

燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制 III: 电除尘电源及小分区改造与PM₁₀和PM_{2.5}的排放(以4×330 MW机组为例)

王仕龙¹, 陈英¹, 韩平¹, 许兵², 李增枝², 郭占纬², 郑钦臻³, 沈欣军³, 李树然³, 闫克平³

1. 神华国能集团有限公司, 北京 100033
2. 天津大港发电厂, 天津 300272
3. 浙江大学生物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027

摘要 讨论了4台典型电除尘改造和细颗粒物(PM_{2.5})排放控制,对四电场电除尘器通过本体小分区和电源改造实现了颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})的超低排放控制。仅对五电场电除尘器进行电源改造,即可实现PM₁₀和PM_{2.5}的超低排放,电除尘出口PM₁₀和PM_{2.5}可分别控制在15和2 mg/m³以下。脱硫塔对PM₁₀有较好的捕集效果,但对PM_{2.5}的去除几乎没有效果。电除尘振打引起的二次飞扬过程及烟气温度也影响PM₁₀和PM_{2.5}的排放,当烟气温度从150~160℃降低到约110℃时,电除尘出口及脱硫塔出口的PM_{2.5}均在2 mg/m³以下。

关键词 电除尘;细颗粒物;电源改造;小分区供电

中图分类号 X513

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.33.004

PM₁₀ and PM_{2.5} Emission Control by Electrostatic Precipitator (ESP) for Coal-fired Power Plants III: Applications with A 4×330 MW Power Plant

WANG Shilong¹, CHEN Ying¹, HAN Ping¹, XU Bing², LI Zengzhi², GUO Zhanwei², ZHENG Qinzen³, SHEN Xinjun³, LI Shuran³, YAN Keping³

1. Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China
2. Tianjin Dagang Power Plant, Tianjin 300272, China
3. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract This paper discusses how to upgrade electrostatic precipitators (ESPs) with four 330 MW coal-fired generators. For the two four-field ESPs, the upgrading includes replacement of high-voltage electrodes and the high-voltage power sources. For the two five-field ESPs, only the power sources are retrofitted. The ESP outlet PM₁₀ and PM_{2.5} emissions are less than 15 and 2 mg/m³, respectively. The flue gas desulfurization (FGD) can be effective for PM₁₀ emission reduction, but not for PM_{2.5}. This paper also presents the rapping and gas temperature effects on particle emission. When reducing the gas temperature from 150–160℃ to about 110℃, PM_{2.5} emission from the ESP or FGD is always less than 2 mg/m³.

Keywords electrostatic precipitation; PM_{2.5}; power source retrofitting; multi-sectionalization

收稿日期:2014-07-17;修回日期:2014-10-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA065000);浙江省重点科技创新团队计划项目(2013TD07)

作者简介:王仕龙,高级工程师,研究方向为燃煤电厂复合污染控制和管理,电子信箱:wangshilong@shenhua.cc;闫克平(通信作者),教授,研究方向为环境科学与环境工程,电子信箱:kyan@zju.edu.cn

引用格式:王仕龙,陈英,韩平,等.燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制 III:电除尘电源及小分区改造与PM₁₀和PM_{2.5}的排放(以4×330 MW机组为例)[J].科技导报,2014,32(33):39-42.

根据原电除尘特点开展电除尘(electrostatic precipitator, ESP)改造,控制PM₁₀和PM_{2.5}排放的报道较少,本文继讨论电除尘改造原理和应用^[1,2]之后,对比4台330 MW燃煤机组所配套的电除尘改造后的PM_{2.5}和PM₁₀排放,讨论电除尘改造的可行性。

电除尘改造技术包括电除尘本体扩容^[3]、更换高效电源^[4-7]、降低烟气温度^[2]、采用电袋复合除尘^[8,9]或集成这些技术为一体等,但事实上因场地限制、投资有限或灰对除尘效果影响的不确定性等^[10],实际的电除尘可选的改造技术方案并不多。本文同时讨论脱硫塔对PM₁₀与PM_{2.5}排放的影响,为大型燃煤锅炉电除尘改造提供应用案例。

1 燃煤锅炉及电除尘改造方法

4台燃煤机组均为328.5 MW,1号和2号炉各配2台卧式双室四电场电除尘器,3号炉配2台卧式双室五电场电除尘器,4号炉配2台卧式单室五电场电除尘器。电厂主要燃烧神华煤,原电除尘设计效率为99.7%,改造前电除尘器出口烟气含尘量浓度约70 mg/m³。所有机组都采用选择性催化还原(SCR)脱硝和石灰石湿法脱硫,为满足《GB 13223—2011 燃煤电厂大气污染物排放标准》中,重点地区允许烟尘浓度低于20 mg/m³的要求、引导燃煤电厂开展对PM₁₀及PM_{2.5}的控制,电厂对4台机组开展了电除尘器及脱硫塔除雾器改造。

原4台电除尘本体设计、阴阳极振打不同,改造工作是在本体不进行改动的条件下,通过采用ZH三相电源实现电除尘提效^[11,12]。1号和2号炉为双室四电场,改造包括1~4电场的本体分区和1~2电场的高电压极线更换。3号炉为双室五电场并采用阴阳极顶部振打,改造工作只对1~5电场采用小分区供电。4号炉为五电场并采用阳极侧部振打,改造工作主要为更换原10台高压电源。电除尘主要特征和改造后的三相高压电源数量如表1所示。

表1 电除尘的主要参数

Table 1 Operating parameters of ESP

参数名称		1~2号炉	3号炉	4号炉
每台炉所配电除尘器数		2	2	2
每台除尘器电场数		4	5	5
阴极振打		顶部	顶部	顶部
阳极极振打		顶部	顶部	侧部
本体改造	更换电极	1~2电场	无	无
	分区	1~4电场	1~5电场	无
每台炉高压电源数	改造前	16	12	10
	改造后	18	24	10
烟气温度调节(低省)		无	有	无

2 结果和讨论

2.1 电除尘二次电流电压参数优化

改造后电除尘典型的二次电流电压运行参数见图1,电除尘小分区供电后,原四电场电除尘被分为9个小电场,烟气温度的140℃左右时,电除尘基本可运行在高压电源的电流极限下,阳极板运行电流密度可在0.45 mA/m²以下调节,运行电压及电场强度分别在60 kV和3 kV/cm左右优化,为改善电除尘的适应性和提高电除尘效率奠定基础。

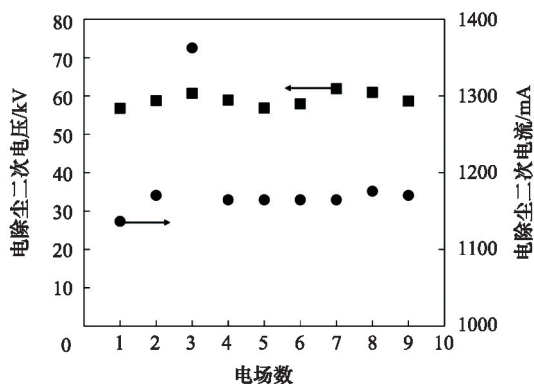


图1 电除尘1至9小分区后的运行电压和电流

Fig. 1 Voltage-current characteristics from inlet (No. 1) to outlet (No. 9) fields

2.2 电除尘排放动态分析

电除尘振打清灰过程及振打引起的细颗粒物二次飞扬研究不多^[12,13],图2是一组包括各电场振打清灰时电除尘出口颗粒物的动态排放。一般情况运行下,如图3(a)所示振打时的峰值排放维持2 min左右,如图3(b)优化后的振打峰值排放仅维持20 s左右。第一电场的振打重复周期在5~15 min,从图2(a)不难看出,第一电场的振打清灰将直接影响电除尘出口的平均排放浓度。因后续电场少或没有,第二、第三和第四电场振打清灰引起的颗粒物排放峰值排放逐步增加,需要优化各电场的振打时序以有效降低因振打引起的二次飞扬。除振打引起的二次飞扬外,低排放电除尘也可能受到其他多个因素的影响,图2(b)显示1台炉的2台电除尘中的1台因烟气量变化而引起的排放变化过程,图2(c)显示因机组发电负荷变化而引起的动态排放过程,详细的排放过程与电除尘中的气流分布及运行参数需进一步研究^[13,14]。

2.3 烟气温度对PM₁₀和PM_{2.5}排放的影响

图4表明了烟气温度对电除尘效果的典型影响,当烟气温度从160℃左右降低到110℃左右时,电除尘出口PM₁₀的排放从50 mg/m³左右下降到10 mg/m³以下;PM_{2.5}排放浓度从4.86 mg/m³下降到0.67 mg/m³。PM₁₀和PM_{2.5}分别下降了81%和86%。图5同时比较了在烟气温度110℃下脱硫塔出口PM₁₀的颗粒物个数和质量分布,可见脱硫塔(flue gas desulfurization, FGD)对PM₁₀有64%左右的除尘效率,但PM_{2.5}

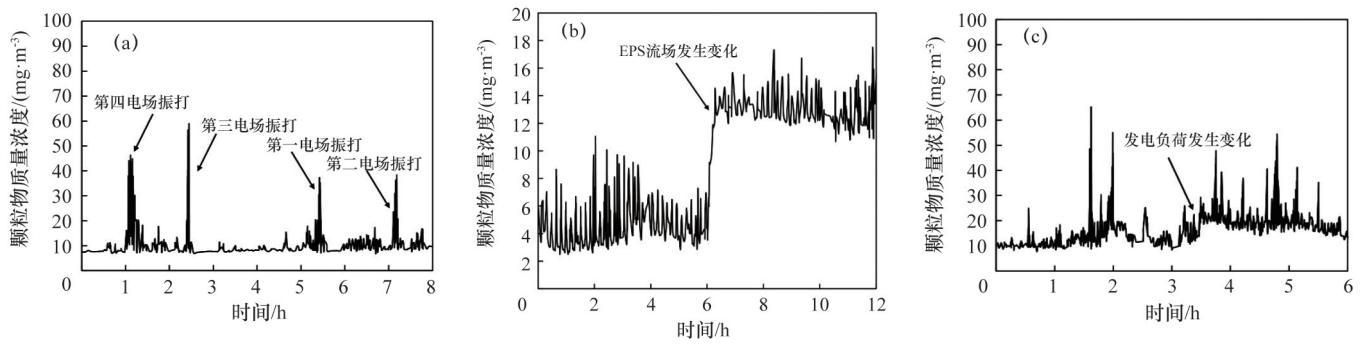
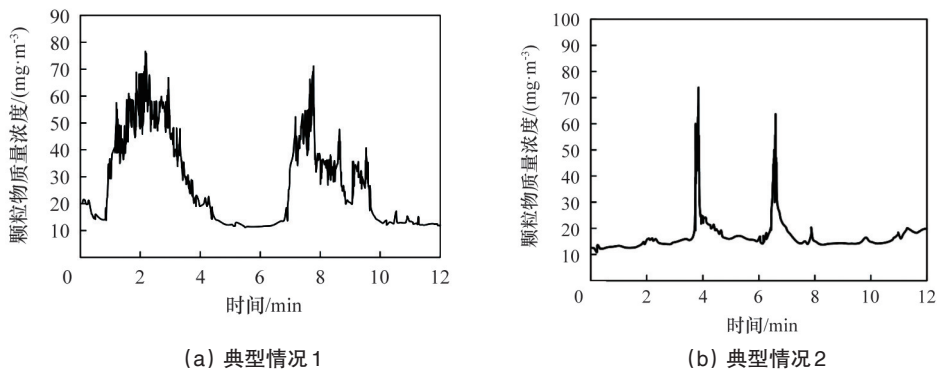


图2 电除尘出口颗粒物的排放与振打(a)、气流(b)和发电负荷(c)的关系

Fig. 2 Typical time-resolved particle emissions due to rapping (a), gas flow (b), and power generation (c), respectively



(a) 典型情况1

(b) 典型情况2

图3 电除尘出口颗粒物的排放与振打的关系

Fig. 3 Typical time-resolved particle emissions

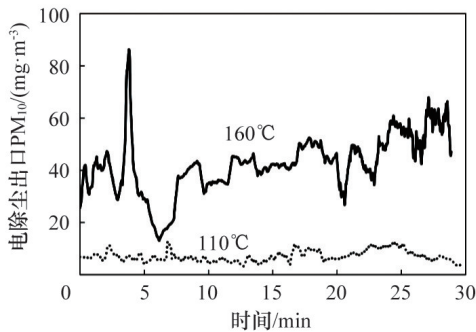


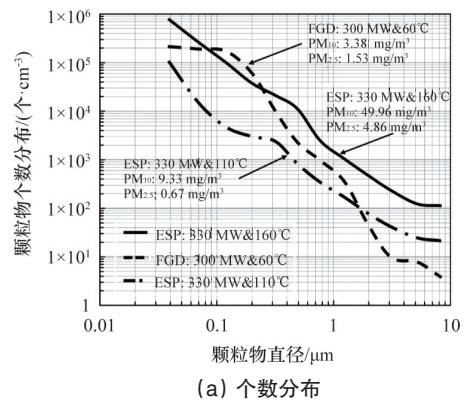
图4 烟气温度对电除尘出口排放的影响

Fig. 4 Temperature effects on ESP performances

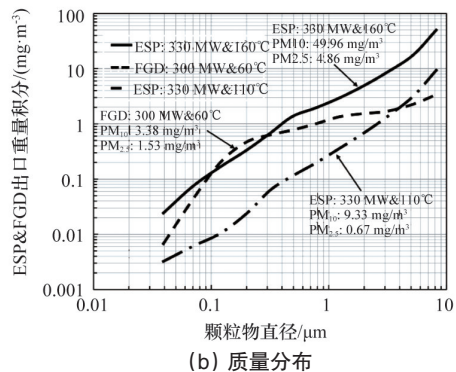
增加了128%,原因是脱硫塔增加了1.5 μm以下的石膏。脱硫塔或烟囱出口的PM₁₀和PM_{2.5}排放浓度分别约为3.38 mg/m³和1.53 mg/m³。

2.4 电除尘和脱硫塔协同PM₁₀和PM_{2.5}减排

图6显示多个工况下,4台机组电除尘出口和脱硫塔出口PM₁₀与PM_{2.5}的排放关系。电除尘出口PM_{2.5}占PM₁₀的比例在6%~17%^[1],而脱硫塔出口PM_{2.5}占PM₁₀的比例在28%~60%,表明脱硫塔对PM₁₀捕集效率较高,但因脱硫塔会增加1.5 μm以下的颗粒物,脱硫塔排出的烟气中PM_{2.5}的排放浓



(a) 个数分布



(b) 质量分布

图5 烟气温度对电除尘和脱硫塔出口排放的影响

Fig. 5 Temperature effects on ESP and FGD performances

度将有所提高。如优化电除尘和脱硫塔的协同除尘效果,则燃煤电厂的 $PM_{2.5}$ 排放可控制在 2.0 mg/m^3 以下。若同时降低脱硫塔进口烟气温度的 $PM_{2.5}$ 可控制在 1.0 mg/m^3 以下。

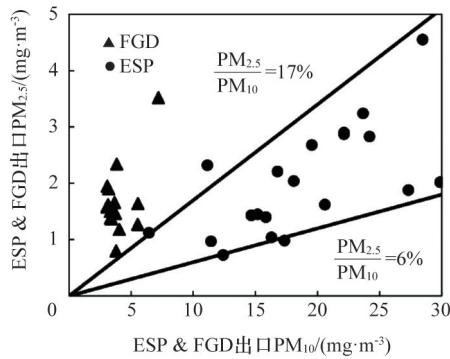


图6 电除尘出口和脱硫塔出口 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的排放关系
Fig. 6 Typical $PM_{2.5}$ and PM_{10} emissions at the ESP and FGD outlets

3 结论

电除尘振打、气流分布、发电负荷等对低排放电除尘都有显著影响。对四、五电场的电除尘通过电除尘本体小分区及高效电源改造,电除尘排放不仅可满足新的国家排放标准,还可控制 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放浓度在 15 mg/m^3 和 2 mg/m^3 以下。脱硫塔出口 PM_{10} 在 5 mg/m^3 以下,脱硫塔可以有效捕集 PM_{10} ,但对 $PM_{2.5}$ 的去除效果并不明显。优化电除尘和脱硫塔的协同除尘效果,脱硫塔烟气温度的 140°C 左右时 $PM_{2.5}$ 排放可控制在 2.0 mg/m^3 以下,降低脱硫塔进口烟气温度的 110°C 左右时, $PM_{2.5}$ 可控制在 1.0 mg/m^3 以下。

参考文献(References)

[1] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制 I: 电除尘选型及工业应用[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 23-33.
Wang Shilong, Chen Ying, Han Ping, et al. PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants I: ESP sizing and applications[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 23-33.

[2] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制 II: 电除尘电源改造与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放(以660 MW机组为例)[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 34-38.
Wang Shilong. PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants II: Evaluation of ESP upgrading in terms of PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission reduction with a 660 MW generator[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 34-38.

[3] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 电除尘器选型设计指导书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
Committee of Electrical Dust Removal, CAEPI. Guide book of ESP design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[4] 马晋辉, 王荣华, 闫克平. 燃煤电厂电除尘器的节能和提效[J]. 电力环境保护, 2008, 24(6): 33-35.
Ma Jinhui, Wang Ronghua, Yan Keping. Energy-saving measures of

electrostatic precipitator in coal-fired power plants[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008, 24(6): 33-35.

[5] Zhang B, Wang R, Yan K. Industrial applications of three-phase T/R for upgrading ESP perform mAnce[M]// Yan K. Electrostatic Precipitation. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co, K, 2008: 276-280.

[6] Hall H J. History of pulse energization in electrostatic precipitation[J]. Journal of electrostatics, 1990, 25(1): 1-22.

[7] Grass N, Hartmann W, Klockner M. Application of different types of high-voltage supplies on industrial electrostatic precipitators[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2004, 40(6): 1513-1520.

[8] 聂孝峰, 李东阳, 郭斌. 燃煤电厂电袋复合除尘器技术优势[J]. 电力科技与环保, 2013, 29(1): 25-27.
Nie Xiaofeng, Li Dongyang, Guo Bin. The advantage of electrostatic and fabric composite filter on coal-fired power plants[J]. Electric Power Environmental Protection, 2013, 29(1): 25-27.

[9] 江得厚, 王贺岑, 张营帅, 等. 燃煤电厂电-袋复合除尘器的应用及问题分析[J]. 中国环保产业, 2012(2): 15-19.
Jiang Dehou, Wang Heceng, Zhang Yingshuai, et al. Current situation and problem analysis on electrostatic-bag integrated precipitator in coal-fired power plants[J]. China Environmental Protection Industry, 2012(2): 15-19.

[10] Li S, Li X, Huang Y, et al. Fly ash resistivity: Influencing factors, predicting models and its impacts on electrostatic precipitator perform mAnce[M]// Sarker P K. Fly Ash, Sources, Applications and Potential Environmental Impacts. New York: NOVA Science Publishers, 2014: 91-144.

[11] 朱继保, 章旭明, 胡行伟, 等. 电除尘器电极结构与灰堆积特性相关性研究[J]. 科技导报, 2008, 26(9): 30-33.
Zhu Jibao, Zhang Xuming, Hu Hangwei, et al. Characteristics of collected dust layer in a laboratory electrostatic precipitator[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(9): 30-33.

[12] Oglesby S. Electrostatic precipitation[M]. New York: Marcel Dekker Inc Press, 1978.

[13] 曾宇翔, 沈欣军, 章旭明, 等. 电除尘器中离子风的实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(12): 2208-2211.
Zeng Yuxuan, Shen Xinjun, Zhang Xuming, et al. Experimental study of ionic wind in an electrostatic precipitator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(12): 2208-2211.

[14] 沈欣军, 王仕龙, 韩平, 等. 电除尘器内亚微米细颗粒物动态的可视化测试[J]. 浙江大学学报: 工学版. (待发表)
Shen Xinjun, Wang Shilong, Han Ping, et al. Visualization measurements of submicron particles motion in electrostatic precipitator [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science. (in press)

(编辑 田恬)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbjb@cast.org.cn。