

· 环境综合整治 ·

基于现场实测的湿电除尘器颗粒物特性变化研究

杨建军¹, 杜利劳², 马启翔², 林启才²

(1. 西安文理学院生物与环境工程学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061)

摘要: 采用自主设计的固定源细颗粒物稀释采集系统以及根据 GB/T 16157—1996 方法对陕西关中地区某燃煤电厂湿电除尘器 (WESP) 进出口的颗粒物开展了现场实测与特性分析。结果表明: WESP 对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和颗粒物的脱除效率分别为 67.85%、43.57%、40.88%; WESP 前后质量浓度峰值均出现在积聚模态, 但由双峰 (1.764、0.649 μm) 变成单峰 (1.764 μm), 峰值移至大粒径段, 数浓度峰值出现在爱根核模态和积聚模态, 但由多峰 (0.017、0.129、0.384、1.764 μm) 变成双峰 (0.017、0.073 μm), 峰值移至小粒径段; 经 WESP, $PM_{2.5}$ 积聚模态大多粒径段颗粒物的质量浓度与数浓度均在下降 (如在质量浓度和数浓度下降粒径段中, 0.129 μm 处下降率均最少 (均为 59.03%)), 爱根核模态大多粒径段颗粒物的质量浓度与数浓度均在上升 (如在质量浓度和数浓度上升粒径段中, 0.017 μm 处上升率均最少 (均为 55.36%)), 但无论是 WESP 前或后, $PM_{2.5}$ 的主要质量浓度均集中在大粒径段、主要数浓度均集中在小粒径段; WESP 对 $PM_{2.5}$ 中大粒径段颗粒物的去除效果要优于小粒径段颗粒物。

关键词: 现场实测; WESP; 颗粒物; 粒径分布

中图分类号: X513

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2019.03.008

Study on Particles Characteristics Variation of WESP Based on Field Measurement

YANG Jianjun¹, DU Lilao², MA Qixiang², LIN Qicai²

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Research Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: Field experiments and characteristic analysis of particles in flue gas from inlet and outlet of a coal-fired power plant using WESP in Guanzhong area of Shaanxi province was carried out according to GB/T 16157-1996 and the dilution and collection system of $PM_{2.5}$ in stationary sources designed by our team. The removal rates of $PM_{2.5}$, PM_{10} and particles by WESP were 67.85%, 43.57% and 40.88%, respectively. The peak of mass concentration before and after WESP appeared in the accumulation mode, but changed from two peak (1.764 μm 、0.649 μm) to one peak (1.764 μm), and the peak moved to large particle. The peak of number concentration appeared in Aitken mode and accumulation mode, but changed from multi peak (0.017 μm 、0.129 μm 、0.384 μm 、1.764 μm) to two peak (0.017 μm 、0.073 μm), and the peak moved to small particle. The mass concentration and number concentration of most particle size fractions in accumulation mode were decreasing (For example, the rate of descent at 0.129 μm were the lowest (59.03%) in the decreasing particle size fractions of mass concentration and number concentration). The mass concentration and number concentration of most particle size fractions in Aitken mode are on the rise (For example, the rate of increase at 0.017 μm were the lowest (55.36%) in the ascending particle size fractions of mass concentration and number concentration). However, the major mass concentration of $PM_{2.5}$ was concentrated in the large particle size, and the main number concentration was concentrated in the small particle size, either before or after the WESP for $PM_{2.5}$. The removal efficiency of WESP on large particles for $PM_{2.5}$ was better than that of small particles.

Keywords: Field Measurement; WESP; Particle; Size Distribution

CLC number: X513

收稿日期: 2019-01-07

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划课题(2012KTZB03-01)资助

作者简介: 杨建军 (1975-), 男, 博士、高级工程师。研究方向: 大气污染控制。E-mail: yangjianjun_05@163.com

引用格式: 杨建军, 杜利劳, 马启翔, 等. 基于现场实测的湿电除尘器颗粒物特性变化研究[J]. 环境保护科学, 2019, 45(3): 45-50.

近 10 年来,我国已有一些城市对其区域内大气污染源做了解析工作,尤其是北方污染较重城市,其污染物解析结果大都显示燃煤排放是大气污染贡献的主要源^[1-10]。研究表明,长时间、高浓度的颗粒物污染会对人体健康及生态环境造成严重损害,所以控制燃煤颗粒物排放已成为众多层级政府部门需要重点关注的环境问题,而在具体控制行动及污染研究中燃煤颗粒物的排放与控制也成为重点工作之一。2013 年,国家环境保护部发布了《环境空气细颗粒物污染综合防治技术政策》,该政策鼓励火电机组和大型燃煤锅炉采用湿式电除尘等新技术来控制工业污染源有组织排放的颗粒物;2014 年,国家发展和改革委员会、国家环境保护部和国家能源局联合印发了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》,该计划要求各企业采用成熟适用的环保改造技术,鼓励加装湿式静电除尘装置。上述政策或计划清晰表明,现有的单纯的干式电除尘器已经很难满足要求,燃煤污染排放企业必须采用更加先进的颗粒物控制技术(如湿电技术)才能长期稳定达标。

文献[11-14]研究报道,作为大气复合污染物控制系统的最终精处理设备——湿式电除尘器(WESP),其能够有效去除(去除率 85% 左右^[13])烟气中的细颗粒物(PM_{2.5})。但由于目前我国主要燃煤污染排放源燃煤电厂的 WESP 设备安装数量较少、WESP 处理后烟气湿度很大、颗粒物排放

浓度很低、固定源细颗粒物标准测试方法尚未出台等原因,导致有关 WESP 细颗粒物现场实测研究方面的文献极少,更多的是非现场实测下的文献研究。由于非现场实测与现场实测下的许多参数存在差异,所以非现场实测下的测试结果很难反映实际情况,因此也不能给与相关部门“第一手”的可靠资料。为了获得 WESP 颗粒物实际排放的“第一手”数据,该研究根据稀释通道基本原理并借鉴美国及国内各大科研院设计的系列固定燃烧源颗粒物稀释采样系统,自主设计了燃煤锅炉细颗粒物稀释采集系统,应用这套系统对陕西省关中地区某典型燃煤电厂末端 WESP 前后的细颗粒物开展了大量实测工作并对采集样品做了实验室分析,同时根据 GB/T 16157—1996 方法对 WESP 前后的粉尘也进行了现场测试与实验分析,目的在于充分了解燃煤电厂 WESP 对颗粒物尤其是细颗粒物的质量浓度、数浓度、粒径分布方面的影响,从而为我国燃煤电厂 WESP 技术的改进和推广、区域细颗粒物控制政策的出台以及燃煤电厂排放对大气污染贡献的进一步认知等方面提供科学的技术资料和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象基本概况

研究企业基本概况及其 WESP 主要设计参数,见表 1~2。

表 1 研究企业基本概况

燃料名称	燃料消耗量 /t·d ⁻¹	测试 机组	功率 /MW	锅炉 类型	规模 /t·h ⁻¹	测试 工况 /%	污控设 施组合	石灰石 用量 /t·d ⁻¹	液氨 用量 /m ³ ·h ⁻¹
混合烟煤(主要来源于 彬长矿区、麟北矿区、华 亭矿区)	2 300	4#	300	煤粉炉	1 025	85	SCR + ESP + WFGD + WESP	18	50

表 2 研究企业 WESP 主要设计参数

型号	布置 形式	室数	电场 数	通道 数	极间 距/m	截面 积/m ²	烟气处 理量 /m ³ ·s ⁻¹	烟气 速度 /m·s ⁻¹	进口烟 气温度 /℃	出口烟 气温度 /℃	集尘 面积 /m ²	宽×高 ×长 /m	冲洗 水量 /t·h ⁻¹	冲洗 频率
SDD - CF - 150	立式	1	4	1	0.15	148	444	3	55 ± 5	54 ± 5	7 949	15 × 21 × 16	90	1 次/24 h, 5 min/ 电场·次

1.2 样品采集系统构建

该研究自主设计的燃煤锅炉细颗粒物稀释采

集系统主要包括进气子系统、稀释子系统、采样子系统3大子系统,见图1。

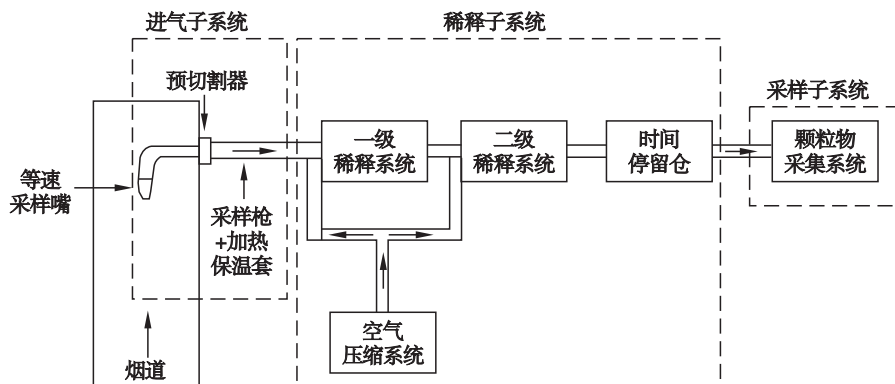


图1 燃煤锅炉细颗粒物稀释采集系统

进气子系统主要包括等速采样嘴、旋风预切割器、采样枪、加热(保温)等部件或装置;稀释子系统主要包括空气压缩机、空气过滤器、空气干燥器、压缩空气加热装置、一级稀释器、二级稀释器、FPS-4000 细颗粒采样仪(芬兰 Dekati 公司)等部件或装置;采样子系统主要包括 ELPI+(电动低压冲击器,芬兰 Dekati 公司)、真空泵、笔记本电脑、颗粒物采集器(BGI PQ200 环境级精细颗粒物采样器)等装置或部件。

等速采样嘴是保证烟气进入采样嘴的流速与烟道内采样点的烟气流速相等,从而确保烟气中颗粒物不被超采或少采。旋风切割器是为解决由于烟气中颗粒物浓度过高最终导致后续系统过载而专门设计的预除尘装置。加热(保温)装置可防止颗粒物在采样管道中出现热泳沉积和冷凝现象,通常加热温度略高于烟气温度。空气过滤器(过滤颗粒物)及干燥器(去除水分)均是为了保证进入稀释器中的气体干洁。一级稀释空气温度接近烟气温度,从而保证稀释后烟气不发生冷凝,二级稀释空气温度接近常温空气,从而保证稀释后烟气温度接近环境空气温度。FPS-4000 细颗粒采样仪是为了保证烟气浓度被精准稀释、烟气温度和压力被精准控制、烟气流速被精准控制而专门设计的一套细颗粒物稀释系统。采样子系统采用多通道观测及采样,烟气经第一通道后进入 ELPI+ 在线测试系统(理论流速 10 L/min),在这

一系统中可以对不同层级颗粒物的质量浓度、数浓度、面积浓度、体积浓度进行在线观测;烟气经第二通道后进入颗粒物采集器(采样流速 16.7 L/min)被滤膜拦截,该滤膜被送至实验室可进行称重及组分分析。

1.3 细颗粒物浓度及粒径分布

根据 ELPI+ 对稀释后烟气中细颗粒物在线质量浓度/数浓度统计结果及其多层次图谱来进行分析。ELPI+ 中细颗粒物各分割直径段 D50% 为 0.006 ~ 0.017 (1 级)、0.017 ~ 0.03 (2 级)、0.03 ~ 0.06 (3 级)、0.06 ~ 0.108 (4 级)、0.108 ~ 0.17 (5 级)、0.17 ~ 0.26 (6 级)、0.26 ~ 0.4 (7 级)、0.4 ~ 0.64 (8 级)、0.64 ~ 1 (9 级)、1 ~ 1.6 (10 级)、1.6 ~ 2.5 μm (11 级)。

细颗粒物粒径分布通常采用 $D_p - dM/d\log D_p$ 来表示,该方法是以质量浓度或数浓度对粒径对数取微分的方法来表示的。细颗粒物质量浓度或数浓度的对数粒径分布频度根据公式(1)、公式(2)计算获得。

$$dM/d\log D_p = \frac{\Delta M}{\Delta \log D_p} \quad (1)$$

$$dN/d\log D_p = \frac{\Delta N}{\Delta \log D_p} \quad (2)$$

式中, D_p 为细颗粒物的空气动力学直径; ΔM 为某粒径范围细颗粒物的质量浓度, mg/Nm³; ΔN 为某粒径范围细颗粒物的数浓度, 1/cm³; $\Delta \log D_p$ 为某粒径范围细颗粒物的粒径上限与下限的对数差值。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物质量浓度及去除率与占比

研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的质量浓度,见图 2。

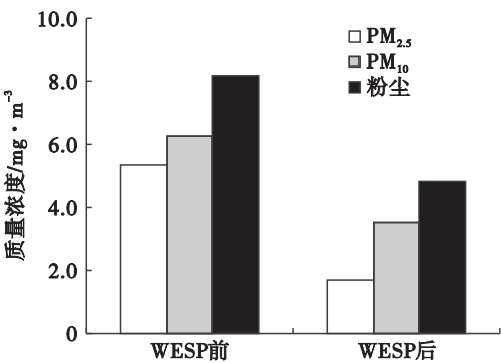


图 2 研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的质量浓度

由图 2 可知,WESP 前 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的质量浓度分别为 5.332、6.250、8.170 mg/m^3 ,WESP 后 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的质量浓度分别为 1.714、3.527、4.830 mg/m^3 (粉尘排放浓度大大低于《关中地区重点行业大气污染物排放限值》(DB61/941 2014)中的限值 20 mg/m^3),WESP 后相比 WESP 前 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的质量浓度均有所下降,下降(去除)率分别为 67.85%、43.57%、40.88%, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的下降(去除)率依次变小。

研究电厂与其他电厂 WESP 出口的颗粒物测试结果和去除率情况,见表 3。

由表 3 可知,两者在数量级别及去除率两个方面均较为接近,这间接表明该研究测试结果具有一定的可信度。

表 3 国内燃煤电厂和该研究电厂 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 及粉尘测试结果

测试对象	机组功率/MW	工况	除尘工艺组合	脱硫出口 $PM_{2.5}$ 数浓度/ $\mu g/cm^3$	WESP 进口(脱硫出口)质量浓度/ $mg\cdot m^{-3}$			WESP 出口质量浓度/ $mg\cdot m^{-3}$		
					$PM_{2.5}$	PM_{10}	粉尘	$PM_{2.5}$	PM_{10}	粉尘
华能山东黄台电厂 ^[15-16]	300	100%	SCR + ESP + WFGD + WESP	—	6.77	48.80	61.08	0.95 (去除率 85.97%)	5.63	6.85
长兴岛第二电厂 ^[17]	24	正常工况		—	1.88	—	19.8	0.83 (去除率 55.85%)	—	4.1
某电厂 ^[18]	220	100%	SCR + ESP + WFGD	—	2.05	—	—	—	—	—
某电厂 ^[19]	300	正常工况	SCR + ESP + WFGD	138 247	19.29	—	—	—	—	—
研究电厂	300	85%	SCR + ESP + WFGD + WESP	110 753	5.33	6.25	8.17	1.71 (去除率 67.85%)	3.53	4.83

注:炉型:煤粉炉;—表示无数据。

此外,研究企业 WESP 前 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度占粉尘质量浓度的比例分别为 65.26%、76.50%,WESP 后 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的该比例分别为 35.49%、73.02%。这表明,在 WESP 前,粒径段较小的颗粒物占据主导地位,而在 WESP 后,粒径段大的颗粒物占据主导地位,粒径段发生了显著偏移。

2.2 $PM_{2.5}$ 质量浓度粒径变化

研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 质量浓度的粒径

变化,见图 3。

由图 3 可知,WESP 前 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈双峰分布,峰值出现在 1.764 μm (几何平均直径,以下同)、0.649 μm 两个积聚模态(accumulation mode, 0.08 ~ 2 μm)^[20] 粒径段;WESP 后 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈单峰分布,峰值出现在 1.764 μm 积聚模态粒径段。WESP 后 $PM_{2.5}$ 峰值相比较 WESP 前 $PM_{2.5}$ 峰值存在重合粒径段,峰值移至大粒径段。在 $PM_{2.5}$ 的积聚模态,WESP 前后各级质量浓度均较高且

变化较为剧烈;在 $PM_{2.5}$ 的爱根 (Aitken) 核模态 ($<0.08 \mu m$)^[20], WESP 前后各级质量浓度均较低且变化较为平缓。

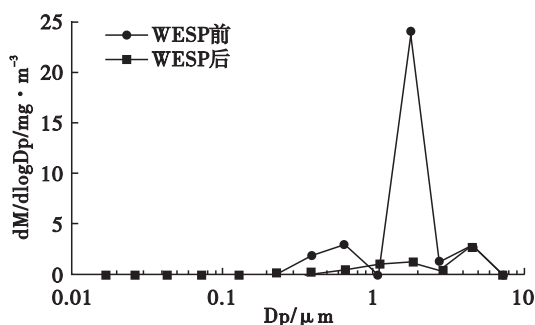


图3 研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 质量浓度粒径分布特征

经 WESP, $PM_{2.5}$ 积聚模态大多粒径段的颗粒物质量浓度均在下降 (如 $1.764 \mu m$ 峰值处粒径段颗粒物质量浓度下降幅度最大, 下降率为 95.06%, 下降最少的粒径段位于 $0.129 \mu m$ 处, 下降率为 59.03%), 爱根核模态大多粒径段的颗粒物质量浓度在上升 (如 $0.017 \sim 0.044 \mu m$ 粒径段的颗粒物质量浓度均在上升, 上升率介于 55.36% ~ 239.11% 之间), 但无论是 WESP 前或后, $PM_{2.5}$ 的主要质量浓度均集中在大粒径段。综上, 烟气经过 WESP, $PM_{2.5}$ 质量浓度会下降, 但其对 $PM_{2.5}$ 不同粒径段颗粒物质量浓度的影响不尽相同, 如 $PM_{2.5}$ 小粒径段的质量浓度大多会升高 (这主要是由于扩散、拦截和惯性碰撞等对 $PM_{2.5}$ 小粒径段颗粒物作用较弱以及粒径较小颗粒物会通过扩散沉积和布朗团聚等作用而强势长大成较大团聚体, 从而导致在“一弱一强”情境下颗粒物质量浓度升高的概率大大增加), $PM_{2.5}$ 大粒径段的质量浓度大多会降低 (主要是因为扩散、拦截和惯性碰撞等对 $PM_{2.5}$ 大粒径段颗粒物作用较大, 从而导致颗粒物去除率增大所致), 但 WESP 并未实质性影响到 $PM_{2.5}$ 主要质量浓度的分布区域, 主要质量浓度仍然集中在大粒径段。这主要是由于 WESP 前 $PM_{2.5}$ 在大粒径段和小粒径段质量浓度的数量级差异 (如 WESP 前 $PM_{2.5}$ 大粒径段颗粒物的质量浓度大都在 10^{-1} 数量级, 而小粒径段一般则在 10^{-4} 或 10^{-5} 数量级) 决定的。虽然经 WESP 处理后, $PM_{2.5}$ 小粒径段颗粒物质量浓度大多会升高, 大粒径段颗粒物质量浓度大多会降低, 但升高

或降低量不足以从根本上改变 $PM_{2.5}$ 质量浓度在大粒径段和小粒径段的原有分布特征。

2.3 $PM_{2.5}$ 数浓度粒径变化

研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 数浓度的粒径变化情况, 见图 4。

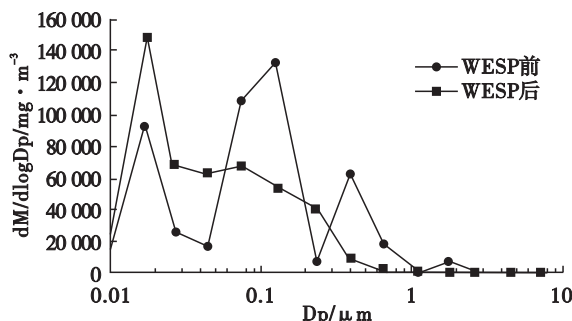


图4 研究企业 WESP 前后 $PM_{2.5}$ 数浓度粒径分布特征

由图 4 可知, WESP 前 $PM_{2.5}$ 数浓度呈多峰分布, 峰值出现在 $0.017 \mu m$ 爱根核模态粒径段及 0.129 、 0.384 、 $1.764 \mu m$ 3 个积聚模态粒径段; WESP 后 $PM_{2.5}$ 数浓度呈双峰分布, 峰值出现在 0.017 、 $0.073 \mu m$ 2 个爱根核模态粒径段。WESP 后 $PM_{2.5}$ 峰值相比较 WESP 前 $PM_{2.5}$ 峰值存在重合粒径段, 峰值移至小粒径段。在 $PM_{2.5}$ 的爱根核模态和积聚模态, WESP 前后各级数浓度均较高且变化较为剧烈。

经 WESP, $PM_{2.5}$ 爱根核模态大多粒径段的颗粒物数浓度都在上升 (如该模态上升最少的粒径段是距离爱根核模态和积聚模态分界线最远处的 $0.009 \mu m$ 粒径段, 其上升率接近 0%, 上升最大的粒径段是接近爱根核模态和积聚模态分界线处的 $0.044 \mu m$ 粒径段, 其上升率为 239.11%), 而积聚模态大多粒径段的颗粒物数浓度都在下降 (如该模态下降最小的粒径段是紧邻爱根核模态和积聚模态分界线处的 $0.129 \mu m$ 粒径段, 其降低率为 59.03%, 下降最大的粒径段是紧邻积聚模态和粗粒子模态分界线处的 $1.764 \mu m$ 粒径段, 其降低率为 95.06%), 但无论是 WESP 前还是后, $PM_{2.5}$ 的主要数浓度均集中在小粒径段。WESP 前 $PM_{2.5}$ 数浓度为 $110\,753$ 个/ cm^3 , WESP 后 $PM_{2.5}$ 数浓度为 $99\,068$ 个/ cm^3 , 数浓度下降了 10.55%。综上, 烟气经过 WESP, $PM_{2.5}$ 数浓度会下降, 但其对 $PM_{2.5}$ 不同粒径段颗粒物数浓度的影响不尽相同,

如 $\text{PM}_{2.5}$ 小粒径段的数浓度大多会升高(经分析,主要原因有二:一是扩散、拦截和惯性碰撞等对 $\text{PM}_{2.5}$ 小粒径段颗粒物的作用极弱从而导致该段颗粒物数浓度无明显变化;二是 WESP 内水雾被放电电极强大电火花击碎后导致电场中存在大量极细雾滴,增加了该段颗粒物的数浓度), $\text{PM}_{2.5}$ 大粒径段的数浓度大多会降低(主要是因为扩散、拦截和惯性碰撞等对 $\text{PM}_{2.5}$ 大粒径段颗粒物作用较大所致),但 WESP 并未实质性影响到 $\text{PM}_{2.5}$ 主要数浓度的分布区域,主要数浓度仍然集中在小粒径段。这主要是由于 WESP 前 $\text{PM}_{2.5}$ 在大粒径段和小粒径段数浓度的数量级差异(如 WESP 前 $\text{PM}_{2.5}$ 大粒径段颗粒物的数浓度大都在 10^3 数量级,而小粒径段一般则在 10^4 数量级)决定的。虽然经 WESP 处理后, $\text{PM}_{2.5}$ 小粒径段颗粒物数浓度大多都会上升,大粒径段颗粒物数浓度大多会降低,但上升或降低量不足以从根本上改变 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度在大粒径段和小粒径段的原有分布特征。

3 结论

(1) 对国内某一典型电厂 WESP 前后颗粒物做了实测,结果显示 WESP 对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和粉尘的脱除效率依次为 67.85%、43.57%、40.88%。

(2) 经 WESP 处理后, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与数浓度峰值均发生了变化,其中:质量浓度峰值均出现在积聚模态,但由双峰(1.764、0.649 μm)变成单峰(1.764 μm),峰值移至大粒径段;数浓度峰值出现在爱根核模态和积聚模态,但由多峰(0.017、0.129、0.384、1.764 μm)变成双峰(0.017、0.073 μm),峰值移至小粒径段。

(3) 经 WESP, $\text{PM}_{2.5}$ 积聚模态大多粒径段的颗粒物质量浓度与数浓度均在下降(如在质量浓度和数浓度下降粒径段中,0.129 μm 处下降率均最少,均为 59.03%),爱根核模态大多粒径段的颗粒物质量浓度与数浓度均在上升(如在质量浓度和数浓度上升粒径段中,0.017 μm 处上升率均最少,均为 55.36%),但无论是 WESP 前或后, $\text{PM}_{2.5}$ 的主要质量浓度均集中在大粒径段,主要数浓度均集中在小粒径段。

(4) WESP 对经湿法脱硫后的烟气进行再处

理时, $\text{PM}_{2.5}$ 总数浓度会有一定程度降低,但降低幅度有限,其主要贡献在于促使 $\text{PM}_{2.5}$ 大粒径段颗粒物的数浓度得到有效降低,从而促使大粒径段颗粒物的质量浓度得到显著降低,进而降低 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量浓度。这说明 WESP 对 $\text{PM}_{2.5}$ 中大粒径段颗粒物的去除效果要优于小粒径段颗粒物。

参考文献

- [1] 徐昶,沈建东,何曦,等.杭州无车日大气细颗粒物化学组成形成机制及光学特性[J].中国环境科学,2013,33(3):392-401.
- [2] 张丹,周志恩,张灿,等.重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源成份谱的建立[J].三峡环境与生态,2011,33(5):14-18.
- [3] 于敦喜,徐明厚,易帆,等.燃煤过程中颗粒物的形成机理研究进展[J].煤炭转化,2004,27(4):7-12.
- [4] 张丹,赵丽,陈刚才,等.不同燃烧过程颗粒物粒径排放特征[J].中国环境科学,2015,35(11):3239-3246.
- [5] MCNALLIEN M J, YUREK G J, ELLIOT J F. The formation of inorganic particulates by homogeneous nucleation in gases produced by the combustion of coal[J]. Combustion and Flame, 1981, 42(2):45-60.
- [6] HILDEMAN L M, MARKOWSKI G R, CASS G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol[J]. Environmental Science and Technology, 1991, 25:744-759.
- [7] 黄德生,张世秋.京津冀地区控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效益评估[J].中国环境科学,2013,33(1):166-174.
- [8] 邵龙义,杨书中,时宗波,等.城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[M].北京:气象出版社,2008.
- [9] NEMMAR A, HOET P H M, VANQUICKENBORNE B, et al. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans[J]. Circulation, 2002, 105(4):411-414.
- [10] PENTTINEN P, TIMONEN K L, TIITTANEN P, et al. Number concentration and size of particles in urban air: Effects on spirometric lung function in adult asthmatic subjects[J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(4):319-323.
- [11] 廖大兵.湿式电除尘器的发展及其在火电厂的应用[D].广州:华南理工大学,2014.
- [12] 帅伟,李立,崔志敏,等.基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J].中国电力,2015,48(11):131-137.
- [13] 莫华,朱法华,王圣,等.湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排作用[J].中国电力,2013,46(11):62-65.
- [14] 丁承刚,时超林,郭士义,等.湿式静电除尘器对可吸入颗粒物不同粒径段脱除效率分析[J].发电设备,2015,29(6):454-457.
- [15] 张华东,周翔翔,龙辉.湿式电除尘器在燃煤电厂的应用条件分析[J].中国电力,2015,48(8):13-16.
- [16] 聂孝峰,张超,刘源.湿式电除尘(雾)器在燃煤电厂 300MW 机组上的应用[C].武汉:第 16 届中国电除尘学术会议论文集,2015.
- [17] 沈浩.湿式电除尘器用于控制燃煤烟气污染物的测评[J].电力与能源,2014,35(1):54-58.
- [18] 马子珍,李振,蒋靖坤,等.燃煤电厂产生和排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子特征[J].环境科学,2015,36(7):2361-2366.
- [19] 殷春肖.燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特性及污染控制研究[D].北京:华北电力大学,2014.
- [20] 张殿印,王纯.除尘器手册[M].北京:化学工业出版社,2005.