



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201904120

中图分类号 X505

文献标识码 A

黄怡民. 低低温电除尘技术对  $PM_{2.5}$  及  $SO_3$  的脱除性能[J]. 环境工程学报, 2019, 13(12): 2924-2933.

HUANG Yimin. Removal performance of  $PM_{2.5}$  and  $SO_3$  by low-low temperature electric dust removal technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(12): 2924-2933.

## 低低温电除尘技术对 $PM_{2.5}$ 及 $SO_3$ 的脱除性能

黄怡民\*

重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404000

第一作者: 黄怡民(1986—), 女, 硕士, 讲师。研究方向: 大气化学与大气污染控制。E-mail: [peace101@yeah.net](mailto:peace101@yeah.net)

\*通信作者

**摘要** 为了较全面地表征低低温电除尘技术的污染物减排特性, 采用实验室研究及工程实测相结合的手段, 对低低温电除尘器的  $PM_{2.5}$  及  $SO_3$  减排情况进行测试。实验研究发现, 当烟气温度从 100 °C 降低至 90 °C 时, 不同工况下电除尘器对 TSP 脱除的提效幅度分别为 54.78%、54.42%,  $PM_{2.5}$  脱除的提效幅度分别为 43.44%、42.37%,  $SO_3$  脱除的提效幅度分别为 88.92%、84.17%, 且细颗粒物存在明显的团聚现象; 工程实测发现, 低低温电除尘器对 TSP、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_3$  脱除的提效幅度分别为 36.54%~42.86%、14.29%~37.93%、73.30%~86.46%, 提效规律与实验室实验一致。通过分析可知, 低低温电除尘技术对  $PM_{2.5}$  及  $SO_3$  均具有较好的脱除效果, 为该技术的大规模推广应用提供了借鉴。

**关键词** 燃煤电厂; 低低温电除尘器;  $PM_{2.5}$ ;  $SO_3$

我国燃煤电厂烟气超低排放已全面实施<sup>[1-5]</sup>, 要求颗粒排放限值为  $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  或  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 钢厂、水泥厂等也纷纷效仿燃煤电厂, 开始实施超低排放。

常规电除尘技术具有细颗粒荷电不充分、高比电阻反电晕和二次扬尘的技术瓶颈<sup>[6]</sup>, 当遇到高比电阻粉尘时, 电除尘器出口颗粒物浓度甚至很难低于  $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。低低温电除尘技术最早应用于日本, 通过控制电除尘器入口烟气温度在 90 °C 左右来实现电除尘效率的有效提升<sup>[7-8]</sup>。国内相关学者也对该技术开展了相关研究, 郦建国等<sup>[9]</sup>和赵海宝等<sup>[10]</sup>归纳了低低温电除尘技术的发展及技术特点, 并对该技术的核心问题及对策措施进行了探讨, 为我国燃煤电厂低低温电除尘技术的应用和发展提供了参考, 但这些研究主要针对国外文献的综述, 未涉及相关实验的研究; 叶兴联等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法, 研究了低低温电除尘器的流场参数, 并对其烟道布置型式进行了优化设计, 但未涉及污染物减排特性。寿春晖等<sup>[12]</sup>对某 1 000 MW 机组低低温电除尘器的颗粒物脱除特性进行了实验研究, 初步探寻了低低温状态下烟温与除尘效果的关系, 研究了低低温电除尘器对各级粒径颗粒物的脱除效果及对主要成灰元素的捕集情况, 但未涉及细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 及  $SO_3$  脱除性能。刘含笑等<sup>[13]</sup>对国内近 200 种煤种的灰硫比进行了计算分析, 发现绝大部分煤种的灰硫比均大于 100, 同时, 采用低低温电除尘技术不发生低温腐蚀风险, 并对污染物减排特性进行了初步探讨, 但对细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 及  $SO_3$  脱除性能的描述较少。

收稿日期: 2019-04-18; 录用日期: 2019-05-23

基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目 (cstc2018jcyjA1711)

针对上述问题, 本研究通过实验室研究及工程实测相结合的手段, 旨在对低低温电除尘技术的 $PM_{2.5}$ 及 $SO_3$ 的减排特性进行较全面的表征, 为该技术的大规模推广应用提供参考。

## 1 实验室研究

### 1.1 实验系统及工况

如图 1 所示, 实验系统主要包括燃油热风炉、加灰系统(储料仓泵、射流器等)、混流装置、加 $SO_x$ 系统( $SO_2$ 、 $SO_3$ )、烟温调节装置、单室五电场电除尘器、风机等。实验系统设计流量为 $1\ 000\ m^3\cdot h^{-1}$ (燃油热风炉出口), 加料系统所采用的原料为电厂的燃煤飞灰, 可通过调整加料系统的加料量来控制电除尘器入口的烟尘浓度, 最高可实现 $40\ g\cdot m^{-3}$ 的给料量, 实验时分别调整其浓度在 $40\ g\cdot m^{-3}$ 和 $10\ g\cdot m^{-3}$ 左右; 加 $SO_3$ 系统可通过调整阀门开度, 浓度最高为 $50\ g\cdot m^{-3}$ , 实验时分别调整其浓度为 $50$ 、 $30$ 、 $10\ mg\cdot m^{-3}$ 左右; 烟温调节装置可通过调整冷却水的流量来控制电除尘器入口的烟气温度, 实验时分别调整其温度为 $130$ 、 $100$ 、 $90$ 和 $80\ ^\circ C$ 。

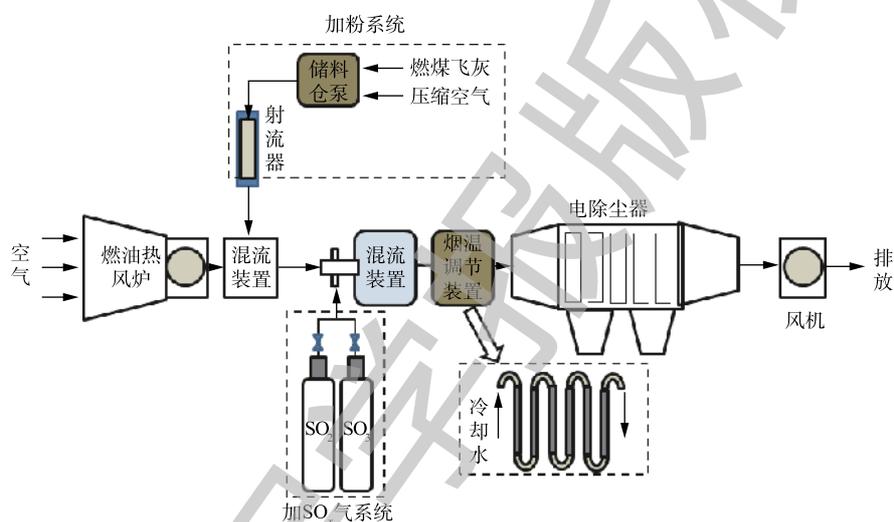
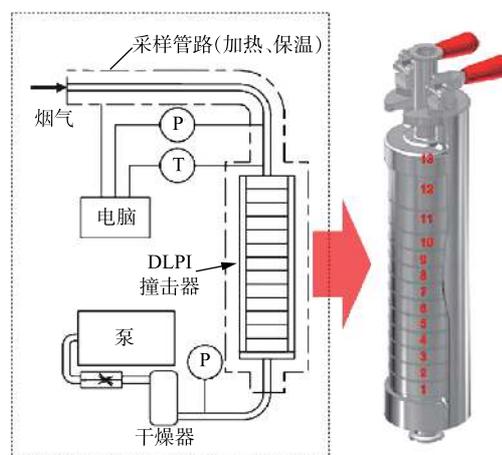


图 1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

### 1.2 实验方法

颗粒物及 $PM_{2.5}$ 测试方法参照 ISO 23210-2009 的相关要求, 采用低压撞击器(DLPI)采样系统进行采样, 采样系统如图 2 所示。采样时, 采样枪须进行加热、保温, 温度宜控制在 $(160\pm 5)\ ^\circ C$ , 根据采样流量和烟气流速, 选取合适的采样头直径, 以实现等速取样。泵采样烟气流量约为 $10\ L\cdot min^{-1}$ , 烟气通过加热的 DLPI 撞击器进行粒径分级, DLPI 撞击器加热温度约 $120\ ^\circ C$ 。DLPI 撞击器共分为 13 级, 各级的累计测试结果为颗粒物的总质量(TSP), 另外 12 级可分别测定 $PM_{10}$ (1~12 级)、 $PM_{2.5}$ (1~9 级)、 $PM_1$ (1~7 级)。电除尘器进口采样时, 须



注: P—压力计; T—温度计。

图 2 DLPI 采样系统

Fig. 2 Sampling system of DLPI

在DLPI前增设1个旋风分离器,测定TSP时,须用去离子水对旋风内壁进行清洗,并烘干后计入样品总重。

在SO<sub>3</sub>测试方面,采用GB/T 21508-2008所规定的控制冷凝法,SO<sub>3</sub>采样系统如图3所示。水浴温度为65℃,石英管采样枪加热温度为300℃,抽气流量为20 L·min<sup>-1</sup>,采样结束后,用80%异丙醇溶液清洗蛇形盘管,硫酸根离子的滴定采用哈希DR 6000紫外-可见分光光度计。

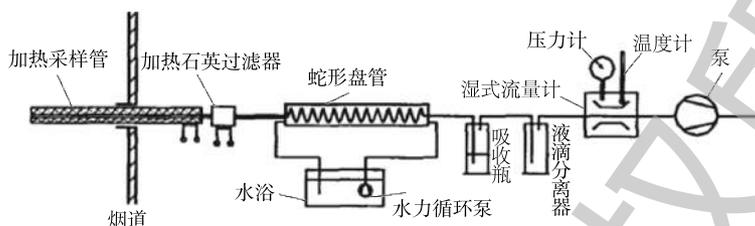


图3 SO<sub>3</sub>采样系统

Fig. 3 SO<sub>3</sub> sampling system

### 1.3 实验结果及分析

1) 总尘(TSP)。调整实验系统SO<sub>3</sub>浓度为50 mg·m<sup>-3</sup>,分别在TSP为40 g·m<sup>-3</sup>和10 g·m<sup>-3</sup>左右时,测定不同电除尘器入口烟气温度时除尘效率,结果如图4所示。随着电除尘器入口烟气温度的降低,电除尘效率逐渐提高,这是因为烟温降低后,烟气量下降,电除尘器的比集尘面积增加,且击穿电压提高、粉尘工况比电阻降低等<sup>[13]</sup>,这些因素均可提高电除尘器的除尘效率。当TSP为40 g·m<sup>-3</sup>左右,电除尘器入口烟气温度分别为130、100、90、80℃时,电除尘器的除尘效率分别为99.92%、99.93%、99.97%、99.98%;当TSP为10 g·m<sup>-3</sup>左右,电除尘器入口烟气温度分别为130、100、90、80℃时,电除尘器的除尘效率分别为99.88%、99.89%、99.94%、99.96%。烟气温度从100℃降低至90℃时,电除尘器的除尘效率增加幅度最为明显,2种工况(TSP为40 g·m<sup>-3</sup>和10 g·m<sup>-3</sup>左右)条件下,提效幅度分别为54.78%、50.42%,这是因为这个温度区间内存在烟气的酸露点,当烟气温度降至酸露点以下后,气态的SO<sub>3</sub>会以硫酸雾滴的形式存在,此时对烟气特性及粉尘性质的改善最为明显。相关研究表明,烟气温度在酸露点前后,粉尘的工况比电阻可降低1~3个数量级<sup>[14-15]</sup>。

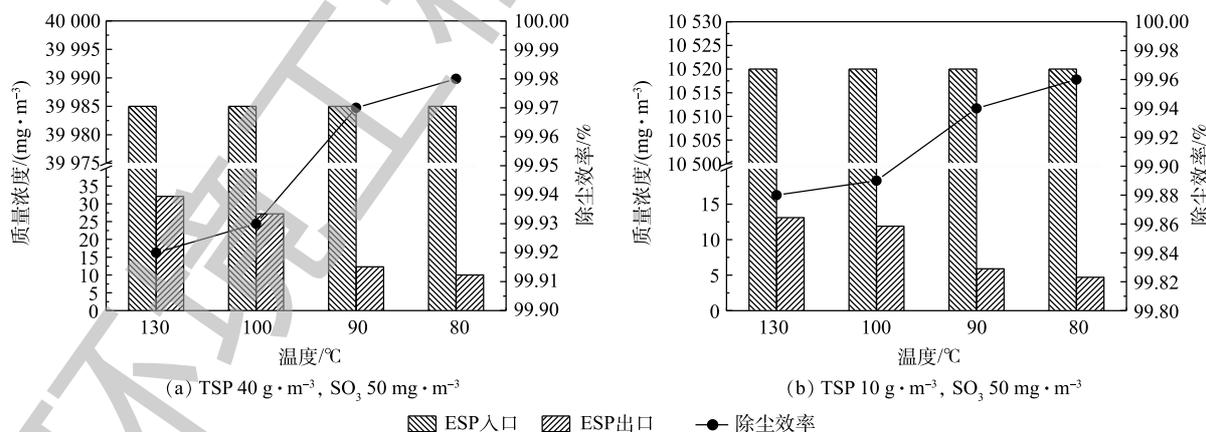


图4 不同温度的除尘效率

Fig. 4 Dust removal efficiency at different temperatures

为进一步研究SO<sub>3</sub>冷凝对电除尘提效的影响,调整实验系统TSP为40 g·m<sup>-3</sup>左右,分别在不同SO<sub>3</sub>浓度,测定100℃和90℃时电除尘器出口TSP浓度及提效幅度,测试结果如图5所示。当

SO<sub>3</sub> 浓度分别为 50、30、10 和 0 mg·m<sup>-3</sup> 时，降温前后低低温电除尘器的提效幅度分别为 54.78%、44.77%、39.07% 和 24.73%，电除尘器的提效幅度与 SO<sub>3</sub> 浓度正相关。这是因为 SO<sub>3</sub> 本身就是一种烟气调质剂<sup>[16]</sup>，尤其当烟气温度低于酸露点温度以后，冷凝后的硫酸雾会大幅改善烟气特性及粉尘性质，从而有效提高电除尘器的除尘效率，且烟气中 SO<sub>3</sub> 浓度越高，其对粉尘性质的改善作用即调质作用越显著。当烟气中不含 SO<sub>3</sub> 时，降温提效则仅依赖于烟气温度，降低后烟气量减少，击穿电压升高<sup>[13]</sup> 等。

2) 粒径分布及 PM<sub>2.5</sub>。调整实验系统 SO<sub>3</sub>

浓度为 50 mg·m<sup>-3</sup>，TSP 为 40 g·m<sup>-3</sup> 和 10 g·m<sup>-3</sup> 左右时，测定不同电除尘器入口烟气温度时 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率，结果如图 6 所示。电除尘器入口烟气温度分别为 130、100、90、80 °C 时，TSP 为 40 g·m<sup>-3</sup> 左右，电除尘器对 PM<sub>2.5</sub> 的除尘效率分别为 93.16%、94.08%、96.65%、97.38%；TSP 为 10 g·m<sup>-3</sup> 左右，电除尘器对 PM<sub>2.5</sub> 的除尘效率分别为 92.78%、93.69%、96.36%、97.22%。随着电除尘器进口烟气温度的降低，PM<sub>2.5</sub> 脱除效率逐渐提高，这与 TSP 的减排规律是一致的。烟气温度从 100 °C 降低至 90 °C 时，电除尘器的 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率增加幅度最为明显，2 种工况条件下提效幅度分别为 43.44%、42.37%，较总尘的提效幅度略微低一些。电除尘器对 PM<sub>2.5</sub> 的提效幅度随着 SO<sub>3</sub> 浓度的增加而提高，如图 7 所示，当 TSP 为 40 g·m<sup>-3</sup> 左右时，烟温调节装置入口 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为 206.07 mg·m<sup>-3</sup>；当 SO<sub>3</sub> 浓度分别为 50、30、10、0 mg·m<sup>-3</sup> 时，降温前后低低温电除尘器对 PM<sub>2.5</sub> 的提效幅度分别为 43.44%、41.49%、37.18%、27.19%。

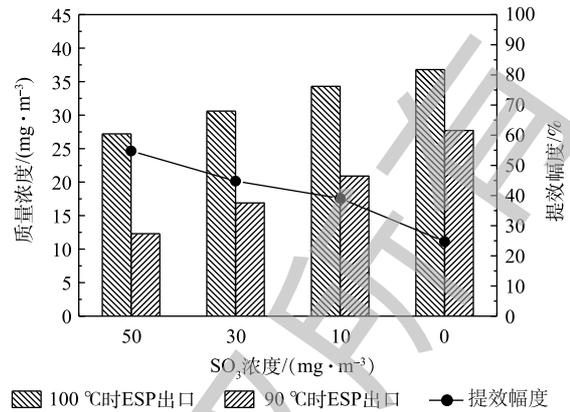


图 5 不同 SO<sub>3</sub> 浓度时电除尘提效幅度测试结果

Fig. 5 The improvement of electric dust removal at different SO<sub>3</sub> concentration

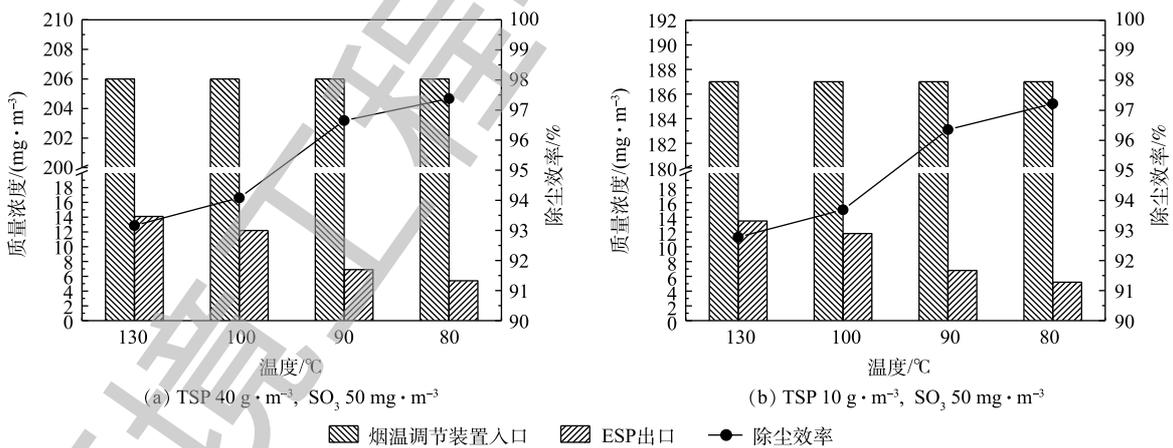


图 6 不同温度时 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率测试结果

Fig. 6 PM<sub>2.5</sub> removal efficiency at different temperatures

为进一步研究烟气降温的电除尘提效机制，采用 DLPI，在 SO<sub>3</sub> 浓度为 50 mg·m<sup>-3</sup>、TSP 为 40 g·m<sup>-3</sup> 左右时，测定不同烟气温度时的烟气调节装置出口的粒径分布，测试结果如图 8 所示。当烟气温度从 100 °C 降至 90 °C 时，烟气调节装置出口的小粒径段颗粒物明显减少，而大粒径段颗粒物有所增加，推测引起上述粒径变化的主要原因是，烟气温度降至酸露点以下，硫酸雾对粉尘性

质,尤其是表面黏性进行改善,有效促进了细颗粒团聚。刘含笑等<sup>[17]</sup>曾预测了 $\text{SO}_3$ 促进细颗粒团聚的机制,但尚未得到实验观测结果的验证。史文峥等<sup>[18]</sup>指出, $\text{SO}_3$ 冷凝对小粒径范围的颗粒团聚尤为明显,但该规律是通过理论计算得到的。GUO等<sup>[19]</sup>使用FESEM电镜扫描技术观测了化学团聚前后的粉煤灰颗粒变化,有效验证了理论推断和计算规律。为证实 $\text{SO}_3$ 冷凝对细颗粒团聚促进作用的推断,采用电镜扫描对采样进行观测分析,结果如图9所示,130℃时颗粒分布较为分散,单个颗粒也较光滑,而90℃时颗粒物聚集较多,且多见到大颗粒表面黏附到小颗粒。

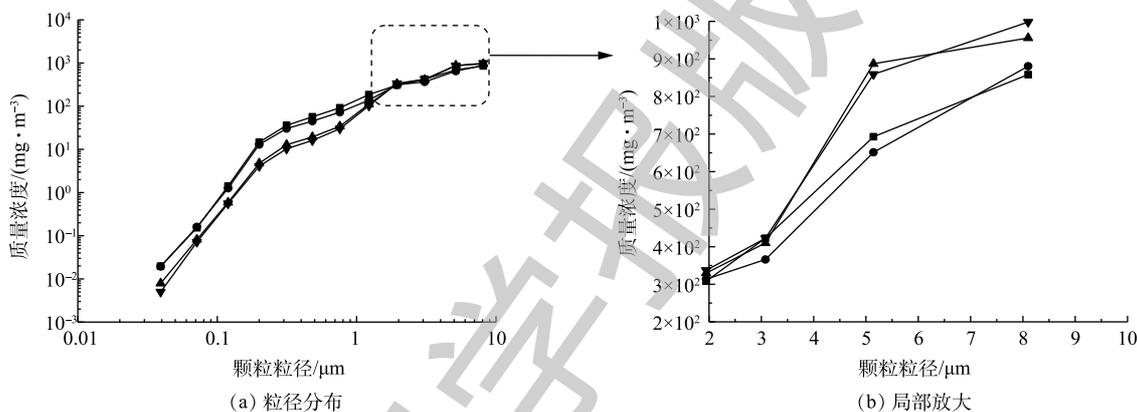


图8 不同温度时粒径分布测试结果

Fig. 8 Particle size distribution test results at different temperatures

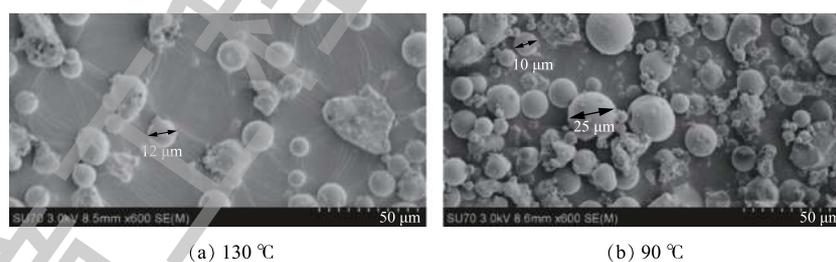


图9 电镜扫描图

Fig. 9 SEM images

3)  $\text{SO}_3$  浓度。调整实验系统  $\text{SO}_3$  浓度为  $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , TSP 分别为  $40$ 、 $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右时,测定不同电除尘器入口烟气温度的  $\text{SO}_3$  脱除效率,结果如图10所示。电除尘器入口烟气温度分别为130、100、90、80℃时,TSP为 $40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,电除尘器对 $\text{SO}_3$ 的脱除效率分别为10.64%、16.97%、90.79%、93.46%;TSP为 $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,电除尘器对 $\text{SO}_3$ 的脱除效率分别为6.54%、10.84%、85.89%、89.37%。130、100℃时电除尘器对 $\text{SO}_3$ 的脱除效率有限,仅有10%左右,烟气温度从100℃降低至90℃时,电除尘器的 $\text{SO}_3$ 脱除效率增加幅度最为明显,2种工况条件下提效幅度分别为88.92%、84.17%。当电除尘器入口烟气温度为90℃时,不同 $\text{SO}_3$ 浓度对应的 $\text{SO}_3$ 脱除效率测试结

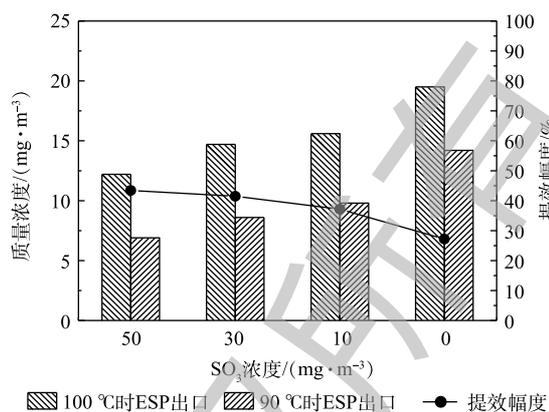


图7 不同 $\text{SO}_3$ 浓度时电除尘提效幅度

Fig. 7 Improvement of electric dust removal at different  $\text{SO}_3$  concentration

果如图 11 所示，入口 SO<sub>3</sub> 浓度越高，所对应的 SO<sub>3</sub> 脱除效率越高，且在相同的 SO<sub>3</sub> 浓度时，TSP 浓度越高，粉尘对冷凝后的硫酸雾吸附就越完全，对应的 SO<sub>3</sub> 脱除效率越高。为了进一步验证粉尘对冷凝后硫酸雾的吸附作用，采用 792 Basic IC 离子色谱仪测定电除尘器入口烟气温度分别为 130、90 °C 时电除尘器收集飞灰样品中的硫酸根含量，测定结果如图 12 所示，降温前后飞灰样品中硫元素质量分数明显增加，且 SO<sub>3</sub> 浓度越高，飞灰样品中硫元素质量分数增幅越显著。

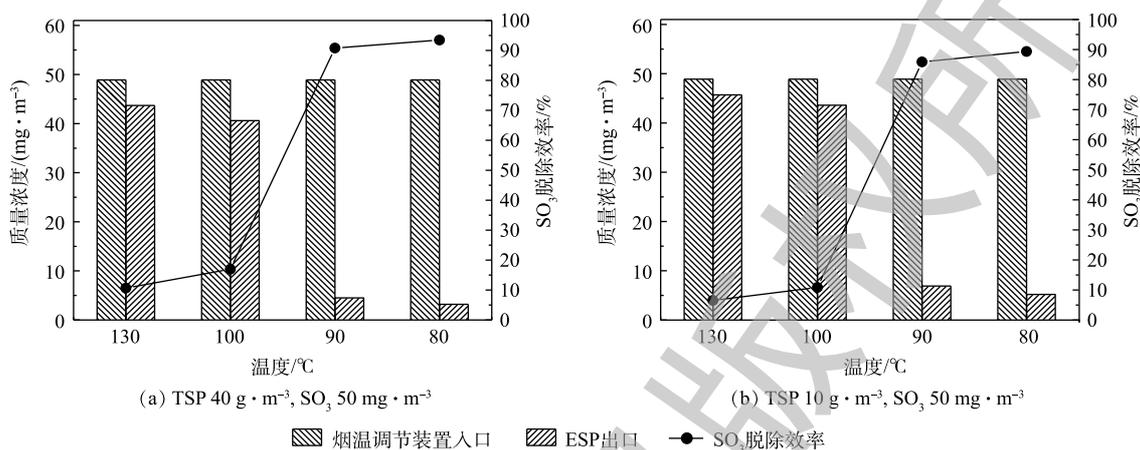


图 10 不同温度时 SO<sub>3</sub> 脱除效率测试结果

Fig. 10 SO<sub>3</sub> removal efficiency at different temperatures

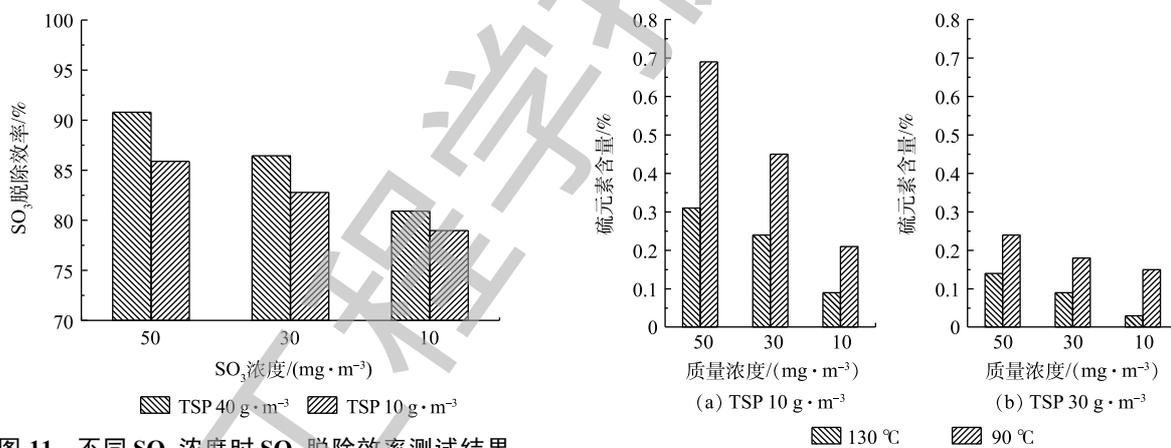


图 11 不同 SO<sub>3</sub> 浓度时 SO<sub>3</sub> 脱除效率测试结果

Fig. 11 SO<sub>3</sub> removal efficiency at different SO<sub>3</sub> concentrations

图 12 飞灰样品中硫元素质量分数

Fig. 12 Sulfur content in the fly ash samples

## 2 应用效果

针对 A 电厂 600 MW 机组、B 电厂 600 MW 机组、C 电厂 1 000 MW 机组配套的低低温电除尘器，开展现场测试研究，3 个项目的烟气参数、煤种成分分析、飞灰成分分析结果如表 1~表 3 所示，所烧煤种均为低硫煤(≤1%)，对应的烟气治理技术路线如图 13 所示。

颗粒物及 PM<sub>2.5</sub> 测试方法参照 ISO 23210-2009 的相关要求，采用低压撞击器 (DLPI) 进行实测，TSP 及 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率测试结果如图 14 所示。对于 A 电厂，烟温降低前后，TSP 脱除效率分别为 99.85%、99.91%，提效幅度达 40.11%，PM<sub>2.5</sub> 脱除效率分别为 97.03%、98.15%，提效幅度达 37.93%。对于 B 电厂，烟温降低前后，TSP 脱除效率分别为 99.93%、99.96%，提效幅度达 36.54%，PM<sub>2.5</sub> 脱除效率分别为 97.52%、98.22%，提效幅度达 28.13%。对于 C 电厂，烟温降低前后，TSP 脱除效率

表1 烟气参数  
Table 1 Flue gas parameters

项目	机组/MW	烟气量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	入口烟尘浓度/(g·m <sup>-3</sup> )	入口烟气温度/°C
A电厂	600	2 624 800	12.68	90
B电厂	600	2 096 700	29.67	88.5
C电厂	1 000	8 029 700	10.74	90

表2 煤种成分分析  
Table 2 Analysis of coal composition

项目	水分/%	灰分/%	硫分/%	低位发热量/(kJ·g <sup>-1</sup> )
A电厂	20.1	10.1	0.45	20.9
B电厂	9.8	16.8	0.53	18.5
C电厂	15.7	6.5	0.81	24.8

表3 飞灰成分分析  
Table 3 Analysis of fly ash composition %

项目	氧化硅	氧化铝	氧化钠	氧化钾	氧化钙
A电厂	44.6	26.5	2.87	0.43	10.4
B电厂	51.9	17.9	0.65	0.35	6.5
C电厂	39.7	29.5	0.71	0.68	7.2

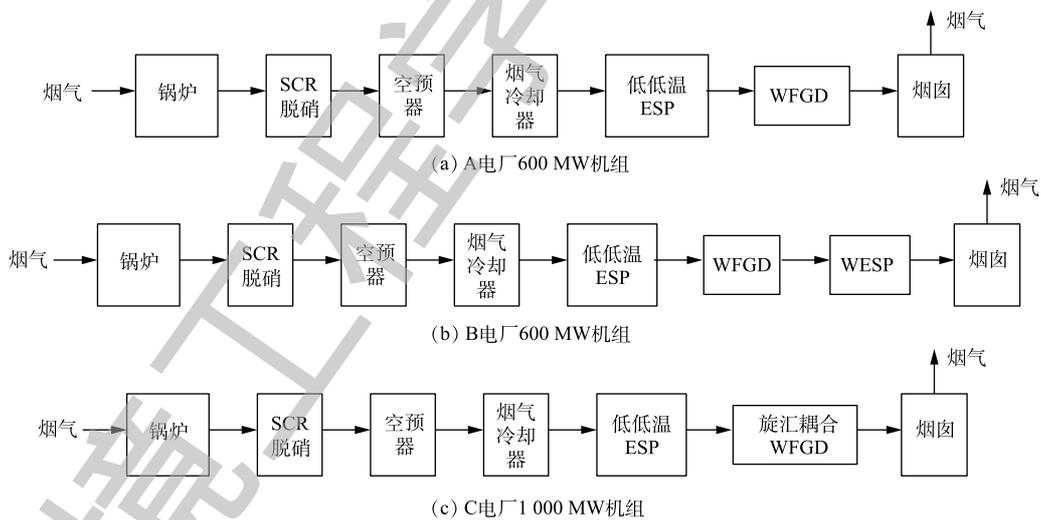


图13 烟气治理技术路线

Fig. 13 Flue gas treatment technology

分别为99.88%、99.93%，提效幅度达42.86%，PM<sub>2.5</sub>脱除效率分别为97.49%、97.84%，提效幅度达14.29%。TSP及PM<sub>2.5</sub>的提效规律与前文实验一致，但提效幅度的绝对值较实验值略小。

SO<sub>3</sub>采用GB/T 21508-2008规定的控制冷凝法进行实测，各测点SO<sub>3</sub>测试结果如图15所示。烟气经过SCR后，SO<sub>3</sub>均有所增加，这是因为SCR脱硝的催化剂在催化氧化NO<sub>x</sub>的同时，也会将一部分SO<sub>2</sub>氧化为SO<sub>3</sub>。催化剂厂家为控制SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>转化率，一般会降低配方中V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的含量<sup>[20]</sup>，目

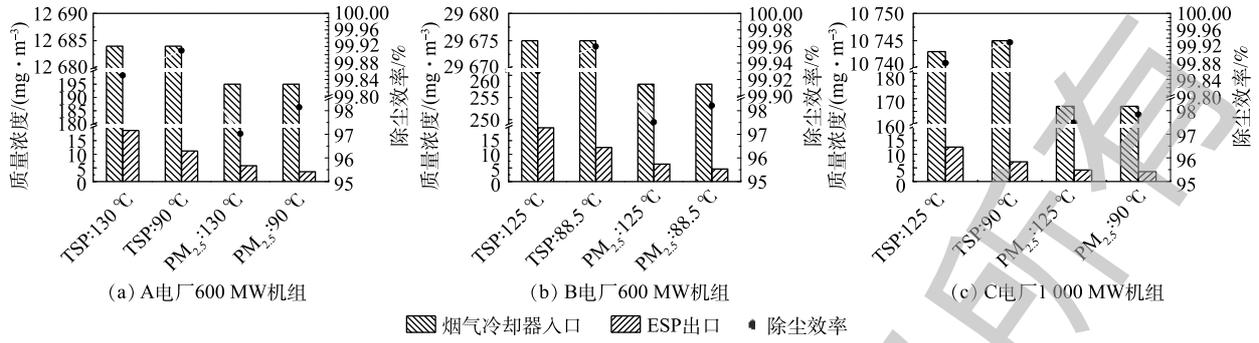


图 14 TSP 及 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率

Fig. 14 TSP and PM<sub>2.5</sub> removal efficiency

前，超低排放机组对 SCR 脱硝的 SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率一般要求 ≤1%。烟温降低前后，A 电厂低低温电除尘系统对 SO<sub>3</sub> 的脱除效率分别为 14.56%、77.18%；B 电厂低低温电除尘系统对 SO<sub>3</sub> 的脱除效率分别为 25.00%、84.06%；C 电厂低低温电除尘系统对 SO<sub>3</sub> 的脱除效率分别为 32.05%、90.80%，3 个机组的低低温电除尘系统对 SO<sub>3</sub> 的减排幅度分别为 73.30%、78.74%、86.46%。SO<sub>3</sub> 的减排规律与前文实验一致，但同样减排幅度的绝对值也较实验值略小。另外，不难发现，湿法脱硫及湿式电除尘器对 SO<sub>3</sub> 也有一定的脱除效果，A 电厂湿法脱硫对 SO<sub>3</sub> 脱除效率分别为 44.89%、44.68%；B 电厂湿法脱硫对 SO<sub>3</sub> 脱除效率分别为 34.78%、18.18%，湿式电除尘器对 SO<sub>3</sub> 脱除效率分别为 72.59%、66.67%，SO<sub>3</sub> 在湿式电除尘器中以硫酸气溶胶颗粒的形式存在，而湿式电除尘器对细颗粒物具有较高的脱除效率<sup>[21]</sup>。

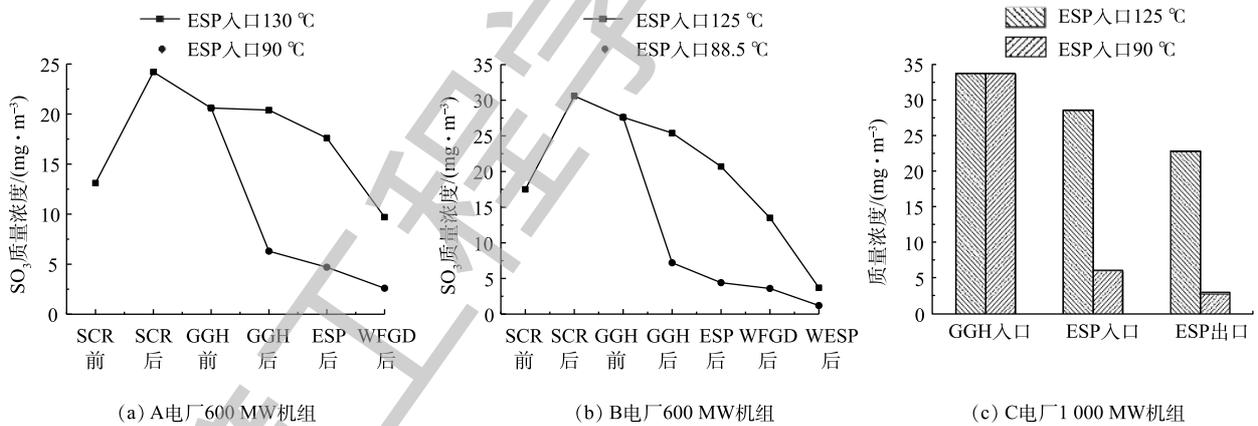


图 15 各测点 SO<sub>3</sub> 测试结果

Fig. 15 Test results of SO<sub>3</sub> at each measuring point

### 3 结论

1) 通过开展实验室实验，发现 SO<sub>3</sub> 浓度为 50 mg·m<sup>-3</sup>，TSP 分别为 40、10 g·m<sup>-3</sup> 左右时，电除尘器入口烟气温从 100 °C 降低至 90 °C，电除尘器的除尘效率增加幅度分别为 54.78%、54.42%，PM<sub>2.5</sub> 提效幅度分别为 43.44%、42.37%，且 TSP 和 PM<sub>2.5</sub> 的提效幅度均与 SO<sub>3</sub> 浓度正相关；烟气温降至酸露点以下，细颗粒物存在明显的团聚现象；在 90 °C 时，2 种工况条件下电除尘器对 SO<sub>3</sub> 脱除效率分别为 90.79%、85.89%，与 100 °C 相比，电除尘器的 SO<sub>3</sub> 提效幅度分别为 88.92%、84.17%。

2) 通过3个工程项目的现场实测,进一步验证了低低温电除尘器对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{SO}_3$ 的脱除性能。低低温电除尘器对TSP和 $\text{PM}_{2.5}$ 的提效幅度分别为40.11%、36.54%、42.86%、37.93%、28.13%、14.29%,对 $\text{SO}_3$ 的减排幅度分别为73.30%、78.74%、86.46%,减排规律与前文实验一致,但减排幅度的绝对值较实验值略小。

## 参考文献

- [1] 全国电力企业联合会规划发展部. 中国电力工业统计快报(2017年)[EB/OL].[2019-04-15]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180207/879486.shtml>.
- [2] 王树民, 张翼, 刘吉臻. 燃煤电厂细颗粒物控制技术集成应用及“近零排放”特性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(9): 1256-1263.
- [3] 闫克平, 李树然, 郑钦臻, 等. 电除尘技术发展与应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 476-487.
- [4] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某1 000 MW燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [5] 郦建国, 朱法华, 孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 2-10.
- [6] 中国环境保护产业协会. 电除尘器选型设计指导书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [7] 藤岛英胜, 土屋喜重, 西田定二, 等. 低低温EP適用による石炭火力用排煙処理システムの合理化設計[J]. 三菱重工技報, 1994, 31(4): 247-251.
- [8] TOSHIAKI M, YOSHIHIKO M. Recent application and running cost of moving electrode type electrostatic precipitator[C]//ISESP. 11th International Conference on Electrostatic Precipitation, 2008: 518-522.
- [9] 郦建国, 郦祝海, 何毓忠, 等. 低低温电除尘技术的研究及应用[J]. 中国环保产业, 2014(3): 28-34.
- [10] 赵海宝, 郦建国, 何毓忠, 等. 低低温关键技术研究与应用[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 117-120.
- [11] 叶兴联, 李立锋, 章华熔, 等. 低低温电除尘器烟风道流线型设计与分析[J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3274-3280.
- [12] 寿春晖, 祁志福, 谢尉扬, 等. 低低温电除尘器颗粒物脱除特性的工程应用试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4326-4332.
- [13] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 低低温电除尘技术适用性及污染物减排特性研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(8): 650-657.
- [14] 张绪辉. 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.
- [15] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 低低温条件下飞灰工况比电阻特性[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 125-128.
- [16] 李谢玲. 燃煤机组中烟气调质对电除尘效率影响分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 314-317.
- [17] 刘含笑, 郦建国, 姚宇平, 等. 电除尘器飞灰粒径表征及细颗粒降温团聚[J]. 化工进展, 2018, 37(6): 2413-2425.

- [18] 史文峥, 杨萌萌, 张绪辉, 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.
- [19] GUO Y Q, ZHANG J Y, ZHAO Y C, et al. Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas: Experimental evaluation[J]. *Fuel*, 2017, 203: 557-569.
- [20] 崔晶, 黄华存, 董文华, 等. F掺杂改性及其制备方法优化对V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>催化剂低温SCR脱硝性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(11): 3139-3152.
- [21] YANG Z D, ZHENG C H, ZHANG X F, et al. Sulfuric acid aerosol formation and collection by corona discharge in a wet electrostatic precipitator[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(8): 8400-8406.

(本文编辑: 王萌萌, 郑晓梅, 张利田)

## Removal performance of PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> by low-low temperature electric dust removal technology

HUANG Yimin\*

College of Environmental and Chemistry Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China

\*Corresponding author, E-mail: peace101@yeah.net

**Abstract** In order to get more comprehensive pollutant emission reduction characteristics of the low-low temperature electric technology, PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> emission reduction of the low-low temperature electrostatic precipitator(LL-ESP) was measured through lab and field tests. The results of lab experiments showed that when the flue gas temperature reduced from 100 °C to 90 °C, the removal efficiency improvements for TSP were 54.78%, 54.42%, for PM<sub>2.5</sub> were 43.44%, 42.37% and for SO<sub>3</sub> were 88.92%, 84.17% under different working conditions of electric dust collector, respectively, an obvious agglomeration phenomenon occurred for fine particles. Field tests indicated that the removal efficiency improvements for TSP, PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> were 36.54%~42.86%, 14.29%~37.93%, 73.30%~86.46%, respectively, which was consistent with the results of the lab experiments. Based on above analysis, LL-ESP had good performance on PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>3</sub> removal, this can provide reference on the large-scale generalization and application of LL-ESP technology.

**Keywords** coal-fired power plant; low-low temperature electrostatic precipitator (LL-ESP); PM<sub>2.5</sub>; SO<sub>3</sub>