

洁净煤技术 Clean Coal Technology ISSN 1006-6772,CN 11-3676/TD

# 《洁净煤技术》网络首发论文

题目: 燃煤机组颗粒物排放特性及其有机成分分析

作者: 林国辉,杨富鑫,李正鸿,赵旭,谭厚章

网络首发日期: 2021-08-09

引用格式: 林国辉,杨富鑫,李正鸿,赵旭,谭厚章.燃煤机组颗粒物排放特性及其有

机成分分析. 洁净煤技术.

https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20210809.1644.004.html





网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间: 2021-08-09 17:21:09

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20210809.1644.004.html

# 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,李正鸿2,赵旭2,谭厚章2

(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)

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,分析了它们对污染物的脱除特性。研究结果表明: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,总的脱除效率达到 78.58%;可凝结颗粒物中多环芳烃含量为 64.17~126.40 μg/g,可过滤颗 粒物中多环芳烃含量较少, 仅有 7.52~11.21 μg/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

# Emission characteristics of particulate matter and organic pollutants from coal-fired power plant

LIN Guohui<sup>1</sup>, YANG Fuxin<sup>2</sup>, LI Zhenghong<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>2</sup>, TAN Houzhang<sup>2</sup>

(1.Zhejiang Juhua Thermal Power Co., Ltd., Zhejiang Quzhou 324004;

2.MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi Xi'an 710049)

Abstract: The emission of pollutants in coal combustion process, especially organic pollutants, has received increasing attention. Based on the sampling system, the concentrations of filterable particulate matter (FPM), condensable particulate matter (CPM) and organic pollutants were measured and studied at the inlet and outlet of wet flue gas desulfurization (WFGD), wet electrostatic precipitator (WESP) and wet phase transition agglomeration system (WPTA) in a 280 t/h coal-fired power plant. The pollutant removal characteristics of the devices were analyzed. The results showed that CPM accounted for 80.94%-90.16% of the total particulate matter concentration; WFGD, WESP and WPTA could effectively reduce the emission of total particulate matter, and the total removal efficiency was 78.58%; the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in CPM were in the range from 64.17 to 126.40 µg/g, while the content of PAHs in FPM was only 7.52-11.21 µg/g. From the qualitative analysis of the organic compositions in CPM, it was found that alkanes were 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

基金项目: 国家自然科学基金(5187060942)

作者简介: 林国辉(1980-),男,山东鱼台人,高级工程师,主要研究锅炉燃烧、烟气综合治理与利用。E-mail: linzi1200@163.com

通讯作者:谭厚章(1965-),男,江西吉安人,教授,主要研究清洁燃烧、污染物控制及节能技术等。E-mail: tanhz@xjtu.edu.cn

# 0 引 言

煤炭燃烧过程中产生大量的污染物,除了NOx、SOx、颗粒物等常规污染物,还会产生有机污染物<sup>[1]</sup>。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的关注,特别是有机污染物,日益成为关注的重点<sup>[2,3]</sup>。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,还会对人的身体健康造成不可修复的危害,进入人体后会伤害神经中枢,影响人体智力发展<sup>[3]</sup>,其中多环芳烃(PAHs)类物质更是具有强烈的致癌性、致畸性和致突变性<sup>[5]</sup>。

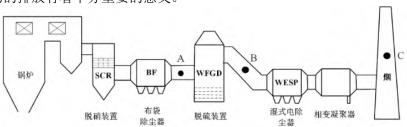
煤的不完全燃烧是有机污染物的重要来源之 一,相关研究表明燃煤发电过程中排放的挥发性有 机化合物在人为排放的有机化合物中占据相当大的 比例[6,7]。Jia 等[8]利用同步辐射真空紫外光电离质 谱对煤粉热解过程中产生的有机污染物进行在线测 量,发现烟煤热解挥发性有机物主要为芳烃和脂肪 烃。倪明江<sup>[9]</sup>等研究了固定床和流化床燃煤方式下 PAHs 的生成特性,发现固定床煤燃烧方式下 PAHs 的生成量比流化床高 1-2 个数量级。李晓东 [10]等在小型管式炉上进行了煤燃烧实验,发现 PAHs 在烟气中的排放量高于底渣,且煤种的挥发 分越高, PAHs 的排放总量约大。Wang 等[11]对 3 台 300~600 MW 燃煤机组中的气相 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 PM<sub>10</sub> 和气 相中的 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,但考虑到我国巨大的 燃煤量,有机污染物排放的总量并不低,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十分 不足,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有着十分重要的意义。 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,本文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了测试和分析,进一步探究燃煤电厂有机污染物进行到测试和分析,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, 而该机组为实现对烟气细颗粒物的有效脱除,在 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]。机 组运行时,烟气依次通过 SCR、低温省煤器、布 袋除尘器,后经引风机送入 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。



## 2 采样和分析方法

### 2.1 采样方法

本次测试设置三个测点分别位于 WFGD 进口、 出口,以及烟囱入口。依据《火电厂烟气中细颗粒 物(PM<sub>2.5</sub>)测试技术规范(DL/T 1520-2016)》<sup>[14]</sup> 和《Determination of Condensable Particulate Emissions from Stationary Sources (EPA-Method 202) » [15] 搭建了 FPM、CPM 采样装置,如图 2、图 3 所 示,利用等速采样法对烟气内的颗粒物进行测量, 采样时间为 30min。FPM 采样装置依次连接等速 采样枪头、PM<sub>10</sub> 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 对颗粒物分级利用的是惯性碰撞的原 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 ℃。

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出现冷凝。取样枪后连接蛇形冷凝管,冷凝管出口连接两个干式冲击瓶,用于收集冷凝液,冲击瓶后放置 CPM 滤膜,用以进一步收集随烟气逃逸的 CPM。采样过程中,冷凝管和冲击瓶放置于冰水浴,始终控制 CPM 滤膜出口烟气温度小于 30 ℃,使得 CPM 充分冷凝。测试使用等速采样法对烟气内的可凝结颗粒物进行测量,采样时间为 60 min。本次实验主要测试仪器设备

### 见表1所示。

为减少实验的误差,提高结果的可靠性,每一组测试进行三组以上的重复实验,对结果进行验证。且每次测试前进行系统气密性试验,以防止装置漏气对实验照成的误差。对于 CPM 采样系统,在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,用以保证实验装置无上次测试残留,提高实验的准确性。

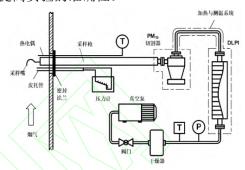


图 2 FPM 采样装置系统图

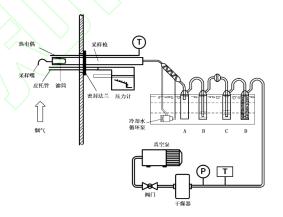


图 3 CPM 采样装置系统图

表 1	主要测试仪	哭

WI TAMMEN								
仪器设备名称 规格型号		数量	用途					
德图 350 烟气分析仪	Testo350	1台	O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx					
电子天平	METTLER TOLEDO	1台	测量冷凝水增重 (千分之一)					
精密天平	德国 MSA 3.6P-0CE-DM	1台	测量颗粒物质量(百万分之一)					
低压冲击采样器 DLPI	芬兰 Dekati	1台	颗粒物测量					
真空泵	德国	2 台	抽气(0~100 L/min)					
热电偶	WRNK-181	1 根	温度(0~1000 ℃)					

## 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 的铝膜做为颗粒物载体,采样后将铝 膜放置 105℃烘箱中干燥两小时,再用百万精度天平(德国 BP211D)进行称量,铝膜测试前后的质量差之和即为烟气中 FPM 含量。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,用天平称量其重量变化,前后质量差即为有机、无机CPM 含量。然后根据采样烟气流量,即可计算出烟气中FPM、CPM浓度,有关公式如下:

烟气中 CPM 浓度计算公式:

$$C_{\text{CPM}}$$
  $= \frac{m_2 - m_1}{V}$  (1)

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

$$C_{\text{CPM}} = C_{\text{CPM}} + C_{\text{CPM}}$$
 (2)

式中: *C* 为可凝结颗粒物浓度, mg Nm<sup>3</sup>。 烟气中总颗粒物(TPM)浓度计算公式:

$$C_{\text{TPM}} = C_{\text{CPM}} + C_{\text{EPM}} \tag{3}$$

烟气含湿量计算公式[16]:

$$X = \frac{461.8(273 + t_{\rm r})G_{\rm w} + p_{\rm v}V_{\rm a}}{461.8(273 + t_{\rm r})G_{\rm w} + (B_{\rm a} + P_{\rm r})V_{\rm a}} \times 100$$
 (4)

式中: X 为烟气中水分含量体积百分数;  $t_r$  为流量计前气体温度, $\mathbb{C}$ ;  $G_w$  为冷凝水质量, $g_i$   $p_v$  为冷凝器出口饱和水蒸气压力, $Pa_i$ ;  $V_a$  为烟气流量, $L_i$ ; Ba 为大气压力, $Pa_i$ ;  $p_r$  为流量计前压力, $Pa_a$ 。

颗粒物排放按 6% O<sub>2</sub> 为基准折算, 计算公式:

$$C = C \times \frac{21 - 6}{21 - \varphi(O_2)}$$
 (5)

式中: C为颗粒物测试浓度,mg Nm³;  $\varphi$ (O<sub>2</sub>)为被测烟气中 O<sub>2</sub> 浓度。三个测点的氧量分别为5.11%、5.17%和 6.70%。三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℃(湿电+相变运行)。

为了探究颗粒物中有机污染物的排放特性,本 文利用 GC-MS 分析 FPM 及 CPM 中有机部分。

采样期间,煤质如表2所示。

表 2 采样期间燃用煤样的工业分析和元素分析

工业分析/%				元素分析/%				
$M_{ar}$	$A_{ar}$	$V_{ar}$	$FC_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$

## 3 颗粒物的排放特性

## 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 280t/h 左右。在 仅相变、仅湿电及两者同时运行三种工况下,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 含量分别占 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 都有较大幅度的降低。 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了 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, 两者的叠加作用可提升对 FPM 和 CPM 的脱除效

经过 WFGD、WESP 及 WPTA 等烟气净化装置处理后,FPM 总量从 6.60 mg/Nm³ 降到了烟囱入口出的 0.77 mg/Nm³,脱除效率达到了 88.39%;CPM 总量从 29.77 mg/Nm³ 降到了烟囱入口出的 7.03 mg/Nm³,脱除效率为 76.40%;TPM 的脱除效率为 78.58%。可见,WESP 和 WPTA 同时运行时,颗粒物的总排放量为 7.79mg/Nm³;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 PM<sub>2.5</sub>,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。

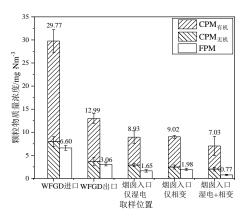


表 3 各烟气净化装置前后颗粒物的质量浓度及脱除效率

装置	测点位置	FPM/mg • Nm <sup>-3</sup>	CPM <sub>无机</sub> /mg • Nm <sup>-3</sup>	CPM 有机 /mg·Nm <sup>-3</sup>	CPM 息量 /mg • Nm <sup>-3</sup>	FPM 脱除 效率%	CPM 脱除 效率%
WEGD	脱硫塔入口	6.60	7.97	21.80	29.77	52.50	5.05
WFGD	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	7.03	74.93	45.91

#### 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<sup>[17]</sup>, CPM 中无机成分的生成与烟气中 HCI、NH3、HF、SO3 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℃降到了 51.5℃,烟气温度的骤降会使有机物产生冷凝,进 而被脱硫浆液捕集,从而使得 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 有机成分有一定的脱 除效率。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多环芳烃的排放特性,利用 GC-MS 对现场收集颗粒物中的多环芳烃含量进行测量,得到不同位置烟气中颗粒物的多环芳烃含量,如图 5 和图 6 所示。

WFGD 进口处颗粒物中多环芳烃含量仅有8.94 µg/g。燃烧产生的烟气经过 SCR、空气预热器等装置后,烟气温度有大幅度下降,在这个过程中,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上的有机物,经过布袋除尘器后,会随着颗粒物的脱除而脱除。小粒径 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃含量依旧占据总粒径中多环芳烃的大部分,占比在58.25%~82.48%。

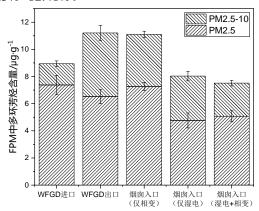


图 5 FPM 中多环芳烃含量变化

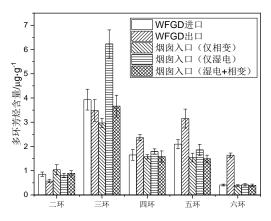


图 6 FPM 中不同环数多环芳烃含量变化

经过 WFGD,颗粒物中总多环芳烃含量从8.94 μg/g 增长到了11.21 μg/g。在这过程中,烟气温度降低了73.71℃,烟气中的多环芳烃会冷凝,一部分会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 出口颗粒物中多环芳烃含量上升<sup>[18]</sup>。WFGD 出口的烟气经过WESP 和 WPTA 进一步得到净化,WESP 对颗粒中多环芳烃脱除效率为28.37%,但 WPTA 对颗粒物中多环芳烃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十六种多环芳烃的含量,以三环多环芳烃为主,四环含量较少,和文献[19]略有不同。

# 4.2 CPM 中有机污染物的排放特性

#### 4.2.1 CPM 中多环芳烃含量变化

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,对十六种多环芳烃 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 分主要来源自烟气中有机物的冷凝, 而 FPM 中 PAHs 主要是由吸附、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 的脱除效率亦各异。经过 WFGD 后, CPM 中 PAHs 含量由 126.40 ug/g 降低到了 87.39 μg/g, 脱除效率为 30.86%。仅运行 WPTA 时,多 环芳烃含量为 77.23 µg/g。而仅运行 WESP 时,多 环芳烃含量下降为 70.70 μg/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[20]。图 8 是各烟气净化 装置前后烟气中 CPM 不同环数的多环芳烃含量, CPM 中多环芳烃含量以三环为主,占比在 68.35%~76.12%之间,对于多环芳烃的脱除主要以

#### 三环类为主。

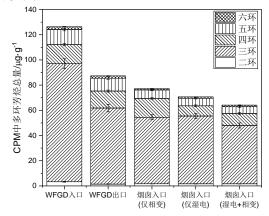


图 7 CPM 中多环芳烃含量变化

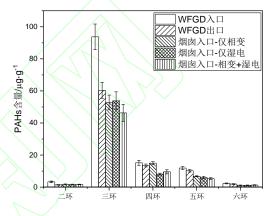


图 8 CPM 中不同环数多环芳烃含量变化

#### 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 测量结果的面积占比,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 中烷烃类占有机成分的 59.94%,经过 WFGD 后占比减小了19.80%,可能是烟气温度降低的原因,烟温对CPM 的生成有明显影响<sup>[18]</sup>。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,电晕放电影响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,但是它的变化规律不明显,可能是由于烷烃类物质变化而产生的比例变化。

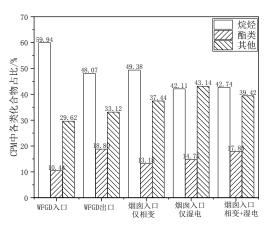


图 9 CPM 中各类化合物占比

# 5 结 论

本文对某 280 t/h 燃煤机组 WFGD、WESP 和WPTA 前后烟气中 FPM、CPM 及其的有机污染物进行了分析。研究了 WFGD、WESP 和 WPTA 对颗粒物的脱除特性,主要结论如下:

- (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 的排放,总脱除效率达到 78.58%,其中 FPM 脱除效率达到了 88.39%, CPM 脱除效率为 76.40%。WFGD 由于前后巨大温降以及浆液吸收的作用,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 中的有机成分主要来源自烟气中有机物的冷凝而成,而 FPM 中多环芳烃含量主要是由吸附沉积而来,FPM 中多环芳烃含量要小于CPM。WFGD 烟温降低,多环芳烃冷凝可能导致CPM 中 PAHs 含量降低,WESP 中电晕放电产生的臭氧对多环芳烃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 organic compounds from coal combustion[J]. CIESC Jorunal, 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& (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, Hwang, Lee, et al. Cell growth of BG-1 ovarian cancer cells is promoted by di-n-butyl phthalate and hexabromocyclododecane via upregulation of the cyclin d 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(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(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研究展望[J].化工进展,2019,38(12):5539-5547.

LI Jinjin, CHEN Feiran, MA Xiuwei, et al. Emission of coalfired VOCs and prospect of control technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress Chem Ind Eng Prog, 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, ert 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] 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(PM2.5)测试技术规范重量法:DL/T 1520-2016[S].北京:中国电力出版社,2016.

[15] Method 202. Determination of Condensable Particulate [19] 李敬伟,施浩勋,李敏,等.燃煤电厂飞灰 PM2.5 及 PM2.5-10 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 PM2.5 and PM2.5-10 from Fly Ash of Coal-fired Power Plants[J]. Journal Of Chinese Society Of Power Engineering, 2015, (4): 306-311.

Emissions from Stationary Sources; Code of Federal Regulations 2008, 40(51), Appendix M; available at www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html (accessed 2009).

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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] 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.