

## 污泥掺烧松木屑及其协同固硫机制的实验研究

申宇婕<sup>1</sup>, 罗思义<sup>1,\*</sup>, 孙少杰<sup>1</sup>, 吴玉麟<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 中科智驭(山东)新能源技术有限公司, 临沂 276000)

**摘要:** 采用焚烧法处置污泥是目前广泛使用的污泥热处理手段, 但由于污泥热值低、灰分含量高、可燃性能较差, 燃烧过程中存在燃烧不稳定、污染严重等诸多问题。提出用松木屑与污泥进行混燃, 来实现污泥的稳定化、无害化和资源化利用。通过热重-红外联用(TG-FTIR)技术分析混燃的反应行为及产物成分, 同时通过燃烧实验对灰渣中的硫含量进行分析。研究表明, 污泥与松木屑的燃烧过程中挥发分析出及燃烧阶段失重占比最大。采用 Coats-Redfern 积分法进行燃烧动力学分析, 选择最佳的反应级数, 当松木屑掺烧比大于 50%, 频率因子大于  $600 \text{ min}^{-1}$  时, 通过 FTIR 发现, 样品燃烧的主要气相产物为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。掺烧松木屑可以将硫元素固定在灰渣中, 减少空气污染。

**关键词:** 污泥; 生物质; 燃烧反应; 硫

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2025)06-0082-08

## Experimental study of sludge blending with pine sawdust and its synergistic sulphur fixation mechanism

SHEN Yujie<sup>1</sup>, LUO Siyi<sup>1,\*</sup>, SUN Shaojie<sup>1</sup>, WU Yulin<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;  
2. Zhongke Zhiyu (Shandong) New Energy Technology Co., Ltd., Linyi 276000, China)

**Abstract:** Incineration is a widely used method for the thermal treatment of sludge disposal. However, sludge combustion faces several challenges, including low calorific value, high ash content, poor combustibility, unstable combustion processes and serious environmental pollution. The co-combustion of pine sawdust and sludge is proposed to achieve the stabilization, harmless treatment and resource utilization of sludge. The reaction behaviour and product components during co-combustion are analysed using thermogravimetric Fourier transform infrared spectroscopy (TG-FTIR). Additionally, the sulphur content in the ash residue is determined through combustion experiments. Results showed that the devolatilization and combustion stage accounts for the largest mass loss during the co-combustion of sludge and pine sawdust. The combustion kinetics of the blended samples were analyzed with the Coats-Redfern integration method to determine the optimal number of reaction stages. It was found that when the mixing ratio of pine sawdust exceeded 50% and the frequen-

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2020YFD1100302); 山东省重点研发计划项目(2024TSGC0801)

作者简介: 申宇婕(2000—), 女, 山西长治人。硕士, 研究方向为固体废弃物能源处理。E-mail: shenyj0816@163.com。

\* 通信作者: 罗思义(1981—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事固体废弃物能源化处理方面的研究。  
E-mail: luosiyi666@126.com。

cy factor was greater than  $600 \text{ min}^{-1}$ , the main gaseous-phase products identified by FTIR were  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ . Blending and co-combusting sludge with pine sawdust can effectively fix sulphur elements in the ash, thereby reducing air pollution.

**Key words:** sludge; biomass; combustion reaction; sulphur

污泥中含有大量有机质、氮、磷等养分和重金属等有害物质<sup>[1-2]</sup>,处理不当会对环境造成污染。生物质能是仅次于煤、石油、天然气的重要能源<sup>[3]</sup>,生物质具有高挥发分、低灰分、相对较高的热值、氮硫污染物低、净零  $\text{CO}_2$  温室气体排放等特点<sup>[4-5]</sup>。所以目前常将生物质作为辅助燃料与污泥混合燃烧来实现污泥的资源化、无害化利用,达到绿色低碳发展的目标。由于污泥中的硫含量通常高于生物质,燃烧过程中  $\text{SO}_2$  的排放会导致酸雨和燃烧设备的腐蚀,对燃烧过程中硫的控制是实现循环发展和清洁经济的关键。目前,学者们针对污泥与生物质掺烧开展了一些研究。GUO 等<sup>[6]</sup>发现了木质颗粒中的碱金属和碱土金属矿物捕获硫形成硫酸盐,减少共燃时的  $\text{SO}_2$  排放。魏志强等<sup>[7]</sup>研究了污泥掺混秸秆燃烧过程中的气态污染物燃烧特性,发现了污泥掺烧生物质能有效减排  $\text{SO}_2$  气体。尽管对污泥与生物质混燃中  $\text{SO}_2$  的排放研究不少,但对燃料成型处理的研究较少,且对成型燃料燃烧灰渣中硫的含量分布尚不明确,无法实现对混燃行为的有效调控及燃烧过程中硫的分布控制。

基于此,本文采用热重-红外联用(TG-FTIR)技术对污泥、松木屑及其混样进行分析,探究样品的燃烧反应行为及气相产物特性,并基于 Coats-Redfern 方法确定了燃烧反应的级数及活化能。同时考察了污泥和松木屑不同混燃比混燃过程灰渣中硫含量的分布,为工业应用中的污染物治理排放提供理论依据,实现绿色低碳发展。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验材料

实验样品选取松木屑为辅助燃料,来自某木材厂。污泥来自青岛某污水厂,将污泥样品放置在温度设置为  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  的干燥箱内 24 h 进行烘干。污泥与松木屑分别粉碎后在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 1 h 去除水分。将松木屑和污泥按照不同质量比混合备用。

### 1.2 工业分析、元素分析和热值测定实验

对松木屑和污泥样品分别参照《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)和《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)进行工业分析。使用上海苏进仪器设备厂生产的 SX-10-12 型高温马弗炉对松木屑和污泥的水分、灰分、挥发分和固定碳含量进行测定。样品的元素分析采用德国元素分析系统 vario EL cube 型元素分析仪,测定模式为 CHNS/O。使用上海密通机电科技有限公司生产的氧弹量热计 MTZW-A4 测定原料的热值。

### 1.3 X 射线荧光光谱(XRF)

使用荷兰帕纳科生产的 PANalytical Axios max 型 X 射线荧光光谱分析仪对样品的矿物组成进行分析。将松木屑和污泥分别在  $550$  和  $815 \text{ }^\circ\text{C}$  下灰化,通过压片法制样。测试条件为电压  $60 \text{ kV}$ ,电流  $160 \text{ mA}$ ,功率  $4 \text{ kW}$ 。

### 1.4 热重-红外联用(TG-FTIR)实验

采用 PerkinElmer 公司 STA8000 热重分析仪对样品颗粒进行测试。实验过程中,样品在  $10 \text{ mL/min}$  空气流量、 $20 \text{ }^\circ\text{C/min}$  升温速率条件下,由室温加热至  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,将 PerkinElmer 公司 Spectrometer Frontier 型傅里叶变换红外光谱仪与热重分析仪产气端相连,实时监测松木屑、污泥及其掺混样品燃烧过程中气态产物成分。傅里叶变换红外光谱仪基于分子内原子相对振动与转动特性,实现产物成分的精准分析<sup>[8]</sup>。

### 1.5 燃烧实验及灰渣中硫含量的测定

取配备好的样品粉末( $3 \pm 0.03$ ) g 加入模具中,置于冷固结合碳球形机压缩成型,压力  $15 \text{ MPa}$  保持  $5 \text{ min}$ ,以消除分子间作用力,然后将成型球团取出自然风干 24 h。将成型燃料放置在马弗炉中分别以

700、800、900 °C 的温度各燃烧 60 min, 期间保持马弗炉门微开以保证物料充分燃烧, 将燃烧后的固体残留物研磨进行元素分析, 测定灰渣中硫的含量。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 材料的理化特性

从表 1 可以看出, 污泥中灰分含量过高, 挥发分不易释放, 燃烧孔隙不发达, 导致燃烧过程中不能与氧气充分接触。松木屑与污泥相比, 挥发分含量高 23.07%, 具有很好的燃烧性能, 易于着火, 有助燃潜力。松木屑的氧含量相对较高, 降低了燃烧过程中对空气的需求量, 燃烧更容易进行。污泥的硫含量大于松木屑, 硫会导致燃烧过程中酸性气体的排放。污泥的热值也远低于松木屑。

表 1 污泥、松木屑的工业分析、元素分析和热值

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{ad}/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )
	$M_{ad}$	$V_{ad}$	$A_{ad}$	$C_{F,ad}$	$C_d$	$H_d$	$O_d$	$N_d$	$S_d$	
松木屑	5.28	56.84	31.49	6.39	33.25	4.52	24.27	0.90	0.29	17.47
污泥	3.22	33.77	60.98	2.03	17.85	2.79	11.30	2.66	1.20	6.77

注:  $M_{ad}$ 、 $V_{ad}$ 、 $A_{ad}$ 、 $C_{F,ad}$  分别为空气干燥基下测定的工业组分水分、挥发分、灰分、固定碳的质量分数;  $C_d$ 、 $H_d$ 、 $O_d$ 、 $N_d$ 、 $S_d$  分别为干燥基下测定的元素组分碳、氢、氧、氮、硫的质量分数;  $Q_{ad}$  为样品在空气干燥基的发热量。

表 2 列出了污泥和松木屑中的灰分成分。污泥中灰分的主要成分是  $Fe_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $P_2O_5$  和  $CaO$ 。松木屑中灰分的主要成分是  $CaO$ 、 $SiO_2$ 、 $K_2O$  和  $MgO$ 。

表 2 污泥和松木屑的元素组成

样品	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$P_2O_5$	$CaO$	$Al_2O_3$	$ZnO$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$	$TiO_2$	其他
污泥	32.34	21.37	18.69	9.53	7.34	2.31	2.23	2.00	1.19	1.11	0.48	1.41
松木屑	5.81	24.29	3.60	35.72	6.41	0.41	6.56	3.16	10.45	1.80	0.37	1.42

### 2.2 热重分析

图 1 为不同松木屑占比下污泥掺烧的 TG 和 DTG 曲线图。从图中可以看出燃烧过程可分为: 水分蒸发、挥发物释放及燃烧、固定碳燃烧和燃尽阶段。由于松木屑的挥发分含量高, 所以在松木屑的燃烧过程中挥发分占主导位置, 失重峰更明显。污泥与松木屑失重率存在明显差异, 污泥在整个过程的失重率为 41.5%, 远低于松木屑失重率 85.27%。

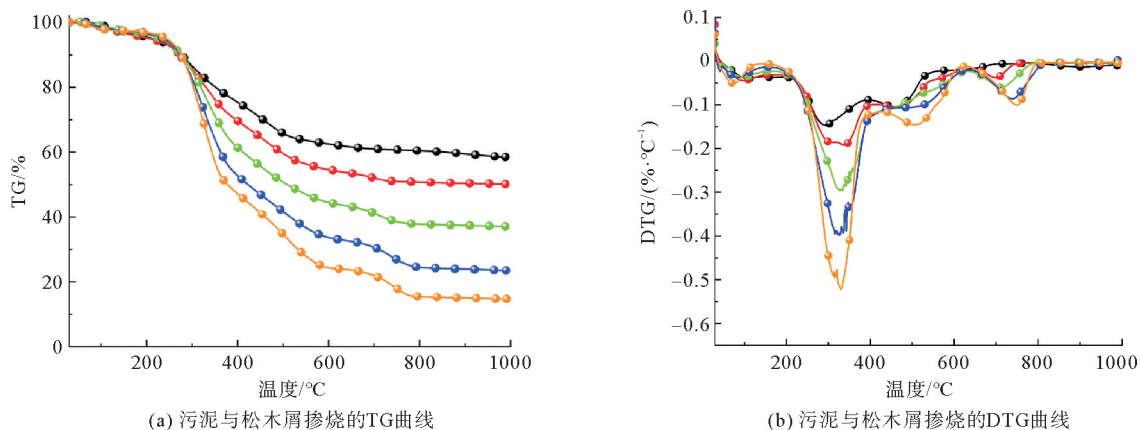


图 1 污泥与松木屑掺烧的 TG 和 DTG 曲线

—●— 污泥; —●— 80%污泥+20%松木屑; —●— 50%污泥+50%松木屑; —●— 20%污泥+80%松木屑; —●— 松木屑

从图 1(a)可以看出,所有掺烧过程的 TG 曲线均位于污泥和松木屑之间。随着松木屑占比增加,曲线向松木屑样品的曲线方向偏移,掺混样品的失重率逐渐增加,失重速率也逐渐增加,且失重率和掺混比例呈线性关系,这是因为松木屑占比增加使得混合燃料的灰分含量逐渐减小,挥发分含量增大。在图 1(b)中,随着松木屑占比增加,混合燃料的峰值逐渐增大,表明松木屑占比增加导致混合燃料的最大失重率增加,对应的温度也逐渐增加。这是因为松木屑的挥发分含量远大于污泥,松木屑占比的增加使混合燃料的挥发分含量逐渐增加,从而使燃烧更剧烈。

### 2.3 燃烧动力学分析

本文采用预置模型法,假定  $f(\alpha)$  符合动力学方程,即  $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$  为反应模型<sup>[9]</sup>,根据 Arrhenius 方程<sup>[10]</sup>,燃烧动力学方程可表示为

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) = A e^{-\frac{E}{RT}} (1-\alpha)^n \quad (1)$$

式中: $t$  为反应时间,s; $T$  为  $t$  时刻反应的温度,K; $A$  为频率因子, $s^{-1}$ ; $E$  为反应活化能,kJ/mol; $R$  为理想气体常数 8.314 J/(mol·K); $n$  为反应级数; $\alpha$  为失重率,可表示为

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \quad (2)$$

式中: $m_0$  为初始时刻样品的质量,mg; $m$  为某一时刻样品的质量,mg; $m_\infty$  为完成时刻样品的质量,mg。

由 Coats-Redfern 方程,假设物质的升温速率  $\beta = \frac{dT}{dt}$  为定值,带入式(1)可得

$$\frac{d\alpha}{df(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{RT}} dt \quad (3)$$

对式(3)用积分法分析可得

$$\ln \left[ \frac{G(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[ \left( \frac{AR}{\beta E} \right) \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

对该反应的温度区间和  $E$  值而言  $\frac{E}{RT} \gg 1$ ,故  $1 - \frac{2RT}{E} \approx 1$  可简化为

$$\begin{cases} \ln \left[ \frac{1 - (1-\alpha)^{1-n}}{(1-n)T^2} \right] = \ln \left( \frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT} & (n \neq 1) \\ \ln \left[ -\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left( \frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT} & (n = 1) \end{cases} \quad (5)$$

因此,当  $n \neq 1$  时, $y = \ln \left[ \frac{1 - (1-\alpha)^{1-n}}{(1-n)T^2} \right]$ ,当  $n = 1$  时, $y = \ln \left[ -\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right]$ , $x = \frac{1}{T}$ , $a = -\frac{E}{R}$ , $b = \ln \frac{AR}{\beta E}$ ,

可以转化为  $y = ax + b$ ,通过热重曲线的数值可以对  $y$  和  $x$  进行线性拟合,通过拟合结果得出斜率  $a$  和截距  $b$ ,从而求出活化能  $E$  和频率因子  $A$ <sup>[11]</sup>,考虑到生物质种类的多样性,取反应级数  $n = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0$ ,通过线性相关系数  $R^2$  确认拟合程度和反应最佳级数。

由于样品的失重主要发生在挥发分析出和燃烧阶段以及固定碳燃烧阶段,因此选取 220~625 °C 的温度范围,同时选取不同的反应级数进行线性回归拟合。在表 3 中列出了计算所得的反应级数、拟合方程以及相关系数。所有计算出的反应级数的相关系数均大于 0.9,这表明回归线的拟合效果非常理想。

表 3 单独燃烧及共燃烧动力学参数

样品	$n$	$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	$A/min^{-1}$	$R^2$	拟合公式
污泥	1.8	26.95	24.74	0.99	$y = -3241.15x - 7.87$
80%污泥+20%松木屑	2.0	32.48	89.04	0.99	$y = -3906.44x - 6.78$
50%污泥+50%松木屑	2.5	41.03	601.12	0.99	$y = -4934.79x - 5.10$
20%污泥+80%松木屑	3.0	49.01	3814.25	0.99	$y = -5894.46x - 3.43$
松木屑	3.0	53.49	9702.36	0.98	$y = -6434.26x - 2.59$

污泥的活化能比松木屑的活化能低,活化能指反应所必需的打破化学键的最小能量,较低的活化能意味着需要较少的能量来断裂化学键,说明反应更容易发生<sup>[12]</sup>。对于燃烧来说,活化能  $E$  越小表示物质越容易着火燃烧,表明污泥比松木屑更容易燃烧,松木屑燃烧所需能量更高。松木屑的频率因子为  $9702.36 \text{ min}^{-1}$ ,远大于污泥的频率因子  $24.74 \text{ min}^{-1}$ ,表明松木屑的燃烧相比污泥更剧烈。随着向污泥中掺混松木屑比例的增多,样品的燃烧活化能和频率因子逐渐增大。说明随着松木屑混合质量比的增加,燃烧反应开始时需要更多能量,污泥中掺混松木屑能显著提高燃烧反应的剧烈程度。与单独燃烧松木屑的情况相比时,污泥和松木屑的共燃烧有效地降低了反应过程的反应级数  $n$ ,说明了共燃的协同作用。

## 2.4 FTIR 分析

选取污泥和松木屑在燃烧 DTG 曲线上失重峰峰值温度下的红外光谱图,用于分析燃烧过程中成分的释放情况,此时燃烧产物的局部吸光度较高,有利于更直观地观察和分析。图 2 分别为污泥在第 1 和第 2 失重峰对应的温度(291 和 474 °C)下的红外光谱图,图 3 分别为松木屑在第 1、第 2 和第 3 失重峰对应的温度(331、506 和 752 °C)下的红外光谱图,样品红外光谱图对应的温度由 DTG 曲线中相应失重峰的温度确定。

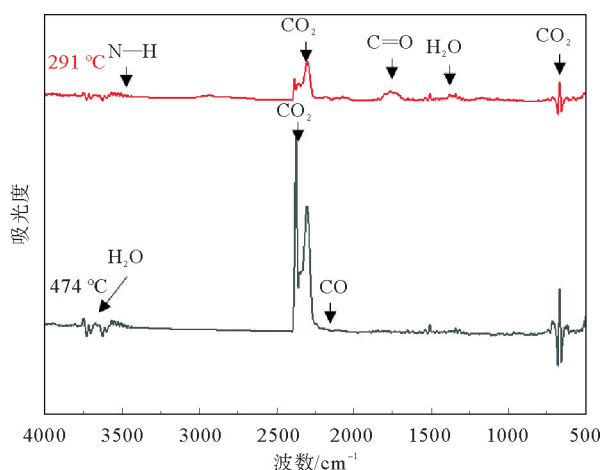


图 2 污泥峰值对应的红外光谱图

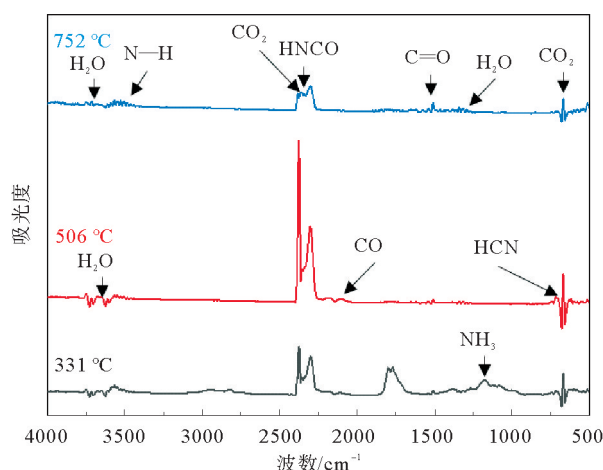


图 3 松木屑峰值对应的红外光谱图

由图 2 可知,波数范围  $4000 \sim 3500$  和  $1875 \sim 1275 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰为  $\text{H}_2\text{O}$  的特征峰,波数范围  $3500 \sim 3300 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应 N—H 伸缩振动的特征峰,表明产物中可能存在伯胺等有机物。波数范围在  $2400 \sim 2240$  和  $780 \sim 560 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应  $\text{CO}_2$  特征峰<sup>[13]</sup>;  $2240 \sim 2060 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应 CO, 在 291 °C 的红外光谱中,波数为  $1850 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应于 C=O 伸缩振动的特征峰,说明燃烧产物中存在具有醛、酮、羧酸及羧酸衍生物的可能性。

由图 3 可知,波数范围  $4000 \sim 3500$  和  $1875 \sim 1275 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰为  $\text{H}_2\text{O}$  的特征峰,通过脂肪族羟基的裂解产生。波数为  $3500 \sim 3300 \text{ cm}^{-1}$  的峰对应 N—H 伸缩振动的特征峰,存在伯胺物质,波数在  $2251$  和  $714 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰分别对应 HNCO 和 HCN 产物伸缩振动的特征峰,其中 HNCO、HCN 主要来自于植物细胞壁中少量的结构蛋白和果胶<sup>[14]</sup>,在 331 °C 对应的红外光谱,波数在  $2960$  和  $2875 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰分别对应于非对称和对称甲基团,  $2929$  和  $2850 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰分别对应于非对称和对称亚甲基团<sup>[15]</sup>,是松木屑中的半纤维素和纤维素的分解。在  $2400 \sim 2240$  和  $780 \sim 560 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应  $\text{CO}_2$  的特征峰,  $2240 \sim 2060 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应 CO 的特征峰,可以看出在 752 °C 时特征峰的出现趋势最小,是由于在 506 °C 时析出的  $\text{CO}_2$  和 CO 挥发性气体较多,之后温度再升高后挥发成分逐渐减少。波数范围  $1850 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$  的吸收峰对应 C=O 伸缩振动的特征峰,产物为醛、酮、羧酸及羧酸衍生物;  $1300 \sim 950 \text{ cm}^{-1}$

的吸收峰对应产物是醚、醇、酚等物质。

分析不同掺混比对相应的产物或官能团的整个燃烧过程中浓度变化的影响,选定的产物和官能团为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ ,对应的红外光谱特征波数分别为  $2310$ 、 $1716$ 、 $1342$ 、 $2798 \text{ cm}^{-1}$ [16]。如图 4(a),掺烧生物质后会出现一大一小的 2 个  $\text{CO}_2$  吸收峰,第 1 个吸收峰的峰值更大。随着松木屑的加入,第 1 个  $\text{CO}_2$  的吸收峰逐渐变宽,第 1 个峰值的  $\text{CO}_2$  是由于纤维素和木质素裂解、挥发分燃烧产生,第 2 阶段是焦炭燃烧产生  $\text{CO}_2$ 。如图 4(b), $\text{C}=\text{O}$  存在一个析出峰,  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  左右析出完成。如图 4(c),有机硫的析出温度在  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,而无机硫的分解温度则是从  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  开始,温度较高,所以在  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,从 FTIR 的  $\text{SO}_2$  吸光度曲线中可以看出样品中的有机硫析出氧化生成  $\text{SO}_2$ ,在  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  以后,随着温度的升高, $\text{SO}_2$  才逐渐从无机硫中分解出来。如图 4(d),在  $250 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$  时  $\text{HCl}$  随着挥发分的释放而析出, $\text{HCl}$  的浓度随着温度的升高先增大后减小,在  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  以后随着温度的升高,污泥和松木屑燃烧过程中  $\text{HCl}$  释放变缓。

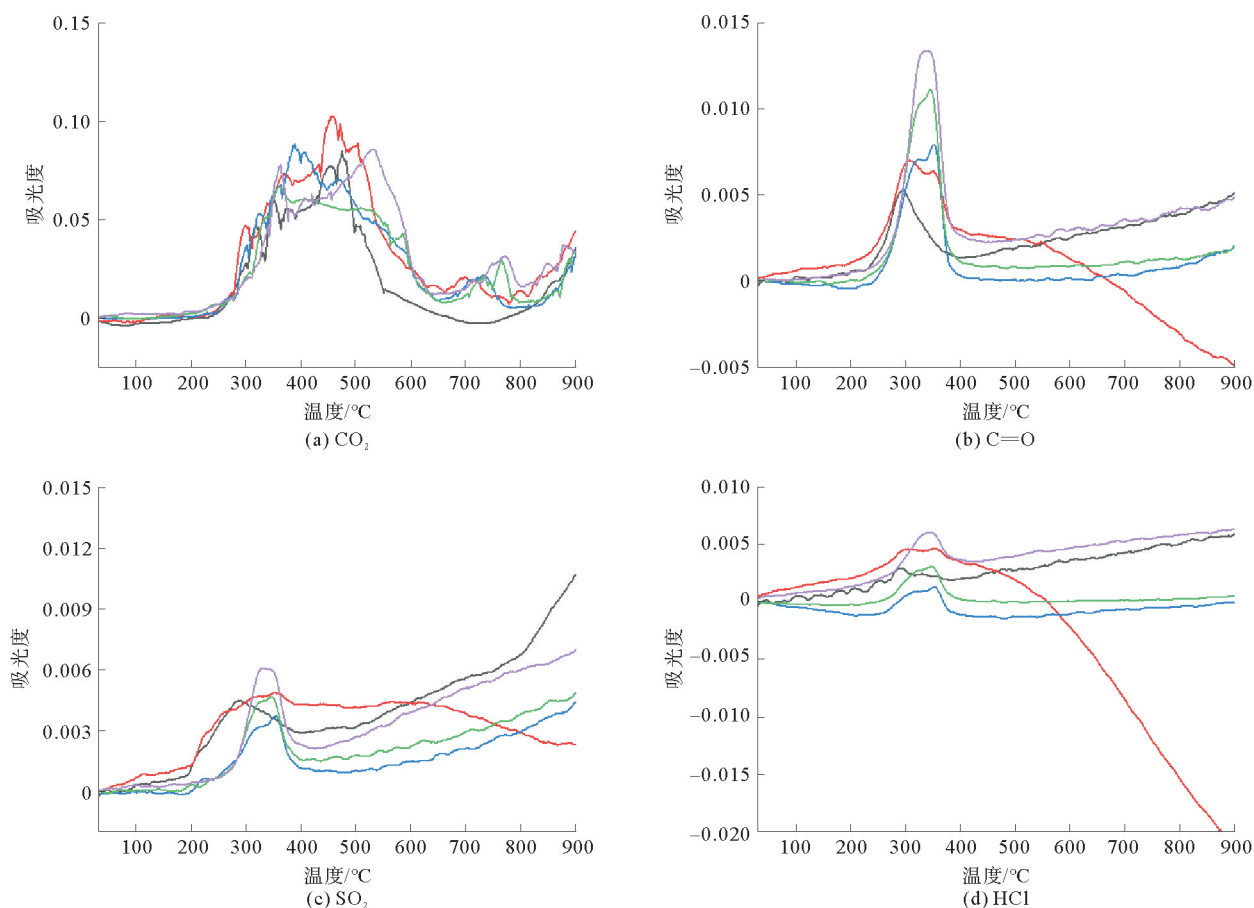


图 4 主要产物和官能团演化过程

— 污泥; — 80%污泥+20%松木屑; — 50%污泥+50%松木屑; — 20%污泥+80%松木屑; — 松木屑

## 2.5 燃烧灰渣中的硫含量

在不同温度下,对污泥和松木屑单独燃烧的灰渣及污泥和松木屑不同比例混合燃烧的灰渣做元素分析,结果列于表 4。元素分析结果显示了燃烧过程中被固定在灰渣中的硫元素含量。可以看出随着松木屑的掺混,硫元素被更多地固定在灰渣中,使烟气中的含硫污染物减少,但由于混合燃烧中硫的排放还受到燃料中硫含量、矿物质种类、温度等的综合影响,所以掺混比例和硫含量的变化不成线性关系。

表4 燃烧灰渣的元素分析

样品	反应条件	$N_d$	$C_d$	$H_d$	$S_d$	%
污泥		0.05	0.18	0.15	0.35	
80%污泥+20%松木屑	900 °C 60 min	0.07	0.19	0.08	0.46	
50%污泥+50%松木屑		0.11	0.29	0.11	0.67	
20%污泥+80%松木屑		0.11	0.34	0.14	0.72	
松木屑		0.12	5.07	0.10	0.03	
污泥		0.07	0.14	0.09	0.69	
80%污泥+20%松木屑	800 °C 60 min	0.07	0.18	0.09	1.17	
50%污泥+50%松木屑		0.11	0.29	0.09	1.02	
20%污泥+80%松木屑		0.06	0.25	0.11	0.68	
松木屑		0.17	5.32	0.14	0.04	
污泥		0.12	0.92	0.13	1.66	
80%污泥+20%松木屑	700 °C 60 min	0.12	0.73	0.12	1.09	
50%污泥+50%松木屑		0.09	0.55	0.10	0.76	
20%污泥+80%松木屑		0.08	2.80	0.11	0.43	
松木屑		0.18	8.77	0.14	0.03	

### 3 结论

1) 在恒定升温速率下,污泥和松木屑的燃烧 TG-DTG 曲线总体趋势相似,燃烧过程可分为:水分蒸发、挥发物释放及燃烧、固定碳燃烧和燃尽阶段。其中,挥发物释放及燃烧阶段的失重比例最高。随着松木屑掺混比例的增加,样品的失重率和最大失重率均显著增加。

2) 掺烧松木屑可以大大提升样品反应的剧烈程度,频率因子从污泥单独燃烧的  $24.74 \text{ min}^{-1}$  增加至松木屑掺混比 80% 时的  $3814.25 \text{ min}^{-1}$ ,样品的活化能会有小幅度的增加,污泥和松木屑在混燃中存在协同作用。

3) 由 FTIR 可知,污泥燃烧的主要产物有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、伯胺等有机物,具有醛、酮、羧酸及羧酸的衍生物。松木屑燃烧的主要产物有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{HNCO}$ 、 $\text{HCN}$ 、醛、酮、羧酸及羧酸衍生物和醚、醇、酚等物质。

4) 污泥掺烧松木屑促使硫元素被固定在灰渣中。

### 参考文献(References):

- [1] CHEN G Y, TIAN S, LIU B, et al. Stabilization of heavy metals during co-pyrolysis of sewage sludge and excavated waste[J]. Waste Management, 2019, 103: 268-275.
- [2] 段先月, 蔡宇凌. 污泥处理及资源化再利用研究进展[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(4): 128-133.  
DUAN Xianyue, CAI Yuling. Research progress on sludge treatment and resource utilization[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(4): 128-133.
- [3] 马爱玲, 谌伦建, 黄光许, 等. 生物质与煤混烧的热重-红外试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 124-128.  
MA Ailing, CHEN Lunjian, HUANG Guangxu, et al. TG-FTIR experimental study on co-firing of biomass and coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 124-128.
- [4] 胡善超. 污泥和生活垃圾/生物质的混合热利用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
HU Shanchao. Study on thermal utilization of sludge blended with municipal solid waste/biomass[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [5] 陆强, 谢文鑫, 胡斌, 等. 双碳时代下多源生物质热化学转化资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(3): 1-20.  
LU Qiang, XIE Wenxin, HU Bin, et al. Research progress on the resource utilization of multi-source biomass thermo-chemical conversion for carbon peaking and carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(3): 1-20.
- [6] GUO F H, ZHONG Z P. Co-combustion of anthracite coal and wood pellets; Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant

- emissions and ash slagging[J]. *Environmental Pollution*,2018,239:21-29.
- [7] 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 Zhiqiang, MA Jiliang, CHEN Xiaoping, 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.
- [8] 刘钊. 生物质与煤混烧及其污染物排放特性[D]. 保定:华北电力大学,2014.  
LIU Zhao. Combustion and pollutant emissions characteristics of coals blended with biomass[D]. Baoding: North China Electric Power University,2014.
- [9] LIU G H, MA X Q, YU Z. Experimental and kinetic modeling of oxygen-enriched air combustion of municipal solid waste[J]. *Waste Management*,2009,29(2):792-796.
- [10] LIN Y S, MA X Q, YU Z S, et al. Investigation on thermochemical behavior of co-pyrolysis between oil-palm solid wastes and paper sludge[J]. *Bioresource Technology*,2014,166:444-450.
- [11] WANG X B, HU Z F, DENG S H, et al. Kinetics investigation on the combustion of biochar in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*,2015,34(3):923-932.
- [12] GAI C, DONG Y P, ZHANG T H. The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions[J]. *Bioresource Technology*,2013,127:298-305.
- [13] 张德升,刘林,左宗良. 脲醛树脂类废弃建筑垃圾热解处理研究[J]. *青岛理工大学学报*,2024,45(2):117-124.  
ZHANG Desheng, LIU Lin, ZUO Zongliang. Study of the pyrolysis of construction waste containing urea-formaldehyde resins[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*,2024,45(2):117-124.
- [14] 王树荣,刘倩,郑赟,等. 基于热重红外联用分析的生物质热裂解机理研究[J]. *工程热物理学报*,2006,27(2):351-353.  
WANG Shurong, LIU Qian, ZHENG Yun, et al. Mechanism study of biomass pyrolysis by thermogravimetric analysis coupled with Infrared Spectroscopy[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*,2006,27(2):351-353.
- [15] MARCILLA A, GÓMEZ-SIURANA A, GOMIS C, et al. Characterization of microalgal species through TGA/FTIR analysis: Application to Application to *nanochloropsis* sp[J]. *Thermochimica Acta*,2009,484(1):41-47.
- [16] PENG X W, MA X Q, LIN Y S, et al. Co-pyrolysis between microalgae and textile dyeing sludge by TG-FTIR: Kinetics and products[J]. *Energy Conversion and Management*,2015,100:391-402.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

### (上接第 54 页)

- [13] 丁智,虞健刚,孙苗苗,等. 越江地铁循环荷载下软黏土累积应变特性及微观结构特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2021,52(3):948-959.  
DING Zhi, YU Jiangang, SUN Miaomiao, et al. Strain accumulation and microstructure characteristics of soft clay under cross-river subway loading[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*,2021,52(3):948-959.
- [14] 丁智,庄家煌,魏新江,等. 越江地铁荷载作用下软黏土孔压试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2020,39(S1):3178-3187.  
DING Zhi, ZHUANG Jiahuang, WEI Xinjiang, et al. Experimental study of pore pressure model of soft clay under cross-river subway loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2020,39(S1):3178-3187.
- [15] 宫全美,周顺华,王炳龙. 地铁隧道地基土孔隙水压力变化及液化性研究[J]. *岩土工程学报*,2004(2):290-292.  
GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, WANG Binglong. Variation of pore pressure and liquefaction of soil in metro[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2004(2):290-292.
- [16] 赵书凯. 地铁行车荷载下软粘土微观结构变形破坏机制研究[D]. 上海:同济大学,2006.  
ZHAO Shukai. The study on the micro-structure distortion mechanics of soft clay under the subway-included loading[D]. Shanghai: Tongji University,2006.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)