

四

分级与筛分

4.1 概述

■ 分级定义

- ✓ 按生产工艺的要求，把粉碎产品按某种粒度大小或不同种类颗粒进行分选的操作过程

■ 分级方式

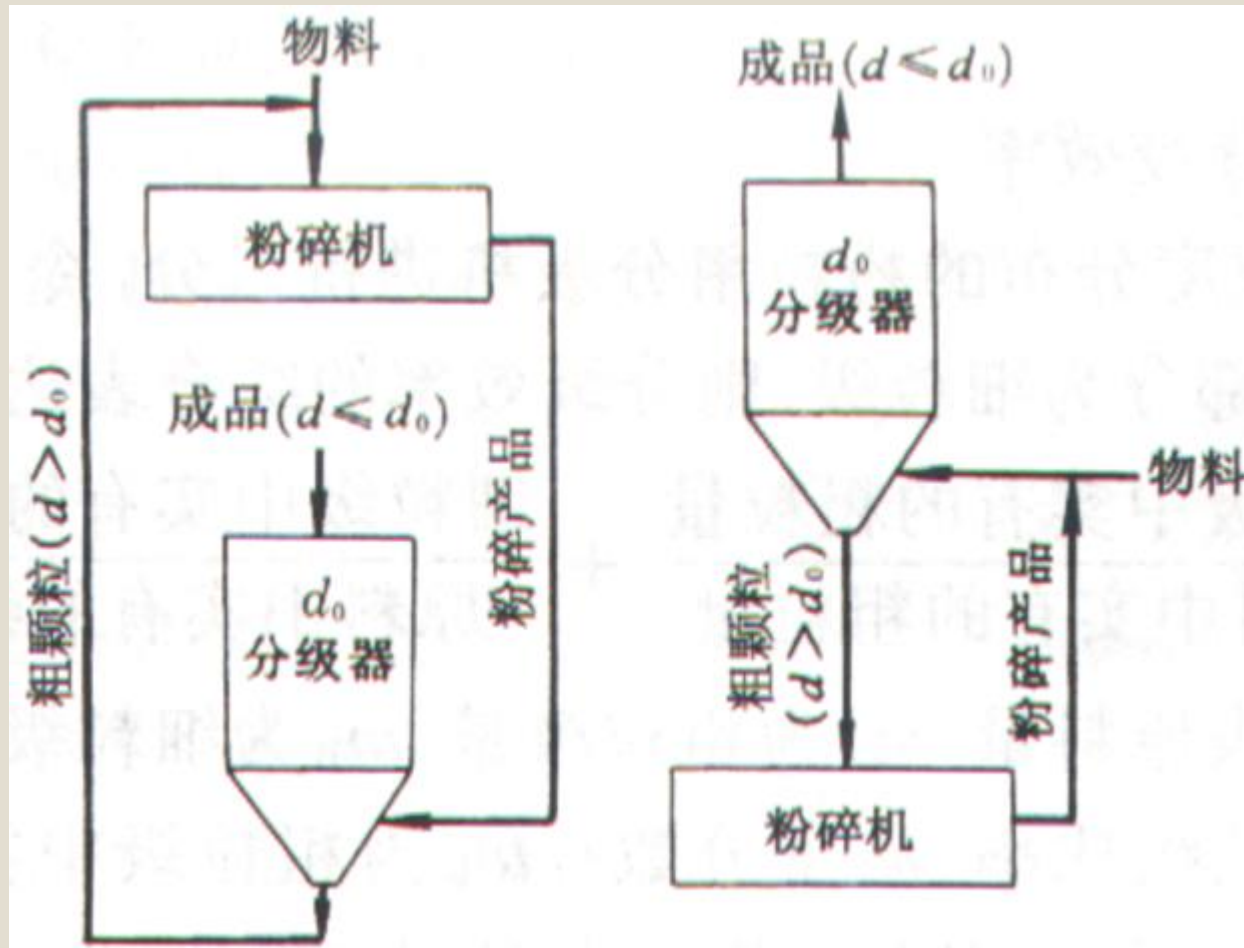
- ✓ 筛分分级：适合粒度大于 $50\mu\text{m}$ 粉末的分级
- ✓ 流体（液体或气体）分级：适合粒度小于 $50\mu\text{m}$ 粉末的分级

■ 分级粒径

- ✓ 将任一组颗粒进行分级，若粗粒部分未混入小于 d_0 的颗粒，细粒粉末混入大于 d_0 的颗粒，此时由于 d_0 粒度的分级进行的完全，称为理想的分级， d_0 为分级粒度或分级颗粒直径，此时的分级效率为100%

分级系统

注意：一般粉碎与分级串联进行



分级机与粉碎机的两种组合形式

分级性能的评估

➤ 分级效率

分级后获得某种颗粒成分的质量与分级前粉体中所含该成分的质量之比。

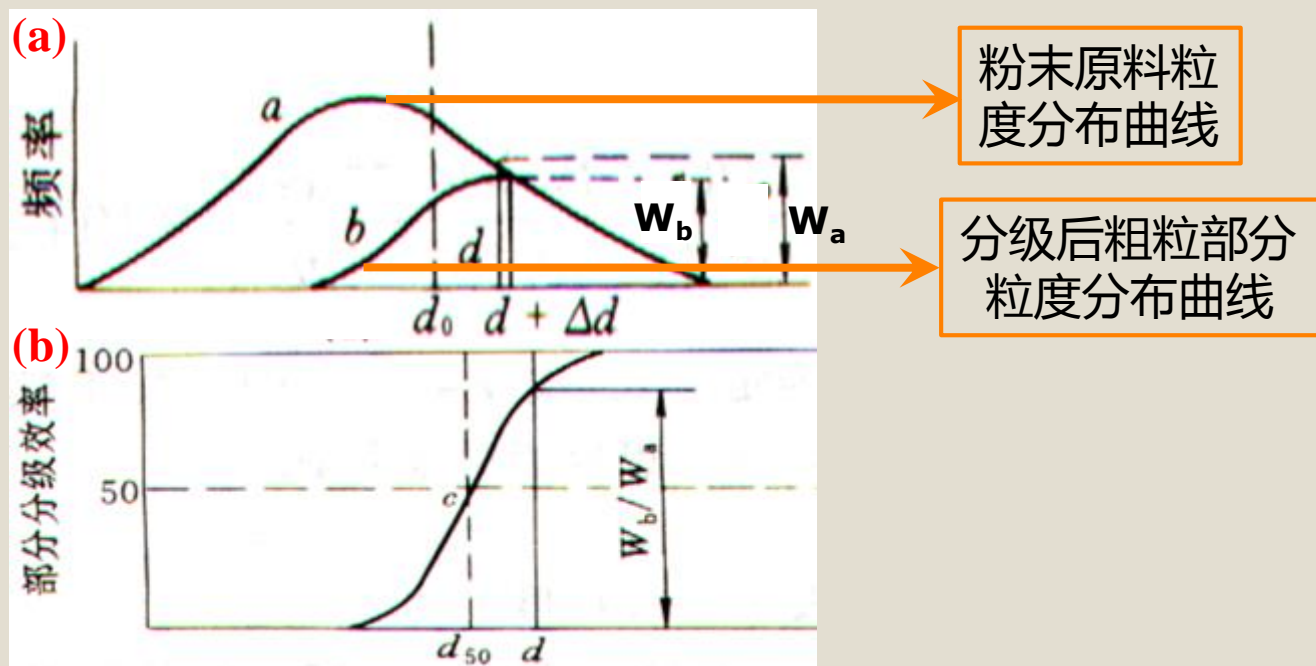
✓ 分级效率的表达式： $\eta = m/m_0 \times 100\%$

式中： m_0 —分级前粉体中某成分的质量

m —分级后获得该成分的质量

假设将任意组颗粒进行分级，在理想分级情况下，分级效率为100%。但是**实际使用的分级机**很难达到这样的分级效率

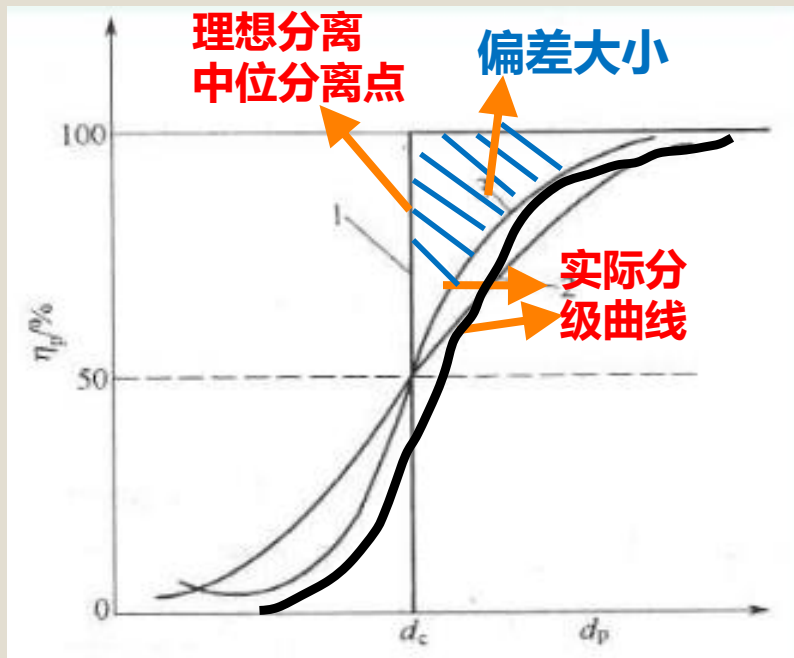
➤ 部分分级效率曲线



部分分级效率

设粒度 d 和 $d+\Delta d$ 区间原料重量为 W_a ，同区间的粗粒的重量为 W_b ，则 $W_b/W_a=\eta_d$ 称为**部分分级效率**，又叫**区间回收率**。图b按相同粒度描述 W_b/W_a 值，所得曲线 c 为部分分级效率曲线，该曲线与50%水平线的交点称为50%分级点，对应的粒度为 d_0 或 d_{50} ，此粒度又称为**分级粒径或切割粒径**。

分级精度



- ✓ 实际分级曲线与理想分级曲线的差别在于两条曲线之间的**偏离**；
- ✓ 其偏离的程度可用来表示分级的精确度，即**分级精度**；
- ✓ 分级精度定义为部分分级效率的75%和25%的粒径 d_{75} 与 d_{25} 的比值，当分级粒度范围宽时，为 d_{90} 与 d_{10} 的比值，理想分级精度为1.

$$\eta = d_{75} / d_{25}$$

筛分

- **筛分：**将粉末颗粒置于具有一定大小孔径和缝隙的筛面上，使通过筛孔为筛下料，被截留在筛面上为筛上料，这种分级方法为筛分
- **筛制：**
 - ✓ **ISO制：**以方孔筛的边长表示筛孔大小
 - ✓ **公制筛：**每平方厘米筛面面积上含有筛孔的数目表示筛孔大小，一般用1cm长度上筛孔数目表示筛号
 - ✓ **英制筛：**每一英寸长度上筛孔的数目表示筛目
- **孔隙率： η_s**
 - ✓ 也称为开孔率或有效面积比，指筛孔净面积占筛面总面积的比率(%): $\eta_s = (1 - zD_b)^2$
z—单位长度内的筛孔数， D_b —筛丝直径，筛孔较小时，有效面积比较低，可能影响粒子通过筛孔的可能性。

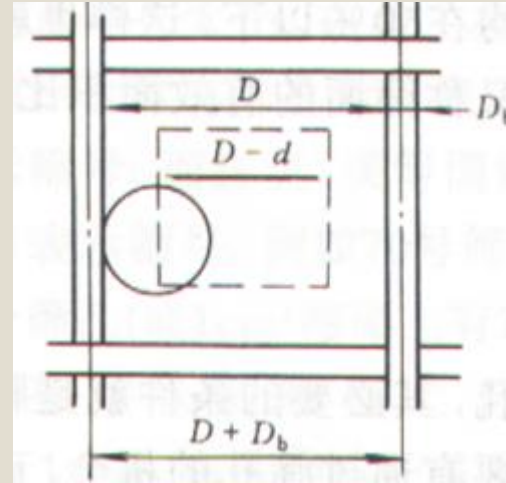
筛制对比

公制筛	筛 号	1	3	6	10	11	12	16	20
	筛孔尺寸/mm	6	3	1.20	0.6	0.54	0.49	0.385	0.30
	筛孔数/(孔/mm)	1	9	36	100	121	144	256	400
公制筛	筛 号	30	40	60	70	80	90	100	
	筛孔尺寸/mm	0.20	0.15	0.102	0.088	0.075	0.066	0.06	
	筛孔数/(孔/mm)	900	1600	3600	4900	6400	8100	10000	
英制筛	筛 目	4	10	20	35	60	80		
	筛孔边长/mm	4.699	1.651	0.833	0.417	0.246	0.157		
英制筛	筛 目	150	170	200	250	325			
	筛孔边长/mm	0.104	0.088	0.074	0.061	0.043			

筛分机理

- **颗粒筛分条件：**在筛分过程中，颗粒若通过筛孔，其必要条件是颗粒的大小一定要比筛孔小，充分条件是颗粒与筛面间要保持相对运动
- **颗粒通过概率：**如图一方形筛孔，筛孔净边长为 D ，筛丝直径为 D_b ，而被筛分的颗粒直径为球形 d ，球粒中心的运动范围为 $D+D_b$ ，球若落下其球心的位置应在 $D-d$ ，球落下的几率如下式所示：

$$P = \frac{(D - d)^2}{(D + D_b)^2}$$

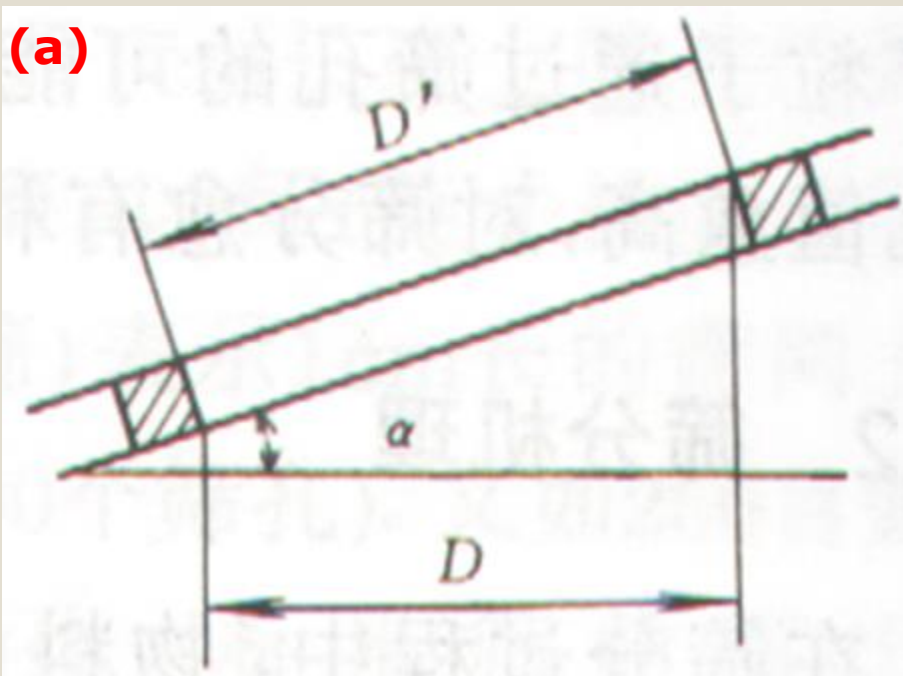


若筛孔 D 为1mm，对两种筛丝的不同颗粒通过的概率比较如下：

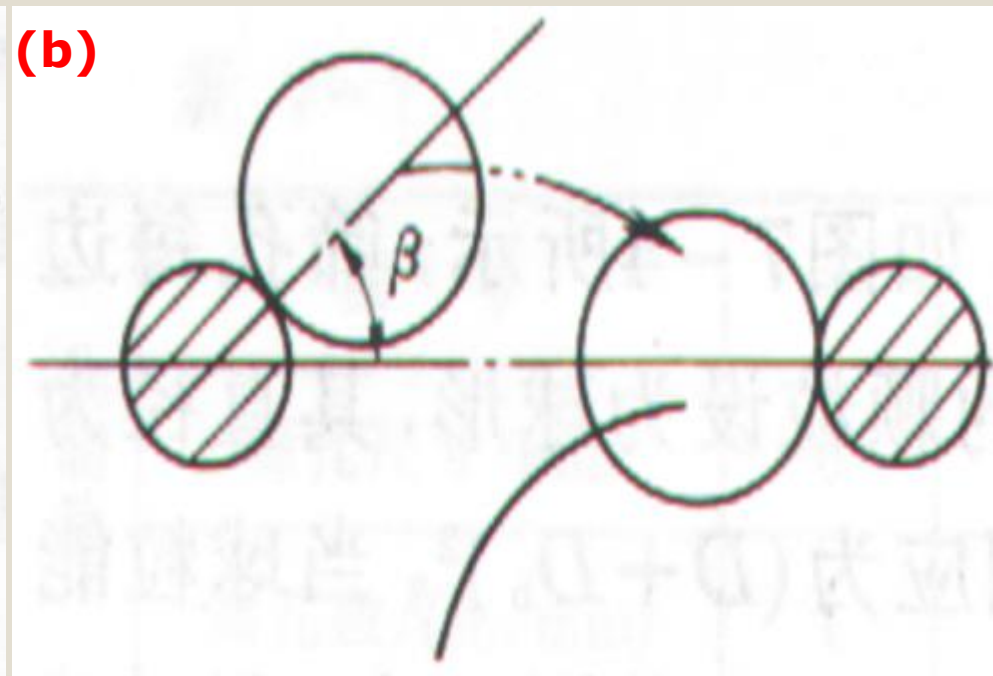
粒 径 d/mm	颗粒通过概率 $P/\%$		粒 径 d/mm	颗粒通过概率 $P/\%$	
	$D_b = 0.25\text{mm}$	$D_b = 0.50\text{mm}$		$D_b = 0.25\text{mm}$	$D_b = 0.50\text{mm}$
0.1	51.92	36.00	0.7	5.76	4.0
0.4	23.08	16.00	1.0	0	0

筛分通过概率的影响因素

- 若筛面倾斜，筛孔的大小减少为 $D' = D \cos \alpha$ ，则球形颗粒通过筛孔的几率减少，颗粒若是长方形或不规则形态，则通过几率降低更多
- 实际球形颗粒通过筛孔的几率将比计算的结果稍大，原因如图，只要不超过一定的范围，颗粒仍有被弹起而落入筛孔的可能：



斜筛面对颗粒通过的影响



颗粒的弹性通过

筛分效率

➤ 含大小不同颗粒的物料经筛分后，仍有小于筛孔粒径的颗粒穿过筛孔，也即筛上料中仍含有筛下料的颗粒，一般用筛分效率来表征筛分质量。

$$\eta = \frac{W_a(W_b - W_c)}{W_b(W_a - W_c)} \approx \frac{W_b - W_c}{W_b(1 - W_c)}$$

W_a —筛下料中含筛下料的质量分数，一般筛面不破时为 100%， W_b —入筛物料含筛下粒级的质量分数， W_c —筛上料中含筛下粒级的质量分数

一般工业实际筛分效率为70%-98%。

影响筛分的因素

➤ 物料方面：

(a) 堆积密度：堆积密度大时(> 0.5)筛分处理能力与颗粒密度成正比，密度小时，由于颗粒飞扬，正比关系不易保持。

(b) 粒度分布：细粒多则处理能力强，最大允许粒度不应大于筛孔的2.5-4倍，粗粒、阻碍粒愈小，越易筛分

(c) 含水量：含水量高，颗粒间粘附而结成团块或堵塞筛孔，筛分能力下降。

➤ 筛分机械方面：

(a) 孔隙率：筛面开孔率越小，筛分处理能力越小，但使用寿命长。

(b) 筛孔大小：筛孔大小与处理能力成正比

(c) 筛孔形状：正方形筛孔的处理能力比长方形的小，但正方形的筛分精度高

(d) 振动的幅度与频率：振动是物料在筛面上运动，防止堵塞，振动有利于提高筛分效率

(e) 加料均匀性：加料均匀有利于筛分，特别是对于细料

(f) 料速与料层厚度：筛面倾角大，可增加料速，此时处理能力也有所增加，但筛分效率降低；料层薄，会降低处理能力，但提高筛分效率。

4.2 筛分机械分类

- 按筛分方式可分为干式筛和湿式筛
- 由筛面结构可将其划分为格子筛、板筛、编织筛、标准筛
- 按筛面的运动特性，可将其分为固定筛、回转筛、摇动筛和振动筛

(1) 固定格筛和条筛筛面

固定格筛：一般安装在粗料仓

固定条筛：筛面与水平面成一角，使其能够沿筛面自动下滑或滚动

优点：结构简单、无运动部件

缺点：筛孔容易堵塞、需要高



(2) 板状筛面

通常有厚度为5~12mm的钢板冲制成方形、长方形或圆孔而制成

优点：比较牢固、刚度大、使用寿命长

缺点：开孔率小、一般用于中等粒度的物料筛分

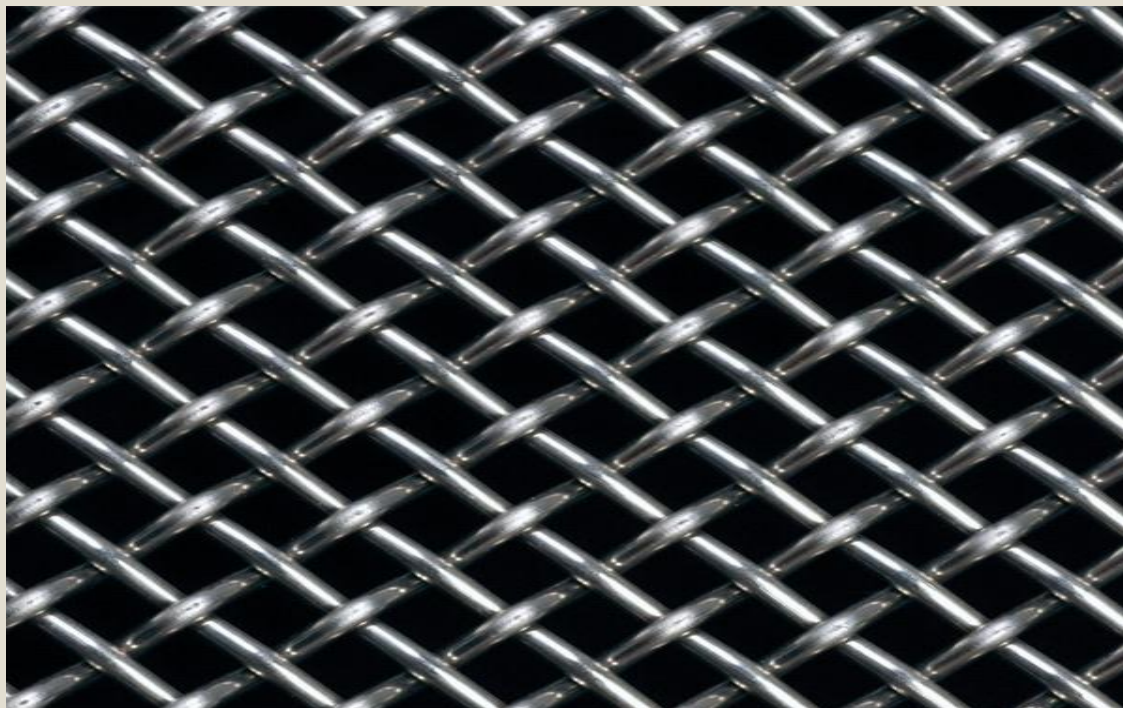


(3) 编织筛面

用钢丝编制而成

优点：开孔率高、质量轻、制造方便

缺点：使用寿命短



■ 回转筛：

物料在回转筒内由于摩擦作用被提升至一定高度，然后因重力作用沿筛面向下滚动，随之又被提升，物料在筒内的运动轨迹呈螺旋形。在不断提升和下滑的过程中，细颗粒通过筛孔落下，粗颗粒则向筛筒大端排出

根据筒体形状又分为：圆筒、圆锥、多角筒以及多角锥筛四种

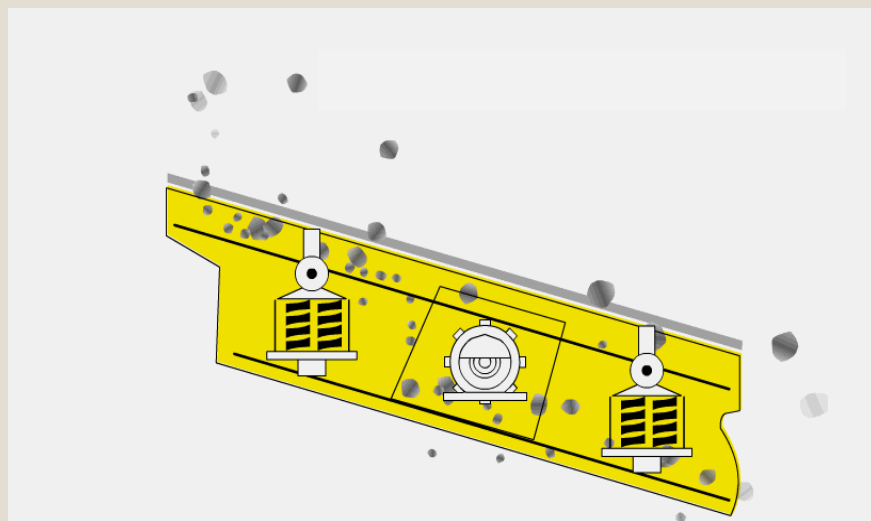


为使圆筒筛内物料沿轴向移动，通常需要对其进行倾斜安装，但这给安装带来一定的困难

总体特点：工作平稳、冲击和振动小、易于密封收尘、维修方便；但其筛面利用率较低、体型相对较大，筛孔易堵塞、筛分效率低

■ 摇动筛：

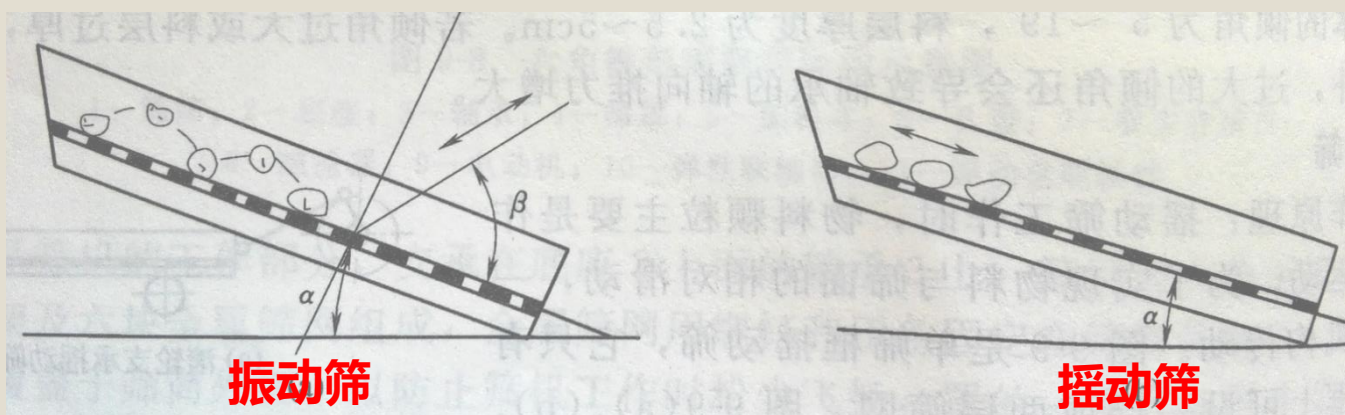
通过曲柄连杆机构传动带动筛面运动，从而实现物料与筛面的相对滑动。它只有一个筛框，筛框上可设一层或两层筛网。



物料由筛面靠近传动装置一端加入，细颗粒物料通过筛孔落至筛下，筛上物在筛面另一端排出。筛面安装角与物料性质相关

■ 振动筛：

目前工业中应用最广泛的一种机型。与摇动筛最主要的区别在于振动筛的物料振动方向与筛面成一定角度，而摇动筛的运动方向基本上平行于筛面。



特点

- a. 筛体以小振幅(0.5 - 5 mm)、高频率(600 - 3000 次/min)作强烈振动，消除物料堵塞现象，提高筛机效率与处理能力；
- b. 动力消耗小，构造简单、维修方便
- c. 使用范围广，适用于细、中、粗筛分，并还可用于脱水和脱泥等分离作业。

4.3 颗粒流体系统分级设备

➤ 流体分级:

对于小于 $100\mu\text{m}$ 的物料可利用粒度变化对流体阻力和颗粒所受的力的平衡原理而分级，流体是水时为湿式分级，利用空气时为干式分级。

➤ 重力式分级机:

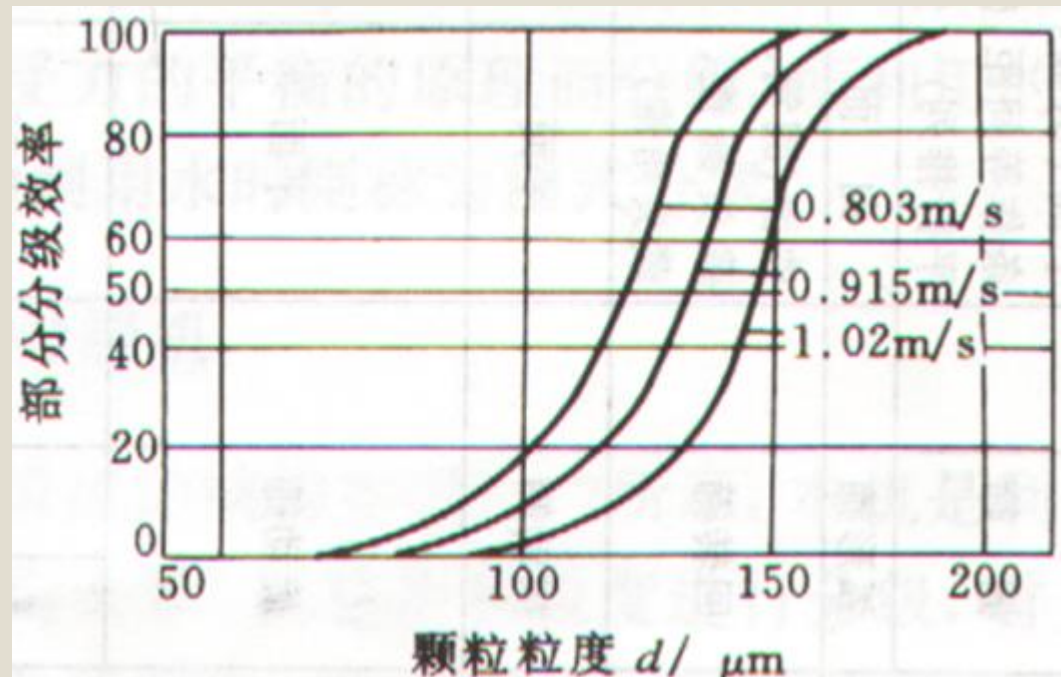
利用空气阻力和重力之间的平衡关系，调整颗粒粒度进行分级。设想颗粒在流体中进行自然沉降，速度逐步增加，流体对之阻力逐步增大，颗粒速度到达一定程度后，重力和流体阻力平衡，速度保持一定，此后颗粒在定速下继续沉降。

重力分级机示意及分级结果

气流自底部进入，在分级室内自下而上运动，喂入分级室的粉体中沉降速度大于气流速度的粗颗粒沉降到底部的粗粉收集器，沉降速度小于气流速度的细颗粒随气流进入气固分离装置，从而获得粗细二级粉体。



垂直流型重力分级机示意图

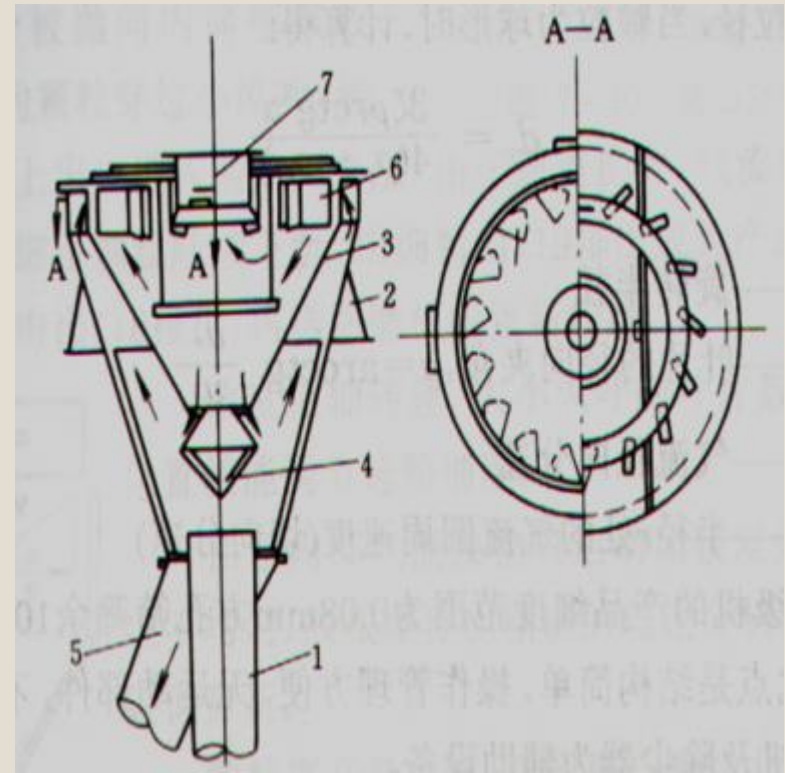


重力式分级机分级结果

通过式选粉机的原理与设备

它是空气一次通过对外部循环式分级设备。携带颗粒的气流在负压作用下以10-20 m/s 的速度自下而上从进气管进入内、外锥形筒之间的空间。气流刚进入进气管时，特大颗粒由于惯性作用碰到反射菱椎体后首先被撞落到内锥形筒下部，由粗粉管排出，因两锥形筒间继续上升的气流上截面积扩大，气流速度降低，所以又有部分粗颗粒在重力作用下被分选出来，顺内锥形筒内壁向下落至粗粉管排出。气流在

两锥形桶之间上升至顶部后定导向叶片进入内锥形筒，由于方向突变，部分粗颗粒再次被分出并落下，同时由于气流在导向叶片的作用下作旋转运动，较细的颗粒由于离心力作用而甩向内锥形筒内壁落下，最后进入细粉管。细粉则随气流经中心排气管排出分级机进入到后面的气固分级装置进行气固分级。



1 进气管；2 外锥筒；3 内锥筒；4 反射菱椎体
5 粗粉管；6 导向叶片；7 中心排气管

通过式选粉级原理与设备

通过式分级机的工作原理可分两个区域来分析。

第一区域是两锥形筒之间的分级区，主要是重力沉降，最小分级粒径可按
下式计算：

$$d_p = \sqrt{\frac{18\mu\mu_0}{g(\rho_p - \rho)}}$$

分离最小粒径随设备直径与风速增大而增大，随叶片角度增加而变小，因此可用下述方法调整颗粒细度

- (1) 改变气流速度，速度越低，细粉细度越高
- (2) 改变叶片的导向角度，叶片与径向夹角越小，气流旋转速度越小，细粉细度下降

$$d_p = \frac{3\xi\rho r \cot^2 \alpha}{4(\rho_p - \rho)}$$

其中： r 为旋转半径， α 为叶片的径向夹角($\alpha = \arctan u_0/u_r$ ， u_0 为气流径向分速； u 为半径 r 处的气流圆周速度)， ρ_p 与 ρ 分别代表颗粒与气体的密度， ξ 表示阻力系数。

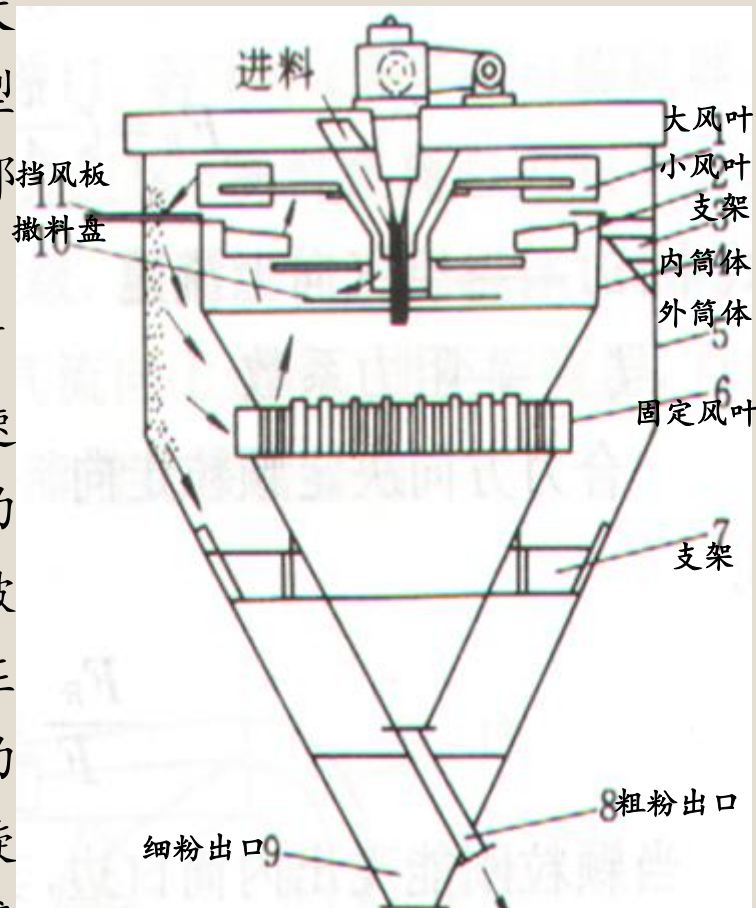
离心式分级机的原理与设备

离心式分级机属第一代选粉机，也称内部循环式选粉机。

✓ 它由上圆柱、下圆锥形的内、外筒体组成。

上部转子由撒料盘、小风叶、大风叶等组成；大小风叶内筒上边缘装可调节的挡风板（有的机型无此挡风板）；有支架固定的外筒内的内筒中部装有导向固定风叶。

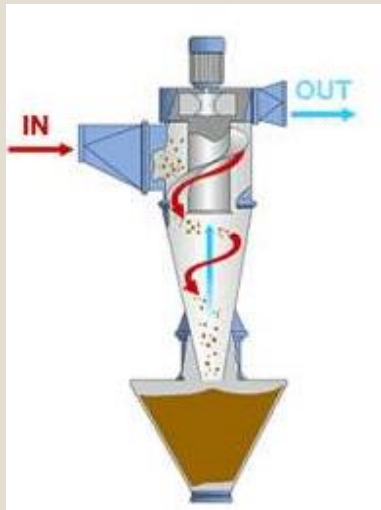
✓ 物料由脚料管经中轴落至撒料盘，受离心惯性力作用向周围抛出，在气流中，较粗颗粒迅速撞到内筒内壁，失去速度沿壁滑下，其余较小的颗粒随气流向上经小风叶时，又有一部分颗粒被抛向内筒壁被收下，更小的颗粒传过小风叶，在大风叶的作用下经内筒上部出口进入两筒之间的环形区域。由于通道扩大，气流速度降低，外旋气流产生的离心力使细小颗粒离心沉降到外筒壁并沿壁下沉，有细粉出口排出。粗粉由粗粉出口排出。



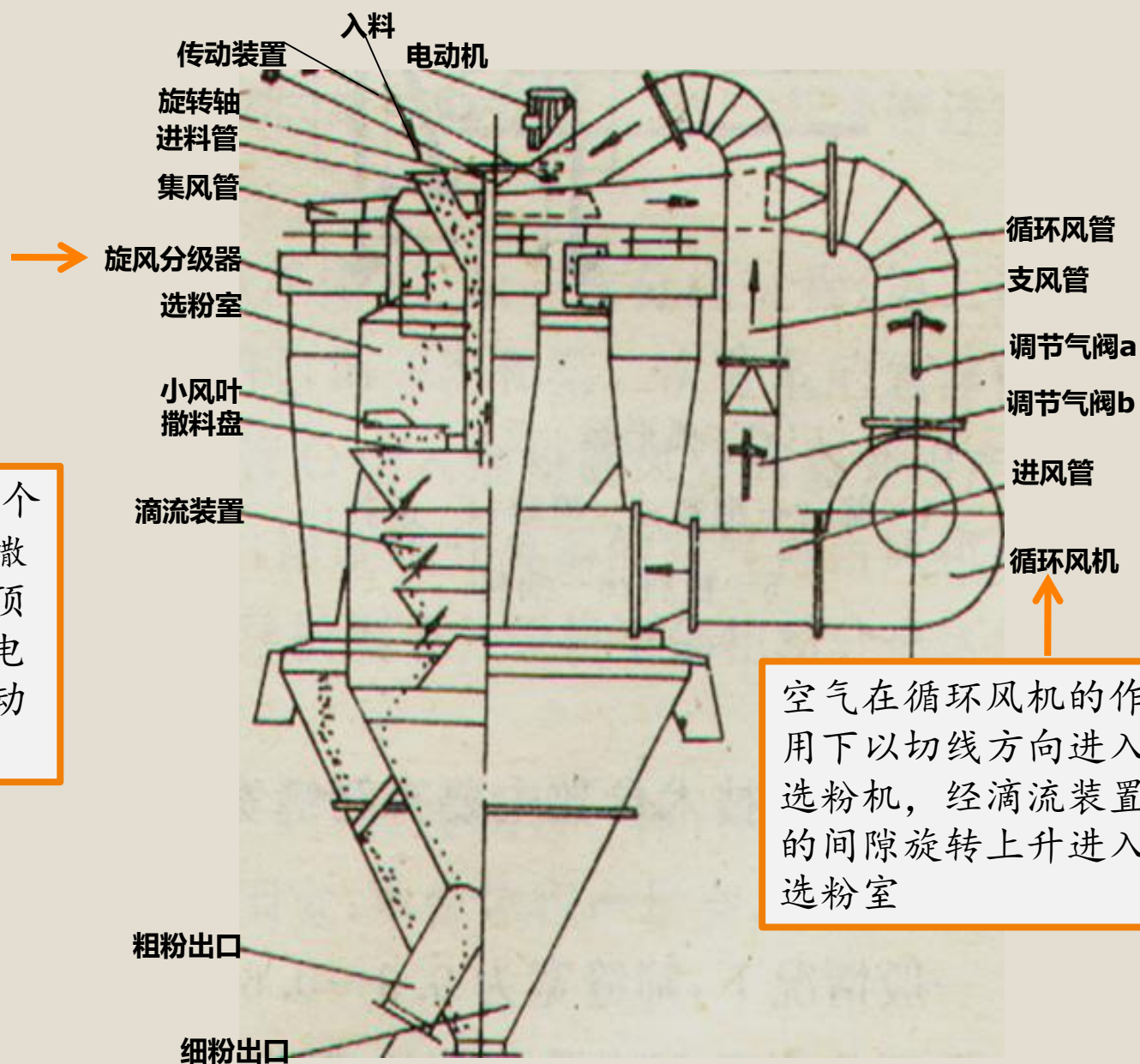
离心式分级机结构示意图

旋风式分级机

旋风式分级机属第二代选粉机，也称外循环式选粉机。用外部空气循环风机取代离心式机型的大风叶。



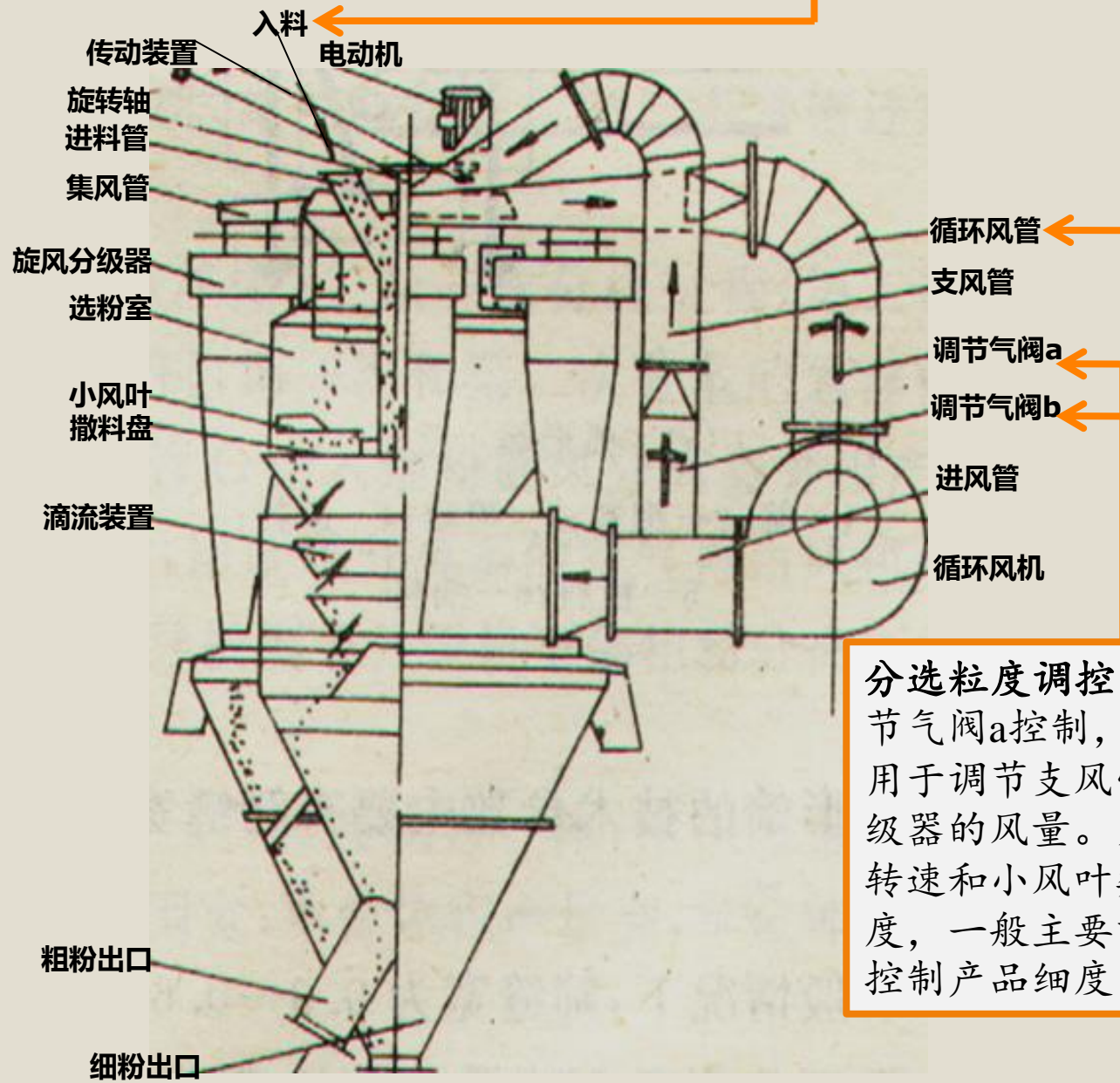
选粉室周围均匀分布6-8个旋风分级器，小风叶和撒料盘一起固定在选粉室顶盖中央的旋转轴上，由电动机经皮带传动装置带动转动



空气在循环风机的作用下以切线方向进入选粉机，经滴流装置的间隙旋转上升进入选粉室

旋风式分级机结构示意图

物料→进料管→撒料盘→甩出→上升气流→粗颗粒由于质量大→离心惯性力大→甩向选粉室内壁→落下;至滴流装置→上升气流→再次分选→粗粉排出; 细粉→质量小→上升气流→进入外锥形筒→由细粉出口排出



气固分级后的净化空气出旋风分级器后经集风管和循环风管返回循环风机, 在选粉室外部形成循环气流

分选粒度调控: 循环风量可由调节气阀a控制, 支风管调节气阀b用于调节支风管直接进入旋风分级器的风量。另外, 改变撒料盘转速和小风叶数量可单独调节细度, 一般主要靠调节气流速度来控制产品细度

4.4 超细粉分级设备

➤ 超细颗粒的分级有两种方式：

■ 干法分级

■ 湿法分级

4.4.1 干法超细分级

■ 干法超细分级装置必须具备的条件：

- (1) 粉料进入分级装置前必须高度分散
- (2) 分级室内应有两种以上的对抗力
- (3) 需要有颗粒特性差别：如粒径、表面性质、磁性、电性、密度、组成等
- (4) 物料的可输送性
- (5) 分级产物的可补集性

■ 提高分级效率和分级精度的技术关键：

- (1) 物料在分级前必须处于充分分散状态；
- (2) 分级作用力大，分级力要作用到点、线上，每个力要强而作用时间短，但整个区域却持久存在
- (3) 对气流要进行整流处理，以提高分级精度
- (4) 一经分离的粗粒要迅速卸出，避免反混

4.4.1 干法超细分级

■ 干法超细分级装置必须具备的条件：

- (1) 粉料进入分级装置前必须高度分散
- (2) 分级室内应有两种以上的对抗力
- (3) 需要有颗粒特性差别：如粒径、表面性质、磁性、电性、密度、组成等
- (4) 物料的可输送性
- (5) 分级产物的可补集性

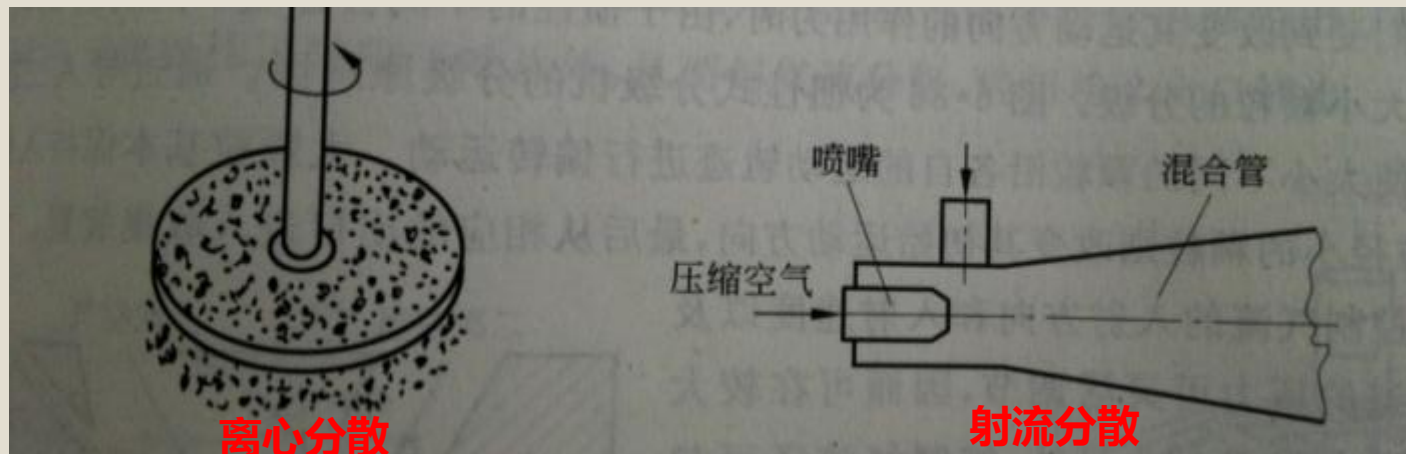
■ 提高分级效率和分级精度的技术关键：

- (1) 物料在分级前必须处于充分分散状态；
- (2) 分级作用力大，分级力要作用到点、线上，每个力要强而作用时间短，但整个区域却持久存在
- (3) 对气流要进行整流处理，以提高分级精度
- (4) 一经分离的粗粒要迅速卸出，避免反混

■ 预分散方法：

✓ 机械分散法

按分散原理又可以分为离心分散和射流分散

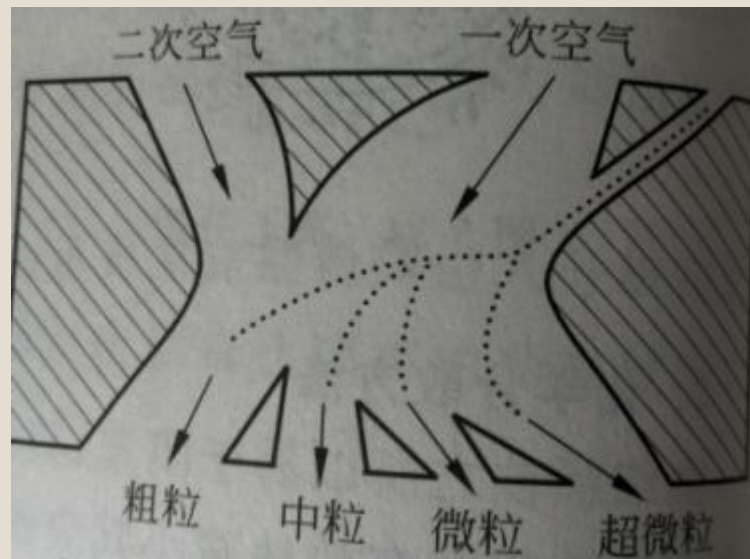


✓ 化学分散法

微细颗粒易于团聚的根源在于它们的巨大比表面积，因此，通过加入表面活性剂能有效减小其表面能，从而能较容易的将它们分开。需要注意的是表面活性剂的加入有可能影响粉体的理化性质以及粉体的处理难易程度。

a. 惯性式分级机

■ 颗粒在传输过程中，当它们受到改变其运动方向的作用力时，由于惯性的不同会形成不同的运动轨迹，从而实现大小颗粒的分级。二次控制气流可使不同大小的颗粒沿各自的运动轨迹进行偏转运动。大颗粒基本保持入射运动方向；粒径小的颗粒则改变其初始运动方向；这种分级机的分级粒径已能达到 $1\mu\text{m}$ 。

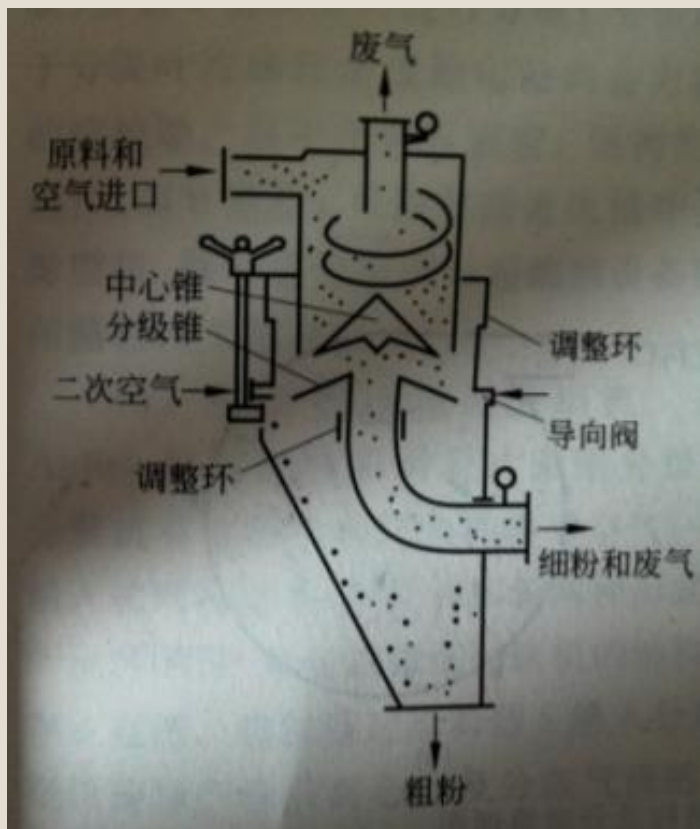


惯性式分级机原理图

b. 离心式分级机

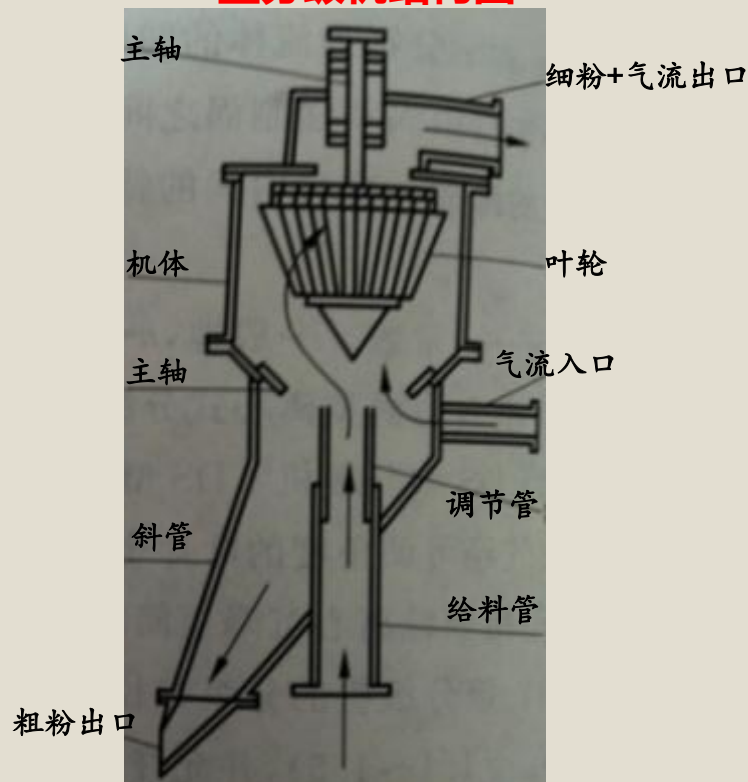
■ 离心式分级机可分为准自由涡型和强制涡型两类。前者包括DS和SLT型分级机，后者包括MS, ATP式等五种机型

无运动部件，粉体在离心力和重力作用下经相应出口卸出进行分级



DS型分级机结构图

MS型分级机结构图



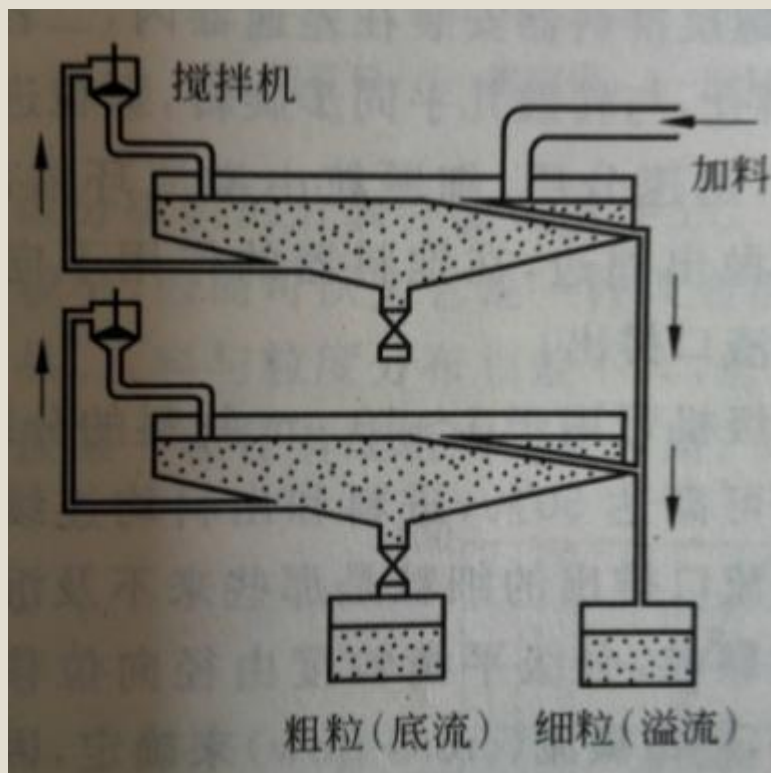
物料进入机体后，经锥形体进入分级区。细粒物料随气流经过叶片间隙向上由细料口排出，粗粒物料被叶片阻留，沿机体内壁向下至粗粉口排出

4.4.2 湿法超细分级

- 湿法超细粉分级主要是应用液固离心沉降原理，也有应用重力沉降的。由于湿法生产和湿法分级还要解决液固分离和粉碎等问题，所以应用比干法少。
- 应用于微细粒湿式分级的设备有两种类型，即
 - ✓ (1) 重力沉降分级类型
 - ✓ (2) 离心分级类型

a. 重力沉降分级--重力分级机

■ 待分级物料加入沉降池，溢流由虹吸管排出，粗粒级由底部排出至第二沉降池继续分级。沉降池内部设有循环分散系统，该设备遵循逆流式分级原理，颗粒所受上升流体阻力与重力的平衡决定平衡粒度，小于该粒度的颗粒进入溢流。



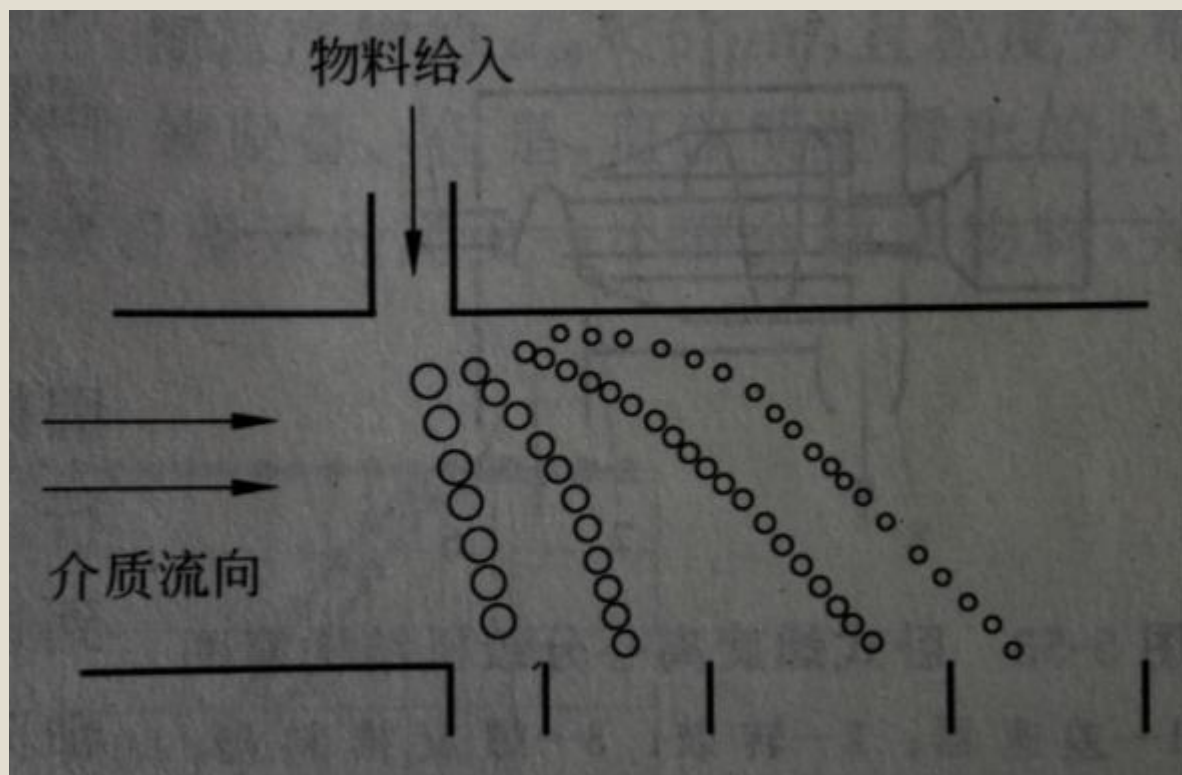
优点：是分级过程平稳，全过程自动控制，溢流中粗粒混入量少，可用于高级颜料、研磨料的分级；

缺点：由于重力场中的重力加速度较小，因而进行微米级颗粒度分级时，分级速度太慢，效率太低。

重力分级机原理图

b. 重力沉降分级—错流式分级机

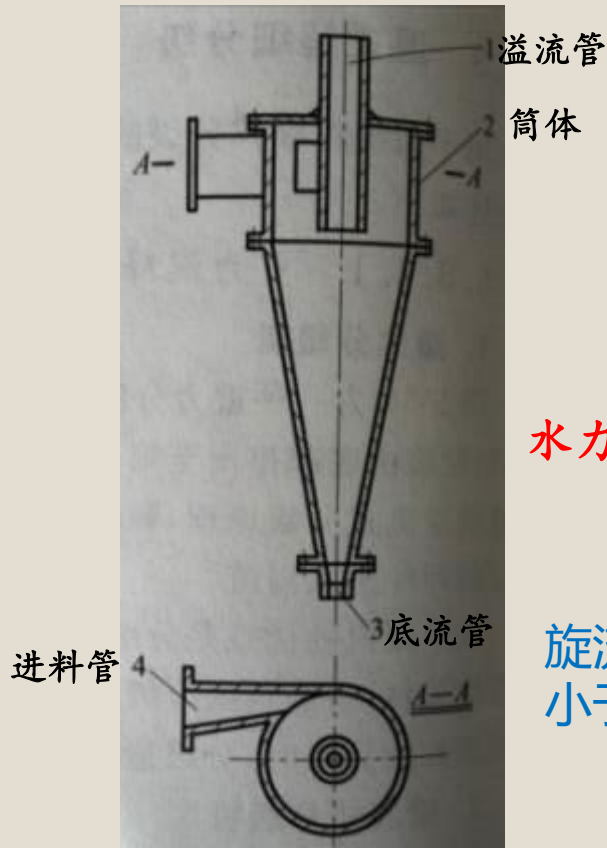
■ 介质运动方向与分级物料的给入方向呈一定夹角。粘滞阻力和重力方向相反，它们共同确定颗粒下落的速度和时间；水平方向颗粒的运动速度确定颗粒的水平运动距离，粒径不同，抛物线的轨迹不同。理论上错流式分级机可以一次实现多粒级的分级。



错流式分级机原理图

c. 离心分级—旋流器

■ 筒体上部为圆柱形、下部为圆锥体，中间插入溢流管，筒体上部沿切线的方向有进料管，圆锥形的出口为底流管，料浆在压力作用下经进料管沿切线方向进入筒体。在筒体中，料浆作旋转运动，其中的固体颗粒在离心力作用下除随料浆一起旋转外，还沿半径方向发生离心沉降。粗颗粒沉降速度大，很快沿内壁下落从底流管排出；细颗粒沉降速度小，在尚未接近筒壁被后来的料浆所排挤，被迫上升至溢流管排出，称为溢流。

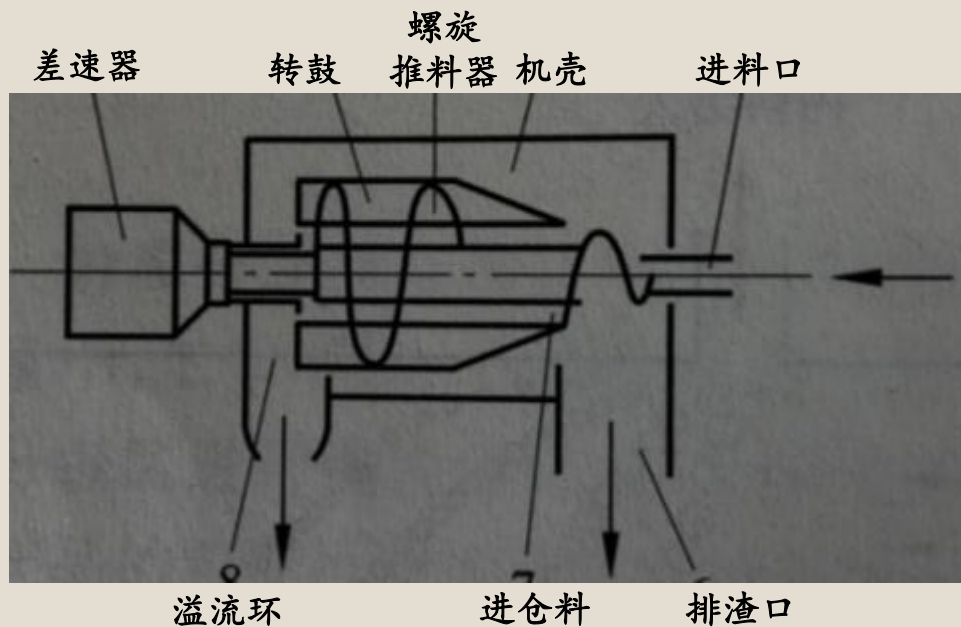


水力旋流器的工作原理图

旋流器结构简单、分级效率高，其分离粒度一般小于 $10\mu\text{m}$ ，广泛用于细颗粒的检查分级

d. 离心分级—卧式螺旋分离机

■ 分级物料由进料管进入料仓，与转鼓几乎同步旋转，颗粒进入离心场，迅速分层，细颗粒由溢流环溢出，粗颗粒被抛向周边，在螺旋推料器的作用下向前运动由排渣口排出。



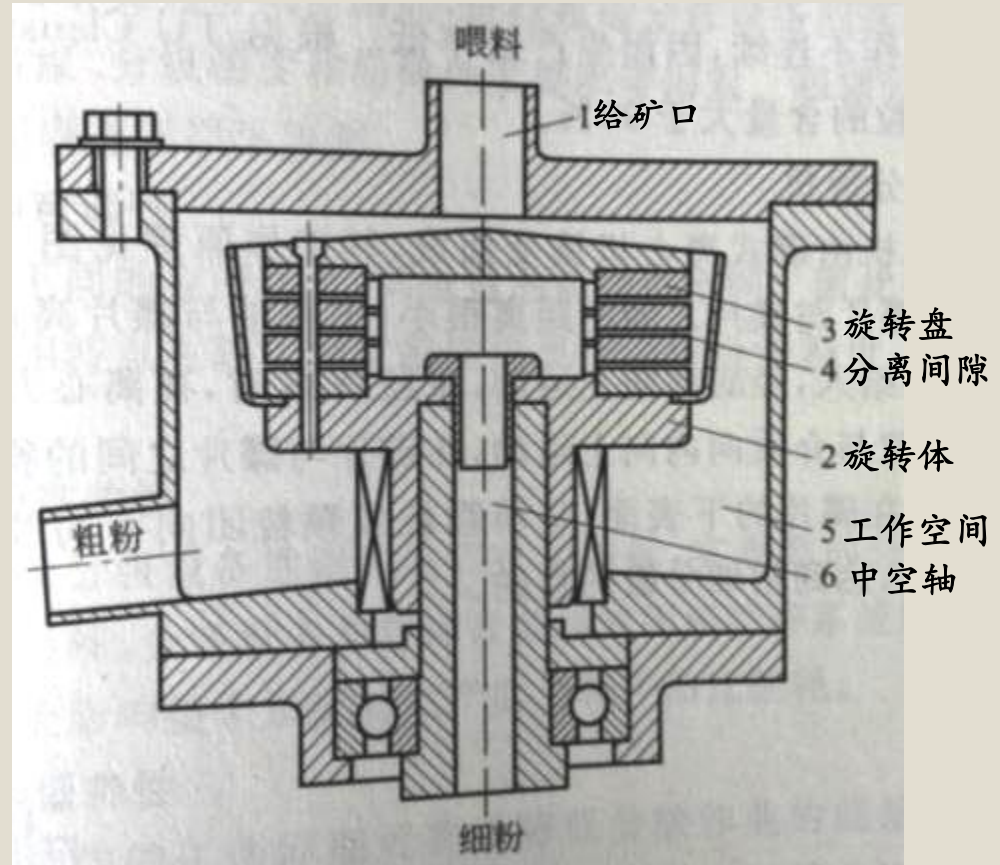
卧式螺旋离心分级机结构简图

优点：该分级机可用于1-10 μ m物料的分级，固体含量可高达50%，进料和出料均连续进行。

缺点：从溢流口排出的细粒是那些来不及沉降到边缘的颗粒，分级平衡粒度由径向位移与轴向位移来确定，因此分级不完全，粗颗粒产品中存在相对数量的细颗粒

e. 离心分级—叶轮式水力分级机

■ 在一定压力下，矿物进入工作空间。受粗粒排出口的限制，部分给矿将被迫进入分离间隙区，该矿流沿径向向内运动，且在旋转盘的作用下加速到几乎与叶片的周边线速度相同。颗粒在此区域获得离心加速度。颗粒越大，离心速度越大，越容易通过分离间隙进入工作空间中，最终从粗粉出口排出。小颗粒则沿径向方向聚沉，由细粉出口排出。

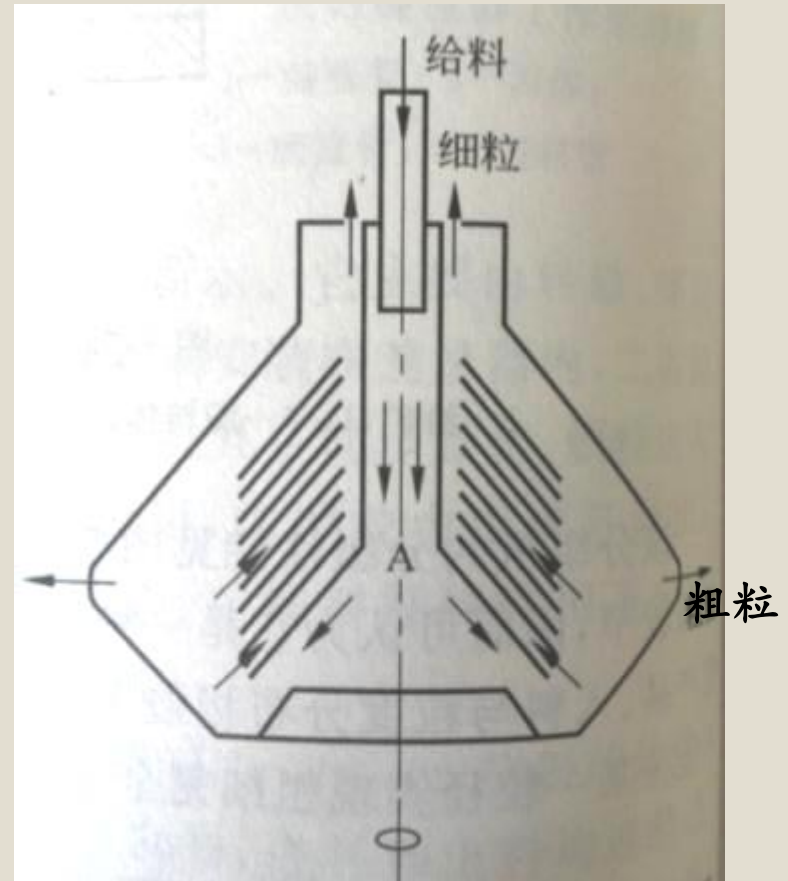


叶轮式水力分级机结构简图

优点：连续性、可通过调整叶轮转速和径向流速来改变分离粒度，溢流中最大颗粒尺寸可达 $137\mu\text{m}$ ；
缺点：只能分离出一小部分微细物料，分离效果不理想。

f. 离心分级—碟式离心分级机

■ 料浆由中空轴给入，经底部向上运动，流经A区时，在离心力作用下即发生粗细颗粒分级，细颗粒与介质向内向上运动，在碟片与碟片之间的狭小区域再次发生分级：较细颗粒沉积在碟片的下表面，呈单颗粒或颗粒团向下向外运动；微细颗粒随介质从中心环排出，达到粗细分级的目的



碟式离心分级机结构简图

湿式分级由于液体介质具有分散作用，所以一般分级效率较高，但由于分级后的粉体中含有水分，在后续干法应用前，需要进行干燥处理，干燥过程可能导致粉体颗粒的再次团聚。

4.5 超细分级设备的选型原则

进行超细分级设备选型时，必须综合考虑物料的性质、分级粒度、分级精度和粉体纯度要求等因素，超细分级设备的选型除满足生产能力外，还应遵循以下原则：

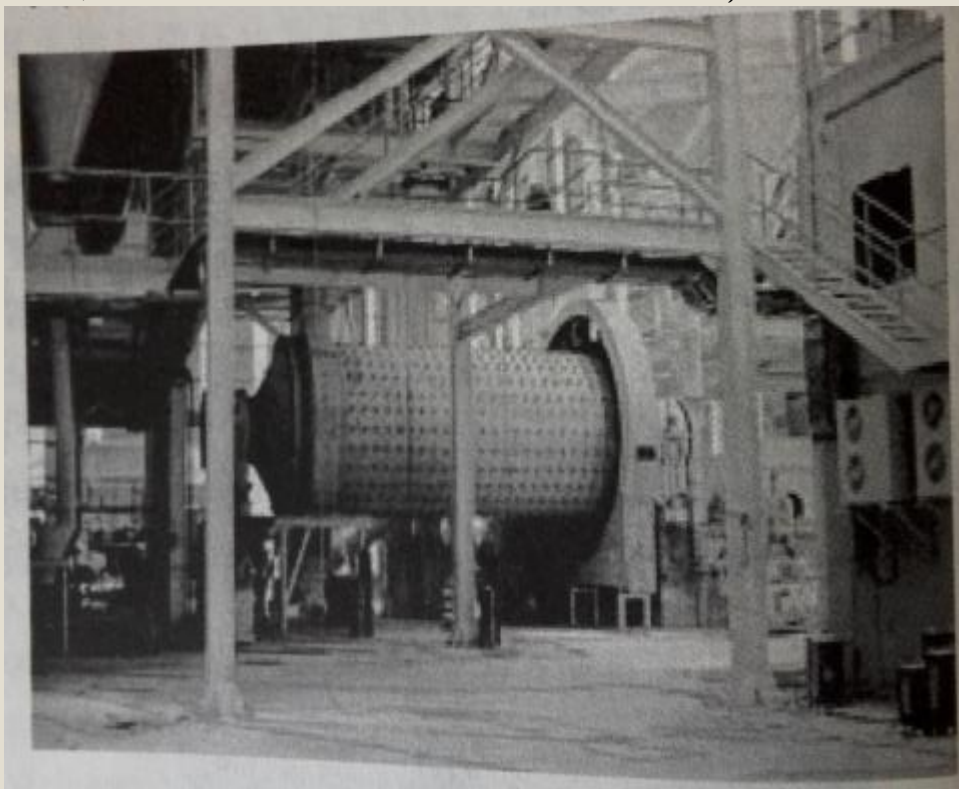
- 分级粒径的可调性
- 分级过程的高效性
- 分级作业的低耗性
- 分级产品粒度级别的适应性
- 分级产品的低污染性

4.5 粉碎分级工艺组合与优化

➤ 球磨+超细分级生产工艺

■ 系统组成：破碎机、改良球磨机、超细分级机和收集系统

■ 工艺流程：矿石经颚式破碎机粗碎和锤式破碎机细碎后，计量喂入球磨机进行粉磨，在气力作用下，粉料送至分级机进行分级，细粉通过收集器收集为产品包装进行，粗粉则由回料螺旋返回球磨机进行再次粉磨，如此循环往复。



球磨+超细分级工艺生产线

➤ 立磨+球磨+超细分级生产工艺

■ 系统组成：由立磨、球磨机、超细分级机和收集器组成

■ 工艺流程：块状物料经颚式破碎和圆锥破碎后进入立磨，分离其中800目细粉，其余粗粉进入下级球磨系统球磨。经粉磨的物料与空气混合直接由气力送至分级机，通过调节分级机转子转速可调节产品品种，合格产品由收集器收集，不合格产品返回磨机球磨，如此循环。



大型立磨生产线

思考题

1. 简述干法超细分级粉体预分散方法
2. 简述影响筛分的主要因素