4}$$

（四）粉碎能耗的统一公式

R. I. Charles 认为物料颗粒粒度 d 发生微小变化 [-d (d)] 时所需的能量 dE 是粒度的函数，其间关系为

$$\mathrm{d}E = -K\frac{\mathrm{d}(d)}{d^n} \tag{1-5}$$

式中 dE ——颗粒粒度减小 d(d)时的粉碎能耗

K——比例常数

n —— 效率系数

将式 (1-5) 积分得：

$$E = \int_{d_1}^{d_2} - K \frac{\mathrm{d}(d)}{d^n} \tag{1-6}$$

n分别取值 2、1 和 1.5 代入式(1-6)，即分别得出表面积、体积和裂缝粉碎假说计算式（1-3)、式（1-4）和式（1-5)。由此可见，式（1-5）是三种假说的综合，但此式也不能反映物料粉碎的真实过程，原因在于：

(1) 为了用数学公式表达粉碎能耗，建立了产生极小的粒度增量 d（d）与能耗增量 dA 之间的关系并积分。但在实际情况下，物料是由于产生局部粉碎和整体粉碎的裂缝而碎成具有各种粒度的颗粒群。换言之，数学描述的过程与实际粉碎过程的区别很大。

(2)积分限是 d_1 和 d_2，这只适用于原料和破碎产品都是均匀粒度的颗粒群时的情况，而实际情况是 d_1和 d_2必须用原料和粉碎产品的平均粒度或名义粒度代入。

(3) 系数 K 和 n 取决于粉碎条件、过程和物料性质、粒度等因素，其数值可能是变数，例如 n 的值可能是在 1和 2 之间的任意值。

在实际应用时，常将式（1-6）直接积分后，由实验方法求取 n和 K 值，再由此进行估算。积分式分：

$$E = \frac{K}{n-1}\left(\frac{1}{d_2^{n-1}} \frac{1}{d_1^{n-1}}\right) \tag{1-7}$$

最后要指出的是，在使用粉碎能耗公式时，不仅要考虑到粉碎物料、粉碎设备和粉碎过程的具体情况，特别还要参考实际生产数据、物料可碎性以及试验资料来对公式中的系数和计算结果加以修正。只有经过修正的数据，才能用于评估或比较粉碎过程与粉碎设备的能耗。

四、粉碎动力学

粉碎动力学研究物料粉碎时粒度、产量等与时间的关系。在间歇式粉碎过程中，初期粉碎腔内粗颗粒含量较高，粉碎进行得比较迅速。随着粉碎的进行，粉碎腔内的粗颗粒含量逐渐减少，这时粉碎速率也逐渐减慢下来。也就是说，粉碎速率（以粗颗粒累积含量对时间的导数来表示）与粗颗粒含量成正比：

$$\frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}t} = - k\beta \tag{1-8}$$

式中 β—— 在 t 时的粗颗粒含量

k—— 比例系数

为了提高粉碎速率，应尽量让粉碎在粗颗粒含量较多时进行。 闭路粉碎和开路粉碎都是通过模拟这种条件来提高粉碎速率的流程。

对式（1-8）移项并积分，得出粉碎动力学公式：

$$\ln\beta = - kt + \ln\beta_0$$

$$\beta = \beta_0 e^{-kt} \tag{1-9}$$

式中 β_0—— 粉碎开始时（$t=0$）的粗颗粒含量

一些试验表明，更确切的粉碎动力学公式为：

$$\beta = \beta_0 e^{-kt^n} \tag{1-10}$$

式中　m——取决于物料性质及粉碎条件的系数

有些研究者对给料和被粉碎产品的粒度分布、产量、粉碎时间等的关系进行分析与数学推导，提出了粉碎的动力学模型，如静态矩阵模型、动态矩阵模型和总体平衡动力学模型等粉碎数学模型。一种方法是将给料中各个粒级粉碎后的产品粒度分布以“粉碎函数”表示，将各个粒级受到粉碎的概率以“选择函数”表示。粉碎产品的粒度分布，即产品中某一粒级的数量由两部分组成：一部分是由较大的粒级粉碎而产生的；另一部分是原有该粒级由于未受到粉碎而遗留下来的。

第二节　干法超微粉碎和微粉碎

干法超微粉碎或微粉碎的形式很多，根据产生粉碎力的原理不同，有气流式、高频振动式、旋转球（棒）磨式、转辊式、锤击式和自磨式六大类，其中后五类又统称机械式。各种不同类型的超微粉碎或微粉碎，又包括若干种不同形式的具体设备，如表 1-2 所示。因为自磨式粉碎尚未在食品工业中得到应用，本节不作讨论。

表 1-2　　干法超微粉碎或微粉碎的主要类型

类型	级别	基本原理	典型设备举例
气流式	超微粉碎	利用气体通过压力喷嘴的喷射产生剧烈的冲击、碰撞和摩擦等作用力实现对物料的粉碎	环形喷射式、圆盘式、对喷式、超音速式和叶轮式气流粉碎机
高频振动式	超微粉碎	利用球或棒形磨介作高频振动产生冲击、摩擦和剪切等作用力实现对物料的粉碎	间歇式和连续式振动磨
旋转球（棒）磨式	超微粉碎或微粉碎	利用球或棒形磨介作水平回转时产生冲击和摩擦等作用力实现对物料的粉碎	球磨机、棒磨机、管磨机和球棒磨机
转辊式	微粉碎或超微粉碎	利用磨辊的旋转产生摩擦、挤压和剪切等作用力粉碎物料	悬辊式盘磨机、弹簧辊式盘磨机、辊磨机和精磨机
锤（盘）击式	微粉碎	利用高速旋转的锤头产生冲击、摩擦和剪切等作用力粉碎物料	锤击式和盘击式粉碎机
自磨式	微粉碎	利用物料间的相互作用产生冲击或摩擦力粉碎物料	一段自磨机、砾磨机和半自磨机

一、气流式超微粉碎

气流式超微粉碎的基本原理是，利用空气、蒸汽或其它气体通过一定压力的喷嘴喷射产生高度的湍流和能量转换流，物料颗粒在这高能气流作用下悬浮输送着，相互之间发生剧烈的冲击、碰撞和摩擦作用，加上高速喷射气流对颗粒的剪切冲击作用，使得物料颗粒间得到充足的研磨而粉碎成超微粒子，同时进行均匀混合。由于欲粉碎的食品物料大多熔点较低或者不耐热，故通常使用空气。被压缩的空气在粉碎室中膨胀，产生的冷却效应与粉碎时产生的热效应相互抵消。

（一）气流式超微粉碎的特点

气流式超微粉碎的特点概括起来包括以下六个方面：

（1）粉碎比大，粉碎颗粒成品的平均粒径在 5μm 以下；

（2）粉碎设备结构紧凑、磨损小且维修容易，但动力消耗大；

（3）在粉碎过程中设置一定的分级作用，粗粒由于受到离心力作用不会混到细粒成品中，这保证了成品粒度的均匀一致；

（4）压缩空气（或过热蒸汽）膨胀时会吸收很多能量产生致冷作用造成较低的温度，所以对热敏性物料的超微粉碎有利；

（5）易实现多单元联合操作，例如可利用热压缩气体同时进行粉碎和干燥处理，在粉碎同时还能对两种配合比例相差很远的物料进行很好的混合，此外在粉碎的同时可喷入所需的包囊溶液对粉碎颗粒进行包囊处理；

（6）易实现无菌操作，卫生条件好。

（二）气流式超微粉碎机的类型

气流式超微粉碎过程是在专用的气流式粉碎机上完成的。气流式粉碎机又称为流体能量磨（流能磨）或射流磨，有环形喷射式、圆盘式、对喷式和超音速式等类型。

1. 环形喷射式气流粉碎机

图 1-2 所示为环形喷射式气流粉碎机的工作原理和结构示意图。待粉碎物料喂料装置输送至环形粉碎室底部喷嘴上，压缩空气从管道下方的一系列喷嘴中喷出形成了高速喷射气流(射流),夹带着物料颗粒运动。在管道内的射流大致可分为外层、中层和内层三层，各层射流的运动速度不相等，这迫使物料颗粒在粉碎室内相互冲击、碰撞、摩擦以及受射流的剪切作用达到粉碎。物料自右下方进入管道后，大致沿管道运动一圈后自右上方排出。由于外层射流的运动路程最长，该层的颗粒群受到的碰撞和研磨作用最强。经喷嘴射入的流体，也首先作用于外层的颗粒群。中层射流的颗粒群在旋转过程中产生一定的分级作用，较粗粒级在离心力作用下进入外层射流与新输入的物料一起重新粉碎，而细粒级在射流的径向速度作用下向内层射流聚集并经排料口排出。

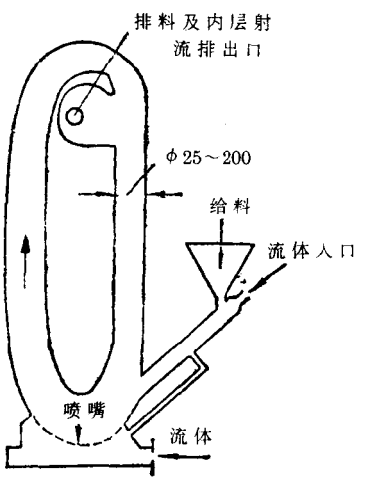


图 1-2 环形喷射式气流粉碎机示意图

2. 圆盘式气流粉碎机

图 1-3 为圆盘式气流粉碎机的工作原理示意图，粉碎室呈扁平圆形，沿着它的圆壁等距离地设置若干个喷嘴。喷嘴形成的射流同圆周切向成 45°，将粉碎室分成靠周边的粉碎区和中间的分级区。由于各层射流的速率不一样，使夹带的物料颗粒间产生冲击、碰撞和研磨，达到粉碎的目的。粗细粒度不同的颗粒在旋转运动气流的离心力场中的径向运动速度不同，粒度大的颗粒径向速度大，而粒度小的径向速度小，所以颗粒在粉碎室内

能同时进行分级，粗颗粒被甩向外围进行重新粉碎，符合要求的细颗粒则随气流自圆盘中部向下方排出，而射流则从上方排出。

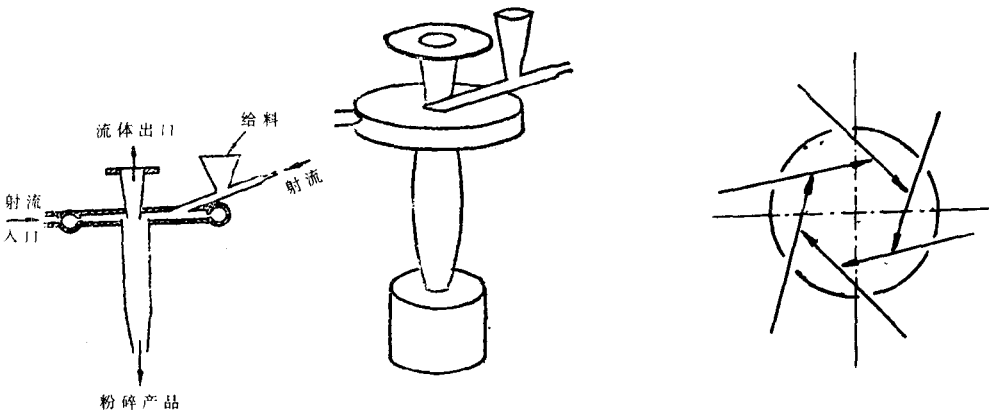


图 1-3　圆盘式气流粉碎机示意图

圆盘式气流粉碎机的进料颗粒粒度通常小于 0.15mm，最大不超过 6mm，成品粒度在 0.2～5μm 之间。进料粒度力求均匀，否则产品的粒度将变大。

3　对喷式气流粉碎机

如图 1-4 所示，对喷式气流粉碎机的下部在对立方向设有两个喷嘴，物料经螺旋进料机进入后受到由对立方向射入机内的射流产生的紊流、冲击和研磨作用。射流及粉末产

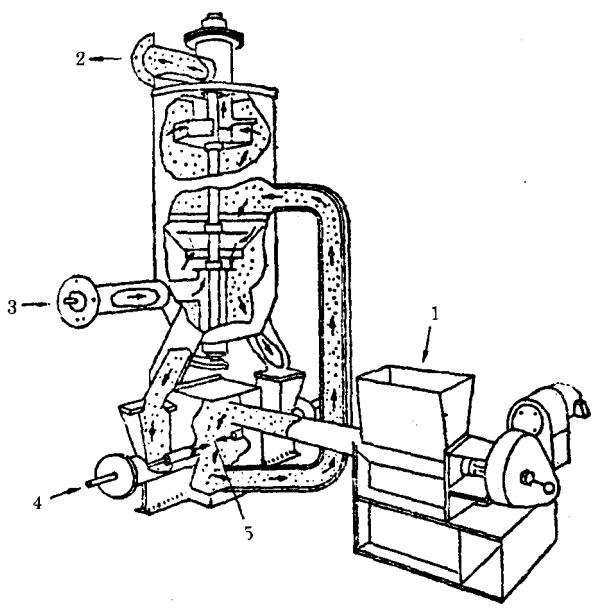


图 1-4　对喷式气流粉碎机的示意图

1—进料　2—粉碎成品出口　3—鼓风机气流入口　4—压缩气体　5—粉碎区

需要全本请访问 www.ertongbook.com

品向上运动至上部的机械分级机中进行分级，粗粒级经环形空间向下运动受到上升气流的淘洗作用后，经两个溜槽返回至粉碎区。粉碎产品的粒度由射流压力，喷嘴间距、风机风量和分级机转速等进行控制。

4. 超音速式气流粉碎机

如图 1-5 所示，在超音速式气流粉碎机的粉碎室周壁上安装有喷嘴，欲粉碎的物料颗粒先与压缩空气混合形成气固混合流，之后以超音速方式由喷嘴喷入粉碎室内，发生强烈的冲击、碰撞和摩擦等相互作用力而被粉碎。粒度不同的颗粒由于在旋转气流作用下的径向运动速度不同而得以分级，符合要求的超微粒子经旋风分离排出机外，较粗的颗粒重新进入粉碎室内与新加入的气固混合流一起重复上述粉碎过程。

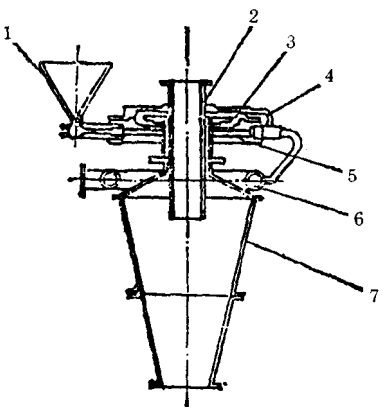


图 1-5 超音速气流粉碎机示意图
1—加料斗 2—出口管 3—分级室
4—循环管 5—粉碎室 6—原料喷出粉碎管 7—旋风分离器

超音速式和圆盘式气流粉碎机的工作原理基本相似，所不同的是前者喷嘴喷射的是气固混合物，而后者喷嘴喷射的是单一的气体流。在前者，物料颗粒由气体混合时受到湍动作用而得以部分粉碎，该过程有助于整个粉碎操作的进行。

5. 叶轮式气流粉碎机

叶轮式气流粉碎机的工作原理、设备结构与上述四种均不相同，它不是通过高压喷嘴形成的射流，而是通过叶轮形式的循环气流产生冲击碰撞等作用力进行粉碎的，而且该机本身带有两级粉碎、内分级、鼓风和排渣等机构，因此可认为是一个小型机组。

该粉碎机的结构和工作原理示意图如图 1-6 和图 1-7 所示。将小于 10mm 的物料颗粒，由加料器定量连续地加至第一粉碎室内。第一段粉碎叶轮的 5 支叶片具有 30°扭转角，它有助于形成旋转风压；但与第二段分级叶轮相对应的 5 支叶轮不具有扭转角，所以形成气流阻力。这样第一段叶轮形成的风压在第一粉碎室内引起气流循环，随气流旋转的物料颗粒之间就发生相互冲击、碰撞、摩擦和剪切，以及受离心力的作用冲向内壁受到撞击、摩擦、剪切等作用而被粉碎成细粉。第二段分级叶轮具有分级作用，细粉在分级叶轮端部斜面和衬套锥面之间的间隙中也进行较有效的粉碎。但最有效的起粉碎作用发生在第一、二段叶轮之间的滞流区，这是因为叶轮高速旋转时物料被急剧搅拌，导致颗粒间的相互冲击、摩擦和剪切而被粉碎。

由于上述作用，粉粒被粉碎至数十微米到数百微米，细粉和较粗的颗粒同时旋转于第一粉碎室内，在离心力的作用下粗颗粒沿第一粉碎室内壁旋转，与新加入的物料一同继续被粉碎；而细颗粒则随气流趋向中心部分，随鼓风机产生的气流带入第二粉碎室内。

分级是由第二段分级叶轮所产生的离心力和隔环内径之间所产生的气流吸力来决定，若颗粒受的离心力作用大于气流吸力，则被滞留下来继续被粉碎，若颗粒所受的离心力作用小于气流吸力，则它被吸向中心随气流进入第二粉碎室。

进入第二粉碎室的细颗粒进行同样的粉碎和分级。由于第二粉碎室的粉碎叶轮和分

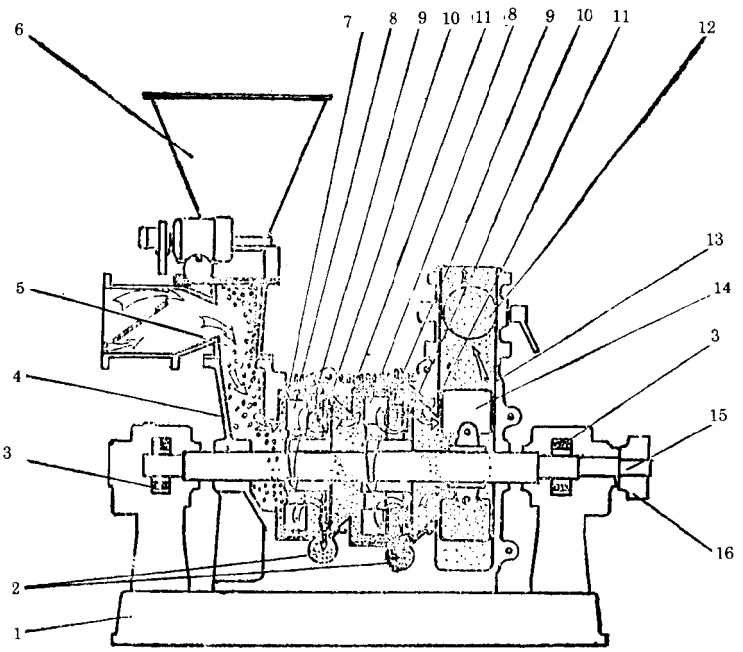


图 1-6　叶轮式气流粉碎机示意图

1—机座　2—排渣装置　3—轴承座　4—加料装置　5—加料器　6—加料斗　7—衬套　8—叶轮　9—撞击销　10—内分级叶轮　11—隔环　12—碟阀　13—机壳　14—风机叶轮　15—主轴　16—皮带轮

级叶轮直径比第一粉碎室的大，因此旋转速度更高；又因第三段叶轮的叶片扭转角大（40°），所以造成的风压更大，颗粒之间相互冲击等力也因此更大，粉碎效果就得以增强。同时因通过该室内的风速因粉碎室直径增大而减缓，分级精度提高，这样使细颗粒粉碎到几微米到数十微米的超细粒子并被气流吸出机外。

排渣装置的工作原理如图 1-7 所示。那些比被粉碎物料硬度大且相对密度也大的杂质，由于旋转时受到分级叶轮离心力的作用而被甩向衬套内壁上，最后降到粉碎室底部排渣孔，并由排渣装置的螺旋器不断地排出机外。当粉碎物料不含有杂质时该装置可将粗颗粒排出机外，这样不但保证成品粒度的大小，而且可防止粉碎

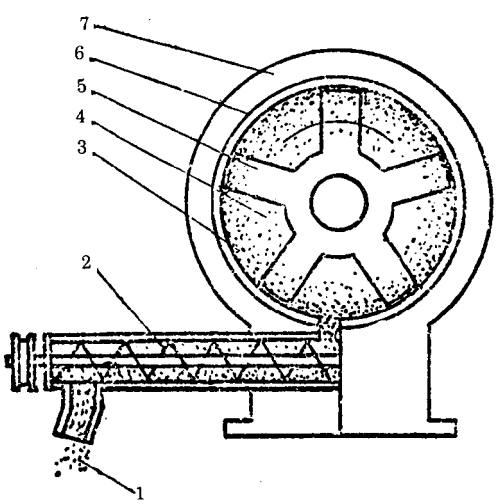


图 1-7　叶轮式气流粉碎机内排渣机构工作示意图

1—粗渣粒　2—螺旋排料器　3—粗粒子　4—细粉　5—分级叶轮　6—衬套　7—壳体

机因粗颗粒的积累以及新物料的不断加入而超载。

由于工作原理的不同，叶轮式气流粉碎机显示出与上述四种气流粉碎机所不同的特点。

（1）动力消耗降低；

（2）设有内分级和排渣机构，所以极大提高了粉碎成品的纯度；

（3）整个系统可在负压下操作，减少了粉尘对环境的污染；

（4）调节与操作简单方便。

但是，若要粉碎两种以上组分的混合物料时，如果相对密度相差较大，则不宜采用排渣机构来排除杂质。

（三）气流式超微粉碎机的效率

从理论上分析，粉碎机粉碎能力与动力的关系为：

$$p = c(H_p)^{\sigma} \tag{1-11}$$

式中 p ——粉碎能力，t/h

H_p ——粉碎动力消耗，kW

σ ——粉碎动力指数

c ——实验测得的系数

球磨机的粉碎动力指数约为 1.1～1.17，锤式粉碎机约 1.4～1.5，而气流粉碎机约为 2.0～2.23。由此可见，气流粉碎机的能耗最大，如何提高粉碎效率是个十分重要的研究课题。

要提高气流粉碎机的效率，必须增加粒子间的碰撞概率（p_c）和粒子的破碎率——应力概率（p_σ），还必须考虑被粉碎物料的物理化学性质、受力时的塑性变形、高真空时产生的龟裂以及颗粒粒度等因素。通过增大给料量可提高气流粉碎机内的颗粒密度，这可增加颗粒间的冲击与碰撞概率。但这要适宜，因为机内颗粒密度太高，粒子间的互相干扰会增强，结果使粉碎效率反而降低要提高应力概率 p_σ 一般可增加冲击速度，对于不同性质的物料、不同直径的颗粒，应选择与之相应的最佳冲击速度。

在粉碎过程中，如果给料速度低则停留时间长，如果循环次数增加则粉碎细度高。但由于给料速度低在单位容积内的粒子个数就会减少，因此粒子间碰撞概率就会减低，粉碎粒度也降低。若给料速度过高，则停留时间太短，对粉碎也不利。粉碎压力增加会增大冲击速度，这样粉碎的应力概率（p_σ）亦增大，对粉碎过程有利。

根据上述关系，在粉碎时必须选用合理的粉碎压力（p_n）和最佳气固比（S/G）以提高粉碎效率。粉碎效率的计算方法为：

$$\eta = \frac{\Delta L - S_P}{E} \times 100\% \tag{1-12}$$

式中 ΔL ——粉碎每单位成品所需的理想能量

E ——粉碎每单位成品所需的实际能量

S_P ——单位成品粒子的比表面能量

二、高频振动式超微粉碎

高频振动式超微粉碎的原理是：利用球形或棒形研磨介质作高频振动时产生的冲击、

摩擦和剪切等作用力，来实现对物料颗粒的超微粉碎，并同时起到混合分散作用。振动磨是进行高频振动式超微粉碎的专门设备，它在干法或湿法状态下均可工作。

振动磨的工作原理和结构示意图如图 1-8 所示，槽形或管形筒体支承于弹簧上，筒体中部有主轴，轴的两端有偏心重锤，主轴的轴承装在筒体上通过挠性轴套与电动机连接。主轴快速旋转时，偏心重锤的离心力使筒体产生一个近似于椭圆轨迹的快速振动。筒体内装有钢球或钢棒等磨介及待磨物料，筒体的振动使磨介及物料呈悬浮状态，利用磨介之间的抛射与研磨等作用力而将物料粉碎。

在振动磨中，研磨介质的运动是实现超微粉碎的关键。除高频振动产生的作用力外，就磨介整体来说还有一种与振动轨迹方向相反的转动（公转），转动的频率大致等于振动频率的 1‰ 也就是说，筒体内磨介的整体运动方向与主轴的旋转方向正好相反，诸如主轴以顺时针运动时磨介则以逆时针方向进行循环运动，由此产生了附加的冲击碰撞等作用力。而且，就单个磨介钢球来说，除了公转外还存在自转运动。因此，振动磨内研磨介质对物料产生的粉碎作用力来自三个方面：高频振动、循环运动（公转）和自转运动。这些运动使得磨介之间和磨介与筒体内壁之间产生剧烈的冲击、摩擦和剪切等作用力，从而在短时间内将物料颗粒研磨成细小的超微粒子。

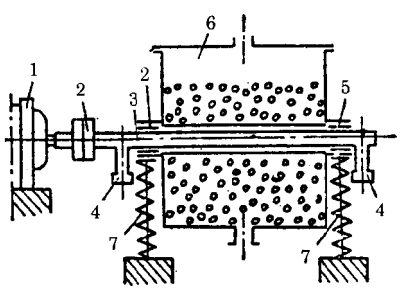


图 1-8　振动磨示意图

1—电动机　2—挠性轴套　3—主轴　4—偏心重锤　5—轴承　6—筒体　7—弹簧

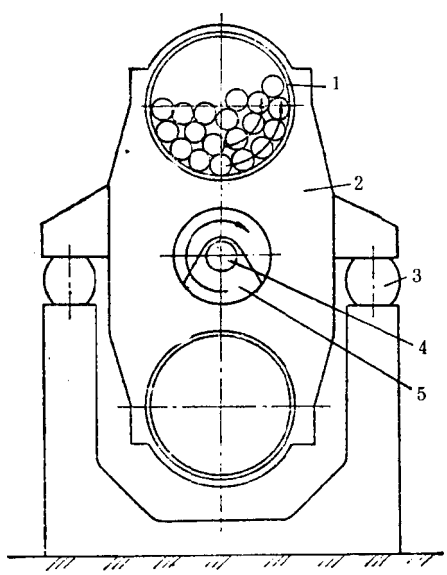


图 1-9　连续式振动磨的外形结构示意图

1—筒体　2—横构件　3—橡胶弹簧　4—主轴　5—偏心重块

振动磨有间歇式和连续式之分，工业化应用的一般都是连续式，图 1-9 所示一种连续式振动磨的外形结构。振动磨有上下安置的两个管形筒体，筒体之间由 2～4 个横构件连接，横构件由橡胶弹簧支承于机架上，在横构件中部装有主轴的轴承，主轴上固定有偏心重块，电动机通过万向联轴器驱动主轴。小型振动磨有两个偏心重块，大型的有 4 个

偏心重块，每个偏心重块各由两件组成，可通过改变其相互间的角度来调节偏心力的大小，偏心力使管形筒体和横构件在橡胶弹簧上振动。通常进料部分和排料部分分别设于筒体两端，但也可以设置在筒体中部。物料的磨碎时间主要取决于它在筒体内经过的路程长短，这与筒体的连接系统有关。如振动磨中筒体以串联方式相连接，则物料的路程最长，适合于坚硬的、进料粒度较大或成品粒度要求很细的场合。1/4 并联连接系统的物料路程最短，半并联系统次之，并联系统的物料路程较长，但短于串联系统。振动磨的连接系统一般都比较灵活，可根据需要随时更改。如要粉碎并混匀两种物料，还可将其中较硬的一种从筒体首端进料，较软的一种从筒体后面某一点进入。

振动磨粉碎物的比表面与粉碎时间的相互关系为：

$$\frac{\mathrm{d}S_s}{\mathrm{d}t}=\frac{K\omega^3A^3\delta_B}{H}\cdot\left(\frac{D_B}{d}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot f\left(\frac{\omega^2A}{g}\right)\cdot f_2(\mu_B)\cdot f_3(\mu_M) \tag{1-13}$$

式中 S_s ——物料的比表面，cm^2/cm^3

K ——系数

ω ——振动频率，1/s

A —— 振幅，mm

δ_B、D_B、μ_B ——分别为钢球密度（g/cm^3）、直径（mm）、充填率（%）

H ——物料可磨性 $H\approx0.058W_i$，W_i 是 Bond 功指数，可参考式（1-18）的取值）

d ——物料粒度，mm

μ_M ——物料充填率，%

研究表明，当 $\omega^2A>3g$ 时，函数 $f_1\left(\frac{\omega^2A}{g}\right)\approx1$，于是式(1-11)可简化为：

$$S=\frac{K}{H}\omega^3A^3\delta_B\left(\frac{D_B}{d}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot f_2(\mu_B)\cdot f_3(\mu_M)t \tag{1-14}$$

式中 $f_2(\mu_B)$ 和 $f_3(\mu_M)$ 由表 1-3 取值。虽然该公式给出了经振动磨超微粉碎后物料颗粒的比表面积与各参数之间的相互关系，但它仅在一定范围内成立。试验表明，只是当粉碎时间在一定限度内，粉碎物料的比表面积与时间成正比关系，超过了一定限度就不一定成正比关系。

表 1-3　　函数 $f_2(\mu_B)$ 和函数 $f_3(\mu_M)$ 取值

μ_B	0	20	40	60	80	100	
$f_2(\mu_M)$	1	1	1.2	1.6	1.9	1.6	
μ_M	10	25	50	75	100	125	150
$f_3(\mu_M)$	5	2	1.2	1	1	1	1

研磨介质有钢球、钢棒、氧化铝球和不锈钢珠等，可根据物料性质和成品粒度要求选择磨介材料与形状。为提高粉碎效率，应尽量先用大直径的磨介。如较粗粉碎时可采用棒状，而超微粉碎时使用球状。一般说来，磨介尺寸越小，则粉碎成品的粒度也越小。

图 1-10 给出磨介尺寸与原料及成品粒度的相互关系。

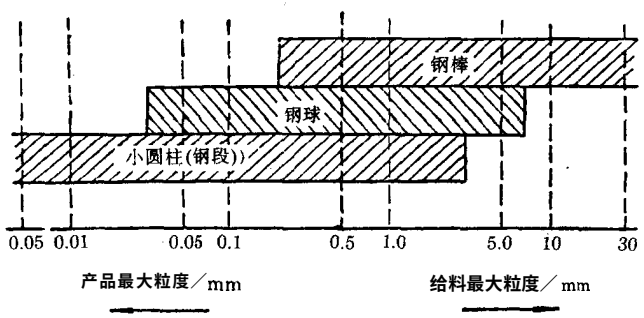


图 1-10 振动磨磨介尺寸与原料和成品粒度的关系

振动磨磨介的充填率一般在 60%～80% 范围内，物料充填率（筒体内物料松容积占磨介之间空隙的百分率)在 100%～130% 之间。物料充填率与粉碎率（以单位时间内的比表面的增加来表示）之间的关系示于图 1-11 。由图可见，当物料充填率高则粉碎率下降，但振动磨筒体内新生总表面积与粉碎率（纵坐标）和物料充填率(横坐标)的乘积成正比。物料充填率增加时，单位时间内新生的总表面在一定范围内仍是增加的。

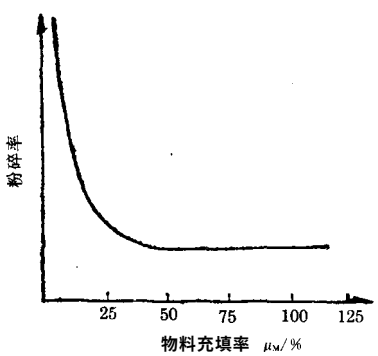


图 1-11 物料充填率与粉碎率的大致关系

与工作原理有些相似的球磨机（下面将讨论）相比，振动磨的特点表现在：

(1) 研磨效率高。由于振动磨采用小直径的研磨介质，其表面积增大，所以研磨机会比旋转式球磨机增大许多倍；而且磨介装填系统（约 60%～80%)比球磨机(约 28%～45%）高，磨介冲击次数比球磨机多几万倍，磨介的冲击力亦大。所以，研磨效率比球磨机高出数倍到十几倍。

(2) 研磨成品粒径细，平均粒径可达 2～3μm 以下。

(3) 可实现连续化生产并可以采用完全封闭式操作以改善操作环境。

(4) 外形尺寸比球磨机小，占地面积小，操作方便，维修管理容易。

(5) 干湿法研磨均可。但是，振动磨运转时的噪音大，需使用隔音或消音等辅助设施。

三、旋转球（棒）磨式超微粉碎或微粉碎

旋转球（棒）磨式超微粉碎或微粉碎的原理是利用水平回转筒体中的球或棒状研磨介质，后者由于受到离心力的影响产生了冲击和摩擦等作用力，达到对物料颗粒粉碎的

需要全本请访问 www.ertongbook.com