

# 基于群平衡模拟的低低温电除尘器 协同脱除 PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>3</sub> 研究

段璐, 王述浩, 李水清\*

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

## Study on the Ultralow Cold-side Electrostatic Precipitation for Synergistic Removal of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> by the Population Balance Model

DUAN Lu, WANG Shuhao, LI Shuiqing\*

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Tsinghua University),  
Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the population balance model (PBM), including sub-models of nucleation of condensable matters and coagulation of fine particulates, was firstly established to elucidate the mechanisms of SO<sub>3</sub> condensation on PM<sub>2.5</sub> surface and their coagulation in a low-temperature economizer before an electrostatic precipitator (ESP). Then, we incorporated the particle charging model, the migration velocity formula and the sedimentation model into the PBM framework to predict the migration/removal of particulates in the ESP. By combing them, a computational method for predicting the collection efficiency of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> of this ultralow cold-side ESP was constructed. The method was validated with experimental data from an ESPs with and without low-temperature economizer in a coal-fired power plants. The results show that, with the low-temperature economizer, the temperature of flue gas decreases from 149 °C to 98 °C at ESP inlet. About 78.3% of SO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> from flue gas condenses and deposits onto the particles, in which 42.2% deposits on PM<sub>1</sub>, 72.7% deposits on PM<sub>2.5</sub> and 91.3% deposits on PM<sub>10</sub> respectively. Therefore, the mass emissions of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> are 11.4 mg/m<sup>3</sup> and 5.8 mg/m<sup>3</sup>, which are lower than conventional ESP by 73% and 76.6%, respectively.

**KEY WORDS:** cold-side electrostatic precipitator; population balance model; condensable particle; coagulation; nucleation

**摘要:** 基于可凝物质核化和细颗粒团聚理论, 建立求解低温省煤器内细颗粒表面 SO<sub>3</sub> 凝结核和团聚机制的群平衡方程, 耦合颗粒荷电模型、驱进速度公式、颗粒沉积核模型, 建立预测电除尘器内粉尘颗粒迁移和捕集过程的群平衡模型, 从

而建立低低温电除尘器内颗粒物和 SO<sub>3</sub> 协同脱除的理论模型, 并针对国内某电厂低低温电除尘器进行了计算。结果表明, 该模型能够准确预测常规电除尘器和低低温电除尘器出口 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和总尘的排放浓度以及 SO<sub>3</sub> 的脱除效率。低低温电除尘器入口烟温为 98 °C, 烟气中 78.3% 的 SO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 沉积在颗粒物表面, 其中 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 上沉积的硫酸质量占总硫酸沉积质量的比值分别为 42.2%、72.7% 和 91.3%, 硫酸液滴主要富集在 PM<sub>2.5</sub> 上, PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>3</sub> 的出口质量排放浓度分别为 11.4 mg/m<sup>3</sup> 和 5.8 mg/m<sup>3</sup>, 相较于入口烟温为 149 °C 的常规电除尘器, 其质量浓度分别降低了 73% 和 76.6%。

**关键词:** 低低温电除尘器; 群平衡模型; 可凝结颗粒物; 团聚; 核化

## 0 引言

自 2015 年我国全面实施燃煤电厂超低排放标准以来, 低温省煤器+电除尘器改造是我国火电厂降低粉尘排放的主流技术路线之一。低温省煤器将烟气温度降低至 90 °C~100 °C 之间, 出口粉尘颗粒物排放浓度一般低于 20 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>3</sub> 脱除效率一般可达 70%~95%, 实现了细颗粒物和 SO<sub>3</sub> 的协同高效脱除<sup>[1]</sup>。

为揭示低低温电除尘器内颗粒物和 SO<sub>3</sub> 协同脱除机理, 国内外学者进行了大量的研究工作。东南大学<sup>[2]</sup>通过实验证明, 增加低温省煤器 (low-temperature economizer, LTE) 后, 静电除尘器 (electrostatic precipitator, ESP) 出口中值粒径从 0.05 μm 增大到 0.08 μm, 颗粒脱除效率提升 5%, SO<sub>3</sub> 脱除效率提升了 60%, 这主要是因为省煤器内烟气

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600602)。

National Key R&D Program of China (2016YFB0600602).

流速一般在 10m/s 以上,且管束引起的强烈湍流作用促进了颗粒与硫酸液滴、颗粒与颗粒之间的团聚长大,有利于其在静电除尘器内的脱除<sup>[3-4]</sup>。清华大学<sup>[5-6]</sup>进行了大量的现场测试,发现温度降低至酸露点以下,粉尘比电阻特性有明显地改善,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>除尘效率均有所提高。澳大利亚莫纳什大学<sup>[7-8]</sup>通过 CFD 方法模拟硫酸体积含量不同的颗粒在静电除尘器内的脱除效率,结果表明,SO<sub>3</sub>沉积提高了颗粒介电常数,进而提高了颗粒的荷电量和脱除效率。华中科技大学<sup>[9]</sup>应用群平衡模型建立了预测静电除尘器效率的零维沉积核模型。清华大学<sup>[5]</sup>建立了描述静电除尘器内颗粒表面 SO<sub>3</sub> 沉积和团聚现象的群平衡模型,模拟结果表明,颗粒表面沉积的 SO<sub>3</sub> 的量与颗粒物粒径分布和浓度有关。

由于烟气中细颗粒物不仅是从几纳米到几十微米的宽粒径筛分分布,更在低温省煤器和电除尘器内发生不同粒径之间颗粒的碰撞、团聚,及其与可凝结气态成分(如 SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 等)的相互作用,这是实验研究和 CFD 商业软件难以解决的核心问题之一。而现有的群平衡模型未考虑颗粒在低温省煤器内的动力学演化过程和静电除尘器内空间尺度的迁移和捕集等问题,因此,难以准确预测颗粒物和 SO<sub>3</sub> 在低低温电除尘器内的脱除效率。

本文结合真实烟气条件和低低温电除尘器基本单元,在耦合可凝结颗粒物核化以及细颗粒团聚过程的群平衡方程基础上,建立低温省煤器内颗粒表面 SO<sub>3</sub> 凝结和团聚模型,并耦合颗粒荷电模型、驱进速度模型、颗粒沉积模型等,建立描述电除尘器内颗粒迁移和捕集过程的群平衡模型。结合真实案例研究烟气内颗粒物和 SO<sub>3</sub> 在低温省煤器和静电除尘器内的动力学演化过程,预测低低温电除尘器的脱除性能。

## 1 数值模型

### 1.1 群平衡模型

颗粒群平衡模拟(population balance modelling, PBM)以颗粒尺度分布(particle size distribution, PSD)为基础,采用概率方法建立各种动力学事件的定量描述模型,将颗粒尺度分布离散成有限数量区间,通过颗粒群平衡方程(population balance equation, PBE)的时间演变、空间演变或时空演变过程来量化离散体系的动力学演变过程<sup>[10]</sup>。PBM 方法已经应用到了大气环境、工业纳米颗粒合成、燃烧过程碳烟颗粒生成演化等诸多领域<sup>[11]</sup>。清华大学不断拓展

PBM 模型的应用领域,将其应用于煤粉燃烧过程中挥发性矿物质的演化过程<sup>[11]</sup>、电除尘器内颗粒与硫酸液滴团聚过程<sup>[5]</sup>、以及高湿烟气中细颗粒、SO<sub>3</sub> 及水汽的非均相核化、团聚过程<sup>[12]</sup>。

PBE 的通用表达式<sup>[10,13]</sup>可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(V,t)}{\partial t} + \nabla \cdot [n(V,t)\bar{u}(V,t)] = & \left\{ \frac{1}{2} \int \beta(V-V', V',t)n(V-V',t)n(V',t)dV' - n(V,t) \cdot \right. \\ & \left. \int \beta(V,V',t)n(V',t)dV' \right\}_{\text{团聚}} + \left\{ \gamma(V',V,t) \cdot \right. \\ & \left. b(V',t)S(V',t)n(V',t)dV' - S(V,t)n(V,t) \right\}_{\text{破碎}} + \\ & \left\{ \frac{\partial I(V,t)n(V,t)}{\partial V} \right\}_{\text{冷凝/蒸发}} + \left\{ \nabla \cdot (D\nabla n_k) \right\}_{\text{扩散}} + \\ & \left\{ J(V^*,t)\delta(V^*,V) \right\}_{\text{成核}} + \left\{ \frac{\partial n(V,t)}{\partial t} \right\}_{\text{沉积}} + \left\{ R \right\}_{\text{其他}} \quad (1) \end{aligned}$$

式中:  $n(V,t)$  为颗粒数浓度密度分布函数,单位为  $1/m^6$ ,表示体积在  $V$  和  $V+dV$  之间的颗粒数浓度为  $ndV$ ;左式第一项为单位时间内颗粒数浓度的变化量;左式第二项为颗粒迁移引起的颗粒数浓度变化量; $\bar{u}$  为颗粒的迁移速度, m/s;右式第一项为团聚引起的颗粒数浓度变化量;右式第二项为颗粒破碎引起的数浓度变化量;右式第三项表示冷凝或蒸发引起的颗粒数浓度变化量;第四项、第五项、第六项分别为颗粒扩散、成核、沉积以及其他因素引起的颗粒浓度变化量。

### 1.2 低温省煤器内颗粒表面 SO<sub>3</sub> 凝结和团聚

本文建立低低温省煤器内颗粒动力学演化零维群平衡模型,模型涉及到硫酸蒸汽均相成核、异相成核以及颗粒与颗粒间、颗粒与硫酸液滴间的碰撞聚并,式(1)可简化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(V,t)}{\partial t} = & \left\{ J(V^*,t)\delta(V^*,V) \right\}_{\text{均相成核}} - \\ & \left\{ \frac{\partial I(V_0,t)n(V,t)}{\partial V} \right\}_{\text{异相成核}} + \left\{ \frac{1}{2} \int \beta(V-V',V',t) \right. \\ & \left. n(V-V',t)n(V',t)dV' - n(V,t) \right. \\ & \left. \int \beta(V,V',t)n(V',t)dV' \right\}_{\text{团聚}} \quad (2) \end{aligned}$$

式中:右式第一项和第二项为均相成核和异相成核,具体公式可见文献[10,13];右式第二项为团聚引起的颗粒数浓度变化,在低温省煤器中主要考虑布朗团聚、湍流剪切团聚和湍流惯性团聚,其团聚核具体计算方法见参考文献[5]。

### 1.3 静电除尘器内颗粒迁移与捕集

在静电除尘器内,荷电颗粒在静电场的作用下不断向收尘极板迁移,而壁面附近存在湍流边界层、二次涡流以及反电晕等现象,导致颗粒不断地

喷射扫略，造成二次扬尘<sup>[14]</sup>。为简化计算，本问忽略颗粒在静电除尘器内的团聚作用，仅考虑颗粒的迁移和沉积，式(1)可简化为

$$\frac{dn}{dt} + \nabla \cdot [n(V, t)\bar{u}(V, t)] = \{[1 - \alpha(V, \bar{u})] \frac{\partial}{\partial y} \cdot [n(V, t)\bar{u}(V, t)]\}_{\text{壁面}} \text{沉积} \quad (3)$$

式中：等式右边为收尘极板上沉积的颗粒量； $\alpha(V, \bar{u})$  为颗粒的扬尘系数，根据日本神奈川理工学院和富士电器大量研究结果表明，当颗粒粒径大于 1 $\mu\text{m}$  时，静电除尘器内颗粒的二次扬尘较大，扬尘系数取 0.5~0.6<sup>[14]</sup>。

根据式(3)所示，颗粒的迁移和捕集涉及到静电除尘器内的空间离散、电场分布和颗粒的荷电量。

### 1.3.1 空间离散

火电厂电除尘器由多级电场组成，总长度通常大于 20m，且每级电场包含多个电除尘通道，采用三维或二维计算模型研究实际电厂静电除尘器时间和计算成本过高。因此，本文忽略颗粒运动对烟气流场的影响，以及颗粒在重力方向的迁移和捕集，假设沿烟气流动方向气流充分发展且电场分布均匀，颗粒在该方向上移动距离与时间成正比，将问题简化为准二维问题，将极线到极板间的通道划分为  $y_{\text{disc}}$  个通道，如图 1 所示。

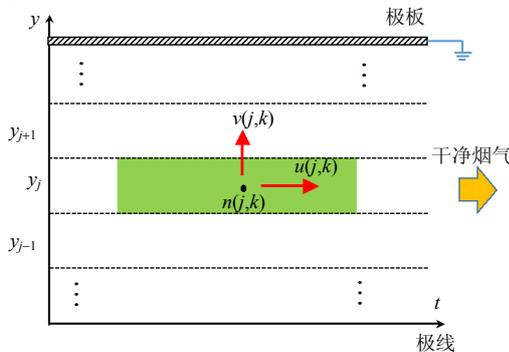


图 1 静电除尘器网格划分  
Fig. 1 Grid mesh inside ESP

### 1.3.2 颗粒荷电模型

本文采用 Pauthenier & Moreau-Hanot(1932)<sup>[15]</sup>建立的场致荷电模型和 White(1963)<sup>[16]</sup>建立的扩散荷电模型联合计算颗粒的荷电量。由于场致荷电和扩散荷电一般在极短的时间内达到饱和状态，为简化计算，本文假设颗粒进入静电除尘器后即达到饱和荷电量。

其中场致荷电引起的饱和荷电量为

$$q_f = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} d_p^2 \cdot E \quad (4)$$

扩散荷电引起的饱和荷电量为

$$q_d = 6.2 \frac{2\pi\epsilon_0 d_p kT}{e} \quad (5)$$

颗粒联合荷电量为

$$q_c = q_f + q_d \quad (6)$$

式中： $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$  为真空介电常数； $\epsilon_p$  为颗粒介电常数； $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  为电子荷电量； $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$  为玻尔兹曼常数。

### 1.3.3 电除尘器内电场强度

本文假设平行于极板方向电场分布均匀，垂直于极板方向电场强度通过管式电除尘器电场强度公式得到：

$$E(y) = \sqrt{\frac{a^2 E_s^2}{y^2} + \frac{i}{2\pi\epsilon_0 b_1} (1 - \frac{a^2}{y^2})} \quad (7)$$

由于线-板式电除尘器内电场分布不均匀，本文采用非均匀系数  $f_E$  来描述电除尘器内电场分布的非均匀程度<sup>[17]</sup>，采用电源修正系数  $f_P$  修正电源类型对电场和荷电颗粒迁移速度的影响，其中工频电源取 1，高频电源取 1.2~1.3。因此，荷电颗粒在电场力作用下的迁移速度可表示为

$$v_p = f_P / f_E \cdot \frac{q_c E \cdot C_m}{3\pi\mu_f d_p} \quad (8)$$

式中： $v_p$  为颗粒迁移速率，m/s； $q_c$  为颗粒总荷电量，C； $E$  为电场强度，V/m； $\mu_f$  为流体的动力黏度，N·s/m<sup>2</sup>； $C_m$  为肯宁汉修正系数，详见文献[17]。

## 2 物理模型

以国内某电厂低低温电除尘器为例，采用本文建立的模型计算低低温电除尘器内颗粒物与 SO<sub>3</sub> 的动力学演变过程，并对比了环保监测部门和清华大学<sup>[6]</sup>的现场测试分析结果，验证本模型的准确性，其中环保监测部门在 149℃ 和 98℃ 下测量了静电除尘器出口粉尘浓度和 SO<sub>3</sub> 的脱除效率，清华大学在 110℃ 下采用 ELPI 测量了 ESP 出口粉尘的分级质量浓度。表 1 给出了该静电除尘器在低温省煤器投运前后的相关测试结果。

清华大学<sup>[6]</sup>在测试中进行了飞灰的成分分析，根据文献[18]所述，飞灰的有效介电常数与其成分和各成分的介电常数有关，即：

$$\ln \epsilon_{\text{eff}} = \sum x_i \ln \epsilon_i \quad (9)$$

表 2 给出了该机组的飞灰成分及各成分的介电常数，根据表 2 和式(8)可知，该机组飞灰的有效介

表1 某电厂低温省煤器投运前后电除尘器测试结果

Tab. 1 Major parameters of the ESP with or without the low-temperature economizer

序号	项目	投运前	投运后	
1	ESP 烟气温度/°C	149	110	98
2	ESP 进口烟气流量/(m <sup>3</sup> /h)	3001772	2724456	2639128
3	ESP 进口烟尘浓度/(g/m <sup>3</sup> )	11.93	11.93	11.93
4	ESP 出口烟尘浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	68.09	—	22.38
5	LTE 烟气停留时间/s	0	0.425	0.425
6	ESP 烟气流速/(m/s)	0.978	0.888	0.860
7	除尘效率/%	99.43	—	99.74
8	SO <sub>3</sub> 脱除效率/%	—	—	71.78

表2 灰成分分析及介电常数

Tab. 2 Component analysis of fly ash and the permittivity of each component

成分	含量/%	介电常数
SiO <sub>2</sub>	44.38	4.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.06	9.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	4.5
CaO	5.19	11.8
MgO	0.64	9.7
Na <sub>2</sub> O	0.04	1.5
K <sub>2</sub> O	0.28	1
SO <sub>3</sub>	2.74	70
TiO <sub>2</sub>	1.76	86

电常数为 6.78。

表3给出了该机组静电除尘器的结构尺寸和运行参数。

表3 静电除尘器结构尺寸和运行参数

Tab. 3 Structure size and operating parameters of ESP

电场级数	长度/mm	同极间距/mm	烟气停留时间/s			电流/mA	电压/kV
			149°C	140°C	98°C		
1	6270	400	6.41	6.55	7.29	720×3	66
2	4500	450	4.60	4.70	5.23	960×2	66
3	4500	450	4.60	4.70	5.23	960×2	66
4	4500	450	4.60	4.70	5.23	960×2	66
5	4400	450	4.50	4.60	5.12	960×2	80

### 3 结果和讨论

#### 3.1 可靠性分析

表4给出了静电除尘器出口粉尘浓度和SO<sub>3</sub>脱除效率的测量值和计算值,以及计算值与测量值间的偏差,测量值来自于环保检测部门的第三方测试报告。如表4所示,静电除尘器出口粉尘浓度计算值与测量值间的偏差在149°C和98°C下分别为4.6%和0.2%,SO<sub>3</sub>脱除效率的偏差为6.6%,因此,

表4 ESP出口颗粒浓度计算值和测量值比较

Tab. 4 Comparison of the experimental and numerical data of particle concentration at ESP outlet

项目	粉尘排放浓度/(mg/m <sup>3</sup> )		SO <sub>3</sub> 脱除效率/%
	149°C	98°C	98°C
测量值	68.1	22.4	71.8
计算值	64.9	22.4	76.5
偏差	4.6	0.2	6.6

本文建立的模型能够较为准确的预测静电除尘器出口粉尘浓度和SO<sub>3</sub>脱除效率。

图2比较了110°C下静电除尘器出口PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的质量浓度的测量值和计算值,测量值来自文献[6]中采用ELPI进行现场测试得到的结果。

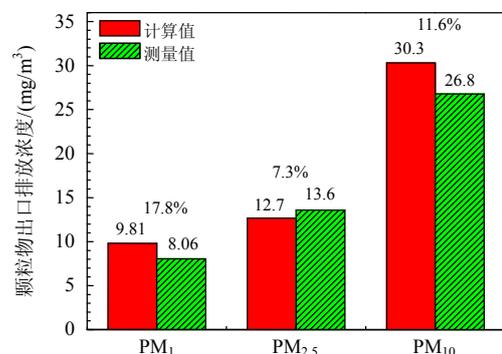


图2 ESP出口颗粒质量浓度计算值和测量值比较

Fig. 2 Comparison of the numerical and measured value of grade mass concentration of particles at ESP outlet

如图2所示,PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的计算值与测量值间的偏差分别为17.8%、7.3%和11.6%,可见该模型能够较为准确地预测静电除尘器出口PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的质量浓度。

综上所述,本文建立的模型能够较为准确地预测静电除尘器出口总粉尘浓度,电除尘器出口PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的质量浓度,以及SO<sub>3</sub>的脱除效率。

#### 3.2 颗粒表面SO<sub>3</sub>凝结及其影响

根据成核理论,当烟气在低温省煤器内温度降低至酸露点时,硫酸蒸汽开始发生凝结。根据表1可知,烟气在低温省煤器内停留时间为0.425s,温度从149°C降至98°C,SO<sub>3</sub>进口浓度为24.8mg/N·m<sup>3</sup>。图3为烟气在低温省煤器内不同时刻SO<sub>3</sub>的浓度以及凝结在颗粒表面的SO<sub>3</sub>的量与进口SO<sub>3</sub>浓度的比值。如图3所示,烟气进入低温省煤器后,在0.281s开始发生凝结,此时温度为112.2°C,即酸露点温度为112.2°C,随着温度的进一步降低,烟气中SO<sub>3</sub>的浓度不断下降,硫酸液滴不断沉积在颗粒物表面,到低温省煤器出口处,烟气中SO<sub>3</sub>浓度降低为

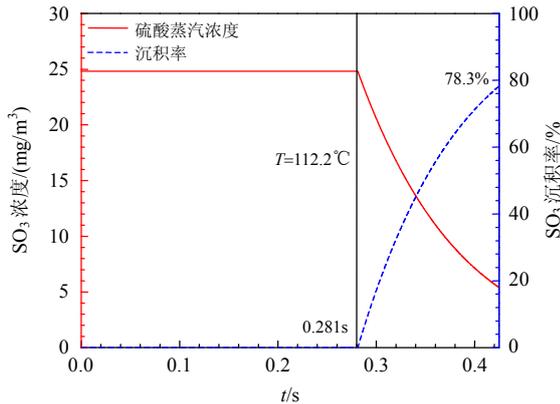


图 3 烟气中 SO<sub>3</sub> 浓度及颗粒表面 SO<sub>3</sub> 沉积率

Fig. 3 SO<sub>3</sub> concentration of flue gas and the deposition ratio of SO<sub>3</sub> on the particles

5.4 mg/m<sup>3</sup>, 颗粒表面 SO<sub>3</sub> 的沉积率达到 78.3%。

图 4(a)给出了低温省煤器进、出口颗粒的数浓度分布曲线, 其中进口颗粒数浓度分布来自典型煤种飞灰分布曲线的测量值<sup>[11]</sup>, 进口颗粒质量浓度 11.93g/m<sup>3</sup>, 如图所示, 相较于低温省煤器进口, 其出口小粒径颗粒数浓度减少, 而大于 10μm 粒径颗粒数浓度增多, 这是因为烟气温度降低和管束的扰动造成颗粒表面 SO<sub>3</sub> 凝结和颗粒间的团聚。不同粒径颗粒上沉积的硫酸体积和硫酸体积占颗粒体积的比值如图 4(b)所示, 当粒径小于 0.5μm 时, 根据核化理论, 细颗粒表面核化能较大, 硫酸液滴不易沉积, 随着粒径增大, 核化能降低, 颗粒表面沉积的硫酸增多, 但当粒径进一步增大, 颗粒表面沉积的硫酸体积先降低再增加最后降低, 与颗粒数浓度变化趋势一致。由图可知, 在 0.5~1μm 粒径范

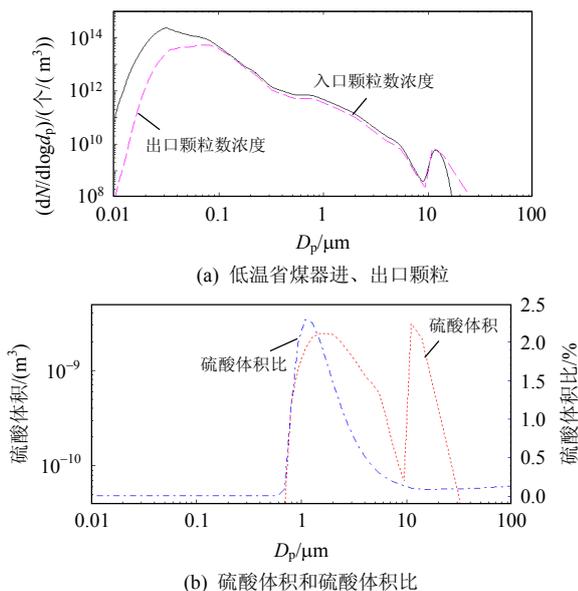


图 4 颗粒表面硫酸沉积体积及体积比  
Fig. 4 Volume and its ratio of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> deposition on particle surface

围内, 颗粒表面硫酸沉积量上升导致硫酸体积比提高, 但随着粒径增大, 颗粒体积急剧增大, 使得硫酸体积比迅速降低。此外, PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 上沉积的硫酸体积占总硫酸沉积体积的比值为 42.2%, 72.7%和 91.3%, 可见, 硫酸液滴更易富集在 PM<sub>2.5</sub> 上。

图 5 对比了不设置低温省煤器和设置低温省煤器时颗粒的介电常数、驱进速度和颗粒穿透率。

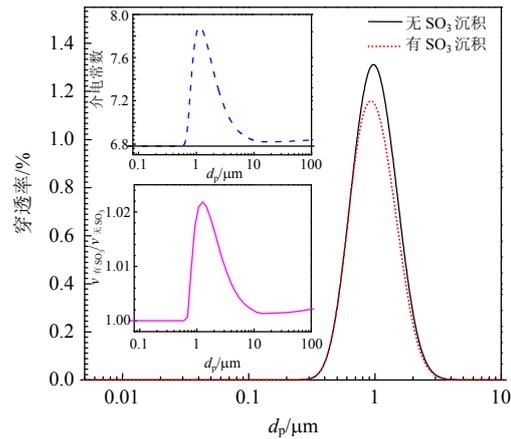


图 5 SO<sub>3</sub> 沉积对颗粒介电常数及迁移特性的影响

Fig. 5 Effect of the SO<sub>3</sub> deposition on the particle dielectric constant and migration velocity

结果表明, 在 0.5~2.5μm 范围内颗粒的介电常数随粒径的变化趋势与硫酸体积比的分布趋势一致, 这是因为硫酸和水的介电常数分别为 86 和 80, 远大于飞灰介电常数, 硫酸体积比较大导致介电常数较高, 提高了颗粒的荷电量和驱进速度, 进而降低了颗粒的穿透率, 如图 5 所示, 颗粒在 0.93μm 处穿透率最大, 在无 SO<sub>3</sub> 和有 SO<sub>3</sub> 沉积时颗粒穿透率分别为 1.33%和 1.18%, 说明温度降低后粉尘穿透率降低了 11.3%。

### 3.3 低低温电除尘器污染物脱除规律研究

图 6 给出了不设置低温省煤器和设置低温省煤器时静电除尘器各级出口粉尘的质量浓度。如图 6 所示, 不设置低温省煤器时, 电除尘器出口 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和总尘的质量浓度分别为 27.9、43.5、64.9 和 64.9mg/m<sup>3</sup>, 设置低温省煤器后, 电除尘器出口 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和总尘的质量浓度分别为 6.2、11.4、22.4 和 22.4mg/m<sup>3</sup>, 相较于不采用低低温省煤器, 出口粉尘浓度分别下降了 77.7%、73.0%、65.5%和 65.5%, 而 SO<sub>3</sub> 的出口排放浓度从 24.8mg/m<sup>3</sup> 降低到 5.8mg/m<sup>3</sup>、降低了 76.6%, 可见, 低低温电除尘器可实现颗粒物与 SO<sub>3</sub> 的协同高效脱除。此外, 在第一电场出口处, 10μm 以上的大粒径颗粒基本被脱除, 这是因为大粒径颗粒迁移速度

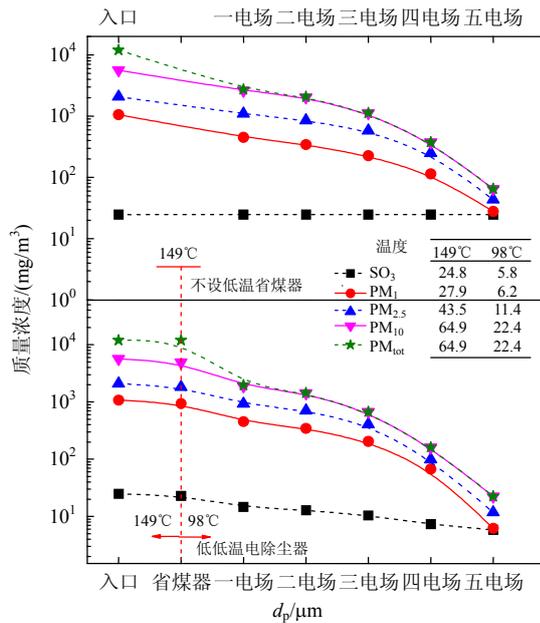


图6 低温省煤器对各级电场出口粉尘浓度的影响

Fig. 6 Effect of the LTE on the particle concentration at various stage of ESP

较大, 进入静电除尘器后很快沉积到极板上。

表5详细给出了低温省煤器入口、低温省煤器出口和各级电场出口SO<sub>3</sub>、PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和总尘的质量浓度。如表所示, 低温省煤器出口处PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度比入口低, 这是由于低温省煤器内强湍流作用促进颗粒团聚, 小粒径颗粒团聚在大粒径颗粒上, 而总尘浓度增加则是由于SO<sub>3</sub>凝结核为硫酸液滴附着在颗粒上。在电除尘器中, 设置低温省煤器后, 各级电场出口粉尘浓度基本都低于不设置低温省煤器时的浓度, 进一步说明, 设置低温省煤器能够显著提升颗粒物和SO<sub>3</sub>的脱除效率。

表5 低温省煤器对各级电场出口粉尘浓度的影响

Tab. 5 Effect of the LTE on the particle concentration at various stage of ESP mg/m<sup>3</sup>

项目	ESP	各级电场出口污染物浓度					
		入口	一	二	三	四	五
无省煤器	SO <sub>3</sub>	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
	PM <sub>1</sub>	1059.2	450.6	344.4	225.6	114.3	27.9
	PM <sub>2.5</sub>	2071.6	1094.4	849.5	578.3	249.7	43.5
	PM <sub>10</sub>	5629.9	2605.3	2029.6	1126.5	375.5	64.9
	PM <sub>tot</sub>	11929.5	2729.9	2070.6	1127.2	375.5	64.9
设置省煤器	SO <sub>3</sub>	24.8	14.7	12.9	10.4	7.3	5.8
	PM <sub>1</sub>	939.5	453.4	346.0	206.3	67.4	6.2
	PM <sub>2.5</sub>	1821.0	923.2	702.4	405.3	98.5	11.4
	PM <sub>10</sub>	4920.6	1876.6	1422.6	676.5	161.8	22.4
	PM <sub>tot</sub>	12011.0	1966.0	1439.4	677.0	161.8	22.4

图7给出了不设置低温省煤器和设置低温省煤器时静电除尘器各级电场出口粉尘脱除效率。

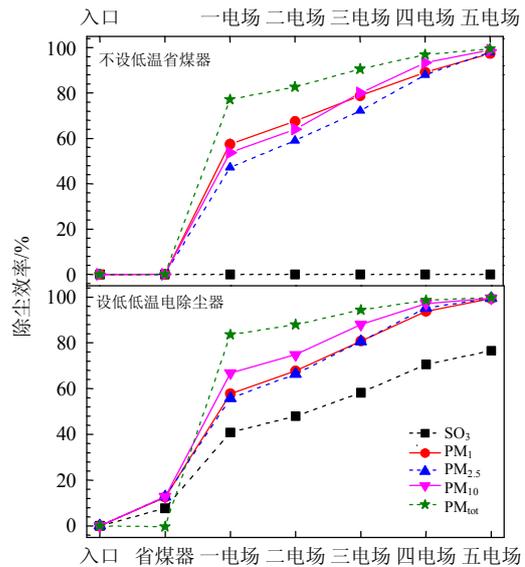


图7 低温省煤器对电除尘器效率的影响

Fig. 7 Effect of the LTE on the collection efficiency of ESP

如图7所示, 在不采用低温省煤器时, PM<sub>2.5</sub>的脱除效率始终低于其他粒径尺度颗粒的脱除效率, PM<sub>1</sub>脱除效率在二电场前高于PM<sub>10</sub>脱除效率, 三电场后低于PM<sub>10</sub>脱除效率; 而增加低温省煤器后, PM<sub>2.5</sub>的脱除效率显著增加, 与PM<sub>1</sub>脱除效率接近, PM<sub>10</sub>的脱除效率也显著增加, 远高于PM<sub>1</sub>的脱除效率。因此, 增加低温省煤器能显著提升PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的脱除效率。

表6详细给出了各级电场的污染物脱除效率和电除尘器的总脱除效率。如表所示, 设置低温省煤器后, PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和总尘的脱除效率分别提高了2.1%、1.7%、0.8%和0.4%, 对SO<sub>3</sub>的脱除效率提高了76.6%。从表6中各级电场除尘效率可以看出, 第一电场对各粒径尺度颗粒脱除效率均高于50%, 尤其是对总尘的脱除效率在设置和不设置低温省煤器时分别可达到77.1%和83.5%, 承担着大

表6 低温省煤器对各级电场效率的影响

Tab. 6 Effect of the LTE on the collection efficiency at various stages of ESP %

项目	一电场	二电场	三电场	四电场	五电场	总效率	
无省煤器	SO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	
	PM <sub>1</sub>	57.46	10.03	11.22	10.50	8.15	97.36
	PM <sub>2.5</sub>	47.17	11.82	13.09	15.86	9.95	97.90
	PM <sub>10</sub>	53.72	10.23	16.04	13.34	5.52	98.85
	PM <sub>tot</sub>	77.12	5.53	7.91	6.30	2.60	99.46
设置省煤器	SO <sub>3</sub>	40.80	7.20	10.18	12.44	5.94	76.56
	PM <sub>1</sub>	57.82	9.99	13.00	12.93	5.69	99.42
	PM <sub>2.5</sub>	55.78	10.58	14.23	14.70	4.35	99.63
	PM <sub>10</sub>	66.76	8.04	13.21	9.12	2.47	99.60
	PM <sub>tot</sub>	83.52	4.41	6.39	4.32	1.17	99.81

部分颗粒的脱除任务。在后面 4 个电场中，对 PM<sub>1</sub>、PM<sub>10</sub> 和总尘脱除效率最高的是第三电场，对 PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>3</sub> 脱除效率最高的是第四电场，这是因为第一电场与后面 4 个电场尺寸不同，颗粒在进入第二电场时粉尘浓度重新分布，随着烟气向下一级电场移动，颗粒逐渐靠近极板，初始时，进入极板附近的颗粒逐渐增多，颗粒捕集效率提高，随着大部分颗粒被捕集，颗粒捕集效率逐渐减小，PM<sub>2.5</sub> 捕集效率最高的时间滞后于其他尺寸颗粒，是因为该范围内颗粒驱进速度小，移动至极板范围内需更长时间。

#### 4 结论

本文基于颗粒群平衡方程和细颗粒动力学模型，提出并构建了一种可预测低低温电除尘器内可凝结颗粒物和可过滤颗粒物团聚、迁移和捕集过程的模型，针对国内某电厂的电除尘器，计算了设置低温省煤器前和后，颗粒物及 SO<sub>3</sub> 的排放浓度和脱除效率，并对比测量结果，得到以下重要结论：

1) 结果表明，在 149℃ 和 98℃ 下，电除尘器出口总尘浓度的计算值与测量值的偏差分别为 4.6% 和 0.2%，在 110℃ 下，电除尘器出口 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的计算值与测量值间的偏差分别为 17.8%、7.3% 和 11.6%。而在 98℃ 下，SO<sub>3</sub> 脱除效率计算值与测量值间的偏差为 6.6%，因此，本模型能较为准确地预测在设置和不设置低温省煤器时电除尘器对颗粒物和 SO<sub>3</sub> 的脱除效率。

2) 在低温省煤器内，烟气温度从 149℃ 降至 98℃，烟气中的 SO<sub>3</sub> 从 24.8mg/m<sup>3</sup> 降低到 5.4mg/m<sup>3</sup>，78.3% 的 SO<sub>3</sub> 凝结并沉积在颗粒表面，其中 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 上沉积的硫酸占总硫酸沉积量的比值分别为 42.2%，72.7% 和 91.3%，可见硫酸液滴更容易富集在 PM<sub>2.5</sub> 上，硫酸的沉积可有效降低电除尘器穿透率。

3) 与常规除尘器相比，低低温电除尘器出口 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和总尘的质量浓度分别下降了 77.7%、73.0%、65.5% 和 65.5%，而 SO<sub>3</sub> 的排放浓度降低了 76.6%，可见，低低温电除尘器可实现颗粒物与 SO<sub>3</sub> 的协同高效脱除。

4) 电除尘器一电场在不设置和设置低温省煤器下可脱除总尘的 77.2% 和 83.5%，对于 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的脱除效率也基本高于 50%，可见第一电场承担着大部分颗粒的脱除任务，本文也给出了后续电场对脱除粉尘的贡献，研究成果可用于指导电除尘器清灰装置的运行。

#### 参考文献

- [1] 史文峥, 杨, 张辉, 等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4308-4318.  
Shi Wenzheng, Yang Mengmeng, Zhang Xuhui, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318(in Chinese).
- [2] Hu Bin, Zhang Lin, Yang Yi, et al. PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> collaborative removal in electrostatic precipitator[J]. Powder Technology, 2017, 318: 484-490.
- [3] 刘含, 袁建国, 祝海, 等. 低低温工况下颗粒凝并机理分析及研究方法初探[J]. 电力与能源, 2015, 36(1): 107-111.  
Liu Hanxiao, Yuan Jianguo, Li Zhuhai, et al. Mechanism analysis and research methods of particle coagulation under low-low temperature condition[J]. Power & Energy, 2015, 36(1): 107-111(in Chinese).
- [4] Qi Liqiang, Yuan Yongtao. Influence of SO<sub>3</sub> in flue gas on electrostatic precipitability of high-alumina coal fly ash from a power plant in China[J]. Powder Technology, 2013, 245: 163-167.
- [5] 张辉. 低低温电除尘器对细颗粒物及三氧化硫的协同脱除研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
Zhang Xuhui. Studies on synergetic removal of fine particulates and SO<sub>3</sub> by an extra cold-side electrostatic precipitator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [6] 靳星. 静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.  
Jin Xing. Research on the capture technology of fine particles in electrostatic precipitator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013(in Chinese).
- [7] Guo Baoyu, Yu Aibing, Guo Jun. Numerical modeling of electrostatic precipitation: effect of Gas temperature[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 77: 102-115.
- [8] Guo Baoyu, Yang Ding, Su Yinbiao, et al. Process modelling of low temperature electrostatic precipitators[J]. Powder Technology, 2017, 314: 567-576.
- [9] 赵海波. 颗粒群平衡模拟的随机模型与燃煤可吸入颗粒物高效脱除的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
Zhao Haibo. Stochastic solution of population balance modeling and the research on high-efficiency removal of particulate matter from coal combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese).
- [10] Marshall J S, Li Shuiqing. Adhesive particle flow: a discrete-element approach[M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [11] 黄. 矿物质对煤粉燃烧颗粒物生成和沉积特性的影响

- 机理[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- Huang Qian. Effect of mineral on the particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [12] 王述浩, 李水清, 段璐, 等. 相变凝聚器内蒸汽凝结与细颗粒团聚规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7230-7236.
- Wang Shuhao, Li Shuiqing, Duan Lu, et al. Study on the coagulation of vapor condensates and fine particulates in a phase-change agglomerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7230-7236(in Chinese).
- [13] Friedlander S K. Smoke, dust, and haze: fundamentals of aerosol dynamics[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2000.
- [14] Takahashi T, Zukeran A, Ehara Y, et al. Influence of re-entrainment phenomena on particle deposit in electrostatic precipitator[J]. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 1999, 119(3): 254-260.
- [15] Pauthenier M, Moreau-Hanot M. La charge des particules sphériques dans un champ ionisé[J]. Journal de Physique, 1932, 3(12): 590-613.
- [16] White H J. Particle charging in electrostatic precipitation [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1951, 70(2): 1186-1191.
- [17] 熊 龙. 增强燃煤电站  $PM_{2.5}$  脱除的湿式电除尘技术基础研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Xiong Guilong. Study on wet electrostatic precipitation technologies for reducing  $PM_{2.5}$  emissions from coal-fired power plants[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015(in Chinese).
- [18] 关振 , 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- Guan Zhenduo, Zhang Zhongtai, Jiao Jinsheng. Physical properties of inorganic materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992(in Chinese).



段璐

在线出版日期: 2020-05-15。

收稿日期: 2019-04-17。

作者简介:

段璐(1987), 女, 工学博士, 理研究员, 主要从事燃煤烟气污染物控制的研究工作, [duan\\_lu@126.com](mailto:duan_lu@126.com);

王述浩(1990), 男, 工学博士, 理研究员, 主要从事燃煤烟气污染物控制的研究工作, [duan\\_lu@126.com](mailto:duan_lu@126.com);

\*通信作者: 李水清(1975), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事细颗粒动力学、燃烧技术与清洁能源利用的研究工作, [lishuiqing@tsinghua.edu.cn](mailto:lishuiqing@tsinghua.edu.cn)。

(责任编辑 王庆霞)

# Study on the Ultralow Cold-side Electrostatic Precipitation for Synergistic Removal of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> by the Population Balance Model

DUAN Lu, WANG Shuhao, LI Shuiqing  
(Tsinghua University)

**KEY WORDS:** cold-side electrostatic precipitator; population balance model; condensable particle; coagulation; nucleation

The ultralow cold-side electrostatic precipitation (ESP) is widely used during the ultralow emission implementation of coal-fired power plants. At the present stage, the empirical models and CFD method play an important role in predicting the collection efficiency of ESP. However, it is still a major challenge to accurately evaluate the removal efficiency of polydispersed fly ash particles by the empirical models and CFD method due to the complex particle transport process inside the ESP. In addition, the nucleation and condensation of SO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at ultralow temperature make it more difficult to predict the mass emissions of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub>.

To resolve the problem, the population balance model (PBM), including sub-models of nucleation of condensable matters and coagulation of fine particulates, is firstly established to elucidate the mechanisms of SO<sub>3</sub> condensation on PM<sub>2.5</sub> surface and their coagulation in a low-temperature economizer before an ESP. Then, we incorporate the particle charging model, the migration velocity formula and the sedimentation model into the PBM framework to predict the migration/removal of particulates in the ESP. By combing them, a computational method for predicting the collection efficiency of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> of this ultralow cold-side ESP is constructed.

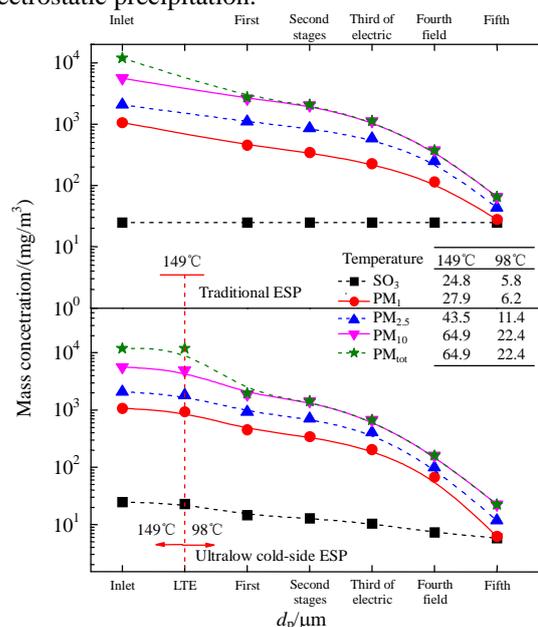
In this paper, the model is used to numerically investigate the mechanism of collaborative removal of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> for an industrial-scale ultralow cold-side ESP in a coal-fired power plant. The computational results are validated by comparing with the experimental data obtained from the third party test and the field test of Tsinghua University. As shown in Tab. 1, the deviation between computational value and experimental data of the total particulate mass emissions at 149°C and 98°C are 4.6% and 0.2%, respectively. The deviation of SO<sub>3</sub> collection efficiency is 6.6%. In addition, the deviations of mass emissions of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> are 17.8%, 7.3% and 11.6%, respectively. Thus, it can be concluded

**Tab. 1 Comparison of the experimental and numerical data of particle concentration at ESP outlet**

Items	total particulate mass emissions/(mg/m <sup>3</sup> )		SO <sub>3</sub> collection efficiency/%
	149°C	98°C	98°C
Experimental	68.1	22.4	71.8
numerical	64.9	22.4	76.5
deviation	4.6	0.2	6.6

that this model is capable of predicting the collection efficiency and the mass emissions of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> for the ultralow cold-side ESP.

As shown in Fig. 1, with the low-temperature economizer, the temperature of flue gas decreases from 149°C to 98°C at the ESP inlet. About 78.3% of SO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> from flue gas condenses and deposits onto the particles, in which 42.2% deposits on PM<sub>1</sub>, 72.7% deposits on PM<sub>2.5</sub> and 91.3% deposits on PM<sub>10</sub> respectively. Therefore, the mass emissions of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> are 11.4 mg/m<sup>3</sup> and 5.8 mg/m<sup>3</sup>, which are lower than conventional ESP by 73% and 76.6%, respectively. The results show a good performance of collaborative removal of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> in the ultralow cold-side electrostatic precipitation.



**Fig. 1 Effect of the temperature on the particle concentration at various stage of ESP**