

# 燃煤机组掺烧市政生活污水泥现场试验

李德波<sup>1</sup>, 阙正斌<sup>2</sup>, 苗建杰<sup>3</sup>, 陈拓<sup>1</sup>, 陈智豪<sup>1</sup>, 陈兆立<sup>1</sup>, 冯永新<sup>1</sup>

(1. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080; 2. 华北电力大学 生物质发电成套设备国家工程实验室, 北京 102206; 3. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 焚烧处理是我国生活污水泥主要处置方式, 燃煤与污泥掺混燃烧是研究热点之一, 但在小规模燃煤机组研究和应用较少, 基于国内某电厂 210 MW 四角切圆燃煤机组, 对 8 个工况分别开展掺烧生活污水泥的现场试验。结果表明, 随污泥掺烧比例增加, 燃料水分、灰分和硫分含量逐渐增加, 热值逐渐降低。对于固体产物, 由于污泥中重金属含量高于燃煤, 在掺混污泥燃烧后, 飞灰、炉渣和脱硫石膏的重金属含量增加, 存在二次污染风险。常规烟气污染物 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 和粉尘排放受掺烧污泥影响较小, 现有烟气净化工艺可满足燃煤烟气的超低排放要求; 掺烧污泥后重金属及其化合物等污染物浓度上升, 最高提升了约 3.6 倍, 满负荷工况下掺烧 10% 污泥时, 二噁英平均质量浓度为 0.021 ng/m<sup>3</sup> (以毒性当量浓度 TEQ 计), 但仍满足相关排放要求; 掺烧 10% 生活污水泥时, 炉膛平均温度仅下降 15 °C, 热效率降幅低于 0.5%, 影响并不显著。

**关键词:** 燃煤机组; 超高压; 污泥掺烧; 现场试验; 烟气污染物; 重金属

中图分类号: TK224 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2022)10-0039-08

## Field experiment on mixed combustion of municipal domestic sludge in coal-fired units

LI Debo<sup>1</sup>, QUE Zhengbin<sup>2</sup>, MIAO Jianjie<sup>3</sup>, CHEN Tuo<sup>1</sup>, CHEN Zhihao<sup>1</sup>, CHEN Zhaoli<sup>1</sup>, FENG Yongxin<sup>1</sup>

(1. China Southern Grid Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. National Engineering Laboratory of Biomass Power Generation Equipment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. College of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Incineration treatment is the main disposal method of domestic sludge in my country. Mixing combustion with coal is one of the research hotspots, but it is less researched and applied in small-scale coal-fired units. Based on the 210 MW four-corner tangential-circle coal-fired unit of a domestic power plant, field tests of mixing domestic sludge for 8 working conditions were carried out, respectively, and the monitoring data and test results were compared and analyzed. The results show that ash content and the sulfur content increase gradually with the increase of sludge blending ratio, the calorific value of the fuel decreases gradually. For solid products, since the content of heavy metals in sludge is higher than that of coal, the content of heavy metals in fly ash, slag and desulfurized gypsum increase after mixed sludge combustion, and there is a risk of secondary pollution. The emission of conventional flue gas pollutants NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and dust is less affected by the mixed burning of sludge, and the existing flue gas purification process can meet the ultra-low emission requirements of coal-fired flue gas. After mixed burning of sludge, the concentration of heavy metals and their compounds and other pollutants increase by about 3.6 times at most. Under full load condition, when 10% sludge is mixed burning, the average mass concentration of dioxin is 0.021 ng/m<sup>3</sup> (calculated by toxic equivalent concentration TEQ), but it still meets the relevant emission requirements. When 10% domestic sludge is mixed, the average temperature in the furnace only decrease by 15 °C, and the decrease in thermal efficiency is less than 0.5%, the effect is not significant.

**Key words:** coal-fired units; ultra-high pressure; sludge blended combustion; field test; flue gas pollutants; heavy metal

收稿日期: 2022-05-24; 责任编辑: 张鑫 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.HK22052401

基金项目: 中国南方电网公司重点资助项目 (NYJS2020KJ005)

作者简介: 李德波 (1983—), 男, 湖北宜昌人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: ldbyx@126.com

引用格式: 李德波, 阙正斌, 苗建杰, 等. 燃煤机组掺烧市政生活污水泥现场试验[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 39-46.

LI Debo, QUE Zhengbin, MIAO Jianjie, et al. Field experiment on mixed combustion of municipal domestic sludge in coal-fired units[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 39-46.



移动阅读

## 0 引言

生活污水处理厂能有效净化废水,避免污染物直接排入水域造成严重污染,对保护环境意义重大。然而,污水处理过程中会产生大量污泥,据统计2020年我国污水处理厂干污泥产量为11 627 678 t,较去年提高约5%,妥善处置污泥避免造成二次污染成为难题<sup>[1]</sup>。

GB/T 23484—2009《城镇污水处理厂污泥处置分类》将处置方式分为土地利用、填埋、建筑材料利用和焚烧四大类<sup>[2]</sup>。发达国家和地区主要采用焚烧处理方式,而我国不同地区的污泥处置方式差别较大。据估计,截至2019年底,国内污泥土地利用处置约29.3%、焚烧处置约26.7%、填埋处置约20.1%、15.9%用于建筑材料,其余8.0%采用其他处置方式<sup>[3]</sup>。然而,由于土地利用困难、填埋空间不足和建筑材料利用要求较高等原因,焚烧处理越来越受到重视。污泥焚烧处理可分为单独焚烧和与其他燃料掺混燃烧,在现有燃煤锅炉中掺烧污泥是研究热点之一<sup>[4-5]</sup>。

研究人员针对掺烧污泥过程,采用实验室研究<sup>[6-8]</sup>、数值模拟<sup>[9-11]</sup>和现场试验<sup>[12-17]</sup>等手段开展相关研究。实验室研究偏向机理方面,如污染物生成与重金属迁移过程。张自丽等<sup>[7]</sup>采用热重傅里叶红外联用技术,研究了市政污泥与徐州烟煤掺烧的燃烧性能,明确了燃料中元素N与S的赋存形态,得到了NO<sub>x</sub>和SO<sub>2</sub>污染物生成过程的部分规律。史明哲等<sup>[8]</sup>针对烟气循环式燃煤耦合污泥掺烧系统,在实验室中采用管式炉、热重分析仪和X射线荧光光谱分析仪等,研究了燃烧特性以及重金属迁移特性,得到炉温、气体成分对重金属迁移特性的影响规律。而数值模拟研究技术多用于运行参数研究优化。王海川等<sup>[9]</sup>采用Fluent软件建立模型,对比多个锅炉工况,重点研究了污泥含水量和掺混比例对烟气流动、燃烧过程和污染物NO<sub>x</sub>排放等的影响,认为需将掺烧比例控制在合理范围,同时可以采取干燥预处理等措施降低污泥水分。孟涛等<sup>[10]</sup>基于涡耗散模型对600 MW四角切圆煤粉锅炉掺烧市政污泥进行数值模拟研究,使用Fluent软件重点研究了二次风配风方式等因素对燃煤锅炉内污泥掺混燃烧及NO<sub>x</sub>生成的影响,综合对比分析后采用束腰配风方式。周科等<sup>[16]</sup>在某电厂开展混烧2种市政污泥试验,探究污泥种类、含水率、掺烧比例对混烧时NO和SO<sub>2</sub>排放的影响规律,为该电厂的掺烧方案优化提供参考。刘笑等<sup>[17]</sup>对某600 MW机组四角切

圆锅炉进行了污泥掺烧试验,研究重金属迁移规律,发现煤和污泥混燃后大部分痕量元素迁移至飞灰和炉渣中,烟气中Hg排放满足排放要求。上述研究为进一步控制重金属排放提供了参考。

2018年国内相关政府部门批准了多个燃煤机组掺烧污泥的试点项目,推动现场试验研究。然而,目前现场试验主要对象是大规模亚临界及以上燃煤机组,针对较小规模的超高压及以下的燃煤机组研究较少。基于团队研究经验,对国内某210 MW超高压燃煤机组开展掺烧污泥现场试验,深入分析在不同掺烧比例下燃料与灰渣的成分含量、锅炉燃烧和烟气污染物等情况,为较小规模超高压燃煤机组掺烧污泥提供参考。

## 1 现场试验

### 1.1 燃煤机组概况

基于国内某电厂的四角切圆超高压燃煤机组开展试验研究。该燃煤机组装机容量为201 MW,额定运行负荷为550 t/h,相比一般燃煤机组规模较小。锅炉从下到上设置5层燃烧器(A~E),在现场试验中燃煤与污泥分层送入,其中A~B层送入燃煤,C~E层送入污泥。

### 1.2 试验工况

不同污泥掺烧比例下锅炉内燃烧情况区别较大,研究表明掺烧比例0~10%对锅炉燃烧影响较小<sup>[18]</sup>。为进一步研究掺烧比例对燃烧的影响,考虑运行负荷对燃烧的影响,参考GB/T 1084—2015《电站锅炉性能试验规程》<sup>[19]</sup>设计调试8个锅炉掺烧污泥的试验工况,具体见表1。

表1 掺烧污泥现场试验工况

工况	锅炉负荷/(t·h <sup>-1</sup> )	掺烧污泥比例/%
1	550	0
2	550	3
3	550	5
4	550	10
5	485	0
6	485	3
7	485	5
8	485	10

### 1.3 试验设计与方法

#### 1.3.1 固体样品

为确保数据准确性,检测给煤机处的燃煤样品,每次取样1~2 kg污泥。飞灰、炉渣和脱硫石膏是燃烧或烟气净化过程的产物,主要考察其重金属和氯

离子含量。重金属含量体现其对环境的危害能力,氯离子含量间接说明燃烧过程发生高温腐蚀的可能性和严重程度。考虑上述样品的成分含量受多因素影响,每个样品均取样2次。

### 1.3.2 烟气采样与检测方法

烟气样品的采样位置为烟囱入口处,测定烟气中污染物含量。针对常规的 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 和粉尘等污染物统一采用网格法测量浓度,即对烟道内多点分别测量浓度后取平均值(6%基准含氧量)。采用德国进口的烟气分析仪检测 $\text{NO}_x$ 浓度;采用连续测量的仪器检测 $\text{SO}_2$ 浓度;采用重量法检测粉尘浓度;采用顺磁式氧量分析仪检测 $\text{O}_2$ 浓度。

非常规污染物中重金属及其化合物主要考察汞和二噁英。选用EPA Method 30B标准方法采样,直接对吸附汞后的活性炭管进行分析,确定汞含量。

表2 燃料特性分析

Table 2 Analysis of fuel properties

项目	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,ar}/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$Q_{net,ar}/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
	$M_{ar}$	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$		
燃煤	18.00	3.11	15.73	30.47	66.70	3.65	9.10	1.02	0.69	25.96	20.85
污泥	42.30	5.04	55.65	41.45	17.60	2.65	14.50	2.34	2.22	6.38	2.42

### 2.2 燃料与燃烧产物的微量成分

表3为燃料与不同燃烧产物的重金属质量分数。与煤相比,污泥中部分重金属质量分数极高。对比燃烧产物发现,掺烧后飞灰与炉渣的重金属质量分数仅在掺烧比例10%时,变化较明显,与现有研究存在差别<sup>[17]</sup>。这可能是由于重金属迁移受多方面影响,如样品污泥中重金属含量相对较低、测量方法准确度等。掺烧污泥对脱硫石膏基本没有影响,因此认为使用湿法脱硫装置几乎不发生

依据HJ 77.2—2008《环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》,利用过滤、吸附和冷凝等原理分离烟气中二噁英。

### 1.3.3 运行参数

燃煤机组中设置多个监控装置,可测定温度、压力和流量等参数,在试验开始和结束时记录大气压力、温度和湿度数据。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 燃料特性分析

燃煤与污泥的燃料特性分析结果见表2。由表2可知,污泥中全水分达42.30%,灰分达55.65%,污泥中硫分为2.22%,均高于燃煤。因此掺烧污泥后增大了燃料硫分、灰分和水分,进而导致热值降低。

重金属二次污染。

燃料中氯离子浓度影响炉内受热面的高温腐蚀过程,燃料氯离子质量分数高于0.250%时高温腐蚀倾向较高<sup>[21]</sup>。对燃煤、污泥、飞灰和炉渣中氯离子含量进行采样分析,化验结果见表4。可知原煤的氯含量较低,污泥氯离子含量高于原煤,污泥氯离子质量分数为0.143%,仍属于较低腐蚀倾向范围。为减少受热面高温腐蚀,建议加强入厂污泥中氯离子的化验并污泥掺烧比例。

表3 燃料与固体产物的重金属质量分数

Table 3 Heavy metal mass fraction of solid products and fuel

项目	质量分数/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )								
	As	Cr	Cd	Cu	Ca	Hg	Ni	Pb	Zn
燃煤中重金属	<5.0	5.7	<5.0	8.0	<5.0	<5.0	<5.0	7.1	24.6
污泥中重金属标准 要求 <sup>[20]</sup>	<5.0	70.4	<5.0	1 079.6	<5.0	<5.0	29.4	70.6	519.0
	75.0	1 000.0	20.0	1 500.0	—	15.0	200.0	1 000.0	3 000.0
工况 1	<5.0	50.0	<5.0	58.5	47.8	<5.0	16.7	75.8	79.0
工况 2	<5.0	32.4	<5.0	48.5	27.5	<5.0	10.2	52.0	58.5
工况 3	<5.0	29.6	<5.0	48.1	29.1	<5.0	13.1	57.1	59.4
飞灰中重 金属	16.9	53.8	<5.0	117.7	34.4	<5.0	16.3	62.1	89.8
工况 4	<5.0	50.8	<5.0	58.6	34.6	<5.0	27.7	52.7	104.8
工况 5	<5.0	51.6	<5.0	63.9	31.8	<5.0	29.5	51.2	102.2
工况 6	<5.0	51.6	<5.0	63.9	31.8	<5.0	29.5	51.2	102.2
工况 7	8.5	58.5	<5.0	78.4	34.6	<5.0	27.2	58.7	111.2
工况 8	8.3	41.6	<5.0	60.3	34.1	<5.0	14.7	52.1	79.1

续表

项目	质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )									
	As	Cr	Cd	Cu	Ca	Hg	Ni	Pb	Zn	
炉渣中重金属	工况 1	<5.0	51.9	<5.0	38.1	18.8	<5.0	10.2	<5.0	92.1
	工况 2	<5.0	49.6	<5.0	49.4	49.4	<5.0	9.2	25.8	14.1
	工况 3	<5.0	46.1	<5.0	52.3	52.3	<5.0	9.4	<5.0	13.5
	工况 4	<5.0	56.0	<5.0	77.3	77.3	<5.0	14.0	5.9	20.5
	工况 5	6.8	66.4	<5.0	66.4	18.9	<5.0	17.1	11.3	47.5
	工况 6	<5.0	121.9	<5.0	121.9	13.3	<5.0	16.5	10.0	36.4
	工况 7	5.2	72.3	<5.0	72.3	21.0	<5.0	18.8	13.8	53.1
	工况 8	<5.0	72.0	<5.0	72.0	18.7	<5.0	16.7	17.5	58.3
脱硫石膏中重金属	工况 1	1.4	4.5	0.1	0.9	—	0.2	2.0	0.8	—
	工况 2	0.9	3.8	0.1	0.6	—	0.2	1.7	0.7	—
	工况 3	0.6	4.5	0.1	1.7	—	0.2	2.1	1.6	—
	工况 4	0.9	4.3	0.1	0.8	—	0.2	1.7	0.9	—
	工况 5	0.9	4.2	0.1	0.7	—	0.2	1.8	0.7	—
	工况 6	1.2	4.8	0.1	0.8	—	0.2	1.9	1.0	—
	工况 7	0.7	4.8	0.1	1.7	—	0.2	2.1	1.7	—
	工况 8	0.6	4.5	0.1	1.7	—	0.2	2.1	1.8	—

表4 燃料及固体产物的氯离子质量分数

Table 4 Chloride mass fraction of fuel and solid products

物质	氯离子质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )
燃煤	367.6
污泥	1 430.6
飞灰	36.6
炉渣	20.9

### 2.3 烟气污染物排放

掺烧比例对常规烟气污染物排放浓度(6% O<sub>2</sub>氛围下)的影响如图1所示。除常规烟气污染物(NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>和粉尘)外,非常规污染物(重金属及其化合物、二噁英类)同样受到重视。

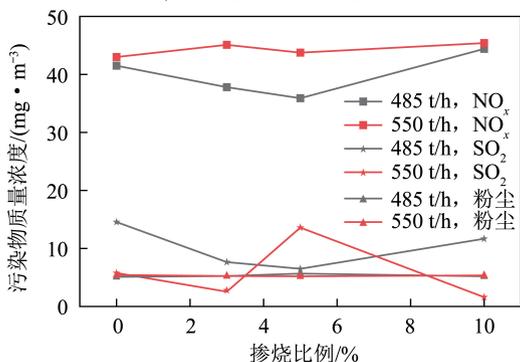


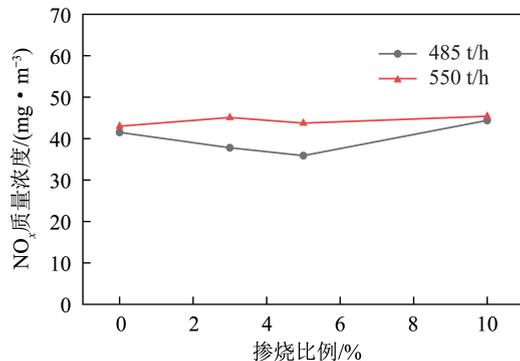
图1 掺烧比例与常规烟气污染物排放浓度的关系

Fig.1 Relationship between blending ratio and conventional flue gas pollutants emission concentration

然而,国内尚未发布明确的燃煤掺烧污泥的排放标准。对于常规烟气污染物,一般执行燃煤烟气超低排放标准,同样采用6%含氧量作为折算基准。而对于非常规烟气污染物,则参考垃圾焚烧烟气的相关排放标准。

#### 2.3.1 NO<sub>x</sub>

试验期间不同工况下的NO<sub>x</sub>质量浓度变化情况(6% O<sub>2</sub>氛围下)如图2所示。由图2可以看出,各个试验工况NO<sub>x</sub>质量浓度无明显变化,约为42 mg/m<sup>3</sup>。整体而言,NO<sub>x</sub>质量浓度均小于燃煤烟气的超低排放标准(50 mg/m<sup>3</sup>),掺烧污泥可以满足NO<sub>x</sub>的排放规定。

图2 掺烧比例与NO<sub>x</sub>排放浓度的关系Fig.2 Relationship between blending ratio and NO<sub>x</sub> emission concentration

### 2.3.2 SO<sub>2</sub>

不同工况下 SO<sub>2</sub>质量浓度(6% O<sub>2</sub>氛围下)如图3所示,SO<sub>2</sub>质量浓度波动较大,但与其他污染物相比变化幅度较小。

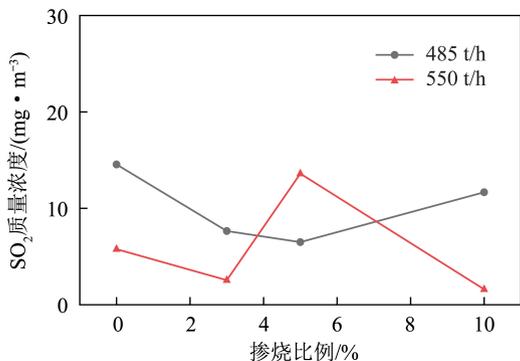


图3 掺烧比例与SO<sub>2</sub>排放浓度的关系

Fig.3 Relationship between blending ratio and SO<sub>2</sub> emission concentration

从第2.1节知混合燃料硫含量高于燃煤,因此燃烧生成的SO<sub>2</sub>污染物浓度增大。试验测得的脱硫塔进口烟气中SO<sub>2</sub>质量浓度在800~900 mg/m<sup>3</sup>,排放烟气中SO<sub>2</sub>质量浓度在0~15 mg/m<sup>3</sup>,燃煤电厂湿法脱硫装置脱除效率达98%以上。

### 2.3.3 粉尘

试验期间不同工况下粉尘质量浓度情况(6% O<sub>2</sub>氛围下)如图4所示,发现粉尘质量浓度维持在5 mg/m<sup>3</sup>左右,满足燃煤烟气超低排放标准。

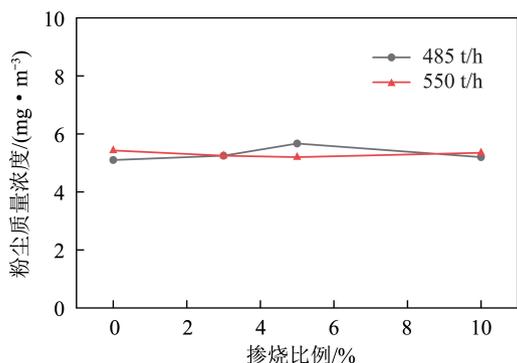


图4 掺烧比例与粉尘排放浓度的关系

Fig.4 Relationship between blending ratio and dust emission concentration

### 2.3.4 重金属及其化合物

结合第2.1节可知,混合燃料中的重金属含量增加,理论上其迁移到烟气中导致烟气重金属浓度提高。为了更直观了解重金属向烟气的迁移情况,选取工况1和工况4的烟气重金属含量进行对比,见表5。

表5 不同工况烟气中重金属质量浓度

Table 5 Heavy metal mass concentration in flue gas under different tests

重金属	质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )		
	工况1	工况4	排放限值
As	0.002 75	0.007 50	—
Cd	0.033 00	0.012 00	0.100
Cu	0.055 00	0.007 50	—
Cr	0.140 25	0.013 50	—
Hg	0.002 75	0.007 50	0.075
Ni	0.012 65	0.024 00	—
Pb	0.002 75	0.007 50	1.600

由于目前缺少燃煤电厂掺烧污泥后烟囱出口处重金属相应标准,参考GB 18485—2014《生活垃圾焚烧污染控制标准》<sup>[22]</sup>。由表5可知,掺烧10%污泥的工况下,烟囱入口烟道烟气中重金属含量均有所上升,增幅最高达3.6倍,但仍能满足排放要求。

### 2.3.5 二噁英类

由于污泥含水量较大、热值较低,一般认为与煤掺烧促进二噁英生成,且受其他因素影响,本文在工况4现场试验的基础上,测量了烟气中二噁英浓度。参考GB 18485—2014《生活垃圾焚烧污染控制标准》采用11%含氧量作为折算浓度基准<sup>[22]</sup>。3次平行测量结果分别为0.017、0.021和0.026 ng/m<sup>3</sup>,平均质量浓度为0.021 ng/m<sup>3</sup>,低于国家标准的排放要求(0.1 ng/m<sup>3</sup>)。

### 2.4 燃烧温度及稳定性

污泥水分高、热值较低是不利于掺烧的主要原因,掺烧污泥对锅炉稳定运行有一定影响。表6为锅炉负荷550 t/h时不同掺烧比例工况的炉膛温度测量结果。由表6可知,不掺烧污泥时炉膛温度为951.75℃,掺烧3%污泥时炉膛温度为954℃,掺烧5%污泥时炉膛温度为939.5℃,掺烧10%污泥时炉膛温度为935.25℃。可知随掺烧比例增加,炉膛温度呈小幅下降趋势,未明显影响燃烧过程。分析不同测量点之间差值以及同一测量点最值,发现掺烧污泥后导致温度波动变大,即不利于稳定燃烧。

### 2.5 锅炉热效率

锅炉效率试验工况为锅炉负荷485和550 t/h、掺烧比例0、3%、5%、10%,测量相关数据完成锅炉效率计算。

图5为试验期间不同工况下的锅炉热效率变化情况。由图5可以看出,掺烧比例增大,锅炉热效率呈下降趋势,但降幅较低。掺烧10%污泥时,热效

表6 不同工况下的炉膛温度测量结果

Table 6 Heavy metal content in flue gas under different test conditions

测量位置	工况 1			工况 2			工况 3			工况 4		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
位置 1	961	923	943	1 017	924	961	931	880	903	1 052	923	969
位置 2	978	904	934	1 085	920	963	1 111	924	978	974	869	910
位置 3	1 007	913	945	997	925	951	991	888	945	986	915	940
位置 4	1 022	936	985	969	905	941	1 012	895	932	954	900	922
平均	992.00	919.00	951.75	1 017.00	919.00	954.00	1 011.00	897.00	939.50	992.00	902.00	935.25

率下降幅度均不超过 0.5%，掺烧污泥对热效率影响不显著。

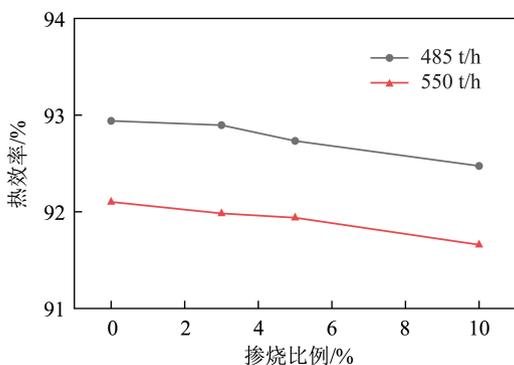


图5 掺烧比例与锅炉热效率的关系

Fig.5 Relationship between mixing ratio and boiler thermal efficiency

因此,造成掺烧污泥后锅炉热效率下降的主要

原因是固体不完全燃烧热损失增加。相较不掺烧污泥的工况,锅炉负荷为 550 t/h 时,掺烧 10% 污泥的固体不完全燃烧热损失升高 0.52%; 锅炉负荷 485 t/h 工况,掺烧 10% 污泥的固体不完全燃烧热损失升高 0.41%, 锅炉负荷对其影响较小, 故造成固体不完全燃烧热损失升高的主要原因是污泥灰分高。

## 2.6 受热面积灰与腐蚀

受热面积灰与腐蚀问题与燃料灰熔融温度相关, 因此对燃煤、污泥以及不同掺混比例的混合燃料分别开展灰熔融温度试验, 见表 7。可知随污泥比例增加, 灰熔融温度下降。掺入 10% 污泥混合燃料的软化温度  $T_s$  为 1 310 °C, 高于 1 200 °C。掺入 10% 污泥混合燃料的软化温度比燃煤的软化温度下降 50 °C。掺入 10% 污泥混合燃料的软化区间温度 ( $T_s - T_D$ ) 低于 100 °C, 属于短渣。

表7 燃料的灰熔融温度情况

Table 7 Ash melting point of fuel

项目	燃煤	污泥	3%污泥	5%污泥	10%污泥
变形温度 $T_D$	1 320	1 200	1 290	1 280	1 260
软化温度 $T_s$	1 360	1 220	1 340	1 340	1 310
半球温度 $T_H$	1 400	1 230	1 370	1 360	1 340
流化温度 $T_F$	1 410	1 250	1 390	1 380	1 360

总之,掺烧 10% 污泥的对结渣特性影响不大, 但随灰熔融温度下降, 结渣风险仍会增加, 建议掺烧污泥比例不超过 10%, 并且在运行中观察结渣等情况。

## 2.7 风烟系统

与未掺烧工况相比, 掺烧工况下由于燃料发生变化, 所需燃烧空气量与产生的排放烟气量也会变化, 因此需对风烟系统进行运行调整优化, 优化对象主要为一次风机、二次风机和引风机。试验过程中对比了工况 1 与工况 4 中风烟系统各风机运行时的最大电流与平均电流, 见表 8。

表8 不同工况下风机运行电流情况

Table 8 Operating current of the fan under different working conditions

项目	工况 1	工况 4	
一次风机	平均电流值/A	38.5	39.3
	最大电流值/A	43.4	44.8
二次风机	平均电流值/A	51.4	52.9
	最大电流值/A	52.1	53.6
引风机	平均电流值/A	99.7	100.6
	最大电流值/A	101.6	102.5

总体而言, 掺烧前后各风机的平均电流值基本

一致,说明对风烟系统运行影响较小,适当调整后风烟系统可以正常运行。其中二次风机的平均电流相对提升较多,达 1.5 A,分析认为是由于混合燃料与燃煤区别较大,需要灵活调整二次风送风量。

### 3 结 论

1) 燃煤与生活污泥在组成成分上差别较大,混合燃料成分随掺混比例的不同而有所差别。随掺混比例增大,飞灰、炉渣和脱硫石膏的重金属含量增加,增大二次污染风险;污泥氯离子质量分数为 0.143%,高温腐蚀倾向较低,但继续提高混合燃料氯离子含量,增加高温腐蚀风险。

2) 常规烟气污染物  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  和粉尘排放受掺烧影响较小,现有烟气净化工艺可确保满足燃煤烟气超低排放要求;重金属及其化合物等污染物浓度在掺烧污泥后普遍上升,最高提升了约 3.6 倍,但仍满足相关排放要求;满负荷工况下掺烧 10% 污泥时,二噁英平均质量浓度为  $0.021 \text{ ng/m}^3$  (以毒性当量浓度 TEQ 计),满足环保要求。

3) 在掺烧 10% 生活污水污泥时,炉膛平均温度仅下降  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,热效率降幅低于 0.5%,影响并不显著。另外,灰熔融温度明显降低,会增大受热面结渣积灰和腐蚀的风险,需考虑采取防腐等措施;风烟系统各级风机受掺烧污泥影响较小,适当调整后均能够正常运行。

### 参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020 年城市建设统计年鉴 [EB/OL]. (2021-10-12) [2022-05-23]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdkgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇污水处理厂污泥处置 分类: GB/T 23484—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[3] WEI L, ZHU F, LI Q, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and  $\text{CO}_2$ -equivalent emissions analysis [J]. *Environment International*, 2020, 144(3): 106093.

[4] 黄伟, 林英红, 罗子丰, 等. 燃煤电厂污泥掺烧技术及其研究进展 [J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(1): 1-4, 22.  
HUANG Wei, LIN Yinghong, LUO Zifeng, et al. Progress on research and technology of sludge blending combustion in coal-fired power plants [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2021, 37(1): 1-4, 22.

[5] ZHANG S, WANG F, MEI Z, et al. Status and development of sludge incineration in China [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 12: 3541-3574.

[6] 李德波, 崔乘亮, 蒋勇军, 等. 煤和市政污泥掺烧的灰熔融特性研究 [J]. 发电技术, 2019, 40(4): 347-354.

LI Debo, CUI Chengliang, JIANG Yongjun, et al. Investigation of fusion characteristics in co-combustion of coal with municipal sludge [J]. *Power Generation Technology*, 2019, 40(4): 347-354.

[7] 张自丽, 孙光, 段伦博. 煤与污泥混燃及污染物逸出特性 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 118-129.  
ZHANG Zili, SUN Guang, DUAN Lunbo. Combustion characteristic and pollutants emission behavior during co-combustion of coal and municipal sewage sludge [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(3): 118-129.

[8] 史明哲, 雷凯, 张睿. 烟气循环式燃煤耦合污泥焚烧系统中污泥燃烧特性及重金属迁徙特性 [J/OL]. 洁净煤技术: 1-9 [2022-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20220110.1624.002.html>.

[9] 王海川, 李德波, 曾祥浩, 等. 污泥掺混煤粉燃烧过程的数值模拟模型适应性研究 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 179-186.  
WANG Haichuan, LI Debo, ZENG Xianghao, et al. Adapt ability of numerical simulation model for the combustion process of sludge mixed with coal [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(2): 179-186.

[10] 孟涛, 邢小林, 张杰, 等. 配风方式对燃煤锅炉掺烧污泥影响的数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 263-271.  
MENG Tiao, XING Xiaolin, ZHANG Jie, et al. Numerical simulation study on the effect of air distribution on combustion of coal-fired boiler blended with sludge [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(1): 263-271.

[11] 丁先, 吴何来, 臧剑南, 等. 燃煤耦合城市污泥燃烧特性与  $\text{NO}_x$  生成行为模拟 [J]. 动力工程学报, 2022, 42(3): 207-214, 248.  
DING Xian, WU Helai, ZANG Jiannan, et al. Numerical simulation on co-combustion characteristics and  $\text{NO}_x$  formation behavior of coal with municipal sludge [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(3): 207-214, 248.

[12] 李德波, 孙超凡, 冯斌全, 等. 300 MW 燃煤电厂污泥掺烧技术研究及应用 [J]. 浙江电力, 2019, 38(7): 109-114.  
LI Debo, SUN Chaofan, FENG Binqun, et al. Investigation and application of sewage sludge co-combustion in a 300 MW coal-fired boiler [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(7): 109-114.

[13] 张宗振, 李德波, 冯永新, 等. 1 000 MW 燃煤锅炉污泥掺烧试验研究与工程应用 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 210-216.  
ZHANG Zongzhen, LI Debo, FENG Yongxin, et al. Investigation and applications of co-combustion of sludge in a 1 000 MW coal fired boiler [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(1): 210-216.

[14] 冯炳全, 李德波, 孙超凡, 等. 300 MW 燃煤锅炉污泥掺烧现场试验关键技术研究与应用 [J]. 发电设备, 2021, 35(2): 131-136.  
FENG Bingquan, LI Debo, SUN Chaofan, et al. Key technology research and engineering application of the co-combustion of sludge and coal in a 300 MW coal-fired boiler [J]. *Power Equipment*, 2021, 35(2): 131-136.

- [15] 张宗振,李德波,李新虎,等. 污泥掺烧对燃煤机组锅炉效率及环保系统的影响[J].浙江电力,2020,39(7):93-101.  
ZHANG Zongzhen, LI Debo, LI Xinhui, et al. Impact of co-combustion of sludge with coal on boiler efficiency and environmental protection system of coal-fired generating units [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(7):93-101.
- [16] 周科,刘好文,彭金宝,等. 含水/脱水市政污泥与煤混烧的NO和SO<sub>2</sub>排放特性研究[J].锅炉技术,2022,53(1):8-15.  
ZHOU Ke, LIU Haowen, ZHANG Jinbao, et al. NO and SO<sub>2</sub> emission behaviors of co-combustion of power coal and high water or de-water sewage sludge [J]. Boiler Technology, 2022, 53(1):8-15.
- [17] 刘笑,丹慧杰,房凡,等. 燃煤耦合污泥发电过程重金属、砷和硒迁移转化试验研究[J].热力发电,2022,51(5):65-72.  
LIU Xiao, DAN Huijie, FANG Fan, et al. A test study on migration and transformation of heavy metals, As and Se in coal and sludge co-firing power generation system [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5):65-72.
- [18] 李德波,刘鹏宇,刘彦丰,等. 新型电力系统规划下燃煤电厂锅炉机组的发展[J/OL].广东电力:1-13 [2022-05-23].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1420.tm.20210920.0232.002.html>.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电站锅炉性能试验规程:GB/T 1084—2015 [S].北京:中国标准出版社,2015.
- [20] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002 [S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [21] 陈小涵. 污泥的燃烧特性与氯析出规律的实验研究[D].济南:山东大学,2019.
- [22] 中华人民共和国环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 生活垃圾焚烧污染控制标准:GB 18485—2014 [S].北京:中国环境出版社,2014.