

第一届煤电超低排放和节能改造技术交流研讨会



李水清

清华大学热能工程系教授、博士生导师，曾入选教育部新世纪优秀人才支持计划入选者、清华大学221基础人才研究计划。曾在利兹大学、爱荷华大学、普林斯顿大学和耶鲁大学先后从事访问合作研究。主要研究方向包括燃煤清洁燃烧、非均相燃烧机理、颗粒动力学和细颗粒控制技术等，先后主持完成和在研的国家自然科学基金项目5项，主持航天五院科研项目5项，曾参加科技部973和863项目课题4项。共同完成剑桥大学出版社学术专著《Adhesive Particle Flow》一部，发表SCI收录论文60余篇，获授权发明或实用新型专利10项。

化石燃料燃烧源头控制PM_{2.5}的基础与技术

2016年3月9-10日 中国·济南



燃煤发电设施源头控制PM2.5 的关键技术研究

报告人：李水清 教授 博导

清华大学

lishuiqing@tsinghua.edu.cn

内容提要



一、排放

1. 背景：燃煤设施PM_{2.5}生成机制和排放特征

2. 湿式电除尘器实验室机理研究

3. 燃煤电厂WESP脱除PM_{2.5}现场测试与分析

二、控制

4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究

5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

6. 主要结论





研究背景

橙色预警：2015年11月30日，北京市升级发布今年首个雾霾橙色预警，全市PM2.5浓度12个小时内增长近10倍

环保部及专家分析表示，初步的来源解析表明，就整个华北区域而言，原煤燃烧和工业排放是此次重污染过程最主要的来源。

但就北京而言，此次重污染过程主要以本地排放贡献为主，其中机动车排放贡献占比较大。

燃煤电厂仍是大气颗粒物重要来源之一，排放控制日益严格



火电厂大气污染物排放标准

1996: 200 mg/m³

2003: 50 mg/m³

2011: **30(20)** mg/m³

2014: **10** mg/m³

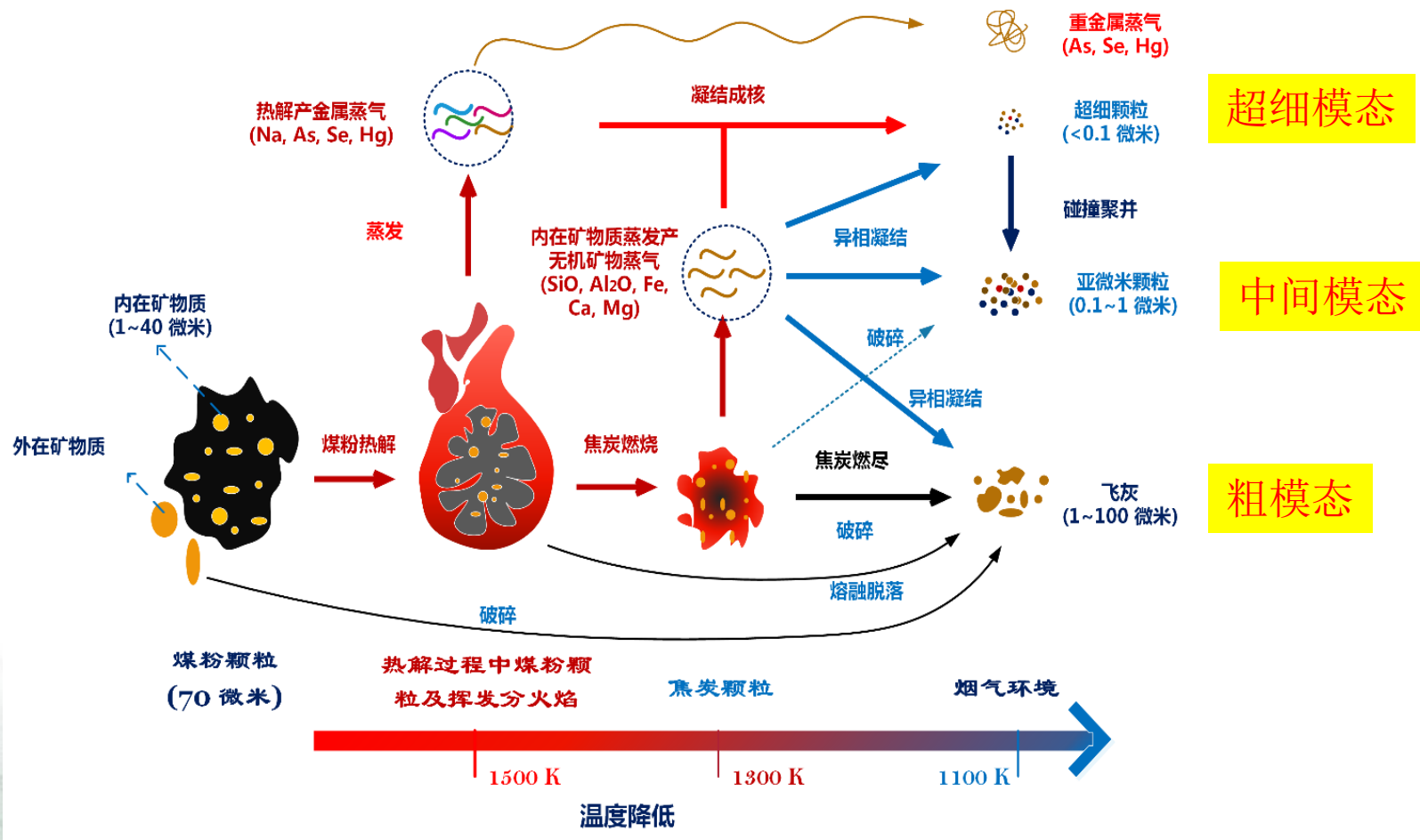


一. 燃煤设施 $PM_{2.5}$ 生成机制和排放特征

对象：并不熟悉？！



1.1 燃煤飞灰颗粒物的生成途径



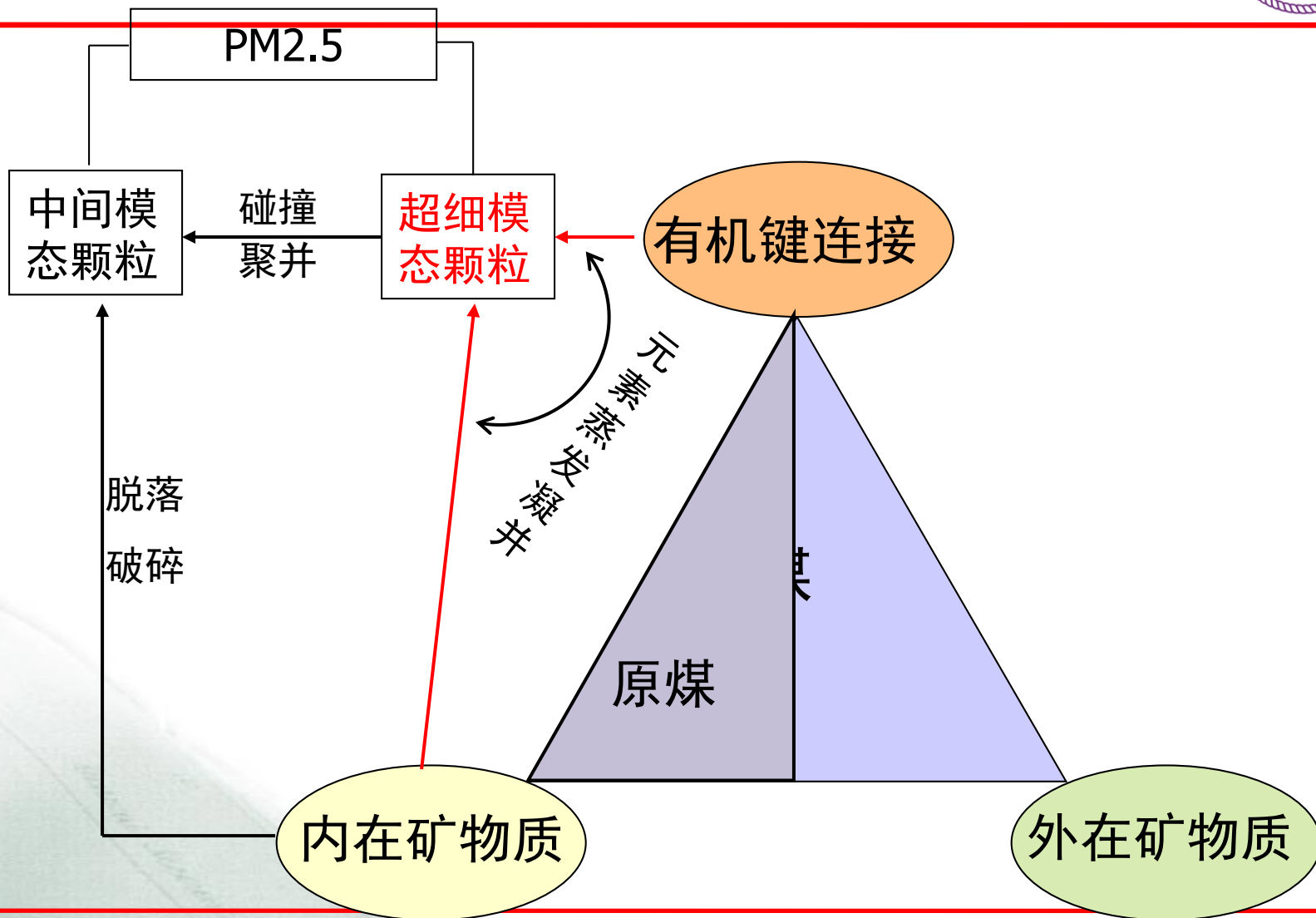
李庚达 博士论文 2014

卓建坤 清华大学博士学位论文, 2008



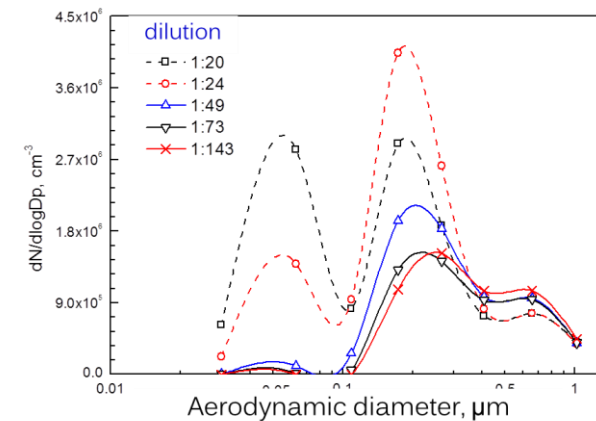
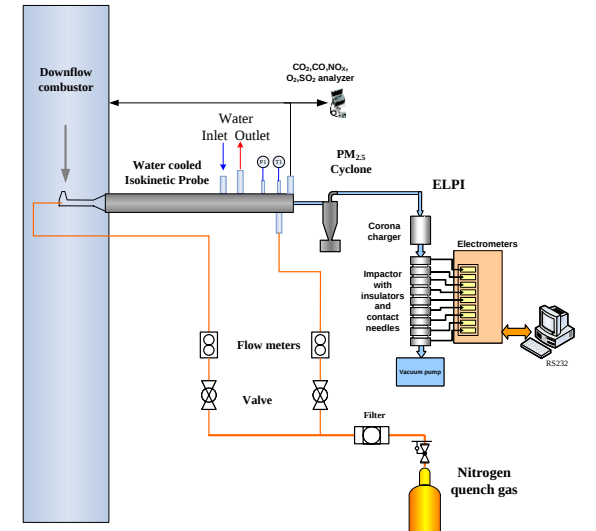
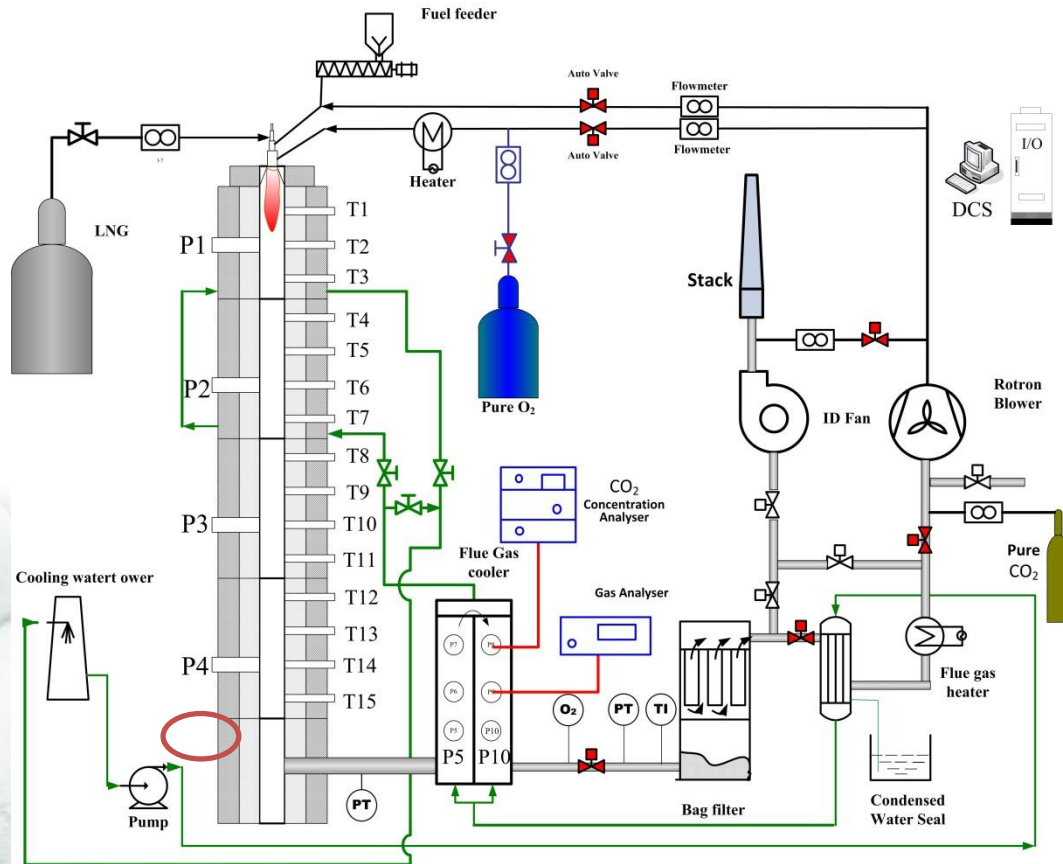


1.2 燃煤的矿物组成对PM2.5的贡献



1.3 清华大学973研究

清华大学 25kW自维持一维下行煤粉燃烧炉



燃料特性

典型高阶烟煤

低阶褐煤

高碱金属含量亚烟煤



工业分析（干燥基）

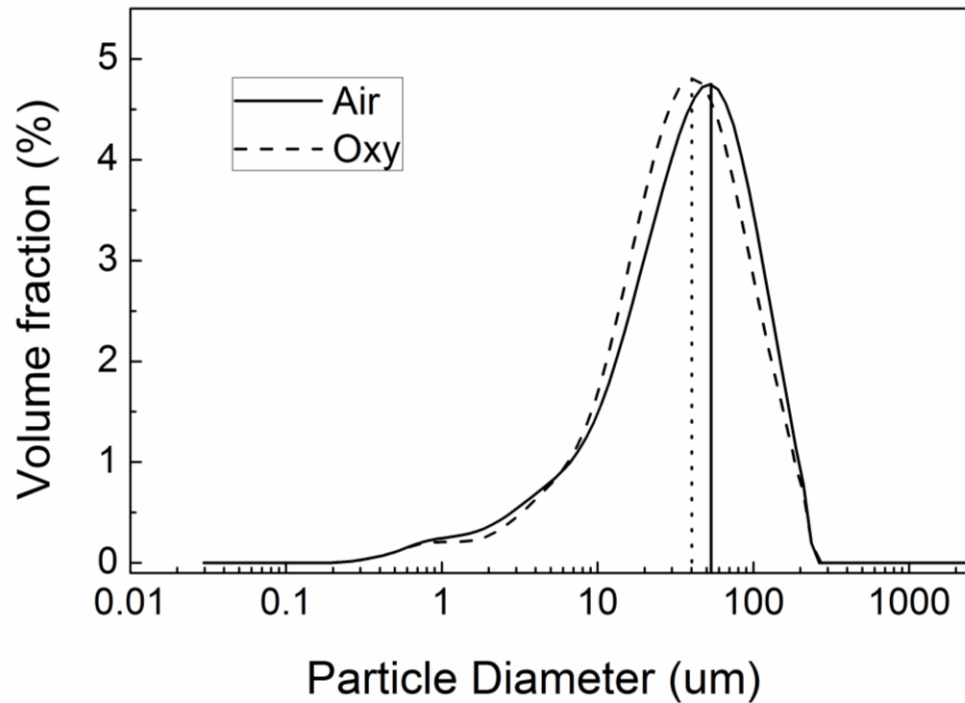
	固定碳 FC_d	挥发分 V_d	灰分 A_d	高位发热量 $Q_{gr,d}$
	/ wt %	/ wt %	/ wt %	/ MJ/kg
高熔点神华烟煤	55.52	24.11	20.37	25.26
呼伦贝尔褐煤	49.1	38.8	12.1	25.6
新疆准东煤	63.54	30.58	5.88	28.83

灰成分分析

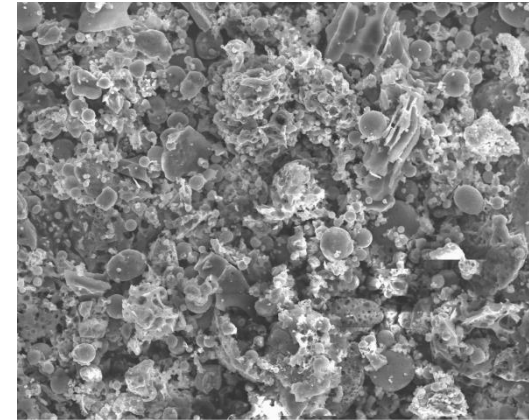
	高熔点神 华烟煤	呼伦贝尔 褐煤	新疆 准东煤
SiO_2	56.83	54.09	28.53
Al_2O_3	26.17	11.19	3.27
Fe_2O_3	6.98	13.83	4.01
CaO	2.68	10.93	32.78
MgO	0.7	2.08	2.88
TiO_2	1.2	0.74	0.3
SO_3	2.1	2.94	21.47
P_2O_5	0.48	0.06	ND ^a
K_2O	1.02	0.47	0.57
Na_2O	0.2	0.91	6.19



1.4 粗粒径飞灰颗粒的粒径分布



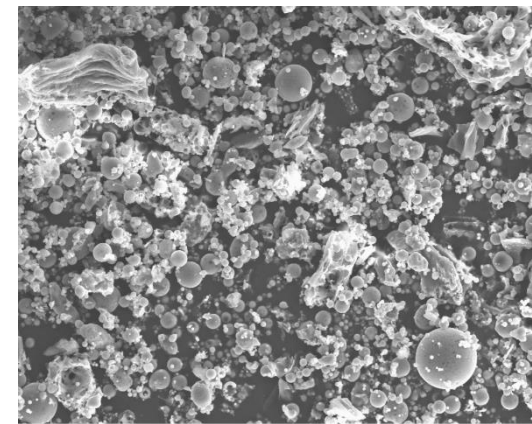
Air: 常规燃烧模式
Oxy: 富氧燃烧模式



100um

BET-SSA: 15.5143 m²/g

(a) Air mode



100um

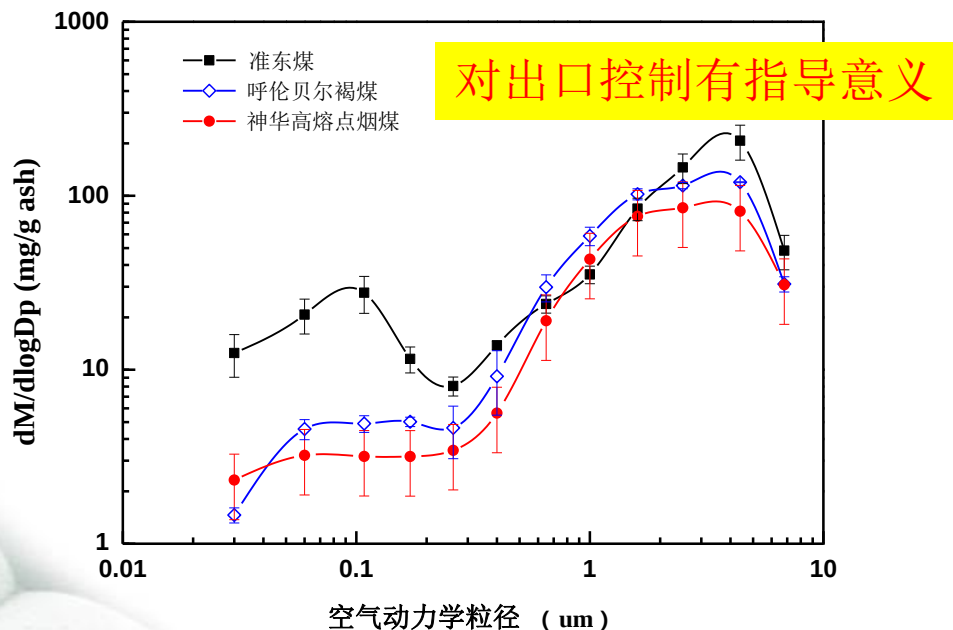
BET-SSA: 18.3738 m²/g

(b) Oxy mode

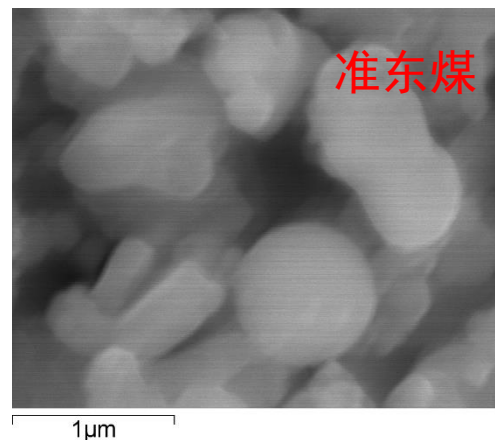
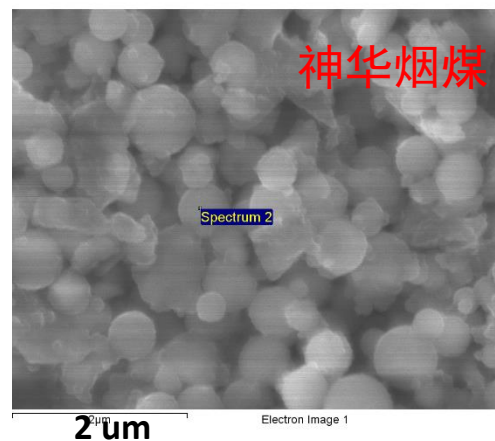
1.5 不同煤阶煤粉燃烧细颗粒物排放特性研究 (1/2)



单位质量煤灰生成细颗粒物浓度粒径分布



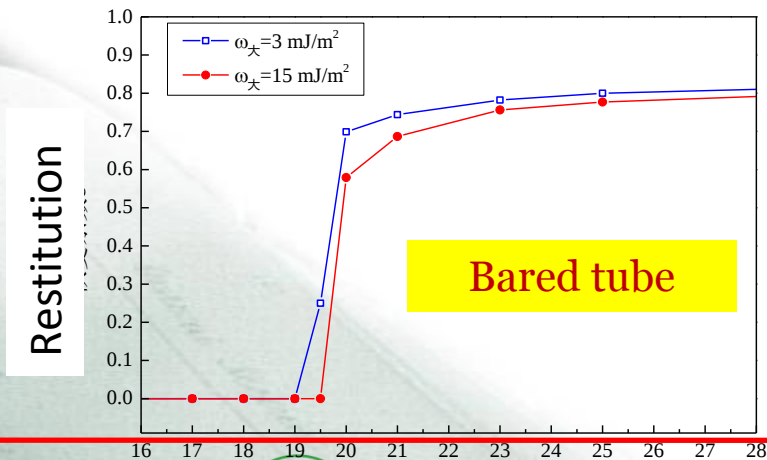
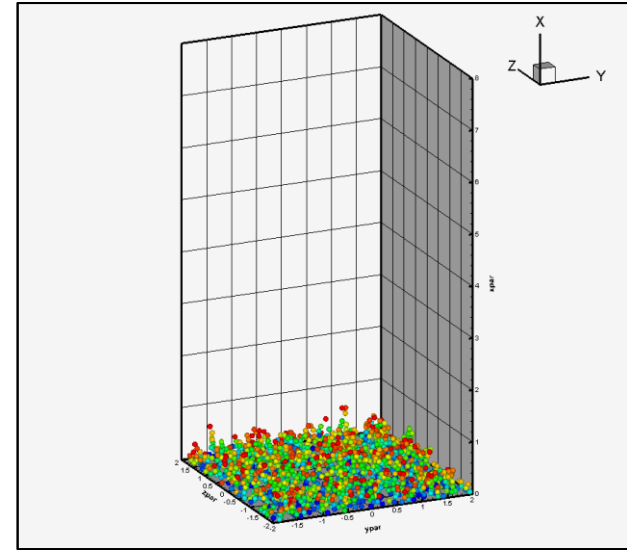
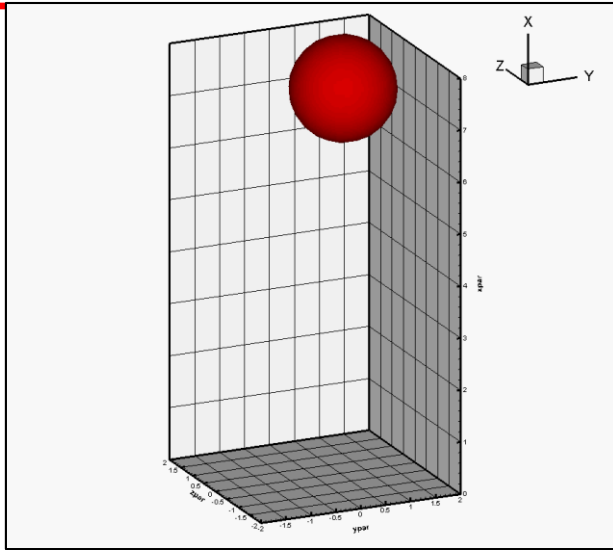
亚微米颗粒650 nm~1 μm



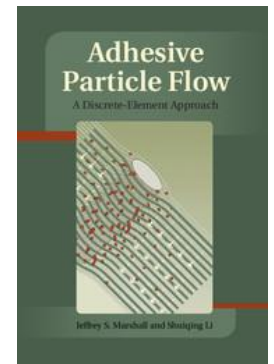
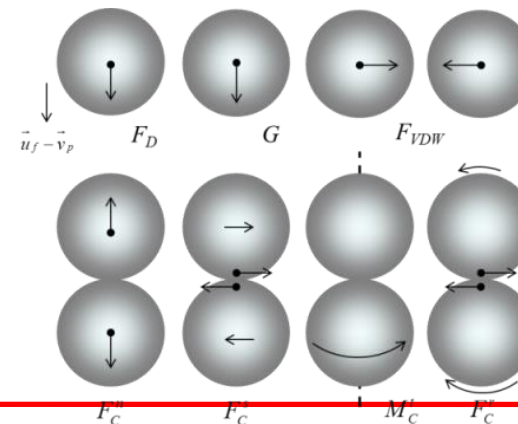
亚微米颗粒400~650nm

单位: mg/g ash	PM _{0.2}	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀
新疆准东煤	16.6	25.5	49.1	134.4
呼伦贝尔褐煤	3.5	11.9	43.7	99.6
神华高熔点烟煤	2.7	8.1	31.7	73.2

颗粒动力学



Marshall & Li, *Adhesive particle flow*, CUP, 2014



2016-3-9

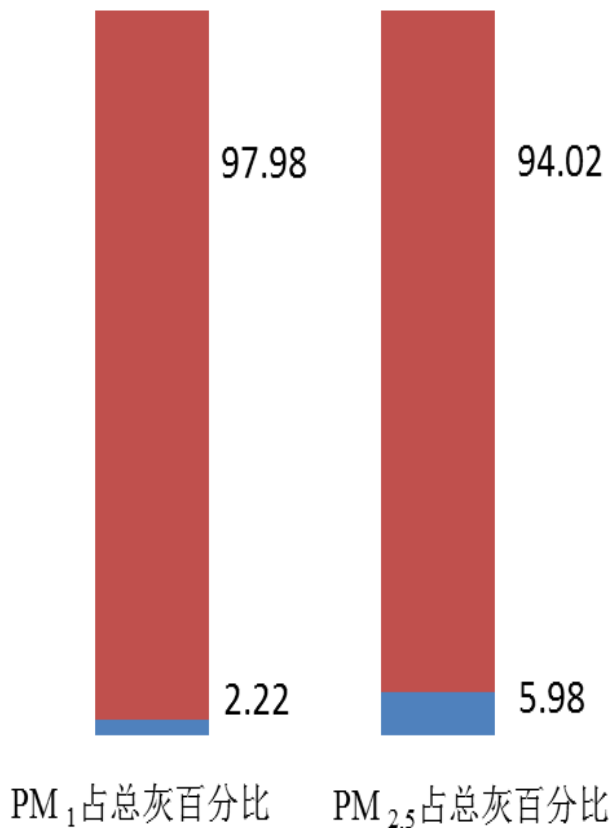
Particle diameter, μm

Engineering Research Group
Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

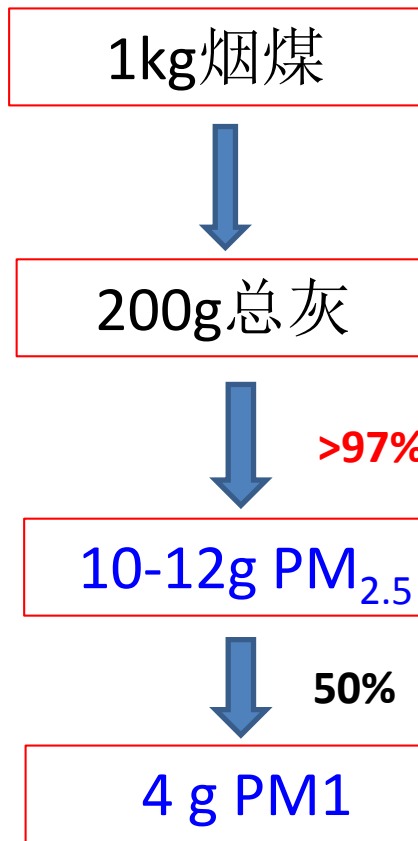


1.6 燃煤细颗粒物生成量的估算

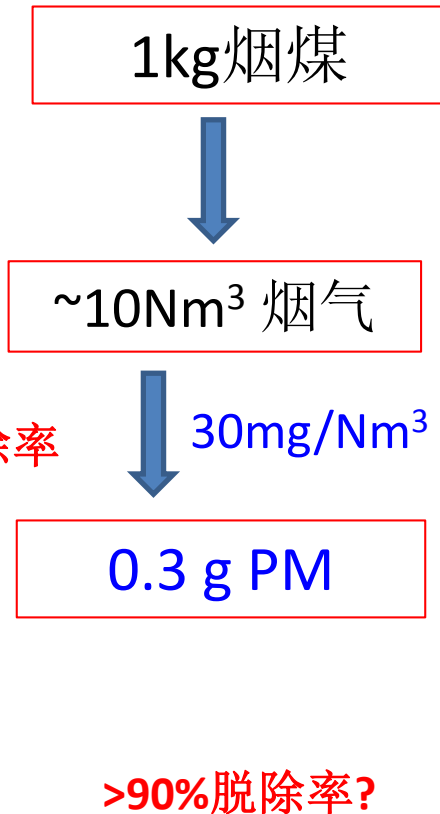
高温一维炉燃烧
神华烟煤细颗粒物排放特性



排放



标准



灰分

13.12%
17.50%

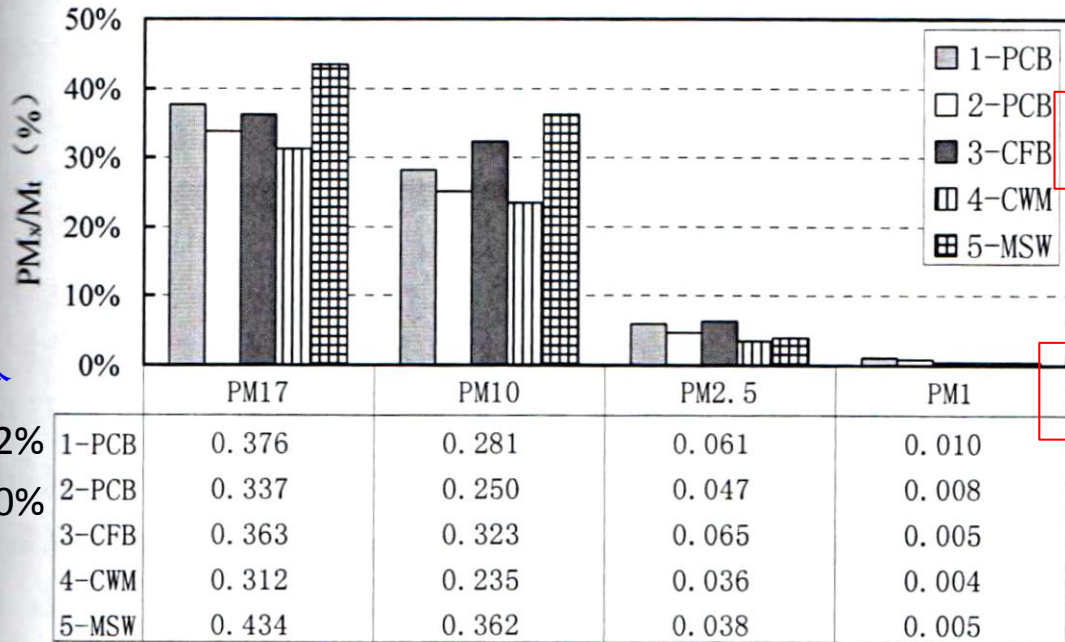


图 3.14 燃烧源 1、2、3、4、5 的 PM_x 排放量

>96.5%脱除率

岳勇 清华大学博士学位论文, 2007

排放

标准

1kg烟煤

1kg烟煤

130-175g总灰

~10Nm³ 烟气

8-9 g PM_{2.5}

0.3 g PM

1.5 g PM1

80%脱除率?

50%



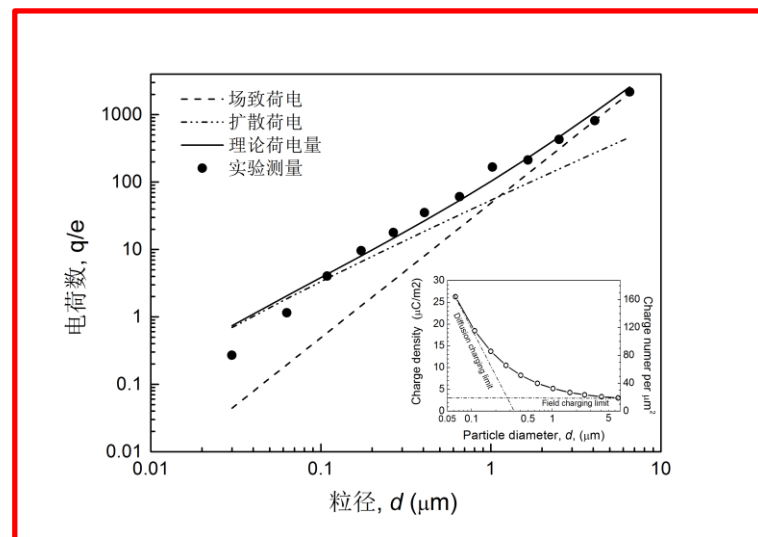
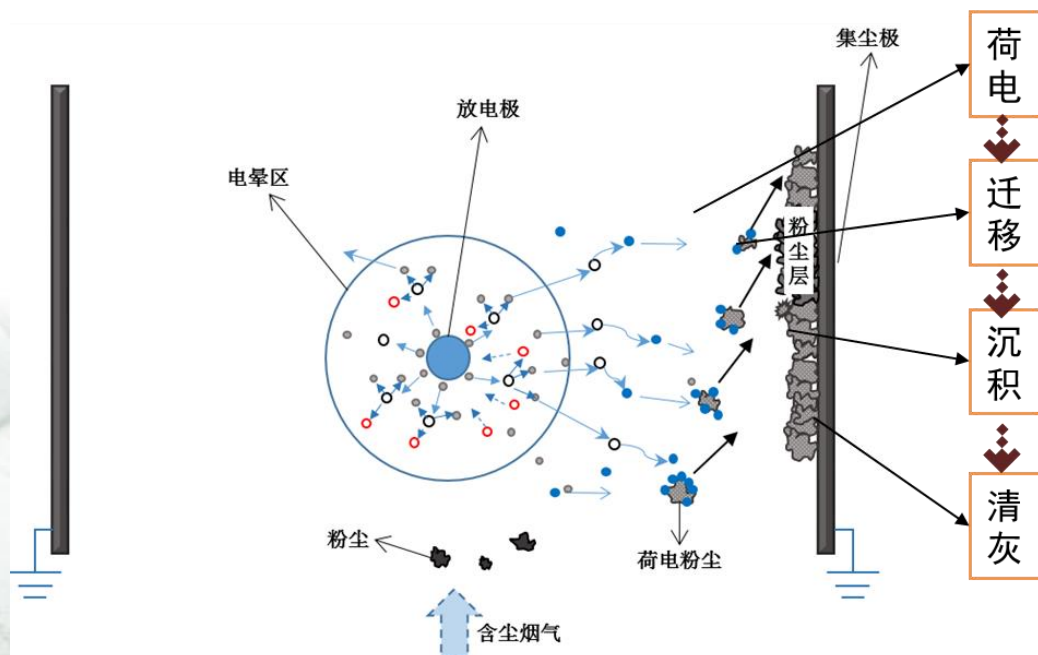
二. 燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 控制技术路线和协同脱除



电除尘器基础：热工 vs. 电工

电除尘器：燃煤电厂主要烟气粉尘处理设备，在国内外得到广泛使用
可控制出口排放浓度 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ - $100\text{mg}/\text{Nm}^3$

国内某电厂



高频？脉冲？复式？
是否必要

技术路线一：低低温+FGD除雾塔协同脱除

低低温电除尘器：通过在电除尘器前布置换热器使烟气温度从130℃降至90℃左右后再进行除尘，避免飞灰在130℃左右的高比电阻问题

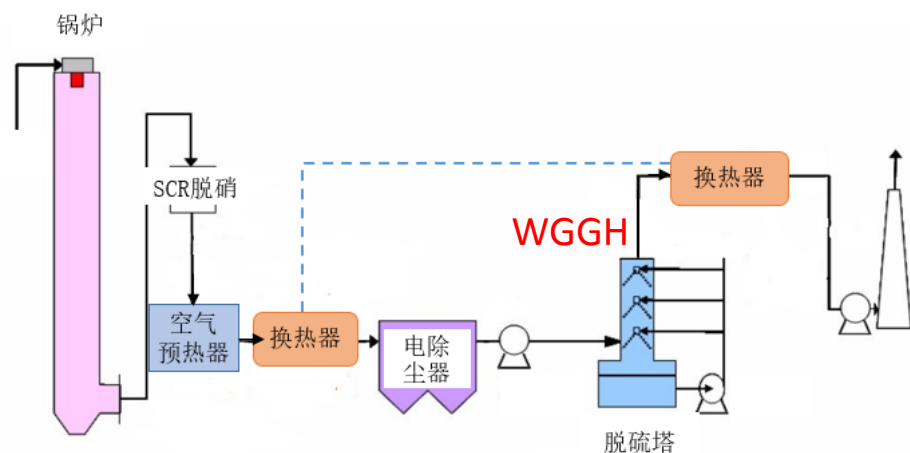


图1 低低温电除尘器电厂布置图

- 粉尘比电阻降低
- 烟气体积流量减小
- 击穿电压提高
- **协同脱除SO₃ (硫酸蒸汽)**

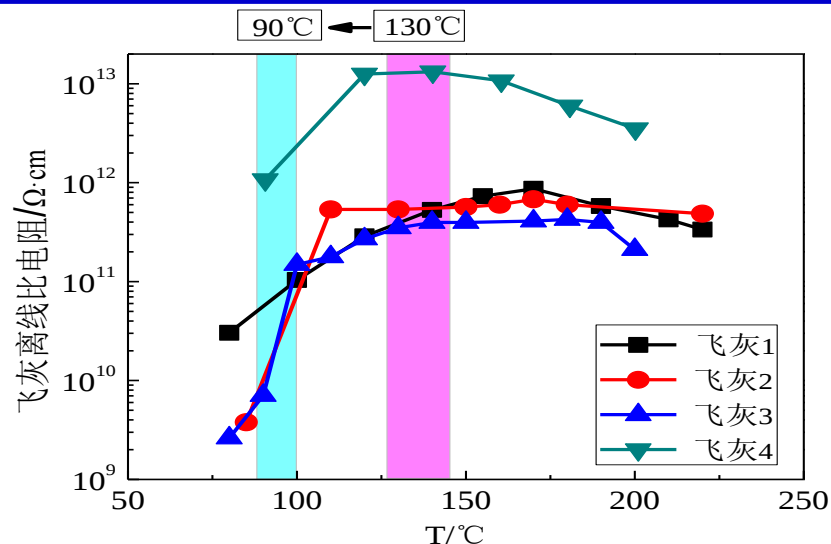


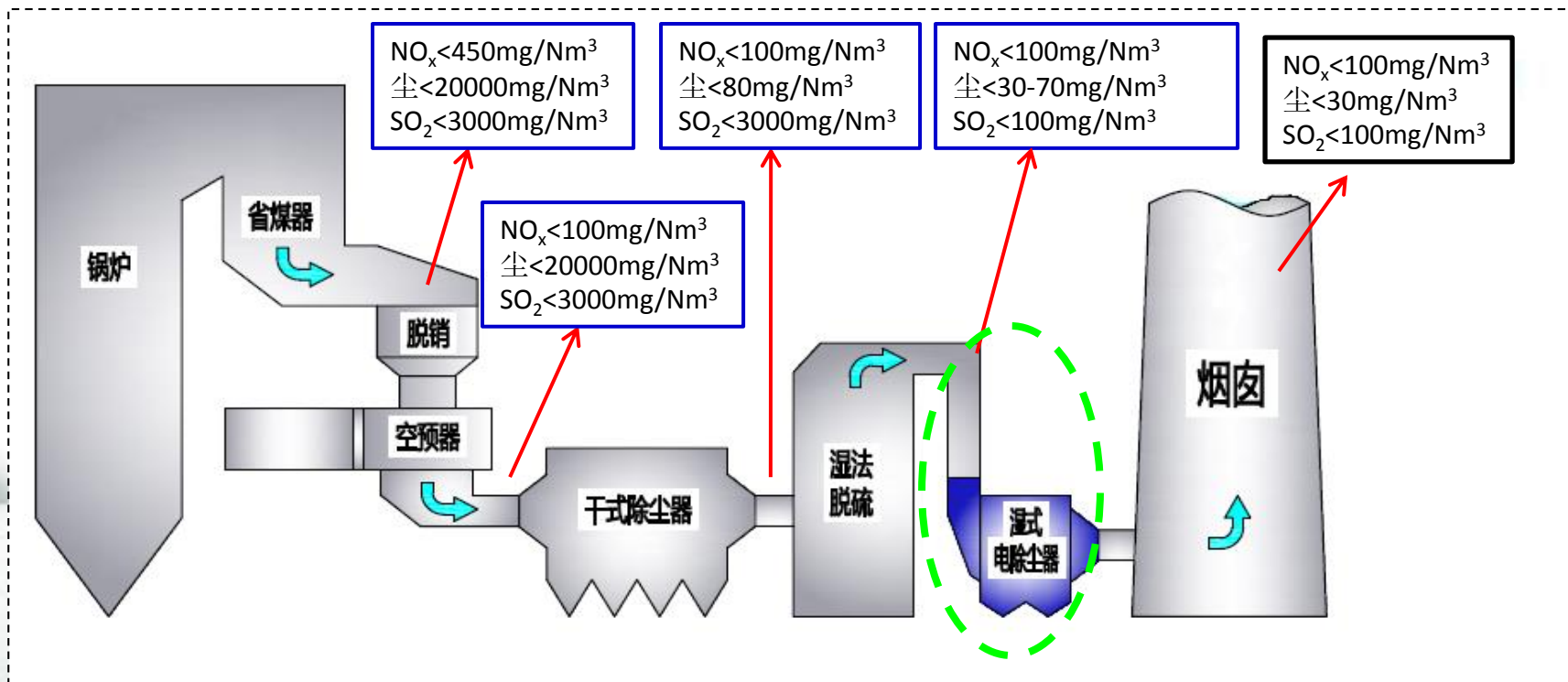
图2 飞灰离线比电阻与温度的关系

- 二次扬尘
- 灰流动性较差：溜灰角
- 煤种适应性有待研究

技术路线二：湿式静电除尘器深度脱除+共同去除



湿式电除尘器：与火电机组配套，布置在湿法脱硫塔后



实现 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_3 酸雾、汞等重金属的共同去除



内容提要

一、排放

1. 背景：燃煤设施PM2.5生成机制和排放特征

2. 湿式电除尘器实验室机理研究

3. 燃煤电厂WESP脱除PM2.5现场测试与分析

4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究

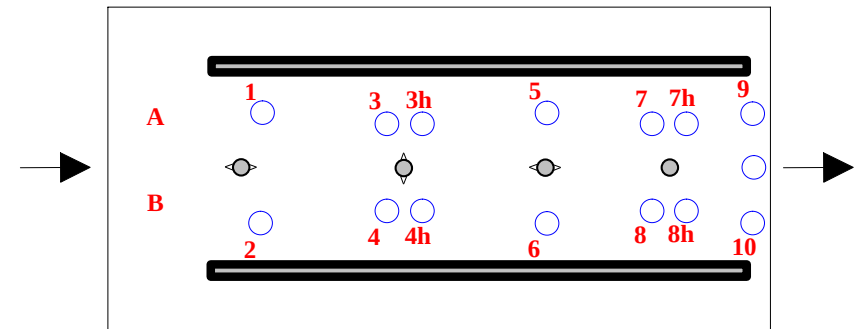
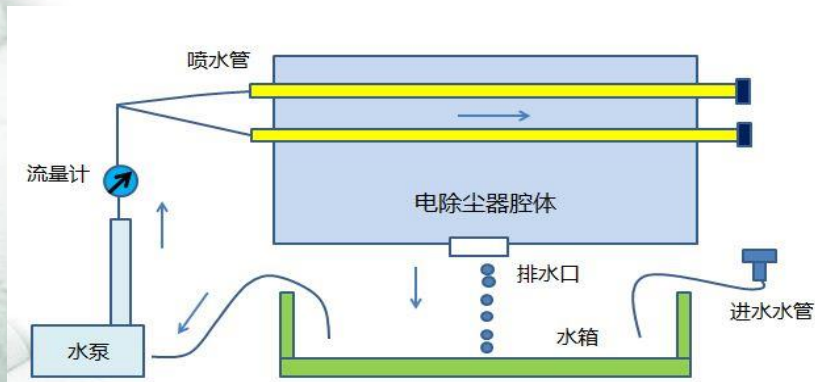
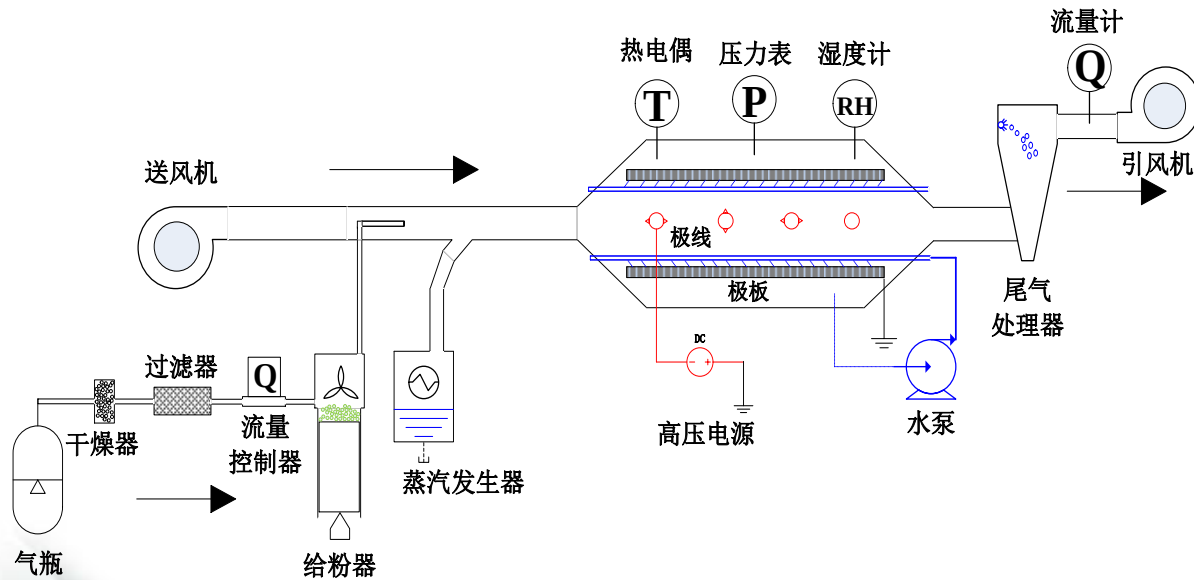
5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

6. 主要结论

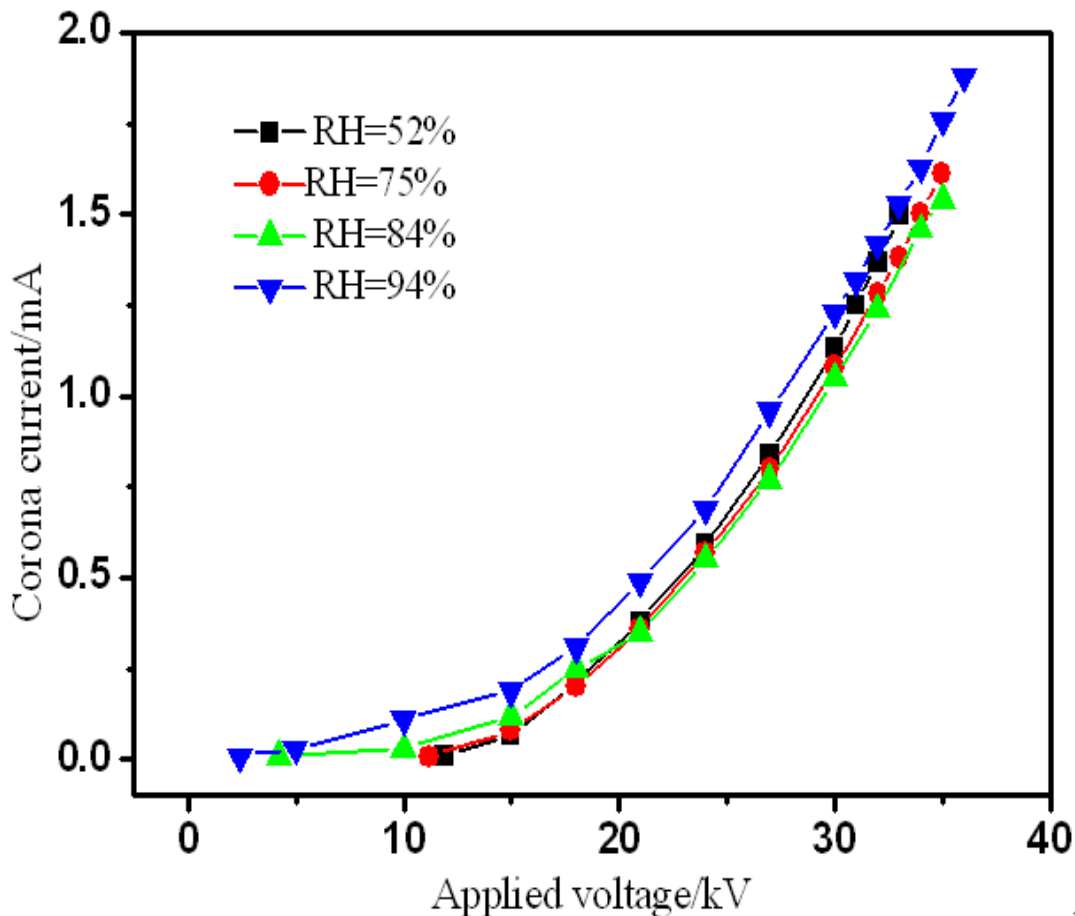
二、控制



2.1 实验室规模电除尘器实验系统图



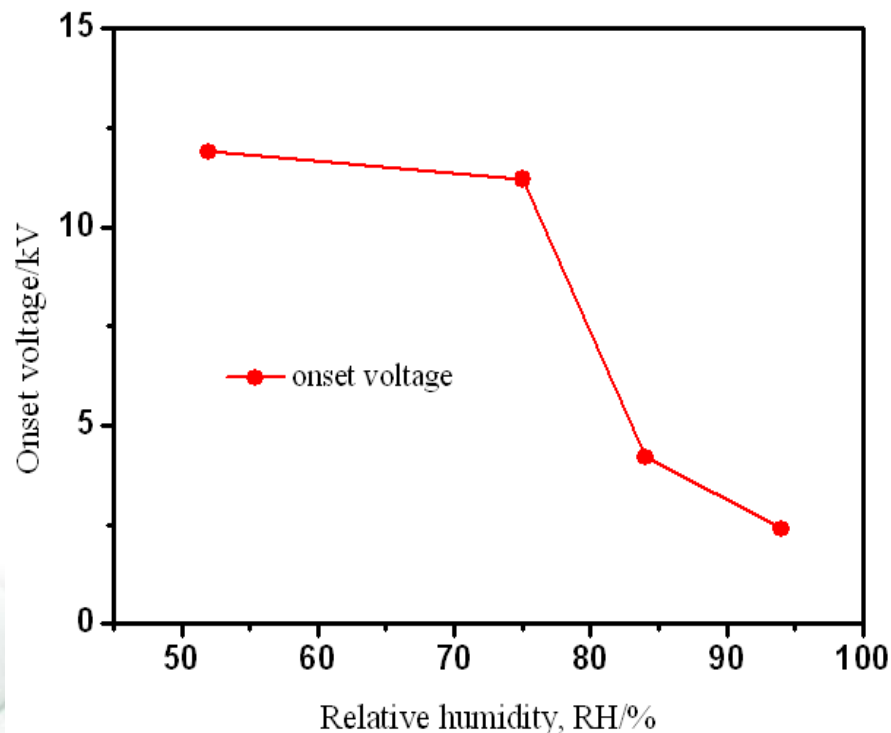
2.2 放电特性的典型研究结果



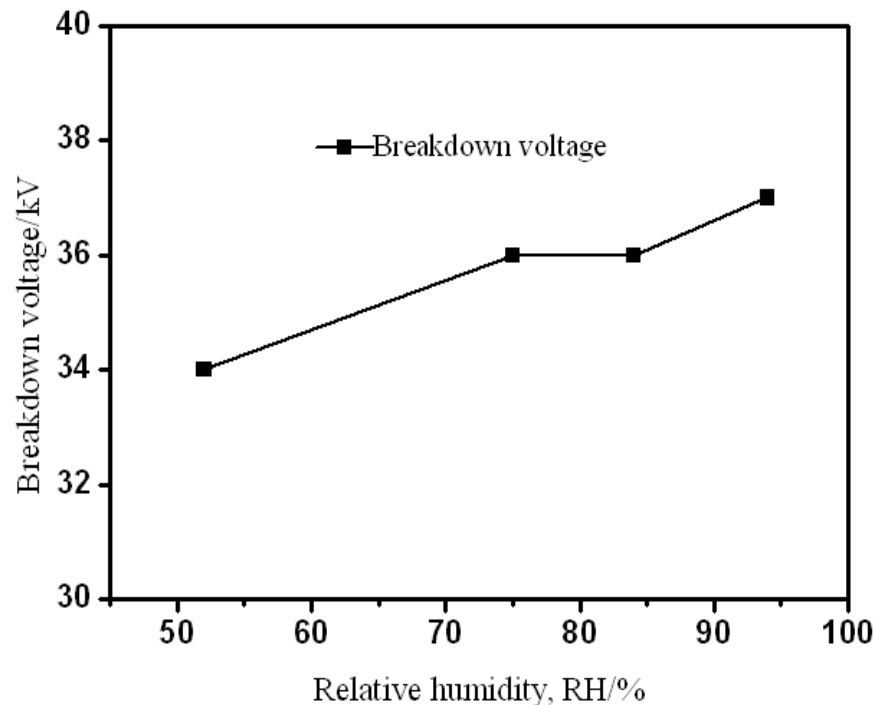
- 湿度对放电特性的影响与工作电压有关
- 工作电压较小时，随着烟气湿度增大，电晕放电电流增大
- 工作电压较大时，随着烟气相对湿度增大，电晕电流减小 (RH=94%的情况除外)

相对湿度对I-V特性的影响

放电特性的典型研究成果



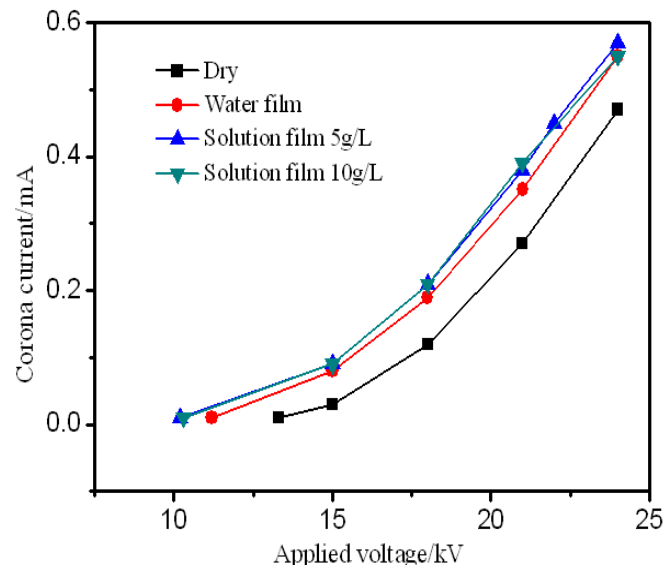
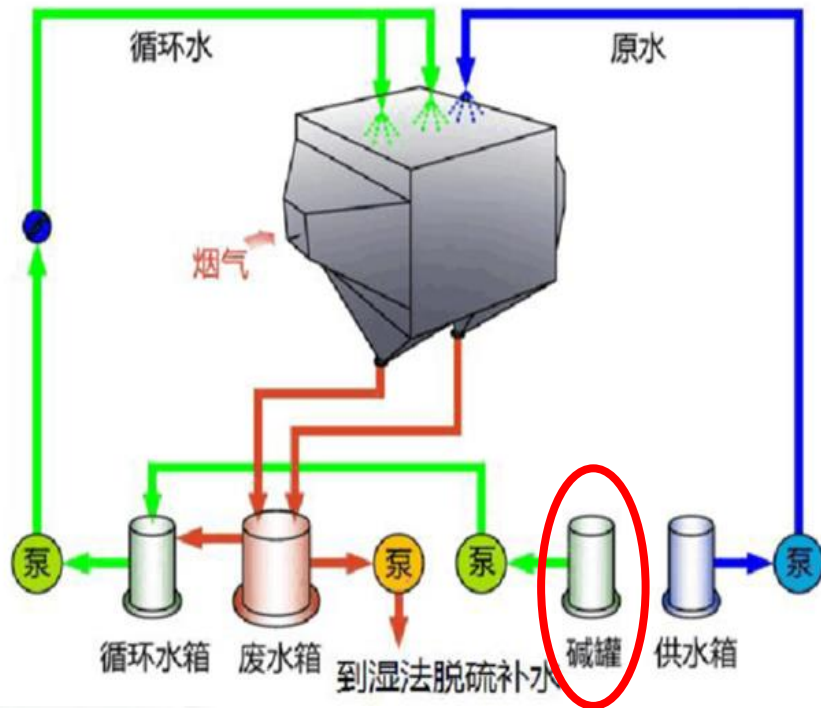
相对湿度对起晕电压的影响



相对湿度对击穿电压的影响

- 湿度增大，起晕电压减小
- 湿度增大，击穿电压增大
- 湿度增大，WESP工作电压窗口增大，利于稳定操作运行

2.3 极板液膜种类对WESP放电影响

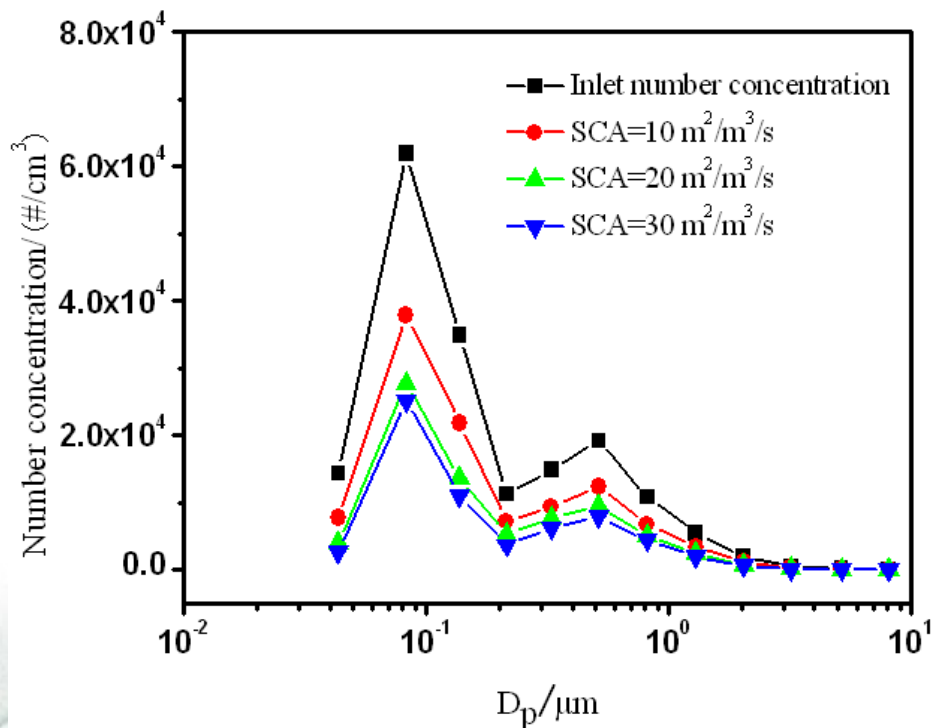


液膜对I-V特性的影响

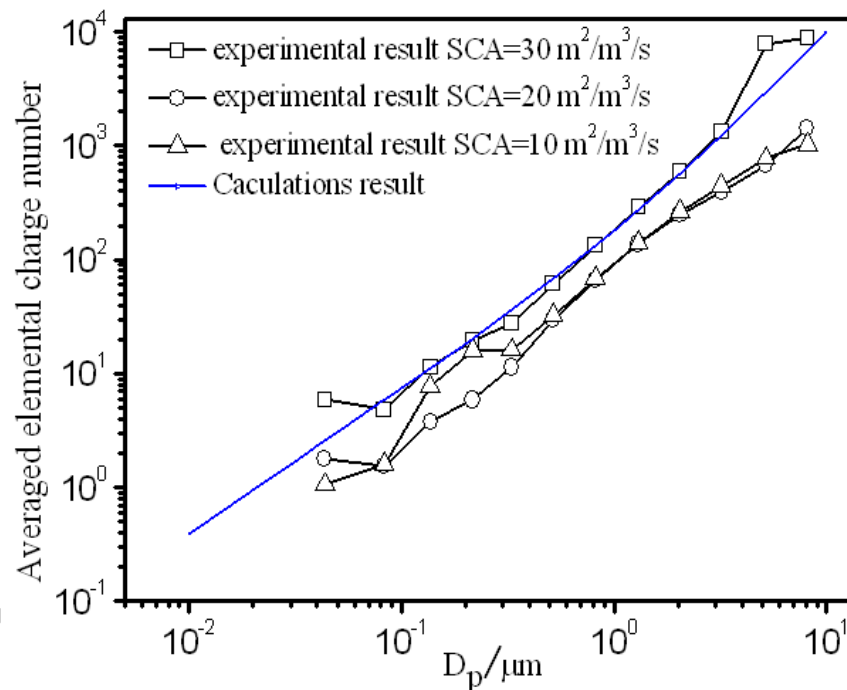
- WESP前端电场极板，循环喷淋
- WESP后端电场极板，补给水喷淋
- 灰水酸性增强，PH可低至2，中和处理

放电电流：
电解质液膜>水膜>干式

2.4 荷电与脱除效率的研究结果



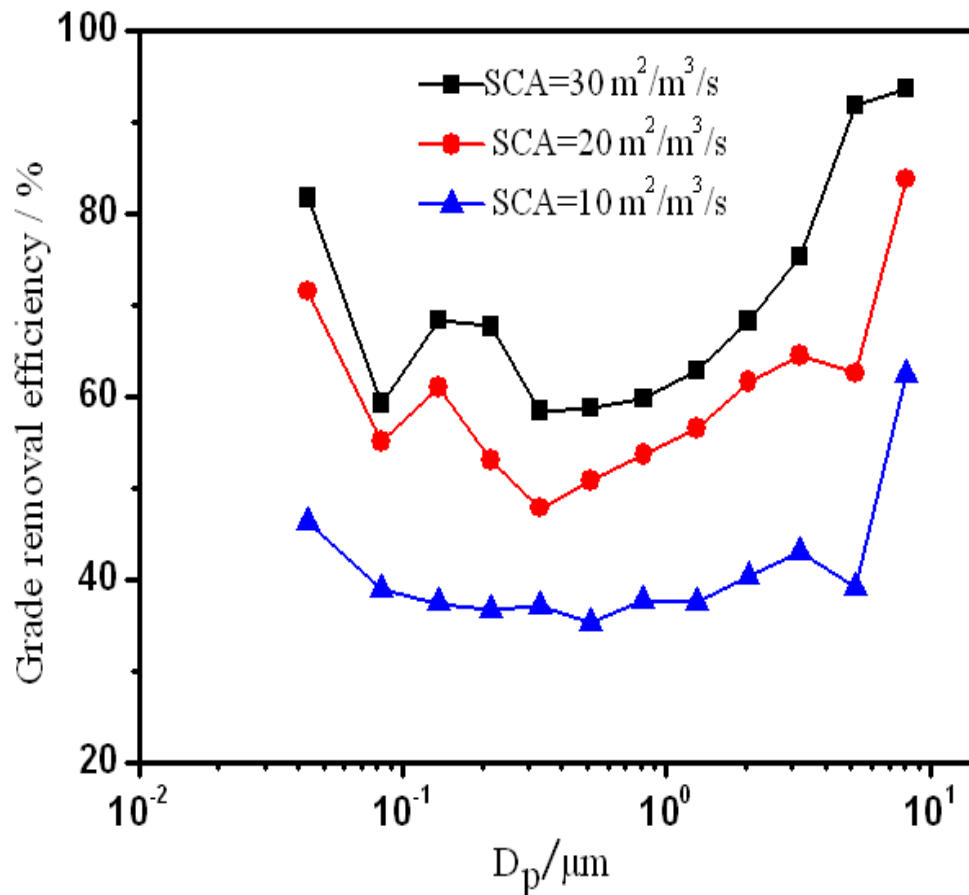
数浓度分布



荷电量

- 比集尘面积增大，停留时间增加，平均荷电量增大
- 颗粒粒径增大，平均荷电量显著增加
- 比集尘面积SCA为30 $\text{m}^2/\text{m}^3/\text{s}$ 时，荷电量接近理论饱和

2.4 超低浓度下：比集尘面积与脱除效率的关联



比集尘面积增大

➤比集尘面积增大，脱除效率明显增大

➤实验条件下，板式WESP适宜的 $\text{SCA}=30 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$

WESP分级脱除效率



内容提要

一、排放

1. 应用背景及研究内容

2. 湿式电除尘器实验室机理研究

3. 燃煤电厂WESP脱除PM2.5现场测试与分析

二、控制

4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究

5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

6. 主要结论





3.1 WESP测试对象设计参数

机组主要技术参数

机组	机组负荷	最大燃煤量	干式除尘	湿式除尘
ZBHD-6	330MW	153.1 t/h	静电除尘器	板式 WESP
TCHN-2	600 MW	415 t/h	低低温电除尘器	管式 WESP

ZBHD-6 机组配套 WESP 主要设计参数

参数	设计值
结构形式	平板式
规格	双室 4 电场 (共 8 电场)
入口干烟气量	1641100 Nm ³ /h
入口烟尘	70 mg/Nm ³
出口烟尘	<10 mg/Nm ³
PM _{2.5} 脱除率	≥ 80%
SO ₃ 去除率	≥ 80%
漏风率	≤ 2%
本体阻力	≤ 250Pa
年可用小时数	6200 小时

板式WESP设计参数

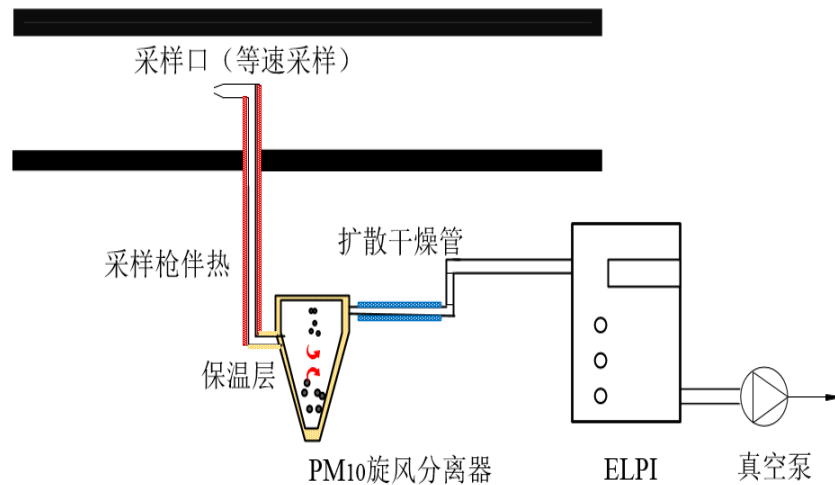
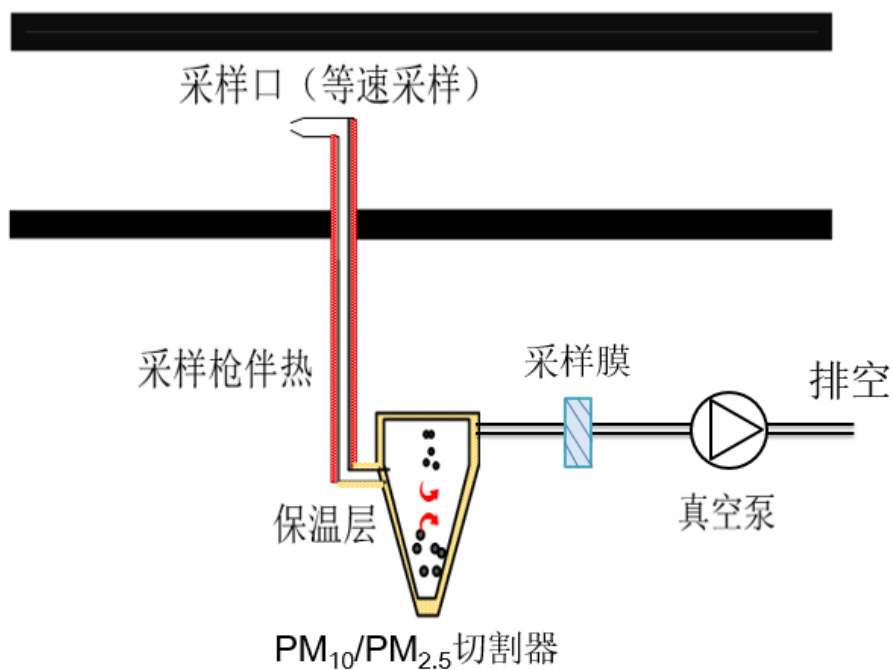
TCHN-2 机组配套 WESP 主要设计参数

参数	设计值
结构形式	正六边形蜂窝状管式
入口干烟气量	2992274 Nm ³ /h (实际烟气量)
入口烟尘	70 mg/Nm ³
出口 PM _{2.5} 排放浓度	≤ 5mg/Nm ³
出口固体颗粒物排放浓度	<10 mg/Nm ³
PM _{2.5} 脱除率	≥ 80%
固体颗粒物脱除率	≥ 85%
SO ₃ 去除率	≥ 80%
漏风率	≤ 1%
本体阻力	≤ 400Pa
WESP 内烟气流速	≤ 3m/s

管式WESP设计参数

3.2 采样系统及方法

膜法采样系统示意图



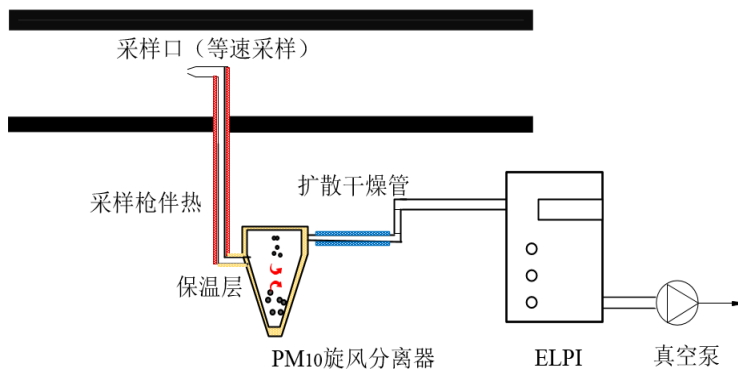
ELPI 采样系统示意图



- WESP复杂的烟气条件，尚未见到统一的采样测试标准
- 根据EPA 201 (2014发布)，自行设计了一套采样测试系统

采样装置及仪器

测试装置



主要测试仪器

图1 测试采样装置

荷电低压撞击器（ELPI）各级数浓度与该级电流值的关系为：

$$N = I / Pn e Q \quad (\text{式 1})$$

测试过程中，先得到颗粒分级数浓度，再将ELPI的荷电器关闭，所得电流值即可按照式折算为每一级颗粒的平均荷电量：

$$q = \frac{I}{N Q e} \quad (\text{式 2})$$



图2 ELPI实物图

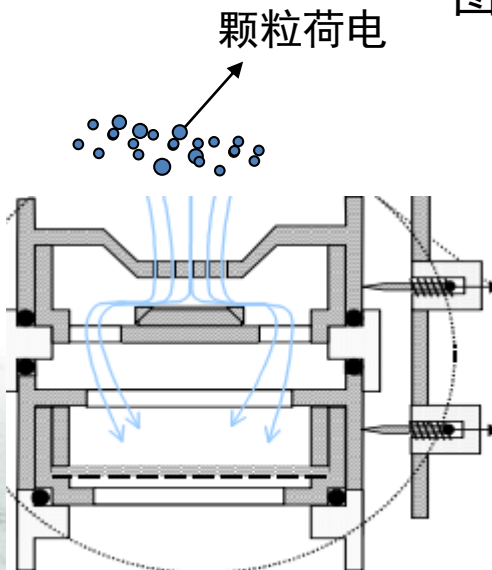
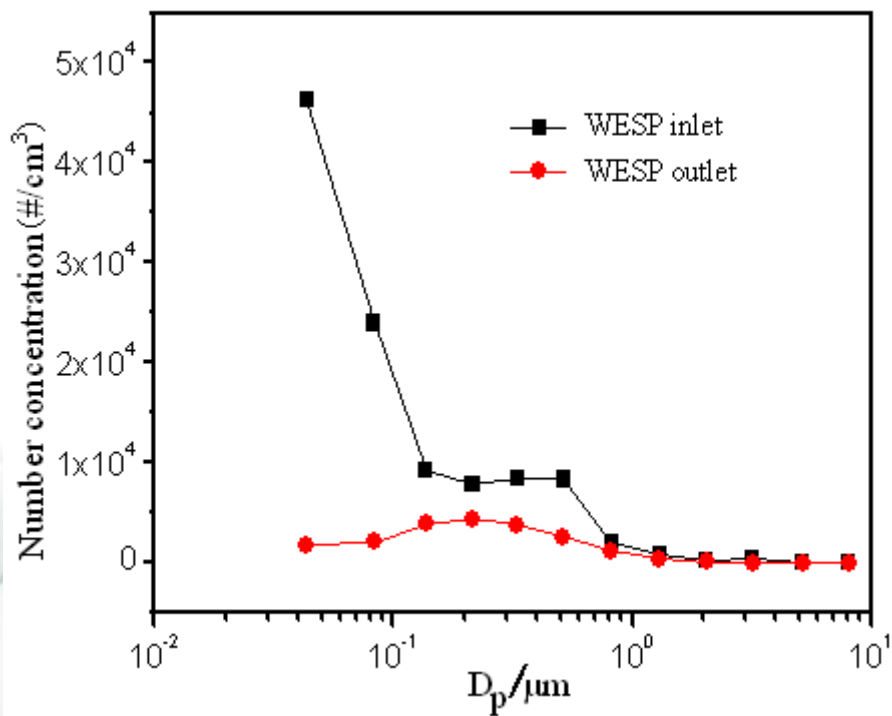


图3 测试原理图

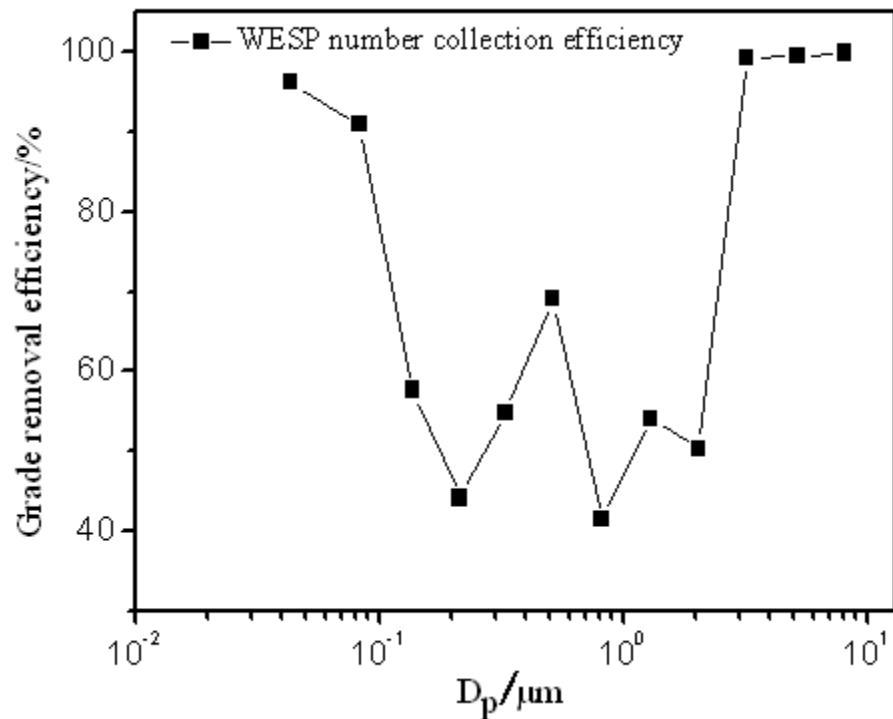


3.3 燃煤电站板式WESP现场测试结果

锅炉负荷95%，对应的比集尘面积 $25.8 \text{ m}^2 /(\text{m}^3/\text{s})$



数浓度分布

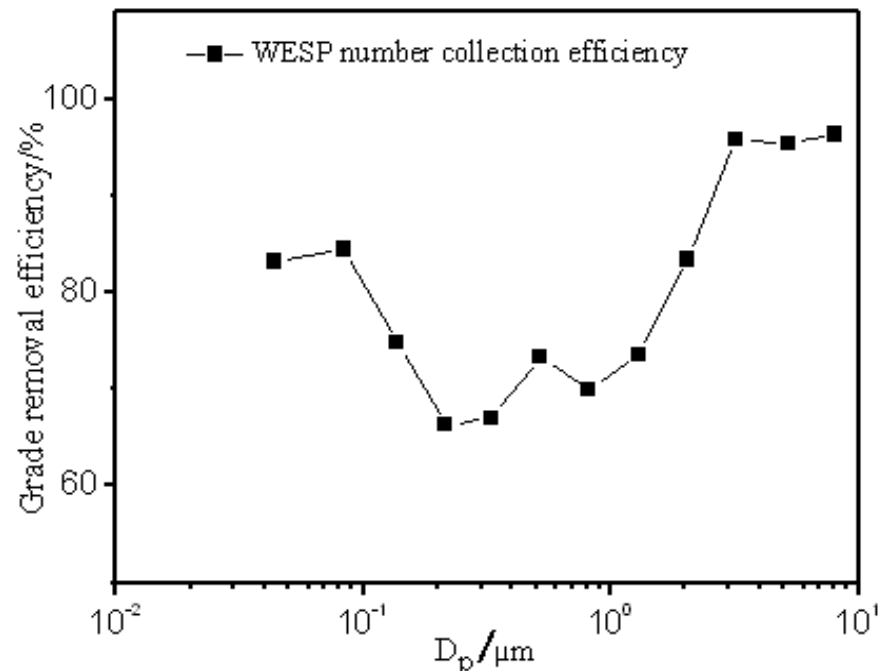
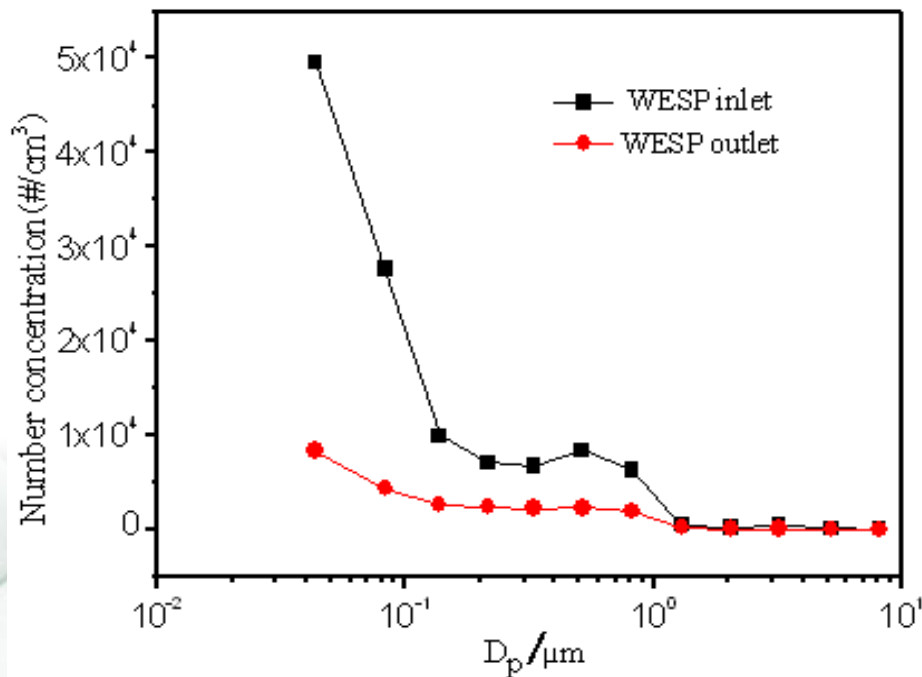


分级脱除效率

板式WESP进出口细颗粒数浓度分布及分级脱除效率

3.4 燃煤电站板式WESP现场测试结果

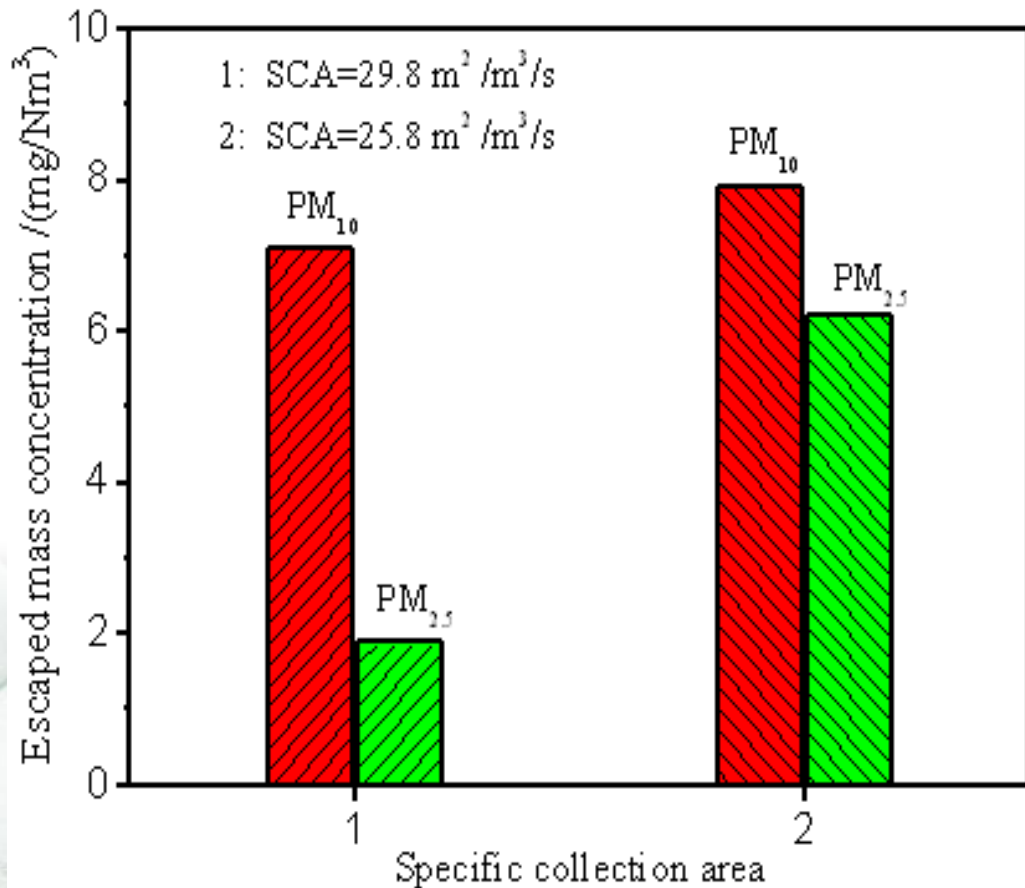
锅炉负荷75%，对应的比集尘面积 $29.8 \text{ m}^2 /(\text{m}^3/\text{s})$



- 板式WESP进口细颗粒物数浓度在 $10^4 \sim 10^5 \#/\text{cm}^3$ 数量级
- 板式WESP出口细颗粒物数浓度在 $10^3 \sim 10^4 \#/\text{cm}^3$ 数量级
- 板式WESP适宜的SCA约为 $30 \text{ m}^2/\text{m}^3/\text{s}$



3.5 燃煤电站板式WESP出口逃逸特性

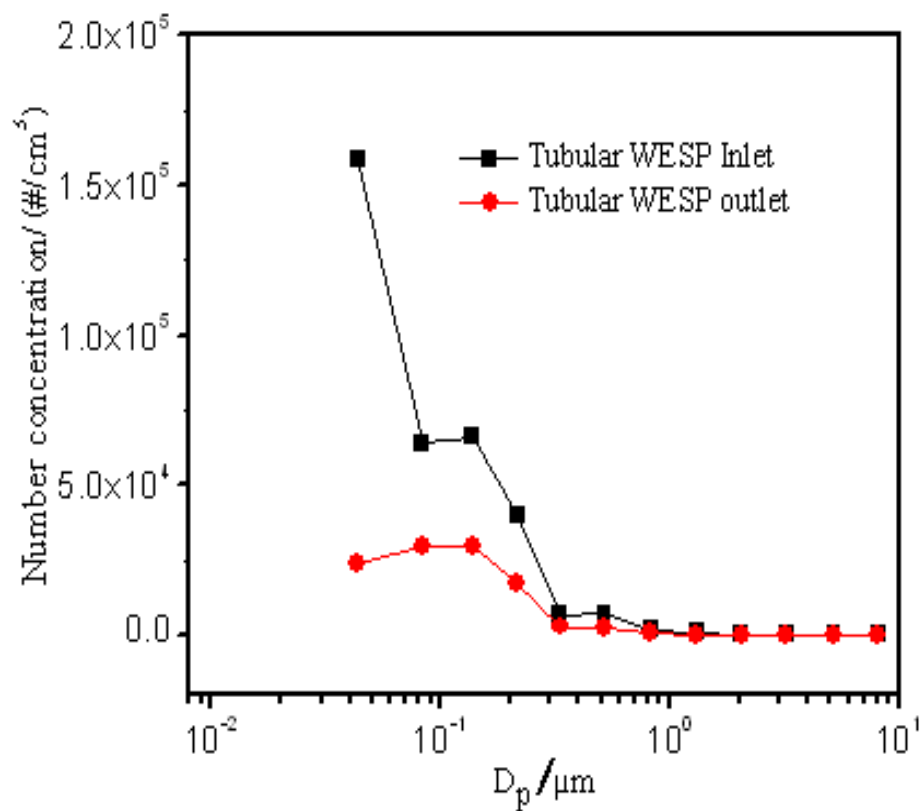


➤比集尘面积增大, WESP 出口排放 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度减小

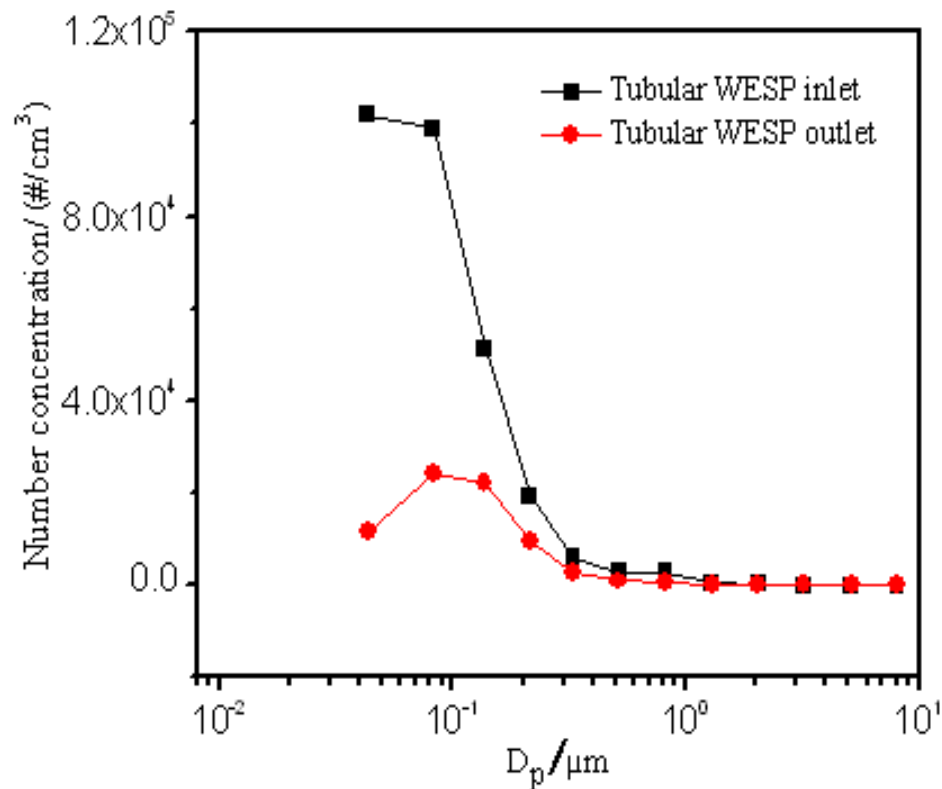
➤板式WESP出口粉尘排放浓度均在10mg/Nm³以下

板式WESP出口逃逸 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度

燃煤电站管式WESP现场测试结果



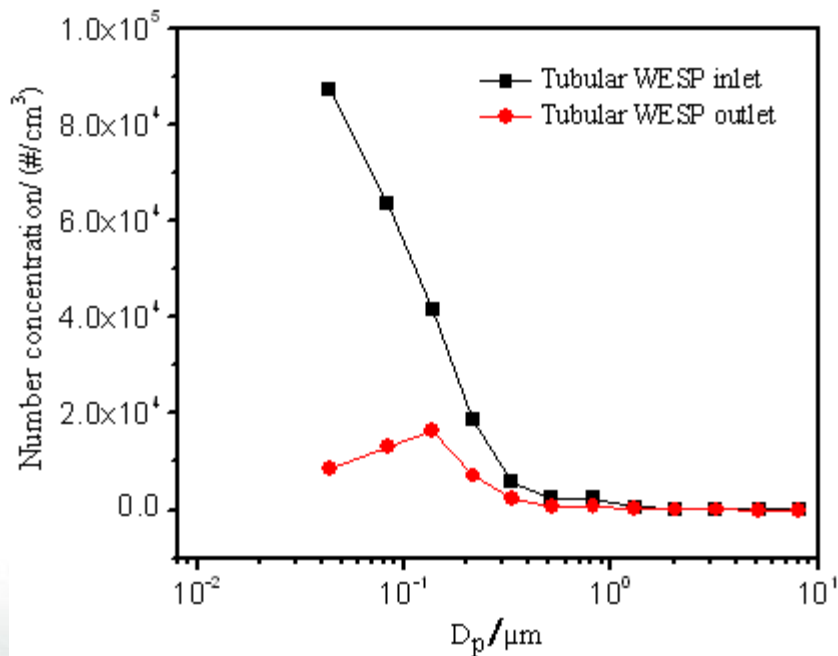
(a) 锅炉负荷 100%



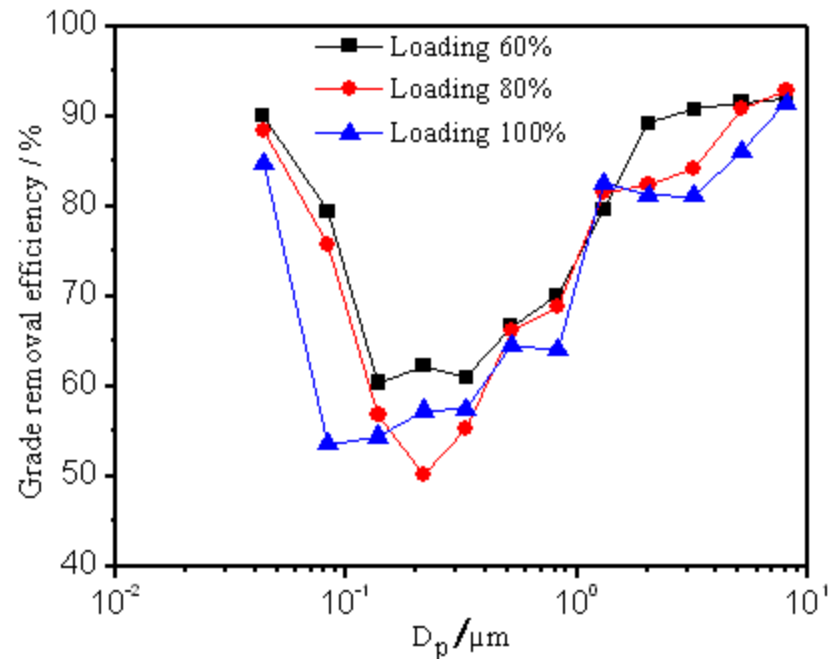
(b) 锅炉负荷 80%

管式WESP进出口细颗粒数浓度分布及分级脱除效率

燃煤电站管式WESP现场测试结果



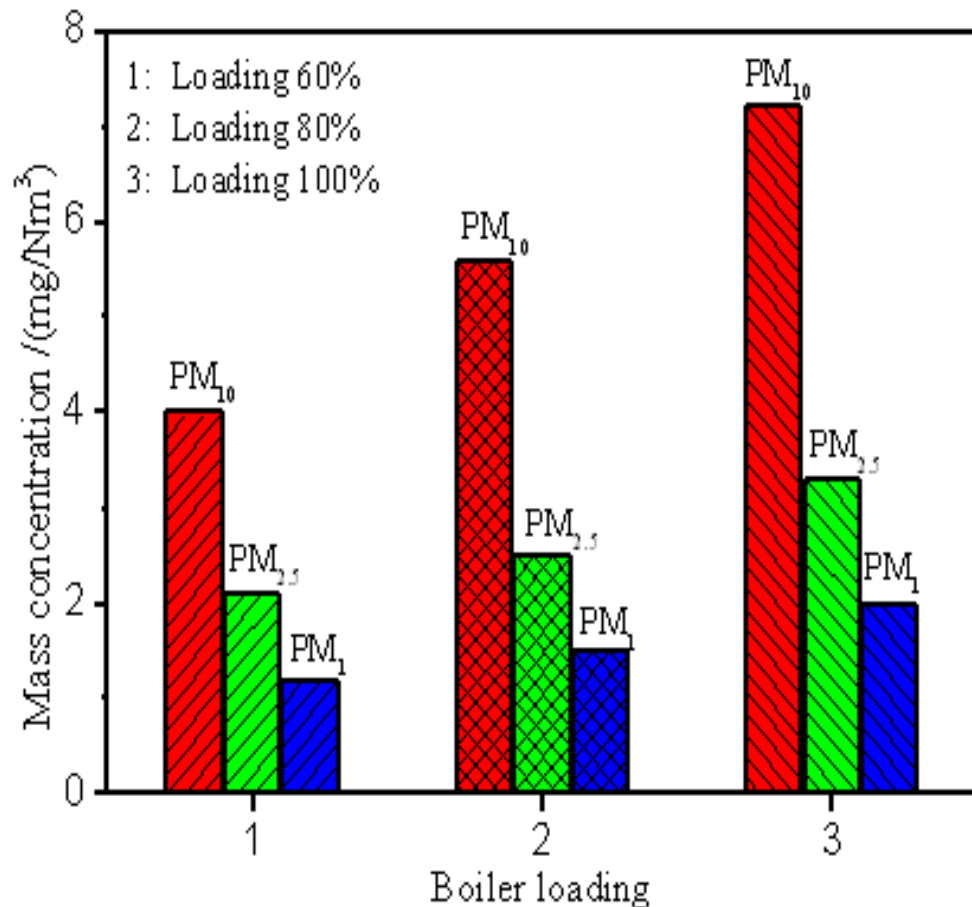
(c) 锅炉负荷 60%



(d) 管式 WESP 分级脱除效率

- 管式WESP进口细颗粒数浓度在 $10^4 \sim 10^5 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 数量级，以超细颗粒为主
- 板式WESP出口细颗粒数浓度在 $10^3 \sim 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 数量级，呈单峰分布
- 锅炉负荷降低，管式WESP对细颗粒分级脱除效率呈增大趋势

燃煤电站管式WESP出口排放特性

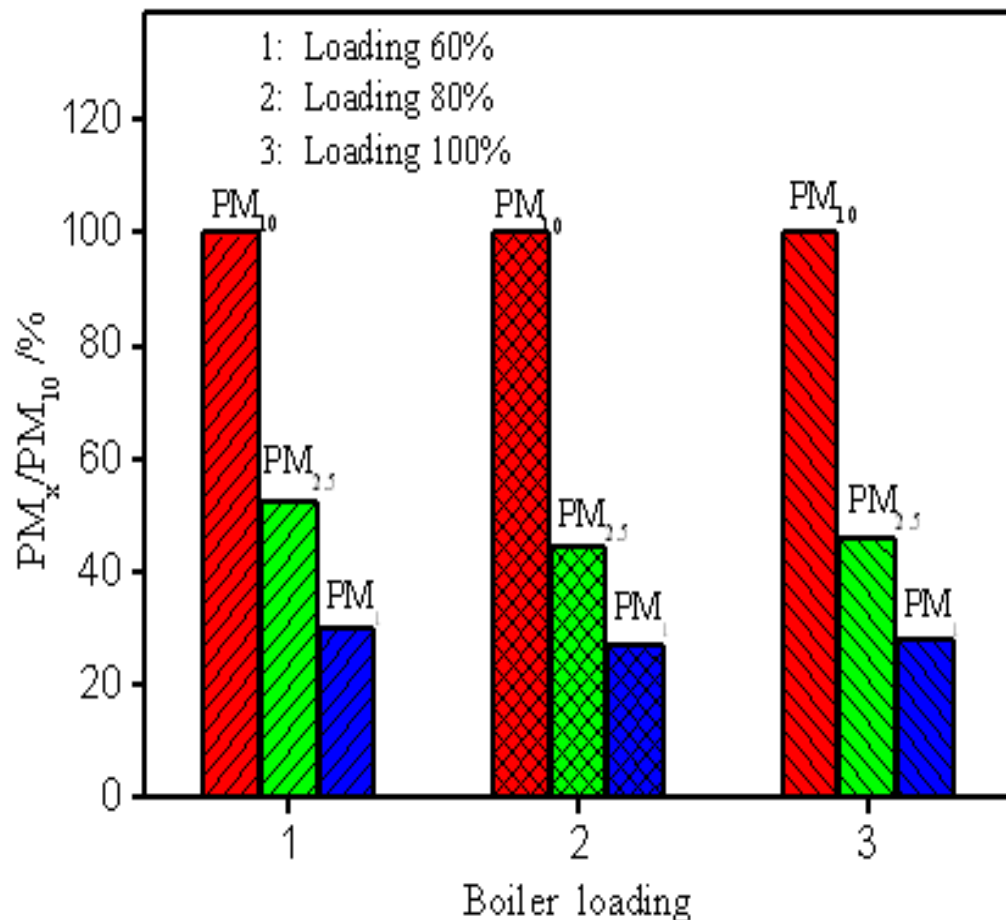


- 锅炉负荷增加，管式WESP出口排放PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁质量浓度增大
- 管式WESP出口排放PM₁₀质量浓度在4.0-7.2mg/Nm³
- 管式WESP出口排放PM_{2.5}质量浓度在2.1-3.3mg/Nm³
- 管式WESP出口排放PM₁质量浓度在1.2-2.0mg/Nm³

管式WESP出口逃逸PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁质量浓度



管式WESP出口 $PM_{2.5}/PM_{10}$, PM_1/PM_{10} 特性



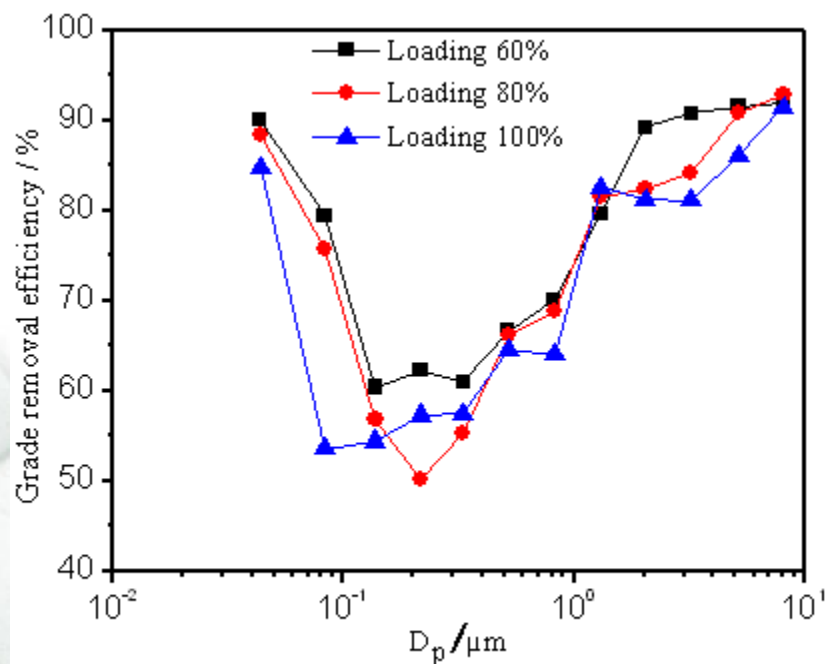
- 管式WESP出口 PM_1 占 PM_{10} 质量份额为26.8%~30.0%
- WESP出口 $PM_{2.5}$ 对 PM_{10} 质量贡献率为44.6%~52.5%
- WESP出口 PM_1 占 $PM_{2.5}$ 质量份额超过50.0%
- WESP出口排放 PM_{10} 中粒径在2.5~10 μm 颗粒的质量份额超过50.0%
- 实现燃煤电站的超净排放, 关键提高WESP对 PM_1 及粒径在2.5~10 μm 颗粒的脱除效率

管式WESP出口逃逸 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 占 PM_{10} 的质量份额

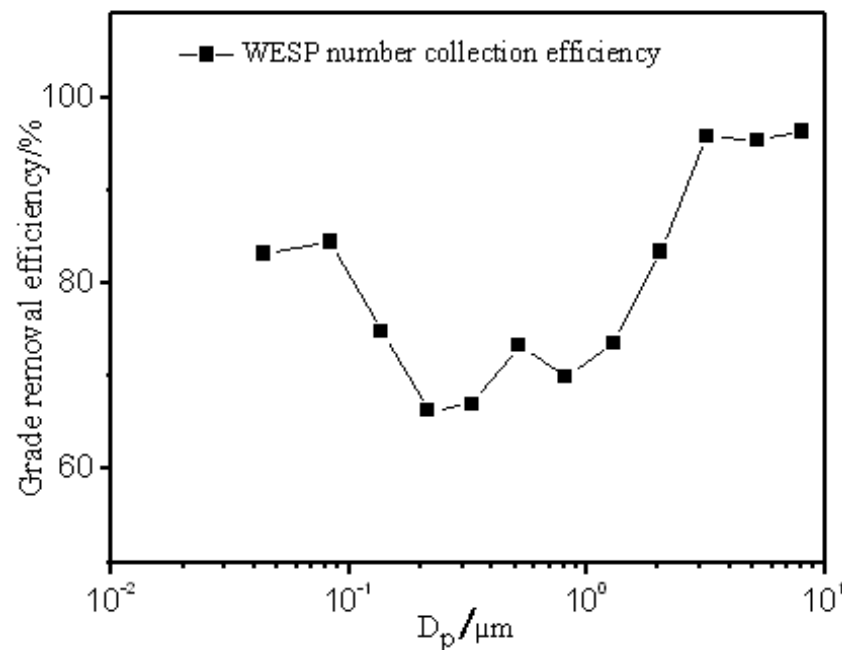
板式/管式WESP: 逃逸分析

提高穿透窗口的逃逸颗粒捕集效率

1. 颗粒团聚技术和相变凝结长大
2. 大液滴协同沉积



(d)管式 WESP 分级脱除效率



液相对除尘效果的影响

——液滴-颗粒间流场相互作用



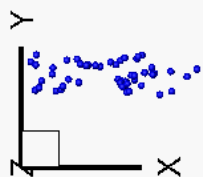
将扰动场叠加后得到协同沉降过程：

(非接触作用)

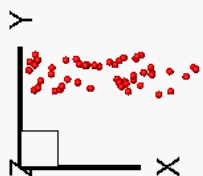
极板

主流

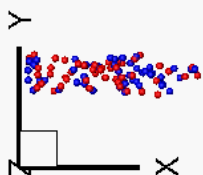
边界层



→ 微米颗粒单独沉积



→ 大液滴单独沉积



→ 液滴-颗粒协同沉积



小结

- 电除尘器中细颗粒迁移速度大约在1~10cm/s量级，粒径在0.1~1 μ m颗粒的迁移速度处于低谷2.17~3.24cm/s
- 燃煤电站WESP虽然存在不稳定性，但在保证良好的设计参数下，采用前干+后湿结合的电除尘方式，粉尘排放浓度基本可控制在10mg/Nm³以下，合理设计可达5mg/Nm³，满足超低排放环保标准
- WESP技术进一步提高：0.1~1 μ m逃逸窗口的细颗粒物，仅靠电源改进是不够的，如何组织这类的团聚-相变长大以及协同沉积更为关键



内容提要

一、排放

1. 应用背景及研究内容

2. 湿式电除尘器实验室机理研究

3. 燃煤电厂WESP脱除PM2.5现场测试与分析

二、控制

4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究

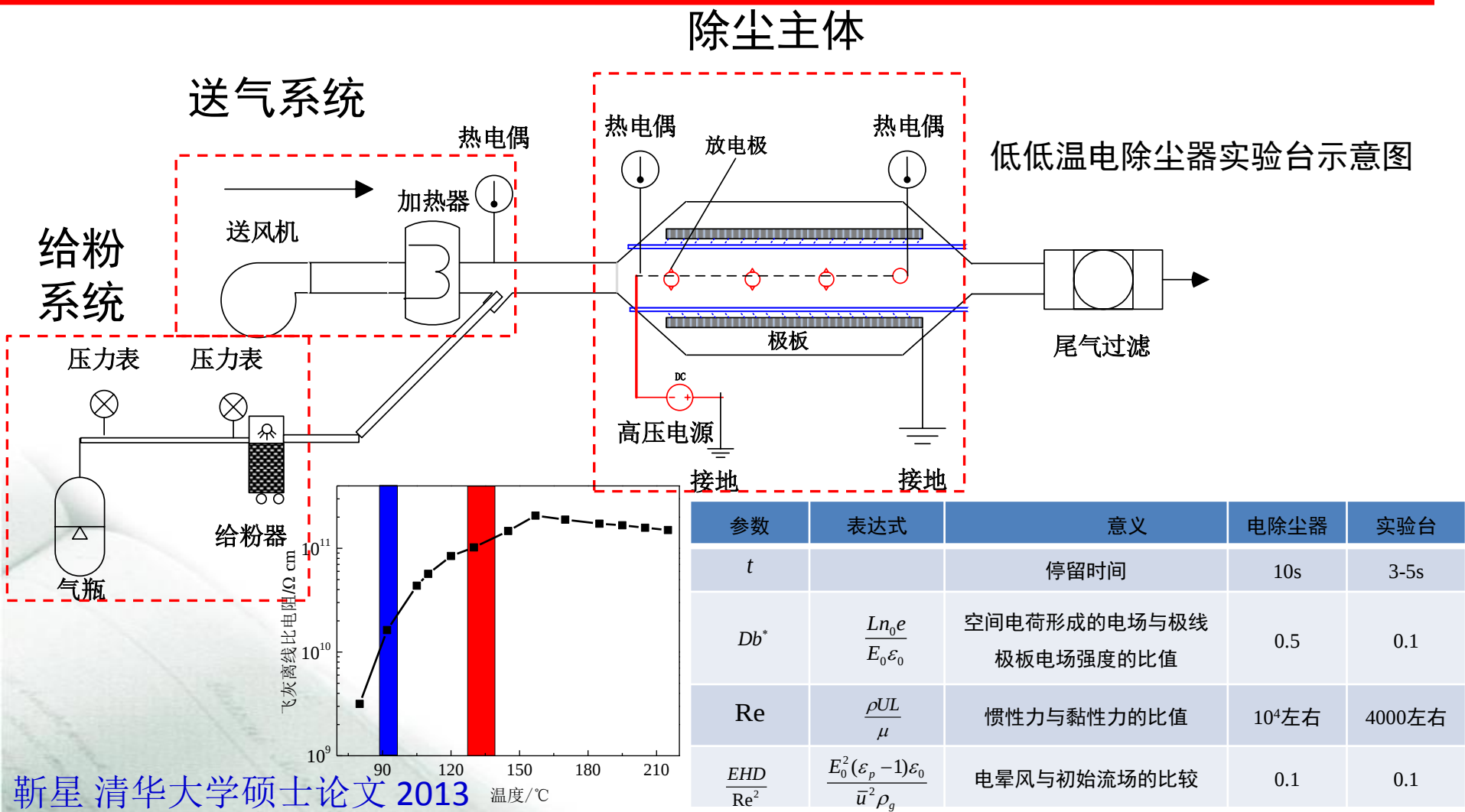
5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

6. 主要结论





4.1 温度对粉尘荷电及脱除性能研究

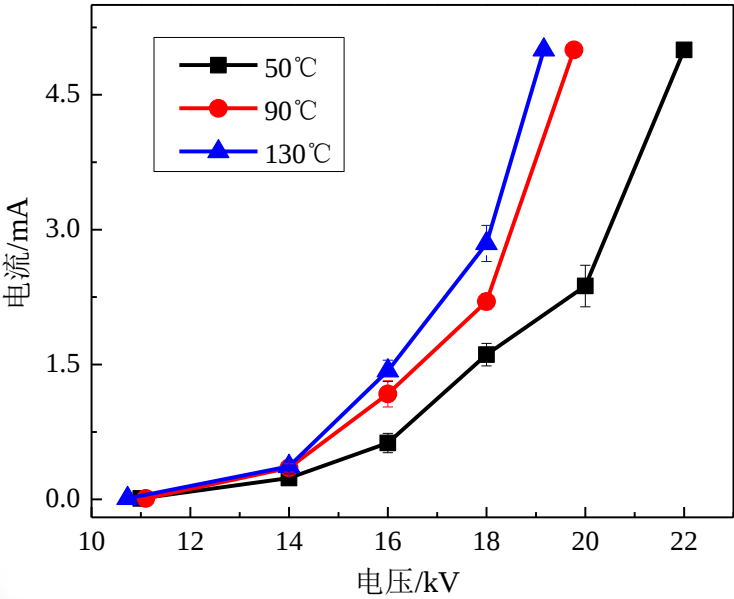


靳星 清华大学硕士论文 2013





4.2 温度对粉尘荷电及脱除性能研究



温度与放电特性的关系

- 烟气温度升高，电晕电流增大而击穿电压减小：电晕极周围空间电荷密度减小
- 易达到火花放电，对电除尘器的运行不利，这也是电除尘器低低温技术改造的一个性能优势

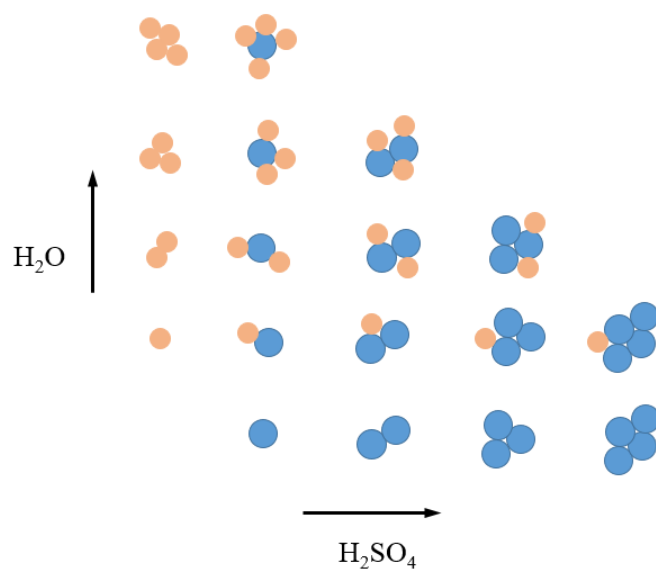
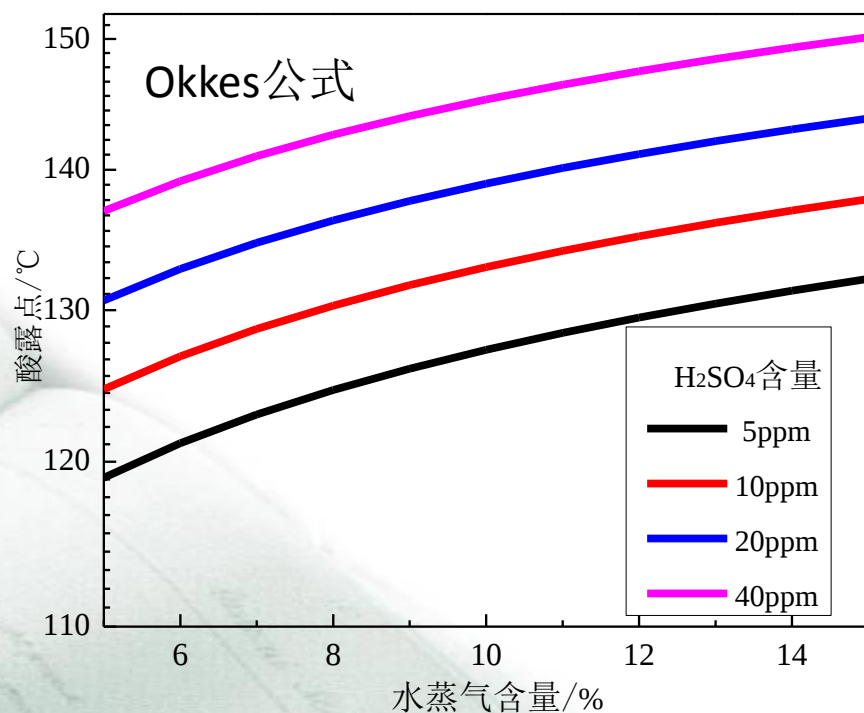
实验工况

研究内容	实验温度	放电电压	除尘风速	测量值
温度与颗粒分级脱除效率的关系	90℃ 130℃	16kV	0.31m/s	入口、出口粉尘数浓度
		18kV	0.31m/s	
		20kV	0.31m/s	
风速与颗粒荷电量的关系	90℃	18kV	0.31m/s、 0.35m/s	测点1、2粉尘荷电量
	130℃	18kV	0.35m/s、 0.40m/s	
温度与颗粒荷电量的关系	90℃ 130℃	16kV	0.31m/s	测点1、2粉尘荷电量
		18kV	0.31m/s	
		20kV	0.31m/s	



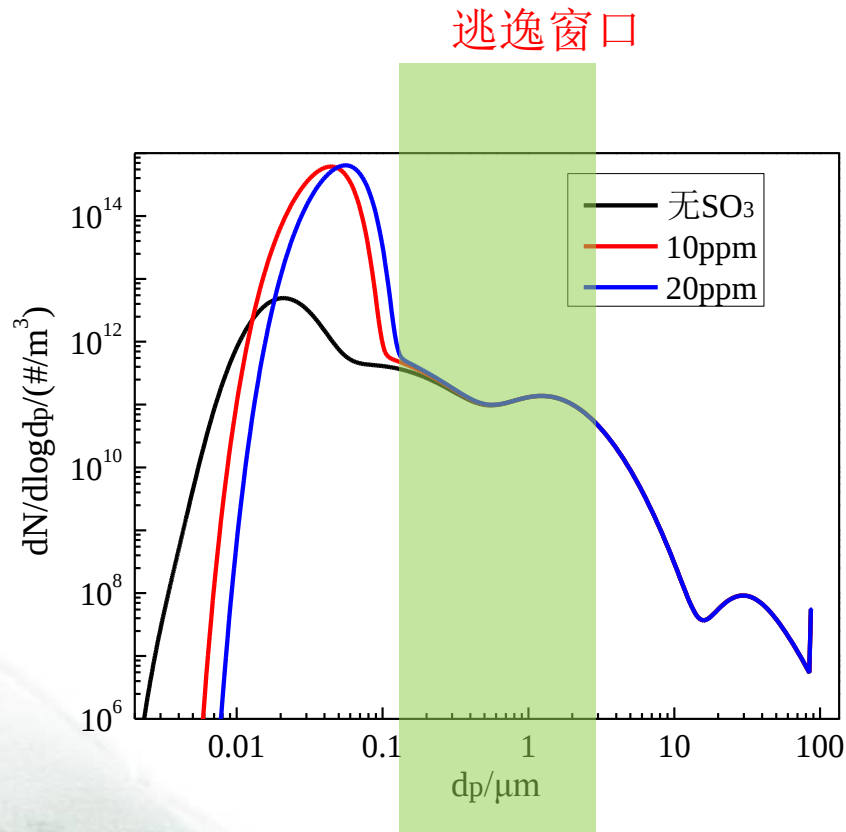
低低温电除尘器的 SO_3 和细颗粒团聚

空气预热器中，烟气在酸露点以上， SO_3 会与烟气中汽相水分(vapor phase moisture)结合形成硫酸蒸汽。当烟气温度低于 205°C 时，几乎所有 SO_3 都以硫酸蒸汽的形式存在。当烟气温度降到酸露点以下时，水蒸气和硫酸蒸汽会凝结，形成硫酸液滴
(张绪辉 清华大学硕士论文)。



穆勒曲线、Halstead曲线、Okkes公式等都根据烟气中 H_2SO_4 蒸汽含量给出了酸露点

SO₃和细颗粒团聚



$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} \beta(v_i, v_j) n_i n_j - n_k \sum_{i=1}^{\infty} \beta(v_i, v_k) n_i n_k$$

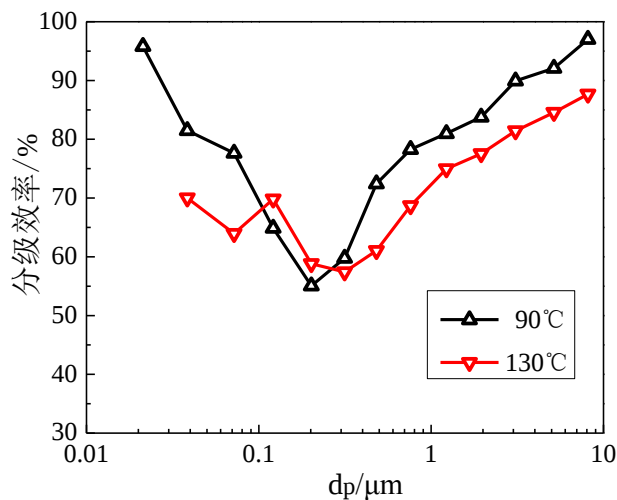
电除尘器中，首先考虑布朗团聚、湍流剪切团聚和湍流惯性团聚等团聚机制。

团聚作用：

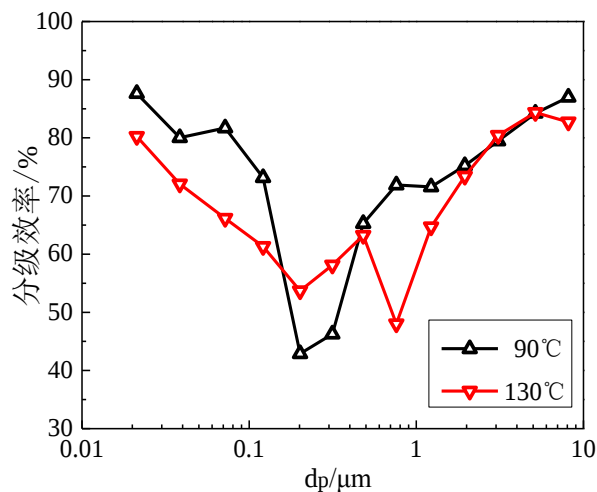
并非提高穿透床口的
颗粒粒径
而是表面改姓，提高了比电阻



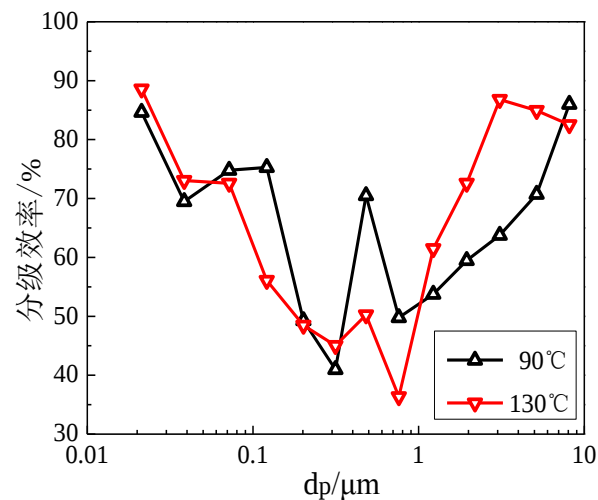
4.3 不同电压下除尘效率： 逃逸窗口左移并变窄



电压：20kV



电压：18kV

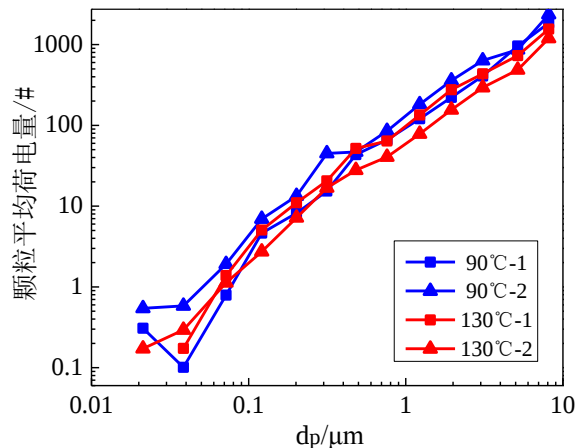


电压：16kV

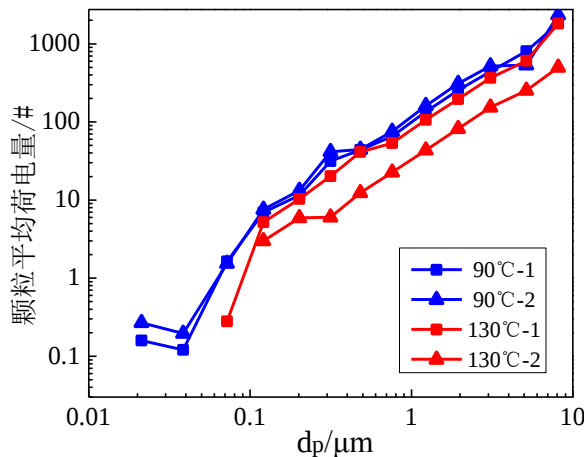
- 两温度下脱除效率的最低值均出现在0.1-1μm之间
- 与130℃相比，90℃工况下的最低脱除效率对应的粒径向左移动并变窄，130℃下在0.7μm左右出现脱除效率的最低点，而90℃则对应在0.3μm左右
- 20kV下运行稳定性较好，而16kV下各粒径段对应的分级效率波动较大，这可能是由于电压对空间电荷分布的影响导致的



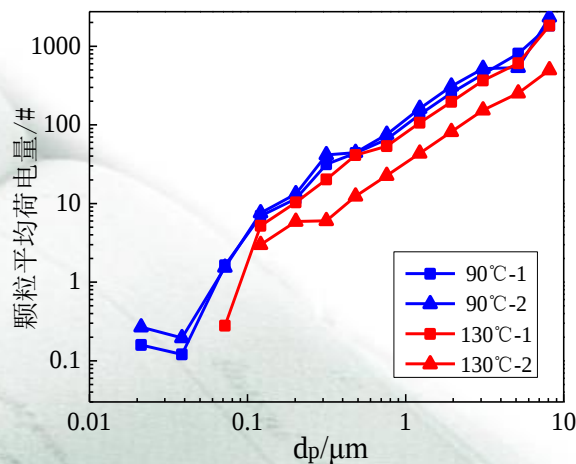
4.4 温度对荷电量的影响



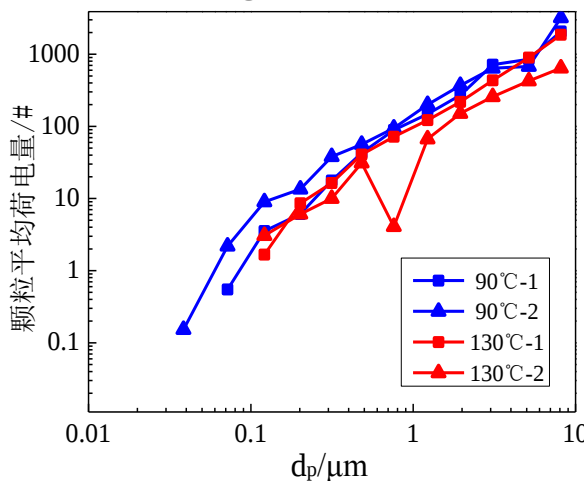
2g/m³, 18kV



2g/m³, 16kV



1g/m³, 18kV



1g/m³, 16kV

➤ 与130℃相比，90℃下颗粒的平均荷电量明显增加

➤ 随着颗粒停留时间的增加，降温对颗粒的荷电量影响更为显著



小结

放电特性

- 烟气温度的降低，电晕电流减少而击穿电压增大，有利于运行

分级效率

- 各电压下，90℃和130℃下粉尘脱除的分级效率最低值均出现在0.1-1 μm 之间，但与130℃相比，90℃工况下的最低脱除效率对应的粒径向左移动并变窄

荷电量

- 荷电量在不同运行温度下的差别是沿程变化的，随着颗粒在电场内停留时间的增加，运行温度对荷电量的影响越大





内容提要

一、排放

1. 应用背景及研究内容

2. 湿式电除尘器实验室机理研究

3. 燃煤电厂WESP脱除PM2.5现场测试与分析

二、控制

4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究

5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

6. 主要结论





5.1 低低温电除尘器的现场测试与采样分析

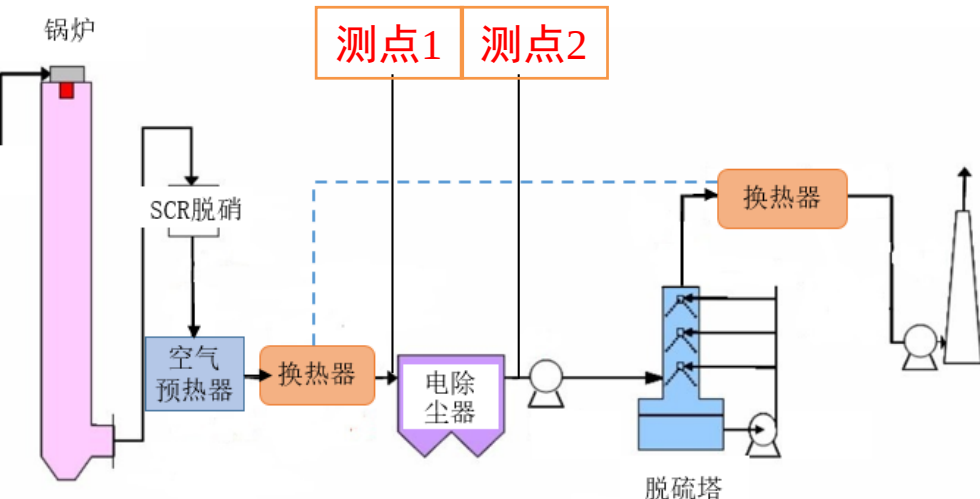


图1 电厂布置及测点位置

表1 测试工况

工况	煤种型号	机组负荷	换热器投运状况	烟温/℃
1	①	100%	正常投运	94
2	②	100%	正常投运	93
3	②	100%	未投运	130
4	②	100%	完全投运	84
5	②	50%	正常投运	90

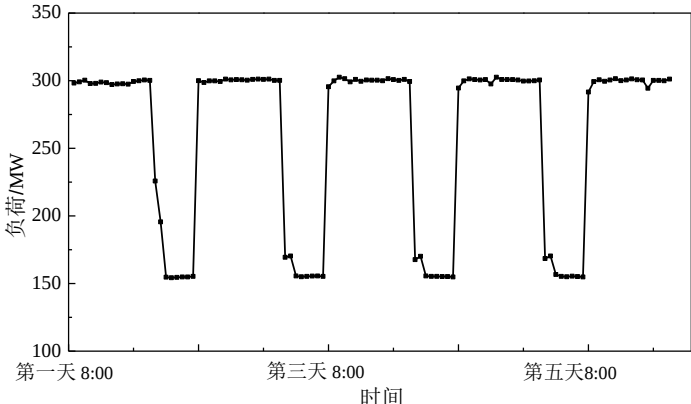


图2 电厂锅炉负荷

表2 煤种分析

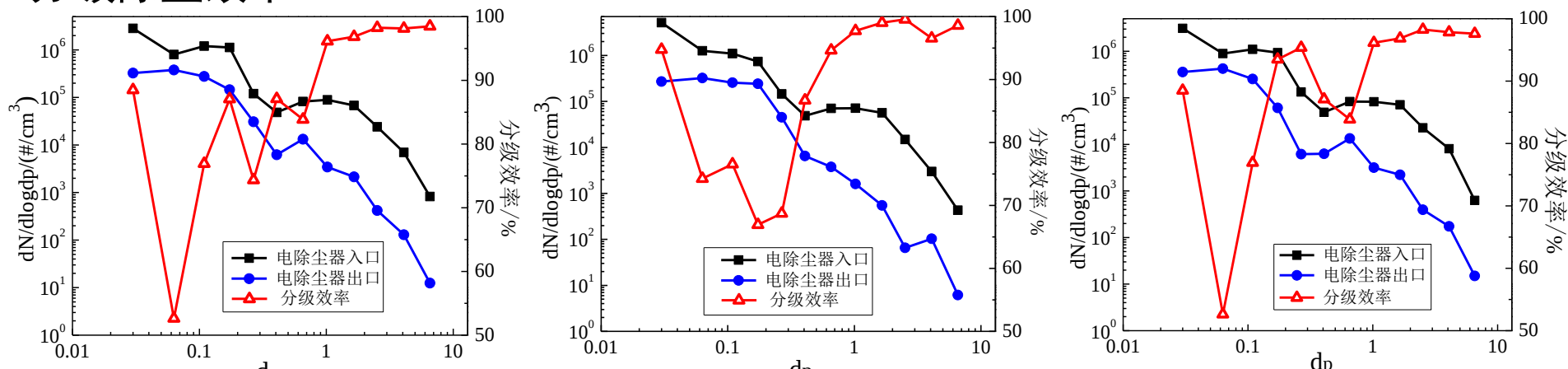
参数/煤种	煤种①	煤种②
全水分(%)	5.2	7.3
收到基灰分(%)	33.6	30.3
空干基挥发分(%)	18.2	13.8
干燥基固定碳(%)	45.1	52.5
收到基低位发热量(MJ/kg)	19.25	19.25
收到基硫分(%)	1.6	1.3





进出口数浓度测试

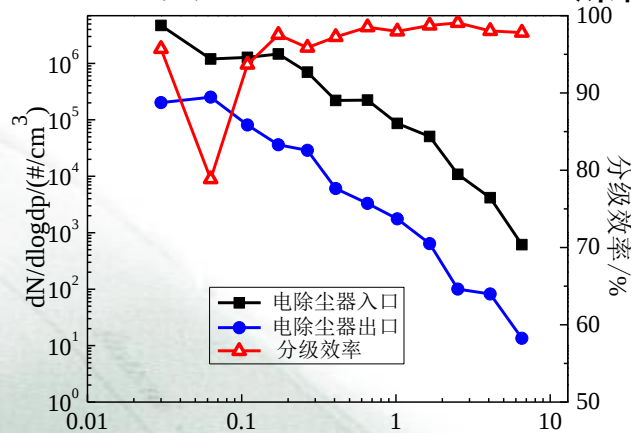
分级除尘效率: $\eta_i = (1 - N(i)_{outlet} / N(i)_{inlet}) \times 100\%$



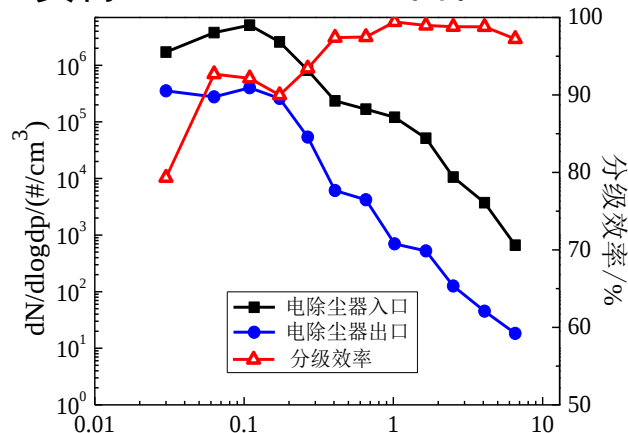
煤种1、100%负荷、94°C

煤种2、100%负荷、93°C

煤种2、100%负荷、130°C



煤种2、100%负荷、84°C



煤种2、50%负荷、90°C





除尘效率比较

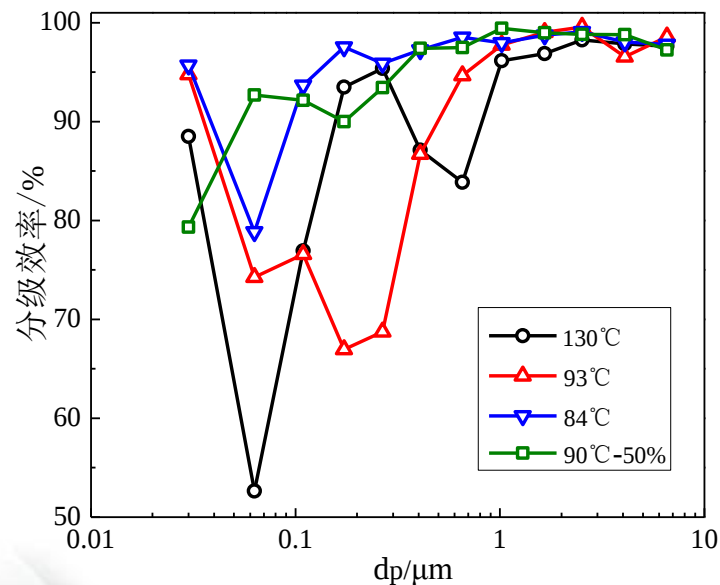


图1 工况2-4下数浓度分级脱除效率

烟温130°C → 93°C → 84°C

运行负荷降至50%

分析数浓度结果，得到PM_{2.5}和PM₁₀的穿透率

降温后，PM_{2.5}和PM₁₀的穿透率明显降低，对细颗粒脱除性能显著提升

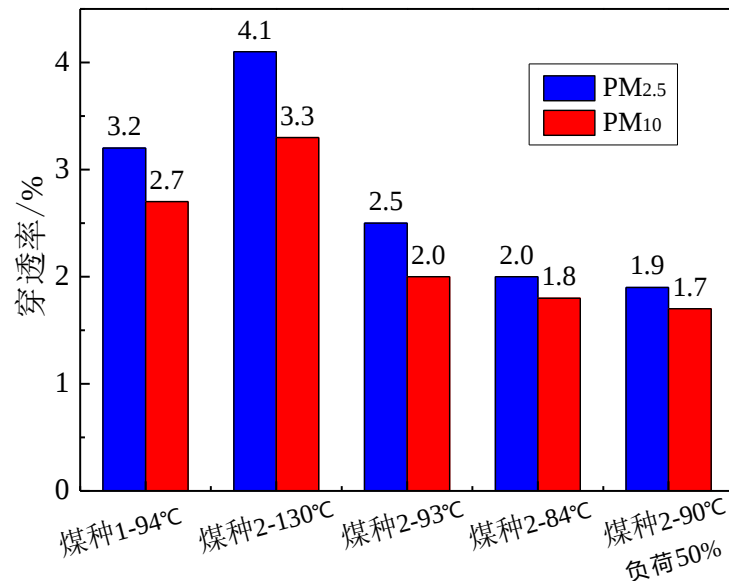


图2 各工况下PM₁₀、PM_{2.5}的穿透率

分级脱除效率整体逐渐增大

分级脱除效率明显增大

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A}{Q} \omega_e\right)$$



飞灰工况比电阻及荷电量

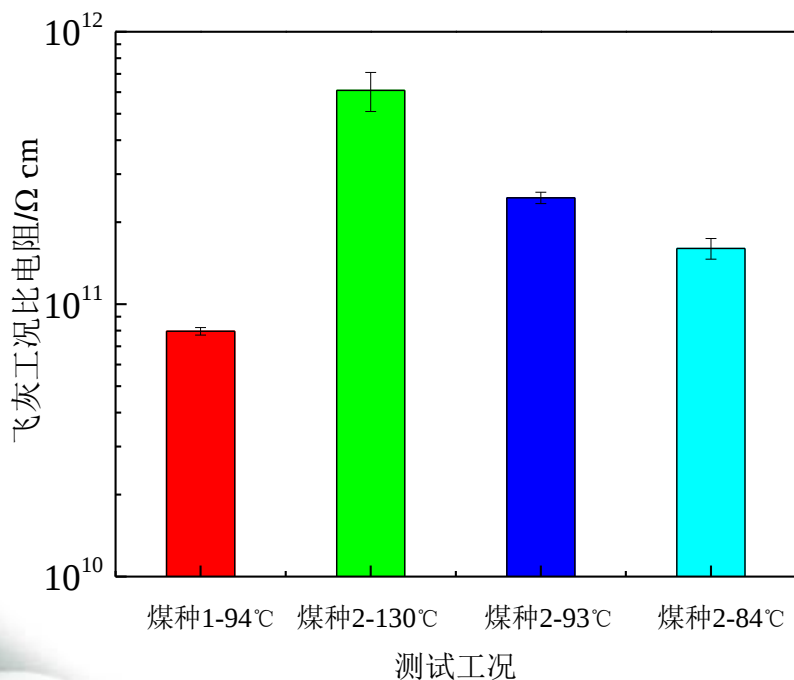


图1 不同工况下电除尘器入口飞灰比电阻

烟温在130°C、93°C、84°C时对应比电阻分别为 6.09×10^{11} 、 2.46×10^{11} 、 $1.60 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ，降温对粉尘比电阻特性有明显改善。

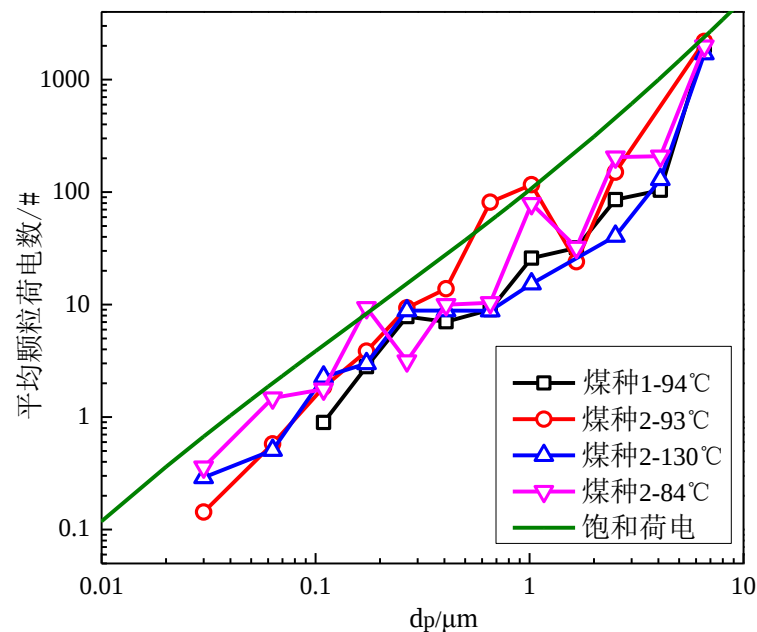
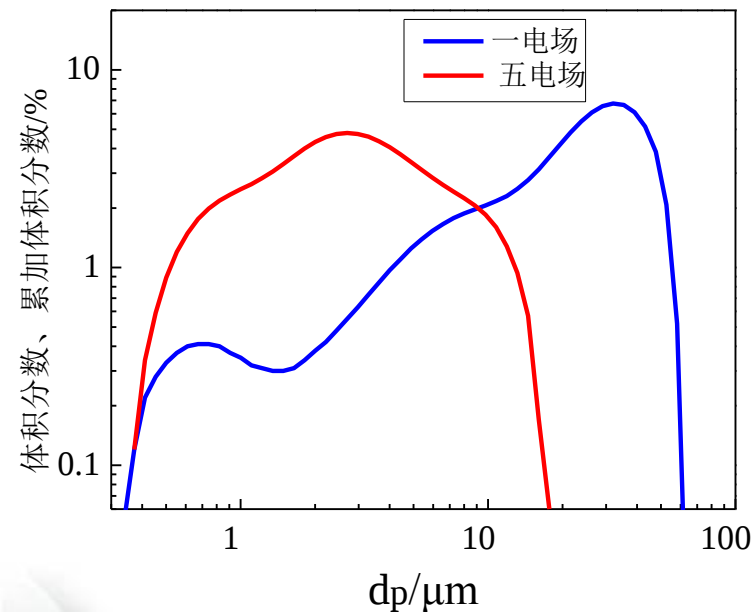


图2 工况1-4 颗粒的平均荷电量

- 颗粒粒径 $<0.1\mu\text{m}$ ，平均颗粒荷电量小于1，即部分颗粒未能荷电而逃逸
- 各粒径范围内的颗粒基本难以达到饱和荷电；烟温降低后，颗粒平均荷电率明显提升



采样粒径分析与元素分析-重要!



体积分数对应的颗粒粒径

工况	取灰位置	dp(10%)/μm	dp(50%)/μm	dp(90%)/μm
煤种1,94℃	一电场	3.966	22.316	42.214
	五电场	0.842	2.641	7.872
煤种2,93℃	二电场	1.675	3.901	7.671
	五电场	0.803	2.817	5.202

工况1(煤种①-94℃)不同位置灰样元素分析

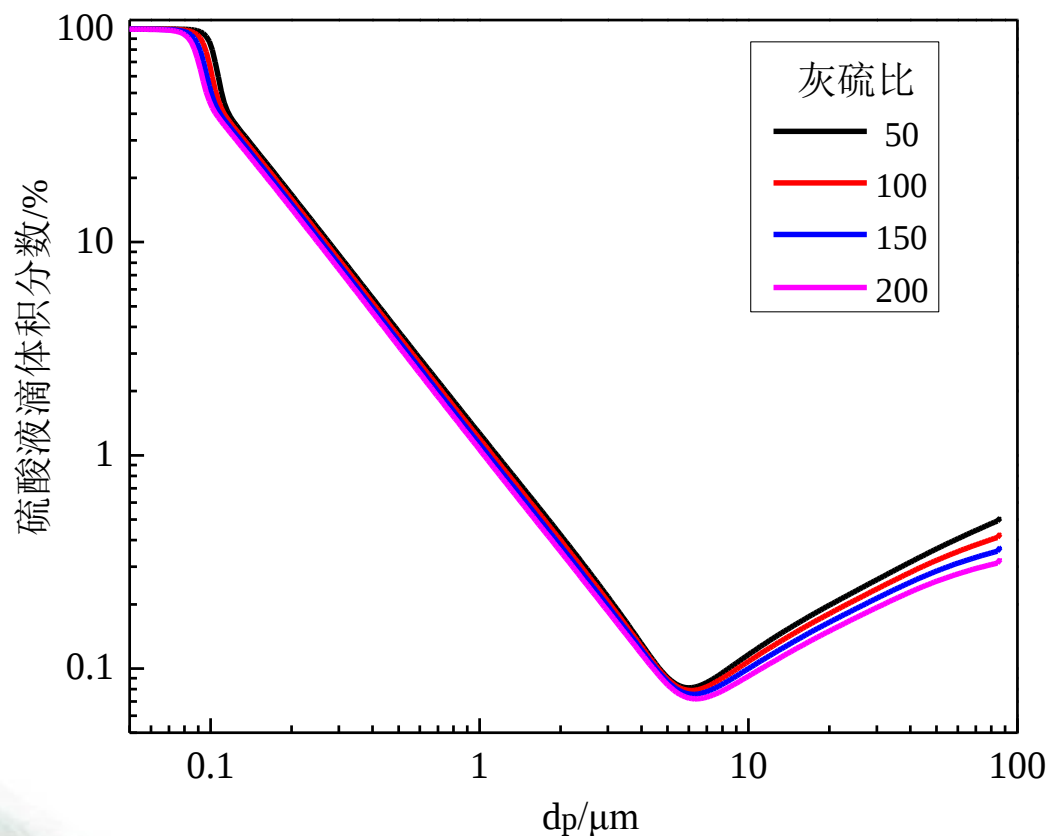
元素/取灰位置	换热器前%	换热器后%	1电场%	5电场%
S	0.0769	0.1048	0.1164	1.263

工况2(煤种②-93℃)不同位置灰样元素分析

元素/取灰位置	换热器前%	换热器后%	2电场%	5电场%
S	0.0859	0.1087	0.1714	1.698

S元素在颗粒中的含量逐渐增加，尤其是在第四电场灰样中，**这可能与SO₃演化产物**在不同粒径颗粒上的沉积有关。

SO₃液滴在不同细颗粒上沉积



小结



脱除效率

- 烟温降低后得到改善，效率有明显提升，特别是当烟温降到84℃时。烟气降温后，PM₁₀和PM_{2.5}的穿透率明显减小。其排放可达10mg/Nm³以下，协同方式下乃至可达5 mg/Nm³，但是要是锅炉运行工况和煤质特性而言。

飞灰比电阻

- 烟气温度为130℃、93℃和84℃时，电除尘器入口在工况比电阻分别为 6.09×10^{11} 、 2.46×10^{11} 、 $1.60 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ，改善作用明显。

控制条件

- 低温高湿的条件下，SO₃液滴和颗粒物的团聚是决定性因素，灰硫比的调控



内容提要

1. 应用背景及研究内容
2. 湿式电除尘器实验室机理研究
3. 燃煤电厂WESP脱除PM_{2.5}现场测试与分析
4. 低低温电除尘器温度对粉尘荷电及脱除性能研究
5. 低低温电除尘器的现场测试与采样分析
6. 主要结论

低低温之后FGD对细颗粒的脱除



		入口 (mg/Nm ³)	出口 (mg/Nm ³)	脱除效率(%)
膜法	PM ₁₀	16.68	4.62	72.3
	PM _{2.5}	6.12	3.58	41.5
ELPI法	PM ₁₀	17.49	4.38	75.0
	PM _{2.5}	6.39	3.60	43.7

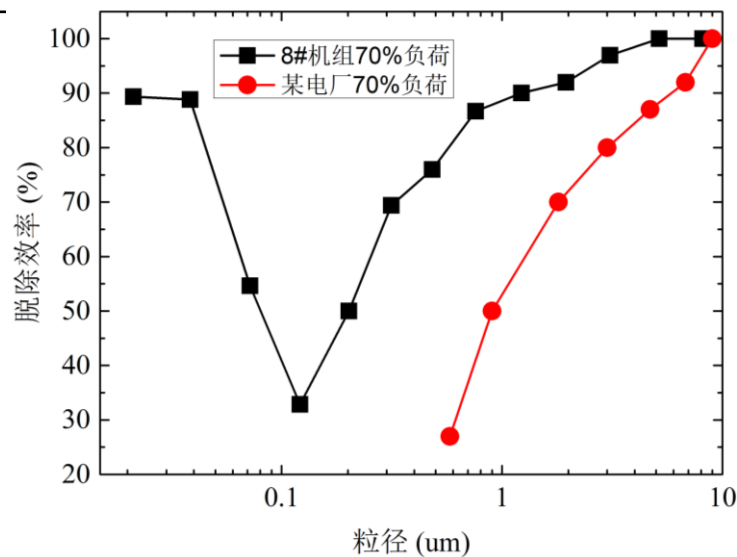
➤ 膜法与ELPI法测试结果吻合良好。

➤ 分级脱除效率也与以往测试相近。

表3 WFGD 前后飞灰颗粒物质量浓度与脱除效率

Tab. 3 Mass concentrations of fly ash particles and removal efficiency

日期	锅炉 负荷/%	入口浓度/ (mg/m ³)	出口浓度/ (mg/m ³)	脱除效率/%
23	100	86.11	21.30	75.3
28	100	84.70	22.34	73.6
29	70	18.33	6.78	63.0





6. 主要结论

- WESP已测排放可稳定在 $3-10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 之间，WESP出口 $\text{PM}_{2.5}$ 中， PM_1 的质量贡献率超过50.0%；实现燃煤电站超净排放，关键要进一步提高WESP对 PM_1 及粒径在 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒的脱除效率
- 低低温电除尘现场测试结果表明：与常规电除尘器相比，低低温电除尘器对细颗粒的脱除性能显著提升，排放约在 $4-15\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。而且降温对粉尘比电阻及荷电性能有明显改善；但是其更多改善的是穿透窗口内右侧较大粒径部分，对超细部分的捕捉和改善仍不确定。
- 比之于荷电方式提高，穿透窗口细颗粒的团聚最为重要！！
- 颗粒物的控制越来越成熟，技术有保障





6. 主要结论：燃气轮机，更长远

燃煤电厂超低排放：

看似是环保要求，其实是不同国家能源结构(气、油、煤)的市场博弈

1. 走向工业锅炉/窑炉, 乃至控制散煤
2. 电厂排放烟尘本身砝码越来越小
3. 大气二次颗粒物
4. 气候和二氧化碳CO₂

燃气轮机的NO_x排放

	ppm, O ₂ =15%	mg/Nm ³ , O ₂ =15%	mg/Nm ³ , O ₂ =6% (电厂)
北美	2	4.3	10.8
日本	2	4.3	10.8
欧盟	15	32.4	80.9
中国	25	53.9	134.9
长三角	15	32.4	80.9
世界银行	25	53.9	134.9

燃煤

NO_x: 50 mg/Nm³

SO₂: 35 mg/Nm³





谢谢

Thanks for listening
Any questions ...

2016-3-9



Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084