

布袋除尘器改造电除尘器关键技术 在600 MW燃煤机组超低排放改造 工程中的应用分析

范学明¹, 王磊¹, 桑媛媛¹, 王仕龙², 韩平², 郑钦臻³, 闫克平³

1. 山西鲁能河曲发电公司, 河曲 036500
2. 神华国能集团有限公司, 北京 100033
3. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310027

摘要 山西鲁能河曲发电公司完成了2×600 MW燃煤机组布袋除尘器改造为低低温电除尘器, 实现了超低排放, 通过协同优化三相电源低低温电除尘器和湿法脱硫同步实现SO₂和颗粒物的超低排放, 针对本燃煤机组工况特点以及原布袋除尘器本体大小, 通过对电除尘器本体选型、流场优化、三相电源等关键技术的工程应用, 完成布袋除尘器改造电除尘器。结果表明: 在电除尘器比集尘面积为83.5 m²/(m³·s)、入口烟尘质量浓度为35.8 g/m³的条件下, 电除尘器出口烟尘排放总质量浓度在9.93~14.69 mg/m³, 其中PM_{2.5}排放质量浓度不高于1.58 mg/m³。三相电源低低温电除尘集成湿法脱硫可满足燃煤电厂超低排放要求。

关键词 燃煤电厂; 电除尘器; 比集尘面积; 数值模拟; 过程控制

以神华河曲2×600 MW燃煤机组为例, 介绍了布袋除尘器改造为电除尘器的关键技术应用。该工程案例为国内典型的全布袋除尘器改造为电除尘器, 通过低低温电除尘器和湿法脱硫协同实现颗粒物超低排放。本文研究的主要对象为电除尘器, 研究范围包括电除尘器的设计方案、改造技术以及改造完成后的运行效果。本文研究目的是指出低低温电除尘协同湿法脱硫技术路线可实现颗粒物超低排放, 而且该技术路线适合西北干旱地区的燃煤机组超低排放改造, 可为该地区提供超低排放改造技术借鉴。

为满足新环保标准的排放要求履行该电厂的社会环保责任, 提出对该厂颗粒物最终排放质量浓度<5 mg/m³的要求, 然而可实现该目标的技术方案有很多。考虑到除尘器后低于15 mg/m³, 布袋除尘器本体阻力太高, 风机电耗巨大, 经过湿法脱硫后, 烟气温度梯度大, 热损耗、尤其水耗非常巨大, 这对西北地区极不负责任。该厂最终决定采用布袋除尘器全部改为电除尘器的总体改造方案, 增设低温省煤器装置, 对湿法脱硫进行增效改造。该技术路线可实现低能耗、低水耗条件下的超低排放。

电厂3号、4号机组为600 MW的超临界燃煤空冷凝汽式机组, 锅炉为超临界参数变压直流炉、一次再热、墙式切圆燃烧、平衡通风、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构Π型锅炉, 该锅炉最大连续蒸发量为2141 t/h, 满负荷工况燃煤量为293.05 t/h, 其原配除尘设备为布袋除尘器。为落实山西省《推进全省燃煤发电机组燃气超低排放的实施意见》和实现重点地区燃烧锅炉烟尘排放质量浓度<5 mg/m³的要求, 同时为改善系统运行安全和实现脱硫节水, 电厂对每台锅炉所配套的布袋除尘器改造为2台三相电源低低温电除尘器。

1 原布袋除尘器概况及烟气参数

1.1 原布袋除尘器概况

单台锅炉原配2台外滤式分室定位反吹袋式除尘器, 在线清灰、在线检修, 在线完成整机更换滤袋, 并配置旁路烟道, 设计压力及瞬时防爆压力分别为±5.8 kPa和±9.8 kPa, 主要参数如表1所示。因布袋除尘器沿烟气方向的总长度仅为14.4 m, 改造后的电除尘器比集尘面积较小(图1~图2), 实现高效电除尘器比较困难^[1-5]。

收稿日期: 2017-03-13; 修回日期: 2017-05-02

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: 范学明, 工程师, 研究方向为燃煤电厂脱硫脱硝除尘, 电子信箱: 17048616@shenhua.cc; 闫克平(通信作者), 教授, 研究方向为环境科学与工程, 电子信箱: kyan@zju.edu.cn

引用格式: 范学明, 王磊, 桑媛媛, 等. 布袋除尘器改造电除尘器关键技术在大容量燃煤机组超低排放改造工程中的应用分析[J]. 科技导报, 2017, 35(15): 51-56; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.15.007

表1 原布袋除尘器主要参数
Table 1 Bag-filter parameters

过滤面积/m ²	过滤风速/(m·min ⁻¹)	袋室风速/(m·s ⁻¹)	设计烟气温度/℃	灰斗数/个	袋室数/个
65286	≤1.06	≤2	130(短时190)	16	288
滤袋数/个	滤袋材质	清灰气源压力/Pa	每台炉除尘器烟气进口数 量(出口数量)/个	除尘器本体 阻力/Pa	
6912	90% PPS+10% P84	3000	8	1200	



图1 原布袋除尘器现场照片
Fig. 1 Bag-filter photo

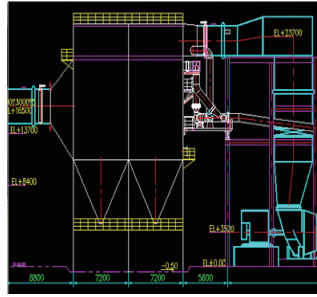


图2 原布袋除尘器CAD图
Fig. 2 Bag-filter drawing

1.2 烟气参数

单台锅炉工况烟气量达414×10⁴ m³/h,空预器出口烟气温度130℃,主要参数如表2。

1.3 煤种参数

表3为电厂燃煤的主要特性参数,灰分较高,燃烧产生的烟尘浓度较高;同时烟气温度高,导致烟尘比电阻大^[6-9]。因烟尘浓度较高,改造前布袋除尘器的最大压力损失可达2400 Pa,加重所配引风机负荷及运行不稳定。

表2 锅炉烟气参数
Table 2 Gas flow parameters from boiler

煤种	除尘器进口 烟气量/ (m ³ ·h)	除尘器进口 烟温/℃	除尘器进口 过剩空气 系数α	除尘器进口 含尘质量 浓度/(g·m ⁻³)	除尘器进口 二氧化硫 含量/%	除尘器进口氮 氧化物含量/ (mg·m ⁻³)	除尘器进口 水蒸气 含量/%	除尘器进口 酸露点/℃
设计煤种	4142487	130	1.35	28.5	1.9	≤400	8.48	96.65
校核煤种	4148745	130	1.35	33.8	1.83	≤400	8.56	94.07

表3 锅炉燃烧煤种分析
Table 3 Composition of coal fired

煤种	收到基全水分/%	空气干燥基水分/%	收到基灰分/%	干燥无灰基挥发分/%	收到基低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)
设计煤种	11.42	3.69	22.5	41.19	19.97
校核煤种	11.42	4.47	25.5	41.43	19.05

2 超低排放技术路线选择

国内燃煤电厂污染物超低排放的技术路线主要有以下两种:1)电除尘器或电袋复合除尘器或布袋除尘器+湿法脱硫+湿式电除尘器;2)低温省煤器+电除尘器+湿法脱硫^[10-18]。考虑到河曲地区为半干旱气候区,多风少水,若维持原布袋除尘器再加湿式电除尘器不仅增大了脱硫过程的水蒸发量,而且需要采用昂贵的湿式电除尘器废水处理系统及不断安排废旧滤袋处理。

在电除尘器前安装低温省煤器,把烟气温度从130℃左右降低到90℃左右时,不仅可大幅度降低烟尘比电阻,而且降低了烟气流量,从而提高了电除尘器的比集尘面积,表4比

较了烟气温度在130℃和90℃下烟气量的实测值和比集尘面积计算值。根据闫克平等研究,330及600 MW 低低温电除尘的改造运行,比集尘面积位于75~85 m²/(m³·s⁻¹)范围内,采用技术路线2可完全满足超低排放的改造要求^[11-13]。

表4 不同烟气温度条件的烟气量与比集尘面积
Table 4 Gas flow rate and specific collection area with different temperature

烟气温度/℃	烟气量/(m ³ ·h ⁻¹)	比集尘面积/(m ² ·m ⁻³ ·s)
130	4142487	75.2
90	3731323	83.5

3 电除尘器设计选型

考虑到原布袋除尘器所占的空间,电除尘器本体设计采用了增加4 m电场长度和在原布袋除尘器两外边各扩一个电场通道的方案,利用原布袋除尘器外壳,将每台布袋除尘器

改造为双室四通道的电除尘器,即每台锅炉采用2台6通道5电场的电除尘器,电除尘器内部电场中烟气流速为0.748 m/s,表5为电除尘器的其他主要参数。

表5 电除尘器的主要设计选型参数
Table 5 ESP parameters

设计效率/%	设计入口粉尘质量浓度/($g \cdot m^{-3}$)	设计出口粉尘质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	本体阻力/Pa	本体漏风率/%	烟气量/($m^3 \cdot h^{-1}$)		总有效断面积/ m^2	总集尘面积/ m^2
≥ 99.96	≤ 35.5	< 15	≤ 300	≤ 1.5	4142487 (130℃)	3731323 (90℃)	1202	86546
比集尘面积/($m^2 \cdot m^{-3} \cdot s$)		室数/电场数	通道数	电场总有效长度/m	同极距/mm	阳极板/阴极线高度/m	阴极线型式	阳极板型式
75.2(130℃)		83.5(90℃)	10/5	194	14.5	400	新型RS芒刺线	C480

4 流场优化

由于电除尘器的进出口与原布袋除尘器的进出口有较大的变化,因此改造后在进出口烟箱中的流场也有较大的变化,图3显示了在保留原烟箱宽度和优化烟箱后电除尘器内部流场分布。表6为对应的各通道烟气流分布,如采用图3布置,各通道间的流量分配偏差高达15.5%,然而优化后各通道的流量偏差均小于1%。图4为电除尘器电场入口断面的烟气流速分布,优化前其烟气流速均方根最大为3.6,而优化后其烟气流均方根最大为0.07,远小于电除尘器设计规范中0.25的要求。电除尘器对亚微米颗粒物的捕集很大程度上依赖于流场的均匀性,风速越低、流场越均匀,颗粒物就更容

易被捕集到阳极板上。降低电场风速还可以显著地降低二次扬尘,提高电除尘器效率^[19-25]。

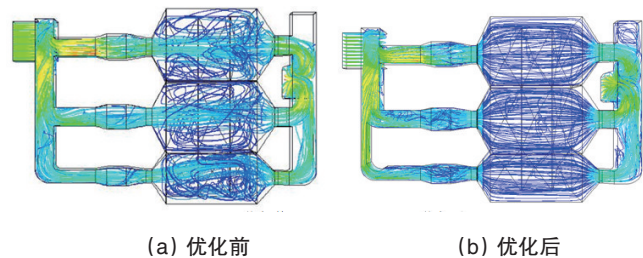


图3 电除尘器系统流场分布
Fig. 3 Gas flow distribution of ESP

表6 优化前后电除尘器各通道烟气流
Table 6 Gas flow rate before and after optimizing

通道	烟气流设计值/($10^4 m^3 \cdot h^{-1}$)	烟气流优化前/($10^4 m^3 \cdot h^{-1}$)	优化前偏差/%	烟气流优化后/($10^4 m^3 \cdot h^{-1}$)	优化后偏差/%
通道1	77.4	82.9	7.2	76.9	0.58
通道2	77.4	65.4	15.5	77.3	0.10
通道3	54.2	60.0	10.8	54.1	0.09

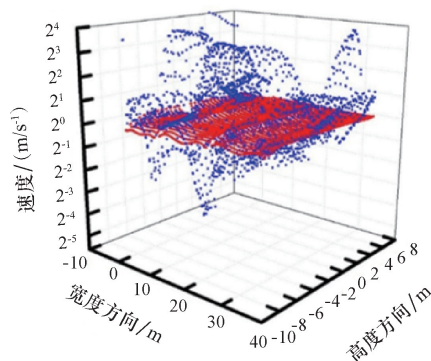


图4 电除尘器电场入口断面烟气流速分布
Fig. 4 Gas flow velocity distribution of the first field in ESP

5 三相高压电源

图5为高效三相高压电源示意图,采用三相交流同步输入,电源具有较高的能量转换效率并输出更大的电流,提高电除尘效率。三相电源的选型及运行已在前面做过详细的讨论^[26-31]。

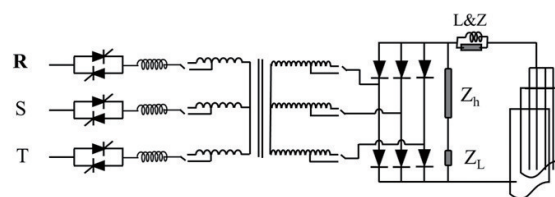


图5 三相电源主电路图示意图
Fig. 5 Primary circuit of three phases power source

6 排放质量浓度

表7为典型的600 MW机组电除尘性能测试数据,低低温电除尘器入口烟气温度110℃,左侧3个出口烟道中电除尘器出口烟尘平均排放质量浓度为14.69 mg/m³,右侧3个出口烟道中电除尘器出口烟尘平均排放质量浓度为9.93 mg/m³,

均满足设计≤15 mg/m³的要求。图6是利用颗粒物在线检测仪ELPI对电除尘器出口汇合烟道中PM₁₀和PM_{2.5}的测试结果,PM₁₀在10 mg/m³左右,PM_{2.5}在1.58 mg/m³左右,PM_{2.5}占PM₁₀比例约15.02%。

表7 电除尘器各通道出口烟尘排放质量浓度

Table 7 Emission concentration at different outlets of ESP

电除尘器	烟道	进口烟气温度/℃	进口含尘质量浓度/(g·m ⁻³)	进口平均质量浓度/(g·m ⁻³)	出口含尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	出口平均质量浓度/(mg·m ⁻³)	除尘效率/%	平均除尘效率/%
1 [#]	1 [#]	110	33.86		17.55		99.95	
	2 [#]	110	32.31	33.62	14.76	14.69	99.95	99.96
	3 [#]	110	34.68		11.76		99.97	
2 [#]	4 [#]	110	39.15		9.99		99.97	
	5 [#]	110	38.52	37.96	10.31	9.93	99.97	99.99
	6 [#]	110	36.21		9.48		99.97	

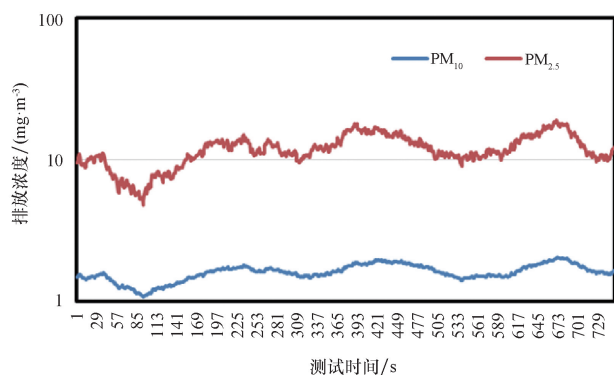


图6 电除尘器出口汇合烟道PM₁₀和PM_{2.5}排放质量浓度

Fig. 6 PM₁₀ & PM_{2.5} emission concentration at the final outlet of ESP

7 结论

1) 将2×600 MW燃煤机组布袋除尘器改造为低低温电除尘器后,在电除尘器入口烟尘质量浓度为35 g/m³、比集尘面积为83.5 m²/(m³·s⁻¹)条件下,电除尘器出口排放质量浓度小于15 mg/m³。

2) 三相电源低低温电除尘集成湿法脱硫可满足燃煤电厂超低排放要求,降低烟气温度不仅可提高电除尘器的运行参数,而且可实现高灰下的高效收尘。

参考文献(References)

[1] White H J. Industrial electrostatic precipitation[M]. Boston: Addison Wesley, 1963: 112-130.
 [2] Mizuno A. Electrostatic precipitation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 615-624.
 [3] 闫克平,李树然,冯卫强,等. 高电压环境工程应用研究关键问题分析及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2529-2544.

Yan Keping, Li Shuran, Feng Weiqiang, et al. Analysis and prospect on key technology of high-voltage discharge for environmental engineering study and application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2528-2544.

[4] Li S R, Huang Y F, Yan K P, et al. Fundamentals and environmental applications of non-thermal plasmas: Multi-pollutants emission control from coal-fired flue gas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2014, 34(3): 579-603.

[5] Huang Y F, Zheng Q Z, Yan K P. Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM_{2.5} emission control from coal-fired boilers[J]. International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 2015, 9(2): 69-126.

[6] Li S R, Li X Y, Yan K P, et al. Fly ash resistivity: Influencing factors, predicting models and its impacts on electrostatic precipitator performance[M]. New Yorks: NOVA Science Publishers, 2014: 91-144.

[7] Li X Y, Zhang X M, Yan K P, et al. Sensitivity analysis on the maximum ash resistivity in terms of its compositions and gaseous water concentration[J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(1): 83-90.

[8] 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 Keping, Li Shuran, Zheng Qinzhen, et al. Development and application of electrostatic precipitation technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 476-486.

[9] 肖创英. 促进燃煤电厂烟尘超低排放[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 12.

Xiao Chuangying. To promote the ultra-low emission from coal-fired power plants[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 12.

[10] 肖创英,王仕龙,韩平. 燃煤电厂电除尘器超低排放升级改造[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 487-492.

Xiao Chuangying, Wang Shilong, Han Ping. Experience of upgrading electrostatic precipitators for ultra-low emission from coal-fired power plants[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 487-492.

[11] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘PM₁₀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): 34-38.

- Wang Shilong. PM₁₀ 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): 34-38.
- [12] 马元坤. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制, V: 以660 MW机组为例微细讨论高压电源运行优化[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 69-72.
- Ma Yuankun. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants, V: optimization of high voltage power source with 660 MW boiler[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(6): 69-72.
- [13] 梁志宏, 李栓宝, 闫克平, 等. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制 VII: 以2×600 MW机组为例分析讨论电除尘选型和改造[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 84-88.
- Liang Zhihong, Li Shuanbao, Yan Keping, et al. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants, VII: ESP sizing and refitting with 2×600 MW boilers [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(5): 84-88.
- [14] 沈欣军, 郑钦臻, 闫克平, 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, 2015, 49(5): 985-992.
- Shen Xinjun, Zheng Qinzen, Yan Keping, et al. Visualization measurements of submicron particle movement inside an electrostatic precipitator[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2015, 49(5): 985-992.
- [15] 沈欣军, 郑钦臻, 闫克平, 等. 基于粒子成像测速法的正负电晕放电下线板式电除尘器内流场测试[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2757-2763.
- Shen Xinjun, Zheng Qinzen, Yan Keping, et al. Measurements of flow field in wire-plate electrostatic precipitator during positive or negative corona discharge using PIV method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2757-2763.
- [16] Ning Z Y, Li S R, Yan K P, et al. Electrode configurations inside an electrostatic precipitator and their impact on collection efficiency and flow pattern[J]. The European Physical Journal D, 2016, 70(1): 126-132.
- [17] Ning Z Y, Podlinski J, Yan K P, et al. Electrode geometry optimization in wire-plate electrostatic precipitator and its impact on collection efficiency[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 80(1): 76-84.
- [18] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制, II: 电除尘电源改造与PM₁₀和PM_{2.5}的排放[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 23-33.
- Wang Shilong. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants, II: Evaluation of ESP upgrading in terms of PM₁₀ and PM_{2.5} emission reduction with A 660 MW generator[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 23-33.
- [19] 王仕龙, 陈英, 闫克平, 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.
- Wang Shilong, Chen Ying, Yan Keping, et al. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants, III: Application with a 4×330 MW power plant[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 39-42.
- [20] 马晋辉, 王荣华, 闫克平. 燃煤电厂电除尘器的节能与提效[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.
- [21] Zhu J B, Zeng Y X, Yan K P, et al. Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(2): 285-291.
- [22] 胡斌, 刘勇, 杨林军, 等. 化学团聚促进电除尘脱除烟气中的PM_{2.5}和SO₃[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3902-3909.
- Hu Bin, Liu Yong, Yang Linjun, et al. Simultaneous control of PM_{2.5} and SO₃ by chemical agglomeration collaborative electrostatic precipitation[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3902-3909.
- [23] 龙正伟, 冯壮波, 姚强. 静电除尘器数值模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3393-3401.
- Long Zhengwei, Feng Zhuangbo, Yao Qiang. Numerical modeling of electrostatic precipitator[J]. CIESC Journal, 2016, 63(11): 3393-3401.
- [24] Huang J, Zhang F, Shi Y, et al. Investigation of a pilot-scale wet electrostatic precipitator for the control of sulfuric acid mist from a simulated WFGD system[J]. Journal of Aerosol Science, 2016, 100: 38-52.
- [25] Kasdi A. Computation and measurement of corona current density and V-I characteristics in wires-to-plates electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 81: 1-8.
- [26] Arif S, Branken D J, Everson R C, et al. CFD modeling of particle charging and collection in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 84: 10-22.
- [27] Kim H J, Han B, Chang G W, et al. Performance evaluation of dry and wet electrostatic precipitators used in an oxygen-pulverized coal combustion and a CO₂ capture and storage pilot plant[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 77: 116-126.
- [28] Lancereau Q, Roux J M, Achard J L. Influence of secondary flows on the collection efficiency of a cylindrical electrostatic precipitator[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 63(2): 146-160.
- [29] Noda N, Makino H. Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler[J]. Advanced Powder Technology, 2010, 21(4): 495-499.
- [30] Bologna A, Paur H R, Seifert H, et al. Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2/3): 150-153.
- [31] Zhao H, Zheng C. A stochastic simulation for the collection process of fly ashes in single-stage electrostatic precipitators[J]. Fuel, 2008, 87(10/11): 2082-2089.

Application of key technology changing bag filter to electrostatic precipitator in ultra-low emission upgrading projects of coal-fired power plants

FAN Xueming¹, WANG Lei¹, SANG Yuanyuan¹, WANG Shilong², HAN Ping², ZHENG Qinzheng³, YAN Keping³

1. Shanxi Luneng Hequ Power Plant, Hequ 036500, China

2. Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China

3. Institute of Industrial Ecology and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract This paper presents a pioneer project of changing the bag-filter into colder-side electrostatic precipitator (ESP) for two 600 MW coal-fired boilers of Shanxi Luneng Hequ Power Plant for ultra-low emission of particle matters (PM) and sulfur dioxide (SO₂) by cooperative optimization of colder-side ESP with three-phase power source and wet flue gas desulfurization (WFGD). Due to the coal-fired boiler condition and initial bag filter size, we change bag filter into ESP by taking ESP sizing, gas flow distribution optimizing, three-phase power source, etc. into consideration. The main result of this paper is when the ESP's specific collection area is 83.5 m²/(m³·s) with three-phase rectifier transformer and the inlet ash load concentration is around 35.8 g/m³, the outlet particle mass concentration is 9.93~14.69 mg/m³, of which the mass concentration of particles with diameters of less than 2.5 μm is below 1.58 mg/m³. The integration of colder-side ESP with three-phase power source and WFGD can achieve ultra-low emissions of air pollutants for coal-fired power plants.

Keywords coal-fired power plant; electrostatic precipitator; specific collection area; numerical simulation; process control

(责任编辑 田恬)