

高洁. 污泥与木质生物质颗粒的鼓泡流化床混烧特性[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 100-108.

Gao J. Co-combustion characteristics of sludge and wooden biomass particles in a bubbling fluidized bed[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 100-108.

## 污泥与木质生物质颗粒的鼓泡流化床混烧特性

高洁\*

(上海漾沁环境科技有限公司, 上海 201712)

**摘要** 【目的】 市政污泥单独焚烧存在高含水率、低热值的问题, 生物质与污泥混烧是解决该问题的有效途径, 为探究市政污泥固体燃料与木质生物质颗粒燃料的混烧特性, 实现污泥的高效清洁利用, 本文开展相关试验。【方法】 采用内径为 0.1 m、高度为 1.2 m 的气泡流动层反应器系统, 设置生物质颗粒混烧比例分别为 20%、50%、80% 的 3 组工况, 并以纯污泥、纯生物质燃烧为对照, 固定当量比为 1.65、空气流量为 100 L/min、反应器温度为 800 °C 及流动化气体流速为 0.21 m/s (床料平均粒径为 460 μm) 的试验参数, 通过热重分析(TGA)、烟气排放实时监测、灰分 X 射线(XRF)分析及灰分沉积倾向评估等方法, 系统对比了不同工况下燃料的热解燃烧特性、污染物排放规律及灰分行为特征。【结果】 TGA 表明生物质燃烧区间更窄、燃尽性更优; 混烧中生物质低氮硫的特性使污染物排放量显著降低, 80% 混烧比例下, NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>x</sub> 排放量分别降至纯污泥燃烧的 43% 和 69%, 协同减排效应显著; CO 浓度随生物质比例小幅上升但整体变化平缓, 燃烧效率随生物质混烧率提升最高增加 0.12%, 均保持 99% 以上; 灰分成分主要受污泥主导, 混烧对灰分成分影响较小, 灰分沉积倾向可控, 仅出现少量流化介质板结。【结论】 污泥与木质生物质颗粒混烧可有效改善污泥燃烧性能、降低污染物排放量, 且燃烧效率高、灰分沉积风险可控, 本文为污水污泥燃料的高效清洁利用、鼓泡流化床混烧工艺的优化设计与工程应用提供了重要的理论依据和试验支撑。

**关键词** 鼓泡流化床 污泥 生物质 混烧 污染物排放

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0100-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.013

## Co-Combustion Characteristics of Sludge and Wooden Biomass Particles in a Bubbling Fluidized Bed

Gao Jie\*

(Shanghai Yangqin Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 201712, China)

**Abstract** [Objective] Municipal sludge incineration alone is faced with the problems of high water content and low calorific value, and co-combustion of biomass and sludge is an effective way to solve this problem. To explore the co-combustion characteristics of municipal sludge solid fuel and wooden biomass pellet fuel and realize the efficient and clean utilization of sludge, this paper carries out relevant experiments. [Methods] A bubbling fluidized bed reactor system with an inner diameter of 0.1 m and a height of 1.2 m was adopted, with three working conditions of biomass co-combustion ratios of 20%, 50% and 80%, and pure sludge and pure biomass combustion as controls. The experimental parameters were fixed as follows: equivalence ratio was 1.65, air flow rate was 100 L/min, reactor temperature was 800 °C, fluidizing gas velocity was 0.21 m/s (average particle size of bed material was 460 μm). Through thermogravimetric analysis (TGA), real-time flue gas emission monitoring, ash X-ray fluorescence (XRF) analysis and deposition tendency evaluation, the pyrolysis and combustion characteristics, pollutant emission laws and ash behavior characteristics of fuels under different working conditions were systematically compared. [Results] TGA showed that biomass had a narrower combustion range and better burnout performance; the low nitrogen and sulfur characteristics of biomass in co-combustion significantly reduced pollutant emissions, and the emissions of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> at 80% co-combustion ratio decreased to 43% and 69% of those in pure sludge combustion, respectively, with a prominent synergistic emission reduction effect; the CO concentration increased slightly with the biomass ratio but the overall change was gentle, and the combustion efficiency increased by up to 0.12% with the increase of biomass

[收稿日期] 2025-07-30

[通信作者] 高洁(1993—), 女, 工程师, 主要从事工作为水污染防治理论与技术、污泥处理处置技术等工作, E-mail: 610740284@qq.com。

co-combustion ratio, all maintaining above 99%; the ash components were mainly dominated by sludge, co-combustion had little effect on ash components, the ash deposition tendency was controllable, and only a small amount of fluidized medium agglomeration occurred. [ **Conclusion** ] The co-combustion of sludge and wooden biomass pellets can effectively improve sludge combustion performance, reduce pollutant emissions, and has high combustion efficiency and controllable ash deposition risk. This paper provides an important theoretical basis and experimental support for the efficient and clean utilization of wastewater sludge fuel, and the optimal design and engineering application of bubbling fluidized bed co-combustion process.

**Keywords** bubbling fluidized bed sludge biomass co-combustion pollutant emission

我国作为一个发展中国家,目前面临着许多挑战,如能源安全、清洁环境和废物管理。工业发展和城市化进程的加快,大幅增加了城市污水污泥的产量。早期污泥处理处置的主要方法是填埋,由于大多数垃圾填埋场都超过了极限,又缺乏建设新垃圾填埋场的空间,同时考虑到固体废物减量化、无害化、资源化的政策,焚烧成为大城市污泥处理的主要途径。然而污泥单独焚烧面临着高含水率、低热值燃烧的挑战,与生物质的联合焚烧是解决污泥低热值燃烧问题的有效途径之一。由于国内丰富的生物质来源,生物质与污泥的混合焚烧可以缓解污泥单独焚烧热量不足的问题,并可以减少化石能源的使用量。流化床焚烧炉作为一种环境友好、经济高效的技术,能够有效燃烧污泥和生物质。

火力发电由于高品质煤炭使用增加及化石燃料使用带来的环境问题,对低品位煤炭使用的要求越来越高,污水污泥、生物质及其他废旧资源的能源化技术也同时受到关注。但在解决污水污泥内含有的污染物对发电设备的负面影响及尾气排放等问题方面的研究还不尽如人意。魏志强等<sup>[1]</sup>研究了市政污泥流化床掺烧生物质的 NO 与 SO<sub>2</sub> 排放特性。张涛等<sup>[2]</sup>通过热重分析(TGA)法探讨了烟煤耦合不同含碳废弃物时的燃烧特征参数变化规律,并进一步对掺混燃料的成灰特性进行了深入分析。目前主要的研究方向为生物质和污泥混烧后对烟气排放指标的影响以及生物质混烧对焚烧炉内流化状态的影响<sup>[3-4]</sup>,对中试或者实际规模的流化床焚烧炉掺烧污泥和生物质的研究较少,特别缺少针对燃烧后飞灰的性质的研究,而该特性是影响焚烧设备腐蚀、结焦的重要因素。

本文将干燥后的污泥颗粒与生物质燃料颗粒按不同的比例进行混烧,确认污泥耦合生物质发电的可行性,为此,首先利用实验室规模的鼓泡流化床,通过污泥固体燃料和生物质燃料的混烧试验,了解

各燃料的燃烧特性,并通过对其灰分进行捕集和分析,判断其结焦的可能性。

## 1 研究方法及原理

### 1.1 生物质燃料特性测定

本试验采用的固体燃料分别是市政污水厂污泥和木质生物质燃料颗粒,木质生物质燃料颗粒的原料以木质纤维为主,主要包括林业剩余物、木材加工产生的木屑等。另外,考虑到燃料投入装置,2种燃料破碎后利用筛子只提取直径为4~5 mm的颗粒使用。污泥和生物质燃料的元素分析和工业分析采用了美国材料与试验协会( ASTM ) E1915 标准,高位/低位发热量分析采用了《煤的发热量测定方法》( GB/T 213—2008)中的方法,结果如表1所示。元素分析结果显示(表1),污泥的 N 和 S 含量均比生物质燃料高,而 O 的含量低。特别是污泥的 N 含量是生物质燃料的 8 倍。不仅如此,污泥的总质量约 40% 是由灰分组成的,燃烧后的灰分将比生物质燃料多。

表1 污泥和生物质燃料的特性分析

Tab. 1 Analysis of Characteristics of Sludge and Biomass Fuel

项目	污泥	生物质燃料
C	48.90%	50.20%
H	9.20%	5.80%
N	6.40%	0.80%
S	1.80%	0.01%
O	26.50%	46.20%
含水率	20.00%	8.50%
挥发分	37.60%	80.50%
灰分	40.20%	0.24%
固定碳	4.20%	10.80%
高位热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	13 100	18 924
低位热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	12 209	17 710

测定了流动层物质石英砂的物理性质,主要是粒度分布、生物质本身的密度及堆积密度。本文以式(1)、式(2)为基础,基于 Geldart 等<sup>[5]</sup>的研究,得出了

适用于本试验的层流最小流动速度为 0.21 m/s。

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (1)$$

$$Re_{mf} = U_{mf} \rho_g D_p / \mu_g \quad (2)$$

其中： $Re_{mf}$ ——最低流动速度的雷诺数；

$Ar$ ——阿基米德数；

$C_1, C_2$ ——常数；

$\rho_g, \mu_g$ ——分别为常压、常温状态时介质的密度、黏度,  $\text{kg}/\text{m}^3, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ；

$U_{mf}$ ——床料的最小流化速度(层流最小

流动速度),  $\text{m}/\text{s}$ ；

$D_p$ ——床料的平均粒径,  $\text{m}$ 。

## 1.2 试验装置与方法

本试验采用实验室规模的鼓泡流化床反应器, 直径为 0.1 m、高度为 1.2 m, 反应器下部设置了布风板, 为了防止燃料输送位置的高温烟气倒流, 增加了  $\text{N}_2$  供应。为了捕集燃烧后生成的飞灰并对烟气进行冷却, 设置了旋风除尘器和冷凝器。使用烟气分析仪 (TESTO 350) 对烟气进行实时分析, 试验装置如图 1 所示。

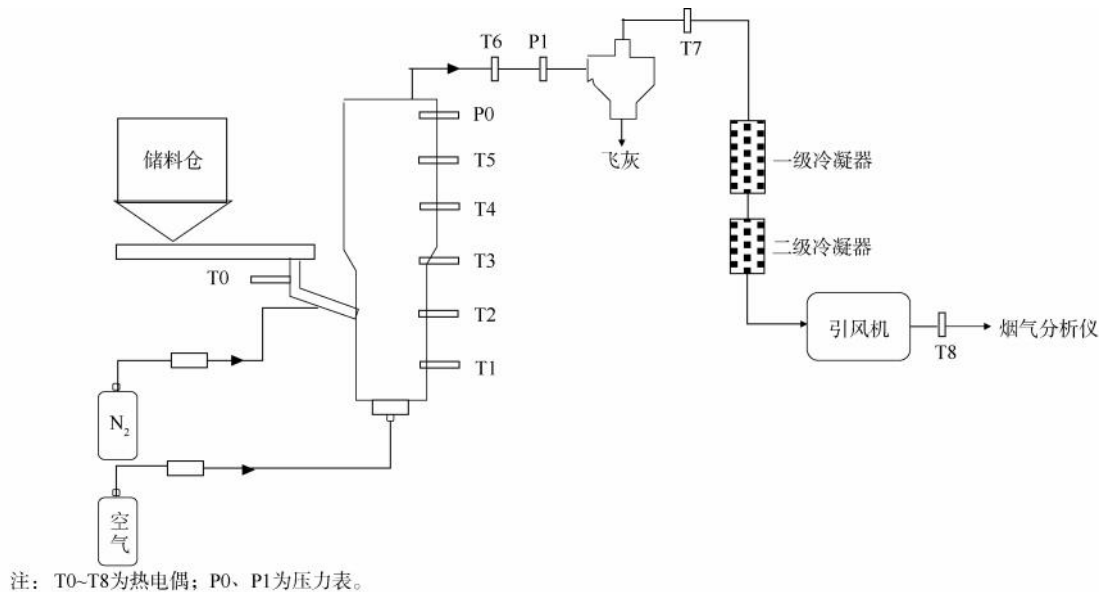


图 1 实验室规模鼓泡流化床系统

Fig. 1 Lab Scale Bubbling Fluidized Bed System

本文核心旨在分析污泥与生物质燃料混烧时的燃烧特性。试验由生物质混合率为 20%、50%、80% 的混烧试验以及污泥和生物质单独燃烧试验组成。如表 2 所示, 当量比维持在 1.65, 氧化剂为空气。为了维持当量比, 燃料供应量根据燃料的混合比例有所差异, 以投入热量维持在 3.0~3.5 kW 的水平。空气流量设定为 100 L/min。为了防止燃料生成高温气体在投入装置中的逆流, 在投入装置中注入  $\text{N}_2$  流量为 2 L/min。如图 1 所示, 沿鼓泡流化床反应器轴向布置多组热电偶, 实时监测各位置温度: 在反应器侧壁的燃料投加口 (T0 位置)、布风板上方 10 cm (T1 位置)、20 cm (T2 位置)、30 cm (T3 位置)、60 cm (T4 位置)、80 cm (T5 位置) 处, 以及除尘器进口 (T6 位置)、除尘器出口 (T7 位置)、反应器总出口 (T8 位置) 分别设置测温点。为了测定流入除尘器

的灰分的压差, 并保持焚烧炉的压力恒定, 在反应器顶部 (P0 位置) 和除尘器入口 (P1 位置) 测量了压力, 使用后端的引风机调整系统压力。冷凝器用常温的自来水冷却。

## 1.3 灰分分析

灰分的沉积倾向是基于生物质灰分的经验因子预测的。代表因子计算如式 (3)~式 (7) 所示, 每个参数的评估指标如表 3 所示。

$$\frac{B}{A} = \frac{M_{\text{CaO}} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{K}_2\text{O}} + M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{Al}_2\text{O}_3} + M_{\text{TIO}_2}} \quad (3)$$

$$\frac{S}{A} = \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (4)$$

$$\frac{I}{C} = \frac{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{M_{\text{CaO}}} \quad (5)$$

$$T_A = M_{Na_2O} + M_{K_2O} \quad (6)$$

$$B_{Al} = \frac{M_{Fe_2O_3}}{M_{K_2O} + M_{Na_2O}} \quad (7)$$

其中:  $B/A$ ——碱酸比;  
 $S/A$ ——硅铝比;  
 $I/C$ ——铁钙比;

$T_A$ ——总碱度;

$B_{Al}$ ——结渣指数;

$M_{CaO}$ 、 $M_{MgO}$ 、 $M_{K_2O}$ 、 $M_{Fe_2O_3}$ 、 $M_{SiO_2}$ 、 $M_{Al_2O_3}$ 、 $M_{Na_2O}$ 、 $M_{K_2O}$ 、 $M_{TiO_2}$ ——分别为灰分中  $CaO$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 、 $TiO_2$  的质量分数。

表 2 试验条件

Tab. 2 Experiments Conditions

项目	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
燃料类型	100%污泥	80%污泥+20%生物质	50%污泥+50%生物质	20%污泥+80%生物质	100%生物质
进料量/(g·min <sup>-1</sup> )	18	17	15	13	12
当量比	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
热量输入/kW	3.0	3.1	3.4	3.3	3.2
空气量/(L·min <sup>-1</sup> )	100	100	100	100	100

表 3 灰分沉积趋势

Tab. 3 Ash Deposits Tendency

指数	趋势		
	低	中	高
$B/A$ 值	$\leq 0.5$	$0.5 < B/A < 1$	$\geq 1$
$S/A$ 值	$< 0.31$ 或 $> 3$	—	$0.3 < S/A < 3$
$I/C$ 值	$< 0.31$ 或 $> 3$	—	$0.3 < I/C < 3$
$T_A$	$\leq 0.3$	$0.3 < T_A < 0.4$	$\geq 0.4$
$B_{Al}$	—	—	$< 10$

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃料性质分析

在实验室规模的流动层反应器试验之前,对本试验中使用的污泥和生物质燃料特性进行了基础分析,测定了氧化条件下的 TGA 曲线<sup>[6]</sup>。TGA 分析使用的分析仪为 TGA-100,试验条件设定如下:升温速率为 20 °C/min,终温为 800 °C,氧化剂(空气)流量为 50 mL/min,试样质量约为 10 mg。污泥和生物质燃料的 TGA 结果如图 2 所示。为了从 TGA 结果中得出挥发分及燃烧时的温度,将各图中切线的交点规定为燃烧时的温度。由图 2 可知,污泥挥发分在约 268 °C 的温度开始燃烧,之后在 440 °C 形成固定碳的燃烧。随着环境温度的增加,污泥的质量变化与生物质燃料的质量变化均经历了 2 个阶段,具有不同的特征。其中,污泥的挥发分质量分数约为 40%,因此在挥发分燃烧阶段,试样质量从初始值减少约 40%;该阶段结束后,进入固定碳燃烧阶段,直至试样剩余质量降至初始质量的 23% 左右。生物

质燃料也分 2 个阶段发生燃烧,但与污泥相比,固定碳燃烧阶段的质量变化与挥发分燃烧阶段相比相对较小。生物质燃料的挥发分燃烧在 300 °C 形成,与污泥相比,在较高的温度下形成挥发分燃烧。着火温度反映了燃料着火以及燃烧初期反应进行的难易程度,着火温度越低表明燃料越容易点燃,着火性能越好。生物质燃料的着火温度与其所含挥发分的种类密切相关,污泥中的挥发分以脂肪类、蛋白质和糖类为主,且污泥中的  $CaO$  等能够将难分解挥发分转变为易分解挥发分,促使污泥的着火温度降低。生物质燃料中的挥发分以较难分解的纤维素、半纤维素和木质素为主,因此,生物质的着火温度相对较高。燃尽温度是反应燃料燃尽特性的重要参数,燃尽温度越低表明燃料越容易燃尽,反之燃料较难燃尽。由图 2 可知,生物质燃料在 450 °C 时基本燃尽,而污泥在 450 °C 时仍有 30% 左右没有燃尽,说明生物质燃料比污泥更易燃尽,这是因为污泥中含有难以燃烧的有机物和无机盐。另外,挥发分燃烧开始后,生物质燃料的质量急剧下降,挥发分燃烧到质量的 5% 左右。这是因为生物质燃料的挥发分质量分数比污泥高 40% 以上,所以大部分质量都是由挥发分燃烧消耗的。与污泥相比,固定碳燃烧阶段不明显,但在 450 °C 时形成固定碳燃烧。另外,由于灰分的含量与污泥相比相对很小,通过分析可以确认,燃烧完成后质量分数只剩下 0~1%。通过 TGA 可知,污泥的燃烧温度为 268~440 °C,形成 172 °C 左右宽度的区间,生物质的燃烧温度为 300~450 °C,形成

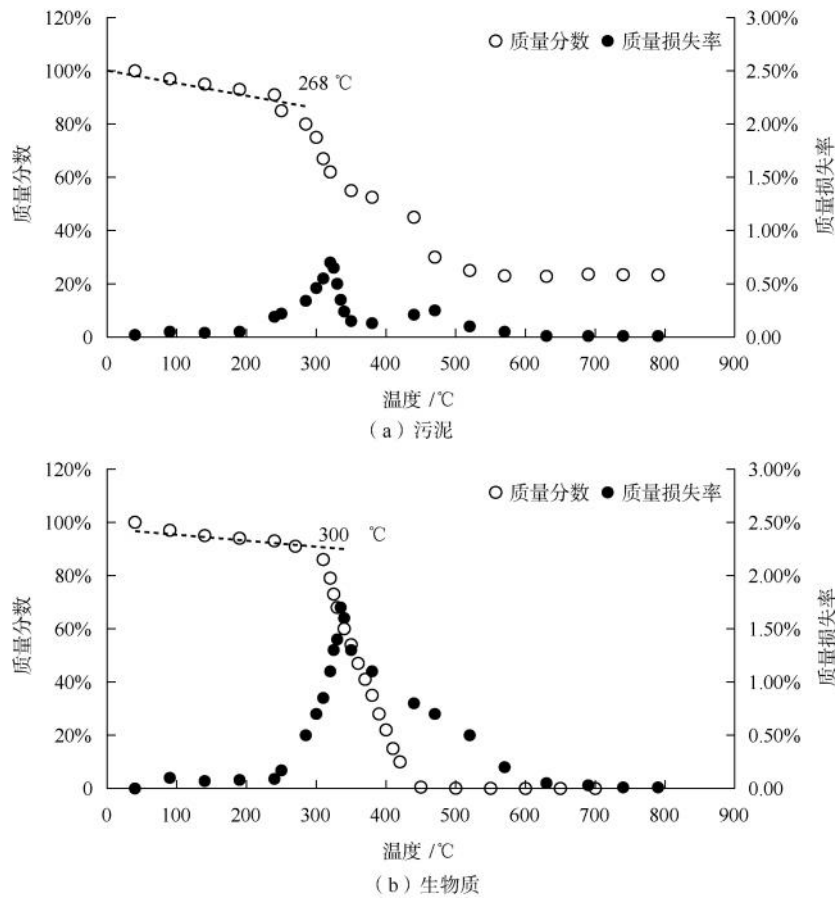


图 2 (a)污泥和(b)生物质燃料的 TGA 结果

Fig. 2 TGA Results of (a) Sludge and (b) Biomass Fuel

150 °C 左右宽度的区间。由此可以判断,生物质燃料在相对狭窄的温度区域内燃烧急剧进行,大部分由挥发分完成燃烧。因此生物质燃料的燃烧性相对污泥较好,原因可能是生物质燃料中挥发性有机物的化学键比活性污泥弱,且有机物的种类较为简单,这与其他研究结论一致<sup>[7-9]</sup>。

## 2.2 鼓泡流化床焚烧炉燃烧试验结果

不同试验条件下,对焚烧炉各测量位置的温度、压力测量结果如表 4 所示。整个测量时间在燃料投入后流动床温度稳定后实时测量了 30 min 左右,在此基础上得出平均值。从试验 1~试验 5,温度和压力的测量结果虽然在运行条件上有所差异,但整体趋势表现得非常相似。本实验室规模的鼓泡床反应器通过电炉将整个反应器温度设定为约 800 °C,反应器整体温度维持在 800~900 °C。从各位置的温度来看,温度最高的 T4 和 T5 以空气布风管为基准分别位于反应器 60 cm 和 80 cm 处。燃料以布风管为准,从 25 cm 的高度投入,流动的石英砂和燃料与

表 4 测量点的平均温度和压降

Tab. 4 Mean Temperatures and Pressure Drops at Measured Points

项目	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
T0/°C	33.2	33.5	34.2	34.3	33.6
T1/°C	745.2	753.3	796.3	778.5	765.6
T2/°C	764.2	772.1	815.7	798.2	789.3
T3/°C	770.1	782.1	823.4	810.5	790.3
T4/°C	850.2	864.2	898.2	878.5	873.2
T5/°C	801.4	813.5	842.2	825.3	820.5
T6/°C	400.5	414.3	442.4	425.5	420.5
T7/°C	250.5	265.3	289.4	270.4	268.3
T8/°C	26.3	26.7	28.4	26.4	26.3
P0/Pa	238.4	247.6	241.3	241.6	237.2
P1/Pa	80.4	83.5	85.3	83.4	86.7

空气混合后形成燃烧,尾气位于反应器 60~80 cm 的位置。T1~T3 位于反应器底部,石英砂流动活跃的位置,也是燃料燃烧和石英砂热量传递同时进行

的位置。根据运行条件,燃料量为 12~18 g/min,以高位发热量为准,为 3.0~3.5 kW,因此,与燃料发热相比,电炉的加热热量占主导地位。

在本试验中,压力的目的是维持燃烧室内和除尘器的压力差,使燃烧保持稳定。根据燃烧室内压力(P0 测得)和除尘器中压力(P1 测得)的压差调整引风机的转速,以保持约为 150 Pa,压差在测量时间内整体保持均匀。

在烟气采样位置上实时测量烟气组成的结果如图 3 所示。同时测量了烟气中 O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>x</sub> 的浓度。根据烟气成分,O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 以体积分数表示,CO、NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>x</sub> 以 mg/L 为单位表示,本测量数据是利用 TESTO 350 进行测量的。由图 3 可知,NO<sub>x</sub> 是平均变化幅度最大的烟气成分之一。NO<sub>x</sub> 的测定区分了 NO 和 NO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub> 主要组成成分为 NO,NO<sub>2</sub> 的量约占 NO<sub>x</sub> 总生成量的 1.5% 左右。在所有试验条件下,NO 浓度都是支配性的,NO<sub>2</sub> 的在大多数条件下质量浓度为 10 mg/L 左右,因此可以认为 NO<sub>x</sub> 生成特性与 NO 的生成特性相同。在试验 1 条件下,NO<sub>x</sub> 的质量浓度为 800~1 000 mg/L,随着生物质比例的增加,NO<sub>x</sub> 的浓度也逐渐降低,在试验 5 条件下,NO<sub>x</sub> 的质量浓度结果为 100 mg/L 以下,试验 1 的 NO<sub>x</sub> 生成量高出 8~10 倍。在本文中,鼓泡流化床都是在不超过 900 °C 的条件下进行燃烧试验的,可以判断热力型 NO<sub>x</sub> 的产生量不是很高。在这种燃烧环境中,可以认为影响 NO<sub>x</sub> 生成的是燃料自身含有的 N 燃烧产生的。根据污泥和生物质燃料的元素分析结果可知,污泥的 N 质量分数为 6.4%,生物质燃料的 N 质量分数为 0.8%,污泥的 N 含量是生物质燃料 N 含量 8 倍。因此认为 N 含量与 NO<sub>x</sub> 生成比率的差异有关。另外,在试验 2~试验 4 的运行条件下,NO<sub>x</sub> 的浓度逐渐减少,这是因为随着生物质混烧率的增加,反应器内投入的燃料整体 N 含量减少。这样的结果也可以用 SO<sub>x</sub> 的浓度变化来解释。SO<sub>x</sub> 的生成大部分是由燃料内的 S 或氧化剂中的 S 决定的。本文中,氧化剂为空气,因此可以认为 SO<sub>x</sub> 的形成取决于燃料内含有的 S。通过比较污泥和生物质燃料的元素分析结果,生物质的 S 含量几乎为零,因此在实际试验 5 的烟气分析结果中也可以认为没有 S 的生成。但对于试验 1,污泥中 S 质量分数约为 1.8%,这将导致 800~900 mg/L 的 SO<sub>x</sub> 形成。另外,与 NO<sub>x</sub> 一样,

随着生物质混烧率的增加,反应器中投入的燃料整体 S 含量减少,结果整体 SO<sub>x</sub> 的生成减少。综合分析 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 的浓度情况,为了减轻后端尾气处理设备的负荷,通过燃料前处理过程降低燃料内 N 和 S 的含量将非常重要。

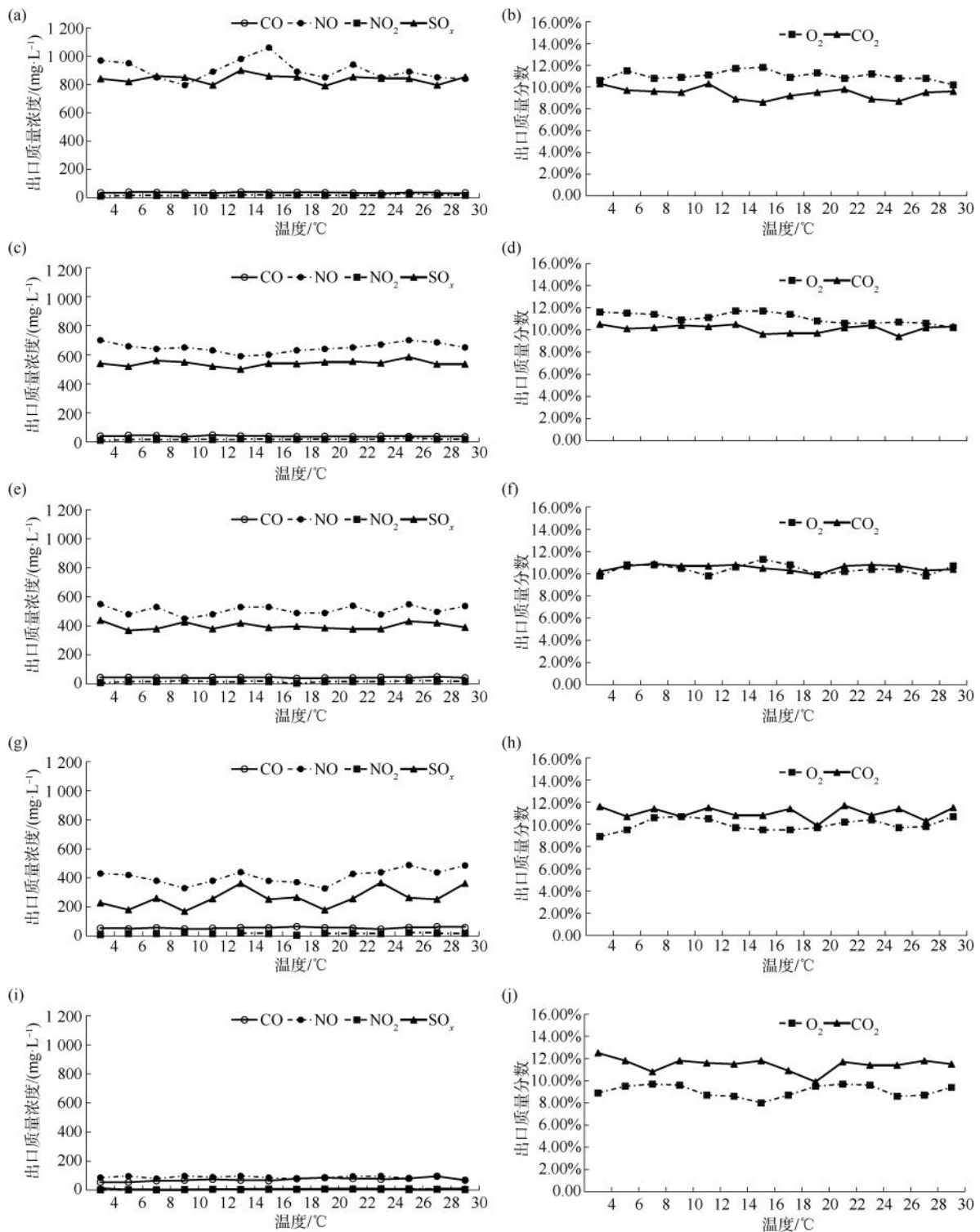
随着生物质混烧率的增加,CO 生成量有一定的增加,但是变化不是很明显。一方面由于生物质中 C 含量高于污泥,因此可以判断 CO 的生成相对高于污泥。因此,如果增加生物质的混烧率,CO 会有所增加。另一方面,由于在 TGA 中比较污泥和生物质的燃烧特性时,污泥明显区分了挥发分燃烧和固定碳燃烧,燃烧温度区域分布略广,与此形成鲜明对比的是,生物质的燃烧温度区域较小,因此生物质燃烧的效果较好,因此燃烧后的 CO 基本都转化为 CO<sub>2</sub>。

由图 3 可知,随着污泥燃烧时生物质的混烧率增大,NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 生成量明显减少,这是因为通过混烧生物质减少了燃料中的 N 和 S 成分,CO 浓度变化不大,原因是生物质的高燃烧性抑制了 CO 的生成。

表 5 给出了各试验条件下燃烧烟气排放浓度测定结果的平均值。平均值是基于图 3 中的实时测量数据按时间平均得出的结果。本文将当量比固定在 1.65 进行,结果显示 O<sub>2</sub> 质量分数为 9.1%~11.1%。根据各试验条件下燃烧尾气测定结果的平均值可知,生物质的混烧比例越高,O<sub>2</sub> 含量越少,因此 CO<sub>2</sub> 呈增加趋势。这可以看作是因为 TGA 结果中,与污泥相比,生物质的燃烧性更好,因此在相同当量比的条件下,生物质的混烧率相对越高,CO 向 CO<sub>2</sub> 的转化量就越大。根据平均值可知,试验 1 的 NO<sub>x</sub> 质量浓度约为 900 mg/L,试验 5 的 NO<sub>x</sub> 质量浓度约为 88 mg/L,相差约 10 倍。如前文所述,燃料 NO<sub>x</sub> 的生成占主导地位,通过生物质的混烧,投入的燃料内 N 含量减少,从而导致生成的 NO<sub>x</sub> 减少,这与 SO<sub>x</sub> 的生成趋势相同。

### 2.3 鼓泡流化床燃烧后灰分分析结果

灰分会在锅炉内沉积,对锅炉的寿命和传热效率有很大影响。本文以实验室规模的鼓泡流化床反应器燃烧后捕集的灰分为基础,进行了灰分的 X 射线(XRF)分析,代表性成分的结果如表 6 所示。并以 XRF 分析结果为基础,通过式(3)~式(7)导出了灰分的沉积倾向的相关因子。XRF 分析结果中,不同试验条件下灰分成分的差异不大。也就是说,污泥和生物质的混烧,在燃烧性能和尾气组成上存在



注:(a)~(b)为试验1;(c)~(d)为试验2;(e)~(f)为试验3;(g)~(h)为试验4;(i)~(j)为试验5。

图3 试验条件下的排放曲线

Fig. 3 Emission Curves under Testing Conditions

差异,但在灰分成分上没有太大差异。这样的结果可能是2种燃料灰分含量差异的结果,从污泥和生

物质燃料内的灰分质量分数来看,污泥为40.2%,生物质为0.24%。试验中生物质混烧率最高为

表 5 采样点的平均烟气排放浓度  
Tab. 5 Average Flue Gas Emission Concentration at Sampling Points

项目	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5
CO/(mg · L <sup>-1</sup> )	35.7	39.1	44.6	55.5	71.8
NO/(mg · L <sup>-1</sup> )	900.0	649.5	509.2	409.2	87.6
NO <sub>2</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	16.4	15.3	16.2	14.2	4.3
SO <sub>x</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	839.0	540.4	399.0	260.9	6.4
O <sub>2</sub>	11.1%	11.0%	10.4%	9.9%	9.1%
CO <sub>2</sub>	9.4%	10.1%	10.5%	11.0%	11.4%

表 6 燃料灰分的化学成分分析  
Tab. 6 Chemical Analyses of Tested Fuel Ashes

项目	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
试验 1	8.32%	4.23%	13.43%	22.54%	2.46%	12.35%	1.34%	2.34%	11.35%
试验 2	7.95%	4.14%	13.42%	21.53%	2.64%	12.53%	1.25%	2.45%	11.42%
试验 3	7.37%	3.74%	13.23%	21.43%	2.53%	13.32%	1.23%	2.53%	10.46%
试验 4	7.43%	3.84%	12.63%	23.42%	2.53%	12.42%	1.24%	2.14%	10.43%
试验 5	6.95%	1.64%	11.12%	27.45%	3.34%	11.53%	0.45%	1.34%	28.35%

表 7 燃料灰分的结渣、结垢和床团聚指数  
Tab. 7 Slagging, Fouling and Bed Agglomeration Indices for Tested Fuel Ashes

项目	B/A	S/A	I/C	T <sub>A</sub>	B <sub>AI</sub>
试验 1	0.81	1.68	0.92	10.78	1.05
试验 2	0.85	1.60	0.91	10.59	1.08
试验 3	0.84	1.62	0.79	9.90	1.06
试验 4	0.78	1.85	0.84	9.96	1.05
试验 5	1.15	2.47	2.46	10.29	2.76

以灰分的分析结果为基础,为分析灰分的沉积趋势,分别计算了  $B/A$ 、 $S/A$ 、 $I/C$ 、 $T_A$  和  $B_{AI}$ ,如表 7 所示。通过灰分  $B/A$ 、 $S/A$ 、 $I/C$  和  $T_A$  参数的分析判断,结垢的可能性很高。不仅如此, $B_{AI}$  小于 10,流化介质发生板结的可能性很大。但在本文中,试验后对流化介质进行分析,发现少量流化介质板结,但体积较小。这是因为实验室规模的鼓泡流化床反应器试验的特性是通过电炉将反应器整体控制在 800 °C 左右,包括焦油在内,可以引发流化介质板结的成分也在燃烧过程中被氧化。由于试验时间较短,没有投入足够的燃料来产生流化介质板结。为了观察流化介质板结的情况,有必要在实际工程用的鼓泡流化床中分析灰分引起的流化介质板结现象。仅凭本文的结果,很难明确流化介质和燃料之

间的关系,需要进一步对污泥和生物质燃料的灰分与流化介质之间的相关特性进行准确的研究。80%,但从燃料特性测定结果中污泥和生物质灰分质量分数来看,生物质的灰分不超过总质量的 10%,因此混烧后捕集的大部分灰分可以认为是污泥的灰分。除试验 5 外,试验 1~试验 4 污泥的灰分占主导地位,灰分分析结果没有太大差异。但是在试验 5 中, $SiO_2$  和  $Fe_2O_3$  的测量值相对高于试验 1,而  $Na_2O$ 、 $MgO$  和  $TiO_2$  的测量值相对较低,而污泥中 Si 和 Fe 的含量高于生物质燃料。本文使用的流化介质主要由  $SiO_2$ (90%)、 $Al_2O_3$ (4%) 和  $Fe_2O_3$ (3%) 组成。因此,认为流化介质对灰分内的  $SiO_2$  和  $Fe_2O_3$  产生了影响。

根据测定的灰分内的未燃分,计算得出燃烧效率,结果如表 8 所示,所有运行条件下,燃烧效率均在 99% 以上。随着生物质燃料混烧率的增加,燃烧效率小幅增加。由于燃烧效率均在 99% 以上,绝大部分碳都被氧化,但从定量上看,试验 4 的燃烧效率比试验 1 增加了 0.12%,验证了上述 TGA 试验中生物质燃料的燃烧性相对污泥较好的结论。

表 8 燃料飞灰的未燃烧碳比例和燃烧效率  
Tab. 8 Unburned Carbon Ratios and Combustion Efficiencies for Tested Fuel Ashes

项目	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
未燃烧碳	0.44%	0.43%	0.43%	0.35%
燃烧效率	99.56%	99.58%	99.65%	99.68%

### 3 结论

本文分析了污泥和生物质燃料的燃烧特性及灰分沉积特性。利用鼓泡流化床反应器,对 2 种燃料的单独燃烧和混烧进行了试验,通过温度和压力以及  $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $NO_x$ 、 $SO_x$  的测定结果,分析了燃烧特性。另外,通过燃烧过程中产生的灰分的捕集和 XRF 分析,同时对 2 种燃料的单独燃烧及混烧的灰分沉积特性进行了研究。TGA 显示,污泥焚烧分 2

个特征燃烧阶段,燃烧温度为 268~440 ℃。生物质燃料的燃烧温度为 300~450 ℃,在相对狭窄的温度区域内燃烧急剧,大部分燃烧由挥发分完成,且生物质燃料在 450 ℃时基本燃尽,而污泥在 450 ℃时仍有 30%左右没有燃尽,由此可以判断,生物质燃料的燃烧性相对污泥较好。实验室规模鼓泡流化床反应器各位置温度分布均匀,在 800~900 ℃,反应器 60~80 cm 处温度最高。这是因为反应器内烟气位于反应器 60~80 cm 处。在试验 1 条件下,NO 的平均质量浓度为 900 mg/L,随着生物质比例的增加,NO<sub>x</sub> 的浓度也逐渐降低,在试验 5 条件下,NO 的平均质量浓度为 87.6 mg/L,试验 1 条件下的 NO 生成量是试验 5 条件下的 10 倍以上。这可以认为是燃料内所含 N 含量差异的结果,SO<sub>x</sub> 也是由同样的原因产生的,随着生物质的混烧率增加,有抑制 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 生成的效果。通过鼓泡流化床反应器燃烧后捕集的灰分分析,污泥和生物质的混烧在燃烧性能和尾气组成上存在差异,但在灰分内的成分上没有发现太大差异。这样的结果是 2 种燃料灰分含量的差异导致的,污泥的灰分质量分数约为 40%,因此在试验 1~试验 4 条件下污泥的灰分占主导地位。另外,通过灰分的沉积倾向因子分析,所有试验条件下板结的可能性都很高,但是由于试验时间较短,且流化效果和实际工程相差较大,需要进一步通过工程型试验验证。通过灰分内的未燃尽成分分析,燃烧效率在所有条件下均在 99%以上,通过增加生物质的混烧率,燃烧效率可增加 0.12%。

### 参考文献

- [ 1 ] 魏志强, 马吉亮, 陈晓平, 等. 市政污泥流化床掺烧生物质的 NO 与 SO<sub>2</sub> 排放特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 151-157.  
Wei Z Q, Ma J L, Chen X P, et al. Study on NO and SO<sub>2</sub> emission characteristics of municipal sludge fluidized bed mixed with biomass[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 151-157.
- [ 2 ] 张涛, 袁天霖, 杨琨, 等. 煤与小麦秸秆及污泥燃烧及成灰特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(6): 580-589.  
Zhang T, Yuan T L, Yang K, et al. Co-combustion and ash formation characteristics of coal, wheat straw and sludge[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024, 30(6): 580-589.
- [ 3 ] 任少辉, 向家涛, 张世红, 等. 城市污泥干燥动力学特性及其与生物质共气化热电联产系统模拟[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 1-13.  
Ren S H, Xiang J T, Zhang S H, et al. Drying kinetics of sewage sludge and simulation of its co-generation system with biomass co-gasification[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 1-13.
- [ 4 ] 任少辉, 林立, 余桥, 等. 污泥与生物质共焚烧流化床反应器 CPFD 模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 257-267.  
Ren S H, Lin L, Yu Q, et al. CPFD simulation and validation for a sludge and biomass co-incineration fluidized-bed reactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(5): 257-267.
- [ 5 ] Geldart D. Types of gas fluidization[J]. Powder Technology, 1973, 7(5): 285-292.
- [ 6 ] 吴云生, 汪国梁, 银正一, 等. 市政污泥热解炭化工程应用及运行分析[J]. 给水排水, 2022, 48(6): 43-48.  
Wu Y S, Wang G L, Yin Z Y, et al. Application and operation analysis of sewage sludge pyrolysis carbonation project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(6): 43-48.
- [ 7 ] 王杰. 污泥与生物质混烧特性及对重金属迁移转化的影响机制[D]. 广州: 广州大学, 2021.  
Wang J. Combustion characteristics and mechanism of heavy metal migration and transformation in co-combustion of municipal sludge and biomass[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021.
- [ 8 ] 任少辉, 余桥, 张立民, 等. 生物质循环流化床掺烧污泥成型燃料实证研究[J]. 能源与环境, 2025(2): 8-10, 49.  
Ren S H, Yu Q, Zhang L M, et al. Empirical study on biomass circulating fluidized bed mixed with sludge to form fuel[J]. Energy and Environment, 2025(2): 8-10, 49.
- [ 9 ] 张涛, 袁天霖, 杨琨, 等. 煤与小麦秸秆及污泥燃烧及成灰特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(6): 580-589.  
Zhang T, Yuan T L, Yang K, et al. Co-combustion and ash formation characteristics of coal, wheat straw and sludge[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024, 30(6): 580-589.