



# 京能集团2016年环保改造技术交流会



**叶勇健**

华东电力设计院副总工程师，教授级高级工程师，长期从事火力发电厂设计，主持参加多个高参数、大容量1000MW、600MW超超临界电厂设计。主要研究方向：烟气净化、电厂节能、热机设备、热力系统、厂房布置等。

## 利用现有电厂环保系统降低PM2.5的方法探讨

# 利用现有火电厂环保系统降低 PM2.5颗粒排放的方法

华东电力设计院

2016年3月



# 第1节

## PM<sub>2.5</sub>的形成和特性



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 1 PM<sub>2.5</sub>的形成和特性

- PM<sub>2.5</sub>颗粒是指大气环境中动力学直径小于2.5μm的细微颗粒物，在大气中的PM<sub>2.5</sub>颗粒中大部分是直径小于1.0μm的更为细小的颗粒。由于这种细微颗粒物被人体通过呼吸吸入后，可在人体呼吸道、肺部以及血液中常时间停留，不能通过咳嗽等方式被人体排出，因此对人体的健康造成不利的影晌。另外，这种细微颗粒物还能造成大气的能见度下降，容易形成“阴霾”天气，对城市景观带来负面影响。



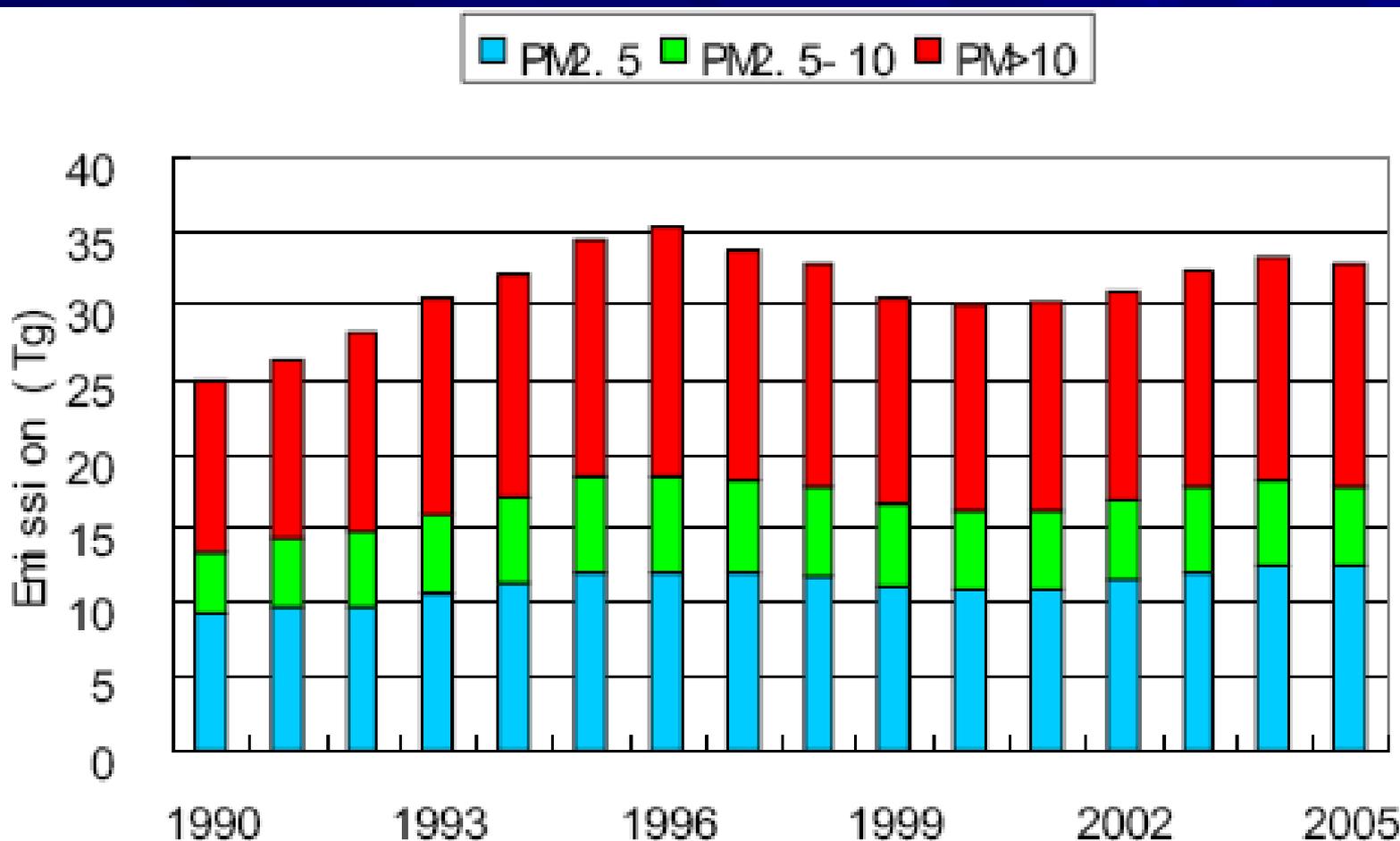
# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- $PM_{2.5}$ 颗粒主要是人为活动引起的，比如汽车的排放、燃煤烟气排放等。自然现象如风沙扬尘形成的一般为直径大于 $PM_{10}$ 颗粒。据统计，我国自1990年以来大气中 $PM_{2.5}$ 颗粒的平均浓度呈不断上升趋势，年总排放从1990年的约900万吨上升到2005年的超过1200万吨。



# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

我国 $PM_{2.5}$ 的排放总量



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

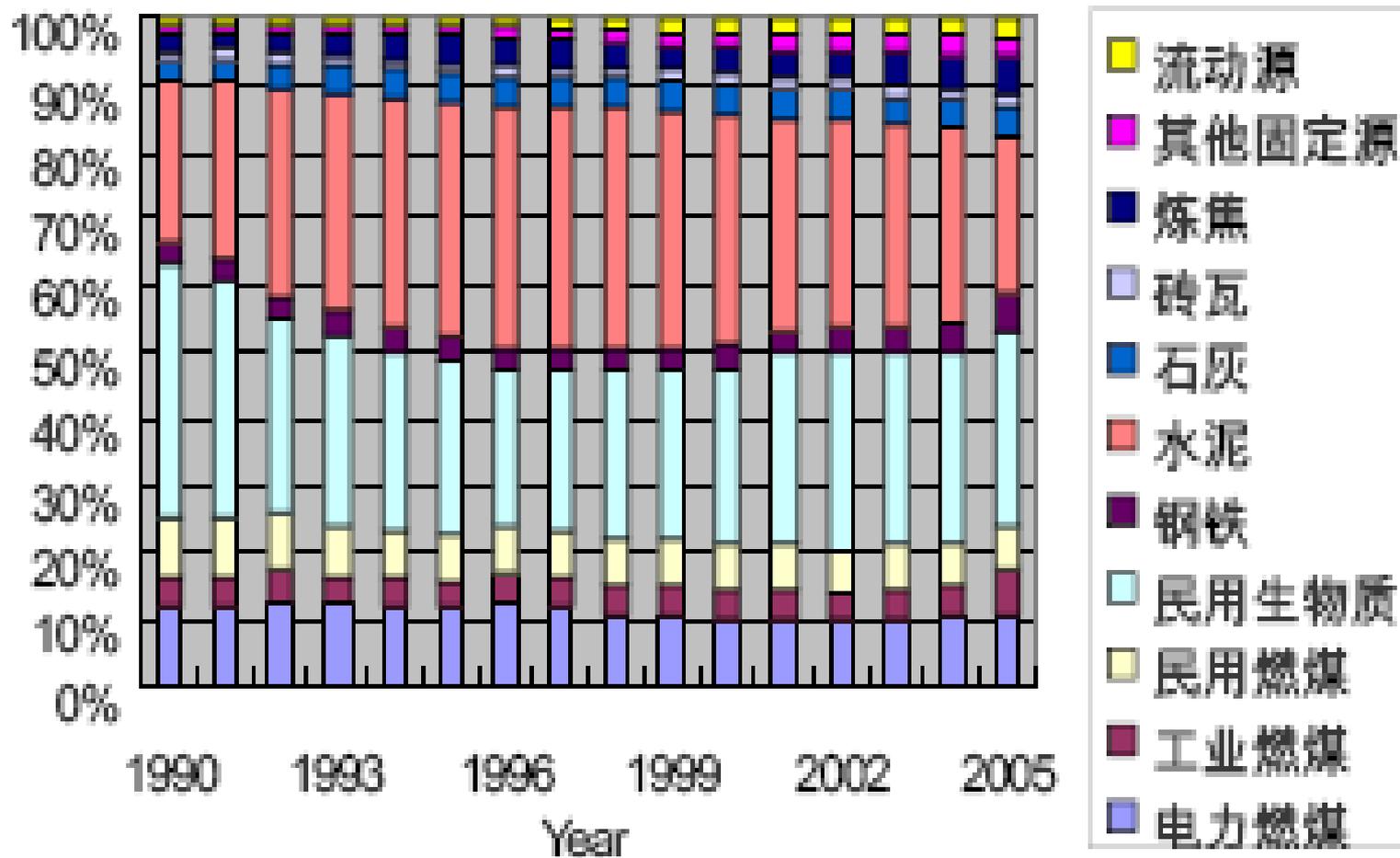
# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- $PM_{2.5}$ 颗粒主要是人为活动引起的，比如汽车的排放、燃煤烟气排放等。自然现象如风沙扬尘形成的一般为直径大于 $PM_{10}$ 颗粒。据统计，我国自1990年以来大气中 $PM_{2.5}$ 颗粒的平均浓度呈不断上升趋势，年总排放从1990年的约900万吨上升到2005年的超过1200万吨。



# 1 PM2.5的形成和特性

我国各行业PM2.5的排放量比较



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

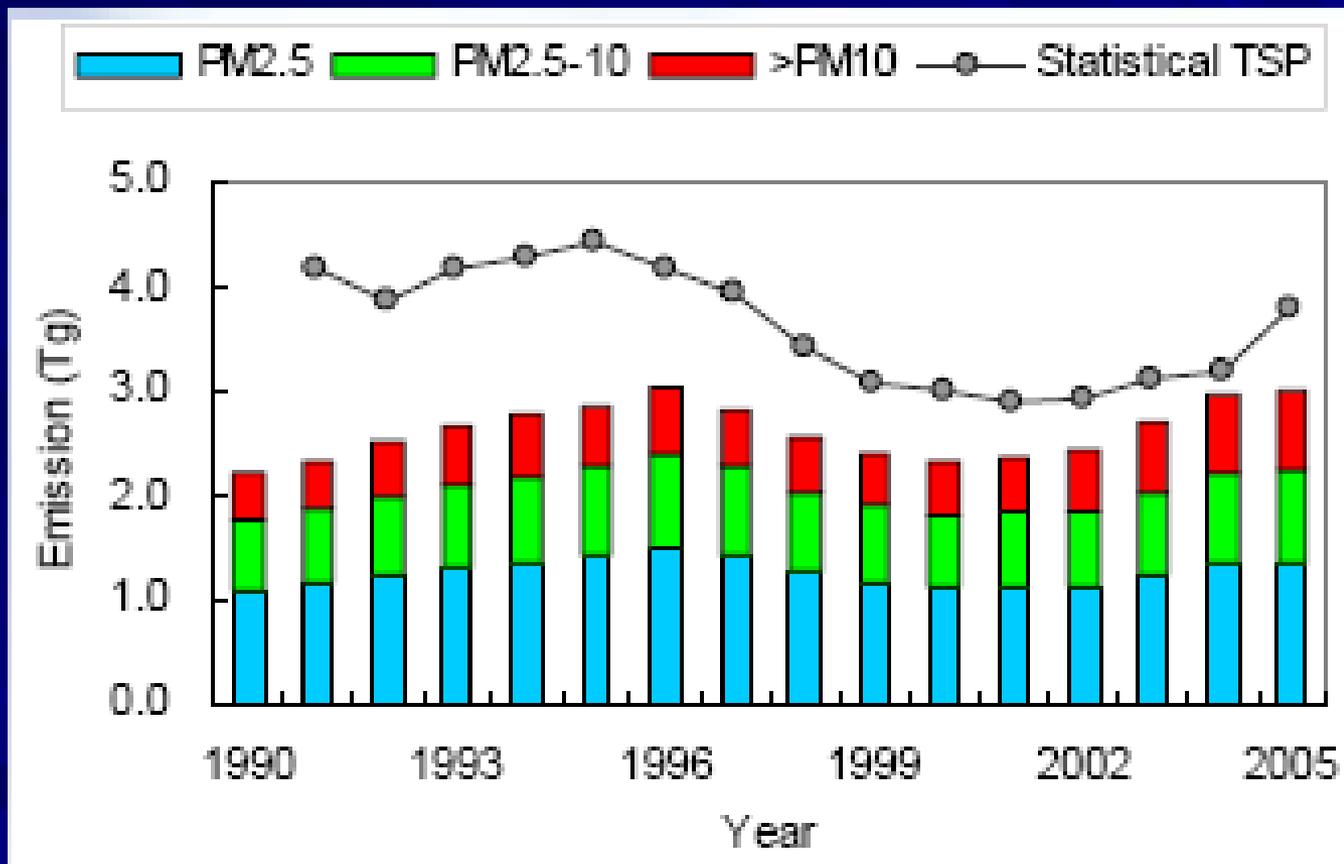
# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- 火电厂的排放水平在100万吨左右，约在总排放量的10%。火电厂的烟尘排放中大部分是 $PM_{2.5}$ 颗粒，且 $PM_{2.5}$ 颗粒所占比例逐年提高，这与近年来火电行业大力推行高效除尘技术，全行业平均除尘效率不断上升的趋势是相对应的。



# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

我国火电厂 $PM_{2.5}$ 颗粒的总排放量



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- 虽然，火电行业 $PM_{2.5}$ 的排放量在所有行业中排名第三，但是其排放总量仍不可忽视。随着国内对大气中 $PM_{2.5}$ 颗粒的关注程度不断上升，相关部门正在酝酿在空气质量标准中增加 $PM_{2.5}$ 指标，火电厂应对 $PM_{2.5}$ 的减排应有相应措施。



# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- $PM_{2.5}$ 颗粒在大气中主要以水溶性离子气溶胶的型式存在，其中硫酸盐、硝酸盐和氨盐是其重要的组成部分。比如，硫酸根、硝酸根和氨根离子通过一些化学反应（如夏季光化学反应或者 $SO_2$ 和 $NO_x$ 的均相和非均相氧化反应）生成二次粒子硫酸盐、硝酸盐和氨盐。因此，许多研究中，以测定上述离子的质量浓度谱分布来表征 $PM_{2.5}$ 颗粒污染特征。



# 1 PM<sub>2.5</sub>的形成和特性

- 通过对北京市大气颗粒的测定发现，上述三者总量占到水溶性离子的85%。北京冬季采暖期SO<sub>2</sub>污染严重，PM<sub>2.5</sub>质量浓度冬季最高，晚春、夏天和早秋最低。又如，汽车尾气的排放污染物中含有大量的氮氧化物，大气中被氧化成硝酸盐，是形成PM<sub>2.5</sub>的重要来源。



# 1 PM2.5的形成和特性

北京市城区和郊区PM2.5来源分布

	土壤	煤炭燃烧	汽车尾气	工业源	未知源
北京城区	11.2%	25.6%	59.7%	0.8%	0.7%
北京郊区	11.3%	48.6%	18.5%	6.2%	15.4%



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 1 $PM_{2.5}$ 的形成和特性

- 可见， $PM_{2.5}$ 颗粒的来源可分为两部分，一部分是汽车发动机燃烧、煤炭燃烧过程中形成的微小颗粒，可称为“原发性” $PM_{2.5}$ 颗粒，另一部分是大气中的硫酸根、硝酸根和氨根离子通过化学反应生成的微小颗粒，可称为“继发性” $PM_{2.5}$ 颗粒。两种形式的 $PM_{2.5}$ 颗粒在大气中相互作用。





## 第2节

# 除尘、脱硫、脱硝与PM<sub>2.5</sub>的关系



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



## 2 除尘、脱硫、脱硝与PM<sub>2.5</sub>的关系

- 火电厂排放的PM<sub>2.5</sub>一部分来自于烟气中的粉尘。除尘器效率的提高能降低PM<sub>2.5</sub>的排放。
- 湿法脱硫塔能通过洗涤降低烟气中的含尘量。工程上一般取脱硫塔的除尘效率50%。但是，除去的大部分是大颗粒烟尘。
- 烟尘通过脱硫塔烟尘颗粒的粒径分布向小颗粒方向迁移，PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的质量比由入口的0.434增加到出口的0.764。



## 2 除尘、脱硫、脱硝与PM<sub>2.5</sub>的关系

- 火电厂排放到大气中的PM<sub>2.5</sub>并不是完全从烟气粉尘中产生，相当一部分是火电厂排放到大气中的SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>在大气中生成的硫酸根、硝酸根和氨根离子等形成酸性水溶胶。
- 最新的燃煤电厂排放标准中，NO<sub>x</sub>排放限制为100~200mg/Nm<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>排放限值为50~200 mg/Nm<sup>3</sup>，烟尘的排放限值为20~30 mg/Nm<sup>3</sup>。因此，由火电厂排放的SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>而形成的PM<sub>2.5</sub>总量应不低于烟尘中的PM<sub>2.5</sub>。





# 第3节

## 袋式除尘器运行方式对PM2.5颗粒的捕捉效率的影响



# 3袋式除尘器运行方式对PM2.5颗粒的捕捉效率的影响

- 袋式除尘器通过滤袋对烟气中的颗粒物进行捕捉，这种方式可类比于滤网。滤袋织物的孔径很小，烟尘经过滤袋时大于滤袋孔径的烟尘颗粒无法通过滤袋，而被滤袋捕捉。同时滤袋上附着的烟尘颗粒也起到滤网的作用，实现一次尘捕捉二次尘。



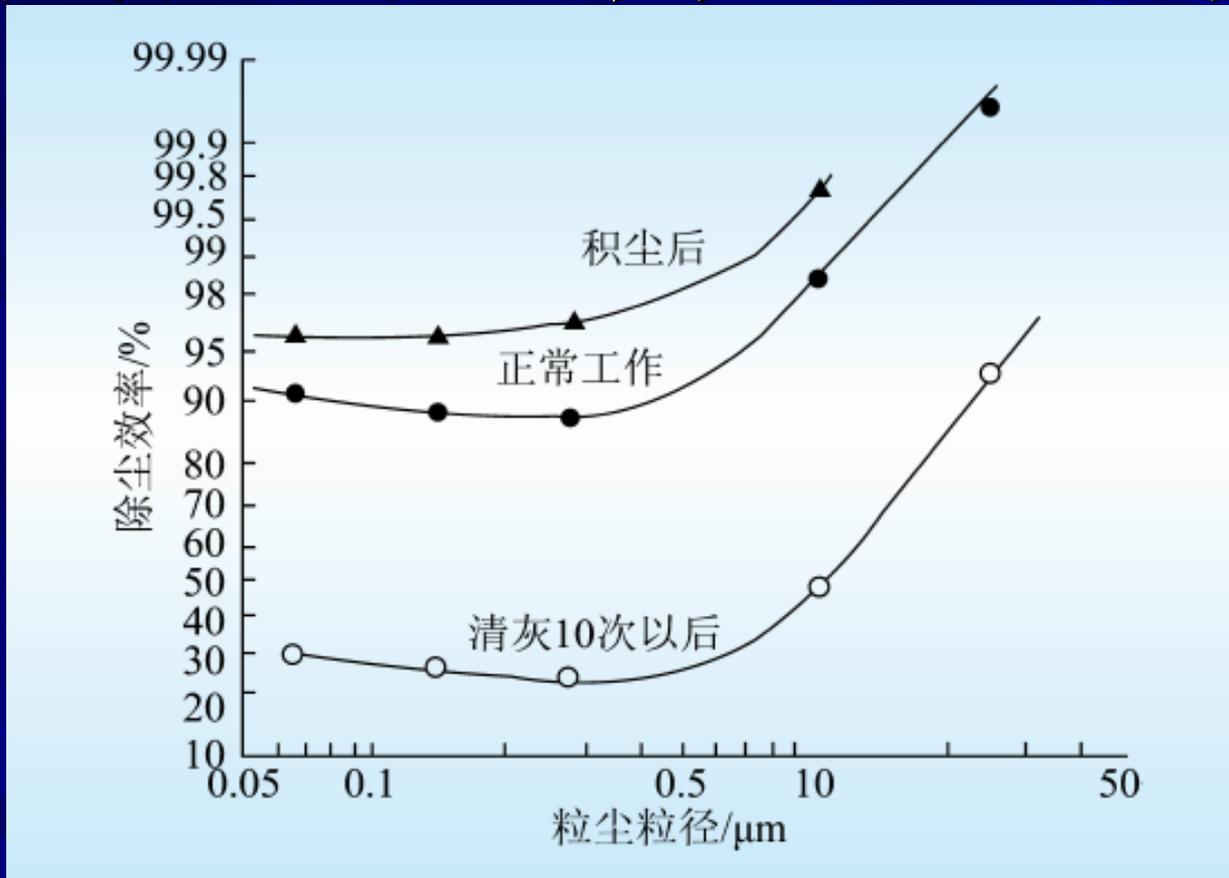
# 3袋式除尘器运行方式对PM<sub>2.5</sub>颗粒的捕捉效率的影响

- 附着在滤袋上的烟尘颗粒更为紧密，微观上这些紧密排列的烟尘阻挡和干扰了细小颗粒在滤袋中的布朗运动，使得大量的细小颗粒被滤袋阻挡。因此袋式除尘器烟尘排放量很低，一般小于50mg/Nm<sup>3</sup>，绝大部分的PM<sub>2.5</sub>可以被袋式除尘器捕捉。
- 袋式除尘器正常工作时，0.1~0.5μm的颗粒收尘效率略低于90%，0.5~1.5μm的颗粒收尘效率大于90%。



# 3袋式除尘器运行方式对PM2.5颗粒的捕捉效率的影响

袋式除尘器除尘效率与颗粒粒径的关系



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 第4节

## 提高静电除尘器 去除PM<sub>2.5</sub>效率的 方法



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

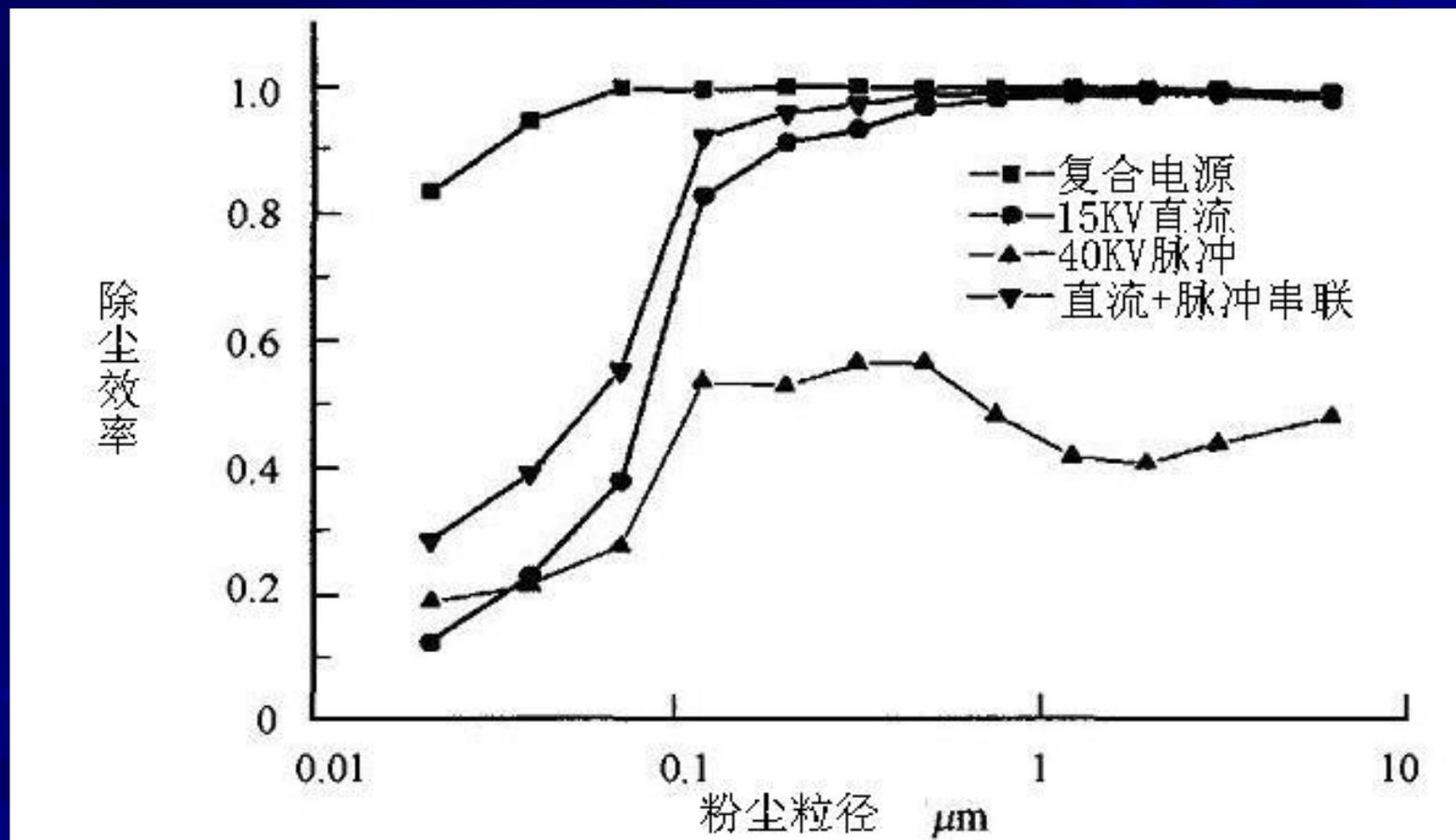


# 4 提高静电除尘器去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

- 静电除尘器对颗粒的捕捉，无论其粒径大小，都是通过使颗粒荷电后被电极吸附的方式。通常认为，静电除尘器对于大颗粒烟尘的捕捉能力强，对于PM<sub>2.5</sub>颗粒的除尘效率较低。
- 通过变化静电除尘器的荷电形式可大大提高静电除尘器对PM<sub>2.5</sub>的捕捉能力。



# 4 提高静电除尘器去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法



## 4 提高静电除尘器去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

- 采用低能耗的高压窄脉冲放电对粉尘颗粒物预荷电，可大大增加了亚微米级颗粒的荷电量，结合传统的直流静电除尘，既复合电源方式，将提高静电除尘器对亚微米级颗粒的脱除效率。对小于1 $\mu$ m颗粒的脱除效率可达90%。





# 第5节

## 提高湿法脱硫 去除PM<sub>2.5</sub>效率 的方法



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

应用蒸汽相变原理促进PM<sub>2.5</sub>颗粒增大

- 在过饱和蒸汽环境中，水蒸气以微小颗粒为凝结核，并发生相变，形成粒径较大的含尘液滴，并同时产生扩散泳和热泳的作用，促使含尘液滴迁移运动，相互碰撞接触并长大，长大后的液滴可通过惯性碰撞机理加以捕捉。
- 以PM<sub>2.5</sub>颗粒为凝结核，并发生相变，使PM<sub>2.5</sub>颗粒直径长大，质量增加。



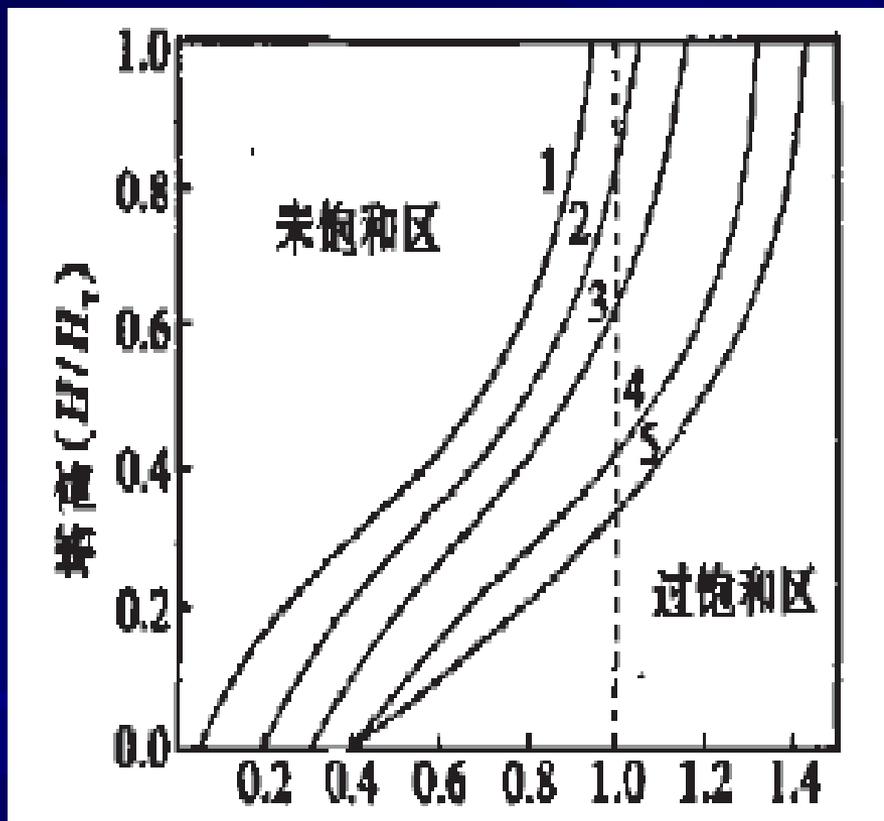
# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

- 在可凝结水汽质量浓度为10~20g/m<sup>3</sup>，PM<sub>2.5</sub>颗粒可在100ms内快速长大到PM<sub>3</sub>~PM<sub>5</sub>。
- 对于PM<sub>3</sub>~PM<sub>5</sub>颗粒湿法脱硫塔可的除尘效率可达50%~80%。



# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

吸收塔入口烟气条件与出口烟气条件的关系



- 1: 进口烟气温度90度, 湿度8%
- 2: 进口烟气温度80度, 湿度20%
- 3: 进口烟气温度80度, 湿度30%
- 4: 进口烟气温度80度, 湿度40%
- 5: 进口烟气温度90度, 湿度50%

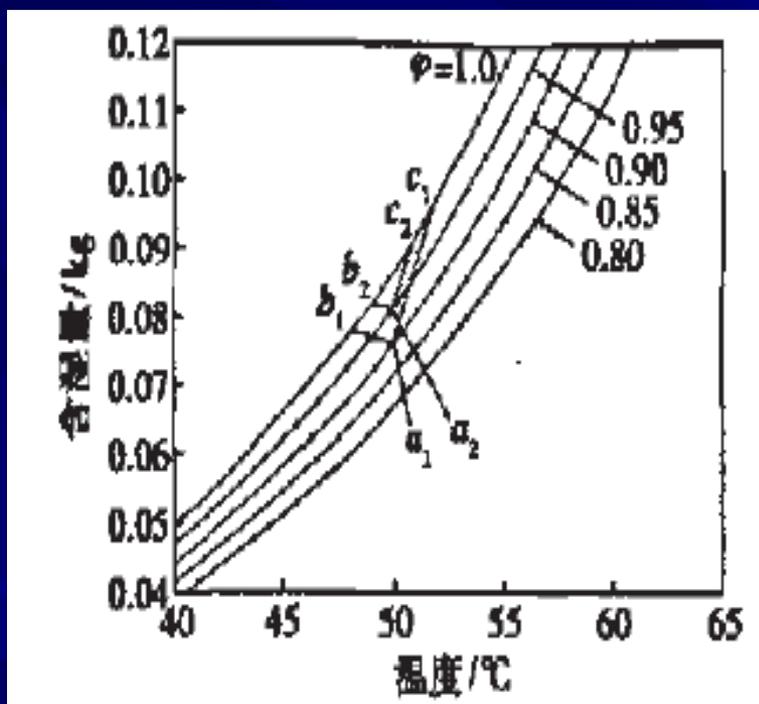


华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

吸收塔出口烟气与饱和状态的关系



- 烟气绝热冷却1~2度
- 向1kg干烟气中加入0.01~0.02kg水蒸汽

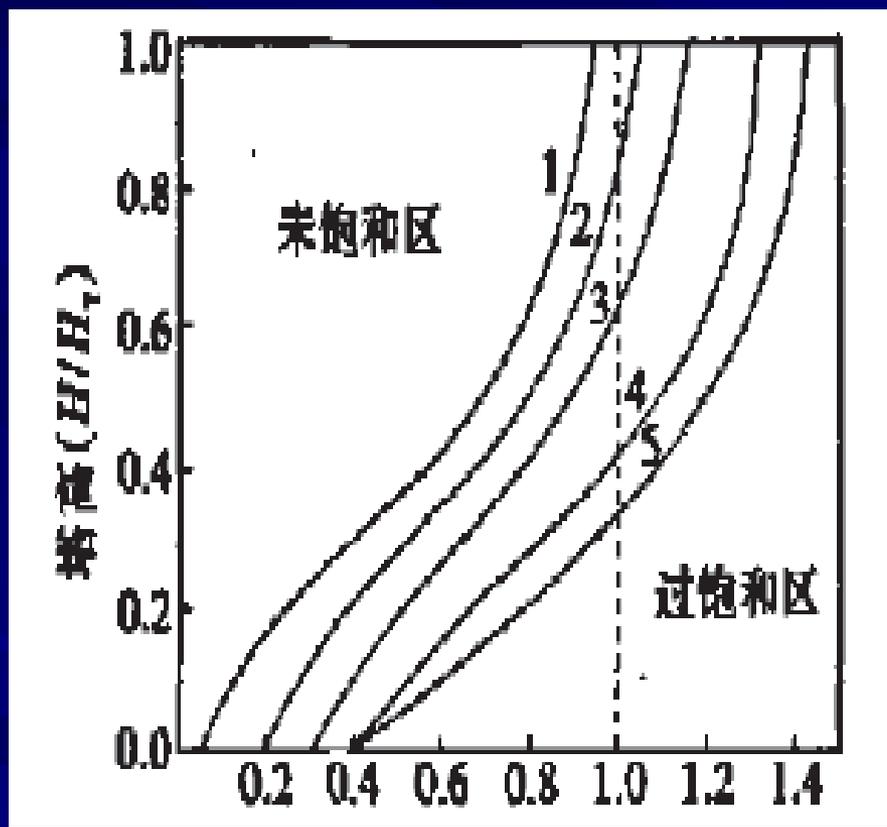


华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

方法一：吸收塔入口调节



- 增加脱硫塔进口的烟气含湿量。使得脱硫塔进口的烟气参数为图中的2, 3, 4, 5点。
- 在脱硫塔与引风机（增压风机）间的烟道上设置烟气湿度调节段。



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

- 在烟气调节段中喷入粒径为20μm~30μm的微粒水雾，利用烟气热量使得水汽化，烟气湿度增加到30%~40%。
- 湿度较高的烟气在脱硫塔内与低温的循环浆液逆向接触，烟气被冷却，在吸收塔的上部达到过饱和状态。过饱和水汽以PM<sub>2.5</sub>为凝结核发生相变，使得PM<sub>2.5</sub>颗粒增大，被浆液、除雾器捕获。



# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

## 方法二：吸收塔中调节

- 适当提高液汽比，使得吸收塔喷淋层进口烟气温  
度降低2~3度，实现烟气处于过饱和状态。
- 在吸收塔中段喷入适当饱和蒸汽，每kg干烟气喷  
入0.2kg饱和蒸汽。使得烟气达到过饱和状态。



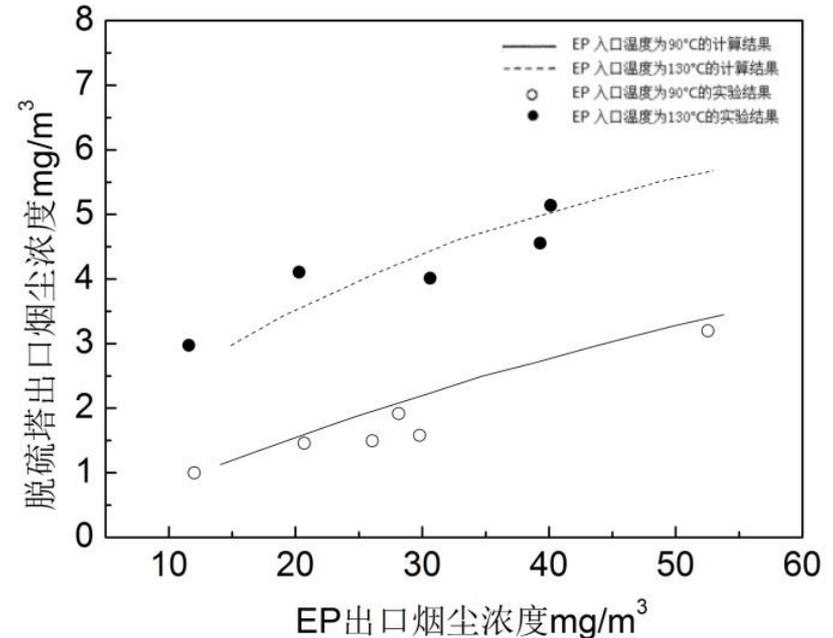
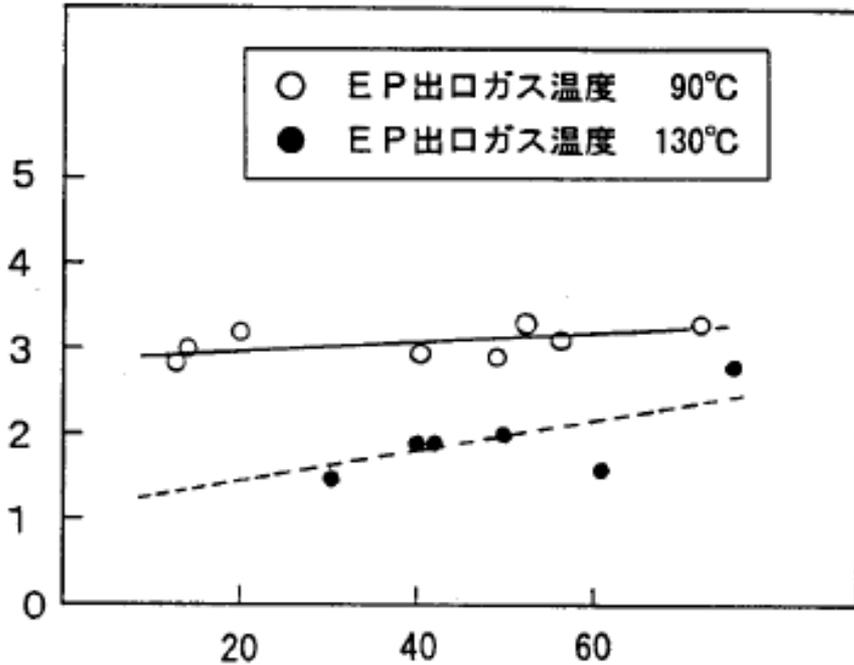
# 5 提高湿法脱硫去除PM<sub>2.5</sub>效率的方法

## 方法三：采用低低温静电除尘器

- 降低除尘器进口烟气温度的酸露点温度以下，90℃，可有效增加颗粒物的粒径。

低低温电除尘与  
低温除尘粒径级别

除尘粒径级别与  
脱硫出口烟尘浓度



A close-up photograph of electrical components, likely busbars or connectors, showing metallic surfaces and complex shapes.

# 第6节

## 小结



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



## 6 小结

- 电厂PM<sub>2.5</sub>颗粒不仅是随烟气排放，而且SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>在大气中生成的硫酸根、硝酸根和氨根离子等形成酸性水溶胶。因此，仅仅限制烟尘排放的PM<sub>2.5</sub>颗粒是没有意义的。
- 降低PM<sub>2.5</sub>颗粒需要降低除尘效率、脱硫效率、脱硝效率三管齐下。
- 降低PM<sub>2.5</sub>颗粒可充分利用现有除尘、脱硫等环保技术和环保设备。

