



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201907112

中图分类号 X505

文献标识码 A

杨丽萍. 湿式电除尘器的高压恒流源供电及其能效分析[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 730-742.

YANG Liping. High pressure constant current power supply and energy efficiency analysis of wet electrostatic precipitator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 730-742.

## 湿式电除尘器的高压恒流源供电及其能效分析

杨丽萍\*

云南工商学院交通机电学院, 昆明 651700

第一作者: 杨丽萍(1973—), 女, 学士, 高级工程师。研究方向: 电气工程及其自动化。E-mail: 13769164198@163.com

\*通信作者

**摘要** 湿式电除尘器电场的放电状态变化大、干扰因素多, 尤其是导电玻璃钢阳极管内壁材料的特殊性, 必须尽量减少火花放电, 防止电极灼伤甚至起火, 保证设备安全、稳定运行。为了深入研究湿式电除尘器的电源供电特性及污染物脱除性能, 搭建了湿式电除尘器实验系统, 并开展不同类型电源的对比实验。实验结果表明: 湿式电除尘器喷淋系统开启, 工频恒流源运行相对平稳, 出口烟尘浓度变化不大, 但恒压源则存在一个电源参数振荡区, 出口烟尘浓度增加了约 147%, 因此, 湿式电除尘器应优先考虑抗干扰能力强的恒流源; 高频恒流源的运行参数更高, 污染物脱除性能更强, 与工频相比, 高频恒流源不同供电电耗时烟尘、SO<sub>3</sub> 的减排幅度分别为 46.30%~78.69%、42.86%~66.67%。通过对实际工程项目的深度测试及节能优化实验, 定量分析了湿式电除尘器的比电耗与污染物脱除性能关系。工程实践表明: 随机组负荷的降低, 湿式电除尘器的污染物脱除性能有所提升, 但高压供电比电耗也大幅增加, 从满负荷到 50% 负荷, 比电耗从  $2.41 \times 10^{-4}$  kWh·m<sup>-3</sup> 升至  $4.57 \times 10^{-4}$  kWh·m<sup>-3</sup>, 有较大的节能空间; 经节能优化, 控制湿式电除尘器出口烟尘浓度在 4~5 mg·m<sup>-3</sup>, 50% 负荷的比电耗下降达 84.68%。根据该节能优化思路, 对其他 3 个工程项目实施运行优化, 控制烟尘排放浓度在 4.5 mg·m<sup>-3</sup> 以内, 比电耗下降幅度分别为 32.65%、27.15%、41.64%。以上研究结果可为后续湿式电除尘器的性能提升及节能优化提供参考。

**关键词** 燃煤电厂; 湿式电除尘器; 高压恒流源; 污染物脱除性能; 电耗; 比电耗

电除尘器是工业烟气的主流除尘设备, 在燃煤电厂的应用占比约为 70%<sup>[1-3]</sup>, 烧结机机头的烟尘治理设备几乎全部为电除尘器<sup>[4-6]</sup>。随着燃煤电厂烟气超低排放的实施, 湿式电除尘技术在燃煤电厂得到广泛应用。电除尘器主要分为电控和本体 2 个部分, 近年来, 针对燃煤电厂及非电行业的超低排放改造技术频有报道。在本体技术方面, 超低排放技术包括低低温电除尘技术、湿式电除尘技术、颗粒团聚技术等<sup>[7-11]</sup>。在电源技术方面, 朱法华等<sup>[12]</sup>分析了电除尘器高频电源节能减排的机理, 介绍了国内外高频电源的研究与应用情况, 并基于实际工程案例, 介绍了高频电源的节能、减排幅度; 李纪等<sup>[13]</sup>针对我国冶金转炉冶炼周期内工艺波动大、粉尘浓度及比电阻大等情况, 提出了三相电源改造思路, 提高了除尘器的除尘效率, 并优化了电控性能; 汤铭等<sup>[14]</sup>提出了一种低成本高压脉冲静电除尘电源, 分析了该高压脉冲电源的稳态工作原理以及电场发生闪络时工作的情况; 丁鑫龙等<sup>[15]</sup>通过实验方法, 研究了脉冲电源技术对高比电阻粉尘的脱除特性; 张滨

收稿日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-09-27

基金项目: 云南省应用基础研究计划重点项目(2014FA029)

涓等<sup>[16]</sup>研究发现, 三相电源适合高粉尘负荷, 高频电源在匹配良好条件下可实现较好的提效作用, 而脉冲电源更多的研究是针对性地脱除细颗粒物和高比电阻粉尘。

按输出特性分类, 电源可分为电压源和电流源, 上述研究多针对干式电除尘器配套的电压源, 对于湿式电除尘器配套高压恒流源的供电特性及对电除尘提效及能耗的分析, 国内鲜有文献报道。电除尘器供电电源的工作状态直接影响除尘器的运行稳定性及除尘性能, 对于湿式电除尘器而言, 因其工作在饱和湿烟气状态, 且存在喷淋冲洗环节, 电场的放电状态变化大、干扰因素多, 电源工作的稳定性至关重要。尤其是导电玻璃钢管式湿式电除尘器, 鉴于其阳极管内壁材料的特殊性, 必须尽量减少火花放电, 防止电极灼伤甚至起火, 保证设备安全、稳定运行。近年来, 因火花控制不当等原因, 山西、河南、山东等地频有导电玻璃钢管式湿式电除尘器着火事故报道。本研究通过实验室研究及现场实测相结合的手段, 定量分析了导电玻璃钢管式湿式电除尘器的高压恒流源供电特性及其对电除尘提效、能耗的影响, 为后续湿式电除尘器的性能提升及节能优化提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验系统

湿式电除尘器实验系统如图1所示, 通过燃油热风炉产生高温烟气, 设计烟气量为  $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 炉膛出口烟气温度控制在  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  左右。通过飞灰料仓、文丘里射流器向实验系统内喷射燃煤飞灰。通过浓硫酸电加热方式产生气态  $\text{SO}_3$ , 以恒定流量均匀注入系统, 并通过混流装置将其与烟气充分混合。通过向烟道内喷水增湿, 使烟气达到湿饱和, 并控制湿式电除尘器入口烟气温度在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  左右。湿式电除尘器为导电玻璃钢管式湿式电除尘器, 阳极板为正六边形(内切圆直径为  $\varphi 300 \text{ mm}$ ), 阳极管长度为  $4.7 \text{ m}$ , 湿式电除尘器的总集尘面积约为  $180 \text{ m}^2$ , 阴极线为合金锯齿线, 喷淋系统每次冲洗时间为  $5 \text{ min}$ , 冲洗水量约为  $0.2 \text{ t}$ 。湿式电除尘器的供电电源分别有  $72 \text{ kV}/100 \text{ mA}$  工频高压恒流源、恒压源和  $72 \text{ kV}/200 \text{ mA}$  高频高压恒流源, 不同电源间可灵活切换。湿式电除尘器出口布置 CEMS, 用于监测出口烟气中的烟尘浓度, 在实验期间, 采用手工测试方法对 CEMS 进行数据校准。

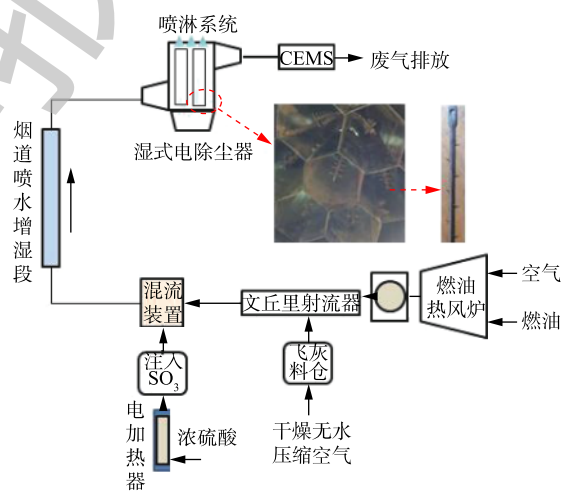


图1 湿式电除尘器实验系统

Fig. 1 Experiment system of wet electrostatic precipitator

### 1.2 工频电源实验

工频电源是目前电除尘器应用最为成熟和应用最多的电源<sup>[17-18]</sup>。工频恒压源输出电压恒定且可控, 电流随负载变化; 恒流源输出电流恒定且可控, 电压随负载变化<sup>[19-21]</sup>。首先, 参照行业标准《电除尘器设计、调试、运行、维护安全技术规范》(JB/T 6407-2017)的相关规定, 分别在  $72 \text{ kV}/100 \text{ mA}$  工频高压恒流源和  $72 \text{ kV}/100 \text{ mA}$  工频高压恒压源供电情况下对湿式电除尘器进行空载升压实验, 对应的一次电压/电流、二次电压/电流分别如图2(a)和图2(b)所示。在空载条件下, 工频高压恒流源和工频高压恒压源的一次、二次电压/电流信号基本一致。

控制湿式电除尘器入口烟气温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 烟尘浓度为  $51.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{SO}_3$  浓度为  $9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  (大约为当前超低排放机组中湿法脱硫出口的  $\text{SO}_3$  平均浓度<sup>[21]</sup>)。烟尘浓度的测定采用 ZR-D09A 型一体化采样枪和 ZR-3260 型自动烟尘测试仪, 测试方法符合行业标准《固定污染源废气低浓度颗粒物的

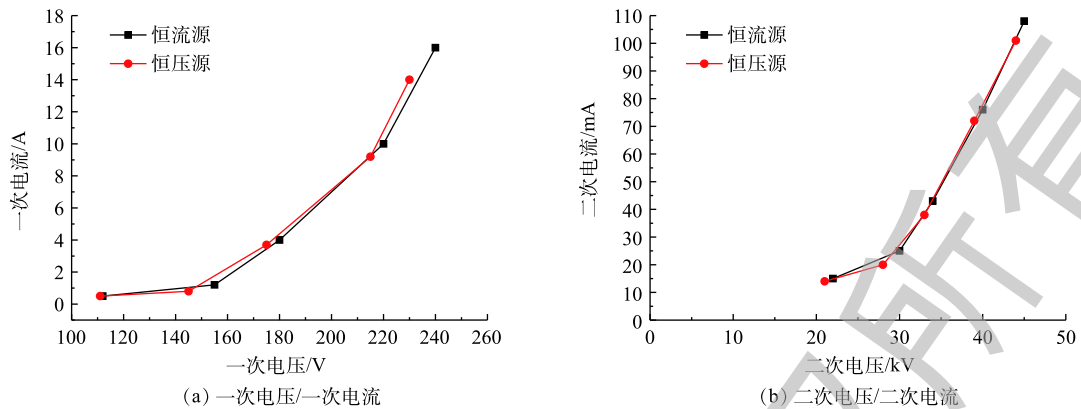
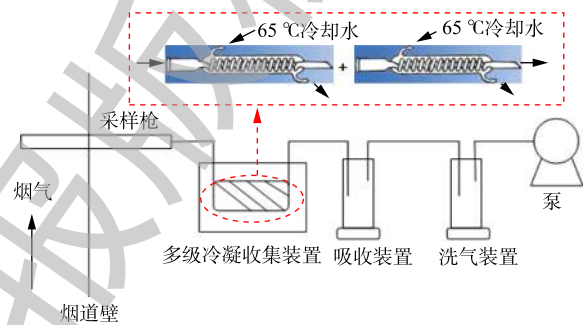


图2 空载升压实验结果

Fig. 2 Test results of no-load boost

测定重量法》(HJ 836-2017)的相关规定。 $\text{SO}_3$ 测定采用国家标准《燃煤烟气脱硫设备性能测试方法》(GB/T 21508-2008)所规定的控制冷凝法,采样系统如图3所示,水浴温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$ ,多级冷凝装置为两级蛇形盘管,采样枪加热温度 $>280\text{ }^\circ\text{C}$ ,抽气流量为 $20\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。采样后,用去离子水清洗蛇形盘管,之后用DR 6000型分光光度计测定溶液中的硫酸根,换算得到 $\text{SO}_3$ 浓度值。在上述带负载工况下,再次分别在 $72\text{ kV}/100\text{ mA}$ 工频高压恒流源和 $72\text{ kV}/100\text{ mA}$

图3  $\text{SO}_3$ 采样系统Fig. 3  $\text{SO}_3$  sampling system

工频高压恒压源供电情况下对湿式电除尘器进行升压实验,对应的一次电压/电流、二次电压/电流分别如图4(a)和图4(b)所示。在负载条件下,工频高压恒流源和工频高压恒压源的一次、二次电压/电流信号一致性仍较好,且与空载升压时所示的运行电源参数相比差异不大。经测定, $72\text{ kV}/100\text{ mA}$ 工频高压恒流源和 $72\text{ kV}/100\text{ mA}$ 工频高压恒压源供电情况下湿式电除尘器出口烟尘、 $\text{SO}_3$ 浓度及其脱除效率如图5所示,两者的污染物脱除性能也大致相当。

开启湿式电除尘器的喷淋系统,开启后约 $5\text{ s}$ 后电场出现闪络,此时电源的二次电压、二次电流分别如图6(a)和图6(b)所示。对于工频恒流源来说,电源检测到火花放电后,自动下调电源运

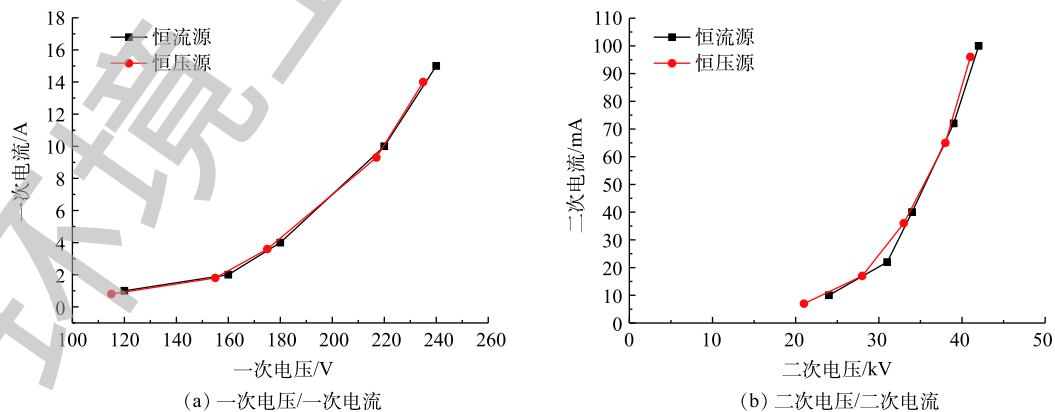


图4 负载升压实验结果

Fig. 4 Test results of load boost

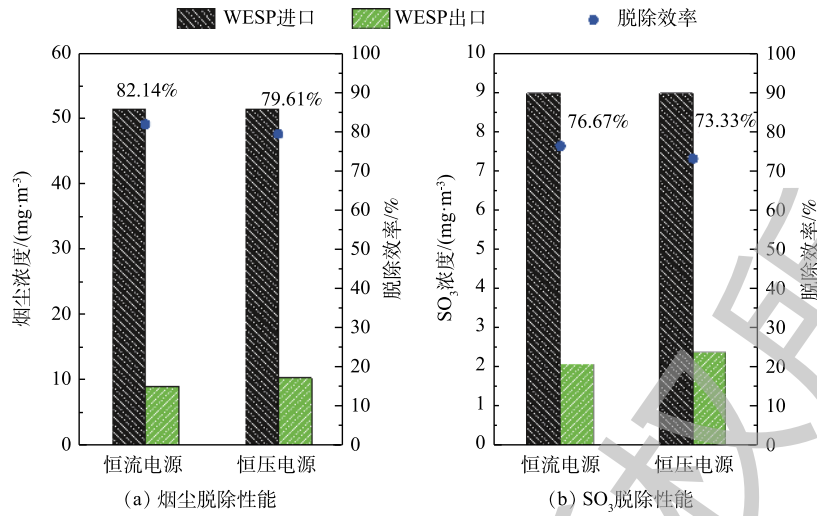


图 5 湿式电除尘器 (WESP) 对烟尘、SO<sub>3</sub> 的脱除性能

Fig. 5 Dust and SO<sub>3</sub> removal performance of wet electrostatic precipitator (WESP)

行参数，使得电流/电压稳定运行在相对较低的参数范围。虽然仍会有零星放电发生，但电源运行参数相对平稳，且喷淋系统关闭后，电源可自动回复到原设定参数运行。对于工频恒压源来说，在喷淋开启初期阶段，电场内频繁产生火花放电，电源运行参数不稳定，有一段明显的振荡区，且喷淋系统关闭后，其电源参数的回复过程也较恒流源慢一些。这是因为，恒流源输出特性受负载干扰产生的电流变量的约束，负载特性总能回到原来的平衡点，工作状态都是稳定的；恒压源输出存在不稳定的工作点，抗干扰能力差，喷淋系统开启后会使得电除尘器进入负阻区，电流瞬间增大、电压下降，产生火花击穿，然后电源保护，停止供电，电压源既不能约束负载电压的减少又不能约束负载电流的增加，因而失去对负载的控制能力，造成电源运行参数振荡。

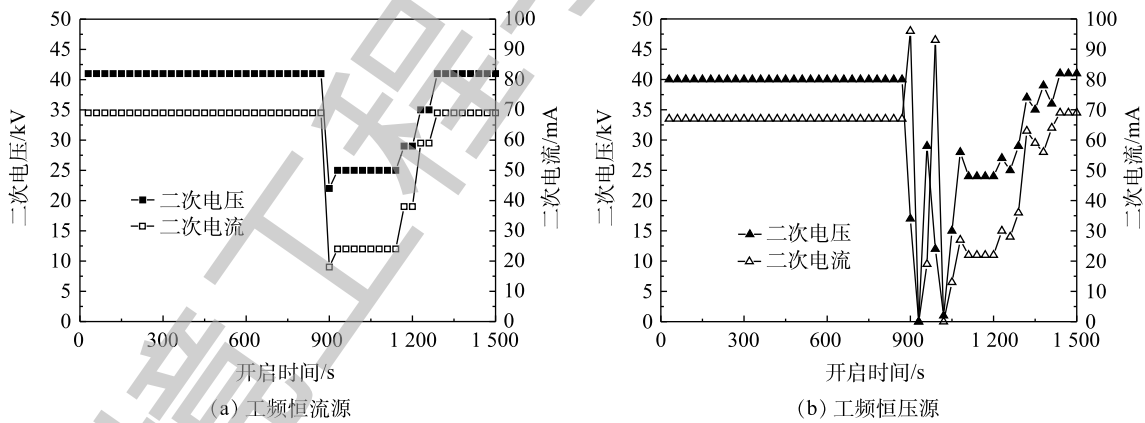


图 6 喷淋系统开启时二次电压/二次电流

Fig. 6 Secondary voltage/secondary current curve when the spray system was turned on

为研究不同电源供电特性对湿式电除尘器性能的影响，分别调取 2 种电源供电时湿式电除尘器出口 CEMS 测得烟尘浓度数据，显示喷淋系统开启前后湿式电除尘器出口烟尘浓度变化，结果如图 7(a) 和图 7(b) 所示。喷淋系统开启后，随着电源运行参数的降低，烟尘排放浓度均有不同程度的增加，其中，工频恒流源供电时，湿式电除尘器出口烟尘浓度最大值为  $10.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，较喷淋前平均值 ( $9.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 增加了约 12%；但恒压源存在一个电源参数振荡区，此时，出口烟尘浓度最大价值达  $25.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，较喷淋前平均值 ( $10.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 增加了约 147%。因此，对于湿式电除尘器而

言, 应优先考虑采用抗干扰能力强的恒流源, 尤其是导电玻璃钢管式湿式电除尘器, 由于其阳极管内壁材料的特殊性, 因此, 必须尽量减少火花放电, 防止电极灼伤甚至起火, 保证设备安全、稳定运行。

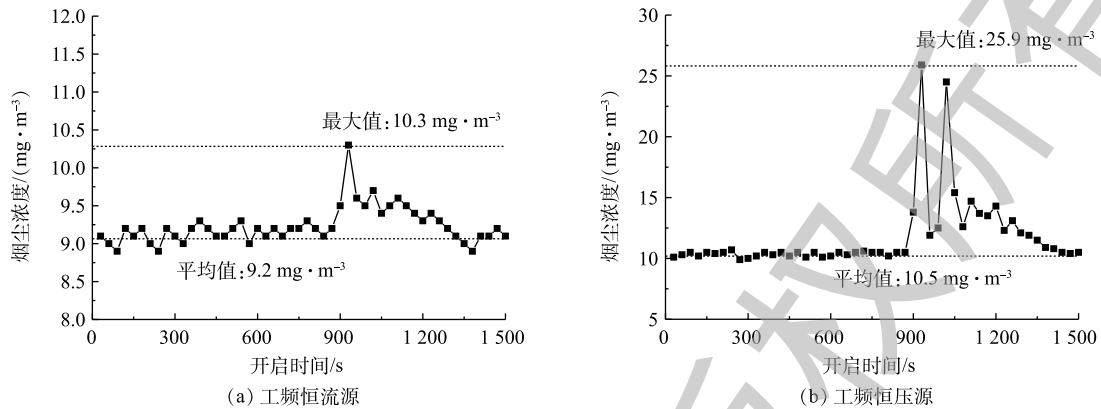


图7 喷淋系统开启时湿式电除尘器出口烟尘浓度的变化

Fig. 7 Change of dust concentration at the outlet of wet electrostatic precipitator when the spray system was turned on

### 1.3 高频电源实验

参照 JB/T 6407-2017 的相关规定, 分别对 72 kV/200 mA 高频高压恒流源进行空载、负载升压实验, 对应的一次电压/电流、二次电压/电流曲线及与工频恒流源对比分别如图 8 和图 9 所示。在负载条件下, 高频电源的一次、二次电压/电流信号与空载升压时所示的运行电源参数相比差异不大。值得注意的是, 空载实验前实际上也已通过湿烟气, 只是空载时临时停掉了风机跟加灰装置, 所以湿电场内的烟气仍基本处在湿饱和状态。推测是因湿电场内湿饱和烟气中水分子导电性能好, 因此, 运行电流较大, 是否有烟气流动及飞灰加入, 对升压实验的结果影响不大, 这与某实际工程项目的通水升压实验/锅炉投运升压实验规律<sup>[18-19]</sup>一致。与工频恒流源相比, 高频电源的功率因数更高, 一般情况下, 功率因数 $\geq 0.92$ , 有效电能的转化率高, 同样具有电除尘负载跟踪特性和火花抑制特性的自适应特点。因此, 在相同的供电电压条件下, 高频电源的运行电流更大, 且在额定容量放开运行时, 二次电压、二次电流可分别高达 60 kV、300 mA, 这更有利于湿式电除尘器的污染物脱除性能的提升。

为进一步分析高频与工频恒流源, 对湿式电除尘器的提效特性, 分别在相同供电电耗及高频恒流源最大电耗条件下, 测定湿式电除尘器对烟尘及  $\text{SO}_3$  的脱除性能。根据国家标准《电除尘器

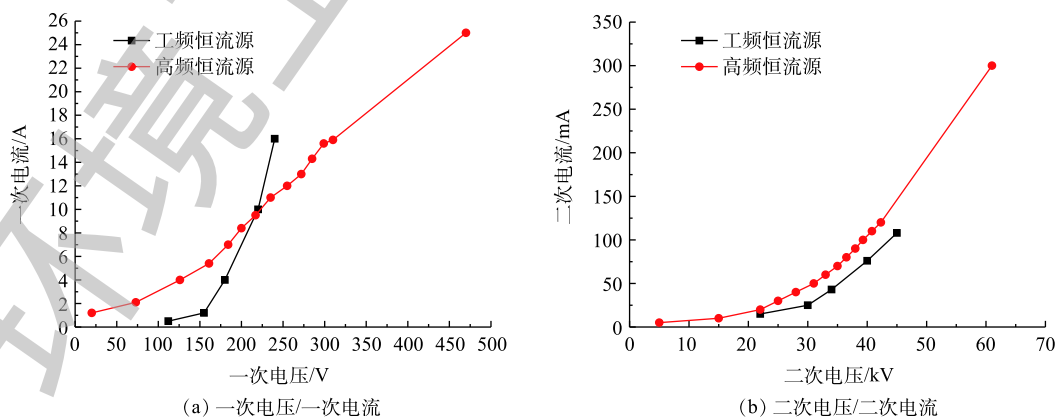


图8 空载升压实验结果

Fig. 8 Test results of no-load boost

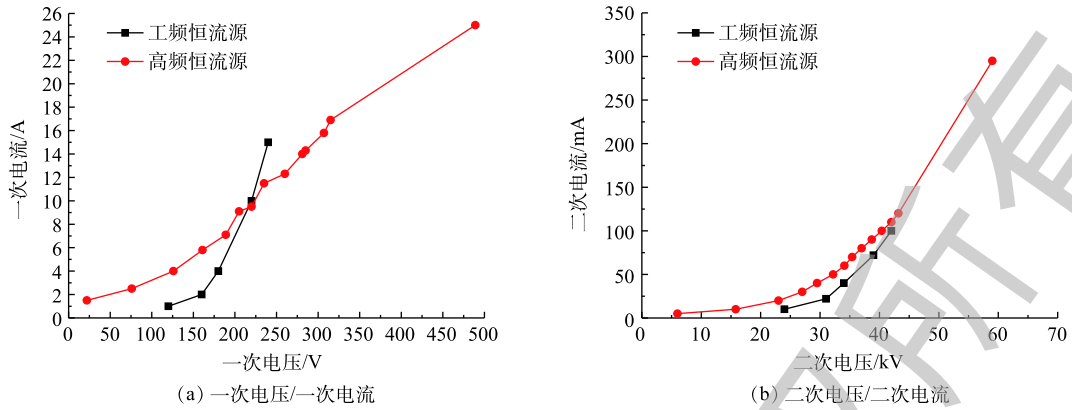


图 9 负载升压实验结果

Fig. 9 Test results of load boost

性能测试方法》(GB/T 13931-2017)的规定，采用三相有功电能表测定不同电源配置实验期间湿式电除尘器的电耗，分别记录电能表读数和测量时间，并参照式 (1) 计算湿式电除尘器电耗。

$$W = \frac{W_2 - W_1}{t} \quad (1)$$

式中： $W$ 为湿式电除尘器电耗，kW； $W_2$ 为测量后电能表读数，kWh； $W_1$ 为测量前电能表读数，kWh； $t$ 为测量时间，h。

分别在工频恒流源电耗 3.49 kW，高频恒流源电耗 3.54、5.89、9.84 和 16.26 kW 条件下，测定湿式电除尘器出口烟尘及  $SO_3$  质量浓度，结果如图 10 所示。在供电电耗相当(工频 3.49 kW、高频 3.54 kW)的情况下，湿式电除尘器出口的烟尘、 $SO_3$  浓度变化不大，可以认为两者具有相同的污染物脱除性能。分别将高频电源的电耗提高至 5.89、9.84 和 16.26 kW，湿式电除尘器出口的烟尘、 $SO_3$  浓度不断降低，与工频相比，烟尘的减排幅度分别为 46.30%、70.98%、78.69%， $SO_3$  的减排幅度分别为 42.86%、57.14% 和 66.67%。与烟尘的减排幅度相比， $SO_3$  减排幅度略小，这主要是因为此时  $SO_3$  是以硫酸气溶胶颗粒的形式存在，粒径小(纳米级)，驱进速度低，且荷电后的气溶胶颗粒还会在放电极周围产生空间电荷效应<sup>[20-23]</sup>，影响电场放电。

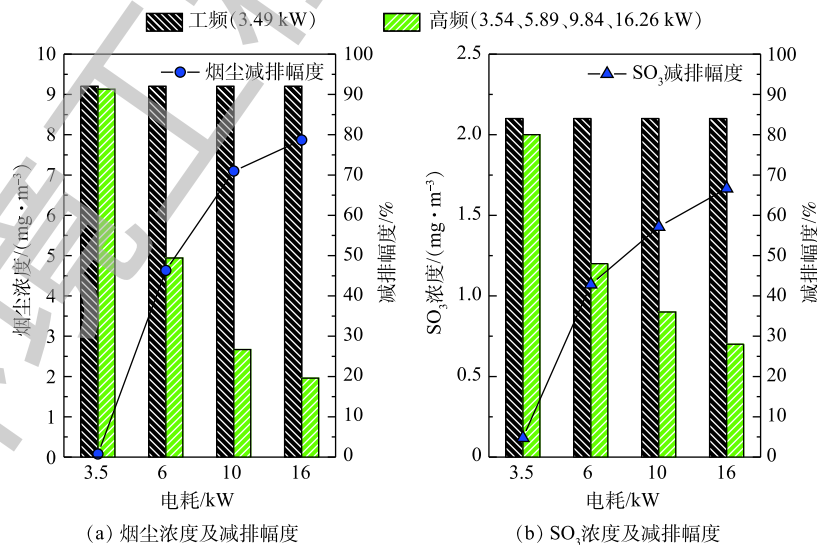


图 10 不同电源供电时湿式电除尘器 (WESP) 对烟尘和  $SO_3$  的脱除性能

Fig. 10 Dust and  $SO_3$  removal performance of wet electrostatic precipitator (WESP) at different power supply

另外,值得注意的是,随着供电电耗的增加,湿式电除尘器出口的烟尘、 $\text{SO}_3$ 浓度虽然不断降低,但减排幅度与电耗的增加并非呈线性关系,高频电源的供电电耗从3.54 kW增加至5.89 kW,仅增加了2.35 kW电耗,烟尘、 $\text{SO}_3$ 的减排幅度分别为46.30%、42.86%;但从9.84 kW增加至16.26 kW,电耗增加了6.42 kW,烟尘的减排幅度仅从70.98%增加至78.69%,增加了不足8个百分点, $\text{SO}_3$ 的减排幅度仅从57.14%增加至66.67,增加了约9个百分点。因此,从节能角度来说,在满足 $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 超低排放要求的前提下,可适当减少湿式电除尘器的电能消耗,尤其是针对湿式电除尘器运行在 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 甚至 $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下的工况,节能空间较大。该发现可为实际工程项目的节能优化运行提供有效的数据支撑。

## 2 工程实测结果及分析

### 2.1 典型工程案例实测及分析

某660 MW机组锅炉为亚临界压力中间再热式直流炉,原配套双室四电场电除尘器出口烟尘浓度为 $35.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,经石灰石-石膏湿法脱硫的协同除尘后仍无法满足超低排放要求,因此,在脱硫吸收塔出口烟气烟道上增设导电玻璃钢管式湿式电除尘器,分体(独立)布置,共布置4个电室,阳极采用正六边形导电玻璃钢,阴极线采用锯齿线型,喷淋系统采用间断冲洗方式,冲洗后的水进入吸收塔集水坑,作为脱硫部分用水。配套80 kV/1 600 mA高频高压恒流源。烟气量为 $2\ 127\ 660 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,入口烟气温为 $49\sim 53\text{ }^\circ\text{C}$ ,煤的水分、灰分、硫分含量分别为7.79%、16.59%、1.2%,低位发热量为 $21.4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

采用ZR-D09A型一体化采样枪、ZR-3260型自动烟尘测试仪、DEKATI  $\text{PM}_{2.5}$ 测定装置、DR 6000型分光光度计、ZR-D03A型高温采样枪等测试仪器分别测定湿式电除尘器进、出口的烟尘浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\text{SO}_3$ 浓度等,并将三相有功电能表安装在湿式电除尘器除尘变出口母线处,用于读取并计算湿式电除尘器的电耗。

$\text{PM}_{2.5}$ 测试采用DEKATI公司的 $\text{PM}_{2.5}$ 测试装置,测试方法参照行业标准《火电厂烟气中细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )测试技术规范重量法》(DL/T 1520-2016)中的规定,采样枪温度宜控制在 $(160\pm 5)^\circ\text{C}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 测定装置如图11所示。装置由三级撞击器组成,每级撞击器上布置滤膜,并涂上耐高温松脂,分别用于收集大于10、2.5、 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒,在最末级布置石英滤膜,石英滤膜对 $0.3\ \mu\text{m}$ 颗粒的拦截效率达99.9%,最末级撞击器和滤膜收集的颗粒累计为 $\text{PM}_{2.5}$ ,后二级撞击器和滤膜收集的颗粒累计为 $\text{PM}_{10}$ 。为防

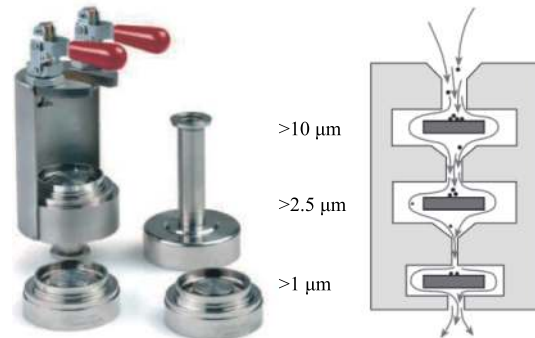


图11  $\text{PM}_{2.5}$ 测定装置

Fig. 11  $\text{PM}_{2.5}$  measurement device

止液滴对颗粒分级及铝箔集尘的影响,对撞击器进行加热保温,温度为 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 的采样系统如图12所示。根据烟道流速、温度、压力等参数,选择合适的采样嘴及抽气流量,以保证各级撞击器收集的颗粒粒径在规定范围内。

分别在满负荷、90%负荷、75%负荷、50%负荷条件下,测定湿式电除尘器对各污染物的脱除性能。烟尘测试结果如图13所示,随着机组负荷的降低,湿式电除尘器入口烟尘浓度有所降低,从 $19.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $16.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,推测是因为负荷降低,烟气流速下降,前端电除尘器的除尘性能提升<sup>[24-25]</sup>所致。机组负荷降低,烟气流速下降,湿式电除尘器的除尘性能也得到提升,满负荷、90%负荷、75%负荷、50%负荷条件下湿式电除尘器的除尘效率分别为81.12%、82.72%、

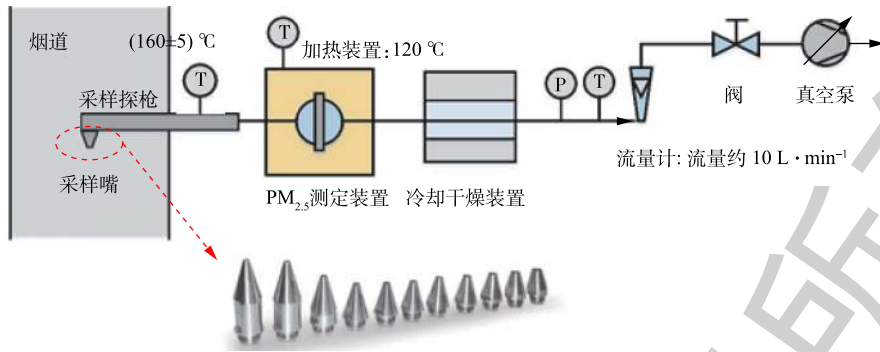


图 12 PM<sub>2.5</sub> 采样系统

Fig. 12 PM<sub>2.5</sub> sampling system

86.49%、89.88%。SO<sub>3</sub> 测试结果如图 14 所示，随着负荷降低，湿式电除尘器入口的 SO<sub>3</sub> 浓度也有所下降，这主要是因为负荷降低后 SCR 脱硝的烟气温度降低，此处的 SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> 转化率减小<sup>[26-28]</sup>。同烟尘类似，烟气流速下降，湿式电除尘器对 SO<sub>3</sub> 气溶胶颗粒的脱除性能也得到提升，满负荷、90% 负荷、75% 负荷、50% 负荷条件下湿式电除尘器对 SO<sub>3</sub> 的脱除效率分别为 68.79%、70.59%、74.47%、76.64%，较烟尘的脱除效率要低一些。PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 测试结果如图 15 所示，随着负荷的降低，前端电除尘器对 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 的脱除性能提升，湿式电除尘器入口浓度均有所下降，同时，烟气流速下降，湿式电除尘器除尘也得到提升，满负荷、90% 负荷、75% 负荷、50% 负荷条件下湿式电除尘器对 PM<sub>10</sub> 的脱除效率分别为 77.04%、77.86%、79.44%、83.15%，对 PM<sub>2.5</sub> 的脱除效率分别为 72.28%、72.63%、75.31%、80.14%。

为科学评价电除尘器的电耗水平，《高效能大气污染物控制装备评价技术要求第 2 部分：电除尘器》(GB/T 33017.2-2016) 中给出了比电耗的概念，即处理单位工况烟气量所消耗的电量，计算方法如式 (2) 所示。

$$C = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

式中：C 为湿式电除尘器比电耗，kWh·m<sup>-3</sup>；W 为湿式电除尘器的电耗，kW；Q 为进入湿式电除尘器入口的工况烟气量，m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

为对比不同负荷条件下湿式电除尘器的高压电耗，式 (2) 忽略了低压电耗、引风机阻力电耗等对比电耗的影响，湿式电除尘器的高压供电电耗采用三相有功电能表测定，经计算，不同负荷条件下，湿式电除尘器的高压供电电耗如图 16 所示。随着负荷的降低，湿式电除尘器的高压供电

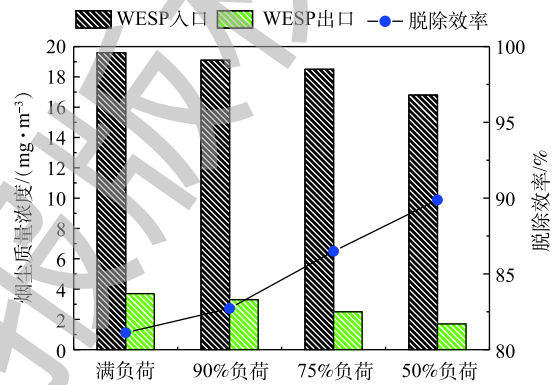


图 13 烟尘浓度测试结果

Fig. 13 Test results of smoke concentration

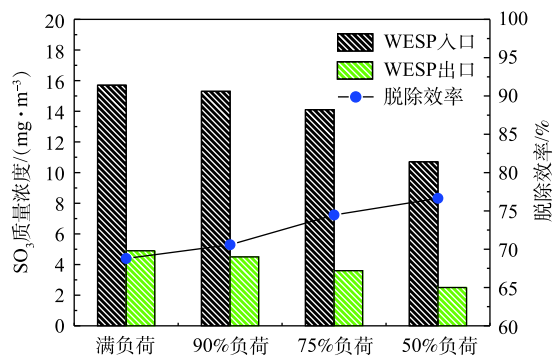
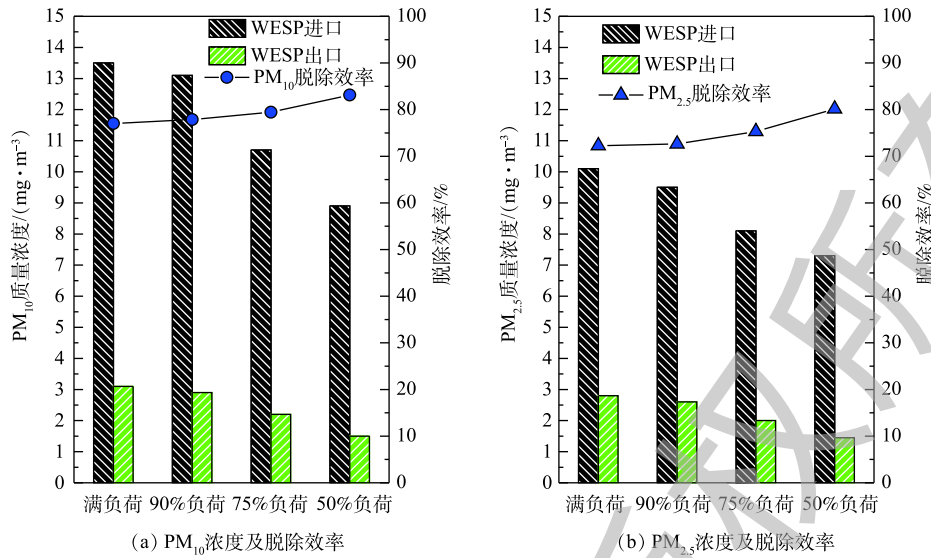


图 14 SO<sub>3</sub> 浓度测试结果

Fig. 14 Test results of SO<sub>3</sub> concentration



图 15 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 浓度测试结果Fig. 15 Test results of PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> concentration

比电耗大幅增加,从满负荷到50%负荷,比电耗从 $2.41 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ 升至 $4.57 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ ,有较大的节能空间。通过调整电源参数,控制湿式电除尘器出口烟尘浓度在 $4 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,在满足 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 超低排放要求的前提下,最大程度地降低比电耗,实现节能最优化。节能优化后的比电耗结果如图17所示,湿式电除尘器的高压供电比电耗降幅显著,以50%负荷为例,节能优化后,比电耗从 $4.57 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ 降至 $0.7 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ ,节能优化后的比电耗下降达84.68%,即便是对于满负荷工况,烟尘浓度从 $3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增到 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,比电耗也下降了12.86%。该节能优化思路同样适用于其他工程项目及满负荷时烟尘排放远低于超低排放限值要求的工况。

## 2.2 其他工程项目的节能优化实验

对其他3个导电玻璃钢湿式电除尘项目实施上述节能优化实验,相关数据如表1所示。在满负荷条件下,3个项目原烟尘排放浓度分别为 $1.9$ 、 $2.7$ 、 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,经节能优化,控制烟尘排放浓度在 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以内,此时比电耗下降幅度分别为32.65%、27.15%、41.64%。对应节能优化前后的 $\text{SO}_3$ 、 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 浓度测试结果分别如图18、图19所示。节能优化后,污染物排放浓度略有升高,但均在可承受范围内,如 $\text{SO}_3$ 浓度未超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,不会出现烟囱蓝烟拖尾的风险。值得注意的是,目前实际上有许多电厂的烟尘排放 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 甚至 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下<sup>[29-37]</sup>,

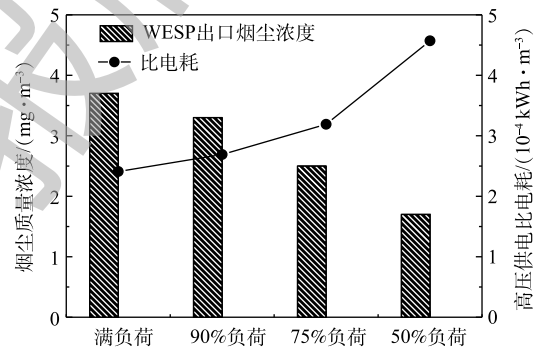


图 16 湿式电除尘器比电耗

Fig. 16 Specific power consumption of WESP

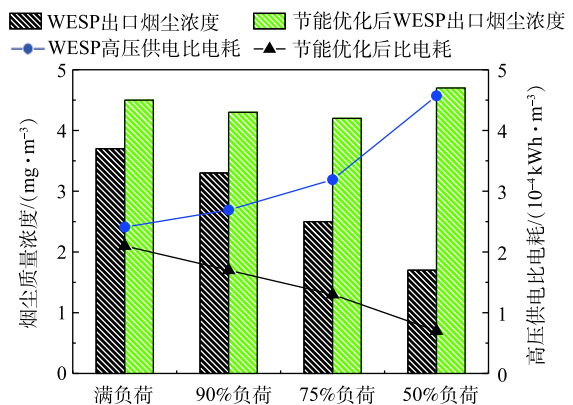
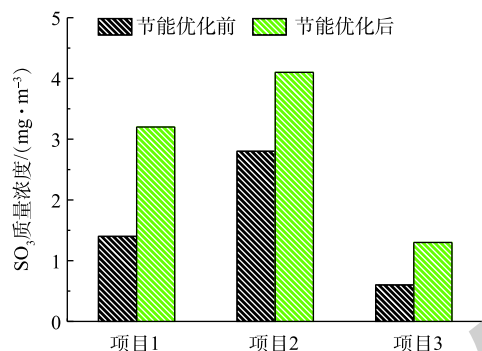
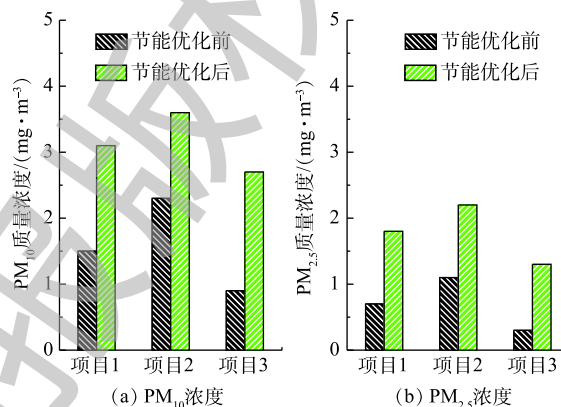


图 17 节能优化后湿式电除尘器比电耗

Fig. 17 Specific power consumption of WESP after energy saving optimization

表1 工程数据汇总  
Table 1 Project data summary

序号	机组/MW	电源配置	设计出口烟尘浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	原排放浓度及电耗		节能优化后指标		比电耗下降幅度/%
				烟尘浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比电耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ )	烟尘浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比电耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ )	
1	300	72 kV/1 200 mA 高频高压恒流源	<5	1.9	5.88	4.2	3.96	32.65
2	660	72 kV/1 200 mA 高频高压恒流源	<5	2.7	4.31	4.1	3.14	27.15
3	1 000	80 kV/1 600 mA 高频高压恒流源	<5	1.2	3.29	4.0	1.92	41.64

图18 SO<sub>3</sub>浓度测试结果Fig. 18 Test results of SO<sub>3</sub> concentration图19 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>浓度测试结果Fig. 19 Test results of PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> concentration

此时的高压供电比电耗值较高，具有较大的节能优化空间，建议这类电厂在满足烟尘超低排放要求的前提下，适当降低电源运行参数，以达到节能的目的。

### 3 结论

1) 在正常工况下，工频高压恒流源和恒压源的空载/负载伏安特性曲线差别不大，两者的污染物脱除性能也大致相当。一旦喷淋系统开启，恒流源检测到火花放电后，自动下调电源运行参数，使电流/电压稳定运行在相对较低的参数范围，且运行相对平稳。恒压源则有一段明显的振荡区，抗干扰能力差。湿式电除尘器出口 CEMS 数据显示，喷淋系统开启后，工频恒流源供电的湿式电除尘器出口烟尘浓度最大值较喷淋前平均值增加了约 12%；但恒压源因存在一个电源参数振荡区，出口烟尘浓度增加了约 147%。因此，对于湿式电除尘器而言，应优先考虑抗干扰能力强的恒流源。

2) 在供电电耗相当(工频 3.49 kW、高频 3.54 kW)的情况下，工频恒流源和高频恒流源供电的湿式电除尘器污染物脱除性能差异不大。但额定容量放开运行时，高频电源的运行电压/电流参数变大，其供电电耗分别提高至 5.89、9.84、16.26 kW 时，与工频相比，烟尘的减排幅度分别为 46.30%、70.98%、78.69%，SO<sub>3</sub> 的减排幅度分别为 42.86%、57.14%、66.67%。

3) 某 660 MW 机组典型工程的深度测试表明，随负荷的降低，湿式电除尘器的污染物脱除性能有所提升，在满负荷、90% 负荷、75% 负荷、50% 负荷条件下，湿式电除尘器的除尘效率分别为 81.12%、82.72%、86.49%、89.88%，SO<sub>3</sub> 脱除效率分别为 68.79%、70.59%、74.47%、76.64%，

PM<sub>10</sub> 脱除效率分别为 77.04%、77.86%、79.44%、83.15%，PM<sub>2.5</sub> 脱除效率分别为 72.28%、72.63%、75.31%、80.14%。但随负荷的降低，湿式电除尘器高压供电比电耗大幅增加，从满负荷到 50% 负荷，比电耗从  $2.41 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  升至  $4.57 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ ，有较大的节能空间。通过调整电源参数，控制湿式电除尘器出口烟尘浓度在 4~5  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，比电耗显著降低，满负荷的比电耗也下降了 12.86%，50% 负荷的比电耗下降达 84.68%，实现了湿式电除尘器的节能优化运行。

4) 根据本研究得到的节能优化思路，对其他 3 个工程项目实施运行优化，优化前烟尘排放浓度分别为 1.9、2.7、1.2  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，经节能优化，控制烟尘排放浓度在 4.5  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以内，比电耗下降幅度分别为 32.65%、27.15%、41.64%。该思路同样适用于其他除尘项目及满负荷时烟尘排放远低于超低排放限值 (5  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 要求的工况，尤其是部分烟尘排放长期在 2.5  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  甚至 1  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以下项目，建议这类电厂在满足烟尘超低排放要求的前提下，适当降低电源运行参数，以达到节能的目的。

## 参考文献

- [1] 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): 476-487.
- [2] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 燃煤电厂烟气超低排放技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 安连锁, 王金平, 郦建国, 等. 中国燃煤电厂电除尘技术发展及应用综述[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 115-123.
- [4] ZHANG X, GUO Z C. On energy consumption and atmospheric pollutants of China's iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2000, 35(1): 63-68.
- [5] 范晓慧, 甘敏, 季志云, 等. 烧结烟气超细颗粒物排放规律及其物化特性[J]. 烧结球团, 2016(3): 42-45.
- [6] 李海英, 王锦, 郑雅欣. 烧结过程细微颗粒物排放特征与控制方法[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 102-106.
- [7] 寿春晖, 祁志福, 谢尉扬, 等. 低低温电除尘器颗粒物脱除特性的工程应用试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4326-4332.
- [8] 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.
- [9] 熊桂龙, 李水清, 陈晟, 等. 增强PM<sub>2.5</sub>脱除的新型电除尘技术的发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2217-2223.
- [10] CHANG Q Y, ZHENG C H, YANG Z D, et al. Electric agglomeration modes of coal-fired fly-ash particles with water droplet humidification[J]. Fuel, 2017, 200: 134-145.
- [11] 闫克平, 李树然, 冯卫强, 等. 高电压环境工程应用研究关键技术问题分析及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2528-2544.
- [12] 朱法华, 李辉, 王强. 高频电源在我国电除尘器上的应用及节能减排潜力分析[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(1): 26-32.
- [13] 李纪, 王福升. 转炉干法除尘三相电源的可行性研究[J]. 世界有色金属, 2018, 31(3): 4-5.
- [14] 汤铭, 宁光富, 乔光尧, 等. 一种低成本高压脉冲静电除尘电源的分析与验证[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 890-898.

- [15] 丁鑫龙, 王琼杰, 郎佳红, 等. 脉冲供电技术去除高阻比粉尘[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(1): 159-163.
- [16] 张滨渭, 李树然. 电除尘器在超低排放下的系统运行优化[J]. *高电压技术*, 2017, 43(2): 493-498.
- [17] 林展翔. 基于高频PWM控制的工频静电除尘电源[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [18] 杨群发, 侯剑雄, 陈灌明. 600 MW级湿式电除尘器工程调试与运行调整研究[J]. *中国电力*, 2015, 48(8): 20-26.
- [19] 杨群发, 侯剑雄, 陈灌明. 600 MW机组湿式电除尘器工程调试与运行调整研究[J]. *电力科技与环保*, 2016, 2(1): 22-25.
- [20] 王红艳. 新型工频恒流型静电除尘电源研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [21] 冯彦杰, 金文博, 王欣, 等. 用于静电除尘的新型三相恒流源[J]. *电子器件*, 2018, 41(1): 189-194.
- [22] 廖文杰, 陈焕其. 调幅高频电源在湿式电除尘器上的应用[J]. *中国环保产业*, 2015, 30(6): 33-38.
- [23] 杨文霞, 张连永, 杨明印. 恒流源型电源在静电除尘中的特性研究[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(4): 61-63.
- [24] 刘含笑, 陈招妹, 王少权, 等. 燃煤电厂SO<sub>3</sub>排放特征及其脱除技术[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(5): 1128-1138.
- [25] 张雪峰, 杨正大, 李响, 等. SO<sub>3</sub>对高湿静电场中电晕放电的影响机制研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(9): 3268-3275.
- [26] 杨正大. 多场强化湿烟气中PM、SO<sub>x</sub>协同脱除机理及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [27] YANG Z D, ZHENG C H, ZHANG X F, et al. Sulfuric acid aerosol formation and collection by corona discharge in a wet electrostatic precipitator[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(8): 8400-8406.
- [28] YANG Z D, ZHENG C H, ZHANG X F, et al. Highly efficient removal of sulfuric acid aerosol by a combined wet electrostatic precipitator[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(1): 59-66.
- [29] 向晓东, 朱青松, 常玉锋, 等. 侧流电除尘增效机理与检验[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(6): 1720-1724.
- [30] 吕建焱, 徐冰漪, 陆义海, 等. 燃煤颗粒物电除尘器内相互作用模拟[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3641-3646.
- [31] 陈叮叮, 沈伯雄, 刘智, 等. 干/湿混法对中温SCR催化剂碱土金属中毒的影响[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(3): 694-700.
- [32] 杨晓刚, 马强, 牛国平, 等. 快速SCR反应对商用V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>催化剂脱硝特性的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(7): 1968-1976.
- [33] 竹涛, 张书庆, 郭娜. 火电行业SO<sub>3</sub>控制技术研究进展[J]. *环境工程*, 2018, 36(2): 109-112.
- [34] 赵磊, 周洪光. 近零排放机组不同湿式电除尘器除尘效果[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(1): 53-58.
- [35] 沈志刚, 刘启贞, 陶雷行, 等. 湿式电除尘器对烟气中颗粒物的去除特性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2557-2561.
- [36] 金侃, 张军, 郑成航, 等. 百万燃煤机组烟气污染物超低排放改造费效评估[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 1061-1068.
- [37] 陶雷行, 戴苏峰, 艾春美. 湿式电除尘器污染控制性能与应用经验[J]. *环境工程*, 2015, 11(9): 96-99.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

## High pressure constant current power supply and energy efficiency analysis of wet electrostatic precipitator

YANG Liping\*

College of Traffic Mechanical and Electrical, Yunnan Technology and Business University, Kunming 651700, China

\*Corresponding author, E-mail: 13769164198@163.com

**Abstract** The discharge state of the electric field in wet electrostatic precipitator presents large changes and has many interfering factors. Particularly due to the special materials of the inner wall of conductive FRP anode tube, it was necessary to reduce the spark discharge as much as possible and prevent the electrode burn or even catching fire, then ensure the safe and stable operation of the equipment. In order to further study the power supply characteristics of high voltage constant current source and pollutant removal performance of wet electrostatic precipitator, an experimental system of wet electrostatic precipitator was established, and the comparative experiments of different types of power supply were conducted. The results showed that when the spray system of wet electrostatic precipitator was turned on, fundamental frequency constant current source run relatively smoothly, and the smoke concentration at outlet presented slight change. However, there was an oscillation zone for supply parameters for constant voltage source, and the smoke concentration at outlet increased by about 147%. Therefore, wet electrostatic precipitator preferred to use constant current source with strong anti-interference ability. For the high frequency constant current source, it had higher operation parameters and stronger pollutant removal performance. Compared with the fundamental frequency, the emission reduction ranges of dust and SO<sub>3</sub> at different power supply consumptions of high frequency constant current source were 46.30%~78.69% and 42.86%~66.67%, respectively. Moreover, the relationship between specific power consumption and pollutant removal performance of the wet electrostatic precipitator was quantitatively analyzed through in-depth testing of practical engineering projects and energy-saving optimization experiments. Engineering measurement showed that the pollutant removal performance of the wet electrostatic precipitator was improved with the reduction of unit load, but the specific power consumption of high voltage power supply increased significantly, from full load to 50% load, the specific power consumption increased from  $2.41 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $4.57 \times 10^{-4} \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ , which showed a large energy saving space. Through energy saving optimization, the specific power consumption of 50% load decreased by 84.68% when the smoke concentration at the outlet of wet electrostatic precipitator was kept at 4~5 mg·m<sup>-3</sup>. According to this energy saving optimization idea, the operation optimization was carried out for the other three engineering projects, and the smoke emission concentration was controlled within 4.5 mg·m<sup>-3</sup>, and the specific power consumptions decreased by 32.65%, 27.15% and 41.64%, respectively. The research can provide reference for the performance improvement and energy saving optimization of wet electrostatic precipitator.

**Keywords** coal-fired power plant; wet electrostatic precipitator; high voltage constant current power supply; pollutant removal properties; power consumption; specific power consumption