Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第1期 2019年1月
Vol. 40, No. 1 Jan., 2019

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性

阮仁晖[1]，谭厚章[1*]，段钰锋[2]，杜勇乐[1]，刘鹤欣[1]，萧嘉繁[1]，杨富鑫[1]，张朋[1]
(1. 西安交通大学能源与动力工程学院，热流科学与工程教育部重点实验室，西安 710049; 2. 东南大学能源与环境学院，能源热转换及其过程测控教育部重点实验室，南京 210096)

摘要: 在京津冀某660 MW超低排放发电机组，通过低压撞击器(DLPI)颗粒物取样系统对选择性催化还原装置(SCR)、低低温省煤器(LLTe)、静电除尘器(ESP)、高效湿法脱硫塔(WFGD)、湿式静电除尘器(WESP)进出口烟气中的颗粒物取样，通过滤膜取样系统对WFGD、WESP进出口颗粒物进行同步取样. 获得了超低排放改造后，不同烟气处理设备对PM_1、$PM_{1\sim2.5}$、$PM_{2.5\sim10}$的脱除效率. 结果表明，SCR能够明显增加PM_1的质量浓度，PM_1增加了52.11%; LLTe能够显著提高ESP的脱除效率，尤其是0.1~1 μm范围内的颗粒物; WFGD能够协同脱除SO_2和颗粒物，但会增加PM_1的排放，PM_1质量浓度增加了59.41%，PM_{10}中水溶性Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}组分增加; WESP对PM_1、$PM_{1\sim2.5}$、$PM_{2.5\sim10}$均有较高的脱除效率，能够进一步降低颗粒物质量浓度. 超低排放技术路线下，该燃煤电厂最终排放的PM_{10}质量浓度为2.04 mg·m^{-3}.

关键词: 超低排放; 煤燃烧; 烟气处理设备; 颗粒物; 水溶性离子
中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)01-0126-09 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.201805184

Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant

RUAN Ren-hui[1], TAN Hou-zhang[1*], DUAN Yu-feng[2], DU Yong-le[1], LIU He-xin[1], XIAO Jia-fan[1], YANG Fu-xin[1], ZHANG Peng[1]
(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A 660 MW unit of an ultra-low emission coal-fired power plant in the Beijing-Tianjin-Hebei area was chosen for this study. The particulate matter was sampled with a Dekati low-pressure impactor (DPLI) at the inlet and outlet of flue gas cleaning devices including selective catalytic reduction (SCR), low-low temperature economizer (LLTe), electrostatic precipitator (ESP), wet flue gas desulfurization (WFGD), and wet electrostatic precipitator (WESP). A filter sampling system was also used at the inlet and outlet of the WFGD and WESP. The removal efficiencies of PM_1, $PM_{1-2.5}$, and $PM_{2.5-10}$ from different flue gas cleaning devices were obtained after ultra-low emission modification. The results show that SCR increases the mass concentration of fine particulates and PM_1 by 52.11%. The LLTe improves the removal efficiency of the ESP, especially for particles with a range of 0.1-1 μm. The high-efficiency WFGD removes both SO_2 and particulates, but it increases PM_1. The mass concentration of PM_1 increases by 59.41% and the water-soluble Mg^{2+}, Cl^-, and SO_4^{2-} in PM_{10} increases. The WESP has a high removal efficiency with respect to PM_1, $PM_{1-2.5}$, and $PM_{2.5-10}$ and can further reduce the dust concentration. Based on an ultra-low emission reform, the final PM_{10} emission of this 660 MW unit is 2.04 mg·m^{-3}.

Key words: ultra-low emission; coal combustion; flue gas cleaning device; PM; water-soluble ion

不同于有些国家拥有丰富的天然气资源或水利资源，我国富煤、贫油、少气，以发电行业为例，2016年我国煤电装机总量占总装机量的57.3%，占火电装机总量的92.5%，燃煤发电量贡献了总发电量的65%[1]. 目前我国能源仍主要由煤炭提供，燃煤产生的污染物如果不加以控制就排放大气中，会造成相当大的环境污染[2]. 据统计，"十一五"期间仅COD、SO_2两项污染物减排带来的社会环境效益，就比减排投资费用多出5倍以上，污染物治理能带来显著的环境、经济效益[3]. 近年随着环保知识的普及与生活条件的提高，大气污染问题逐渐受到关注. 2014年，国家发改委出台了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020年)》[4]; 2015年，国家环境保护部制定了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》[5]，明确了燃煤电厂减排改造的目标. 同时，国内主要发电集团也自发开展比标准更严的改造运动，神华集团在GB 13223-2011基础上提出燃煤机组近零排放概念(6% O_2下，PM、SO_2、NO_x排放浓度低于5、35、50 mg·m^{-3})，揭开了燃煤电厂近零排放改造的序幕.

收稿日期: 2018-05-22; 修订日期: 2018-07-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(91544108); 国家重点研发计划项目(2016YFB0601504); 浙江省重点研发计划项目(2018C03036)
作者简介: 阮仁晖(1993~)，男，博士研究生，主要研究方向为燃煤源颗粒物的排放控制技术，E-mail: 2286027422@qq.com
* 通信作者，E-mail: tanhz@mail.xjtu.edu.cn

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

近零排放是目前全世界最严格的火电排放标准，为实现这一指标，需对锅炉及后续烟气处理系统进行全面提效改造. 目前针对煤粉锅炉超低排放改造有多条技术路线，差异主要体现在除尘技术上[6]：①以低氮燃烧器、全负荷 SCR、三相电源低低温 ESP、脱硫系统提效、WESP 的技术路线，能适应宽范围煤种变化和宽负荷条件下的近零排放要求；②以低氮燃烧器、全负荷 SCR、三相电源低低温 ESP、脱硫系统提效的技术路线对煤质稳定性要求较高，能实现脱硫塔高效协同脱除 SO_2 与 PM；③以低氮燃烧器、全负荷 SCR、电袋除尘器、提效脱硫塔、WESP 的技术路线通过电袋除尘器保证高效脱除 PM，根据脱硫塔设计运行情况选择性安装 WESP，保证最终污染物排放达标.

针对火电厂超低排放改造后烟气处理设备的颗粒物脱除性能，国内学者开展了大量研究. 赵磊等[7]研究了某 300 MW 超低排放机组的 WESP 对细颗粒物的脱除效果，发现不同负荷下颗粒物的脱除效率均在 88% 以上. 张军等[8]监测了某 1 000 MW 燃煤超低排放机组 SCR、ESP、WFGD、WESP 进出口的多种污染物，结果表明 WFGD、WESP 对 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 均有脱除效果，由于 WESP 入口颗粒物质量浓度低，超细颗粒物脱除效果不明显. 朱杰等[9]对比了 7 个超低排放燃煤机组 WFGD 的颗粒物脱除性能，改造后 WFGD 具有较好的协同除尘效果. 陈鸿伟等[10]研究了烟气调质对某 600 MW 超低排放机组 ESP 除尘性能的影响，发现在 ESP 入口喷入适量的 SO_3 和 NH_3 能够降低飞灰比电阻，ESP 出口颗粒物质量浓度低于 20 $mg \cdot m^{-3}$. 已有研究大都关注单一或某几个烟气处理设备，少有关注整套烟气处理系统. 超低排放改造后，不同烟气处理设备间的协同除尘对燃煤电厂颗粒物超低排放具有关键作用，研究不同烟气处理设备对颗粒物的影响对超低排放技术的进一步优化具有重要意义.

本研究选取京津冀某超低排放机组，对烟气沿程的颗粒物进行取样，分析超低排放改造后烟气处理系统对颗粒物的影响与作用机制，以期为超低排放技术做出贡献.

1　材料与方法

1.1　测试条件与工况

选取京津冀某机组容量 2 × 660 MW 电厂，该电厂通过全负荷脱硝改造(将原来 SCR 前部 27% 的省煤器移到 SCR 后)；加装 LLTe(深度降低烟温，加热汽轮机凝结水)；ESP 三相电源改造；脱硫系统提效改造(增设一层喷淋层，将原有两层平板式除雾器改为两层屋脊式 + 一层管式除雾器)；加装 WESP 等措施，实现了超低排放. 本研究在 SCR、LLTe、ESP、WFGD、WESP 进出口对烟气中的 PM 进行取样，采样点如图 1 所示.

结合分布式控制系统(DCS)数据和崂应 3012H(崂应，青岛)获得各设备进出口烟气参数，如表 1 所示.

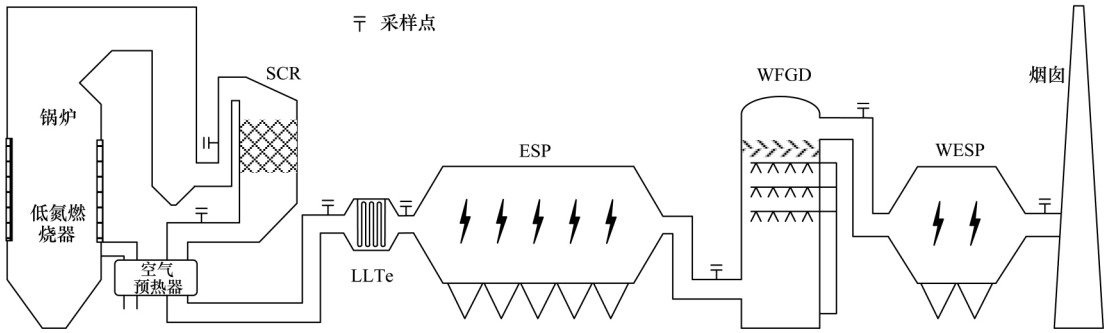


图 1　颗粒物采样点位置示意

Fig. 1　PM sampling position

表 1　烟气处理设备进出口烟气参数[1)]

Table 1　Flue gas parameters of fume cleaning devices

设备名称	入口				出口			
	烟温/℃	氧量/%	绝对湿度/%	全压/Pa	烟温/℃	氧量/%	绝对湿度/%	全压/Pa
SCR	360	4.9	—	−854	305	4.9	—	−1 432
LLTe	115	5.9	—	−2 362	90	5.9	7.4	−2 810
ESP	90	5.9	7.4	−2 810	90	5.9	7.5	−2 920[a]
WFGD	90	5.9	7.5	1 637[b]	49	6.0	12.0	801
WESP	49	6.0	12.0	801	49	6.0	11.9	295

1) a 为引风机入口，b 为引风机出口

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

该电厂入炉煤是两种煤的混煤，以 1、2 号表示，测试期间混煤质量比平均为 4∶1，总耗煤量 195 $t \cdot h^{-1}$. 1、2 号煤的工业分析数据如表 2 所示，1 号煤的灰分较低为 8.66%；2 号煤灰含量较高为 18.98%. 掺烧方式既可以降低成本又可以保证发电量，是目前我国火电行业燃用劣质煤的主要方法[11].

表 2 煤质工业分析1)

Table 2 Proximate analysis of coal

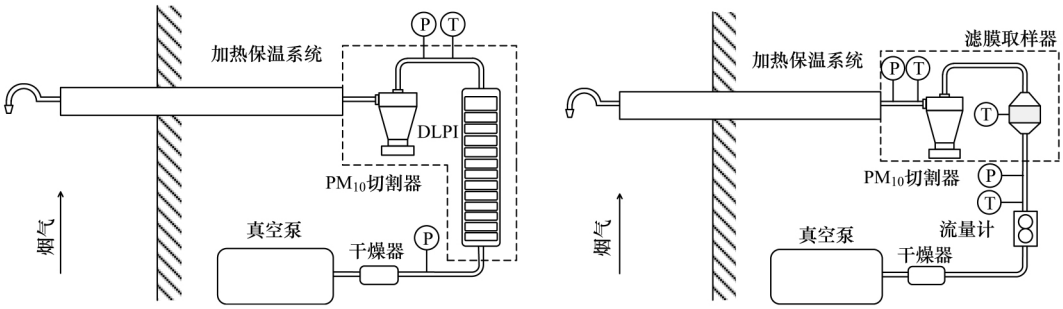
工业分析/%	1 号	2 号
水分$_{ad}$	6.18	3.12
灰分$_{ad}$	8.66	18.98
挥发分$_{ad}$	29.30	28.84
固定碳$^{*}_{ad}$	55.86	49.06

1) ad 表示空气干燥基，* 代表差减法

1.2 采样方法

参照 DL/T1520-2016[12]，依据等速取样原理选用相应尺寸的烟气采样头，烟气经过 PM_{10}旋风分离器去除空气动力学粒径大于 10 μm 的飞灰颗粒，随后 PM_{10}在 DLPI 取样装置内被分为 13 级，实验装置如图 2(a) 所示. 参考 EPA-Method 5 和 EPA Method 0010，在 WFGD、WESP 进出口采用直径 47 mm 石英膜(MK 360，Munktell) 收集颗粒物，用于分析固态颗粒中的水溶性组分[13]，实验装置如图 2(b) 所示. 取样管路保温 130℃，防止水汽和酸雾冷凝[14]. 为了获得足够量样品并防止 DLPI 过载，ESP 前飞灰质量浓度高的测点取样时间控制在 30 s ~ 2 min，ESP 后测点的取样时间控制在 30 ~ 60 min；取样铝膜涂有松脂(Apiezon resin，英国)，减小颗粒物反弹带来的测试偏差. 采样前检查 DLPI 和滤膜取样系统的气密性，达标后开始取样；各测点采样 3 次，为保证数据的重复性，采样期间锅炉负荷稳定在 80% 附近，燃用相同批次煤种，控制吹灰、振打、喷淋等操作，防止以上操作带来的颗粒物质量浓度波动. 取样后的石英滤膜与空白石英膜放入滤膜盒中待后续分析.

国内外固定污染源 PM 采样方法可以分为[15]：①直接采样法，②稀释采样法. 本实验采用的是烟道外直接采样法，这有两方面考虑：①我国电厂标准测孔直径为 80 mm，采样探头 + PM_{10}旋风分离器(Dekati，芬兰) 的尺寸大于 80 mm，取样器无法进入烟道，②脱硫装置出口烟气温度一般低于 50℃ 且湿度饱和，采用烟道内取样会导致滤膜潮湿，进一步吸收烟气里可凝结气体，导致测试结果偏大. 本研究的烟道外直接采样法可收集烟气中的可过滤颗粒物，无法收集可凝结气态物质转化的颗粒物[16].



(a) DLPI取样系统 (b) 滤膜取样系统

图 2 颗粒物取样系统

Fig. 2 Schematic of the PM sampling system

1.3 分析方法

取样前后的铝膜、石英膜均在 105℃ 烘箱中干燥 2 h，置于干燥器中冷却至室温，用高精度百万分之一天平(Sartorius M2P，德国) 获得采样前后膜片质量. 颗粒物中的水溶性离子通过离子色谱(Thermo Scientific Dionex Integrion，美国) 分析，前处理步骤如下：用陶瓷剪刀将 47 mm 石英膜剪碎，置于 15 mL 烧杯中，倒入 5 mL 去离子水(电阻率≥ 18.2 MΩ·cm)，超声波冰浴提取 30 min 后用定量滤纸过滤，用 0.22 μm 水系滤头过滤所得清液，得到待测溶液样品. 所用阴离子淋洗液为 30 $mmol \cdot L^{-1}$ KOH，流速 1 $mL \cdot min^{-1}$；阳离子淋洗液为 30 $mmol \cdot L^{-1}$ 甲基磺酸，流速 0.64 $mL \cdot min^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 选择性催化还原装置(SCR)

机组低负荷工况下，常规 SCR 装置入口烟气温度较低，无法保证催化剂在有效工作范围内(320 ~ 400℃)[17]，导致脱硝效率恶化，喷氨量增加，氨逃逸超标，易造成空预器堵塞等问题. 该机组通过省煤器给水旁路改造，SCR 可以在 40% ~ 100% 宽负荷工况下正常投运. 如表 1 所示，测试期间，SCR 入口烟温 360℃，出口烟温 305℃(SCR 出口测点与 SCR 催化剂之间有一级低温省煤器)；催化剂层阻

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力 578 Pa.

采样期间 SCR 进出口 NO_x 质量浓度与氨逃逸量如表 3 所示. 80% 负荷下 NO_x 脱除效率为 85.4%，氨逃逸量 0.3 mg·m^{-3}，低于国家限值 2.5 mg·m^{-3} [18]，表明 SCR 入口烟气流速和 NH_3、NO_x 分布均匀[19].

表 3　SCR 脱硝效率与氨逃逸量

Table 3　Denitrification efficiency and ammonia escape of SCR

项目	SCR 入口 NO_x/mg·m^{-3}	SCR 出口 NO_x/mg·m^{-3}	脱硝效率/%	氨逃逸量/mg·m^{-3}
参数	165	24	85.4	0.3

SCR 对颗粒物的影响如图 3 所示. PM_{10} 以超微米颗粒物为主，经过 SCR 后 PM_1 的质量浓度增加了 52.11%，增加的 PM_1 主要来自烟气中气态物质的转化. SCR 催化剂能将 SO_2 氧化为 SO_3 [20]，比例为 1% ~ 2%; SCR 出口烟温低于 $(NH_4)_2SO_4$、$(NH_4)HSO_4$ 分解温度，SO_3 与 NH_3 在催化剂内部生成 $(NH_4)_2SO_4$、$(NH_4)HSO_4$ [21]，增加 PM_1 含量[22]，形成的颗粒物容易逃逸出后续烟气处理设备，成为大气一次颗粒物，或参与大气物理化学反应形成二次颗粒物[21]. 同时，从 SCR 逃逸的 SO_3 和 NH_3 在水分参与的条件下会在脱硝装置下游继续形成 $(NH_4)_2SO_4$ 和 $(NH_4)HSO_4$ [23]，在空余器换热元件表面冷凝析出，造成空预器堵塞、腐蚀等问题，影响引风机、空预器正常运行. 我国电站 SCR 装置大多采用高尘布置，催化剂层对颗粒物有拦截作用[24]，SCR 出口 $PM_{1\sim2.5}$、$PM_{2.5\sim10}$ 分别降低了 12.87%、27.43%. 电厂运行时根据 SCR 催化剂层压差对催化剂层进行清灰，防止飞灰颗粒堵塞催化剂层[25].

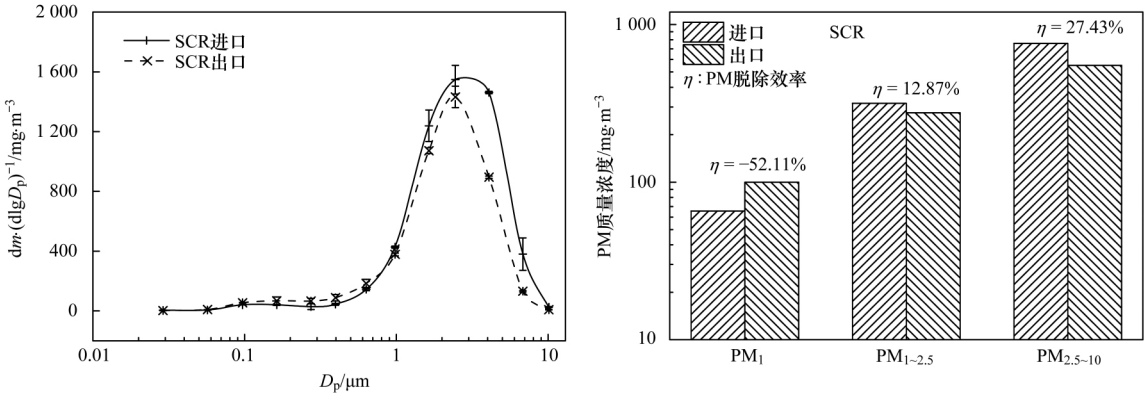


图 3　SCR 进出口 PM_{10} 质量粒径分布与颗粒物脱除效率

Fig. 3　Mass-size distribution of PM_{10} and PM removal efficiency of the SCR

2.2　低低温省煤器(LLTe)

如表 1 所示，测试期间 LLTe 入口烟温 115℃，出口烟温 90℃. 常规 ESP 进口烟温为 120 ~ 150℃，高于酸露点，LLTe 安装在空气预热器与 ESP 之间，能深度降低烟温，促进 SO_3 冷凝，有利于飞灰颗粒吸附、捕获 SO_3，降低飞灰比电阻，减少反电晕现象. 降低烟温会减少烟气的体积流量，增加 ESP 中烟气的停留时间[26]，提高 ESP 除尘效率. LLTe 对颗粒物质量浓度的影响如图 4 所示. LLTe 能够增加 14.46% 的 $PM_{1\sim2.5}$、减少 13.03% 的 $PM_{2.5\sim10}$，烟

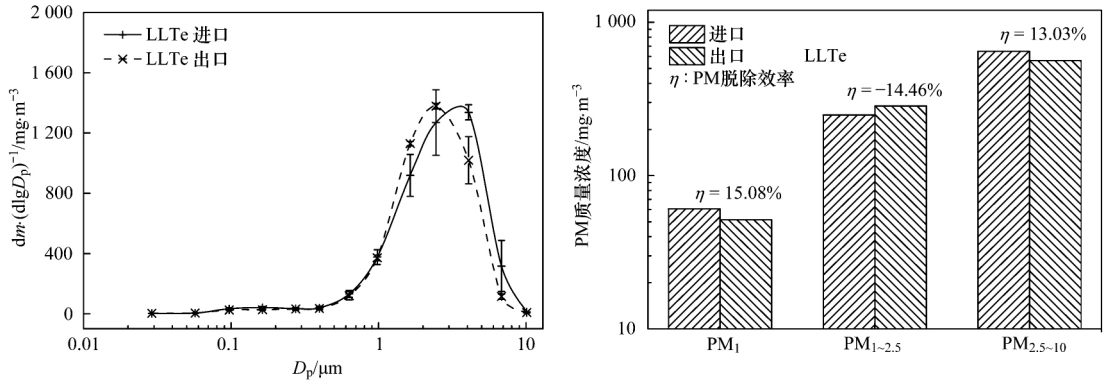


图 4　低低温省煤器进出口 PM_{10} 质量粒径分布与颗粒物脱除效率

Fig. 4　Mass-size distribution of PM_{10} and PM removal efficiency of the LLTe

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

温降低到酸露点以下，促进了烟气中酸性气体析出，有利于颗粒物团聚长大，导致 $PM_{1\sim2.5}$ 质量浓度增加.

2.3 静电除尘器(ESP)

如表 1 所示，测试期间 ESP 进出烟温均为 90℃，说明 ESP 漏风系数低. 该电厂 ESP 通过三相电源改造，二次直流电压从 60 kV 提高到 80 kV，能改善飞灰颗粒的荷电效果，提高电场力，增大颗粒驱进速度，提高除尘效率. ESP 对颗粒物的脱除效果如图 5 所示. 颗粒物脱除效率总体与粒径呈反比，对 PM_1、$PM_{1\sim2.5}$、$PM_{2.5\sim10}$ 的脱除效率分别为 98.12%、98.79%、98.70%.

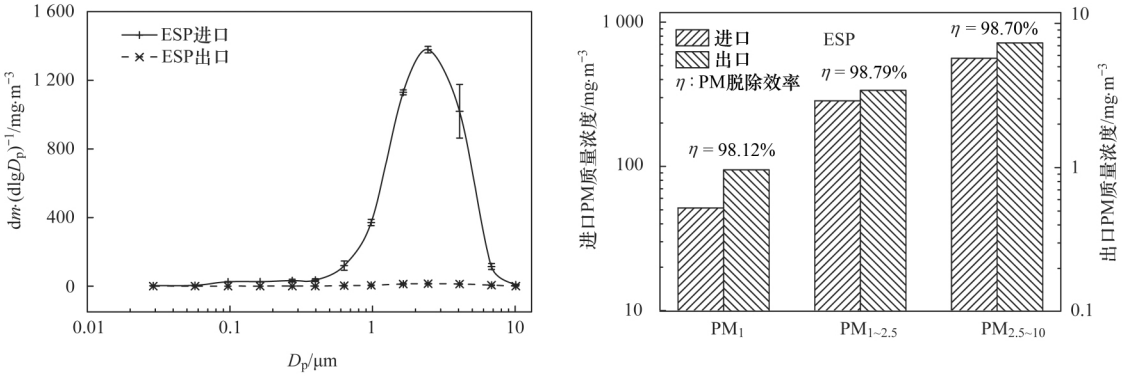


图 5 ESP 进出口 PM_{10} 质量粒径分布与颗粒物脱除效率

Fig. 5 Mass-size distribution of PM_{10} and PM removal efficiency of the ESP

粒径范围 0.1 ~ 1 μm 内的颗粒物处于扩散荷电与场致荷电机制的转变区内，荷电效果差，脱除效率低[27]. 图 6 为低低温 ESP 对 PM_{10} 的分级脱除效率. LLTe 投运后，0.1 ~ 1 μm 穿透窗口内颗粒物的脱除效率没有明显降低，LLTe 能够提高穿透区间内颗粒物的捕集效率[28].

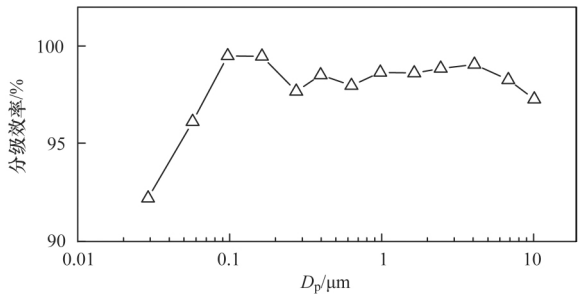


图 6 低低温电除尘颗粒物分级脱除效率

Fig. 6 Size-graded PM removal efficiency of the LLT-ESP

2.4 高效湿法脱硫塔(WFGD)

如表 1 所示，测试期间 WFGD 出口烟温 49℃，绝对湿度由 7.5% 增加到 12.0%，经过浆液淋洗 WFGD 出口烟气湿度饱和；脱硫系统烟气侧阻力 836 Pa，除雾器未出现堵塞现象.

WFGD 不但能脱除 SO_2，还具有除尘效果，除尘效果与脱硫塔的结构设计、运行工况、入口烟气条件(烟温、飞灰质量浓度等)有关. 表 4 是由 DCS 系统获得的 SO_2 脱除效率. 通过合理设计喷淋层、安装高效除雾器，可以大大减少烟气对石膏浆液的携带[29]，脱硫塔对颗粒物，尤其是粗颗粒的脱除效率得到提升. 脱硫塔对烟气中颗粒物质量浓度的影响如图 7 所示. 从粒径分布曲线上可以看出，WFGD 能脱除超微米颗粒物，但会增加 PM_1. 雾化喷嘴将脱硫浆液破碎为小液滴，这些液滴的烟气跟随性好，容易穿过除雾器，逃逸出脱硫塔[30]；此外塔内下行的脱硫浆液与热烟气逆流，蒸发形成亚微米浆液滴，吸收烟气中 SO_2 并转化为亚微米 $CaSO_4$ 晶体，这部分颗粒物容易从除雾器中逃逸，增加 PM_1 的排放[31].

表 4 WFGD 脱硫效率

Table 4 Desulfurization efficiency of WFGD

项目	WFGD 入口 SO_2/mg·m^{-3}	WFGD 出口 SO_2/mg·m^{-3}	脱硫效率/%
参数	853	15.4	98.2

本实验采用 DLPI、滤膜取样系统测得 WFGD 进口 PM_{10} 质量浓度为(11.72 ± 2.40) mg·m^{-3}(DLPI)和(9.40 ± 2.75) mg·m^{-3}(滤膜)；WFGD 出口 PM_{10} 质量浓度为(5.56 ± 1.53) mg·m^{-3}(DLPI)和(4.96 ± 1.87) mg·m^{-3}(滤膜)，两套取样系统的结果基本一致，DLPI 系统的结果略高. 实验采用的石英膜对粒径大于 300 nm 的颗粒的拦截效率较高，导致一部分超细颗粒物穿透石英膜未被捕集；同时拆装过程中石英膜表面的粉饼可能存在松散脱落情况，造成测量结果偏低[32].

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

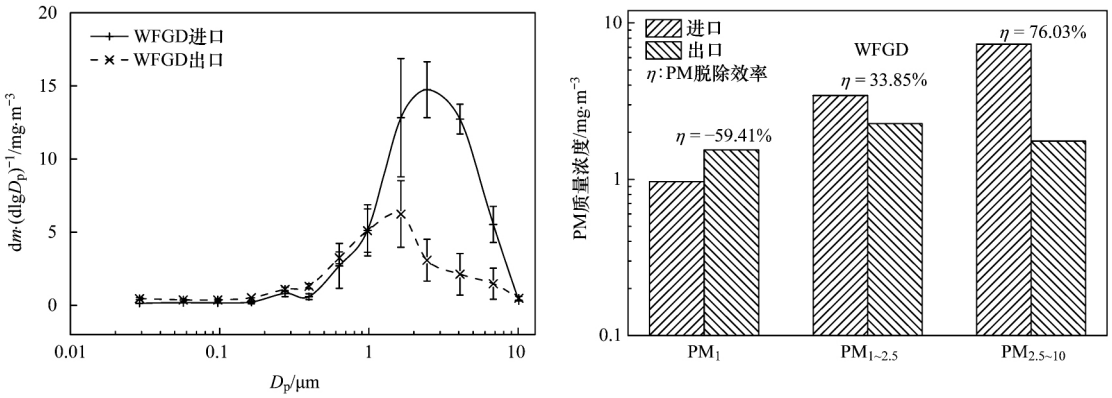


图 7　WFGD 进出口 PM_{10} 质量粒径分布与颗粒物脱除效率

Fig. 7　Mass-size distribution of PM_{10} and PM removal efficiency of WFGD

2017 年，针对燃煤电厂广泛采用的湿法脱硫技术是否对雾霾有重要贡献，国内学术界进行了激烈讨论[33,34]，促使 2018 年相关地区出台烟气消白政策[35]. WFGD 能够脱除 SO_2，但会增加烟气湿度，可能对环境造成不良影响.

WFGD 进出口 PM_{10} 中水溶性离子质量浓度如图 8 所示. 脱硫塔对 Na^+、Ca^{2+}、F^-、NO_3^- 有明显脱除作用，Na^+ 降低了 0.039 mg·m^{-3}，F^- 降低了 71%，脱硫喷淋浆液对烟气具有洗涤作用，可以脱除部分颗粒物，尤其是水溶性组分. 经过脱硫塔后，Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 分别增加了 0.084、0.048 和 0.022 mg·Nm^{-3}. 脱硫循环浆液中 Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 浓度最高，浆液在塔内强烈的传热传质作用下会蒸发、破碎形成细小的颗粒物，一部分穿过除雾器后转化为 PM_{10}，导致 WFGD 出口 PM_{10} 中水溶性组分升高. WFGD 出口 PM_{10} 中的水溶性 Ca^{2+} 浓度有所降低，前期研究表明脱硫塔出口烟气中含有大量的石膏颗粒，超低排放改造对除雾器进行了提效，将原有两层平板式除雾器改为两层屋脊式 + 一层管式除雾器，同时对脱硫塔内流场进行优化，能提高除雾器对石膏颗粒等细小颗粒物的脱除效果.

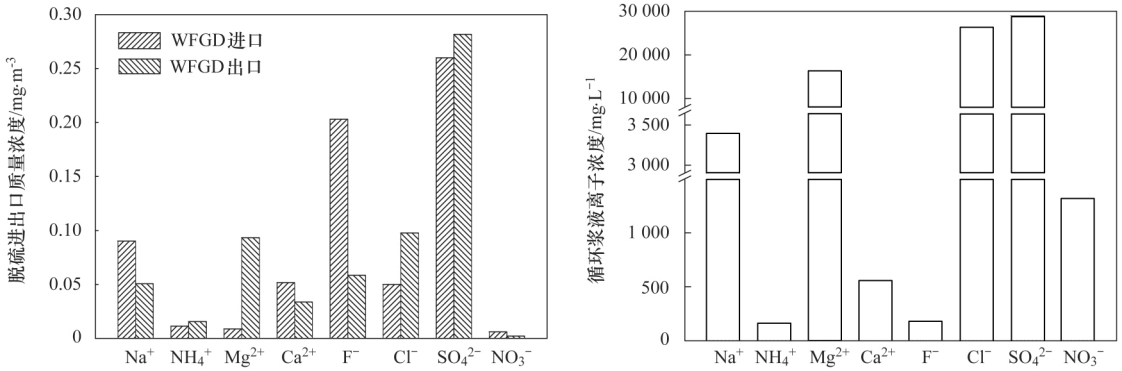


图 8　脱硫塔进出口 PM_{10} 中水溶性离子质量浓度和脱硫浆液离子成分

Fig. 8　Water-soluble ions concentrations of PM_{10} and ionic compositions of the desulfuration slurry

2.5　湿式静电除尘器(WESP)

WESP 是超低排放技术的最后一个烟气处理设备，由于烟气湿度高，液滴、颗粒物容易荷电，没有机械振打带来的二次扬尘，WESP 对低尘浓度烟气有较好的净化效果[36]. 测试期间，WESP 二次直流电压为 45 kV，二次电流1 057 ~ 1 240 mA. WESP 进出口 PM_{10} 的粒径分布曲线与脱除效率如图 9 所示. WESP 对不同粒径范围内的颗粒物均有较好的脱除效果，PM_1、$PM_{1\sim2.5}$、$PM_{2.5\sim10}$ 的脱除效率分别达到 55.77%、82.88%、45.01%. 80% 负荷下，该电厂烟囱入口最终排放的 PM_{10} 质量浓度为(2.04 ± 1.01) mg·m^{-3}(DLPI) 和(1.13 ± 0.92) mg·m^{-3}(滤膜)，低于近零排放要求的 5 mg·m^{-3}.

WESP 出口烟气 PM_{10} 中水溶性离子质量浓度与脱除效率如图 10 所示. WESP 出口烟气中 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 质量浓度相对较高，分别为 0.042 5、0.032 2、0.043 4 mg·m^{-3}，其中 NH_4^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、F^-、Cl^-、SO_4^{2-} 的脱除效率均超过了 60%.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

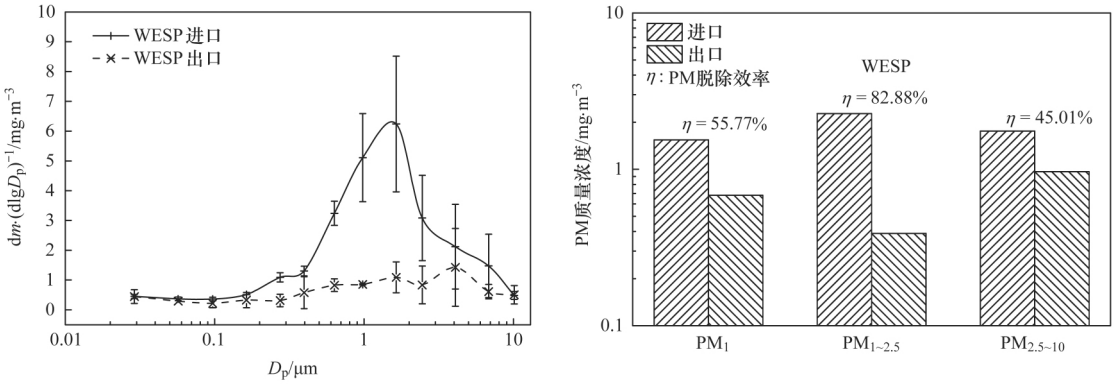


图 9 WESP 进出口 PM_{10} 质量粒径分布与颗粒物脱除效率

Fig. 9 Mass-size distribution of PM_{10} and PM removal efficiency of WESP

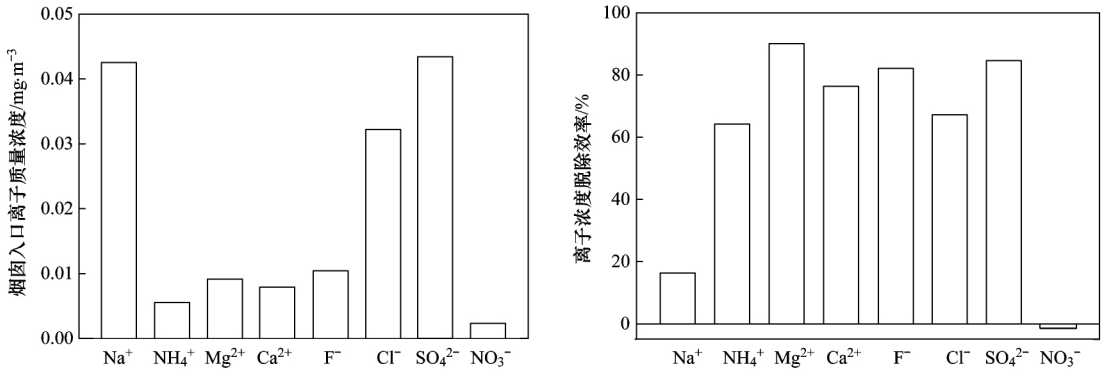


图 10 湿式静电除尘器出口 PM_{10} 中水溶性离子质量浓度与脱除效率

Fig. 10 Concentrations and removal efficiency of water-soluble ions in PM_{10} from WESP

3 结论

(1) SCR 和 WFGD 均会大幅增加 PM_1 质量浓度. SCR 催化剂能将 SO_2 氧化为 SO_3，与 NH_3 反应生成 $(NH_4)_2SO_4$、$(NH_4)HSO_4$，导致 SCR 出口 PM_1 增加; WFGD 中形成的亚微米脱硫浆液滴容易被烟气携带逃逸出脱硫塔，导致 PM_1 质量浓度升高，脱硫出口颗粒物中的水溶性组分受脱硫循环浆液影响.

(2) LLTe 通过烟气调质降低飞灰比电阻、增加 ESP 中烟气的停留时间，增强了 ESP 的颗粒物脱除效果，能显著提高 0.1 ~ 1 μm 粒径范围内颗粒物的脱除效率.

(3) WFGD 出口烟气湿度饱和，显著改善了 WESP 内颗粒物的荷电效果; WESP 采用阳极水膜除尘，降低了颗粒物二次携带. WESP 对 WFGD 出口低尘浓度烟气有较好的净化效果，各粒径范围内颗粒物的脱除效率均高于 45%.

参考文献:

[1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告(2017)[M]. 北京: 中国市场出版社，2017.

[2] 史妍婷，杜谦，高建民，等. 燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析[J]. 环境科学，2014，35(2): 470-474.
Shi Y T, Du Q, Gao J M, *et al*. Hazard evaluation modeling of particulate matters emitted by coal-fired boilers and case analysis[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 470-474.

[3] 李红祥，王金南，葛察忠. 中国"十一五"期间污染减排费用-效益分析[J]. 环境科学学报，2013，33(8): 2270-2276.
Li H X, Wang J N, Ge C Z. A cost-benefit analysis of the pollution reduction during the eleventh five-year period in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2270-2276.

[4] 国家发改委. 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]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140919_626240.html, 2014-09-12.

[5] 生态环境部. 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]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm, 2015-12-11.

[6] 王树民，刘吉臻. 燃煤电厂烟气污染物近零排放工程实践分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22): 6140-6147.
Wang S M, Liu J Z. Investigation of near-zero air pollutant emission characteristics from coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(22): 6140-6147.

[7] 赵磊，周洪光. 超低排放燃煤火电机组湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(2): 468-473.
Zhao L, Zhou H G. Particle removal efficiency analysis of wesp in an ultra low emission coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(2): 468-473.

[8] 张军，郑成航，张涌新，等. 某 1000MW 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.
Zhang J, Zheng C H, Zhang Y X, *et al*. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1000 MW coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(5): 1310-1314.

[9] 朱杰，许月阳，姜岸，等. 超低排放下不同湿法脱硫协同控制颗粒物性能测试与研究 [J]. 中国电力，2017，**50**(1)：168-172.
Zhu J, Xu Y Y, Jiang A, *et al*. Test and study on performance of wet FGD coordinated particulate matter control for ultra-low pollutants emission [J]. Electric Power, 2017, **50**(1): 168-172.

[10] 陈鸿伟，梁占伟，赵斌，等. 超低排放燃煤机组细颗粒物排放特性实验 [J]. 热力发电，2017，**46**(11)：108-113.
Chen H W, Liang Z W, Zhao B, *et al*. Experimental study on fine particle emission characteristics of ultra-low emission coal-fired units [J]. Thermal Power Generation, 2017, **46**(11): 108-113.

[11] 陈亚飞，陈怀珍，崔凤海. 煤炭行业标准《动力配煤导则》编制说明 [J]. 煤质技术，2006，(3)：19-21.
Chen Y F, Chen H Z, Cui F H. Coal trade standard《Guidance for steam coal blending》and its regimentation explaination [J]. Coal Quality Technology, 2006, (3): 19-21.

[12] DL/T 1520-2016，火电厂烟气中细颗粒物($PM_{2.5}$)测试技术规范 重量法 [S].
DL/T 1520-2016, Specifications for fine particles ($PM_{2.5}$) monitoring in the thermal power plants-gravimetric method [S].

[13] 胡月琪，邬晓东，王琛，等. 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 [J]. 环境科学，2016，**37**(5)：1653-1661.
Hu Y Q, Wu X D, Wang C, *et al*. Testing of concentration and characteristics of particulate matters emitted from stationary combustion sources in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1653-1661.

[14] Sui Z F, Zhang Y S, Peng Y, *et al*. Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant [J]. Fuel, 2016, **185**: 863-871.

[15] 蒋靖坤，邓建国，李振，等. 固定污染源排气中 $PM_{2.5}$ 采样方法综述 [J]. 环境科学，2014，**35**(5)：2018-2024.
Jiang J K, Deng J G, Li Z, *et al*. Sampling methods for $pm_{2.5}$ from stationary sources: a review [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 2018-2024.

[16] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 [J]. 环境科学，2015，**36**(5)：1544-1549.
Pei B. Determination and emission of condensable particulate matter from coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1544-1549.

[17] 黄文静，戴苏峰，艾春美，等. 电站燃煤锅炉全负荷 SCR 脱硝控制技术探讨 [J]. 节能技术，2015，**33**(2)：189-192.
Huang W J, Dai S F, Ai C M, *et al*. Discussion about SCR denitration control technology under full load in a coal-fired boiler [J]. Energy Conservation Technology, 2015, **33**(2): 189-192.

[18] 生态环境部. 火电厂氮氧化物防治技术政策 [EB/OL]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/wrfzjszc/201002/t20100201_185221.htm, 2010-01-27.

[19] 李晗天，宋蔷，姚强. SCR 反应器入口速度与氨分布不均匀性对脱硝性能的影响 [J]. 中国电机工程学报，2017，**37**(9)：2599-2607.
Li H T, Song Q, Yao Q. Influence of non-uniform distributions of inlet velocity and reductant on SCR $DeNO_x$ performance [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, **37**(9): 2599-2607.

[20] 段雷，马子轸，李振，等. 燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 [J]. 环境科学，2015，**36**(3)：1117-1122.
Duan L, Ma Z Z, Li Z, *et al*. Characteristics of water soluble inorganic ions in fine particles emitted from coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1117-1122.

[21] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al*. Effect of selective catalytic reduction (SCR) on fine particle emission from two coal-fired power plants in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **120**: 227-233.

[22] Xu Y S, Liu X W, Zhang Y, *et al*. Field measurements on the emission and removal of $PM_{2.5}$ from coal-fired power stations: 3. Direct comparison on the PM removal efficiency of electrostatic precipitators and fabric filters [J]. Energy & Fuels, 2016, **30**(7): 5930-5936.

[23] 束航，张玉华，杨林军，等. SCR 烟气脱硝对 $PM_{2.5}$ 排放特性的影响机制研究 [J]. 燃料化学学报，2015，**43**(12)：1510-1515.
Shu H, Zhang Y H, Yang L J, *et al*. Effects of SCR-$DeNO_x$ system on emission characteristics of fine particles [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, **43**(12): 1510-1515.

[24] 潘凤萍，陈华忠，庞志强，等. 燃煤电厂锅炉中颗粒物在选择性催化还原、静电除尘器和烟气脱硫入口处的分布特性 [J]. 中国电机工程学报，2014，**34**(32)：5728-5733.
Fan F P, Chen H Z, Pang Z Q, *et al*. Distribution characteristics of particulate matter at the inlet of SCR, ESP and FGD in a coal-fired power plant boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, **34**(32): 5728-5733.

[25] 张杨，杨用龙，冯前伟，等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝改造工程关键技术 [J]. 中国电力，2015，**48**(4)：32-35.
Zhang Y, Yang Y L, Feng Q W, *et al*. Key technical issues of SCR denitrification from coal-fired boiler flue gas [J]. Electirc Power, 2015, **48**(4): 32-35.

[26] 朱唯卓，沈之旸，严佩，等. 高温烟气中颗粒静电脱除特性的实验研究 [J]. 中国环境科学，2016，**36**(4)：1009-1016.
Zhu W Z, Sheng Z Y, Yan P, *et al*. Experimental investigation on particle collection performance of electrostatic precipitator at high temperatures [J]. China Enviromental Science, 2016, **36**(4): 1009-1016.

[27] 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. Case study for a 1000 MW ultrasupercritical utility boiler [J]. Energy & Fuels, 2016, **30**(8): 6547-6554.

[28] Qi Z F, Li J W, Wu D L, *et al*. Particulate matter emission characteristics and removal efficiencies of a low-low temperature electrostatic precipitator [J]. Energy & Fuels, 2017, **31**(2): 1741-1746.

[29] 王树民，宋畅，陈寅彪，等. 燃煤电厂大气污染物"近零排放"技术研究及工程应用 [J]. 环境科学研究，2015，**28**(4)：487-494.
Wang S M, Song C, Chen Y B, *et al*. Technology research and engineering applications of near-zero air pollutant emission coal-fired power plants [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(4): 487-494.

[30] 欧阳丽华，庄烨，刘科伟，等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析 [J]. 环境科学，2015，**36**(6)：1975-1982.
Ouyang L H, Zhuang Y, Liu K W, *et al*. Analysis on mechanism of rainout carried by wet stack of thermal power plant [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1975-1982.

[31] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al*. Influence of flue gas desulfurization (FGD) installations on emission characteristics of $PM_{2.5}$ from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction (SCR) [J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 655-662.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[32] 刘含笑，姚宇平，郦建国. 燃煤电厂低浓度颗粒物测试的空白实验研究[J]. 中国电力，2017，**50**(7)：115-121.
Liu H X，Yao Y P，Li J G. Study on blank test of low-concentration particulate matter gravimetric testing for coal-fired power plants[J]. Electric Power，2017，**50**(7)：115-121.

[33] 朱法华. 煤电湿法脱硫是治霾功臣[N]. 中国能源报，2017-09-11(05).

[34] 何平，李树生，朱维群，等. 湿法脱硫如何导致大面积雾霾[J]. 科学与管理，2017，**37**(6)：7-11.
He P，Li S S，Zhu W Q，*et al*. How wet desulfurization cause large area smog[J]. Science and Management，2017，**37**(6)：7-11.

[35] 邯郸市环境保护局. 我市启动2018年大气污染综合治理攻坚 开展十大专项行动[EB/OL]. http://www.hbj.hd.gov.cn/main/detail/71387，2018-03-19.

[36] 李清毅，胡达清，张军，等. 超低排放脱硫塔和湿式静电对烟气污染物的协同脱除[J]. 热能动力工程，2017，**32**(8)：138-143.
Li Q Y，Hu D Q，Zhang J，*et al*. Synergistic removal of WFGD and WESP on gas pollutants with ultra low emission[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2017，**32**(8)：138-143.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net