

燃煤机组颗粒物排放特性及其有机成分分析

林国辉¹, 杨富鑫^{2,3}, 李正鸿^{2,3}, 赵旭^{2,3}, 谭厚章^{2,3}

(1. 浙江巨化热电有限公司, 浙江 衢州 324004; 2. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 煤燃烧过程中污染物的排放, 特别是有机污染物的排放受到了广泛关注。基于颗粒物取样系统, 对某 280 t/h 燃煤机组中的脱硫塔、湿式静电除尘器、湿式相变凝聚器前后的可过滤颗粒物、可凝结颗粒物及其有机污染物进行了测试和研究, 分析了其对污染物的脱除特性。结果表明: 可凝结颗粒物占总颗粒物排放的 80.94%~90.16%; 脱硫塔、湿式静电除尘器及湿式相变凝聚器可有效降低总颗粒物的排放, 总脱除效率达 78.58%; 可凝结颗粒物中多环芳烃质量分数为 64.17~126.40 $\mu\text{g/g}$, 可过滤颗粒物中多环芳烃含量较少, 仅有 7.52~11.21 $\mu\text{g/g}$; 对可凝结颗粒物有机成分定性分析发现, 烷烃类物质是主要成分, 占总有机物的 42.11%~59.94%; 其次是酯类物质, 其他有机化合物包括芳香烃、酸类、醇类、酮类等。

关键词: 湿式相变凝聚器; 湿式静电除尘器; 可过滤颗粒物; 可凝结颗粒物; 有机污染物

中图分类号: TK284.5; TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2022)02-0145-07

Analysis of emission characteristics of particulate matter and organic pollutants from coal-fired power plant

LIN Guohui¹, YANG Fuxin^{2,3}, LI Zhenghong^{2,3}, ZHAO Xu^{2,3}, TAN Houzhang^{2,3}

(1. Zhejiang Juhua Thermal Power Co., Ltd., Quzhou 324004, China; 2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The emission of pollutants in coal combustion process, especially organic pollutants, has received increasing attention. Based on the particulate matter sampling system, the filterable particulate matter (FPM), condensable particulate matter (CPM) and organic pollutants were measured and studied at the inlet and outlet of desulfurization tower (WFGD), wet electrostatic precipitator (WESP) and wet phase transition agglomeration system (WPTA) in a 280 t/h coal-fired unit. The pollutant removal characteristics of the devices were analyzed. The results show that CPM accounts for 80.94%~90.16% of the total particulate matter concentration. WFGD, WESP and WPTA can effectively reduce the emission of total particulate matter, and the total removal efficiency reaches 78.58%. The concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in CPM are 64.17~126.40 $\mu\text{g/g}$, while the content of PAHs in FPM is only 7.52~11.21 $\mu\text{g/g}$. From the qualitative analysis of the organic compositions in CPM, it is found that alkanes are the main components, accounting for 42.11%~59.94% of the total organic matter, followed by esters, and other organic compounds, including aromatic hydrocarbons, acids, alcohols, ketones, et al.

Key words: wet phase transition agglomeration system; wet electrostatic precipitator; filterable particulate matter; condensable particulate matter; organic pollutant

0 引言

煤炭燃烧过程中产生大量污染物, 除 NO_x 、 SO_x 、

颗粒物等常规污染物, 还会产生有机污染物^[1]。随着生态文明建设的不断推进, 煤炭燃烧过程中污染物的排放受到了广泛关注, 其中有机污染物成为关

收稿日期: 2021-07-04; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21070401

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5187060942)

作者简介: 林国辉(1980—), 男, 山东鱼台人, 高级工程师。E-mail: linzi1200@163.com。通讯作者: 谭厚章(1965—), 男, 江西吉安人, 教授, 博士。E-mail: tanhz@xjtu.edu.cn

引用格式: 林国辉, 杨富鑫, 李正鸿, 等. 燃煤机组颗粒物排放特性及其有机成分分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 145-151.

LIN Guohui, YANG Fuxin, LI Zhenghong, et al. Analysis of emission characteristics of particulate matter and organic pollutants from coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 145-151.



移动阅读

注重点^[2-3]。有机污染物种类繁多、组成复杂,且毒性远高于无机污染物,不仅会造成光化学污染、臭氧层破坏、雾霾、水土资源污染等严重的生态环境破坏,还会严重危害人体健康^[4],其中多环芳烃(PAHs)类物质更是致癌、致畸和致突变^[5]。

煤的不完全燃烧是有机污染物的重要来源之一,相关研究表明燃煤发电过程中排放的挥发性有机化合物在人为排放的有机化合物中占相当大的比例^[6-7]。JIA等^[8]利用同步辐射真空紫外光电离质谱对煤粉热解过程中产生的有机污染物进行在线测量,发现烟煤热解挥发性有机物主要为芳烃和脂肪烃。倪明江等^[9]研究了固定床和流化床燃煤方式下PAHs的生成特性,发现固定床煤燃烧方式下PAHs的生成量比流化床高1~2个数量级。李晓东等^[10]在小型管式炉上进行了煤燃烧试验,发现PAHs在烟气中的排放量高于底渣,且煤种的挥发分越高,PAHs排放总量越大。WANG等^[11]对3台300~600 MW燃煤机组中气相PAHs浓度及其在气相和颗粒中的分布规律进行了研究,结果表明PAHs在气相和颗粒物中的分布规律受到锅炉容量和运行条件的影响,且湿法脱硫装置对PM₁₀和气相中PAHs有很好的脱除效果。虽然燃煤过程中产生的有机污染物浓度较低,但我国燃煤量巨大,有机污染物排放总量并不低,降低燃煤过程中有机污染物的排放问题不容忽视^[12]。

相对日趋成熟的传统污染物排放控制研究,燃煤有机污染物的生成机理和排放控制等研究较少,因此研究有机污染物在燃煤污染物种的分布特性和排放规律,对于探究有机污染物的生成机理以及控制有机污染物的排放十分重要。同时,燃煤机组运行过程中还存在着耗水严重的问题,对水资源及大气环境造成不利影响,利用相变冷凝法回收水,稳定

性良好且成本低,湿式相变凝聚器可以高效回收湿烟气中的水分并协同脱除颗粒物,使用寿命长且具有良好的经济效益。因此,笔者搭建了可过滤颗粒物(FPM)和可凝结颗粒物(CPM)采样装置,研究了某集团280 t/h燃煤锅炉烟气净化装置(脱硫塔、湿式静电除尘器、湿式相变凝聚器)对颗粒物和可凝结颗粒物的脱除特性,并且利用GC-MS对FPM和CPM中的有机污染物进行测试和分析,进一步探究燃煤电厂有机污染物迁移和排放特性,为燃煤电厂控制有机污染物排放提供参考。

1 研究对象

某280 t/h燃煤机组配备选择性催化还原脱硝装置(Selective Catalytic Reduction, SCR)、布袋除尘器(Bag Filter, BF)和石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置(Wet Flue Gas Desulfurization, WFGD)、湿式静电除尘器(Wet Electrostatic Precipitator, WESP)等常规烟气污染物控制装置。目前国内主流的超低排放改造方法为在WFGD后设置WESP,为实现对烟气细颗粒物的有效脱除,在该机组WESP后设置湿式相变凝聚装置(Wet Phase Transition Agglomeration system, WPTA),可实现烟气水分回收并利用烟气中水蒸气冷凝过程,促进细颗粒物长大、团聚,实现细颗粒物的进一步脱除。WPTA在实现颗粒物脱除的同时,可协同脱除可溶性盐、可凝结颗粒物、SO₃等多种污染物^[13-14]。机组运行时,烟气依次通过SCR、低温省煤器、布袋除尘器,经引风机送入WFGD、WESP、WPTA,净化后的烟气经烟囱排放。

现场测试设置有A、B、C三个测点,分别位于布袋除尘器出口和脱硫塔进口之间、脱硫塔与湿电除尘器中间烟道平台处、烟囱内部二层平台处。燃煤机组及现场测点具体布置如图1所示。

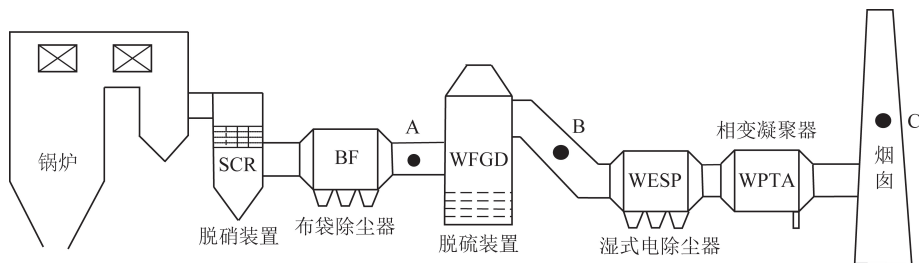


图1 燃煤机组分布及测点情况

Fig.1 Measurement points in coal-fired plant

2 采样和分析方法

2.1 采样方法

本次测试3个测点分别位于WFGD进口、出

口以及烟囱入口。依据DL/T 1520—2016《火电厂烟气中细颗粒物(PM_{2.5})测试技术规范》^[15]和EPA-Method 202《Determination of Condensable Particulate Emissions from Stationary Sources》^[16]搭

建了FPM、CPM采样装置,如图2、3所示,利用等速采样法对烟气内颗粒物进行测量,采样时间30 min。FPM采样装置依次连接等速采样枪头、PM₁₀旋风分离器、13级低压撞击器(DLPI)、压力温度传感器、流量计、真空泵等装置。DLPI对颗粒物分级利用惯性碰撞原理,装置内的颗粒物收集基底由涂抹有Apiezon-H硅脂的铝箔制成,用以捕集烟气中的颗粒物。为避免水分和酸性气体冷凝对测量系统和测试结果造成影响,采样过程中使用加热套对取样枪、旋风分离器、DLPI及连接管道进行保温加热,维持温度不低于130℃。

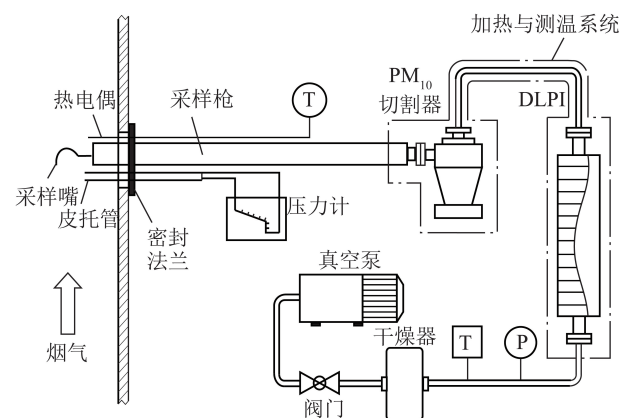


图2 FPM采样装置系统

Fig.2 FPM sampling system

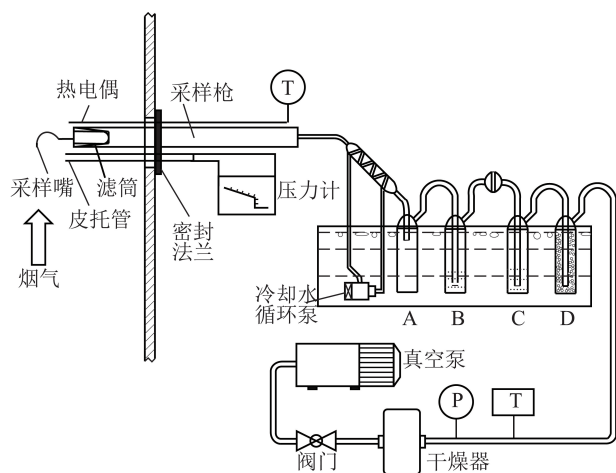


图3 CPM采样装置系统

Fig.3 CPM sampling system

CPM采样装置依次连接等速采样枪头、蛇形冷凝管、冲击瓶组、压力温度传感器、流量计、真空泵等装置。在采样枪头部分放置滤筒去除FPM,取样枪外缠绕加热带使温度不低于130℃,防止高温烟气在取样枪内冷凝。取样枪后连接蛇形冷凝管,冷凝管出口连接2个干式冲击瓶,用于收集冷凝液,冲击瓶后放置CPM滤膜,用以收集随烟气逃逸的CPM。采样过程中,冷凝管和冲击瓶置于冰水水浴,始终控制CPM滤膜出口烟气温度小于30℃,使CPM充分冷凝。采用等速采样法测量烟气内的可凝结颗粒物,采样时间60 min。主要测试仪器设备见表1。

表1 主要测试仪器

Table 1 Measurement devices

仪器设备	规格型号	数量	用途
德图350烟气分析仪	Testo350	1	测量O ₂ 、SO ₂ 、NO _x
电子天平	METTLER TOLEDO	1	测量冷凝水增重(千分之一)
精密天平	德国MSA 3.6P-0CE-DM	1	测量颗粒物质量(百万分之一)
低压冲击采样器DLPI	芬兰Dekati	1	颗粒物测量
真空泵	德国	2	抽气(0~100 L/min)
热电偶	WRNK-181	1	温度(0~1 000℃)

为减少试验的误差,提高结果的可靠性,每组测试进行3组以上重复试验,对结果进行验证。且每次测试前进行系统气密性试验,以防止装置漏气对试验造成误差。对于CPM采样系统,每次取样前后均用超纯水和正己烷清洗冲击瓶、冷凝管和连接部件等,以保证试验装置无上次测试残留,提高试验准确性。

2.2 分析方法

FPM采样主要设备为低压撞击器,采用涂有松脂Apiezon的铝箔作为颗粒物载体,采样后将铝箔放置105℃烘箱中干燥2 h,再用百万精度天平(德

国BP211D)称量,铝箔测试前后的质量差之和即为烟气中FPM质量。CPM采样使用干式冲击瓶法,采样结束后先用氮气进行吹扫,再用去离子水及正己烷清洗冷凝管以及连接管路,滤膜经称重后再分别用纯净水、正己烷进行萃取,冲洗及萃取所得溶液分为有机与无机部分,并定容。有机、无机溶液放置于玻璃器皿中干燥至恒重,用天平称量其质量变化,前后质量差即为有机、无机CPM质量。根据采样烟气流量,即可计算出烟气中FPM、CPM质量浓度,有关公式如下:

烟气中CPM质量浓度 $C_{\text{CPM,or/in}}$ 计算公式:

$$C_{\text{CPM,or/in}} = (m_2 - m_1) / V, \quad (1)$$

式中, m_1 、 m_2 分别为玻璃器皿净重及盛有样品干燥后质量, mg; V 为采样期间烟气流量, L。

$$C_{\text{CPM}} = C_{\text{CPM,or}} + C_{\text{CPM,in}}, \quad (2)$$

式中, C_{CPM} 为可凝结颗粒物质量浓度, mg/m^3 ; $C_{\text{CPM,or}}$ 为有机颗粒物质量浓度, mg/m^3 ; $C_{\text{CPM,in}}$ 为无机颗粒物质量浓度, mg/m^3 。

烟气中总颗粒物 (TPM) 质量浓度计算公式:

$$C_{\text{TPM}} = C_{\text{CPM}} + C_{\text{FPM}}. \quad (3)$$

烟气含湿量^[17]计算公式:

$$X = \frac{461.8(273 + t_r) G_w + p_v V_a}{461.8(273 + t_r) G_w + (B_a + P_r) V_a} \times 100\%, \quad (4)$$

式中, X 为烟气中水分体积分数; t_r 为流量计前气体温度, $^{\circ}\text{C}$; G_w 为冷凝水质量, g; p_v 为冷凝器出口饱和水蒸气压力, Pa; V_a 为烟气流量, L; B_a 为大气压力, Pa; P_r 为流量计前压力, Pa。

颗粒物排放按 6% O_2 为基准折算, 计算公式:

$$C = C' \times \frac{21 - 6}{21 - \varphi(\text{O}_2)}, \quad (5)$$

其中, C' 为颗粒物测试质量浓度, mg/m^3 ; $\varphi(\text{O}_2)$ 为被测烟气中 O_2 体积分数, 3 个测点的氧气体积分数分别为 5.11%、5.17% 和 6.70%, 3 个测点的温度分别为 124.7、51.5 和 51.1 (仅湿电运行)、48.9 (仅相变运行)、48.6 $^{\circ}\text{C}$ (湿电+相变运行)。

为了探究颗粒物中有机污染物的排放特性, 利用 GC-MS 分析 FPM 及 CPM 中有机部分。采样期间, 煤质分析见表 2。

表 2 采样期间燃用煤样的工业分析和元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}
7.51	30.47	17.21	44.81	52.32	3.20	4.86	0.91	1.20

表 3 各烟气净化装置前后颗粒物的质量浓度及脱除效率

Table 3 Mass concentration and removal efficiency of particle in flue gas purification device

装置	测点位置	FPM 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_{\text{CPM,in}}$ / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_{\text{CPM,or}}$ / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_{CPM} / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	FPM 脱除 效率/%	CPM 脱除 效率/%
WFGD	脱硫塔入口	6.60	7.97	21.80	29.77	53.69	56.37
	脱硫塔出口	3.06	3.62	9.37	12.99	53.69	56.37
WESP	烟囱入口	1.65	2.89	6.04	8.93	46.19	31.22
WPTA	烟囱入口	1.98	2.47	6.55	9.02	35.19	30.59
WESP+WPTA	烟囱入口	0.77	2.02	5.00	7.02	74.93	45.91

3 颗粒物排放特性

3.1 FPM 及 CPM 在烟气中的排放特性

测试期间, 锅炉负荷稳定在 280 t/h 左右。在仅相变、仅湿电及 2 者同时运行 3 种工况下, 对脱硫塔进出口和烟囱入口烟气中的 FPM 和 CPM 进行测量, 得到 WFGD 进出口及不同工况下烟囱入口烟气中 FPM、CPM 数据, 如图 4 所示。结果表明, 在 WFGD 进出口及烟囱入口烟气中的 CPM 质量分数分别占 TPM 总数的 80.94%~90.16%, 是总颗粒物排放的主要成分。表 3 给出了各烟气净化装置对 CPM、FPM 的脱除效率, 在经过烟气净化装置处理后, CPM 与 FPM 都有较大幅度降低。WFGD 对 CPM 和 FPM 都有较好的脱除效率, 经过 WFGD 后质量浓度分别下降至 56.37%、53.69%。而在单独运行的工况下, WESP 和 WPTA 对 FPM 的脱除效率相对偏低, 分别为 46.19% 和 35.19%, 原因在于经过脱硫塔后, 大粒径颗粒物被大幅度脱除, 烟气中的 FPM 质量浓度已经下降到较低水平, 难以进一步被有效脱除。在单独运行的工况下, WESP 和 WPTA 两者对于 CPM 的脱除效果分别为 31.22% 和 30.59%。WESP 和 WPTA 同时运行时, 2 者的叠加作用可提升对 FPM 和 CPM 的脱除效率。

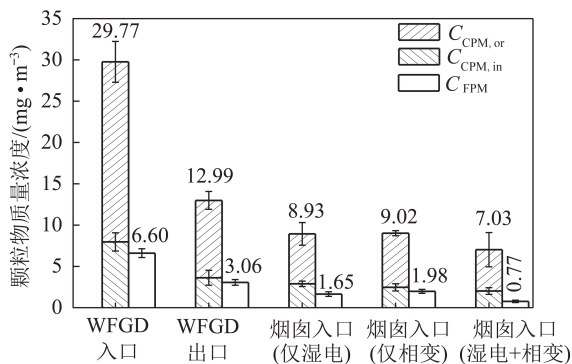


图 4 不同采样点处颗粒物质量浓度分布

Fig.4 Concentration of particle at different locations

经过 WFGD、WESP 及 WPTA 等烟气净化装置处理后,FPM 总量从 6.60 mg/m^3 降到了烟囱入口的 0.77 mg/m^3 ,脱除效率达到了 88.39%;CPM 总量从 29.77 mg/m^3 降到了烟囱入口的 7.02 mg/m^3 ,脱除效率为 76.40%;烟气中总颗粒物 TPM 脱除效率为 78.58%。可见,WESP 和 WPTA 同时运行时,颗粒物的总排放量为 7.79 mg/Nm^3 ;其中,FPM 已经接近“零排放”,效果良好。而 CPM 排放量是 FPM 的 9.13 倍,且 CPM 属于 $\text{PM}_{2.5}$,表面呈多孔形貌,较传统 FPM 更容易富集有毒物质,对环境及人体健康更容易造成危害,因此更值得关注。

3.2 CPM 中有机、无机组分的排放特性

CPM 由无机部分和有机部分组成,表 3 给出了 CPM 在 WFGD 进出口以及不同工况下烟囱入口的有机、无机成分质量浓度,有机成分占总 CPM 的 67.63%~73.24%,是 CPM 的主要成分。WFGD、WESP 和 WPTA 对无机 CPM 的脱除效率分别为 54.52%、20.19% 和 31.90%,对有机 CPM 的脱除效率分别为 57.04%、35.48% 和 30.09%。相关研究表明^[18],CPM 中无机成分的生成与烟气中 HCl 、 NH_3 、 HF 、 SO_3 等气体的存在密切相关,经 WFGD 浆液吸收后,这些气体产物的质量浓度大幅度降低,因此无机 CPM 脱除效率较高;而湿电装置中集尘板水膜和相变过程中产生的液滴对这些气体也有一定的脱除效果。对于 CPM 中有机成分,烟气经过 WFGD 后,烟温从 124.67°C 降到了 51.5°C ,烟温骤降使有机物产生冷凝,进而被脱硫浆液捕集,使 CPM 中有机成分减少。而 WPTA 前后,烟温降低且烟气水分冷凝,存在雨室洗涤现象,对 CPM 有机成分有一定脱除效果。WESP 对 CPM 有机成分脱除效率一般,可见电极放电作用对有机物影响有限,但作用原理尚待进一步研究。

4 颗粒物中有机污染物的排放特性

4.1 FPM 中有机污染物的排放特性

颗粒物是有机污染物排放到空气中的重要载体。为了研究燃煤电厂现场颗粒物中 PAHs 的排放特性,利用 GC-MS 对现场收集颗粒物中的 PAHs 含量进行测量,得到不同位置烟气中颗粒物的 PAHs 含量,如图 5、6 所示。

WFGD 进口处颗粒物中 PAHs 质量分数仅有 $8.94 \mu\text{g/g}$ 。燃烧产生的烟气经过 SCR、空气预热器等装置后,烟温大幅下降,此时部分有机污染物会随着冷却而脱除,部分吸附附着在颗粒物的有机物上,经过布袋除尘器后,会随着颗粒物的脱除而脱除。

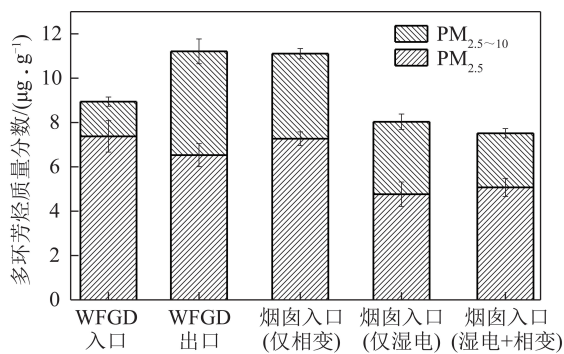


图5 FPM 中 PAHs 含量变化

Fig.5 Content changes of PAHs in FPM

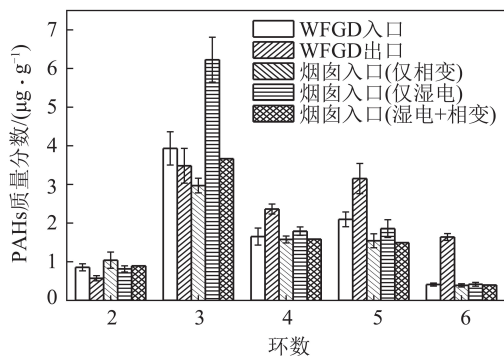


图6 FPM 中不同环数 PAHs 含量变化

Fig.6 Content changes of PAHs with different ring in FPM

小粒径 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃含量仍占总粒径中 PAHs 的大部分,占比在 58.25%~82.48%。

经过 WFGD,颗粒物中 PAHs 质量分数从 $8.94 \mu\text{g/g}$ 增至 $11.21 \mu\text{g/g}$ 。烟温降低了 73.71°C ,烟气中的 PAHs 会冷凝,一部分随喷淋液进入循环浆液中,同时部分循环浆液逃逸进入烟气,导致 WFGD 出口颗粒物中 PAHs 含量上升^[19]。WFGD 出口的烟气经过 WESP 和 WPTA 进一步净化,WESP 对颗粒中 PAHs 脱除效率为 28.37%,但 WPTA 对颗粒物中 PAHs 的含量脱除效果不显著。图 6 给出了不同采样位置总颗粒物中 16 种 PAHs 的含量,以三环多环芳烃为主,四环含量较少,和文献^[20]略有不同。

4.2 CPM 中有机污染物的排放特性

4.2.1 CPM 中 PAHs 含量变化

对现场收集的 CPM 有机部分进行浓缩、除杂、过滤后,将样品注入 GC-MS,对 16 种多环芳烃进行定量分析,得到不同烟气采样点 CPM 中 PAHs 的含量,如图 7 所示。相较于 FPM 中 PAHs 含量,CPM 中 PAHs 含量更高。CPM 中的有机成分主要来自烟气中有机物的冷凝,而 FPM 中 PAHs 主要由吸附、沉积而来。在燃煤电厂中,不同烟气净化装置对

CPM的有机脱除效果不同,对PAHs的脱除效率各异。经过WFGD后,CPM中PAHs质量分数由126.40 $\mu\text{g/g}$ 降低到了87.39 $\mu\text{g/g}$,脱除效率为30.86%。仅运行WPTA时,多环芳烃质量分数为77.23 $\mu\text{g/g}$ 。而仅运行WESP时,多环芳烃质量分数下降为70.70 $\mu\text{g/g}$,脱除效率为19.10%,WESP对多环芳烃的脱除效率略微显著,可能是因为电极高压放电时会产生臭氧,而臭氧能够氧化多环芳烃造成多环芳烃降解^[21]。图8为各烟气净化装置前后烟气中CPM不同环数的PAHs含量,CPM中PAHs含量以三环为主,占比在68.35%~76.12%,对于PAHs的脱除主要以三环类为主。

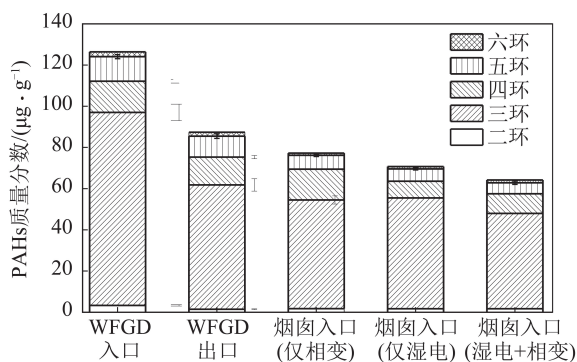


图7 CPM中多环芳烃含量变化

Fig.7 Content changes of PAHs in CPM

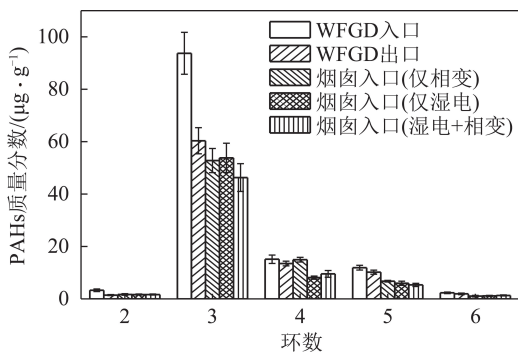


图8 CPM中不同环数PAHs含量变化

Fig.8 Content changes of PAHs with different ring in CPM

4.2.2 CPM中有机污染物定性分析结果

图9给出了CPM中各类化合物GC-MS测定结果的面积占比,主要分为烷烃类、酯类和其他有机物。其中,烷烃类是CPM中有机物的主要成分,占比42.11%~59.94%,其次是酯类物质,占比10.44%~17.85%,其他有机化合物,包括芳香烃、酸类、醇类、酮类等。WFGD入口CPM中烷烃类占有有机成分的59.94%,经过WFGD后占比减小了19.80%,可能是由于烟气温度降低,烟温对CPM的生成有明显影响^[19]。WPTA前后,CPM有机成分

中,烷烃占比变化不明显。而烟气经过WESP后,烷烃类物质比例降低,电晕放电可能是烷烃占比下降的原因。酯类物质是除烷烃外CPM中最多的有机物,但是变化规律不明显,可能是由于烷烃类物质变化而产生的比例变化。

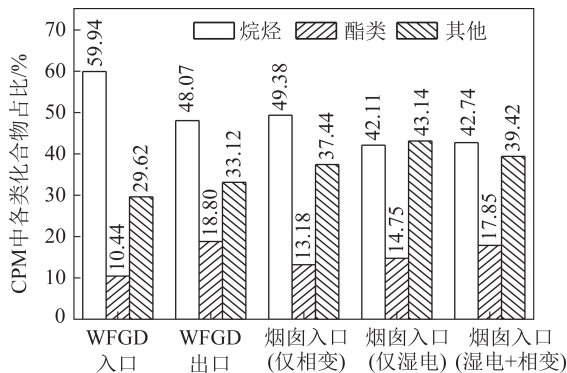


图9 CPM中各类化合物占比

Fig.9 Proportion of various compounds in CPM

5 结 论

1) CPM是颗粒物排放的主要成分,占TPM的80.94%~90.16%。

2) WFGD、WESP及WPTA能有效降低TPM排放,总脱除效率达78.58%,其中FPM脱除效率达88.39%,CPM脱除效率为76.40%。由于巨大温降以及浆液吸收的作用,WFGD对CPM和FPM都有很好的脱除作用,WESP和WPTA对FPM的脱除作用要好于对CPM的脱除。

3) CPM中的有机成分主要由烟气中有机物的冷凝而成,而FPM中PAHs主要是由吸附沉积而来,FPM中PAHs含量要小于CPM。WFGD烟温降低,PAHs冷凝可能导致CPM中PAHs含量降低,WESP中电晕放电产生的臭氧对PAHs的降解作用可能是导致FPM及CPM中PAHs降低的原因。

4) 对CPM有机成分定性分析发现,烷烃类物质是主要成分,占比为42.11%~59.94%;其次是酯类物质,占比为10.44%~17.85%,其他有机化合物,包括芳香烃、酸类、醇类、酮类等。

参考文献 (References):

- [1] YI H, HAO J, DUAN L, et al. Fine particle and trace element emissions from an anthracite coal-fired power plant equipped with a bag-house in China[J]. Fuel, 2008, 87(10): 2050-2057.
- [2] 徐静颖, 卓建坤, 姚强. 燃煤有机污染物生成排放特性与采样方法研究进展[J]. 化工学报, 2019, 70(8): 2823-2834.

XU Jingying, ZHUO Jiankun, YAO Qiang. Research progress on formation, emission characteristics and sampling methods of organ-

- ic compounds from coal combustion[J]. CIESC Journal, 2019, 70(8):2823-2834.
- [3] MAHLER B J, METRE P C V, CRANE J L, et al. Coal-tar-based pavement sealcoat and PAHs: Implications for the environment, human health, and stormwater management [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6):3039-3045.
- [4] KAMPA M, CASTANAS E. Human health effects of air pollution [J]. Environmental Pollution, 2008, 151(2):362-367.
- [5] PARK Min Ah, HWANG Kyung A, LEE Hye Rim, et al. Cell growth of BG-1 ovarian cancer cells is promoted by di-n-butyl phthalate and hexabromocyclododecane via upregulation of the cyclinD and cyclin-dependent kinase 4 genes [J]. Molecular Medicine Reports, 2012, 5(3):761.
- [6] YAN Y, PENG L, LI R, et al. Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: A study in Shuozhou, China [J]. Environmental Pollution, 2017, 223:295-304.
- [7] WANG M, SHAO M, LU S, et al. Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing [J]. Chinese Chemical Letters, 2013, 24(9):829-832.
- [8] JIA L, WENG J, WANG Y, et al. Online analysis of volatile products from bituminous coal pyrolysis with synchrotron vacuum ultraviolet photoionization mass spectrometry [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(2):694-701.
- [9] 倪明江, 尤孝方, 李晓东, 等. 不同煤燃烧方式多环芳烃生成特性的研究 [J]. 动力工程学报, 2004, 24(3):400-405.
- NI Mingjiang, YOU Xiaofang, LI Xiaodong, et al. Study of PAHs formation from different kinds of coal combustion process [J]. Power Engineering, 2004, 24(3):400-405.
- [10] 李晓东, 傅钢, 尤孝方, 等. 不同煤种燃烧生成多环芳烃的研究 [J]. 热能动力工程, 2003, 18(2):125-127.
- LI Xiaodong, FU Gang, YOU Xiaofang, et al. A study of the PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) emissions resulting from the combustion of different ranks of coal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(2):125-127.
- [11] WANG R, LIU G, ZHANG J. Variations of emission characterization of PAHs emitted from different utility boilers of coal-fired power plants and risk assessment related to atmospheric PAHs [J]. Science of the Total Environment, 2015, 538:180-190.
- [12] 李津津, 陈扉然, 马修卫, 等. 燃煤有机污染物排放及其控制技术展望 [J]. 化工进展, 2019, 38(12):5539-5547.
- LI Jinjin, CHEN Feiran, MA Xiuwei, et al. Emission of coal-fired VOCs and prospect of control technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12):5539-5547.
- [13] 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.
- TAN Houzhang, XIONG Yingying, WANG Yibin, et al. Investigation on fine particulate matters removal by using wet phase transition agglomeration technology cooperated with wet electro static precipitator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(12):2710-2714.
- [14] 熊英莹, 谭厚章. 湿式相变冷凝除尘技术对微细颗粒物的脱除研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2):20-24.
- XIONG Yingying, TAN Houzhang. Influence of wet phase transition condensate dust removal technology on fine particle removal [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):20-24.
- [15] 国家能源局, 电力行业环境保护标准化技术委员会. 火电厂烟气中细颗粒物 (PM_{2.5}) 测试技术规范 重量法: DL/T 1520—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [16] Method 202. Determination of condensable particulate emissions from stationary sources; code of federal regulations [S/OL]. (2010-12-20) [2021-06-30]. <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-12-21/pdf/2010-30847.pdf>.
- [17] 国家环境保护局科技标准司. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157—1996 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [18] 邓建国, 王刚, 张莹, 等. 典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 [J]. 环境科学, 2020, 41(4):1589-1593.
- DENG Jianguo, WANG Gang, ZHANG Ying, et al. Characteristics of condensable particulate matter in ultra-low emission coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2020, 41(4):1589-1593.
- [19] 李敬伟. 燃煤烟气中可凝结颗粒物及典型有机污染物的排放特性实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 李敬伟, 施浩勋, 李敏, 等. 燃煤电厂飞灰 PM_{2.5} 及 PM_{2.5-10} 中多环芳烃分布特性研究 [J]. 动力工程学报, 2015(4):306-311.
- LI Jingwei, SHI Haoxun, LI Min, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} from fly ash of coal-fired power plants [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015(4):306-311.
- [21] 冉宗信. 土壤多环芳烃及其化学氧化修复技术研究进展 [J]. 云南化工, 2019, 46(2):33-35.
- RAN Zongxin. Research progress on soil polycyclic aromatic hydrocarbons and their chemical oxidation repair techniques [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(2):33-35.