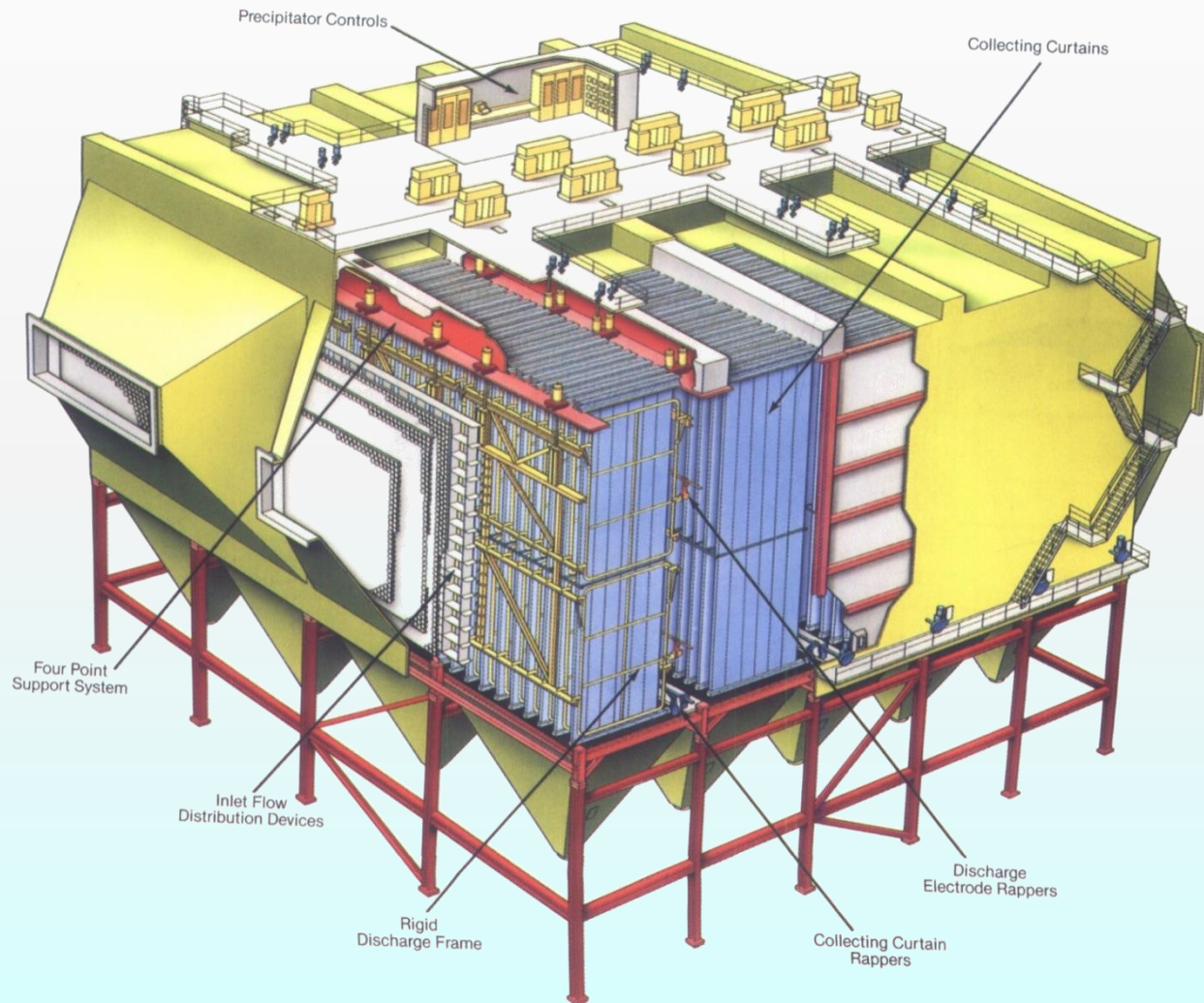


第3.5节 电除尘器

3.5 电除尘器



第3.5节 电除尘器

一 电除尘器特点

1. 分离的作用力直接施之于粒子本身，而机械方法大多把作用力作用在整个气体。
2. 气流阻力小。耗电少： **$0.2 \sim 0.4$ 度/1000m³**，压损小：一般为 **$200 \sim 500$ Pa**。
3. 捕集细小颗粒（ **$1\mu\text{m}$** 左右）的效率**高**。

第3.5节 电除尘器

特点:

4. 除尘效率高，一般在**95-99%**(最高可达**99.9%**)。
5. 处理气量大。
6. 可在高温或强腐蚀性气体下操作。
7. 主要缺点是设备庞大，消耗钢材多，初投资大，要求安装和运行管理技术较高。

第3.5节 电除尘器

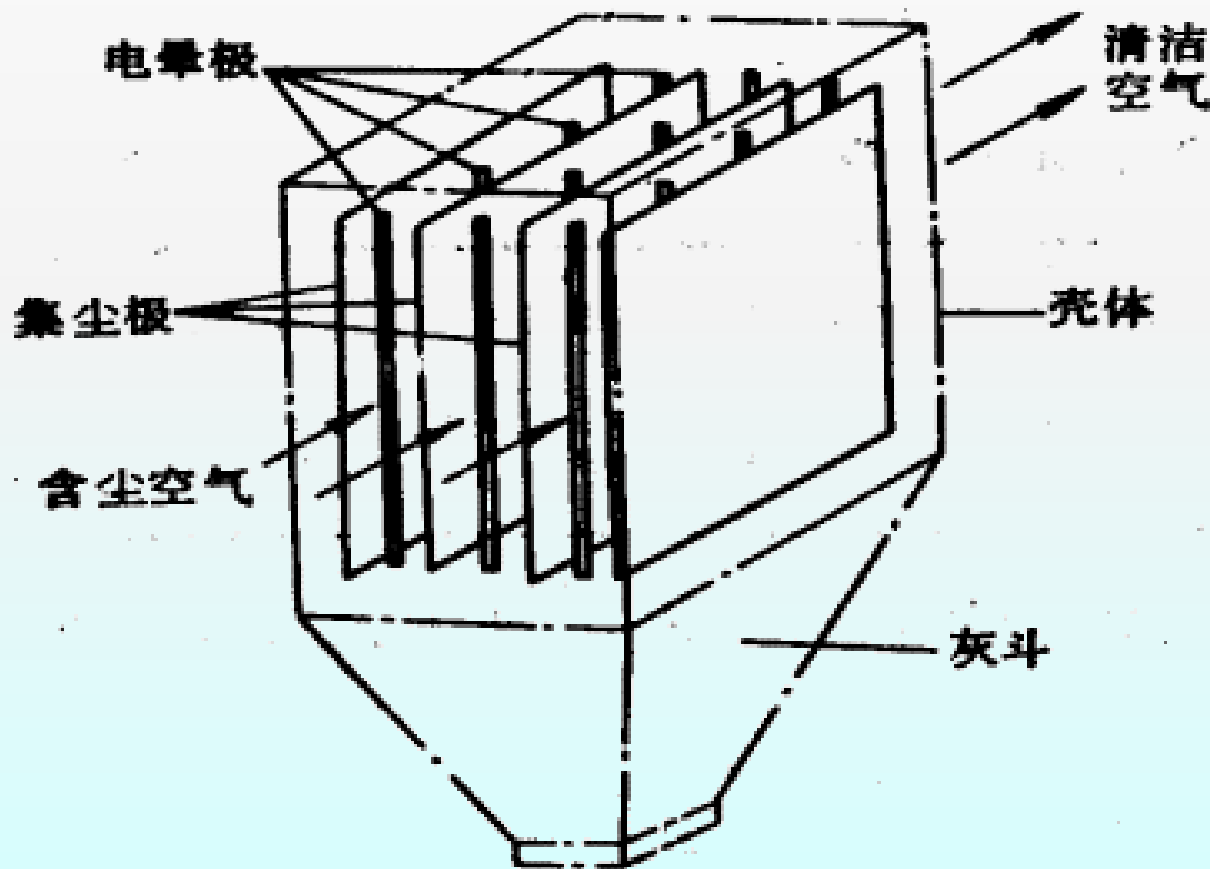


宁波北仑电厂 60 万千瓦机组配套电除尘器

第3.5节 电除尘器

二 主要构件

- 电晕极 集尘极 清灰装置



第3.5节 电除尘器

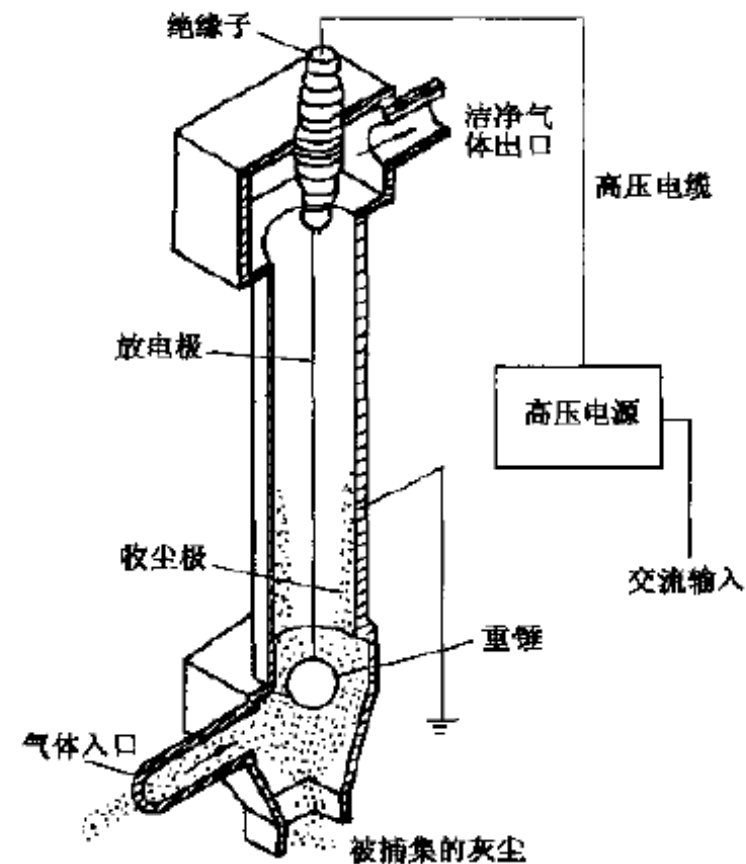
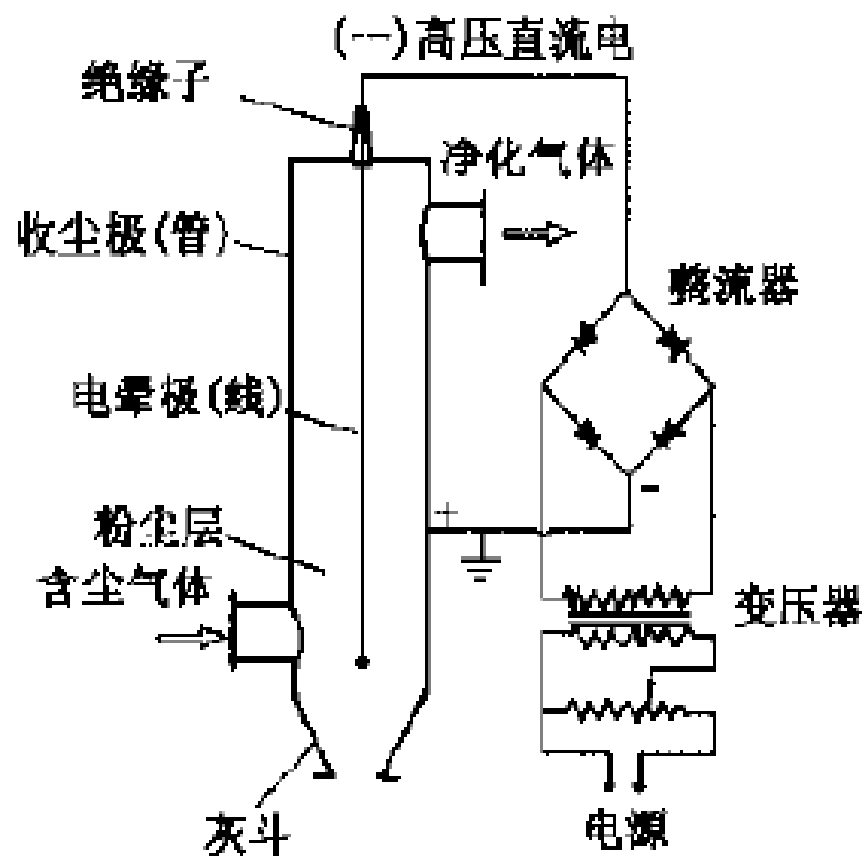
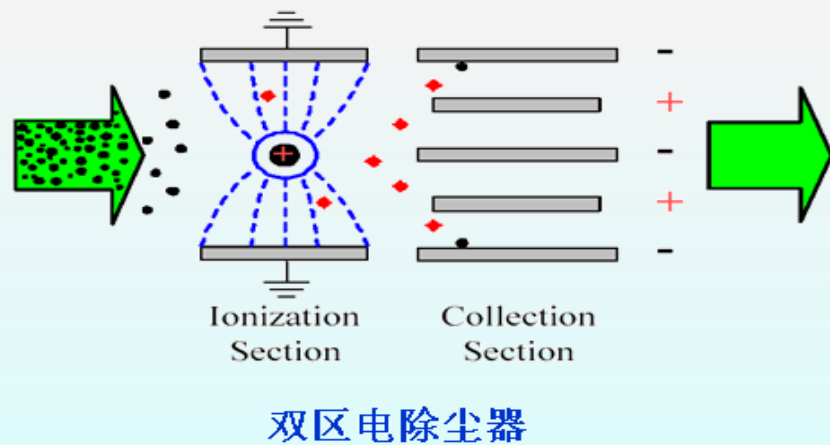
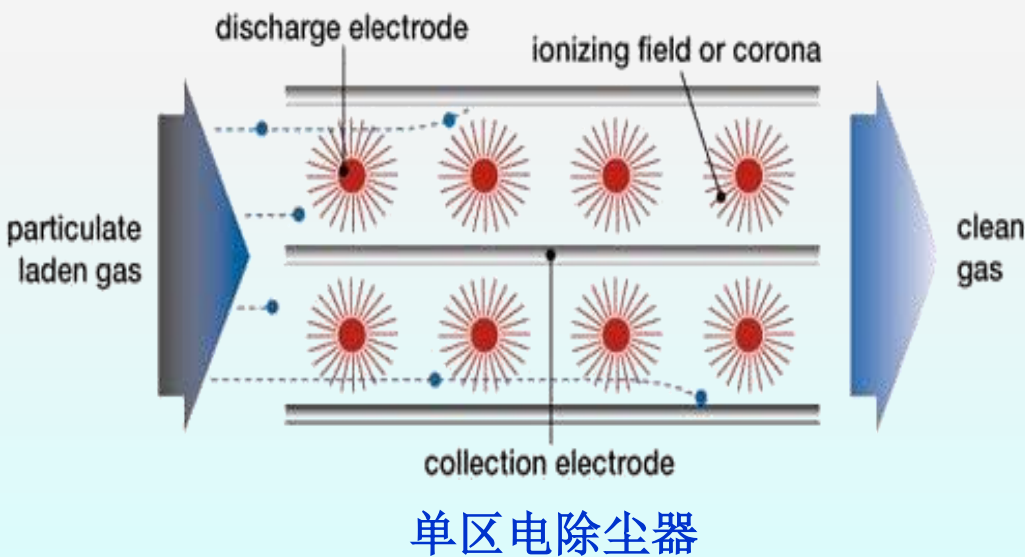


图 8-1 管式电除尘器示意图

第3.5节 电除尘器

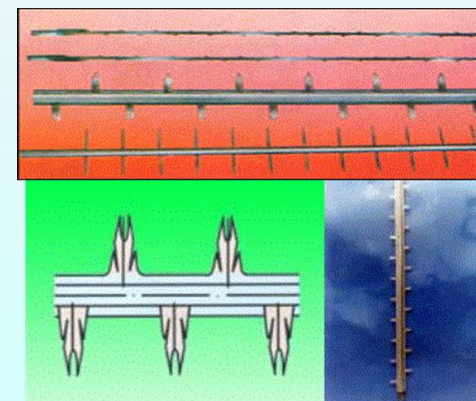
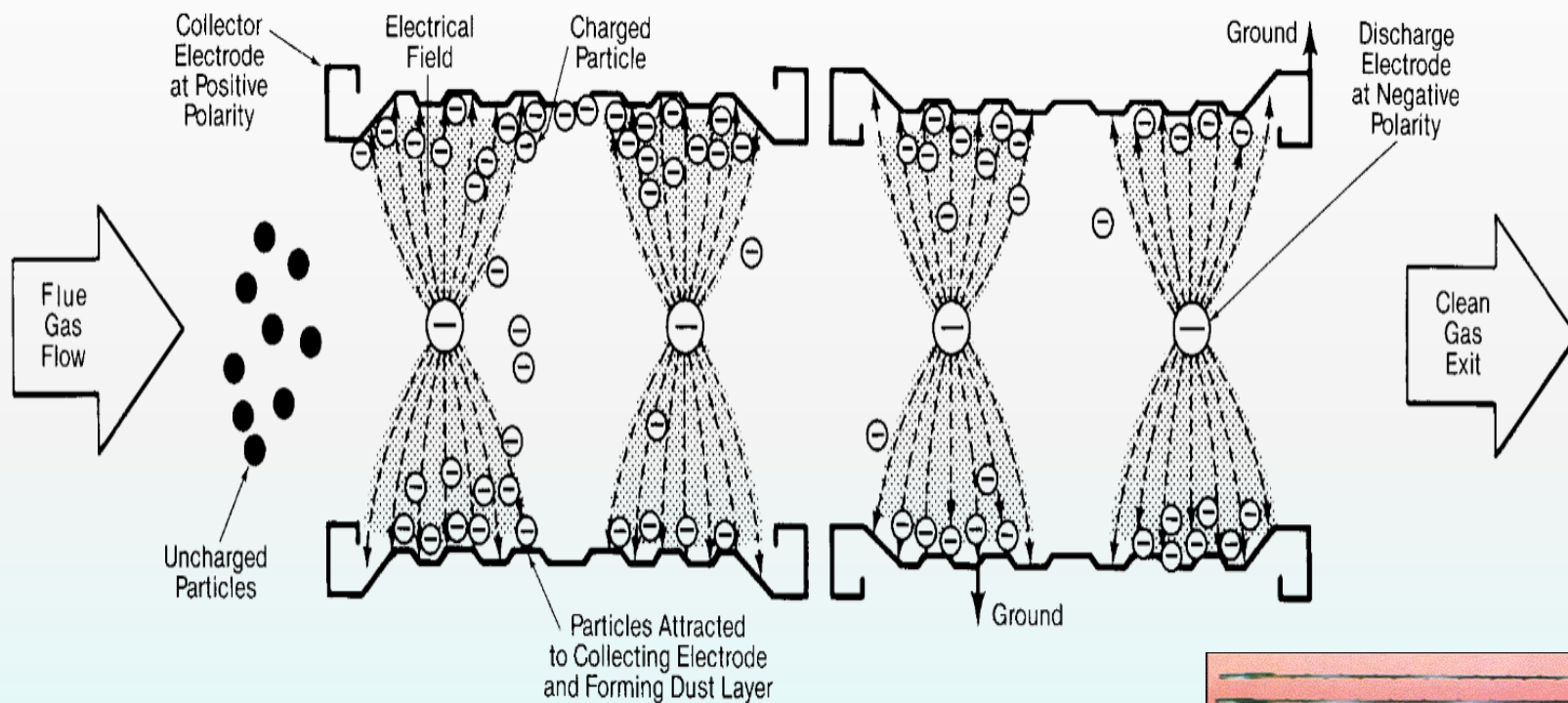
➤ 除尘器类型

- ✓ 双区电除尘器—通风空气的净化和某些轻工业部门
- ✓ 单区电除尘器—控制各种工艺废气和燃烧烟气污染



第3.5节 电除尘器

三 电除尘器的工作原理



第3.5节 电除尘器

1、电晕放电

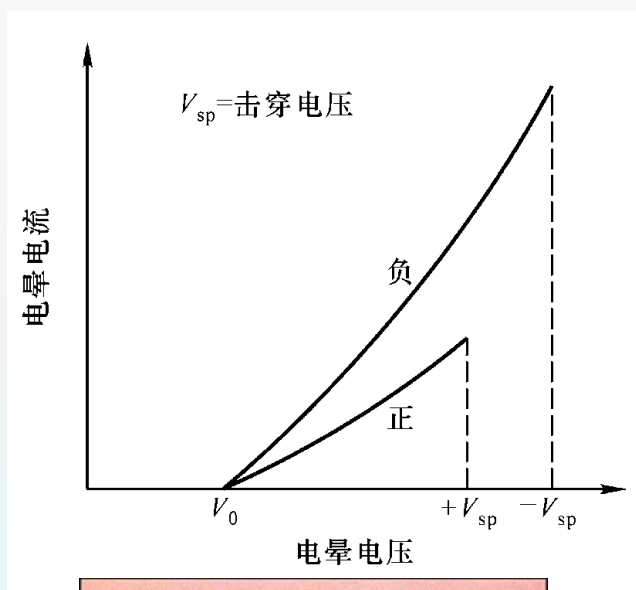
- 1) 电除尘器中两电极的电位差达到一定值时，在电晕极附近的强电场空间内，气体中的微量自由电子加速到极高速度。足以使与之碰撞的气体分子发生电离——产生新的自由电子和正离子。
- 2) 新的自由电子接着又获得足够动能，进一步引起气体分子的碰撞电离。
- 3) 这种过程在瞬间重复无数次，在放电极表面附近产生大量的自由电子和正离子——“**电子雪崩**”。

第3.5节 电除尘器

起晕电压

——开始产生电晕电流时的电压

- 起始电晕电压可以通过调整电极的几何尺寸来实现。电晕线越细，起始电晕电压越小。

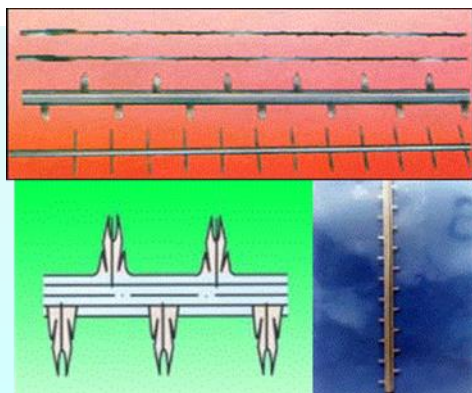


- 电晕区范围逐渐扩大致使极间空气全部电离—电场击穿，相应的电压—**击穿电压**。此时发生火花放电，电路短路，电除尘器停止工作。

- 在相同电压下通常负电晕电极产生较高的电晕电流，且击穿电压也高得多

- 工业气体净化倾向于采用稳定性强，操作电压和电流高的负电晕极；

- 空气调节系统采用正电晕极，其产生臭氧和氮氧化物的量低（约为负电晕的1/10）



第3.5节 电除尘器

2、粒子荷电

电除尘过程对粒子荷电的基本要求是：相同条件下荷电速度快，荷电量。

■ 两种机理

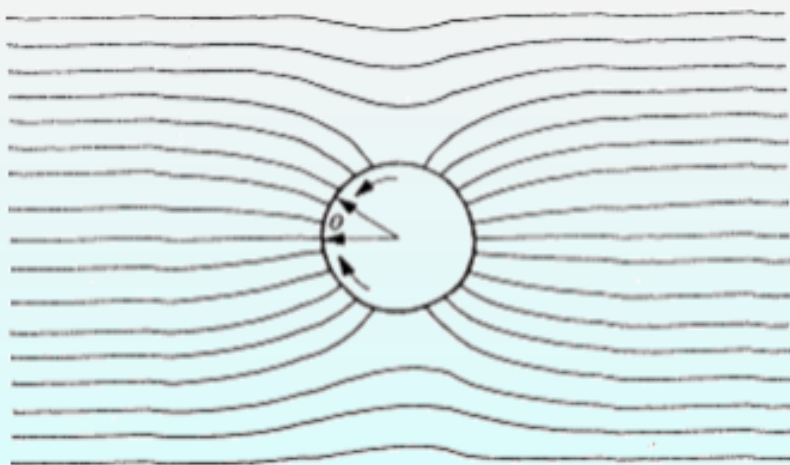
- **电场荷电或碰撞荷电**—离子在静电力作用下做定向运动，与粒子碰撞而使粒子荷电；
- **扩散荷电**—离子由于热运动产生扩散而导致的粒子荷电过程；
依赖于离子的热能，而不是依赖于电场。

第3.5节 电除尘器

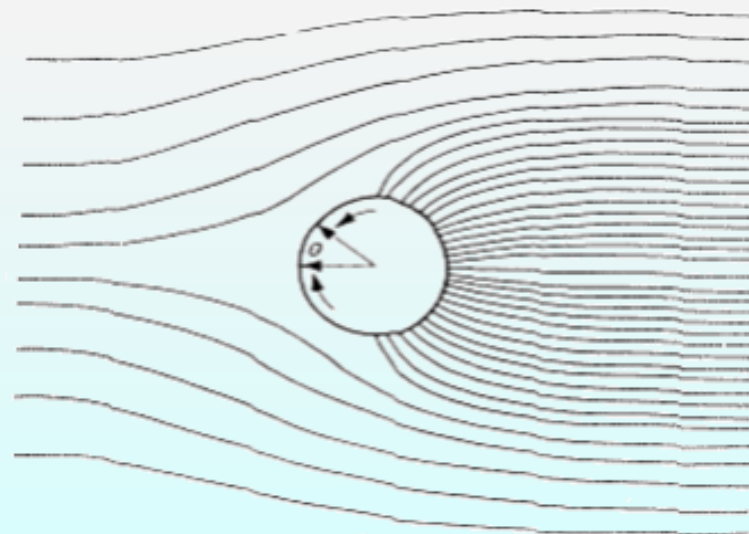
■ 粒子的主要荷电过程取决于粒径

- 大于 $0.5\mu\text{m}$ 的微粒，以**电场荷电**为主
- 小于 $0.15\mu\text{m}$ 的微粒，以**扩散荷电**为主
- 介于之间的粒子，需要同时考虑这两种过程。

粒子荷电 \longrightarrow 电荷累积 \longrightarrow 粒子场强增加
 \longrightarrow 没有气体分子能够到达粒子表面，**电荷饱和**



Electric field modified by the presence of an uncharged conducting particle.



Electric field after particle acquires a saturation charge.

第3.5节 电除尘器

(1) 电场荷电

◆ 粒子获得的饱和电荷

$$q = 3\pi\epsilon_0 E_0 d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right)$$

ϵ_0 — 真空介电常数，等于 8.85×10^{-12}

E_0 — 电场强度，V/m

ϵ — 粒子相对介电常数

■ 一般粒子的荷电时间仅为0.1s，相当于气流在除尘器内流动10～20cm所需要的时间，一般可以认为粒子进入除尘器后立刻达到了饱和电荷。

第3.5节 电除尘器

(2) 扩散荷电

- 荷电量取决于离子热运动的动能、粒子大小和荷电时间
- 扩散荷电理论方程

$$n = \frac{2\pi\epsilon_0 k T d_p}{e^2} \ln\left(1 + \frac{e^2 \bar{u} d_p N_0 t}{8\epsilon_0 k T}\right)$$

k —玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

T —气体温度, K

N_0 —离子密度, 个/ m^3

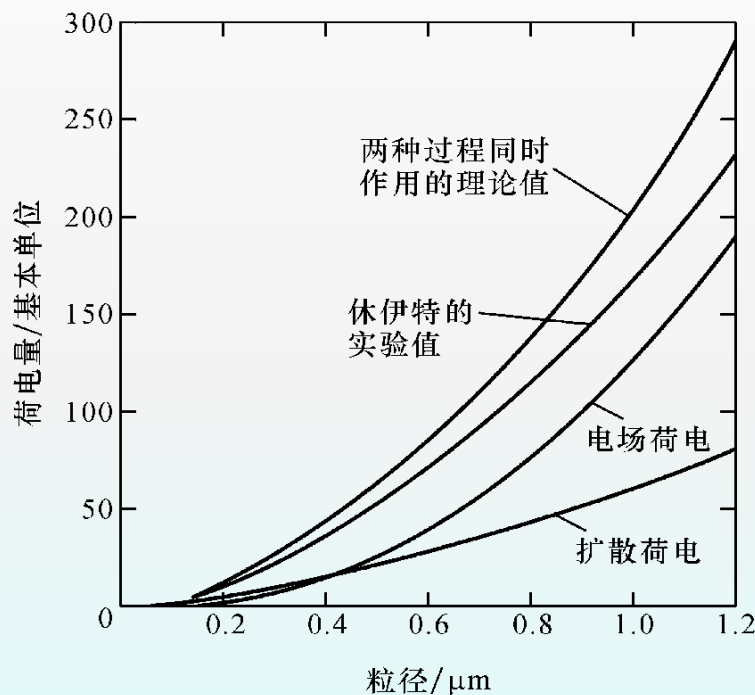
e —电子电量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

\bar{u} —气体离子的平均热运动速度, m/s

第3.5节 电除尘器

(3) 电场荷电和扩散荷电的综合作用

- 处于中间范围 ($0.15\sim 0.5\mu\text{m}$) 的粒子，需同时考虑电场荷电和扩散荷电



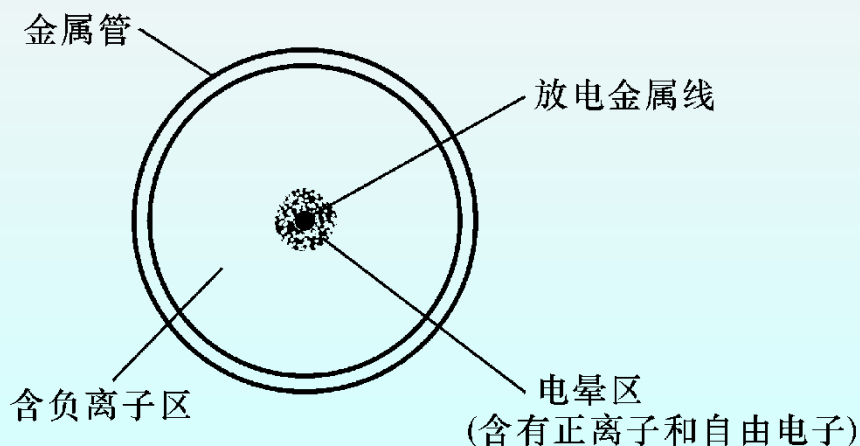
根据Robinson的研究，简单地将电场荷电和扩散荷电的电荷相加，可近似地表示两种过程综合作用时的荷电量，与实验值基本一致

第3.5节 电除尘器

3、荷电粒子的运动和捕集

- **在电晕区内**，气体正离子向电晕运动的路程极短，只能与极少数的粉尘相遇并使之荷正电，而沉积在电晕极上。
- **在负离子区**，大量荷负电的粉尘颗粒在电场力的驱动下向集尘极运动，到达极板失去电荷后便沉降在集尘板上。

当尘粒所受的静电力与尘粒的运动阻力达到平衡时时，尘粒便达到一个静电沉降的末端速度——**驱进速度**。



第3.5节 电除尘器

■ 驱进速度

➤ 力平衡关系

$$m \frac{d\omega}{dt} = qE_p - 3\pi\mu d_p \omega$$

$$\int \frac{m d\omega}{qE_p - 3\pi\mu d_p \omega} = \int dt$$

$$\frac{-m}{3\pi\mu d_p} \ln(3\pi\mu d_p \omega - qE_p) = t + C$$

$$\text{则} \quad e^{-\left(\frac{3\pi\mu d_p}{m}\right)(t+C)} = 3\pi\mu d_p \omega - qE_p$$

第3.5节 电除尘器

➤ **$t=0$ 时, $\omega=0$, 则**

$$e^{-\left(\frac{3\pi\mu d_p}{m}\right)t} = -qE_p$$

➤ **最终得**

$$\omega = \frac{qE_p}{3\pi\mu d_p} \left(1 - e^{-\left(\frac{3\pi\mu d_p}{m}\right)t}\right) \text{cm/s}$$

第3.5节 电除尘器

■ 驱进速度

$$\omega = \frac{qE_p}{3\pi\mu d_p} (1 - e^{-\left(\frac{3\pi\mu d_p}{m}\right)t}) \text{ cm/s}$$

- e的指数项是一个很大的数值。例如，密度为1g/cm³、直径为10 μm的球状粉尘粒子，在空气中有

$$3\pi\mu d_p / m = 3\pi\mu d_p / \left(\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho\right) = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho} = \frac{18 \times 1.8 \times 10^{-4}}{(10 \times 10^{-4})^2 \times 1} = 3240$$

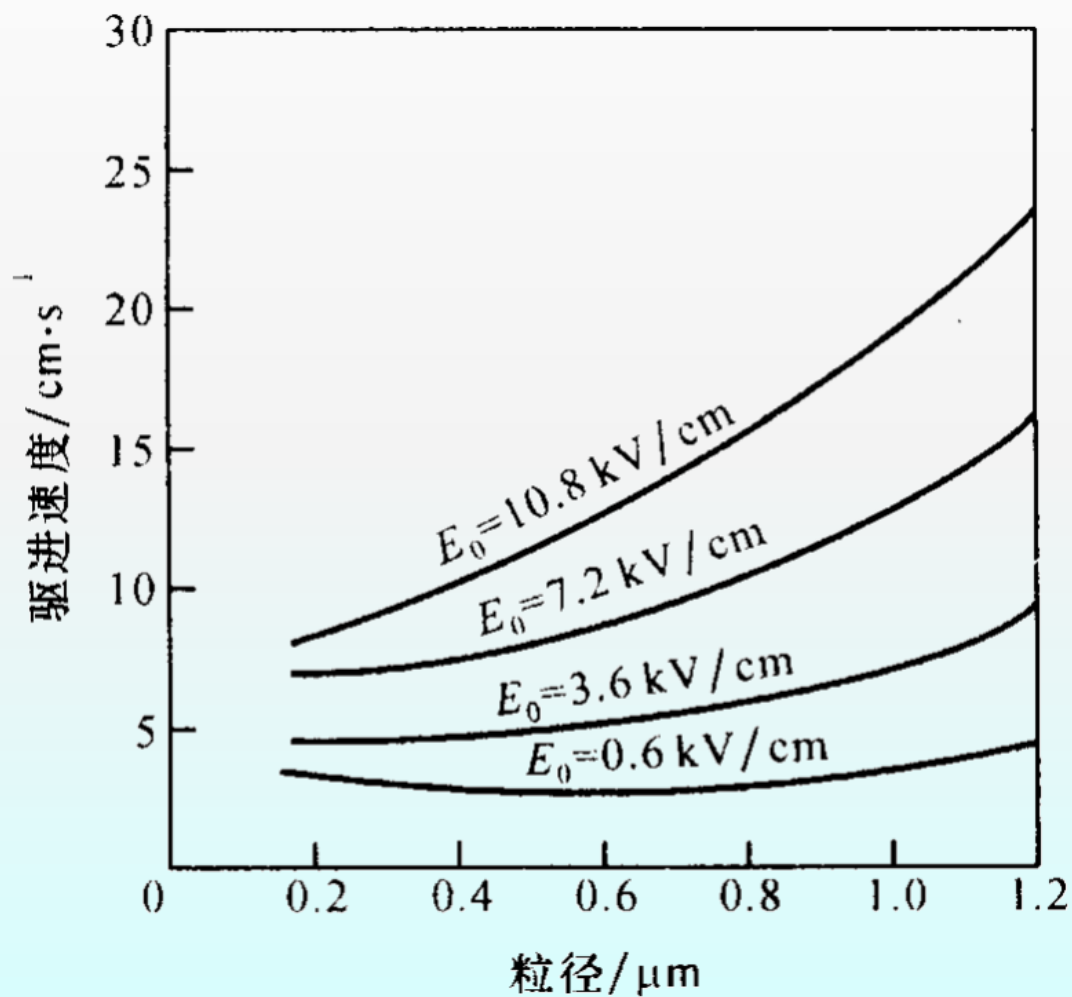
- 若 $t > 10^{-2}\text{s}$ ， $e^{-\left(\frac{3\pi\mu d_p}{m}\right)t}$ 完全可以忽略不计

- 所以，驱进速度

$$\omega = qE_p / (3\pi\mu d_p)$$

第3.5节 电除尘器

■ 驱进速度与粒径和场强的关系



第3.5节 电除尘器

◆ 捕集效率——德意希公式

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{A}{Q}\omega_i\right)$$

指明了提高电除尘器效率的途径，在除尘器性能分析和设计中被广泛采用。

第3.5节 电除尘器

- **有效驱进速度**—实际中常常根据在一定的除尘器结构型式和运行条件下测得的总捕集效率值，代入德意希方程式中反算出的相应驱进速度值，以 ω_e 表示(大致0.02~0.2m/s)
- **实际测量表明：对于粒径在亚微米区的粒子（100nm~1.0 μm ），除尘效率有增大的趋势。最低捕集效率区在0.1~0.5微米。**

第3.5节 电除尘器

粉尘种类	驱进速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	粉尘种类	驱进速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
煤粉（飞灰）	0.10~0.14	冲天炉（铁—焦比=10）	0.03~0.04
纸浆及造纸	0.08	水泥生产（干法）	0.06~0.07
平炉	0.06	水泥生产（湿法）	0.10~0.11
酸雾（ H_2SO_4 ）	0.06~0.08	多层床式焙烧炉	0.08
酸雾（ TiO_2 ）	0.06~0.08	红磷	0.03
氧气转炉	0.08	石膏	0.16~0.20
催化剂粉尘	0.08	二级高炉（80%生铁）	0.125

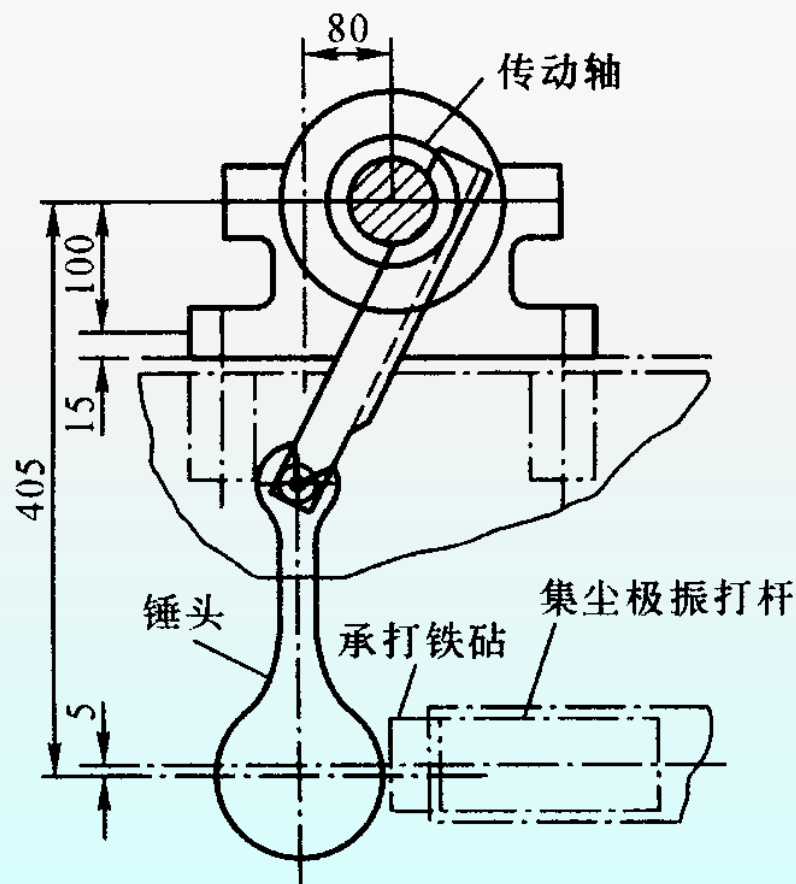
第3.5节 电除尘器

4、被捕集粉尘的清除

- 电晕极和集尘极上都会有粉尘沉积
- 粉尘沉积在电晕极上会影响电晕电流的大小和均匀性，一般方法采取振打清灰方式清除；
- 从集尘极清除已沉积的粉尘的主要目的是防止粉尘重新进入气流。
 - 在湿式电除尘器中，用水冲洗集尘极板。无二次扬尘，效率高。主要问题是清灰水的处理及设备腐蚀。
 - 在干式电除尘器中，一般用机械撞击或电极振动产生的振动力清灰。有利于回收有经济价值的粉尘，但易产生二次扬尘。

第3.5节 电除尘器

现代的电除尘器大都采用**电磁振打或锤式振打**清灰。振打系统要求既能产生高强度的振打力，又能调节振打强度和频率，常用的振打器有电磁型和挠臂锤型。



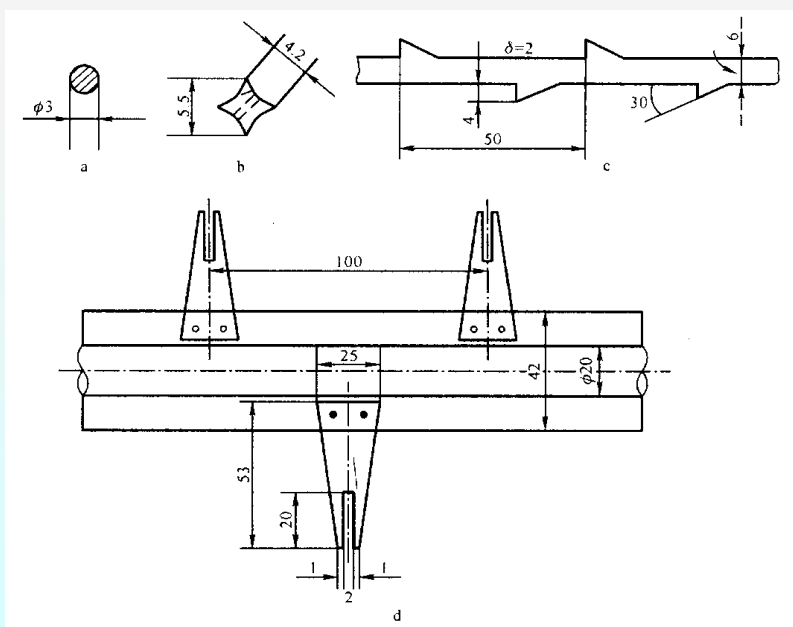
挠臂锤型振打装置

第3.5节 电除尘器

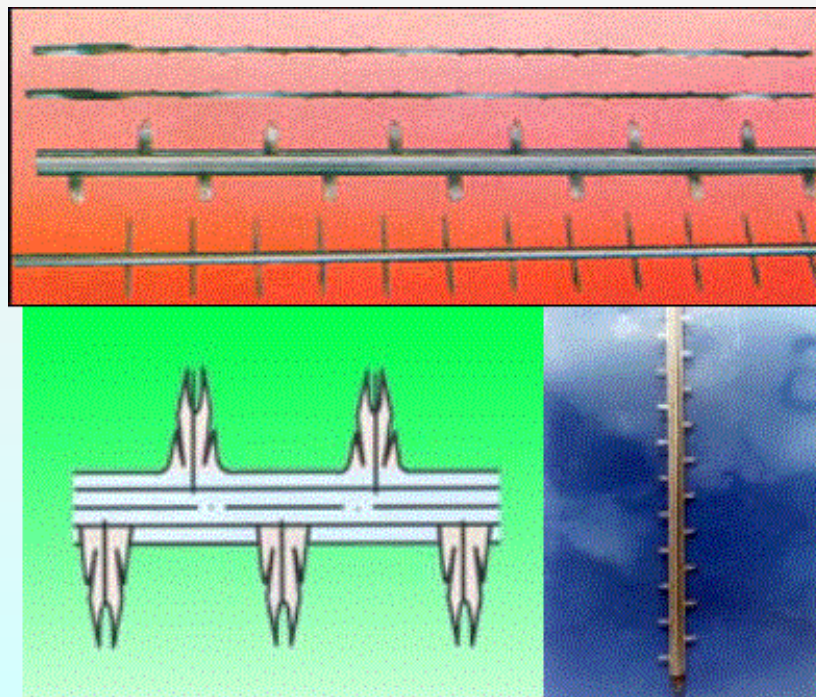
四、电除尘器结构

➤ 电晕电极

电晕线的一般要求：起晕电压低、电晕电流大、机械强度高、能维持准确的极距、易清灰等。



a. 圆形线 b. 星形线 c. 锯齿线 d. 芒刺线



第3.5节 电除尘器

◆ 电晕线固定方式

◆ 重锤悬吊式

◆ 管框绷线式

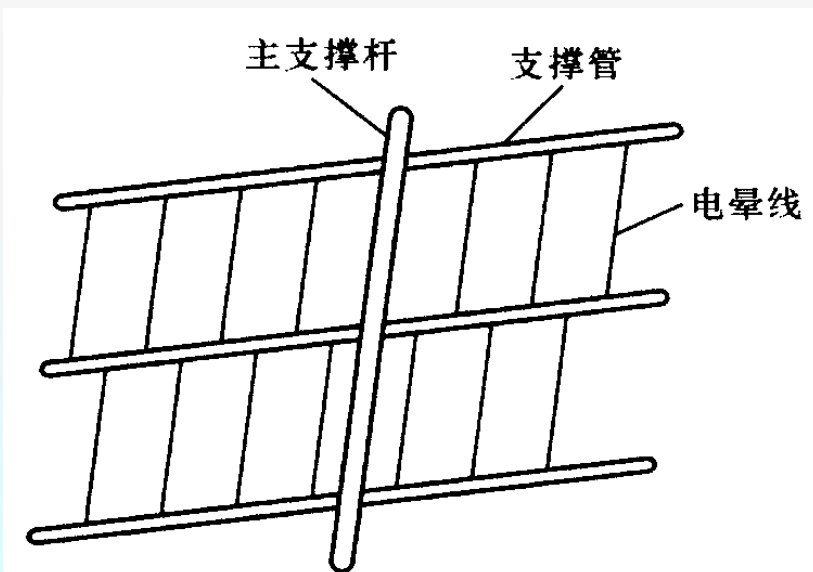


图 6-25 管框绷线式电晕极示意图

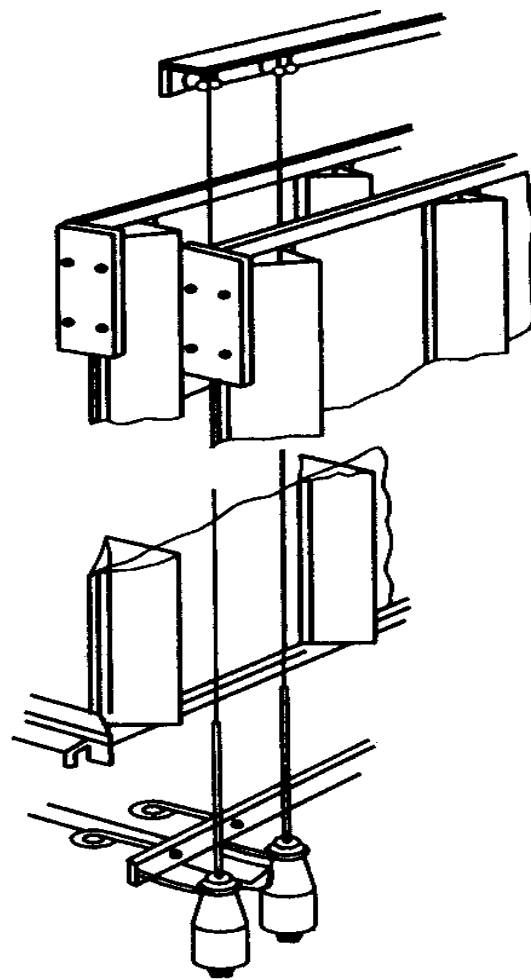


图 6-24 重锤悬吊式电晕极示意图

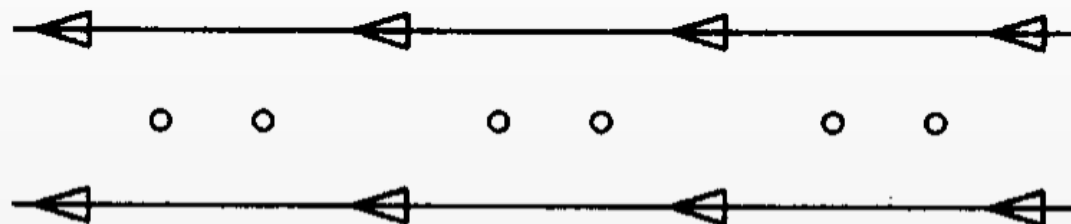
第3.5节 电除尘器

➤ 集尘极

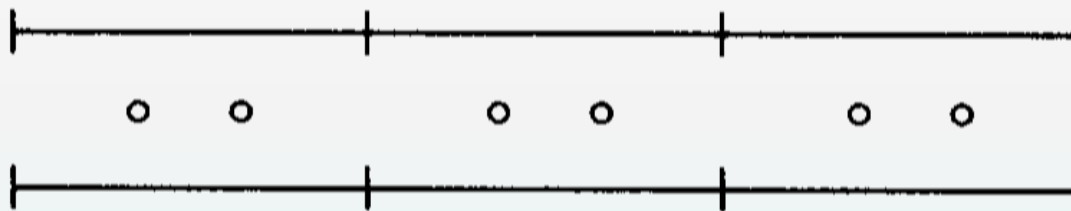
- ✓ 集尘极结构对粉尘的二次扬起，及除尘器金属消耗量（约占总耗量的40%~50%）有很大影响；
- ✓ 性能良好的集尘极应满足下述基本要求
 - ◆ 振打时粉尘的二次扬起少；
 - ◆ 单位集尘面积消耗金属量低；
 - ◆ 极板高度较大时，应有一定的刚性，不易变形；
 - ◆ 振打时易于清灰，造价低。

第3.5节 电除尘器

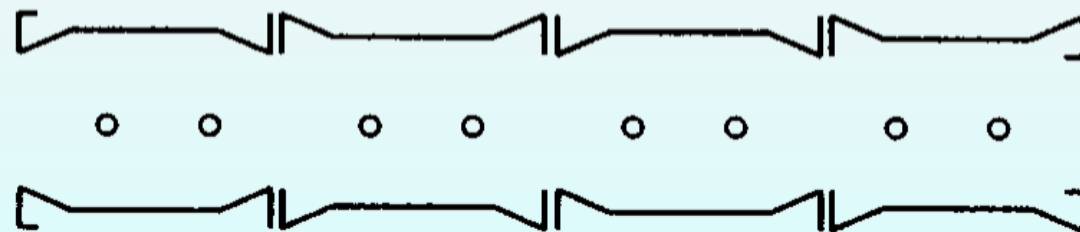
◆ 常用板式电除尘器集尘极



V型板



折流板



典型折流板结构设计

第3.5节 电除尘器

➤ 气流分布板

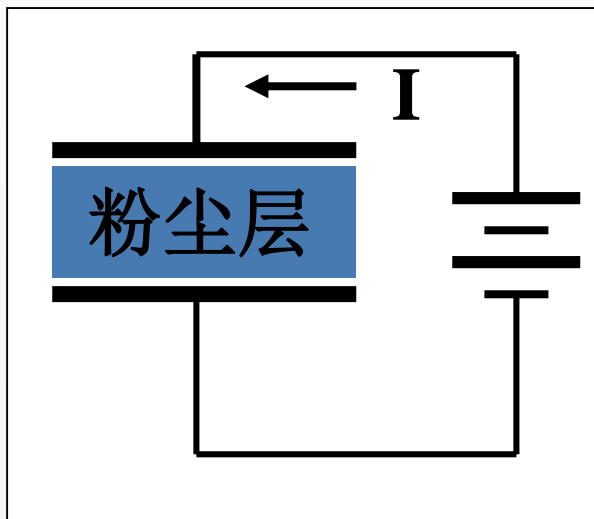
- ◆ 为保证气流分布均匀，在进出口处应设变径管道，进口变径管内应设气流分布板；
- ◆ 最常见的气流分布板有百叶窗式、多孔板分布格子、槽形钢式和栏杆型分布板。

■ 对气流分布的具体要求是

- 任何一点的流速不得超过该断面平均流速的 $\pm 40\%$ ；
- 在任何一个测定断面上，85%以上测点的流速与平均流速不得相差 $\pm 25\%$ 。

第3.5节 电除尘器

五 粉尘比电阻



$$\rho_d = \frac{V}{j\delta} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

- 比电阻过高或过低都会大大降低电除尘器的除尘效率，适宜的范围是从 $10^3 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm} \sim 1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

第3.5节 电除尘器

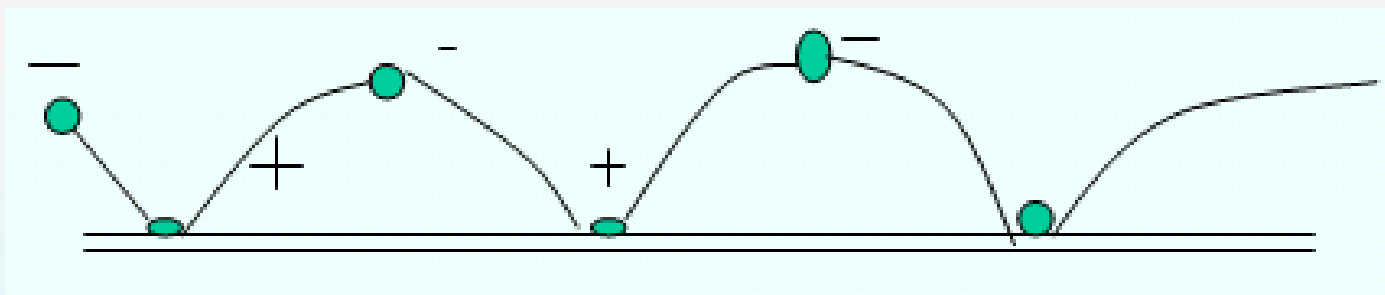
➤ 高比电阻粉尘对电除尘器性能的影响

- ✓ 高比电阻粉尘既不易荷电，也不易放电，到达集尘极后，残留部分电荷，对随后而至的同性电荷颗粒产生排斥，阻止其沉降。
- ✓ 高于 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 时，产生明显反电晕——随着颗粒层变厚，会在表面与极板间造成大的电压降，发生电晕放电。这种在集尘板上的电晕放电叫反电晕放电，其结果产生大量正离子，部分或全部中和颗粒所带负电荷，导致除尘效率下降。

第3.5节 电除尘器

► 低比电阻粉尘对电除尘器性能的影响

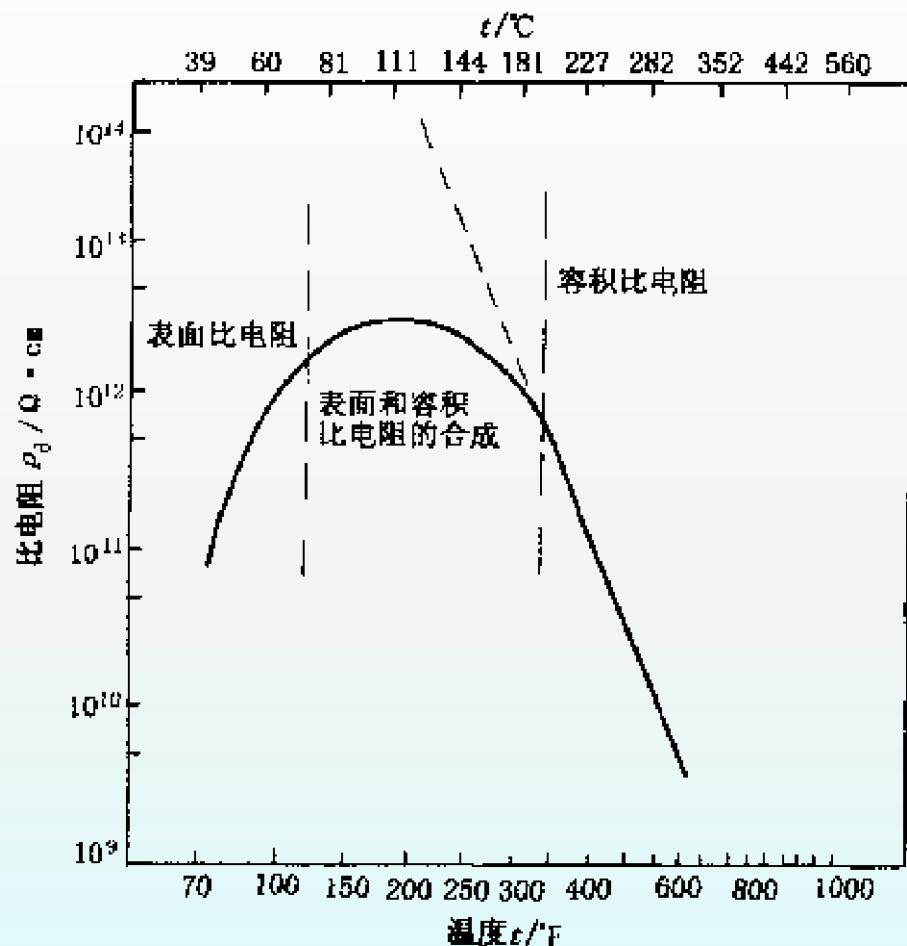
- ✓ 如果灰尘的比电阻小于 $10^3 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ，则易荷电，也易放电，粉尘到达集尘极后很快放出电荷并马上因静电感应获得与集尘极相同的电荷而被排斥出去。



- ✓ 用电除尘器处理各种金属粉尘和石墨粉尘、炭黑粉尘都可以看到这一现象。

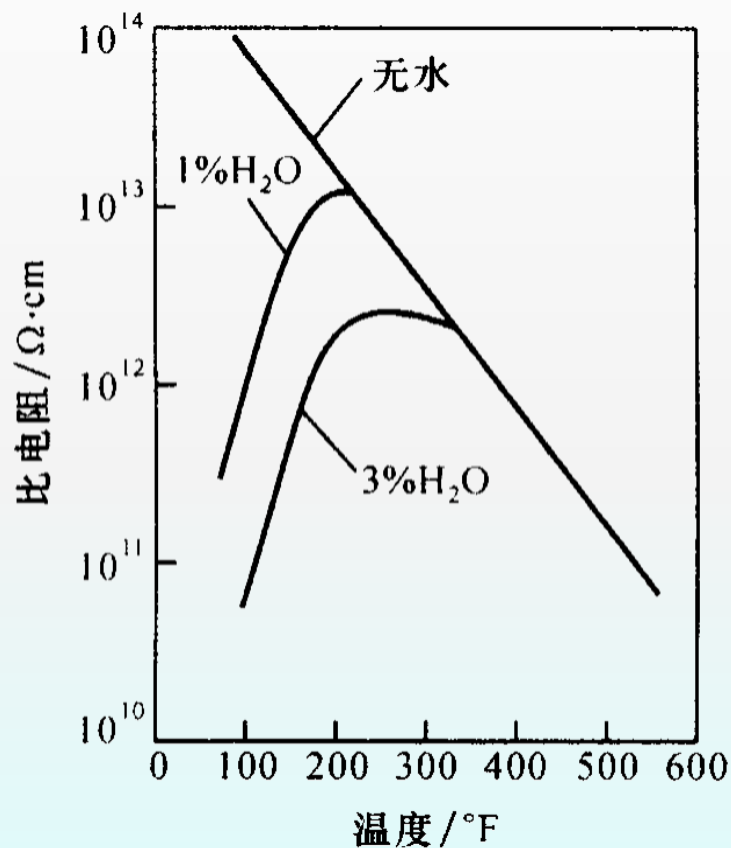
第3.5节 电除尘器

粉尘的导电性主要取决于粉尘、气体的温度和组成成分。在温度较高时(约高于200度), 粉尘的导电主要靠粉尘内部的电子或离子进行(即容积导电); 而在较低温度时(约低于100度), 则主要靠粉尘表面吸附的水分和化学膜进行(即表面导电)。

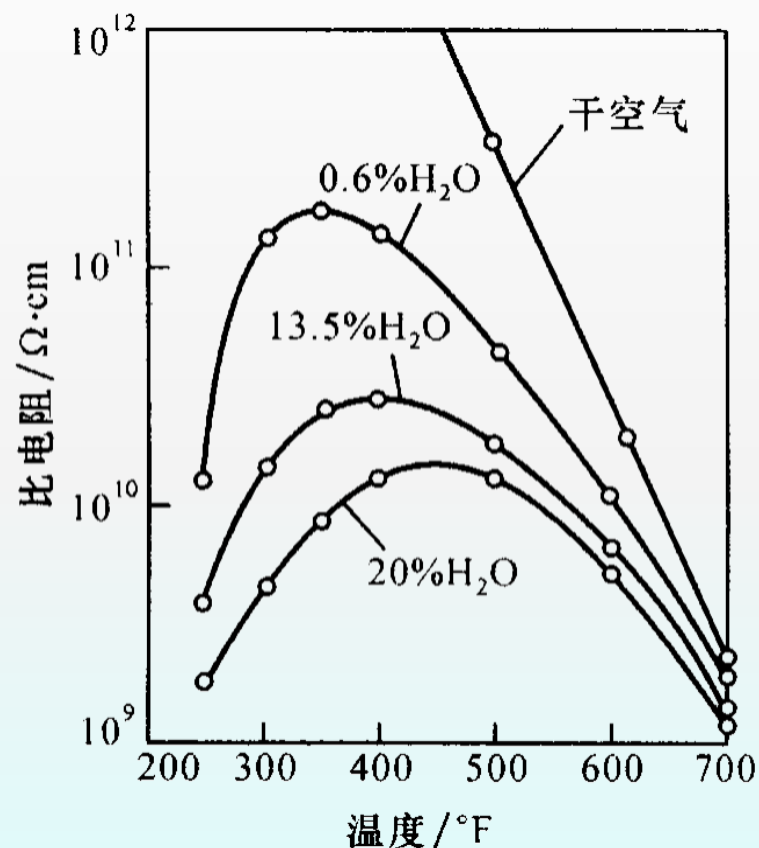


第3.5节 电除尘器

◆ 烟气湿度和温度对粉尘比电阻的影响



a. 飞灰



b. 水泥窑粉尘

第3.5节 电除尘器

◆ 克服高比电阻影响的方法

- 保持电极表面尽可能清洁
- 烟气调质
 - ◆ 增加烟气湿度，或向烟气中加入 SO_3 、 NH_3 ，及 Na_2CO_3 等化合物，使粒子导电性增加。最常用的化学调质剂是 SO_3
 - ◆ 改变烟气温度
 - ◆ 烟气温度调至403 K以下或623 K以上，可使粉尘有较高的导电性向烟气中喷水，可以同时增加烟气湿度和降低温度

第3.6节 过滤式除尘器

3.6 过滤式除尘器

一 工作机理与特点

又称空气过滤器，是利用多孔过滤介质分离捕集气体中固体或液体粒子的净化装置，属于高效干式除尘装置。

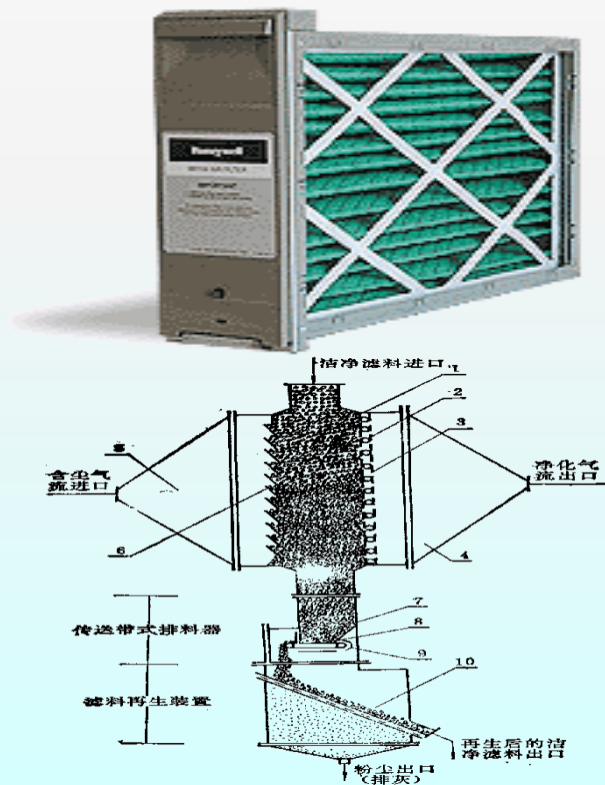
◇ 分类

➤空气过滤器

- 滤纸或玻璃纤维

➤颗粒层除尘器

- 砂、砾、焦炭等颗粒物



第3.6节 过滤式除尘器

➤袋式除尘器

• 纤维织物

- 采用纤维织物作滤料的袋式除尘器，在工业尾气的除尘方面应用较广；
- 除尘效率一般可达99%以上；
- 效率高，性能稳定可靠、操作简单，因而获得越来越广泛的应用。

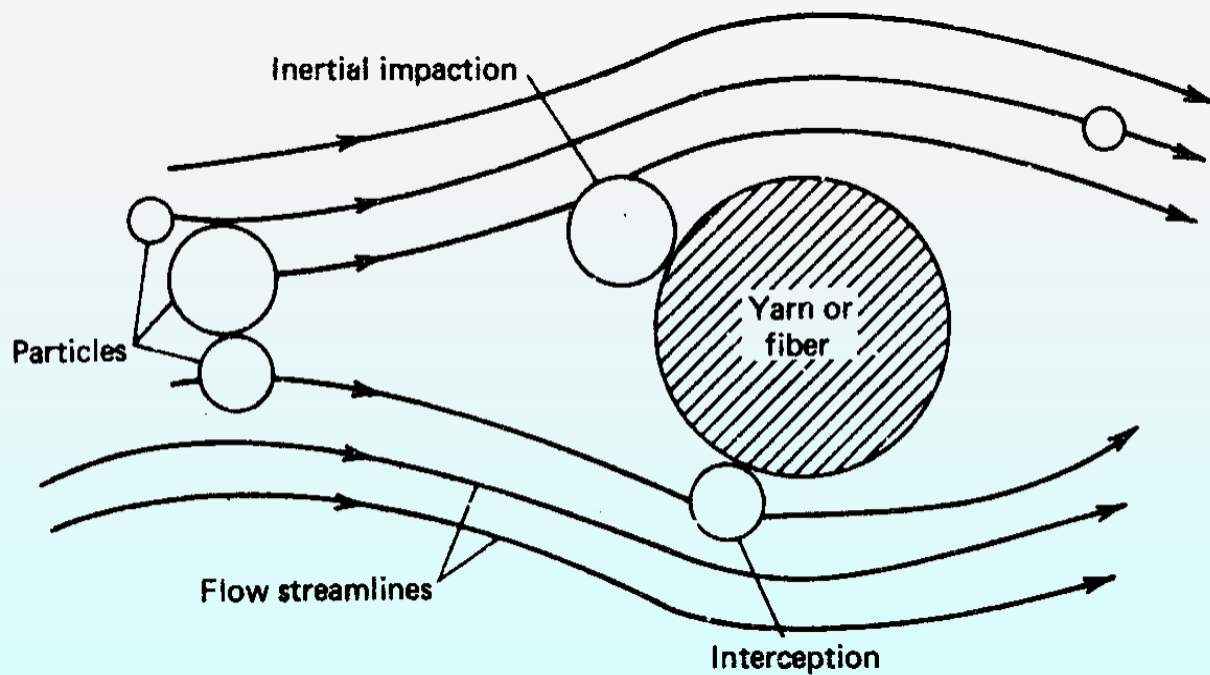


第3.6节 过滤式除尘器

◆ 除尘器工作原理

◇ 工作原理

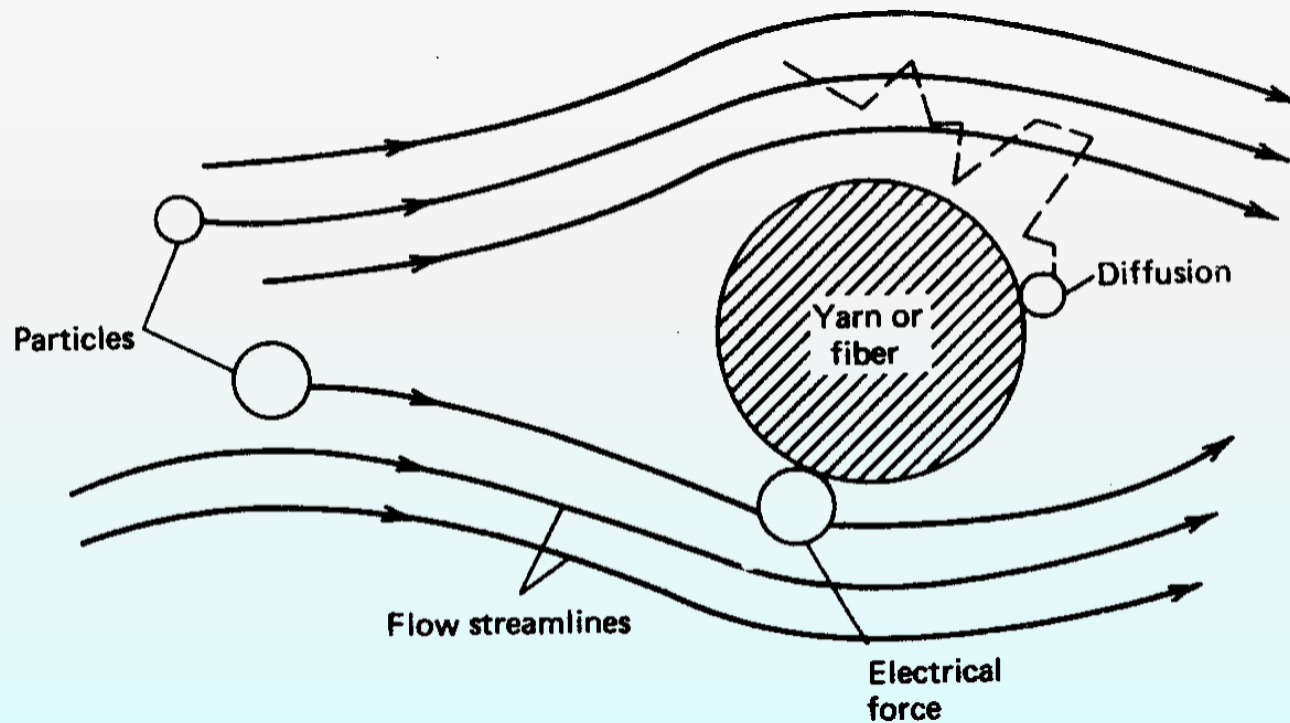
◇ 拦截、惯性碰撞



第3.6节 过滤式除尘器

◆ 工作原理

◆ 扩散、电沉积



第3.6节 过滤式除尘器

各种捕集机理作用的粒度范围

序号	机理	粒度范围	风速增高对机理效率的影响
1	拦截	$>1\mu\text{m}$	降低
2	惯性碰撞	$>1\mu\text{m}$	增高
3	扩散	$<0.01\sim0.5\mu\text{m}$	降低
4	静电	$<0.01\sim5\mu\text{m}$	降低
5	筛滤	$>$ 过滤层微孔尺寸	降低

第3.6节 过滤式除尘器

- ◆ 粉尘因拦截、惯性碰撞、静电和扩散等作用，在滤袋表面形成粉尘层，常称为粉层初层。

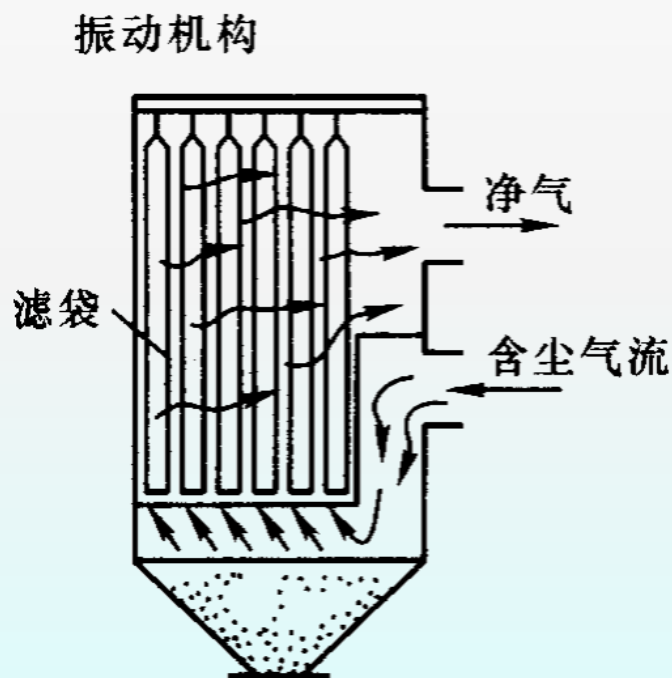


图 6-41 机械振动袋式除尘器

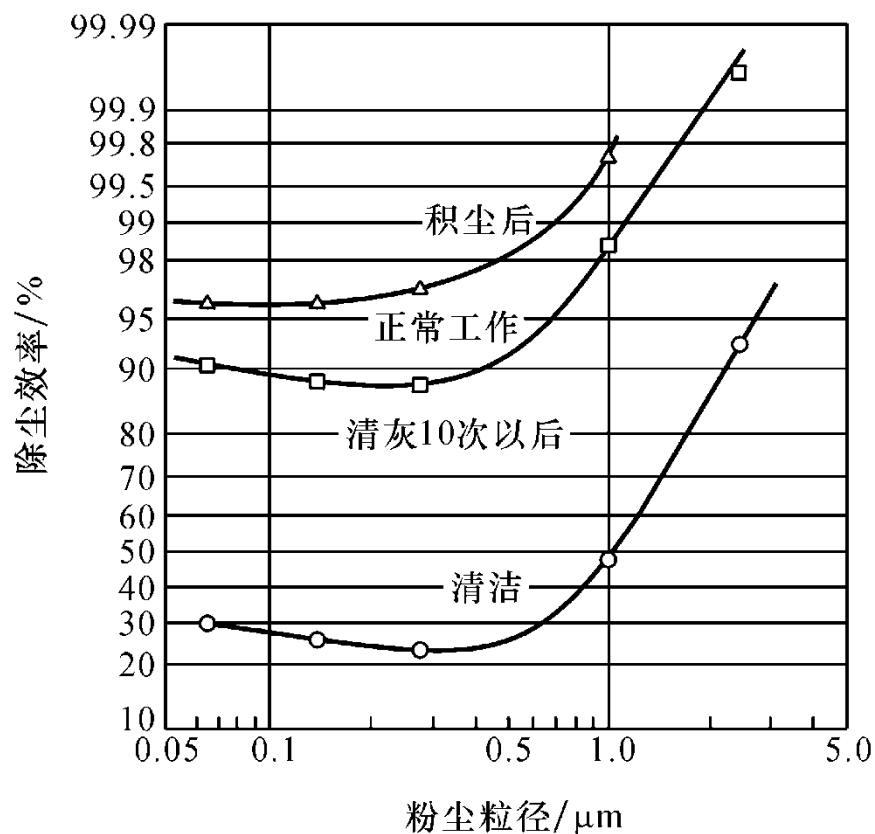
第3.6节 过滤式除尘器

- ◆ 新鲜滤料（网孔为 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ）的除尘效率较低；
- ◆ 粉尘初层形成后，成为袋式除尘器的主要过滤层，提高了除尘效率；
- ◆ 随着粉尘在滤袋上积聚，滤袋两侧的压力差增大，会把已附在滤料上的细小粉尘挤压过去，使除尘效率下降。
- 除尘器压力过高，还会使除尘系统的处理气体量显著下降，因此除尘器阻力达到一定数值后，要及时清灰；
- 清灰不应破坏粉尘初层。

第3.6节 过滤式除尘器

二 除尘效率与压损

1 袋式除尘器的分级效率曲线



第3.6节 过滤式除尘器

2 袋式除尘器除尘效率的影响因素

- 粉尘负荷 m ——单位面积滤布上的积尘量 (kg/m^2) 。

m 增大时，除尘效率提高，但滤布的积尘量太大，除尘效率反而降低，压损增大，气体处理量减小。

$$v = \frac{Q}{A}$$

- 过滤速度

- ◆ 烟气实际体积流量与滤布面积之比，也称气布比
- ◆ 选用高的过滤速度，所需要的滤布面积小，除尘器体积、占地面积和一次投资等都会减小，但除尘器的压力损失却会加大。而且一般来讲，除尘效率随过滤速度增加而下降

第3.6节 过滤式除尘器

3 袋式除尘器的压力损失

- ΔP_f — 通过洁净滤料的压力损失，100~130Pa;
- ΔP_p — 通过粉尘层（dust cake）的压力损失;
- 两者均可以用达西定律表示

$$\frac{\Delta P}{x} = \frac{v\mu_g}{K}$$

K — 粉尘或滤料的渗透率（permeability），由实验测定

x — 粉尘或滤料的厚度

渗透率 K 是沉积粉尘层性质，如孔隙率、比表面积、孔隙大小分布和粉尘粒径分布等的函数

第3.6节 过滤式除尘器

袋式除尘器的压力损失

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p = \frac{x_f \mu_g \nu}{K_f} + \frac{x_p \mu_g \nu}{K_p}$$

- ◆ 对于给定的滤料和操作条件，滤料的压力损失基本上是一个常数；
- ◆ 通过袋式除尘器的压力损失的变化主要由**粉尘层决定**。

第3.6节 过滤式除尘器

三 袋式除尘器的滤料

◇ 对滤料的要求

- 容尘量大、吸湿性小、效率高、阻力低；
- 使用寿命长，耐温、耐磨、耐腐蚀、机械强度高；
- 表面光滑的滤料容尘量小，清灰方便，适用于含尘浓度低、粘性大的粉尘，采用的过滤速度不宜过高；
- 表面起毛（绒）的滤料容尘量大，粉尘能深入滤料内部，可以采用较高的过滤速度，但必须及时清灰。

第3.6节 过滤式除尘器

◇ 滤料种类

◇ 按滤料材质分

◆ 天然纤维

- ◇ 棉毛织物，适于无腐蚀、350~360K以下气体；

◆ 无机纤维

- ◇ 主要指玻璃纤维，化学稳定性好，耐高温，质地脆；

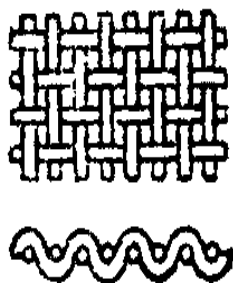
◆ 合成纤维

- ◇ 性能各异，满足不同需要，扩大除尘器的应用领域。

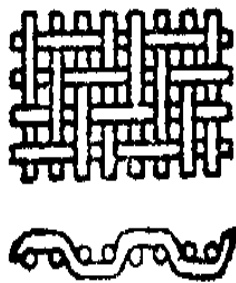
第3.6节 过滤式除尘器

◆ 滤料种类

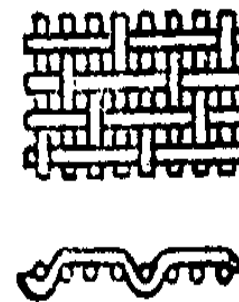
◆ 按滤料结构分：滤布（编织物）



平纹编织



斜纹编织



缎纹编织

- ◆ 平纹滤布：交织点近，纱线相互压紧，滤布致密，效率高，透气性差，阻力大，易堵；

第3.6节 过滤式除尘器

- ◆ 斜纹：机械强度略低于平纹，易错位，耐磨性好，效率高、易清灰，不易堵，较常用；
- ◆ 缎纹滤布，透气性和弹性都较好，易清灰，但强度低，效率低；
- ◆ 毛毡
 - 工艺简单；致密，除尘效率高；容尘量小，易于清灰。

第3.6节 过滤式除尘器

滤料名称	直径/ μm	耐温性能/K		吸水率/ %	耐酸性	耐碱性	强度
		长期	最高				
棉织物（植物短纤维）	10~20	348~358	368	8	很差	稍好	1
蚕丝（动物长纤维）	18	353~363	373	16~22			
羊毛（动物短纤维）	5~15	353~363	373	10~15	稍好	很差	0.4
尼龙		348~358	368	4.0~4.5	稍好	好	3.5
奥纶		398~408	423	6	好	差	1.6
涤纶（聚脂）		413	433	6.5	好	差	1.6
玻璃纤维（用硅酮树脂处理）	5~8	523		4.0	好	差	1
芳香族聚酰胺（诺梅克斯）		493	533	4.5~5.0	差	好	3.5
聚四氟乙烯		493~523		0	很好	很好	3.5

第3.6节 过滤式除尘器

四 袋式除尘器的结构型式

- ◆ 按滤袋形状——筒形和扁形
- ◆ 按进气方式——上进气和下进气
- ◆ 按清灰方式——简易清灰、机械振动清灰、逆气流清灰和脉冲喷吹清灰等。

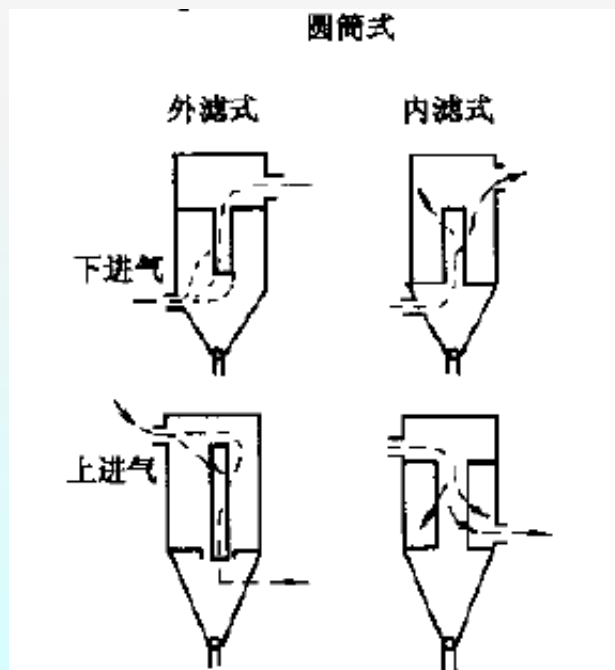
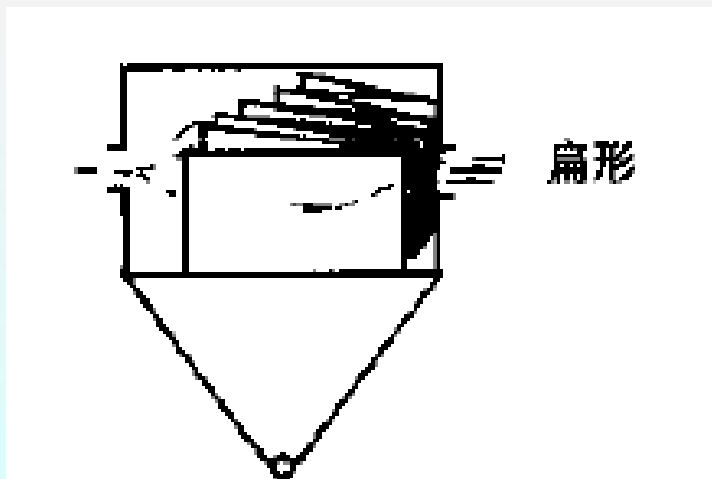


图 7-8 袋式除尘器型式

第3.6节 过滤式除尘器

五 袋式除尘器的清灰

- ◆ 清灰是袋式除尘器运行中十分重要的一环，多数袋式除尘器是按清灰方式命名和分类的
- ◆ 常用的清灰方式有三种
 - ◆ 机械振动式
 - ◆ 逆气流清灰
 - ◆ 脉冲喷吹清灰

第3.6节 过滤式除尘器

□ 机械振动清灰

- ◆ 机械振动袋式除尘器的过滤风速一般取 $1.0\sim 2.0\text{m/min}$ ，压力损失为 $800\sim 1200\text{Pa}$

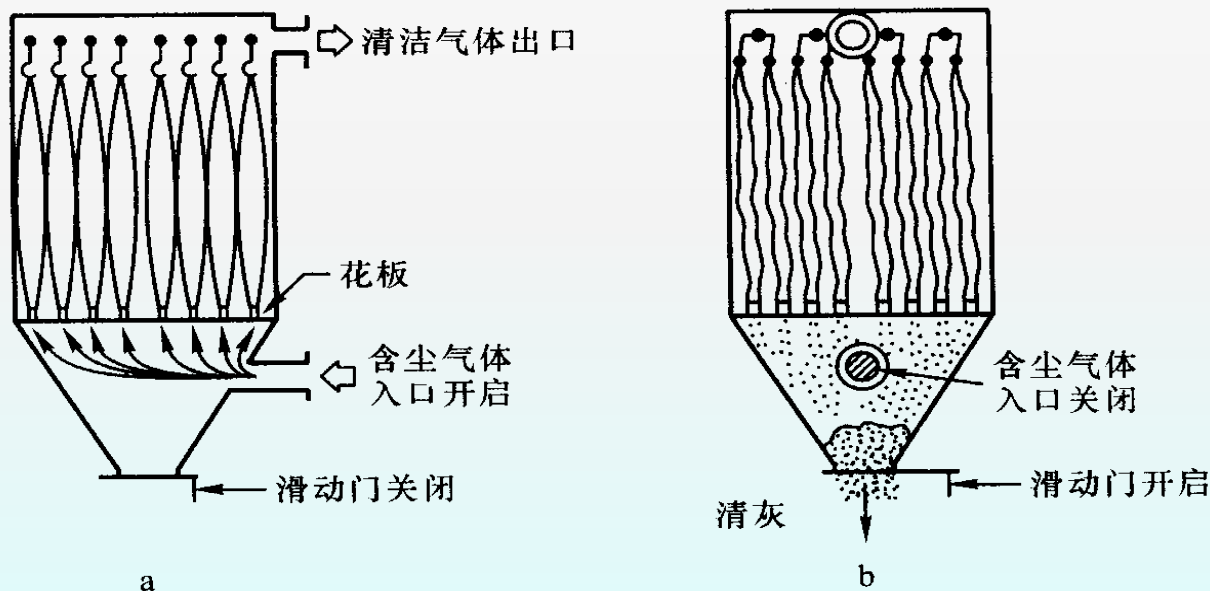


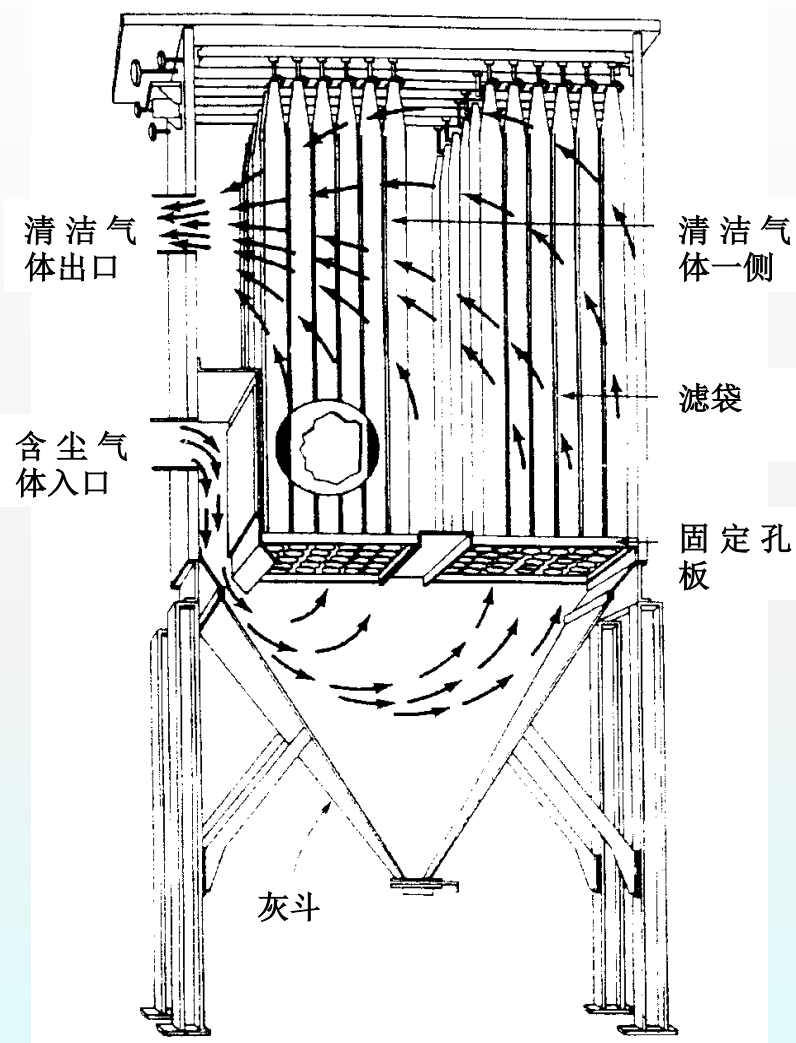
图 6-44 机械振动袋式除尘器工作过程

a. 过滤; b. 清灰

第3.6节 过滤式除尘器

机械振动清灰

- ◆ 此类型袋式除尘器的优点是工作性能稳定，清灰效果较好；
- ◆ 缺点是滤袋常受机械力作用，损坏较快，滤袋检修与更换工作量大。



典型机械振动式布袋除尘器

第3.6节 过滤式除尘器

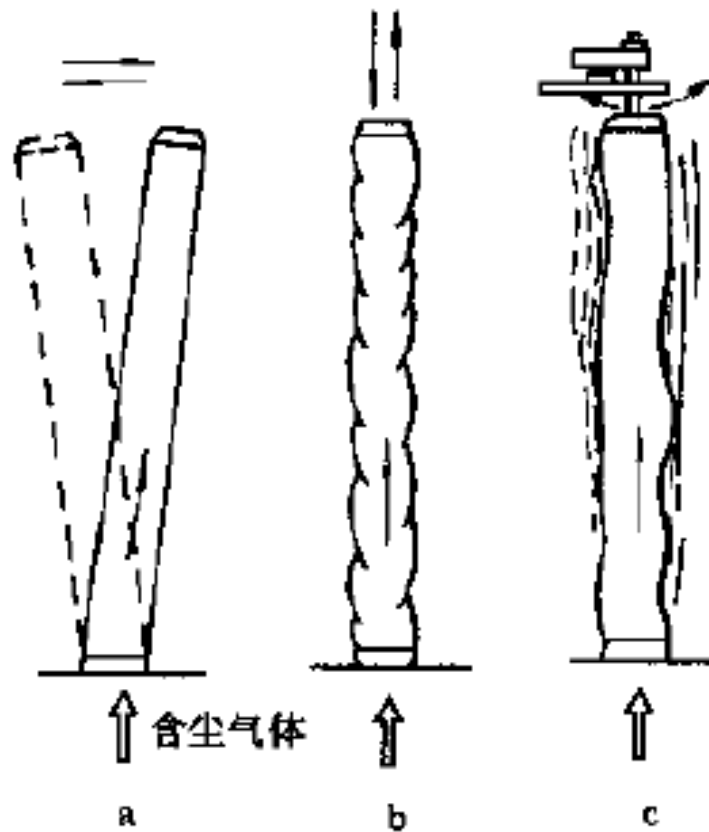


图 7-11 机械清灰的振动方式

a: 水平振动; b: 垂直振动; c: 扭曲振动

第3.6节 过滤式除尘器

▣ 逆气流清灰

- ◆ 过滤风速一般为 $0.5\sim 2.0\text{m/min}$ ，压力损失控制范围 $1000\sim 1500\text{Pa}$ ；
- ◆ 这种清灰方式的除尘器结构简单，清灰效果好，滤袋磨损少，特别适用于粉尘粘性小，玻璃纤维滤袋的情况。

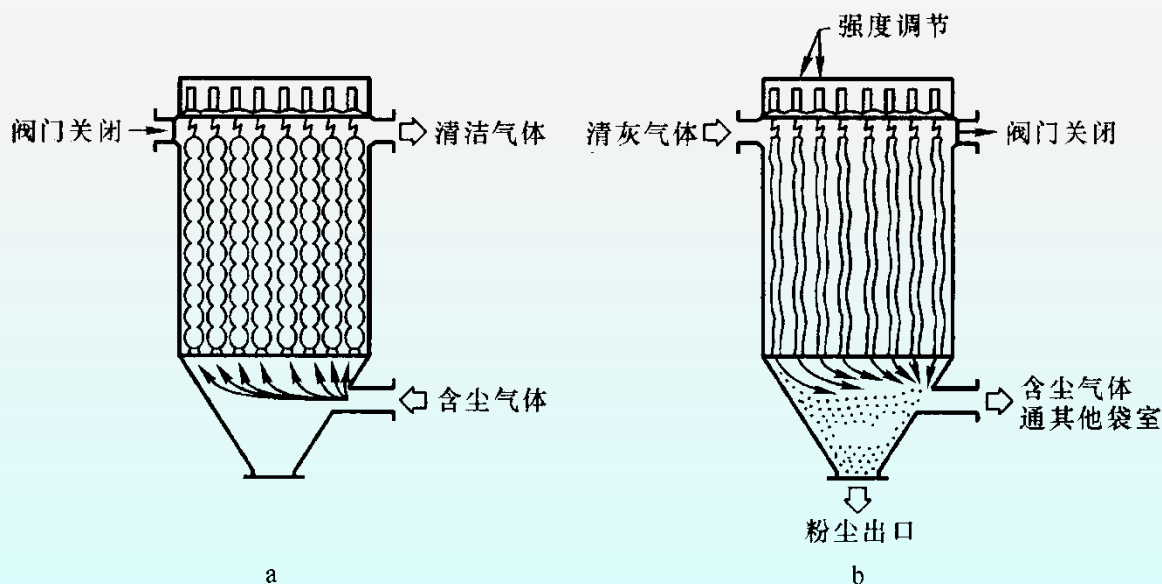


图 6-45 逆气流清灰袋式除尘器工作过程

a. 过滤; b. 清灰

第3.6节 过滤式除尘器

□ 脉冲式清灰

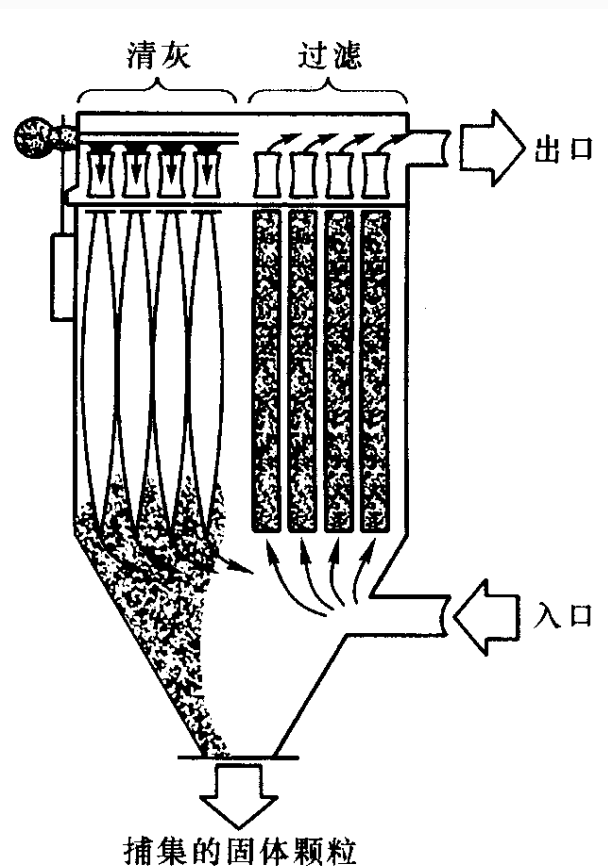


图 6-46 脉冲喷吹清灰袋式除尘器

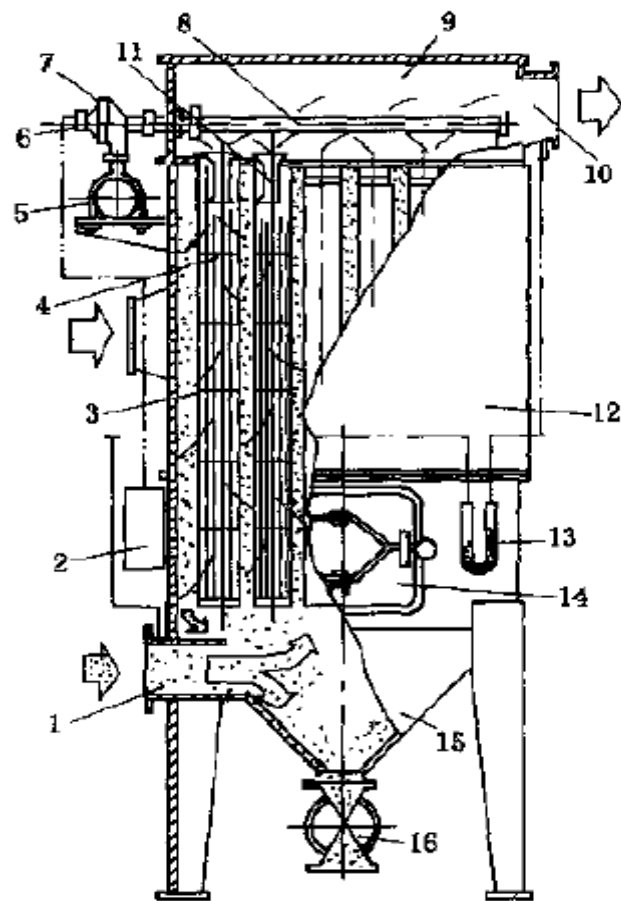


图 7-13 脉冲喷吹袋式除尘器的结构

- 1. 进气口; 2. 控制仪; 3. 滤袋; 4. 滤袋框架;
- 5. 气包; 6. 排气阀; 7. 脉冲阀; 8. 喷吹管;
- 9. 净气箱; 10. 净气出口; 11. 文氏管; 12. 除尘箱;
- 13. U形压力计; 14. 检修门; 15. 灰斗; 16. 卸尘阀

第3.6节 过滤式除尘器

六 袋式除尘器的应用

◆ 应用

- ◆ 袋式除尘器作为一种高效除尘器，广泛用于各种工业部门的尾气除尘；
- ◆ 比电除尘器结构简单、投资省、运行稳定，可以回收高比电阻粉尘；
- ◆ 与文丘里洗涤器相此，动力消耗小，回收的干粉尘便于综合利用；
- ◆ 对于微细的干燥粉尘，采用袋式除尘器捕集最适宜。

第3.6节 过滤式除尘器

优点

- 除尘效率高，处理量大
- 结构简单，造价及运行费用低
- 可提高干法脱硫的脱硫率

缺点

- 体积和占地面积都很大
- 处理高温、高湿度、腐蚀性气体应慎选滤袋
- 滤袋易破损
- 阻力损失大

第3.7节 湿式除尘器

3.7 湿式除尘器

一 除尘机理与特点

➤ 优点：

- ① 不仅可以除去粉尘，还可净化气体；
- ② 效率较高（高于干式机械除尘器），可去除的粉尘粒径较小；
- ③ 体积小，占地面积小；
- ④ 能处理高温、高湿的气流。

➤ 缺点：

- ① 有泥渣；
- ② 需防冻（冬天）；
- ③ 易腐蚀设备；
- ④ 动力消耗大。

第3.7节 湿式除尘器

3.7 湿式除尘器

机理

使含尘气体与液体（一般为水）密切接触，利用水滴和尘粒的惯性碰撞及其它作用捕集尘粒或使粒径增大的装置。

- ① 液体介质与尘粒间的惯性碰撞和拦截（1~5微米）；
- ② 微细尘粒与液滴间的扩散接触；
- ③ 加湿的尘粒相互凝并；
- ④ 饱和态高温烟气降温时，以尘粒为凝结核凝结。

第3.7节 湿式除尘器

二 湿式除尘器的除尘机理

◇ 惯性碰撞参数与除尘效率

◇ 定义**惯性碰撞参数** N_I ：停止距离 x_s 与液滴直径 d_D 的比值

◇ 对斯托克斯粒子

$$N_I = \frac{x_s}{d_D} = \frac{d_p^2 \rho_p (u_p - u_D) C}{9 \mu d_D}$$

u_p ：粒子运动速度； u_D ：液滴运动速度； d_D ：液滴直径

第3.7节 湿式除尘器

- ◆ 除尘效率： N_I 值越大，粒子惯性越大，则 η 越高
- ◆ 对于粘性流，

$$\eta = 1 - \exp(-KL\sqrt{N_I})$$

K —关联系数，其值取决于设备几何结构和系统操作条件

L —液气比， $L/1000\text{m}^3$ 气体

当颗粒直径和密度确定以后，**碰撞系数与液滴之间的相对速度成正比，而与液滴直径成反比**。所以对于给定的烟气系统，要提高 N 值，必须**提高液气相对运动速度**和**减小液滴直径**。目前工程上常用的各种湿式除尘器基本上是围绕这两个因素发展起来的。

第3.7节 湿式除尘器

液滴直径并非越小越好，直径过小的液滴易随气流一起流动，减小了液气相对运动的速度；对于给定尘粒的最大除尘效率应有一个最佳液滴直径。一般 $d_D > 100\mu\text{m}$ 。

第3.7节 湿式除尘器

三 常见湿式除尘器形式

◆ 主要湿式除尘装置的性能和操作范围

装置名称	气体流速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	液气比 $/\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$	压力损失/ Pa	分割直径 $/\mu\text{m}$
喷淋塔	0.1~2	2~3	100~500	3.0
填料塔	0.5~1	2~3	1000~2500	1.0
旋风洗涤器	15~45	0.5~1.5	1200~1500	1.0
转筒洗涤器	(300~750r/min)	0.7~2	500~1500	0.2
冲击式洗涤器	10~20	10~50	0~150	0.2
文丘里洗涤器	60~90	0.3~1.5	3000~8000	0.1

第3.7节 湿式除尘器

三 常见湿式除尘器形式

➤ 按能耗分为：高能和低能湿式除尘器

- 低能湿式除尘器的压力损失为 $0.2 \sim 1.5 \text{ kPa}$ ，对 $10 \mu\text{m}$ 以上

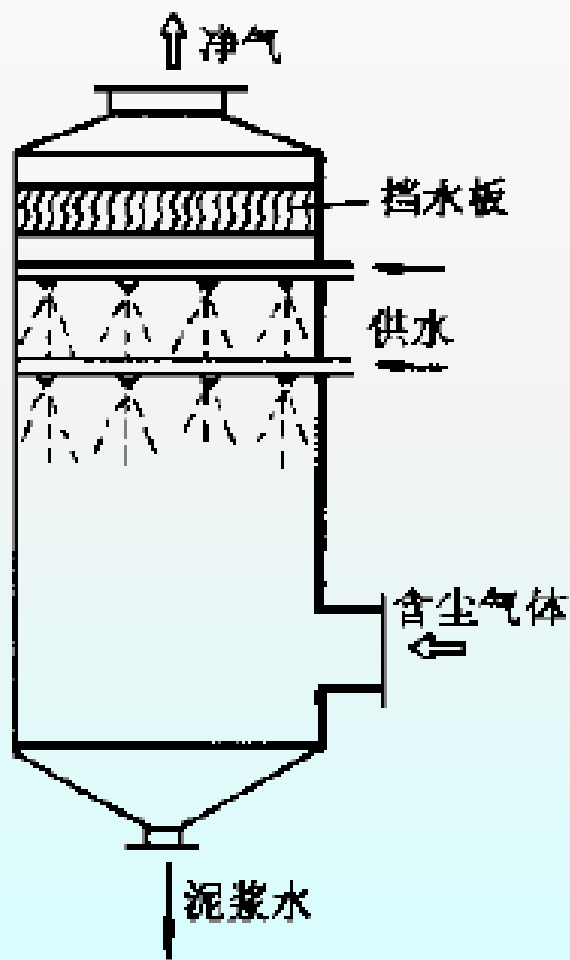
粉尘的净化效率可达 $90\% \sim 95\%$ ；

- 高能湿式除尘器的压力损失为 $3.5 \sim 9.0 \text{ kPa}$ ，净化效率可达

99.5% 以上。

第3.7节 湿式除尘器

喷雾塔洗涤器



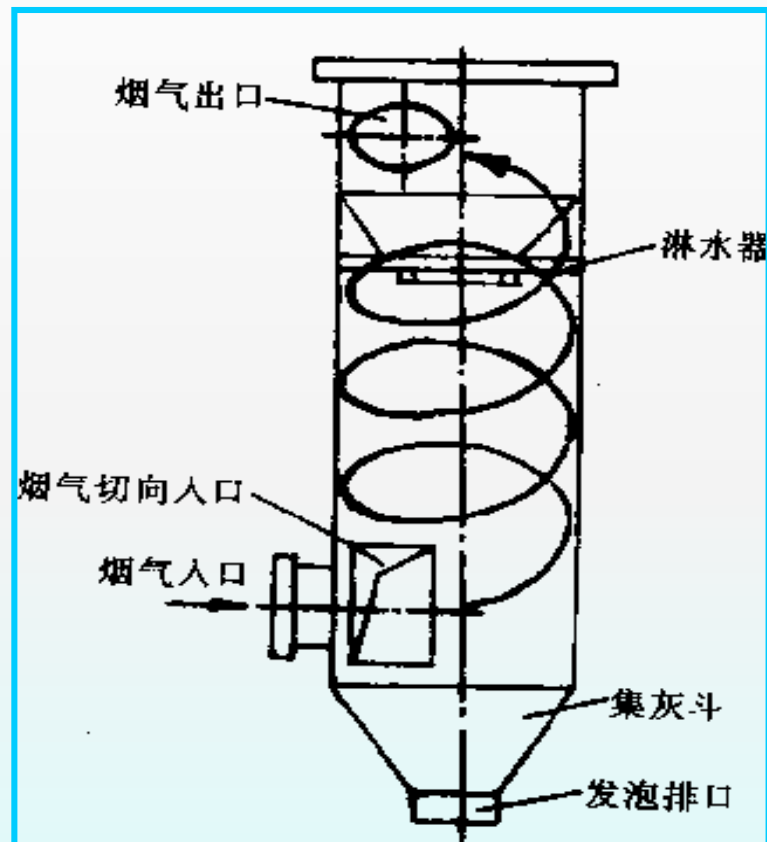
广泛用于净化大于50微米的颗粒，
对于小于10微米的颗粒，净化效率较
低，很少用于脱除气态污染物，常与高
效的联用，起净化和降温作用。严格控
制喷雾的组成，保证液滴大小均匀，对
有效的操作是很有必要

第3.7节 湿式除尘器

旋风洗涤器

干式旋风分离器内部以环形方式安装一排喷嘴，就构成一种最简单的旋风洗涤器；

喷雾作用发生在外涡旋区，并捕集尘粒，携带尘粒的液滴被甩向旋风洗涤器的湿壁上，然后沿壁面沉落到器底。



第3.7节 湿式除尘器

旋风洗涤器

含尘气流由筒体下部导入，旋转上升，水通过轴上安装的多头喷嘴喷出形成水雾与螺旋转气流相碰，使尘粒被捕集下来。

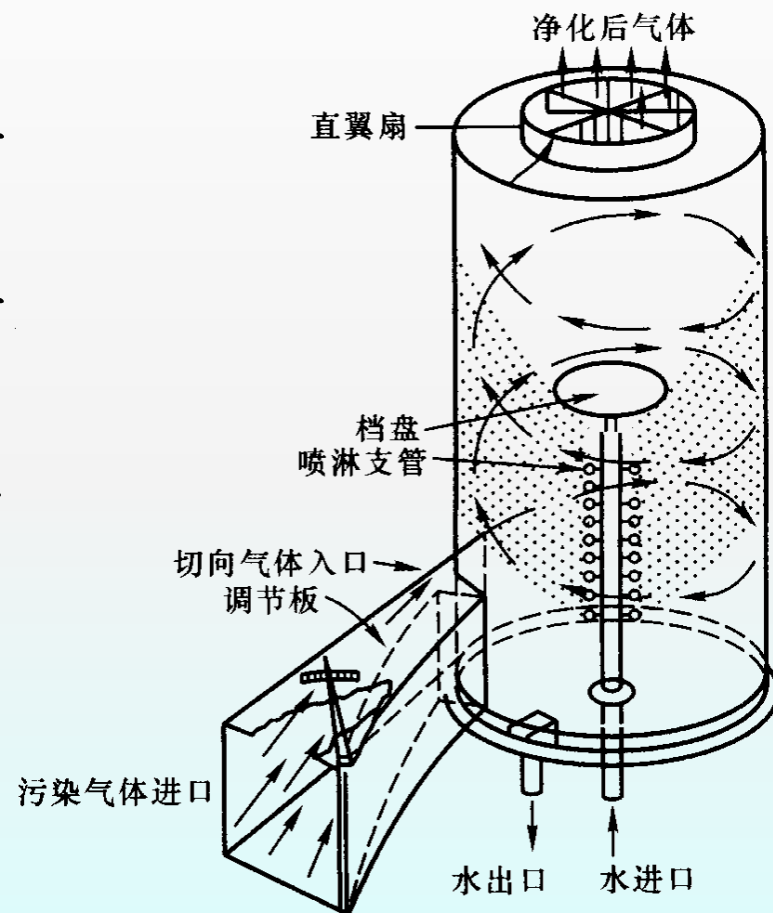
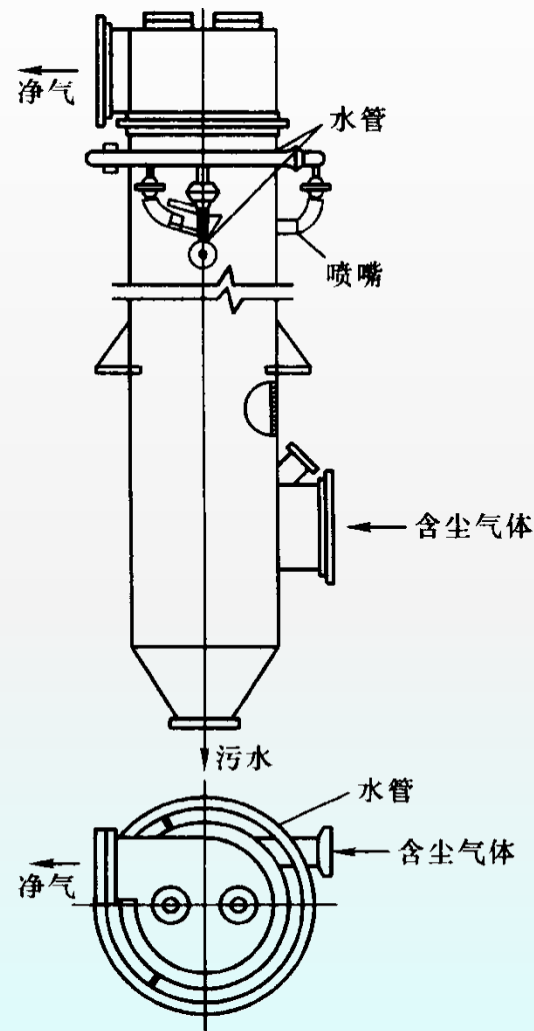


图 6-37 中心喷雾的旋风洗涤器

第3.7节 湿式除尘器

旋风水膜除尘器

含尘气流由筒体下部导入，旋转上升，
靠离心力甩向壁面的粉尘为水膜所粘附，
沿壁面流下排走，效率一般在90%以上。



旋风水膜除尘器

第3.7节 湿式除尘器

- ◆ 旋风洗涤器的压力损失范围一般为0.5~1.5kPa，可用下式进行估算

$$\Delta P = \Delta P_0 + \frac{Q_L}{Q_G} \rho_L \overline{u_D}^2$$

ΔP — 旋风洗涤器的压力损失，pa

ΔP_0 — 喷雾系统关闭时的压力损失，Pa

ρ_L — 液滴密度，kg/m³

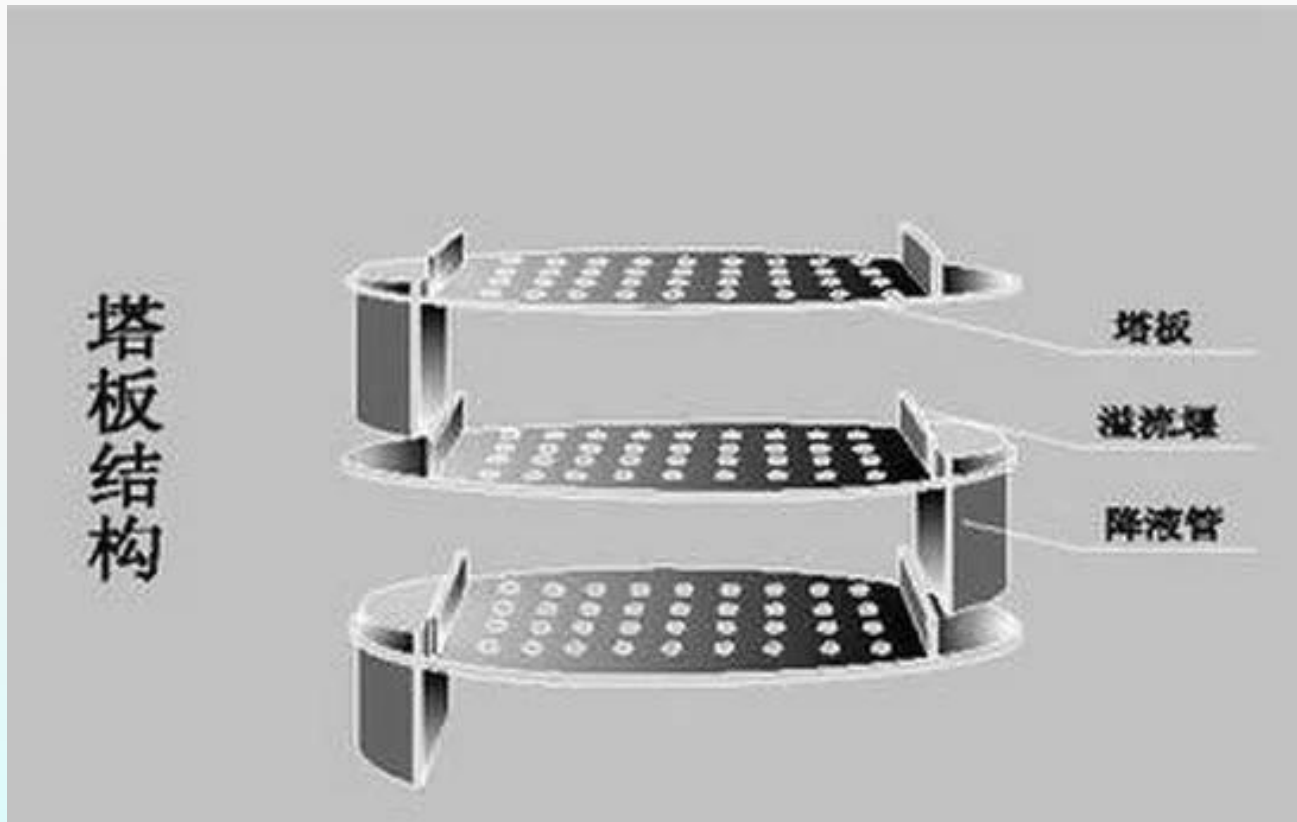
$\overline{u_D}$ — 液滴初始平均速度，m/s

第3.7节 湿式除尘器

- ◆ 离心洗涤器净化 $d_p < 5 \mu\text{m}$ 的尘粒仍然有效
- ◆ 耗水量 $L/G = 0.5 \sim 1.5 \text{L/m}^3$
- ◆ 适用于处理烟气量大，含尘浓度高的场合
- ◆ 可单独使用，也可安装在文丘里洗涤器之后作脱水器。

第3.7节 湿式除尘器

板式塔除尘器



第3.7节 湿式除尘器

文丘里洗涤器

◆ 文丘里洗涤器由文丘里管（简称文氏管）和脱水器两部分组成

◆ 文丘里管：包括收缩管、喉管、扩散管。

◆ 除尘过程

◆ 分为雾化、凝聚和脱水三个过程

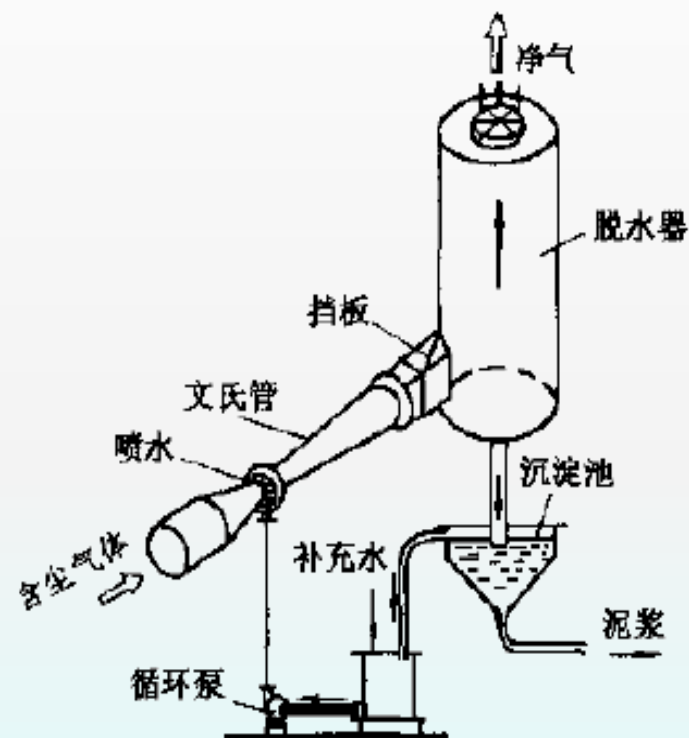


图 6-11 PA 型文丘里洗涤器

第3.7节 湿式除尘器

除尘过程

- 含尘气体进入收缩管后，流速逐渐增大，气流的压力能逐渐转变为动能。在喉管入口处，气速达到最大，一般为 **$50\sim 180\text{m/s}$** 。
- 水沿喉管周边均匀分布的喷嘴进入，液滴被高速气流雾化和加速。在液滴加速过程中，由于液滴与粒子之间惯性碰撞，实现微细尘粒的捕集。
- 充分的雾化**是实现高效除尘的基本条件

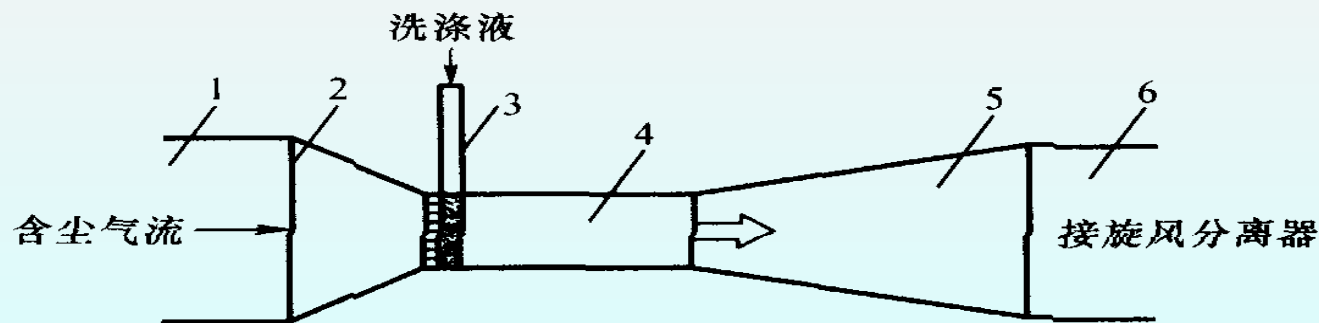
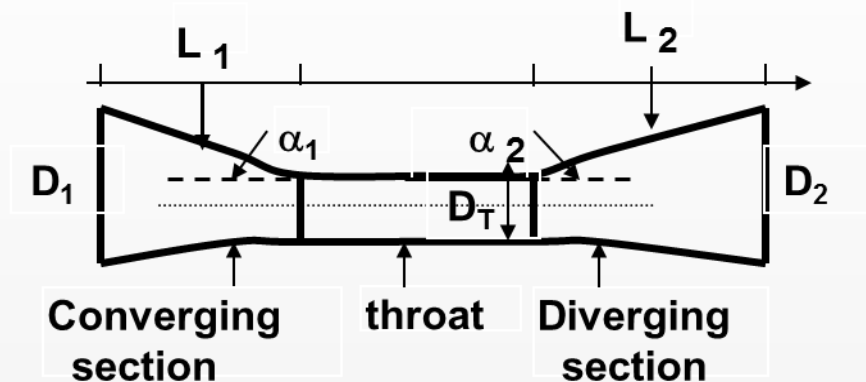


图 6-39 文丘里洗涤器示意图

1. 进气管; 2. 收缩管; 3. 喷嘴; 4. 喉管; 5. 扩散管; 6. 连接管

第3.7节 湿式除尘器

文丘里洗涤器



■ 几何尺寸

- 进气管直径 D_1 按与之相联管道直径确定
- 收缩管的收缩角 α_1 常取 $23^\circ - 25^\circ$
- 喉管直径 D_T 按喉管气速 v_T 确定，其截面积与进口管截面积之比的典型值为1: 4
- v_T 的选择要考虑粉尘、气体和洗涤液的物理化学性质、对洗涤器效率和阻力的要求等因素

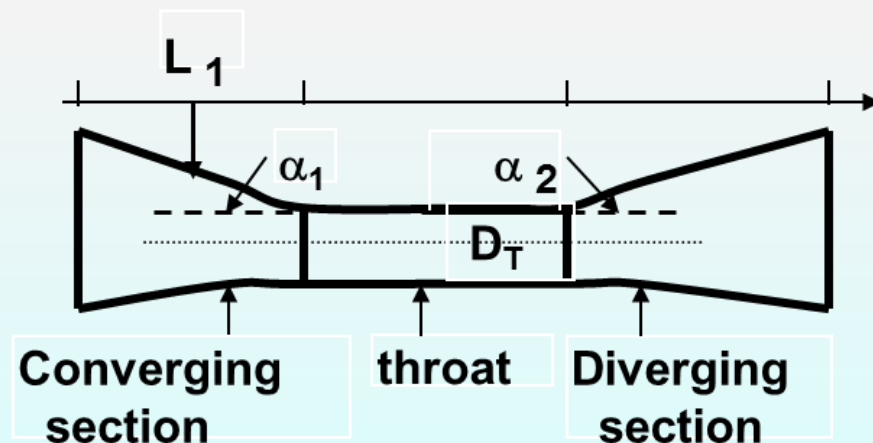
第3.7节 湿式除尘器

■ 几何尺寸（续）

- 扩散管的扩散角 α_2 一般为 $5^\circ - 7^\circ$
- 出口管的直径 D_z 按与其相联的除雾器要求的气速确定

$$L_1 = \frac{D_1 - D_T}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2}$$

$$L_2 = \frac{D_2 - D_T}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2}$$



第3.7节 湿式除尘器

文丘里洗涤器

- ◆ 文丘里洗涤器结构简单、体积小、布置灵活、投资费用低，用于高温烟气降温 and 除尘，也可用于吸收气体污染物，效率较高主要缺点阻力太大， $3\sim 9\text{kPa}$ ，存在污泥处理问题，运行费用高。

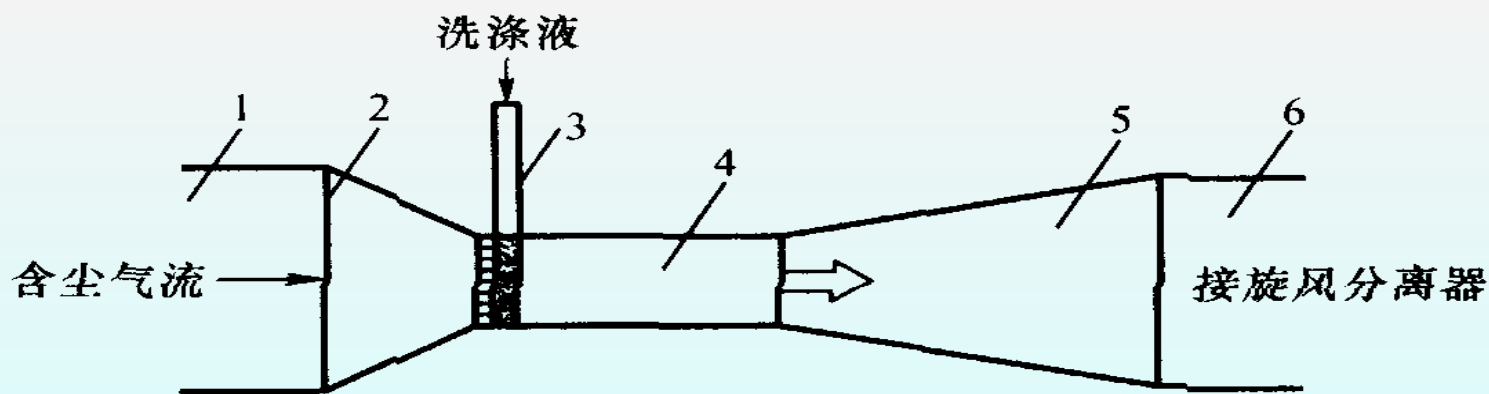


图 6-39 文丘里洗涤器示意图

1. 进气管; 2. 收缩管; 3. 喷嘴; 4. 喉管; 5. 扩散管; 6. 连接管

第3.8节 除尘器应用

➤ 除尘器的合理选择

选择除尘器必须全面考虑有关因素，如除尘效率、压力损失、一次投资、维修管理、运行安全性等，其中最主要的是除尘效率。

第3.8节 除尘器应用

1. 选用的除尘器必须满足排放标准规定的排放浓度
2. 粉尘的物理性质对除尘器性能具有较大的影响

包括粉尘的粒径分布、密度、比电阻、亲水性、温度、压力、粘性、毒性等

- ✓ 粘性大的粉尘容易粘结在除尘器表面，不宜采用干法除尘；
- ✓ 比电阻过大或过小，不宜采用电除尘；
- ✓ 纤维性或憎水性粉尘不宜采用湿法除尘。

第3.8节 除尘器应用

除尘器的合理选择

粒径/ μm	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100	10^3	10^4
气 体 净 化 设 备 的 类 型		超声波除尘器					沉降室	
				旋风除尘器				
				湿式除尘器				
				袋式除尘器				
		填充床过滤器						
		静电除尘器						
		高效空气过滤器				撞击除尘器		
		热沉积器 (仅供取样用)						

图 6-48 气体净化设备可能捕集的大致粒径范围

注：……表示可沿用的范围

第3.8节 除尘器应用

◇ 3. 气体的含尘浓度

- 气体的含尘浓度较高时，在静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

一般说来，湿式除尘器、袋式除尘器、静电除尘器的入口含尘浓度分别以 $10\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.2\sim 10\text{g}/\text{m}^3$ 、 $30\text{g}/\text{m}^3$ 为宜。

◇ 4. 气体温度和其它性质也是选择除尘设备时必须考虑的因素

- ◆ 高温、高湿气体不宜采用袋式除尘器
- ◆ 烟气中同时含有 SO_2 、 NO_x 等气态污染物，可以考虑采用湿式除尘器，但是必须注意腐蚀问题

◇ 5. 选择除尘器时，必须同时考虑捕集粉尘的处理问题

第3.8节 除尘器应用

◇ 6. 其他因素

- ◆ 设备的位置，可利用的空间，环境条件
- ◆ 设备的一次投资（设备、安装和工程等）以及操作和维修费用

设备	投资费用	运行费用
高效旋风除尘器	100	100
袋式除尘器	250	250
电除尘器	450	150
塔式洗涤器	270	260
文丘里洗涤器	220	500