

# 粉碎与筛分

## 本章的学习目的与要求

通过对本章内容学习，学生能够熟悉各种粉碎方法与粉碎原理，从而可以根据不同的食品材料选择合理的粉碎方法。要求学生掌握粒度分布和粒度的测定方法；掌握各种粉碎机理和各种粉碎方法所适用的对象；能估算粉碎能耗和其它生产参数；掌握筛分机理和方法；了解超微粉碎原理与设备。



现代工程技术的发展,要求许多以粉末状态存在的固体物料具有级细的颗粒,严格的粒度分布,规整的颗粒外形和极低的污染程度。为满足这些要求,便产生了粉碎、超微粉碎的加工技术。在食品工业中,需要将固体颗粒粉碎与筛分的情况很多。例如,为迎合食品消费的需要,必须将豆粉、面粉、奶粉、藕粉、咖啡等加工成粉末态产品;在巧克力、冰激凌以及许多功能性食品的生产过程中,需将各种配料粉碎成足够细小的颗粒才能保证物料均匀分布和终产品的品质;在干燥、浸出等操作之前,常先将大块的物料粉碎成小块物料以增大其比表面积,即利用粉碎操作来增大物料的传热和传质面积,使后序处理能顺利而快速地进行。凡此种种,都要采用适当的粉碎及分离的方法与设备,并消耗一定的能量和物料。显然,为实现上述粉碎的目的,必须根据原料性质、成品质量要求、生产规模以及投资、环保等多种因素而选用适当的方法与设备。

本章主要讨论固体粉碎操作的方法与原理以及固体颗粒混合物的一种分离方法——筛分。

# 1 粉碎理论

## 1.1 有关粉碎的基本概念

“粉碎”是固体物料尺寸由大变小的过程的总称,是利用机械力来克服固体物料内部凝聚力使之破碎成符合要求的小颗粒的单元操作,它包括“破碎”和“粉磨”。“破碎”指由大料块变成小料块的过程,包括粗碎和中碎;粉磨则是指由小料块变成细粉体的过程,也称做磨碎或研磨,包括微粉碎和超微粉碎。但在实际应用中,粉碎又往往是相对破碎而言,专指由小料块变成细粉体的过程。本章所讨论的粉碎,基本上是指粉磨过程。

物料颗粒的大小称为粒度,它是粉碎程度的代表性尺寸。形状最匀称的颗粒是圆球,无论从哪个方向看去形状都一样,只用一个尺寸——直径就可以表明其大小,所以球形颗粒的粒度就是其直径。对于非球形颗粒,为了袭用球形颗粒的研究和讨论方法,则常以面积、体积或质量等为基准的各种当量直径来表示。有关这方面的内容,已在第4章中介绍。



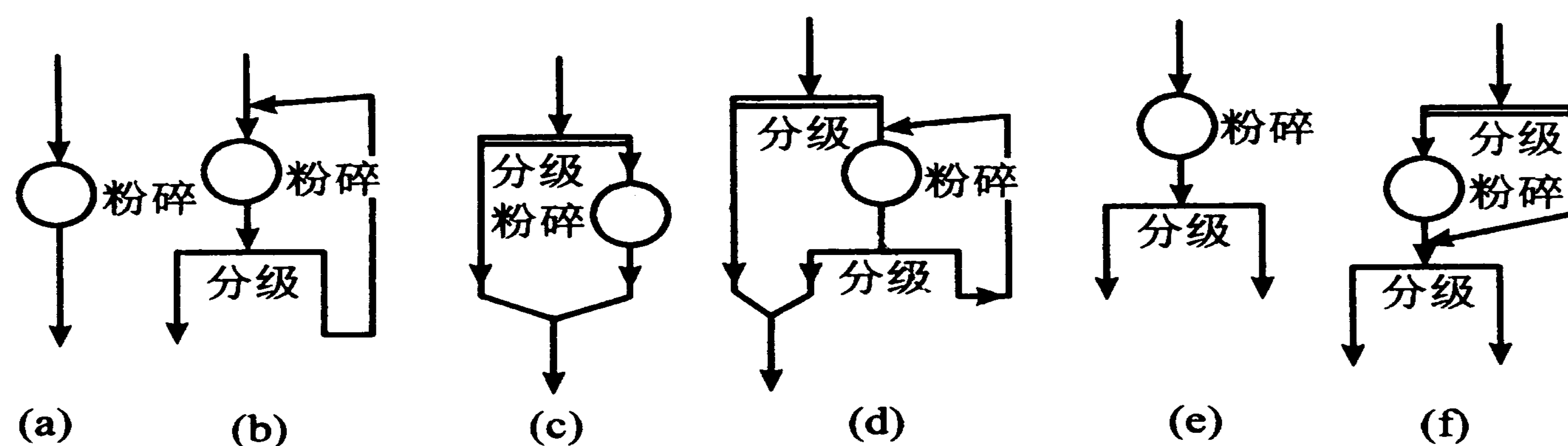
根据被粉碎物料和成品粒度的大小，粉碎可分为粗粉碎、中粉碎、微粉碎和超微粉碎 4 种：

- (1) 粗粉碎 原料粒度在 40~1 500 mm 范围内，成品粒度范围 5~50 mm。
- (2) 中粉碎 原料粒度在 10~100 mm 范围内，成品粒度范围 5~10 mm。
- (3) 微粉碎（细粉碎） 原料粒度在 5~10 mm 范围内，成品粒度在 100  $\mu\text{m}$  以下。
- (4) 超微粉碎（超细粉碎） 原料粒度在 0.5~5 mm 范围内，成品粒度在 10~25  $\mu\text{m}$ 。

粉碎前后的粒度比称为粉碎比或粉碎度，它反映了粉碎前后粒度的变化，同时近似反映了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 300~1 000 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，若通过一次粉碎完成，则因粉碎比太大而使得设备利用率太低，为了提高粉碎效率和降低能耗，通常利用分级粉碎原理，将总过程分成若干段，每段完成一定的粉碎比。此时总粉碎比等于各段粉碎比之积。

根据粉碎操作特点，粉碎可以分为干法和湿法两种方式。而无论是干法粉碎还是湿法粉碎，其工艺流程又均可以分为一级粉碎或多级粉碎。就粉碎单元作业（一级超细粉碎）而言，又大体有图 6-1 所示的几种类型。



(a) 开路粉碎 (b) 闭路粉碎 (c) 带预先分级的开路粉碎  
(d) 带预先分级的闭路粉碎 (e) 带最终分级的开路粉碎  
(f) 带预先分级和最终分级的开路粉碎

图 6-1 超细粉碎工艺类型

(1) 开路粉碎 如图 6-1 (a) 所示，一般扁平循环管式气流磨因具有自行分级性能，常采用这种类型。批量超细粉碎也常采用这种类型。这种类型的优点



是工艺简单，但由于不能及时地分出合格的细粒级产品，粉碎效率较低。

(2) 闭路粉碎 如图 6-1 (b) 所示，一般连续式粉碎都采用这种类型。球磨机、搅拌磨、高速机械式冲击磨等常采用这种类型。这种类型的优点是能及时地分出合格的细粒级物料，因此可以减轻颗粒的团聚，粉碎效率较高。

(3) 带预先分级的开路粉碎 如图 6-1 (c) 所示，当给料中含有较多的合格粒级物料时，采用这种类型可减轻磨机的负荷，降低粉碎能耗，有助于提高作业的效率。

(4) 带预先分级的闭路粉碎 如图 6-1 (d) 所示，如果磨机给料来自前一段粉碎作业，采用这种流程可将给料中的合格级物料预先分出，避免了细粒物料“过磨”，有助于提高粉碎效率。

(5) 带最终分级的开路粉碎 如图 6-1 (e) 所示，这种粉碎流程的特点是可以得到粒度及粒度组成不同的几种粉体产品。

(6) 带预先分级和最终分级的开路粉碎 如图 6-1 (f) 所示，这种类型的特点是与 (5) 相同，但由于设置了预先分级作业，可以提高粉碎销路。

粉碎操作的工艺类型很多，各有独特的优点，要选用合适的工艺流程与设备，首先必须了解各粉碎工艺和设备的性能，包括它所适应的给料粒度、能达到的产品细度、处理能力、配套性能、粉碎方式（干法或湿法）等，然后再综合考虑要完成的粉碎任务，包括原料的性质、产品的用途、质量标准、生产规模以及投资等因素，使所选择的工艺设备既可圆满完成粉碎任务，又能达到尽可能高的粉碎效率，获得最大的经济效益。

## 1.2 粉碎理论

### 1.2.1 粉碎机理

宏观物体的粉碎机理是比较复杂的，很难用一个理论来圆满地解释，但我们可以透过晶体的破碎和变形对固体为什么会被粉碎作一些了解。

晶体是由构成它的基本质点——离子、原子或分子在空中作有几何规则的周期性排列而形成的，这些质点借相互间的吸引力和排斥力维持平衡。质点间的相互吸引主要源于库仑引力，它与质点间的距离的平方成反比；质点间的相互排斥力是由于两质点充分接近时，电子云产生重叠所引起的。所以，质点间的排斥力只有在距离相当近时才有显著的作用，并随着距离的缩小而急剧增大。晶体中由



质点间的引力造成的结合能  $-\frac{Ae^2}{r}$ 、由斥力造成的结合能  $\frac{B}{r^n}$ 、质点间的相互作用力  $F$  及结合能  $U$  随质点间距  $r$  的变化关系如图 6-2 所示。

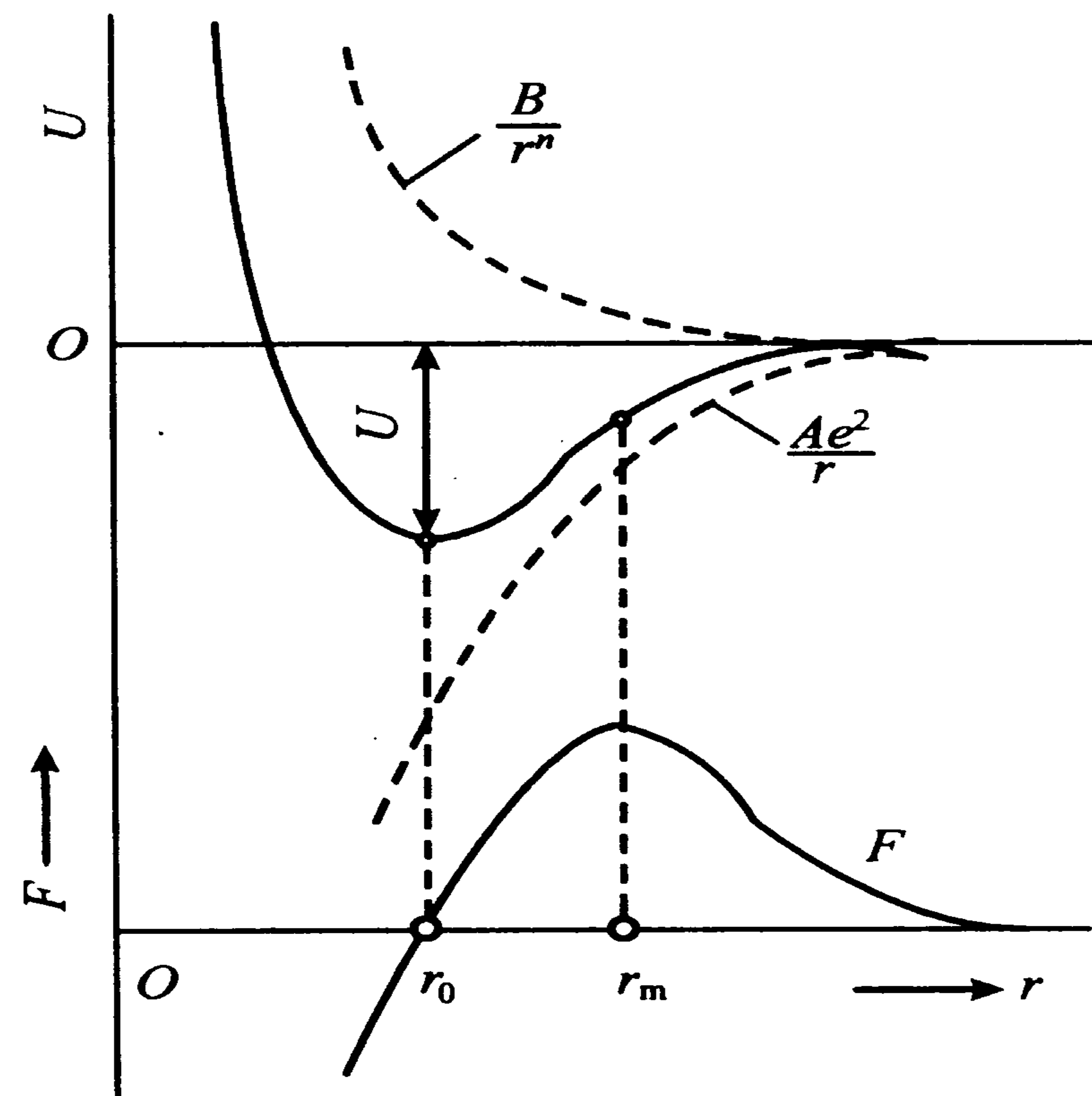
$$U = \frac{-Ae^2}{r} + \frac{B}{r^n} \quad (6-1)$$

$$F = \frac{Ae^2}{r^2} - \frac{nB}{r^{n+1}} \quad (6-2)$$

式中： $A$  为麦德隆常数，它取决于晶胞质点的排列方式； $B$  为和晶体结构相关的常数； $e$  为质点所带的电荷量； $n$  为玻恩指数，与晶体类型相关。

图 6-2 表明，在  $r = r_0$  时，质点间的吸引力和排斥力相互平衡， $F = 0$ ， $U$  有最小值  $U_0$ ；当晶体受到外力作用而被压缩时， $r < r_0$ ，这时斥力的增大超过引力的增大，剩余的斥力支撑着外力的压迫；当晶体受到外力作用而伸张时，在  $r_0 < r < r_m$  范围内，引力的减小少于斥力的减小，质点间相互作用力  $F$  随着质点间的距离的增加而增大，多余的引力抗御着外力的拆散作用；在  $r = r_m$  时，到达吸引力大于排斥力的极限点，质点间相互作用力  $F = F_{\max}$ ；此后，若进一步增大外力，使之超过质点间最大可能的相互作用力  $F_{\max}$ ，晶体将抵抗不住外力的拉伸而导致破碎或产生永久变形。这就是晶体粉碎过程的力学原理， $F_{\max}$  则是理论上的破碎强度。

与晶体相比，宏观固体内部质点的排列不规则，而且固体物料中往往存在有微裂纹，当物料受到各种外力作用时，除了原生裂纹的扩展外，还将产生新的裂纹并扩展。裂纹的产生和扩展虽然不能说是破碎的所有形式，但无疑是固体物料（尤其是脆性物料）破碎的主要过程。



$U$  为结合能  $F$  为相互作用力  $r_0$  为平衡时质点间距  
 $r_m$  为断裂时质点间距  $\frac{B}{r^n}$  为由斥力造成的结合能

$-\frac{Ae^2}{r}$  为由引力造成的结合能

图 6-2 晶体中质点间距和作用力及结合能的关系



### 1.2.2 粉碎机械的施力作用

粉碎过程就是粉碎设备的粉碎工具（如齿板、锤头、钢球等）或产生的高速气流对物料施力使其粉碎的过程。物料被粉碎时所受到的作用力可归纳为挤压力、冲击力和剪切力（摩擦力）3种。粉碎机械对物料的施力作用很复杂，多数情况是若干种施力作用同时存在。根据施力种类的不同，物料粉碎可分为压碎、劈碎、切断、磨碎和冲击破碎等基本形式（图6-3）。

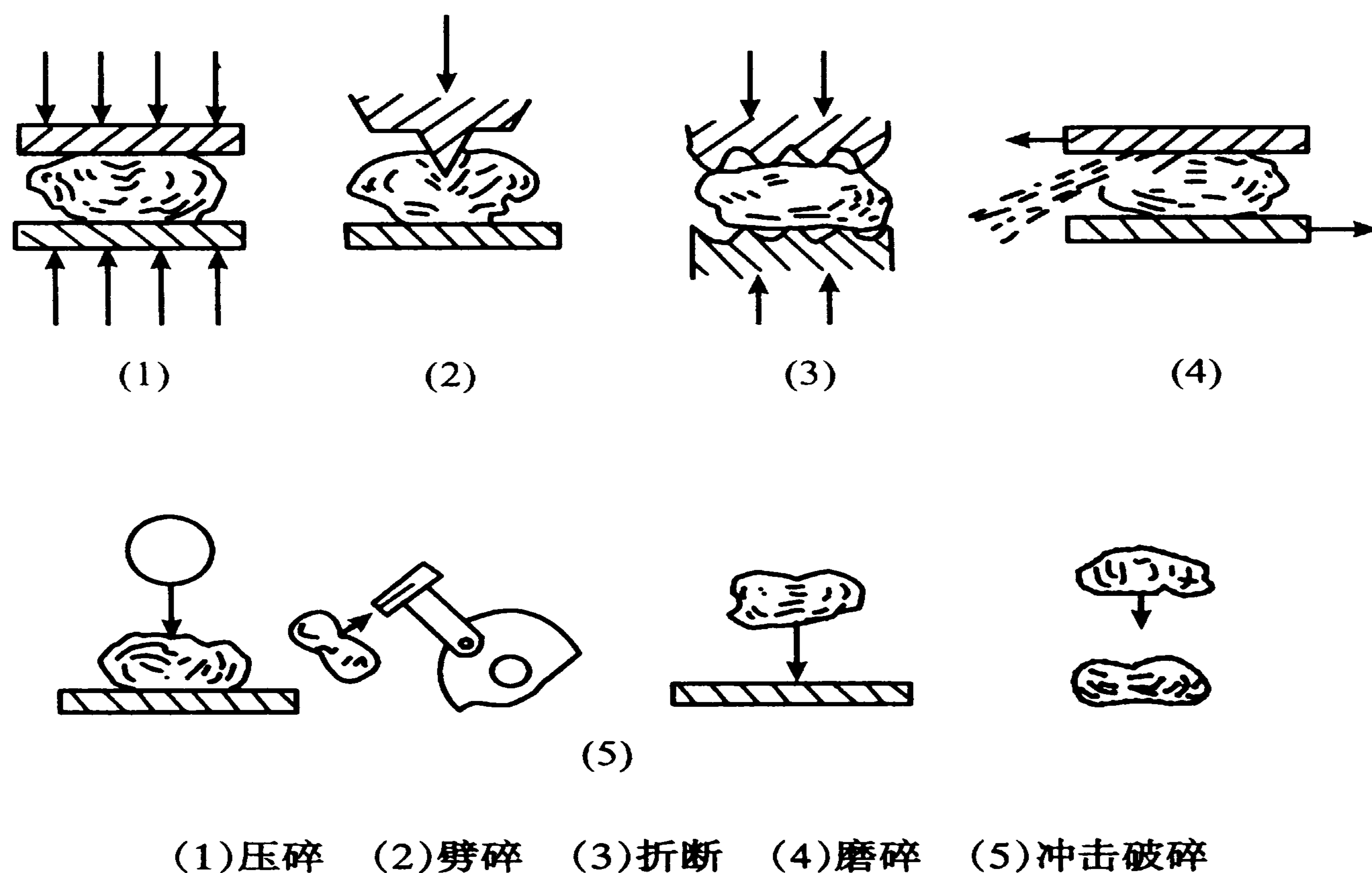


图 6-3 粉碎的基本方法

(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，由于劈裂平面上的拉应力达到或超过物料拉伸强度极限，物料沿压力作用线的方向被劈碎。

(3) 折断 被粉碎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就被折断。

(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，它对粉碎脆性物料最有利。



### 1.2.3 物料的力学性质

由粉碎过程的力学原理可知，结构不同的物料在力学性质上存在差异，理论上的破碎强度  $P_{\max}$  不同，粉碎时的阻力也不同。因而，欲达到相同的粉碎度，就要根据物料的应变与应力关系以及极限应力的不同，选择适当的粉碎方式与粉碎设备。物料的力学性质包括以下 4 个方面：

(1) 硬度 它是根据物料弹性模量大小来划分的性质，有硬软之分。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上来划分的性质，有强与弱之分，强的材料抵抗塑变的能力越大。

(3) 脆度 它是根据物料塑变区域长短来划分的性质，有脆性与塑性之分。

(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。

对任何一种物料，上述 4 种力学性质相互关联。一般来说，硬度高、脆性小、韧性大的物料，其强度和粉碎时的阻力往往也较大。选择粉碎方法时，须以物料的力学性质与所要达到的粉碎度为依据，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。

### 1.2.4 粉碎能耗假说

粉碎物料时，粉碎工具对物料颗粒施力，当作用力超过颗粒之间的结合力时，颗粒被粉碎。外力做的功称为粉碎能耗。外力做的功主要消耗于以下 6 个方面：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粉碎产品新增表面积的表面能；④颗粒表面结构发生变化所消耗的能量；如位错、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研磨介质之间的摩擦、振动及其他能耗。

研究工作者曾经对球磨机的能耗进行了测定分析，发现输入的能量的大部分以热的形式散发（表 6-1）。

表 6-1 球磨机粉碎能耗的分析

能耗类别	功率/kW	占能耗的比例/%
轴承、齿轮等机械传动的能耗	57	12.3
单位时间内粉碎产品带走的热	222	47.6



续表

能耗类别	功率/kW	占能耗的比例/%
单位时间内筒体辐射的热	30	6.4
单位时间内气流带走的热	144	31.0
单位时间内新生表面的表面能	3	0.6
其他能耗:		
磨矿介质的摩擦	5	} 2.1
磨矿介质温升散热	2	
振动、水分蒸发及其他	3	
总 计	466	100

由于粉碎过程比较复杂,受影响的因素较多,直到现在,人们尚未彻底认识粉碎机理,也无法对给定的物料减小粒度所需要的能量做出精确的定量计算。然而,经过近百年的研究,关于粉碎能耗与给料和产品粒度之间的关系,已经提出多种假说,其中比较著名的有表面积假说、体积假说和裂缝假说3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。

#### 1.2.4.1 表面积假说

该假说是由 P R Von Rittinger 提出的。鉴于物质表面层分子与内部分子的性质的差异,欲将固体内部的分子移到表面层(或者说欲增大表面积)时,就必须克服相内分子之间的相互作用力而消耗能量。粉碎的过程,就是增大表面积的过程,而且对于一定量的物质来说,粉碎度越高,表面积的增量越大,所要消耗的能量就越多。Rittinger 提出的所谓“表面积假说”,表达的就是粉碎能耗与粉碎后物料的新生表面积成正比的关系或粉碎单位质量物料的能耗与新生的比表面积成正比。具体地,将调和平均粒度为  $\bar{d}_1$  的物料粉碎成调和平均粒度为  $\bar{d}_2$  的颗粒,所消耗的能量为:

$$\begin{aligned}
 E &= K_1 \Delta S = K_1 (S_2 - S_1) = K_1 \frac{6}{\rho} \left( \frac{1}{\bar{d}_2} - \frac{1}{\bar{d}_1} \right) \\
 &= K_0 \left( \frac{1}{\bar{d}_2} - \frac{1}{\bar{d}_1} \right) \quad (6-3)
 \end{aligned}$$

式中:  $E$  为粉碎能耗;  $\Delta S$  为物料经粉碎后表面积的增量;  $K_1$ 、 $K_0 \left( = K_1 \frac{6}{\rho} \right)$  为比例常数;  $\rho$  为物料的密度。



Rittinger 假说认为粉碎能耗同物料在磨碎时的表面积增量成正比关系，这并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，在全部粉碎能耗中，新生面积的表面能仅占有很小的比例，而物料粉碎时消耗的表面能、变形能、摩擦损失能耗、颗粒表面结构及内部结构变化所消耗的能量以及噪声、热能等的总和也是与粉碎后表面积的增加成正比关系的。

#### 1.2.4.2 体积假说

体积假说由基克和俄国的 Кирличев 首先提出。该假说认为，物料粉碎所消耗的能量与颗粒的体积成正比；粉碎后颗粒的粒度也与过程的能耗成正比例减小。按体积假说可推导得粉碎能耗与给料及破碎产品粒度之间的关系为：

$$E = K_1 \lg \frac{\bar{d}_1}{\bar{d}_2} \quad (6-4)$$

式中： $E$  为粉碎能耗； $K_1$  为比例系数； $\bar{d}_1, \bar{d}_2$  为粉碎前后的颗粒粒度（几何平均粒度）。

实践证明，表面积假说和体积假说分别适用于不同的粉碎过程。表面积假说对于磨碎（粉碎产品的粒度在 0.01~1 mm 之间）的能耗的计算是较为适用的。体积假说适用于粉碎产品粒度大于 10 mm（粗碎和中碎）的过程。这是因为，对于不同类型的粉碎而言，物料性质的变化规律是不一样的。对于粗碎和中碎来说，粉碎产品的粒度较大，颗粒的表面积增加不显著，因而表面能和表面及颗粒内部结构变化等消耗的能量相对较小，局部破碎作用也是次要的，而消耗于物料的变形和粉碎机械传动机构的摩擦等能耗都与颗粒体积成正比，所以用体积假说来计算破碎能耗较合适。

#### 1.2.4.3 裂缝假说

如上所述，表面积假说适用于微粉碎和超微粉碎，体积假说适合于粗中粉碎，而介于两者之间的粉碎产物粒度在 1~100 mm 范围内的，按两种假说计算的误差都较大。为此，F C Bond 从实验出发提出了下列计算的公式

$$E = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{d_{2(80)}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{1(80)}}} \right) \quad (6-5)$$

式中： $E$  为粉碎 1 kg 物料的能耗； $W_i$  为功指数； $\sqrt{d_{2(80)}}$ 、 $\sqrt{d_{1(80)}}$  分别为粉碎产品



和给料相当于细粒累计含量为 80% 的粒度, 为  $\mu\text{m}$ 。

F C Bond 在提出此式时, 还阐明以下几点:

① 粉碎发生之前, 外力对颗粒所做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破碎。因此, 粉碎能耗与裂缝长度成正比。颗粒的裂缝长度既与颗粒体积有关, 也与颗粒面积有关。粉碎能耗  $E$  可假设正比于  $d^{2.5}$ , 即

$$E \propto \sqrt{V \cdot A} \propto \sqrt{d^3 \cdot d^2} \propto d^{2.5}$$

② 功指数  $W_i$  可看做是从粒度无限大 ( $d_{1(80)} \rightarrow \infty$ ) 粉碎至粒度为  $100 \mu\text{m}$  时每单位质量料物所消耗的能量:

$$E = 10 W_i \left( \frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = W_i \quad (6-6)$$

功指数  $W_i$  在一定程度上反映了物料粉碎的难易程度 (称为可碎性或可磨性)。

③ 对于同一物料, 功指数  $W_i$  只适用于一定的粒度范围。这是因为随着物料粒度的减小, 颗粒内部的缺陷和裂纹的数目将减小, 物粒呈现更高的强度高, 粉碎更为困难。此外, 当粒度减小时, 从沿着物料的晶体或质点的界面发生破碎, 转变为从晶体或质点内部发生破碎, 粉碎阻力将增加,  $W_i$  值也相应增大。

④ 对于单位质量的物料, 从假想粒度为无限大破碎至粒度为  $d_{80}$  的能耗为  $10 W_i / \sqrt{d_{80}}$ , 破碎至粒度为  $D_{80}$  的能耗为  $10 W_i / \sqrt{D_{80}}$ 。两者之差为单位质量物料从粒度为  $D_{80}$  粉碎至粒度为  $d_{80}$  所需的功, 如式 (6-6) 所示。

#### 1.2.4.4 粉碎能耗的统一公式

从上述几种能耗假说可知, 粉碎过程的能耗总是与粉碎前后颗粒的粒度密切相关的。1957年, R I Charles 提出: 物料颗粒粒度  $d$  发生微小变化时所需的能量是粒度的函数, 其数学表达式为

$$dE = - K \frac{d(d)}{d^n} \quad (6-7)$$

式中:  $dE$  为颗粒粒度减小  $d(d)$  时的粉碎能耗;  $K$  为比例常数;  $n$  为效率系数; “-” 为能耗是与粒度增量的方向相反的。

将式(6-7)积分, 得:



$$E = \int_{d_1}^{d_2} K \frac{d(d)}{d^n} \quad (6-8)$$

分别以  $n = 2, 1$  和  $1.5$  代入式(6-8),可积分得

$$E_1 = K \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)$$

$$E_2 = K \lg \frac{d_1}{d_2}$$

$$E_3 = 2K \left( \frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right)$$

显然,这3个式子就是 Rittinger、Kick 和 Bond 表达式。由此可见,取不同的  $n$  值,式(6-8)包括了 Rittinger、Kick 和 Bond 三假说。

一般,对于  $n > 1$ ,积分(6-8)式,得

$$E = \frac{K}{n-1} \left( \frac{1}{d_2^{n-1}} - \frac{1}{d_1^{n-1}} \right) \quad (6-9)$$

实际上,  $K$  和  $n$  都与颗粒粒度或比表面积有关,也与粉碎方式以及粉碎机理有关。所以,公式中  $K$  不是惟一的,  $n$  不仅仅限于 1, 1.5 或 2, 正确的取值应该通过试验来确定。

## 2 粒度分布与测定

在粉碎工程中,物料(包括给料和产品)的粒度和粒度特性的定性和定量的描述是一项基本内容。物料的粒度分布是评价粉碎工艺和设备性能的重要参数,也是选择分级工艺和设备的基本依据之一。对于物料的应用来说,颗粒的大小及其粒度的分布是重要的性能指标之一。

### 2.1 颗粒群的粒度分布

在任何颗粒群中,不仅各单颗粒的形状不可能完全一样,其粒度范围也相当



宽，常显示出一定的粒度分布。为研究粒度组成特性对颗粒群性能的影响，就必须测量并定量地表示粒度分布。

粒度组成特性的表示方法很多，有列表法、图解法和函数法。

列表法可将测定和分析所得的结果精确地罗列出来，但不易一目了然。

图解法就是将测定和分析所得的结果绘制成能直观地表达颗粒群的粒度组成特性的曲线，最常用的有频率分布曲线和累计分布曲线两种，如图6-4所示。频率分布曲线标绘的是某一粒度范围的颗粒的质量分率与其平均粒度的关系；累计分布曲线则标绘出等于及小于某一粒度的颗粒所占的质量分率。

[例6-1] 实验室以500 g某喷雾干燥产品为试样进行筛分分析，所用的筛号、筛孔尺寸及筛分后称取各号筛面上的颗粒筛余量列于例6-1附表。试作该颗粒群的频率分布曲线和累计分布曲线，并分别计算出各部分颗粒的以比表面积为基准的平均直径（设颗粒为球形）。

解：将各号筛余量除以试样总量（500 g）得筛余量质量分率  $x_i$ ，列于表6-1中第4列。

某筛号的筛余量质量分率为该号筛子以下的全部筛余量质量分率  $x_i$  之和，此即为累计质量分率，计算结果列入附表中第5列。每号筛面上颗粒的平均直径取该号与上一号筛孔尺寸的算术平均值，列入附表第6列。以第4，6两列数据作图得到频率分布曲线；以第5，6两列数据作图得到累计频率分布曲线（图6-4）。

例6-1 附表

筛号	筛孔尺寸/ mm	筛余量/ g	筛余量质 量分率 $x_i$	累计质量分率	颗粒的平 均直径
14	1.651	10.00	0.02	1.00	1.410
20	1.168	25.0	0.05	0.98	1.001
28	0.833	50.0	0.10	0.93	0.711
35	0.589	90.0	0.18	0.83	0.503
48	0.417	130.0	0.26	0.65	0.356
65	0.295	120.0	0.24	0.39	0.252
100	0.208	75.0	0.15	0.15	0.104

函数法是用数学的方法整理粉碎产物的粒度分析资料，归纳出足以概括并反



映它们的分布规律的数学表达式。这种数学表达式一般称为粒度特性方程式。粒度特性方程式为粒度分布数据提供了简单的数学表达形式，便于进行数学计算或数学分析以及用电子计算机进行计算。由于粒度特性方程式可以概括复杂的粒度分析数据，早期的研究工作中就曾用它计算比表面积、求平均粒度和推导计算部分筛分效率的公式等。近年来又用它和粉碎所耗的能量相联系，并用于粉碎过程数学模型的研究。

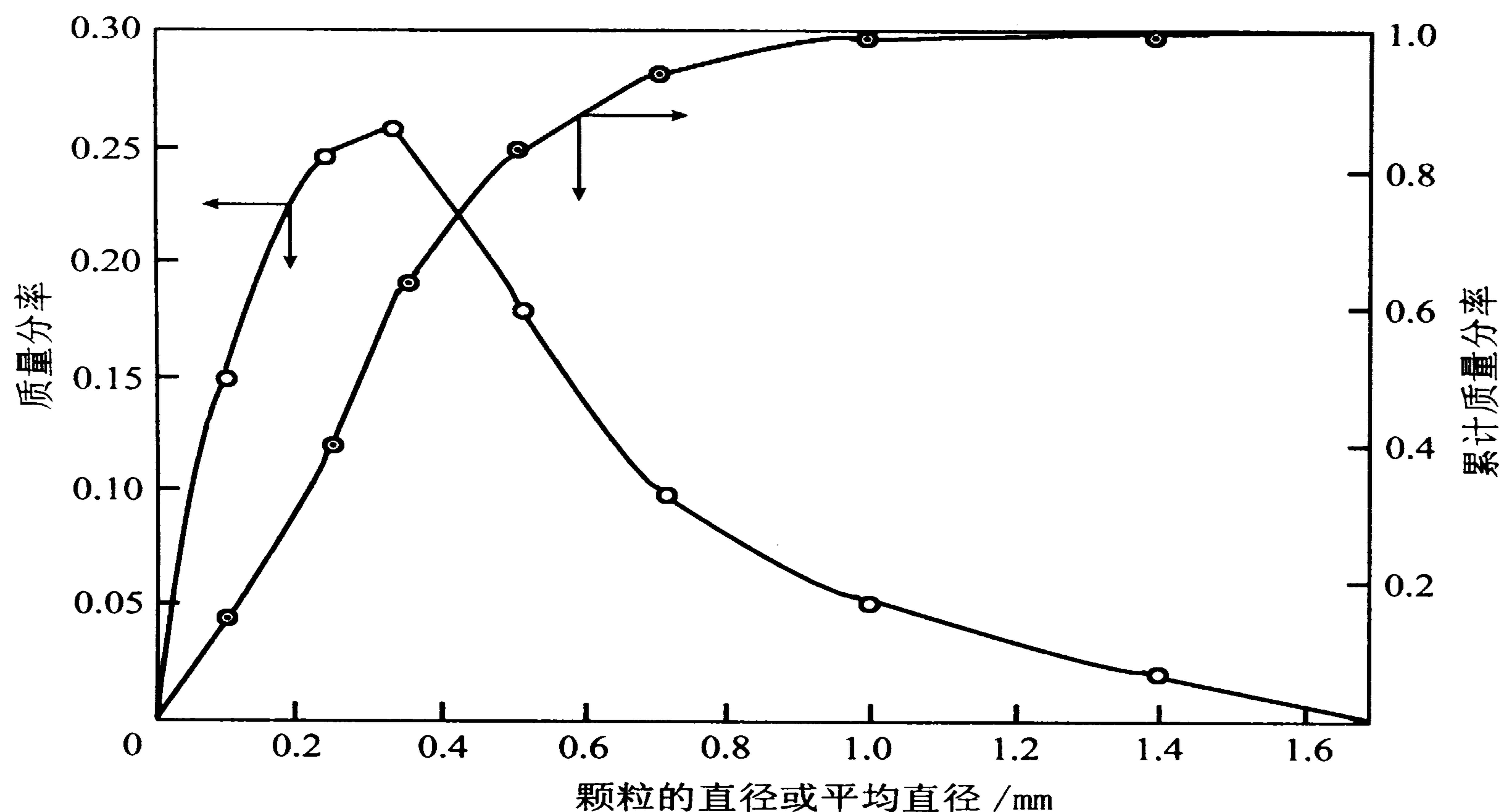


图 6-4 颗粒大小的频率分布曲线和累计分布曲线

## 2.2 粒度测定方法

粒度是粉体物料的重要特性之一，在粉碎工程的研究以及粉体产品的生产中，常常要用到物料的平均粒度、粒度组成和粒度分布等数据。为获得这些数据，就要掌握粒度测定方法。换言之，粒度测定方法在粉碎工程乃至粉体物料的研究中起着必不可少的作用。

用来测定固体物质粒度的方法很多，最简单的也是最早且应用最广的是筛分法。但是，筛分分析有一定的局限性。传统的丝织筛的筛分结果受颗粒的形状的影响较大，且一般认为筛析的分析下限是 0.038 mm；采用电沉积筛网，目前可



筛分至  $5\ \mu\text{m}$  的物料,但这种技术存在筛析时间长和经常发生堵塞两个严重的缺点。近年来,科学技术的迅猛发展为粉体粒度的测定提供了许多新的方法和仪器,如沉降法、显微镜法(包括光学显微镜和电子显微镜)、库尔特计数器,用于测定比表面积的透过法和吸附法等。这些测定方法的基本原理、适用范围和特点大致如表 6-2 所示。

表 6-2 粉体物料粒度测定方法

方法或仪器名称	基本原理	测定范围/ $\mu\text{m}$	特点	
丝网筛	通过一组筛子将样品分级,称重各粒级,可得粒度质量累积分布	38~1 000	方法简单、快速,可得平均粒径和粒度分布,分干法和湿法两种筛析法	
电沉积筛	物料通过电成型的微孔筛将样品分级	5~56	近年来开始在工程技术上使用的一种新型筛析仪器	
重力沉降	移液管法	分散在沉降介质中的样品颗粒,其沉降速度是颗粒大小的函数,通过测定分散体因颗粒沉降而发生的浓度变化,测定颗粒大小和粒度分布	1~100	仪器便宜、方法简单,安德逊移液管法应用很广。缺点是测定时间长,分析、计算的工作量大
	比重计法 (密度计法)	利用比重(密度)计在一定位置所示悬浊液比重(密度)随时间的变化测定粒度分布	1~100	
	浊度法	利用光透过法或 X 射线透过法测定因分散体浓度变化引起的浊度的变化,测定样品的粒度分布	0.1~100	自动测定,数据不需处理便可得到分布曲线,可用于在线粒度分析
	天平法	通过测定已沉降下来的颗粒的累积质量测定粒度分布	0.1~150	自动测定和自动记录,但仪器较贵,测定小颗粒,误差较大
离心沉降	在离心力场中,颗粒沉降也服从斯托克斯定律,利用圆盘离心机使颗粒沉降,测定分散体的浓度变化;或者使样品在空气介质离心力场中分级,从而得到粒度分布	0.01~30	测定速度快,是超细粉体颗粒的基本粒度测定方法之一,可得到颗粒大小和粒度分布,是较先进的测定方法之一,用途广泛	



续表

方法或仪器名称	基本原理	测定范围/ $\mu\text{m}$	特点	
库尔特计数器	悬浮在电解液中的颗粒,通过一小孔时,由于排出了一部分电解液而使液体电阻发生变化,这种变化是颗粒大小的函数,电子仪器自动记录下粒度分布	0.4~200	速度快、精度高、统计性好,完全自动化,近年来应用较广,可得到颗粒粒度和粒度分布	
激光粒度分析仪	根据夫琅和费衍射原理测定颗粒粒度和粒度分布	2~176	自动化程度高,操作简单,测定速度快,重复性好,可用于在线粒度分析	
显微镜	光学显微镜	把样品分散在一定的分散液中制取制片,测颗粒影像,将所测颗粒按大小分级,便可求出以颗粒个数为基准的粒度分布	1~100	直观性好,可观察颗粒形状,但分析的准确性受操作人员主观因素影响程度大
	扫描和透射电子显微镜	与光学显微镜方法相似。用电子束代替光源,用磁铁代替玻璃透镜。颗粒用显微镜照片显示出来	0.001~10	测定亚微米颗粒、粒度分布和颗粒形状的最基本方法,广泛用于科学研究,仪器昂贵,需专人操作
透过法	把样品压实,通过测定空气流通过样品床时的阻力,用柯增尼——卡曼理论计算样品的比表面积,引入形状系数,可换算成平均粒径	0.01~100	仪器简单,测定迅速,再现性好,但不能测定粒度分布数据。另外,测定时样品一定要压实	
BET法	根据BET吸附方程式,用测定的气体吸附量求比表面积,引入形状因素,可换算成平均粒径	0.003~3	这是常用的比表面积测定法,再现性好,精度较高,但数据处理较复杂	

### 3 粉碎方法

为适应待处理物料在形态和物性上的多样性以及对粉碎成品规格的不同要求,粉碎的方法原理及粉碎设备的种类是多种多样的。粗粉碎过程常用颚式压碎



机、回转压碎机等重型设备，在普通食品生产上不常见。在普通食品生产过程中，为获得糖类、香料、胡椒、谷物等粉粒状的、干燥的或含少许水分的脆性物料而常用的粉碎方法有：以冲击力或挤压力为主要粉碎力的滚筒轧碎法、锤式粉碎法、盘击式粉碎法、气流式超微粉碎法等；以摩擦力或剪切力为主要粉碎力的研磨粉碎法；对于具有纤维结构且含相当数量的液体的肉类、鲜果和蔬菜类的物料，则常用切割碎解法。

现代工程技术的发展，对粉体物料在颗粒细度、粒度分布、颗粒外形以及产品纯度等方面有了更高的要求，特别是面对将对 21 世纪的经济和社会产生巨大影响，且有可能引导下一个工业革命的纳米科学与技术的开发研究和迅速发展，对粉碎工程提出了更高的要求。于是，各种超微粉碎技术和设备便应运而生了。

### 3.1 高速机械冲击微粉碎

高速机械冲击微粉碎是依靠高速旋转的工件（棒、锤、叶片等）撞击和打击颗粒，并使其在转子与定子间、物料颗粒与颗粒间产生高频度的相互强力冲击、剪切而粉碎。具体有锤击式微粉碎、盘击式微粉碎、叶轮式超细冲击磨等。

#### 3.1.1 锤击式微粉碎

锤击式微粉碎是利用高速旋转的锤头产生的强大冲击力，使物料受锤头离心力作用冲向内壁时产生的冲击、摩擦和剪切力以及颗粒间相互强烈的冲击、摩擦和剪切作用力将物料粉碎。经粉碎后的物料，平均粒度可达到  $40\ \mu\text{m}$  以下，属于微粉碎范畴。

如图 6-5 所示，锤击式粉碎机的主轴上装有几个钢质圆盘式的转动件，盘上又装有硬钢锤头，锤头多以铰链联接于转动件，也有刚性联接于转动件者。锤头各式各样，有矩形断面的锤棒，有较薄的锤片，有的锤片很薄就成为刀状。锤头的安放位置有垂直于主轴的，也有平行于主轴的。锤式粉碎机的机壳内面通常是平滑的，但也有具有一定形状的，可使物料与机壳发生撞击而粉碎。锤式粉碎机机壳下部有格栅或筛网，锤头与格栅间的物料就受到很大的摩擦力。经粉碎后的细小颗粒，从格栅缝隙或筛网中卸出。格栅缝隙有各种形式，视物料性质而定，且格栅或筛网的空隙大小决定了制品粒度的上限，因而可以通过调节缝隙的大小来限定一定的粉碎比。格栅或筛网适用于非常干燥的制品或者如水果之类含水分高的物料，对于中间状态的物料，易产生堵塞现象，不宜使用。

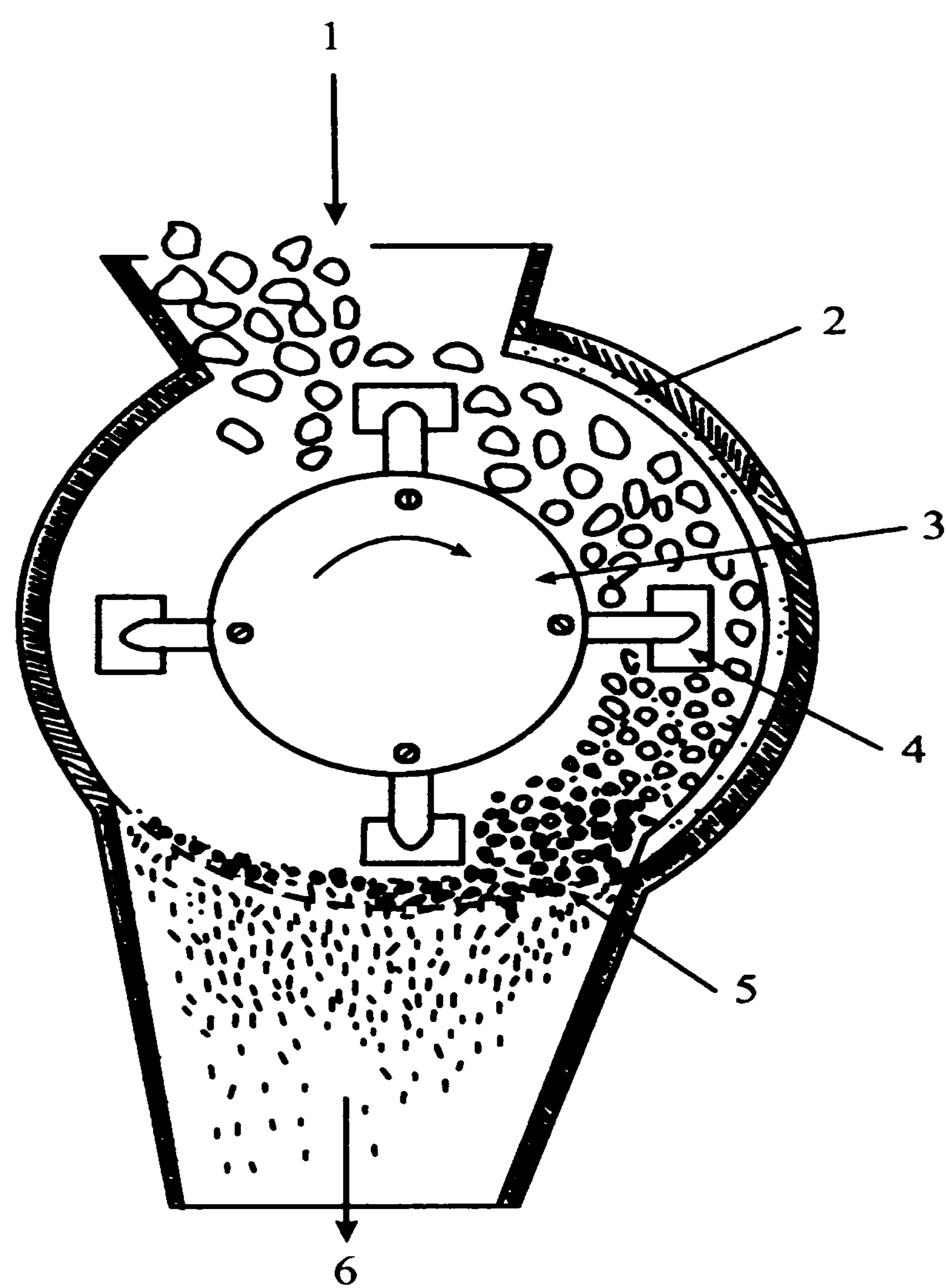


### 3.1.2 盘击式微粉碎

盘击式粉碎机的工作原理与锤击式粉碎机相似，它是由互相靠近的两个圆盘组成，每个圆盘上装有很多依同心圆排列的齿状、针状或棒状的“指爪”，而且一个圆盘上的每层指爪都伸入到另一个圆盘的两层指爪之间。这样，当两个圆盘作相对运动时，除了指爪对物料的冲击粉碎力外，还产生分割或拉碎作用，所以最适合于较韧的纤维质物料的粉碎。

盘击式粉碎机的式样颇多，可从两大方面加以比较。

从圆盘的运动情况看，可以分为两种形式。参阅图 6-6。一种仅一盘转动，另一盘固定；另一种则两盘均转动。后一种形式又可分为两种情况：其一两个圆盘同时转动但转速不等（德国 Apline 公司生产的 CW 型和 UPZ 型宽腔冲击磨亦属此例）；另一种两个圆盘依相反的方向转动。



1. 进料口 2. 挡板环 3. 旋转件  
4. 锤头 5. 筛网 6. 出料口

图 6-5 锤击式粉碎机示意图

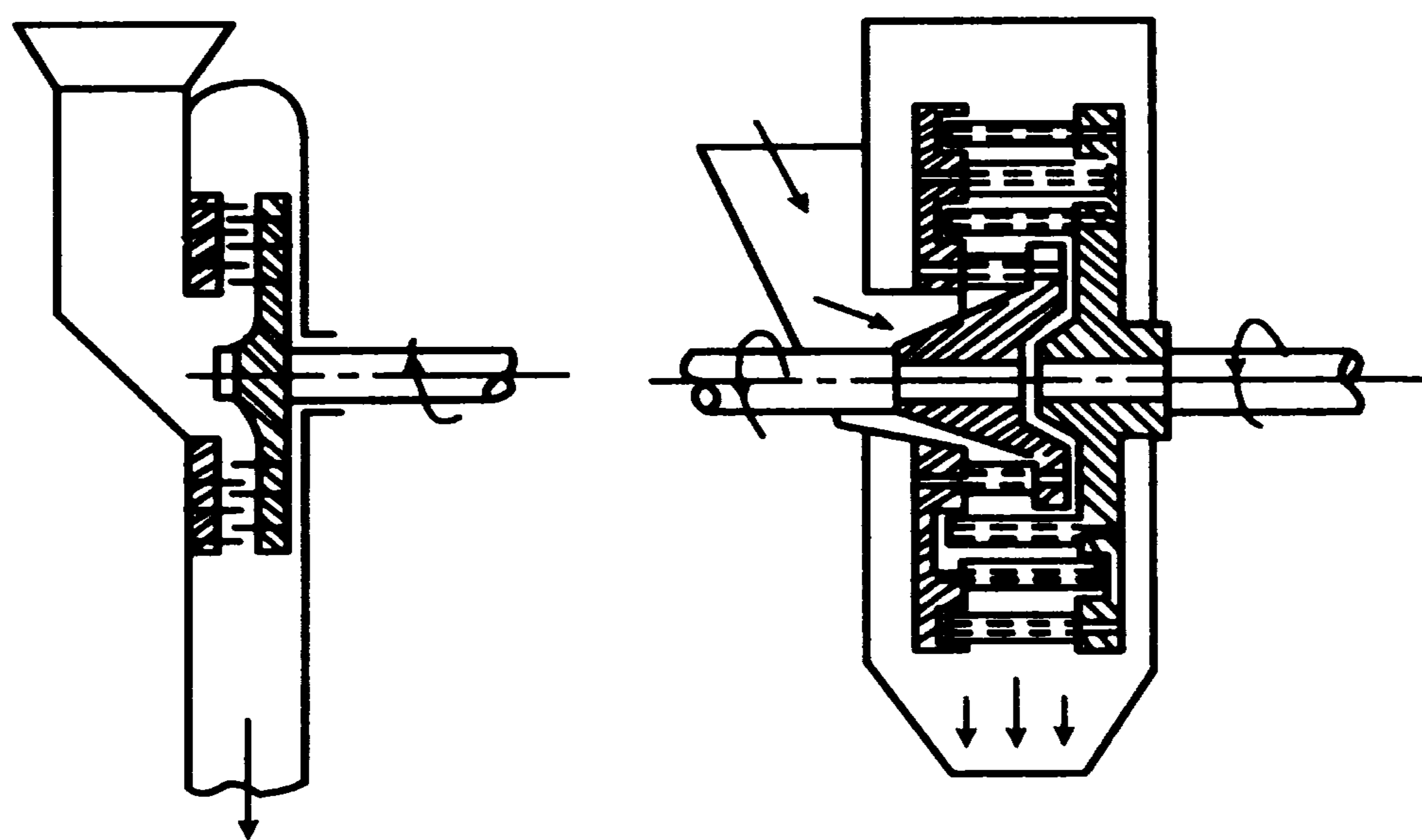


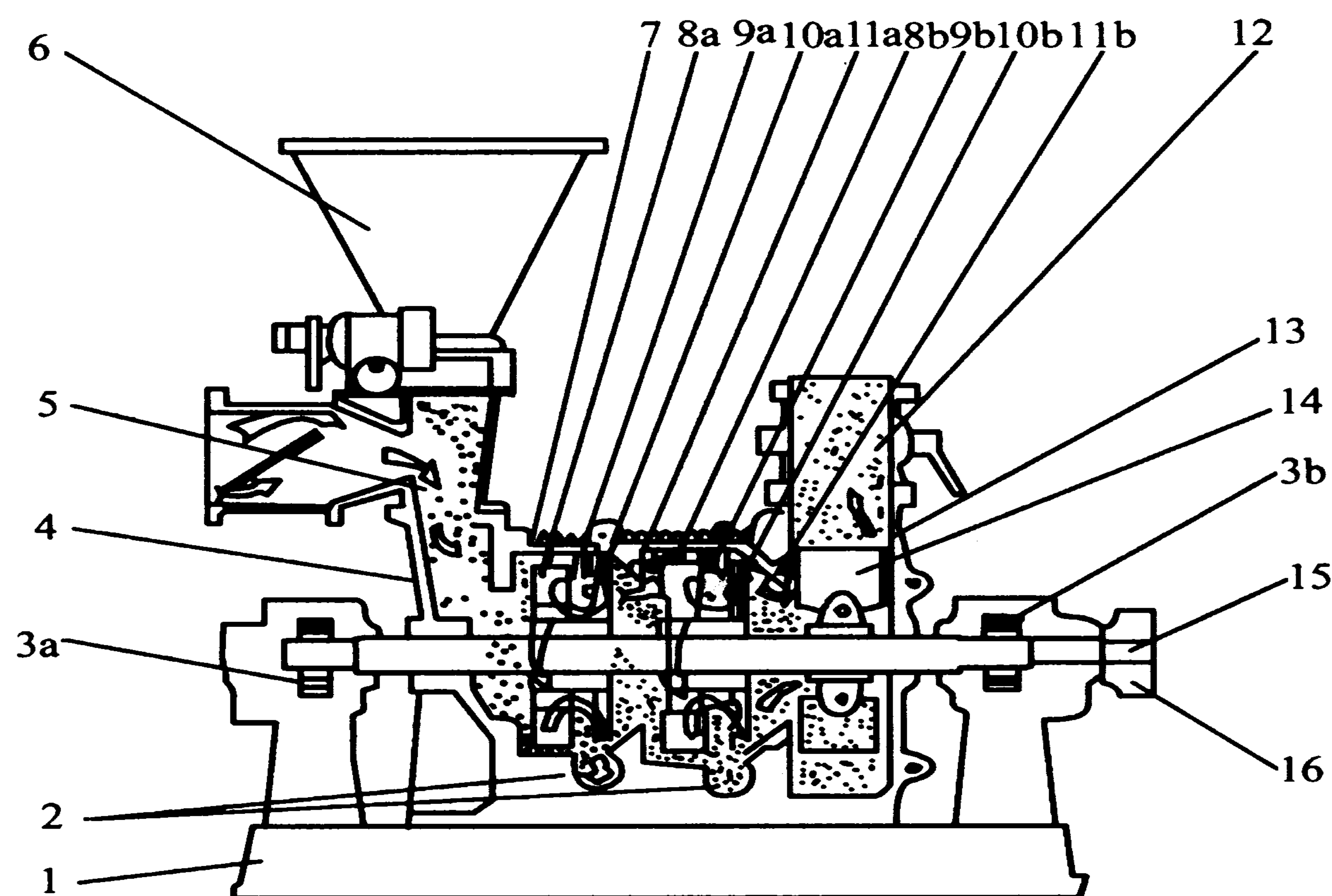
图 6-6 盘击式粉碎机示意图



盘击式粉碎机的“指爪”的形状也是多种多样的，有短的或长的圆柱状，有形似刀齿状的；还有的为使物料在离心力作用下向外周移动的同时能产生逐级粉碎的作用，设计成内层指爪形状及其相互距离与外层不同的结构。

### 3.1.3 叶轮式超细冲击磨

叶轮式超细冲击磨同时具有锤（刀）式和气流式粉碎机的特点，其结构和工作原理如图 6-7 所示。它是由水平轴上设置的两个串联的粉碎—分级室、风机、定量加料机（圆盘式或螺旋式）等组成。每一个粉碎—分级工段都设有带撞击叶片的粉碎叶轮和定子衬套以及分级叶轮。开机运行时，将小于 10 mm 的物料颗粒由加料器定量连续地加至第一粉碎室内，由于第一段的粉碎叶轮的 5 支叶片有 30° 的扭转角，旋转时形成旋转风压，而第二段的分级叶轮的 5 支叶片不具有扭转角，旋转时形成气流阻力，粉碎叶轮和分级叶轮旋转时形成旋转式的循环气流，使颗粒反复地受强烈的冲击、碰撞、摩擦和剪切，同时因受离心力的作用冲向内壁而与器壁发生撞击、摩擦和剪切作用，这样一来，较粗的颗粒就被粉碎成



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

图 6-7 叶轮式超细冲击磨



细粉。细粉在分级叶轮端部斜面和衬套之间的间隙中也进行有效的粉碎。但最有效的粉碎作用发生在两个叶轮之间的滞流区。这是因为叶轮高速旋转时物料被急剧搅拌，导致了颗粒间的剧烈冲击、摩擦和剪切作用。

由于上述作用，粉粒被粉碎至数十到数百微米，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；细颗粒则随气流趋向中心部分，随鼓风机产生的气流带人第二粉碎室内。

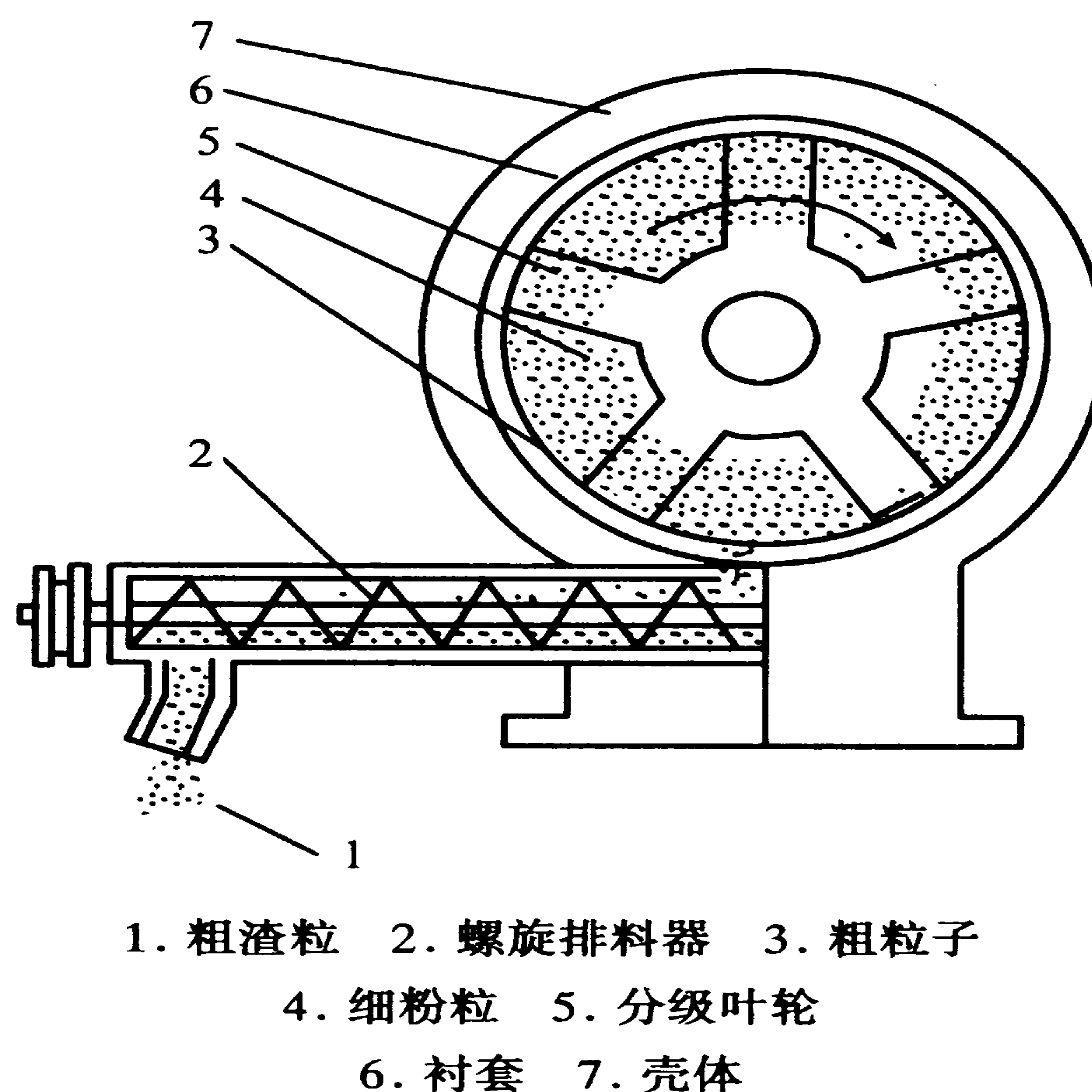
分级是由分级叶轮所产生的离心力和隔环内径之间所产生的气流吸力来决定的，若颗粒受的离心力的作用大于气流吸力的作用，则被滞留下来继续被粉碎；若颗粒受的离心力的作用小于气流吸力的作用，则被吸向中心随气流进入第二粉碎室。

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级叶轮直径比第一粉碎室的大，且粉碎叶轮的叶片的扭转角更大（ $40^\circ$ ），所以造成的风压更大，颗粒之间相互冲击等作用力因此更大，粉碎效果就得以增强。同时因粉碎室直径增大而使得通过该室的风速减缓，分级精度提高，这样可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。

由图 6-7 可见，该粉碎机的两个粉碎室的底部都设有排渣装置。图 6-8 反映的是排渣装置的工作原理。当物料中含有硬度和相对密度大的杂质时，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最后降到粉碎室底部排渣孔，由排渣装置的螺旋器不断地排出机外，从而提高了成品的质量和纯度。当物料不含有杂质时，该装置也可将粗颗粒排出机外，以防止粉碎机因粗颗粒的积累以及新物料的不断加入而超载，保证成品粒度的大小符合规格。但是，若要粉碎两种以上组分的混合物，且各组分密度相差较大，则不宜采用排渣机构来排除杂质。

叶轮式超细冲击磨产品粒度的调节方法：

(1) 风量 调节粉碎机出口端的蝶阀可控制风量大小。风量增大时，产品粒



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

图 6-8 排渣原理示意图



径随之增大，产量也随之增高，反之亦然。

(2) 隔环直径 隔环直径大小决定颗粒在粉碎室内停留时间的长短。隔环直径越大，颗粒停留时间越短，粉碎产品粒度越大，产量越高；反之亦然。

(3) 分级叶轮与隔环间隙 间隙减小，产品变细；间隙增大，产品变粗。当允许产品中含一定量的粗颗粒时，可将间隙调大些。

(4) 排渣量 根据物料中含杂质情况，通过调节排渣装置的排渣孔大小来控制排渣量，可提高产品质量和纯度。

叶轮式超细冲击磨的特点是：①由于采用两级串联粉碎装置，故粉碎效率高，能耗较低；②产品粒度细（平均粒径 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ ）；③机内设有排渣装置可将难于粉碎的杂质排除，产品纯度高；④负压操作，减少了粉尘对环境的污染；⑤调节与操作简单方便。

## 3.2 研磨介质粉碎

研磨介质粉碎就是利用运动的研磨介质（如球、圆柱体、立方体、棒等）对颗粒状物料施加冲击、研磨、摩擦、剪切等作用使物料粉碎。环磨机、振动磨和搅拌磨等都是实施介质粉碎的常用设备。

### 3.2.1 旋转球（棒）磨式微粉碎和超微粉碎

旋转球（棒）磨式微粉碎和超微粉碎是一种历史比较悠久，至今仍被广泛应用的一种粉碎技术。该粉碎技术的特点是：粉碎比大；结构简单、机械可靠性强，易磨损的零件容易检查和更换；工艺成熟，可标准化；可以适应不同情况下的操作如粉碎与干燥、粉碎与混合同时进行等；既可用于干法粉碎，又可进行湿式粉碎。但是，该粉碎过程的粉碎效率低，单位产量的能耗较高，研磨介质容易磨损，运转时噪声较大。它是利用与物料颗粒一起运动的球形或棒状的研磨介质对颗粒状物料施加冲击、研磨、摩擦、剪切等作用达到粉碎目的。

#### 3.2.1.1 球磨机的结构

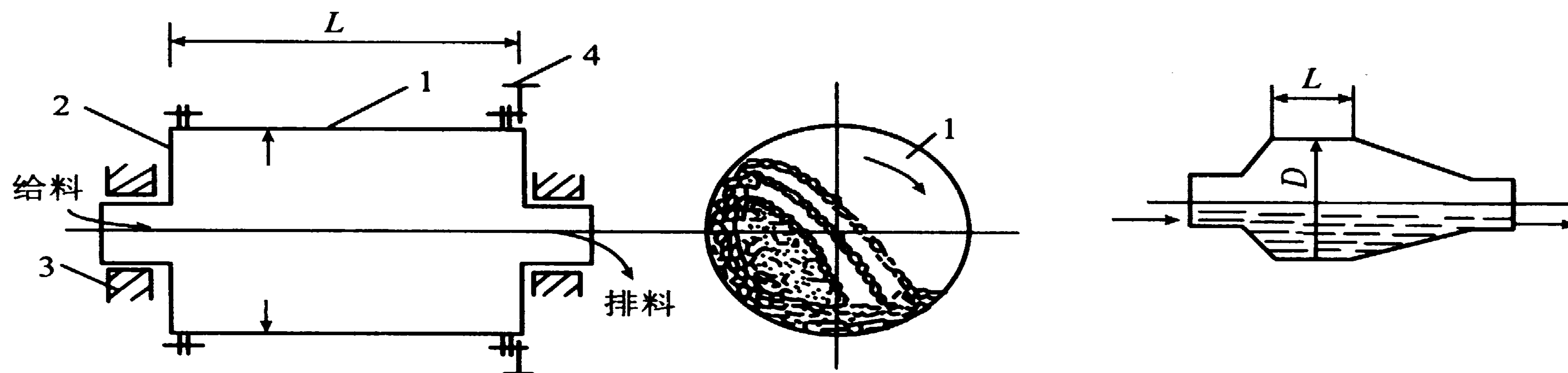
旋转球磨式微粉碎和超微粉碎所用设备为球磨机，它由筒体、给料、卸料、传动装置等部分构成，其中最主要的是装有研磨介质的筒体部分。

筒体部分由筒体、法兰盘、衬板、入孔盖构成。筒体用钢板卷制，为了防止研磨介质冲击及磨损，减少噪声，在筒体内衬橡胶板、树脂橡胶板、铸石板、陶



瓷板等；小型环磨机也有用瓷制的圆筒。

筒体多为圆柱形，如图 6-9 所示，随着圆柱筒体长度与直径的比值的不同分为：短筒环磨机 ( $L \leq 1.5D$ )；长筒球磨机 ( $L = 1.5 \sim 3D$ )；超长筒球磨机 ( $L = 3 \sim 6D$ ) (又称管磨机)；另有一种圆锥式球磨机，它由 2 个圆锥筒和 1 个中间短圆筒组成，短圆筒的长度 ( $L = 0.25 \sim 1D$ )。



1. 筒体 2. 端盖 3. 轴承 4. 大齿圈

图 6-9 球磨机筒体示意图

给料部分多用铸钢制成中空轴颈，在轴径内嵌有加料漏斗；卸料部分用中空轴颈、出料篦板构成；传动装置由减速装置、传动轴构成。

### 3.2.1.2 球磨机的粉碎原理及技术参数的确定

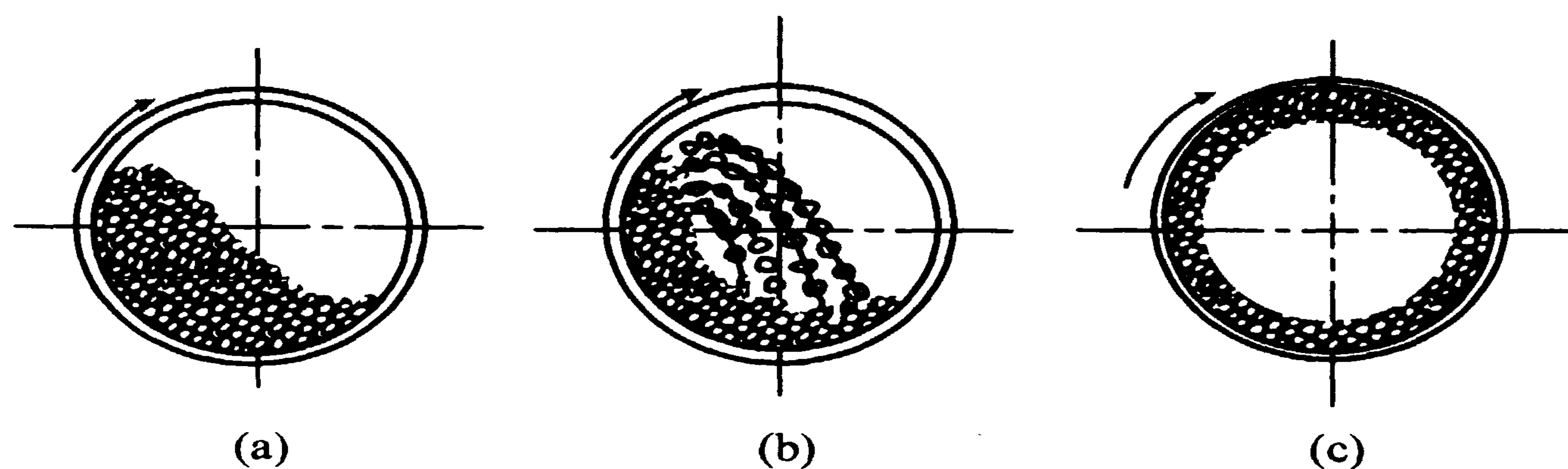
球磨机内装有许多小钢球（或瓷球等），当筒体按一定转速运转时，小球与物料一起，在离心力和摩擦力的作用下被提升到一定高度后，由于重力作用而脱离筒壁沿抛物线轨迹下落。然后，它们又被提升到一定高度，再沿抛物线轨迹下落，如此周而复始。处于研磨介质之间的物料，一方面受冲击作用而被击碎，另一方面由于研磨介质的滚动和滑动，对其产生研磨、摩擦、剪切等作用而被磨碎。

由球磨机的结构原理可知，对粉碎过程的生产能力和粉碎效率有影响的技术参数主要包括筒体转速、磨介尺寸、研磨介质的填充率和物料的水分等 4 种。

(1) 转速 筒体的转速大小决定着筒体内物料和研磨介质的运动状态和研磨作业的效果。如图 6-10 (a) 所示，当转速较小时，全部球荷被提升的高度较小，只向上偏转一定角度，其中每个小球都绕自己的轴线转动。当球荷的倾斜角超过介质（钢球或瓷球等）在球荷表面上的自然休止角时，介质即沿此斜坡滚落。介质的这种运动状态叫“泻落”。在泻落式状态工作的磨机中，物料在介质间主要受到磨剥作用，冲击作用很小，粉碎效率不高。如果磨机的转速足够高，介质边



自转边随筒体内壁作圆曲线运动上升至一定高度，然后纷纷作抛物线下落，这种运动状态叫抛落式，如图 6-10 (b) 所示。在抛落式状态工作的研磨机中，物料在圆曲线运动区受到介质的磨剥作用，在介质落下的地方，物料受到介质的冲击和强烈翻滚着的介质的磨剥作用，故此种运动状态，粉碎效率最高。当球磨机的转速超过某一限度时，介质就贴在筒壁上不再下落，这种状态叫离心运转，如图 6-10 (c)。发生离心运转时，物料也随筒体一起运转，既无介质的冲击作用，磨剥作用也很弱，粉碎几乎停止。



(a) 泻落 (b) 抛落 (c) 离心运转

图 6-10 研磨介质的运动轨迹

球磨机中最外层介质刚刚随筒体一起旋转而不下落时的球磨机的转速称为临界转速，用  $n_c$  表示。临界转速随球磨机大小（筒体直径和长度）而变。临界转速与球磨机直径的关系用下式表示：

$$n_c = \frac{42.3}{\sqrt{\Phi}} \quad (6-10)$$

式中： $n_c$  为球磨机的临界转速，r/min； $\Phi$  为球磨机的筒体直径，m。

应当指出的是，该式的推导过程作了一些理想化的假设，如设定球荷与筒体之间没有滑动。当球磨机筒体内的衬板突起较高、磨介充填率也较高时，这种假设比较符合实际。但若采用光滑衬板且磨介充填率较低时，球荷与筒体之间将发生相对运动，使球荷的实际转速低于筒体的转速。此时，即使球磨机的转速达到甚至略超过临界转速，球体的转速却有可能低于离心状态时的转速。由于这种相对滑动，球磨机的工作转速甚至可以选择大于临界转速，称为“超临界转速”的工作制度，它在一定条件下能提高球磨机的生产能力，但衬板的磨损和比能耗增加。这时，粉碎作用不仅来自钢球的抛射、冲击与研磨，而且来自最外层钢球与筒壁以及各层钢球之间由于相对运动所产生的研磨与压碎。

球磨机的实际工作转速 ( $n$ ) 与临界转速 ( $n_c$ ) 之比称为转速比 ( $\Psi$ )。一



般取  $P = 0.65 \sim 0.85$  之间。

(2) 磨介尺寸 球磨机中常用的研磨介质有钢球(密度 7.8),氧化锆球(密度 5.6),氧化铝球(密度 3.6),瓷球(密度 2.3)等。对于一定的粉碎系统,研磨介质的粒径、密度及研磨介质的填充率对于粉碎效率和制品质量都有影响。

研磨介质的尺寸大小,直接影响球磨机产品的粒度和粒度分布。一般情况下,进料颗粒越粗,配置的磨介尺寸也越大,产生的冲击和摩擦作用力越大,这样有利于提高产量,但粉碎产品的粒度也大。进料颗粒较细时,配置的磨介尺寸也较小,这样粉碎产品的粒度较小,粉碎效果较好,但产量较低。所以,适宜的研磨介质粒径,首先要视物料的性质,以及对产品粒度和粒度分布的要求而定,还应该考虑到球磨机的类型,其中主要考虑筒体直径、转速比、衬板寿命以及介质的价格等因素。

在实际应用中,常将各种尺寸的钢球按一定比例配合以达到最佳的优化组合。其原则是,粉碎产品的粒度要求越细,筒体直径越大,配比时小钢球的比例越大。小钢球对筒体衬板的磨损小,但价格高,使用寿命短;相反,大钢球对物料的冲击和摩擦力大,使用寿命长,且价格低,但同样质量下,大钢球的数目和对物料的粉碎次数比小钢球少,比表面积小,对筒体衬板的磨损大。

钢球的最大直径  $D_B$  可用以下两经验公式求算:

按最大给料粒度

$$D_B = iD^n \quad (6-11)$$

按最大给料粒度和粉碎产品粒度

$$D_B = 6 \lg d \sqrt{D} \quad (6-12)$$

式中: $D$  为最大给料粒度,mm; $D_B$  为钢球的最大直径,mm; $d$  为粉碎产品粒度,mm; $i, n$  为取决于物料性质的系数。对于水,通常分别取值 28 和  $1/3$ 。

球磨机开始运转时钢球的百分比的确定,有 2 种方法可供参考:

①根据进料(闭路粉碎时包括返回物料)的粒度分布,将这些粒级适当合并成 3 或 4 组,求出各粒级需要的钢球直径,使各种直径钢球的配比大致等于相应物料粒级的配比。

②根据进料粒度和经验数据选择若干种钢球直径,使每一种钢球的总面积相等,据此算出各种钢球的配比。

(3) 磨介充填率 磨介充填率,指的是球(棒)磨机内研磨介质所点截面积与筒体截面积的百分比值。在一定条件下,磨介充填率的提高,意味着进行粉碎的有



效钢球数目增多,球磨机粉碎物料的能力也相应提高。但是,如果磨介充填率过高的话,在抛射钢球的落点处钢球堆积过多,这将减缓钢球的冲击力,导致粉碎效率降低和能耗上升。此外,对于溢流型球磨机来说,磨介充填率太高则有可能从中空轴颈处排出。鉴于这些原因,球磨机内磨介充填率是有限度的,一般不超过50%。

干法粉碎时,由于混合于磨介之间的物料使磨介膨胀,物料易受磨介的阻碍使得轴向流动性较差,因此磨介充填率不宜过高,通常在28%~35%范围内。湿法粉碎,溢流型球磨机取值40%,格子型球磨机取值40%~45%(以45%居多)。

(4)物料的水分 球磨机干法工作时对物料的水分比较敏感,一般应小于2%,以防粉末粘连。对于干燥和粉碎相结合的操作,物料水分可达5%或更高些。

湿法粉碎时,料浆过浓的话会使磨介表面粘上一层较厚的料浆,减弱磨介的冲击力,料浆相对密度增加使钢球的浮力增大,有效相对密度减小;如过稀则黏附于磨介表面的料浆太少,导致产量和磨碎率下降,且由于细粒沉降较快而产生过粉碎。球磨机料浆的固形物含量通常在60%~82%(多数在65%~78%之间)之间,粗磨时取上限,细磨时取下限。

### 3.2.1.3 棒磨机

棒磨机的结构与球磨机很相似,只是用直径50~100 mm(特殊情况可达150 mm)的钢棒代替了球磨机中的球形研磨介质而已。棒磨机筒体长度与直径的比值一般为1.5~2,常采用溢流型、开口型和周边排料型等排料方式。棒磨机与球磨机相比,冲击力和摩擦仍是粉碎的主要作用力,但因转速取值较小,冲击力的作用较小。棒磨的特点是,棒与物料的接触是线接触而不是点接触,因而在大块与小块的混合料中大块料先受到冲击,而且因钢棒与钢棒之间保持平行,物料运行快、排料通畅,这样的粉碎较均匀且过度粉碎少。此外,由于棍棒的重量大,对于粘结性物料,不像小球那样易被物料粘成团而失去粉碎的作用,故适合于用来处理潮湿粘结性的物料。

棒磨机的转速比通常取0.60左右,此时棒式磨介的运动形式以泻落式为主。在棒磨机中,磨介充填率,干法时取35%,湿法取35%~40%;料浆固形物含量通常为70%,最高不超过78%~80%。

棒磨机常用的钢棒长度是有效筒体长度(筒体长度减去端盖衬板厚度的净长度)减去150 mm。钢棒的废弃直径为25~40 mm。当最大钢棒尺寸为100~115 mm时,磨损至直径约38 mm的钢棒往往折断,折断的碎钢棒在操作时可排出机外。当最大钢棒尺寸为50~60 mm时,磨损至一定程度的钢棒易于弯曲,操作时需要定期取出已达到小于废弃直径的钢棒。



### 3.2.2 高频振动式超微粉碎

高频振动式超微粉碎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、剪切等作用力使物料粉碎的，其专用设备是振动磨。

#### 3.2.2.1 振动磨的结构与操作原理

图 6-11 所示为惯性振动磨的结构简图，槽形或管形的筒体通过支承板(轴承座)依靠弹簧坐落在机座上，主轴水平穿过筒体内，两端用轴承座支承，并装有带不平衡重量的偏重飞轮，主轴的轴承通过挠性轴套与电动机联接。运行时，电动机带动主轴快速旋转，主轴两端的两个偏心轮产生离心力使筒体产生一个近似于椭圆轨迹的快速振动，强制筒体内的钢球或钢棒等磨介以及待磨物料高频振动，使研磨介质与物料之间产生强烈的冲击、摩擦、剪切作用，物料被粉碎成微细颗粒。

#### 3.2.2.2 振动磨的粉碎特性

在振动磨中，研磨介质的运动取决于振动类型、振动频率、磨筒形状以及物料填充率等。用摄影技术进行的研究表明，在振动磨中，研磨介质作整体升举、松散和缓慢的流动，只是在冲击时才有介质之间的接触和介质与器壁的接触。这种复杂过程的理论研究至今尚未完善，因而对于高频振动式超微粉碎过程，严格计算相当困难。目前，工程上应用得较多的是，在把介质当做一个弹性质点的简化研究中，由 Ross 和 Sullivan 利用因次分析法导出的振动磨粉碎物的比表面积与粉碎时间的相互关系式，其具体表达方式如下：

$$\frac{dS_a}{dt} = \frac{K\omega^2 A^2 \rho_B}{H} \cdot \left(\frac{D_B}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot f_1\left(\frac{\omega^2 A}{g}\right) \cdot f_2(\mu_B) \cdot f_3(\mu_M) \quad (6-13)$$

式中： $S_a$  为物料的比表面积， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ； $K$  为系数； $t$  为粉碎时间， $\text{s}$ ； $\omega$  为振动频率， $\text{r/s}$ ； $A$  为振幅， $\text{mm}$ ； $\rho_B$ 、 $D_B$ 、 $\mu_B$  分别为介质的密度、直径( $\text{mm}$ )和充填率( $\%$ )； $H$  为物料的可磨性指数( $H = 0.058 W_i$ ， $W_i$  是 Bond 功指数)； $D$  为物料的粒度， $\text{mm}$ ； $\mu_M$  为物料的充填率， $\%$ 。

试验表明，当  $\omega^2 A > 3g$  时，函数  $f_1\left(\frac{\omega^2 A}{g}\right) = 1$ ， $f_2(\mu_B)$  和  $f_3(\mu_M)$  的值分别列于表 6-3 和表 6-4。这样， $S$  和  $t$  的关系简化为：

$$S = \frac{K\omega^2 A^2 \rho_B}{H} \cdot \left(\frac{D_B}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot f_2(\mu_B) \cdot f_3(\mu_M) \cdot t \quad (6-14)$$



表 6-3 函数  $f_2(\mu_M)$  的值

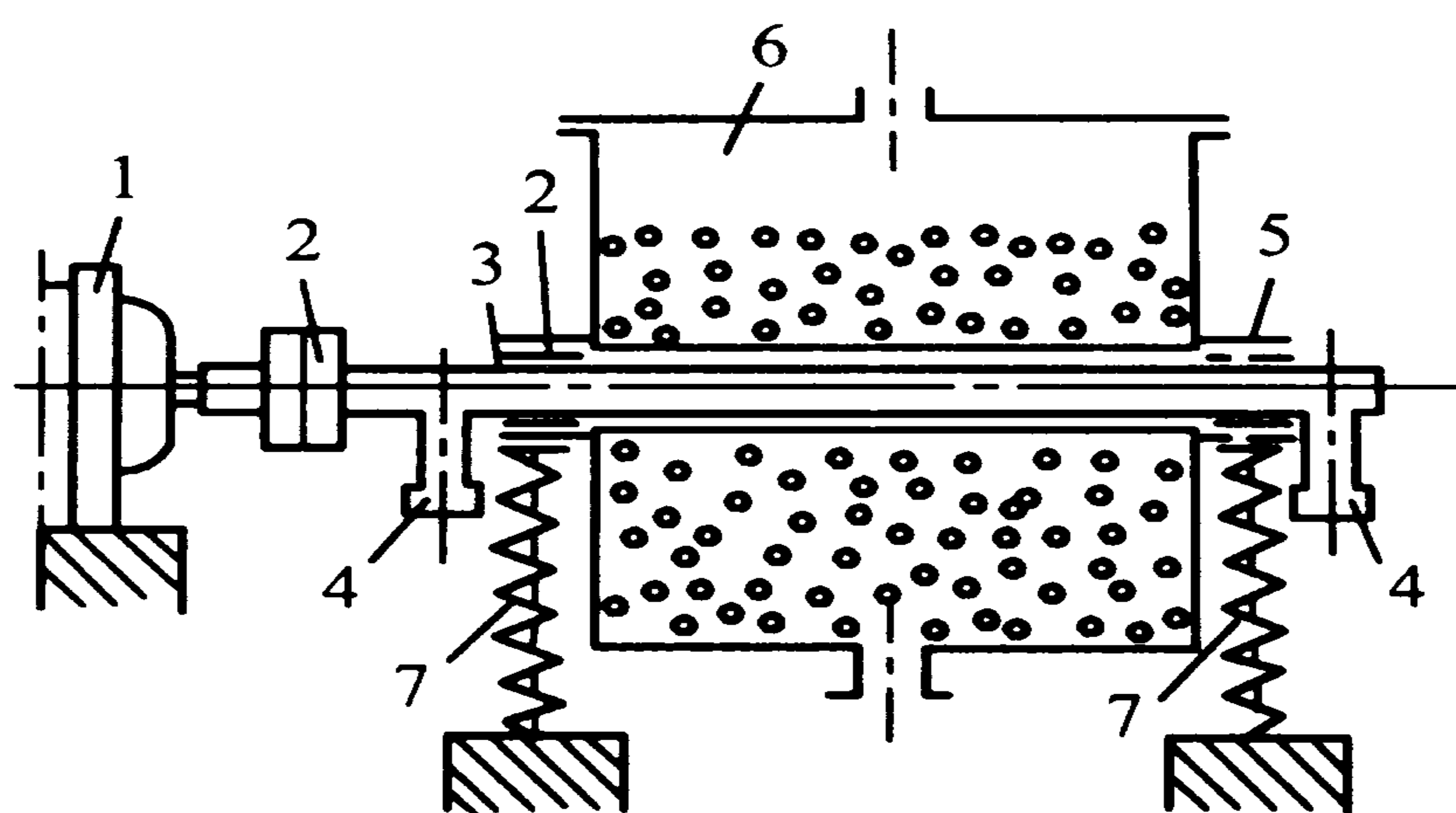
$\mu_B$	0	20	40	60	80	100
$f_2(\mu_B)$	1	1	1.2	1.6	1.9	1.6

表 6-4 函数  $f_3(\mu_M)$  的值

$\mu_M$	10	25	50	75	100	125	100
$f_3(\mu_M)$	5	2	1.2	1	1	1	1

有一点要说明，该公式虽然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关系，但它仅适用于一定范围。对于一定的粉碎体系，各参数都一定时，粉碎物料颗粒的比表面积与粉碎时间的正比关系也有一定的时间限度，超过一定的时间限度就不一定成正比关系。此外，振动磨的生产能力、电动机功率等的计算，仍需靠经验数据或经验公式修正或计算。

振动磨的磨介的充填率一般在 60%~68% 之间，物料充填率（筒体内物料松容积占研磨介质之间的空隙的百分率）在 100%~130% 之间。物料充填率与磨碎率的关系如图 6-12 所示。由图可见，当物料充填率增大时，磨碎率下降，但振动磨筒体内总的新生表面积同磨碎率和物料充填率的乘积成正比。物料充填率增加时，单位时间内物料新生表面积在一定范围内仍然是增加的。



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 6-11 振动磨示意图

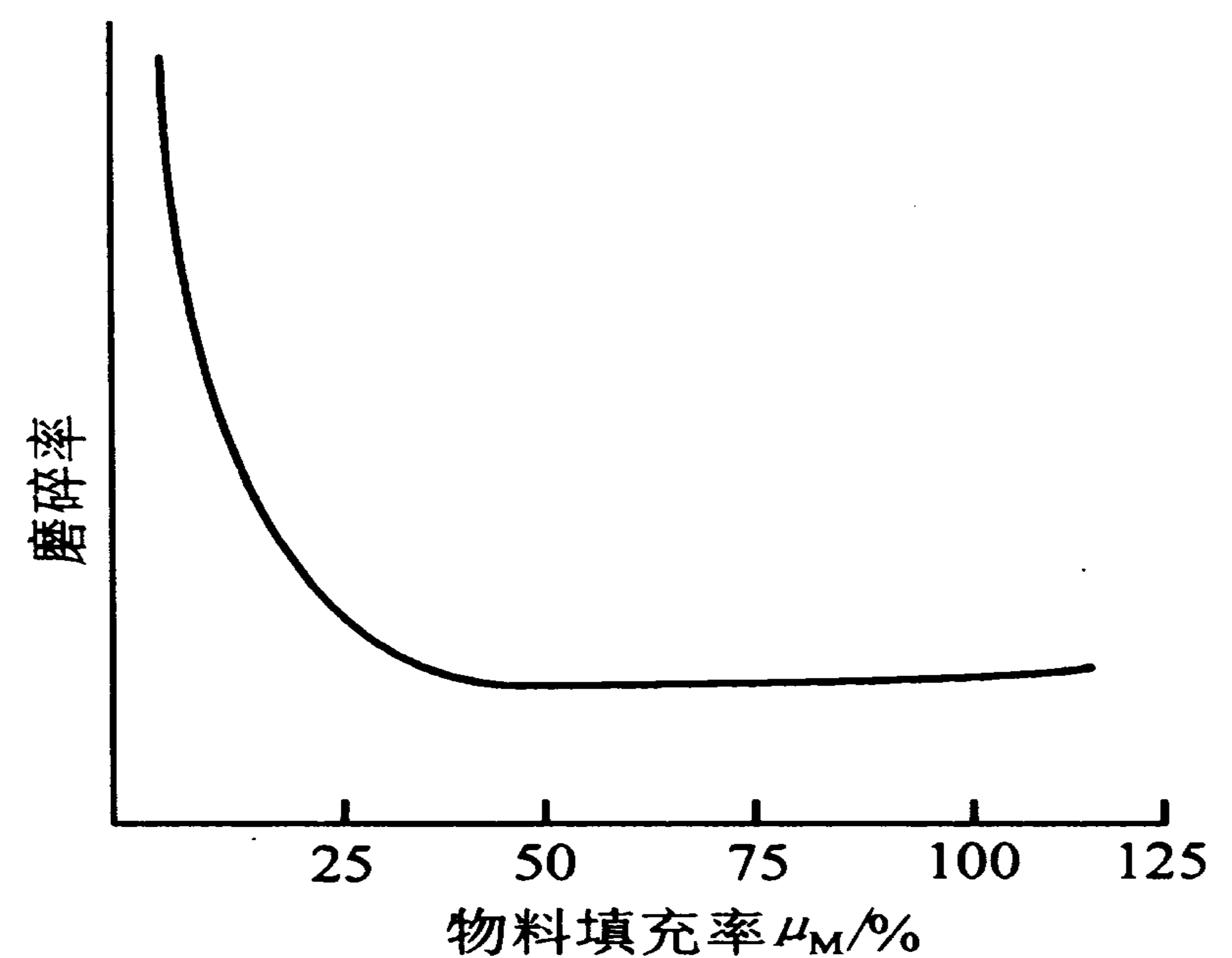


图 6-12 物料充填率与磨碎率的关系

振动磨的介质直径（球形、柱形或棒形）依给料粒度和所要求的产品细度而定，给料粒度小时（一般在 10~15 mm 之间），产品粒度要求越细，介质直径应越小。

振动磨的加速度系数（ $\omega^2 A/g$ ， $g$  是重力加速度）通常小于或等于 10，振动频率  $f$  在 1 000~1 500 之间（相当于  $\omega = 100 \sim 150$  r/s），振幅  $A$  介于



3~20 mm。当给料粒度  $d_0$  增大时，振幅相应增大，振幅  $A$  与给料粒度  $d_0$  之间的关系大致为  $A = (1 \sim 2) d_0$ 。

振动磨干法生产时对物料的湿度较敏感，一般物料的湿度（含水分含量）越高，产量越低。

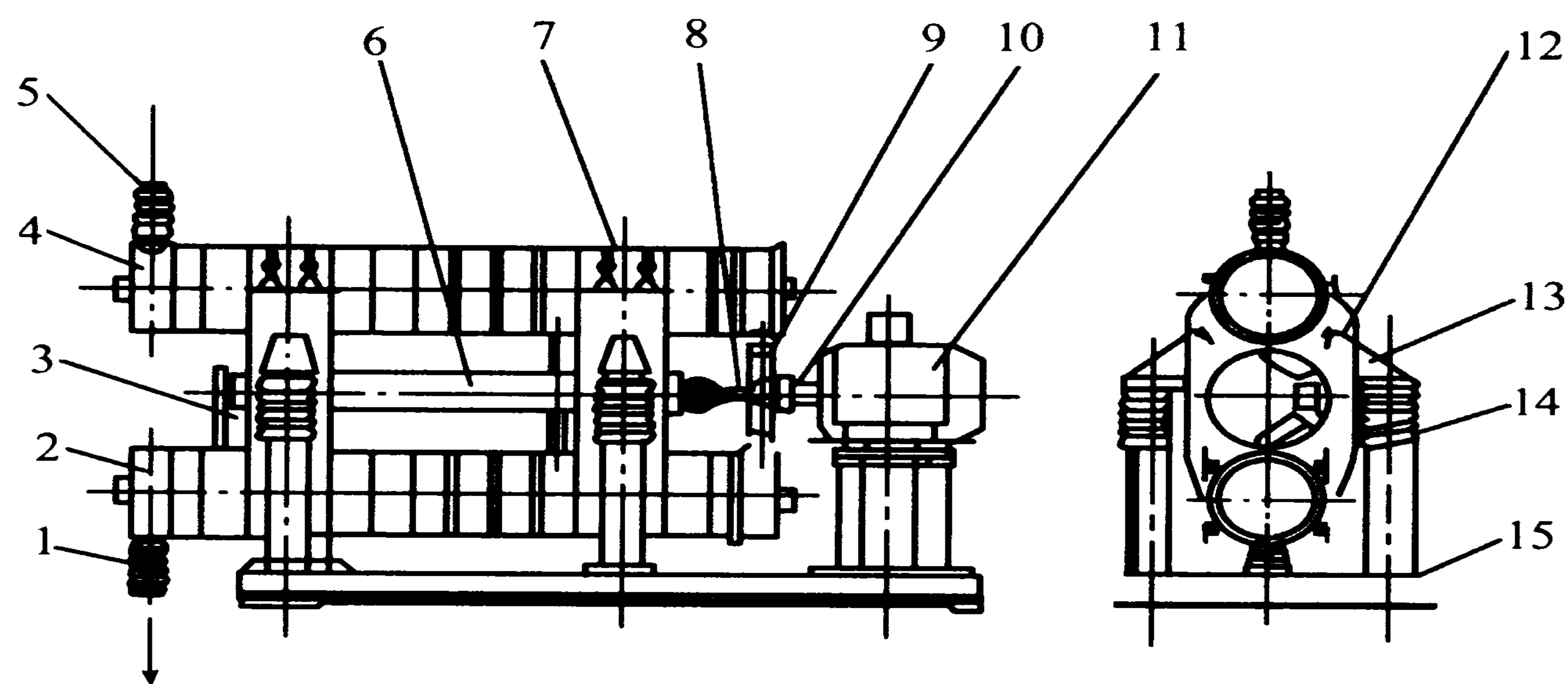
总之，振动磨的粉碎特性为：振动的振幅、频率越高，则产品粒度越细；物料充填率或给料量越大，则产品粒度越粗；介质的充填率以 60%~80% 为宜；在一定范围内，产品的比表面积与粉碎时间成正比；干法生产时，物料的水分含量影响振动磨的生产率。

掌握了振动磨的粉碎特性后，对一定的给料粒度，通过选择适宜的介质尺寸，调节振动的振幅和频率以及给料量和介质的充填率等可以得到所要求的产品细度。

### 3.2.2.3 振动磨的类型

振动磨的种类，按其振动特点分为惯性式、偏旋式振动磨；按筒体数目分为单筒式、多筒式振动磨；按操作方法又可分为间歇式、连续式振动磨。工业中应用的一般都是连续式的。

(1) 连续式的振动磨 图 6-13 所示为两圆筒上下串联的连续式振动磨。它的主要结构是有带冷却或加热夹套的上筒体 4 和下筒体 2，两者依靠支撑板 12 装置在主轴 6 上，并坐落在支座 13 上，而支座又通过弹簧 14 装置在机座 15 上；主轴通过万向节 8、联轴器 10 与电动机 11 联接；上筒体出口与下筒体入口由上下筒体连接管 9 相连，上下两筒体出口端均有带孔隔板。



1. 出料管 2. 下筒体 3. 冷却或加热管 4. 上筒体 5. 加料管  
6. 主轴 7. 紧固带 8. 万向节 9. 连接管 10. 联轴器  
11. 电动机 12. 支撑板 13. 支座 14. 弹簧 15. 机座

图 6-13 连续式振动磨



物料由加料管 5 加入上筒体内进行粗磨，被磨碎的物料通过带孔隔板，经上下筒体连接管被吸入下筒体，在下筒体内被磨碎成微细的粒子。产品通过带孔隔板，经过出料管 1 排出。

连续式振动磨的主要技术参数如下：

①筒体 筒体长度 ( $L$ ) 与直径 ( $D$ ) 之比一般取 6:1，例如，筒体直径 500 mm，则长度为 3 000 mm。

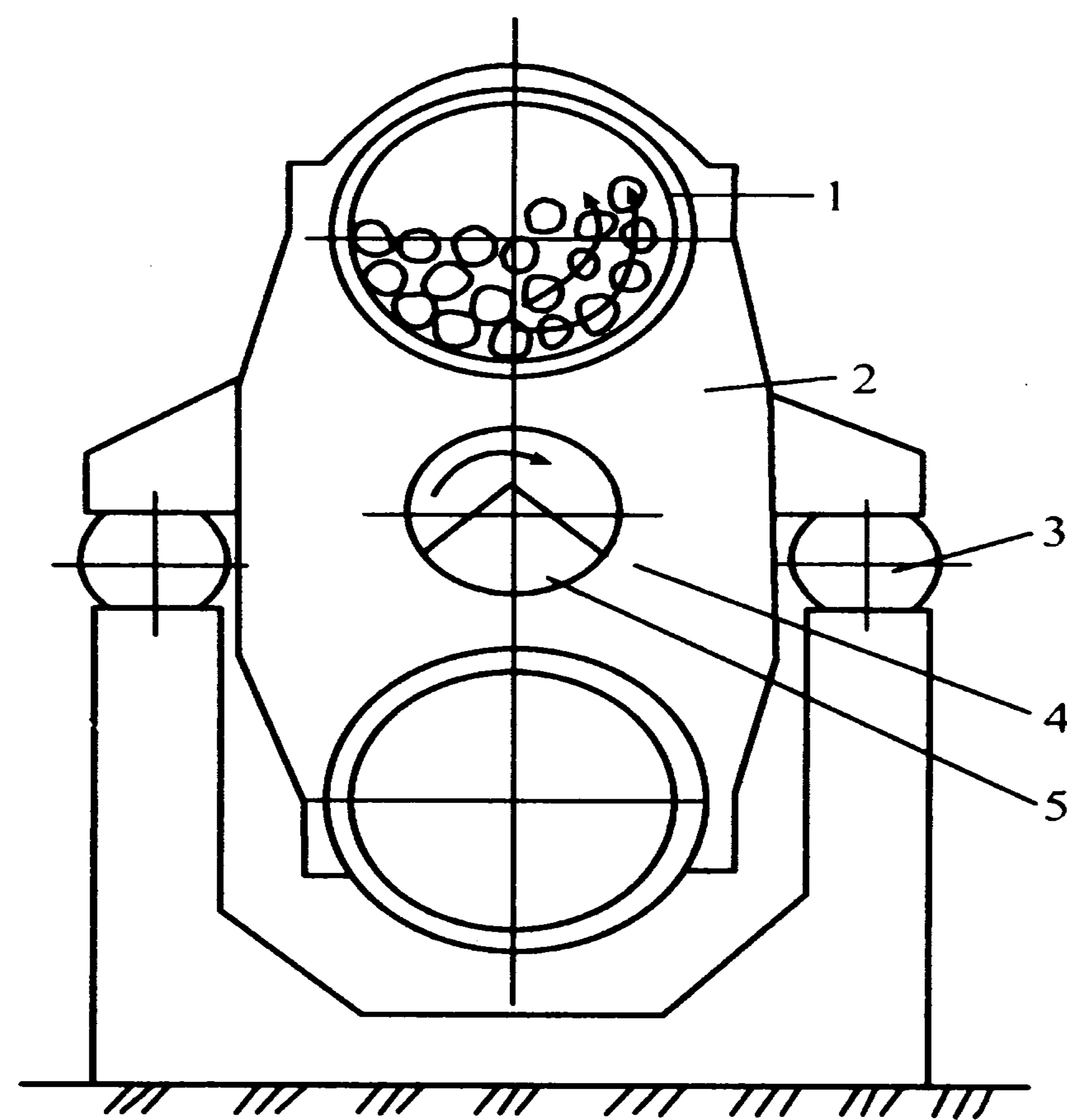
②介质研磨 介质可以是钢珠、氧化铝珠、不锈钢珠、瓷珠、钢棒等，应用时，根据原料性质及要求的产物粒度选择材质和形状。为了提高粉碎效率，尽量选用大直径的介质；一般在粗粉碎时采用棒状，而微粉碎时用球形，介质越小，产品越细。

介质的充填率取长补短 30%~80% 为宜。

③原料与产物粒度 原料粒度最大约为 40 mm，研磨产物粒度可在 2~3 mm 至 1  $\mu\text{m}$  范围内任意选择。原料在筒体内滞留量越少，研磨效率越高。研磨效率可通过调节研磨时间加以控制，一般物料的平均滞留时间约 10 min。

(2) Palla 型振动磨 图 6-14 为德国产的 Palla 型振动磨，机器上安有上下两个管形筒体 1，筒体之间由 2~4 个横构件 2 连接，横构件由橡胶弹簧 3 支承于机架上，在横构件中部装有主轴 4 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，小规格的 Palla 型振动磨有两个偏心重块，大规格的有 4 个偏心重块，每个偏心重块各由两件组成，其间相互角度可调整，以调节偏心力的大小，离心力使管形筒体和横构件在橡胶弹簧上振动。通常给料部和排料部分别设于上下筒体的两端，但根据工作需要也可设在筒体中部。Palla 型振动磨大直径和长度分别达 200~650 mm 和 300~4 300 mm，电机最大功率达 200 kW，是目前振动磨使用较多和较广的一种机型。

Palla 型振动磨的优点是：无需筛分就能得到微细物料；生产操作安全；只要调整其振幅、频率、管径、研磨介质、



1. 筒体 2. 横构件 3. 橡胶弹簧  
4. 主轴 5. 偏心重块

图 6-14 Palla 型振动磨结构示意图



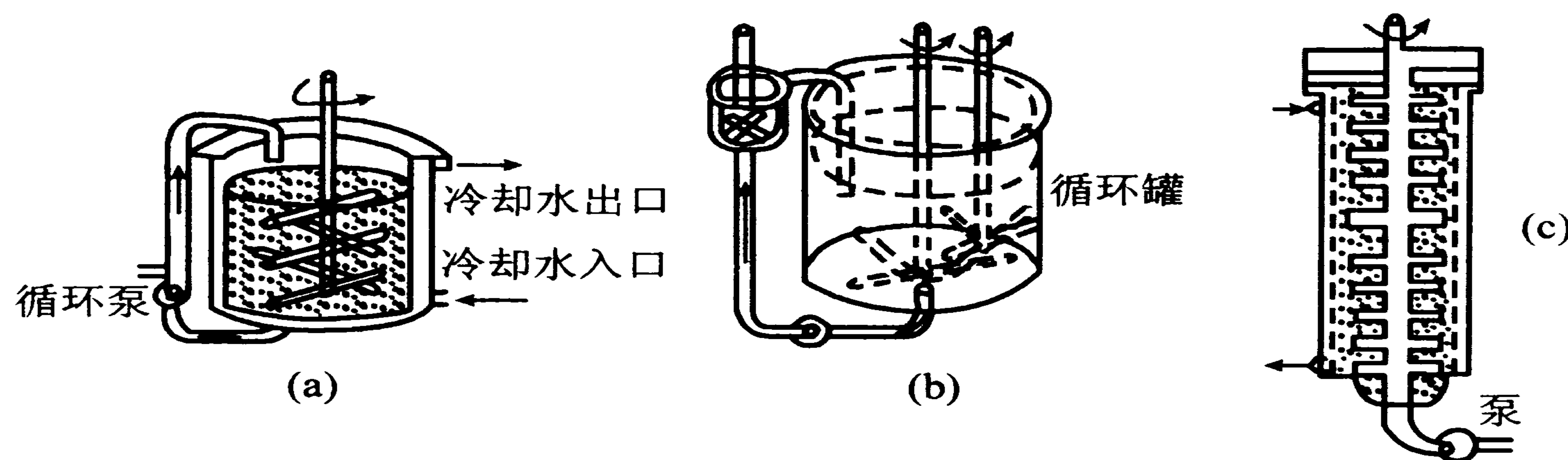
充填率和控制给料等就能得到所需的产品粒度，而且这些参数易于调节。但也存在着缺点：处理量较小，随着管径的增加，在有效范围内，低能区所占比例增大。

### 3.2.3 搅拌磨

搅拌磨粉碎是在球磨基础上发展起来的又一种研磨介质粉碎法，该法大多用于湿法超微粉碎。

#### 3.2.3.1 搅拌磨的结构及粉碎原理

搅拌磨主要由一个静置的内填小直径研磨介质的研磨筒和一个旋转搅拌器(搅拌装置)构成。图 6-15 是间歇式、循环式和连续式 3 种类型搅拌磨的示意图。



(a)间歇式 (b)循环式 (c)连续式

图 6-15 搅拌磨的类型

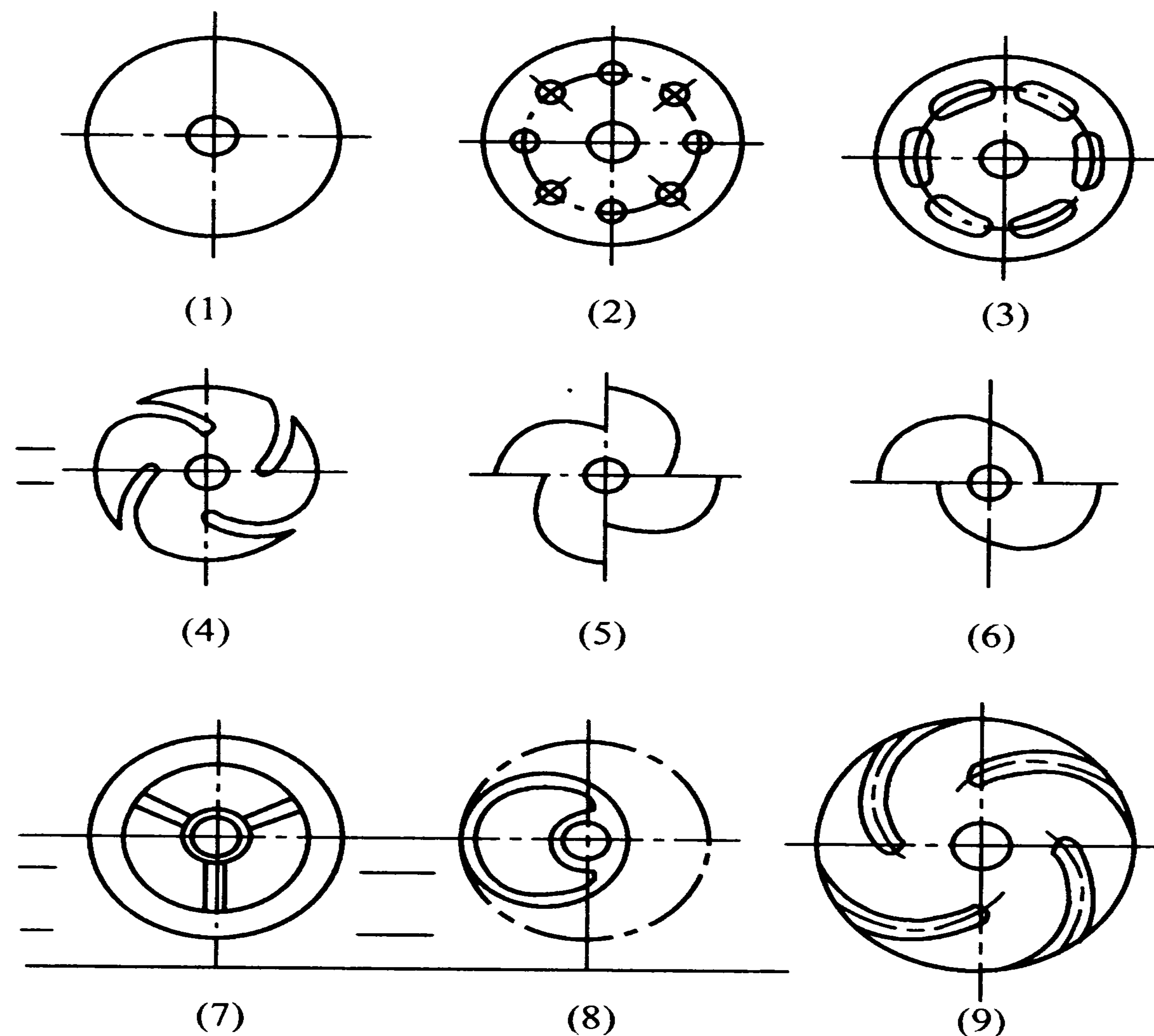
间歇式搅拌磨主要由带冷却套的研磨筒、搅拌装置和循环卸料装置等组成。冷却套内可通入不同温度的冷却介质，以控制研磨时的温度；研磨筒内壁及搅拌装置的外壁可根据不同的用途镶上不同的材料；循环卸料装置既可保证在研磨过程中物料循环，又可保证最终产品及时卸出。连续式搅拌磨的研磨筒的高径比较大，其形状像个倒立的塔体，筒体上下装有格栅，产品的最终细度是通过调节进料流量而控制物料在研磨筒内的“滞留时间”来保证的。循环式搅拌磨是由一台搅拌磨和一个大容积循环罐组成，循环罐的容积是磨机容积的 10 倍左右。这种搅拌磨的特点是可用较小型的设备一次生产出质量均匀及产品粒度分布较窄的大量产品。

在粉碎过程中，搅拌磨的筒体不转动，主要通过搅拌器搅动研磨介质产生冲击、摩擦和剪切作用使物料粉碎。在搅拌磨中研磨介质不是作整体运动而是作不规则运动，这种不规则运动对物料产生 3 种作用力，即：①研磨介质之间的互相冲击产生的冲击力；②研磨介质的转动产生的剪切和摩擦力；③研磨介质填入搅拌臂所留下的空间而产生的撞击力。



正是在这些力的作用下，浆料中的固体颗粒被粉碎成微粒。

搅拌磨中的搅拌器要搅动的是研磨介质与浆料的混合物，它需要为颗粒的粉碎提供足够的能量，因而比普通的液体搅拌器更强有力。常见的搅拌磨的搅拌器由搅拌轴和分散器构成，搅拌轴是连接并带动分散器转动的轴，直接与电动机相连。在搅拌磨内，容器内壁与分散器外圆周之间是强化研磨区，浆料颗粒在该区内被有效地研磨。靠近搅拌轴却是一个不活动的研磨区，在该区内的浆料颗粒可能还没有被研磨就在泵的推动下通过。为避免存在研磨“死区”，将搅拌轴设计成带冷却壁的空心粗轴，以强化搅拌轴周围研磨介质的撞击作用，保证研磨容器内各点比较一致的研磨分散作用。在搅拌磨中搅拌器结构有多种形式，从桨状叶轮到轴射状叶轮，偏心或穿孔盘式轮等。分散器多用不锈钢制作，有时也用树脂橡胶和硬质合金材料等。常见的分散器有圆盘形、异型、环型和螺旋沟槽形等，参见图 6-16。



(1) 平面圆盘型 (2) 开圆孔圆盘型 (3) 开弯豆孔圆盘型  
 (4) 渐开线槽形异型 (5) 风车形异型 (6) 偏凸形异型  
 (7) 同心圆环型 (8) 偏心圆环型 (9) 螺旋沟槽型

图 6-16 搅拌磨中常见的分散器类型



### 3.2.3.2 研磨介质与产品质量

搅拌磨最初用玻璃砂作为研磨介质，故又称为砂磨器。现在一般使用球形研磨介质，常用的有玻璃珠、钢珠、氧化铝珠和氧化锆珠等。研磨介质粒径大小对研磨效率和产品粒径有直接影响。介质的粒径越大，产品的粒径也越大，产量越高；反之，介质的粒径越小，产品的粒径也越小，产量越低。所以，研磨介质的粒径大小视原料粒度和要求的产品粒度而定。为了提高粉碎效率，研磨介质的粒径必须大于10倍的给料平均粒径。如果对成品粒度要求不高，可使用较大的研磨介质；若要求成品粒径小于 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ ，介质粒径通常采用 $0.6\sim 1.5\ \text{mm}$ ；当要求成品粒度在 $5\sim 25\ \mu\text{m}$ 时，则介质粒度可采用 $2\sim 3\ \text{mm}$ 。

研磨介质的密度对研磨效率亦起重要作用，介质密度越大，研磨时间越短。所以，在选用研磨介质时，也要考虑其密度。尤其对于高粘度、高浓度的浆料，应尽可能选用密度大的介质，同时，也要注意采用硬度高的材料制造容器内筒体和搅拌器，以防止其严重磨损。表6-5给出了常用研磨介质的密度和直径。

表 6-5 搅拌磨常用的研磨介质

研磨介质	密度 / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	直径 / mm	研磨介质	密度 / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	直径 / mm
玻璃 (含铅)	2.5	0.3~3.5	锆砂	3.8	0.3~1.5
玻璃 (不含铅)	2.9	0.3~3.5	氧化锆	5.4	0.5~3.5
氧化铝	3.4	0.3~3.5	钢球	7.6	0.2~1.5

研磨介质的充填率对研磨效率有直接影响。充填率视介质粒径大小而定，粒径大，充填率也大，粒径小，充填率也小。具体的充填系数，还随搅拌磨类型而变。对于敞开型立式搅拌磨，取研磨器有效容积的 $50\%\sim 60\%$ ，对于密闭型立式和卧式搅拌磨则可取研磨容器有效容积的 $70\%\sim 90\%$ （常取 $80\%\sim 85\%$ ）。

研磨介质的粒度愈均匀愈好，这样不但可以获得均匀强度的剪切力、冲撞力和摩擦力，使成品粒度均匀，提高研磨效率和成品的产量和质量，而且研磨介质也不易破损。

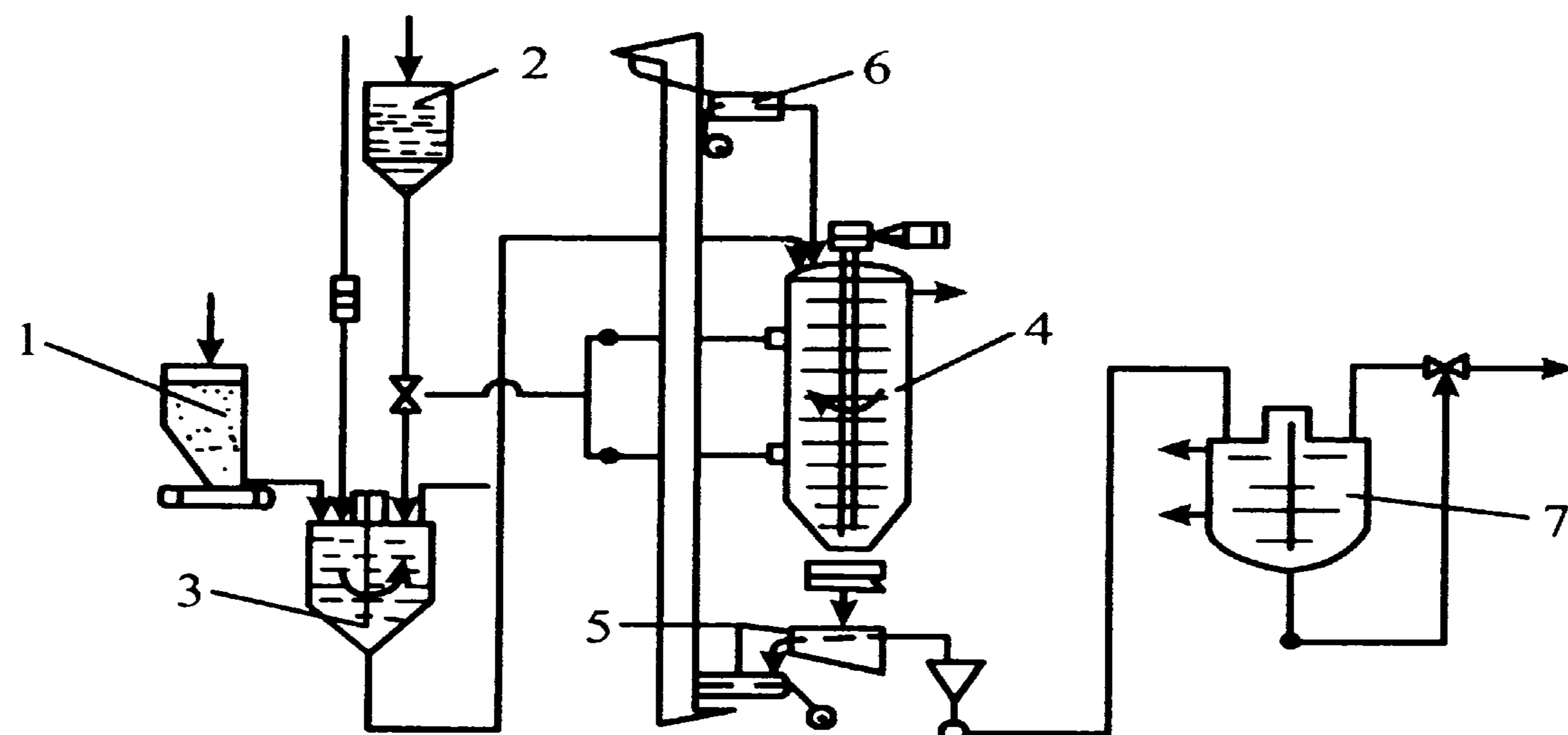
### 3.2.3.3 搅拌磨粉碎系统工艺流程

搅拌磨分敞开型和密闭型两种，每种又有立式与卧式、单轴与双轴、间歇式与连续式、干式与湿式之分，有的还配有双冷形式。无论哪一种形式的搅拌磨粉碎系统，都应配备给料装置和分离设备。图6-17是瑞士Partner Ltd生产的NRZK湿式搅拌磨系统示意图。

NRZK湿磨适用于软至中硬物料的超细粉碎。物料、水分及分散剂经调浆槽



3 制备成浆料后送入 NRZK 湿式搅拌磨中进行研磨，磨好的浆料（含研磨介质）从磨机底部排出后经与介质分离进入浆料产品储存仓成为最终产品。研磨介质则经过洗涤、脱水和干燥后循环使用。



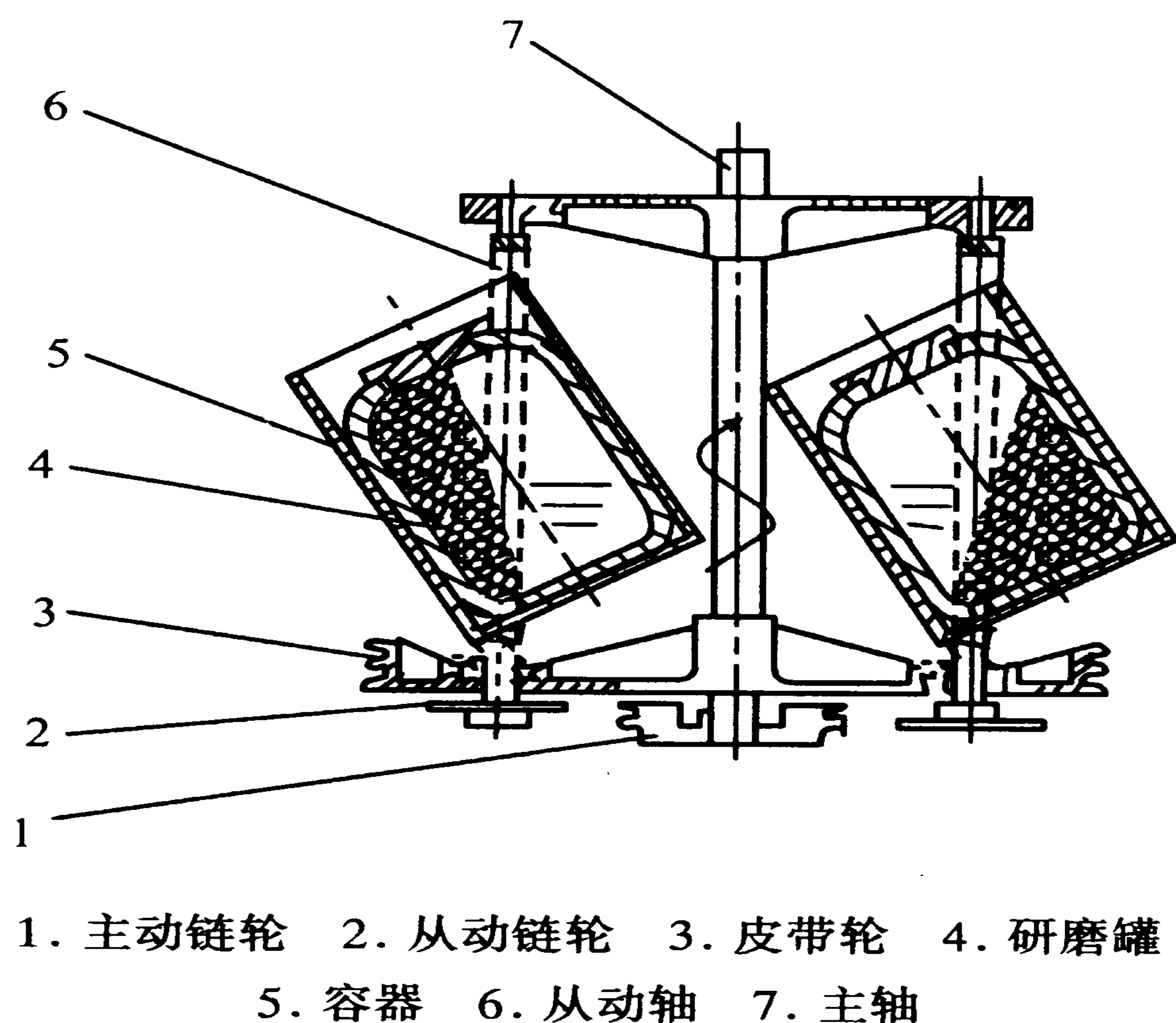
1. 给料 2. 分散剂 3. 搅拌器(浆料制备) 4. NRZK 湿式搅拌磨  
5. 研磨介质的洗涤 6. 研磨介质的干燥系统  
7. 浆料产品储存仓

图 6-17 NRZK 湿磨系统工艺流程简图

### 3.2.4 行星磨和双锥磨

行星磨和双锥磨都是 20 世纪 80 年代问世的利用研磨介质粉碎物料的湿法高效超微粉碎设备，可将浆料中的固体颗粒研磨至  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  以下。

行星磨由 2~4 个研磨罐组成，如图 6-18 所示。这些研磨罐在围绕主轴高速旋转（公转）的同时还进行自转，由此得名。在行星磨中，研磨罐有意安装成倾斜式，以使其在离心运动的同时出现摆动现象。倾斜式研磨罐自转时，产生最大离心力的最外点的相对位置不断变化，使得罐内的研磨介质不时上下翻动。研磨罐



1. 主动链轮 2. 从动链轮 3. 皮带轮 4. 研磨罐  
5. 容器 6. 从动轴 7. 主轴

图 6-18 行星磨结构示意图

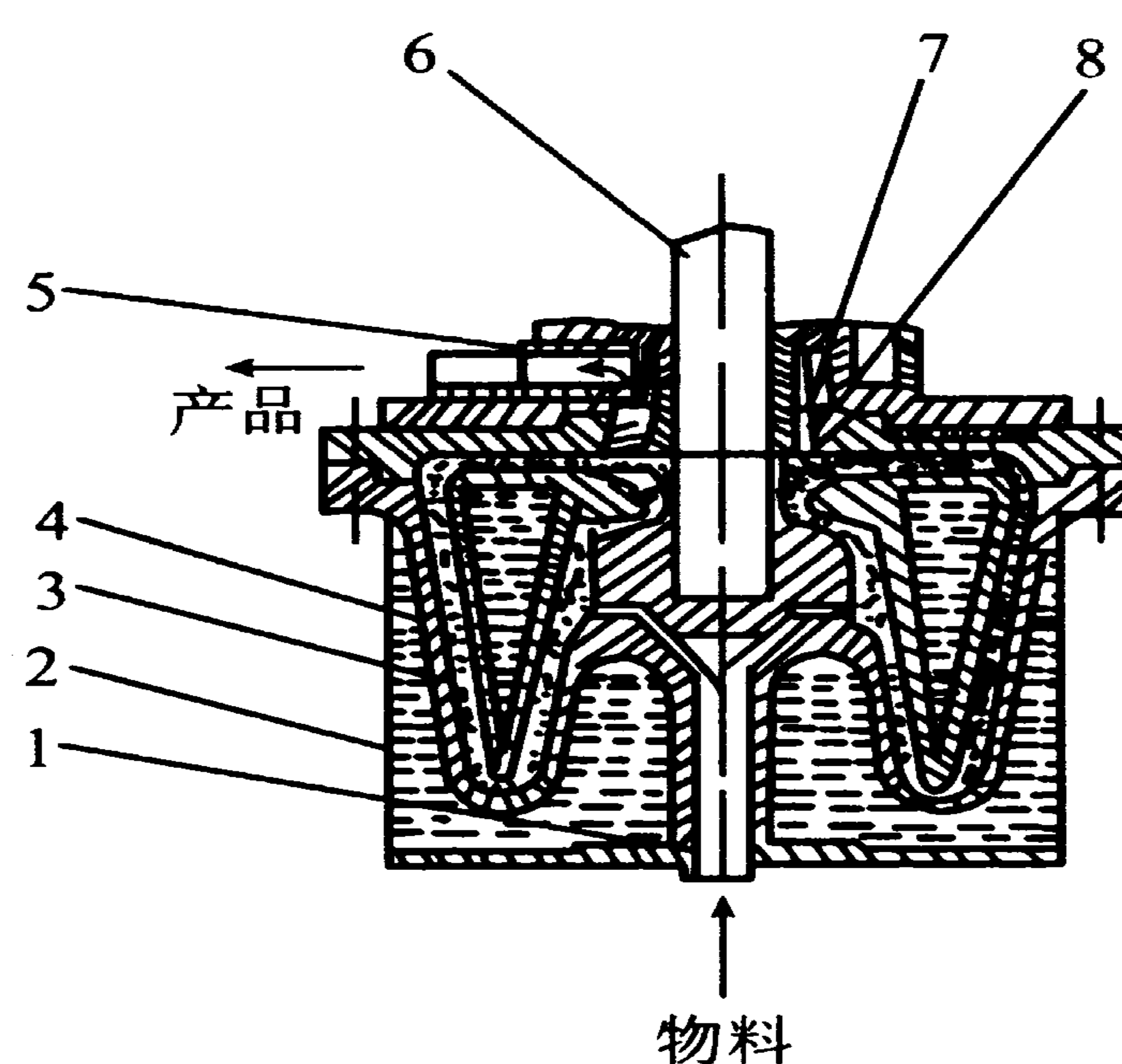


旋转时，离心力大部分产生在水平面上。由于倾斜罐体的水平截面呈椭圆形，研磨罐围绕主轴旋转时，整个研磨介质和物料的椭圆形不断变化。如此等，当研磨罐自转和绕主轴公转时，物料颗粒就受到强有力的剪切力、摩擦力和冲击力，继而研磨成微细粒子。

行星研磨罐的研磨介质充填率为 30% 左右，它不但粉碎效率较球磨机高，而且产品粒度小且均匀。该设备还具有结构简单、运行平稳、操作方便等优点，它不仅常用于湿法处理，也适用于干法处理。

双锥磨是一种新型高能量密度的超微粉碎设备，如图 6-19 所示，它利用两个锥形容器的间隙构成一个研磨区，带冷却腔的内锥体为转子，带冷却夹套的外锥体为定子。研磨介质充填于转子和定子之间的环隙。研磨介质可以是玻璃珠、陶瓷珠或钢珠等。研磨介质的直径通常为 0.5~3.0 mm，转子和定子之间的环隙为 6~8 mm，与研磨介质直径相适应。定子与转子间的间距大，介质直径也大。由于设备结构的特点，供研磨用的能量从进料口至出料口逐渐递增，物料通过锥形研磨区时可达到渐进的研磨效果。

双锥磨的特点为：①具有很高的能量密度和较小的研磨容器容积，因而能获得很细且均匀的成品微粒和很高的生产能力；②在同样的生产负荷和细度情况下，双锥磨所需的容积是传统搅拌磨容积的 1/5~1/3，磨介充填率也是后者的 1/5~1/3，所以研磨介质的耗量少，更换研磨品种时残留物少且容易清理；③结构紧凑且在密闭状态下作业，故适宜处理含有有机溶剂的物料，且外界空气不能进入研磨容器内，浆料不会起泡；④适宜研磨热敏性物料和在低沸点下溶解的物料。



1. 加料管 2. 容器 3. 转子 4. 定子  
5. 浆料出口管 6. 旋转轴  
7. 转子环 8. 定子环

图 6-19 双锥磨结构示意图

### 3.3 超微气流粉碎

旋转球（棒）式、高频振动式超微粉碎等都是利用研磨介质对固体颗粒的冲



击、摩擦、剪切作用达到粉碎的目的，气流式超微粉碎则是利用高速气流（300～500 m/s）或过热蒸气（300～400℃）的能量，赋予颗粒以极高的速度，使它们互相冲击、碰撞和摩擦，从而达到粉碎的目的。虽然，颗粒与器壁之间的碰撞不可避免，但颗粒与颗粒间碰撞的频率远远超过颗粒与器壁的碰撞，所以气流式超微粉碎的粉碎作用主要是颗粒之间的冲击或碰撞。

### 3.3.1 气流粉碎的优缺点

由于粉碎方式的独特性，与机械式粉碎相比，气流粉碎具有如下优点：

①粉碎强度大，粉碎产品细，可达数微米甚至亚微米，颗粒规整，表面光滑。②颗粒在高速旋流中分级，在离心力的作用下，粗粒不会混到细粒成品中，成品粒度均匀一致。③采用硬度极高、耐磨性极好的材料作衬里，保证产品完全不会被磨损下来的金属或非金属杂质污染，产品纯度高。④由于高压工质通过喷嘴产生冷却效果（焦耳-汤姆逊效应），并且气流粉碎过程又是瞬时过程，所以可粉碎低熔点和热敏性物料。⑤除粉碎之外，还可实现粉碎与干燥、粉碎与混合、粉碎与包覆、粉碎与化学反应等联合作业。⑥设备结构简单，拆卸容易，维护检修工作少，且清洗快，易消毒，可进行无菌作业。⑦在微粉碎和超微粉碎过程中的能量利用率较高。一般气流粉碎机可达2%，个别可达10%，而球磨机仅约为0.6%。

当然，气流粉碎也存在一些缺点，如①辅助设备多，一次投资较大。②粉碎操作成本较高。③影响运行的因素多，一旦工况调整不当，操作不稳定。④不太适宜于粉碎粘滞性大的物料，因为这种物料易发生粘壁而导致加料困难和设备堵塞现象。⑤噪声较大，采用高温工质时操作岗位附近的温度高；粉碎系统堵塞时会发生倒料现象，喷出大量粉尘，这些都会恶化工作环境。

### 3.3.2 气流粉碎的工质

在气流式超微粉碎方式中，气流是使物料颗粒获得速度的动力。用以产生高速气流的高压气体，一般称为能量载体，或称为工作介质，简称工质。常用的工质有压缩空气，过热蒸汽、氮气、二氧化碳等惰性气体。对于一定的粉碎过程，采用不同的工质，设备选型和粉碎流程的布置方式有所不同，粉碎过程的能耗、粉碎产品质量等也会存在一定的差异。

工质的选择，主要依据被粉碎物料的物理-化学性质。但是，了解各种工质性能、操作特性以及适用情况也是非常重要的。

压缩空气工质最大的优点是，它可以在常温甚至低温条件下工作。所以，对



低熔点、热敏性物料的粉碎，它具有极大的优势。

过热蒸汽比压缩空气优越的是：

①蒸汽易得，而且价格便宜，在经济上有吸引力。这一方面是因为发生蒸汽所采用的能源种类比较便宜，另一方面也因为蒸汽的临界速度高，动能大，粉碎同样的物料，蒸汽工质的气固比较空气工质的气固比为小。②蒸汽工质的压强可以很高，而其成本并不因为压强的提高而直线上升。因此，可以采用压强比空气工质高得多的过热蒸汽进行气流粉碎，使粉碎设备的生产能力大大提高。③在同一温度下，过热蒸汽的粘度比空气低得多，这是过热蒸汽工质被广泛采用的又一基本因素。④有些高粘滞性物料，用高温蒸汽工质粉碎，产品流动性好，不易粘壁和堵塞装置。⑤蒸汽工质粉碎的超微粉体物料，不带静电，内聚现象小，长时间储存和运输，不发生结块现象，应用分散性好。而空气工质粉碎的一些物料，静电多，极易絮凝，影响分散效果。

鉴于过热蒸汽工质有这么多的优点，当某些物料既可用过热蒸汽粉碎，又可用压缩空气粉碎时，应当优先选用过热蒸汽。

对于某些熔点极低或热敏性极强的物料，不宜用过热蒸汽工质，但空气工质又会使其氧化。在这种情况下，就必须考虑采用惰性气体工质。选用惰性气体工质时，应注意其流程布置要保证工质的回收利用。

### 3.3.3 气流式超微粉碎机的类型

气流粉碎是以冲击粉碎为主的粉碎过程，用于气流粉碎的设备是冲击式粉碎机，通常称为气流磨。目前工业上应用的主要有水平圆盘(扁平)式、循环管(环形喷射)式、对喷式和超音速式等，它们都是由加料装置、工质分配室、喷嘴、粉碎室、成品收集器、废工质排出管等基本部件构成的。

#### 3.3.3.1 扁平式或水平圆盘式气流磨

图 6-20 为水平圆盘式气流粉碎机的工作原理和结构示意图。其粉碎过程为：高压气流经入口 5 进入气流分配室 1 中。分配室 1 与粉碎-分级室 2 相通。气流靠自身压强强行通过喷嘴时，产生高达每秒几百米乃至上千米的气流速度。待粉碎的物料经过文丘里喷射式给料器 4 进入粉碎-分级室 2 的粉碎区，在高速喷气流作用下发生粉碎。由于喷嘴与粉碎-分级室 2 的相应半径呈一锐角，所以气流挟带着被粉碎的颗粒作回转运动，把粉碎合格的颗粒推到粉碎-分级室中心处，进入产品收集器 7。这种收集器实质上就是一个旋风分离器，与普通的旋风分离器的差异，仅在于挟带颗粒的气流是由其上口进入。在收集器内，颗粒沿器壁螺旋



形地下降到产品贮斗 8 中。而废气流挟带着 5%~15% 的细颗粒经排出管 6 排出,待进一步捕集回收。

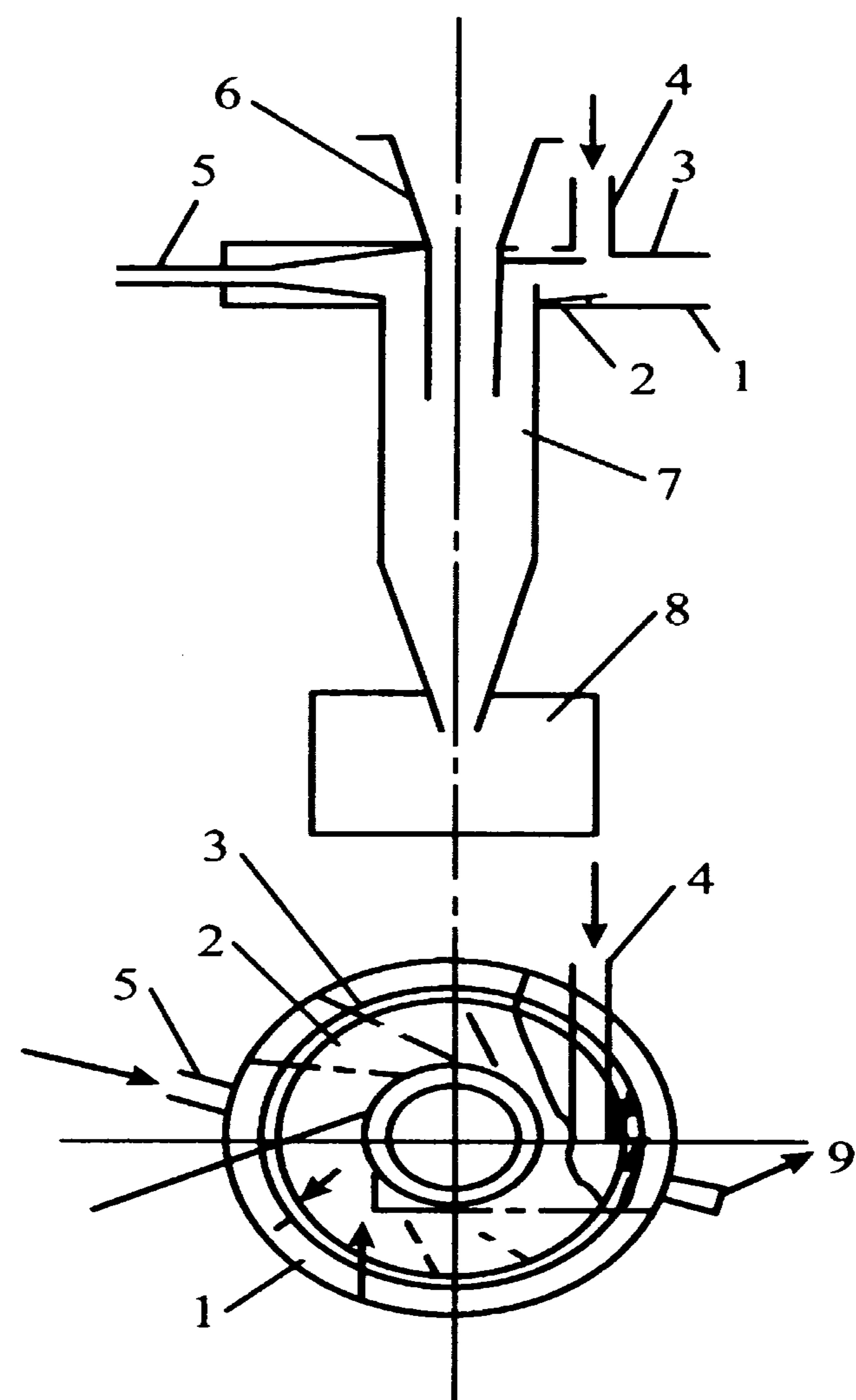
水平圆盘式气流粉碎机的进料粒度通常小于 0.15 mm,最大不超过 6 mm,成品粒度在 0.2~5  $\mu\text{m}$  之间。进料粒度力求均匀,否则产品粒度将变大。

### 3.3.3.2 循环管式气流粉碎机

循环管式气流粉碎机也具有自行分级特点,图 6-21 是目前应用最广的杰托米泽尔(Jet-O-Mizer)型(变截面)循环管式气流粉碎机的结构及工作原理示意图。它的下部为粉碎区,上部为分级区。粉碎区各个喷嘴的安装位置,正好使喷气流的轴线与粉碎室中心线相切。物料经喷射式加料器 11 进入粉碎区 12,气流经过一组喷嘴 2 进入粉碎室,将物料颗粒加速,使颗粒之间产生冲击碰撞;气流旋流挟带着被粉碎的颗粒,沿上行管 4 向上运动进入分级 5,区 6;在分级区,由于离心力场的形成和离心力与分级区轮廓的配合,使密集的颗粒流分层,粗大颗粒在外层,细小颗粒在内层。在细粒成品出口处 8,安装了百叶窗式惯性分级装置 7,使处于内层的细颗粒通过 7 时,又发生一次分离作用,粗颗粒被弹回,产品细度又有提高。

与里达克蒂奥奈泽尔型的循环管式气流粉碎机不同的是,这种气流粉碎机循环管粉碎室的内腔截面不是真正的圆截面,循环管各处的截面也不相等,而且分级区和粉碎区的弧形部分也不是圆周的一部分,即其曲率半径是变化的。由于采用了这样的结构,物料颗粒在离开粉碎区之后,能减速上升,而进入分级区时,又能加速,从而产生更强大的离心力场,获得更精细的分级效果。此外,由于分级区的弯曲管壁被设计成减速曲线状,所以循环管内壁的磨损大大减轻。

这种气流粉碎机粉碎细度可达 3~0.2  $\mu\text{m}$ ,应用非常广泛。从热敏性和爆炸性的化学品到极坚硬的磨料,以及纤维、金属、药物、化妆品、食品、颜料、填料等,都



1. 气流分配室 2. 粉碎-分级室
3. 气流喷嘴 4. 喷射式给料器
5. 高压气流入口 6. 废气流排出管
7. 产品收集器 8. 产品贮斗
9. 排污口

图 6-20 水平圆盘式气流磨结构示意图

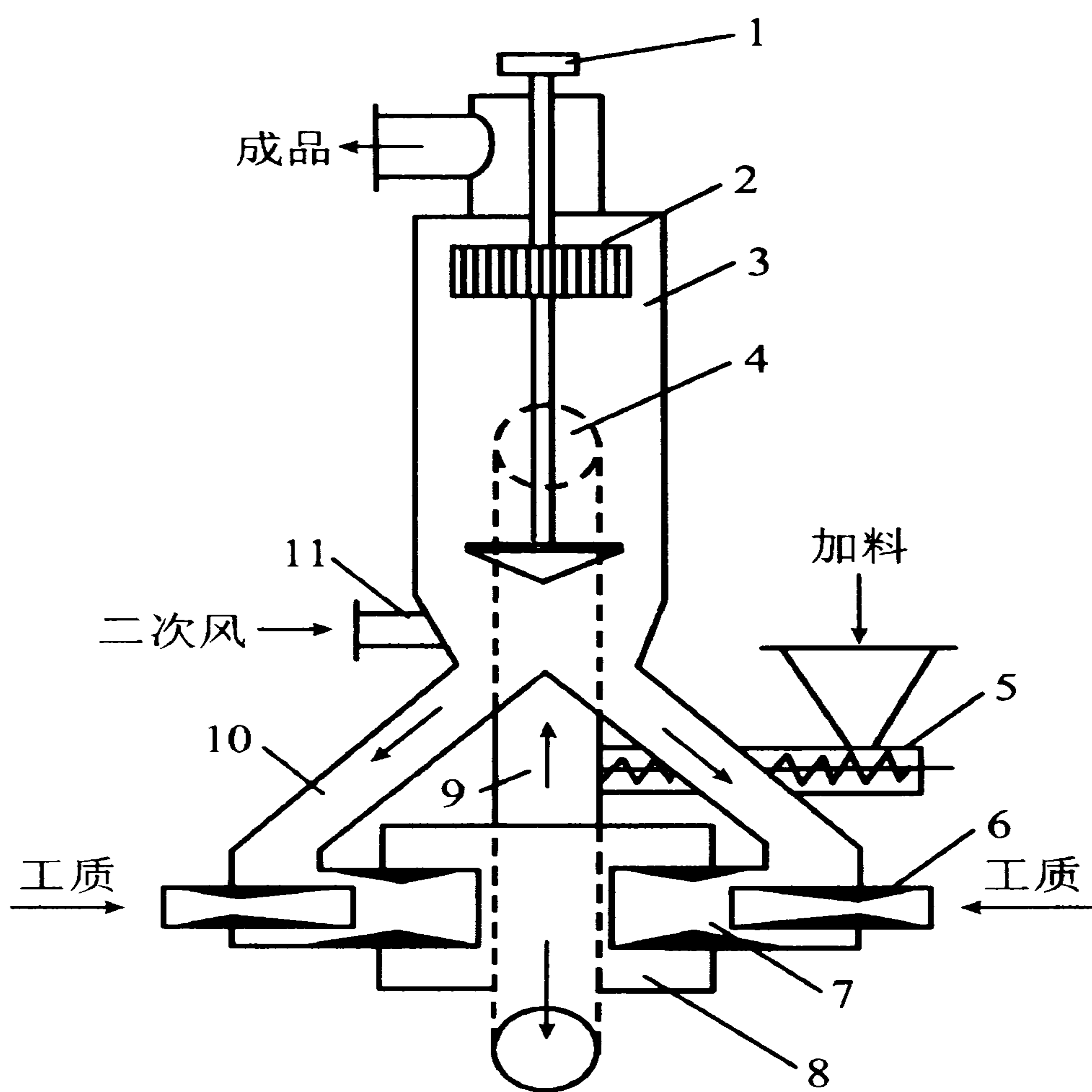


可用它进行卓有成效的微粉碎或超微粉碎。

### 3.3.3.3 对喷式气流粉碎机

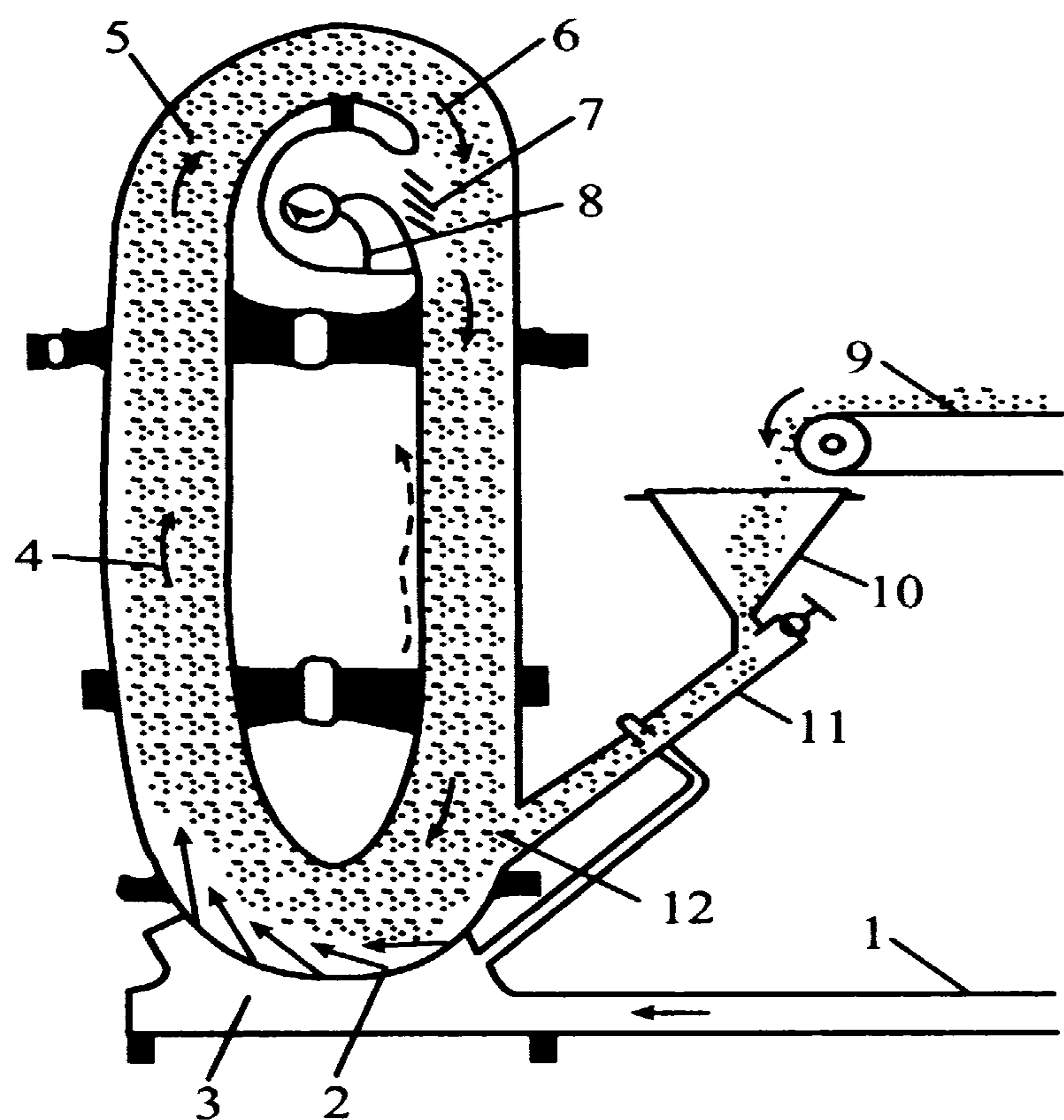
对喷式气流粉碎机最显著的特点是利用相反方向的气流对颗粒进行加速,使颗粒彼此从两个或多个方向相互进行冲击和碰撞,从而被粉碎。

对喷式气流粉碎机也有多种机型,它们的粉碎部分都采用逆向对喷式气流磨,但是它们所采用的分级器类型是各式各样的。如布劳-诺克斯型的粉碎机采用风力分级器;特劳斯特型粉碎机的分级部分则采用扁平式气流磨的分级结构。具有代表性的现代逆向对喷式粉碎机是马亚克型(Majac Jet Pulverizer)



1. 传动装置 2. 分级转子 3. 分级室 4. 入口  
5. 螺旋加料器 6. 喷嘴 7. 混合管 8. 粉碎室  
9. 上升管 10. 粗颗粒返回管 11. 二次风入口

图 6-22 马亚克型气流粉碎机



1. 工质总管 2. 喷嘴 3. 工质分配室  
4. 上行管 5, 6. 分级区 7. 惯性分级装置  
8. 成品出口 9. 加料器 10. 料斗  
11. 喷射式加料器 12. 粉碎区

图 6-21 杰托米泽尔型气流粉碎机

如图 6-22 所示。其粉碎过程为:物料经螺旋加料器 5 进入上升管 9 中,依靠上升的气流带入分级室后,粗颗粒沿返回管 10 返回粉碎室 8,在来自喷嘴 6 的两股相对的喷气流作用下,发生冲击碰撞而被粉碎。粉碎后的物料从粉碎室底部的出口管进入上升管 9 中,被气流带入分级室进行分级。细颗粒通过分级转子后成为产品。粉碎室底部安设有排渣口,可防止物料沉积而堵塞粉碎室。为了尽可能地把合格的细颗粒都分离出去,在分级器下部经二次风口 11 通入二次空气。

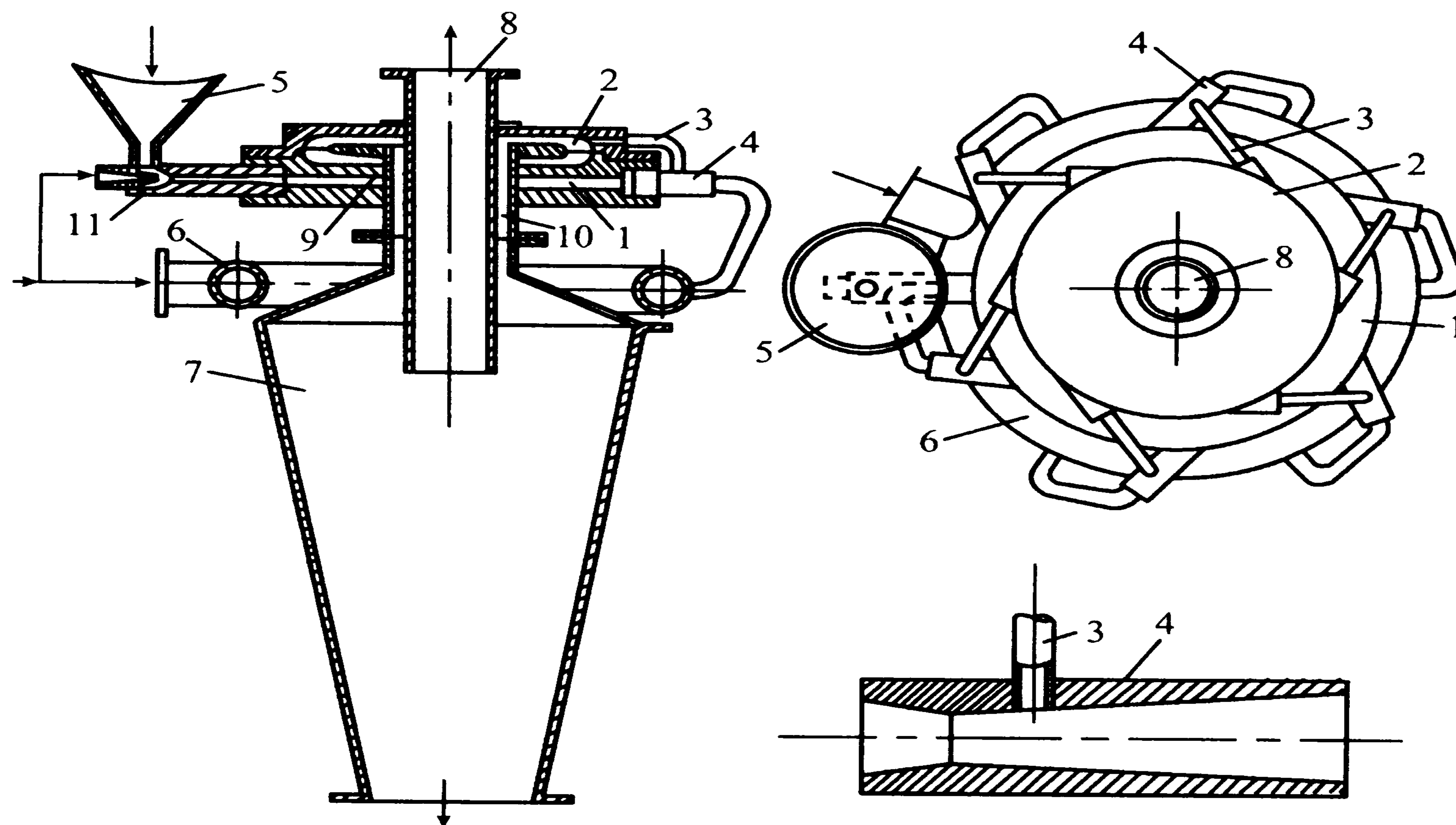
马亚克型逆向对喷式粉碎机是同类装置中较先进的。它有三十几种规



格，从实验室型一直到工业生产型。它的特点是颗粒以极高的速度直线迎面冲击，冲击强度大，能量利用率高。它的粉碎室容积很小，衬里材料好解决，因此，产品的污染度轻。粉碎产品的粒度，一般从200目到亚微米。工质可用压缩空气，也可用过热蒸气；粉碎热敏性物料时，还可用惰性气体。

#### 3.3.3.4 超声速式气流粉碎机

图6-23是日本风动工业株式会社生产的P.J.M.型超声速式气流粉碎机的结构及操作原理图。它的明显特点，就是有一个二次分级室，或者说物料在该机内经过两个粉碎-分级室。这两个粉碎-分级室与圆盘式气流粉碎机的粉碎-分级室很相象，呈扁平形，且在周边均匀地设置若干个喷嘴，所不同的是，这种气流粉碎机的喷射式加料器11不是安装在粉碎-分级室的上盖上，而是安装在侧壁处，喷嘴4为气-固双相流喷嘴。运行时，物料在粉碎-分级室1中粉碎后，细颗粒经一环形通道9进入二次分级室2，再做一次粉碎分级。合格的颗粒从二次分级室中心的环型下中心管10进入旋风分离器(成品收集器)，成品螺旋形地下降到下方贮斗中，废



1. 粉碎-分级室 2. 二次分级室 3. 连通管 4. 喷嘴 5. 料斗 6. 工质分配室  
7. 成品收集器 8. 废工质排出管 9. 环形通道 10. 下中心管 11. 喷射式加料器

图 6-23 P.J.M. 型超声速式气流粉碎机



工质挟带部分细颗粒沿废工质排出管 8 排走。二次分级室分离出来的粗颗粒，在离心力作用下跑向室外围，经连通管 3 进入缩扩型超声速喷嘴 4 的低压区，然后随工质一起进入粉碎-分级室 1，重复上述粉碎过程。

这种气流粉碎机由于采用了超声速喷嘴而具有很高的粉碎能力；而二次分级出来的细颗粒不与进来的待分级的物料相混，所以产品中不会含有不合格的大颗粒。

但是，这种腔型的粉碎-分级室结构复杂，喷嘴的磨损加剧，物料多次通过狭窄的通道，因此通道被物料堵塞的可能性大。

### 3.4 辊压式微粉碎或超微粉碎

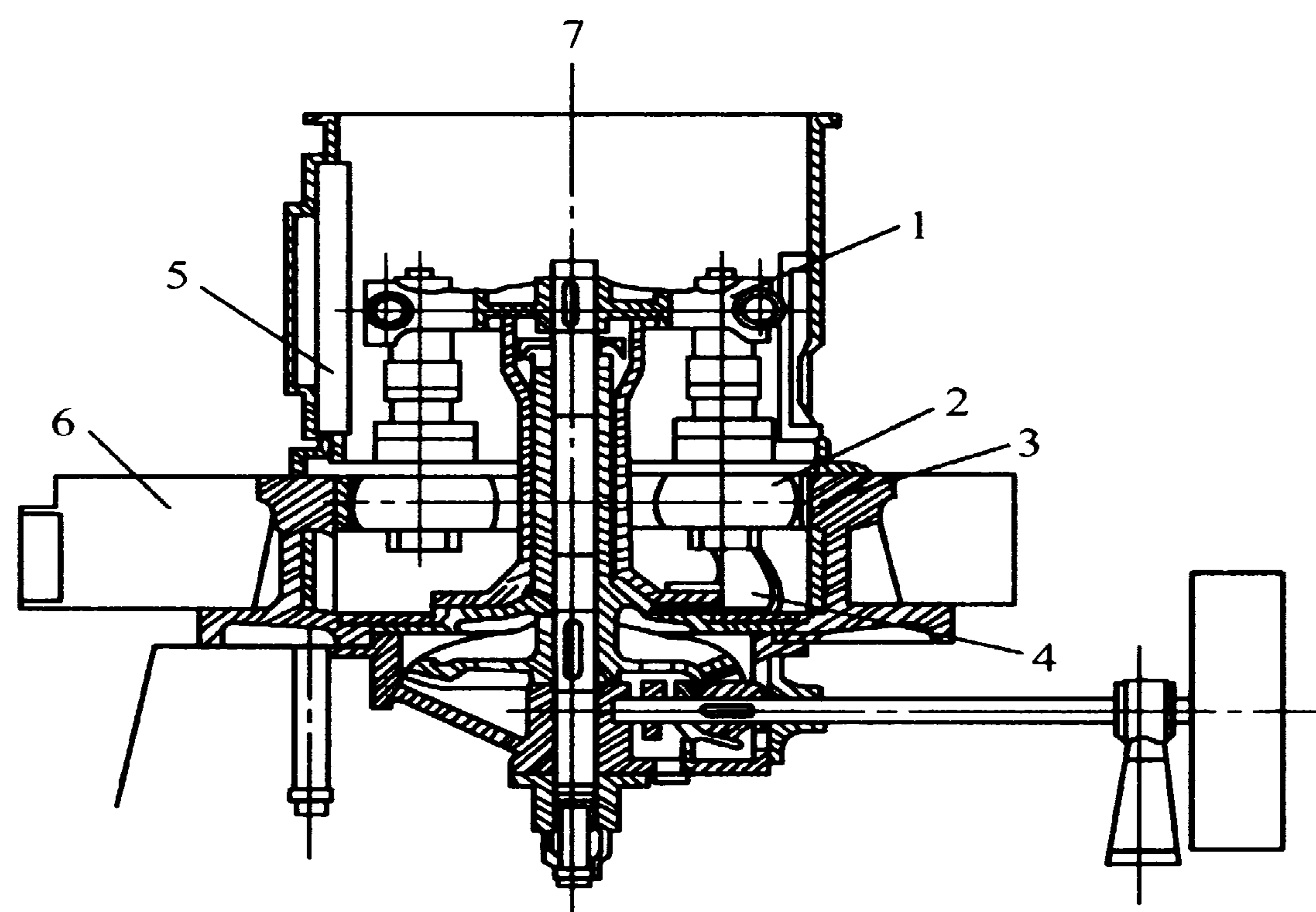
这种微或超微粉碎技术是利用转动的辊子与另一相对表面之间产生摩擦、挤压或剪切等作用力，达到粉碎物料的目的。根据相对表面形式的不同，有盘辊研磨机（pan roll mills）和辊磨机（roller mills）两大类型的专用设备。

#### 3.4.1 盘辊研磨机

在盘辊研磨机内，物料的粉碎发生于辊子与圆盘之间。根据圆盘是否转动分为圆盘固定式和圆盘转动式两种；根据辊子施力方式的不同又可分为悬辊式和弹簧辊式两类。悬辊式的进料粒度 30~40 mm，粉碎成品粒度 44~125  $\mu\text{m}$ ；弹簧式的进料粒度小于 150  $\mu\text{m}$ ，粉碎成品粒度 88~150  $\mu\text{m}$ 。

图 6-24 给出悬辊式的环辊研磨机（ring roll mill）的结构示意图，它又称为雷蒙磨（ray-mond mill），属于圆盘不动型、相对表面为侧壁上磨环的盘磨机。辊子的轴安装于梅花架上，梅花架由传动装置带动而快速旋转。磨环固定不动，物料由机体侧部通过给料机和溜槽进入机内，在辊子和磨环之间受到磨碎作用。气流从磨环下部以切线方向吹入，经过辊子与圆盘之间的磨碎区夹带粉碎的物料排入磨机上部的叶轮式风力分级机（选粉机）。梅花架上悬有 3~5 个辊子，绕机体中心轴线公转。由于公转产生的离心力使辊子向外张开，压紧磨环，并在其上面滚动。进入机内的物料由铲刀铲起并送入辊子与磨环之间进行磨碎。铲刀与梅花架连接在一起，铲刀是倾斜安装的，每个辊子前面都有一把铲刀，这样可使物料形成一股物料流连续送至辊子与磨环之间。



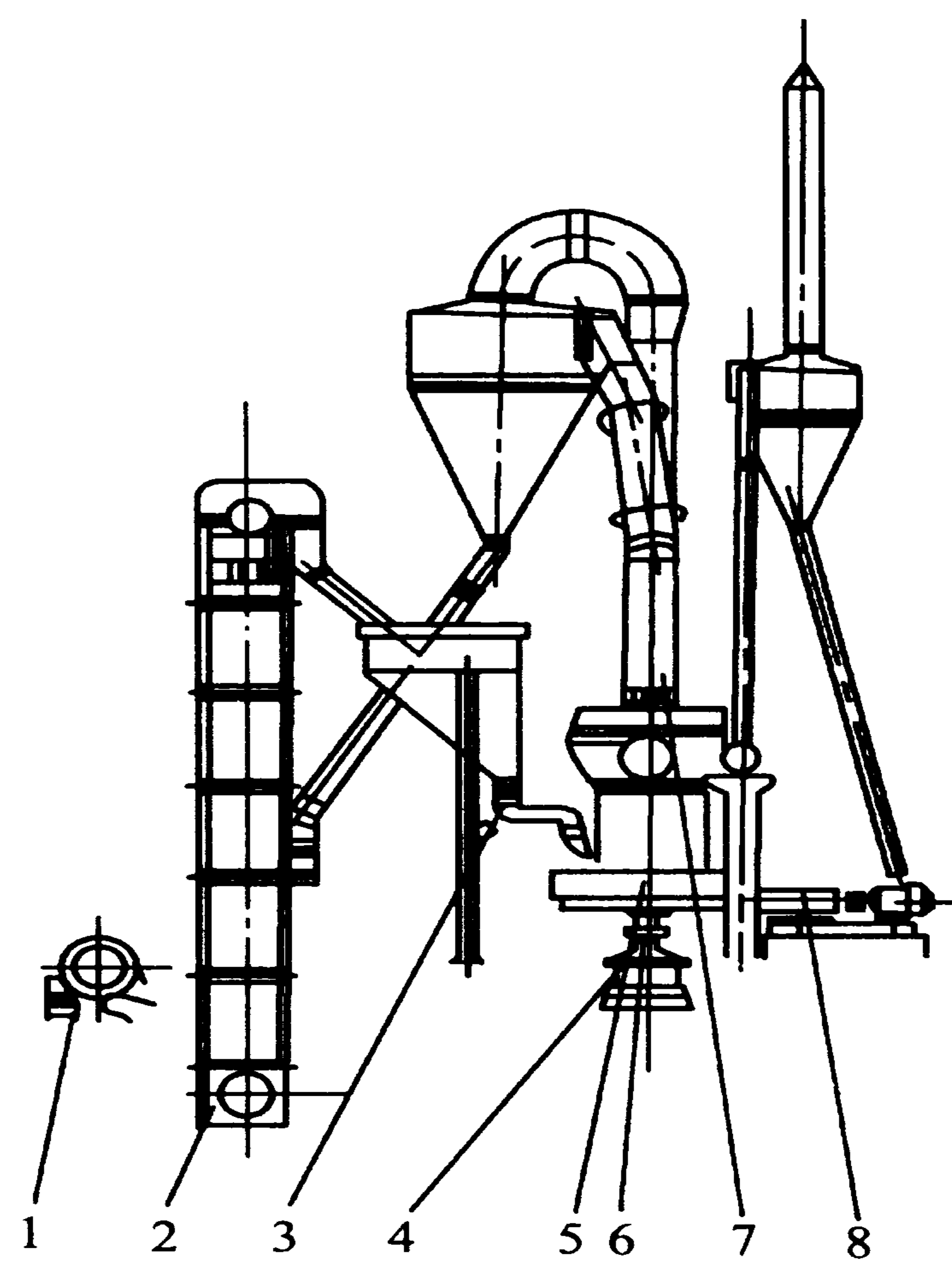


1. 梅花架 2. 辊子 3. 磨环 4. 铲刀  
5. 给料部 6. 返回风箱 7. 排料部

图 6-24 雷蒙磨（悬辊式盘磨机）

图 6-25 是雷蒙磨粉碎工艺流程简图。其中风力分级机是单排或双排叶轮式分级机，由一台单独的电动机驱动。为了提高分级效率并在较广泛范围内调节分级粒度，可选用双排叶轮式分级机。单排与双排叶轮式分级机的分级粒度分别在  $60\% < 100$  目至  $95\% < 200$  目之间或  $60\% < 100$  目至  $99.9\% < 325$  目之间，叶轮的转速越高，分级粒度将越细。叶轮由转盘及若干个径向叶片构成，使上升气流产生旋转运动。旋转气流产生的离心力使粗粒向外层聚集，最终脱离气流而落至磨碎区再度磨碎；符合要求的细粒级则随气流向上排入旋风集尘器，之后从集尘器下部排出，净化的气流从上部排入鼓风机并返回磨机的回风箱。整个系统在负压下工作，多余的气流经过另一台旋风集尘器再度清理后排入大气。

弹簧辊式的盘辊研磨机属于圆盘转动型，它是利用油压紧紧地将具有 2~4 个锥面的辊



1. 颚式破碎机 2. 斗式提升机 3. 电磁振动给料机 4. 传动装置 5. 雷蒙磨  
6. 风力分级机 7. 管道 8. 鼓风机

图 6-25 雷蒙磨粉碎工艺流程简图



子压向磨盘，物料经密封给料装置进入到磨盘上，受到辊子的压碎和研磨。气流自下方进入机内，夹带粉碎的物料向上排至风力分级机。风力分级机设于机器内部，直接在粉碎区之上，分级机分出的细粒产品排送到除尘和集尘装置，与气流分离后成为最终产品，不符合要求的粗颗粒可直接返回粉碎区。

食品工业上常用的碾辊盘磨机如图 6-26 所示，它由两个碾辊和一个磨盘组成。当碾辊绕着立轴和其本身的横轴转动时，物料就在碾辊与磨盘之间受挤压和研磨而被碾碎。盘磨机也有两种形式，图中所示为碾辊转动而磨盘不动，另一种是磨盘转动而碾辊相对于立轴并不转动。后一种的优点是：①比较容易固定碾辊且操作稳定；②比较容易卸出碾碎后的粉末产品；③在碾辊上没有离心力作用。

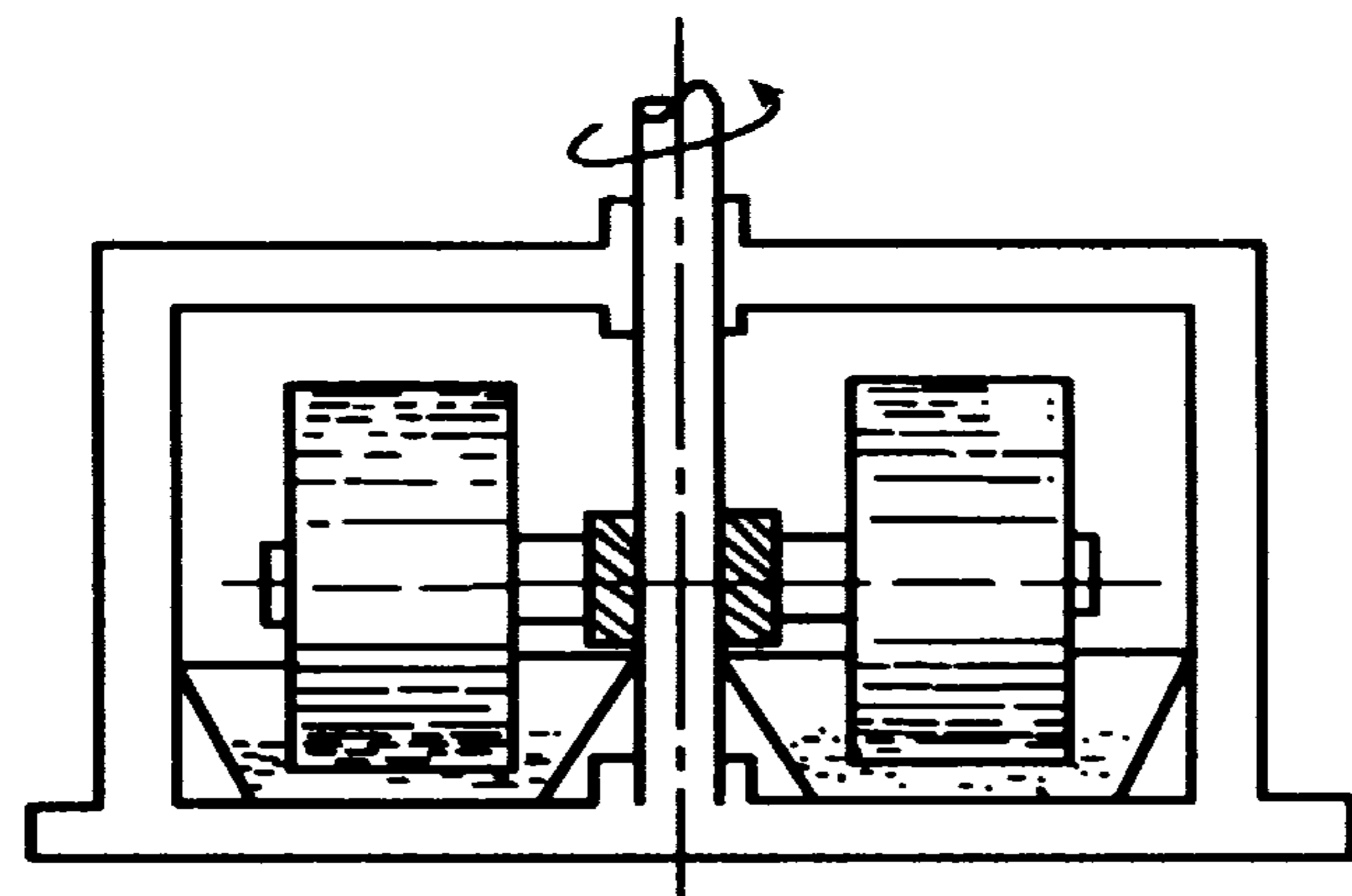


图 6-26 碾辊盘磨机示意图

### 3.4.2 辊磨机

辊磨机的中心部件是磨辊。在辊磨机内，磨辊表面可以是光滑的，也可以是带有齿槽的。表面光滑的称为光辊，带有齿槽的称为齿辊。由于齿辊的研磨效率高且能耗小，故经常采用。齿辊的技术特性主要有磨齿的齿数、齿型、斜度和排列四个方面。但对用于超微粉碎的精磨机来说，则要采用表面高度光滑坚硬的磨辊。

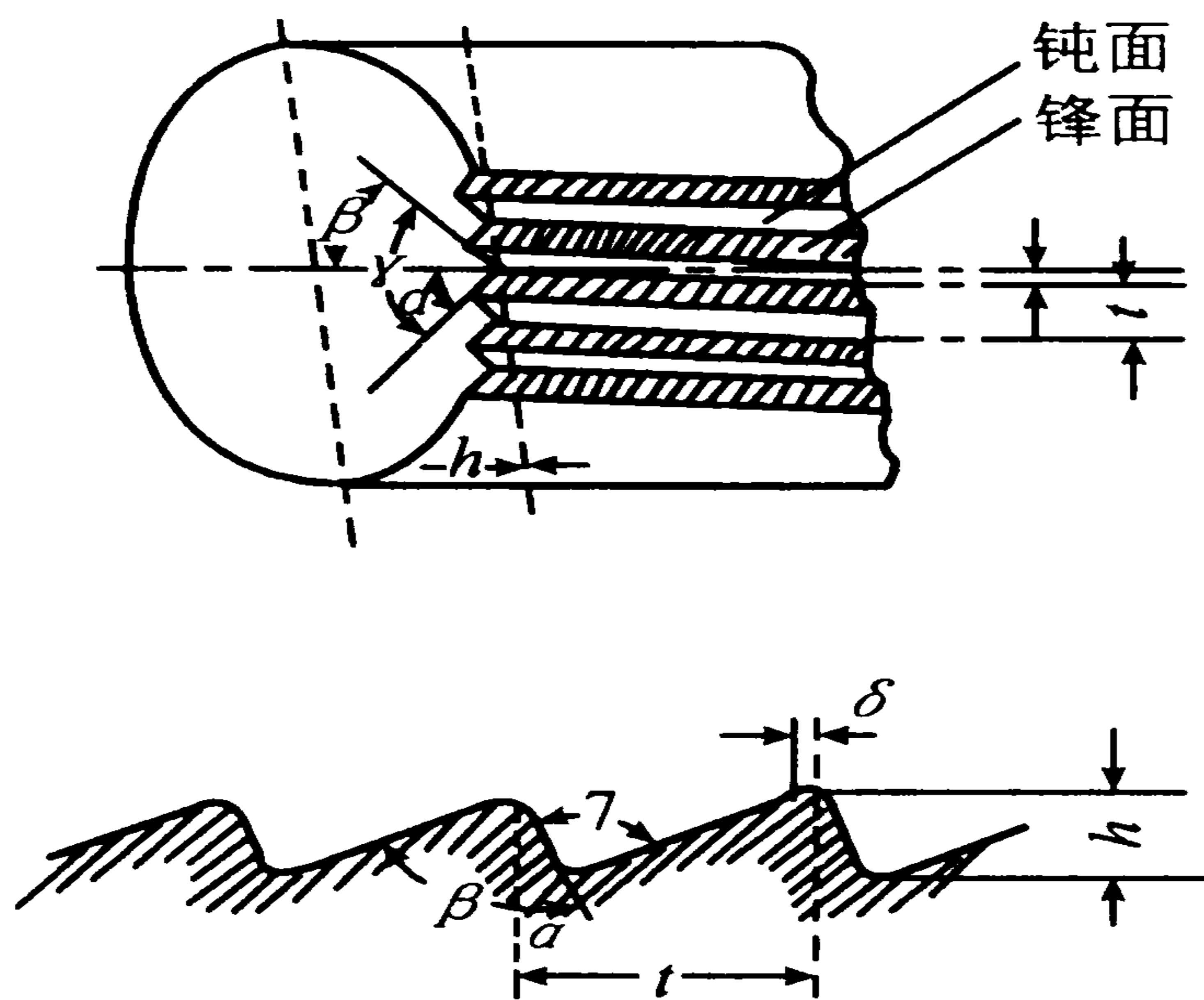


图 6-27 磨辊磨齿的齿形示意图

齿数是指磨辊单位长度上拉丝形成的拉丝数，也称牙数。研磨操作的必要条件之一就是原料的粒度  $d$  必须大于磨齿的齿距  $t$ ，否则就会失去研磨的作用。不难理解，对于粗颗粒的粉碎，磨辊的研磨齿数宜少，对于细料则宜多。此外，粉碎过程的动力消耗、研磨温度和磨辊的使用寿命等均与齿数相关。通常情况下，稀牙比密牙省动力、磨温低且磨辊使用寿命长。

磨齿的断面形状称为齿形，图 6-27 为磨辊齿形示意图。锋面与钝面之夹角称为牙角  $\gamma$ ，锋面与磨辊直径所形成的角称为锋角  $\alpha$ ，钝面与磨辊直径所形成的角称为钝角  $\beta$ ，这 3 个角之间存在如下的关系：

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (6-15)$$



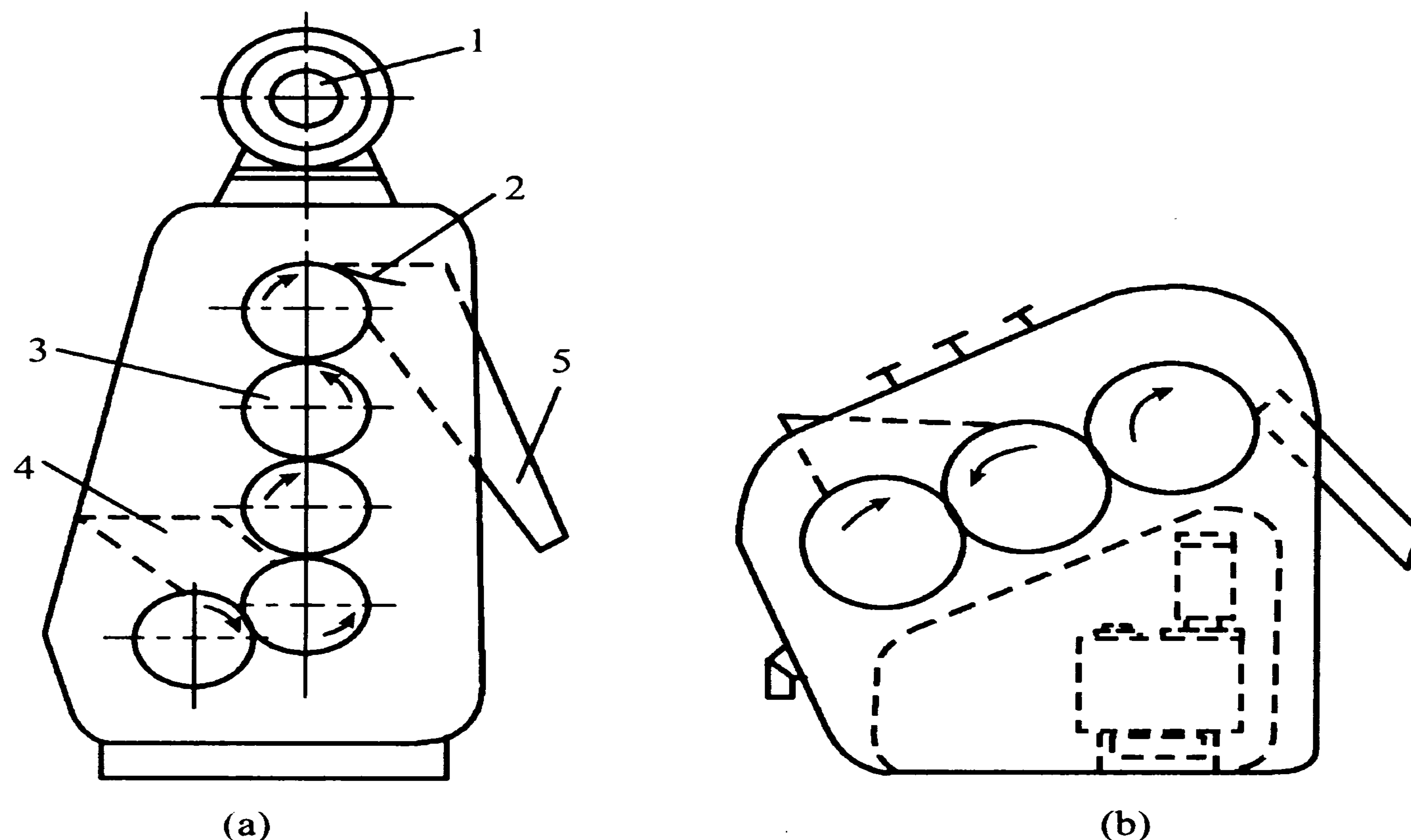
磨齿的齿顶不宜太尖,太尖容易磨损,一般都有  $\delta = 0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$  的宽度。牙角的大小对粉碎作用力有影响。同一牙数下,牙角越大,齿槽越宽,则剪切力越小而挤压力越大,当牙角为  $180^\circ$  时,即成为光辊,此时粉碎程度低,能耗大;在同一牙角的情况下,锋角越小时钝角越大,则剪切力越大而挤压力相对减小。

当辊磨机内相邻的 2 个辊子的排列方式不同时,将出现 4 种磨齿排列方式,即锋对锋、锋对钝、钝对锋、钝对钝。锋对锋排列时,物料在两锋面之间受到挤压作用,后来则以剪切作用为主。由于两辊快慢不同,慢辊起托住作用,快辊起挤压和剪切作用,而且锋角越大,剪切力越小,挤压力越大。当钝对钝排列时,作用为钝角,物料进入工作区后受挤压作用并逐步加强,最后略有剪切作用。

一对磨辊的拉丝必须有一定的斜度,且互相平行,否则不可能进行平稳的研磨。斜度越大(即  $\theta$  角越大),快辊磨齿对物料的作用力  $P$  的径向分力(剪切力  $F_1 = F \cos \theta$ )就越小,因此粉碎力越低,同时轴向分力( $F_2 = F \sin \theta$ )越大,物料容易克服磨齿上的摩擦阻力而滑向一边,使切削困难;相反,斜度越小则剪切力越大,当齿形尖时就成为切削作用。因此,斜度一般只能控制在  $0 \sim 20\%$  范围内变化。

综上所述,齿辊对于物料颗粒主要起挤压和剪切作用,适用于一般的微粉碎过程,对用于超微粉碎的精磨机来说,则要采用表面高度光滑坚硬的磨辊。

辊磨机类型很多。图 6-28 (a) 所示的是专用在巧克力浆料精磨上的五辊精



1. 电动机 2. 刮料刀 3. 辊筒 4. 进料 5. 出料

图 6-28 五辊和三辊精磨机



磨机，属于湿法超微粉碎设备，经它磨出的浆料平均粒度不超过  $25\ \mu\text{m}$ ，其中大部分颗粒的粒度在  $15\sim 20\ \mu\text{m}$  之间。图 6-28 (b) 所示的是三辊精磨机，其结构及工作原理与五辊磨机相似。它们的辊子的表面都要求高度光滑坚硬，以保证产品有一定的细度及精磨机有一定的使用寿命；辊筒与辊筒之间始终保持固定的间隙，这也是为了控制物料研磨的速度和粗细度；各个辊筒都要保持各自的指定的工作温度，使通过这些辊筒的物料能保持应有的温度和粘度；相邻的两个辊筒的转动方向和转速都不一样，进料辊最慢，出料辊最快，在出料辊处有一刮刀把磨好的物料刮入出料口。

多辊精磨机的工作原理如图 6-29 (以三辊机为例) 所示。由加料料斗加入的浆料借助于粘着力由辊筒表面带到加料缝 (两个辊筒的缝隙)，由于加料缝隙逐渐变窄，大部分浆料不能通过，而是在加料槽中不断翻滚做循环运动，其中一小部分浆料被拖带通过下、中两辊筒间的缝隙，这部分浆料受到两只辊筒速度差产生的较强的剪切力作用，较大的颗粒被粉碎微粒化，而且浆料得到均匀混合分散，浆料中的气泡同时被碾出。通过下辊筒和中辊筒缝隙的浆料，少部分黏附在下辊筒表面并被带回到加料槽中，而大部分却黏附在中辊筒的表面，被送到中辊筒与上辊筒间的缝隙里。由于上辊筒的转速更快，中辊筒与上辊筒的缝隙比下辊筒与中辊筒间的缝隙更狭窄，故浆料受到更强烈的剪切作用，于是浆料得到进一步微粒化、均匀混合和分散。

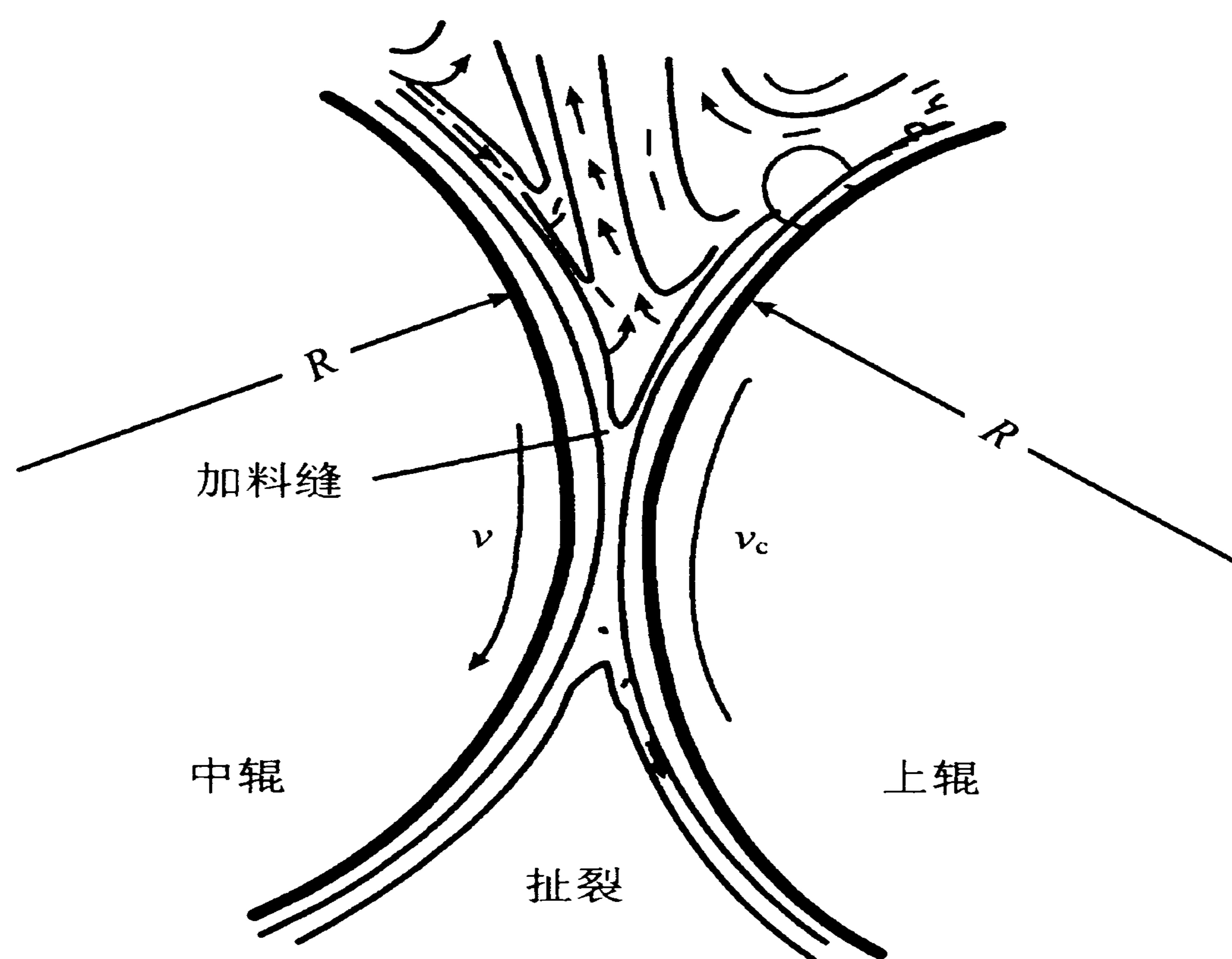


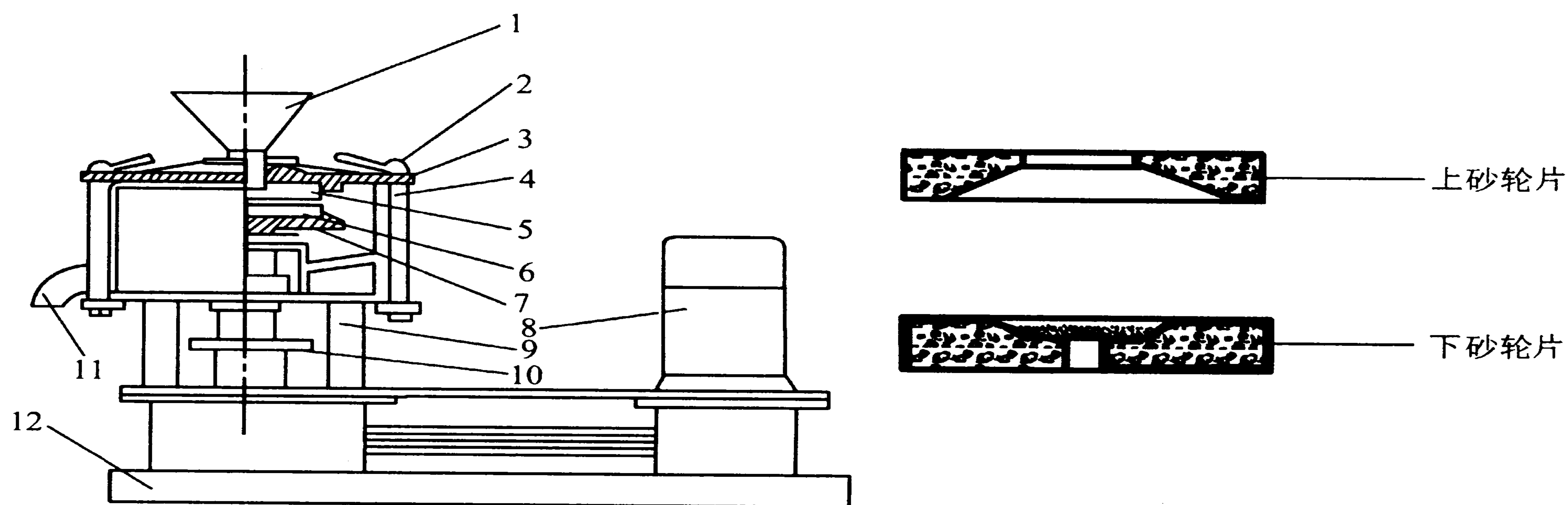
图 6-29 浆料在加料缝中的流动模型



### 3.5 盘式粉碎

盘式粉碎既适用于干的硬质物料，也适用于研磨含水率较高的以及韧性较大的物料的粉碎，尤其是用天然石和无毒金刚砂制造的磨盘在豆制品、玉米淀粉、果汁、油制品和乳制品等湿物料的生产过程中应用十分广泛。

金刚砂盘式粉碎机的基本构造如图 6-30 所示，其最基本部件是分别用螺母紧固在砂轮机轴头上和盖下面的两个金刚砂轮磨盘。



1. 料斗 2. 手把螺母 3. 上固定盘 4. 支撑柱 5. 上砂轮片 6. 下砂轮片  
7. 下固定盘 8. 电机 9. 支架 10. 调节器 11. 出料口 12. 机座

图 6-30 金刚砂盘式粉碎机

盘磨的工作原理是依靠两个磨盘表面间的挤压力和两磨盘上的磨纹在旋转时产生的摩擦和剪切作用将物料研磨成极细的产品。磨盘是一个扁圆柱体，它的中央部分内表面向里凹入，称为磨膛区，起到向外推送和分配物料的作用，整个工作表面按其形状和作用可分为四个区域，即喂入区、接收区、引入区和研磨区。喂入区位于磨盘的中央，是个圆形直孔；接收区成圆锥形，其功能是将喂入的物料储存起来，并逐渐送到引入区；引入区是锥度更小的薄的圆锥形，物料从接收区到引入区时受到越来越大的挤压力，被部分破碎并进一步推向研磨区；研磨区的磨盘上刻有许多带棱角的磨纹，物料在此区内被磨碎后从磨盘边缘排除。有的磨盘的研磨区内没有磨纹，由于两磨盘间存在锥形喇叭口，借助于物料的重力和



离心力喂入，磨盘对物料逐渐施加的挤压力和摩擦力也能使物料源源不断地通过研磨区而被热粉碎。

### 3.6 超细粉末制备技术研究方向

粉末工业是一个重要的基础原料工业，粉末制备技术在化学工业、材料工业、电子学和计算机技术领域、医疗卫生、航空航天、环保和能源、生物技术和农业、国家安全等领域都占有十分重要的地位。尤其是处在纳米材料正在渗入整个工业部门和高新技术领域的年代，纳米粉体的工业化制备技术已成为当今世界高科技竞争的热点之一，粉末工业面临着更严峻的挑战。

纳米材料指的是晶粒和晶界等显微结构能达到纳米级尺度水平的材料，而纳米粒子是加工和制造纳米材料的粒度在 1~100 nm 范围的超细粉末，它大于原子簇，小于通常的微粒，它包括金属、非金属、有机、无机和生物等多种颗粒材料。由于颗粒的超细化，界面原子占极大的比例，而且原子排列互不相同，界面周围的晶格结构互不相关，于是构成与晶态、非晶态均不同的一种新的结构状态，显示出奇特的物理、化学和力学性能以及优异的光、力、电、热、磁、放射、吸收、敏感、催化等特殊功能。

纳米粉末的制备是纳米材料和纳米技术研究的基础。早在 1861 年，随着胶体化学的建立，科学家就开始对直径为 1~100 nm 的粒子的体系进行研究。真正有意识地研究纳米粒子可追溯到 20 世纪 30 年代的日本，当时为了军事需要而开展了“沉烟试验”，但受到实验水平和条件限制，虽用真空蒸发法制成世界上第一批超微铅粉，但光吸收性能很不稳定。直到 20 世纪 60 年代人们才开始对分立的纳米粒子进行研究。1963 年，Uyeda 用气体蒸发冷凝法制得金属纳米微粒，对其形貌和晶体结构进行了电镜和电子衍射研究。1984 年，德国的 H Gleiter 等人将气体蒸发冷凝获得的纳米铁粒子在真空下原位压制成纳米固体材料，使纳米材料研究进入了一个新的阶段。1990 年在美国召开的第一届国际纳米科学技术会议，正式宣布纳米材料科学为材料科学的一个新分枝。近年来，纳米制备科学中纳米粉体的制备，由于其显著的应用前景，发展得较快。

由于纳米粉体在颗粒度、形貌、分散状况、物相和晶体结构等方面的特殊要求，要制备纳米粉体，不能简单套用上述的“粉碎”操作。20 多年来，经过众多发达国家的不懈的努力，在纳米制备科学中纳米粉体的制备已获得较快的发展。总括起来，纳米粉体的制备方法，以物料状态来分可归纳为固相法、液相法



和汽相法 3 大类；以过程特性来分，可分为化学制备法、化学物理合成法、物理方法 3 大类，或分为机械粉碎法和非机械法两类。

物理方法通常采用光、电技术或采用喷雾、加热等手段使材料在真空或惰性气体中蒸发，然后使原子或分子形成纳米颗粒。

化学方法一般先通过溶液中的反应生成沉淀，再将沉淀加热分解制成纳米颗粒。化学制备方法包括化学沉淀法、化学还原法、溶胶-凝胶法、水热法、溶剂热合成法、热分解法、微乳液法、高温燃烧合成法、模板合成法以及电解法。化学沉淀法又包括共沉淀法、均匀沉淀法、多元醇为介质的沉淀法、沉淀转化法、直接沉淀法等；而化学还原法包括水溶液还原法、多元醇还原法、气相还原法和碳热还原法等。

高能球磨法是用于制备纳米粉体的较成熟的机械粉碎法。高能球磨法与传统的筒式球磨不同，传统的球磨工艺只对物料起粉碎和混合均匀作用，而在高能球磨工艺中，由于磨球的运动速度更大，将使粉末产生塑性变形、固相相变，达到合成新物质的目的。高能球磨法可细分为机械合金化法（又称为反应性球磨法）和机械研磨法两个概念。

机械合金化技术是 20 世纪 60 年代末由美国 INCO 公司的 Benjamin 及其合作者在制造氧化物粒子弥散强化合金时发展起来的一门新技术。其过程为：将一定粒度的反应粉末（元素粉末、预合金粉末以及非金属粉末或反应气体等）以一定的配比、并保持研磨体与粉末的一定比例置于高能球磨机中长时间研磨。在研磨过程中，由于磨球与磨球、磨球与磨罐之间的高速撞击和摩擦，使得处于它们之间的粉末承受冲击、剪切、摩擦、压缩等多种力的作用，发生变形、焊合、加工硬化直至断裂。该过程反复进行、复合粉组织结构不断细化并发生扩散和固态反应形成合金粉。

机械研磨法与机械合金化法略有差异，首先其处理对象是单相金属间化合物、金属间化合物的混合物、金属间化合物与元素粉末的混合物、金属氧化物等，此外，在机械合金化法中有物质组分的传输，而在机械研磨法中一般不发生化学组成的变化。

高能球磨法工艺简单，制备效率高，能制备出常规方法难以获得的高熔点金属合金纳米材料，因而得到广泛应用。近年来又发展出助磨剂物理粉碎法及超声波粉碎法，均可制得纳米级微粒。

高能球磨法制备新材料的优势在于所需设备少、工艺简单，但影响最终产品的组成和性能的因素颇多，最主要的有如下几项：

(1) 原料性质的影响 物料体系的组成和各组成的配比是决定最终产品组成



的物质基础。原料的粒度和纯度则影响最终产品的性能。

(2) 球磨强度的影响 传统的筒式低能球磨机不能胜任制备纳米粉体的重任,就是因为它们不能为粉末的机械合金化或机械研磨提供所需要的能量。现在普遍用于机械合金化和机械研磨技术的设备是高能行星磨、搅拌磨和振动磨,尤其是行星磨。研磨过程最终获得的相,有的主要依赖于每次钢球碰撞所传输的能量,有的还与碰撞频率有关。实验表明,球磨强度对机械合金化非晶( $\text{Fe}_{50}\text{Ti}_{50}$ )的形成有着极其重要的影响。强度低时,粉末形成非晶的时间较长,甚至无法形成非晶。而当强度较高时形成非晶的时间会大大缩短,且有助于非晶成分范围的扩大。但继续球磨会使已经非晶化的粉末重新晶化形成新的未知相。当研磨能量提高到一定程度以后,往往更易形成稳定的化合物而不是非晶。此外,Mo-Si混合粉末机械合金化的研究也证明了Mo/Si相变与球磨强度密切相关,高能球磨有利于 $\alpha\text{-MoSi}_2$ 的形成,而低能球磨有利于亚稳相 $\beta\text{-MoSi}_2$ 的形成。

(3) 球磨气氛的影响 在高能球磨中,各种金属粉末粒子被磨球捕获或被碰撞,粒子重复性地被挤压变形、断裂、焊合及再挤压变形。在每次冲击载荷作用下,粉末都可能产生新生原子面,当新生原子面之间接触时就焊合在一起。因为新生原子面之间极易氧化,所以球磨时必须在真空或保护气氛下进行。由Ar、 $\text{N}_2$ 和 $\text{O}_2$ 气氛对机械合金化合金( $\text{Ni}_6\text{O}_6\text{Ti}_4\text{O}$ )结构的影响的研究表明,只有 $\text{O}_2$ 对合金结构有影响,磨到一定时候, $\text{O}_2$ 进入合金,再磨又分解出来。一般说来,高纯Ar气一类的惰性气体不会参与机械合金化和机械研磨过程,但 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2$ 等却可能直接参与反应,而且,反应产物还同反应气氛的压力有关。所以,应根据需要慎重选择反应气氛及其相应的压力。有时还用添加过程控制剂来除氧,人为营造一个球磨气氛。

(4) 研磨介质大小及球料比的影响 在高能球磨中一般都采用不锈钢球作为研磨介质,球径一般在10 mm以下。为了获得较高的球磨能量,一般都采用较大的球料比,其值从几比一到几十比一不等。

(5) 球磨时间和温度的影响 球磨时间的长短直接影响着产物的组分和纯度。因为球磨时间与相转变等休戚相关,某种成分只在某一时间段生成。球磨时间的长短与上述诸因素都有关系。

在研磨过程中,由于球磨对粉末的摩擦与撞击,粉末的温度要升高,一般认为,研磨时粉末的温升不要超过350 K。

新的制备技术的发展是十分重要的,它将扩大纳米微粒的应用范围和改进其性能,满足当今高科技对结构和功能材料之需要,使超微粉体的优良特性得以造福人类。



## 4 筛分与筛析的基本概念

### 4.1 筛分与筛析

筛分是利用筛分器（或简称筛子）将粒度不同的固体颗粒混合物分离成若干部分的单元操作。在筛分过程中，通过筛孔的物料称作筛过物，未能通过的称作筛留物。筛分结果，使每一部分颗粒的大小都比原来更均匀。在工业上，常用筛分法将粒状或粉状物料按规定的粒度范围相分离。除此之外，还通过利用筛孔大小不同的一套筛子进行粒度分级，测定和分析粉碎产物的粒度组成特性，即进行过筛分析（简称筛析）。

### 4.2 标准筛

#### 4.2.1 标准筛

筛分操作所用设备的工作面是筛面。筛面结构有格子筛（又称栅筛）、板筛（又称筛板）、编织筛（又称网筛）等多种。格子筛与板筛用于筛分块、粒状物料，编织筛主要用于筛分粉料或浆料。标准套筛则用于分析细粒物料，也即用于测定粒度分布。

编织筛是用钢丝、铜丝或尼龙丝等按经纬形式编织而成的。标准套筛是由一套筛孔大小有一定比例的筛子组成的，每个筛子的筛孔尺寸、筛丝尺寸都经过严密鉴定，因而网面上一定长度所包括的孔数都一定。不过，对不同的筛子，其网眼大小与筛号的定量关系的规定不完全一样。

世界上比较通行的泰勒标准(Tyler Standard)筛，筛号即为筛网上每英寸(1英寸=2.54 cm)筛丝上的孔数，我国称为“目”数。它既规定了某一号筛的筛网上每英寸的孔数，又规定出其网线的直径，则每孔大小便固定下来。例如80号(目)筛上每英寸筛网有80孔，网线的直径规定为0.0056英寸，故筛孔的宽度为 $(1/80 - 0.0056) = 0.0069$ 英寸=0.175 mm。此外，该系列中任一号筛的筛孔面积正好



两倍于与其相邻的较大一号筛的筛孔面积,即孔眼的宽度是按 $\sqrt{2}$ 倍递变的。亦有孔眼的宽度按 $\sqrt[4]{2}$ 倍递变(即筛孔面积按 $\sqrt{2}$ 倍递变)的系列筛号,但较少用到。

德国标准(DIN)筛制的筛号代表每厘米长筛丝上的网眼数目。例如20号筛即每厘米长筛丝上有20个筛孔,每平方厘米有400个筛孔。

英国标准(BS)筛制规定,一个170号筛的筛网大小为 $90\ \mu\text{m}$ ,相邻两筛号的筛网大小之比约为 $\sqrt[4]{2}$ 。

美国的筛制(ASTM-ELL)规定,18号筛的网眼大小为 $0.1\ \text{mm}$ ,相邻间隔为 $\sqrt[4]{2}$ 。

日本标准(JIS)筛制的筛号表示法与泰勒筛制相同,但采用的筛丝直径略有差异,因而对应筛号的筛孔净宽也略有差异。

我国现行标准筛采用ISO制,以方孔筛的边长表示筛孔大小。

#### 4.2.2 筛网的空隙率

空隙率也称开孔率,是指筛孔净面积占筛面总面积的比率(%),可以用下式表示:

$$\eta_s = (1 - zD_b)^2 \times 100\% \quad (6-16)$$

式中: $z$ 为单位长度内的筛孔数; $D_b$ 为筛丝直径

一般来说,筛网的空隙率可达80%,但在筛孔较小的情况下,空隙率则为40%左右。筛板的空隙率均在50%以下,这样就影响了颗粒通过筛孔的可能性。空隙率又称筛面的有效面积比,这个比值越高,对筛分越有利。

### 4.3 筛分机理

在筛分过程中,物料欲通过筛孔,必要的条件就是颗粒的大小一定要比筛孔小,同时颗粒还要有通过筛孔的机会,充分的条件就是颗粒与筛面之间要保持一定的形式的相对运动。

(1) 颗粒通过概率 如图6-31所示,设有一筛面为金属丝织成方形孔的网筛,筛孔每边净长为 $D$ ,筛丝的粗细为 $D_b$ ,要通过该网眼的是直径 $d$ 的球形颗粒。对于这个网眼而言,球粒中心的运动范围为 $(D + D_b)^2$ 。当球心的位置处于 $(D - d)^2$ 时,颗粒能够顺利落下,所以理论上颗粒下落的概率为:

$$P = \frac{(D - d)^2}{(D + D_b)^2} = \left( \frac{1 - d/D}{1 + D_b/D} \right)^2 \quad (6-17)$$



例如，筛孔  $D$  为 1 mm，筛丝直径  $D_b$  为 0.25 mm 或 0.5 mm，不同粒度的颗粒通过筛孔的概率比较结果列表于 6-6：

表 6-6 颗粒通过网眼概率的比较

粒径 $d/\text{mm}$	颗粒通过概率 $P/\%$		粒径 $d/\text{mm}$	颗粒通过概率 $P/\%$	
	$D_b=0.25\text{ mm}$	$D_b=0.50\text{ mm}$		$D_b=0.25\text{ mm}$	$D_b=0.50\text{ mm}$
0.1	51.92	36.00	0.7	5.76	4.0
0.4	23.08	16.00	1.0	0	0

如图 6-32 所示，当筛面倾斜位置时，筛孔的“有效”宽度将由  $D$  减小为  $D'$ ，即  $D' = D \cos \alpha$ ，相应的颗粒能通过筛孔的概率势必减小；若颗粒的形状不是球形，而是正方形、长方形或是其他不规则的形状，则其通过筛孔的机会也必定会减少。

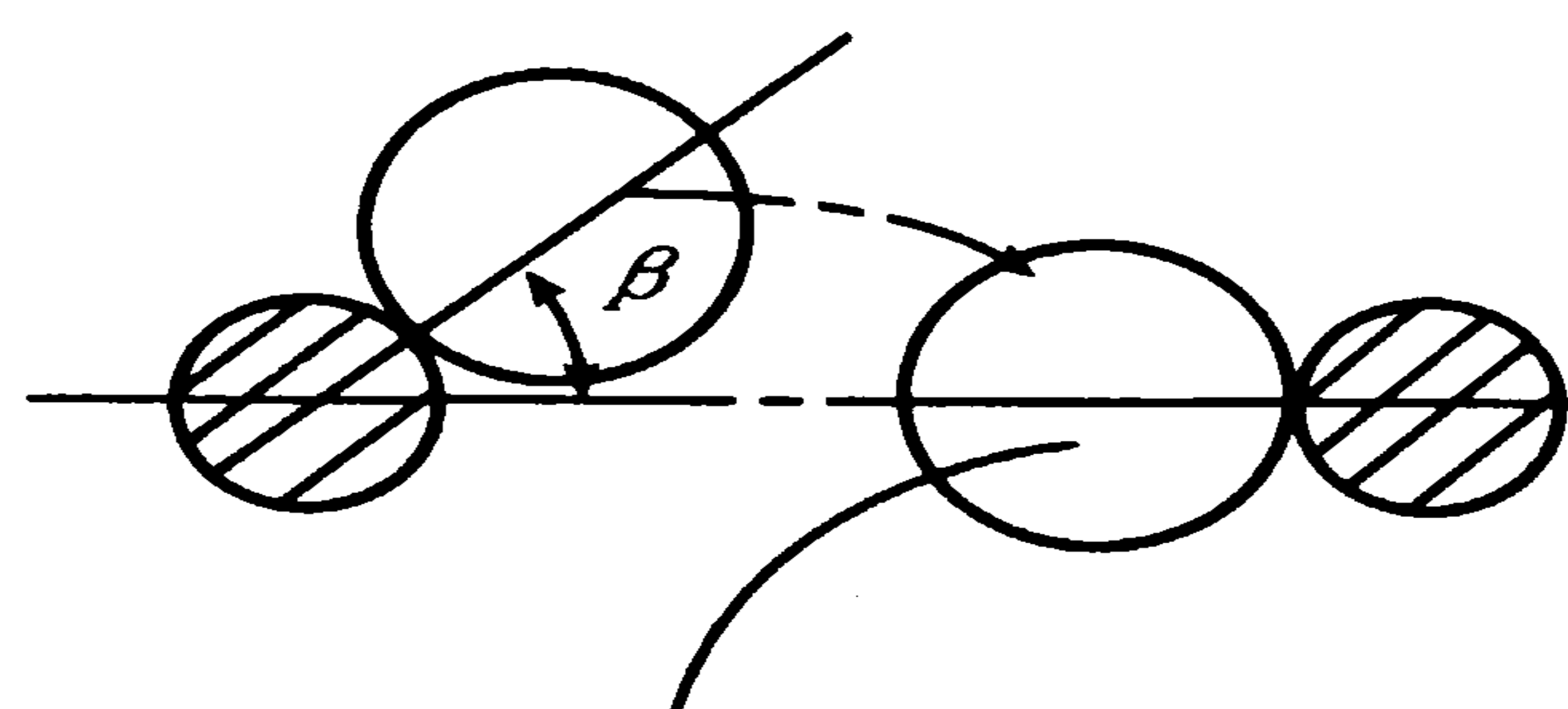
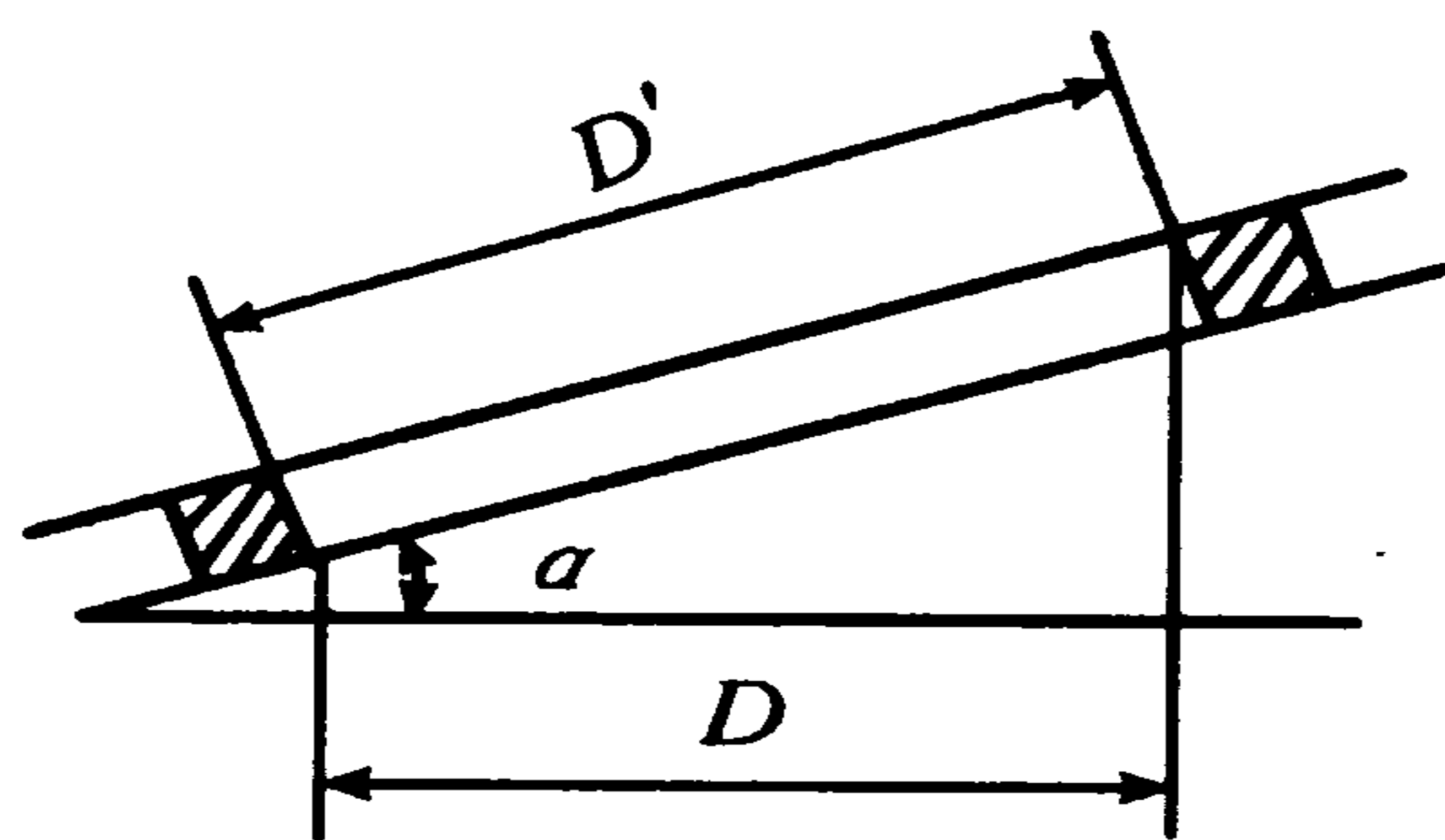
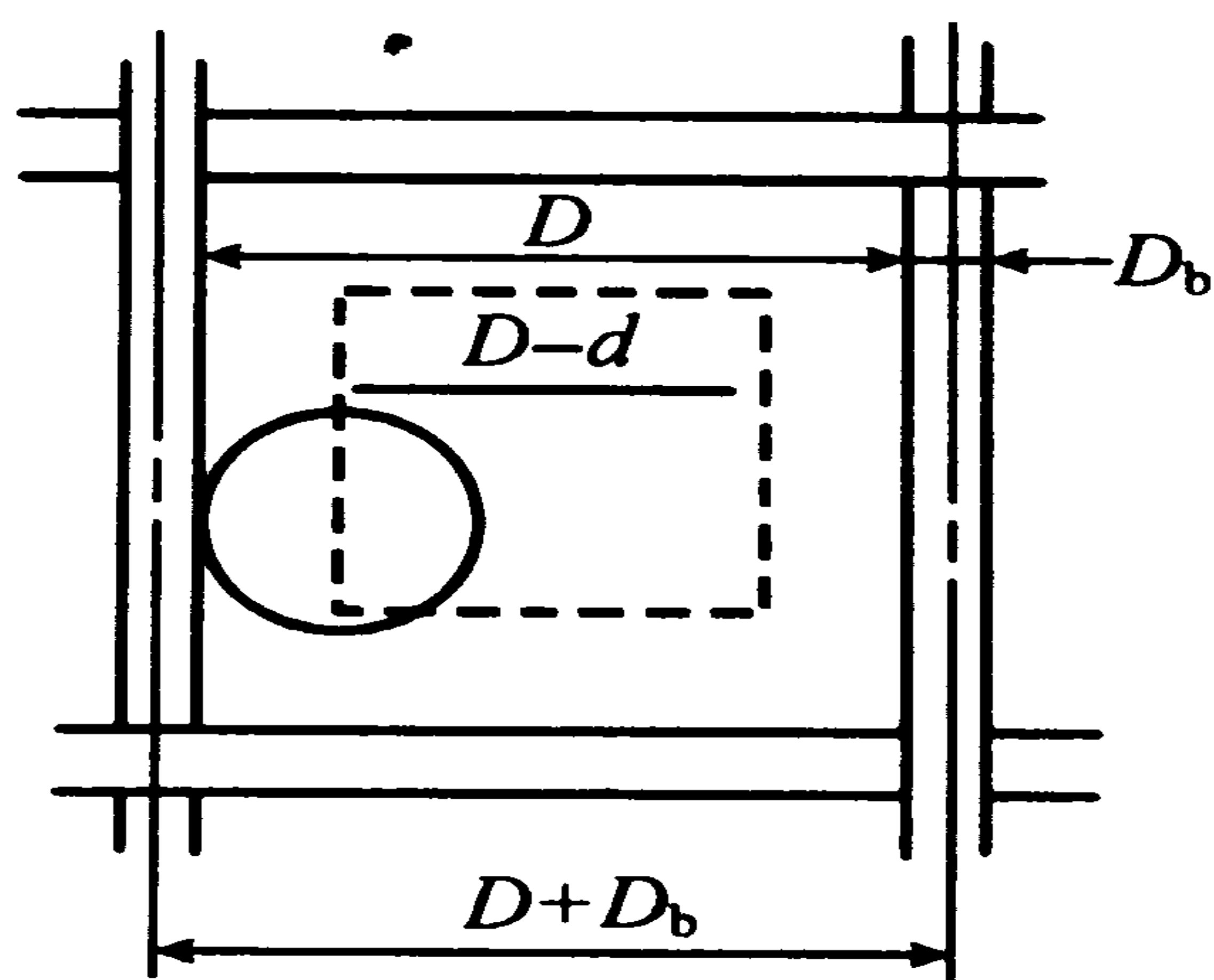


图 6-31 颗粒通过概率 图 6-32 斜筛面对颗粒通过的影响 图 6-33 颗粒的弹性通过

在实际的过筛过程中，球形颗粒通过筛孔的概率要比上述理论计算值大一些。这是因为，一开始球形颗粒落在可能通过的范围之外并不代表它完全不能通过网眼，当它与筛丝相碰时，只要角度  $\beta$ （参见图 6-33）在一定范围内，仍旧有被弹跳起再落入筛孔的可能。

(2) 筛分效率 如前所述，含有不同粒度的物料经过筛面时，并非所有小于筛孔的颗粒都能有机会穿过筛孔而成为筛下料，即在筛上料中仍混有筛下料颗粒。为了说明筛分质量，引入筛分效率的概念。设入筛物料中含有筛下粒级的颗粒的质量为  $m_1$ ，筛上料的质量为  $m_2$ ，混在筛上料中的筛下粒级的颗粒的质量为  $m_3$ ，实际筛出的筛下料质量  $m_4$ ，则：

$$m_1 = m_3 + m_4$$

$$\eta = \frac{m_4}{m_1} \times 100\% = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \times 100\% \quad (6-18)$$



用累计筛下百分含量来表示,则:

$$\eta = \frac{w_a(w_b - w_c)}{w_b(w_a - w_c)} \times 100\% \approx \frac{w_b - w_c}{w_b(1 - w_c)} \times 100\% \quad (6-19)$$

式中: $w_a$  为筛下料中含筛下粒级的质量分数,在筛面不破,筛上料不漏入筛下的正常情况, $w_a = 100\%$ ;  $w_b$  为入筛物料含筛下粒级的质量分数;  $w_c$  为筛上料中含筛下粒级的质量分数。

工业上实际操作的平均筛分效率为 70% ~ 98%, 这与筛面的相对运动, 料层的厚薄, 筛孔形状和有效面积比, 物料颗粒大小的分布规律和颗粒形状, 过细颗粒的含量以及物料的含水率等因素有关。

(3) 影响筛分的因素 影响筛分的因素主要来自两方面: 一是被筛分的物料; 二是过程所用的设备。

物料方面的影响因素有:

①堆积密度: 在物料堆积密度比较大(约在 0.5 t/m<sup>3</sup> 以上)的情况下, 筛分处理能力与颗粒密度成正比例关系; 但在堆积密度较小的情况下, 由于微粒子的飘扬, 尤其是轻质的物料, 则上述的正比例关系不成立。

②粒度分布: 粒度分布是一个十分关键的因素, 可引起处理能力的变化幅度高达 300%。一般讲, 细粒多, 则处理能力大。物料中所含的难筛物(粒度大于筛孔尺寸的 3/4 而小于一筛孔尺寸的颗粒)、阻碍粒(粒度大于筛孔尺寸而小于 1.5 倍筛孔尺寸的颗粒)的数量越少, 筛分越容易, 筛分效率也越高。一般规定, 入筛物中最大颗粒的粒度不能大于筛孔的 2.5~4 倍。

③含水量。物料中水分含量达到一定程度时, 由于颗粒间的相互黏附易结成团块或堵塞筛孔, 筛分能力就会急剧下降。若因势利导地改成湿式筛分, 反可以使处理能力提高。

筛分机械方面的影响因素有:

①空隙率: 筛面开孔率越小, 则筛分处理能力越小, 但是筛面的使用寿命相对的会延长。

②筛孔大小: 在一定范围内, 筛孔大小与处理能力成正比关系。但是筛孔过分小的话, 筛分处理能力就会急剧降低。

③筛孔形状: 正方形筛孔的处理能力比长方形的为小, 但是就筛分的精确度而言, 以正方形的为佳。

④振动的幅度与频率: 振动的目的在于使筛面上的物料不断运动, 防止筛孔堵塞, 以及使大小颗粒构成一合适的料层。一般说来, 粒度小的适宜小振幅与高



频率振动。现在有用音频波来提高细粉的筛分效率的，即所谓“音波筛”。

⑤加料的均匀度：单位时间的加料量应该相等，入筛料沿筛面宽度分布应该均匀。在细筛时加料的均匀性影响更大。

⑥料速与料层厚度：筛面倾角大时，增快料速，可增加处理能力，但使筛分效率降低。料层薄，虽会降低处理能力，但可提高筛分效率。

## 4.4 筛分方法

根据物料性质的差异及对筛析结果精度要求的不同，筛分分析有干法和湿法之分。如果对筛析的精确度要求不甚严格，通常直接进行干法筛析。但如果物料含水较多、互相粘结时，应采用干湿联合筛析法，才能得到比较精确的结果。

干法筛析时，先将标准筛按筛孔由大到小的顺序从上到下叠置起来，网眼最密的一个筛底下放置一无孔的盘—底盘，然后将要分级的试样加于顶端的筛子上，盖好上盖，放到振筛机上均衡地振摇一定的时间，使试样按颗粒大小过筛而分离为几部分。最后将截留在每一个筛面上的颗粒取出称量，并记录每一筛号。停留在某一号筛面上的颗粒可认为是通过上一号筛的筛孔而被该号筛所截留的颗粒，因而，可取这两号筛的筛孔的净宽度的算术平均值代表这部分颗粒的平均直径。通过最细一号筛而落在筛底盘上的颗粒，其平均直径则取为此筛孔宽的 $1/2$ 。于是，我们就可得到各号筛上的颗粒的平均直径和质量分数的对应关系，也就是得到试样的粒度分布数据。

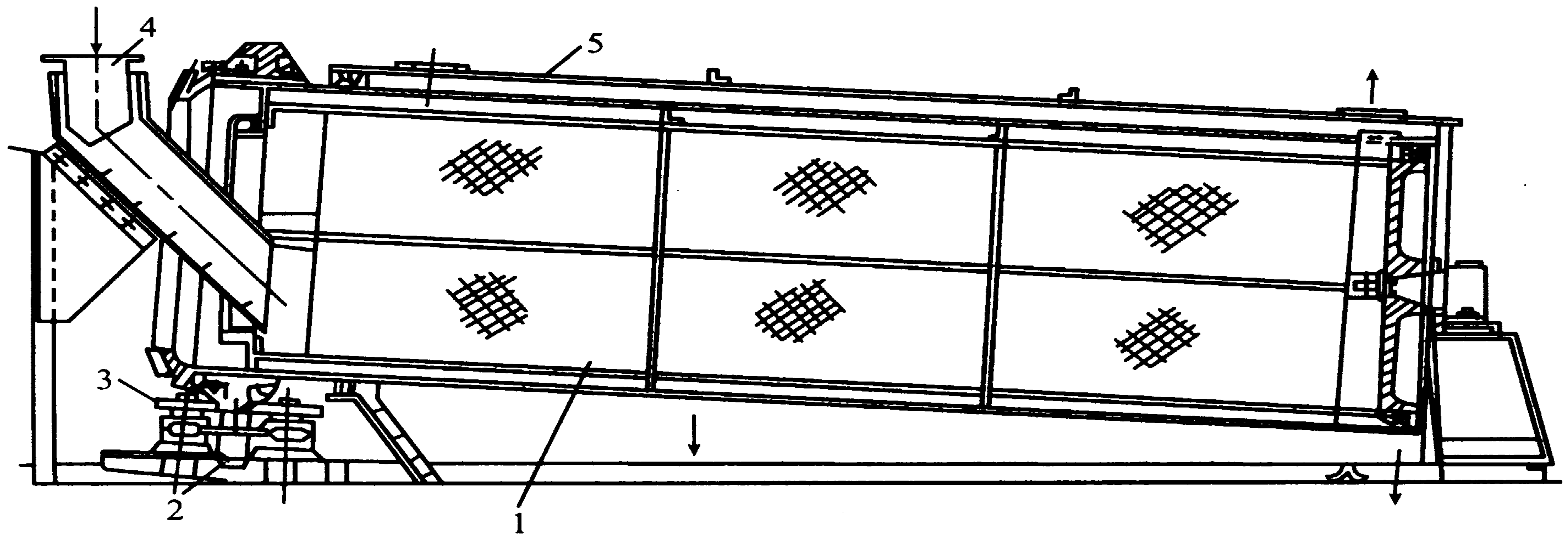
干湿联合筛析的过程是，先将试样倒入细孔筛（如200目或325目的筛子）中，在盛水的盆内进行筛分，每隔 $1\sim 2$  min，将盆内的水更换一次，直到盆内的水不再混浊为止。将筛上物料进行干燥和称量，并根据称出质量与原样品质量之差，推算出洗出的细粒物料的质量。然后再将干燥后的筛上物用干法筛析，并将所得最底层筛面的筛下物料量与湿筛时洗出的细粒物料量合在一起计算。筛析结束后，将各粒级物料称量，各粒级物料质量之和与入筛物料之差不得超过入筛物料质量的1%，否则应重新筛析。

为促使物料颗粒通过筛孔，提高筛分效率和生产能力，物料与筛网之间必须作相对运动。于是，可将筛分设备分为固定式和运动式两类；依筛面形状又可将运动式的分为滚筒筛和平面筛2种。

图6-34为滚筒筛的结构简图。滚筒筛的主要部件为圆筒形的筛网。运行时，筛筒绕与水平面成约 $5^\circ$ 倾角的轴回转，被筛分的物料经加料斗送入圆筒内，筛



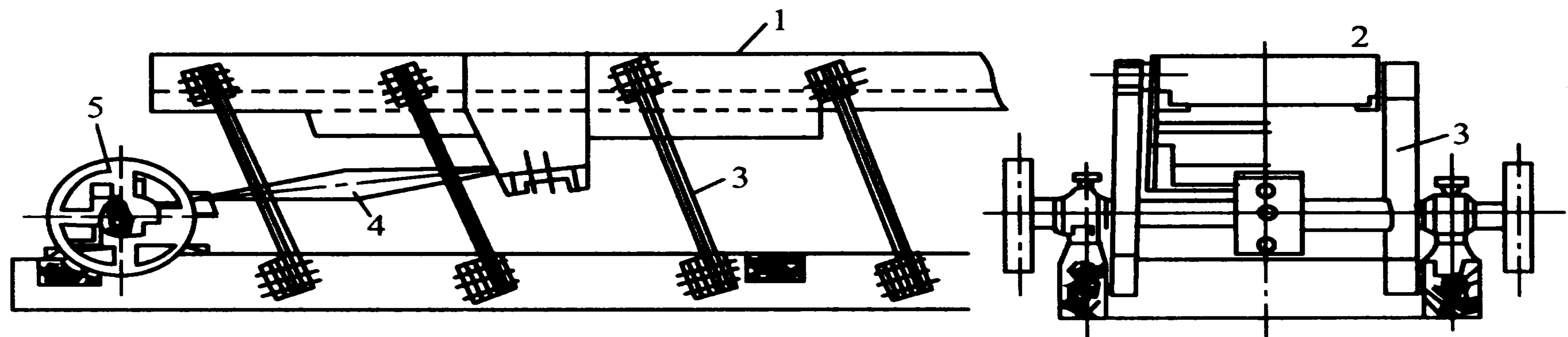
过物从筛筒四周排出。此种筛适用于分离较粗的物料。分离较细的物料，则以采用平面筛较为有效。



1. 带孔圆筒 2. 支承轮 3. 止推轮 4. 加料漏斗 5. 外壳

图 6-34 滚筒筛

按运动方式，平面筛又可分为摇动式、旋转式和振动式。图 6-35 为摇动筛筒图，它的筛网是水平放置或略微倾斜，操作时利用偏心轮使筛网作往复运动，物料从筛的一端送入，筛过物经筛孔落下，筛留物则顺筛移动，最后从另一端送出。振动筛与摇动筛无甚大区别，惟摇动筛的摆动幅度较大，数量级为厘米，频率为每秒钟几次；振动筛的振幅的数量级为 mm，频率为每秒钟几十次。两种筛都可以用机械的（偏心轮或曲轴）或电磁的方法传动，但摇动筛常用前者，振动筛用后者。



1. 外壳 2. 筛 3. 弹簧杆 4. 连接杆 5. 偏心轮

图 6-35 摇动筛



## 习题

1. 有一柱形颗粒，底面是边长为  $a$  的正方形，柱高为  $h$ ，试计算其表面积当量直径  $d_s$ 、体积当量直径  $d_v$  及球形度  $\Psi$ 。
2. 实验测得将 1 kg 直径为 1 mm 的玉米淀粉颗粒磨碎到 0.2 mm 需要消耗能量 18.0 kJ，若继续将其磨碎到最终粒度为 0.05 mm，还需多少能量？
3. 表 6-1 列出了某筛分分析所得的粒度分布数据，试计算该分析试样的以比表面积作为平均基准的平均粒度。
4. 某面粉厂的磨粉机送出的第 1 道粗磨物料中含面粉 9%，经 100  $\mu\text{m}$  筛孔的筛网过筛 50 s，筛上料中面粉含量降到 1.5%，试计算相应的筛分效率为多少？欲达到 92% 以上的筛分效率，筛上料中面粉含量至少应降到多少？

## 思考题

1. 开路粉碎与闭路粉碎在工艺流程上有何不同？各有何优缺点？适用于哪些情况？
2. 粉碎过程中物料受到哪几种力的作用？粉碎能耗、物料的破碎强度主要与物料哪些性质相关？
3. 工业上怎样表述非球形颗粒的粒度？一定形状的颗粒的球形度与其表面积当量直径及体积当量直径之间存在怎样的关系？
4. 何谓平均粒度？常用的表达方式有哪些？
5. 球磨机、振动磨及搅拌磨在粉碎过程中有哪些异同点？
6. 从工作原理看，叶轮式超级冲击磨的粉碎作用是属于机械粉碎还是属于气流粉碎？试比较各种粉碎操作的特点。
7. 何谓纳米粉末？如何制备？有何用途？
8. 影响筛分效率的主要因素有哪些？



## 本章重点符号说明

符号	含义	计量单位
$U$	结合能	kJ
$A$	麦德隆常数	
$B$	和晶体结构相关的常数	
$r$	质点间的距离	m
$n$	玻恩指数	
$e$	电量	
$F$	质点间的相互作用力	N/m <sup>2</sup>
$E$	粉碎能耗	kJ
$\Delta S$	物料经粉碎后表面积增量	m <sup>2</sup>
$K_1、K_0$	比例常数 ( $K_0 = K_1$ )	
$\rho$	物料的密度	kg/m <sup>3</sup>
$d_1、d_2$	粉碎前后的颗粒粒度	m
$W_i$	功指数	
$d_s$	表面积当量直径	m
$S_p、V_p、a$	颗粒的表面积、体积、比表面积	
$d_v$	体积当量直径	m
$d_A$	比表面积当量直径	m
$\Psi$	球形度	
$n_c$	球磨机的临界转速	r/min
$\Phi$	球磨机的筒体直径	m
$\omega$	振动频率	
$\mu_M$	物料的充填率	
$t$	粉碎时间	s
$H$	物料的可磨性指数	

## 参考文献

- [1] 卢寿慈. 粉体加工技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1999
- [2] 盖国胜. 超细粉碎分级技术. 北京: 中国轻工业出版社, 2000
- [3] 郑水林. 超细粉碎原理、工艺设备及应用. 北京: 中国建材工业出版社, 1993



[4] 高福成. 现代食品工程高新技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1997

[5] 杨宗志. 超微气流粉碎(原理、设

备和应用). 北京: 化学工业出版社, 1988

[6] 谭天恩. 化工原理. 北京: 化学工业出版社, 1990