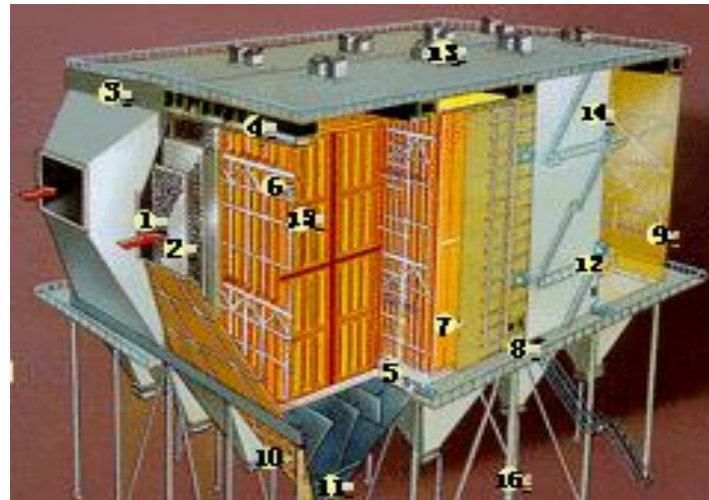


第六章(2) 电除尘器

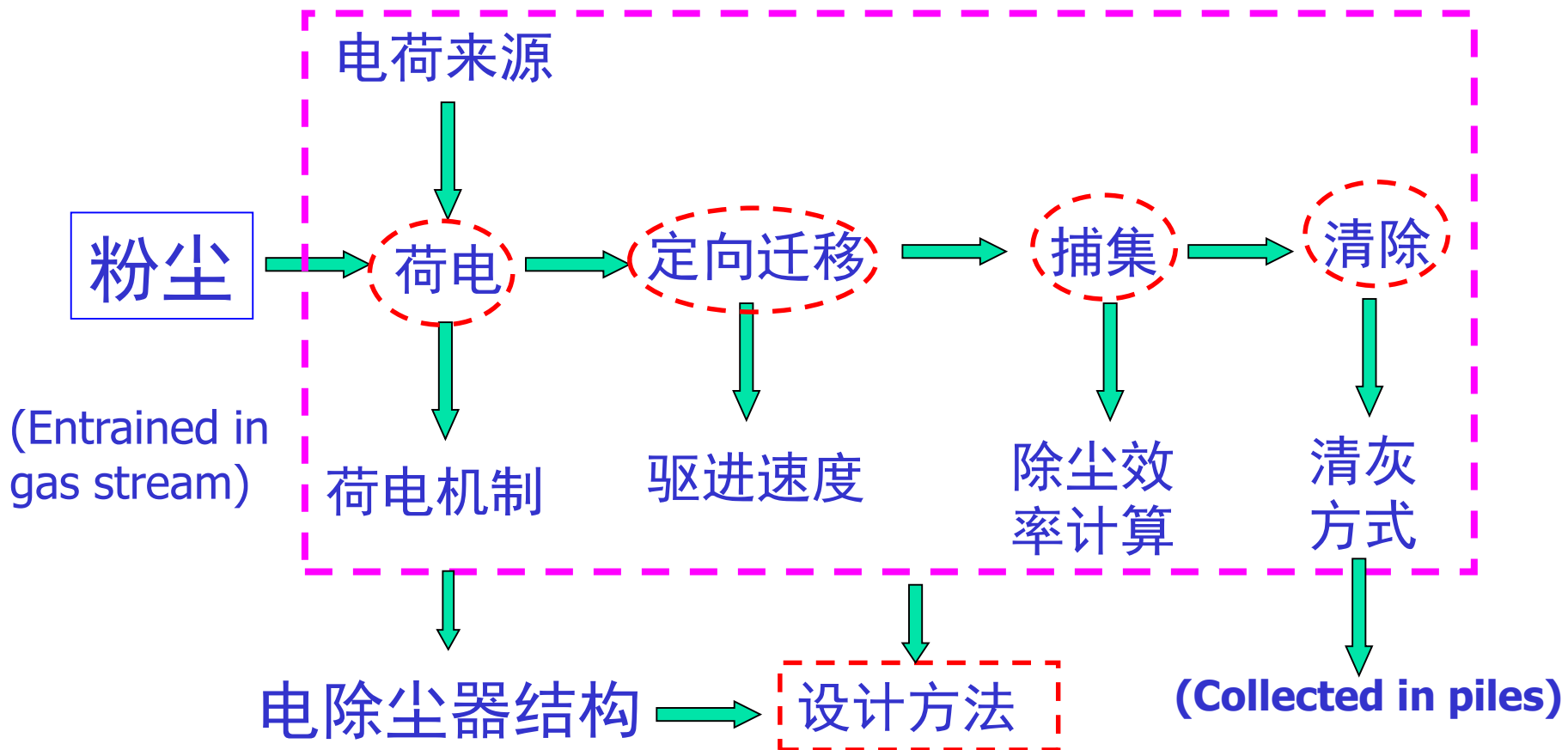
Chapter VI (2)

Electrostatic Precipitator (ESPs)

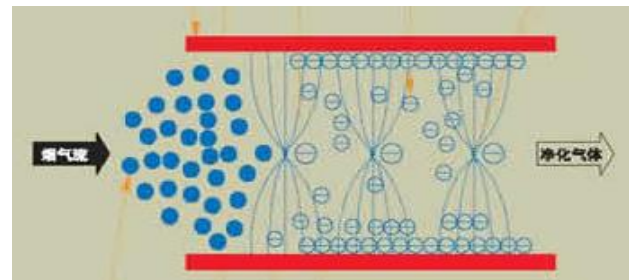


2016.12.16/12.23

Overview



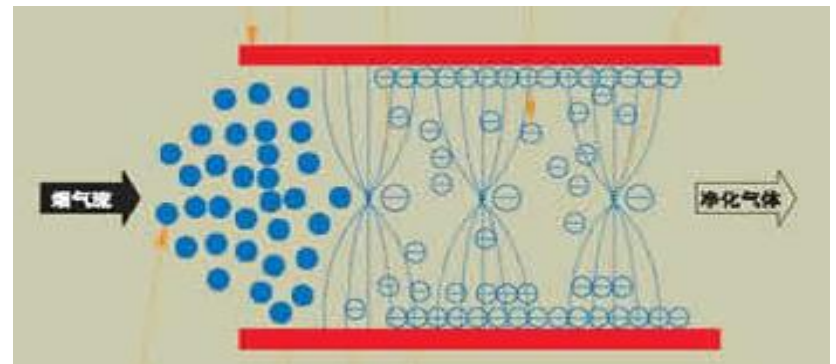
0、概述



- 电除尘器是利用静电力从气流中分离悬浮颗粒的装置, 见示意图
- 所使用的分离力为电场力, 电场力直接作用在荷电颗粒上, 而不是作用在整个气流上
- 电除尘器分为 管式和板式 两类

一、电除尘器的工作原理

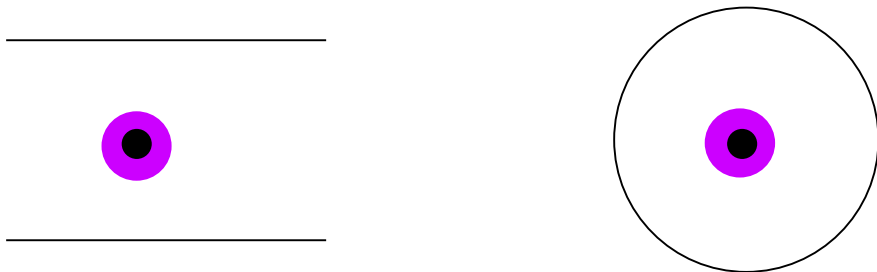
- 电除尘器的工作原理一般涉及以下几个过程：
 - 使气流中的颗粒的荷电
 - 离子源的产生方法、粉尘的荷电机理
 - 带电粒子在电场内迁移和捕集
 - 清灰过程



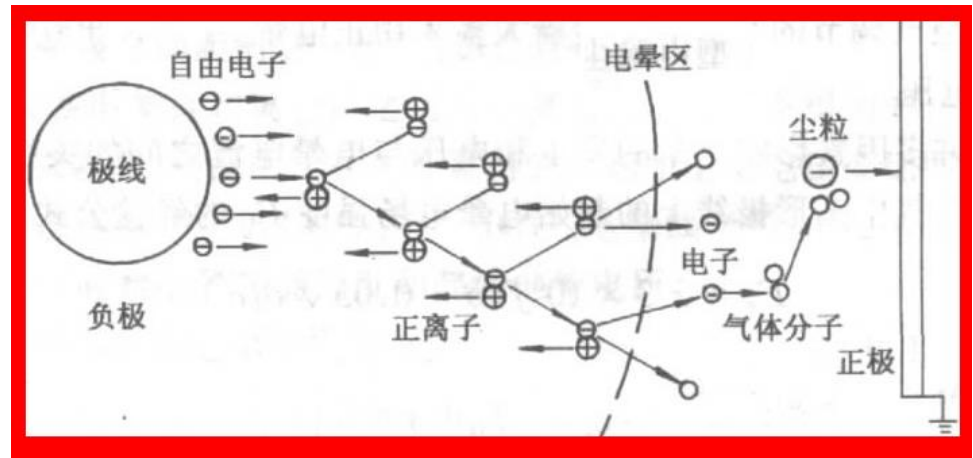
1、离子源--电晕放电

■ 电晕放电现象（Corona）

- 通过施加在不对称电极间的电场分布的不均匀性，而在高电场区产生的局部放电现象，可以直观的理解为“尖端放电效应”
- 实际使用时，电晕放电发生在细金属电晕线和集尘板之间，或者发生在金属丝和外管之间。



■ 电晕放电的机理 (电子雪崩现象)

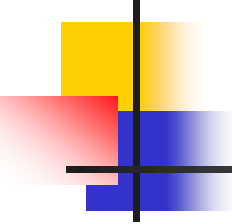


- 一个电子（母电子）在电场的作用下迅速地（向正极）运动，并在运动的过程中与气体分子发生碰撞使之电离，产生一个新的自由电子（次生电子），该电子也在电场的作用下向正极运动，可能发生新的电离碰撞。这样电子由原来的一个变为2个；
- 该过程不断重复，结果产生大量的电子和离子，这一过程称电子雪崩现象



知识延伸点 (Plasma chemistry):



- 
- 电子雪崩效应是与电子所处位置的电场强度密切相关的，电场强度越大，程度越显著，当电场低于某一阈值时，不能发生电子雪崩现象



- 对于电除尘器，随着电子离开电晕极的距离增加，电场迅速减弱，对电子的加速作用也迅速减弱，因此，在电除尘器的收尘极附近，不会有电子雪崩现象存在

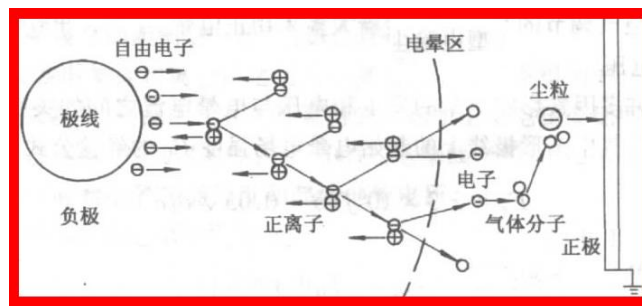


■ 电晕区

- 能够使气体发生电离的区域，即为能够发生电子雪崩的区域

■ 电晕放电所产生的带电粒子种类

- 电子（负电荷）
- 正离子：气体分子被电离出一个或多个电子，集中在电晕区，并与电晕极碰撞产生新的源电子
- 负离子：电负性气体分子俘获电子而带负电
- 荷电颗粒



- 电除尘器内的电场分布

- 管式电除尘器

- 板式电除尘器

- 起晕电场 E_c

- 气体的性质、电极的几何形状

- Peek经验计算公式



■ 起晕电压的计算

- 将 E_c 的表达示代入E-V关系式，整理后可的起晕电压的表达示
- 对于管式除尘器

$$E_c = 3 \times 10^6 m(\delta + 0.03\sqrt{\delta/a})$$

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$



$$V_c = 3 \times 10^6 a m(\delta + 0.03\sqrt{\delta/a}) \ln(b/a)$$



2、粒子荷电过程

- 粒子的两种荷电机理

- 电场荷电：

- 离子在电场作用下作定向运动，与粒子的碰撞而使粒子荷电现象，与电场强度有关
 - 直径大于 $1.0\mu\text{m}$ 时，电场荷电占主导

- 扩散荷电

- 因离子和细粒子的扩散作用而导致粒子的荷电过程，与离子的热运动和微粒的直径有关
 - 直径小于 $0.4\mu\text{m}$ 时，扩散荷电占主导

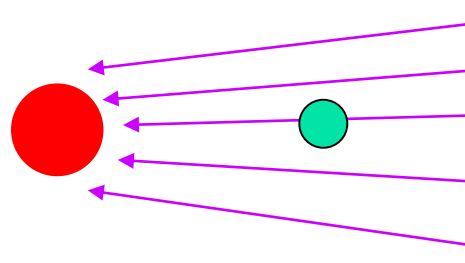
电场荷电量的计算

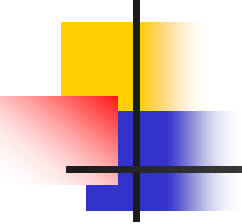
■ 前提条件：

- 假设粒子处于均匀离子密度的电场中
- 粒子的荷电仅为离子的碰撞所引起的
- 粒子荷电饱和时，其自身电荷在其边缘处所产生的电场与施加电场相互作用，到达一定的平衡关系

对应的饱和荷电量为 q_s

$$q_s = 3\pi\epsilon_o E_o d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right)$$



- 
- 在t时间内获得的电荷为

$$q_1 = 3\pi\epsilon_o E_o d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) t / [t + (4\epsilon_o / N_o e K)]$$

其中， ϵ 为粒子的相对介电常数

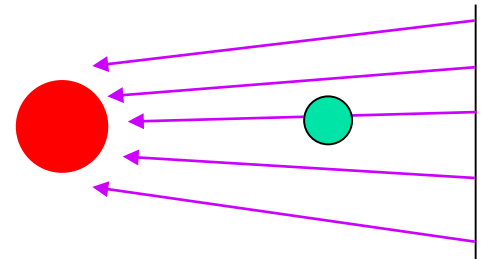
ϵ_o 为真空介电常数，等于 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

E_o 为电场强度， V/m

K 为气体离子的迁移率， $\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$

N_o 为离子密度，个/ m^3

e 为电子的电量， $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$



$$q_1 = 3\pi\epsilon_o E_o d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) t / [t + (4\epsilon_o / N_o e K)]$$

- 因为粒子最终达到饱和电荷 q_s （ t 趋进无穷），所以可以用比较简单的式子表示

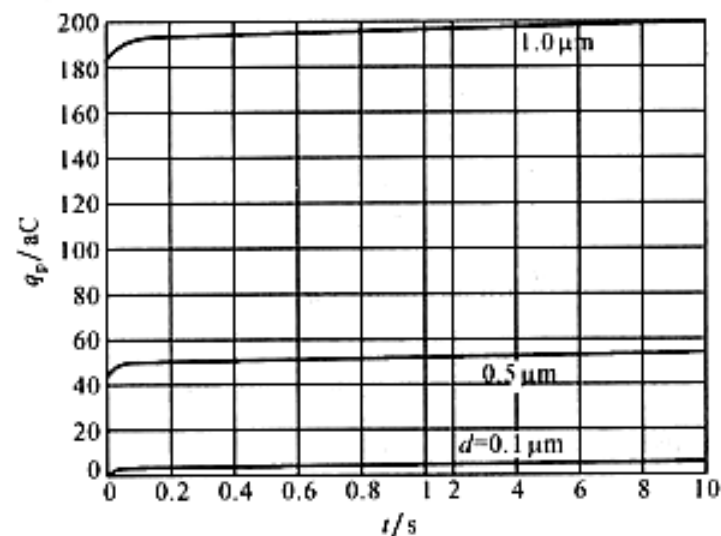
$$q = q_s \left(\frac{t}{t + t_o} \right)$$

- 其中，

$$q_s = 3\pi\epsilon_o E_o d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right)$$

- 时间常数

$$t_o = 4\epsilon_o / (N_o e K)$$





影响电场荷电的因素

$$q_1 = 3\pi\epsilon_o E_o d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) t / [t + (4\epsilon_o / N_o e K)]$$

- 粒子性质：粒径 d_p 和介电常数 ϵ
 - 常见物质的 ϵ 在**1-100**间，导电物体为无穷大
 - 粒径越大，饱和电荷越大
 - 荷电时间常数越小，荷电速率越快
- 电场强度和离子密度
 - 电场强度越大，饱和电量也越大；离子密度越高，荷电时间常数越小，但对饱和电量无影响
 - 电场强度一般在**3-6kV/cm**范围；离子密度在 **10^{13} - 10^{14} 个/ m^3** 范围



■ 离子的迁移速率

离子的迁移速率越大，荷电时间常数越小，荷电速率越快，但对饱和荷电量无影响

- 同一中气体的正负离子迁移速率也有不同
- 大气中离子的迁移速率一般为 $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$ 量级
- 离子的迁移速度 u_0

$$u_0 = KE$$



扩散荷电

- 离子及细粒子的热运动导致其与颗粒碰撞，使颗粒荷电，其特点为：
 - 由于离子的热运动不存在动能的上限，因此扩散荷电也不存在最大极限
 - 荷电量取决于离子的热运动动能、粒子的大小和荷电时间
- 利用分子热运动理论可以导出扩散荷电的理论方程



■ 扩散荷电的理论方程

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

k-----波尔兹曼常数

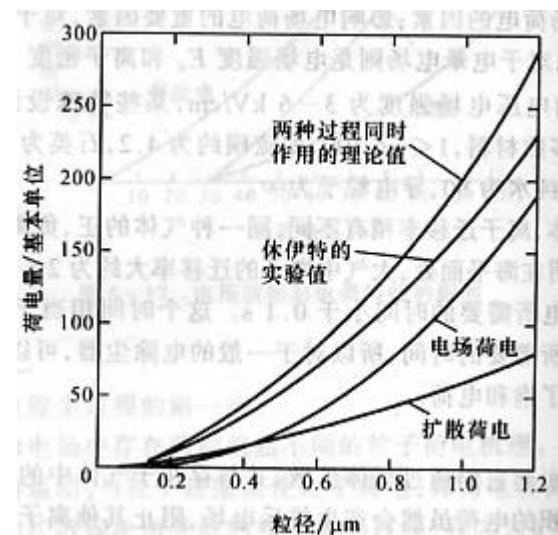
T-----气体温度

$\bar{u}$ -----气体粒子平均热运动速度

$$\bar{u} = \left(\frac{8kT}{m\pi}\right)$$

电场电荷和扩散电荷的综合运用

- 对于粒径处于中间范围（ $0.2-1\mu\text{m}$ ）的粒子，应同时考虑电场荷电和扩散荷电
- 二者的共同作用过程较复杂，无法得到解析解
- 有代表性的近似解描述：
 - Smith and Mcdonald 的图解法
 - Hewitt 的图解法
 - Robinson的简单相加法





荷电粒子的运动和捕集

■ 驱进速度计算

- 只考虑粒子所受的电场力 F_q 与运动阻力 F_D 作用
- 对于Stokes区:

$$F_D = 3\pi\mu d_p \omega$$

$$F_e = qE_p$$

$$m \frac{d\omega}{dt} = qE_p - 3\pi\mu d_p \omega = 0$$

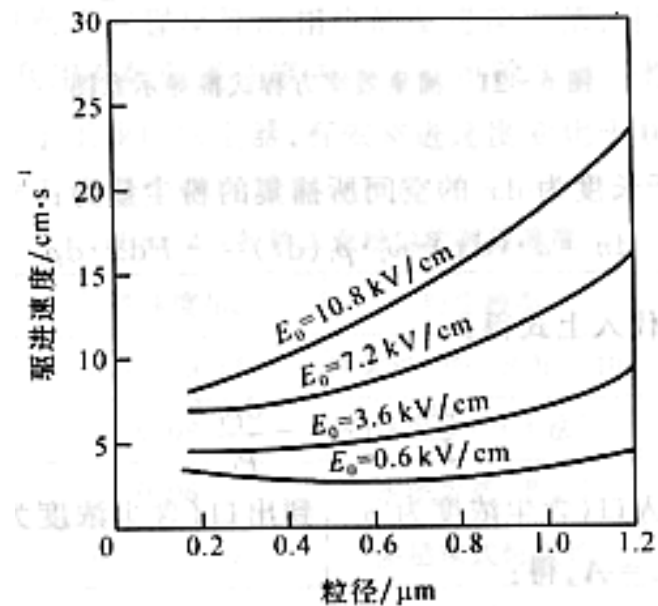
$$\omega = \frac{qE_p}{3\pi\mu d_p}$$

- 通过分析发现，对于一般荷电粒子，只要 $t > 0.01s$ ， ω 很快接近其终端沉降速度，加速段的时间可忽略，荷电粒子向集尘极运动时，电场力与空气阻力很快达到平衡，并向集尘极作等速运动

$$\omega = q E_p / (3\pi\mu d_p)$$

$$q_s = 3\pi\varepsilon_o E_p d_p^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right)$$

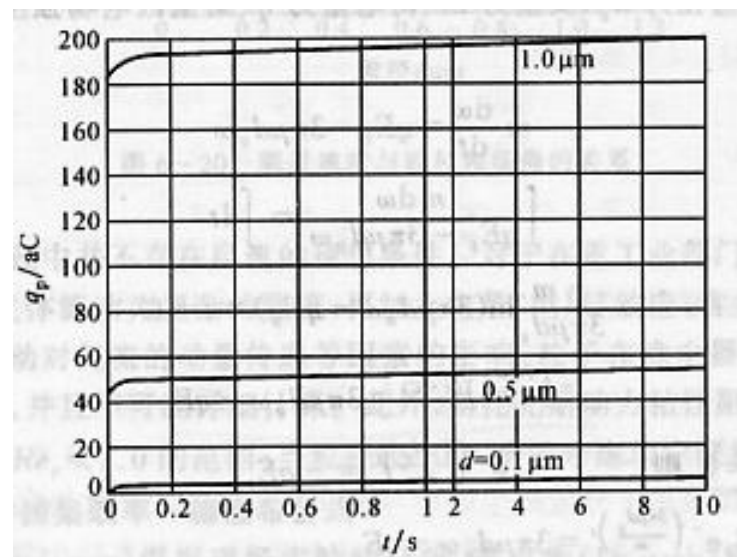
- 当粒径在 $2-50\mu m$ 时， ω 与粒径成正比
- 实际电除尘器内的气体流动比较复杂（电风现象、粒子的积聚现象等），所以实际驱进速度与计算值有较大差异



粒子的捕集效率计算（Deustch公式）

■ 基本假设

- 除尘器内气流为湍流，垂直于集尘极表面的任一横断面上粒子浓度和气流分布是均匀的
- 粒子进入除尘器立即完成荷电
- 忽略粒子驱进的加速时间
- 忽略电风、气流分布不均，被捕集粒子的二次扬起等现象



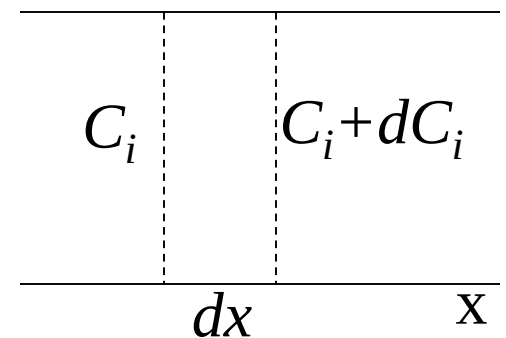
- 如右图，气流方向为 x ，气流速度 u ，气体流量 Q ， x 方向单位长度集尘板的面积为 a ，总的集尘面积为 A ，电场长度 L ，气流截面积 F ，直径为 d_{pi} 的粒子的浓度为 C_i ，驱进速度为 ω_i ；则在 dt 时间内、 dx 的空间内所捕集的粉尘量 dn 为：

$$dn = a(dx)\omega C_i(dt) = -Fdx dC_i$$

- 方法1

$$\Delta \eta_i = \frac{a(dx)\omega C_i(dt)}{Fdx C_i} = \frac{a\omega dx}{Fu}$$

$$\eta_{ti} = 1 - \left(1 - \frac{a\omega dx}{Fu}\right)^{\frac{L}{dx}} = 1 - \left(1 - \frac{A\omega dx}{LQ}\right)^{\frac{L}{dx}}$$





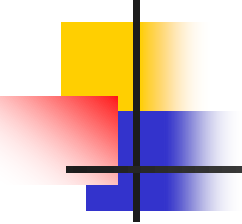
■ 方法2（Deustch公式）

$$dn = a(dx)\omega C_i(dt) = -Fdx dC_i$$

$$\frac{a\omega_i}{Fu} \cdot dx = -\frac{dC_i}{C}$$

$$\frac{A}{Q}\omega_i = -\ln \frac{C_{2i}}{C_{1i}}$$

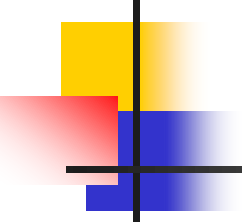
$$\eta_i = 1 - \frac{C_{2i}}{C_{1i}} = 1 - \exp\left(-\frac{A}{Q}\omega_i\right)$$

- 
- 上述公式概括了分级除尘效率与集尘板面积、气流流量和粉尘的驱进速度之间的关系
 - 适用范围：
 - 粒子的驱进速度不超过气流速度的**10-20%**时，上述方程才在理论上成立
 - 驱进速度应取其某种形式的平均值
 - 对于某一驱进速度求得的值只是对应的某一粒径的分级效率



有效驱进速度

- 由于各种因素的影响，由上述公式得到的捕集效率比实际值高得多，所以常常根据除尘器结构形式和运行条件下测得的总捕集效率，带入 **Deustch** 方程，算出相应的驱进速度值，并称为有效的驱进速度。
- 对于一般工业电除尘器，有效驱进速度变化于 **0.02-0.2m/s** 范围

- 
- 实际测量表明，电除尘器的除尘效率与粒径的大小有关
 - 当粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 时，除尘效率随粒径的增大而增大, $\omega \propto d_p$
 - 粒径在 $0.1\text{-}1\ \mu\text{m}$ 范围，除尘效率变化较小，但在 $0.1\text{-}0.5\ \mu\text{m}$ 范围，除尘效率最低, ω 与 d_p 无关



被捕集粉尘的清除

■ 电晕极表面

- 电晕极和集尘极上都会有粉尘沉积，其厚度约为几毫米至几厘米
- 粉尘沉积在电晕极表面会影响电晕电流的大小和均匀性
- 保持电晕极表面清洁的最一般方法是振打清灰

- 集尘极表面的清灰

- 其目的是防止已沉积的灰尘重新进入气流

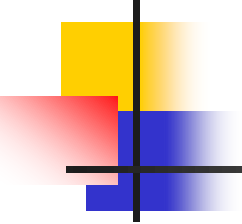
- 其方式有气流的卷扬作用、振打电极的弥散作用、灰斗粉尘被重新卷起

- 气流的分布不均和剧烈紊流是造成灰尘重新进入气流的主要原因



集尘极的清灰方式

- 分为湿式和干式电除尘器两种
- 湿式电除尘器中一般用是冲洗集尘极板，是极板表面经常保持着一层水膜，粉尘随水膜流下，其特点为：
 - 粉尘重新进入气流中的量较少
 - 可同时净化部分有害气体



■ 干式电除尘器

- 依靠机械撞击或电极振动进行清灰
- 目前电除尘器除尘器大都采用电磁振打或锤式振打清灰
- 对振打系统的要求：
 - 应有较好的可靠性，不仅要产生高强度的振打力，又能调节振打强度和频率
- 常见的振打器分为电磁型和挠臂锤型



异常荷电现象

- 最常见的几种异常荷电现象
 - 沉积在集尘极表面的高比电阻粒子导致在低电压下发生火花放电或在**集尘极发生反电晕**现象。
 - 通常比电阻高于 $2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时，易产生该现象；
 - 当粉尘比电阻太低时，会因颗粒间**失电过快**，导致其在收尘极表面附着不牢，形成跳跃效应；
 - 当含尘量大到某一数值时，放电电流消失，电晕放电被抑制，称为电晕闭塞



电除尘器的结构

- 电除尘器的类型

- 单区型和双区型：

- 单区主要应用于实际废气控制中，其又包括管式和板式两种类型，前者适用于处理气量较小，含雾滴气体或需要用水冲刷的场合；后者则应用在大流量场合
 - 双区主要用于空气的净化



■ 电晕电极的结构

对电晕极的要求为：起晕电压低、电晕电流大、机械强度高，便于安装等，按其几何形状分：

园形线（直径3mm左右）

星形线

锯齿线

芒刺线

■ 电晕线固定方式有2种：

- 重锤悬掉式

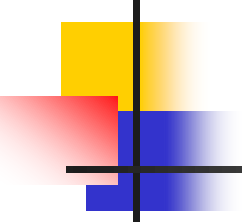
- 管筐绷线式

- **集尘极结构**

- 分为管式和板式两种

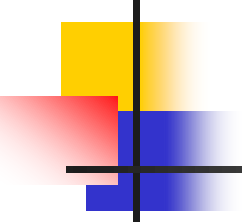
- **管式集尘极**

- 直径在**15-40cm**范围，长度**3-6m**



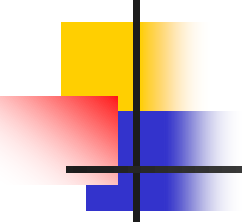
■ 板式集尘极

- 对板式集尘极的基本要求为
 - 振打粉尘时2次扬起少
 - 单位集尘面积耗金属量低
 - 极板高度较大式，应有一定的刚性
 - 易于清灰，造价低
- 常见的结构有：
 - 含V型板、折流板等阻挡元件，防止气流直接冲刷极板表面



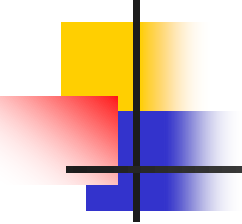
■ 高压供电设备

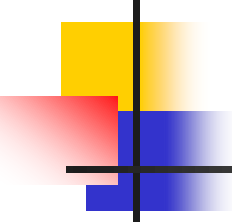
- 提供粒子荷电和捕集所需的高电压和电晕电流
- 其输出峰值电压为**70-100kV**，电流为**100-2000mA**
- 采用可控硅高压硅堆整流设备
- 一般的大型电除尘器常采用多组电源供电
- 电压波形：直流、半波整流、全波整流、脉冲电压等



■ 气流分布板

- 为使进出口气流均匀和平稳
- 常见的气流分布板有
 - 百叶窗式，多孔板，分布格子，槽型钢式，栏杆形分布板
- 实际对气流分布的基本要求是
 - 任何一点的流速不得超过或低于该断面的平均流速的**40%**
 - 在任何一断面上，**85%**以上测点的流速与平均流速不得相差正负**25%**

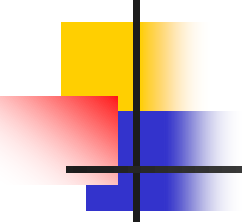
- 
- 当电除尘器中的气流分布不均时，必须引入校正系数 F_v ，其值大于或等于1.0,用以描述气流分布不均时粉尘通过率的增大程度，见p236图5-30



粉尘比电阻

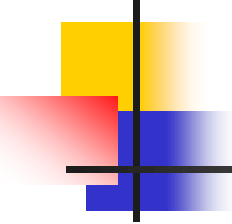
- 粉尘导电性

- 为了保证电晕极和集尘极间的电流输送，要求沉积在集尘极表面的粉尘具有一定的导电性
- 其比电阻的最低要求为 $10^{-10}(\Omega \cdot cm)^{-1}$ ，高于此值的粉尘称高比阻粉尘
- 表面比阻、容积比阻与温度间的关系



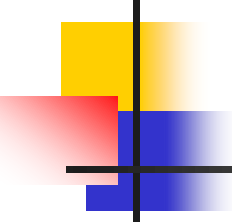
■ 高比阻粉尘对电除尘器的影响

- 干扰电场，导致除尘效率下降
- 当比电阻界于 10^{10} - $10^{11}\Omega\text{cm}$ 范围时，火花率增加，操作电压降低
- 当比电阻高于 $10^{11}\Omega\text{cm}$ 时，出现反电晕现象



■ 克服高比电阻影响的方法

- 保持电极表面尽可能清洁：使集尘极粉尘沉积厚度小于**1mm**
- 采用较好的供电系统：脉冲供电系统或自动控制系统
- 烟气调质：增加湿度、加入酸性或碱性物质
- 发展新型的电除尘器



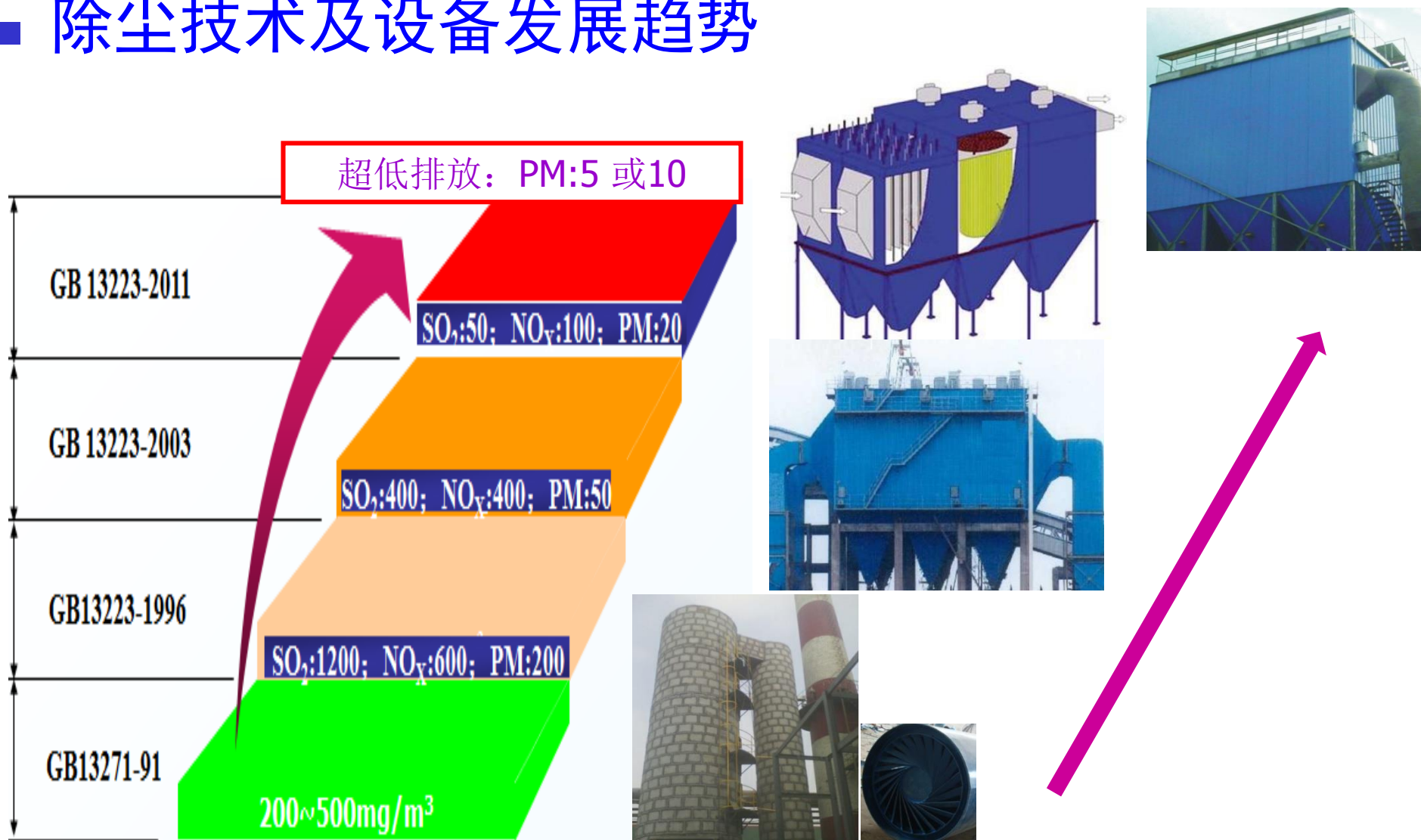
气体的含尘浓度

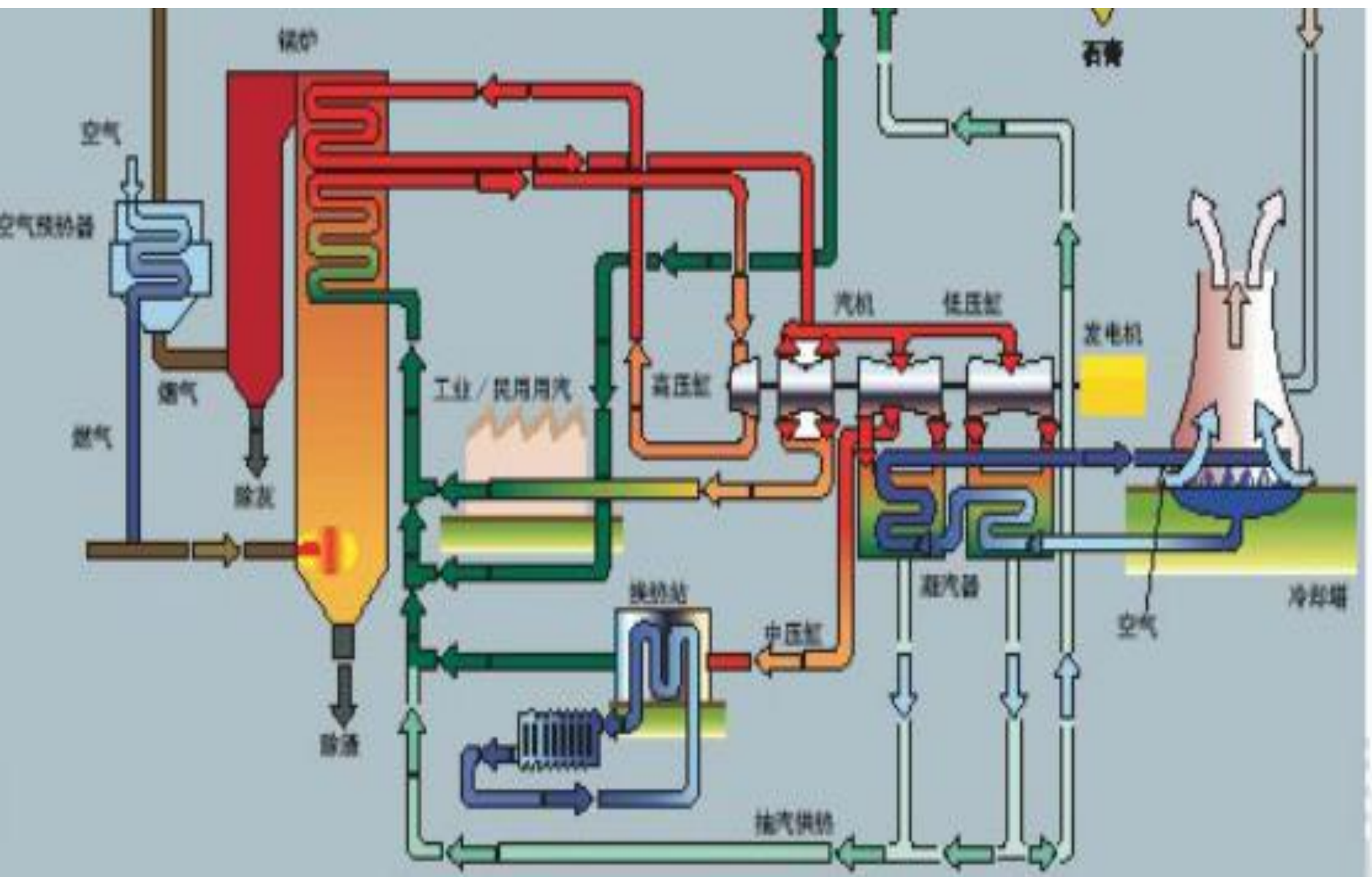
- 含尘气流通过电除尘器时要降低其电晕电流
- 若含尘浓度很高时，可能导致电晕闭塞
- 防止电晕闭塞的方法有
 - 对粉尘进行预净化（粉尘浓度控制在 $30\text{g}/\text{m}^3$ 以下）
 - 提高除尘器的工作电压
 - 采用芒刺电晕极

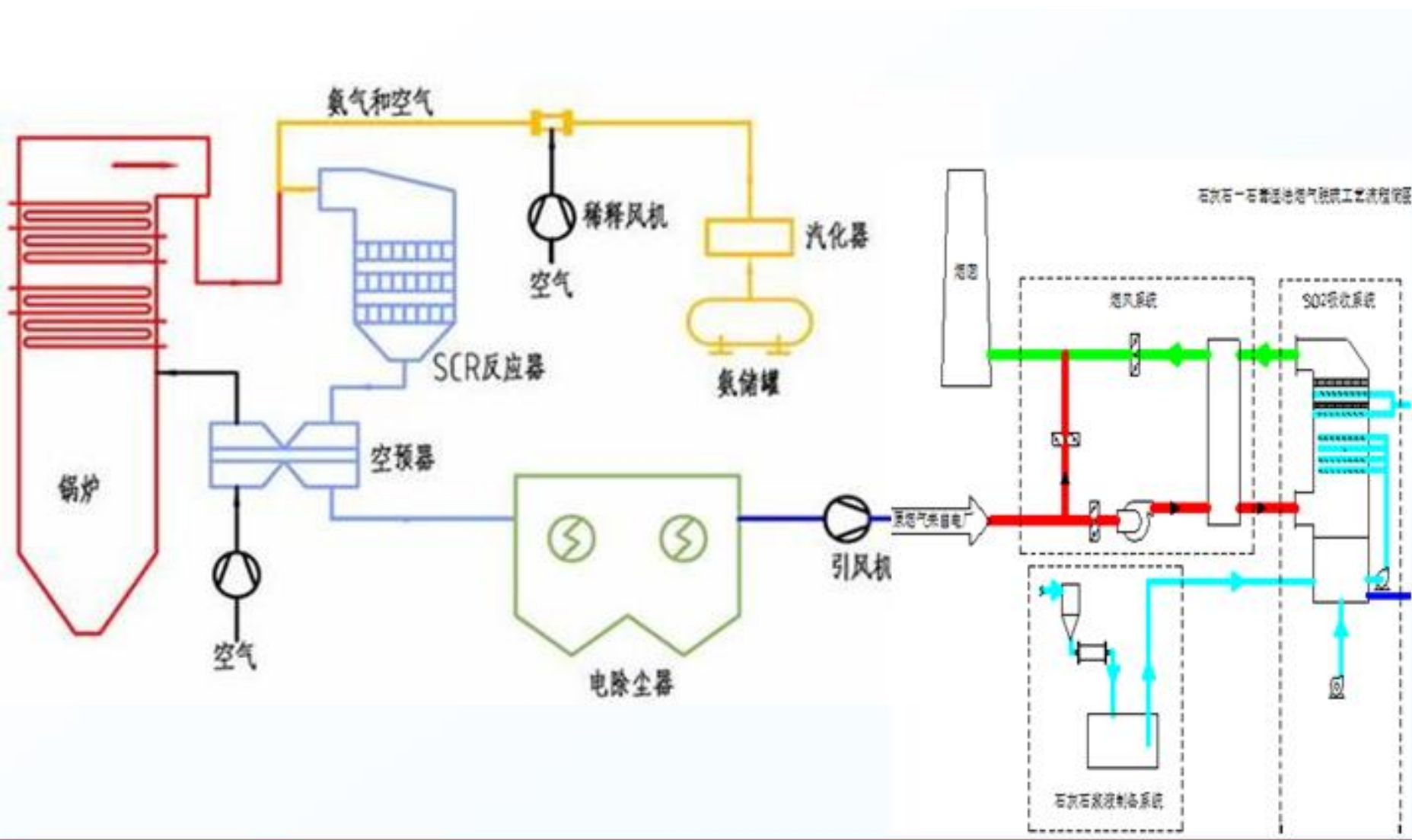
补充内容：

满足超低排放的高效除尘技术

■ 除尘技术及设备发展趋势







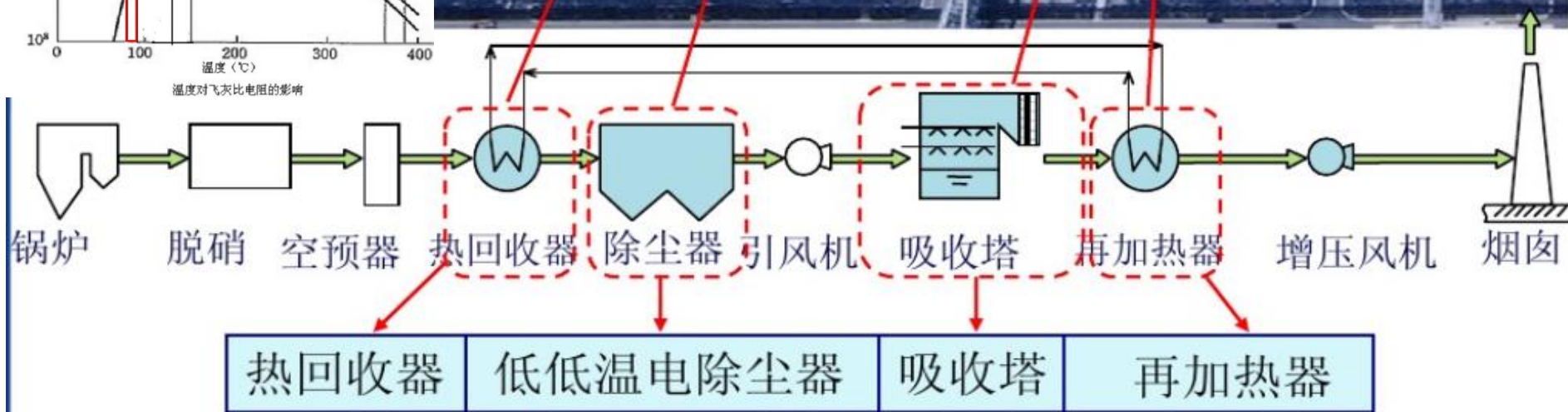
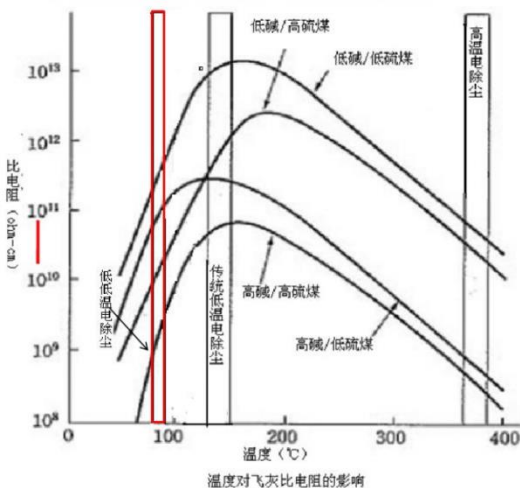
- 电除尘器是目前治理工业粉尘污染的主要设备，以前燃煤电厂90~95%采用电除尘器，现在市场份额也在70%以上；

针对影响电除尘效率的主要因素，对传统电除尘器加以升级改造，是提高ESP对PM_{2.5}脱除效果，降低PM_{2.5}排放的重要技术途径。影响电除尘效率的主要因素及应对措施：

- ① 高比电阻粉尘引起的反电晕-烟气调质、低低温电除尘；
- ② 振打清灰引起的二次扬尘-移动电极电除尘；
- ③ 微细粉尘荷电不充分导致的难以有效脱除PM_{2.5}-电凝聚、新颖电源；
- ④ 电极结构和形状、电除尘器内气体流动方式等。

■ 低低温电除尘器

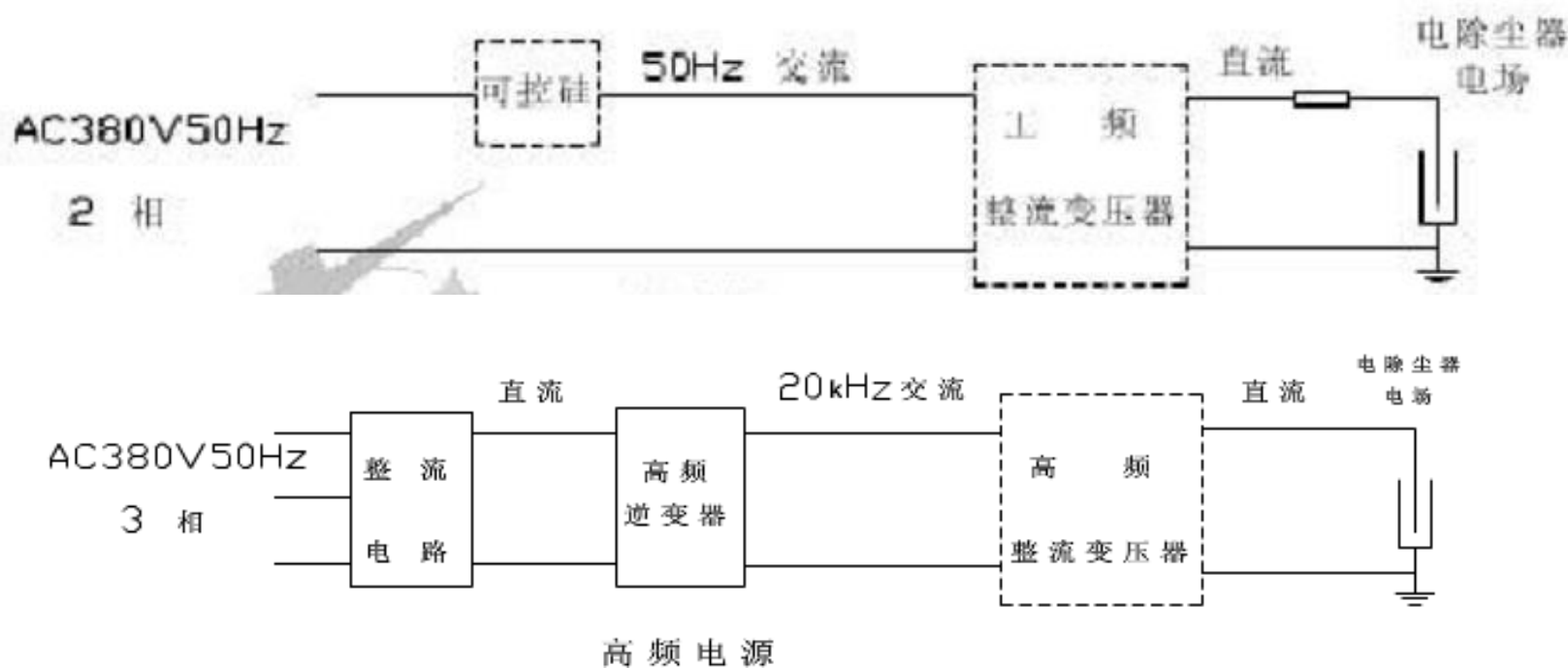
在电除尘前增设热回收器，降低除尘器入口温度（**80~100℃**），利用了烟气体积流量随温度降低而变小和粉尘比电阻随温度降低而下降的特性。随温度降低，粉尘比电阻减少至 10^{11} 以下，此时的粉尘更容易被捕集。





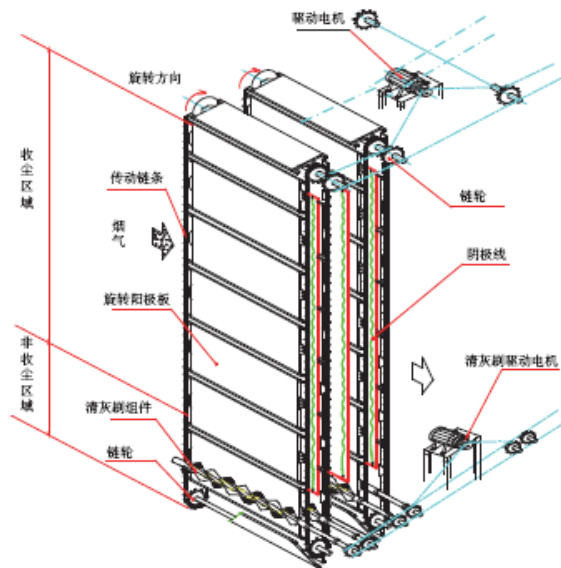
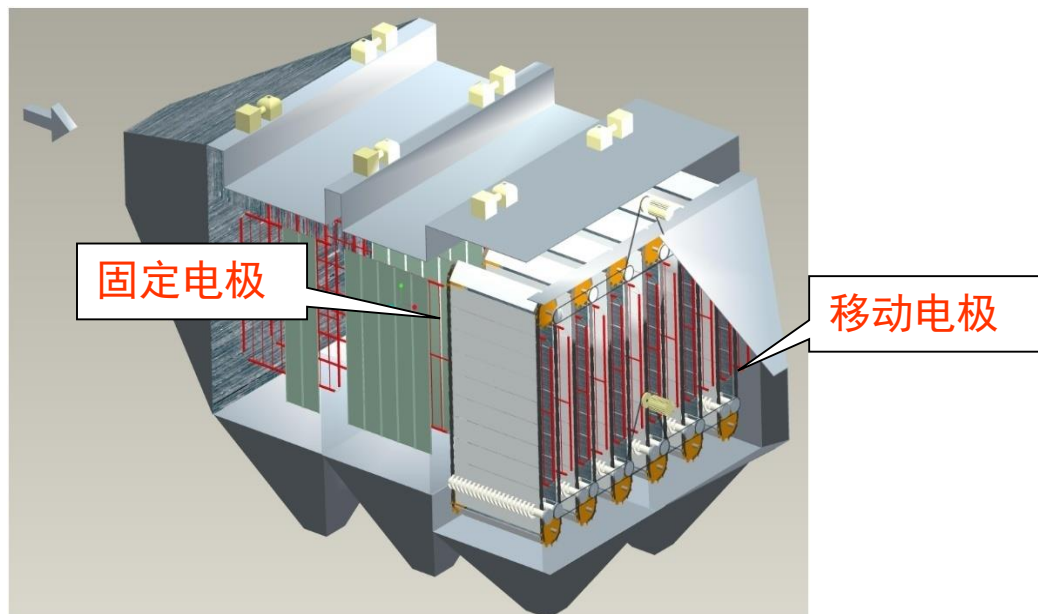
■ ESPs的高频电源改造技术

▲ 可提高电晕功率：高频电源的输出电压纹波系数比常规电源小（高频电源约 1%，而常规电源约 30%），可大大提高电晕电压（约 30%），从而增加电场内粉尘的荷电能力，也减小了荷电粉尘在电场中的停留时间，从而可提高除尘效率。电晕电压的提高，同时也提高了电晕电流，增加了粉尘荷电的机率，进一步提高除尘效率，特别适用于高浓度粉尘场合。



移动电极电除尘器

- 采用可移动的集尘极板和可旋转的刷子来构成移动电极电场，附着于集尘极上的粉尘在尚未达到形成反电晕的厚度时，就随移动电极运行至没有烟气通过的灰斗内，被旋转的清灰刷彻底清除，可有效抑制高比电阻粉尘引起的反电晕和振打引起的二次扬尘问题；
- 有研究表明，在电除尘器出口的粉尘中，约有20%是由清灰过程中的二次扬尘造成的；特别是 $PM_{2.5}$ ，在振打时易造成二次扬尘，是导致电除尘器对 $PM_{2.5}$ 捕集效率低的原因之一；采用移动电极电除尘可有效提高对 $PM_{2.5}$ 的捕集效果。



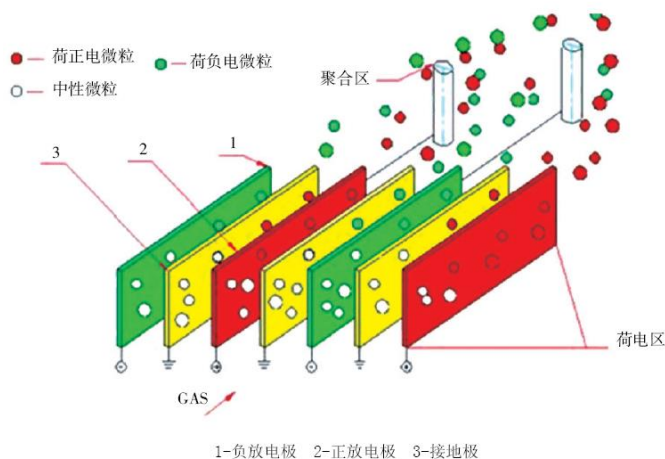
■ 细粒子的促凝去除技术

■ 颗粒物直径与荷电间关系

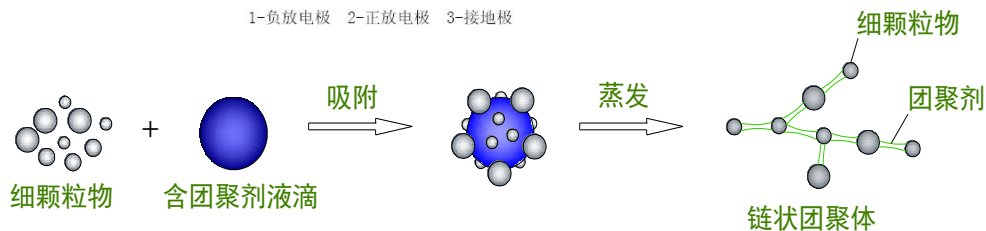
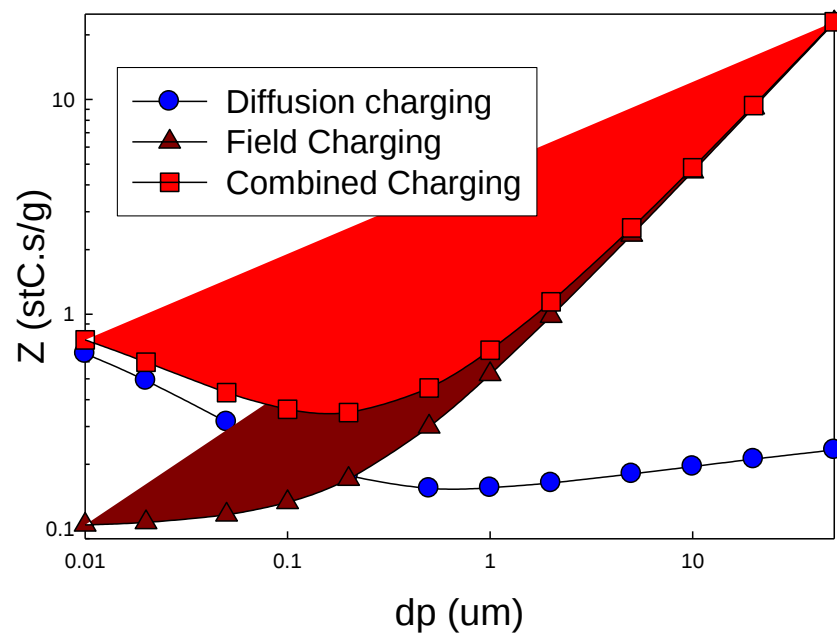
■ 促凝并方法

■ 电凝并

■ 化学凝并

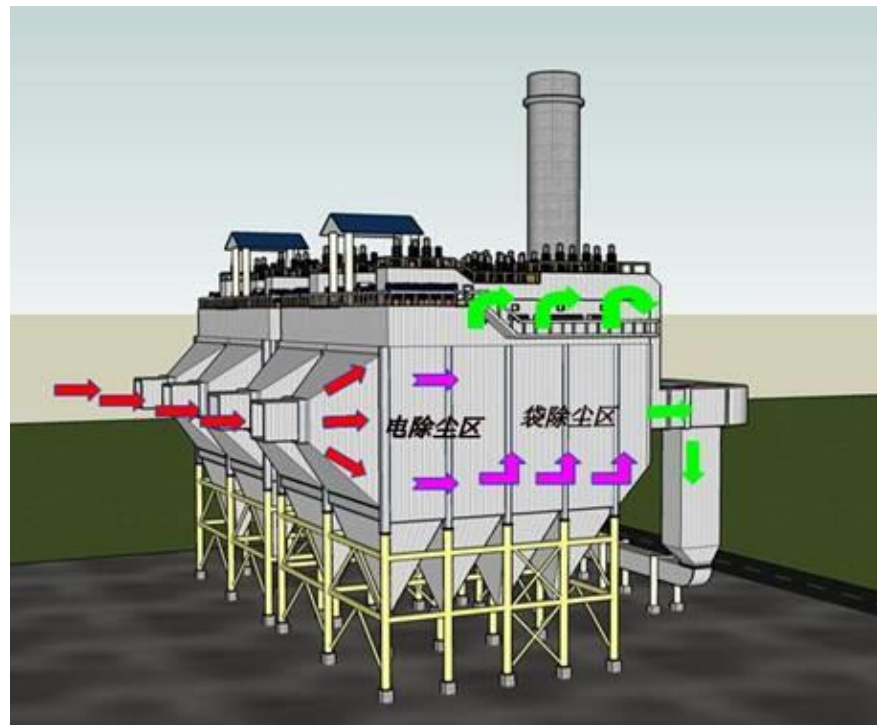


Electrical Mobility vs dp



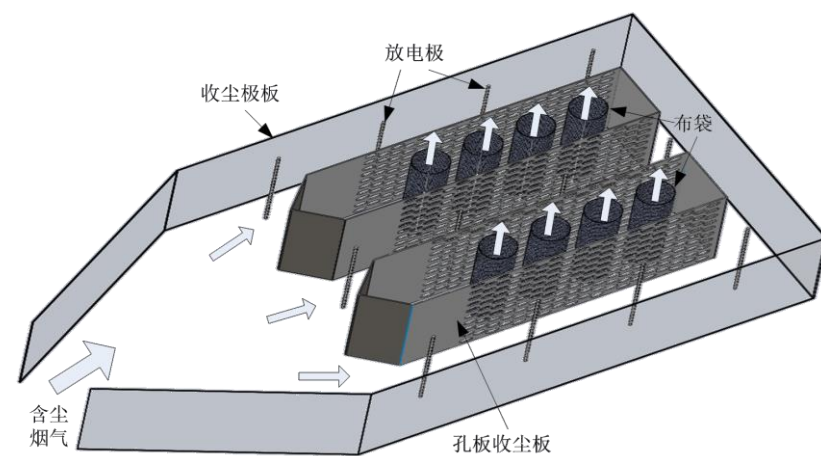
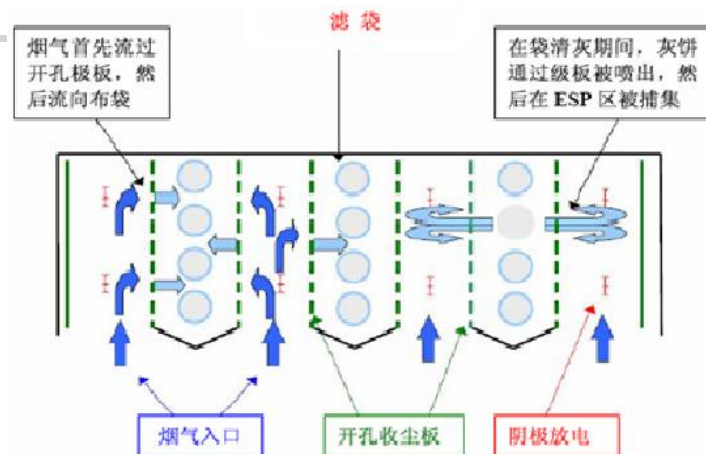
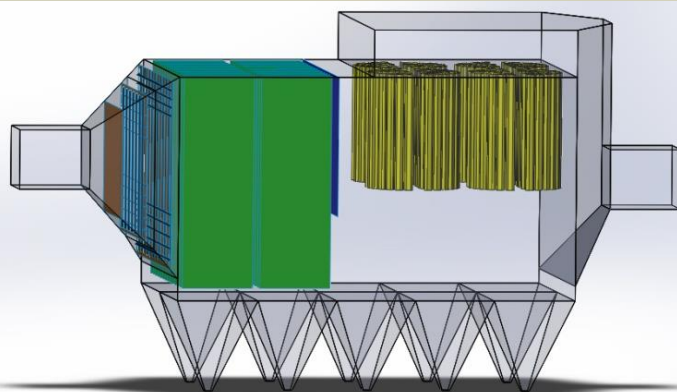
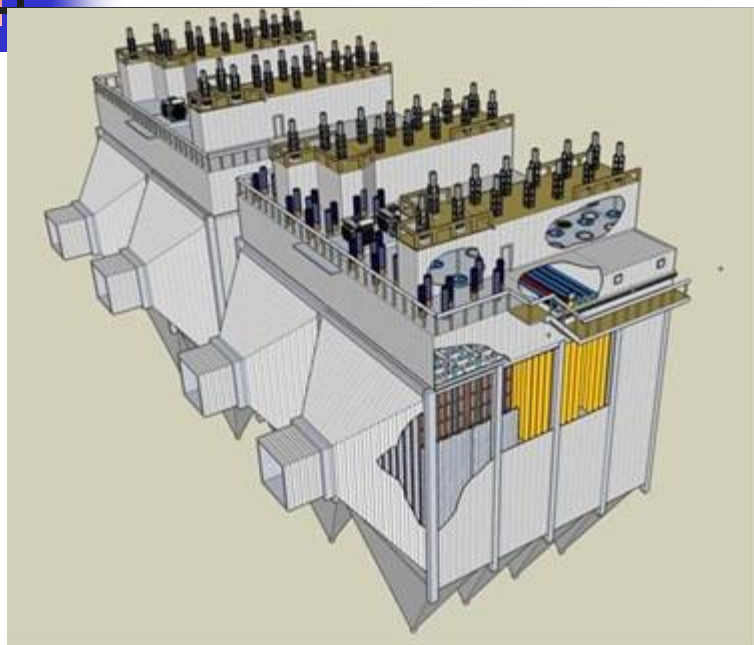
3.2.3 电袋复合除尘器

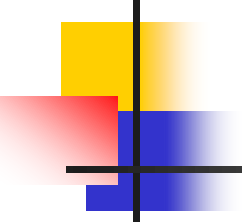
- **工作原理：**电袋复合除尘器是一种综合了静电除尘和布袋除尘两种成熟的除尘技术而提出的一种新型除尘设备。通常，电除尘器第一电场能除去烟气中80~90%的粉尘，剩余电场用来除去剩下的10~20%的粉尘。电袋除尘器只采用第一电场，余下的细粉尘由布袋除尘单元过滤脱除，使布袋除尘单元除尘负荷显著降低，一方面可以选择更高的过滤速度；同时，除尘压降大大减小；其对PM_{2.5}的脱除性能与布袋除尘相当。



电袋复合除尘器工作原理

烟气的流过路径：进口烟道→进口烟箱→静电除尘区→布袋除尘区→净气室→出口烟道→风机。





The End of ESPs Section

管式除尘器的结构

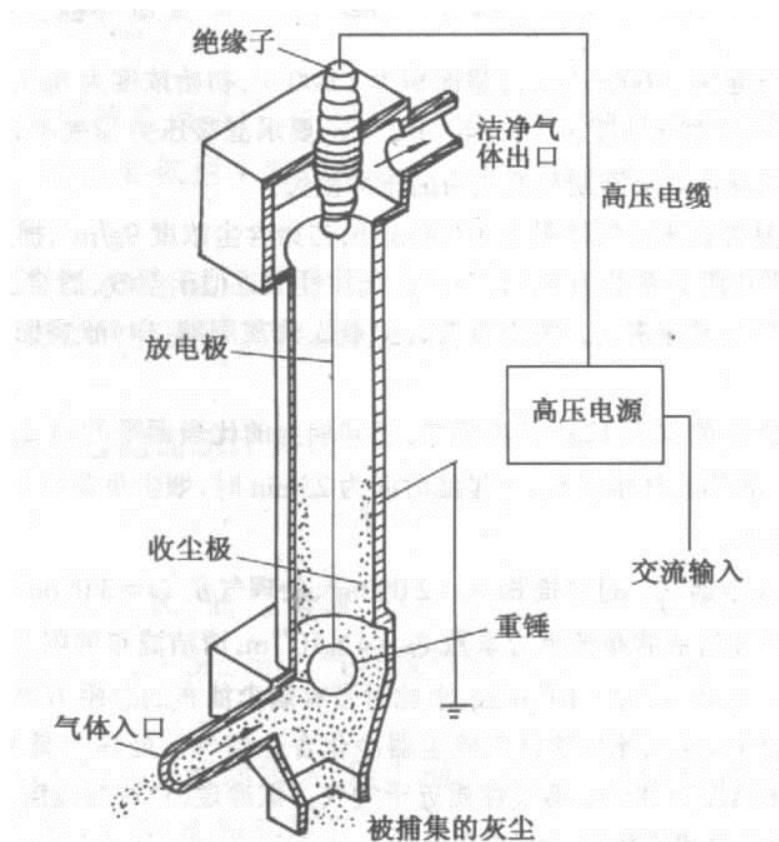


图 8-1 管式电除尘器示意图

板式除尘器的结构

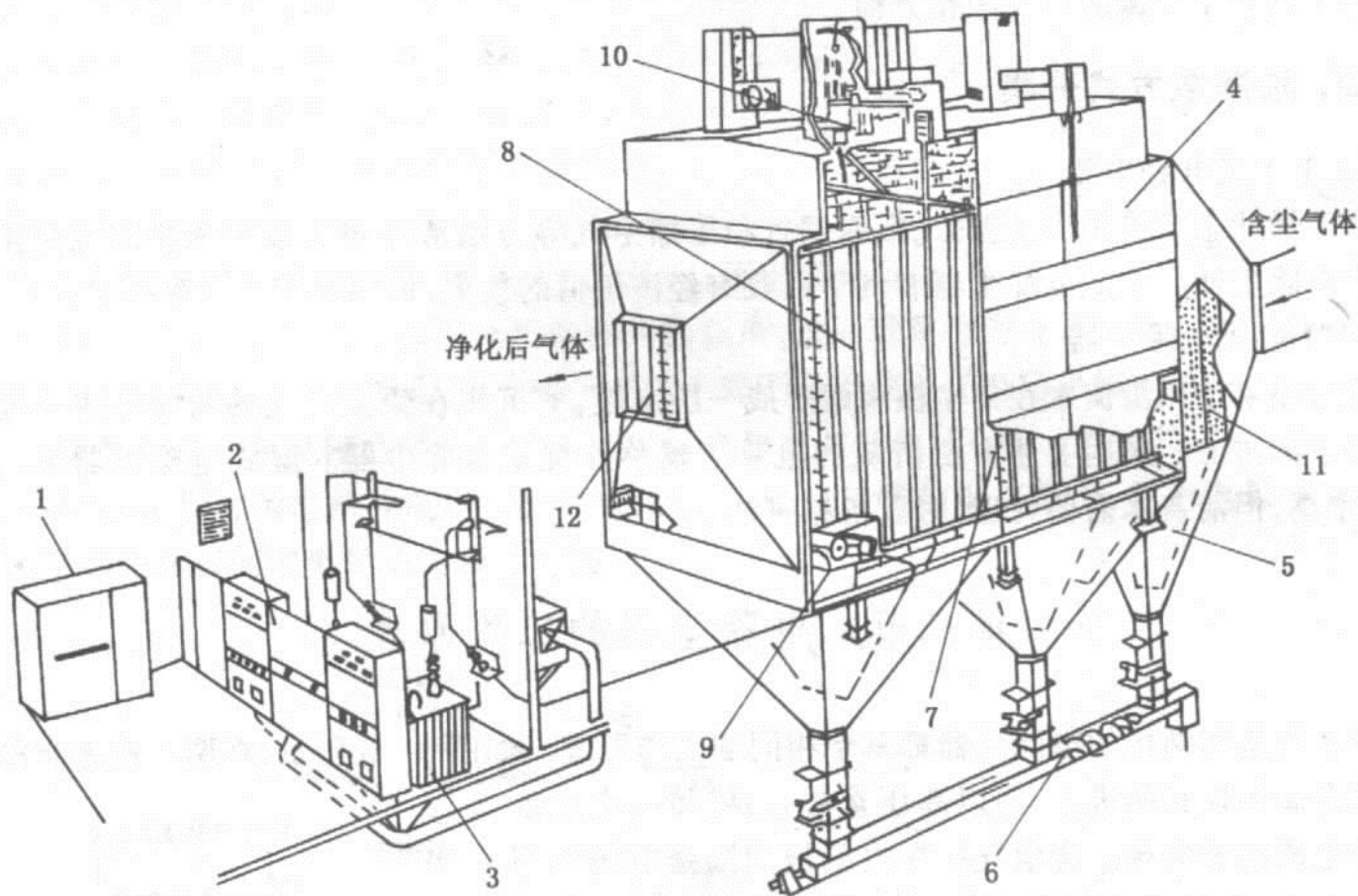


图 8-2 板式电除尘器示意图

1. 低压电源控制柜; 2. 高压电源控制柜; 3. 电源变压器; 4. 电除尘器本体; 5. 下灰斗;
6. 螺旋除灰机; 7. 放电极; 8. 集尘极; 9. 集尘极振打清灰装置; 10. 放电极振打清灰装置;
11. 进气气流分布板; 12. 出气气流分布板

[返回](#)

集尘极的结构形式

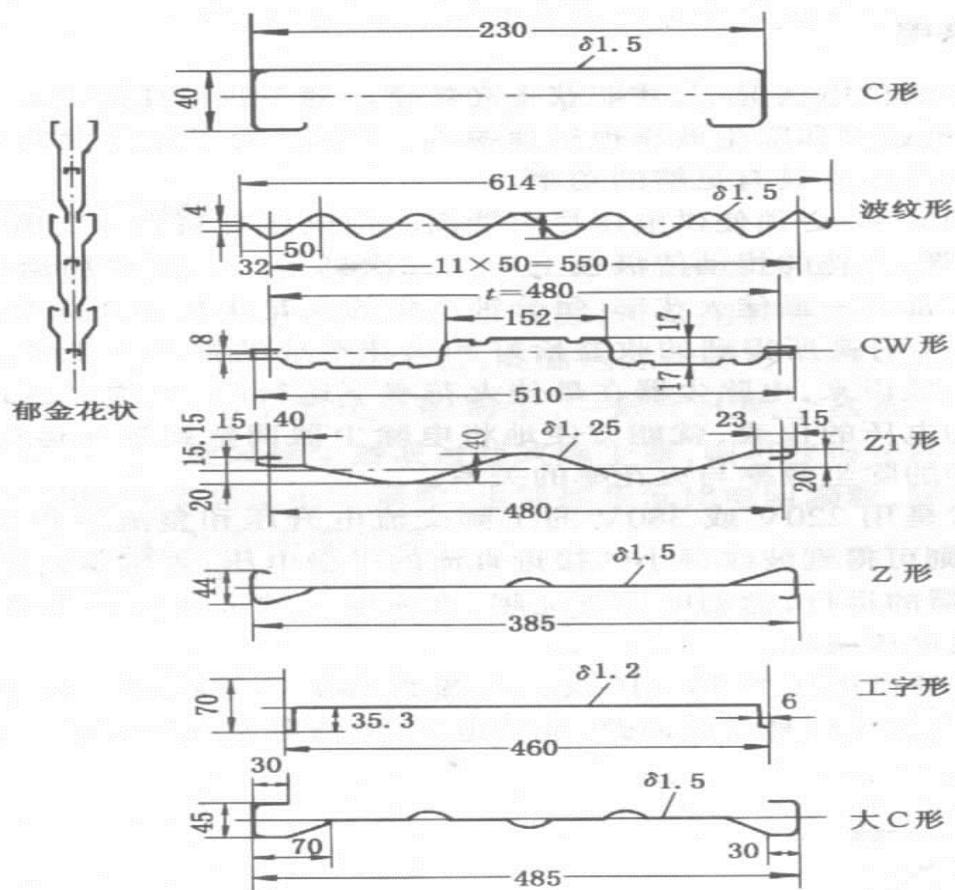


图 8-15 常见的几种收尘极极板的形式

[返回](#)

电晕极的固定型式

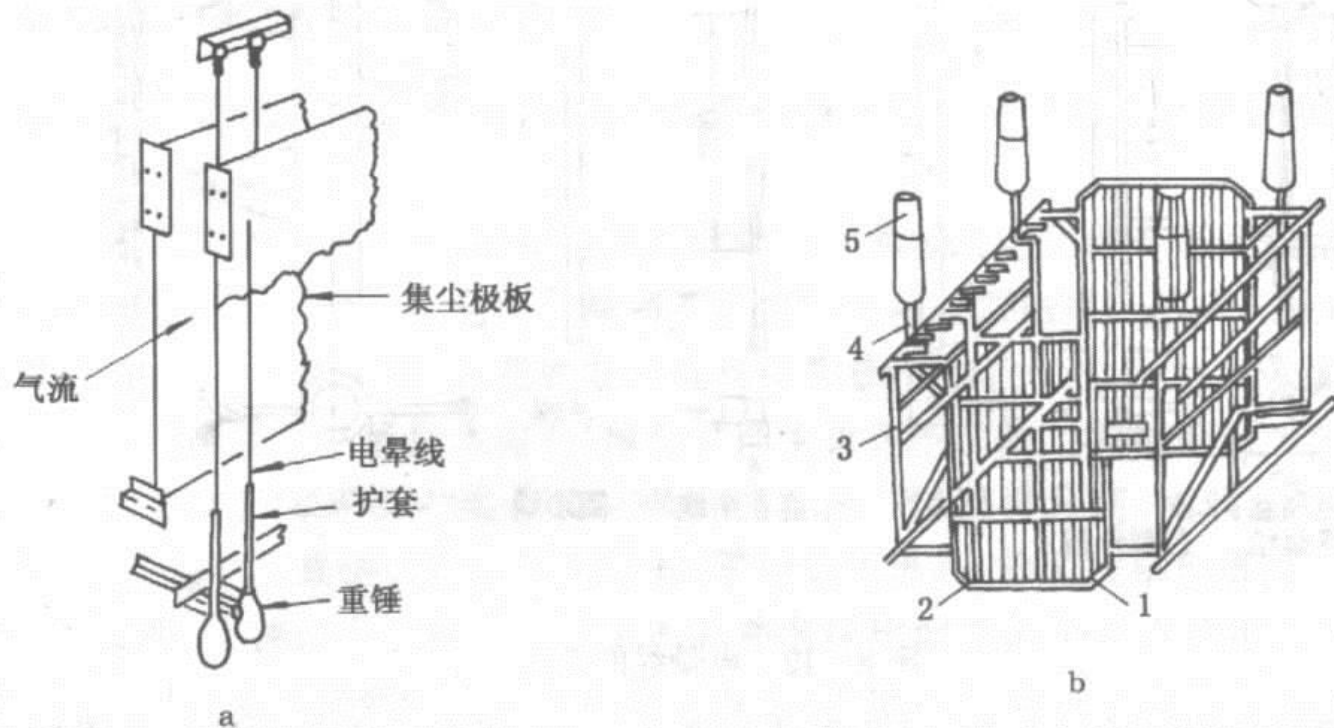


图 8-14 电晕电极的两种固定型式

a. 重锤悬吊张紧电晕线; b. 框架绷紧电晕线

1. 框架电晕线; 2. 电晕线; 3. 框架电晕线吊架; 4. 悬吊杆; 5. 绝缘套管

[返回](#)

电晕线的形式

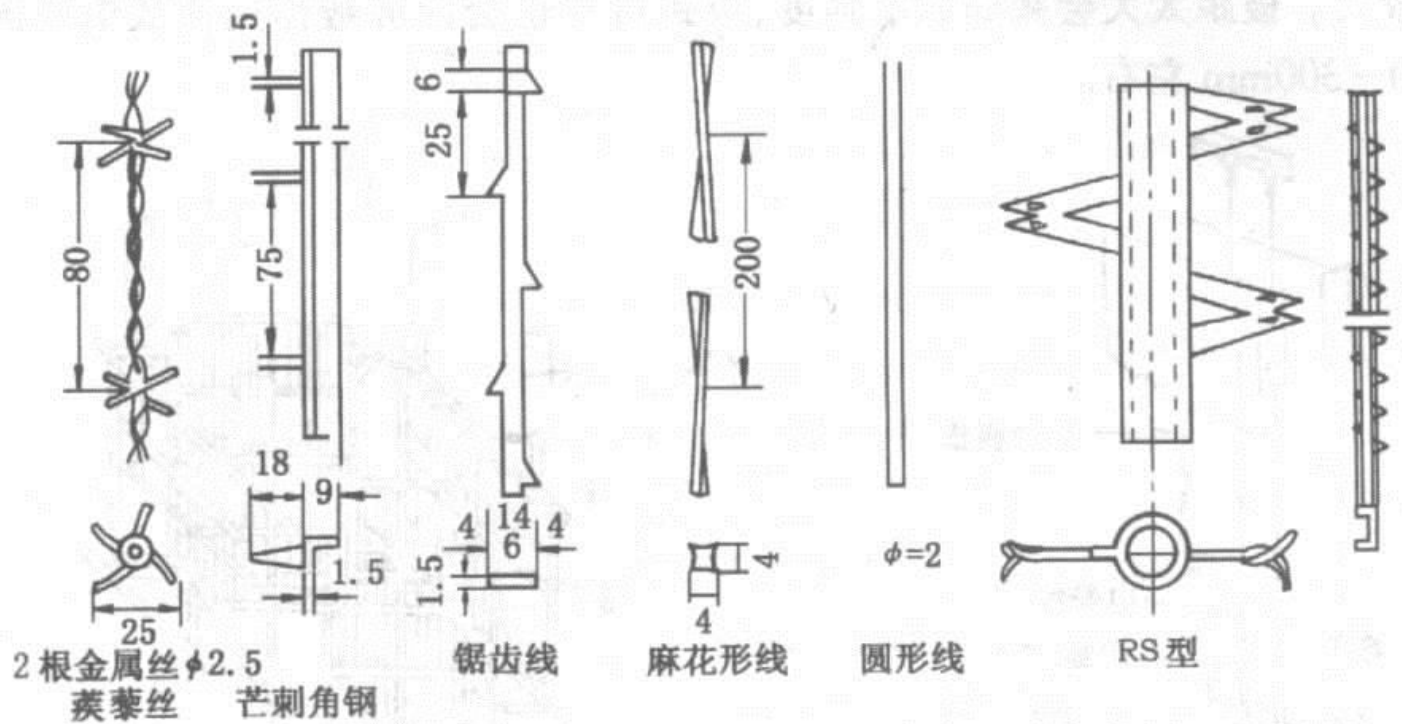


图 8-12 电晕线的形式

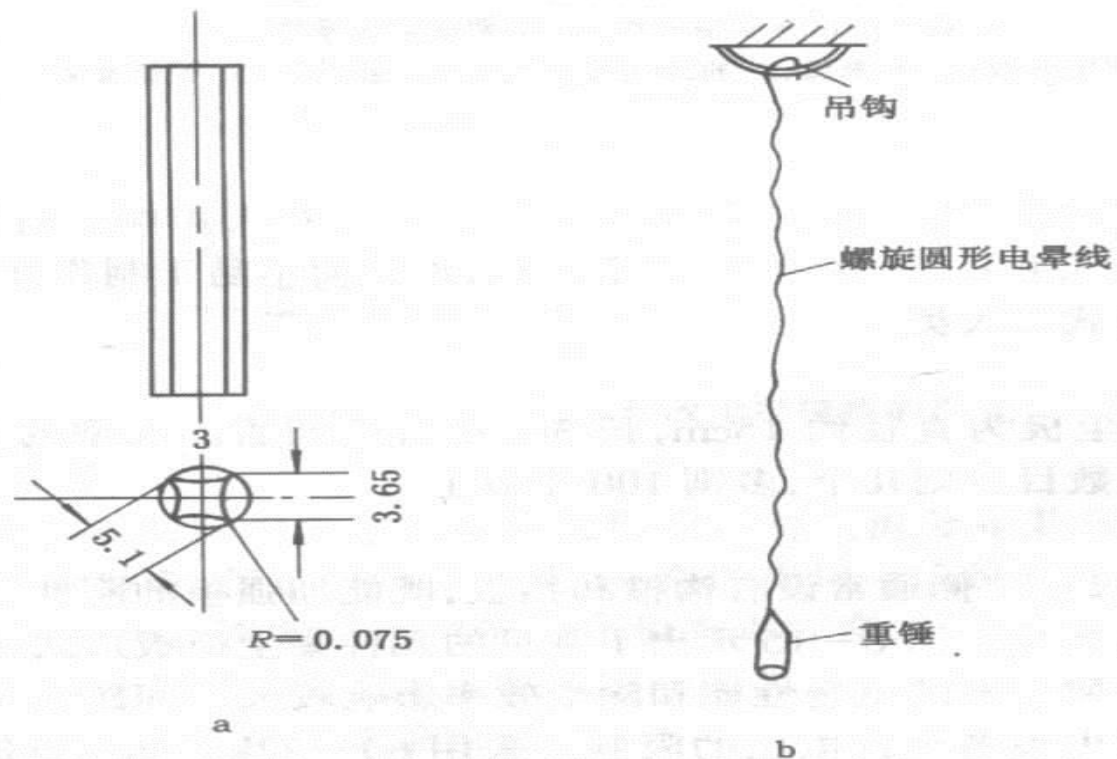


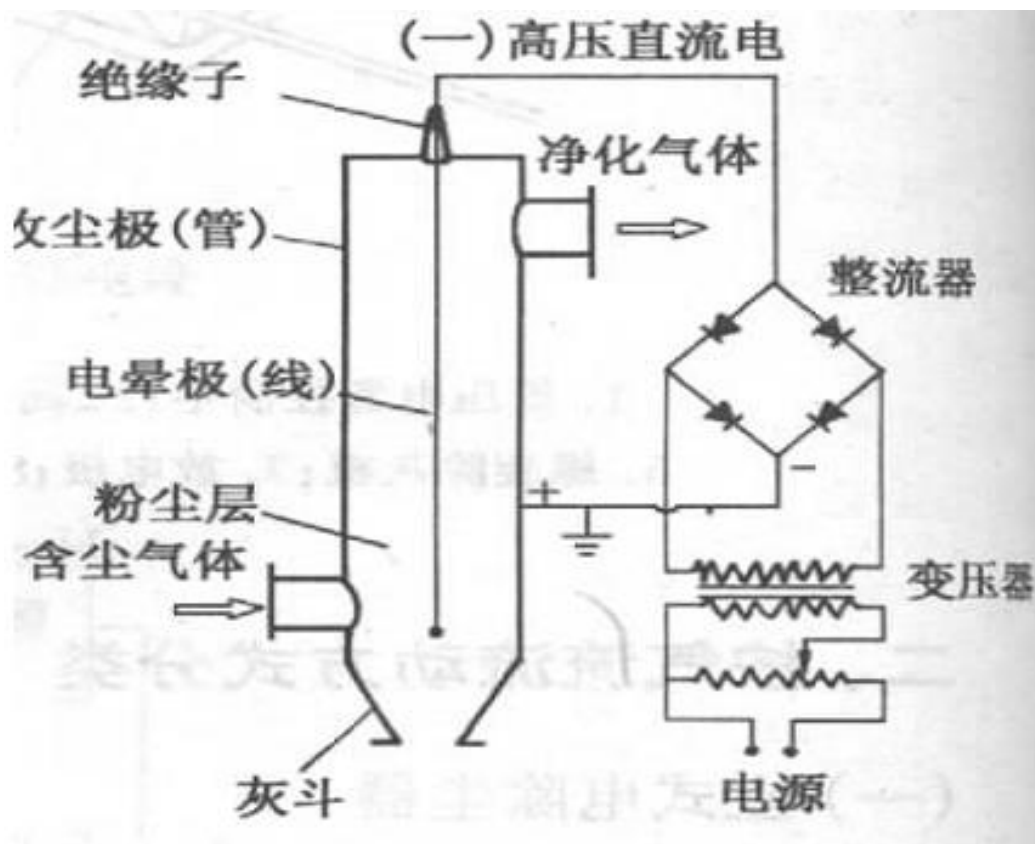
图 8-13 星形及螺旋圆形电晕线

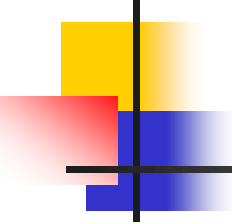
a. 星形电晕线; b. 螺旋圆形电晕线

■ [返回](#)

电除尘器示意图

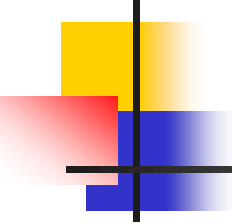
■ [返回](#)





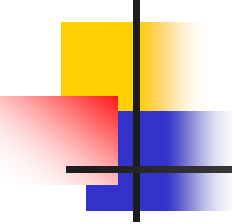
压力和温度的影响

- 影响气体密度，进而改变分子运动的平均自由程和起晕电压
 - 压力越大，起晕电压越高；温度升高，起晕电压降低
 - 温度还会对粉尘的比电阻产生影响
- 影响离子的迁移率
- 返回



气体组成的影响

- 气体组成对电晕特性的影响主要体现在组成分子对电子的亲合力（电负性）大小，氢、氮气和氩气等对电子几乎没有亲合力，不能形成负离子；
- 而氧气、二氧化硫等却因其电负性强，能俘获电子形成负离子；
- 二氧化碳和水蒸气分子，在高速电子作用下，容易形成氧原子，继而由氧原子俘获电子形成负离子；
- 另外，不同种类气体形成的负离子在电场中的迁移率也不同
- [返回](#)



起晕电场 E_c 计算式

■ Peek计算公式

$$E_c = 3 \times 10^6 m (\delta + 0.03 \sqrt{\delta / a})$$

δ --- 气体的相对密度

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}$$

m ----- 导线光滑修正系数

[返回](#)

板式电除尘器内的电场分布(通过电晕极的断面上)

$$E(l) = \frac{V}{l \ln(d / a)}$$

d的计算

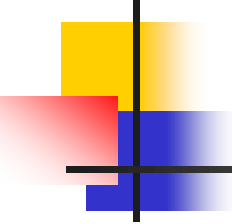
$$\mathbf{b/c \leq 0.6 \text{ 时, } d = \frac{4b}{\pi}} \quad \mathbf{b/c \geq 2 \text{ 时, } d = \frac{c}{\frac{\pi b}{\pi e^{2c}}}}$$

a----电晕线半径

b----电晕极到集尘极间的距离

c—两电晕线之间距离的一半

■ **返回**



管式电除尘器内的电场分布

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$

$$V_c = E_c r_0 \ln(r_c / r_0)$$

r----距电晕线中心的距离

a----电晕线半径

b----管式电极半径

V---施加于电晕线和集式电极之间的电压

返回

电子雪崩示意图

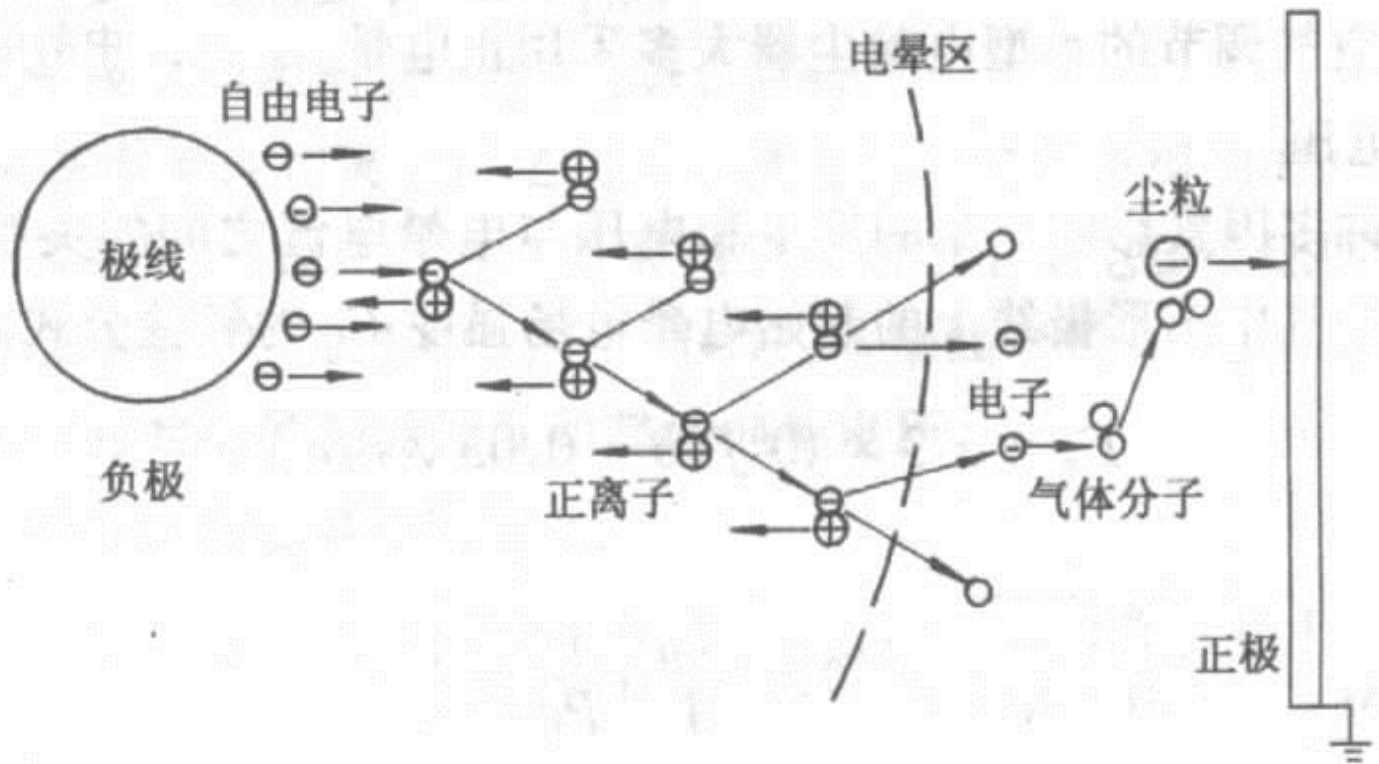


图 8-5 气体的电离

■ [返回](#)