

文章编号: 1003-9015(2021)02-0363-09

燃煤机组脱硫双塔及相关系统颗粒物脱除特征

廖永进¹, 杨富鑫², 冯鹏², 李正鸿², 刘鹤欣², 谭厚章², 陈志伟¹, 顾红柏¹

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了探究装配双级脱硫塔的燃煤机组对颗粒物脱除特性的问题, 通过低压撞击器颗粒物取样系统对西安某300 MW机组双级串联湿法脱硫塔及相关污染物控制设备进出口颗粒物现场采样, 并搭建滤膜取样系统, 收集脱硫塔进出口处的颗粒物进行水溶性离子分析。结果表明: 双级脱硫塔对PM₁₀的总脱除效率为60.3%, PM₁的质量浓度未出现逆增长现象, 脱硫出口处PM₁₀水溶性离子中SO₄²⁻、Cl⁻、Mg²⁺含量增加; 选择性催化还原装置会使得PM₁的质量浓度增加24.7%; 静电除尘器对PM_{2.5-10}、PM_{1-2.5}、PM₁的脱除效率分别为98.6%、98.3%、95.7%; 湿式静电除尘器对各级颗粒物脱除效率均达到60%以上。70%负荷下, 该机组排放的PM₁₀质量浓度为2.89 mg·m⁻³, 排放因子为0.049 kg·t⁻¹。

关键词: 燃煤机组; 脱硫塔; 脱除特征; 水溶性离子; 排放因子

中图分类号: X 701

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1003-9015.2021.02.022

Characteristics of particulate matter removal in two-stage WFGD and related systems of a coal-fired power plant

LIAO Yong-jin¹, YANG Fu-xin², FENG Peng², LI Zheng-hong²,
LIU He-xin², TAN Hou-zhang², CHEN Zhi-wei¹, GU Hong-bai¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;
2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of particulate matter (PM) removal during two-stage flue gas desulfurization, a Dekati low pressure impactor was used to determine PM concentration at the inlet and outlet of each air pollutant control device of a 300 MW power plant in Xi'an. A sampling system was set up at the inlet and outlet of the desulfurization system for collecting particles to analyze water-soluble ions. The results show that the PM₁₀ removal efficiency in the desulfurization system is 60.3%, and the mass concentration of PM₁ does not show the reverse growth phenomenon. The water-soluble ion contents of SO₄²⁻, Cl⁻ and Mg²⁺ in PM₁₀ increased at the outlet of the desulfurization system. The mass concentrations of PM₁ increased by 24.7% in the selective catalytic reduction system. The removal efficiencies of electrostatic precipitator for PM_{2.5-10}, PM_{1-2.5} and PM₁ were 98.6%, 98.3% and 95.7%, respectively. The removal efficiency of wet electrostatic precipitator was over 60%. The mass concentration of PM emission was 2.89 mg·m⁻³ and the emission factor was 0.049 kg·t⁻¹ under 70% load.

Key words: coal-fired power plant; wet flue gas desulfurization; removal characteristic; water-soluble ions; emission factor

1 前言

燃煤电厂是我国大气颗粒物(particulate matter, PM)的主要来源之一。大气中的可吸入颗粒物、可入肺颗粒物会引起人体呼吸、神经、心血管等系统疾病^[1-3]。为了改善我国大气环境现状, 国家发改委、环

收稿日期: 2020-04-29; 修订日期: 2020-08-11。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0600605)。

作者简介: 廖永进(1971-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 硕士。通信联系人: 谭厚章, E-mail: hzt@mail.xjtu.edu.cn

境保护部、能源局联合印发节能减排改造方案^[4-5], 促使燃煤电厂对原有选择性催化还原装置(selective catalytic reduction, SCR)、静电除尘器(electrostatic precipitator, ESP)、双级串联湿法脱硫塔工艺(two-stage wet flue gas desulfurization, WFGD)进行改造并在脱硫装置后增设湿式静电除尘器(wet electrostatic precipitator, WESP)或将单级脱硫塔升级为双级脱硫塔, 改善燃煤电厂烟气颗粒物的排放情况。

众多学者对改造后污染物控制设备脱除颗粒物的效果展开了研究。Liu 等^[6]研究发现, SCR 对超细颗粒物 PM_{0.1-0.3} 脱除效果很差, 甚至会导致其质量浓度增加; 闫克平等^[7]研究发现颗粒物比电阻、高压电源、ESP 本体选型等因素均会影响 ESP 的脱除效果, 需要多方面优化实现超低排放; Xu 等^[8]对 300 MW 机组 WESP 进行了现场采样, 发现不同粒径段颗粒物脱除效率均在 70% 以上。WFGD 位于烟气处理流程尾部, 对控制污染物的排放起到至关重要的作用。然而单级 WFGD 装置对 PM₁ 的脱除效果一般, 由于烟气夹带浆液甚至发生了 PM₁ 质量浓度逆增长现象^[9-11]。Meij 等^[12]测得 WFGD 对颗粒物脱除效率约为 90%, 但脱硫出口处的颗粒物中包含 10% 的石膏颗粒以及脱硫浆液蒸发析出的化合物。张周红等^[13]对超低排放燃煤机组 WFGD 进出口 PM_{2.5} 样品进行水溶性离子分析, 发现 PM_{2.5} 中的 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 Ca²⁺ 等含量明显增加。双级串联双循环脱硫工艺对颗粒物的脱除效果与单级 WFGD 有着较为明显的区别。邓建国等^[14]针对不同湿法脱硫工艺, 估算了 PM_{2.5} 脱除率(原烟气 PM_{2.5} 脱除效率)和新增率(WFGD 过程 PM_{2.5} 新增效率), 结果表明: 双塔系统能够明显减少浆液携带。潘丹萍等^[15]对比单塔、双塔脱硫工艺对烟气颗粒物的处理效果, 发现双塔过程烟气携带浆液效应更加明显。周心澄等^[16]研究指出双塔系统对于微米级颗粒物的脱除效果明显高于单塔, 然而脱硫出口净烟气中亚微米级颗粒物所占比例高于单塔系统。以上研究表明目前双级脱硫塔对细颗粒物尤其是亚微米颗粒物的脱除效果尚具争议。

本文选取西安城区附近某配置双级脱硫系统的 300 MW 超低排放燃煤机组, 采用低压撞击器(Dekati low pressure impactor, DLPI)取样系统对各级污染物控制设备进出口的颗粒物进行取样, 并用石英滤膜采集双级脱硫塔进出口颗粒物, 利用离子色谱仪测量颗粒物中的水溶性离子(water-soluble ions, WSIs)含量。对双级脱硫塔以及相关系统脱除颗粒物效果深入分析, 结合相关研究明确双塔系统运行过程与参数对浆液夹带效应的影响, 为双级脱硫系统的运行优化以及进一步治理大气颗粒物污染提供参考。

2 试验对象与方法

2.1 试验对象

试验选取西安市城区附近某 300 MW 经过超低排放改造的燃煤机组, 锅炉为亚临界自然循环煤粉炉, 采用四角布置切圆燃烧方式。试验期间锅炉运行负荷为 70% 额定负荷。如图 1 与表 1 所示分别为双级 WFGD 系统图及其主要运行参数。表 1 中 θ_{inlet} 、 θ_{outlet} 、 α 、 v 、 t 分别表示进口烟气温度、出口烟气温度、液气比、空塔气速、烟气停留时间。

根据《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996)^[17], 本次采样点布置如图 2 所示。测点分别为 SCR 进口、SCR 出口、ESP 进口、ESP 出口(WFGD 进口)、WFGD 出口(WESP 进口)、WESP 出口。在各测点处选取采样断面, 采用网格布点法计算断面各点流速, 取其平均值作为断面平均流速, 最终选择流速与平均流速最为接近的点为

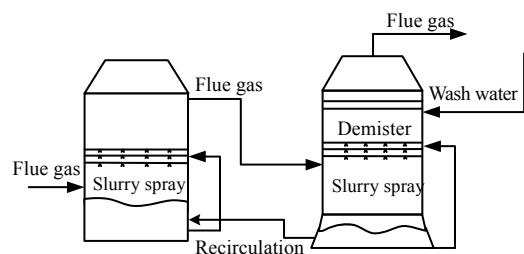


图 1 双级串联脱硫塔系统图
Fig.1 Schematic diagram of the WFGD system

表 1 双级脱硫系统主要运行参数

Table 1 Operation parameters of WFGD

Parameter	$\theta_{\text{inlet}} / ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{outlet}} / ^\circ\text{C}$	$\alpha / (\text{L} \cdot \text{m}^{-3})$	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	t / min
Primary tower	153.8	54.1	15.2	4.0	4.5
Secondary tower	54.1	52.7	11.9	3.7	3.7

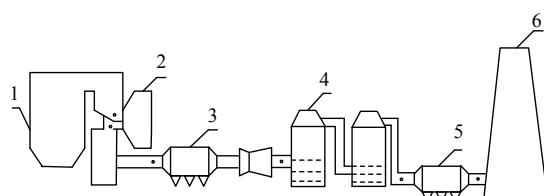


图 2 颗粒物采样点示意图
Fig.2 Schematic diagram of PM sampling position
1. boiler 2. SCR 3. ESP 4. WFGD 5. WESP 6. chimney

实际采样点。用烟气分析仪以及热电偶获得各设备进出口采样点烟气中氧气体积分数 $\phi(O_2)$ 与烟气温度 θ , 结果如表 2 所示。试验期间采集的入炉煤煤质工业及元素分析结果见表 3。

2.2 采样技术

本次测试的采样原理为等速采样原理，根据 DLPI 所收集到的颗粒物质量与同时抽取的气体体积，计算出颗粒物浓度。DLPI 采样系统如图

3(a)所示，在采样枪、切割器、DLPI 处加装加热保温装置以防止高湿烟气冷凝，采用物理性质稳定的铝膜收集颗粒物。滤膜取样系统如图 3(b)所示，在 WFGD 进出口采用石英膜收集颗粒物。

表 2 污染物处理设备进出口烟气参数

Table 2 Flue gas parameters at the inlet and outlet of air-pollution control devices

Location	$\theta / ^\circ \text{C}$	$\varphi(\text{O}_2) / \%$
SCR inlet	343.9	3.23
SCR outlet	319.2	3.69
ESP inlet	153.8	5.33
WFGD inlet	153.8	5.46
WESP inlet	52.7	6.39
WESP outlet	52.4	7.56

表 3 煤的工业分析与元素分析

Table 3 Proximate and ultimate analyses of coal

Proximate analysis / %				Ultimate analysis / %				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	H _{ad}
2.569	27.325	25.131	44.975	55.836	4.471	0.884	1.07	3.785

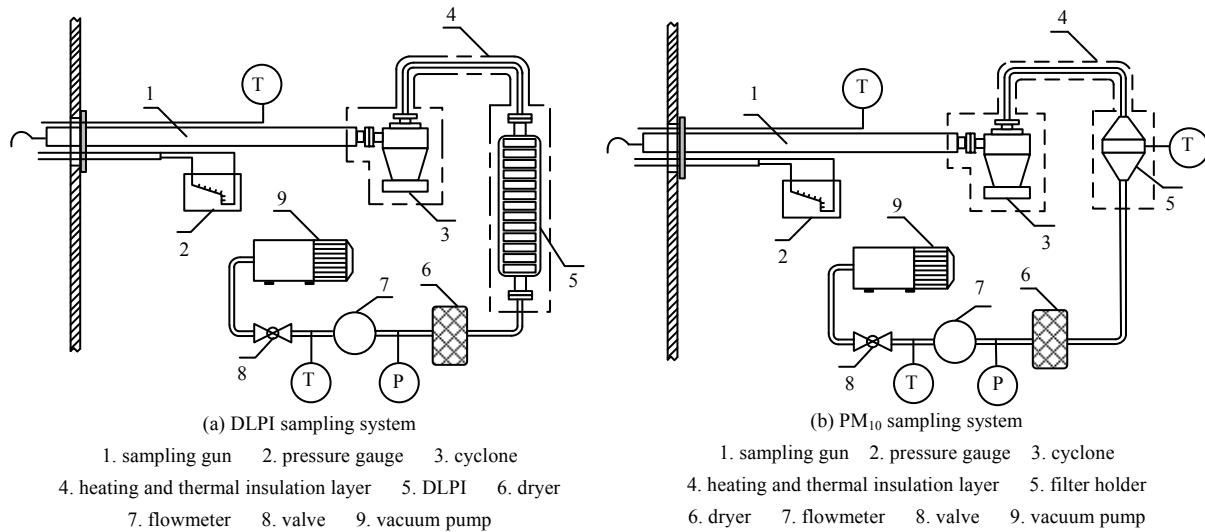


图 3 颗粒物取样系统

Fig.3 Schematic diagram of the PM sampling system

2.3 分析方法

实验室中采用高精度百万分之一天平对采样前后的铝膜及石英膜进行质量称量，得到烟气中不同粒径颗粒物的质量浓度。标准状态下颗粒物质量浓度的计算公式为

$$\rho_B = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{pi,1} - m_{pi,0})}{V} \times 1\ 000 \quad (1)$$

式中: ρ_B 为标准状况下颗粒物的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; $m_{pi,0}$ 和 $m_{pi,1}$ 分别为采样前后第 i 级收集铝膜的质量, mg ; V 为标准状况下的采样体积, m^3 。同时将式(1)所得颗粒物质量浓度换算到标准状况下氧气体积分数为 6% 的烟气中颗粒物的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

在颗粒物的排放特征分析中，常采用质量浓度的对数粒径分布 $D_p \cdot d\rho_m \cdot (d\log D_p)^{-1}$ 来表征任意两级粒径区间宽度的颗粒质量浓度分布，计算方法如下：

$$d\rho_m \cdot (d \log D_p)^{-1} = \frac{\Delta \rho_m}{\Delta \log D_p} \quad (2)$$

式中: $\Delta\rho_m$ 为对应级颗粒物的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; D_p 为颗粒物粒径, μm ; $\Delta(\log)D_p$ 为对应级颗粒物粒径范围的上限、下限的对数之差。

取 1/2 石英膜样品放于 50 mL 容量瓶中，采用水浴超声法提取水溶性离子。用去离子水定容后放入超声波清洗仪中进行水浴超声，超声时间控制在 30 min 以内防止过热；超声后用 0.22 μm 混纤-水系过滤头过滤，得到待测样品清液；用 C18 萃取小柱脱除有机物以排除其干扰。样品处理得当后采用离子色谱

仪测量样品中阴离子和阳离子浓度。

颗粒物及水溶性离子脱除效率计算公式为

$$\eta = \frac{\rho_{\text{in}} - \rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为颗粒物或水溶性离子的脱除效率, %; ρ_{in} 、 ρ_{out} 分别为污染物处理设备进、出口污染物或水溶性离子的质量浓度(标准状况、干基、6% O₂), mg·m⁻³。

2.4 样品质量控制及质量保证

采样前严格参照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996)^[20]与《火电厂烟气中细颗粒物(PM_{2.5})测试技术规范重量法》(DL/T 1520-2016)^[18]在实验室对空白收集铝膜、石英膜进行烘干、平衡、称重等操作, 将松脂(apiezon resin)均匀涂于铝膜中心位置以起到缓冲作用, 并保证铝膜边缘清洁; 采样前对铝膜进行检查, 确保未发生污染缺损等情况。连接好系统后进行泄漏检验, 确认无泄漏情况后开始采样; 采样过程中保持锅炉运行工况、给粉方式、机组负荷、烟气流量和烟气流速稳定, 燃用相同批次煤种; 同时保证采样嘴进口正对烟气来流方向, 最大偏差小于5°; 每个采样点平行测试3次, 进行平行样分析。

在利用离子色谱测量水溶性离子时, 测量由低到高不同浓度大小的标准样品以获得误差较小的标准曲线; 注意离子色谱样品测试的重复性, 对同一样品进行多次测量, 若出现相差过大则对样品及仪器稳定性进行检查。

3 结果与讨论

3.1 双级脱硫塔对颗粒物的脱除作用

颗粒物采样测试期间, 根据电厂 CEMS 烟气监测系统得到双级脱硫塔的脱硫效率达到99.58%, 脱硫出口 SO₂质量浓度 $\rho(\text{SO}_2)$ 为 22.7 mg·m⁻³, 低于超低排放标准限值。双级脱硫塔进出口的粒径分布以及粒径质量浓度如图 4(a)和(b)所示。烟气中 PM₁₀ 的质量浓度经过双级脱硫塔由 26.14 降低至 10.37 mg·m⁻³, 双级脱硫塔对 PM_{1-2.5} 和 PM_{2.5-10} 的脱除效率分别为 76.1%、85.6%, 对 PM₁₀ 总脱除效率为 60.3%, 明显高于一般的单级脱硫装置。

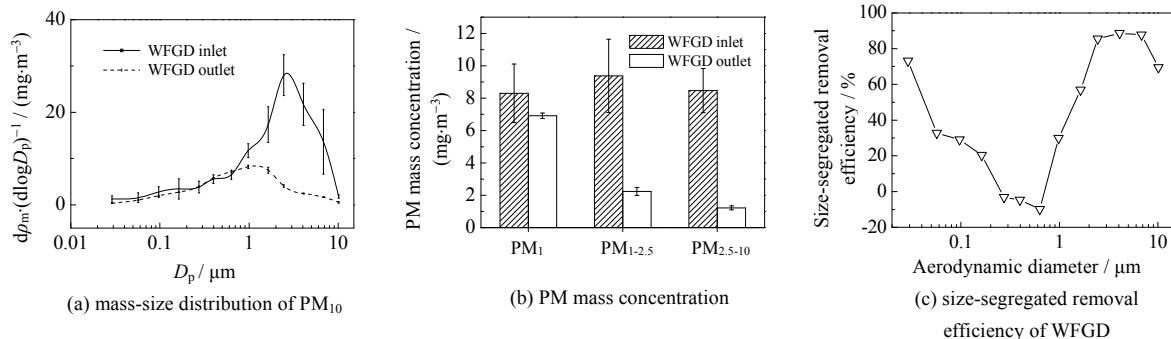


图 4 WFGD 进出口 PM₁₀ 变化
Fig.4 PM₁₀ profiles at the inlet and outlet of WFGD

出现这种现象的主要原因是双级脱硫塔增加了烟气在脱硫塔内的停留时间使得浆液滴可以对原烟气中的大粒径颗粒物进行充分捕捉。PM₁ 的脱除效率为 16.8%, 显然双级脱硫塔对于亚微米颗粒物的脱除效果弱于微米级颗粒物。

如图 4(c)所示, 随着粒径的增大, 双级脱硫塔颗粒物分级脱除效率先减小后增加, 对 PM_{0.1-1} 的脱除效率最低。这主要由于浆液捕集 PM_{0.1} 依靠布朗扩散, 对于粒径大于 1 μm 颗粒物则主要依靠拦截作用, 随着粒径的增大拦截作用将逐渐增强^[19], PM_{0.1-1} 受到此 2 种作用效果较差^[20], 且烟气夹带浆液蒸发会形成新的微细颗粒物。

烟气经过双级脱硫塔后未出现单级脱硫装置中 PM_1 质量浓度逆增长的现象, 主要由于双级脱硫塔中浆液夹带效应相对较弱, 这与邓建国等^[14]的研究相符合。分析其主要原因如下: 1) 双级脱硫塔通过调整两塔的运行参数, 实现脱硫浆液双循环。1 级脱硫塔浆液密度、浆液含固量、液气比高, pH 值较低, 使得 SO_2 在 1 级脱硫塔中脱除; 2 级脱硫塔运行工况平稳, 生成石膏很少, 浆液 pH 值提高, 在较低液气比的条件下实现高 SO_2 脱除效率。低液气比有利于减少烟气对浆液液滴的夹带, 对 1 级塔带来的石膏晶粒有一定洗涤作用, 因此 2 级脱硫塔对颗粒物的脱除起到主导作用^[21]。而文献[15]中双级脱硫塔的运行方式为 1 级塔降温除尘, 2 级塔主要负责吸收 SO_2 , 因此导致烟气夹带浆液现象严重。2) 烟气经过 1 级脱硫塔的洗涤, 烟气温度降至 54.1 °C。因此烟气进入 2 级脱硫塔后, 减少了烟气与浆液的传热传质, 抑制石灰石与石膏等晶体的析出。同时有利于浆液液滴成核长大, 被高效屋脊式除雾器脱除^[22]。3) 双级脱硫塔循环浆液温度控制在 50 °C 左右, 浆液温度较高有利于浆液中的晶体长大, 使得液滴不易被夹带, 同样减少了烟气中的液滴含量^[23]。

双级脱硫塔对 PM_{10} 中水溶性组分的改变同样值得注意, 许多学者认为颗粒物中水溶性组分对于大气雾霾的形成至关重要, 并且在大气雾霾组分中占有较高的比例^[24-26]。张周红等^[13]报道单级 WFGD 过程烟气主要水溶性离子包括 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- , 其中 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 分别增长了 233.3%、139.3%、500%。本机组双级脱硫塔进口和出口处水溶性离子组成如图 5 所示。进口水溶性离子总质量浓度为 $1.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中阳离子质量浓度为 $0.48 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 阴离子质量浓度为 $0.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 造成阴阳离子浓度差距较大的原因主要是因为烟气中 SO_3 冷凝为 H_2SO_4 液滴与颗粒物结合, 导致测得阴离子浓度较高。 PM_{10} 中 SO_4^{2-} 是主要的阴离子, 而阳离子中 Na^+ 含量较高。双级脱硫塔脱除颗粒物的同时对 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 F^- 有一定的脱除效果, 脱除效率分别为 34.3%、24.3%、74.3%。而 PM_{10} 中其余水溶性离子的质量浓度, 如 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 出现增长, 分别增长了 66.4%、20.5%、35.65%, 相比单级 WFGD 装置, 增长幅度较小。烟气经过脱硫系统后新增的颗粒物浓度与脱硫浆液夹带过程中析出的固体晶粒密切相关^[27]。因此可以推测, 颗粒物中水溶性离子含量的增加同样与浆液的夹带与蒸发密不可分。

如图 6 所示为测试期间循环浆液的离子质量浓度图, 从图中可以看出循环浆液中含量较高的离子与颗粒物中增加的水溶性离子相对应, 由此推断浆液夹带效应是造成烟气颗粒物中水溶性离子成分增加的主要原因。

综上, 对双级脱硫塔的运行过程及运行参数进行合理控制, 可以在高效脱除 SO_2 的情况下, 减少细颗粒物与颗粒物中水溶性组分的新增, 有助于提高燃煤机组颗粒物的排放水平, 减少“石膏雨”的现象出现^[21]。

3.2 相关污染物处理设备对颗粒物的脱除作用

3.2.1 选择性催化还原装置

SCR 对颗粒物的影响如图 7 所示, 经过 SCR 后 PM_1 的质量浓度增加了 24.7%, 主要原因是 SCR 能将烟气中部分 SO_2 氧化为 SO_3 , 同时 NH_3 作为 SCR 过程还原剂, 也会与烟气中 SO_3 发生反应生成亚微米 $(NH_4)_2SO_4$ 或者 NH_4HSO_4 气溶胶。刘芳琪等^[28]的研究同样出现了烟气经过 SCR 导致 PM_1 增多的现象。

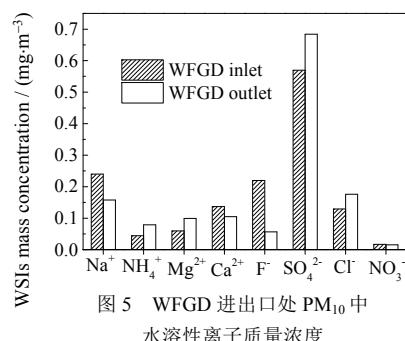


图 5 WFGD 进出口处 PM_{10} 中水溶性离子质量浓度

Fig.5 Concentrations of water-soluble ions in PM_{10} at the inlet and outlet of WFGD

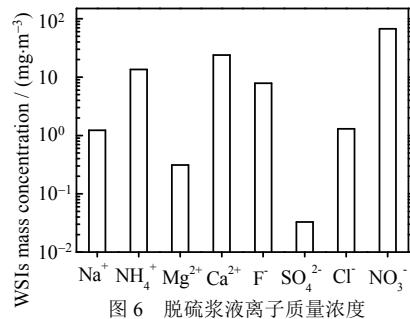
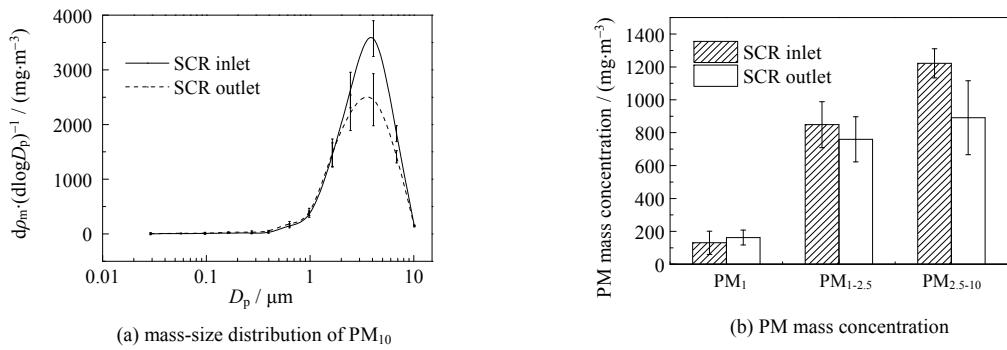


图 6 脱硫浆液离子质量浓度

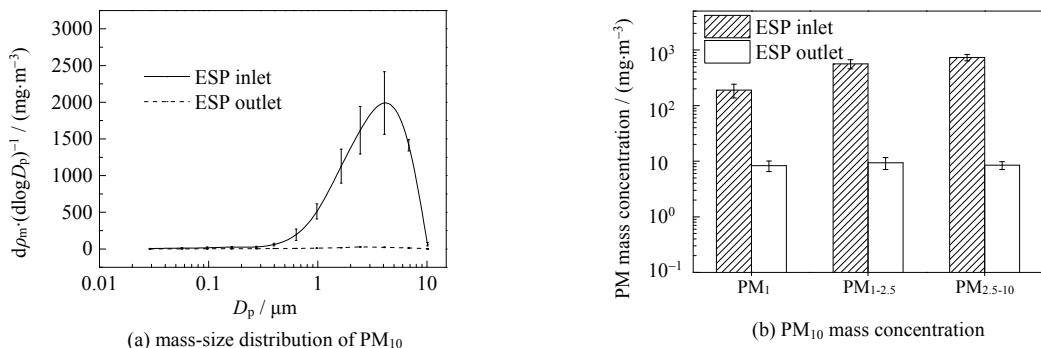
Fig.6 Concentrations of water-soluble ions in the desulfurization slurry

图7 SCR进出口PM₁₀变化Fig.7 PM₁₀ profiles at the inlet and outlet of SCR

SCR出口PM_{1-2.5}、PM_{2.5-10}分别降低了10.5%、27.1%，说明机组SCR装置催化剂层对微米级颗粒物有一定拦截作用。同时新生成的NH₄HSO₄气溶胶具有黏性，易堵塞催化剂孔道，故应提升催化剂层抗磨损性能^[29]。

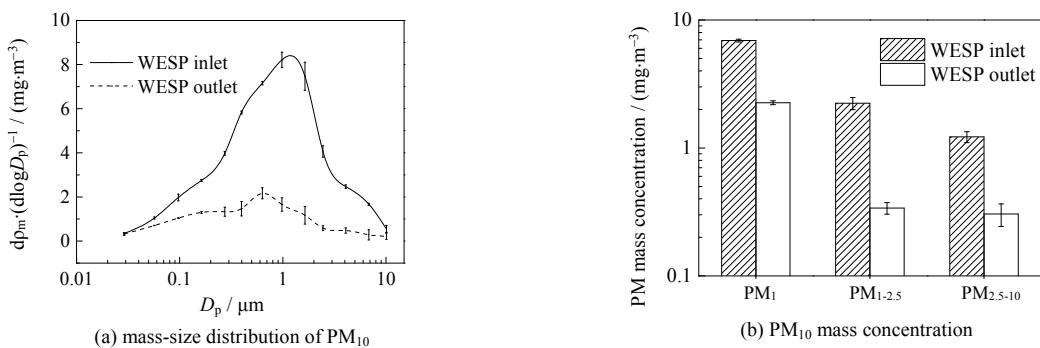
3.2.2 静电除尘器

机组ESP由工频高压供电改为高频高压供电，减少了电源电压波动，增强了ESP在高浓度粉尘工况下的工作性能与电场收集能力^[30]。ESP进出口PM₁₀的粒径分布、质量浓度如图8(a)和(b)所示。从图中可以看出烟气经过ESP后，各粒径段颗粒物质量浓度均大幅降低，PM₁、PM_{1-2.5}、PM_{2.5-10}的脱除效率分别为95.7%、98.3%、98.6%。PM₁的脱除效率明显低于大粒径颗粒，这主要由于PM_{0.1-1}受到扩散荷电与电场荷电机制的共同作用，导致荷电效果较差，存在穿透窗口^[31]。

图8 ESP进出口PM₁₀变化Fig.8 PM₁₀ profiles at the inlet and outlet of ESP

3.2.3 湿式静电除尘器

机组WESP采用下进气立式布置，采用水冲洗极板除灰方式，不会产生二次扬尘，测试期间，WESP为高电压低电流运行方式，二次直流电压为58~67 kV，二次电流46~81 mA。WESP进出口PM₁₀的粒径分布曲线与脱除效率如图9所示。由于脱硫尾部烟气接近饱和，因此烟气在WESP中处于高湿度状态使得颗粒物与液滴荷电效果更好，WESP对PM₁、PM_{1-2.5}、PM_{2.5-10}的脱除效率分别达到67.4%、84.9%、

图9 WESP进出口PM₁₀变化Fig.9 PM₁₀ profiles at the inlet and outlet of WESP

75.1%，对各级颗粒物脱除效果均达到60%以上，但亚微米颗粒脱除效率明显低于微米级颗粒。而PM_{2.5-10}的脱除效率低于PM_{1-2.5}主要原因是WESP入口PM_{2.5-10}的浓度较低。70%负荷下，该机组烟囱最终排放的PM₁₀质量浓度为2.89 mg·m⁻³，低于超低排放要求的5 mg·m⁻³。

3.3 颗粒物的排放因子及排放总量的计算

燃煤锅炉排放颗粒物对大气环境的危害性可以通过燃煤锅炉颗粒物排放因子进行评估，其为决策者发展和制定排放控制策略，确定控制项目的可行性、研究各种因素对控制的影响提供有力的工具^[32]。燃煤锅炉消耗单位质量燃煤颗粒物的排放因子是指在燃煤锅炉在固定负荷正常运行下消耗单位标准煤时产生及排放颗粒物的质量。基于现场实测数据，根据式(4)计算出机组单位煤炭消耗量大气PM₁₀排放因子。

$$EF = \frac{\rho(PM_{10}) \cdot q_V}{M_0} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中：M₀为机组单位时间煤炭消耗量，t·h⁻¹；ρ(PM₁₀)为电厂排放PM₁₀的质量浓度，mg·m⁻³，q_V为锅炉标准状况下干烟气体积流量，m³·h⁻¹。计算得到机组70%负荷下单位煤炭消耗量大气PM₁₀排放因子EF为0.049 kg·t⁻¹。

4 结 论

(1) 双级脱硫塔对PM₁₀脱除效果明显高于一般的单级脱硫装置，其中PM_{2.5-10}脱除效率达到85.6%，同时PM₁未出现逆增长。双级脱硫塔采取合适的运行参数并对两塔合理调控，有助于减少烟气对脱硫浆液的夹带蒸发，抑制细颗粒物的新增。

(2) SCR设备会导致亚微米颗粒物增多，其催化剂层对大粒径颗粒物有一定拦截作用；由于穿透窗口的存在，ESP对亚微米颗粒物脱除效果相对较低；WESP对各级颗粒物脱除效果均达到60%以上。

(3) 经过两级脱硫塔以及相关系统处理后机组排放PM₁₀质量浓度为2.89 mg·m⁻³，满足超低排放标准。

参考文献：

- [1] 陈月洪, 严丽莎, 寿逸凯, 等. 环境PM_{2.5}致神经系统损伤机制研究进展 [J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2019, 33(7): 550-558.
CHEN Y H, YAN L S, SHOU Y K, et al. Research progress in mechanism of nervous system injury induced by environmental PM_{2.5} [J]. **Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology**, 2019, 33(7): 550-558.
- [2] 黄斯粤, 付俊杰. 大气PM_{2.5}对呼吸系统影响的研究进展 [J]. 江西医药, 2019, 54(7): 865-867.
HUANG S Y, FU J J. Research progress of the effect of atmospheric PM_{2.5} on respiratory system [J]. **Jiangxi Medical Journal**, 2019, 54(7): 865-867.
- [3] 钱吉琛, 裴颖皓, 曹筠, 等. PM_{2.5}暴露对心血管疾病影响的研究进展 [J]. 医学综述, 2019, 25(19): 3880-3884.
QIAN J C, PEI Y H, CAO Y, et al. Research progress on the effect of PM_{2.5} exposure on cardiovascular disease [J]. **Medical Recapitulate**, 2019, 25(19): 3880-3884.
- [4] 发展改革委, 中华人民共和国生态环境部, 能源局. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的通知 [EB/OL]. 2014 [2020-4-29]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Energy Administration. Notice on printing and distributing the action plan for upgrading and transformation of coal power energy conservation and emission reduction (2014-2020) [EB/OL]. 2014 [2020-4-29]. http://www.gov.cn/gongbao/ content/ 2015/ content_2818468.htm.
- [5] 发展改革委, 中华人民共和国生态环境部, 能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知 [EB/OL]. 2015 [2020-4-29]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Energy Administration. Notice on printing and distributing the work plan for the comprehensive implementation of ultra-low emission and energy saving transformation of coal-fired power plants [EB/OL]. 2015 [2020-4-29]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.
- [6] LIU X W, XU Y S, ZENG X P, et al. Field measurements on the emission and removal of PM_{2.5} from coal-fired power stations: 1. A case study for a 1000 MW ultra supercritical utility boiler [J]. **Energy & Fuels**, 2016, 30(8): 6547-6554.
- [7] 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): 476-486.

- YAN K P, LI S R, ZHENG Q Z, et al. Development and application of electrostatic precipitation technology [J]. **High Voltage Engineering**, 2017, 43(2): 476-486.
- [8] XU Y S, LIU X W, CUI J, et al. Field measurements on the emission and removal of PM_{2.5} from coal-fired power stations: 4. PM removal performance of wet electrostatic precipitators [J]. **Energy & Fuels**, 2016, 30(9): 7465-7473.
- [9] 周科, 聂剑平, 张广才, 等. 湿法烟气脱硫燃煤锅炉烟气颗粒物的排放特性研究 [J]. 热力发电, 2013, 42(8): 87-91, 95.
- ZHOU K, NIE J P, ZHANG G C, et al. Emission characteristics of particulate matter from coal-fired plant equipped with WFGD [J]. **Thermal Power Generation**, 2013, 42(8): 87-91, 95.
- [10] 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 等. 超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性 [J]. 环境科学, 2019, 40(1): 126-134.
- RUAN R H, TAN H Z, DUAN Y F, et al. Particle removal characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. **Environmental Science**, 2019, 40(1): 126-134.
- [11] 王东歌, 朱法华, 易玉萍, 等. 基于实测的湿法脱硫系统对颗粒物去除效果的研究 [J]. 环境监测与技术, 2015, 27(5): 21-24.
- WANG D G, ZHU F H, YI Y P, et al. Removal efficiency of WFGD system to particles based on field tests [J]. **The Administration and Technique of Environmental Monitoring**, 2015, 27(5): 21-24.
- [12] MEIJ R, WINKEL B T. The emissions and environmental impact of PM₁₀ and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD [J]. **Fuel Processing Technology**, 2004, 85(6/7): 641-656.
- [13] 张周红, 丁少波, 张楠, 等. 燃煤电厂湿法脱硫对PM_{2.5}和多环芳烃排放的影响 [J]. 环境工程, 2019, 37(9): 119-124.
- ZHANG Z H, DING S B, ZHANG N, et al. Influence of wet flue gas desulfurization on PM_{2.5} and PAHs emitted coal-fired power plants [J]. **Environmental Engineering**, 2019, 37(9): 119-124.
- [14] 邓建国, 马子軒, 李振, 等. 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3457-3462.
- DENG J G, MA Z Z, LI Z, et al. Effect of a wet flue gas desulphurization system on the emission of PM_{2.5} from coal-fired power plants [J]. **Environmental Science**, 2019, 40(8): 3457-3462.
- [15] 潘丹萍, 吴昊, 鲍静静, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及SO₃酸雾脱除作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4356-4362.
- PAN D P, WU H, BAO J J, et al. Removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles and SO₃ acid mist from coal-fired power plants [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2016, 36(16): 4356-4362.
- [16] 周心澄, 黄治军, 潘丹萍, 等. 燃煤电站超低排放烟气颗粒物排放测试及特性分析 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 240-247.
- ZHOU X C, HUANG Z J, PAN D P, et al. Testing and characteristics analysis on ultra-low particulate matter emission of flue gas from coal-fired power plants [J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2018, 48(2): 240-247.
- [17] 国家环境保护局科技标准司. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157-1996 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- Department of science and technology standards, State Environmental Protection Administration. The determination of particulates and sampling methods of gaseous pollutants emitted from exhaust gas of stationary source: GB/T 16157-1996 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [18] 国家能源局, 电力行业环境保护标准化技术委员会. 火电厂烟气中细颗粒物(PM_{2.5})测试技术规范 重量法: DL/T 1520-2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- National Energy Administration, Technical Committee for Environmental Protection Standardization of Electric Power Industry. Specifications for fine particles (PM_{2.5}) monitoring in the thermal power plants-gravimetric method: DL/T 1520-2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [19] 张军. 超低排放的湿法高效脱硫协同除尘的机理及模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHANG J. Mechanism and model study on high efficiency desulfurization and dedust based on ultra-low emission technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [20] KIM H T, JUNG C H, OH S N, et al. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction [J]. **Environmental Engineering Science**, 2001, 18(2): 125-136.
- [21] 杨法华. 高硫煤脱硫串联双塔的石膏雨防治的探讨 [J]. 化工管理, 2019(3): 23-25.
- YANG F H. Discussion on the prevention and control of gypsum rain in high sulfur coal desulfurization series double tower [J]. **Chemical Enterprise Management**, 2019(3): 23-25.
- [22] 侯大伟. 湿法脱硫超低排放过程中细颗粒物转化特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- HOU D W. Study on the transformation characteristics of fine particles during the ultra-low emission of WFGD process [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [23] 赵汶, 陈武. 石灰石-石膏湿法脱硫过程中浆液液滴及细颗粒物迁移转化特性研究 [J]. 动力工程学报, 2019, 39(3): 242-247.
- ZHAO W, CHEN W. Study on transformation characteristics of slurry droplets and fine particles during limestone gypsum desulfurization process [J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2019, 39(3): 242-247.

- [24] 汤莉莉, 江蓉馨, 王月华, 等. 2013年1月南京强霾时期大气细颗粒物污染特征分析 [J]. 环境工程, 2016, 34(3): 91-97.
TANG L L, JIANG R X, WANG Y H, et al. Characteristics of fine aerosol particles during a serious haze in Nanjing in January 2013 [J]. **Environmental Engineering**, 2016, 34(3): 91-97.
- [25] 苏跃进. 水蒸气和水溶性离子排放对雾霾暴发的影响分析 [J]. 科学与管理, 2019, 39(2): 55-68.
SU Y J. Analysis of the influence of water vapor and water-soluble ion emission on haze outbreak [J]. **Science and Management**, 2019, 39(2): 55-68.
- [26] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区PM_{2.5}季节污染特征及来源解析 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2947-2952.
ZHANG Z S, TAO J, XIE S D, et al. Seasonal variations and source apportionment of PM_{2.5} at urban area of Chengdu [J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2013, 33(11): 2947-2952.
- [27] 刘亚明, 潘丹萍, 徐齐胜, 等. 石灰石膏法脱硫浆液结晶特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(4): 985-991.
LIU Y M, PAN D P, XU Q S, et al. Experimental investigation on crystalline properties of limestone-gypsum desulphurization slurry [J]. **Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities**, 2015, 29(4): 985-991.
- [28] 刘芳琪, 于敦喜, 吴建群, 等. 燃煤锅炉SCR对颗粒物排放特性影响 [J]. 化工学报, 2018, 69(9): 4051-4057.
LIU F Q, YU D X, WU J Q, et al. Effect of SCR on particulate matter emissions from a coal-fired boiler [J]. **CIESC Journal**, 2018, 69(9): 4051-4057.
- [29] 钟礼金, 宋玉宝. 锅炉SCR烟气脱硝空气预热器堵塞原因及其解决措施 [J]. 热力发电, 2012, 41(8): 51-53, 56.
ZHONG L J, SONG Y B. Air preheater blocking in boiler with SCR denitration device: reason analysis and solutions [J], **Thermal Power Generation**, 2012, 41(8): 51-53, 56.
- [30] 谢建. 电除尘常用高压电源技术特点 [J]. 钢铁技术, 2017(1): 25-29.
XIE J. Technical characteristics of high voltage power supply commonly used in ESP [J]. **Iron & Steel Technology**, 2017(1): 25-29.
- [31] 张萌. 燃煤电厂细颗粒物在电除尘器中凝并和沉降机理的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
ZHANG M. Study on coagulation and setting mechanism of fine particles in coal-fired power plants in electrostatic precipitator [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [32] 卢锦程, 段钰锋, 赵士林, 等. 600 MW燃煤电厂痕量元素排放特性实验研究 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4444-4450.
LU J C, DUAN Y F, ZHAO S L, et al. Experimental study on emission characteristics of trace elements in 600 MW coal fired power plant [J]. **China Environmental Science**, 2018, 38(12): 4444-4450.