

# Combustion characteristics and kinetics during co-combustion of bituminous coal in Linhuan Mining Area, Anhui Province and municipal sludge

Ziwei XIA<sup>1,2</sup>, Liugen ZHENG<sup>1,2\*</sup>, Chuncai ZHOU<sup>3</sup>, Xiangping WEI<sup>4</sup>, Xianglin DONG<sup>4</sup>

1. School of Resource and Environment Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Hefei, Anhui 230601, China

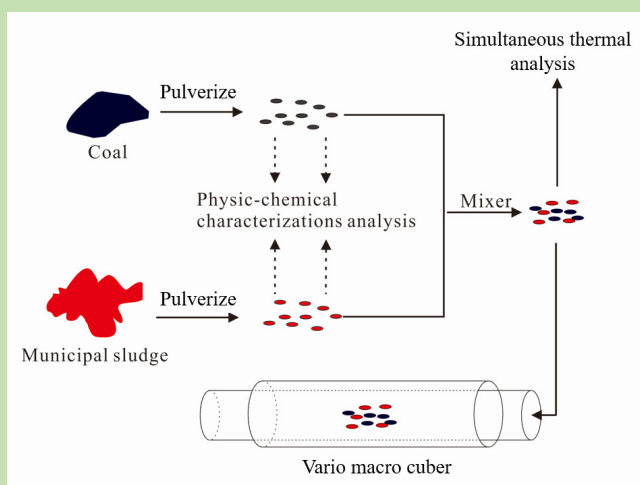
3. School of Resource and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

4. Geological Survey Division, Huaibei Coal Mining Group Corporation, Huaibei, Anhui 235000, China

**Abstract:** Coal samples from coal-fired power plants and sludge samples from domestic sewage treatment plant were collected in Linhuan Industrial Park in Huaibei, Anhui Province. The co-combustion experiments of coal and sludge under different mixing ratios were carried out by thermogravimetric analysis (TGA). The kinetics analysis of the mainly weightlessness stage of fuel was studied by five reaction kinetics models, and the combustion characteristics of coal and sludge were revealed. Results showed that the coal sample had one weight loss peak at the temperature of 529 °C while sludge had three ones at the temperature of 140, 293 and 430 °C, indicated that the combustion process of sludge was divided into three stages of weightlessness while coal only had one stage of weightlessness. The flammability index and combustion characteristics index of coal were  $11.36 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$  and  $47.16 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ . Compared with coal, the flammability index and combustion characteristics index of sludge were lower,  $10.74 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$  and  $13.04 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ , respectively. The combustion characteristics of the reaction was increased by adding sludge to coal, and the mixing ratio was preferably 90 (coal): 10 (sludge). As the heating rate increases, the weight loss of coal and sludge decreases, and the burning weight loss rate increases. The DTG curves of all samples were shifted to the high temperature side, resulting in thermal hysteresis. During the fixed carbon burnout phase, the activation energy of the blended fuel was between the two kinds of raw materials, and decreased with the addition of sludge, which proved that the addition of sludge can effectively improve the reactivity of coal and promote its combustion process.

The combustion process of sludge was divided into three stages of weightlessness while coal only had one stage of weightlessness. The flammability index and combustion characteristics index of coal were  $11.36 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$  and  $47.16 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ . Compared with coal, the flammability index and combustion characteristics index of sludge were lower,  $10.74 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$  and  $13.04 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ , respectively. The combustion characteristics of the reaction was increased by adding sludge to coal, and the mixing ratio was preferably 90 (coal): 10 (sludge). As the heating rate increases, the weight loss of coal and sludge decreases, and the burning weight loss rate increases. The DTG curves of all samples were shifted to the high temperature side, resulting in thermal hysteresis. During the fixed carbon burnout phase, the activation energy of the blended fuel was between the two kinds of raw materials, and decreased with the addition of sludge, which proved that the addition of sludge can effectively improve the reactivity of coal and promote its combustion process.

**Keywords:** coal; sludge; co-combustion; combustion characteristic; kinetics



收稿: 2019-12-20, 修回: 2020-03-30, 网络发表: 2020-04-23, Received: 2019-12-20, Revised: 2020-03-30, Published online: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 41702176); 安徽省交通航务工程有限公司科技开发项目(编号: NO. JTHW-2017K1); 淮北矿业集团有限责任公司科技项目(编号: HK-2018-1)

作者简介: 夏紫薇(1996-), 女, 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 环境工程专业, E-mail: xiaziwei@stu.ahu.edu.cn; 郑刘根, 通讯联系人, E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn.

**引用格式:** 夏紫薇, 郑刘根, 周春财, 等. 安徽临涣矿区烟煤与生活污泥共燃的燃烧特性与动力学特征. 过程工程学报, 2021, 21(1): 108-115.  
Xia Z W, Zheng L G, Zhou C C, et al. Combustion characteristics and kinetics during co-combustion of bituminous coal in Linhuan Mining Area, Anhui Province and municipal sludge (in Chinese). Chin. J. Process Eng, 2021, 21(1): 108-115, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219375.

# 安徽临涣矿区烟煤与生活污泥共燃的燃烧特性与动力学特征

夏紫薇<sup>1,2</sup>, 郑刘根<sup>1,2\*</sup>, 周春财<sup>3</sup>, 魏祥平<sup>4</sup>, 董祥林<sup>4</sup>

1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601

2. 安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601

3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009

4. 淮北矿业(集团)有限责任公司通防地测部, 安徽 淮北 235000

**摘 要:** 以安徽淮北临涣工业园燃煤电厂煤样品和生活污水处理厂污泥样品为研究对象, 采用热重分析法(TGA)对不同混合质量比条件下的煤与污泥进行了共燃实验, 同时通过五种反应动力学模型研究了不同燃烧阶段煤、污泥样品共燃的动力学特征, 揭示了煤和污泥的燃烧特性。研究结果表明, 煤在 529℃出现一个失重峰, 污泥分别在 140, 293 和 430℃出现三个失重峰, 表明污泥的燃烧过程分为三个失重阶段, 而煤只有一个失重阶段。煤的可燃性指数与综合燃烧特性指数为  $11.36 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$ ,  $47.16 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ , 与煤相比, 污泥的可燃性指数与综合燃烧特性指数较低, 分别为  $10.74 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})$ ,  $13.04 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ 。在煤中添加污泥可以提高反应的燃烧特性, 混合质量比以 90(煤):10(污泥)为宜。随升温速率升高, 煤与污泥的失重减少, 燃烧失重速率增加, DTG 曲线向高温区移动, 产生热滞后现象。在固定碳燃尽阶段, 混合燃料的活化能均位于两种原料之间, 并且随污泥添加量增加而降低, 表明污泥的添加有效提高了煤的反应活性并促进其燃烧过程。

**关键词:** 煤; 污泥; 共燃; 燃烧特性; 动力学

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)01-0108-08

## 1 前 言

随着我国城市化、工业化进程的加速, 污水排放量不断增加, 污泥是污水处理过程的副产品。根据《中国城市建设统计年鉴》, 2016 年中国污水处理厂干污泥产生量约 800 万吨。这些污泥释放出的恶臭气味污染空气, 且含重金属、病原微生物、寄生虫卵和可降解性差的有机化合物等许多有害物质<sup>[1]</sup>。传统的污泥处理方法, 如垃圾填埋和农业使用, 会对空气、土壤和水带来潜在的环境风险。然而, 污泥又是一种潜在的生物质资源, 其有机物质含量较高且能产生较高的热量。有研究表明, 污泥焚烧可以破坏污泥中的有毒有机成分, 降低对环境的污染<sup>[2]</sup>。

基于污泥具有高水分、高灰分、高密度、高黏度的特点和低热值、单独燃烧不彻底、挥发分不易析出等缺点<sup>[3,4]</sup>, 研究发现可通过添加煤与污泥共燃来解决以上问题<sup>[5]</sup>, 且该方法已在火力发电厂的焚化炉及水泥或砖窑中广泛应用<sup>[6]</sup>。众多研究发现, 污泥中的挥发性物质、固定碳、矿物成分和灰分与煤有巨大差异, 其燃烧行为与煤也有很大不同<sup>[7]</sup>; 煤与污泥的混合比例对其混合样的着火及燃烧特性有较大影响<sup>[8]</sup>; 在煤中加入污泥与木

质物质的混合燃料可降低挥发性、着火点及燃尽温度<sup>[9]</sup>。在水稻秸秆与煤粉的混合燃烧过程中发现, 较低的升温速率可促进燃烧反应充分进行<sup>[10]</sup>。在煤中添加垃圾衍生材料(RDF)可促进煤粉的燃烧反应, 且掺混比为 50%时促进作用最佳<sup>[11]</sup>。目前研究煤与污泥混合燃烧动力学的方法大多直接假定为一级反应, 而事实上污泥的燃烧过程比较复杂, 简单的假设无法揭示其反应机理<sup>[12]</sup>。

本工作以燃煤电厂的烟煤(Bituminous Coal, BC)及生活污泥(Municipal Sludge, MS)为研究对象, 采用热重分析法(TGA)对不同混合质量比下的煤与污泥进行了共燃实验, 同时通过反应动力学模型研究了不同燃烧阶段煤、污泥样品共燃的动力学特征, 揭示了煤和污泥共燃的燃烧特性, 研究结果可为污泥资源化利用和环境治理提供依据。

## 2 实 验

### 2.1 实验原料

实验所用煤样为安徽淮北临涣矿区燃煤电厂的新鲜煤样, 研磨后过 100 目(149  $\mu\text{m}$ )筛。污泥取自淮北临涣生活污水处理厂, 将污泥自然干燥 20 天、研磨后过 100 目筛, 将样品保存在密封的塑料袋中备用。制备一

系列煤和污泥混合样品, 污泥质量百分比分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 分别命名为 BC90MS10, BC80MS20, BC70MS30, BC60MS40 和 BC50MS50。

## 2.2 样品分析

### 2.2.1 基础特性分析

样品的元素组成通过 Vario Macro Cuge 元素分析仪

(德国艾力蒙塔公司)进行测试, 工业分析采用 SDTA5000a 型工业分析仪(湖南三德公司)进行测试, 其中, 氧元素与固定碳均通过差减法计算得到。样品的灰成分分析采用 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪(日本理学公司)分析测定。煤和污泥样品的工业分析和元素分析见表 1, 灰成分分析见表 2。

表 1 样品的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of samples

Sample	Proximate analysis/wt%				Ultimate analysis/wt%					Lower heating value/(MJ/kg)
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	C	H	O	N	S	
Coal	1.09	38.72	21.37	38.82	63.75	4.20	10.55	0.93	0.84	19.78
Sludge	8.02	50.19	39.63	2.16	22.91	3.38	17.10	3.04	1.11	11.53

Notes: M: moisture; A: ash yield; V: volatile matter; FC: fixed carbon; ad: air dried basis.

表 2 煤和污泥样品的灰成分

Table 2 Composition of coal and sludge ash samples

Sample	Composition/wt%						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
Coal	18.49	10.23	0.35	1.56	0.49	0.14	0.19
Sludge	32.77	9.42	7.76	4.48	1.36	0.56	1.29

### 2.2.2 热重分析

实验采用 STA449F3 型同步热分析仪(德国耐驰公司)进行测试, 测量温度范围为室温~1500℃, 量热灵敏度为 1 μW, 温度精度 0.1℃。实验温度按设定程序以 10, 20, 60℃/min 的升温速率由室温升至 900℃, 空气作为载气。对每个样品进行三次实验以确认重现性, 结果显示重现性良好, 误差在 3% 以内。

### 2.2.3 燃烧动力学分析

热重曲线中采用等温热重曲线和非等温热重曲线求取动力学方程和动力学参数<sup>[13]</sup>。固体反应的动力学参数(活化能和指前因子)可通过微分和积分方法确定<sup>[14]</sup>。通过积分评估煤、污泥及其混合物的动力学性质。在动力学研究中采用分解速率方程, 见式(1):

$$\frac{dx}{dt} = K(T)f(x) \quad (1)$$

式中,  $x$  为燃烧过程中的质量转换率(%),  $t$  为燃烧时间(min),  $T$  为绝对温度(K),  $K(T)$  为反应速率,  $f(x)$  为假设模型, 其由反应机制确定。由式(1)可通过 Arrhenius 方程得到式(2):

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

式中,  $A$  为指前因子( $\text{min}^{-1}$ ),  $E$  为活化能(kJ/mol),  $R=8.314 \text{ J/(K mol)}$ , 为通用气体常数。非等温热重分析用于燃烧

时, 升温速率  $H(\text{k/min})$  是恒定的, 可通过式(3)描述式(1)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{H} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(x) \quad (3)$$

经过整理后得到式(4):

$$g(x) = \int_0^x \frac{dx}{f(x)} = \frac{A}{H} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (4)$$

$g(x)$  为积分转换函数。由于  $E/RT$  远大于 1, 温度积分可通过 Cauchy 规则近似为式(5):

$$\frac{A}{H} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \cong \frac{ART^2}{HE} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

整理式(4)和(5), 方程两侧取对数得出式(6):

$$\ln\left[\frac{g(x)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR(1 - 2RT/E)}{HE}\right] - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

在式(6)中的表达式中,  $\ln[AR(1 - 2RT/E)/HE]$  对于  $E$  的大多数值和燃烧的温度范围基本是恒定的。因此, 通过绘制  $\ln[g(x)/T^2]$  和  $1/T$  的直线  $E/R$  可获得斜率, 且可通过斜率计算活化能  $E$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 单一样品热重分析

图 1 为煤、污泥在 20℃/min 的升温速率下单独燃烧的 TG-DTG 曲线。从图可以看出, 煤与污泥的热重曲

线存在很大差异。煤的 TG 曲线在 314~651 °C 区间出现一次明显的失重, 占总失重的 97.15%, DTG 曲线上对应一个独立的失重过程。煤的失重速率峰值出现在 529 °C, 为 2.478%/°C。污泥的燃烧过程分为三个失重阶段, 即水分脱水、挥发物析出和燃烧、固定碳燃尽阶段<sup>[15]</sup>, 温度区间的分界点取 DTG 曲线上两区间相邻处的极小值点。在 122~201 °C 之间为污泥样品的水分脱水阶段, 占总失重的 8.21%; 201~380 °C 之间为污泥样品的挥发物析出和燃烧阶段, 是燃烧过程的主要控制阶段, 占总失重的 43.68%; 380~659 °C 之间为污泥样品的固定碳燃尽阶段, 占总失重的 34.08%。可以看出, 污泥的失重主要发生在挥发物析出和燃烧及固定碳燃尽阶段。污泥的失重速率峰值分别在 140, 293 及 430 °C, 为 0.524%/°C, 1.050%/°C 和 0.649%/°C。

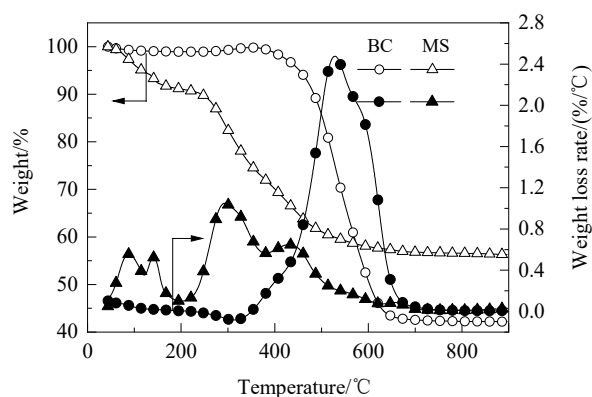


图1 煤、污泥单独燃烧的 TG-DTG 曲线  
Fig.1 TG-DTG curves of coal and sludge

煤与污泥燃烧失重阶段的不同与煤样和污泥中的

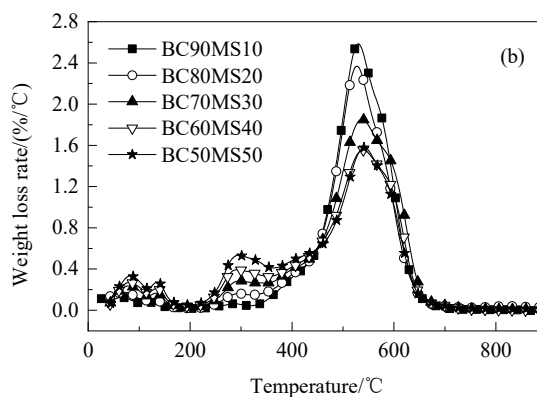
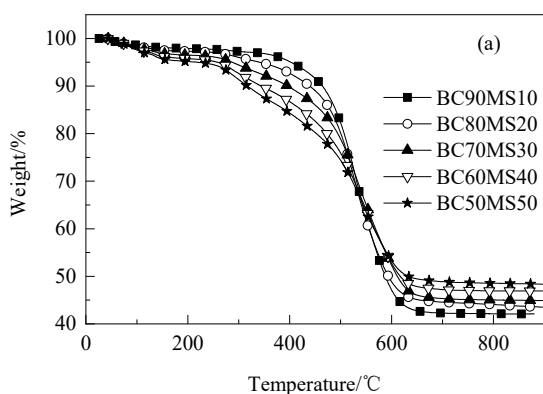


图2 不同混合质量比的煤与污泥燃烧的 TG-DTG 曲线  
Fig.2 TG-DTG curves of the mixture of coal and sludge at different mixing ratios

### 3.3 煤、污泥及其混合物的燃烧特性

由 TG-DTG 曲线可进一步得到燃烧过程的三个特

挥发分含量有关。由于煤中挥发分含量较低, 从而导致燃烧时的挥发分析出与固定碳燃尽阶段没有分开, 煤样的 DTG 曲线在挥发分析出阶段没有出现明显的独立失重速率峰<sup>[16]</sup>。污泥中含有较复杂的有机物, 如蛋白质、纤维素、半纤维素和木质素等, 污泥的失重主要来自这些有机物的分解<sup>[17]</sup>。从 TG 曲线上看, 煤的总失重为 57.85%, 污泥的总失重为 43.73%, 煤的减量化性能较好, 污泥的减量化性能较差。

### 3.2 煤与污泥混合热重分析

图 2(a)和 2(b)分别为煤和污泥在 20 °C/min 的升温速率下按不同比例混合后样品的 TG-DTG 曲线。由图 2(a)可见, 不同比例混合物的 TG 曲线按污泥添加比例增加具有规律性, 表现为煤样与污泥共同作用的结果。研究表明, 在煤与污泥混合物的 TG 曲线上, 混合物的曲线顺序位于煤与污泥单样之间<sup>[18]</sup>。混合物的 TG 曲线随煤含量增加, 逐渐趋向于煤的 TG 曲线, 且混合物的 TG 曲线与煤的 TG 曲线相似。DTG 曲线与煤和污泥的 DTG 曲线均有所不同, 混合物的 DTG 曲线存在三个阶段, 且固定碳燃尽阶段的峰值最高。在第三阶段, 最大失重速率温度点( $T_{max}$ )随污泥比增加而增大, 表明污泥比例增大时样品的分解需要更高的温度。在煤中添加污泥后, 燃烧反应向低温区移动, 燃烧时间提前, 其中 BC90MS10 的最大失重速率最大, 为 2.587%/°C, 比煤单独燃烧的最大失重速率(2.478%/°C)增加 4.40%。最大失重速率越大, 燃料越容易燃烧, 燃烧特性越好<sup>[19]</sup>。由此表明在煤中添加少量污泥可增大反应速率, 提高热反应性。

征温度点, 包括着火温度点( $T_i$ )、最大失重速率温度点( $T_{max}$ )及燃尽温度点( $T_f$ ), 根据其继续计算得到可燃性指

数( $C$ )与综合燃烧特性指数( $S$ ), 如式(7)和(8)所示:

$$C = \frac{(dw/dT)_{\max}}{T_i^2} \quad (7)$$

$$S = \frac{(dw/dT)_{\max}(dw/dT)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_f} \quad (8)$$

式中,  $T_i$  为着火温度(着火点温度)( $^{\circ}\text{C}$ ),  $(dw/dT)_{\max}$  为最大燃烧速率( $\%/^{\circ}\text{C}$ ),  $(dw/dT)_{\text{mean}}$  为平均燃烧速率( $\%/^{\circ}\text{C}$ ),  $T_f$  为燃尽温度即样品失重占总失重 98%时所对应的温度( $^{\circ}\text{C}$ ), 以上参数可反映出样品的燃烧特性。

表 3 为煤、污泥及混合物的燃烧特性参数。采用 TG-DTG 法确定煤与污泥的着火温度, 即在 DTG 曲线上过峰值点做垂线与 TG 曲线的交点, 用 Tangent 插件得到一条切线, 切线与开始失重时平行线的交点即为着火温度<sup>[20]</sup>。可以看出, 污泥的着火温度( $246^{\circ}\text{C}$ )比煤( $467^{\circ}\text{C}$ )低 47%, 表明污泥中含更多的可燃成分。且混合物的着火温度基本随污泥质量添加比例增加而减小, 可能是因为污泥中的挥发分质量分数 (39.63%) 高于煤 (21.37%)<sup>[21]</sup>。其中, 混合物 BC60MS40 的着火点最低, 着火性能最好。煤和污泥的燃尽温度相差较小, 且混合物的燃尽温度与污泥质量添加比例无相关规律性。由此推断, 污泥的添加对混合物的燃尽温度并无直接影响。

可燃性指数  $C$  越大表明样品燃烧的着火稳定性越好<sup>[22]</sup>。由表 3 可知, 煤的可燃性指数 $[11.36 \times 10^{-6}$

$\text{mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})]$ 大于污泥 $[10.74 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})]$ , 所以煤的单一样品燃烧更稳定。煤与污泥的混合样品中, 可燃性指数基本随污泥质量添加比例增大而减小。混合物 BC90MS10 的可燃性指数比煤增加了 6.69%, 表明少量污泥的添加可提高样品的可燃性, 增加燃烧反应能力。

综合燃烧特性指数  $S$  全面反映了样品的着火和燃尽性能,  $S$  越大, 燃料的综合燃烧性能越好<sup>[23]</sup>。如表 3 所示, 煤与污泥的综合燃烧特性指数相差较大。污泥的综合燃烧特性指数较低, 仅为  $13.04 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ , 而煤为  $47.16 \times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$ 。污泥的综合燃烧特性指数主要受挥发分含量影响, 而煤由于本身挥发分和固定碳含量高, 即使着火点高, 综合燃烧特性指数仍比污泥高。在煤与污泥的混合物中, 综合燃烧特性指数随污泥质量添加比例的增大递减。混合物 BC90MS10 的综合燃烧特性指数比煤增加了 9.39%。

由表 3 可知, 混合物 BC90MS10 的共燃过程燃烧特性最佳, 可能是煤与污泥共燃发生协同相互作用<sup>[24]</sup>。相互作用的原因可能是添加污泥会在燃烧前期释放大热量, 从而加速吸热反应<sup>[25]</sup>。煤和生物质之间的相互作用受热效应支配, 生物质燃烧释放的热量迅速传递给煤, 从而提高了煤的反应速度。综合而言, 将煤与污泥混合燃烧可提高燃料的燃烧性能, 且混合质量比以 90(煤):10(污泥)为宜。

表 3 煤、污泥及混合物的燃烧特性参数  
Table 3 Combustion characteristic parameters of coal, sludge and their blends

Sample	Characteristic temperature/ $^{\circ}\text{C}$			$(dw/dT)_{\max}/(\%/^{\circ}\text{C})$	$(dw/dT)_{\text{mean}}/(\%/^{\circ}\text{C})$	$C/[\times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^{-2} \cdot \text{min})]$	$S/(\times 10^{-10} \text{ K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2})$
	$T_i$	$T_{\max}$	$T_f$				
BC	467	529	651	2.48	0.27	11.36	47.16
BC90MS10	462	530	635	2.59	0.27	12.12	51.59
BC80MS20	465	528	689	2.37	0.19	10.95	30.23
BC70MS30	441	537	651	1.85	0.19	9.53	27.76
BC60MS40	418	539	646	1.56	0.16	8.93	22.11
BC50MS50	420	542	654	1.58	0.14	8.96	19.17
MS	246	430	659	0.65	0.08	10.74	13.04

### 3.4 升温速率对燃烧特性的影响

图 3(a)和 3(b)为不同升温速率下煤和污泥燃烧的 TG-DTG 曲线。样品的失重量随升温速率增大而减小, 样品的  $T_{\max}$  和最大失重速率随升温速率增大而增大。煤与污泥的  $T_{\max}$  在升温速率为  $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时, 分别比升温速率  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时增加  $73^{\circ}\text{C}$ ,  $187^{\circ}\text{C}$ 。煤与污泥的最大失重速率在升温速率为  $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时, 分别比升温速率  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  时增加  $2.318\%/^{\circ}\text{C}$ ,  $2.017\%/^{\circ}\text{C}$ 。

可以看出, 升温速率越高, 同一温度下煤和污泥的失重越小, 这是因为固相产率变大, 挥发性产物产率减

小。随升温速率增加, DTG 曲线向高温区移动, 峰值增大, 燃烧区变宽, 燃烧失重速率变大。这是因为升温速率越高, 反应进行得越快, 有机物分解得越快。升温速率的增加影响了样品之间的传热温差和温度梯度, 部分产物来不及挥发而产生滞后现象, 致使曲线向高温一侧移动, 部分可燃质的逸出需要更高的温度<sup>[26]</sup>。但升温速率增大的同时, 反应时间变短, 样品颗粒内外温度温差变大, 影响内部燃烧从而使反应不彻底。由此可见, 在煤与污泥的共燃过程中, 提高升温速率可以使燃烧速率和放热速率增大, 有利于样品的快速处理。但另一方面,

提高升温速率会使反应不彻底, 不利于焚烧过程中样品的减量化。

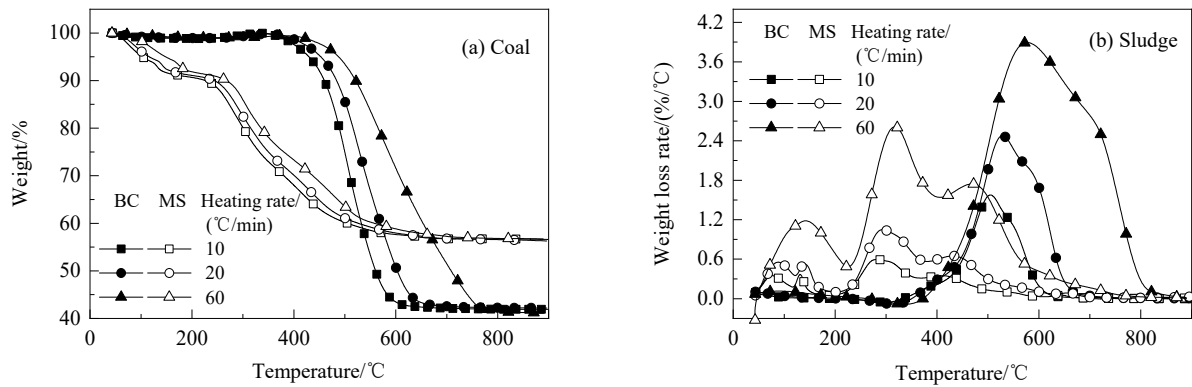


图 3 不同升温速率下煤和污泥燃烧的 TG-DTG 曲线  
Fig.3 TG-DTG curves of coal and sludge at the heating rate of 10, 20 and 60°C/min

3.5 煤、污泥及其混合物的燃烧动力学特征

Masnadi 等<sup>[27]</sup>报道了用于动力学分析的基本模型函数  $g(x)$ 和  $f(x)$ 的表达。反应机理分为四种类型, 包括化学反应(第一、第二、第三和第  $n$  阶)、随机成核和原子核生长(二维和三维)、相界反应(一维、二维和三维)和扩散(单向、双向和三向传输, Ginstling-Brounshtein 方程和 Zhuravlev 方程)。  $R$  为拟合直线的先行相关系数, 表现出最佳相关性(基于  $R^2$ )的  $g(x)$ 被视为模型的函数表达式, 该函数可表示燃烧期间质量损失的动力学特征<sup>[28]</sup>。为比较不同混合物的热化学性质, 通过化学反应(一级)、随机成核和原子核生长(三维)、扩散(单向传输)、扩散(三

向传输)、扩散(Zhuravlev 方程)五种反应模型研究样品不同燃烧阶段之间的动力学特征。

根据煤和污泥及其混合物的 DTG 曲线, 将其燃烧分为三个阶段, 但煤仅在第三阶段中出现明显的失重峰。针对各自的燃烧区间求出煤与污泥不同比例对应阶段的最优动力学方程及相应的动力学参数。由表 4 可知,  $R^2$  在 0.9781~0.9984 之间, 表明五种动力学模型均可较好地拟合燃料共燃过程的燃烧反应。煤的动力学方程符合扩散中的 Zhuravlev 方程, 表明煤的燃烧符合 Zhuravlev 扩散模型的反应机理, 而污泥的动力学方程符合扩散中的三向传输, 推测原因为污泥燃烧时反应速

表 4 不同混合质量比的煤与污泥的燃烧动力学参数  
Table 4 Kinetic parameters for combustion of coal and sludge with different ratios

Sample	Range/°C	$Y=aX+b$	$R^2$	$E/(kJ/mol)$
BC	314~651	$-9628.7X+1.9037$	0.9963	80.05
BC90MS10	107~188	$-1457.4X-1.5079$	0.9781	12.11
	188~319	$-4005.6X+0.8073$	0.9824	33.30
	319~635	$-8685.8X+0.5835$	0.9950	72.21
	635~900	$-1470.3X-1.6635$	0.9806	12.22
BC80MS20	114~200	$-5223.5X+3.8485$	0.9973	43.43
	200~320	$-7001.2X-2.5189$	0.9930	58.21
	320~689	$-1571.7X-1.1691$	0.9865	13.07
	689~900	$-5734.6X+5.2226$	0.9957	47.68
BC70MS30	117~202	$-6979.9X-2.6498$	0.9944	58.03
	202~344	$-1634.7X-0.8535$	0.9827	13.59
	344~651	$-5801.7X+5.1825$	0.9982	48.23
	651~900	$-6842.2X-2.7483$	0.9949	56.88
BC60MS40	118~203	$-1573.8X-1.1265$	0.9879	13.08
	203~355	$-5576.9X+4.1895$	0.9977	46.37
	355~646	$-6735.8X-2.9099$	0.9951	56.00
	646~900	$-1749.2X-0.3259$	0.9900	14.54
BC50MS50	122~201	$-5543.4X+3.9444$	0.9984	46.09
	201~380	$-6558.5X-0.7253$	0.9806	54.53
	380~659			
	659~900			
MS				

率随温度升高而降低,且有烃脱挥发分的作用。混合物燃烧失重的第二阶段与污泥的动力学方程相同,符合扩散中的三向传输,而失重的第三阶段与煤的动力学方程一致。原因可能为第二阶段中在煤中添加污泥后,样品的燃烧速率受污泥影响较大,混合物中的燃烧速率与污泥中的相近,第三阶段反之,受煤影响较大。表明混合物共燃过程中,第二阶段的失重主要源于污泥的燃烧,而第三阶段的失重主要源于煤的燃烧。污泥在第二阶段的活化能(46.09 kJ/mol)小于第三阶段的活化能(54.53 kJ/mol),表明第二阶段中的轻质组分燃烧所需的能量低于第三阶段中的重质挥发分及固定碳<sup>[29]</sup>。将煤与污泥混合后发现,在固定碳燃尽阶段,混合燃料的活化能均位于两种原料之间,且随污泥添加量增加而降低。证实了添加污泥能有效提高煤的反应活性并促进其燃烧过程。

## 4 结 论

通过研究安徽临涣矿区烟煤与生活污泥的燃烧特性和动力学特征,得出以下结论:

(1) 根据 TG-DTG 曲线,污泥燃烧的失重过程可分为水分脱水、挥发物析出和燃烧、固定碳燃尽阶段三个阶段,而煤燃烧的失重过程仅有固定碳燃尽阶段一个阶段。污泥的失重主要来自挥发分的释放,而煤主要来自固定碳的燃烧。

(2) 与煤相比,污泥的燃烧特性较差。混合物中污泥质量百分数为 10% 时,样品的可燃性指数  $C$  与综合燃烧特性指数  $S$  分别比煤增加了 6.69% 和 9.39%,表明在煤中添加少量污泥可增加反应的燃烧特性,混合质量比以 90(煤):10(污泥)为宜。

(3) 随升温速率增加,样品的最大失重速率逐渐增加,有机物分解得越快,但样品燃烧不彻底,不利于样品的减量化处理。

(4) 样品动力学方程拟合结果表明,煤和污泥混合物燃烧的第二阶段的失重主要源于污泥的燃烧,而第三阶段主要源于煤的燃烧,混合燃料的活化能均位于两种原料之间,并且在固定碳燃尽阶段随污泥添加量的增加而降低,表明添加污泥能有效提高煤的反应活性并促进其燃烧过程。

## 参考文献

- [1] Wang Z Q, Hong C, Xing Y, et al. Combustion behaviors and kinetics of sewage sludge blended with pulverized coal: with and without catalysts [J]. Waste Management, 2018, 74: 288–296.
- [2] Kijo-Kleczkowska A, Sroda K, Kosowska-Golachowska M, et al. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass [J]. Fuel, 2016, 170: 141–160.

- [3] Xie Z Q, Ma X Q. The thermal behaviour of the co-combustion between paper sludge and rice straw [J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 611–618.
- [4] Cieřlik B M, Namieřnik J, Konieczka P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 90: 1–15.
- [5] Magdziarz A, Wilk M. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion [J]. Energy Conversion Management, 2013, 75: 425–430.
- [6] Liu J Y, Xie C D, Xie W M, et al. Arsenic partitioning behavior during sludge co-combustion: thermodynamic equilibrium simulation [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10: 2297–2307.
- [7] Zhou C C, Liu G J, Cheng S W, et al. Thermochemical and trace element behavior of coal gangue, agricultural biomass and their blends during co-combustion [J]. Bioresource Technology, 2014, 166: 243–251.
- [8] 陈繁荣, 孙鸣, 高晓明. 生活污泥与煤混烧及热解特性 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3161–3165.  
Chen F R, Sun M, Gao X M. Combustion and pyrolysis characteristics of sewage sludge and coal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 3161–3165.
- [9] Namkung H, Lee Y J, Park J H, et al. Blending effect of sewage sludge and woody biomass into coal on combustion and ash agglomeration behavior [J]. Fuel, 2018, 225: 266–276.
- [10] 邢献军, 陈泽宇, 李永玲, 等. 水稻秸秆与煤粉混合燃烧特性及动力学 [J]. 过程工程学报, 2019, 19(3): 637–643.  
Xing X J, Chen Z Y, Li Y L, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analyses of rice straw and pulverized coal [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(3): 637–643.
- [11] 施江, 谢峻林, 梅书霞, 等. RDF 与煤粉混合燃烧特性及动力学分析 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 490–496.  
Shi J, Xie J L, Mei S X, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of RDF and coal blends [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 490–496.
- [12] Mu L, Chen J B, Yao P, et al. Evaluation of co-pyrolysis petrochemical wastewater sludge with lignite in a thermogravimetric analyzer and a packed-bed reactor: pyrolysis characteristics, kinetics, and products analysis [J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 147–156.
- [13] 常凤民, 王启宝, 王凯军. 城市污泥与煤混合热解特性及动力学分析 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2412–2418.  
Chang F M, Wang Q B, Wang K J. Thermogravimetric characteristics and kinetic analysis of co-pyrolysis of sewage sludge and coal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2412–2418.
- [14] Zhou C C, Liu G J, Fang T, et al. Investigation on thermal and trace element characteristics during co-combustion biomass with coal gangue [J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 454–462.
- [15] Idris S S, Rahman N A, Ismail K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA) [J]. Bioresource Technology, 2012, 123: 581–591.
- [16] 李洋洋, 金宜英, 李欢. 采用热重分析法研究煤掺烧干污泥燃烧特性 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 408–411.  
Li Y Y, Jin Y Y, Li H. Thermo-gravimetric analysis and co-combustion characteristics of dried sludge and coal [J]. China

- Environmental Science, 2011, 31(3): 408–411.
- [17] Liu X J, Chang F M, Wang C P, et al. Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 464–470.
- [18] Liao Y F, Ma X Q. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and paper mill sludge [J]. Applied Energy, 2010, 87: 3526–3532.
- [19] Merve O, Hanzade H, Serdar Y. Co-combustion of lignite with sewage sludge and refuse-derived fuel [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 103: 10–15.
- [20] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(1): 72–76.
- Nie Q H, Sun S Z, Li Z Q, et al. Thermogravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(1): 72–76.
- [21] Lin Y, Liao Y F, Yu Z S. The investigation of co-combustion of sewage sludge and oil shale using thermogravimetric analysis [J]. Thermochimica Acta, 2017, 653: 71–78.
- [22] 刘敬勇, 傅杰文, 孙水裕, 等. 不同来源污泥混燃特性及其综合燃烧性能评价 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 940–952.
- Liu J Y, Fu J W, Sun S Y, et al. Co-combustion of various of sludge and its combustion performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(3): 940–952.
- [23] 武宏香, 赵增立, 李海滨, 等. 污泥与煤、木屑的混合燃烧特性及动力学研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 73–77.
- Wu H X, Zhao Z L, Li H B, et al. Co-combustion of sewage sludge, coal and sawdust [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(7): 73–77.
- [24] Guo F, 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.
- [25] Wang R K, Zhao Z H, Qiu L C, et al. Experimental investigation of synergistic behaviors of lignite and wasted activated sludge during their co-combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 156: 271–279.
- [26] 刘敬勇, 卓钟旭, 宁寻安, 等. 印染污泥混燃特性及其燃烧动力学模型 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1286–1297.
- Liu J Y, Zhuo Z X, Ning X A, et al. Co-combustion characteristics of textile dyeing sludge and its combustion kinetics model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1286–1297.
- [27] Masnadi M S, Habibi R, Kopyscinski J, et al. Fuel characterization and co-pyrolysis kinetics of biomass and fossil fuels [J]. Fuel, 2014, 117: 1204–1214.
- [28] Xie W H, Wen S T, Liu J, et al. Comparative thermogravimetric analyses of co-combustion of textile dyeing sludge and sugarcane bagasse in carbon dioxide/oxygen and nitrogen/oxygen atmospheres: thermal conversion characteristics, kinetics, and thermodynamics [J]. Bioresource Technology, 2018, 255: 88–95.
- [29] 庄修政, 宋艳培, 詹昊, 等. 水热污泥与煤在混燃过程中的协同效应特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2018, 46(12): 40–49.
- Zhuang X Z, Song Y P, Zhan H, et al. Synergistic effects in co-combusting of hydrochar derived from sewage sludge with different rank coals [J]. Journal of Fuel Chemistry Technology, 2018, 46(12): 40–49.