



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201906068

中图分类号 X505

文献标识码 A

黄怡民. 温湿电场对 PM_{2.5} 及 SO₃ 的脱除性能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(4): 1042-1051.

HUANG Yimin. Removal performance of PM_{2.5} and SO₃ by temperature and wet electric field[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 1042-1051.

温湿电场对 PM_{2.5} 及 SO₃ 的脱除性能

黄怡民*

重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404000

第一作者: 黄怡民(1986—), 女, 硕士, 讲师。研究方向: 大气化学与污染控制。E-mail: peace101@yeah.net

*通信作者

摘要 为深入研究温湿电场对 PM_{2.5} 及 SO₃ 的脱除性能, 采用实验室研究、工程调研或实测相结合的手段, 系统分析了湿式电除尘器(WESP)对 PM_{2.5} 及 SO₃ 的脱除规律, 尤其是高 SO₃ 浓度对湿式电除尘器性能的影响及其应对措施。实验研究发现: 电源电压分别为 35、45、55 kV 时, 湿式电除尘器对总尘、PM_{2.5} 和 SO₃ 的脱除效率分别为 60.8%、75.2%、82.4%, 53.7%、67.1%、76.8% 和 43.4%、58.6%、72.7%; 随着电压的增加, 各粒径段颗粒的分级脱除效率均有明显提升, 但 0.1~1 μm 提升最为明显; 鉴于烟尘的吸附及 SO₃ 的调质作用, 烟尘和 SO₃ 两者有一定的相互促进脱除作用, 但 SO₃ 浓度过高, 容易在放电极线周围形成高密度的空间电荷, 导致电晕电流降低, 除尘效率下降; 针对高浓度的 SO₃, 采用降温方式, 可有效提高湿电场的烟尘及 SO₃ 脱除性能。工程实测发现: 单独使用湿式电除尘器或是与其他相关技术耦合应用, 均对烟尘及 SO₃ 有较高的脱除效率; 湿式电除尘器对烟尘及 SO₃ 脱除效率分别为 63.5%~88.3%、65.1%~71.9%, 与湿法脱硫耦合使用, 效率分别达 82.1%、86.1%, 与相变凝聚器(PCA)耦合使用, 效率分别达 92.3%、90.1%。上述研究可为湿式电除尘器的宽范围、多场合应用提供参考。

关键词 燃煤电厂; 湿式电除尘器; PM_{2.5}; SO₃

我国燃煤电厂烟气超低排放改造已接近尾声^[1], 据不完全统计, 截至 2017 年底, 全国已完成燃煤电厂超低排放改造约 7×10⁹ kW^[2], 约占全国煤电装机容量的 71%。燃煤电厂排放的颗粒物、SO₂、NO_x 等常规大气污染物的排放已经得到了有效控制。2017 年, 中国火电厂颗粒物、SO₂、NO_x 排放量分别为 26×10⁶、120×10⁶、114×10⁶ t, 约占 2006 年排放量的 7%、9%、10%。相应地, 治理技术及技术路线也达到了较高水平^[3-5], 但对 SO₃ 等非常规污染物及细颗粒物(PM_{2.5})的排放尚未采取针对性的控制措施。相关研究^[6-8]表明, 常规的干式电除尘器存在小粒径段颗粒(0.1~1 μm)的“穿透窗口”, 通常其烟尘排放浓度越低, PM_{2.5} 占比就越高^[9], 而 PM_{2.5} 对人体及环境危害更大, 也更难沉降。SO₃ 是大气中二次 PM_{2.5} 的重要组成部分^[10], 同时也是电厂有色烟羽(蓝烟、黄烟)排放的主要诱因^[11], 因此, 燃煤电厂 PM_{2.5} 及 SO₃ 的排放控制迫在眉睫。

采用湿式电除尘器(WESP)作为终端设备, 是目前对燃煤电厂烟气中 PM_{2.5} 及 SO₃ 进行有效控制的重要技术手段之一。高朋等^[12]采用计算流体力学(CFD)软件, 分析某 116 MW 机组管式湿式电除尘器的流场特性, 并对其气流分布进行组织和优化, 指导湿式电除尘器的设计工作, 但未涉

收稿日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-07-21

基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目(cstc2018jcyjA1711)

及相关性能参数的测定。赵磊等^[13-14]通过现场实测手段(使用DPI细颗粒物采样仪),分析了某300 MW机组湿式电除尘器对PM_{2.5}的脱除能力,其PM_{2.5}脱除效率可达75%以上,鉴于现场工程条件所限,对其脱除机理及影响因素未进行充分分析,且未涉及SO₃测试。沈志刚等^[15]现场实测了某12 MW机组湿式电除尘器的PM_{2.5}及SO₃的减排性能,但因其湿式电除尘器投运较早,部分设计尚不成熟,其PM_{2.5}及SO₃的减排能力有限,脱除效率分别仅为38%、32%。雒飞等^[16]基于实验室分析,研究了电压、烟温和入口浓度等对湿式电除尘器脱除PM_{2.5}及SO₃性能的影响,发现烟气中的SO₃可增强湿式电除尘对PM_{2.5}的脱除效果,但SO₃浓度较高时,该规律是否仍然适用,该文并未提及。本研究通过实验,系统分析了湿式电除尘器对PM_{2.5}及SO₃的脱除规律,尤其是高SO₃浓度对湿式电除尘器性能的影响及其应对措施;结合实际工程项目,分析了湿式电除尘器的适用场合及与其他技术的耦合特性,为湿式电除尘技术的宽范围、多场合应用提供参考。

1 实验系统与方法

如图1所示,实验系统主要包括燃油热风炉、加灰系统(储料仓泵、射流器等)、混流装置、加SO_x系统(SO₂、O₂)、催化装置、混流增湿塔、2个烟温调节装置、湿式电除尘器(配置2.0 A/72 kV高频电源)、风机等。实验系统设计风量为1 000 m³·h⁻¹(燃油热风炉出口),热风炉出口烟气温度的50~200 ℃,连续可调。加料系统所采用的原料为电厂的燃煤飞灰,模拟湿式电除尘器入口的实际飞灰,特意选某工程项目电除尘器第5个电场(最末级电场)灰斗内收集到的细灰为研究对象,采用Mastersizer 2000E激光粒度分析仪分析飞灰颗粒的几何粒径分布,结果如图2所示。与电除尘器入口的飞灰相比,第5个电场收集到的飞灰中细颗粒占比更高,小于1、2.5和10 μm颗粒的体积分数分别高达26.27%、57.47%、88.06%,远高于电除尘器入口的飞灰。通过调整加料系统的加料量来控制烟气中的烟尘浓度;通过加SO_x系统向烟气中通入SO₃、SO₂,其中,SO₃通过SO₂氧化产生;通过混流增湿塔对烟气进行加湿,从而模拟湿法脱硫后的饱和湿烟气,但同时该增湿塔也具有一定的烟尘及SO₃脱除能力及降温能力;通过调整加料系统、加SO_x系统的给料量及增湿塔的喷淋水量,控制增湿塔出口烟气温度的50 ℃左右,控制烟尘浓度分别为50、30、10、0 mg·m⁻³左右,控制SO₃浓度分别为200、100、50、30、10、0 mg·m⁻³左右。湿式电除尘器进、出

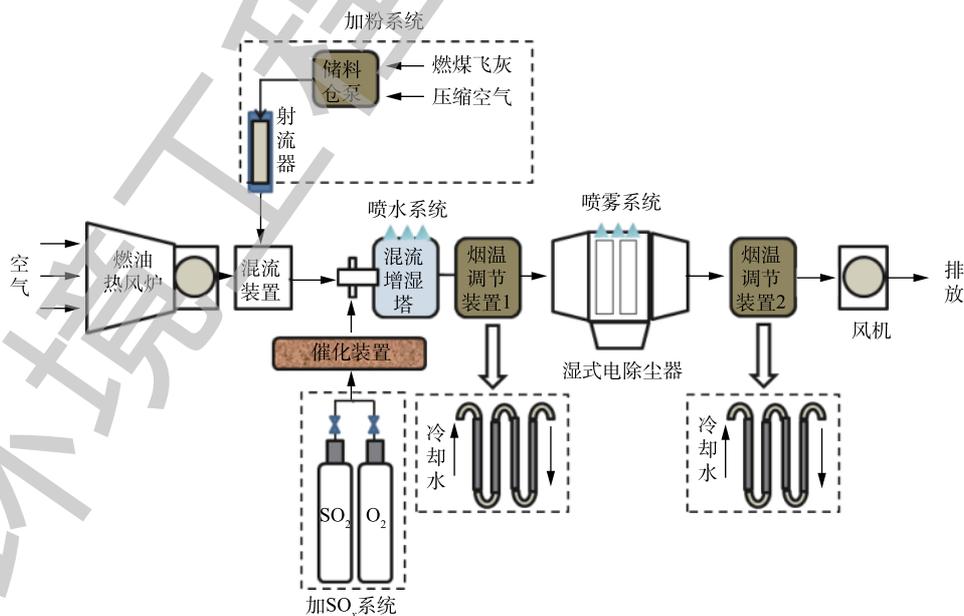


图1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

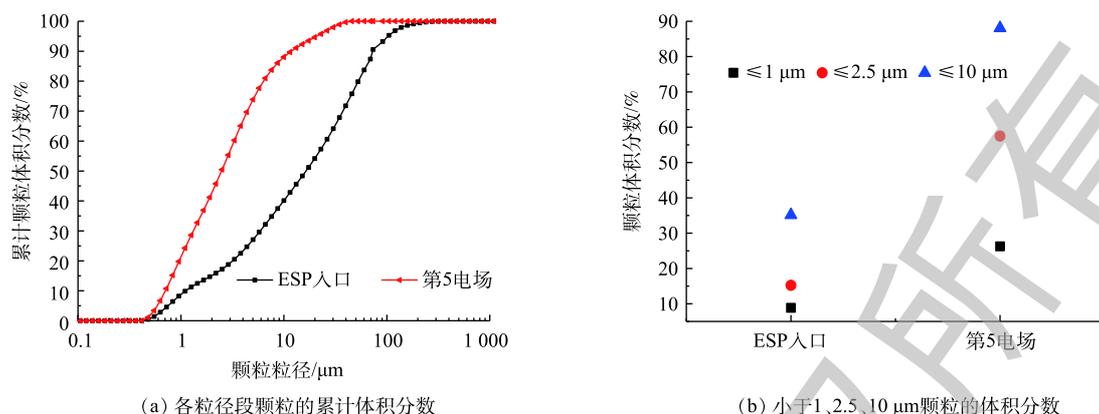


图2 飞灰颗粒几何粒径分布

Fig. 2 Geometric diameter distribution of fly ash particles

口烟道上均布置烟温调节装置,通过改变冷却水的流量,可分别控制降温幅度为5、3、0℃左右。

烟尘测试参照 GB/T 16157-1996 和 GB 13931-2017 的相关规定,采用崂应 3012H 型全自动烟尘采样仪、1085B 型烟尘采样枪(内置进口石英滤筒),采样枪加热至 (160 ± 5) ℃,并开展空白实验,采样结束后,用 1/100 000 电子天平进行称重。

$\text{PM}_{2.5}$ 及粒径分布测试方法参照 ISO 23210-2009 中的相关规定,采用 DEKATI 的静电低压撞击器(ELPI)进行采样。采样时,采样枪温度宜控制在 (160 ± 5) ℃,采用一级常温稀释器(稀释比约为 8:1),泵采样烟气流量约为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,ELPI 撞击器共分为 13 级(有效数据为 1~12 级),其中第 1~9 级累计为 $\text{PM}_{2.5}$ 。采样时须在 ELPI 前增设 1 个旋风分离器,剔除除湿塔逃逸出来的小液滴对测试结果的影响。

在 SO_3 测试方面,采用 GB/T 21508-2008 规定的控制冷凝法,水浴温度为 65℃,石英管采样枪加热温度为 300℃,抽气流量为 $20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采样结束后,用 80% 异丙醇溶液清洗蛇形盘管,硫酸根离子的滴定采用哈希 DR 6000 紫外-可见分光光度计。

2 实验结果与分析

2.1 湿电场对总尘(TSP)、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 SO_3 的脱除性能

调整湿式电除尘器入口烟气温度为 51.3℃,在烟尘及 SO_3 浓度分别为 12.5 、 $0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,电源供电电压分别为 35、45 和 55 kV 时,测定湿电场对总尘(TSP)、 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除性能,此时湿式电除尘器入口的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度约为 $8.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。经测定,湿式电除尘器进、出口烟气中总尘及 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度及其脱除效率测试结果如图 3 所示。电源供电电压分别为 35、45、55 kV 时,湿式电除尘器对总尘的脱除效率分别为 60.8%、75.2%、82.4%,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除效率分别为 53.7%、67.1%、76.8%,供电电压是湿式电除尘器的重要运行参数,其主要通过影响空间电场强度和空间电荷密度来影响湿式电除尘器的除尘性能^[17],电压越高,其对应的空间电场强度越高,则湿式电除尘器对总尘及 $\text{PM}_{2.5}$ 的脱除效率也越高。

为进一步分析湿式电除尘器对各粒径段颗粒的分级脱除性能,采用 ELPI 测定湿式电除尘器进、出口的空气动力学飞灰粒径分布,并计算其分级脱除效率,结果如图 4 所示。各个粒径段的颗粒的质量浓度均有明显减少,且电压越高,减幅越大,0.1~1 μm 颗粒的减少幅度较两端小许多;从分级脱除效率来看,基本呈“V”型分布,在 0.1~1 μm 内脱除效率最低,粒径大于 1 μm 及小于 0.1 μm 的颗粒脱除效率基本稳定在 60% 以上,甚至达到 90%。随着电压的增加,各粒径段颗粒的分级脱除效率均有明显提升,但提升幅度不同,0.1~1 μm 颗粒的分级脱除效率提升最为明显。一般来说,粒径小于 0.1 μm 的颗粒,其荷电主要通过扩散荷电来实现;粒径大于 1 μm 的颗粒,其

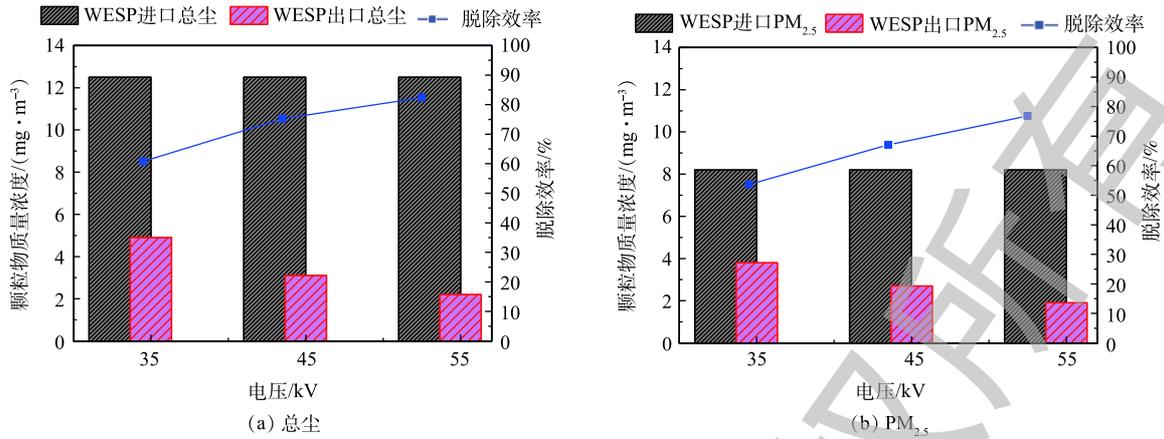


图 3 总尘、PM_{2.5} 的质量浓度及其脱除效率

Fig. 3 Mass concentration and removal efficiency of total dust and PM_{2.5}

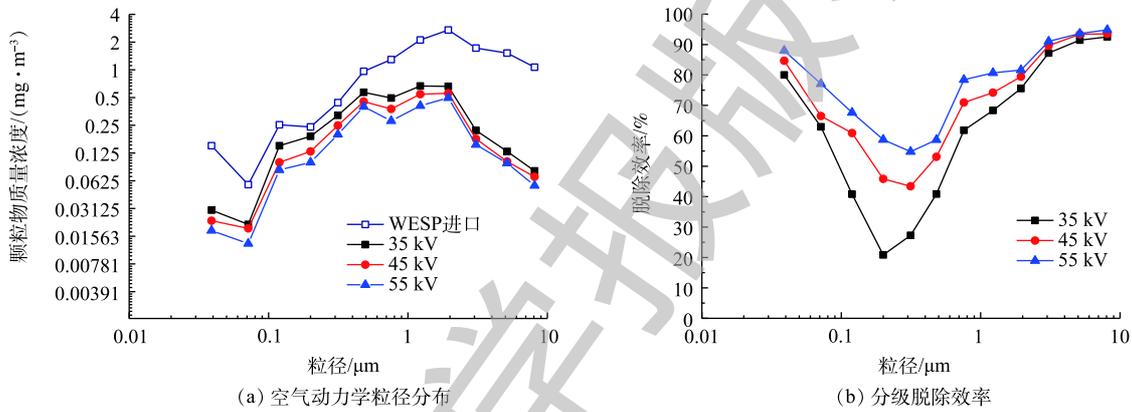


图 4 粒径分布及其分级脱除效率

Fig. 4 Particle size distribution and grade removal efficiency

荷电主要通过电场荷电来实现；而 0.1~1 μm 颗粒的扩散荷电和电场荷电作用均不明显^[18]，因此，导致该粒径段的颗粒分级脱除效率不理想。对于电场荷电而言，在湿电场比较容易达到饱和电量，因此，进一步提高电压，对大粒径段颗粒的提效并不十分明显；但扩散荷电具有不规则性，且不存在饱和电量的限制^[19]，当电压提高后，其荷电量增加，分级脱除效率也会相应提升。

在烟尘及 SO₃ 浓度分别为 0、29.7 mg·m⁻³，电源供电电压分别在 35、45、55 kV 时，测定湿电场对 SO₃ 的脱除性能。经测定，湿式电除尘器进、出口烟气中 SO₃ 的质量浓度及其脱除效率测试结果如图 5 所示。电源供电电压分别为 35、45、55 kV 时，湿式电除尘器对 SO₃ 的脱除效率分别为 43.4%、58.6%、72.7%。随着电压的升高，湿式电除尘器对 SO₃ 的脱除能力提升，但较 PM_{2.5} 的脱除效率还是要低一些。这主要是因为，在湿电场中，烟气温度低于酸露点，此时，SO₃ 以硫酸气溶胶的形态存在，其粒径非常细，多在几纳米或几十纳米^[20-21]，

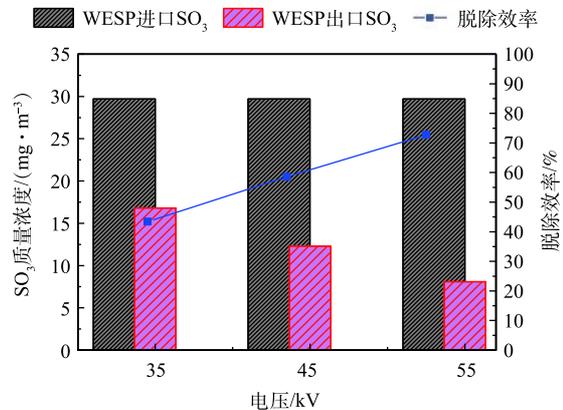


图 5 SO₃ 的质量浓度及其脱除效率

Fig. 5 SO₃ mass concentration and removal efficiency

与大粒径颗粒相比,湿电场对其脱除性能要低一些。

2.2 湿电场中烟尘与 SO_3 的相互影响

为分析湿电场中烟尘对 SO_3 的脱除性能影响,调整湿式电除尘器入口 SO_3 浓度为 $29.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,电源供电电压为 55 kV ,分别控制湿式电除尘器入口烟尘浓度在 49.7 、 30.1 、 12.5 、 $0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,测定湿式电除尘器对 SO_3 的脱除性能,结果如图 6 所示。随着入口烟尘浓度的升高,湿式电除尘器对 SO_3 的脱除性能有一定程度的提升,这是因为冷凝后的硫酸雾颗粒会在湿电场中与飞灰颗粒发生团聚,并吸附在粉尘表面^[22-23],同粉尘一起被脱除。

为分析湿电场中 SO_3 对烟尘的脱除性能的影响,调整湿式电除尘器入口烟尘浓度为 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,电源供电电压为 55 kV ,分别控制湿式电除尘器入口 SO_3 浓度在 194.7 、 98.9 、 51.4 、 29.7 、 11.2 、 $0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,测定湿式电除尘器对烟尘的脱除性能,结果如图 7 所示。随着入口 SO_3 浓度的升高,湿式电除尘器对烟尘的脱除性能先提升后降低,这是因为 SO_3 本身就是一种烟气调质剂^[24],尤其冷凝后的硫酸雾会大幅改善烟气特性及粉尘性质,从而有效提高湿电场的烟尘脱除效果。但酸雾气溶胶颗粒的粒径小(几纳米或几十纳米),随着浓度的提升,容易在放电极线周围形成高密度的空间电荷,降低极线附近的电场强度及离子浓度,最终导致电晕电流降低^[25-26],严重时可能还会产生电晕封闭,从而降低湿电场的烟尘脱除效果。为进一步验证除尘脱除效率下降的原因,分别在不同 SO_3 浓度条件下开展伏安特性实验,极板表面区域先贴一层绝缘薄膜,然后再贴上多块薄铜片,每个铜片外接微安表,以读取其电流值,并计算各个电流读数的平均值,测试结果如图 8 所示

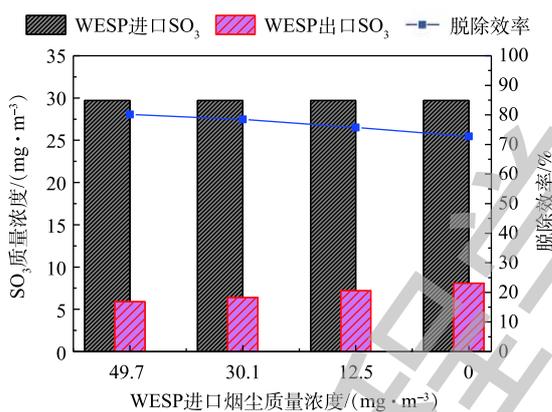


图 6 SO_3 的质量浓度及其脱除效率

Fig. 6 SO_3 mass concentration and removal efficiency

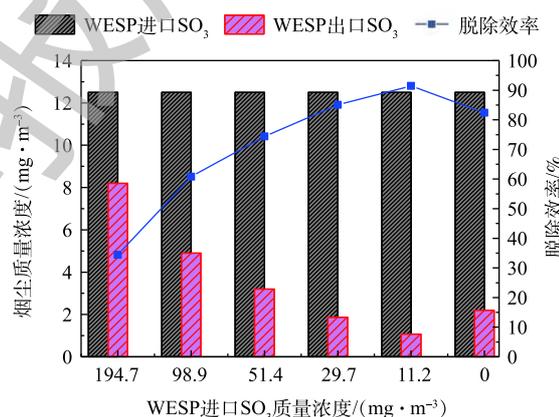
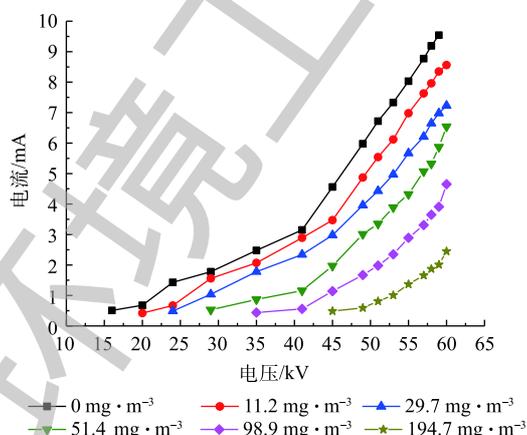
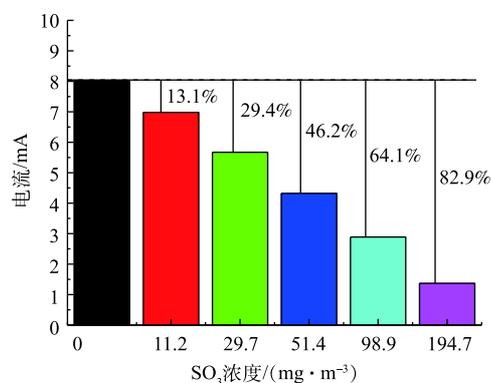


图 7 烟尘的质量浓度及其脱除效率

Fig. 7 Smoke mass concentration and removal efficiency



(a) 伏安特性曲线



注:图中百分数表示电流降低率。

(b) 55 kV时电流对比

图 8 不同 SO_3 浓度条件下的伏安特性曲线及电晕电流对比

Fig. 8 Comparison of V - I characteristic curve and corona current at different SO_3 concentrations

示。随着SO₃浓度的增加,湿电场的起晕电压升高,电晕电流降低。在同等供电电压条件下,高浓度SO₃的电晕电流明显减低,在电压为55 kV时,SO₃浓度在194.7、98.9、51.4、29.7、11.2 mg·m⁻³的电晕电流分别比无SO₃时减低了13.1%、24.9%、46.2%、64.1%、82.9%。

2.3 湿电场脱除高浓度SO₃的改进措施

本研究尝试采用降温的方式来提高湿电场的烟尘及SO₃脱除性能,在湿式电除尘器进口烟尘及SO₃浓度分别为12.5、98.9 mg·m⁻³时,调整湿式电除尘器进口烟道上的烟温调节装置,可分别控制降温幅度约在0、3、5℃(原烟气温度为51.3℃),测定此时烟温调节装置出口、湿式电除尘器出口的烟尘及SO₃浓度,并计算其脱除效率,结果如图9所示。通过降低湿式电除尘器入口烟气温度,可明显提高整个温湿电场系统(烟温调节装置1+湿式电除尘器)的烟尘、SO₃脱除效率,降温程度从0℃到5℃,其综合除尘效率从60.8%提高到83.2%,SO₃脱除效率从52.2%提高到67.5%。对于饱和湿烟气中的酸雾气溶胶颗粒来说,降温过程势必伴随着水汽相变和气溶胶颗粒、飞灰颗粒的团聚长大^[27-33],从而有效提高温湿电场对烟尘及SO₃脱除效率。

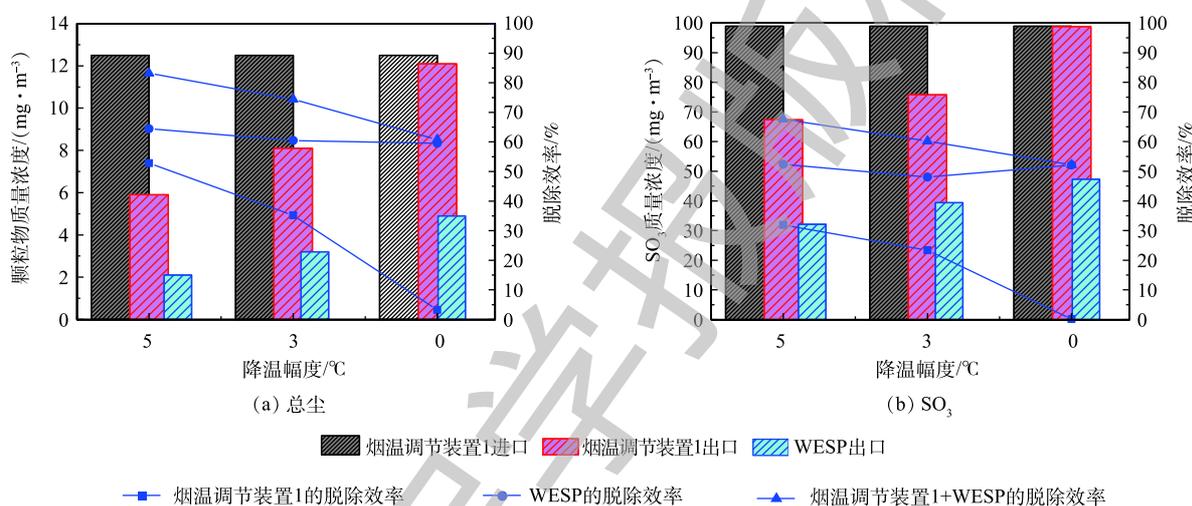


图9 总尘、SO₃的质量浓度及其脱除效率

Fig. 9 Mass concentration and removal efficiency of total dust and SO₃

值得注意的是,在烟温调节装置1降温幅度达到5℃时,虽然SO₃综合脱除效率达到了67.5%,但其排放浓度仍然较高,为32.1 mg·m⁻³,仍有蓝色烟羽排放风险。为进一步降低SO₃排放,开启湿式电除尘器出口烟道上的烟温调节装置2,分别控制降温幅度约在5℃和3℃,测定其进一步减排后的SO₃排放浓度,结果如图10所示。降温幅度分别为3℃和5℃时,SO₃进一步减排幅度分别达20.2%和29.3%。

3 实测结果及分析

针对A电厂600 MW机组、B电厂1000 MW

机组、C电厂600 MW机组配套的低低温电除尘器,开展现场调研或测试分析,3个项目的烟气参数、煤种成分分析结果如表1和表2所示。所烧煤种均为低硫煤(≤1%),对应的烟气治理技术路线如图11所示,其中A电厂为湿法脱硫装置(WFGD)与湿式电除尘器一体化布置,B电厂为湿式

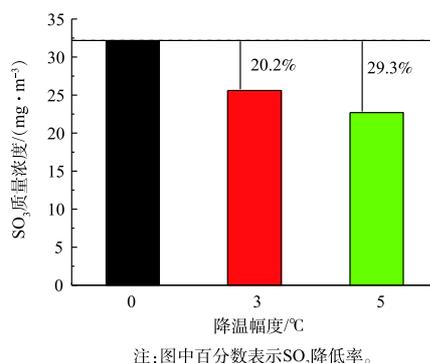


图10 SO₃的排放浓度及其进一步减排幅度

Fig. 10 SO₃ emission concentration and its further emission reduction

电除尘器单独布置, C 电厂为湿式电除尘器与相变凝聚器 (PCA) 组合布置, C 电厂相变凝聚器的降温幅度约 2 °C。

3 个项目对烟尘及 SO₃ 的脱除效果如图 12 和图 13 所示。对于 A 电厂, 湿式电除尘器对烟尘及

表 1 烟气参数

Table 1 Flue gas parameters

电厂	机组大小/MW	烟气量/(m ³ ·h ⁻¹)	入口烟气温度/°C
A	600	2 029 810	约51
B	1 000	6 025 409	约50
C	600	2 780 666	50~57

表 2 煤种成分分析

Table 2 Analysis of coal composition

电厂	水分/%	灰分/%	硫分/%	低位发热量/(kJ·g ⁻¹)
A	10.1	16.2	0.55	23.9
B	7.51	17.81	0.93	17.5
C	5.12	15.27	0.80	19.5

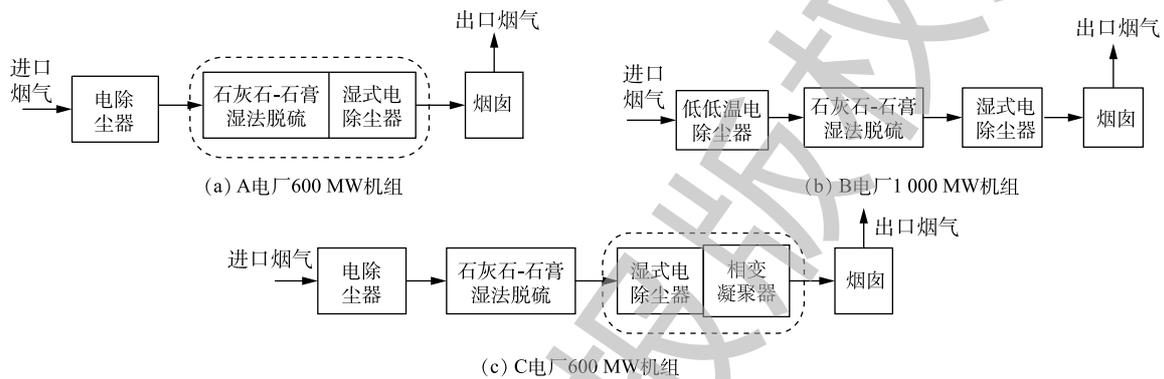
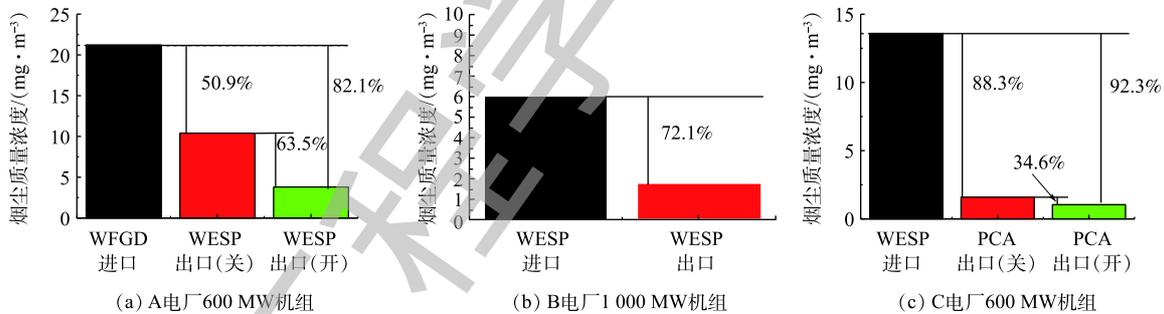


图 11 烟气治理技术路线

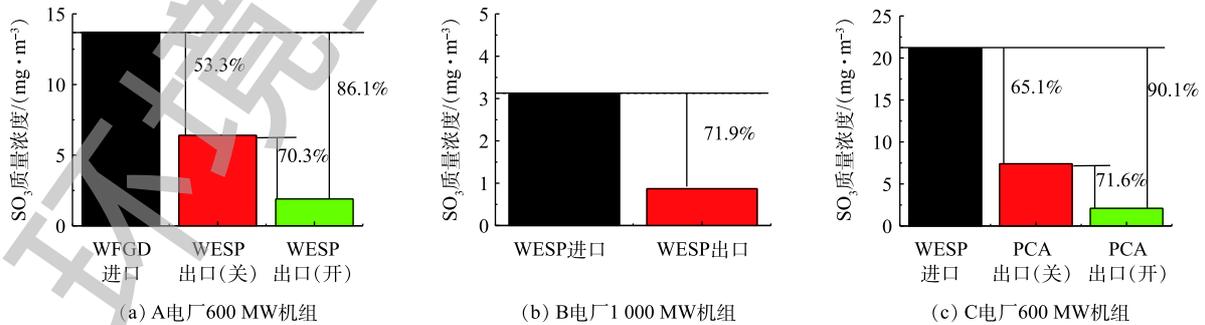
Fig. 11 Flue gas treatment technology



注:图中百分数表示烟尘脱除效率。

图 12 烟尘浓度测试结果

Fig. 12 Test results of smoke concentration



注:图中百分数表示SO₃脱除效率。

图 13 SO₃ 浓度测试结果

Fig. 13 Test results of SO₃ concentration

SO₃脱除效率分别为63.5%、70.3%，与湿法脱硫耦合使用，脱除效率分别达82.1%、86.1%；对于B电厂，湿式电除尘器对烟尘及SO₃脱除效率分别为72.1%、71.9%；对于C电厂，湿式电除尘器对烟尘及SO₃脱除效率分别为88.3%、65.1%，与相变凝聚器(PCA)耦合使用，效率分别达92.3%、90.1%。湿式电除尘器不论单独使用，还是与其他相关技术耦合应用，均对烟尘及SO₃有较高的脱除效率。

4 结论

1) 通过开展实验室实验，设置电源供电电压分别为35、45、55 kV时，湿式电除尘器对总尘的脱除效率分别为60.8%、75.2%、82.4%，对PM_{2.5}的脱除效率分别为53.7%、67.1%、76.8%，对SO₃的脱除效率分别为43.4%、58.6%、72.7%。随着电压的增加，各粒径段颗粒的分级脱除效率均有明显提升，但提升幅度不同，0.1~1 μm颗粒的分级脱除效率提升最为明显；随着入口烟尘浓度的升高，湿电场对SO₃的脱除性能有一定程度的提升；随着入口SO₃浓度的升高，湿电场对烟尘的脱除性能先提升后降低，且SO₃浓度过高，容易在放电极线周围形成高密度的空间电荷，降低极线附近的电场强度及离子浓度，最终导致电晕电流降低；采用降温的方式来提高湿电场的烟尘及SO₃脱除性能，湿式电除尘器前降温程度从0℃到5℃，其综合除尘效率从60.8%提高到83.2%，SO₃脱除效率从52.2%提高到67.5%，湿式电除尘器后降温幅度分别为3℃和5℃时，SO₃还会分别进一步降低20.2%、29.3%。

2) 通过3个工程项目的现场调研或实测，进一步研究了湿式电除尘器对烟尘、SO₃的脱除性能及适用范围。湿式电除尘器不论单独使用，还是与其他相关技术耦合应用，均对烟尘及SO₃有较高的脱除效率。湿式电除尘器对烟尘及SO₃脱除效率分别为63.5%~88.3%、65.1%~71.9%，与湿法脱硫耦合使用，效率分别达82.1%、86.1%，与相变凝聚器(PCA)耦合使用，效率分别达92.3%、90.1%。

参考文献

- [1] 孙雪丽, 朱法华, 王圣, 等. 燃煤电厂颗粒物超低排放技术路线选择[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2): 129-136.
- [2] 中国电力企业联合会规划发展部. 中国电力工业统计快报(2017年)[R]. 2019-04-15.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某1 000 MW燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [6] 靳星. 静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [7] 熊桂龙, 李水清, 陈晟, 等. 增强PM_{2.5}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.
- [8] 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.
- [9] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 630-634.
- [10] HUANG R J, ZHANG Y L, CARLO B, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events

- in China[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [11] 刘含笑, 陈招妹, 王少权, 等. 燃煤电厂SO₃排放特征及其脱除技术[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(5): 1128-1138.
- [12] 高朋, 党小庆, 赵少雄, 等. 管式湿式电除尘器气流分布的组织与优化[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(7): 4223-4228.
- [13] 赵磊, 周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 468-473.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 雒飞, 胡斌, 吴昊, 等. 湿式电除尘对PM_{2.5}/SO₃酸雾脱除特性的试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1): 91-97.
- [17] 杨正大. 多场强化湿烟气中PM、SO_x协同脱除机理及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [18] 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.
- [19] SEINFELD J H, PANDIS S N. *Atmospheric Chemistry and Physics*[M]. New York: John Wiley, 1998.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 刘含笑, 郦建国, 姚宇平, 等. 电除尘器飞灰粒径表征及细颗粒降温团聚[J]. *化工进展*, 2018, 37(6): 2413-2425.
- [23] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 燃煤电厂WESP颗粒物脱除机制及排放特征研究[J]. *中国电力*, 2017, 50(12): 178-184.
- [24] 李谢玲. 燃煤机组中烟气调质对电除尘效率影响分析[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(3): 314-317.
- [25] 张雪峰. 含SO₃湿烟气中电晕放电及SO₃脱除研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [26] 张雪峰, 杨正大, 李响, 等. SO₃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.
- [27] 谭厚章, 熊英莹, 王毅斌, 等. 湿式相变凝聚技术协同湿式电除尘器脱除微细颗粒物研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(12): 2710-2714.
- [28] TAN H Z, XIONG Y Y, WANG Y B, et al. Study on synergistic removal of multi-pollutants by WPTA[J]. *Electric Power*, 2017, 50(2): 128-134.
- [29] TAN H Z, WANG Y Y, CAO R, et al. Development of wet phase transition agglomerator for multi-pollutant synergistic removal[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 130: 1208-1214.
- [30] XIONG Y, TAN H Z, WANG Y B, et al. Pilot-scale study on water and latent heat recovery from flue gas using fluorine plastic heat exchangers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1416-1422.
- [31] CAO R, TAN H Z, XIONG Y B, et al. Improving the removal of particles and trace elements from coal-fired power plants by combining a wet phase transition agglomerator with wet electrostatic precipitator[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161:

1459-1465.

[32] 王述浩, 李水清, 段璐, 等. 相变凝聚器内蒸汽凝结与细颗粒团聚规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7230-7236.

[33] LIU J M, ZHU F H, MA X Y. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification[J]. *Engineering*, 2018, 4(3): 416-420.

(本文编辑: 王萌萌, 郑晓梅, 张利田)

Removal performance of PM_{2.5} and SO₃ by temperature and wet electric field

HUANG Yimin*

College of Environmental and Chemistry Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China

*Corresponding author, E-mail: peace101@yeah.net

Abstract In order to study the performance of temperature and humidity electric field on PM_{2.5} and SO₃ removal, the removal rules of PM_{2.5} and SO₃ by wet electrostatic precipitator(WESP) were analyzed systematically by means of laboratory research, engineering investigation or field measurement, especially for the influence of high SO₃ concentration on the performance of WESP and its countermeasures. The experimental results showed that at the power supply voltages of 35, 45 and 55 kV, the removal efficiencies of total dust, PM_{2.5} and SO₃ by WESP were 60.8%, 75.2%, 82.4%; 53.7%, 67.1%, 76.8% and 43.4%, 58.6%, 72.7%, respectively. With the increase of voltage, the grade removal efficiencies for particles within each size interval also increased significantly, and the most remarkable increase occurred for particles with size of 0.1~1 μm. In view of the adsorption of soot and tempering effect of SO₃, the removal performance of dust and SO₃ can promote each other to some extent. However, at too high SO₃ concentration, a high density space charge around the discharge electrode line was easy to form, which could lead to the reduction of corona current and dust removal efficiency. Aiming at high SO₃ concentration, adopting cooling method could effectively improve the soot and SO₃ removal performance of wet electric field. Engineering field measurements indicated that high removal efficiency of dust and SO₃ for wet electrostatic precipitator happened no matter it was used alone or coupled with other related technologies. The dust and SO₃ removal efficiencies of the wet electrostatic precipitator were 63.5%~88.3% and 65.1%~71.9%, respectively, and when it was coupled with the wet desulfurization, the efficiencies could reach 82.1% and 86.1%, respectively, and when it was coupled with the PCA, the efficiencies could reach 92.3% and 90.1%, respectively. The analysis shows that this study can provide reference for the wide range and multiple applications of wet electrostatic precipitator.

Keywords coal-fired power plant; wet electrostatic precipitator(WESP); PM_{2.5}; SO₃