



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201903055

中图分类号 X513

文献标识码 A

高星, 刘潇, 武新斌, 等. 燃煤电厂典型超低排放除尘技术组合下的尘排放特性[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 181-188.
GAO Xing, LIU Xiao, WU Xinbin, et al. Dust emission characteristics of typical dust ultra-low emission technology configurations in coal-fired plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 181-188.

燃煤电厂典型超低排放除尘技术组合下的尘排放特性

高星¹, 刘潇^{1,*}, 武新斌², 常彬杰¹, 刘之琳^{1,3}, KU Anthony¹, 矫卫东¹, 陈立林², 赵福明², 高圣铭²

1. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211

2. 神华地质勘查有限责任公司(中国神华生态环境遥感监测中心), 北京 102211

3. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

第一作者: 高星(1989—), 女, 硕士, 助理工程师。研究方向: 燃煤电厂大气污染防治。E-mail: gaoxing@nicenergy.com

*通信作者: 刘潇(1982—), 男, 博士, 工程师。研究方向: 煤基大气污染物防治。E-mail: liuxiao@nicenergy.com

摘要 为研究典型超低排放除尘技术组合下的尘排放特性, 梳理了目前超低排放除尘技术改造的主流技术路线, 归纳出典型的 7 种改造技术路线。依据典型的改造技术路线, 选择了 27 台在 2015—2017 年完成改造的燃煤发电机组, 并对其烟尘排放进行长期的连续监测, 根据机组长期运行的排放表现对典型超低排放除尘技术路线的实际减排效果进行量化对比分析。结果表明, 7 种除尘改造技术路线均可达到控制烟尘排放浓度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下的超低排放标准, 其中路线 6 改造后尘浓度控制在 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。对减排效率的研究表明, 各技术路线改造后的减排效率均可达到 99.97% 以上, 计算得到机组的平均排放因子为 $0.0257 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ (95% 置信区间 $0.0254 \sim 0.0261 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$), 其中路线 6 的排放因子最低, 为 $0.0086 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ (95% 置信区间 $0.0084 \sim 0.0088 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。

关键词 煤电机组; 清洁煤电; 超低排放 (ULE); 除尘技术; 排放因子; 除尘效率

近年来, 我国大气污染形势严峻^[1-4], 其中煤炭消费一直被认为是导致大气污染物的最主要排放源之一^[5-6]。由于我国煤炭约一半用于发电^[7], 因此, 燃煤发电一直以来被认为是重要的排放源, 与大气污染治理密切相关。为减少燃煤电厂污染物排放对环境的污染, 自 2011 年以来, 国家先后颁布一系列政策法规^[8-10]。2015 年印发的《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》^[10]要求, 到 2020 年, 全国所有具备改造条件的燃煤电厂力争实现超低排放。随后, 国内火电厂积极响应, 推出了一系列超低排放改造技术路线^[11-13], 取得了良好的减排效果。

对尘排放的控制是超低排放改造中的难点, 故尘排放特征的研究备受关注。赵磊等^[14]对 1 台加装湿式电除尘器的机组尘排放进行了研究, 发现加装湿式电除尘器后烟气中尘浓度降至 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 满足超低排放标准; 王树民等^[15]对三河电厂 4 台机组不同的超低排放改造技术进行研究, 发现低温静电除尘、脱硫除尘一体化系统、湿式电除尘器安装后尘排放浓度均可达到超低排放要求; SUI 等^[16]对 1 台装有低温省煤器、高频电源和湿式电除尘器的煤电机组尘排放效率进行了研究, 发现各减排设备对烟气中尘排放具有协同脱除效果。

目前,尘排放特性的研究仍存在以下几点不足:1)通常都针对特定机组进行研究,无法反映整体排放水平;2)数据基础时间跨度短、信息不全面,无法准确反映实际运行情况;3)缺乏对超低排放除尘技术中包含的多种设备及技术组合的综合效果比较,对后续机组改造而言,参考价值不高。本研究选取了不同规模的27台煤电机组,根据其详细技术改造信息归纳出7种除尘技术组合路线,并基于各机组2年内的连续排放数据及运行情况,对各种路线下的尘排放特征进行对比研究,得到各路线的尘排放特性,为后续燃煤机组改造提供参考;同时计算了运行条件下超低排放机组的尘排放因子,为提高环评、规划和模拟等工作效率建立基础。

1 除尘技术及协同除尘

在超低排放提出之前,国内电厂几乎都配备了除尘设施。为实现超低排放,除尘改造既考虑了除尘技术,也考虑了脱硝、脱硫设备对除尘的协同作用^[17]。表1总结了主流的超低排放除尘技术及协同除尘技术。

表1 除尘技术及协同除尘技术

Table 1 Dust controlling technologies and cooperative dust controlling technologies

除尘技术	改造内容	除尘效率	技术特点
干式静电除尘技术(ESP)升级增效	工频电源改造为高频电源 ^[18]	较改造前提高30%~70% ^[19]	同时具有节约电耗的效果 ^[20-21]
干式静电除尘技术(ESP)升级增效	电极改造为旋转电极 ^[22]	除尘效率99.85%以上 ^[23]	避免反电晕、二次扬尘;可脱除黏性大、高比阻 ^[24] 烟尘
低低温静电除尘技术(LLTESP)	在ESP前增加低温省煤器或烟气换热装置 ^[21]	对0.1~1 μm细颗粒物,除尘效率可达90% ^[25]	提高对SO ₃ 的脱除率 ^[26] ;同时具有节能效果 ^[27]
湿式静电除尘技术(WESP)	加装湿式电除尘器	除尘效率99.9%以上 ^[28-29]	可脱除黏性大、比电阻高的粉尘,对SO ₃ 和烟气中的气溶胶协同脱除 ^[30] ,可以避免管道和烟囱被腐蚀 ^[31]
脱硫除尘一体化技术(SPC)	原有脱硫塔加装离心式管束除尘除雾装置、高效节能喷淋装置及高效旋汇耦合脱硫除尘装置	除尘效率约85.5% ^[32]	改造周期短、投资低、能耗低
石灰石-石膏法湿式脱硫(WFGD)协同除尘技术	入口烟道改造、增设湍流层及增效环、除雾器改造等	PM ₁₀ 脱除效率约51.39%PM _{2.5} 约为16.88% ^[33]	缺点:出口烟气中含有石膏颗粒 ^[16,34]
海水脱硫(SFGD)协同除尘技术	3层除雾器、海水分配器、烟气换热器改造等	协同除尘效率50%以上 ^[35]	不需要添加任何化学添加剂、对附近海域并无明显影响 ^[36-37] (局限:需要在海洋扩散条件较好的区域才适用)

2 研究方法及数据采集

2.1 研究方法

烟气最终除尘效果取决于减排系统的整体协同作用,因此,本研究的除尘方法是将除尘效果有关的各减排技术分类结合,形成7种除尘技术组合路线进行综合分析。

本研究调研了分布在全国各地的27台现役燃煤发电机组的除尘技术组合路线信息,机组负荷为215~1 000 MW,基本涵盖了目前主流燃煤发电机组。机组信息及其超低排放除尘技术组合路线如表2所示。

本研究将针对7种除尘技术组合路线展开研究,对各路线下改造前后尘排放浓度、减排效率、排放因子进行对比分析,比较改造前后的指标变化;通过对改造前后不同路线下机组长时间

连续排放表现进行对比, 分析各除尘技术路线的工程实践效果。

2.2 采集数据内容

本研究采集的数据内容如表 3 所示, 采集了 27 台机组从 2015 年初至 2017 年的连续尘排放数据、各机组的每日耗煤量数据及各机组燃用煤的煤质数据, 通过各机组长期运行时的尘排放情况, 分析各除尘技术组合路线的工程实际表现。

在进行数据分析前, 根据装置运行记录筛选数据, 将非正常工况数据剔除。采集数据中尘排放数据包括尘排放浓度和烟气流量, 均为实时监测数据。实时监测的原始数据间的时间间隔为 2~20 s, 在分析前, 统一将 1 h 内的排放浓度进行均值计算; 烟气流量数据需要将连续排放数据根据烟气含氧量和环境温度、压力折算成为标态下的烟气量数据。

表 4 列出了 27 台超低排放机组的年均耗煤量以及主要煤质数据, 单机组年入炉煤量逐日逐机组统计。本研究中的尘减排效率根据入炉煤量和入炉煤灰分计算得出, 尘排放因子根据尘排放量和标准煤耗量计算得出, 其中尘排放量根据尘排放浓度和烟气流量得出, 标准煤耗量根据入炉煤低位发热量和标准煤的低位发热量计算得出。

2.3 分析方法

本研究中除尘效率根据式 (1)~式 (3) 进行计算。

$$\eta = (E_{\text{总}} - E_{\text{排}}) / E_{\text{总}} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{\text{总}} = 6.9A \cdot M_{\text{煤}} \quad (2)$$

$$E_{\text{排}} = C_{\text{尘}} \cdot Q / 1000 \quad (3)$$

式中: η 为日均除尘效率; $E_{\text{总}}$ 为未经过减排措施控制前的尘排放量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; $E_{\text{排}}$ 为减排后实际监测结果计算得到的尘排放量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; $M_{\text{煤}}$ 为机组入炉煤量, $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$; A 为机组燃用煤的入炉煤灰分; $6.9A$ 为煤粉炉在未经减排措施控制时的排放因子^[38], $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; $C_{\text{尘}}$ 为机组的尘排放浓度, $\text{mg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; Q 为机组烟气流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表 2 燃煤机组超低排放除尘技术组合路线

Table 2 Dust ultra-low emission technology configurations of the coal-fired power units

除尘技术路线分类	机组	机组负荷/MW	除尘技术组合路线
路线1	机组1	215	ESP+SFGD
路线1	机组2	215	ESP+SFGD
路线1	机组3	320	ESP+SFGD
路线1	机组4	320	ESP+SFGD
路线2	机组5	330	ESP+WFGD
路线2	机组6	330	ESP+WFGD
路线2	机组7	330	ESP+WFGD
路线2	机组8	330	ESP+WFGD
路线2	机组9	530	ESP+WFGD
路线2	机组10	530	ESP+WFGD
路线2	机组11	1 000	ESP+WFGD
路线2	机组12	1 000	ESP+WFGD
路线2	机组13	1 000	ESP+WFGD
路线3	机组14	600	ESP+WFGD+WESP
路线3	机组15	600	ESP+WFGD+WESP
路线3	机组16	600	ESP+WFGD+WESP
路线3	机组17	600	ESP+WFGD+WESP
路线3	机组18	660	ESP+WFGD+WESP
路线3	机组19	660	ESP+WFGD+WESP
路线4	机组20	300	LLTESP+WFGD
路线5	机组21	300	LLTESP+WFGD+WESP
路线5	机组22	320	LLTESP+WFGD+WESP
路线5	机组23	320	LLTESP+WFGD+WESP
路线6	机组24	630	LLTESP+SPC+WESP
路线6	机组25	630	LLTESP+SPC+WESP
路线7	机组26	1 000	ESP+SPC
路线7	机组27	1 000	ESP+SPC

表 3 连续排放数据内容

Table 3 Content of continuous emission data

数据内容	数据质量
机组运行工况	记录机组非正常运行时间段
尘排放浓度	实时监测数据(数据的时间间隔2~20 s)
烟气流量	实时监测数据(数据的时间间隔2~20 s)
机组入炉煤量	日均数据
煤质数据	年均数据

本研究中尘排放因子根据式(4)和式(5)进行计算。

$$F_{EF} = E_{排}/M_{标煤} = (C_{尘} \cdot Q)/M_{标煤} \quad (1)$$

$$M_{标煤} = (Q_L/Q_{L标煤}) \cdot M_{煤} \quad (2)$$

式中： F_{EF} 为机组日均尘排放因子， $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ； $M_{标煤}$ 为机组消耗的标准煤的量， $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ； Q_L 为机组入炉煤低位发热量， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $Q_{L标煤}$ 为标煤低位发热量，取值29 307.6 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 排放浓度

将27台机组超低排放改造前后的实时尘排放浓度数据按照7种除尘技术组合路线分类进行数据分析。图1为7种路线改造前后的尘排放浓度数据分布箱线图，箱图框的下、上边界代表第1个四分位数(Q_1)和第3个四分位数(Q_3)，框内的横线为中位数(Q_2)；四分位距为 $Q_3 - Q_1$ ，记作 r ，箱图框上、下方的横线分别代表 $Q_3 + 1.5r$ 的最大值和 $Q_1 - 1.5r$ 的最小值；横线上、下方的小圆圈表示相较于其他值偏大或偏小的值，通常称为离群值；由图1可以得到数据的中心趋势及发散情况。由图1(a)可知，在改造前，尘排放浓度数据的 r 为5~20 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，且仅存在少数超过30 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时间段。可见，本研究采集的机组在未进行改造前就依据2012年开始实施的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)要求，采取了一定减排措施，控制尘排放浓度在30 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的限值以下(重点地区为20 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。由图1(b)可知，经过改造后，数据分布较改造前更加集中，7种技术组合路线均能使尘排放浓度稳定在10 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下，且排放浓度数据的 r 为1~4 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，其中路线6改造后尘排放浓度分布范围最窄，尘排放浓度不超过2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3.2 除尘效率

图2是以日均排放数据为基础，结合煤质数据，根据2.3节中式(1)~式(3)计算所得的除尘效率。由图2可知，应用除尘技术组合路线改造前，平均除尘效率均已达到99.87%以上，效率可提高的空间很小，除尘技术改进难度较大；应用除尘技术组合路线改造后，平均

表4 机组燃用煤质信息

Table 4 Coal quality parameter of the coal-fired power units

机组	年入炉煤量/t	入炉煤灰分/%	入炉煤低位发热量/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
机组1	590 900	26.89	20 559
机组2	606 200	26.89	20 559
机组3	745 100	26.89	20 559
机组4	861 100	26.89	20 559
机组5	1 590 000	31.7	16 294
机组6	1 590 000	31.7	16 294
机组7	1 590 000	31.7	16 294
机组8	1 590 000	31.7	16 294
机组9	1 866 000	13.53	22 190
机组10	1 540 200	13.53	22 190
机组11	1 349 700	13.27	21 552
机组12	1 890 600	13.27	21 552
机组13	2 381 900	19.1	20 980
机组14	562 900	9.18	15 110
机组15	812 200	9.18	15 110
机组16	689 000	19.2	22 052
机组17	728 000	19.2	22 052
机组18	547 100	11.65	23 790
机组19	484 100	11.65	23 790
机组20	670 400	12.24	21 979
机组21	644 000	12.24	21 979
机组22	827 200	15.19	21 510
机组23	665 000	15.19	21 510
机组24	1 577 900	10.7	24 136
机组25	1 577 900	10.7	24 136
机组26	968 100	13.7	21 334
机组27	780 600	13.7	21 334

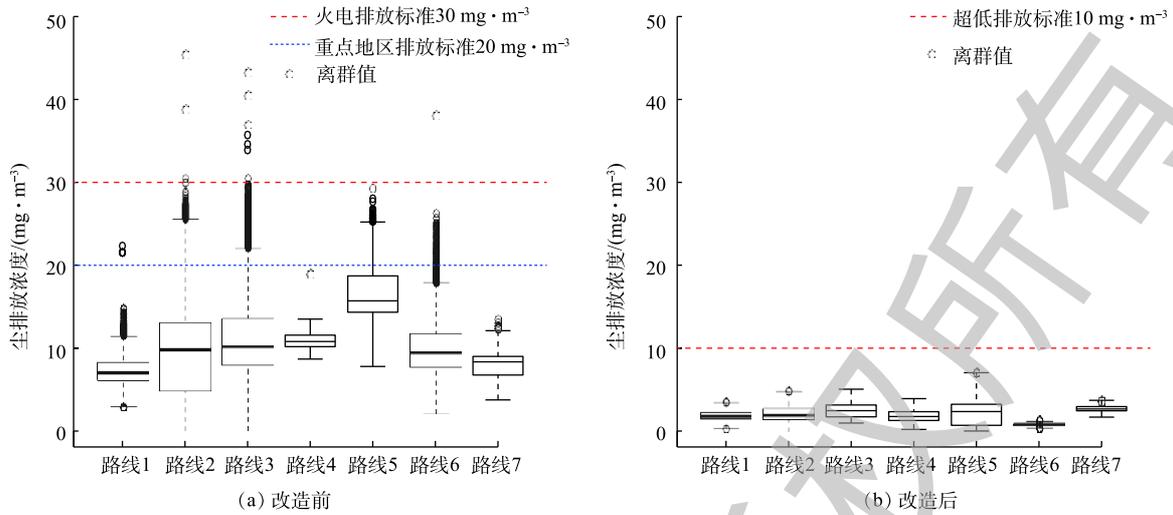


图 1 各除尘技术路线改造前后烟尘排放浓度分布

Fig. 1 Dust concentration distribution of different ULE configurations

除尘效率均达到 99.97% 以上，其中路线 1 和路线 6 的除尘效率最高，均值都达到 99.99% 以上。7 种技术组合路线实施前后相比，除尘效率平均提高 0.072%。

由图 2 可知，改造前除尘效率的大小可作为选择除尘技术路线的参考，对改造前除尘效率已经较高的机组 (除尘效率大于 99.90%) 来说，只须对原有的减排设备进行改造，不新增除尘设备便可达到超低排放标准。图 2 中选择路线 1、路线 2、路线 7 的机组，在改造前，其减排效率均较高，分别为 99.957%、99.937%、99.931%，故这 3 种路线的改造内容均较小。

运行结果表明，改造后可达到超低排放标准并稳定运行，改造后除尘效率分别提高 0.034%、0.048%、0.048%。

对于改造前除尘效率较低的机组而言 (除尘效率低于 99.90%)，要达到超低排放标准，仅对原有设备进行增效改造无法保证达到标准，增加新的高效除尘设备在所难免。选择路线 3 的机组在改造前除尘效率为 99.884%，因此，增加 WESP 以增强除尘效果，改造后减排效率提高 0.096%；对于选择路线 4 和路线 5 的机组，其改造前的除尘效率分别为 99.900%、99.878%，为达到排放标准，2 种路线都选择了增加低温省煤器，由于选择路线 5 的机组除尘效率更低，因此，多增加了 WESP，改造后 2 种路线的减排效率分别提高 0.071%、0.10%。对于路线 6，改造前除尘效率为 99.886%，此路线机组改造时，不但对原有减排设备进行了增效改造，同时使用了 SPC 系统，新增低温省煤器，新增 WESP，较之其他路线，改造内容最多，增加新设备最多，改造后除尘效率提高 0.11%，改造效果最显著。对比路线 2 和路线 4、路线 3 和路线 5，发现增加低温省煤器可有效提高除尘效率；对比路线 2 和路线 3、路线 4 和路线 5，发现增加 WESP 后，除尘效率提高显著。

综上，除尘效率是多种技术减排技术的综合体现，包括除尘技术及脱硝、脱硫技术对除尘的协同作用，机组改造前的除尘效率对机组进行超低排放除尘技术路线选择具有指导意义：对于改造前除尘效率已较高 ($\geq 99.90%$) 的机组，超低排放除尘技术组合路线偏向升级原有设备；而对于

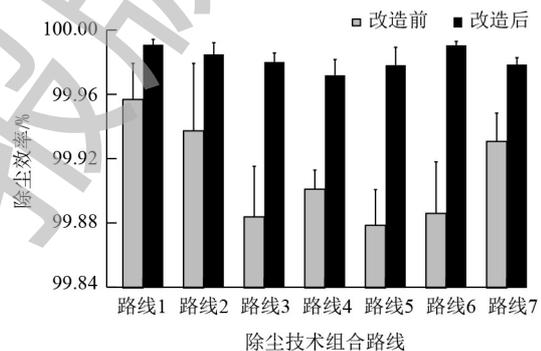


图 2 各除尘技术路线改造后除尘效率

Fig. 2 Dust-exhaust efficiency of different ULE configurations

改造前除尘效率较低 ($\leq 99.90\%$) 的机组, 电厂为保证满足超低排放标准, 倾向于增加低温静电除尘设备及湿式静电除尘器等新型高效除尘设备。机组超低排放技术路线选择时, 可以根据上述分析, 同时结合机组原有减排设备配置情况、改造空间及脱硝、脱硫效率等进行综合分析后确定最终改造路线。

3.3 排放因子

图3是以日均排放数据为基础, 结合入炉煤量及煤质数据, 根据2.3节中式(4)和式(5)计算所得的不同技术组合路线下的日均尘排放因子数据分布情况。表5列出了计算所得的各路线的排放因子均值和置信区间数据。由图3可知, 虽然各不同技术组合路线间计算所得的排放因子分布存在一定的差异, 但排放因子整体分布在 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 以下, 除路线6的排放因子明显低于其他路线以外, 各路线改造后的排放因子平均水平相差不大, 其上四分位和下四分位分布在 $0.01\sim 0.05 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$, 分布范围较窄。这表明, 超低排放改造后, 在一定程度上降低了机组对燃用煤质及运行工况的敏感度。

超低排放改造后, 燃煤机组平均尘排放因子为 $0.0257 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (95% 置信区间为 $0.0254\sim 0.0261 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$)。由表5可知, 由于路线6综合了多种不同的除尘技术, 其排放因子最低, 约为其他改造路线的 $1/3$ 。

4 结论

1) 采集了27台燃煤发电机组2015—2017年连续监测数据(尘排放浓度、烟气流量、机组入炉煤量等)及燃煤数据, 采集的机组负荷包括215~1000 MW, 机组实现尘超低排放的技术路线涵盖了7种国内除尘主流技术组合。本研究所得到的结果具备一定的代表性, 可以反映目前我国超低排放机组的尘排放普遍水平。

2) 根据尘排放浓度数据分析可见, 7种技术路线均可满足尘排放浓度小于 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的超低排放标准, 其中路线6组合了所有高效除尘技术, 排放浓度最低, 因此, 改造后平均排放浓度不超过 $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 从尘减排效率方面分析, 改造后机组平均除尘效率均达到 99.97% 以上, 其中路线1和路线6的除尘效率最高, 均值都达到 99.99% 以上。机组改造前的除尘效率对机组进行超低排放除尘技术路线选择具有指导意义, 改造前除尘效率为 99.90% 以上的电厂倾向在原有减排设备基础上进行提效; 改造前除尘效率低于 99.90% 的电厂则倾向于新增 LLTESP、WESP 等高效除尘技术组合, 机组进行超低排放技术路线选择时, 可结合原有减排设备配置情况、改造空间及脱硫、脱硝效率等综合分析。

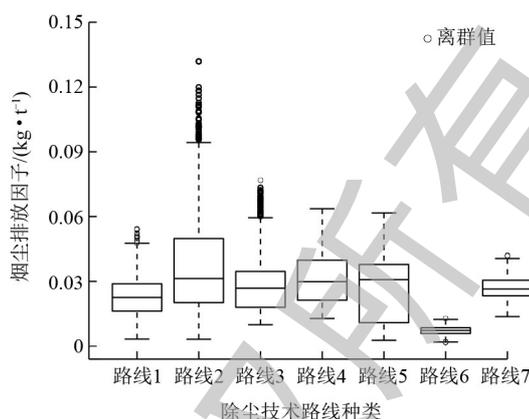


图3 各除尘技术路线改造后烟尘排放因子

Fig. 3 Dust emission factors of different ULE configurations

表5 各除尘技术组合路线的尘排放因子

Table 5 Dust emission factors after ULE configurations

技术种类	平均排放因子 改造后/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	排放因子95% 置信区间/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
ESP+SFGD	0.023 4	0.022 9~0.024 0
ESP+WFGD	0.029 0	0.028 0~0.029 9
ESP+WFGD+WESP	0.026 7	0.026 2~0.027 3
LLTESP+WFGD	0.030 4	0.028 7~0.032 2
LLTESP+WFGD+WESP	0.031 4	0.030 0~0.032 8
LLTESP+SPC+WESP	0.008 6	0.008 4~0.008 8
SPC	0.027 4	0.026 8~0.028 0
平均	0.025 7	0.025 4~0.026 1

4) 从尘排放因子方面分析, 27 台机组的平均尘排放因子为 $0.0257 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (95% 置信区间 $0.0254\sim 0.0261 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$), 各路线的平均尘排放水平差别不大, 其中路线 6 的尘排放因子最低, 为 $0.0086 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ (95% 置信区间 $0.0084\sim 0.0088 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$)。本研究从机组规模到除尘技术路线涵盖了目前国内超低排放燃煤发电机组的普遍情况, 故本研究可以一定程度上体现我国超低排放机组的尘排放整体特征。

参 考 文 献

- [1] LAI H K, TSANG H, THACH T Q, et al. Health impact assessment of exposure to fine particulate matter based on satellite and meteorological information[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2014, 16(2): 239-246.
- [2] MADANIYAZI L, NAGASHIMA T, GUO Y M, et al. Projecting fine particulate matter-related mortality in east China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11141-11150.
- [3] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 1-8.
- [4] 杜鹏瑞, 杜睿, 任伟珊. 城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2815-2827.
- [5] LEE S W, HERAGE T, DUREAU R, et al. Measurement of $\text{PM}_{2.5}$ and ultra-fine particulate emissions from coal-fired utility boilers[J]. *Fuel*, 2013, 108: 60-66.
- [6] NIU Y Q, YAN B K, LIU S Q, et al. Ultra-fine particulate matters(PMs) formation during air and oxy-coal combustion: Kinetics study[J]. *Applied Energy*, 2018, 218: 46-53.
- [7] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [9] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [10] 国家发展改革委, 环境保护部, 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)[EB/OL]. [2019-03-01]. <http://www.askci.com/news/chanye/2014/09/19/174447vfq1.shtml>.
- [11] 朱法华, 王临清. 煤电超低排放的技术经济与环境效益分析[J]. *环境保护*, 2014, 42(21): 28-33.
- [12] 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.
- [13] 赵永椿, 马斯鸣, 杨建平, 等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2629-2640.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 舒英钢, 刘卫平, 酆建国. 燃煤电厂烟气超低排放技术路线研究[C]//中国国际贸易促进委员会电力行业委员会, 中国电力企业联合会节能环保分会. 2015年电力行业节能环保论坛暨技术应用交流会论文集, 2015: 423-429.
- [18] 乔加飞, 周洪光. “近零排放”技术路线探索[J]. *环境影响评价*, 2015, 37(4): 1-4.
- [19] 姜雨泽, 韩乃民, 王新美. 燃煤电厂电除尘采用高频电源供电的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(9): 2069-2072.
- [20] 王临清, 朱法华, 赵秀勇. 燃煤电厂超低排放的减排潜力及其 $\text{PM}_{2.5}$ 环境效益[J]. *中国电力*, 2014, 47(11): 150-154.
- [21] 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.
- [22] 姚淑勇, 郭峰, 徐小峰, 等. 旋转电极式电除尘器性能及可靠性研究[J]. *电站系统工程*, 2012, 28(2): 73-74.
- [23] 栾立海, 李颖, 洪刚. 旋转电极电除尘技术在660 MW火电机组的应用[J]. *锅炉技术*, 2015, 46(增刊1): 59-61.
- [24] 朱法华, 王圣. 煤电大气污染物超低排放技术集成与建议[J]. *环境影响评价*, 2014, 36(5): 25-29.
- [25] 龙辉, 王盾, 钱秋裕. 低低温烟气处理系统在1000 MW超超临界机组中的应用探讨[J]. *电力建设*, 2010, 31(2): 70-73.

- [26] 胡斌, 刘勇, 任飞, 等. 低低温电除尘协同脱除细颗粒与SO₃实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4319-4325.
- [27] 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.
- [28] 刘媛, 闫骏, 井鹏, 等. 湿式静电除尘技术研究及应用[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6): 83-88.
- [29] 赵琴霞, 陈招妹, 周超炯, 等. 湿式电除尘技术及其在电厂的应用前景探讨[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(4): 24-26.
- [30] 雒飞, 胡斌, 吴昊, 等. 湿式电除尘对PM_{2.5}/SO₃酸雾脱除特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 91-97.
- [31] 金定强, 舒喜, 申智勇, 等. 湿式静电除尘器在火电厂大型机组中的应用[J]. 环境工程, 2015, 33(3): 65-72.
- [32] 孟令媛, 朱法华, 张文杰, 等. 基于SPC-3D技术的烟气超低排放工程性能评估[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(1): 13-16.
- [33] 郑钦臻. 燃煤锅炉电除尘器及湿法脱硫对微细颗粒物控制与排放特征的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [34] 武春锦, 吕武华, 梅毅, 等. 湿法烟气脱硫技术及运行经济性分析[J]. 化工进展, 2015, 34(12): 4368-4374.
- [35] 郑晓盼, 高翔, 郑成航, 等. 基于燃煤电厂“超低排放”的海水脱硫系统性能评估与建议[J]. 环境影响评价, 2015, 37(4): 9-13.
- [36] 孙双双, 张少峰, 唐猛, 等. 海水脱硫工艺的研究[J]. 现代化工, 2015, 35(9): 131-134.
- [37] 郭娟, 袁东星, 陈进生, 等. 燃煤电厂海水脱硫工艺的排水对海域环境的影响[J]. 环境工程学报, 2008, 2(5): 707-711.
- [38] ZHAO Y, WANG S X, CHRIS P N, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44: 1515-1523.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Dust emission characteristics of typical dust ultra-low emission technology configurations in coal-fired plants

GAO Xing¹, LIU Xiao^{1*}, WU Xinbin², CHANG Binjie¹, LIU Zhilin^{1,3}, KU Anthony¹, JIAO Weidong¹, CHEN Lilin², ZHAO Fuming², GAO Shengming²

1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China

2. Shenhua Geological Exploration Company (Shenhua Environment Remote Sensing and Monitoring Center), Beijing 102211, China

3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Corresponding author, E-mail: liuxiao@nicenergy.com

Abstract In order to study dust emission characteristics of typical dust ultra-low emission technology configurations, the essential technical routes for the current ultra-low emission (ULE) control technologies innovation were reviewed, and 7 typical technical innovation configurations were generalized. Then 27 coal-fired power units completing the technical innovation in 2015—2017 were selected to monitor their continuous hourly dust emission data and analyze the actual emission performances of these different ULE configurations. The results indicated that 7 ULE configurations could meet the ULE limit with dust emission concentration lower than 10 mg·m⁻³, of which ULE configuration 6 could lead to averaged dust emission concentration lower than 2 mg·m⁻³. Averaged dust reduction efficiency of 7 ULE configurations could reach 99.97%, and the calculated averaged dust emission factor of above 27 units was 0.025 7 kg·t⁻¹ of standard coal (95% confidence intervals 0.025 4~0.026 1 kg·t⁻¹), and the lowest one occurred for ULE configuration 6 with a value of 0.008 6 kg·t⁻¹ of standard coal (95% confidence intervals 0.008 4~0.008 8 kg·t⁻¹).

Keywords coal-fired power plants; clean coal-fired power; ultra-low emission (ULE); dust controlling technology; emission factor; dust removal efficiency