

循环流化床锅炉烟气中 VOCs 分布规律及排放特性

王建国¹, 朱 蒙¹, 卢少华¹, 张晓光²

(1. 河北建投宣化热电有限责任公司, 河北 张家口 075100; 2. 河北冀研能源科学技术研究院有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为了解循环流化床(CFB)锅炉烟气中挥发性有机物(VOCs)的分布和排放情况, 明晰烟气处理装置对 VOCs 的处理效果, 在某台 200 MW CFB 锅炉机组上, 开展了烟气中 CH₄、非甲烷总烃(NMHCs)和多种典型 VOCs 组分的全流程浓度监测, 并分析了燃煤、飞灰和炉渣 3 种固体样品中 CH₄、NMHCs 含量。结果表明, CFB 锅炉机组在 100% 和 50% 负荷下 SCR 入口处烟气中 CH₄ 和 NMHCs 质量浓度分别为 0.65 和 6.63 mg/m³, 经过一系列烟气处理装置后 CH₄ 质量浓度为 0.14~0.18 mg/m³, NMHCs 质量浓度为 1.05~1.43 mg/m³。煤样中 VOCs 质量分数为 49 979.65 mg/kg, 而飞灰和炉渣内只残余少量 VOCs。CFB 锅炉机组排放烟气中主要以苯、甲苯、乙苯、对/间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯等碳原子数 ≥ 6 的苯系物和以正己烷为代表的烃类化合物为主。SCR 脱硝系统和袋式除尘器对烟气中 VOCs 处理效率较好, 经过全部污染物治理设备后, 通过烟囱排放的总 VOCs 质量浓度为 1.19~1.61 mg/m³, 总 VOCs 协同脱除效率为 77.88%~78.64%, 现有烟气处理设施整体脱除效果可以满足相应排放要求。

关键词: 循环流化床; 挥发性有机物(VOCs); 非甲烷总烃(NMHCs); 排放特性; SCR 脱硝系统; 袋式除尘器; 协同脱除

中图分类号: TQ53; TK114 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2022)02-0093-06

Distribution and emission characteristics of VOCs in flue gas of CFB boiler

WANG Jianguo¹, ZHU Meng¹, LU Shaohua¹, ZHANG Xiaoguang²

(1. Hebei Jiantou Xuanhua Thermal Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075100, China; 2. Hebei Ji-Yan Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to understand the distribution and emission of volatile organic compounds (VOCs) in flue gas of circulating fluidized bed (CFB) boiler, as well as the treatment effect of flue gas treatment device, the whole process concentration monitoring of CH₄, non-methane total hydrocarbon (NMHCs) and a variety of typical VOCs components in flue gas of a 200 MW CFB boiler unit was carried out. The contents of CH₄ and NMHCs in three solid samples of coal burning, fly ash and slag were analyzed. The results show that the mass concentrations of CH₄ and NMHCs in the flue gas at the entrance of SCR are 0.65 and 6.63 mg/m³ respectively under 100% and 50% load of CFB boiler units, and the mass concentrations of CH₄ emission and NMHCs after a series of flue gas treatment devices are 0.14~0.18 and 1.05~1.43 mg/m³, respectively. The total VOCs content in coal sample is 49 979.65 mg/kg, while only a small amount of VOCs remains in fly ash and slag. The flue gas of CFB boiler unit is mainly benzene series with carbon atomic number ≥ 6, such as benzene, toluene, ethylbenzene, p/m-xylene, styrene, o-xylene and hydrocarbons represented by n-hexane. SCR denitration system and bag filter have better treatment efficiency for VOCs in flue gas. After all pollutant treatment equipment, the total VOCs mass concentration discharged through the chimney is 1.19~1.61 mg/m³, and the total VOCs synergistic removal efficiency is 77.88%~78.64%. The overall removal effect of existing flue gas treatment facilities can meet the corresponding discharge requirements.

Key words: CFB; volatile organic compounds(VOCs); non-methane total hydrocarbon(NMHCs); emission characteristics; SCR denitrification system; fabric filter; collaborative removal

收稿日期: 2021-10-11; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.VOCs21101101

作者简介: 王建国(1974—), 男, 河北邢台人, 工程师, 硕士。E-mail: wangjiang1974@163.com。通讯作者: 张晓光(1991—), 男, 河北保定人, 工程师, 硕士。E-mail: zhangxg991@sina.com

引用格式: 王建国, 朱蒙, 卢少华, 等. 循环流化床锅炉烟气中 VOCs 分布规律及排放特性[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 93-98.

WANG Jianguo, ZHU Meng, LU Shaohua, et al. Distribution and emission characteristics of VOCs in flue gas of CFB boiler [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 93-98.



移动阅读

0 引言

我国是煤炭消费大国,据统计,我国2020年能源消费总量为49.8亿t标准煤,其中煤炭消费量占能源消费总量的56.8%^[1-2]。而发电是煤炭消耗的重要行业之一,2020年燃煤发电占我国发电量63.2%^[3-4]。随着我国环保治理力度的不断加大,燃煤电厂进行了一系列改造,现已在SO₂、NO_x及可吸入颗粒物等方面实现超低排放^[5-7]。然而,煤燃烧过程中还会释放一定的挥发性有机物(VOCs),VOCs是臭氧和二次有机气溶胶形成的关键前驱体,对环境和人类健康具有较大危害^[8-11]。

煤粉炉(PC)和循环流化床锅炉(CFB)是大规模火力发电的2种技术,CFB具有燃料适应性广、燃烧温度低、SO₂和NO_x质量浓度低等优点,尤其对煤矸石等劣质煤有极强的适应性^[12]。目前我国拥有超过3000台CFB锅炉,总装机容量已近1亿kW,是世界上CFB锅炉数量最多、容量最大的国家^[13]。近年来,随着300MW级和600MW级大型CFB锅炉机组的成功投运,CFB技术发展势头迅猛^[14]。

目前针对火力发电厂有机污染物排放研究主要集中在燃煤锅炉方面。史晓宏等^[15]对300MW燃煤机组开展了烟气中CH₄、非甲烷总烃(NMHCs)和多种典型VOCs的全流程浓度监测。徐静颖等^[16]论述了燃煤有机污染物生成排放特性与采样方法。孙树睿等^[17]分析了我国7家典型燃煤电厂和2家

焦化厂燃煤锅炉在脱硫工艺设施前后排放烟气中的VOCs排放特性。李津津等^[18]分析了燃煤电厂烟气中有机物的迁移转化规律以及烟气处理设施对有机物的协同去除作用。CFB锅炉作为大规模火力发电的一种重要形式,在燃用煤质、锅炉燃烧温度、尾气处理设施等方面均与燃煤锅炉有重大差异,相应的有机污染物排放情况也与燃煤锅炉存在差异。然而针对CFB锅炉机组的有机污染物排放情况还鲜见相关报道。

因此,笔者以某台200MW CFB锅炉机组为研究对象,以CH₄、NMHCs和多种典型VOCs为指标,分析燃煤电厂排放烟气中有机物的分布,并对电厂中燃煤、飞灰和炉渣3种固体样品中CH₄、NMHCs含量进行检测,以期更好地掌握CFB锅炉机组VOCs的排放特征。

1 试验方法

1.1 电厂概况

测试CFB锅炉机组为200MW,配备德国产的DKEH-IND31型双抽汽机,50WX23Z-109型空冷发电机;东方锅炉生产的DG410/9.81-9型循环流化床锅炉。炉内进行一级脱硫,每台炉后配尿素法选择性非催化还原(SNCR)+选择性催化还原(SCR)脱硝,石灰石-石膏湿法脱硫系统(WFGD),袋式除尘器(FF)以及湿式电除尘器(WESP)。机组燃用煤工业分析结果见表1。

表1 入炉煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate of incoming coal

工业分析/%				元素分析/%						$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
M_t	A_{ad}	V_{daf}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{\text{t,ad}}$		
9.10	32.03	26.26	41.71	50.42	2.40	0.77	4.38	1.50	18.50	

1.2 样品采集

烟气取样位置分别选取在CFB锅炉机组SCR入口1、SCR出口2、FF入口3、WFGD入口4、WFGD出口5和WESP出口6等6个位置。由于SNCR位置处温度在800℃以上,温度过高,采样设备易损,因此未对SNCR系统烟气进行采集。燃煤样品从输煤输送带处采集,炉渣从锅炉排渣口采集,飞灰采集自FF袋式除尘器排灰口(每个灰斗采取相同质量样品并混合均匀)。CFB锅炉机组烟气流程和取样位置如图1所示。为保证样品采集的实时性,在烟气测试期间采集煤样、炉渣和飞灰样品。

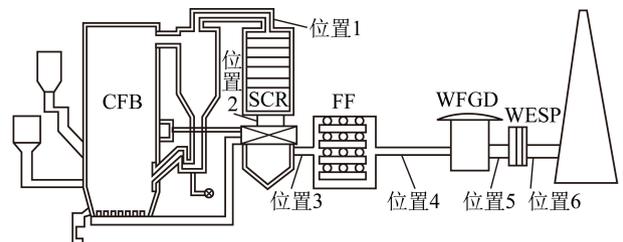


图1 CFB锅炉机组和取样位置

Fig.1 Sampling location of CFB boiler unit

1.3 样品分析

1.3.1 烟气中VOCs分析

使用便携式挥发性有机化合物分析仪(意大利

PCFElectronica 生产,型号 GC-FID)分析烟气中总烃、 CH_4 含量,同时通过差值法得到 NMHCs 浓度。每次试验测定前采用含 CH_4 和丙烷 (C_3H_8) 的混合标准气体对仪器进行校准^[15]。测定 SCR 系统烟气时采用玻璃内衬探针防止高温烟气损坏仪器。测试中采用氧量测试仪对烟气中含氧量同步测试。为便于计算,烟气中 VOCs 浓度均按 6% O_2 折算。典型 VOCs 检测参照 HJ 734—2014《固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法》,采用内装 Carboxen 1000 材料吸附管直接采集烟气中 VOCs,为防止水蒸气干扰,采样过程中全程对采样枪和管线进行恒温 120 $^\circ\text{C}$ 伴热^[19]。样品采集后立即用密封帽将采样管两端密封,4 $^\circ\text{C}$ 避光保存,并于 7 d 内分析。利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) (美国安捷伦公司 7890B-5977B MSD) 对吸附管中 VOCs 组分进行分析,首先通过热脱附设备在 300 $^\circ\text{C}$ 热解析吸附管 3 min,再由高纯氮气携带出 VOCs 进入 GC-MS 系统进行分析。

为保证试验可靠性,试验过程中每个采样点均进行 3 次采样,计算各 VOCs 浓度,然后求平均值。

1.3.2 固体样品中 VOCs 分析

取固体样品(煤样、飞灰、炉渣)采用热重分析仪进行热解,以 20 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速度从 30 $^\circ\text{C}$ 加热至 900 $^\circ\text{C}$,保持 10 min。以高纯氮气为载气,出口采用 2LTedlar 袋对挥发气体进行收集^[20]。再通过便携式挥发性有机化合物分析仪对气袋中 CH_4 和 NMHCs 含量进行分析。分析热解逸出气中 VOCs 浓度,然后计算处相应固体样品中 VOCs 浓度。

为保证试验可靠性,试验过程中每份固样品分成相同的 3 份,并对其进行热解分析,计算各 VOCs 浓度,然后求平均值。

2 结果与讨论

2.1 烟气中 CH_4 和 NMHCs 分布

CFB 锅炉机组 100% 和 50% 负荷下各采样点烟气中 CH_4 和 NMHCs 质量浓度分布如图 2 所示。由图 2 可知,100% 负荷时 SCR 入口处烟气中 CH_4 和 NMHCs 质量浓度分别为 0.65 和 6.63 mg/m^3 ,与史晓宏等^[15]和 LIU 等^[21]研究中燃煤锅炉有机物排放值相比较低。这主要是由于 CFB 锅炉机组本身燃烧温度在 850~900 $^\circ\text{C}$,相比燃煤机组低,且采用炉内喷钙方式进行脱硫,燃烧室中石灰石和已发生脱硫反应生成的 CaSO_4 大粒子对有机物分子有一定吸附作用,造成燃尽物中挥发的有机物减少。此外,CFB 锅炉机组配备的 SNCR 脱硝系统,在炉后进行

尿素喷射,也会造成部分有机物分子与烟气中 NH_3 反应导致部分 VOCs 分解。

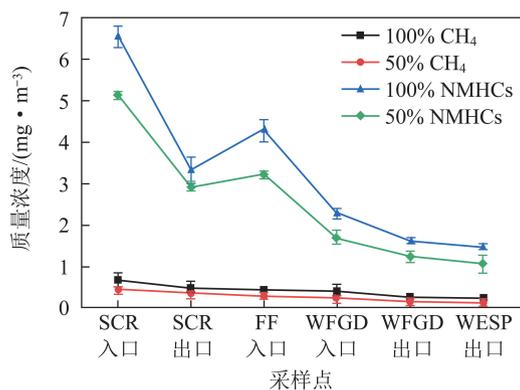


图 2 CFB 锅炉机组烟气中 CH_4 和 NMHCs 分布

Fig.2 Distribution of CH_4 and NMHCs in flue gas of CFB boiler

不同负荷下,烟气中 NMHCs 质量浓度远高于 CH_4 质量浓度,这是由于 CH_4 是可燃性气体,随着燃煤挥发出来后,大部分在锅炉中燃烧分解成 CO_2 和 H_2O ,只有极少部分随烟气外溢。此外,100% 负荷下烟气中 VOCs 总量要高于 50% 负荷时。这主要是由于负荷降低时,燃用煤随之减少,导致燃料分解的有机物含量降低,同时低负荷时,烟气在锅炉中滞留时间会相对延长,更多有机物参与高温燃烧反应分解,造成有机物排放量降低。经过处理后不同负荷下 CH_4 最终质量浓度为 0.14~0.18 mg/m^3 ,NMHCs 质量浓度为 1.05~1.43 mg/m^3 。目前,GB 13223—2011《火电厂大气污染排放准》中并未明确规定 VOCs 的排放限值,而现行的一些国家、行业和地方标准中上海市对 VOCs 排放限值要求最严格,DB 31/872—2015《印刷业大气污染物排放标准》、DB 31/881—2015《涂料、油墨及其类似产品制造工业大气污染物排放标准》以及 DB 31/859—2014《汽车制造业(涂装)大气污染物排放标准》等不同行业规定 VOCs 排放限值在 15~100 mg/m^3 。因此,CFB 锅炉机组排放的 VOCs 质量浓度远低于标准要求。

2.2 不同烟气处理设施的烟气总 VOCs 处理效率

CFB 锅炉机组 100% 和 50% 负荷下不同烟气处理设施的烟气总 VOCs 处理效率如图 3 所示。由图 3 可知,不同烟气处理设施对烟气中总 VOCs 的处理效率不同,其中 SCR 脱硝系统和 FF 袋式除尘器处理效率较高。SCR 脱硝系统对烟气中总 VOCs 的处理效率可达 41.11%~48.63%;FF 袋式除尘器对烟气中总 VOCs 的处理效率可达 45.56%~46.29%;WFGD 脱硫系统对烟气中总 VOCs 的处理效率为 26.06%~34.81%,WESP 湿式除尘器对烟气中总 VOCs 的处理效率仅为 8.52%~14.39%。这主要是

由于SCR脱硝装置中含有 V_2O_5 、 WO_3 、 MoO_3 等活性催化成分,导致VOCs成分被催化氧化分解成 CO_2 和 H_2O ^[22]。而FF袋式除尘器的高效处理效率是由于烟气经过除尘器时温度大幅降低,导致大量有机物分子吸附至粉尘等大颗粒物表面,经过除尘器滤袋时随粉尘脱附。而后,随着烟气流经FGD装置,烟气温度降至50℃左右,部分VOCs被脱硫浆液冲刷溶解进入吸收塔内,导致烟气中VOCs进一步下降。经过WESP湿式除尘器时,烟气中VOCs含量很低,且烟气中VOCs和部分被飞灰吸附的VOCs受极板静电排斥作用再次释放到烟气中,致使WESP处理效果不明显。

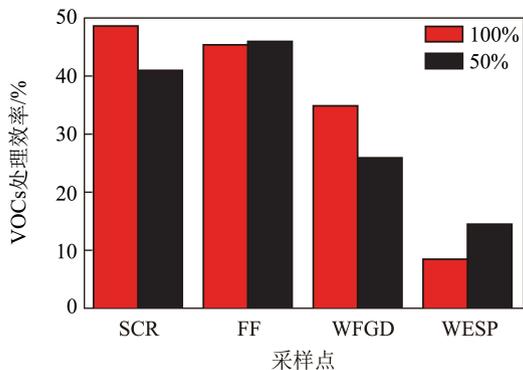


图3 不同烟气处理设施对烟气中总VOCs处理效率

Fig.3 Treatment efficiency of total VOCs in flue gas by different flue gas treatment facilities

总之,烟气经过全部污染物处理设施后,通过烟囱排放的总VOCs质量浓度为 $1.19\sim 1.61\text{ mg/m}^3$,协同脱除效率为 $77.88\%\sim 78.64\%$,可知现有烟气处理设施协同脱除效率,可以满足相应排放要求。

2.3 固体样品中 CH_4 和NMHCs质量分数

对CFB锅炉机组入炉煤、炉渣和飞灰3种样品中 CH_4 和NMHCs质量分数进行分析,结果见表2。可

知煤样中 CH_4 质量分数高于NMHCs,而总VOCs质量分数为 $49\ 979.65\text{ mg/kg}$,煤中总VOCs质量分数与其挥发分相关,挥发分越高,总VOCs质量分数越高^[23]。而炉渣中VOCs质量分数与燃烧工况和燃烧温度相关,CFB锅炉燃烧温度相对燃煤锅炉较低,会产生较多的不完全燃烧,从而增加灰渣中NMHCs质量分数。因此CFB锅炉燃烧后炉渣中总VOCs质量分数相对值高于燃煤锅炉。飞灰和炉渣中总VOCs质量分数相对较低,这主要是由于煤在炉膛内高温燃烧使得煤中95%以上 CH_4 和NMHCs燃烧分解为 CO_2 和 H_2O ,导致飞灰和炉渣内只残余了少量VOCs。此外,与低负荷运行条件下相比,高负荷运行状态下炉渣和飞灰样品产生的 CH_4 和NMHCs质量分数偏高,结合高负荷运行条件下烟气中含有更多VOCs是由于高负荷下所需燃煤量相对较多。

表2 固体样品中 CH_4 和NMHCs质量分数

Table 2 CH_4 and NMHCs mass fraction in solid samples

样品	负荷/%	CH_4 质量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NMHCs质量分数/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
煤样		28 945.13	21 034.52
炉渣	100	273.50	683.22
飞灰	100	432.66	918.38
炉渣	50	176.93	455.23
飞灰	50	389.40	778.12

2.4 典型VOCs在电厂的分布

为了深入了解电厂VOCs排放特征,根据HJ 734—2014《固定污染源废气挥发性有机物的测定固相吸附-热脱附气相色谱-质谱法》,对VOCs组分的沿程变化进行检测。100%负荷下的VOCs分布情况见表3。

表3 CFB锅炉机组典型VOCs质量浓度分布

Table 3 Typical VOCs mass concentration distribution of CFB boiler unit

项目	VOCs质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)					
	SCR入口	SCR出口	FF入口	WFGD入口	WFGD出口	WESP出口
正己烷	365.77	217.83	232.65	149.24	76.09	88.73
苯	544.90	208.56	177.76	140.12	89.00	62.52
正庚烷	17.86	3.34	—	—	—	—
甲苯	634.98	560.45	776.39	338.67	120.55	54.22
环戊酮	5.99	2.87	0.24	—	—	—
乙苯	38.90	23.65	17.44	21.67	12.89	5.40
对/间二甲苯	66.87	54.22	30.79	19.08	24.09	15.47
2-庚酮	11.86	3.98	0.65	0.16	—	—
苯乙烯	154.86	133.98	213.83	186.33	89.21	43.76
邻二甲苯	65.97	43.88	23.64	20.43	18.32	10.65
苯甲醚	19.65	10.43	8.66	4.23	—	—
苯甲醛	1.33	0.92	0.33	—	—	—

续表

项目	VOCs 质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	SCR 入口	SCR 出口	FF 入口	WFGD 入口	WFGD 出口	WESP 出口
1-癸烯	8.56	3.86	2.09	—	—	—
2-壬酮	21.10	10.03	8.99	4.74	2.99	3.06
1-十二烯	18.09	21.32	33.09	24.10	15.85	5.77
合计	1 976.69	1 299.32	1 525.98	908.61	448.99	289.58

注:—表示低于检出限。

由表 3 可知,CFB 锅炉机组烟气中共检出 15 种 VOCs,其中以正己烷、苯、甲苯、苯乙烯为主。SCR 入口处检出的 VOCs 质量浓度为 $1\ 976.69\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\approx 1.98\ \text{mg}/\text{m}^3$),而通过便携式挥发性有机化合物分析仪检出的 NMHCs 质量浓度为 $6.63\ \text{mg}/\text{m}^3$,这是由于 HJ 734—2014 可以分析 23 种 VOCs 组分,说明烟气中仍有大量 VOCs 成分未分析出来,有待进一步检测。在检出的 15 种 VOCs 中,WESP 出口 VOCs 质量浓度合计 $289.58\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,经过全部污染物治理设备后总体去除率为 85.35%,这与第 2.3 节去除率基本相当,进一步说明现有烟气处理设施整体对 VOCs 处理效果良好。

将 WESP 出口(烟囱入口)测得的浓度较高的 VOCs 组分及浓度,与报道的一些燃煤电厂测试结果作为对比,结果见表 4。

表 4 本文结果与已有文献现场测量结果对比

Table 4 Comparison between the results in this paper and the field measurement results in previous literatures

来源	VOCs 质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)						
	苯	甲苯	乙苯	对/间二甲苯	苯乙烯	邻二甲苯	正己烷
本文	62.52	54.22	5.40	15.47	43.76	10.65	88.73
文献[15]	19.59	1.57	0.20	0.26	0.23	0.22	0.56
文献[23]	100.40	11.82	3.05	—	0.84	1.81	—
文献[24]	4.37	10.88	4.28	9.17	0.71	5.05	—
文献[25]	147.1	845.6	53.8	64.7	—	58.5	—

由表 4 可知,各燃煤机组排放的主要 VOCs 组分基本相同,主要是苯、甲苯、乙苯、对/间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯等苯系物(碳原子数 $C \geq 6$)。这主要是由于碳原子数较高的苯环化合物相对稳定的化学结构在反应过程中不易被氧化,质量分数较高。此外,本文测试结果显示 CFB 锅炉机组排放的正己烷含量较高,而其他文献中均显示燃煤机组无正己烷排放或排放量较低。这主要是由于 CFB 锅炉特有的低温燃烧导致煤中释放的烃类化合物并不能完全燃烧分解,导致一部分直接释放;同时 CFB 锅炉燃煤中相应化合物含量较高,造成正己烷含量相对较高。

3 结 论

1) 100% 和 50% 负荷下,CFB 锅炉机组 SCR 入口处烟气中 CH_4 和 NMHCs 质量浓度分别为 $0.65\ \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $6.63\ \text{mg}/\text{m}^3$,经过一系列烟气处理装置处理后 CH_4 质量浓度分别为 $0.14 \sim 0.18\ \text{mg}/\text{m}^3$,NMHCs 质量浓度为 $1.05 \sim 1.43\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。煤样中总 VOCs 质量分数为 $49\ 979.65\ \text{mg}/\text{kg}$,而煤在炉膛内高温燃烧使得煤中 95% 以上 CH_4 和 NMHCs 燃烧分解为 CO_2 和 H_2O ,致使飞灰和炉渣内只残余少量 VOCs。

2) SCR 脱硝系统和 FF 袋式除尘器对烟气中 VOCs 处理效率较好,SCR 脱硝系统对烟气中总 VOCs 的处理效率可达 41.11%~48.63%,FF 袋式除尘器对烟气中总 VOCs 处理效率可达 45.56%~46.29%。经过全部污染物治理设备后,通过烟囱排放的总 VOCs 质量浓度为 $1.19 \sim 1.61\ \text{mg}/\text{m}^3$,总 VOCs 协同脱除效率为 77.88%~78.64%,现有烟气处理设施整体脱除效果可以满足相应排放要求。

3) CFB 锅炉机组烟气中共检出 15 种 VOCs 组分,其中以苯、甲苯、乙苯、对/间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯等碳原子数不小于 6 的苯系物为主。与燃煤机组不同,CFB 锅炉燃烧温度较低,煤中烃类化合物直接释放,导致烟气中正己烷含量较高。

参考文献(References):

- [1] 刘春玲. 能源消费低碳化的金融支持研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2018.
- [2] 李都峰. 基于污染物总量控制的能源消费总量分配优化研究[D]. 吉林:吉林大学,2015.
- [3] 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.
SUN Xueli,ZHU Fahua,WANG Sheng, et al. Technical route selection of ultra-low particulate emissions from coal-fired power plants[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018,8(2):129-136.
- [4] 车凯,郑庆宇,韩忠阁,等. 燃煤电厂痕量元素协同脱除及排放[J]. 中国电力,2019,52(4):161-166.
CHE Kai,ZHENG Qingyu,HAN Zhongge, et al. Research on co-

- removal and emission of trace elements in the coal-fired power plant[J]. *Electric Power*, 2019, 52(4): 161-166.
- [5] 李军状, 杨勇平, 朱法华, 等. SCR 高脱硝效率燃煤发电机组逃逸氨分布特性实测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(10): 3447-3453, 3670.
- LI Junzhuang, YANG Yongping, ZHU Fahua, et al. Actual measurement study on escaped ammonia distribution with SCR high denitration efficiency of coal-fired unit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(10): 3447-3453, 3670.
- [6] 芦海云, 陈爱国, 郝丽娟, 等. 热重-红外联用研究上湾煤中低温热解行为[J]. *煤炭转化*, 2015, 38(3): 32-35.
- LU Haiyun, CHEN Aiguo, GAO Lijuan. Study on low-temperature pyrolysis of Shangwan coal with TG-FTIR[J]. *Coal Conversion*, 2015, 38(3): 32-35.
- [7] ZHU P, LUO A, ZHANG F, et al. Effects of extraditable compounds on the structure and pyrolysis behaviours of two Xinjiang coal[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 133: 128-135.
- [8] 程杰. 燃煤电厂挥发性有机污染物排放机理及脱除研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [9] 刘定超, 金伟, 惠希东, 等. 石油焦燃烧过程中影响多环芳烃生成的因素分析[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(5): 631-637.
- LIU Dingchao, JIN Wei, HUI Xidong, et al. Influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons formation during petroleum coke combustion[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 44(5): 631-637.
- [10] 崔进, 刘成鑫, 陈姗, 等. 气袋采样/热脱附-气相色谱-质谱法检测儿童地垫中 35 种挥发性有机物[J]. *分析实验室*, 2020, 39(6): 700-705.
- CUI Jin, LIU Chengxing, CHEN Shan. Determination of 35 volatile organic compounds in children playmat by bag sampling/thermodesorption-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical Laboratory*, 2020, 39(6): 700-705.
- [11] 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 等. 中国工业源挥发性有机物排放清单[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 4767-4775.
- LIANG Xiaoming, SUN Xibo, XU Jiantie, et al. Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4767-4775.
- [12] 高建强, 宋铜铜, 张雪. 循环流化床锅炉机组碳排放特性分析与计算[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(1): 14-21.
- GAO Jianqiang, SONG Tongtong, ZHANG Xue. Analysis and calculation on carbon emission characteristics of CFB boiler units[J]. *Journal of Power Engineering*, 2021, 41(1): 14-21.
- [13] HONG Feng, CHEN Jiyu, WANG Rui, et al. Realization and performance evaluation for long-term low-load operation of a CFB boiler unit[J]. *Energy*, 2021, 70(8): 214-220.
- [14] 严谨, 卢啸风, 郑雄, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉给煤横向扩散系数的试验研究[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(7): 525-532.
- YAN Jin, LU Xiaofeng, ZHENG Xiong, et al. Experimental study on transverse diffusion coefficient of coal feed in 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *Journal of Power Engineering*, 2021, 41(7): 525-532.
- [15] 史晓宏, 刘俊, 廖海燕, 等. 燃煤电厂烟气中挥发性有机物的分布规律及排放特性研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(4): 405-410.
- SHI Xiaohong, LIU Jun, LIAO Haiyan, et al. Study on distribution and emission characteristics of volatile organic compounds in flue gas of coal-fired power plant[J]. *Environmental pollution and prevention*, 2021, 43(4): 405-410.
- [16] 徐静颖, 卓建坤, 姚强, 等. 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, et al. Study on emission characteristics of organic pollutants from coal burning[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2019, 70(8): 2823-2834.
- [17] 孙树睿, 关卫省, 贾静, 等. 脱硫设施对 2 种燃煤锅炉排放 VOCs 的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1625-1633, 1478.
- SUN Shurui, GUAN Weisheng, JIA Jing, et al. Effects of desulfurization facilities on VOCs emission from two kinds of coal-fired boilers[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(5): 1625-1633, 1478.
- [18] 李津津, 陈靡然, 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. Research prospect of emission and control technology of organic pollutants from coal burning[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(12): 5539-5547.
- [19] 徐静颖. 典型煤种热解与燃烧过程挥发性有机物生成与排放特性[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [20] 王志昌. 宁东煤中有质组的分子组成结构特征及定向转化反应的基础研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [21] LIU J, WANG T, CHENG J, et al. Distribution of organic compounds in coal-fired power plant emissions[J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(6): 5430-5437.
- [22] 程杰, 汪涛, 张永生, 等. 烟煤及其逸出气中挥发性有机化合物研究[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(3): 97-102.
- CHENG Jie, WANG Tao, ZHANG Yongsheng, et al. Study on volatile organic compounds in bituminous coal and its escape gas[J]. *Journal of north China electric power university (Natural Science Edition)*, 2019, 46(3): 97-102.
- [23] DOS Santos C Y M, DE AIMEIDA Azevedo D, DE AQUINO Neto F R. Atmospheric distribution of organic compounds from urban areas near a coal-fired power station[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(9): 1247-1257.
- [24] FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ G, LÓPEZ-VILARIÑO J M, LÓPEZ-MAHÍA P, et al. Determination of volatile organic compounds in emissions by coal-fired power stations from Spain[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(5): 567-575.
- [25] SHI J, DENG H, BAI Z, et al. Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 515: 101-108.