

# 燃煤电厂电除尘 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制 V: 以 660 MW 机组为例分析讨论高压电源运行优化

马元坤<sup>1</sup>, 秦松<sup>1</sup>, 陈亮<sup>1</sup>, 徐荣田<sup>1</sup>, 王仕龙<sup>2</sup>, 陈英<sup>2</sup>, 韩平<sup>2</sup>, 郑钦臻<sup>3</sup>, 沈欣军<sup>3</sup>, 李树然<sup>3</sup>, 闫克平<sup>3</sup>

1. 神华国能宁夏煤电有限公司鸳鸯湖电厂, 银川 750001
2. 神华国能集团有限公司, 北京 100033
3. 浙江大学生物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027

**摘要** 本文讨论优化双室四电场电除尘器(ESP)所配套的 16 台中荷(ZH)三相高压电源和低压振打系统实现电除尘节能和减排。在 16 台传统单相高压电源供电下, 电除尘出口 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放分别为 $63\text{ mg/m}^3$ 和 $23.9\text{ mg/m}^3$ , 对应的高压一次电耗为 $1225\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。采用 16 台 ZH 三相高压电源改造后, 电除尘出口 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放分别为 $10\sim 16\text{ mg/m}^3$ 和 $2.0\sim 2.5\text{ mg/m}^3$ , 对应的高压一次电耗为 $900\sim 1050\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。在同样高电压电耗下, $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 分别下降了 78% 和 92%。

**关键词** 电除尘; 细颗粒物; 三相电源

**中图分类号** X513

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.011

## $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator for coal-fired power plants V: Optimization of high voltage power source with 660 MW boiler

MA Yuankun<sup>1</sup>, QIN Song<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, XU Rongtian<sup>1</sup>, WANG Shilong<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>2</sup>, HAN Ping<sup>2</sup>, ZHENG Qinzen<sup>3</sup>, SHEN Xinjun<sup>3</sup>, LI Shuran<sup>3</sup>, YAN Keping<sup>3</sup>

1. Yuanyang Hu Power Plant, Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Yinchuan 750001, China
2. Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China
3. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract** This paper discusses the optimization of 16 high-voltage power sources for the four-field electrostatic precipitator to achieve energy saving and fly ash emission reduction. With 16 traditional single-phase rectifier-transformers (T/Rs), the  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions and the primary power consumption are about  $63\text{ mg/m}^3$ ,  $23.9\text{ mg/m}^3$  and  $1225\text{ kV}\cdot\text{A}$ , respectively. After retrofitting the power sources with 16 ZH type three-phase T/Rs, the  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions and the primary power consumption are about  $10\sim 16\text{ mg/m}^3$ ,  $2.0\sim 2.5\text{ mg/m}^3$  and  $900\sim 1050\text{ kV}\cdot\text{A}$ , respectively. For a similar primary energy consumption, emissions for  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  are reduced by about 78% and 92%, respectively.

**Keywords** electrostatic precipitation;  $PM_{2.5}$ ; three-phase T/R power source

收稿日期: 2014-12-12; 修回日期: 2014-12-30

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: 马元坤, 高级工程师, 研究方向为燃煤电厂运行和管理, 电子邮箱: wangshilong@shenhua.cc; 闫克平(通信作者), 教授, 研究方向为环境科学与工程工程, 电子邮箱: kyan@zju.edu.cn

引用格式: 马元坤, 秦松, 陈亮, 等. 燃煤电厂电除尘 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制 V: 以 660 MW 机组为例分析讨论高压电源运行优化[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 69-72.

宁夏鸳鸯湖电厂位于宁夏回族自治区银川市,属于《GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准》排放控制重点地区,燃煤电厂颗粒物排放要求不高于  $20 \text{ mg/m}^3$  的排放限值。为改善环境空气质量和降低污染源的排放强度,神华国能要求鸳鸯湖电厂开展 600 MW 等级燃煤电厂环保示范建设,实现颗粒物排放不高于  $5 \text{ mg/m}^3$ ,其中  $\text{PM}_{2.5}$  排放不高于  $2.5 \text{ mg/m}^3$ 。三大污染物  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  和尘的排放控制分别采用选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)还原  $\text{NO}_x$ 、石灰石湿法(flue gas desulfurization, FGD)吸收  $\text{SO}_2$  及电除尘 ESP(electrostatic precipitator)收集烟尘<sup>[1]</sup>。

电厂一期 2×660 MW 机组分别配置两台兰州电力修造厂生产的卧式双室四电场电除尘器,电厂通过增加低温省煤器、改造原电除尘所配套的 16 台单相高压电源为 16 台中荷(ZH)三相电源及其 4 台低压控制电源、优化脱硫塔运行并采用高效除雾器,开展节能减排改造。

本文在“燃煤电厂电除尘  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的排放控制”<sup>[2]</sup>的基

础上,探讨高低压电源运行优化与细颗粒物排放控制的关系。

## 1 燃煤锅炉及电除尘电源优化方法

电除尘运行优化过程也包括通过在电除尘器入口前加装低温省煤器,将电除尘器入口烟气温度的自  $125\sim 137^\circ\text{C}$  降至  $95\sim 100^\circ\text{C}$ ,设计最大降温幅度为  $40^\circ\text{C}$ 。在改善除尘效率的同时<sup>[2-4]</sup>,电厂也可同时降低煤耗和水耗,系统设计选型如图 1 所示,电除尘器本体特征及具体改造工作详参以往工作<sup>[5]</sup>。燃煤锅炉入炉煤质主要特性如表 1 所示。

单相电源与三相电源的主电路如图 2 所示<sup>[2]</sup>。单相电源主电路为一组可控硅移相调压和变压器升压整流。三相电源主电路为三组可控硅移相调压和升压后整流,电源输出二次电压波动小有利于提高电除尘的运行平均电压、平均电流和除尘效率。

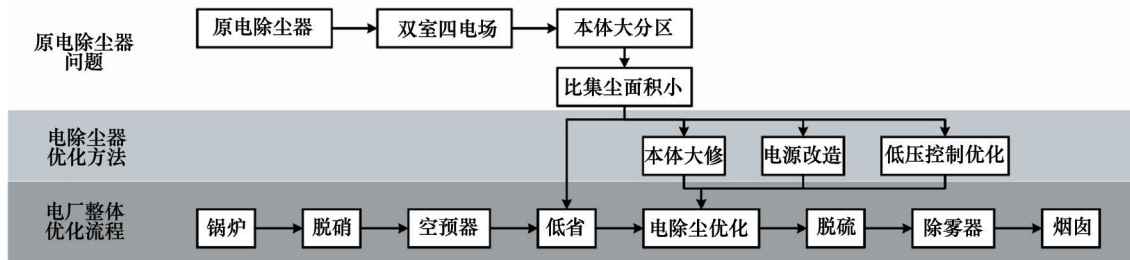


图 1 电除尘改造优化流程

Fig. 1 Systematic optimization of ESP operation

表 1 燃煤锅炉入炉煤质特性(2014 年 7 月 1 日至 10 月 31 日,入炉煤煤质平均值)

Table 1 Coal quality of coal-fired boiler (mean value from July 1<sup>st</sup> to October 31<sup>st</sup>, 2014)

机组	全水分/ %	含硫量/ %	灰分/ %	固定碳/ %	高位热值/ ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	低位热值/ ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	飞灰可燃物/ %
1 <sup>#</sup>	12.4	1.10	23.59	44.86	22.24	19.28	12.4
2 <sup>#</sup>	12.6	1.08	22.17	45.89	22.60	19.66	12.6

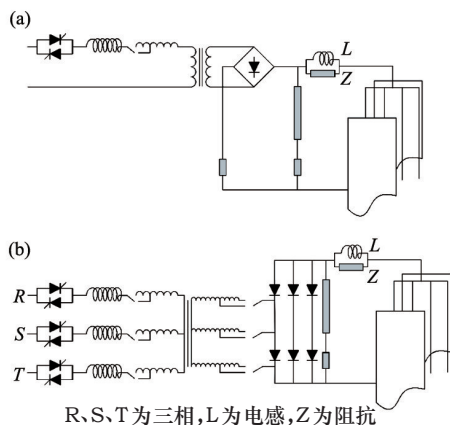


图 2 单相高压电源(a)和三相高压电源(b)电路示意

Fig. 2 Circuit schematics for single-phase T/R (a) and three-phase T/R (b)

## 2 结果和讨论

图 3 为典型的电除尘二次电压与二次电流的关系。图中由上至下为第 1 电场至第 4 电场的伏安特性,可以发现,尽管温度不同,在相同的电流条件下,电除尘器二次电压与粉尘浓度为正相关,粉尘浓度越高,对应的二次电压也更高<sup>[6-8]</sup>。一般电除尘器中,随气流方向电场中的粉尘浓度逐渐降低,在同样电流下加在电除尘器上的电压也逐渐降低,实现降低能耗和控制离子风引起的粉尘二次飞扬<sup>[9]</sup>。第 1 至第 4 电场所加的二次电压  $V$  应符合:  $V_1 > V_2 > V_3 > V_4$  (下标为电场序号)。

低低温电除尘器(cold-side ESP)通常采用单相电源或高频电源<sup>[10]</sup>,采用 ZH 三相电源的低低温电除尘伏安特性可以利用  $\frac{I}{V_a} = k \cdot (V_a - V_c)$  开展预测和分析,其中  $I$ 、 $V_a$  和  $V_c$  分别为电除尘器的二次电流(mA)、二次电压(kV)和放电起晕电压(kV),

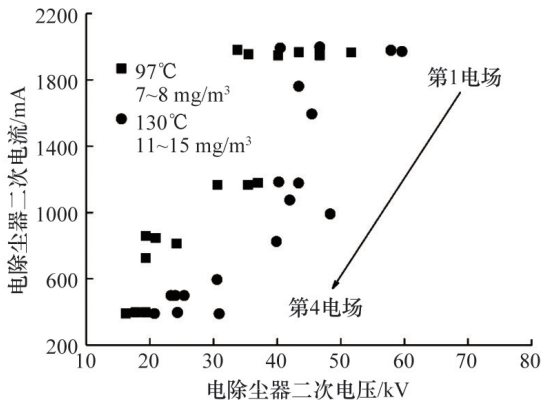


图3 烟气温度对电除尘器运行的影响  
Fig. 3 The voltage-current characteristics of the ESP at different temperatures

$k$ 为实验系数。现电除尘和脱硫塔器进出口的热态主要性能如表2所示<sup>[11]</sup>。

图4为采用静电低压撞击器(electrical low pressure impactor, ELPI)<sup>[8]</sup>测试时,电除尘出口典型的PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度随时间变化趋势,PM<sub>2.5</sub>质量占PM<sub>10</sub>的比值为9%~30%,在第4电场振打时PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放均有增加,PM<sub>10</sub>的峰值约为50 mg/m<sup>3</sup>,持续时间约100 s左右,类似的峰值约10~20 h出现一次,长周期的振打间隔对排放的小时平均值影响不到10%。

高压电源注入功率与电除尘器出口PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度关系如图5所示。图5中PM<sub>10</sub>的排放与高压输出功率基本可以分为两个工作区,当功率低于1000 kW·A时,排放随注入功率的增加而降低,当功率远高于1000 kW·A时,排放因离子风引起的二次飞扬而增加,这些电厂应用实验结果同实验室对细颗粒物收集观察到的规律基本一致<sup>[9]</sup>。

表2 电除尘器进出口热态性能

Table 2 Hot state performance of the ESP inlet and outlet

项目	工况烟 气流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	标干态烟气 流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	烟气温 度/ °C	入口烟尘浓度 (标干态)/ (mg·m <sup>-3</sup> )	烟囱入口净 烟气NO <sub>x</sub> 浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )	吸收塔NO <sub>x</sub> 浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )	烟囱入口净 烟气SO <sub>2</sub> 浓 度/(mg·m <sup>-3</sup> )	电除尘出口 烟尘浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )	脱硫塔颗粒 物浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )
1号炉	进口	3933869	2240503	100	22	33.95	22.5	14.0~16.2	4.6~4.8
	出口	3996605	2280562	99					
2号炉	进口	3935223	2211224	104	22	34.16	33.5	15.4~15.5	3.8~4.1
	出口	3993300	2254583	102					

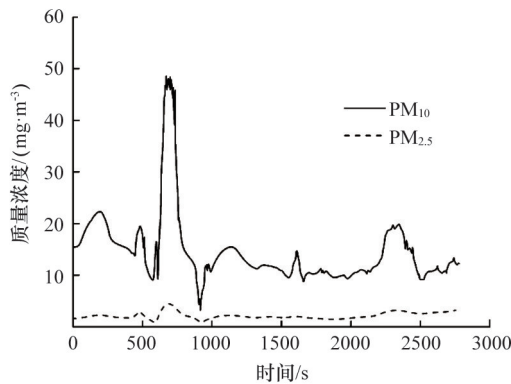


图4 电除尘器出口PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>的质量浓度  
Fig. 4 Mass concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at the ESP outlet

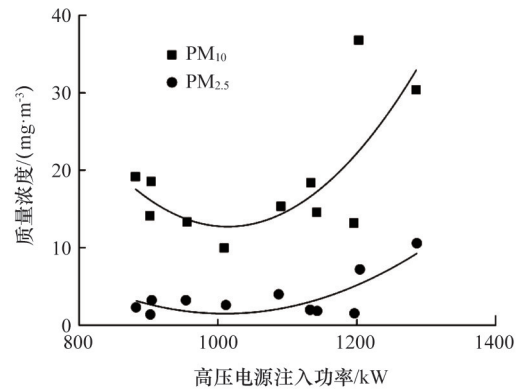


图5 高压电源注入功率与电除尘器出口PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>排放质量浓度的关系  
Fig. 5 Emissions of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and the input power at the ESP outlet

表3比较采用单相和三相电源时系统运行的主要参数,电源的能量利用效率从61%提高至94%,电源的一次电耗从1225 kW·A降至962~1075 kW·A,下降了12%~21%,二次输出功率从753 kW·A提高到900~1010 kW·A。

目前两台机组均实现了电除尘器的出口烟尘浓度低于20 mg/m<sup>3</sup>,PM<sub>2.5</sub>排放低于2.5 mg/m<sup>3</sup>的目标<sup>[11]</sup>。其中1#机组电

除尘器的出口烟尘排放浓度为14.0~16.2 mg/m<sup>3</sup>,除尘效率为99.91%~99.92%,烟囱入口净烟气烟尘浓度为4.6~4.8 mg/m<sup>3</sup>。2#机组电除尘器出口烟尘排放浓度为15.4~15.5 mg/m<sup>3</sup>,除尘效率为99.90%~99.91%,烟囱入口净烟气烟尘浓度为3.8~4.1 mg/m<sup>3</sup>。

在单相电源供电下电除尘器出口烟尘浓度约71 mg/m<sup>3</sup>,

表 3 电除尘器改造优化前后电耗与排放的关系

Table 3 Energy consumptions and emissions before and after the optimization

项目	高压电 源	高压电 源设计			二次输出 功率/ (kV·A)	高压电源 一次输入 功率/ (kV·A)	电 源 能 量 效 率/ %	PM <sub>10</sub> 下 降 率/ %	PM <sub>10</sub> 下 降 率/ %	PM <sub>2.5</sub> 下 降 率/ %	二次注入 功率增 加/ %	一次电 耗下 降/ %	
		容量/ (kV·A)	PM/ (mg·m <sup>-3</sup> )	PM <sub>10</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> )									PM <sub>2.5</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> )
改造前	单相	3376	71	63.5	23.9	753	1225	61%	—	—	—	—	
改造后	ZH2013T	2762	11~12	10.3	2.6	1010	1075	94%	83.8	83.7	89.1	34.1	12.2
			15~16	14.4	1.4	904	962	94%	78.1	77.3	94.1	20.0	21.4

其中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>分别为63 mg/m<sup>3</sup>和24 mg/m<sup>3</sup><sup>[5]</sup>,利用三相电源改造后烟尘平均浓度降至约16 mg/m<sup>3</sup>,其中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>分别降至14 mg/m<sup>3</sup>和2 mg/m<sup>3</sup>左右。总烟尘排放浓度下降77%, PM<sub>10</sub>下降78%, PM<sub>2.5</sub>下降92%。

### 3 结论

通过采用16台ZH三相高压电源和4台低压控制系统改造优化燃煤电厂两台双室四电场电除尘器后,电除尘出口的PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>排放分别为10~16 mg/m<sup>3</sup>和2.0~2.5 mg/m<sup>3</sup>,对应的高压一次电耗为900~1050 kV·A。在同样高电压电耗下,与单相高压电源比较PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>分别下降了78%~84%和92%~94%。

#### 参考文献 (References)

[1] 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. Technical progress for achieving low particle matter emission from coal-fired power plant[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 12.

[2] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>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<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants I: ESP sizing and application[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 23-33.

[3] Li X, Zhang X, Zhu J, 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.

[4] Li S, Li X, Huang Y, 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.

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

[6] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放控制III: 电除尘电源及小分区改造与PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>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, Han Ping, et al. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> 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.

[7] Du C, Yang Y, Wang J, et al. Evaluation of ESP performance via its index value[J]. International Journal of Plasma Environment Science and Technology, 2015 (in Press).

[8] Zhu J, Zhao Q, Yao Y, et al. Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator [J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(3): 285-291.

[9] 沈欣军, 郑钦臻, 宁致远, 等. 燃煤电厂电除尘PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放控制IV: 采用二维PIV除尘[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 43-50.  
Shen Xinjun, Zheng Qinzen, Ning Zhiyuan, et al. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants IV: Investigation on electrostatic precipitation by means of 2D PIV technique[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 43-50.

[10] 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.

[11] 南京电力设备质量性能检验中心. NICE/P/2014-TY2014011-HB01, NICE/P/2014-TY2014012-HB01 神华国能宁夏煤电有限公司鸳鸯湖电厂静电除尘改造后性能试验[R]. 南京: 南京电力设备质量性能检验中心, 2014.  
Nanjing Inspection Center of Quality Performance for Electric Power Equipment. ESP performance evaluation of Yuanyang Hu Power Plant, No NICE/P/2014-TY2014011-HB01, No NICE/P/2014-TY2014012-HB01[R]. Nanjing: Guodian Science and Technology Research Institute, 2014.

(编辑 田恬)

#### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。