

• § 4 通风排气中颗粒物的净化

•为什么要除尘？

- 粉尘对人体有危害
- 粉尘越小对人体的危害越大

•净化的目的？

- 达到排放标准
- 满足室内卫生标准
- 回收有用物料

除尘和净化的区别？

• § 4.1 颗粒物的特性

• 1. 粉尘的特性

• (1) 粉尘的密度: 真密度 (尘粒密度); 容积密度

容积密度: 松散状态下单位体积颗粒物的质量。

真密度: 设法排出颗粒之间及颗粒内部的空气, 所测出在密实状态下单位体积颗粒物的质量。

• (2) 粘附性: 分子力、毛细粘附力及静电力等作用

- ✓ 粉尘与粉尘之间
- ✓ 粉尘与器壁之间
- ✓ 双刃剑

• § 4.1 颗粒物的特性

• 1. 粉尘的特性

• (3) 爆炸性

固体物料破碎后，总表面积大大增加；

与氧气接触机会越多，粉尘的化学活泼性增大。

• (4) 荷电性与比电阻

✓ 荷电后的粉尘在电场中受到电场力的作用，从而达到除尘目的。

✓ 粘附性和爆炸性

• § 4.1 颗粒物的特性

• 1. 粉尘的特性

- (5) 粉尘的湿润性
 - ✓ 亲水性
 - ✓ 疏水性
 - ✓ 水硬性

• (6) 粉尘的粒径及粒径分布

- 粒径：表征颗粒的大小。

显微镜法、筛分法，液体沉降法（Stokes，常用）

- 粒径分布：表征同一粒径的颗粒占有的比例

1、颗粒物的粒径分布：也叫颗粒物的分散度

◆ 用颗粒的个数表示所占比例：粒数分布

◆ 用颗粒的质量表示所占比例：质量分布

2、粒径的分布密度函数： $f(d_c)$

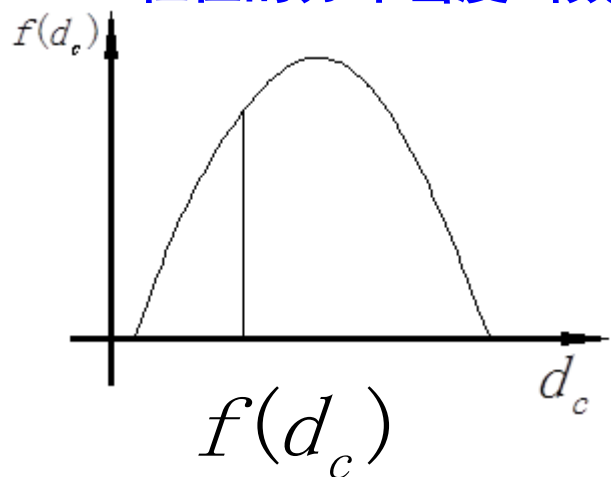
同一粒径的颗粒占有的比例用函数表示： $f(d_c)$

3、粒径的频率分布： $f(d_c) \cdot \Delta d_c$

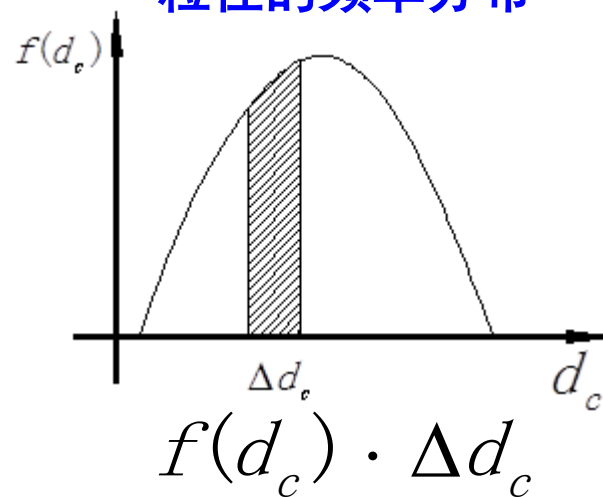
在某一粒径间隔 Δd_c 内尘粒所占的质量百分数： $f(d_c) \cdot \Delta d_c$

4、粒径的累积质量百分数： $\Phi(0, d_c)$

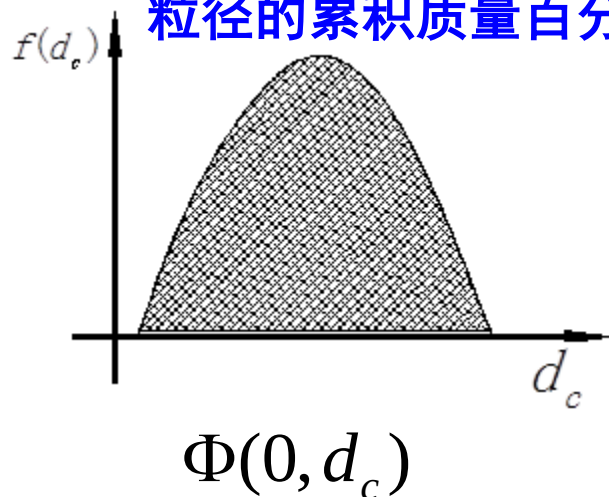
粒径的分布密度函数



粒径的频率分布



粒径的累积质量百分数



$$f(d_c) = \lim_{\Delta d_c \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta d_c}$$

$$\Phi = \int_0^{+\infty} f(d_c) d(d_c) = 1$$

累计质量百分数为50%时的粒径，称为**中位径** d_{cp} d_{50}

• § 4.2 除尘效率和除尘机理

• 1. 除尘效率

除尘效率是评价除尘器性能的重要指标之一。

它是指除尘器从气流中捕获颗粒物的能力。

常用表示方法：

- (1) 全效率
- (2) 串联运行时的总净化效率
- (3) 通过率（穿透率）
- (4) 分级除尘效率

• § 4.2 除尘效率和除尘机理

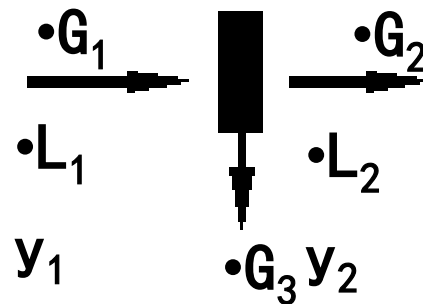
• (1) 全效率

• 概念：含尘气体通过除尘器时所捕获得颗粒物量占进入除尘器的颗粒物总量的百分数称为除尘器全效率

$$\eta = \frac{G_3}{G_1} \times 100\% = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\%$$

• 用进出口除尘浓度表示，则：

$$\eta = \frac{L_1 y_1 - L_2 y_2}{L_1 y_1}$$

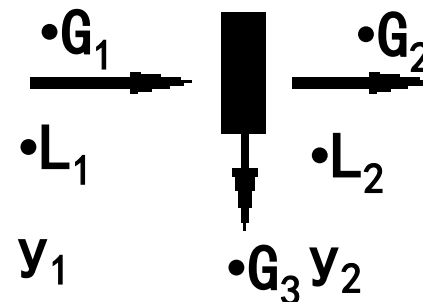


• § 4.2 除尘效率和除尘机理

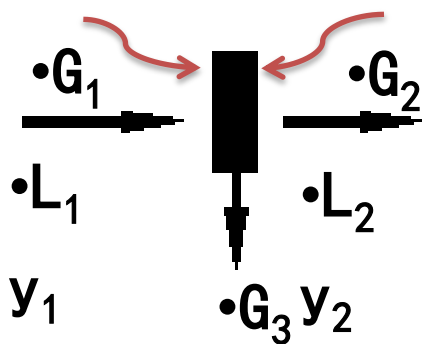
• (1) 全效率

• 如果除尘器没有漏风，则：

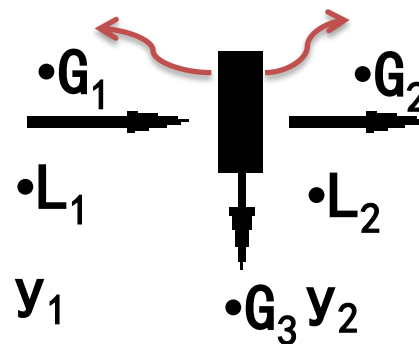
$$\eta = \frac{L_1 y_1 - L_2 y_2}{L_1 y_1} = \frac{y_1 - y_2}{y_1} = 1 - \frac{y_2}{y_1}$$



• 如果除尘器有漏风率？正压段？负压段？



• 负压段 $L_1 < L_2$



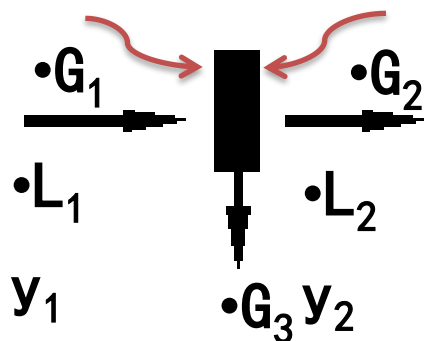
• 正压段 $L_1 > L_2$

• § 4.2 除尘效率和除尘机理

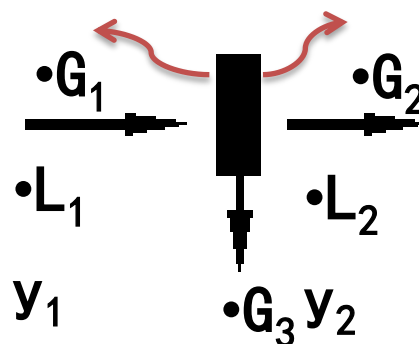
• 例题：

• 除尘器处于正压段，处理风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ， $y_1=3000\text{mg}/\text{m}^3$ ， $\eta=99.9\%$ ，漏风率为4%，

• 求 y_2 。



• 负压段 $L_1 < L_2$



• 正压段 $L_1 > L_2$

• 除尘器处理风量，即铭牌风量指除尘器出口的风量。

$$\bullet \eta = \frac{L_1 y_1 - L_2 y_2}{L_1 y_1}$$

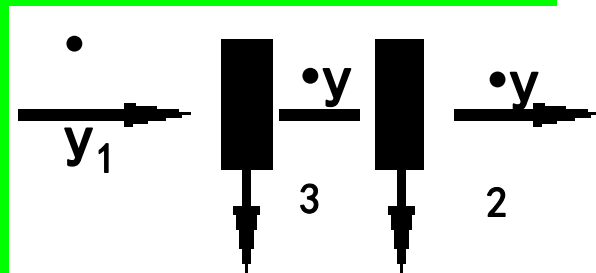
• (2) 串联运行时的总净化效率

• 当污染物浓度较高时，采用一个装置净化，排放浓度可能超过排放标准，或者虽能达到排放标准，因负荷过大容易引起装置性能不稳定等，应采用两级或多级净化装置串联使用。

• 设第一级净化装置的效率为 η_1 ，第二级为 η_2 ，则两级净化装置

• 串联运行的总效率为

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} = \frac{Y_1 - Y_3 - Y_2 + Y_3}{Y_1} \\&= \eta_1 + \frac{Y_3 - Y_2}{Y_1} = \eta_1 + \frac{(Y_3 - Y_2) \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_3} = \eta_1 + \frac{(Y_3 - Y_2) \cdot Y_3}{Y_1 \cdot Y_3} \\&= \eta_1 + \frac{(Y_3 - Y_2)}{Y_3} \cdot \frac{Y_3}{Y_1} = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1) \\&= 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)\end{aligned}$$



• 两个型号相同的除尘器串联运行时，它们的效率相同吗？

• (2) 串联运行时的总净化效率

• 同理，n级净化装置串联后的总效率为

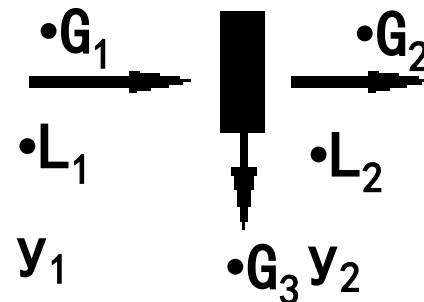
$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n)$$

• (3) 通过率（穿透率）

净化装置出口逸散的污染物量与入口污染物量之百分比。

P值越大，说明出口逸散量越大。

$$\eta = \frac{L_1 y_1 - L_2 y_2}{L_1 y_1} = \frac{y_1 - y_2}{y_1} = 1 - \frac{y_2}{y_1} = 1 -$$



例如：一除尘器的 $\eta = 99\%$ 时， $P = 1.0\%$ ；

另一除尘器 $\eta = 99.9\%$ 时， $P = 0.1\%$

则前一除尘器的通过率为后者的10倍。

• (3) 分级除尘效率

• 分级除尘效率（简称分级效率）是指除尘装置对某一粒径 d_c 或粒径范围 $d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c$ 内粉尘的除尘效率。

$$\eta_{(dc)} = \frac{\text{灰斗中 } d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c \text{ 范围尘粒的质量}}{\text{进入除尘器中 } d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c \text{ 范围尘粒的质量}} = \frac{G_3(d_c)}{G_1(d_c)}$$

$$\eta_{(dc)} = \frac{\text{灰斗中尘粒总质量} \times \text{灰斗中 } (d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c) \text{ 范围尘粒的质量百分数}}{\text{进入除尘器中尘粒总质量} \times \text{除尘器中 } (d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c) \text{ 范围尘粒的质量百分数}}$$

$$\boxed{\eta_{(dc)}} = \frac{G_3(d_c)}{G_1(d_c)} \times 100\% = \frac{G_3 f_3(d_c) \Delta d_c}{G_1 f_1(d_c) \Delta d_c} = \boxed{\eta \frac{f_3(d_c) \Delta d_c}{f_1(d_c) \Delta d_c}}$$

•1、总效率与分级效率之间的关系。

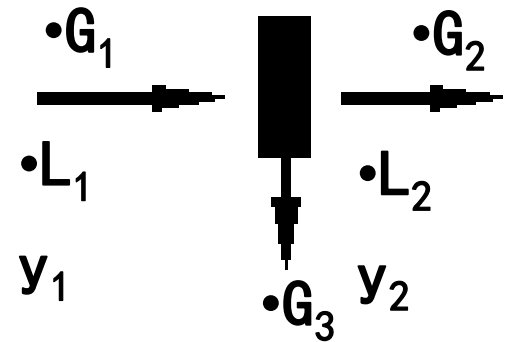
$$\boxed{\eta_{(dc)}} = \frac{G_3(d_c)}{G_1(d_c)} \times 100\% = \frac{G_3 f_3(d_c) \Delta d_c}{G_1 f_1(d_c) \Delta d_c} = \boxed{\eta \frac{f_3(d_c) \Delta d_c}{f_1(d_c) \Delta d_c}}$$

•常用于求灰斗中粒径分布

$$\boxed{\eta(d_c)} = \frac{G_3(d_c)}{G_1(d_c)} = \frac{1 - G_2(d_c)}{G_1(d_c)}$$

$$= 1 - \frac{G_2 \cdot f_2(d_c) \Delta d_c}{G_1 \cdot f_1(d_c) \Delta d_c}$$

$$= 1 - (1 - \eta) \frac{f_2(d_c) \Delta d_c}{f_1(d_c) \Delta d_c}$$



•常用于求出口粒径分布

•2、总效率与分级效率之间的关系。

$$\eta = \frac{\text{灰斗中尘粒的总质量 } G_3}{\text{进入除尘器中尘粒的总质量 } G_1}$$

灰斗中 $d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c$ 范围尘粒的质量 = $\eta_{(dc)}$ · 进入除尘器中 $d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c$ 范围尘粒的质量

•则 $G_3 = \int \text{灰斗中 } d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c \text{ 范围尘粒的质量}$

$$= \int \eta_{(dc)} \cdot \text{进入除尘器中 } d_c \pm \frac{1}{2} \Delta d_c \text{ 范围尘粒的质量}$$

$$\eta = \frac{G_3}{G_1} = \frac{\int_0^{\infty} \eta(d_c) \cdot G_1 \cdot f_1(d_c) \Delta d_c}{G_1} = \int_0^{\infty} \eta(d_c) \cdot f_1(d_c) \Delta d_c$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta(d_c) \cdot f_1(d_c) \Delta d_c$$

• 除尘器分级效率经验公式

$$\eta(d_p) = 1 - \exp[-\alpha d_p^m]$$

在研究除尘器性能时，将除尘器分级效率为 50% 时的粒径称为分割粒径或临界粒径。通常用 d_{c50} 表示。

$$0.5 = 1 - \exp[-\alpha d_{c50}^m]$$

$$0.5 = \exp[-\alpha d_{c50}^m]$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{d_{c50}^m} = \frac{0.693}{d_{c50}^m}$$

则得到分级效率与临界粒径的如下关系：

$$\eta(d_p) = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{d_p}{d_{c50}}\right)^m\right]$$

【例 4-1】 已知某除尘器的分级效率和进口处粉尘粒径分布如下：

粒径(μm)	0~5	5~10	10~20	20~40	>40
$f_i(d_c)\Delta d_c(\%)$	10	25	32	24	9
$\eta(d_c)(\%)$	64	86.4	92.8	97.4	99

【解】 计算该除尘器的全效率

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta(d_c) f_i(d_c) \Delta d_c = 0.1 \times 0.64 + 0.25 \times 0.864 + 0.32 \times 0.928 + 0.24 \times 0.974 + 0.09 \times 0.99 = 90\%$$

某除尘系统，用两个型号相同的旋风除尘器串联运行，已知除尘器进口处的初始含尘浓度 $y_1=0.5\text{g}/\text{m}^3$ ，进口处粉尘粒径分布和除尘器分级效率如下表所示：

粒径(μm)	0~5	5~10	10~20	20~40	>40
$f_i(d_c) \cdot \Delta d_c (\%)$	10	25	32	24	9
分级效率 (%)	64	86.4	92.8	97.4	99

计算该除尘器的排空浓度。

某除尘系统，用两个型号相同的高效长锥体旋风除尘器串联运行，已知除尘器进口处的初始含尘浓度 $y_1=0.5\text{g}/\text{m}^3$ ，进口处粉尘粒径分布和除尘器分级效率如下表所示：

粒径(μm)	0~5	5~10	10~20	20~40	>40
$f_1(d_c) \cdot \Delta d_c$ (%)	10	25	32	24	9
分级效率 (%)	64	86.4	92.8	97.4	99

计算该除尘器的排空浓度。

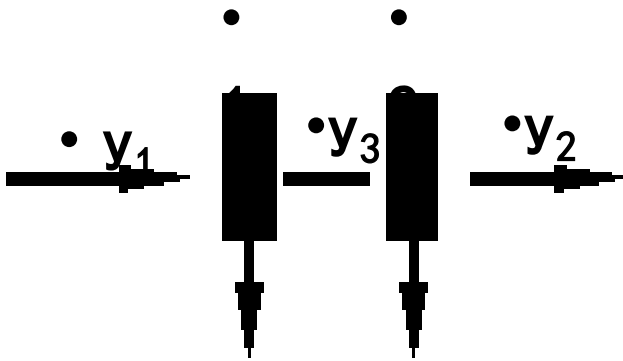
•解题关键点：

•1、 $\eta_1 = \sum_{i=1}^n \eta(d_c) \bullet f_1(d_c) \Delta d_c$

•2、 $\bullet \eta = 1 - \frac{y_2}{y_1} = 1 - (1 - \eta_1) (1 - \eta_2)$

•3、全效率不等，但分级效率相等。

•4、 $\eta(d_c) = 1 - (1 - \eta) \frac{f_2(d_c) \Delta d_c}{f_1(d_c) \Delta d_c}$



- 求出除尘器1的出口粒径分布，
- 也即除尘器2的进口粒径分布

•2 除尘机理和除尘器的分类

一、除尘机理

目前常用除尘器的除尘机理：

1. 重力

2. 离心力

3. 惯性相撞

4. 接触阻留

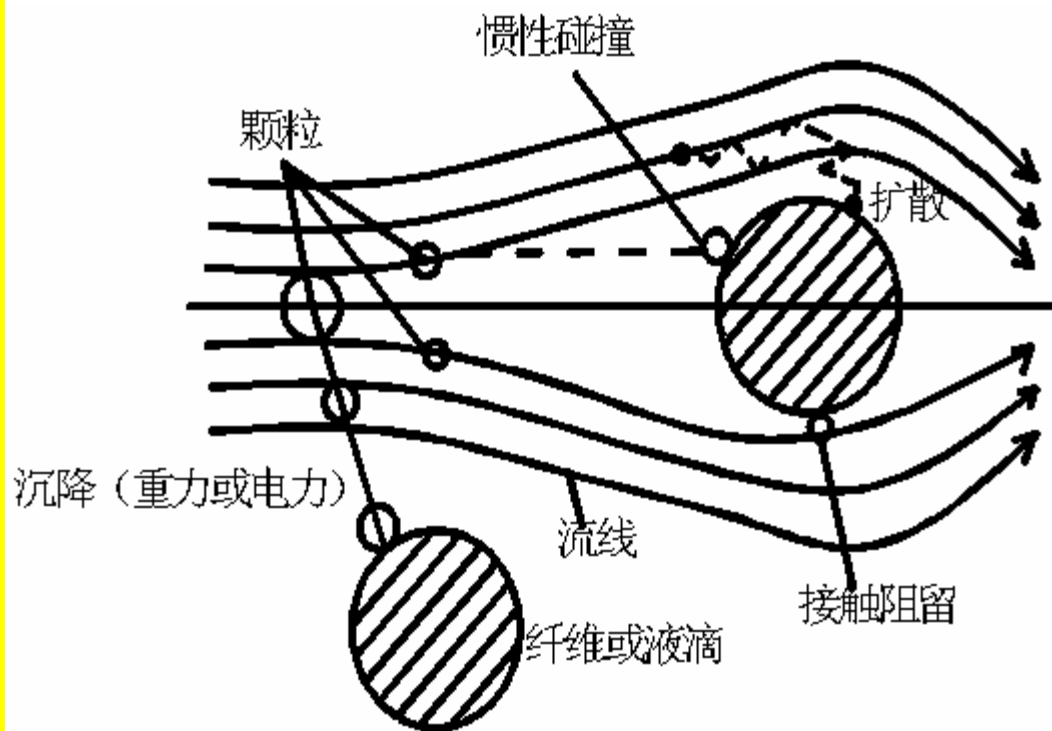
5. 扩散

6. 静电力

7. 凝聚

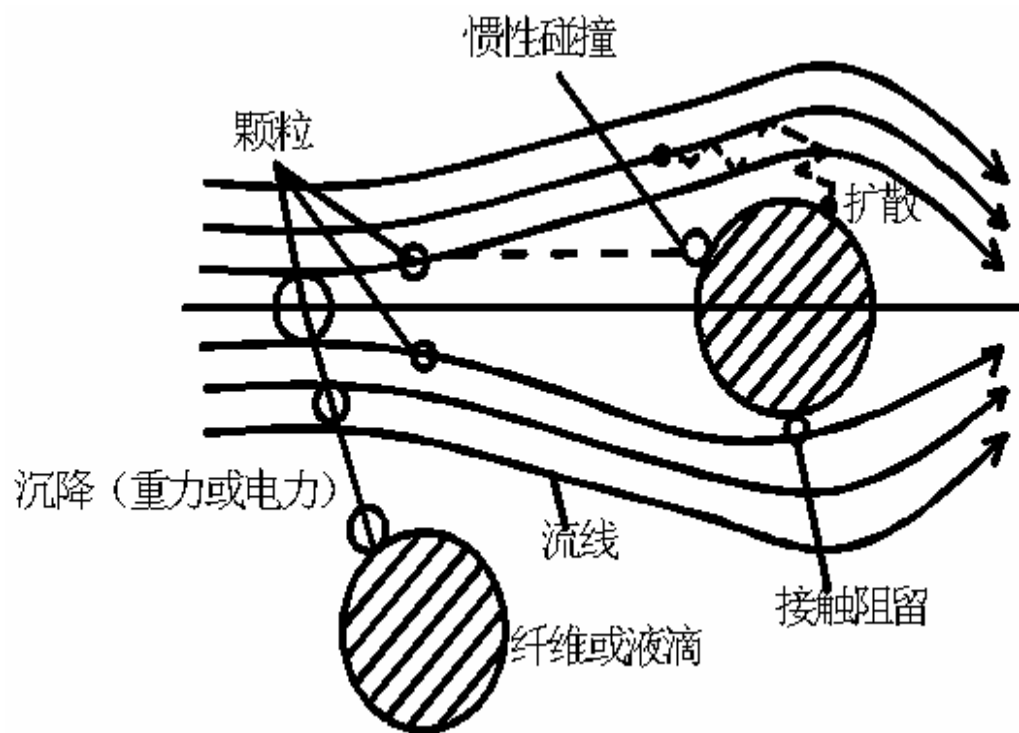
1.重力

气流中的尘粒可以依靠重力自然沉降，从气流中进行分离。由于尘粒的沉降速度一般较小，这个机理只适用于粗大的尘粒。

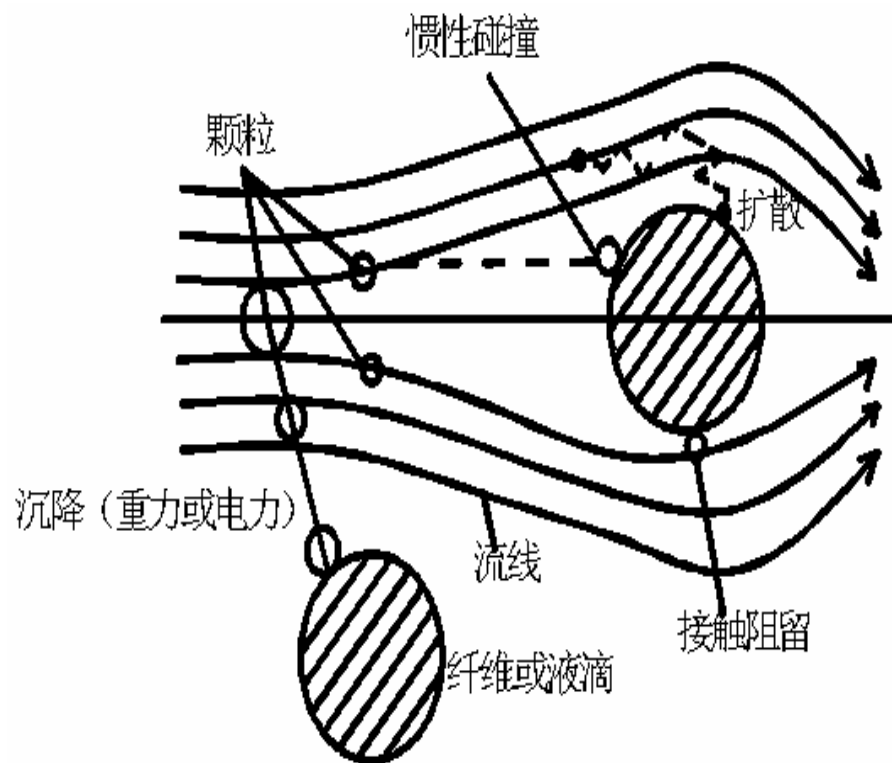


2.离心力

含尘气流作圆周运动时，由于惯性离心力的作用，尘粒和气流会产生相对运动，使尘粒从气流中分离。这个机理主要用于 $10\mu\text{m}$ 以上的尘粒。



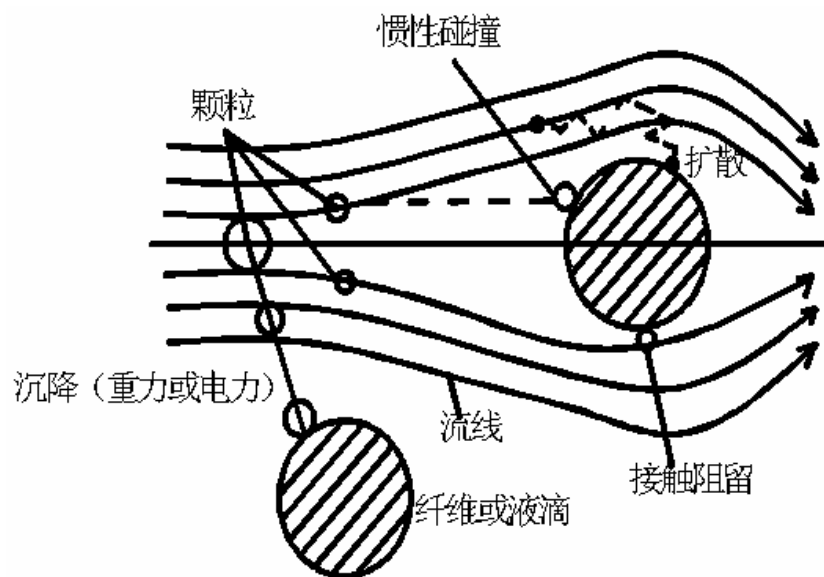
3.惯性相撞



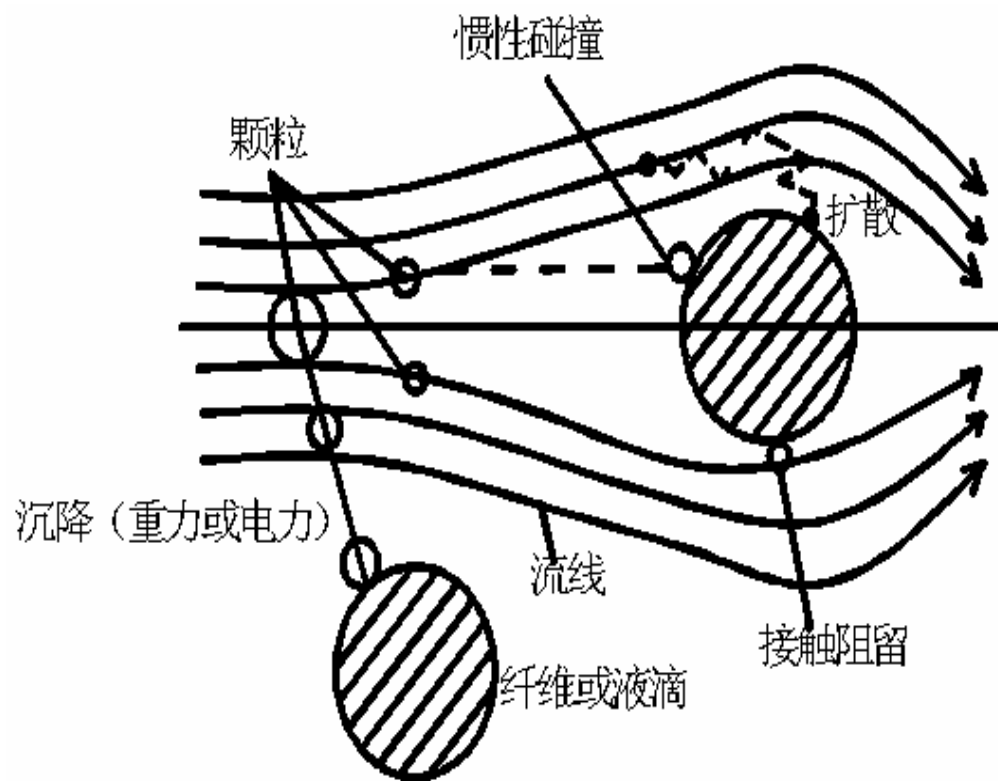
含尘气流在运动过程中遇到物体的阻挡（如挡板、纤维、水滴等）时，气流要改变方向进行绕流，细小的尘粒会随气流一起流动。粗大的尘粒具有较大的惯性，它会脱离流线，保持自身的惯性运动，这样尘粒就和物体发生了碰撞，惯性碰撞是过滤式除尘器、湿式除尘器和惯性除尘器的主要除尘机理。

4.接触阻留

细小的尘粒随气流一起绕流时，如果流线紧靠物体（纤维或液滴）表面，有些尘粒因与物体发生接触阻留。另外当尘粒尺寸大于纤维网眼而被阻留时，这种现象称为筛滤作用。粗孔或中孔的泡沫塑料过滤器主要依靠筛滤作用进行除尘。

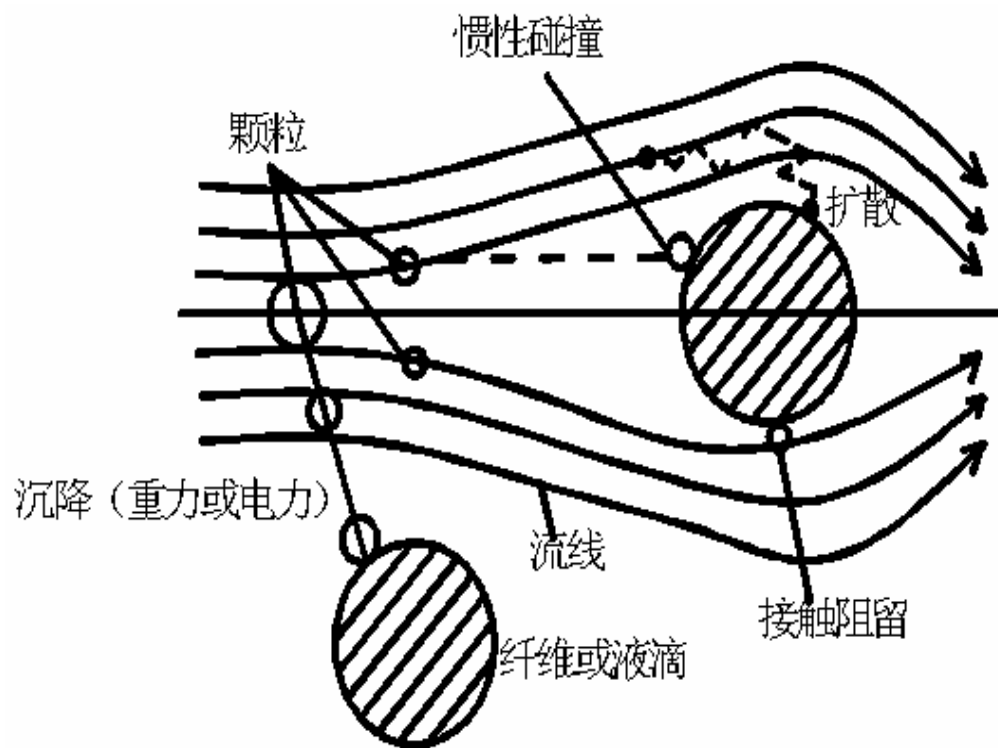


5.扩散



小于 $1\mu\text{m}$ 的微小粒子在气体分子撞击下，象气体分子一样作布朗运动。如果尘粒在运动过程中和物体表面接触，就会从气流中分离，这个机理称为扩散，对于 $d_p \leq 0.3\mu\text{m}$ 的尘粒，这是一个很重要的机理。

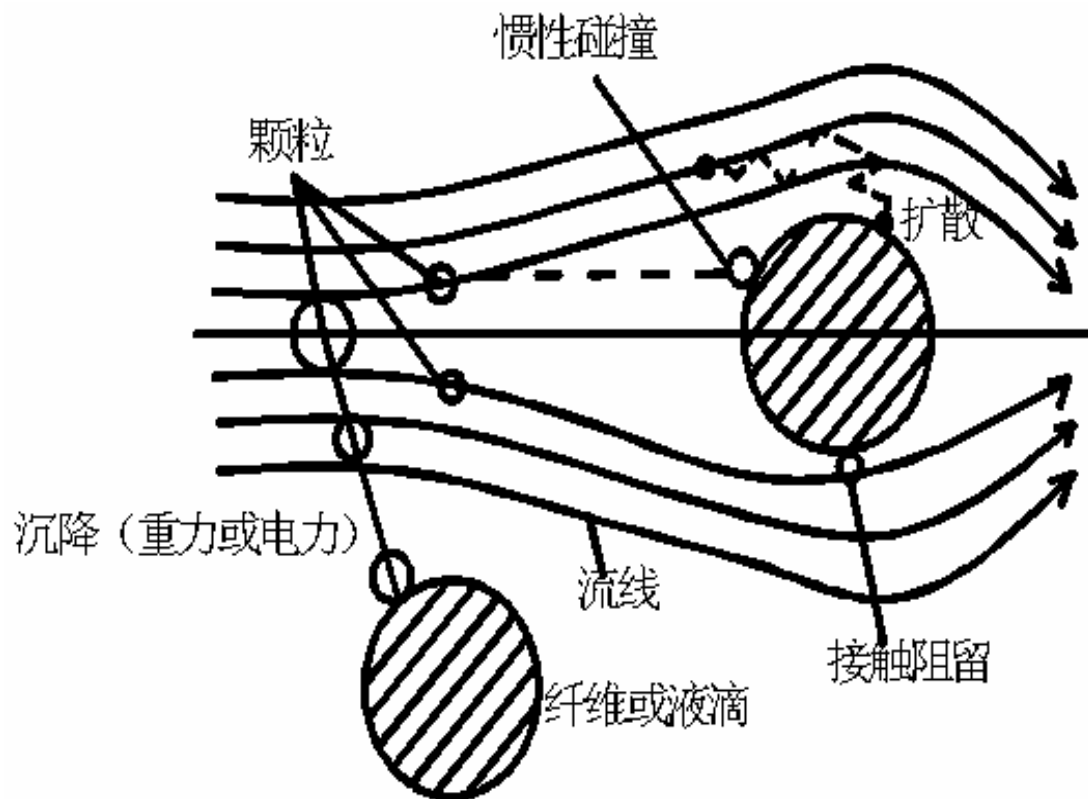
6.静电力



悬浮在气流中的尘粒，都带有一定的电荷，可以通过静电力使它从气流中分离。在自然状态下，尘粒的带电很小，要得到较好的除尘效果，必须设置专门的高压电场，使所有的尘粒都充分荷电。

7.凝聚

凝聚作用不是一种直接的除尘机理。通过超声波、蒸汽凝结、加湿等凝聚作用。可以使微小粒子凝聚增大，然后再用一般的除尘方法去除。



•各种过滤机理的效率

颗粒尺寸	直接拦截	惯性碰撞	扩散拦截
> 1	几乎100%	——	无
1至 0.5	较低效率	较高效率	无
0.5 至 0.3	很低效率	低效率	
0.3 至 0.1	微不足道	微不足道	略有效果
0.1 至0.05	微不足道	微不足道	高效率
< 0.05	微不足道	几乎无效	几乎无效

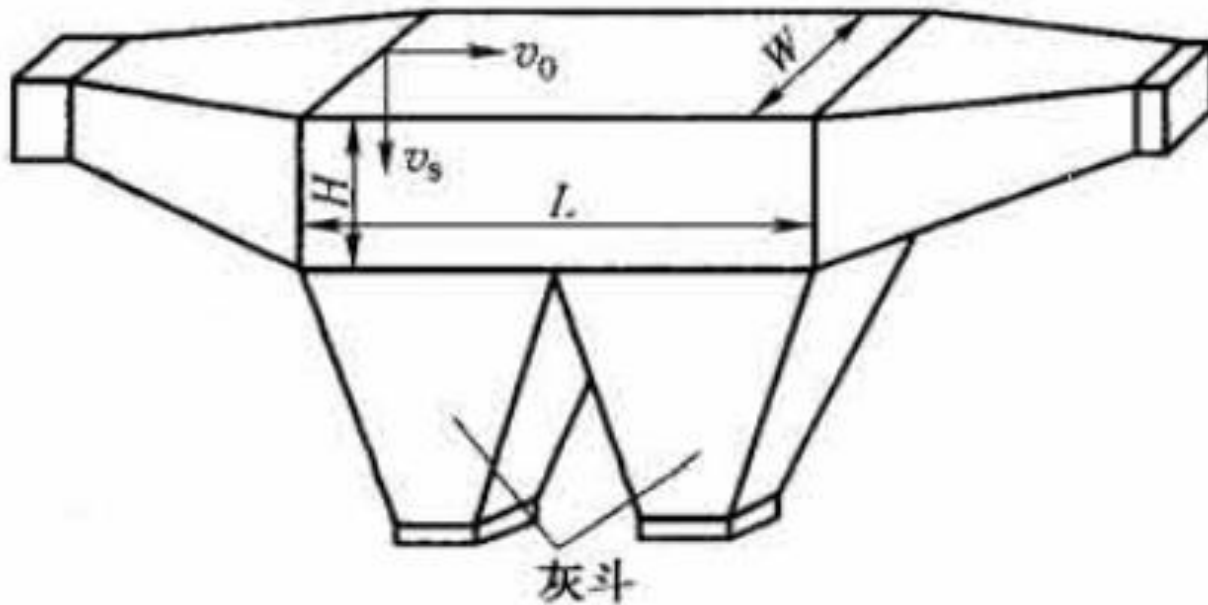
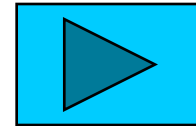
二、除尘器分类

根据主要除尘机理的不同，目前常用的除尘器：

1. **重力除尘**，如重力沉降室；
2. **惯性除尘**，如惯性除尘器；
3. **离心力除尘**，如旋风除尘器；
4. **过滤除尘**，如袋式除尘器、颗粒层除尘器、纤维过滤器、纸过滤器；
5. **洗涤除尘**，如自激式除尘器、卧式旋风水膜除尘器；
6. **静电除尘**，如电除尘器。

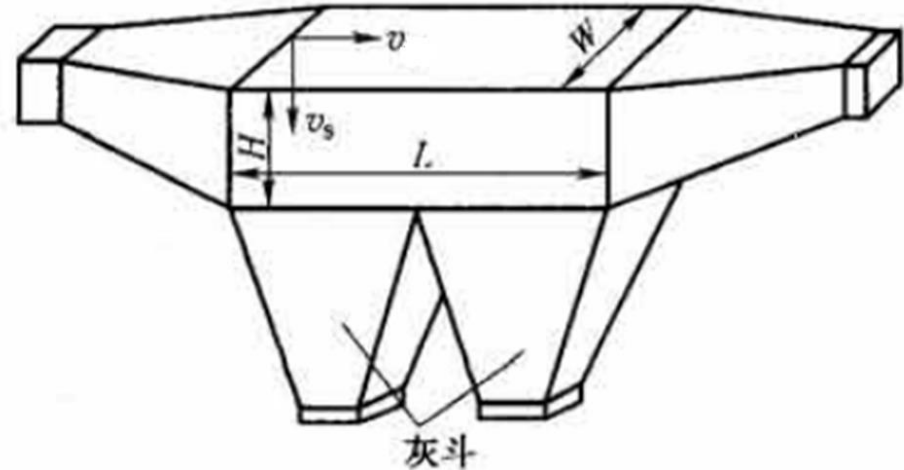
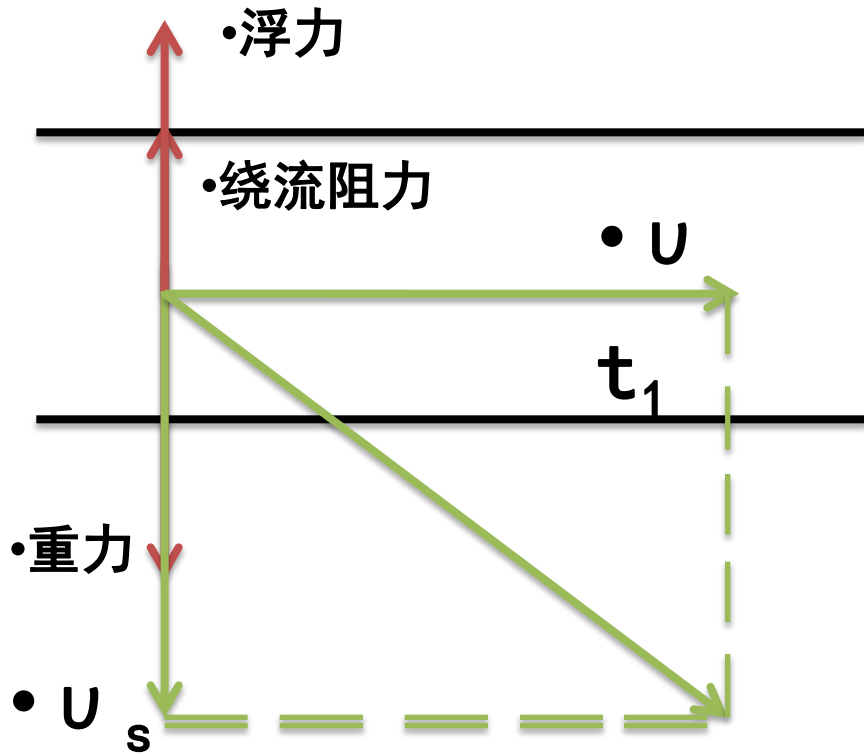
• § 4.3 重力沉降室、惯性除尘器

• 1. 重力沉降室



• **原理：**重力沉降室是一种最简单的除尘器，它是依靠**重力**的作用使尘粒从气流中分离出来的。沉降室是一个断面较大的空室，含尘气体由**断面较小的风管进入沉降室后**，**气流速度大大降低**，尘粒便在重力作用下缓慢向灰斗沉降。

4.3.1 重力沉降室



$$t_1 > t_2$$

t_2 气流在沉降室内停留时间 t_1 , 大于粉尘从除尘器顶部降落到底部所需时间为 t_2 。

$$t_1 = \frac{L}{v} \geq t_2 = \frac{H}{v_s}$$

二、重力沉降室的计算

$$t_1 = \frac{L}{v} \geq t_2 = \frac{H}{v_s} \Rightarrow \frac{L}{v} \geq \frac{H}{v_s}$$

•改善重力沉降室捕集效率的途径：

•1、增长沉降室长度；

•2、降低沉降室高度；

•3、降低沉降室内气流速度



宽一点。

•又长又宽又扁！

三、尘粒的沉降速度

根据流体力学，尘粒在静止空气中自由沉降时，由重力，浮力和绕流阻力平衡导出，粉尘沉降速度按下式计算：

$$v_s = \sqrt{\frac{4(\rho_c - \rho)gd_c}{3C_R\rho}}$$

式中： ρ_c — 尘粒密度； ρ — 空气密度；

g —重力加速度， m/s^2 ；

d_c —尘粒直径， m ； C_R —空气阻力系数

重力沉降室能100%捕集的最小粒径：

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\mu H v}{g\rho_0 l}}$$

悬浮速度和沉降速度两者的区别

悬浮速度

是指要使尘粒处于悬浮状态，具有的最小上升速度。

沉降速度

是指尘粒下落时所能达到的最大速度。

- 悬浮速度和沉降速度有时两者的数值相等，但意义不同。
- 悬浮速度用于除尘器管道的设计。

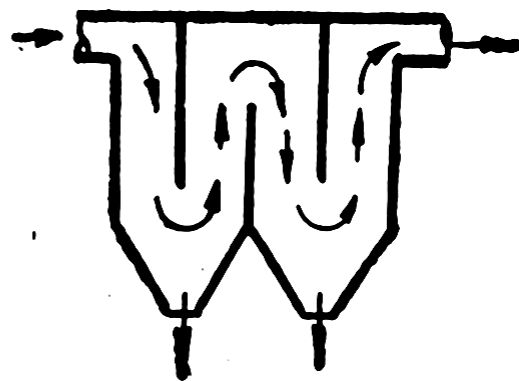
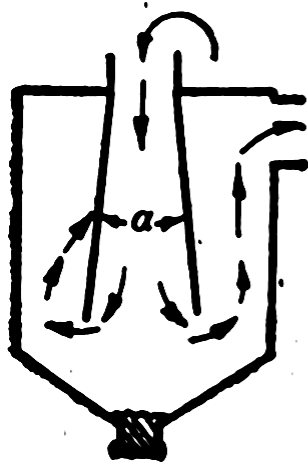
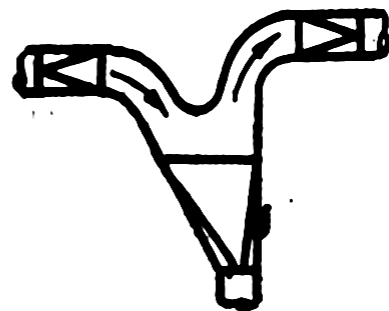
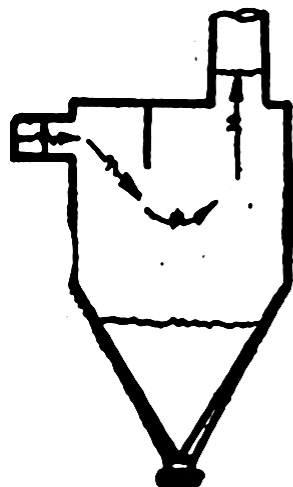
• § 4.3 重力沉降室、惯性除尘器

• 1. 重力沉降室

- **优点：**结构简单、造价低、施工容易、维护管理方便、阻力小
- **缺点：**占地大，除尘效率低， 40%~70%。
- **应用：**仅适用于捕集密度大，颗粒粗（粒径大于 $50\mu\text{m}$ ）的粉尘。
- 只作为初级除尘。

惯性除尘器

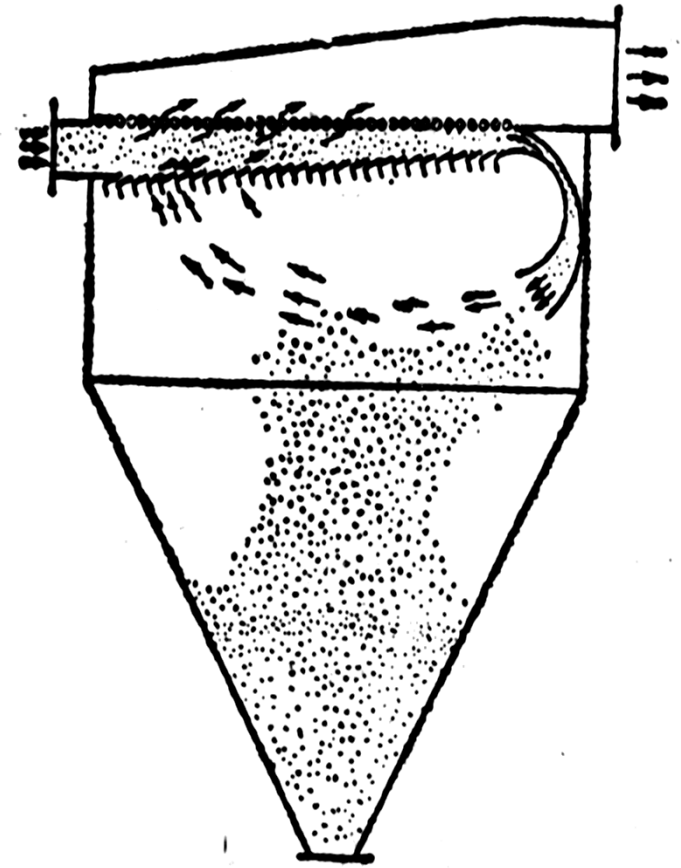
为了改善重力沉降室的除尘效果，可在其中设置各种形式挡板，利用尘粒的惯性使其和挡板发生碰撞而捕集。这种除尘器称为**惯性除尘器**。惯性除尘器的结构形式分为**碰撞式**和**回转式**两类，见右图气流在撞击或方向转变前速度愈高，方向转变的曲率半径愈小，则除尘效率愈高。



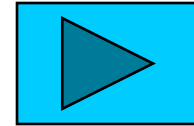
百叶窗式分离器

百叶窗式分离器也是一种惯性除尘器。含尘气流进入锥形的百叶窗式分离器后，大部分气体从栅条之间缝隙流出。气流绕过栅条时突然改变方向，尘粒由于自身的惯性继续保持直线运动，随部分气流（约5~20%）一起进入下部灰斗，在重力和惯性力作用下，尘粒在灰斗中分离。

惯性除尘器主要用于捕集 $20\sim 30\mu\text{m}$ 以上的粗大尘粒，常用作多给除尘中的第一级除尘。



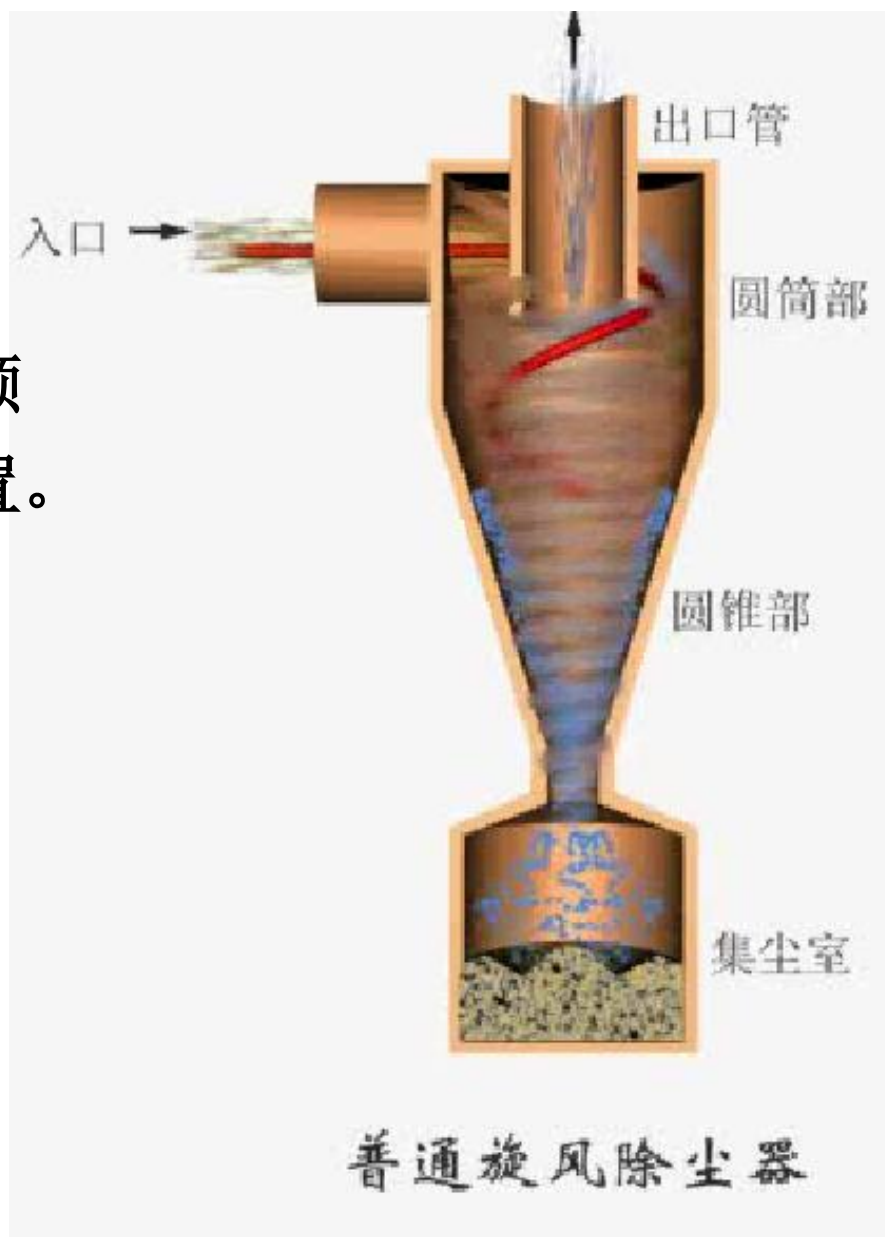
4.4 旋风除尘器



4.4 旋风除尘器

旋风除尘器是利用**离心力**将颗粒从气流中分离并捕集下来的装置。

1、气流中的**尘粒**在离心力作用下向外壁移动，到达壁面，并在气流和重力作用下沿壁落入灰斗而达到分离的目的。



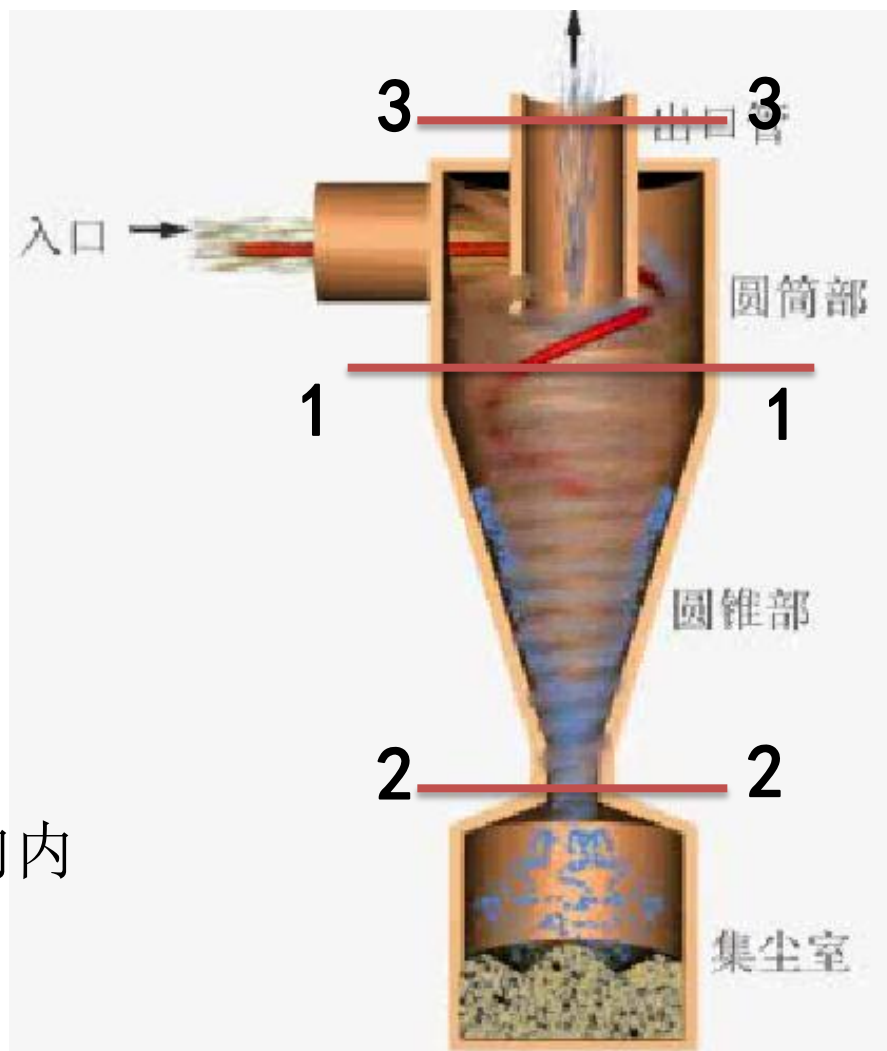
4.4 旋风除尘器

2、气流沿外壁由上而下作**螺旋形旋转**运动，这股向下旋转的气流称为**外涡旋**。外涡旋到达锥体底部后，转而向上，沿轴心向上旋转。这个向上旋转的气流叫**内涡旋**

外涡旋：旋转，一边向下一边向内

内涡旋：旋转，向上，

两者的旋转方向是相同的。



普通旋风除尘器

一、旋风除尘器内的流场（实测）

切向：沿圆周方向的切向运动

外涡旋： v_t 随半径的减小而增大的；

内涡旋： v_t 随半径的减小而减小。

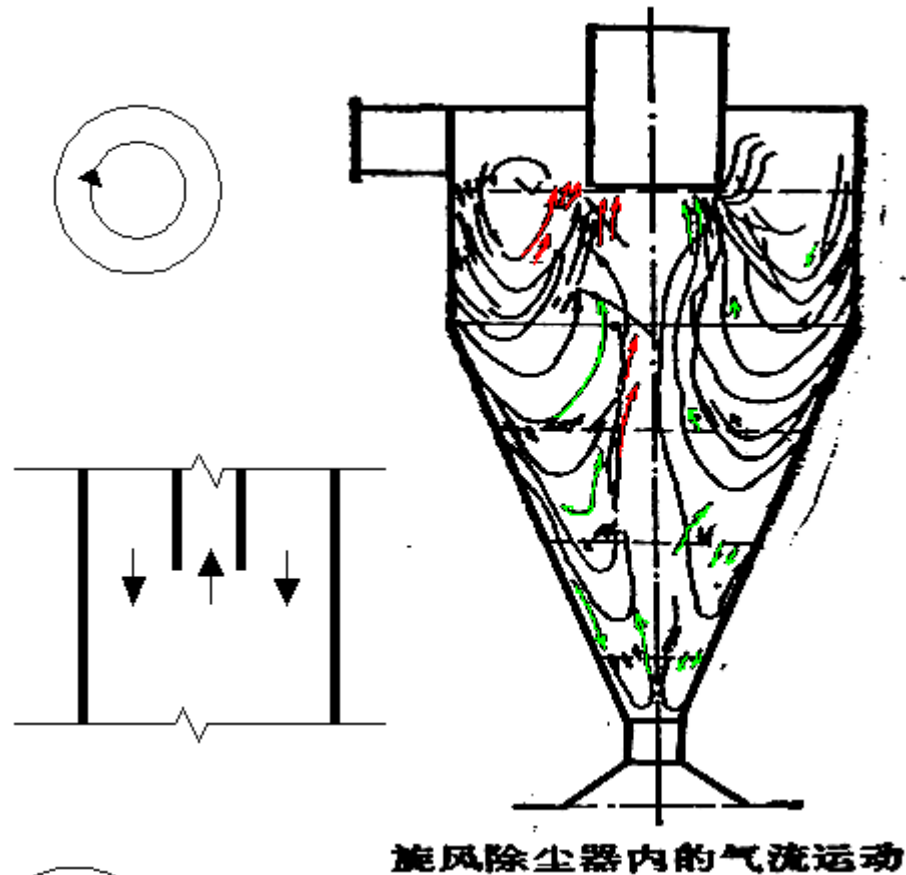
轴向：沿高度方向的轴向运动

外涡旋：轴向速度向下；

内涡旋：轴向速度向上，不断变大，
排气管底部达最大。

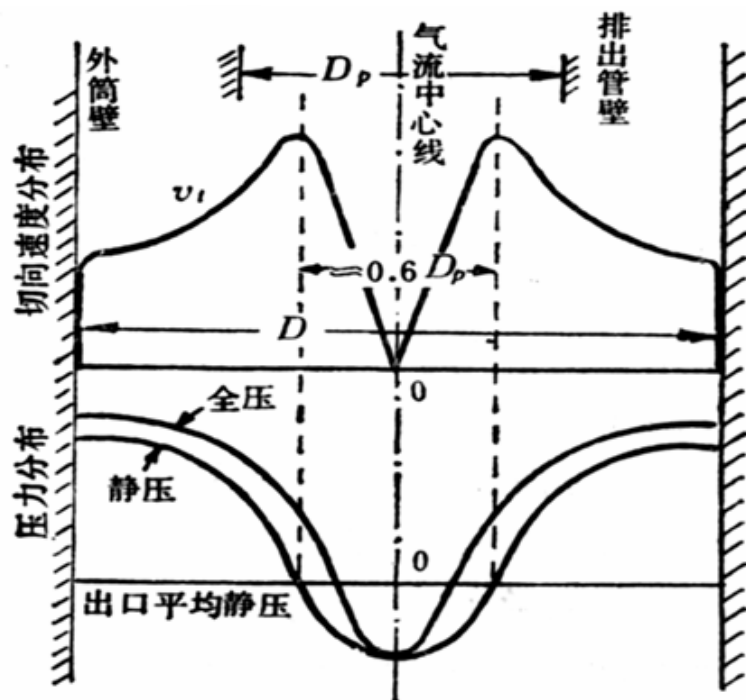
径向：沿径向的向心运动。

使尘粒做向心的径向运动，推入内涡旋。



一、旋风除尘器内的流场（实测）

某一截面上的切向速度和压力分布



1、轴向各断面上的速度分布差别较小，因此轴向压力的变化较小；

2、切向速度在径向有很大变化，径向的压力变化很大。

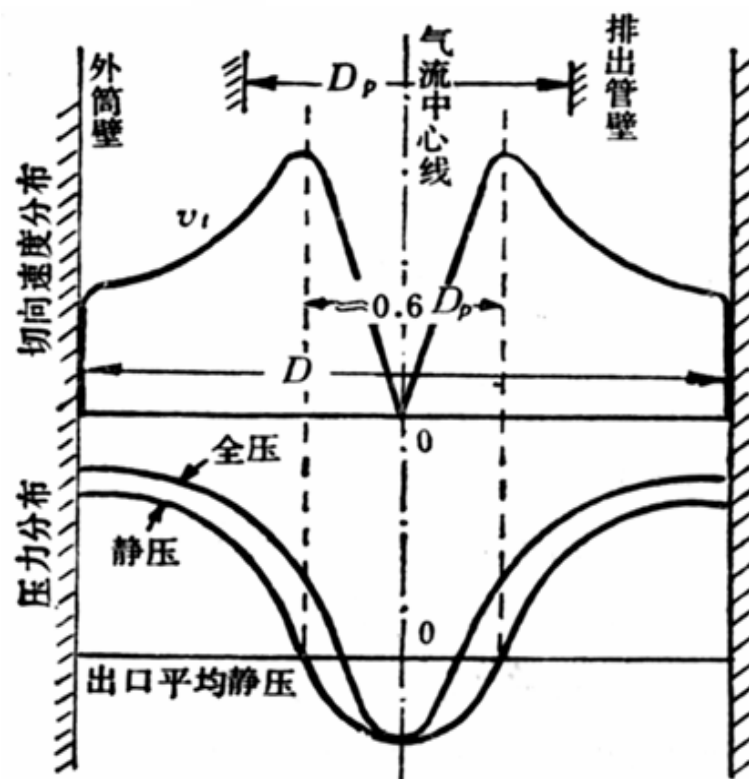
3、在外壁附近静压最高，轴心处静压最低。实验研究表明，即使在正压下运行的旋风除尘器轴心处，也保持负压，这种负压能一直延伸到灰。

二、压力分布

压力分布是沿外壁向中心逐渐减小的，在轴心处为负压，负压一直延伸到底部。

据测定，旋风除尘器当进口处静压为-900Pa时，除尘器下部静压为-300Pa。

如果除尘器下部不保持严密，会有空气渗入，把已分离的颗粒物重新卷入内涡旋。



注意：旋风除尘器底部要保持严密。

三、旋风除尘器分级效率的分割粒径

外涡旋的颗粒物在径向上受到：

•惯性力 $F_1 = \frac{\pi}{6} d_c^3 \rho_c v_t^2 / r$

•向心力 $P = 3\pi\mu\omega d_c$

$F_1 > P$ 惯性离心力推动下尘粒移向外壁；

$F_1 < P$ 向心气流推动尘粒进入内涡旋；

$F_1 = P$ 在内外涡旋交界面上不停旋转，50%可能被捕集，50%可能进入内涡旋。

三、旋风除尘器分级效率的分割粒径

$$F_1 = \frac{\pi}{6} d_c^3 \rho_c v_t^2 / r \quad P = 3\pi\mu\omega d_c$$

当 $F_1=P$ 时颗粒物粒径，称为旋风除尘器的分割粒径

d_{c50} 。

$$d_c = \left[\frac{18\mu\omega_0 r_0}{\rho_c v_{0t}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

分割粒径是反映除尘器除尘性能的重要指标。

当 d_{c50} 越小时，说明除尘效果越好。

四、旋风除尘器的计算

1、旋风除尘器的分级效率

$$\eta_d = 1 - \exp\left[-0.163\left(\frac{d_p}{d_{c50}}\right)\right]$$

2、旋风除尘器的阻力

$$\Delta P = \xi \frac{\rho u^2}{2} (Pa)$$

五、影响旋风除尘器性能的因素

$$d_{c50} = \left[\frac{18\mu\omega_0 r_0}{\rho_c v_{0t}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

1、进口风速 u

$$u \uparrow \left\{ \begin{array}{l} v_{ot} \uparrow \rightarrow d_{c50} \downarrow \rightarrow \eta \uparrow \\ \Delta P \propto u^2 \rightarrow \Delta P \end{array} \right.$$

- 旋风除尘器内气流的切向速度随进口风速的增加而增大，但有一定的限度。
- 增加进口风速，能使粉尘受到的离心力增大，提高了除尘效率，同时也增加了处理风量和阻力，耗电量增大，所以，进口风速也不能太大。12 - 25m/s

五、影响旋风除尘器性能的因素

2、筒体直径 D 和排出管直径 D_p

$$D \downarrow \rightarrow F_1 \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$$

在相同的进风速度下，筒体直径越小，尘粒受到的离心力越大，除尘效率越高，但处理风量越小，而且，筒径过小将引起粉尘堵塞，应不小于150mm，且为了保证除尘效率不太低，筒径一般不大于1000mm。

减少排出管直径可以减少内旋涡的范围，有利于提高除尘效率，但不能过小，以免阻力增大，一般取
(0.5~0.6) D

五、影响旋风除尘器性能的因素

3、锥体和筒体高度

理论上，增加高度，能提高效率，但实际中不应过高。
筒体和锥体的总高度以不大于筒体直径的5倍为宜。

4、除尘器底部的严密性

即使旋风除尘器在正压下运行，锥体底部也会处于负压状态。如果除尘器下部不严密，渗入外部空气，也会把正在落入灰斗的颗粒物重新带走，使除尘效率显著下降。

旋风除尘器结构尺寸对性能的影响

增加	阻力	效率	造价
除尘器直径	降低	降低	增加
进口面积(风量不变)	降低	降低	----
进口面积(风速不变)	增加	增加	----
圆筒长度	略降	增加	增加
圆锥长度	略降	增加	增加
排气管插入长度	增加	增加或减少	增加
排气管直径	降低	降低	增加

六、优缺点

- **优点：**旋风除尘器结构简单、占地面积小、投资低、操作维修方便、压力损失中等、动力消耗不大、能用于高温、高压及有腐蚀性气体,并可直接回收干颗粒物等优点。

- **缺点：**旋风除尘器一般用来捕集 $5\sim 15\mu\text{m}$ 以上的颗粒物,除尘效率可达80 % ,其主要缺点是对捕集 $< 5\mu\text{m}$ 颗粒的效率不高。

七、旋风除尘器的其它结构形式

(一) 多管除尘器

(二) 旁路式旋风式除尘器

(三) 锥体弯曲的水平旋风除尘器



八、旋风除尘器的排灰装置

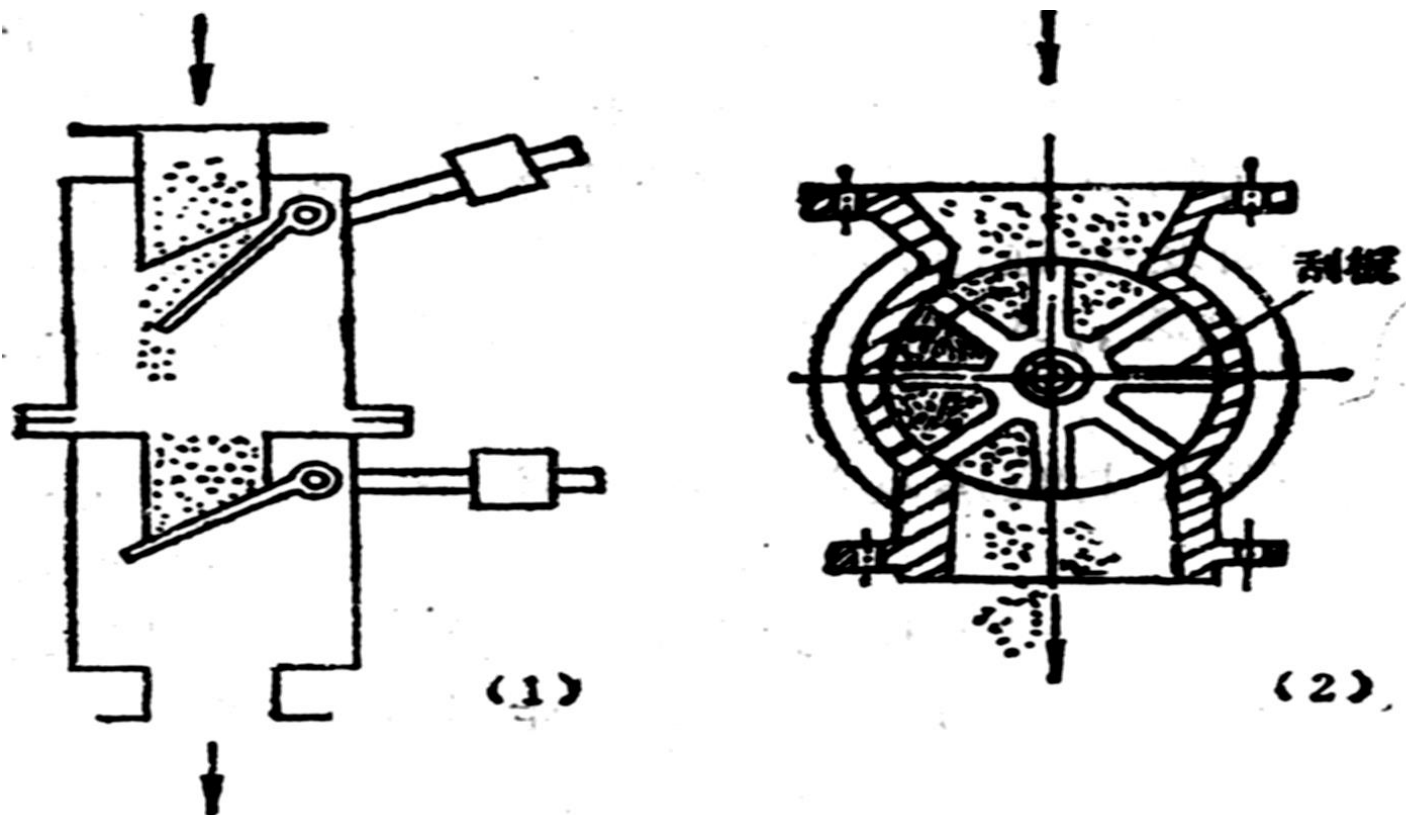
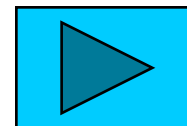
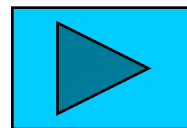


图 4-21 锁气器
(1)双翻板式; (2)回转式

第四节

袋式除尘器

一、工作原理



利用含尘气流通过滤料时将颗粒物分离捕集的装置。

利用纤维织物的过滤作用将含尘气体中的粉尘阻留在滤袋上，这种作用是由**几种除尘机理的综合作用**实现的。

1. **惯性碰撞**：含尘气体流过滤料时，尘粒在惯性力作用下与滤料碰撞而被捕集。

2. **接触阻留**：含尘气体接近滤袋纤维时，如果靠近纤维的尘粒部分突入纤维边缘，尘粒就会被纤维边缘钩住。

3. **扩散**：细微粉尘由于布朗运动与滤料接触而被捕集。

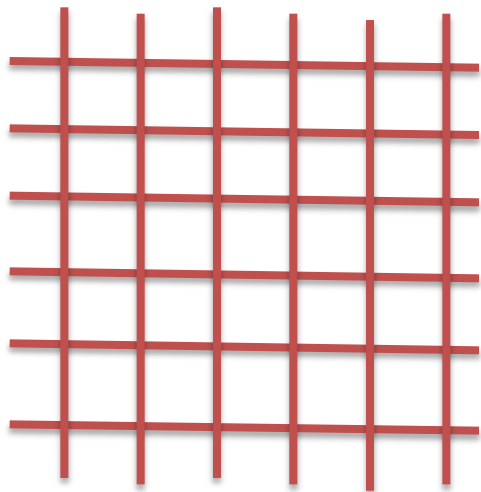
通风除尘系统中，应用最多的是以纤维织物为滤料的袋式除尘器。

一种干法高效除尘器，便于回收
适用于各类粉尘，微细粉尘效率达98%以上
除尘效率高、结构简单、处理风量范围广
广泛应用于工业排气净化及进气净化。

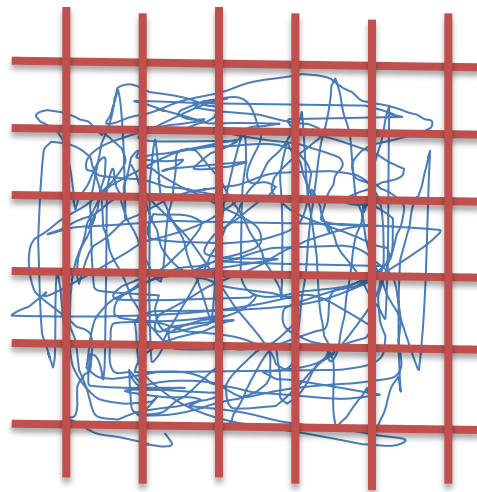
不足：

阻力大；设备庞大，滤袋易破损。

二、袋式除尘器的除尘机理



清洁滤料 $1\mu\text{m}$ 40%



滤料+粉尘层 80%以上

- 1、含尘气体通过滤料时，随着颗粒物被阻留在滤料表面形成颗粒物层（称为初层）。
- 2、随着它们深入滤料内部，使纤维空间逐渐减小，最终形成附着在滤料上的粉尘层。99%以上。

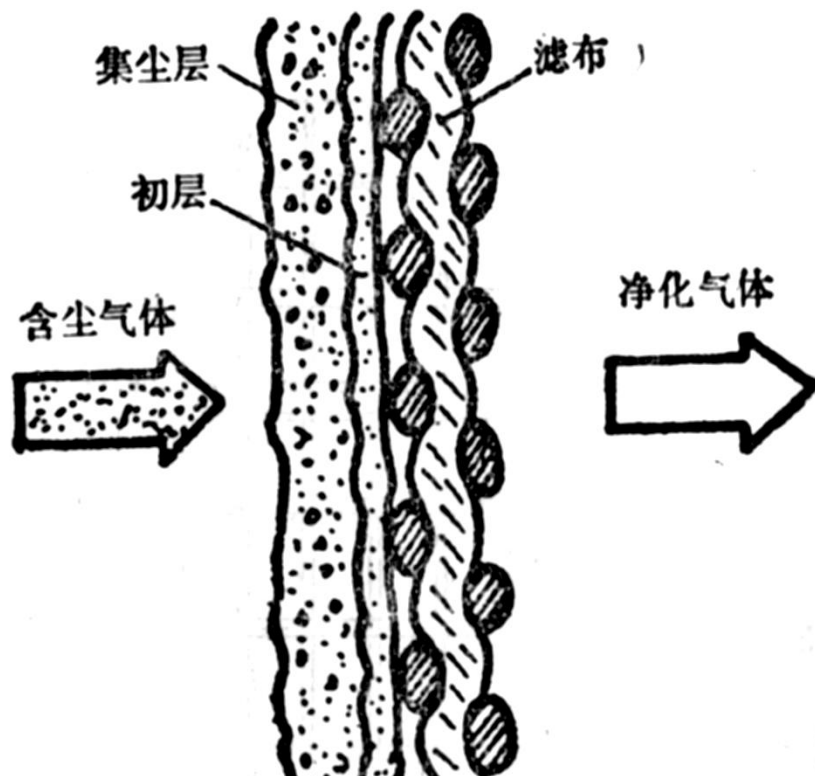
二、袋式除尘器的除尘机理

滤料的作用？

袋式除尘器起主要的过滤作用的是什么？

3、袋式除尘器的过滤作用主要是依靠这个初层及以后逐渐堆积起来的粉尘层进行的。

这时的滤料只是起着形成初层和支持它的骨架作用。



二、袋式除尘器的除尘机理

3、随着粉尘在滤袋上的积聚，滤袋两侧的压差增大，内部的空隙变小。

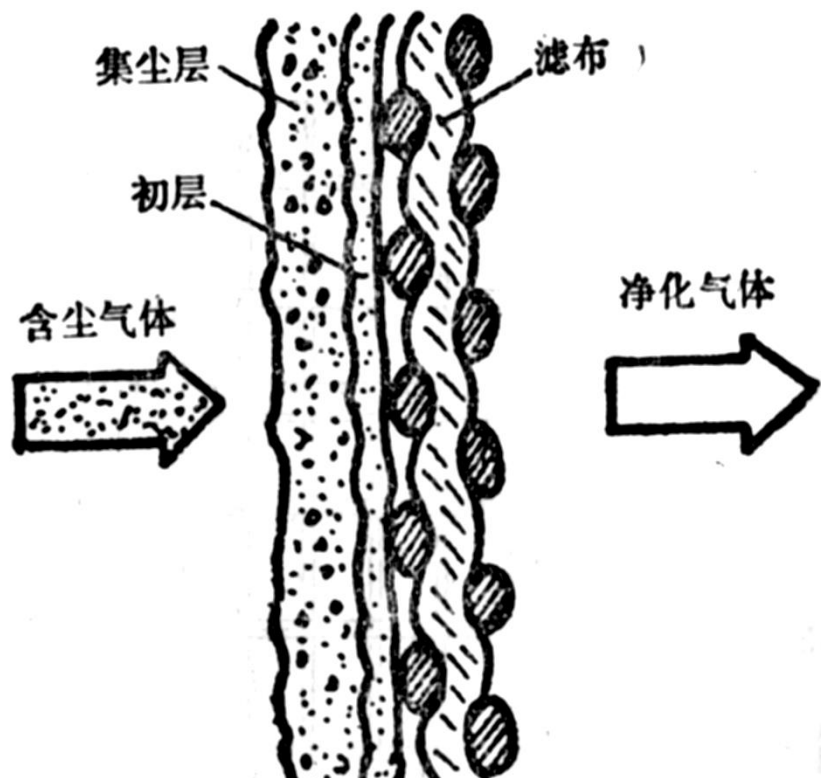
流速 $\uparrow$ $\rightarrow$ 缝隙间的尘粒带走 $\rightarrow \eta \downarrow$

阻力 $\rightarrow$ 滤袋易于损坏

透气性差，通风系统风量 $\downarrow$

因此

除尘器运行一段时间后，要及时进行清灰，清灰时不能破坏初层，以免效率下降。



滤料在不同状况下的分级效率

1、洁净滤料的除尘效率最低

2、积尘后最高，清灰后有所下降。

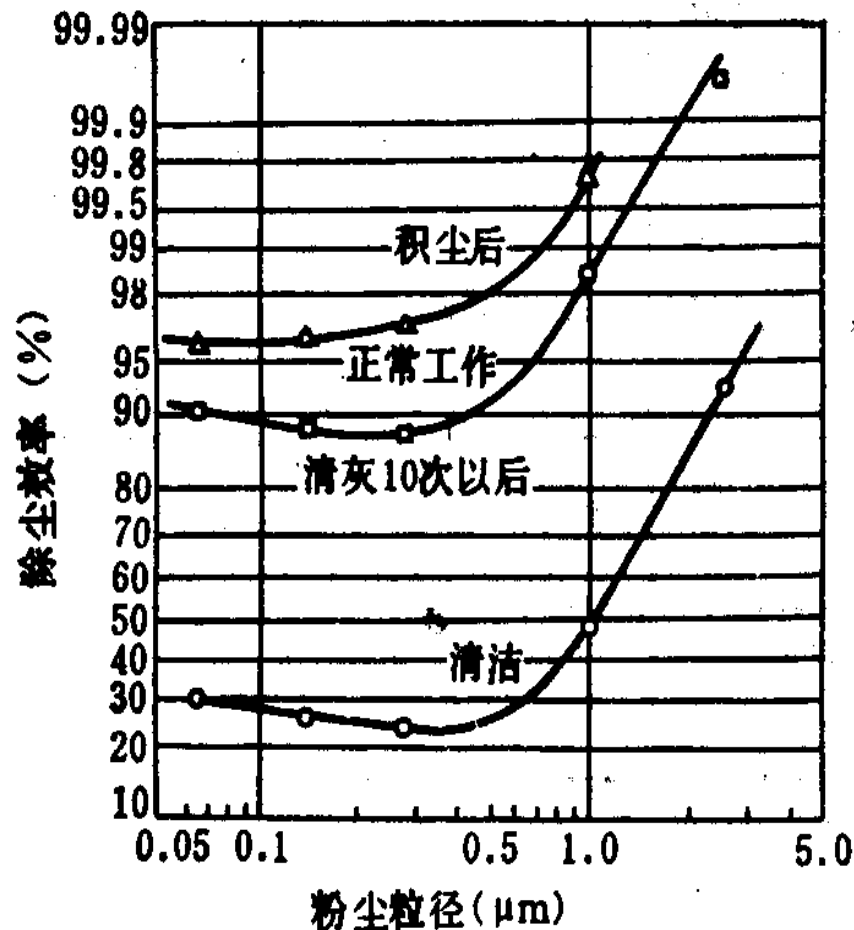


图 4-21 某袋式除尘器分级效率曲线

袋式除尘器的除尘效率与

滤料表面的粉尘层有关，

滤料表面的粉尘初层比滤料起着更重要的捕集作用。

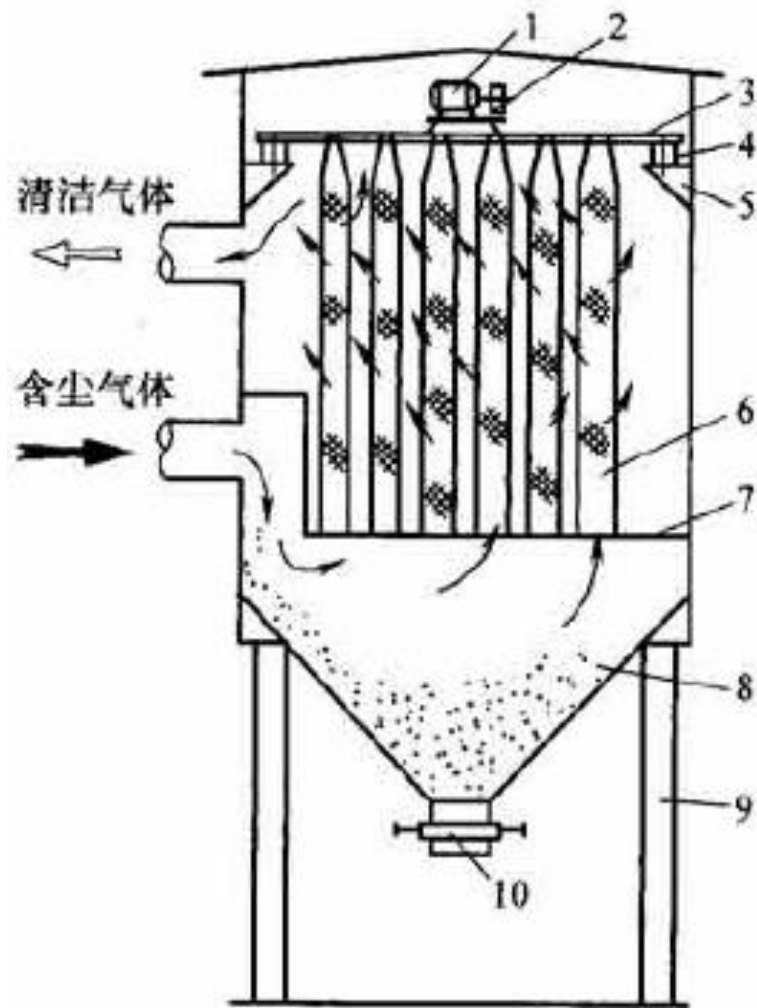
三、袋式除尘器的阻力

袋式除尘器的阻力(ΔP):

- 1、除尘器的结构阻力(ΔP_c)
- 2、滤料阻力(ΔP_f)
- 3、粉尘层阻力(ΔP_d)

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_f + \Delta P_d$$

滤袋阻力



三、袋式除尘器的阻力

- 1、滤袋阻力由滤料阻力和粉尘层阻力构成；
- 2、滤袋阻力（压力损失）呈周期性变化；

清洁时，随着初层的形成，粉尘层阻力逐渐增大；

当阻力达到允许之时，开始清灰；

清灰时，保留一定的颗粒物初层称为残留阻力

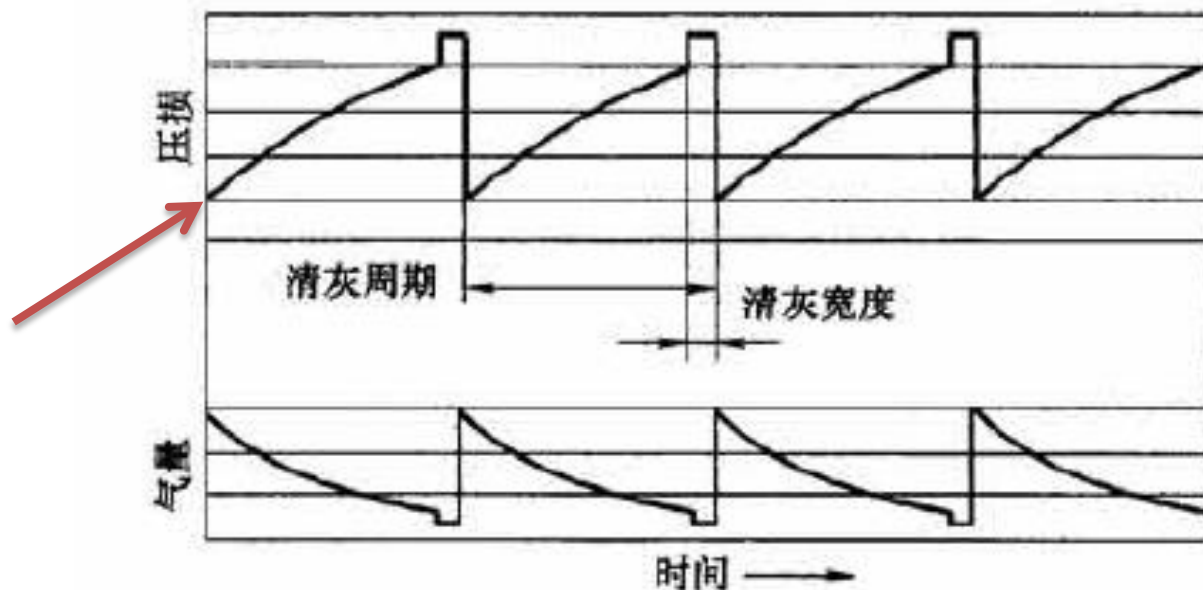
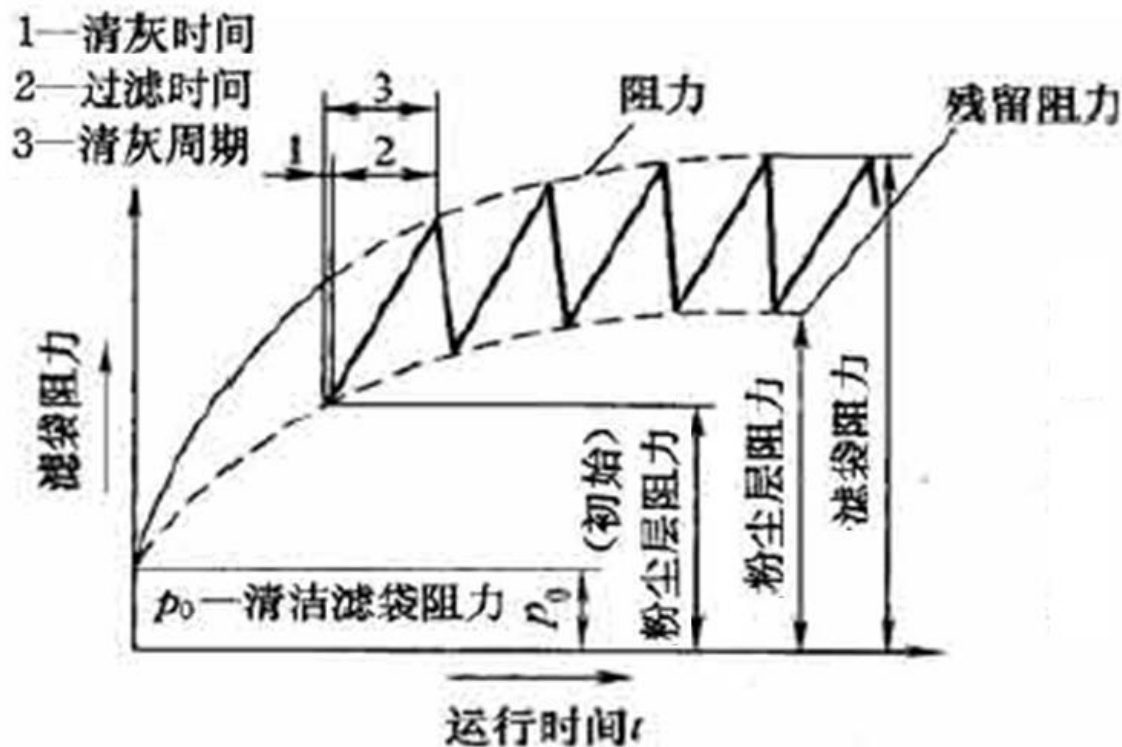


图 4-22 袋式除尘器内滤袋的阻力变化

三、袋式除尘器的阻力

3、实际上残留阻力是逐渐增加（由于颗粒物进入到滤料内部，清灰也不能达到效果）。



4、一般为1000~2000Pa；>2000Pa换袋；

过滤时，按控制阻力值，超过控制阻力（压差自动控制）即清灰。

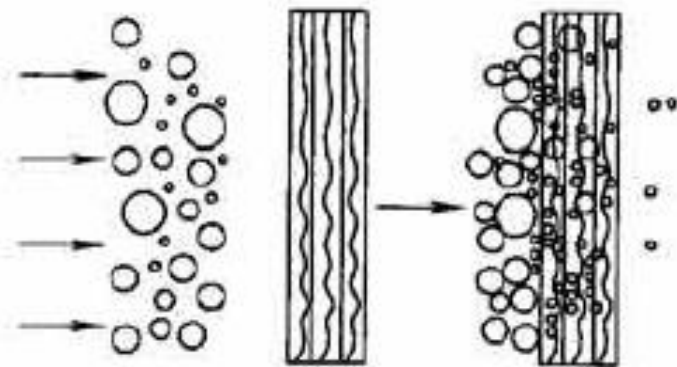
四、滤料

常用滤料：

1. 毛织滤布
2. 尼龙
3. 涤纶绒布
4. 高温尼龙
5. 玻璃纤维

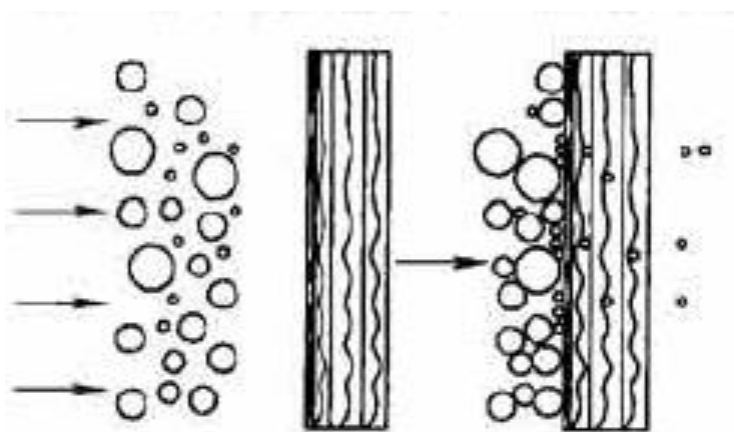


目前常用的 复合纤维滤料:



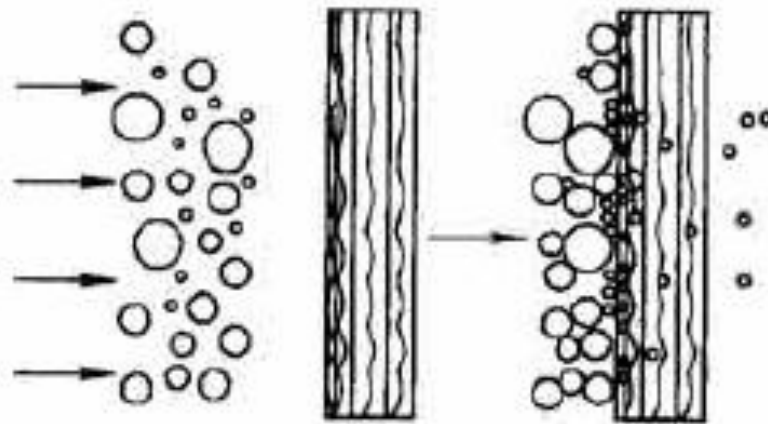
缺点:
易穿透
不易清灰

传统滤料: 表面过滤+深层过滤



PTFE 薄膜表面过滤:

覆膜滤料 接近零排放



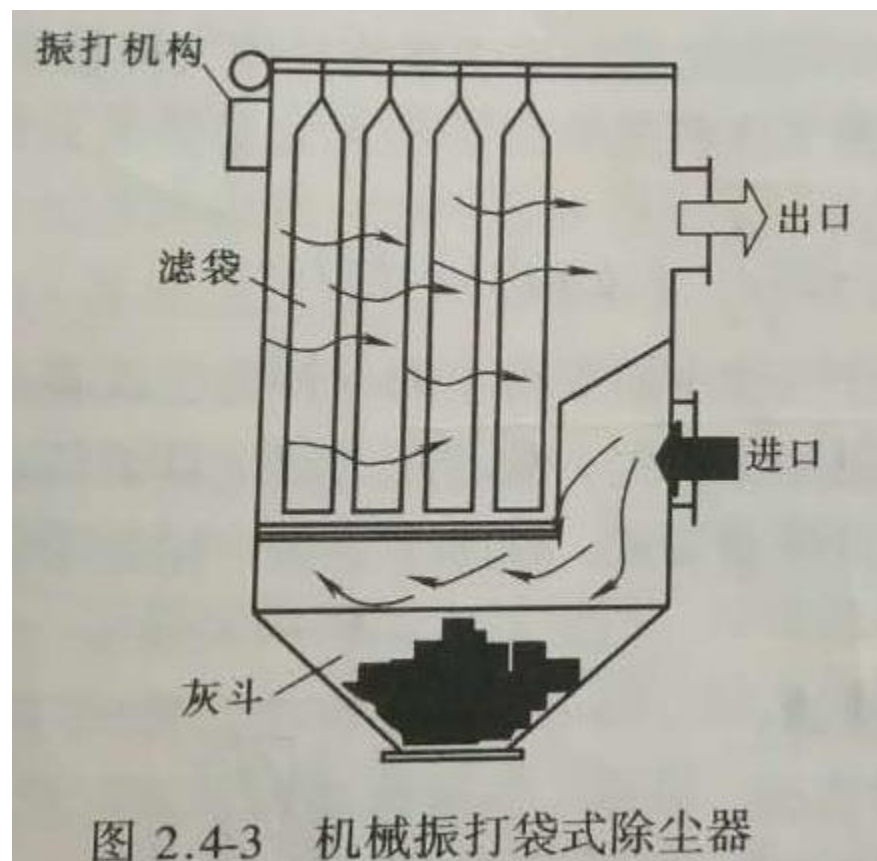
超细纤维表层过滤

梯度纤维滤料: 前小后大过滤通道

五、袋式除尘器的结构

(一) 按清灰方式

- 1.机械振打清灰
- 2.回转式逆气流反吹
- 3.脉冲喷吹清灰



•1) 机械清灰

◆ 人工振打

◆ 机械振打

a. 垂直方向振打

b. 腰部水平振打

c. 高频振荡

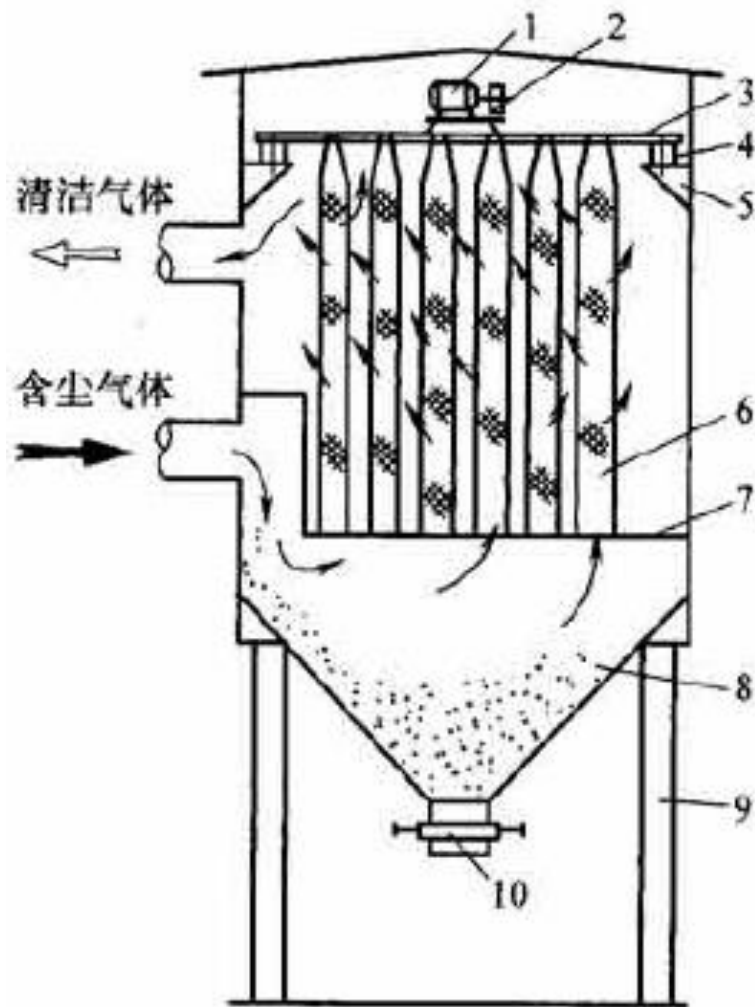
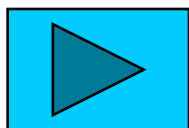
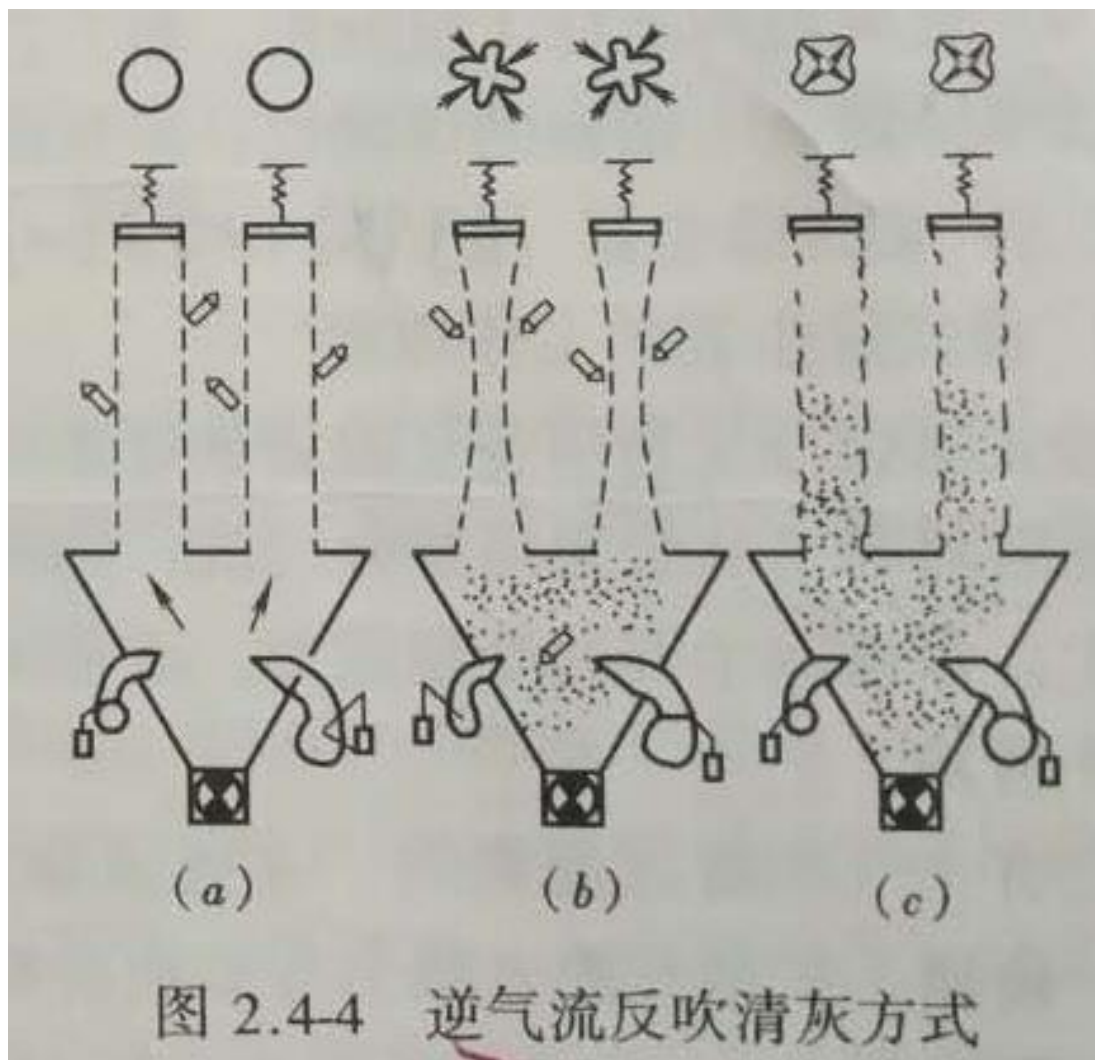
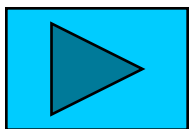


图 4-27 振动清灰袋式除尘器

1—电机；2—偏心块；3—振动架；4—橡胶垫；5—支座；6—滤袋；7—花板；8—灰斗；9—支柱；10—密封插板

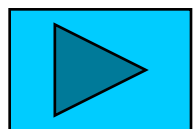
2)、回转式逆气流反吹

- 1、反向的清灰气流直接冲击尘块。
- 2、由于气流方向的改变，滤袋产生变形、振动而使尘块脱落。



3)、脉冲喷吹清灰

利用喷嘴喷出压缩空气进行反吹，每60秒种左右喷吹一次，每次喷吹0.1秒左右。



优点：

清灰过程不中断滤料工作，能使粘附性强的粉尘脱落，清灰时间间隔短，过滤风速高。

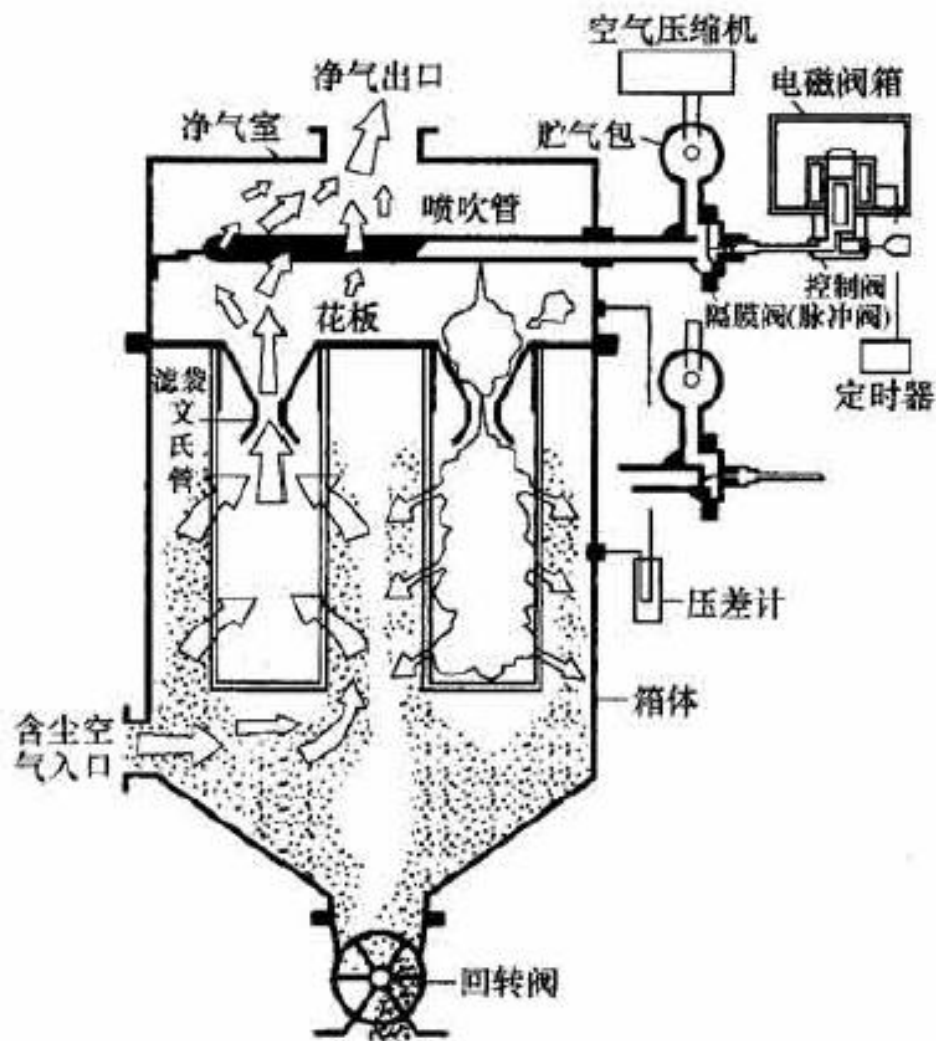


图 4-29 脉冲喷吹袋式除尘器

4.5.6、使用袋式除尘器时应注意以下问题：

- 1、由于滤料使用温度的限制，它不宜处理高温烟气。如需用袋式除尘器处理高温烟气，必须预先冷却。
- 2、处理高温、高湿气体（如球磨机排气）时，为防止水蒸汽在滤袋上凝结，应对含尘空气进行加热（用电或蒸汽），并对除尘器保温。
- 3、不宜处理含有油雾、凝结水和粘性粉尘的气体。
- 4、不能用于有爆炸危险和带有火花的烟气。
- 5、处理含尘浓度高的气体时，为减轻袋式除尘器负担，最好采用两级除尘。用低阻力除尘器进行预净化。

第五节 湿式除尘器

湿式除尘器是通过含尘气体与液滴或液膜的接触使尘粒从气流中分离的。

优点:结构简单，投资低，占地面积小，除尘效率高，能同时进行有害气体的净化。它适宜处理有爆炸危险或同时含有多种有害物的气体。

缺点:物料不能干法回收，泥浆处理比较困难；为了避免水系污染，有时要设置专门的废水处理设备；高温烟气洗涤后，温度下降，会影响烟气在大气的扩散。

一、湿式除尘器的除尘机理

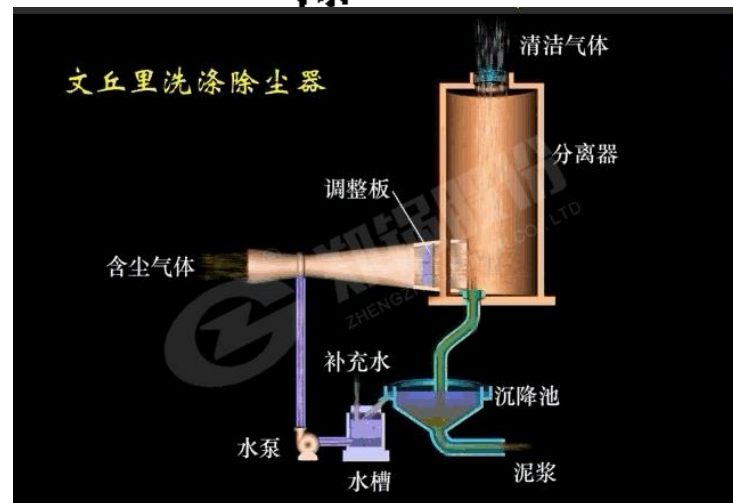
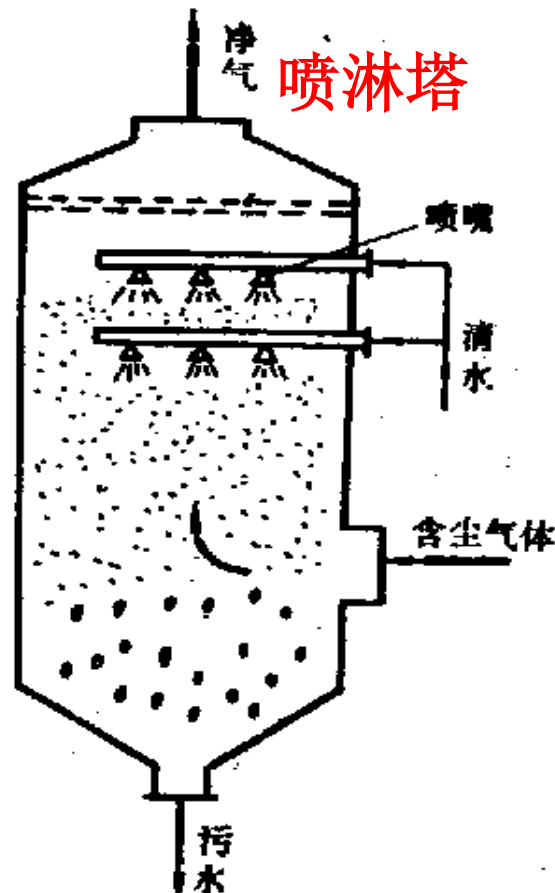
- 1.通过**惯性碰撞、接触阻留**，尘粒与液滴、液膜发生接触，使尘粒**加湿、增重、凝聚**；
- 2.细小尘粒通过**扩散**与液滴、液膜接触；
- 3.由于烟气增湿，尘粒的**凝聚性**增加；
- 4.高温烟气中的水蒸汽冷却凝结时，要以尘粒为凝结核，形成一层液膜包围在尘粒表面，增强了粉尘的**凝聚性**。遇疏水性粉尘能改善其可湿性。

二、湿式除尘器的结构形式

湿式除尘器的种类很多，但是按照气液接触方式，分为两大类。

1. 尘粒随气流一起冲入液体内部，尘粒加湿后被液体捕集，它的作用是液体洗涤含尘气体。属于这类的湿式除尘器有**自激式除尘器、卧式旋风风水膜除尘器、泡沫塔**等。

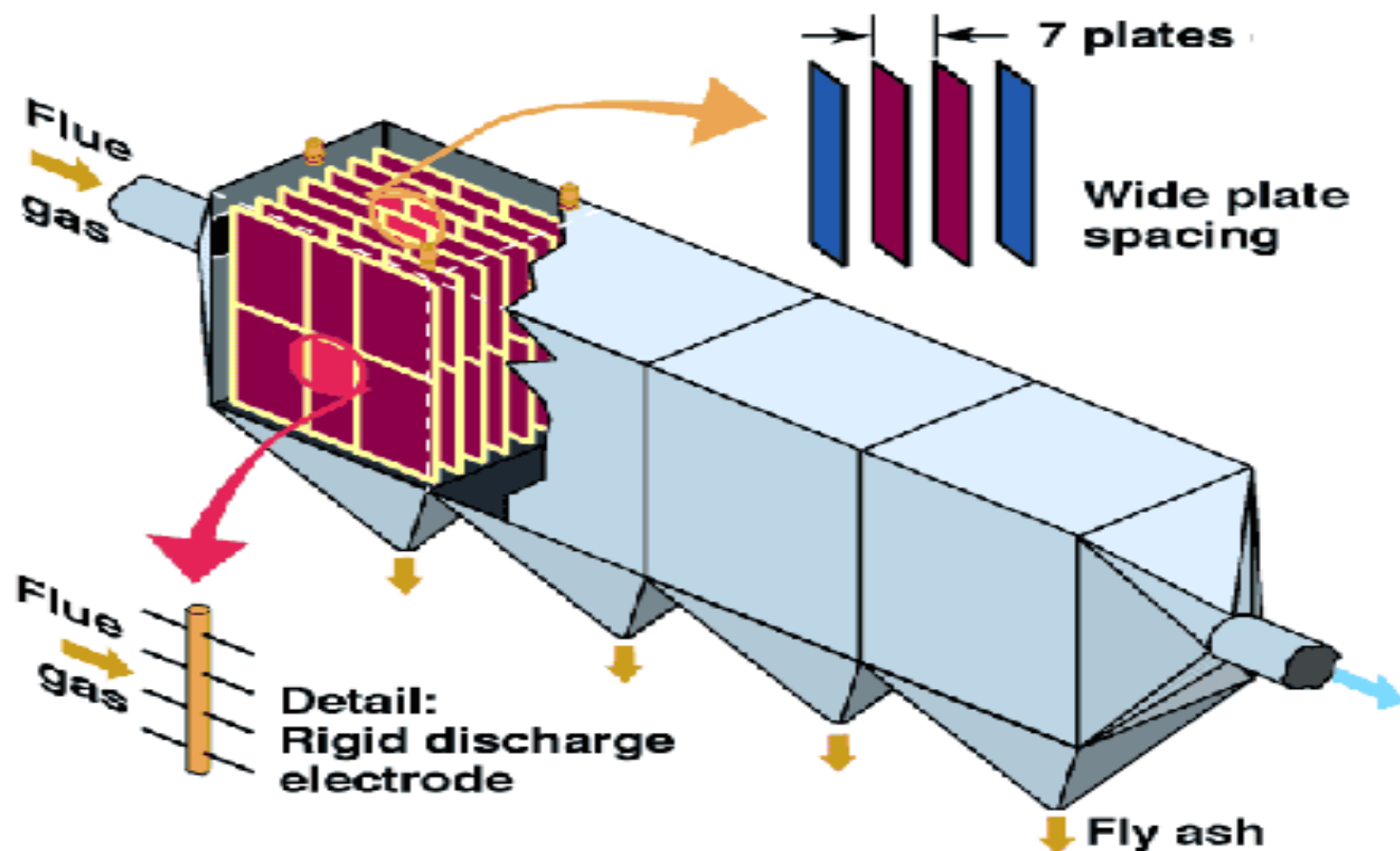
2. 用各种方式向气流中喷入水雾，使尘粒与液滴、液膜发生碰撞。属于这类的湿式除尘器有**文丘里除尘器、喷淋塔**等。



第七节 电除尘器

电 → 电场力 → 颗粒物荷电

→ 营造电场 → 正负电极 → 发电极和集尘极



第七节 电除尘器

优点:

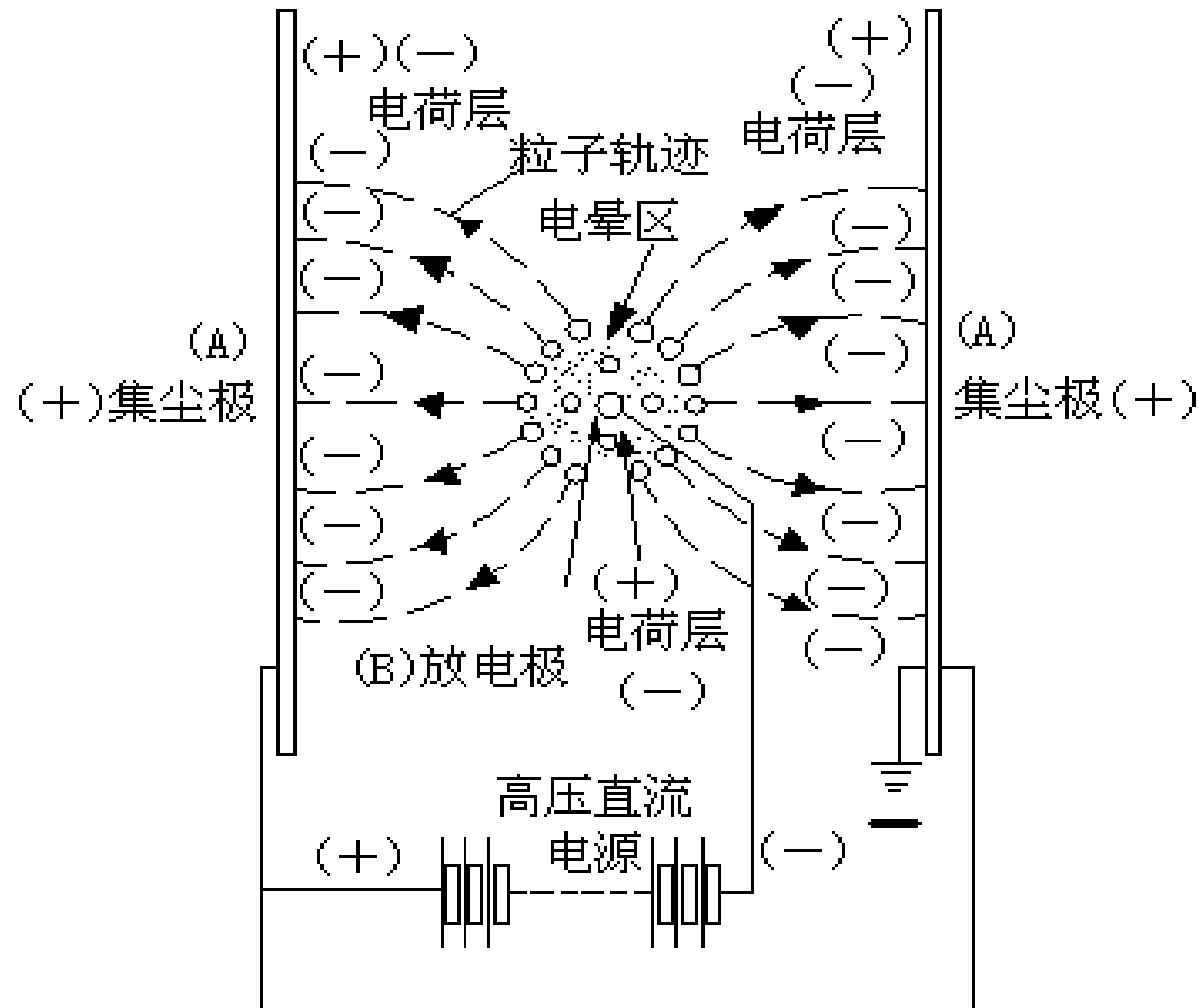
- 1、一种干式高效过滤器
- 2、电除尘器适用于微粒控制，除尘效率高，99.5%以上，对粒径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的尘粒仍有较高的效率。
- 3、阻力低。
- 4、可以处理高温（在 $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ 以下）气体。

电除尘器的缺点

- 1.设备庞大，占地面积大。
- 2.耗用钢材多，一次投资大。
- 3.结构较复杂，制造、安装的精度要求高。
对运行管理人员要求高。
- 4.对粉尘的比电阻有一定要求。

在国外电除尘器已广泛应用于火力发电、冶金、化学和水泥等工业部门的烟气除尘和物料回收。在国内，由于经济条件的限制，目前主要用于某些大型的工程。小型的电除尘器用于进气的净化。

电除尘器的工作原理



电除尘器的工作原理

一、几个基本概念

1、空气电离

电压升高到一定数值后，放电极周围电场很强，使周围的离子获得较高的能量和速度，撞击周围本不带电的中性原子，分离成正负离子。

2、电晕放电

电晕极周围气体电离，产生大量自由电子和离子，附着于粉尘上形成正、负离子，正负离子向极性相反的方向移动形成电流，称为电晕放电。

3、电场击穿

当电极周围空气被全部电离后，出现一圈淡蓝色的光环，叫电晕。如果进一步提高电压，会使电晕区变大，最后极间空气全部电离，叫电场击穿。

电场击穿时，发生火花放电，电路短路，电除尘器停止工作。为了保证电除尘器的正常工作，电晕的范围不宜过大，一般是局限于电晕极附近。

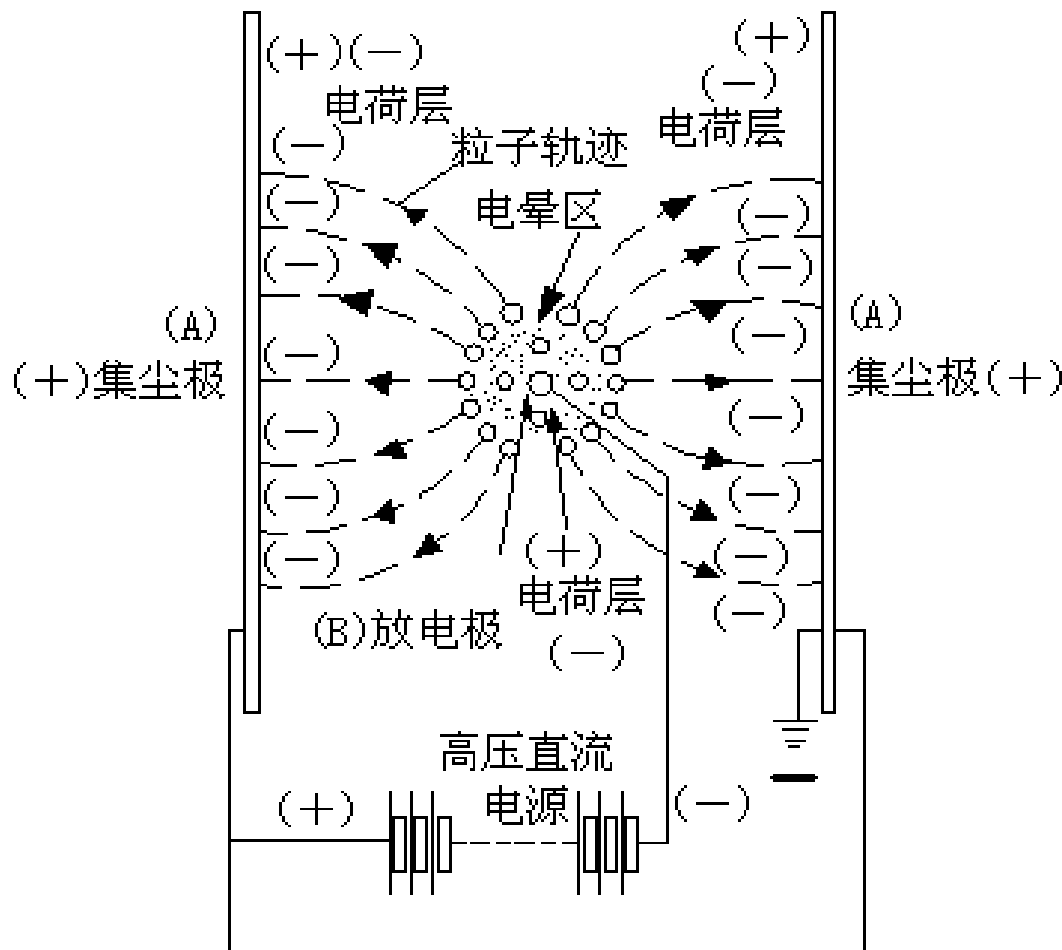
起晕电压：开始产生电晕放电的电压称为起晕电压。

击穿电压：电除尘器达到火花击穿的电压称为击穿电压。

二、电除尘器的工作原理

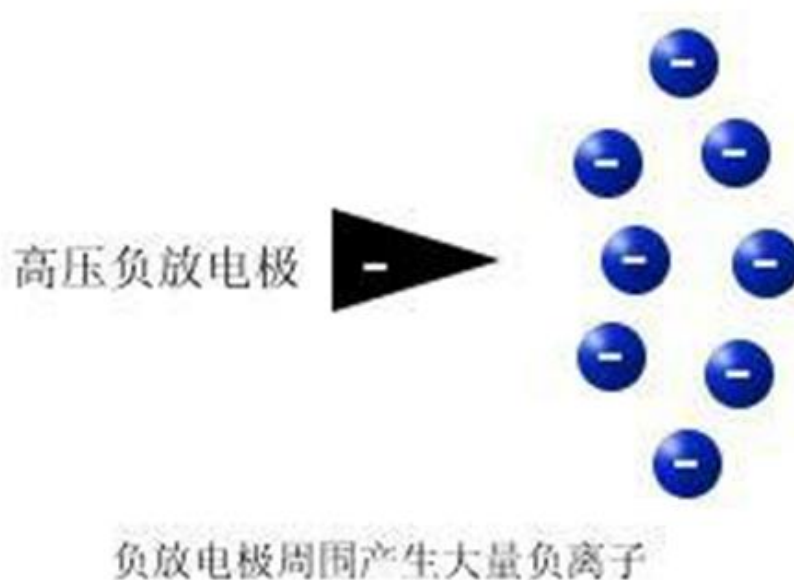
电除尘器又称静电除尘器，是利用电场产生的**静电力**使尘粒从气流中分离的。

- 空气电离
- 颗粒物的荷电
- 收尘
- 清灰



二、电除尘器的工作原理

- 1) **气体电离：**电晕极周围气体电离，产生大量自由电子和离子，电子附着于气体上形成负离子，正负离子向极性相反的方向移动形成电流，称为“电晕放电”。



思考题：

为什么净化用的电除尘器常用负电晕极？用于通风空调进气净化的除尘器采用正电极？

思考题：

为什么净化用的电除尘器常用负电晕极？用于通风空调进气净化的除尘器采用正电晕极？

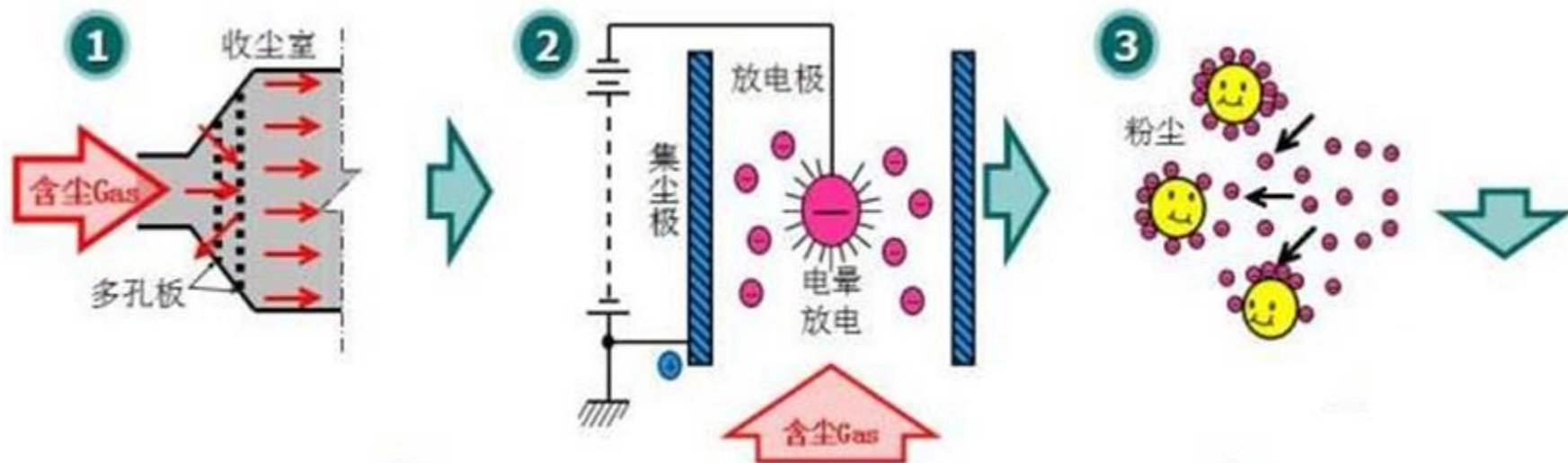
- 1、负离子特性：其运动速度要比正离子大；
- 2、在同样的电压下，负电晕能产生较高的电晕电流，而且它的击穿电压高得多。

用于通风空调进行进化的电除尘器，一般采用正电晕极。

优点：产生的臭氧和氮氧化物量较少。

二、电除尘器的工作原理

- 2) 粉尘荷电：离子及电子附着在粉尘上的过程，负离子浓度大于正离子。



•思考题:

- 1、尘粒荷电的机理？工业电除尘器以什么为主？
- 2、为什么工业进气用电除尘器的阳极板被称为集尘极？

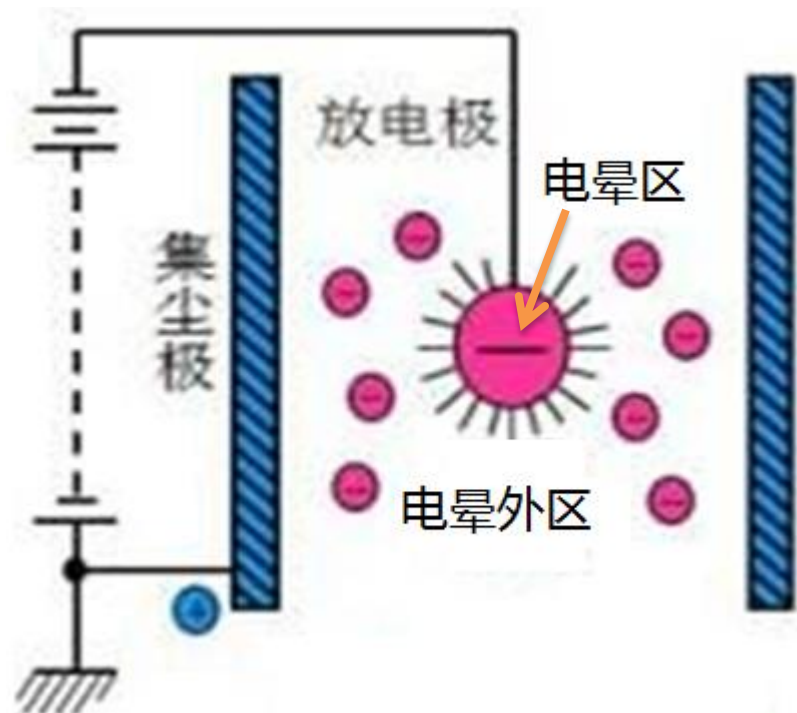
二、电除尘器的工作原理

•思考题:

- 1、为什么工业进气用电除尘器的阳极板被称为集尘极?
- 2、尘粒荷电的机理? 工业电除尘器以什么为主?

关键点:

- 1、电晕区仅有几个mm;
- 2、颗粒物绝大部分通过电晕外区;
- 3、与放电极极性相同的离子进入电晕外区。



二、电除尘器的工作原理

•思考题:

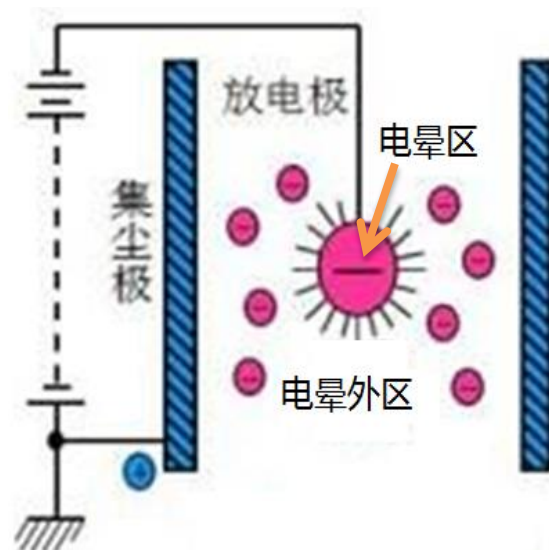
2、尘粒荷电的机理？工业电除尘器以什么为主？

关键点:

4、向集尘板运动的离子与颗粒物

碰撞，使其荷电，**电场荷电，为主**；

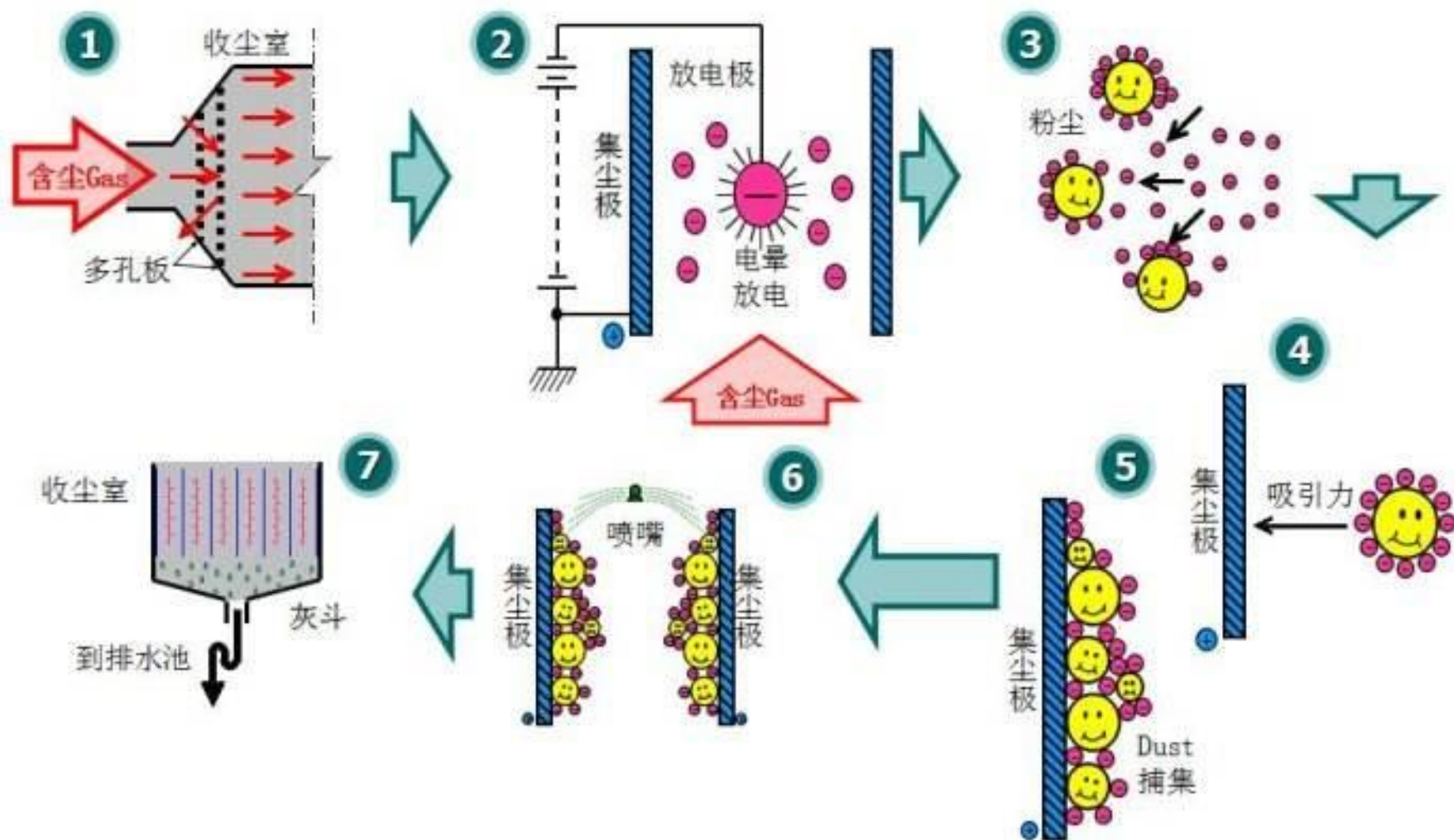
5、离子的扩散现象使颗粒物荷电，**扩散荷电**。



3) 收尘：在电场力的作用下，正负离子移向极板的过程。

二、电除尘器的工作原理

4) 清灰：附着在极板上的荷电粉尘落入灰斗，通过输灰系统使粉尘排除除尘器。



三、影响电除尘器工作的因素

•1、驱进速度

当静电力等于空气阻力时，作用在尘粒上的外力之和等于零，尘粒在横向等速运动。这时尘粒的运动速度称为**驱进速度**。

$$\omega = \frac{qE_j}{3\pi\mu d_c}$$

驱进速度越大，
越有利于收尘。

2、气体的动力粘度 μ

只是随温度的增加而增加的，因此烟气温度增加时，尘粒的驱进速度和除尘效率都会下降。

四、除尘效率方程式（多依奇公式）

$$\eta = 1 - \frac{y_2}{y_1} = 1 - \exp\left(-\frac{\omega A}{L}\right) \Rightarrow A = \frac{L}{\omega} \ln(1 - \eta)$$

公式是在一系列假设的条件下得出的，和实际情况并不完全相符。只能用于定性分析：

- 1、在除尘效率一定的情况下除尘器尺寸和颗粒物驱进速度成反比，和处理风量成正比。
- 2、在除尘器尺寸一定的情况下，除尘效率和气流速度成反比。

3、有效驱进速度：见表4-7

根据某一**除尘器实际测定**的除尘效率和它在集尘极总面积，气体流量，利用除尘器效率计算公式倒算出的驱进速度为有效驱进速度。

五、颗粒物的比电阻

粉尘的比电阻是评定粉尘导电性能的一个指标。某一物质在某一温度下的电阻：

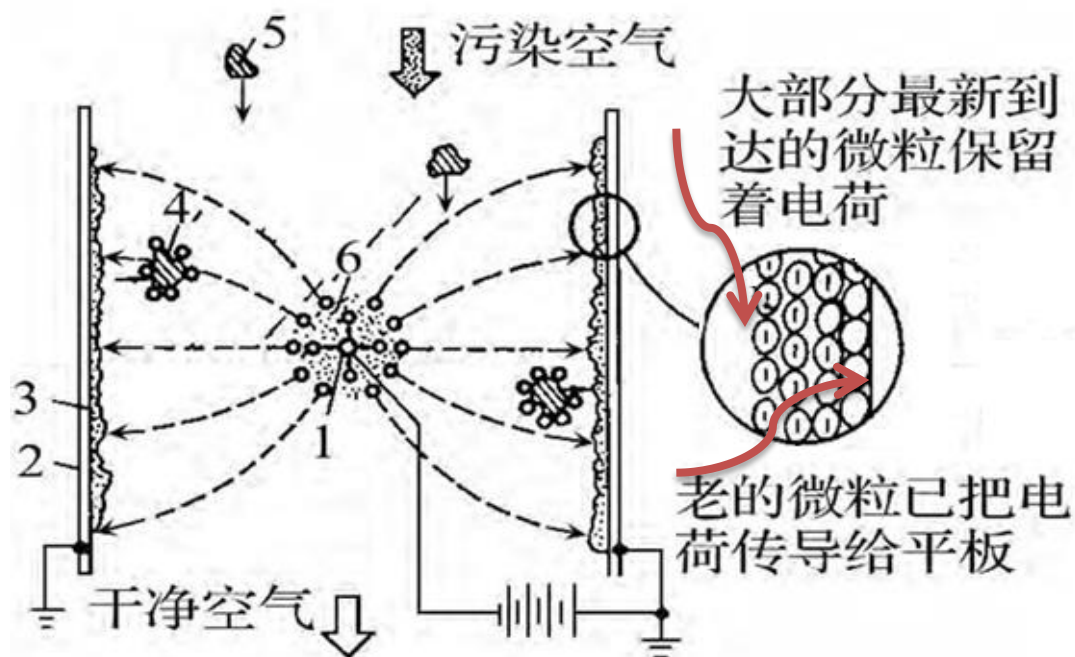
$$R = R_b \frac{L}{A} \quad \Omega \cdot \text{cm}$$

式中

R_b —比电阻或称电阻率

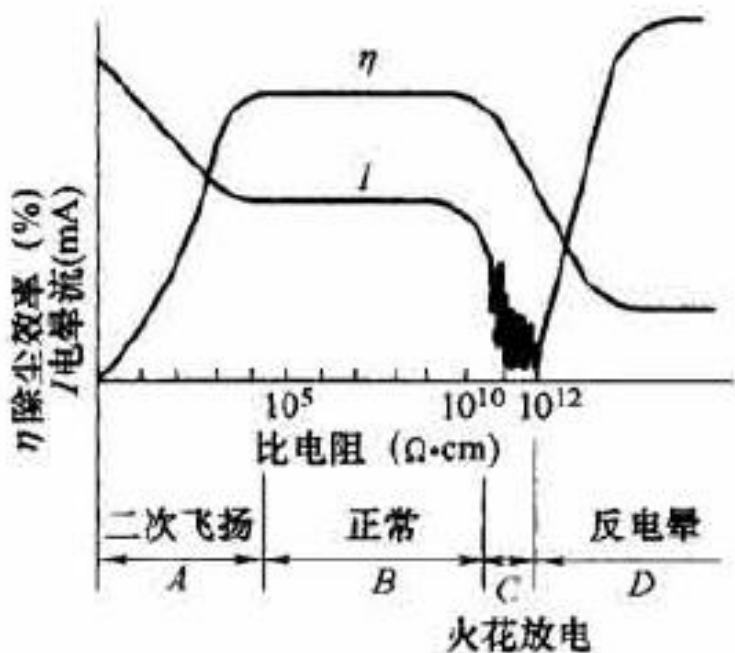
L —长度，cm

A —横断面积， cm^2 。



五、颗粒物的比电阻

- a) 粉尘比电阻低于 10^4 cm ，为低阻型：效率低。
- b) 粉尘比电阻低于 $10^4 \sim 10^{11} \text{ cm}$ ，为正常型：效率高。
- c) 粉尘比电阻低于 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}$ ，为高阻型：效率低。



- ✓ 选择适当的操作温度;
- ✓ 增加引起的含湿量;
- ✓ 在烟气中加入调节剂。

• 思考题: 1、降低颗粒物比电阻的方法? 为什么?

六、电除尘器设计中的几个问题

(1) 集尘极面积的确定

电除尘器所需的集尘面积可按公式计算确定。

$$A = \frac{L}{\omega} \ln(1 - \eta)$$

例题：已知：处理风量 $L=80\text{m}^3/\text{s}$ ， $y_1=15\text{g}/\text{m}^3$ ， y_2 应小于 $50\text{g}/\text{m}^3$ ，
求出必需的集尘板面积。

参考同类型除尘器的测定结果，尘粒有效驱进速度 $\omega_e=0.1\text{m}/\text{s}$ 。

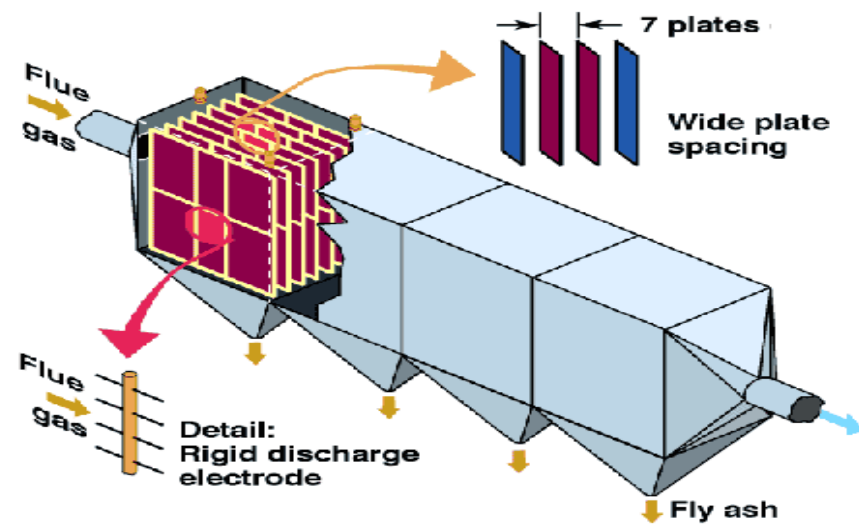
$$A = \frac{L}{\omega_e} \ln \frac{1}{1 - \eta} = \frac{80}{0.1} \ln \frac{1}{0.01} = 3680\text{m}^2$$

(2) 电场风速

电除尘器内气体的运动速度称为电场风速。

$$u = \frac{L}{F}$$

式中 F —电除尘器横断面积， m^2 。

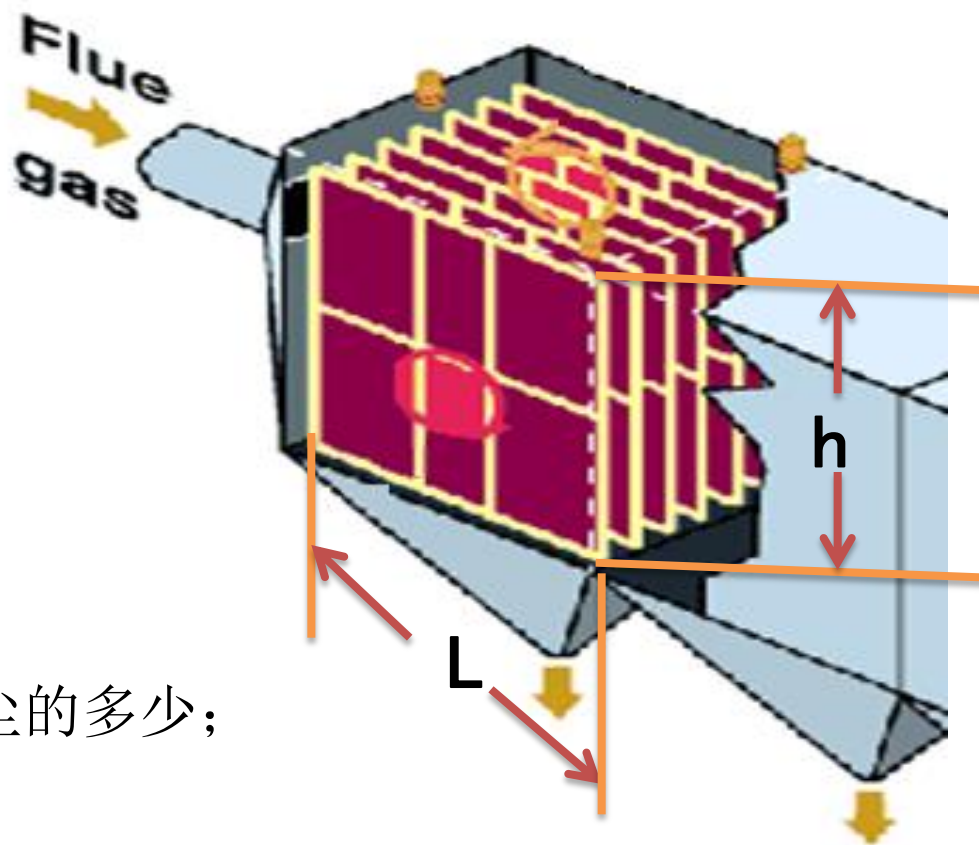


电场风速 $\uparrow$ →除尘效率下降, 且容易产生二次扬尘。

电场风速过低→电除尘器体积大, 投资增加。

根据经验, 电场风速最高不宜超过 $1.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$, 除尘效率要求高的除尘器不宜超过 $1.0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 。

(3) 长高比



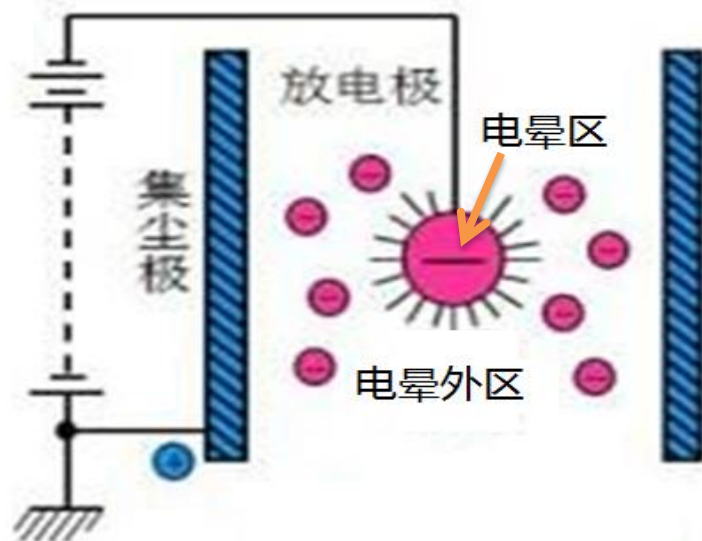
- ◆ 影响振打清灰时二次扬尘的多少；
- ◆ 集尘板L不够，下落的颗粒物被带走。

当除尘效率大于99%时，长高比至少为1.0~1.5

(4) 气体含尘浓度

电晕外区：自由离子和带电颗粒物；

自由离子： $60\sim 100\text{m/s}$ ；带电颗粒物： $60\sim \text{cm/s}$



如果气体的含尘浓度很高，电场内悬浮大量的微小尘粒，会使电除尘器的电晕电流急剧下降，严重时可能会趋近于零，**使除尘器失去除尘能力，这种情况称为电晕闭塞。**

措施：

提高工作电压，采用放电强烈的电晕极，增设预净化设备等。

4.8 进气净化用的空气过滤器

进气净化特点：

- ◆ 含尘浓度低；
- ◆ 微细颗粒物多；
- ◆ 净化效率高。

也可以过滤掉空气中的细菌。

空气过滤器的性能应满足效率高、阻力低、容尘量高的要求 。

一、空气过滤器的分类

性能	型式	粒径	浓度	压损pa	效率	尘量g/m ²
粗效	玻璃纤维	>5	中~大	30—200	70—90	50—2000
中效	泡沫、塑料	>1	中	80—150	90—96	300—800
亚高	石棉纤维	<1	小	150—350	>99	70—250
高效	超细纤维	<1	小	250—490	>99.97	50—70
静电	二段电过滤器	<1	小	80—100	>99	60—75

粉尘在空气过滤器中的分离依靠重力、惯性碰撞、接触阻留、扩散、静电等机理的综合作用。

二、目前常用的空气过滤器

1、粗效过滤器

滤料大多采用金属丝网、
铁屑、瓷环、玻璃丝
(直径大约 $20\text{ }\mu\text{m}$)

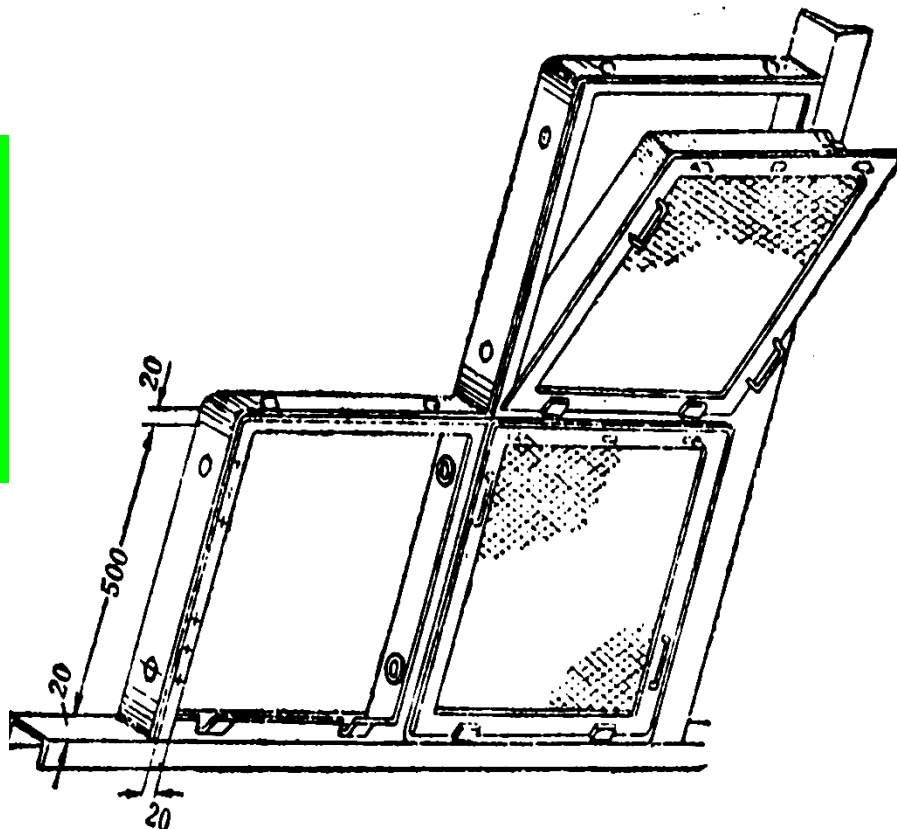


图 4-31 粗效过滤器

目前常用的空气过滤器

2、中效过滤器

主要滤料：

- 1)、玻璃纤维（纤维直径约为 $10\mu\text{m}$ ）左右
- 2)、中细孔聚乙烯泡沫塑料
- 3)、涤纶、丙纶、腈纶等原料制成的合成纤维（俗称无纺布）

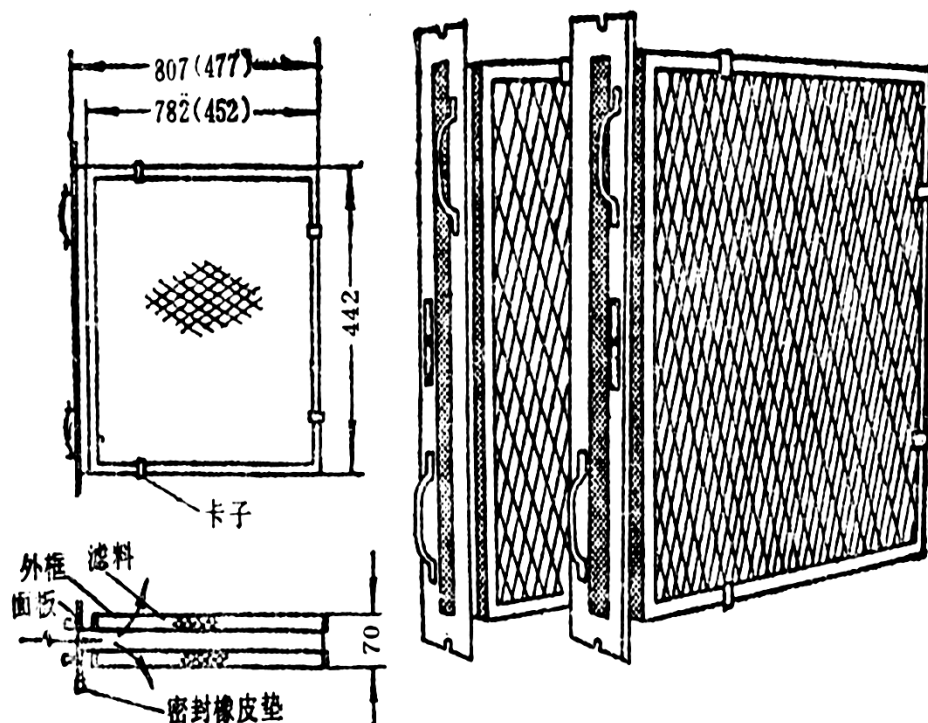


图 4-32 玻璃纤维过滤器

泡沫过滤器

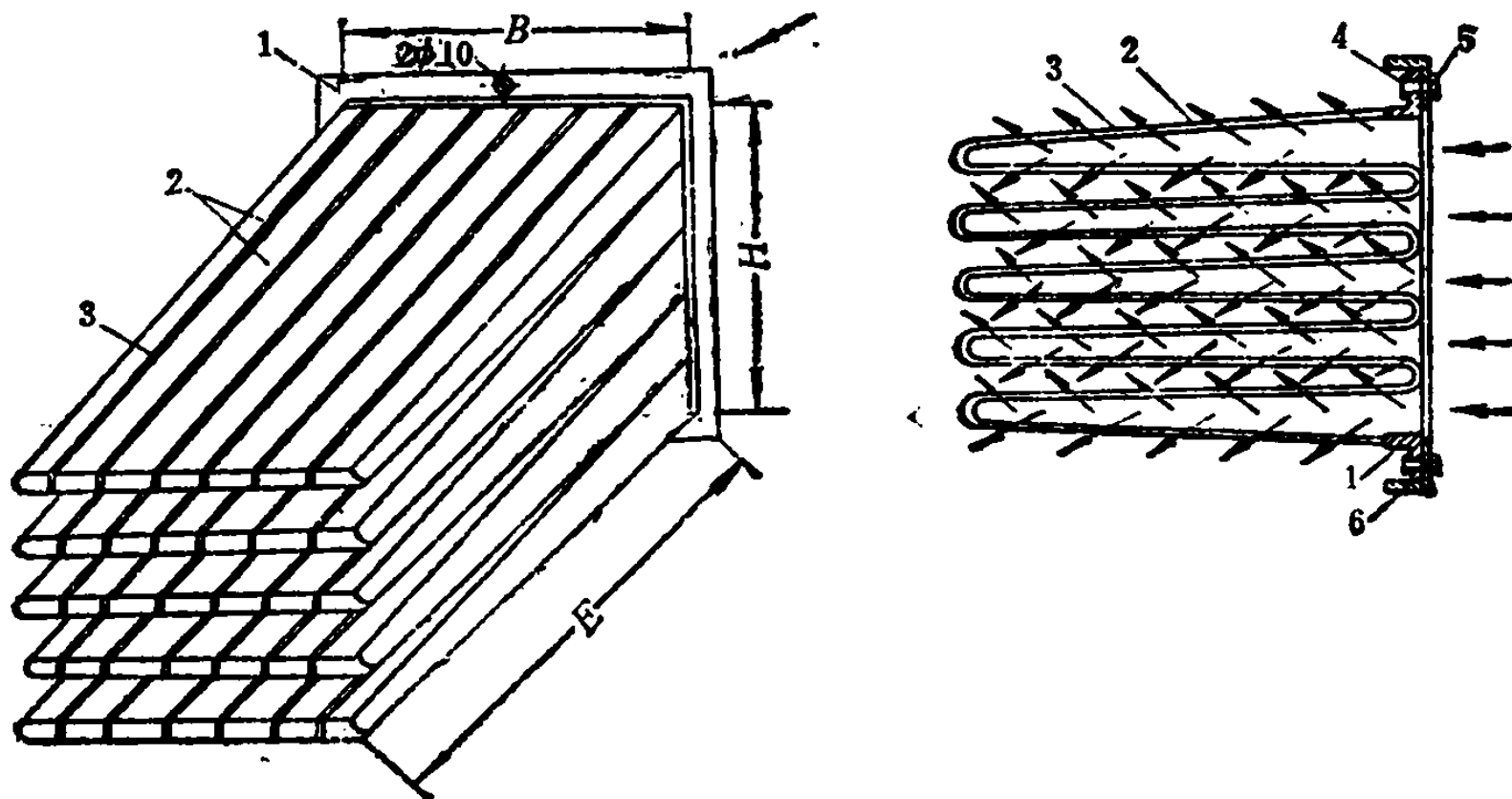


图 4-33 泡沫塑料过滤器

1--边框 $\angle 25 \times 3$; 2-- $\phi 3\text{mm}$ 铁丝支撑; 3--泡沫塑料滤层; 4--螺栓M8; 5--螺母M8;
6--现场安装框架 $\angle 40 \times 3$

目前常用的空气过滤器

3、高效过滤器

1)、必须在有粗、中效过滤器保护之下使用，即成为三级过滤的末级过滤器。

2)、滤料为超细玻璃纤维、超细石棉纤维，滤料纤维直径大部分小于 $1\mu\text{m}$

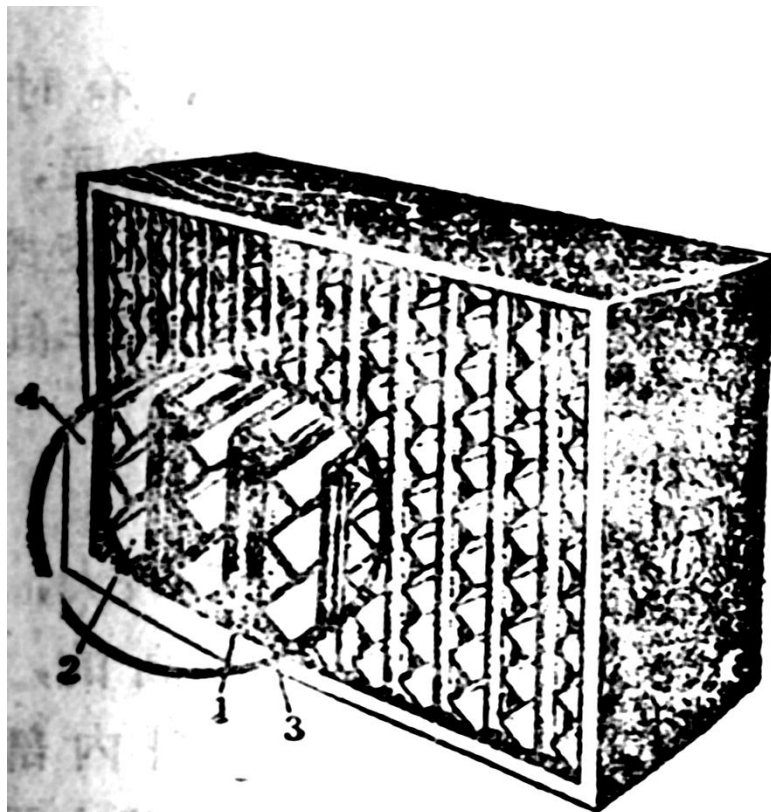


图 4-34 高效过滤器外形
1—滤纸；2—分隔片；3—密封胶；4—木外框

4.9、除尘器的选择

- 1、除尘能力：除尘效率
- 2、动力消耗
- 3、经济性

1. 明确用途，了解排放标准

选用的除尘器必须满足排放标准规定的排空浓度。对于运行工况不太稳定的系统，要注意风量变化对除尘器效率和阻力的影响，例如，旋风除尘器的效率和阻力是随风量的增加而增加的，电除尘器的效率却是随风量的增加而下降的。

选择除尘器时，必须同时考虑除尘器除粉尘的处理问题。对于可以回收利用的粉粒状物如耐火粘土、面粉等，一般采用干法除尘，回收的粉尘可以纳入工艺系统。

2. 熟悉除尘装置的性能

- 各种除尘设备实用性能比较

类型	结构形式	处理粒度 μm	压降 mmH_2O	除尘效率 %
重力除尘	沉降式	50~1000	10~15	40~60
惯性力除尘	烟囱式	10~100	30~60	50~70
离心除尘	旋风式	3~100	50~150	85~95
湿式除尘	文丘里式	0.1~100	300~1000	90~99
过滤除尘	袋式	0.1~20	100~200	85~99.9
电除尘		0.05~20	10~20	

- **3. 气体的含尘浓度和处理风量**

气体的含尘浓度较高时，在电除尘器或袋式除尘器前应设置低阻力的初净化设备，去除粗大尘粒，有利于它们更好地发挥作用。

4. 含尘气体性质

对于高温、高温的气体不宜采用袋式除尘器，如果粉尘的粒径小、比电阻大，又要求干法除尘时，可以考虑采用颗粒层除尘器。如果气体中同时含有有害气体，可以考虑采用湿式除尘，但是必须注意腐蚀问题。