

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

王仕龙¹, 陈英¹, 韩平¹, 张国庆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 针对电除尘细颗粒物($PM_{2.5}$)排放控制, 提出利用电除尘指数指导电除尘本体和电源设计选型技术的原理和方法, 并介绍电除尘改造的应用案例。通过优化电除尘指数、采用三相高压电源开展电除尘改造和选型。通过电除尘和脱硫塔除雾器的同步改造, 可以实现烟囱出口颗粒物排放浓度低于 5 mg/m^3 , 同时, $PM_{2.5}$ (直径 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒物)排放浓度低于 2.5 mg/m^3 。示范工程还表明当电除尘器出口 PM_{10} (直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒物)排放在 $6\sim 30\text{ mg/m}^3$ 时, $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比例为6%至20%;当 PM_{10} 排放在 $5\sim 15\text{ mg/m}^3$ 时, $PM_{2.5}$ 排放可低于 2.5 mg/m^3 。

关键词 电除尘; 细颗粒物; 电除尘指数; 三相电源

中图分类号 X513

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.33.002

PM_{10} and $PM_{2.5}$ Emission Control by Electrostatic Precipitator (ESP) for Coal-fired Power Plants I: ESP Sizing and Applications

WANG Shilong¹, CHEN Ying¹, HAN Ping¹, ZHANG Guoqing², ZHENG Qinzhen³, 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 electrostatic precipitation for fine particle emission control. According to the so-called electrostatic precipitator (ESP) index, a novel ESP sizing method is presented for both mechanical and electrical specifications. By using three-phase rectifier transformer power sources, ESPs give very high collection for fine particle emission control. The ratio of $PM_{2.5}$ over PM_{10} is between 6% and 20%. When PM_{10} emission is around $5\sim 15\text{ mg/m}^3$, $PM_{2.5}$ is below 2.5 mg/m^3 . By upgrading ESP and flue gas desulfurization (FGD), particle emissions can be reduced to below 5 mg/m^3 , and $PM_{2.5}$ below 2.5 mg/m^3 .

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

中国是以煤为主的能源消耗大国, 燃煤锅炉主要有工业锅炉和电站锅炉, 大型燃煤电站颗粒物的排放控制技术和设备仍以电除尘为主^[1,2]。《火电厂大气污染物排放标准

(GB 13223—2011)》自2014年7月1日起执行, 现有火力发电燃煤锅炉烟囱出口烟尘排放限值全国为 30 mg/m^3 , 重点地区特别排放限值为 20 mg/m^3 。然而目前大部分燃煤电厂粉尘排

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 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.

放均超过排放限值,开展电除尘改造、降低颗粒物排放,是电力行业和除尘行业面临的重大技术和经济课题。

电除尘器技术的工业应用已有 100 多年的历史,因处理烟气体量大、除尘效率高、适应范围广、设备阻力低、使用简单可靠、运行维护费用低且无二次污染等优点,成为工业烟尘治理的首选技术和设备^[3-8]。目前国内有 200 多家电除尘企业,产品除满足国内需求外,还有部分出口。然而在过去 30 年间,因国家排放标准低、环保力度执行小,国内企业主要是引进、消化和开拓电除尘工业应用,对电除尘新技术的研究不足;同时在电除尘项目招标、工程设计、本体选型、电气设计等方面未能根据燃煤特性,科学合理地实施工程应用,致使目前大部分电除尘器粉尘排放浓度在 50 mg/m³ 以上,对直径小于 2.5 μm 的细颗粒物(PM_{2.5})未能实现有效的控制^[1,7,9]。而在欧洲、日本等地,电除尘器出口排放浓度一般为 10 mg/m³ 左右^[10-12],集成电除尘和湿式脱硫时,烟囱出口粉尘通常低于 5 mg/m³^[13]。

细颗粒物 PM_{2.5} 通常含有 As、Cu、Cr、Hg 等重金属,多环芳烃、二恶英等有机污染物,能够致癌、致畸、致突变,对健康有严重危害^[1,14,15]。目前国内对细颗粒物的研究工作大都针对源解析、环境影响及健康评价,缺乏对排放控制技术的基础研究,相关工程应用业绩也较少。开展根据细颗粒物收集机理提出高效电除尘选型具有重要的现实意义。

粒径大于 10 μm 颗粒物在电除尘器中的收集主要由所受静电力和 Stocks 阻力决定,而细颗粒物 PM_{2.5} 的收集则主要与荷电和气流分布有关。Mizeraczyk 等^[15-17]利用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术研究电除尘器中细颗粒物的轨迹和收集效率,揭示了离子风影响细颗粒物收集的重要性,并表明从高压线到阳极板离子风的速度逐渐减小。目前国内电除尘器高排放及对 PM_{2.5} 收集效率低的主要原因有:1) 电除尘本体分区少,导致电除尘中放电不均匀、工作电压低、电流小并对燃煤敏感;2) 高压电源技术落后,在高浓度粉尘下电晕放电较弱,第一电场收集效率低;3) 电源控制或本体设计不良,末电场离子风使细颗粒物在到达收尘电极前又返回气流中;4) 电厂煤种复杂、变化快,电除尘器中电晕放电难以优化,不合理电极振打造成粉尘严重二次飞扬。

在高效率电除尘器中,颗粒物气流分布应该是在远离收集板处速度较高,能尽快地到达收集板,而在收集板附近,速度趋于零,减少二次飞扬和不向除尘器中飞扬,这种理想电除尘设计尚未有定论。为提高工业电除尘器对细颗粒物的收集效率,现主要采用的技术有电凝并^[18,19]、膜电极^[21]、气流优化^[22,23]、移动电极^[24]、高效电源^[25-28]和电除尘指数优化^[29]。虽然这些技术已部分在国内外的工业电除尘器中得到应用,但几乎所有工作都基于经验,目前尚未见电除尘器高效收集细颗粒物的详细研究报告,也未见根据细颗粒物收集理论成功设计、制造或改造工业电除尘器的案例。

本文从电除尘基础原理到工业设计选型、本体和电源技术及其工业应用出发,指导电除尘节能减排改造和细颗粒物排放控制,旨在为大型燃煤锅炉电除尘器改造提供理论基础和应用案例,推动细颗粒物排放控制、引导电除尘行业发展。

1 传统电除尘选型方法

电除尘器捕集颗粒物过程包括以下 4 步:1) 负极性高电压放电、烟气电离、产生负离子;2) 粉尘在电场和空间负离子的作用下被荷电^[30];3) 带电粉尘在电场力和离子风的作用下被收集到阳极板;4) 阳极板上的粉尘在振打作用下收集于灰斗^[31]。上述 4 个过程中的任何一个没有达到设计要求都可能导致电除尘的高排放^[32]。目前电力行业电除尘的设计主要是依据 Deutsch 修正公式(式(1))^[4],多年来,国内电除尘的设计和选型仍延续该方法^[7,8]。

$$\eta = 1 - e^{-\omega_e A/Qk} \quad (1)$$

式中, ω_e 为粉尘的有效驱进速度, cm/s; A 为电除尘的总收尘阳极板面积, m²; Q 为电除尘待处理的烟气流量, m³/s; k 为经验系数,一般取 0.5。

将阳极板总面积与烟气流量比值定义为电除尘的比集尘面积 $S=A/Q$, 其单位为 m²·(m³·s⁻¹)⁻¹。根据传统选型和设计原理,电除尘的排放浓度与入口粉尘浓度、粉尘驱进速度、电除尘比集尘面积有关。比集尘面积和驱进速度愈大,除尘效率愈高。当烟气风量一定时,欲提高电除尘效率,只能增加收尘极板面积以增大比集尘面积。

电除尘设计和制造,在选取粉尘驱进速度后,根据式(1)推算电除尘比集尘面积和除尘效率。由于粉尘驱进速度是半经验性的,不同煤种及锅炉具有不同的取值范围。目前电除尘企业多根据煤的特性建立粉尘驱进速度与煤中硫、钠等含量相关的数据库^[7,8]。然而在工业应用中,即使煤种和锅炉相同,采用不同的高压电源技术或不同的本体结构设计,电除尘都会呈现迥异的除尘效率。

传统的电除尘选型方法难以对 10~30 mg/m³ 排放给出合理的设计和改造方案,根据驱进速度开展电除尘设计和选型偏差比较大。合理科学的电除尘改造方案应是通过比较目前的电除尘工况参数和改造后的参数来分析预测改造后的粉尘排放。

电除尘器效率在很大程度上依赖于除尘器中的二次电压和二次电流,图 1 是电除尘在冷态下的二次电压与二次电压关系图(图中坐标数值仅作示意), V_c 为起晕电压, V_h 为火花电压, k 为经验系数,二次电流 I 与二次电压 V 符合图中关系式。图 2 是电除尘阴阳极集尘后的照片,图 3 是在集尘后电除尘电流电压的各种关系图(图中坐标数值仅作示意),所对应的现象如表 1 所示。因阴极或阳极集尘、电极变形或移位等,电除尘的运行参数可能出现很大的变化和不同的除尘效率,根据式(1)很难预测实时的除尘效率。

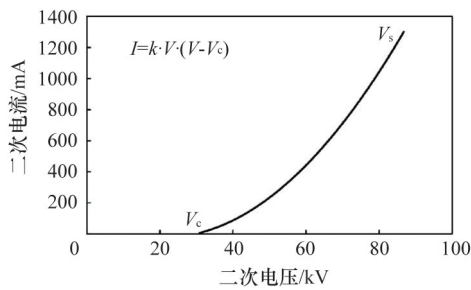


图1 空气中典型的电除尘电压电流关系

Fig. 1 Typical voltage and current characteristics

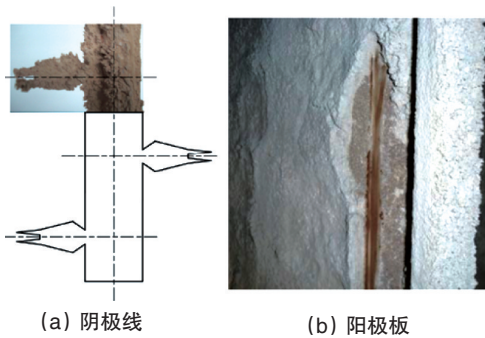


图2 阴、阳极上的典型集灰照片

Fig. 2 Particle collection on high-voltage electrodes

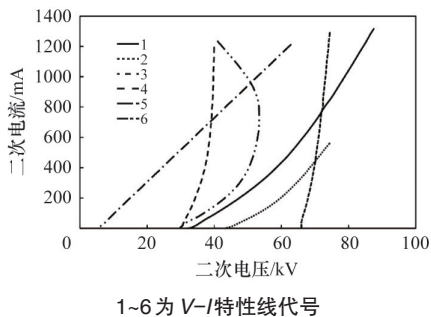


图3 电除尘动态伏安特性及诊断

Fig. 3 Various voltage-current characteristics and their trouble-shooting techniques

表1 电除尘伏安特性与问题诊断

Table 1 V-I characteristics of ESPs and their trouble-shooting techniques

V-I特性线	电除尘器问题诊断
1	本体及电源正常运行,除尘效率最高
2	本体及电源基本正常,但阴极线及阳极板上有可能清灰不完善;对中比电阻的粉尘很难判断阳极板上(图2(b))是否有严重的反电晕放电
3	本体及电源基本正常;阴极振打清灰强度不够(图2(a))
4	本体及电源基本正常;粉尘比电阻较高有比较强的反电晕放电,效率低
5	高压线短路,除尘器不能正常工作
6	本体及电源基本正常;粉尘比电阻较高,电源控制技术比较落后

2 电除尘指数与粉尘排放

为改变传统电除尘选型的局限性,针对10~30 mg/m³的电除尘排放要求,在电除尘分级除尘效率^[25]和总除尘效率^[29]的基础上提出利用电除尘指数进行选型设计的原理和方法。利用在线的电除尘指数不仅可实时评估电除尘运行参数和除尘效率,而且可对本体和电源开展选型。电除尘效率事实上主要取决于2大因素:本体的大小和运行电压的高低。电除尘指数可以有效地反映这2方面,其与电除尘效率满足如下关系:

$$\lg \frac{1-\eta(r)}{\beta} = -\alpha \cdot E_a \cdot E_p \cdot S \quad (2)$$

式中, $\eta(r)$ 为分级除尘效率; $E_a \cdot E_p \cdot S$ 定义为电除尘指数; α 为工况下的实验系数; β 为工况下的实验系数; E_a 为电除尘器中平均电场强度,kV/cm; E_p 为电除尘器中峰值电场强度,kV/cm。

电除尘指数的大小反映了单位烟气在电除尘器中静电储能的高低,储能越大除尘效率就越高。式(2)适应于常规单相电源、中频电源、高频电源、三相电源,三、四及五电场除尘器。图4是对多台400~410 mm间距电除尘测试结果,电站锅炉发电量在250~600 MW之间。

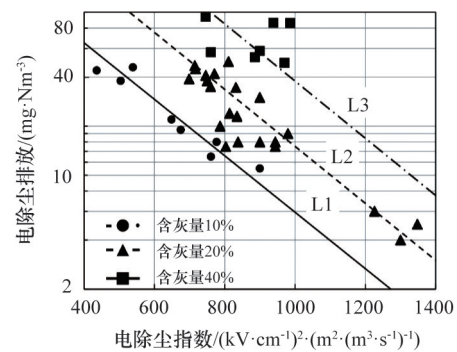


图4 电除尘排放与电除尘指数的关系

Fig. 4 ESPs emission and its index value

图4中,实线L1对应的燃煤含灰量在10%左右、虚线L2为20%左右、点化线L3为40%左右。考虑到目前电厂燃煤复杂的变化情况,建议电厂根据L3线设计选型电除尘本体和电源,以实现10~30 mg/m³排放,运行电场强度和比集尘面积或电除尘指数要满足如下条件:

$$E_a \cdot E_p \cdot S \geq 1300 \left(\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3/\text{s}} \quad (3)$$

根据式(2),可以推出电除尘排放与电除尘比集尘面积、运行电压或电除尘指数的关系,图5是在采用新一代三相电源下典型的电除尘指数、比集尘面积、运行电压、煤的含灰量关系图。图5中的3条曲线分别代表电除尘指数为700、1000和1300时比集尘面积与运行电压关系,对应的电除尘排放分别为100、50、20 mg/m³左右。如对比集尘面积S为80~110 m²·(m³·s⁻¹)⁻¹的四及五电场除尘器,电场的平均电压应高于70 kV才可能实现20~50 mg/m³的排放要求。烟气温度、湿度、灰比电阻、电极振打、电源技术等对电除尘效率的影响都

可利用实时的运行电除尘指数来体现。这些参数都以电除尘指数为媒介,对电除尘器改造进行指导,如图6所示。

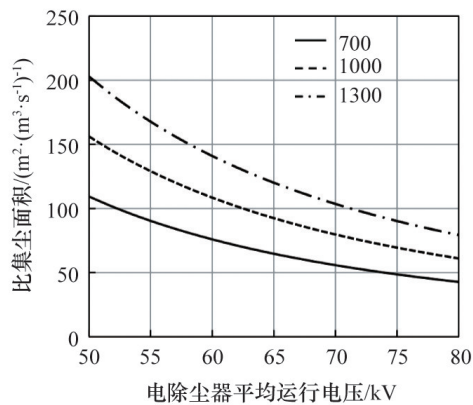


图5 不同电除尘指数下运行电压及比集尘面积的关系
Fig. 5 Relationships between ESP specific collection area and applied voltages at different ESP index values

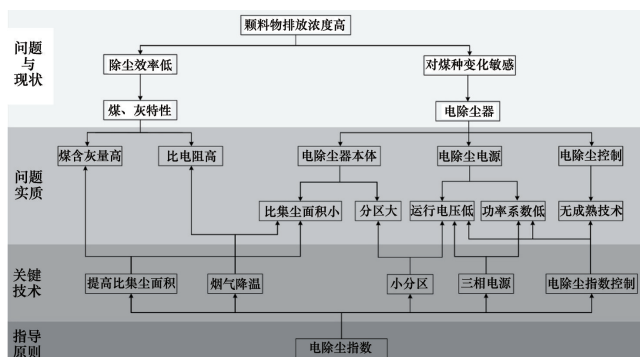


图6 电除尘指数与电除尘器改造技术路线
Fig. 6 ESP index and the techniques for ESP sizing

3 电除尘本体选型和分区

优化电除尘本体选型,即是在相同的本体大小下,实现电除尘指数的最大化。目前电除尘本体选型主要问题表现为:1) 比集尘面积 S 相对较小($50\sim 80\text{ m}^2\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$);2) 高压电源与本体不匹配导致运行电压低(平均场强为 $1.5\sim 2.5\text{ kV/cm}$);3) 本体大分区制造。

电除尘采用大分区制造,会导致电除尘运行电压低、对煤种变化敏感。例如600 MW燃煤机组采用五电场的电除尘器一般分为20个相等的电场分区,单电场的比集尘面积在 $20\sim 25\text{ m}^2\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 左右,总比集尘面积在 $100\sim 125\text{ m}^2\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 左右。

根据国内外电除尘的应用和本研究组对电除尘改造的经验,建议对 $95\sim 160^\circ\text{C}$ 下的燃煤烟气采取如下的相对分区比例。为改善电除尘放电特性,国产电除尘器节能减排的本体改造主要针对第一和第二电场,采取如下建议的前后多分区

改造:当煤种含硫质量分数分别为3%、2.5%、2%、1.5%、1%、0.5%,相对分区比例应为1、1.5、2、2.5、3、4。每增加一个分区,即可将该电场电压提高 $5\sim 10\text{ kV}$ 左右,从而将电除尘指数提高 $10\%\sim 20\%$ 。集尘面积为 $20\sim 25\text{ m}^2\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 时,单相电源下第一电场的除尘效率在 $75\%\sim 85\%$ 左右;采用分区和三相电源后,第一电场除尘效率可达 95% 以上,在比集尘面积 $11\sim 12\text{ m}^2\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 时除尘效率可达 90% 以上^[23]。

除此之外,电除尘小分区还有如下优点:1) 改善电除尘中放电的均匀性,降低反电晕强度、提高电除尘器有效收尘体积;2) 降低振打引起的二次飞扬,提高除尘效率。

如图7所示,采用大分区阳极振打会造成电除尘的多次高排放。根据电除尘指数及分区原理可推导出电除尘本体改造模型,主要参数包括各电场的起晕电压、电流密度、注入功率、比集尘面积大小、振打周期及除尘效率。起晕电压从一电场到末电场逐渐增加、放电电流或注入功率逐渐减低,电场有效长度为两头小中间大,电除尘各电场运行在相同电压但不同电流密度下。

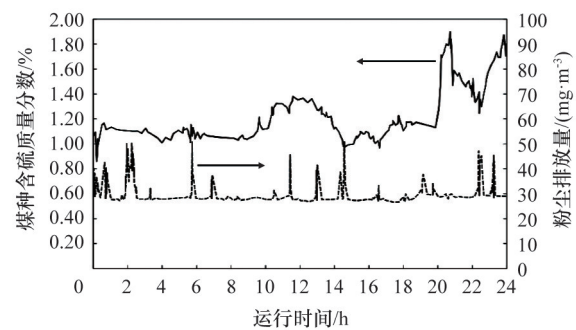


图7 24 h电厂燃煤含硫的变化和粉尘排放
Fig. 7 Time-resolved PM emission and sulfur content in coal within 24 hours

在相同电除尘本体下,烟气温度可以影响到烟气流量和最高的运行电压,最大的电除尘指数与烟气温度可根据式(4)预测:

$$E_a \cdot E_p \cdot S = \psi \cdot \left(\frac{273 + T_0}{273 + T_1} \right)^3 \quad (4)$$

式中, T_0 和 T_1 分别为降温前和降温后的烟气温度, $^\circ\text{C}$; ψ 为本体所对应的工况系数。

降温不仅可以减低烟气在电除尘器中的流速,还可提高其中的气体密度,从而增大击穿电场强度,实现电除尘指数的最大化。针对 $400\sim 410\text{ mm}$ 间距的电除尘,三相电源的平均电压与烟气温度的关系可根据式(5)进行预测。如温度从 140°C 降低到 95°C ,运行电压可从 70 kV 提高到 80 kV ;平均场强从 3.5 kV/cm 提高到 4.0 kV/cm 。降温也可有效地减低灰的比电阻,进而提高放电功率和电除尘效率^[29]。

$$V_a(T) = 80 - 0.2(T - 95) \quad (5)$$

式中, $V_a(T)$ 为电除尘器在烟气温度 T 下的最高平均运行电压, kV ; T 为烟气温度, $^\circ\text{C}$ 。

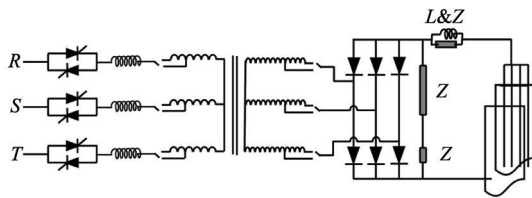
4 电除尘高压电源及其控制技术和方法

4.1 电源主电路

电源技术的先进性是指在相同除尘器本体和燃煤条件下,电除尘指数的最大化。电除尘高效电源技术主要包括3大部分:主电路技术、高压电源控制技术和高低压集成技术。任何一部分不能有效地优化控制,电除尘器都不可能实现低的排放。图8是高效三相电源的主电路。传统的电除尘单相电源和本体设计基本都采用:1)同极距400~410 mm;2)各电场的电场长度或比集尘面积相同;3)高压电源电流密度0.4 mA/m²;4)二次平均电压72 kV。图9为单相电源在不同控制下的平均电压、峰值电压及电压纹波系数 κ 的关系图,电压纹波系数定义为:

$$\kappa = \frac{V_p - V_a}{V_a} \quad (6)$$

式中, V_a 和 V_p 分别为平均和峰值电压,kV。



R、S、T为三相,L为电感,Z为阻抗

图8 三相高压电源主电路

Fig. 8 Circuit topology for the three-phase T/R power source

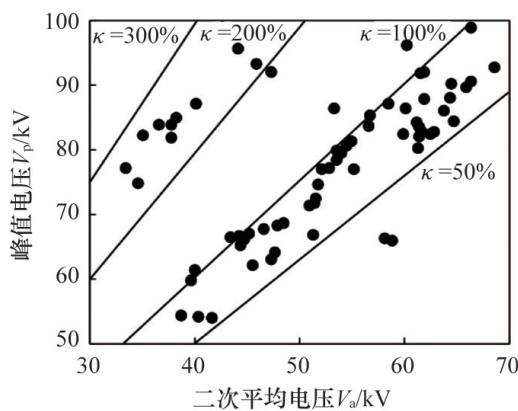


图9 单相电源电除尘运行平均电压与峰值电压的关系

Fig. 9 Relationship between the average and peak voltages for single-phase T/R power source

在火花控制下,电压的纹波系数在75%左右,在限流、间隙及等节能优化下纹波系数在250%左右。间隙或限流虽节能效果好,但均难以降低排放,火花控制同样是一种高排放高能耗的控制技术^[26]。异极距400~410 mm的电除尘器,温度在140~150℃时,电除尘的峰值电压为80 kV左右。三相电源

的电压纹波系数 κ 小于5%,是一种恒压恒流高压电除尘电源。

目前电除尘新电源主要指高频电源^[36]和三相电源^[25],各电源厂家的主要技术差异并非主电路,而是电源控制技术。采用高效电源对传统的单相电源进行减排改造,需要考虑电除尘的运行电压、电除尘的运行电流密度、电除尘的峰值电压及电源功率系数等问题。

4.2 电除尘效率与二次电压(运行电压)

峰值电压主要决定于高压电源所采用的主电路。对常规单相电源(72 kV)而言,平均电压 V_a 为45 kV时,峰值电压 V_p 在80 kV左右。同样的平均电压条件下,高频电源(80 kV)的峰值电压在45 kV左右(间隙和脉冲供电除外),三相电源(82 kV)的峰值电压在47 kV左右。如式(2)所示,除尘效率与电除尘运行的平均电压与峰值电压间的乘积有关,即仅在高频电源或三相电源的运行电压高于60 kV时,才能满足式(7)以产生减排效果。如运行电压不足60 kV,则改造效果不明显。

$$[V_a \cdot V_p]_{\text{改造后}} \geq [V_a \cdot V_p]_{\text{改造前}} \quad (7)$$

对于400~410 mm间距的电除尘器,高频或三相电源的平均运行电压 V_{at} 与单相电源的平均运行电压 V_{as} 应分别满足式(8)和式(9)。单相电源在火花控制下工作,应满足式(8);单相电源在间隙或限流优化控制下应满足式(9)。图10为对250~600 MW机组电除尘器应用实测比较。图10中两实线分别为式(8)和式(9)。

$$V_{at} \geq 1.25V_{as} \quad (8)$$

$$V_{at} \geq 1.25V_{as} + 10 \quad (9)$$

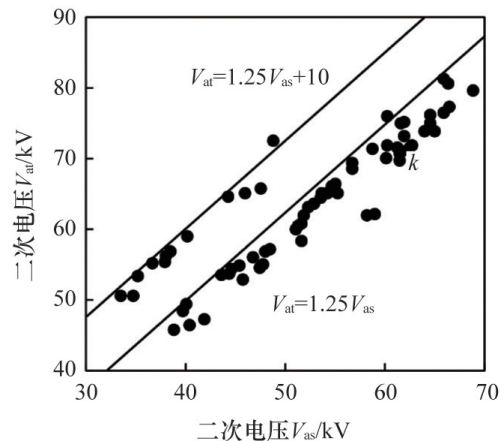


图10 三相电源运行电压 V_{at} 与单相电源二次电压 V_{as} 的比较

Fig.10 Applied voltage comparison of three-phase and single-phase T/R power source

4.3 二次电压与电源主电路

单相电源因电压纹波系数 κ 在75%~250%之间(火花75%,限流、脉冲、间隙250%),运行的最高平均电压主要受制于峰值电压。对高频电源和三相电源,因纹波系数都小于5%,电除尘的运行电压受变压器的电流限制,而不受电压限

制。同时,高频电源的运行电压也受电源和除尘器间的谐振影响,较大本体(如2000 mA对应的本体)对应的分布电容高、电源谐振频率低,高频电源与本体难匹配,电能转换效率低,运行电压低。目前高频电源运行电压在30~50 kV之间的主要原因即是电源和本体不匹配。三相电源在300 Hz下运行,不存在匹配问题,运行电压仅取决于适配变压器的电流容量。

4.4 二次电流与电源主电路

二次电流同样包括平均电流和峰值电流,单相电源的峰值电流一般为2400~3000 mA,亦远高于高频或三相电源对应的峰值电流。峰值电流高,则可在发生火花放电后,短时间内对电除尘本体电容充电。一般高电压的恢复时间多在火花放电发生后的2~8个波形内。而高频电源受峰值电流限制,仅能在短时间内关断火花放电,但无法在短时间内恢复电压。对于三相电源而言,峰值电流与工频电源基本相同,可在火花放电发生后几个波内恢复电压。

目前各电厂的单相电源配置多根据电除尘阳极板的大小和二次电流密度0.4 mA/m²来设计选型。事实上,高效的电源应根据电场、烟气温度、粉尘浓度设计,二次电流密度一般在0.1~0.8 mA/m²之间,最优的匹配情况是电流和电压同时达到电源的极限值。同时,采用单相电源的电除尘器运行电压主要受限于其中火花放电,而高频电源和三相电源则主要取决于电源的电流容量。目前单独三相电源容量最大为86 kV和2.4 A,可以满足大型燃煤锅炉的电除尘改造。

4.5 高压电源功率系数

由于火花放电的存在,高压电源变压器的耦合系数多较小。图11是典型单相和三相电源的功率系数比较图,采用金华市中荷环保科技有限公司开发的ZH系列72 kV和1.2 A电源,实验电除尘为125 MW燃煤机组。对单相电源而言,输出在额定值的50%左右时,功率系数约为60%,如在额定值80%~90%左右,系数约为70%~80%。对三相电源而言,若输出在额定的50%左右,功率系数约为85%,如在额定的90%~95%左右,系数约为92%~95%。

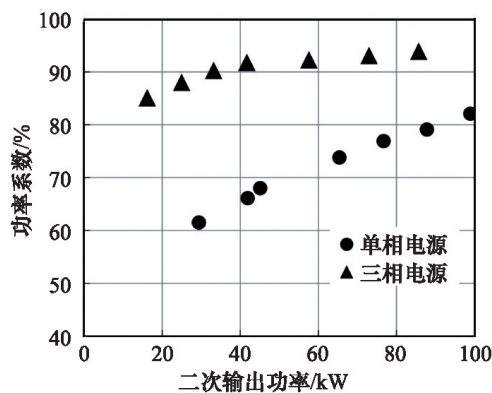


图11 单相和三相电源的功率系数比较

Fig. 11 Power factor comparison of single-phase and three-phase T/R power source

图11中二次输出功率即电除尘放电功率,图中的功率系数也即高压电源的电源效率,可以表示电源的能耗水平。同时,高频电源的功率系数完全取决于电源中的整流电容,电容损坏或电容容值偏小都会造成三相不平衡。

4.6 高压电源控制技术

目前高压电源控制技术主要有火花、限流、间隙、反电晕和电除尘指数等形式。但电除尘的系统控制仍缺少成熟的技术和产品,为使系统电耗和烟尘排放最低,电除尘器各台高压电源应维持的电压和电流仍缺乏相应的理论支持。利用电除尘指数最大化和功耗最小化控制有望实现电除尘电源控制技术的进一步突破。

4.7 高压电源和本体选型

图10的基本原理之一是:第一电场的高压电源要使电压和电流同时达到极限运行,最高的运行电压主要与烟气的温度和含水量有关,而电流主要与粉尘浓度和阴极线有关,高效的电除尘在95~120℃时,运行平均电场强度在3.3~4.0 kV/cm或电压在66~80 kV(400 mm的电除尘),电流密度在0.3~0.8 mA/m²。电厂的第二和第三电场可根据排放和能耗要求设计为不同电流密度下的限流运行,电流密度可在0.2~0.4 mA/m²,对末电场一般要通过选合适的电极和电源实现电流和电压的同时极限运行。一般电流密度在0.1~0.2 mA/m²,电场强度在3.3~4.0 kV/cm。表2比较了高频和三相电源的主要特性。表3详细比较了传统电除尘选型模型式(1)和电除尘指数模型式(2)。

5 电除尘高压电源及其控制技术和方法

5.1 电除尘边界条件优化

电除尘改造技术目的是在电除尘器基础上提高电除尘指数,针对国内目前电除尘排放情况和电除尘指数选型模型,建议遵循表4的改造原则和核心技术,其主要内容包括评估电除尘排放运行现状、改造内容的边界条件(灰量、烟温、比集尘面积、电源等)、改造目标和改造核心技术问题。

针对不同的烟气温度、煤种条件^[35],图12进一步总结了电除尘应遵循的改造选型原则。烟气温度超过140℃时,可采用电除尘器前降温的办法来提高电除尘的效率;当燃煤中的含硫量超过1.5%,或烟气温度在120℃以下时,可直接采用电源改造实现电除尘的减排;当烟气温度在120~140℃左右时,可根据电除尘本体设计、燃煤特性等提出降温、本体增容、新电源改造等不同的技术路线。高效三相电源与单相电源的应用有不同的电压和电流等级要求,在本体和电源选型时应注意以下特点:1)在相同二次电压的情况下,单相电源的放电电流比三相的高20%左右;2)在相同二次电流的情况下,单相电源的放电电压比三相的低20%左右;3)三相电源的工作最高电压接近单相电源的峰值电压,对同一台电除尘器,电压可提高20%~100%,电流可提高30%~100%,注入放电功率可在单相电源的50%~300%,根据需要进行调节。

表2 电除尘电源比较(400 mm电除尘)

Table 2 Comparison between three-phase T/R power source and high frequency power source (400 mm ESPs)

比较内容	三相电源	高频电源
供电	三相平衡	三相平衡
设计平均电压/峰值电压	80 kV/82 kV	85 kV/85 kV
单台电源最大功率	86 kV, 2.2 A	85 kV, 1.7 A
电压纹波系数(满负荷下)	<5%	<1%
电压纹波系数(限流、间歇)	2%~5%	100%~200%
运行平均电场强度(实测)	3.0~4.0 kV/cm	2.5~3.0 kV/cm
电源利用效率	≤90%	≤90%
主要供电方式	(低比电阻)	火花/恒压/恒流
	(高比电阻)	最低排放
对本体机构的敏感度	小	大
对粉尘浓度的敏感度	小	大
推荐应用	单台电源电流在 1200 mA 以上	单台电源电流在 1200 mA 以下
国内应用工程	125~600 MW	125~600 MW

表3 电除尘选型模型比较

Table 3 Comparison of different models for ESP selection

内容	Deutsch 修正公式	电除尘指数
除尘效率	$\ln(1-\eta) = -(\omega_k \cdot S)^k$	$\lg \frac{1-\eta}{\beta} = -\alpha \cdot E_s \cdot E_p \cdot S$
参数	1) 比集尘面积 2) 粉尘迁移速度	1) 比集尘面积 2) 电场强度
除尘器的重力收集	不能预测	系数 β 主要与电除尘的自然收集效率有关
提效改造技术和预测	相同工况下,通过增大比集尘面积提效	相同工况下,分析电压最大值,实现电除尘指数最大化
高低压电源	无直接关系,经验修正;不同控制下除尘效率(火花、间隙、限流限压等)无法预测	直接相关,不同控制下运行电压与除尘效率直接相关
烟气温度	因与集尘面积相关,与温度成一次相关函数	因与场强和比集尘面积相关,与温度成三次相关函数
燃煤和粉尘	迁移速度经验公式	运行电压
本体分区	无直接影响	与电压直接相关
适应性	1) 选型复杂,粉尘迁移速度要不断修正,很难使用	1) 适应高低排放的预测
	2) 不适应不同的除尘厂家	2) 适应所有的电除尘生产厂家
	3) 不适应不同的燃煤锅炉	3) 适应于不同的燃煤锅炉

表4 电除尘改造原则和核心技术

Table 4 Principles and techniques for ESP sizing

目前电除尘排放/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	改造目标/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	改造基础	改造核心技术
10~200	<30	比集尘面积,烟气温度,煤含灰量	电源分区选型
100~200	<20	比集尘面积,高效电源,烟气温度,煤含灰量	一、二电场分区;末电场高压电极
50~100	10~20	比集尘面积,高效电源,烟气温度,煤含灰量	一、二电场分区;气流分布;高低压系统控制

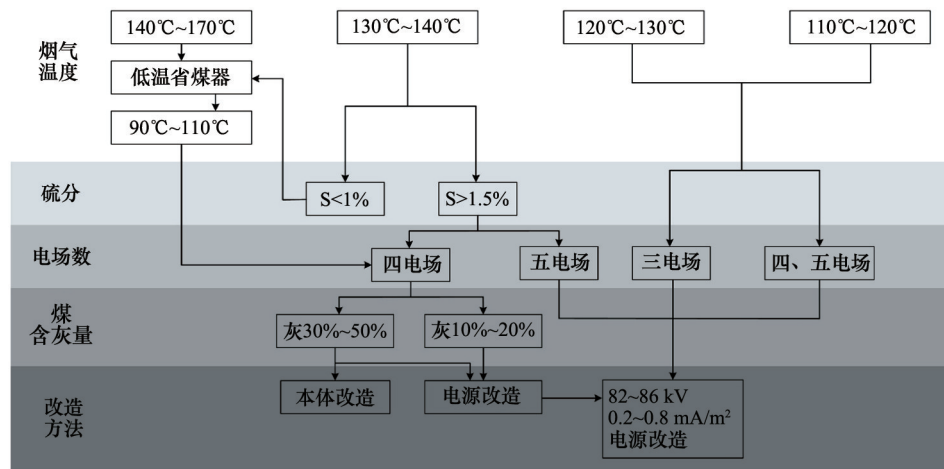


图 12 电除尘改造基本原则

Fig. 12 ESPs sizing principle

5.2 电除尘对PM₁₀及PM_{2.5}的排放控制

一般认为,传统的电除尘无法高效收集PM_{2.5}^[9,34,35],电除尘出口PM_{2.5}占PM₁₀的比例在28.0%~52.5%^[11]。图13是采用ZH系列三相电源电除尘改造后,典型的电除尘出口颗粒物中PM_{2.5}与PM₁₀的比例关系,电源和本体匹配选型根据单电场电除尘指数^[38],测试机组容量包括150、250和350 MW。PM_{2.5}占PM₁₀的比例在6%~20%,当PM₁₀排放为25~30 mg/m³时,PM_{2.5}的排放为4 mg/m³;当PM₁₀排放为5~15 mg/m³时,PM_{2.5}的排放为2 mg/m³以下。

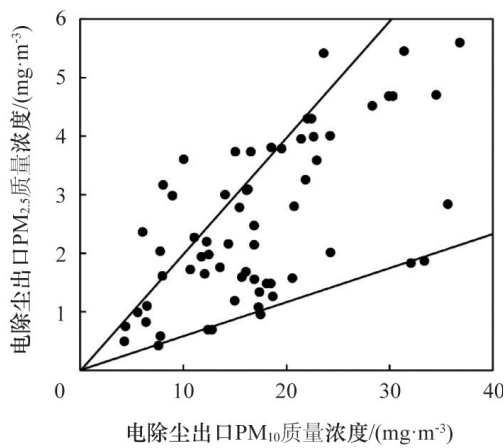


图 13 PM_{2.5}与PM₁₀的排放关系

Fig. 13 PM_{2.5} emission vs. PM₁₀ emission

当电除尘每个电场均不处于振打状态时,PM_{2.5}与PM₁₀的比例在6%左右,当存在电场振打或短路时该比例可提高到20%左右。同对电除尘分级效率实验研究一样^[26],大型燃煤机组的工业应用也证实采用电除尘指数理论和新型三相电源,可高效控制燃煤电厂的PM_{2.5}排放。西安热工研究院报道电袋除尘器PM_{2.5}出口排放为8~10 mg/m³^[39],表明高效电除尘对PM_{2.5}有更高的收集效率。

5.3 电除尘改造案例分析

某地一台330 MW燃煤发电机组,原配两台卧式双室四电场干式电除尘器,设计效率为99.7%,无法满足20 mg/m³的排放要求。为满足2014年7月1日起实施的《GB 13223—2011 燃煤电厂大气污染物排放标准》中重点地区烟尘浓度不高于20 mg/m³的要求,电厂于2013年10月对电除尘本体和电源进行改造。

表5为燃机的主要参数,原有电除尘器的外壳、阳极板、振打、比集尘面积等均保持不变,本体改造主要包括第一和第四电场阴极线前后分区,电源改造主要是将原来的16台单相电源改为18台三相电源^[36]。改造前电除尘器的电除尘指数在600 (kV·cm⁻¹)²·m²·(m³·s⁻¹)⁻¹左右,改造后电除尘指数在900~1000 (kV·cm⁻¹)²·m²·(m³·s⁻¹)⁻¹左右,排放可利用图4中的L2线预测和分析。

利用静电低压撞击器(electrical low pressure impactor, ELPI)分析测试PM₁₀^[23],图14为改造后在不同工作电压下运

表 5 除尘器入口烟气参数

Table 5 Flue gas parameters of ESP inlet

煤种	烟气量/(m ³ ·h ⁻¹)	烟气温度/℃	含尘量/(g·m ⁻³)	实际烟尘温度/℃	实际含尘量/(g·m ⁻³)
设计煤种	1075250	125	19		
校核煤种	1088599	128	24	135~155	24
校核煤种	1087802	128	19		

行电除尘器后典型的 PM_{10} 分布, PM_{10} 分别为 12.56 mg/m^3 、 17.34 mg/m^3 和 32.02 mg/m^3 ,正常情况下 PM_{10} 的排放在 $12\sim 15\text{ mg/m}^3$ 。在脱硫塔除雾器改造后,图15比较电除尘出口和脱硫塔出口 PM_{10} 的分布,电除尘出口的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别为 12.56 mg/m^3 和 0.74 mg/m^3 ,脱硫塔出口的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别为 3.97 mg/m^3 和 1.13 mg/m^3 , $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例在28%左右。电除尘和脱硫塔对细颗粒物的协同收集保证了烟囱出口 PM_{10} 排放低于 5 mg/m^3 ,这是国内首次实现了燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 排放低于 2 mg/m^3 。值得注意的是,尽管脱硫塔并没有减少 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下细颗粒物的排放,但对 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的细颗粒物收集效率高,从而大幅度降低 PM_{10} 。

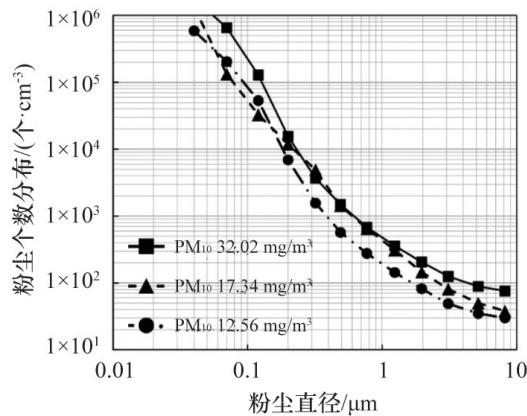


图14 电除尘出口 PM_{10} 的颗粒物数分布
Fig. 14 Particle number concentrations at the ESP outlet

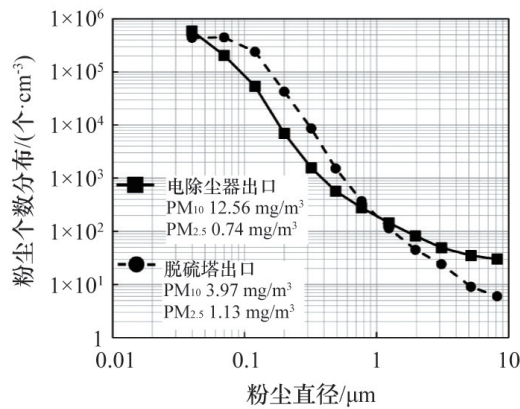


图15 电除尘出口和脱硫塔出口 PM_{10} 的颗粒物数分布
Fig. 15 Particle number concentrations at ESP and flue gas desulfurization (FGD) outlets

对仍采用两节除雾器的脱硫塔,图16、图17为一典型的600 MW机组电除尘改造后,2 d之内煤种变化引起的电除尘出口、电除尘入口与脱硫塔出口粉尘浓度的关系。采用三相电源和电除尘指数供电,电除尘入口粉尘浓度为 $20\sim 45\text{ g/m}^3$,电除尘均可以保持低于 20 mg/m^3 的排放。然而对应脱硫塔的除尘效率小于30%,随电除尘出口粉尘浓度的减少,脱硫塔

除尘效率降低。目前本研究组也对40多台燃煤锅炉开展了电除尘改造,具体电厂及改造内容如表6,通过更进一步的工程应用,推动电除尘指数获得更广泛的推广。

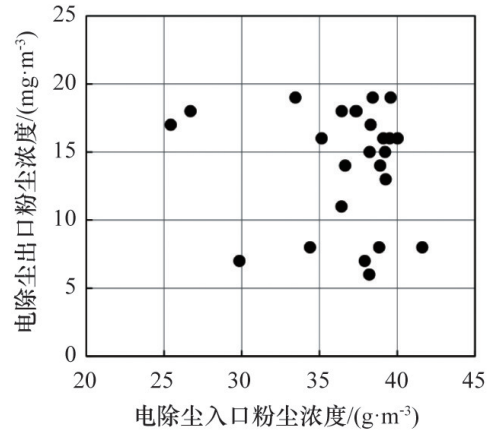


图16 600 MW机组电除尘出口与入口粉尘浓度关系
Fig. 16 ESP inlet and outlet particulate concentrations of a 600 MW power plant

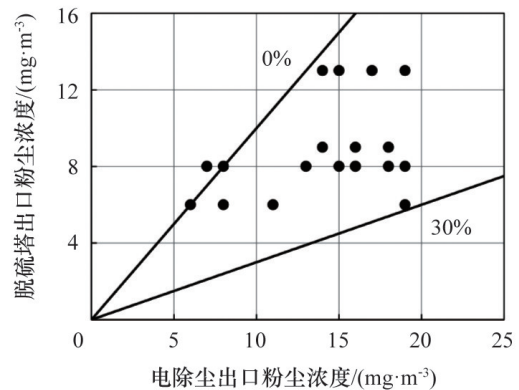


图17 600 MW机组电除尘出口与脱硫塔出口粉尘浓度关系
Fig. 17 ESP and FGD outlet concentrations

6 结论

采用电除尘指数开展电除尘本体设计、选型和优化电源配置可非常有效地提高电除尘的除尘效率,针对目前国内电除尘改造,研究表明:1)传统的电除尘效率模型难以适应 $10\sim 30\text{ mg/m}^3$ 低排放的电除尘本体设计和电源选型,利用电除尘指数模型对现有电除尘本体和电源改造可实现电除尘出口粉尘排放 $10\sim 30\text{ mg/m}^3$,满足新的国家排放标准要求;2)目前各大电厂都面临着电除尘提效改造的压力,采用电除尘指数开展本体设计和应用高效三相电源,将大幅度地降低燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 的排放。 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比例可降低到6%左右,排放可控制在 2.5 mg/m^3 以下;3)电除尘和脱硫塔的协同收尘,可使烟囱出口 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放分别低于 5 mg/m^3 和 2.5 mg/m^3 。

表6 2013—2014年间电除尘改造案例
Table 6 ESP sizing demonstrations during 2013–2014

序号	电厂	改造		低温省煤器
		电源	本体	
1~4	华能北京热电有限责任公司4×250 MW	√	√	√
5~6	天津大港电厂1#、2#炉2×330 MW	√	√	
7	天津大港电厂4#炉2×330 MW	√		
8	天津大港电厂3#炉2×330 MW	√		√
9	山西蒲洲发电分公司1#炉350 MW	√		
10~11	山西王曲发电有限责任公司1#、2#炉600 MW	√	√	
12~13	山东阳城电厂1#、2#炉150 MW	√		
14~15	国华河北定州电厂1#、2#炉600 MW	√		
16~17	国华河北定州电厂3#、4#炉600 MW	√		√
18	山西西山武乡发电厂2#炉600 MW	√	√	
19~20	国能鸳鸯湖电厂2×660 MW	√		√
21~22	大唐太原二电厂2×300 MW	√	√	
23	河北宣化电厂300 MW	√		
24	华能山东河运电厂300 MW	√		√
25~26	湘潭电厂2×600 MW	√		
27	耒阳电厂300 MW	√	√	√
28~29	云冈电厂2×300 MW	√		√
30~31	灞桥电厂2×300 MW	√		
32~33	红河电厂2×300 MW	√		
34~35	阳城电厂2×600 MW	√	√	
36~37	甘谷电厂2×300 MW	√	√	
38~39	鸡西电厂2×125 MW	√	√	
40~41	灵州电厂2×135 MW	√	√	√
42~43	阜康电厂2×145 MW	√	√	
44~45	阳城热电2×150 MW	√		
46~47	万州电厂2×1000 MW	√		

参考文献(References)

- [1] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Hao Jiming, Duan Lei, Yi Honghong, et al. Physical and chemical characteristics of particulate matter from combustion source[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 徐明厚, 于敦喜, 刘小伟. 燃煤可吸入颗粒物的形成与排放[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Xu Minghou, Yu Dunxi, Liu Xiaowei. Formation and emission of particulate matter from coal combustion[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] White H J. Industrial electrostatic precipitation[M]. Boston: Addison Wesley, 1963.
- [4] Oglesby S. Electrostatic precipitation[M]. New York: Marcel Dekker INC Press, 1978.
- [5] Parker K R. Applied electrostatic precipitation[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [6] 陈国策. 适应新排放标准的火电厂除尘技术[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 90–95.
Chen Guoqu. Dust control technologies under the new emission standard for thermal power plants[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 90–95.
- [7] 郦建国, 刘云. 中国煤种成分对电除尘器性能影响及电除尘器适应性评价[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 104–109.
Li Jianguo, Liu Yun. The effect of compositions of domestic coal on the performance of ESP and an evaluation of ESP adaptability[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(7): 104–109.
- [8] 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.
- [9] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对PM₁₀排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1921-1927.
- Yi Honghong, Hao Jiming, Duan Lei, et al. Influence of dust catchers on PM₁₀ emission characteristics of power plants[J]. Environmental Science, 2006, 27(10): 1921-1927.
- [10] Mizuno A. Electrostatic precipitation[J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2000, 7(5): 615-624.
- [11] Nielsen M T, Livbjerg H, Fogh C L, et al. Formation and emission of fine particles from two coal-fired power plants[J]. Combustion Science and Technology, 2002, 174(2): 79-113.
- [12] Porle K, Francis S L, Bradburn K M. Electrostatic precipitators for industrial applications[C]. Brussels-Belgium: REHVA, COSTG3, 2006
- [13] Meij R, TeWinkel B H. The emissions and environmental impact of PM₁₀ and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wetFGD[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6/7): 643-658.
- [14] Lighty J A S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(9): 1565-1618.
- [15] Adgate J L, Mongin S J, Pratt G C, et al. Relationships between personal, indoor, and outdoor exposures to trace elements in PM_{2.5}[J]. Science of the Total Environment, 2007, 386(1): 21-32.
- [16] Niewulis A, Podliński J, Mizeraczyk J. Electrohydrodynamic flow patterns in a narrow electrostatic precipitator with longitudinal or transverse wire electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2): 123-127.
- [17] 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.
- [18] Crynack R, Truce R, Harrison W. Indigo particle agglomerators reduce mass and visible emission on coal fired boilers in the US[C]. 10th International Conference for Electrostatic Precipitation, Cairns, Australia, June 25-29, 2006.
- [19] 唐敏康, 周跃. 电除尘器中粉尘粒子的凝并[J]. 科技导报, 2007, 25(19): 23-25.
- Tang Minkang, Zhou Yue. Agglomeration of dust particle in electrostatic precipitator[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(19): 23-25.
- [20] Zhu J, Zhang X, Chen W, et al. Electrostatic precipitation of fine particles with a bipolar pre-charger[J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68(2): 174-178.
- [21] Bayless D J, Alam M K, Radcliff R, et al. Membrane-based wet electrostatic precipitation[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6): 781-798.
- [22] Poulsen K S, Lund C R. Reduction of fine particulate emission from ESPs[C]. 10th International Conference for Electrostatic Precipitation, Cairns, Australia, June 25-29, 2006.
- [23] 党小庆, 任燕, 马广大, 等. 电除尘器电场数值计算与性能预测的实验研究[J]. 科技导报, 2007, 20(7): 36-42.
- Dang Xiaoqing, Ren Yan, Ma Guangda, et al. Experimental study and numerical calculation on the performance of electrostatic precipitators [J]. Science & Technology Review, 2007, 20(7): 36-42.
- [24] Misaka T, Mochizuki Y. Recent application and running cost of moving electrode type electrostatic precipitator[M]. Springer Berlin Heidelberg: Electrostatic Precipitation, 2009: 518-522.
- [25] 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.
- [26] Zhang B, Wang R, Yan K. Industrial applications of three-phase T/R for upgrading ESP performance[C]//Electrostatic Precipitation, 11th International Conference on Electrostatic Precipitation. Hangzhou: Jointly Published with Zhejiang University Press, 2009.
- [27] 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.
- [28] Zukeran A, Looy P C, Chakrabarti A, et al. Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1999, 35(5): 1184-1191.
- [29] 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, 2014. (in Press)
- [30] Marquard A, Meyer J, Kasper G. Characterization of unipolar electrical aerosol chargers—Part I: A review of charger performance criteria[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(9): 1052-1068.
- [31] 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.
- [32] 杨勇, 张瑞英, 孙喜娟, 等. 影响电除尘器总体设计主要因素的分析研究[J]. 科技导报, 2007, 19(7): 29-35.
- Yang Yong, Zhang Ruiying, Sun Xijuan, et al. Study on the main factors related to integrated design of electrostatic precipitator[J]. Science & Technology Review, 2007, 19(7): 29-35.
- [33] Podliński J, Dekowski J, Mizeraczyk J, et al. Electro-hydrodynamic gas flow in a positive polarity wire-plate electrostatic precipitator and the related dust particle collection efficiency[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64: 259-262.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Zhuang Y, Jin Kim Y, Gyu Lee T, et al. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 2000, 48(3): 245-260.
- [37] Huang S H, Chen C C. Ultrafine aerosol penetration through electrostatic precipitators[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(21): 4625-4632.
- [38] 金华市中荷环保科技有限公司. 中荷环保简介[EB/OL]. (2014-07-05). <http://www.zhnb.cn/>.
- Jinhua Zhonghe Elec Co, Ltd. Brief introduction of Zhonghe Elec Co, Ltd. [EB/OL]. (2014-07-05). <http://www.zhnb.cn/>.
- [39] 西安热工研究院有限公司. 电除尘器可行性研究报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2013.
- Xi'an Thermal Power Research Institute Co, Ltd. Report of ESP feasibility[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co, Ltd, 2013.

(编辑 田恬)