

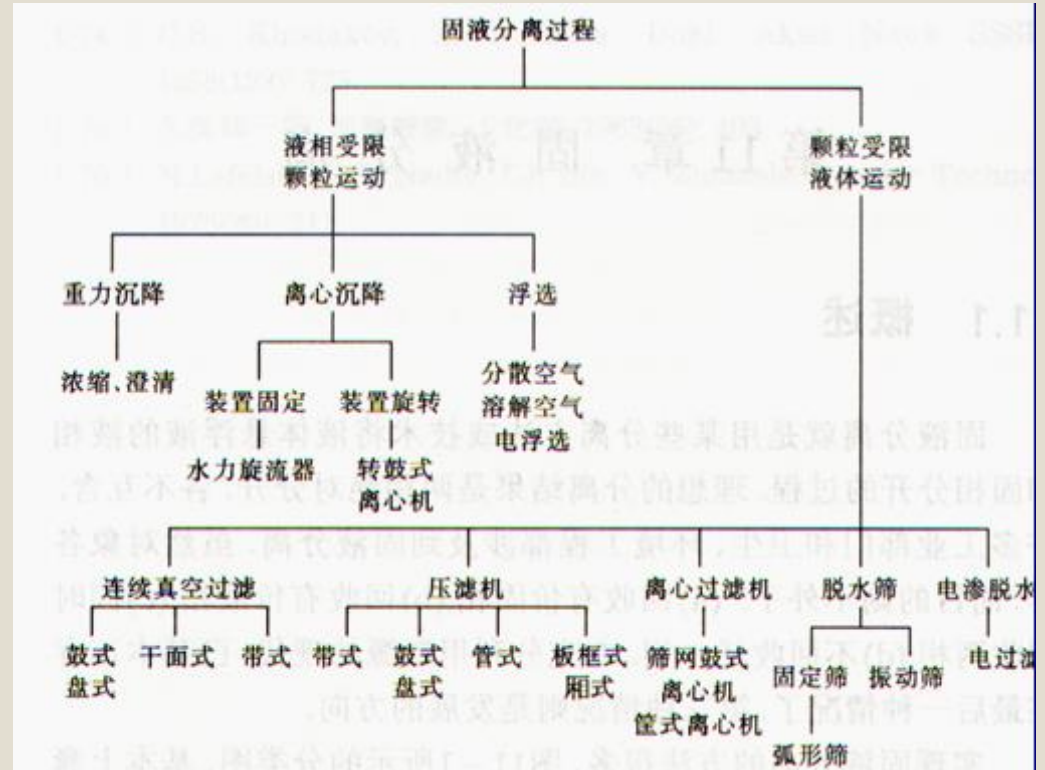
V

分离、干燥与收尘

5.1 固液分离

概述

■ 固液分离就是用分离的方法或技术将液体悬浮液中的液相和固相分开的过程。其目的可归纳为四点：一是回收有用的固体（废弃液体）；二是回收液体（废弃固体）；三是同时回收固体和液体；四是固体和液体均不回收（如防止水污染的固液分离）



固液分离分类图

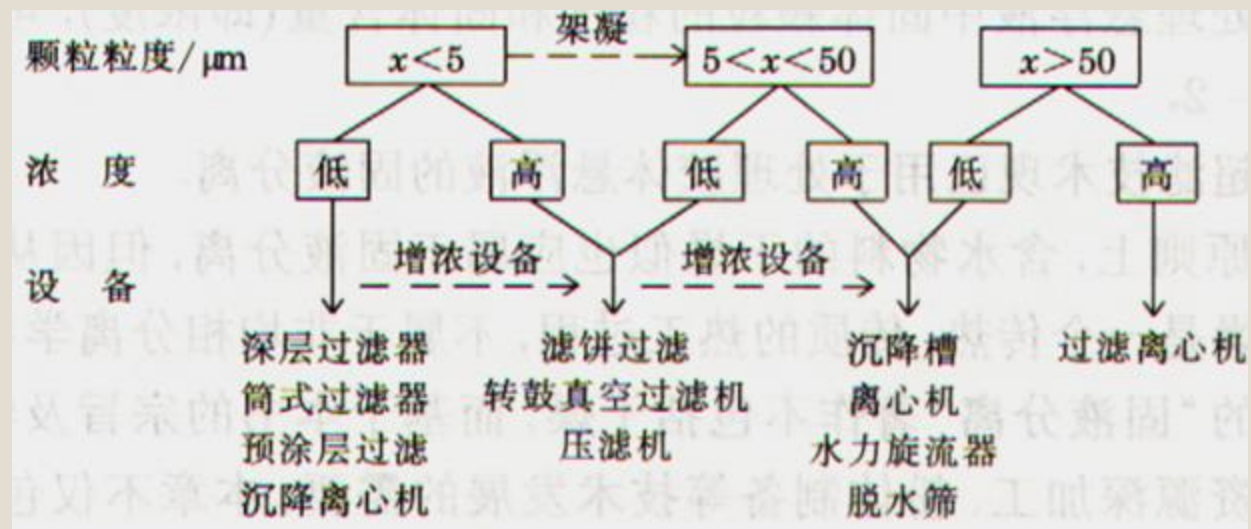
■ 分离效率 E_t 为分离出固相量 m_u 与进入分离器的固相总质量 m_0 之比，即：

$$E_t = m_u / m_0 \times 100\%$$

设 m_c 为分至液相为主的固相量，则 $m_0 = m_c + m_u$ ，

则总分离效率表示如下：

$$E_t = (1 - m_c / m_0) \times 100\%$$



根据颗粒粒度与悬浮液浓度选择固液分离设备

a1 浓缩

➤ **浓缩**是稀薄悬浮液通过固体颗粒在其液相中的沉降分离，因脱出部分清液而变浓的过程，若以获得澄清液为主要目的，称为澄清，固体颗粒从液相中的沉降是基于其自身的重力或惯性离心力。

➤ **主要设备为：**

- 离心式——水力旋流器、沉降离心机等
- 重力式——重力沉降池等

➤ **浓缩效率**：浓缩后固液不能完全分开，得不到不含固相的澄清液，定义浓缩效率：

$$E = \frac{m_u - (m_{ul} + m_c)}{m_0} \times 100\%$$

m_0 进入浓缩时悬浮液固含量， m_u 浓缩产品固含量， m_c 澄清产品固含量， m_{ul} 是 m_u 的一部分，即去除上清液时可能夹杂的部分浓缩液中含有的固体

a2 浓缩过程分析

➤ 若颗粒间的范德华力大于其间的静电斥力，或给予搅拌，颗粒在相互碰撞时自然凝聚而沉降，悬浮液的浓度直接影响颗粒的沉降行为。

➤ 固相沉降的三种模式：

■ 澄清

悬浮液浓度很小，绝大部分颗粒间相互距离大，呈自由沉降，但还有相互碰撞，碰撞后或凝聚或不凝聚，颗粒大的沉降速度快，逐渐在底部聚集起浓浆，上部清液长时间仍有颗粒沉降。

■ 区带沉降

悬浮液的浓度较大，颗粒聚集程度高，呈现一定的结构化，基本上以相同的速度沉降，此沉降速度主要与悬浮液的浓度有关，沉降过程中呈现明显的分区、分带，有明显的澄清区与悬浮液界面

■ 压实沉降

悬浮液浓度相当大，颗粒间形成牢固的结构化，具有一定的力学性质，有向低浓度区域扩散的能力，扩散速度 u_k 与浓度梯度 dC/dx 成正比，沉降速度 $v=f(c, \psi)$ ， ψ 为压实应力，在上下压力差作用下，密实悬浮液中的液相被从颗粒间的孔隙中上挤，呈现沟槽现象。

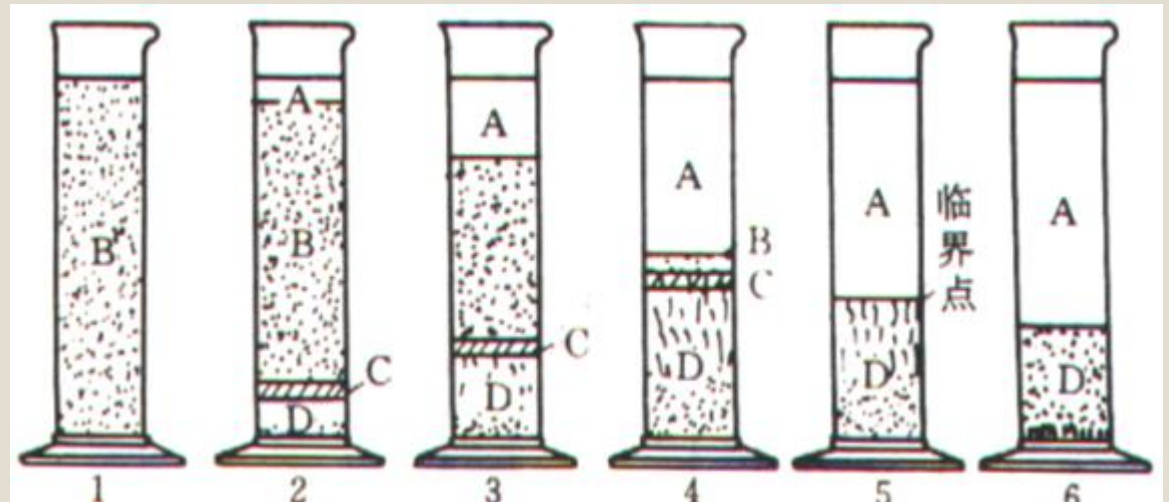
浓缩设备具有以上两种或三种模式

a3 间歇沉降实验

➤ 将悬浮液充分搅拌后，静置自然沉降，记录沉降时间，沉降区B和上层澄清区A界面的位置，汇出H-t, L-t曲线，也可有x-射线浓度的传感器测量悬浮液在长管中的沉降浓缩过程，结果一致。

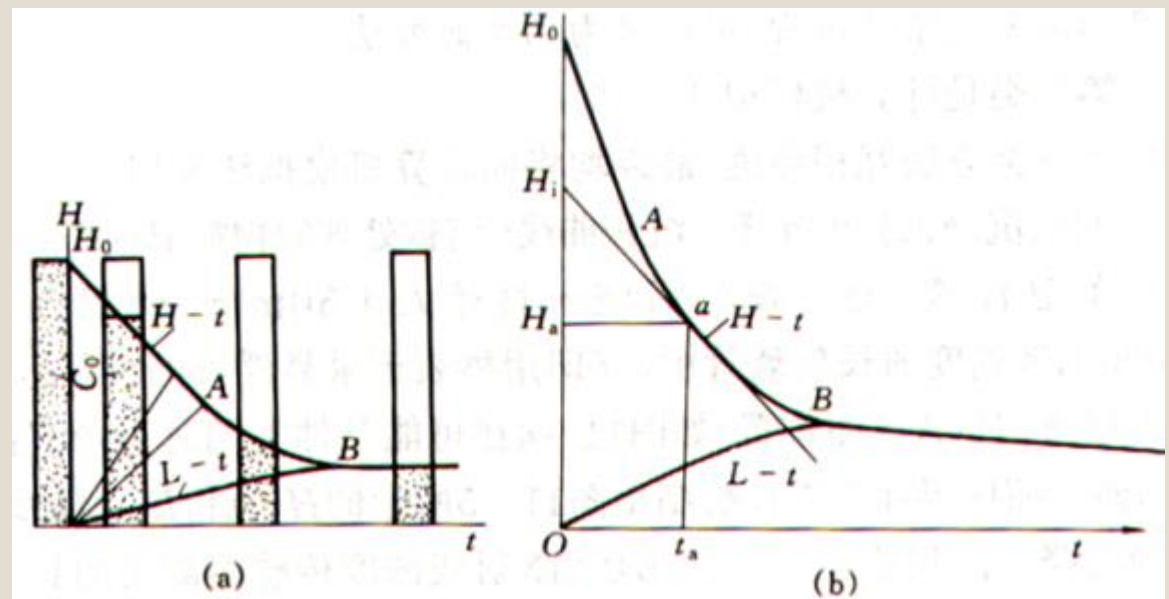
➤ H-t曲线上的切线即为沉降速度，A段为等速的区带沉降，B点为区带沉降消失点，称为压缩点，此点之后，沉降层以压实沉降逐渐变密实。

➤ 不同性质的悬浮液可能形成不同形状的H-t, L-t曲线，一些悬浮液无明显的压缩点，特稀的悬浮液因呈自由沉降而测不出H-t, L-t曲线



间歇沉降实验

A-澄清区；B-沉降区；C-过滤区；D-压缩区



沉降-沉积曲线

a4 凝聚、絮凝悬浮液的浓缩

➤ 为加速浓缩过程，提高浓缩效率，向悬浮液中添加絮凝剂的技术已被广泛使用，加入絮凝剂后一个重要的变化时固体颗粒的粒度增大而粒级范围缩小，絮凝体或絮团尺寸可达几十甚至几百微米，但密度较小，显著提高其沉降速度。

■ 稀薄悬浮液的沉降速度

$$v_{\text{下}} = v_{\text{下}0} - (1-VC)^{4.65}$$

C为悬浮液浓度，V为每克干固体生成絮凝体的溶剂， $v_{\text{下}0}$ 为絮凝体stockes沉降速度。

$$v_{\text{下}0} = 60d_f^2(p_f - p)g / 18\mu \cdot 10^8$$

d_f 为絮凝体平均直径； p_f 与 p 分别为絮凝体与水的密度； μ 为水的粘滞系数

■ 中等浓度悬浮液的沉降速度

絮凝体形成三维网络，出现沟道现象，液体从网络中流出，这种悬浮液的界面沉降速度 $v_{\text{下}b}$ 表达如下

$$v_{\text{下}b} = 3(p_s - p)gd_c^2(1-VC)C \times 10^{-3} / 4p_s\mu$$

d_c 为沟道平均孔径， p_s 为固体密度

■ 高浓度悬浮液的沉降速度

高浓度沉积层中发生压缩沉降，粒子间的结构因受压而破坏，絮凝体中的水被解脱，若有搅拌（如耙子的旋转）、剪切，更有助于破坏絮凝体使沉积体更密实，根据Garman-Kozeny方程原理可导出颗粒在沉积压实层中的沉降速度 v_{fb} (cm/min)为

$$v_{fb} = (p_s - p) g d_p^2 (1 - VC)^{4.65} \times 10^{-7} / 3\mu (V p_s)^{1/3}$$

d_p 为未絮凝体与凝聚的主体颗粒的平均直径

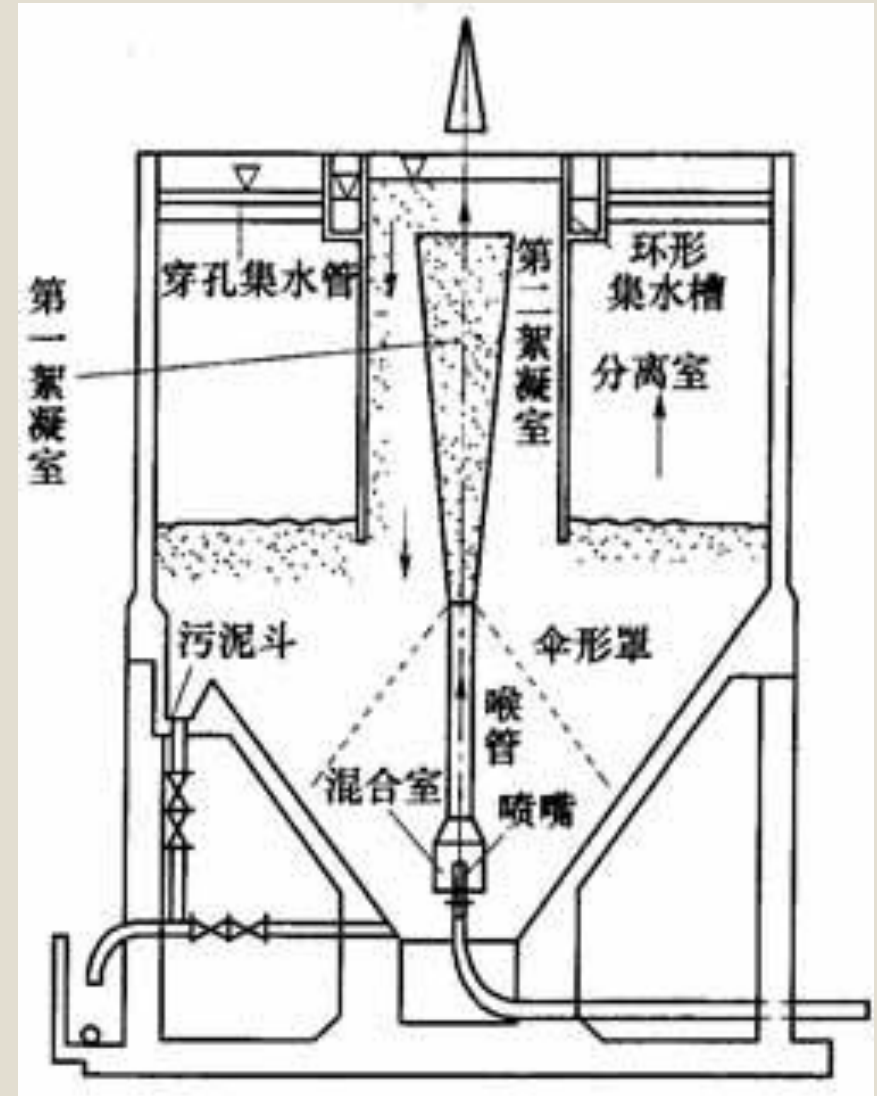
絮凝剂的作用效果与絮凝剂本身的分子量、分子空间结构，电性、溶液pH，溶液中离子浓度等因素密切相关，因此在使用过程中针对不同的悬浮系统需采用合适的絮凝体系

a5 絮凝澄清的装置示意图

➤ 固体颗粒水力循环型澄清池

(1) 加压并含有混凝剂的原水由喷嘴喷出，通过混合室进入喉管。当原水被喷出喷嘴，进入喉管时，由于流速高，在混合室中造成了负压并将池底大量的回流的活性泥渣吸入混合室；

(2) 水的快速流动使水、混凝剂和泥渣得到充分的混合。当水流到第一反应室时，混凝剂已完成了电离、水解、成核，并已开始凝聚形成细小的凝絮。在水流到第二反应室的过程中，由于流通截面逐渐变大，流速逐渐减小，凝絮长大，形成泥渣。缓慢水流带动泥渣进入分离室后，分离出的清水进入集水槽中，泥渣沉降，大部分泥渣吸入喉管进行回流，少部分泥渣进入浓缩斗定期予以排出



固体颗粒水力循环型澄清池

a6 离心浓缩

以颗粒的惯性力取代其重力可使其沉降速度增加，这对微细颗粒尤为重要，常用的浓缩设备是沉降式离心脱水机和水力旋流机，这两者也可作为分级用。

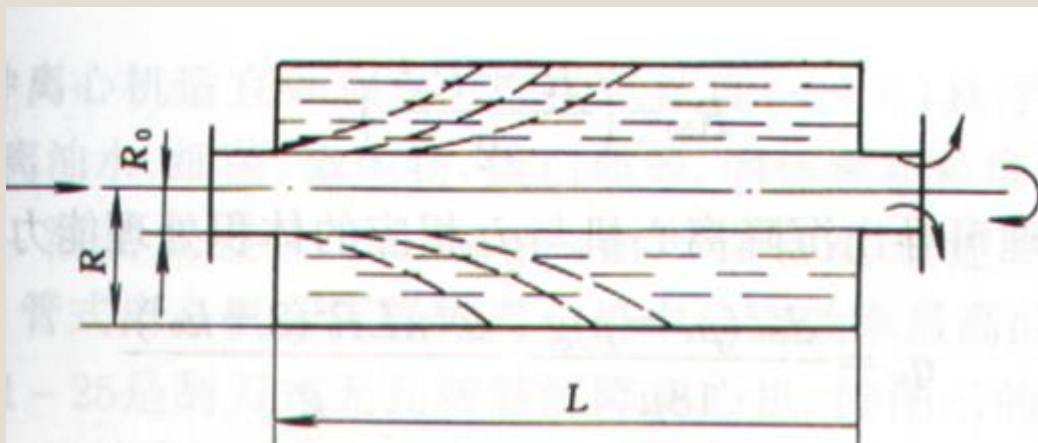
➤ 基本原理

图示为悬浮液在沉降离心机转鼓内的运动，“活塞式”理论认为，流体在离心机转鼓内如活塞般整个向前流动，环状流体在整个界面上的流速是均匀的，新进入转鼓的流体将置换原有的流体。按此理论，悬浮液进入离心机转鼓后，固体颗粒在惯性力的作用下在径向方向向鼓壁沉降，同时随流体作轴向运动。假设它们从液面 R_0 处沉降至鼓壁 R 上的时间为 t_1 ，随流体自入口至出口流出的时间为 t_2 ，为使固体颗粒沉降至鼓壁，必须是 $t_1 \leq t_2$ 。

有上述建设及要求，可导出沉降离心机的体积处理能力 $q_v(\text{m}^3/\text{s})$

$$q_v = \frac{d_{\min}^2 (p_s - p) g}{18\mu} \cdot \frac{\pi R^2 w^2 L (1 + 2K_0 + K_0^2)}{2g}$$

d_{\min} 为离心机中沉降的最小固体颗粒粒度， p_s 为固相密度， p 和 μ 为液相密度和粘度系数， w 为转鼓回转的角速度， L 为离心机的沉降区的有效长度， $K_0 = R_0/R$



悬浮液在沉降
离心机转鼓内的运动

b1 过滤

➤ **过滤**是指在推动力作用下，液固混合物通过多孔性介质（过滤介质）而使液、固两相分离的过程。其中液体透过介质，而固体颗粒则截留在介质上，从而达到液固分离的目的。

➤ **过滤方式：**

■ **澄清过滤**——以获取洁净滤液为目的，包括直接过滤、电磁过滤、助滤剂过滤和膜过滤

■ **滤饼过滤**——通过过滤介质去除液体，大于空隙的颗粒在介质表面沉积，形成一定厚度的滤饼，它分为真空过滤、加压过滤、离心过滤和压榨过滤等

➤ **过滤介质**

分离过程中能截留固体颗粒的多孔材料统称为过滤介质。过滤介质必须**多孔、有一定厚度和机械强度、过滤效率高**等优点

不同类型过滤介质与能截留的最小颗粒

过滤介质类型	过滤介质材质	截留的最小颗粒/μm
针织类	天然纤维和合成纤维滤布	10
非针织类	纤维为材料的滤纸	5
	玻璃纤维滤纸	2
	纤维滤板	0.1
	毛毡和针织毡	10
	纯不锈钢 纤维毡	6
滤网	金属丝平纹编制密纹滤网	40
	金属丝斜纹编织密纹滤网	5
刚性多孔过滤介质	多孔塑料	3
	多孔陶瓷	1
	烧结金属	3
	金属多孔板	100
滤芯	表面式滤芯	0.5-50
	深层式滤芯	1
松散性颗粒	纤维质 、 粉粒质	< 1
滤膜	反渗透膜	0.0001-0.001
	超滤膜	0.001-0.1
	微孔膜	0.1-10

b2 脱水与洗涤

➤ 脱水

滤饼脱水或脱液是过滤的后处理过程之一。**脱液的目的有三个**，一是最大限度提高有价值滤液的回收率；二是减少滤饼中的杂质，降低滤液对滤饼的污染；三是便于滤饼的进一步处理，节省干燥作业及后期处理成本。

滤饼内剩余液体可用滤饼的饱和度来描述，饱和度 S 定义为

$$S = \text{滤饼中液体体积} / \text{滤饼中孔体积}$$

$S=1$ 表示滤饼完全饱和； $S=0$ 则表示滤饼完全干燥。

➤ 常用脱水方式：

■ **气体吹风**：包括真空抽出和加压气吹两种方式，前者用于真空过滤，脱液压差小于0.1MPa；后者多用于压滤，压差大于0.1MPa，这种方式效率较高，但设备也比较复杂。

■ **机械压榨**：机械压榨有膜板式、管压式、带压式和螺旋压榨等形式，前两种用于间歇式压滤机，后两种用于连续式压滤机。

■ **水力脱液**：水力脱液包括压实、反洗等。

■ **其它方法**：如利用惯性离心力脱水等。

➤ 洗涤

洗涤是利用不含杂质的洗液置换出滤饼中的残留滤液。即除去滤饼内残留的可溶性杂质，提高固体组分纯度；同时回收滞留在滤饼中的有价值母液。滤饼的洗涤通常在滤饼脱液后进行。

➤ 滤饼洗涤方式：

■ **置换洗涤**：包括并流洗涤和逆流洗涤。前者洗液方向与滤液方向相同，后者方向相反。当滤液为产品时通常选用并流洗涤，当滤饼为纯净产品时，或为有效利用有价值的洗涤液，采用逆流洗涤。

■ **再制浆洗涤**：当滤饼呈粘泥状，渗透性差，或很难成饼时，可采用再制浆洗涤，即用新鲜洗液将滤饼重新制浆，搅拌，过滤。必要时需多次重复上述过程。

■ **逐级稀释洗涤**：当固体呈浆状时，如在浓缩过滤机中，浆体先被脱去部分母液，再用洗液稀释，再浓缩过滤，如此多次稀释、浓缩，直到洗去所有母液。

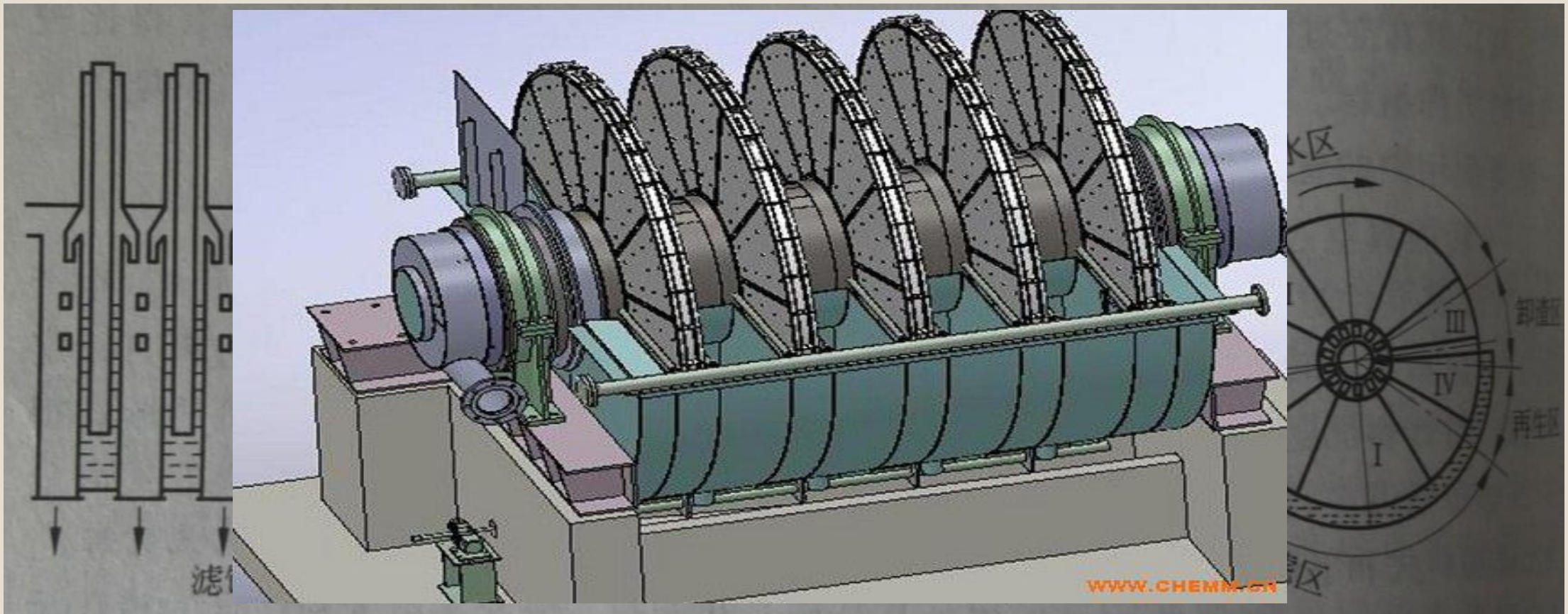
注意用于滤饼洗涤的洗液应具备以下条件

- (1) 能和残留滤液很好的互溶
- (2) 只能溶解需去除的杂质，不能溶解滤渣
- (3) 洗涤后，洗液与溶质易于分离
- (4) 具有较低粘度，通常采用水为洗液

b3 过滤设备

➤ 圆盘真空过滤机

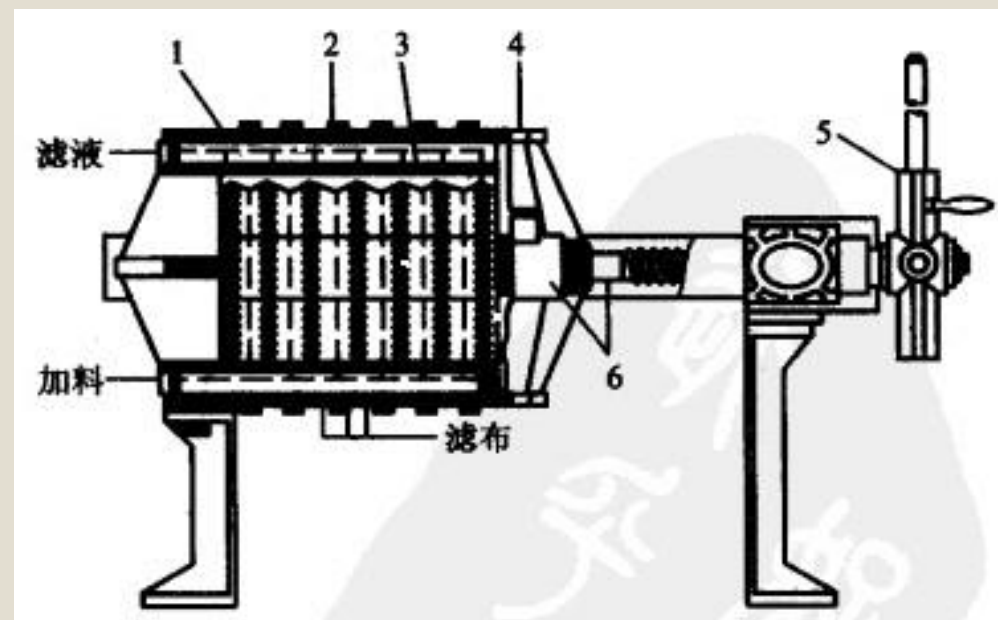
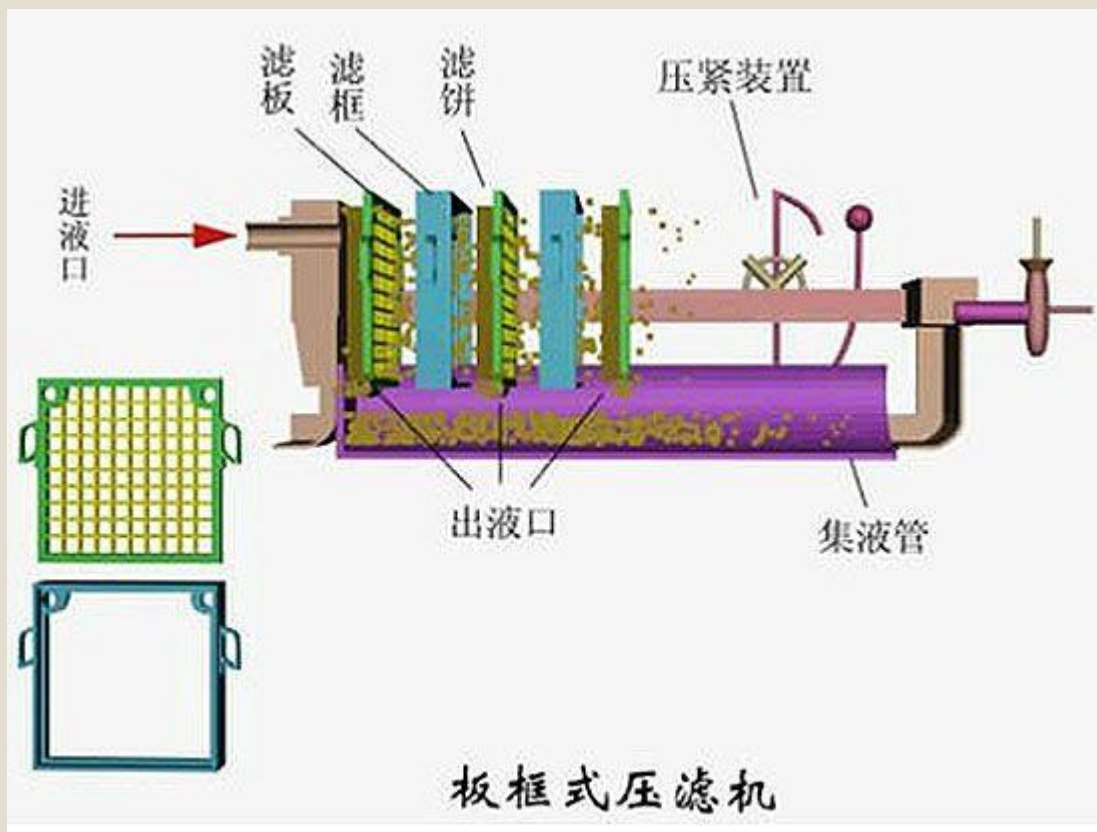
过滤圆盘由10-30个独立且互不想通的扇形滤叶组成，滤叶两侧为筛板或槽板，过滤前将扇形滤叶套上滤布。中空主轴由径向筋板分割成10-30个独立的轴向通道，这些通道与各过滤扇叶相连并与真空抽吸系统相通，使浆料进行固液分离。卸料时，压缩空气进入过滤室瞬时反吹，吹落脱水的滤饼。过滤圆盘每转一周，完成一次作业循环，实现过滤器连续运行



圆盘真空过滤机工作原理图

➤ 卧式板框压滤机

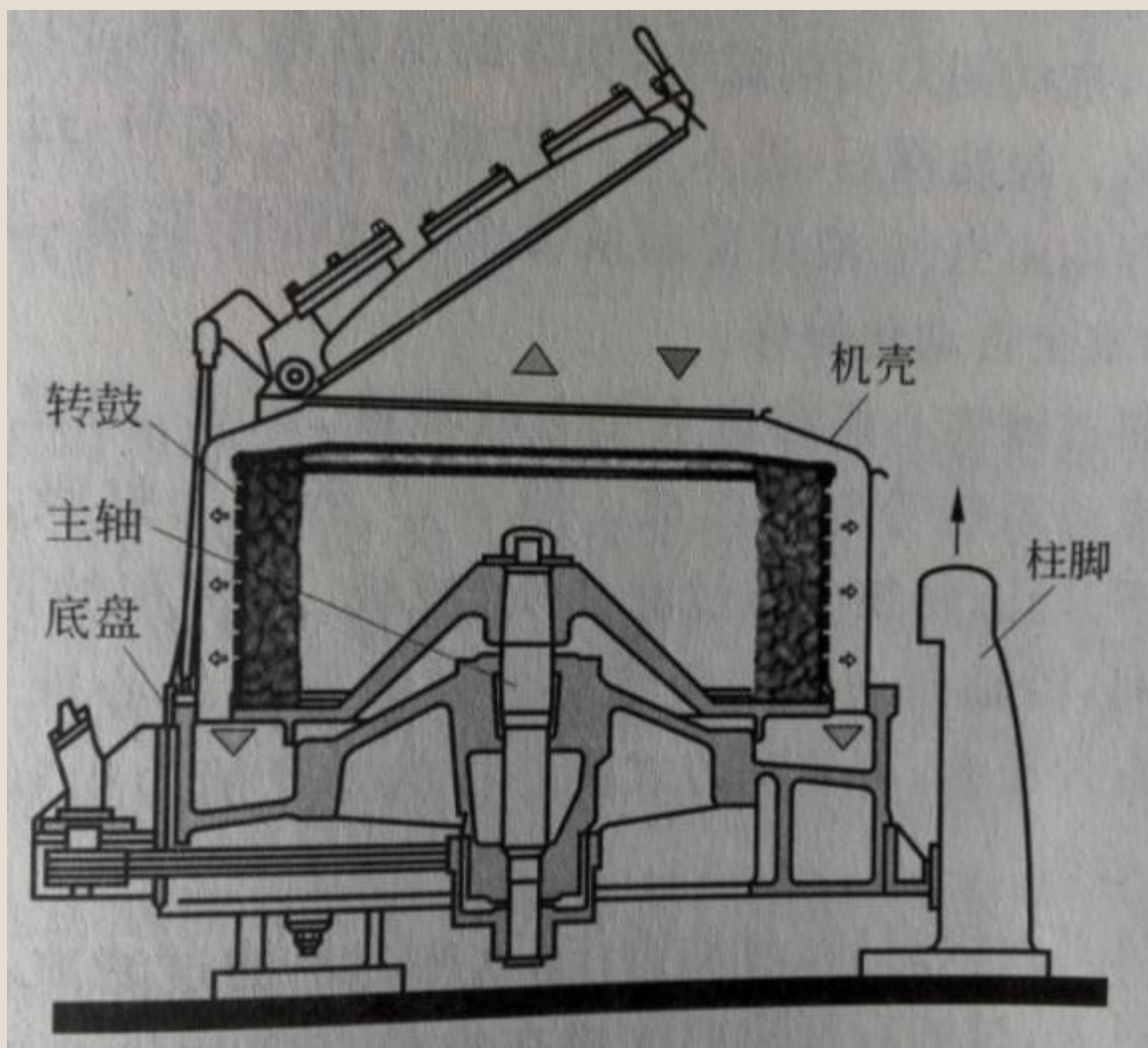
压滤机即加压过滤机是利用加压设备提供的压力作为推动力。料浆经泵作用推入滤板和滤框组合的通道中，由滤框角端的暗孔进入框内，在压差作用下，滤液通过两侧滤布，然后经过滤板而上的沟槽流至出口排出。固相逐渐形成滤饼，待其充满滤框后，停止过滤，卸料。若滤饼需要洗涤时，则将洗涤水压入洗涤水通道，再经洗涤板角端的暗孔进入板面与滤布之间，在压差作用下对滤饼进行洗涤。



1-固定板；2-滤框；3-滤板；
4-压紧板；5-压紧手轮；6-滑轮

➤ 人工上部卸料三足式离心机

分离操作前，转鼓内装好衬网和滤网，根据被分离的物料特性与分离要求，选定分离操作方法，物料在低速下或全速下逐渐加入转鼓内，经分布器预加速后均匀分布在过滤介质上，在离心作用下固相被过滤截留生成滤渣，滤液从机壳排液口排出，滤渣脱水后停车，从转鼓上部用人工或真空抽吸取出滤液。。



优点：对分离物料适应性强；在低速下或停车后卸滤饼，对结晶晶粒破碎小；机器重心低，运行平稳；结构简单，制造容易，安装方便，易维护

缺点：间歇操作、辅助作业时间长，生产能力较低

人工上部卸料三足式离心机

5.2 干燥

概述

➤ 粉体工业生产中所得到的固态产品或半成品往往含有过多的水分或有机溶剂（湿粉），要制得合格的产品需要除去固体物料中多余的水分。

➤ 除湿方法：

■ 机械除湿——如离心分离、压滤等

■ 干燥——利用热能使湿物料中的水分气化。这种方法除湿程度高，但能耗大。

➤ 惯用做法：先采用机械方法把固体所含的绝大部分湿粉除去，然后再通过加热把机械方法无法脱除的湿粉进行干燥，以减低除湿的成本。

干燥分类

操作压力		操作方式		传热方式（组合）			
常压	真空	连续	间歇	导热	对流	辐射	介电加热

a1 干燥速率与干燥效率

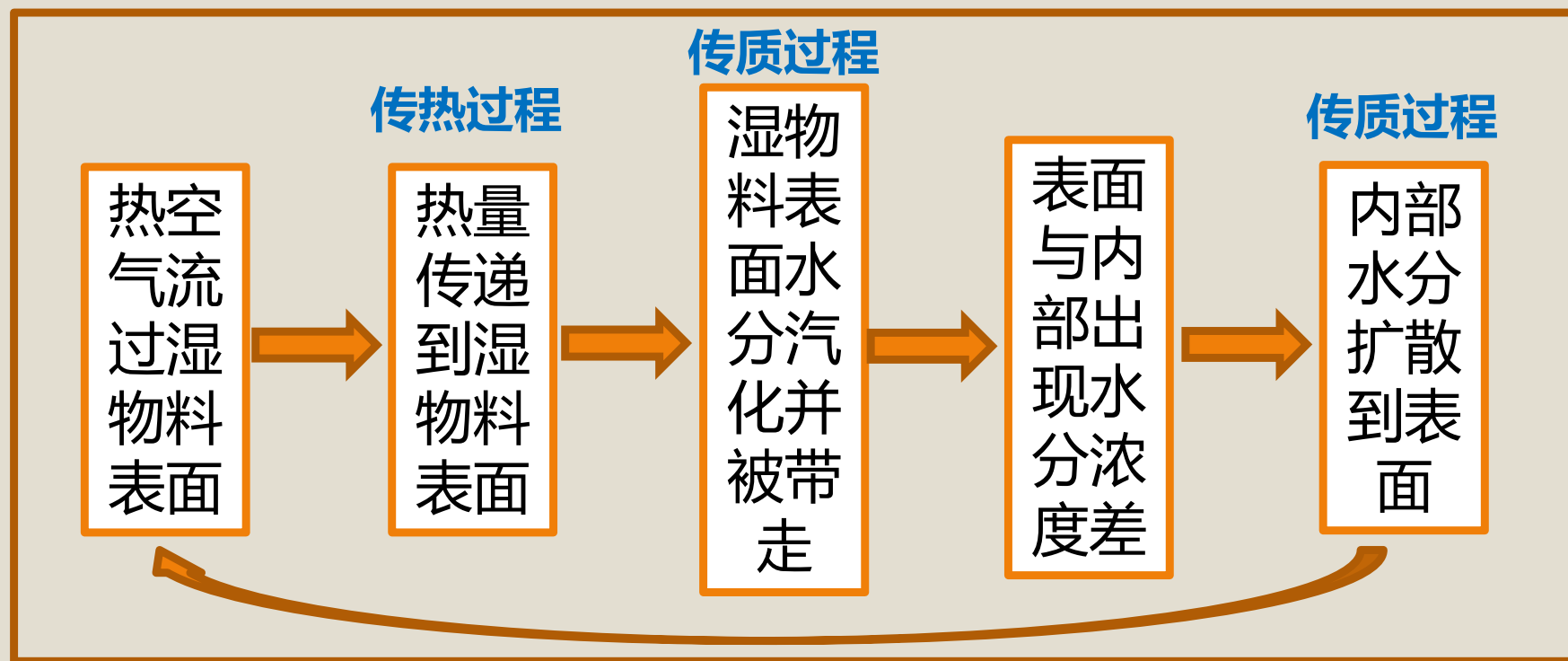
➤ 干燥速率

干燥速率是评价干燥器干燥能力的重要参数，定义为：

$$W_D = m_s / A \cdot dx / dt$$

其中 W_D 为干燥速率， m_s 为被干燥物料的绝干质量， A 为干燥介质和被干燥物料的接触面积， x 为被干燥物料的湿含量， t 为干燥时间

干燥过程示意图



➤ 干燥过程推动力

- (1) 传质推动力：物料表面水分压 > 热空气中的水分压
- (2) 传热推动力：热空气的温度 > 物料表面的温度

➤ 干燥效率

热源提供给干燥器的热量主要包括：湿分蒸发所需要的热量，物料升温所需要的热量以及热损失三部分；干燥器的热效率 η_k 指干燥过程中用于湿分蒸发所需要的热量与热源提供的热量之比，即：

$$\eta_k = E_1 / E_0 \times 100\%$$

其中 E_1 为湿分蒸发所需热量； E_0 为热源提供的热量， η_k 为干燥器的热效率

介质在干燥器中放出的热量，只有一部分用于汽化湿分。所以汽化湿分所消耗的热量与介质在干燥过程中放出的热量之比称为干燥器的干燥效率，表示为：

$$\eta_d = (i_2 - \theta_1) / LC_1(t_1 - t_2) \times 100\%$$

i_2 为在温度 t_2 下湿分蒸汽的热焓量， L 为每汽化1kg湿分所需要的绝干气体量，称为干燥介质的比耗量； θ_1 为冷凝热焓量； C_1 为湿空气的干基比热。

用空气作为干燥介质的热风式对流干燥器，其干燥热效率约为30-60%；用过热蒸汽作为干燥介质，实际干燥热效率约为70-80%。

**热效率或干燥效率是衡量干燥器性能好坏的重要指标，
由于干燥热效率更易测量，因此使用更为广泛**

a2 干燥设备选型

实际并没有一个严格的规则，选择最佳干燥设备，在许多情况下，材料的原始状态可决定干燥器的型式

干燥物料状态与适用的干燥器类型

被干燥物料的状态	适用的干燥器类型	
	大批量连续处理	少量处理
液体、泥浆	喷雾、流化床多级干燥	转鼓式、真空带式等
糊状物	气流干燥、搅拌回转干燥等	传导加热圆筒搅拌、箱式通风干燥
湿片状物	带式通风，回转通风干燥	箱式通风、真空圆筒式搅拌干燥
颗粒状物料	带式、回转、立式通风干燥，流化床干燥，回转干燥	流化床、箱式通风干燥、锥形回转干燥
粉状物料	流化床、气流、闪蒸干燥	间歇液化床、真空圆筒式带搅拌干燥
定型物料	平流隧道式、平流台车式干燥	箱式干燥
片状物料	喷流式、多圆筒式干燥	单筒或多筒式干燥
涂布、涂布液	红外线、喷流式干燥	平行流热干燥
易碎的、晶状物料	带式、穿流循环式、塔式干燥、振动床	箱式通风、多层圆盘干燥

➤ 按照物料的状态将干燥分成两类：

■ 一类要求干燥后仍保持原料的原型

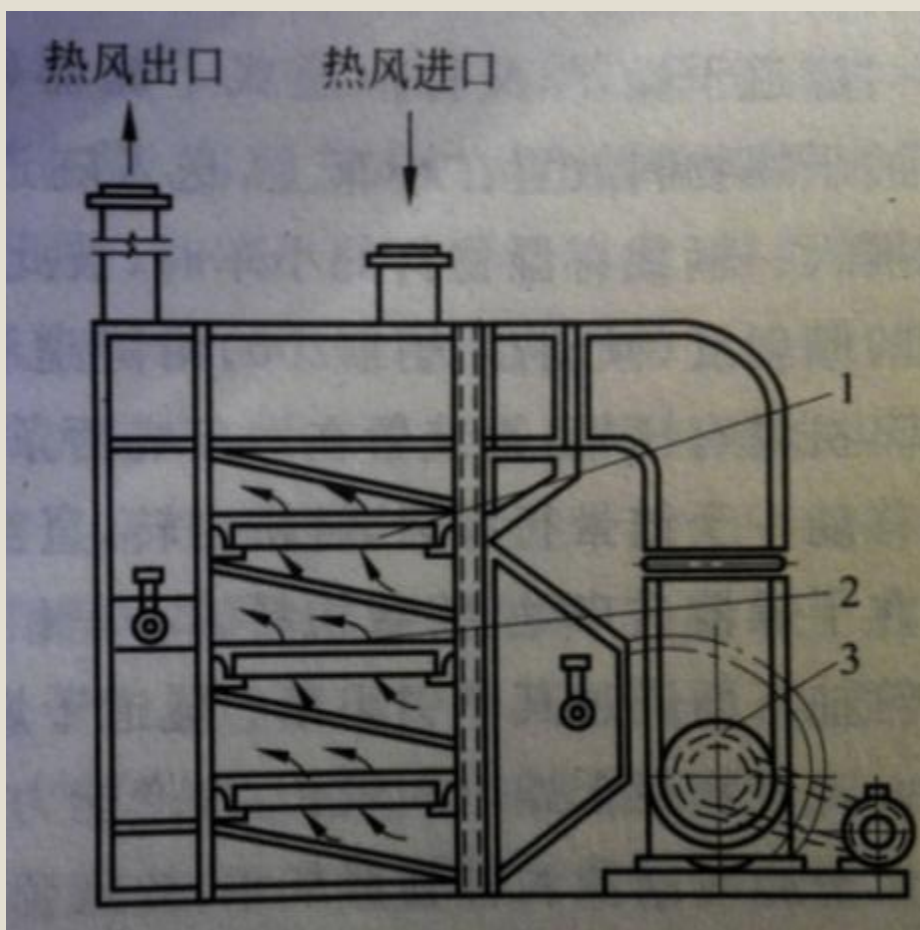
■ 另一类是把液体、泥状、块状、粉状物料干燥后，成为粉状或颗粒状产品。

➤ 箱式干燥器

箱式干燥器一般**间歇操作**，广泛应用于**干燥时间较长和数量不多的物料**，也可用于干燥有**爆炸性和易生成碎屑的物料**。

箱式干燥器内部主要结构有：逐层存放物料的盘子、框架、蒸汽加热翅片管或裸露电热元件加热器。由风机产生的循环流动的热风，吹到潮湿物料的表面以达到干燥的目的。在大多数设备中，热空气被反复循环通过物料。

缺点：物料得不到分散、干燥时间长、劳动强度大、因粉尘导致的环境污染大、热效率低，产品质量不稳定、不利于物料庞大体系的干燥等。



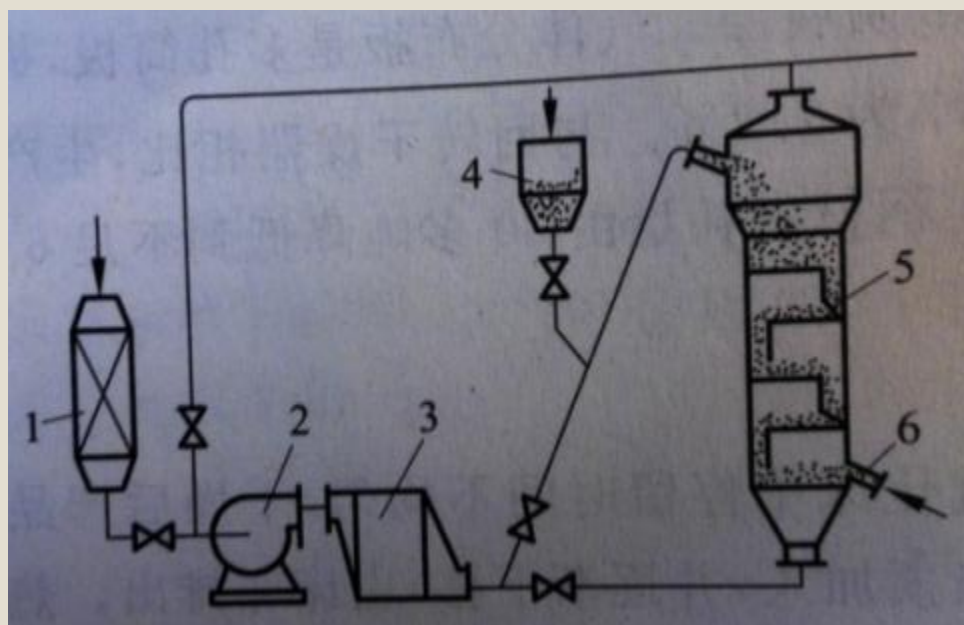
穿流气流箱式干燥器示意图

1-料盘；2-盘网；3-风机

➤ 流化床干燥器

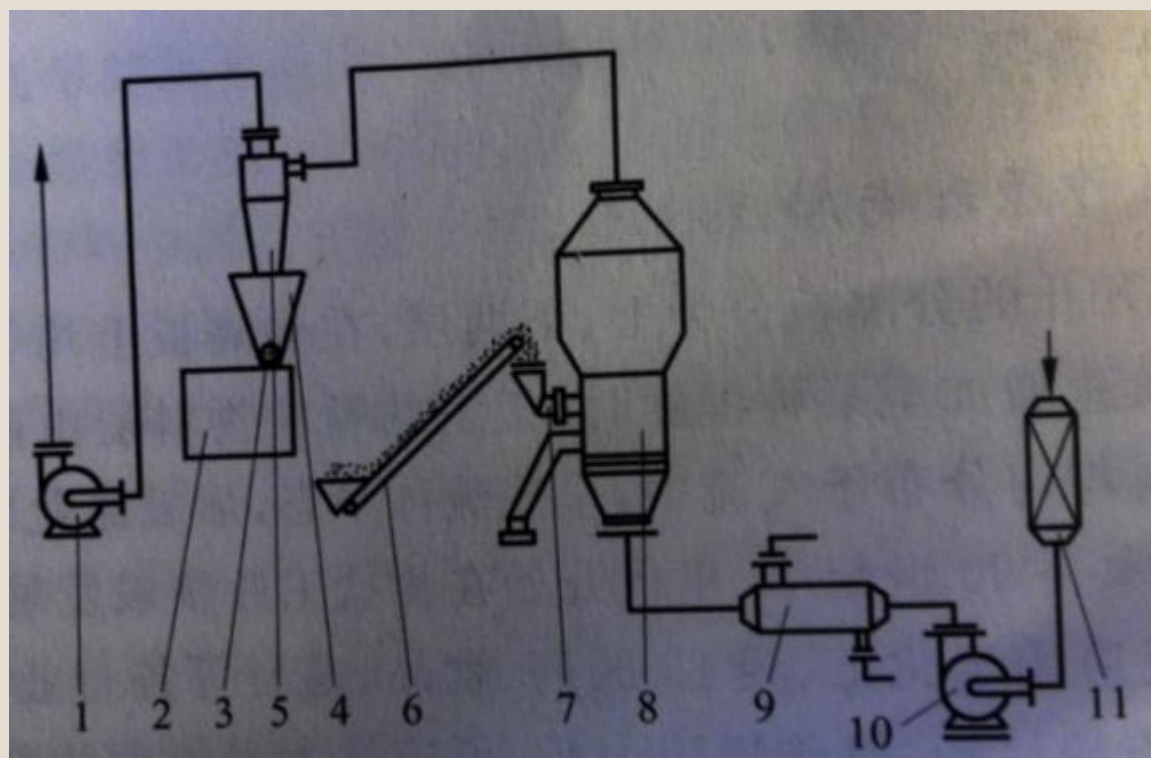
将一圆柱体用开孔的分隔板分为上、下两层，在分隔板上均匀散步颗粒物料，由板下引入热风，当风速增加至某种程度时，板上的颗粒物料层由静止状态逐渐碰撞、鼓泡、进而全部物料均匀分布于气流中，呈现流体状态，称为流化床。

流化床设备结构简单，运行维护费较低，热效率高达50%，干燥时间易于调节，易与其它类型设备组成二级或三级干燥机组。



多层流化床干燥器示意图

1-空气过滤器；2-鼓风机；3-加热器
4-料斗；5-干燥器；6-卸料管



流化床干燥 NH_4Cl 流程图

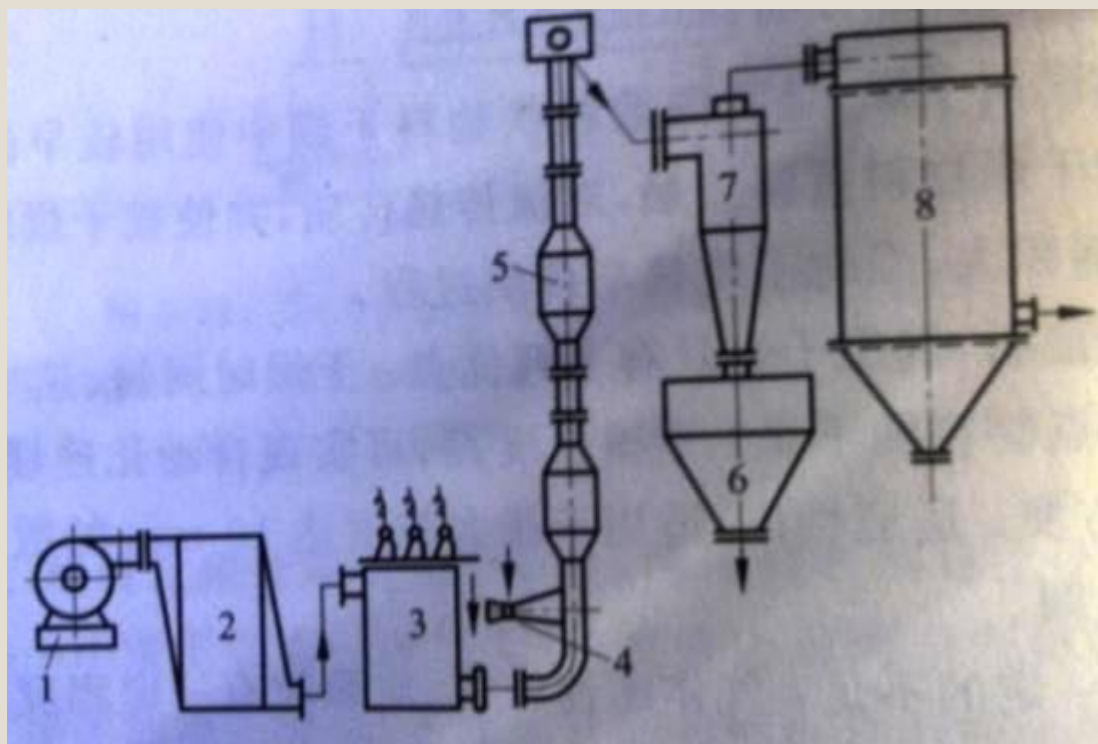
1-引风机；2-料仓；3-星型卸料器；4-集灰斗；5-旋风分离器；6-皮带输送机；7-抛送机；8-流化床；
9-换热器；10-鼓风机；11-空气过滤器

➤ 气流干燥器

气流干燥也称瞬时干燥，该法是使热空气与被干燥物料直接接触，对流传热传质，并使被干燥物料均匀地悬浮于流体中，两相接触面积大，强化了传热与传质过程。

优点：干燥时间短、速率快、处理量大、适合用于热敏性或低熔点物料的干燥、干燥强度高、可实现自动化连续生产、结构简单、占地面积小、制造方便、适应性强。

缺点：气体流速较高，对颗粒有一定程度磨损；物料在高速气流作用下对管壁造成冲刷、磨损；不适用于粘附性很强的物料，对在干燥过程中易产生微粉又不易分离以及需要空气量极大的物料，不宜采用气流干燥。



脉冲气流干燥器5由粗管与细管相互连接而成，物料在脉冲气流作用下在细管中加速，进入粗管后由于空气阻力开始减速，减速终了再次进入细管，进一步加速，如此反复交替。

细管气流速度 > 粗管气流速度

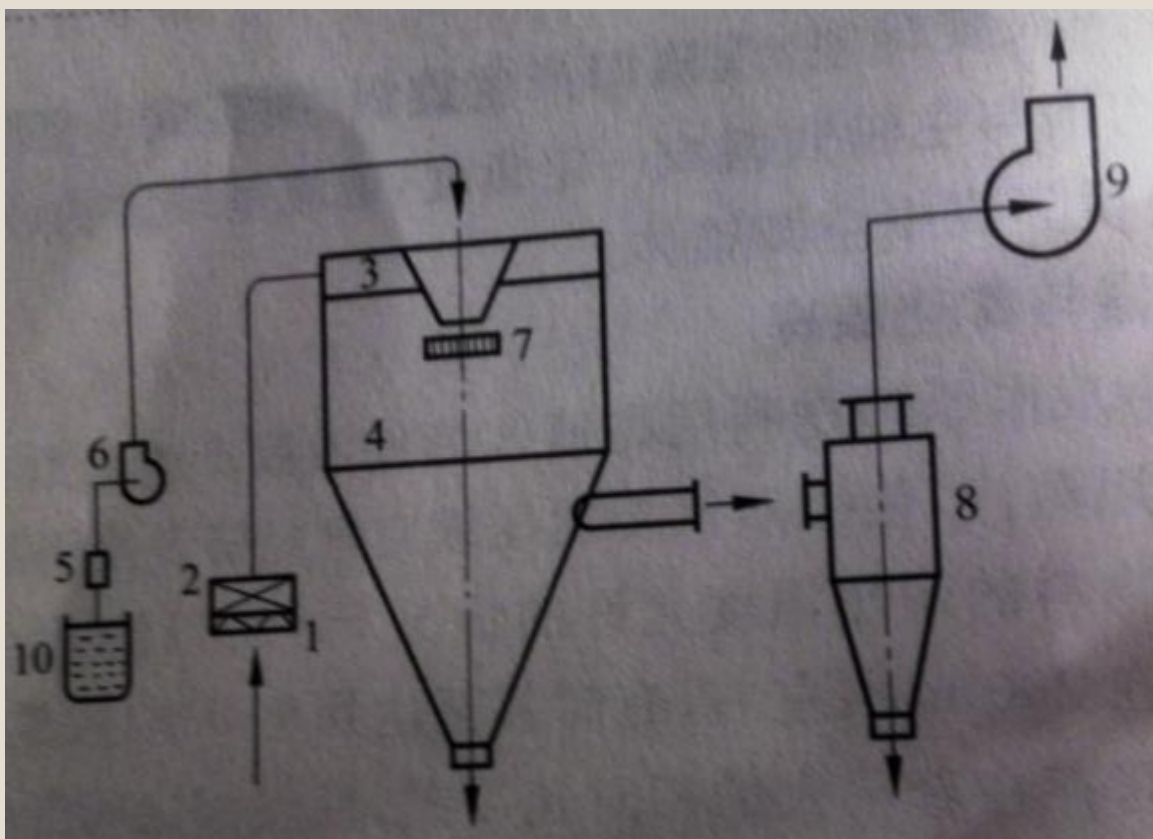
脉冲气流干燥器工艺流程图

1-鼓风机；2-翅片换热器；3-电加热器；4-文丘里加料器；
5-脉冲气流干燥器；6-料斗；7-旋风分离器；8-布袋除尘器

➤ 喷雾干燥器

采用喷雾的方法，是物料成为雾滴分散在热空气中，物料和热空气呈并流，逆流或混流的方式互相接触、使水分迅速蒸发，达到干燥的目的。喷雾干燥是处理溶液。

喷雾干燥雾化器有多种，根据雾化机理分为离心式、压力式，习惯上，人们按雾化方式将喷雾干燥分为转盘式（离心式）、压力式（机械式）。



目前工业生产中使用最广泛的干燥器之一

特点：无需严格的过滤设备，粒料也基本不堵塞通道，适应较高粘度料液的干燥、易于调节产品粒度，干燥器直径大，径长小，干燥空间利用率高。

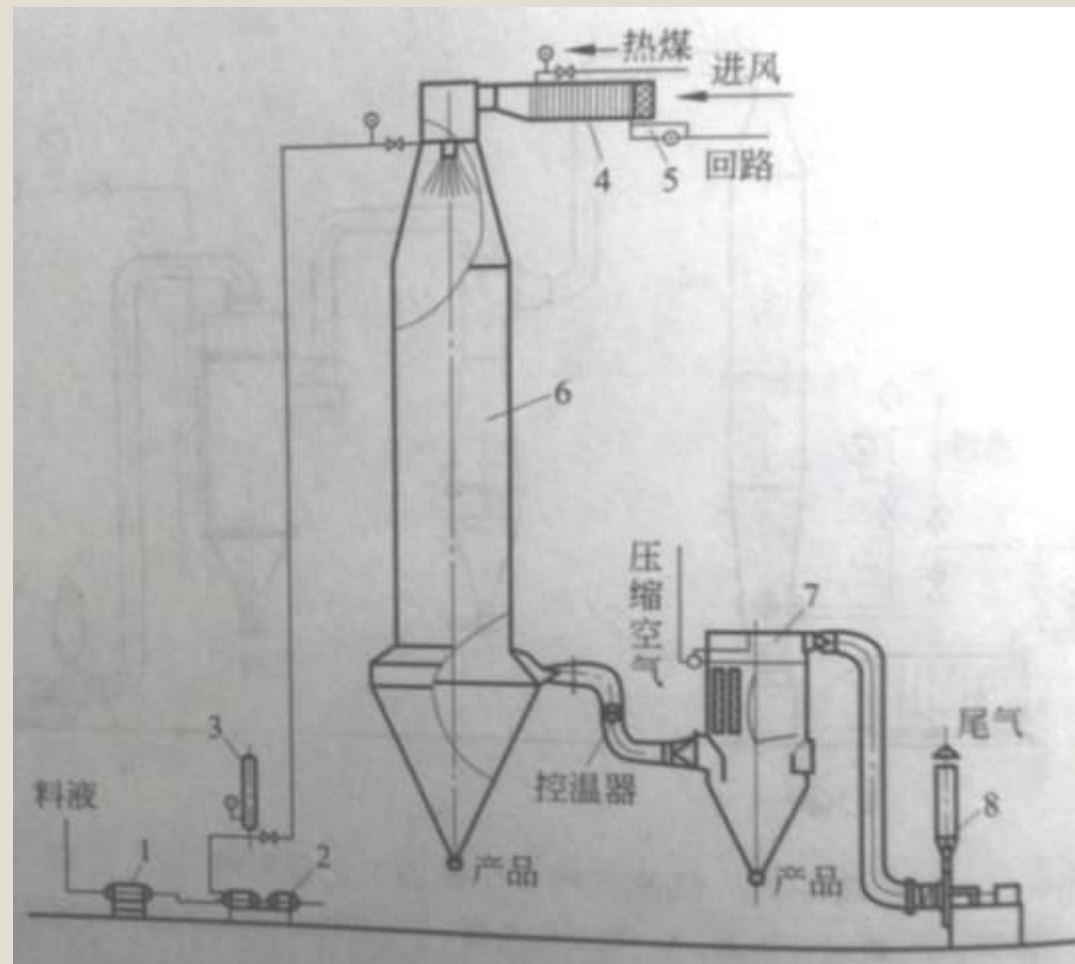
缺点：雾滴与气体接触方式为并流形式，分散盘不能垂直放置，分散盘加工精度高，需具备良好的动平衡性能；产品的堆密度较压力式喷雾干燥器低

离心式喷雾干燥器工艺流程

- 1-空气过滤器；2-加热器；3-热风分配器；4-干燥室；
5-过滤器；6-送料泵；7-离心雾化器；8-旋风分离器
9-引风机；10-料槽

生产中使用最为普遍，平均粒径150-200 μm 。利用高压泵将料液加压到2-20 MPa，送入雾化器将料液喷成雾状，雾化器孔径小，料液进入高压泵前需进行过滤。工作生产中，一个塔内可装十几个喷嘴，每小时产量可达 十几吨。

缺点：流量无法调节，不适于处理纤维状物料，不适用于处理高粘度或固液相分离的悬浮液。



压力式喷雾干燥器工艺流程图

1-过滤器；2-高压泵；3-稳压器；4-加热器；5-空气过滤器；6-干燥箱；7-布袋除尘器；8-引风机

a3 节能措施

➤ 减少干燥过程的各项能量损失

一般来说，干燥器的热损失不会超过10%。为防止干燥系统的渗漏，一般在干燥系统中采用送风机和引风机串联使用，使系统处于零压状态，避免对流干燥器因干燥介质的渗入或漏出造成干燥器热效率的下降。

➤ 提高干燥器入口空气温度，降低出口废气温度

● 部分废气循环，从干燥器出口废气中回收能量

➤ 从固体产品中回收显热

➤ 采用两级干燥法，降低干燥器的蒸发负荷：物料干燥前应尽量脱水，液体物料干燥前应预热。

➤ 利用内换热器

内换热器提供干燥所需部分热量，减少干燥空气流量，节能、提高生产效率

➤ 太阳能干燥

➤ 过热蒸汽干燥

蒸汽传热速率快，且过热蒸汽干燥可有效利用干燥器排出的废蒸汽，提高干燥效率，节约能源。

5.3 气固分离—收尘

概述

➤ 气固分离

- 从气体与细颗粒悬浮相的混合相中除去颗粒的单元操作

➤ 气固分离目的：

- 在气力输送或在某种产品生产中，需要把目的物从气体中分离出来
- 为了环境保护与文明生产的目的，需要把气体中的粉尘进行收尘。

➤ 粉尘

- 固体物料经机械撞击、研磨、碾压而形成的能够悬浮于空气中的固体颗粒称为粉尘，其粒径大都为 $0.25\text{-}20\mu\text{m}$ ，绝大部分为 $0.5\text{-}5\mu\text{m}$ ；
- 在燃烧或金属熔炼过程中产生的固体颗粒，一般称为烟尘或烟，粒径通常小于 $1\mu\text{m}$ ；
- 大气中气态化合物物质，在一定条件下经过复杂的物理、化学反应而形成的微小固体颗粒，粒径为 $0.005\text{-}0.05\mu\text{m}$ ，称为烟或雾

a1 粉尘的特性

➤ 分散度

也称为粉尘的粒径分布，以粉尘粒径大小或质量分数来表示。粒径较小的颗粒越多表示颗粒分散度越高，同理，粉尘粒径较小的颗粒质量分数越大，质量分散度越高。

- 分散度对悬浮性的影响：分散度愈高，小颗粒越多，悬浮性越好
- 分散度与表面积的关系：粉尘粒径越小，分散度越高，总表面积越大

➤ 粉尘的润湿性

取决于粉尘的成分、粒度、温度以及荷电性等因素，分为亲水性和疏水性粉尘。

➤ 粉尘的凝聚性

颗粒因表面电荷、布朗运动、磁性、声波振动等使粉尘相互撞击而凝聚——收尘器设计原理

➤ 粉尘的荷电性

物料处理过程（如粉碎、球磨等）很容易是粉尘带电，其电量与其粒径、密度、作业环境温度与湿度有关。温度升高，荷电量增高，湿度增加，荷电量降低。

➤ 粉尘的爆炸性

悬浮于空气中的粉尘超过一定浓度时，在外界热源刺激下会发生爆炸。能够引起爆炸的最高浓度称为爆炸上限，反之称为爆炸下限，因此在实际生产过程中必须严格控制粉尘浓度，采取必要的防爆措施

a2 粉尘的分类

➤ 按粉尘成分分类

- 无机粉尘：包括矿物性粉尘、金属粉尘和人工无机粉尘等
- 有机粉尘：包括动物性粉尘、植物性粉尘和有机性粉尘等
- 混合型粉尘：上述两种或多种粉尘的混合物

➤ 按粉尘粒径分类

可见粉尘：粒径大于 $10\mu\text{m}$ ；显微粉尘：粒径 $0.25-10\mu\text{m}$ ；超显微粉尘：粒径小于 $0.25\mu\text{m}$ 。

➤ 按燃烧和爆炸性质分类

- 可燃性粉尘，如粉煤灰、硫磺粉尘等
- 非可燃性粉尘，如石英砂，粘土粉尘等

➤ 从卫生学角度分类

- 呼吸性粉尘，即可吸入粉尘，粒径小于 $5\mu\text{m}$ ，可通过呼吸系统对人体内部器官产生损伤
- 非呼吸性粉尘，又称不可吸入性粉尘
- 有毒粉尘，如锰粉尘、铅粉尘等，可粘附与人体皮肤，对表皮进行腐蚀，甚至进入人体血液循环
- 无毒粉尘，如铁矿石粉尘等
- 放射性粉尘，如铀矿石粉尘等。

a3 粉尘浓度测量

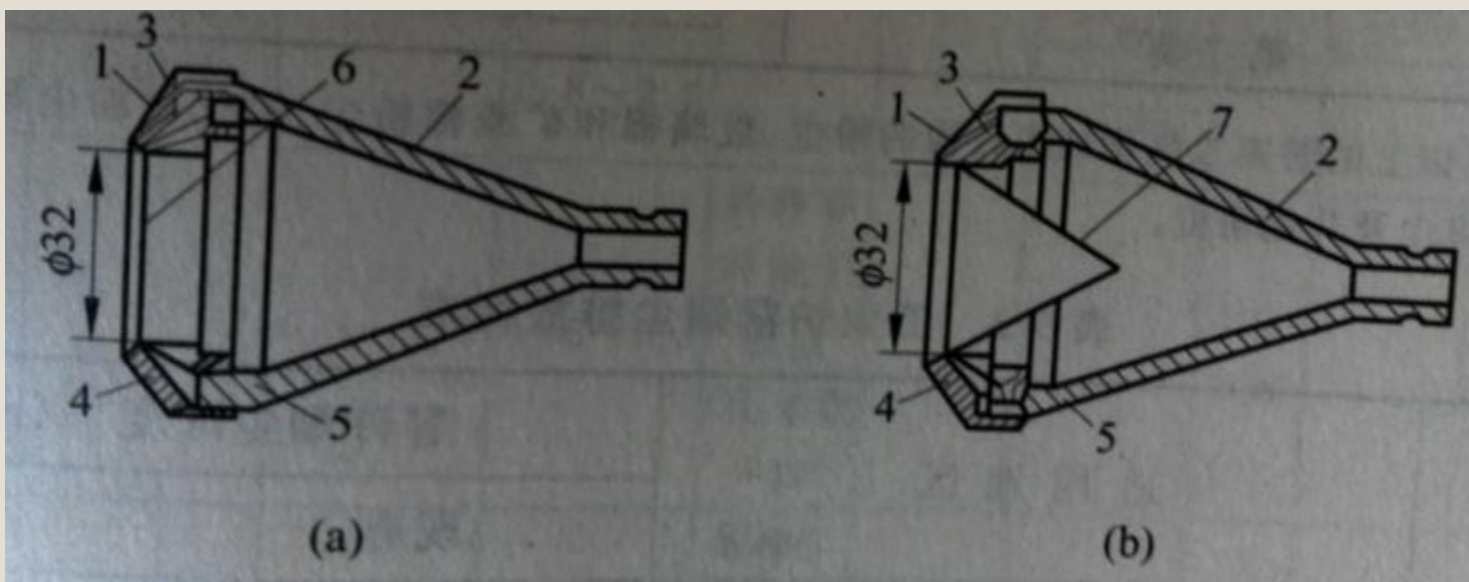
➤ 粉尘浓度测定方法应用较普遍的是集尘管法和滤膜法

当含尘气体通过集尘管或滤膜时，粉尘被截留，测得集尘管或滤膜的增重 ΔW 及气体通过量 L ，计算得气体的含尘浓度为

$$C=3600(G_2-G_1)/t \cdot Q_s$$

$$Q_s = Q\sqrt{273p'\rho / 10000T'\rho'}$$

C 标准状态下气体的含尘量， G_1 测定前集尘瓶或滤料的原始质量， G_2 测定后集尘瓶或滤料的原始质量， Q_s 标准状态下取样速度， t 取样时间； Q 转子流量计的流量标定值； p' 测定时流量计操作压力； T' 测定时流量计操作温度； ρ' 标准状态下被测气体密度； ρ 标定转子流量计气体的密度。



- 1 顶盖；2 漏斗；3 固定盖
4 锥形环；5 螺丝底座；6
平面滤膜；7 锥形滤膜

每个测定点至少重复测定两次，相对误差需小于10%

滤膜粉尘取样器 (a) 平面滤膜安装法 (b) 锥形滤膜安装法

a4 收尘器类型与分离效率

➤ 收尘器是将粉尘从气流中予以分离的设备，其工作状况直接影响排往大气中的粉尘浓度

常用收尘设备的适用范围及性能

类 型		适宜风量 /(m ³ /h)	风速 /(m/s)	阻力 /kPa	应用范围			对不同粒度(μm) 粉尘的分离效率/%			适用净 化程度
					粉尘 类别	粉尘 粒度 /μm	粉尘 浓度 /(g/m ³)	<1	1~5	5~10	
重力沉降室		<50 000	<0.5	0.05~0.1	各种 干粉尘	>20	>10	<5	<10	<10	粗净化
旋风 收尘器	小型	<15 000	0.5~1.5	0.5~1.5	各种 非纤维 干粉尘	>1.0	或	<10	<40	60~90	粗净化
	大型	<100 000	(进口)	0.4~1.0				<10	<20	40~70	
袋式 收尘 器	简易式	按设计	0.2~0.7	0.4~0.8			<5	<30	<80	<95	中细净化
	机械振打		1~3	0.8~1.0			3~5	<90	<90	<99	
	脉冲振打		2~5	0.8~1.2			3~5	<90	<99	<99	
	气环袋式		2~6	1.0~1.5			5~10	<90	<99	<99	
颗粒层 收尘器		按设计		0.8~2.0			<20				中细净化
静电 收尘器	干式		0.5~1.5	0.05~0.3	各种非 纤维干 粉尘 (比电阻 ~Ω)			<90		<100	中细净化
	湿式							<95			
湿法 收尘器	水浴式 冲激式 泡沫	<3000	筒体 断面~	0.4~1.0	各种非 纤维、非 粘性、非 水化性 粉尘		<5	<20	<50	95	中细净化
		按设计		0.8~2.0			<100	<90	<99	99	
		<50 000		0.6~1.5			<10	<70	<70	99	

➤ 分离效率

■ 对收尘器来说，分离性能即为收尘性能，有两项特征指标：收尘效率和部分收尘效率。

收尘效率指收尘器捕集的粉尘量与流入的粉尘量之比。由于实测粉尘流量很困难，故可通过测定粉尘浓度来转换求算，在实际中常用一定时间内直接称量的收尘量与入口粉尘总量之比表示。

$$\eta = \frac{G_c}{G_i} = \frac{G_i - G_e}{G_i} = \frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{C_1 Q_1} = \left(1 - \frac{C_2 Q_2}{C_1 Q_1}\right) \times 100\%$$

式中： G_i, G_c, G_e 分别表示收尘器进出口气体中的含尘量、从气体中分离收集出来的粉尘量和收尘器出口气体中的含尘量；

C_1, C_2 表示进入收尘器和排出收尘器气体的含尘浓度

Q_1, Q_2 表示进入收尘器和排出收尘器的风量。

当收尘器没有漏风时， $Q_1=Q_2$ ，上式可简化为：

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\%$$

若几台收尘器串联使用，则其总收尘效率 η 为：

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n)$$

➤ 分离效率

■ 收尘效率与颗粒的大小及分散度有密切关系，一般来说，粒径越大，收尘效率越高。因此单独使用分离效率来描述某一收尘器的分离性能是不够的，还必须对不同大小颗粒的分离效率进行了解。对于某一粒径或粒径范围的颗粒的分离效率称为**部分收尘效率**，其计算式为：

$$\eta_x = G_{cx}/G_{ix} \times 100\% = G_c R_{cx}/G_i R_{ix} \times 100\% = \eta R_{cx}/R_{ix}$$

式中： G_{ix} , G_{cx} 分别表示收尘器进出口含有某一粒级的含尘量、从气体中分离收集出来的某一粒级的含尘量；

R_{ix} , R_{cx} 表示收尘器进口气体中含有某一粒级的粉尘百分含量、从气体中分离出来的粉尘中某一粒级的粉尘百分比含量

总收尘效率：

$$\eta = R_1 \eta_1 \cdot R_2 \eta_2 \dots R_n \eta_n$$

■ 通过率或通过系数用净化后流体中粉尘含量的百分数表示：

$$\varepsilon = (G_e/G_i) \times 100\% = 1 - \eta$$

a5 收尘设备及其工作原理

➤ 重力收尘器

■ 原理与分类

又称沉降室，是利用粉尘颗粒的重力沉降作用使粉尘与气体分离的收尘技术

优点：结构简单、维护方便、阻力低、投资小、施工快、维护费用低、经久耐用。

缺点：收尘效率低、使用捕集粒径大于 $40\text{-}50\mu\text{m}$ 的粉尘颗粒、设备庞大，适用处理中等气量的常温或高温气体，**多作为多级收尘的预收尘使用。**

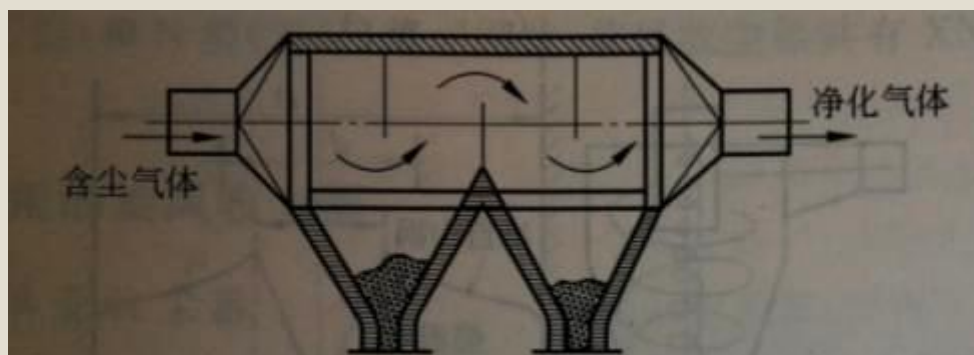


图 9-4 沉降室结构

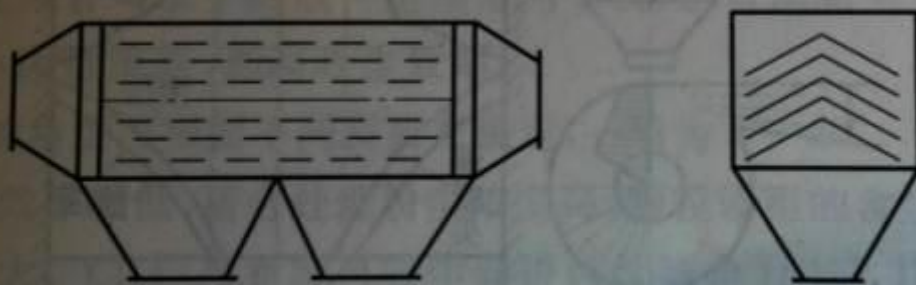


图 9-5 人字形平板沉降室

气体从小管进入大腔室后，气流速度降低，大颗粒在重力作用下缓慢向灰斗沉降。为提高集尘效率，可在沉降室内部加入隔板，但同时也导致多层沉降室清灰困难的问题

➤ 离心式收尘器

■ 原理与分类

又称旋风收尘器，是利用旋风的含尘气体所产生的离心力，将粉尘从气流中分离出来的一种应用较高的干式气固分离装置。

优点：构造简单、价格便宜、体积小、收尘效率高，能处理的气体量大。

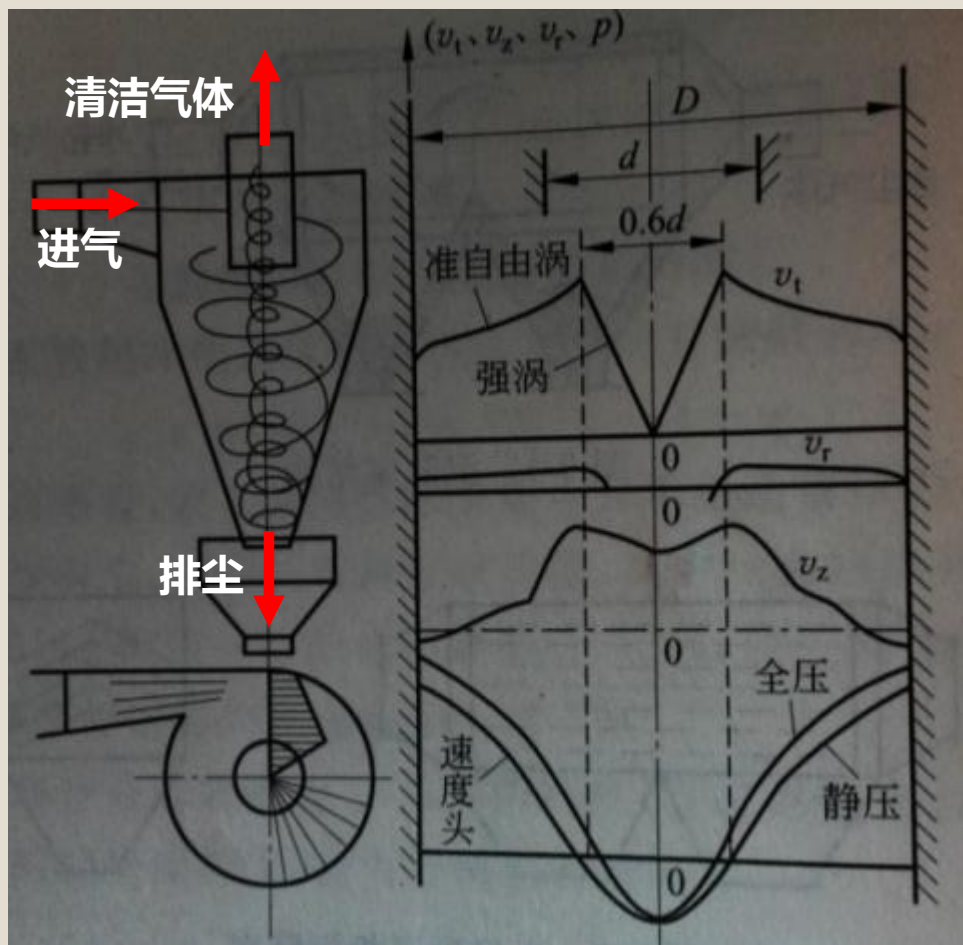
缺点：流体阻力大，收尘效率极易受载荷的影响，常用于多级收尘的初级收尘设备。

■ 分类

(1) **高效型：**筒体直径小，用来分离较细粉尘，分离效率大于95%；

(2) **高流量型：**筒体直径大，处理气体流量大，收尘效率为50-80%；

(3) **通用型：**处理中等气体流量，收尘效率80-95%。



旋风收尘器内气流与压力分布

含尘气体从进气管以加高速度沿切线方向进入收尘器并自上而下旋转，在旋转过程中产生离心力，将颗粒甩向筒壁，颗粒沉降于筒壁后失去动能沿壁面滑下与气体分开，进入下部的圆锥部分

➤ 过滤式收尘器

■ 原理与分类

设置一定的过滤材料，使含尘气体通过过滤材料达到气固分离的一种高效收尘设备，收尘效率一般在99%以上，有的高达99.99%。

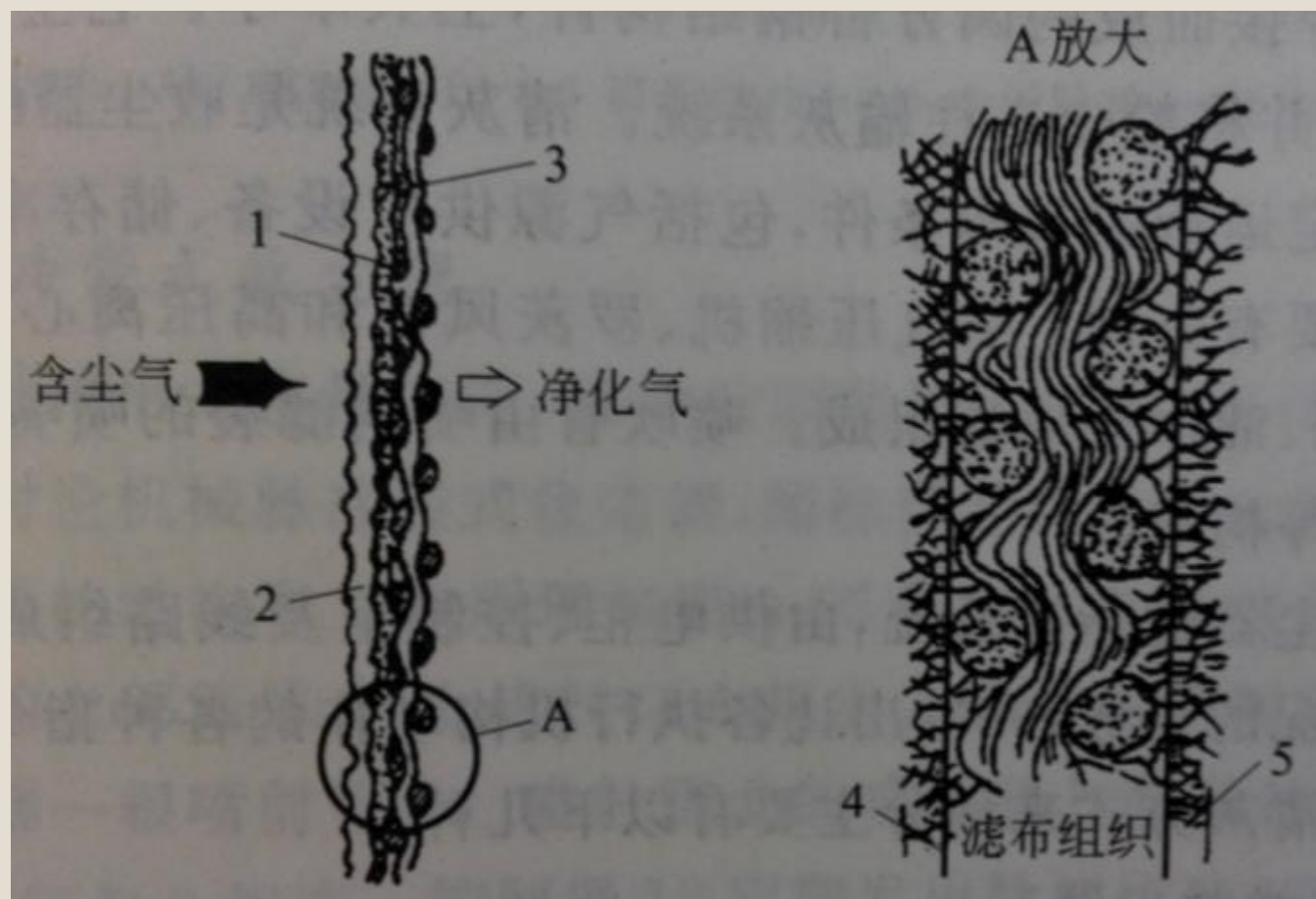
优点：对粉尘的特性不敏感，结构简单，维修方便，价格便宜，对亚微米粉尘有很好的收集效果，**广泛用于第二级收尘设备**（在旋风收尘器之后）。

■ 分类

- ✓ **袋式收尘器**
- ✓ **颗粒层收尘器**
- ✓ **滤尘器**

✓ 袋式收尘器

含尘气体通过多孔纤维的滤袋使气固两相分离的设备，依靠编织的或毡织的滤布作为过滤材料来分离含尘气体中的粉尘。设备开始工作时，粉尘与滤袋产生接触、碰撞、扩散和静电作用，使粉尘沉积于滤布表面的纤维上或毛线之间，在这个阶段净化效率不高，但在数秒或者数分钟内形成一定厚度的初次粘附层后，就能通过粉尘自身成层作用显著改变粉尘粘附层的过滤作用，气体中的粉尘几乎被完全过滤下来。



注：随着粉尘加厚，滤布的透气性能降低，气体通过滤布阻力增加，处理能力下降，且因为压力不断增大，滤布上的粉尘有可能进一步脱落，造成二次污染，因而要定期清除滤布上的粉尘。

滤布的过滤原理

1 尘粒层；2 粉尘；3 滤布；4, 5 绒毛覆盖层

✓ 颗粒层收尘器

原理:

利用颗粒过滤层使粉尘与气体分离。它具有结构简单、适用面广、耐高温、耐腐蚀、耐磨损、收尘效率高等优点，但极细粉尘的收尘效率不如袋式收尘器，而且由于颗粒层容尘量有限，不适用于进口气体含尘浓度太大的场合。

过滤原理:

- (1) 接触凝聚作用：通过分子间力、静电引力、布朗运动等使粉尘与颗粒料接触粘附，凝聚成块；
- (2) 筛滤作用：颗粒层相当于微孔筛，粉尘通过细而弯曲的颗粒孔隙时被截留，颗粒越细，粉尘粒径越粗，筛滤效果越好；
- (3) 惯性碰撞作用：含尘气体流经颗粒层时，粉尘惯性较大，因碰撞失去动能而被捕获

颗粒料的选择:

材质要求：耐磨、耐腐蚀、价廉、耐热，故一般选择 SiO_2 含量99%以上的石英砂作为颗粒料。

清洗:

采用反吹清洗方法，反吹气体速度应大于最大粉尘的临界流化速度而小于颗粒料的自由沉降速度

➤ 电收尘器

■ 原理与分类

在高压直流电的正负两极间维持一个足以使气体电离的静电场，气体电离所产生的正负离子作用于通过静电场的粉尘而使粉尘表面荷电。

优点：电收尘对微细粉尘的收尘效率高，可达99%以上，能处理较大的气体量，能处理高温、高压、高温和腐蚀性气体、能量消耗少，操作过程可实现完全自动化。

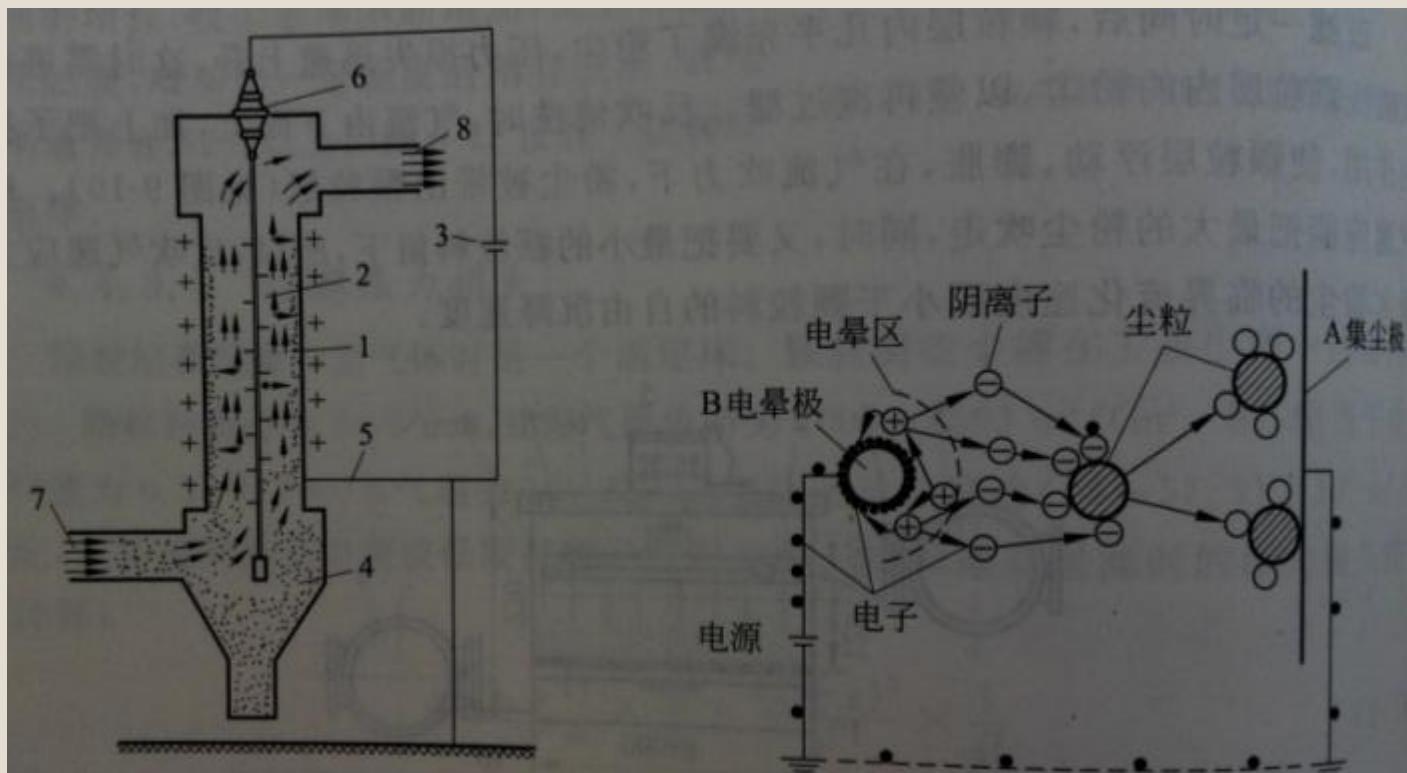
缺点：一次投资大、占用空间大、钢材消耗多、捕集高比电阻的细粉尘时需进行增湿处理等。

■ 分类

- ✓ **运动方向：**立式、卧式
- ✓ **处理方式：**干式、湿式
- ✓ **集尘极型式：**管式、板式

正极：集尘板，负极：电晕极

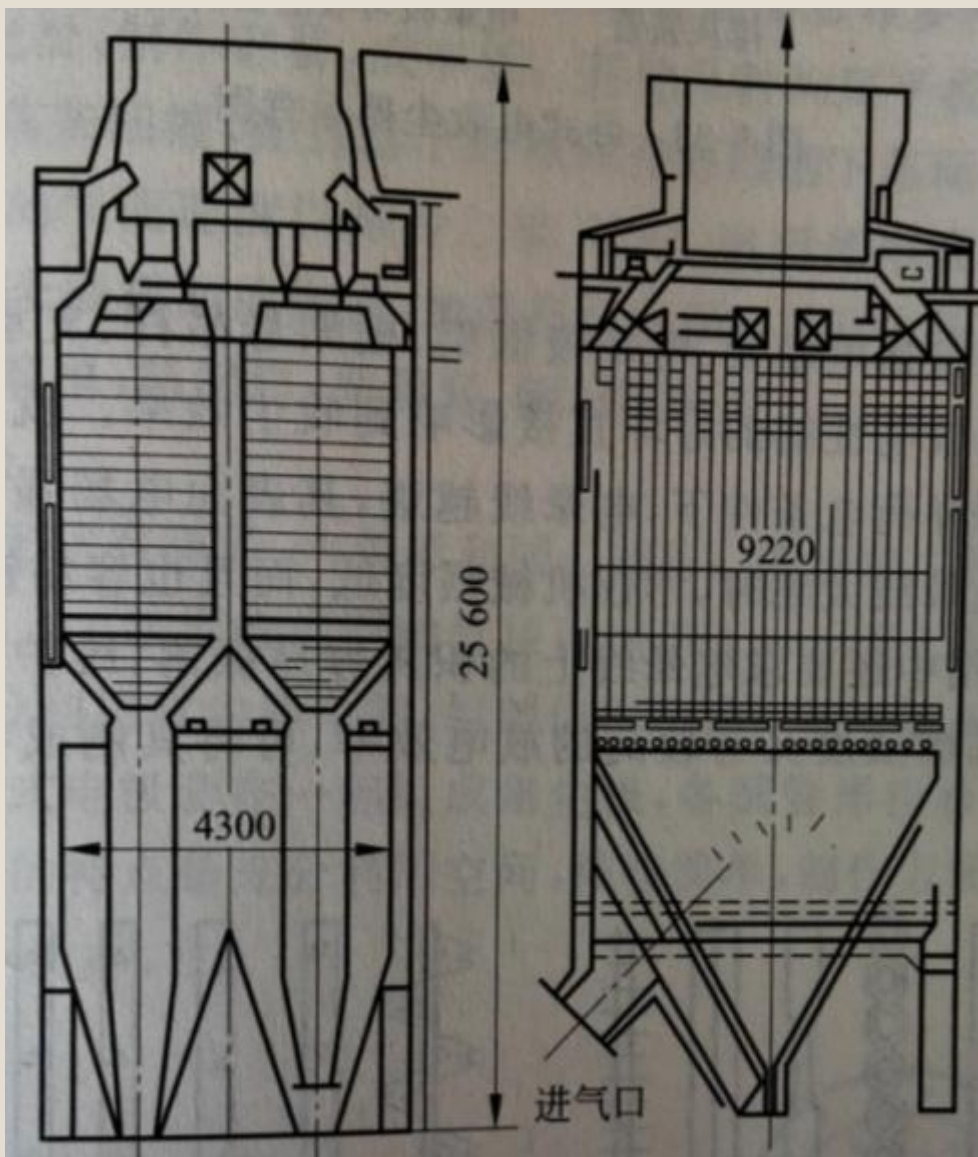
电压升高，电晕极2-3mm附近产生大量正负离子，正离子因靠近负极，几乎没机会与粉尘作用，阴离子向正极运动，途中与粉尘作用，使粉尘带负电，飞向集尘极，只有极少量粉尘沉积于电晕极



电收尘器工作原理

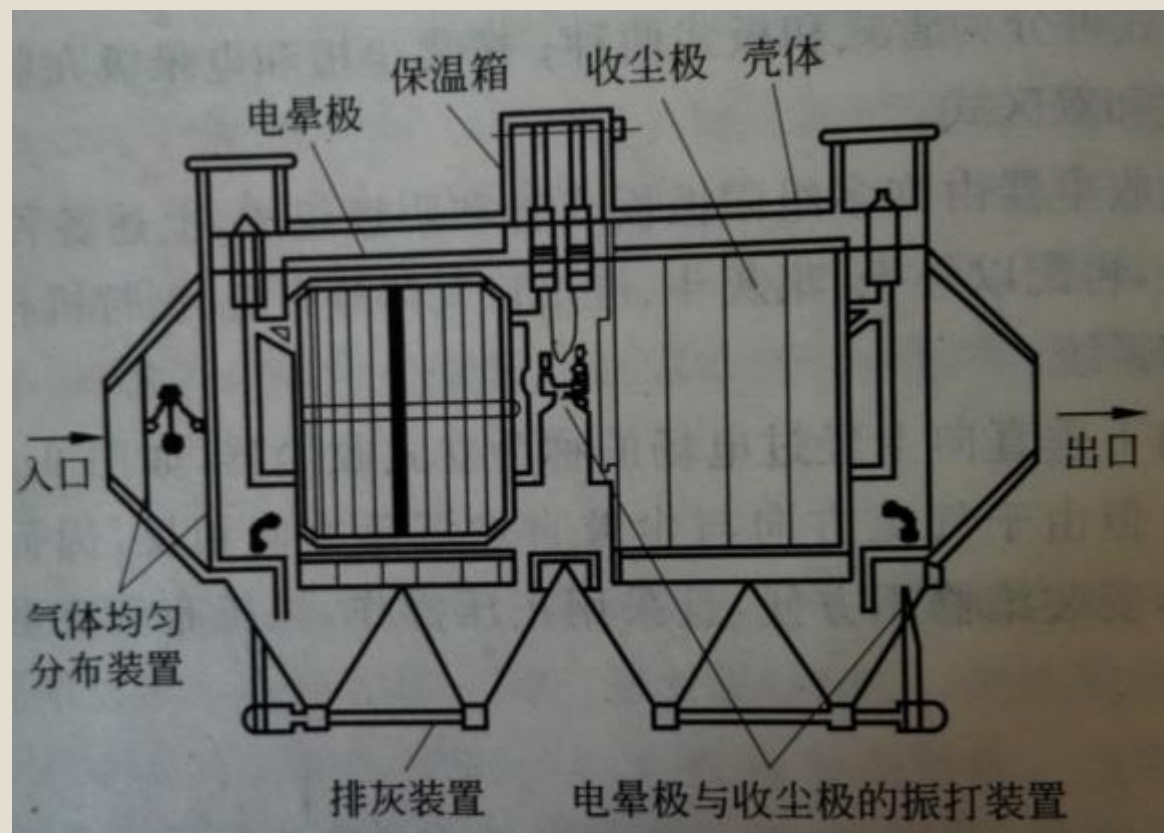
静电收尘过程示意图

1集尘器；2电晕极；3电源；4灰斗；5正极线；6负极绝缘子；7气体入口；8气体出口



60m²立式电收尘器示意图

占地面积小，但由于气流方向与尘粒重力方向相反，因而收尘效率稍低，另外高度较大，安装维修不方便，且采用正压操作，风机布置在收尘器之前，磨损较快。



卧式电收尘器示意图

气体水平通过电场，按需要可分成几个室，每个室有分成几个不同电压的电场，即可保证收尘效率，又可适应不同处理样要求。可负压操作，延长了风机使用寿命，节省动力，高度不大，安装、维修方便，但占地面积大。

■ 主要影响因素分析

✓ 电阻率：

粉尘比电阻在 10^4 - $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内时，带负电的尘粒到达集尘板后中和并以适当的速度流动，收尘效率高。

✓ 含尘浓度

粉尘浓度过高，抑制电晕电流的产生，粉尘颗粒获得的电荷减少，收尘效率降低。当粉尘浓度超过一定值时，甚至会导致电晕封闭现象（此时电晕电流减少至零）。

✓ 湿含量

湿度增加，降低空气被击穿的几率；增加湿度可补偿因气体温度高或气压低造成的气体密度减小，击穿电压降低，收尘效率不高的缺点；增加湿度可降低导电性比较差粉体的比电阻，同时，提高导电性好的粉尘的比电阻，从而进一步提高收尘效率。因此水泥预分解窑尾排出的废弃在进入电收尘器前要先经增湿塔增湿。

✓ 气体流速

气体流速越高，收尘效率越低，反正收尘效率越高。

✓ 结构型式

集尘器总表面积、电场长度、正负极间距、电极形状、振打方式等对收尘效率均有影响

➤ 湿式收尘器

■ 原理与分类

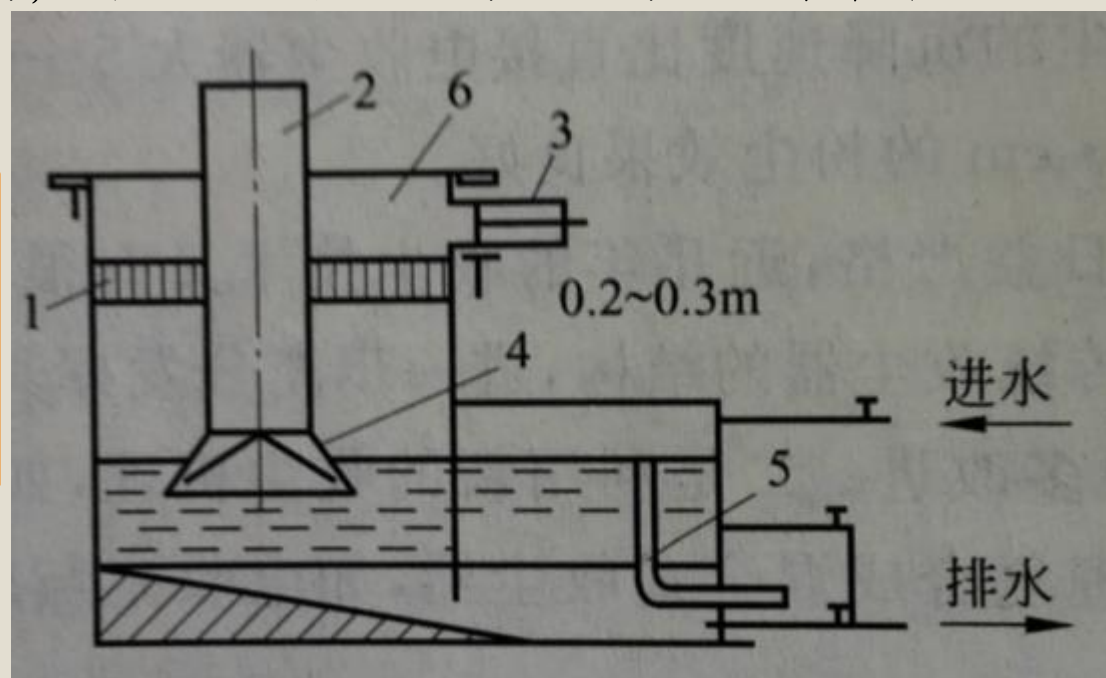
含有悬浮尘粒的气体与水相接触，当气体冲击到湿润的器壁时，尘粒被器壁所粘附，或者当气体与喷洒的液滴相遇时，液体在尘粒质点上凝聚，增大了质点的质量，使之降落。气体与液体接触方式：气体与水沫或已被雾化的水滴接触；气体冲击水层时鼓泡，形成细小的水滴或水膜

优点：适用于非纤维性的、能受冷且与水不发生化学反应的含尘气体，投资少，结构简单，操作及维修方便、占地面积小，收尘效率高，特别适用于处理高温、高湿和有爆炸危险的气体。

■ 类型

- ✓ 水域收尘器
- ✓ 管式水膜收尘器
- ✓ 文氏管收尘器

含尘气流喷入水中，粉尘被水粘结而留在水中，气流穿管水泡，受到泡沫净化后通过挡水板排出。



水浴收尘器结构简图

1挡水板；2进风管；3出风管；4喷头；
5溢水管；6盖板

a6 收尘与劳动保护

➤ 粉尘对人体健康的影响

- **在呼吸道系统沉积**：进入呼吸道内的粉尘并不完全进入肺泡，部分吸附于鼻腔至肺泡组织之间，对呼吸道系统产生危害
- **粉尘从肺内排出**：肺脏有自清洁作用，但少部分粉尘很难清除，肺脏的清洁作用于非常的大小与沉积部位有关
- **粉尘对人体的致病作用**：肺组织病变，如尘肺病、肺粉病等

➤ 收尘对劳动保护的意义

- 粒径在 $0.5-5\mu\text{m}$ 之间的飘尘对人体危害最大
- 大于 $5\mu\text{m}$ 尘粒，由于惯性作用可被鼻毛或呼吸道粘液排除
- 小于 $0.5\mu\text{m}$ 飘尘可通过呼吸道直接到达肺部沉积，危害人体。
- 有些飘尘表面还附有致癌性很强的芳香族碳氢化合物

思考题

1. 什么叫过滤，过滤方式有哪几种？试举例说明几种比较常用的过滤介质
2. 过滤式收尘器原理，优点及分类
3. 如何有效提高电收尘器的收尘效果？