

# 污泥与塑料低温热解固体产物的燃烧性能研究

马亚松, 王景甫, 贾洪鑫, 肖楚轩

北京工业大学, 北京

收稿日期: 2023年1月1日; 录用日期: 2023年2月1日; 发布日期: 2023年2月10日

## 摘要

采用热压装置对污泥与塑料进行低温热解工艺, 利用热重分析、工业分析和元素分析等技术研究不同原料配比、热解温度和热解时间对热解固体产物燃烧特性的影响。结果表明: 提高塑料添加比例可以提高热解固体产物的综合燃烧性能指数、热值、挥发分, 降低其H/C、O/C值, 添加塑料能够明显改善原料热解后的质量产率和能量产率, 然而塑料的添加比例对原料热解的产率影响不大; 提高热解温度会使热解固体产物的综合燃烧性能指数、热值和挥发分先升高后降低, 质量产率、H/C、O/C减少, 能量产率在热解温度高于250℃时发生骤降; 热解时间的升高会略微降低热解固体产物的综合燃烧性能指数, 但是对其它燃烧特性参数的影响却不大。因此, 塑料占比对热解固体产物的燃烧性能影响最大, 热解温度次之, 热解时间对固体产物燃烧性能影响最小。

## 关键词

污泥, 塑料垃圾, 低温热解, 燃烧特性

# Combustion Performance Study of Solid Products from Low Temperature Pyrolysis of Sludge and Plastics

Yasong Ma, Jingfu Wang, Hongxin Jia, Chuxuan Xiao

Beijing Institute of Technology, Beijing

Received: Jan. 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: Feb. 1<sup>st</sup>, 2023; published: Feb. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The low temperature pyrolysis process of sludge and plastics was performed by hot pressing device. The effects of different raw material ratio, pyrolysis temperature and pyrolysis time on the

combustion characteristics of solid products were studied by thermogravimetric analysis, industrial analysis and elemental analysis. The results show that increasing the proportion of plastics can improve the comprehensive combustion performance index, calorific value and volatile content of solid products, and reduce the H/C and O/C values. Adding plastics can significantly improve the mass yield and energy yield of raw materials after pyrolysis, but the proportion of plastics has little effect on the yield of raw materials during pyrolysis. With the increase of pyrolysis temperature, the comprehensive combustion performance index, calorific value and volatile matter of solid products firstly increase and then decrease, and the mass yield, H/C and O/C decrease. The energy yield plummets when the pyrolysis temperature is higher than 250°C. The increase of pyrolysis time will slightly reduce the comprehensive combustion performance index of solid products, but has little effect on other combustion characteristics. Therefore, the ratio of plastics has the greatest influence on the combustion performance of solid products, followed by pyrolysis temperature, and pyrolysis time has the least influence on the combustion performance of solid products.

## Keywords

Sludge, Plastic Waste, Low Temperature Pyrolysis, Combustion Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着工业生产的进行,污泥产量急剧上升,以污泥含水率为 80%计,2019 年全国污泥总产量约为 3904 万吨,年均增长近 20% [1],污泥中含有有机质等可燃成分,但是由于污泥能量密度低、含水率高等特点限制了其作为燃料进一步的推广使用[2]。截止到 2015 年,全球共产生约 63 亿公吨的塑料垃圾,其中聚烯烃塑料约占世界塑料消耗量的 50% [3],在这些塑料垃圾中只有 9%被回收利用,12%被焚烧处理,其余均被丢弃。塑料垃圾传统的处理方法如填埋和焚烧等,会对环境产生较大危害[4]。低温热解技术可以改善固体废物的物理化学性质,实现固废的资源化利用,同时热解过程部分挥发性化合物会进行热裂解,可以减少产生多种有害化合物[5]。由于污泥发热量较低,不宜作为燃料直接使用,而塑料垃圾通常回收成本较高,直接燃烧不仅会造成能源浪费而且对环境污染较为严重,所以可以考虑将污泥与塑料垃圾混合预压后低温热解制备成型燃料[3],利用低温热解技术,将污泥与塑料垃圾在惰性环境且低于 500°C 的环境下进行热分解,不仅可以解决污泥热量低的问题,而且塑料垃圾也能够得到有效的处理。

研究表明,污泥与医疗塑料废弃物共热解可以降低活化能,提高甲烷和碳氢化合物的含量,减少 CO<sub>2</sub> 的排放[3]。污泥与橡胶木锯末共热解可提高生物炭的碳含量,降低灰分和无机元素含量[6]。采用微波热解处理医院塑料废物、木质纤维素和甘油三酯,与单一原料热解相比,共热解可以得到的更高的碳氢化合物液体燃料收率,液态油含氮、硫含量更低,作为燃料,品质接近柴油和汽油[7]。研究含油污泥与谷壳的共热解过程,发现谷壳的初始热解温度明显降低,并且原料中的含氧化合物和脂肪族化合物得到了有效的转化,使芳烃的相对收率提高到最高的 46% [8]。将工业污泥与塑料垃圾按照一定比例掺混,使用热压装置进行低温热解,可以得到力学性能以及燃烧性能更佳的成型燃料。

目前,污泥的热解应用研究主要是在高温下制备活性吸附碳[9],而以污泥与塑料垃圾作为原料,在压力下低温热解制备成型燃料的研究较少。本文通过实验研究不同原料配比、热解温度以及热解时间对

成型燃料的 TG-DTG、成分、热值以及产率的影响，以期望提高污泥的能源化利用。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验原料

实验所用污泥来自高碑店再生水厂，在实验室环境下将污泥自然风干，生活垃圾中的废塑料是按照聚乙烯、聚丙烯和聚氯乙烯 6.5:2.5:1 的比例配制而成[10]。原料的工业分析及热值如表 1 所示。

**Table 1.** Industrial analysis of raw materials and calorific value

**表 1.** 原料的工业分析及热值

原料种类	挥发分/%	灰分/%	水分/%	固定碳/%	热值(MJ/kg)
污泥	37.85	44.70	11.43	6.02	8.68
塑料	99.80	0	0.20	0	41.4

### 2.2. 样品制备

实验前，需要使用粉碎机对原料进行粉碎化处理，过 80 目筛，将污泥与塑料按比例充分混合。取 2 g 混合原料样品，将混合原料放入热压装置。该热压装置由加热模具、定制压杆、普通压杆垫片、隔热板和温控器等组成。其中加热模具腔体高度为 45 mm，直径为 15 mm；定制压杆在中心位置处有直径为 5 mm 的贯穿孔，用以排出水蒸气和轻质挥发份，将样品用压片机进行挤压，成型压力为 6 MPa，然后进行低温热解，热解区间为 20℃~300℃。

### 2.3. 实验测量及分析方法

1) 热重分析：使用德国耐驰 STA 449 F3 型同步热分析仪，称取 10 mg 左右样品，放入氧化铝坩埚，燃烧温度区间为 30℃~800℃，升温速率为 20℃/min，吹扫气 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 流速分别为 21 ml/min、79 ml/min。

2) 工业分析：使用长沙友欣 YX-GYFX7703 型全自动工业分析仪，测定水分和灰分时称取 0.5~0.7 g 样品，测定挥发分时称取 0.9~1.1 g 样品，利用差减法计算固定碳含量。

3) 元素分析：使用意大利利曼 EA3000 型元素分析仪，使用标样 L-NS 测定标线，选择测量模式，称量 1 mg 左右样品置于锡囊内放入仪器测定，每个样品测量 3 次，取平均值。

4) 热值：使用北京宏大博宇 BYLRY-3000W 型全自动量热仪，称取 1 g 左右样品放入氧弹内，充氧后测量样品的热值。

5) 着火温度  $T_i$ ：采用 TG-DTG 切线法，即在 DTG 曲线上最大燃烧速率处作垂线与 TG 曲线相交于一点，过此交点作 TG 曲线切线，该切线与 TG 曲线的失重起始平行线的交点即为着火点，对应温度即为着火温度。

6) 燃尽温度  $T_h$ ：燃尽温度是指燃料基本燃烧完全时的温度，通过 DTG 曲线确定，失重速率为 -1%/min 时所对应的温度为燃尽温度。

7) 最大燃烧速率  $W_{max}$ ：即整个燃烧过程失重速率最大的点，通过对 DTG 曲线最大失重峰顶点处作水平切线获得，其反映了燃料挥发分析出与燃烧的剧烈程度。

8) 平均燃烧速率  $W_{mean}$ ：用指燃料从着火至燃尽整个燃烧过程的平均失重速率，定义为：

$$W_{mean} = \frac{C_i - C_h}{T_h - T_i} \beta \quad (1)$$

式中， $W_{mean}$  是平均燃烧速率，%/min； $T_i$  为着火温度，K； $C_i$  指燃料着火时的质量分数； $T_h$  为燃尽温度，

K;  $C_h$  指燃料燃尽时的质量分数;  $\beta$  为升温速率, K/min。

9) 综合燃烧性能指数  $S_N$ : 用来全面评价成型生物质燃料的燃烧情况, 其值越大, 燃料的燃烧性能越好, 定义为:

$$S_N = \frac{W_{\max} \times W_{\text{mean}}}{T_i^2 \times T_h} \quad (2)$$

式中,  $S_N$  是综合燃烧性能指数,  $\%^2 \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{K}^{-3}$ ;  $W_{\max}$  是最大燃烧速率,  $\%/\text{min}$ 。

### 3. 结果与讨论

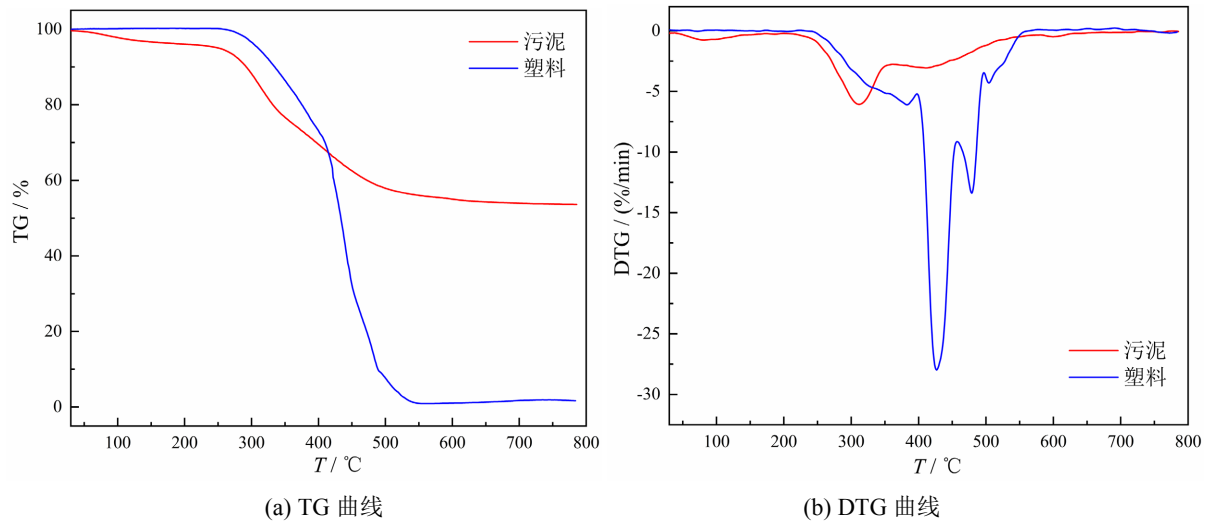
#### 3.1. 原料对比对低温热解固体产物的影响

图 1 是污泥和塑料的 TG-DTG 曲线。可以看出, 污泥燃烧主要分为三个阶段: 水分和轻质挥发分的析出( $30^\circ\text{C} \sim 270^\circ\text{C}$ )、主要挥发分的析出和燃烧( $270^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ )以及硝酸盐和碳酸盐的分解( $550^\circ\text{C} \sim 750^\circ\text{C}$ ) [11]; 塑料燃烧分为两个阶段, 第一个阶段在  $270^\circ\text{C}$  左右, 主要是氯自由基的形成和多烯共轭结构的形成, 第二个阶段在  $420^\circ\text{C}$  左右, 主要是多烯共轭结构的高温热解和热解产物的交联缩聚、芳香化等[10]。

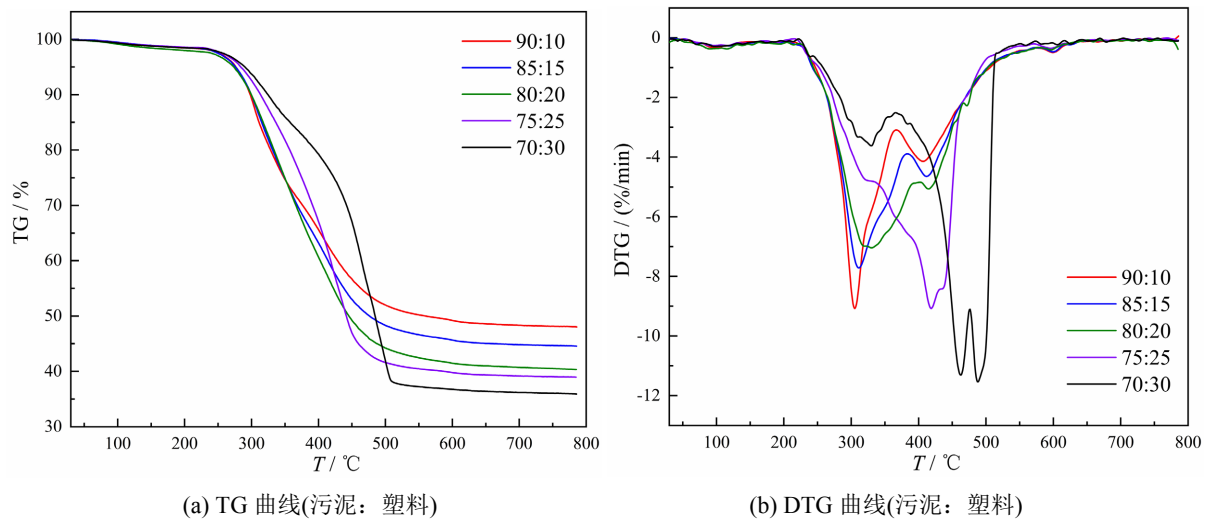
塑料占比是影响污泥和塑料混合燃料低温热解固体产物性能的重要因素, 塑料占比很低时, 固体产物的燃烧性能和物理性能很差。因此塑料占比设为 10%、15%、20%、25%、30%。图 2 是不同配比的原料在  $250^\circ\text{C}$  的温度下热解 30 min 得到的固体产物的 TG-DTG 曲线。燃烧过程可以分为 3 个阶段, 第一阶段( $180^\circ\text{C} \sim 380^\circ\text{C}$ )主要是污泥和 PVC 中的轻质挥发分析出和燃烧过程, 随着塑料添加比例的增大, 最大燃烧速率逐渐减小, 且最大燃烧速率对应的温度逐渐升高。原因是塑料受热会发生软化, 对污泥有包覆作用, 当塑料占比超过 20%时, 包覆作用明显, 影响污泥的燃烧进程[12]; 第二阶段( $380^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ )是污泥和塑料(PP、PE 和少量 PVC)中的剩余挥发分析出燃烧过程以及污泥中的固定碳燃烧过程, 随着塑料添加比例的增大, 最大燃烧速率逐渐增大, 且最大燃烧速率对应的温度逐渐升高; 第三阶段( $550^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ )是污泥中的无机盐分解阶段。

固体产物的燃烧特性可以通过其着火温度、燃尽温度、燃烧速率以及综合燃烧性能指数来表示。如表 2 所示, 随着塑料添加比例的增大, 热解固体产物的着火温度逐渐上升, 从  $274.9^\circ\text{C}$  上升到  $399.8^\circ\text{C}$ 。造成这一现象的原因是热解过程中随着塑料添加比例的增大, 塑料软化后对污泥的包覆效果增强, 塑料本身着火温度较高, 使得污泥与塑料的热解固体产物的着火温度逐渐变大。燃尽温度随着塑料添加比例的增大先减小后增大。这是因为燃烧过程中污泥与塑料发生协同效应, 污泥、塑料燃烧释放的热量能加快彼此燃烧进程, 但是随着塑料添加比例的增加, 污泥燃烧释放的热量对塑料的燃烧进程的促进作用逐渐减弱, 固体产物的燃尽温度逐渐变大。平均燃烧速率随着塑料添加比例的增加而增大, 这是由于塑料的分解燃烧提高了热解固体产物燃烧过程的平均燃烧速率。当塑料占比为 30%时, 平均燃烧速率骤增, 达到  $9.72\% \cdot \text{min}^{-1}$ , 接近纯塑料燃烧的平均燃烧速率。随着塑料添加比例的增大, 热解固体产物的综合燃烧性能指数逐渐增大。这是因为塑料本身综合燃烧性能指数很大, 塑料的添加能很好的改善混合燃料的热解固体产物的综合燃烧性能。

图 3(a)是不同配比原料低温热解固体产物的热值。经过热解后, 干化污泥的热解固体产物热值为  $9.99 \text{ MJ/kg}$ , 与干化污泥热值相比有所提高。这是因为低温热解过程中剩余水分和少量轻质挥发份析出, 提升了固体产物品质。随着废塑料比例增大, 热解固体产物的热值迅速增大, 当塑料添加比例为 30%时, 固体产物热值为  $20.61 \text{ MJ/kg}$ 。原因是废塑料热值远高于污泥, 添加塑料可以很好地改善固体产物的燃料性质。同时塑料可以作为粘结剂使用, 添加塑料后, 热解固体产物的物理性能得到明显改善[13]。



**Figure 1.** TG-DTG curve of sludge and plastic  
**图 1.** 污泥与塑料的 TG-DTG 曲线



**Figure 2.** TG-DTG curves of pyrolysis solid products with different feedstock ratios  
**图 2.** 不同原料配比的热解固体产物的 TG-DTG 曲线

**Table 2.** Combustion characteristics parameters of pyrolysis solid products for different feedstock types  
**表 2.** 不同原料种类的热解固体产物的燃烧特性参数

原料种类 (污泥: 塑料)	着火温度 $T_i/^\circ\text{C}$	燃尽温度 $T_f/^\circ\text{C}$	最大燃烧速率 $W_{\max}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	平均燃烧速率 $W_{\text{mean}}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	综合燃烧性能指 $S_N/10^{-7}(\%\cdot\text{min}^{-2}\cdot\text{K}^{-3})$
污泥	273.3	508	6.07	3.05	0.79
塑料	415.2	541	28.3	10.48	7.69
90:10	274.9	506	9.30	3.53	1.39
85:15	272.7	500	7.75	4.14	1.4
80:20	275.4	501	7.41	4.49	1.42
75:25	323	492	9.22	5.44	1.84
70:30	399.8	512	11.54	9.72	3.15

图 3(b)则是在此热解条件下的原料热解后的质量产率和能量产率变化情况。可以看出,干化污泥添加塑料后,原料热解后的质量产率和能量产率急剧增加,分别从 83.85%和 93.65%增至 87.15%和 98.09%,但是塑料比例由 10%增至 30%过程中,质量产率增长缓慢,仅增长 2.15%,能量产率基本稳定不变。所以添加塑料可以明显改善原料热解后的质量产率和能量产率,但是塑料的添加比例对原料热解后的产率影响不大。

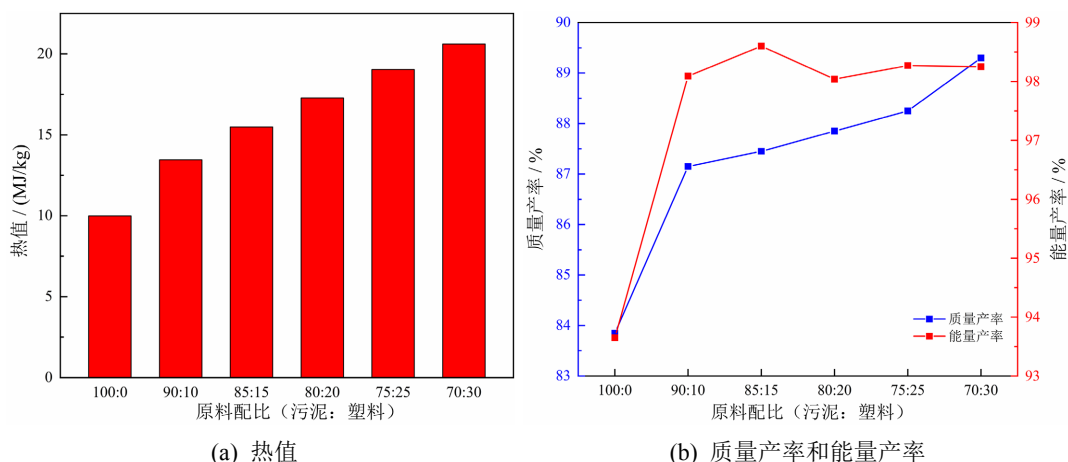


Figure 3. Calorific value and yield of solid products from pyrolysis with different feedstock ratios  
图 3. 不同原料配比热解固体产物的热值和产率

燃料的工业和元素分析是评价燃料性质的重要指标。固体燃料的挥发分和固定碳是可燃部分,不同配比原料热解固体产物的挥发分和固定碳含量如图 4(a)所示。可以看出,随着塑料比例的增加,挥发分占比明显增大,未添加塑料时,热解固体产物挥发分仅为 38.26%,而当塑料添加比例为 30%时,固体产物的挥发分占比可达到 56.86%。添加塑料前后,固定碳占比变化不大,这是由于塑料本身不含固定碳。通过对比污泥热解前后固定碳含量,可以发现,热解可以提高污泥的固定碳含量。

燃料中的 C、H、O 元素可以表征燃料的部分燃烧特性。从图 4(b)可以看出,随着塑料添加比例的增大,H/C 略微下降,仅下降 0.03,O/C 下降明显,从 0.29 下降到 0.04。这主要是因为塑料主要含有 C、H 元素,不含 O 元素,250℃热解时污泥和塑料仅有部分轻质挥发份析出,仅损失少量元素。随着塑料含量上升,热解固体产物的 C、H 元素线性增加。

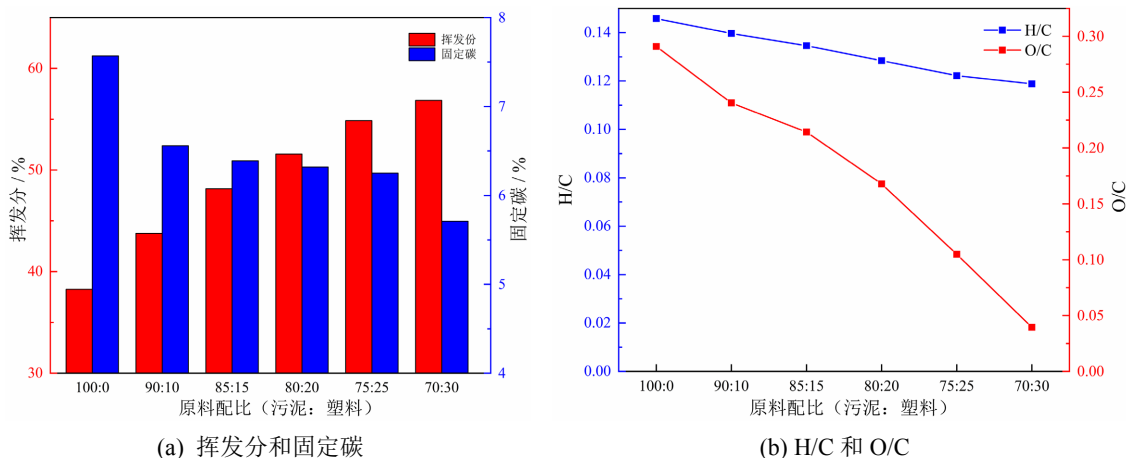


Figure 4. Industrial and elemental analysis of pyrolysis solid products with different feedstock ratios  
图 4. 不同原料配比热解固体产物的工业和元素分析

### 3.2. 热解温度对低温热解固体产物的影响

图 5 是污泥与塑料配比为 85:15 在不同的热解温度下热解 30 min 后得到的热解固体产物的 TG-DTG 曲线。燃烧温度 30℃~200℃ 区间主要是水分挥发，热解温度越低，热解固体产物中残余的水分越多，燃烧时的失重速率越大。由 DTG 曲线可以看到，燃烧温度在 250℃ 左右，热解温度为 100℃~200℃ 的固体产物存在一个失重峰，但是热解温度为 250℃~300℃ 的固体产物没有失重峰。而在燃烧温度 420℃ 左右，随着热解温度升高，固体产物的失重速率变大。这可能是因为热解温度较高时，污泥与塑料在热解过程中存在协同效应，延缓了热解固体产物的燃烧[14]。随着热解温度升高，固体产物的最大燃烧速率先增大后减小。这是因为热解温度为 100℃ 时，固体产物含有比较多的水分和轻质挥发分，能量密度低，随着热解温度升高，能量密度逐渐增大，最大燃烧速率也逐渐增大。但是当热解温度为 300℃ 时，会有大量挥发分析出，降低了固体产物的能量密度，最大燃烧速率减小。

不同热解温度得到的固体产物的燃烧特性参数如表 3 所示。随着热解温度升高，固体产物的着火温度逐渐增大，这是因为热解温度越高，热解过程中挥发分析出越多，固体产物越不易点燃。不同热解温度的固体产物的燃尽温度差别不大。综合燃烧性能指数和燃烧速率随着热解温度的升高先增大后减小，当热解温度为 250℃，综合燃烧性能指数和燃烧速率达到最大。

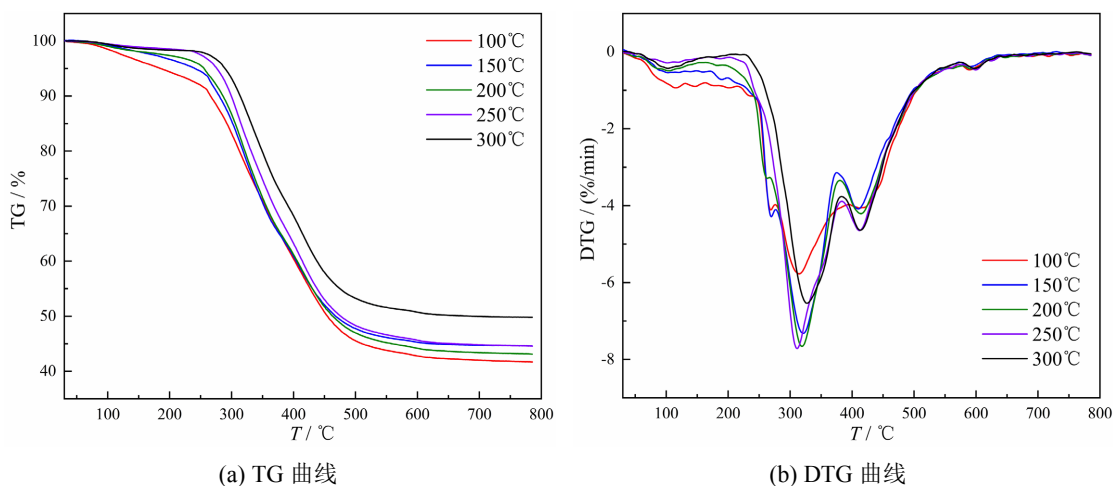


Figure 5. TG, DTG curves of solid products at different pyrolysis temperatures

图 5. 不同热解温度固体产物的 TG、DTG 曲线

Table 3. Combustion characteristics parameters of solid products at different pyrolysis temperatures

表 3. 不同热解温度固体产物的燃烧特性参数

热解温度 /℃	着火温度 $T_i$ /℃	燃尽温度 $T_b$ /℃	最大燃烧速率 $W_{max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	平均燃烧速率 $W_{mean}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	综合燃烧性能指数 $S_N/10^{-7}(\%^2 \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{K}^{-3})$
100	260.6	504	5.78	3.77	0.98
150	270.2	500	7.35	3.81	1.23
200	270.6	505	7.67	3.94	1.31
250	272.7	500	7.75	4.14	1.4
300	287.2	501	6.51	3.94	1.06

图 6 分别是不同热解温度条件下的热解固体产物的热值和产率变化情况。由图 6(a)可以看到，随着热解温度的增加，热解固体产物的热值呈增大的趋势。当热解温度为 250℃ 时，热值达到最大，为 15.49

MJ/kg, 但是继续增高热解温度, 热值反而开始下降。这是由于热解温度超过 250℃ 之后, 混合燃料里的污泥挥发分会大量析出, 塑料开始分解, 导致热值下降。但是此时固体产物热值下降不大, 是因为固定碳含量上升, 弥补了因挥发分析出造成的部分热值损失。图 6(b) 是原料热解后的质量产率和能量产率变化情况。质量产率随热解温度升高而逐渐降低。这主要是因为水分和挥发分的析出。当热解温度从常温升高到 250℃, 能量产率略微下降, 但是当热解温度从 250℃ 升高到 300℃, 能量产率发生骤降, 从 98.6% 降到 90.21%。这是因为污泥的着火温度在 270℃ 左右, 当热解温度高于 270℃, 挥发分大量析出, 能量产率急剧下降。图 7(a) 是不同热解温度的固体产物的挥发分、固定碳变化情况。热解温度较低时, 水分析出, 挥发分占比增大, 后随着热解温度增大, 挥发分大量析出, 固定碳占比增大。图 7(b) 是 H/C 和 O/C 随热解温度的变化情况。可以看到, H/C、O/C 随着热解温度的升高而降低。这是因为在加热过程中, 水分挥发, 造成 H、O 元素下降, 在热解温度 100℃~150℃, 水分损失最多, H/C 骤降。而当热解温度在 250℃~300℃ 时, 原料中的污泥会发生脱羧和脱羧反应生成 CO、CO<sub>2</sub>, 脂肪烃类官能团降低, 生成 H<sub>2</sub>, 在这个热解温度区间, 损失的 O 的摩尔质量要大于 C 的摩尔质量, 所以 O/C 呈下降趋势[15]。

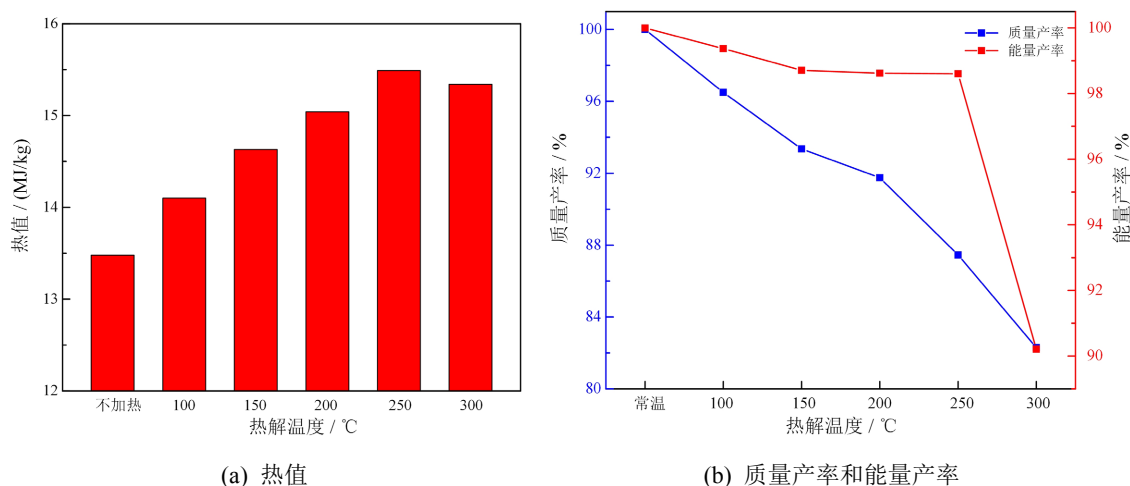


Figure 6. Calorific value and yield of solid products at different pyrolysis temperatures

图 6. 不同热解温度固体产物的热值和产率

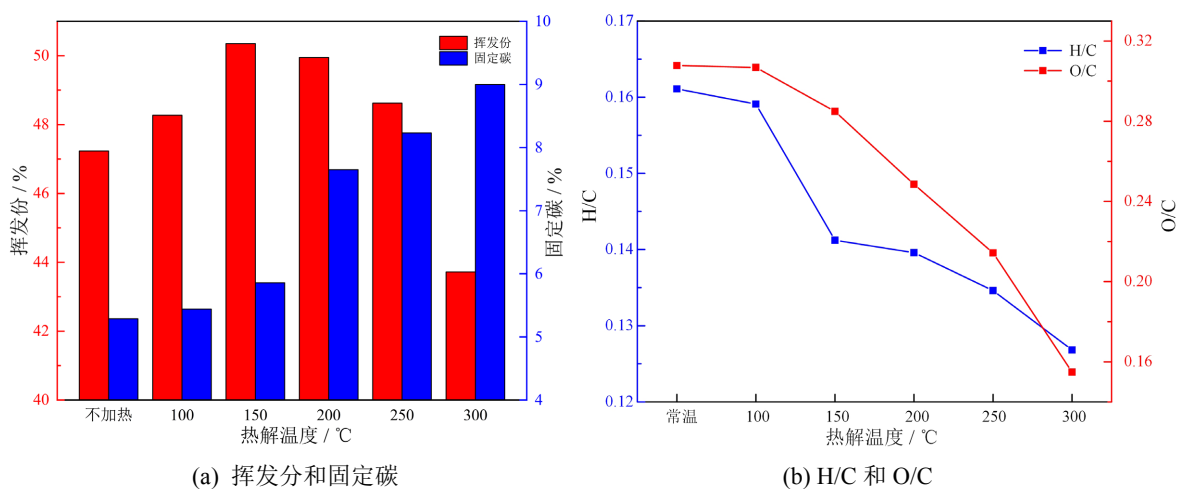


Figure 7. Industrial and elemental analysis of solid products at different pyrolysis temperatures

图 7. 不同热解温度固体产物的工业和元素分析



### 3.3. 热解时间对低温热解固体产物的影响

图 8 是污泥与塑料配比为 85:15 在 250℃ 的温度下热解不同时间得到的固体产物的 TG-DTG 曲线, 表 4 是不同热解时间的固体产物的燃烧特性参数。从图 8(a)中可以看到, 不同热解时间的固体产物的 TG 曲线差别不大。从图 8(b)中的 DTG 曲线可以看到, 在 320℃ 左右, 热解时间 10~20 min 失重速率相差不多, 后随着热解时间增加, 失重速率逐渐减小。在 380℃ 左右, 随着热解时间增加, 燃烧过程失重速率逐渐增大。这可能是因为热解时间较长的, 污泥与塑料发生协同作用延缓了燃烧。随着热解时间的增加, 固体产物的综合性能指数逐渐减小。平均燃烧速率随热解时间增长整体变化不大, 先升高后降低, 热解时间为 30 min 时达到最大。

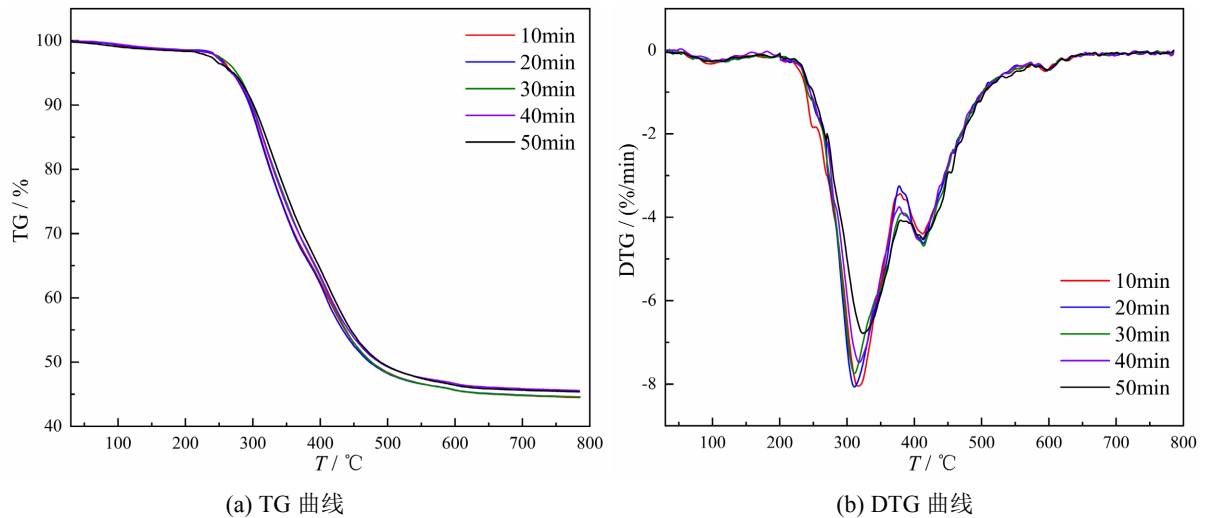


Figure 8. TG, DTG curves of solid products with different pyrolysis times

图 8. 不同热解时间固体产物的 TG、DTG 曲线

Table 4. Combustion characteristics parameters of solid products with different pyrolysis times

表 4. 不同热解时间固体产物的燃烧特性参数

热解时间 /min	着火温度 $T_i/^\circ\text{C}$	燃尽温度 $T_b/^\circ\text{C}$	最大燃烧速率 $W_{\max}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	平均燃烧速率 $W_{\text{mean}}/(\%\cdot\text{min}^{-1})$	综合燃烧性能指数 $S_N/10^{-7}(\%\cdot\text{min}^{-2}\cdot\text{K}^{-3})$
10	271	501	8.04	4.05	1.42
20	272	500	8.02	4.08	1.43
30	272.7	500	7.75	4.14	1.39
40	273.6	502	7.48	4.03	1.30
50	274	500	6.78	3.98	1.16

图 9 是固体产物的热值和产率随热解时间的变化情况。从图 9(a)可以看出, 当热解时间为 10~50 min 时, 增加热解时间, 对固体产物的热值影响不大。图 9(b)中固体产物的能量产率随热解时间增加变化也不大。质量产率在 10~30 min 时间段有降低的趋势, 30 min 后稳定不变。图 10 是热解时间对固体产物的工业和元素分析的影响。热解时间对挥发分和固定碳含量影响不大, 挥发分含量略微下降。随着热解时间增加, H/C 和 O/C 下降, 其中在 10~20 min 阶段, O/C 明显降低。这是因为在 250℃ 的热解温度下, 热解时间为 10~20 min 时, 会产生  $\text{CO}_2$ , 造成固体产物的 O/C 降低。综上, 可以发现热解时间对固体产物的燃烧性能影响不大, 在实际生产情况下, 可以适当缩短燃烧时间来降低燃料的生产成本。

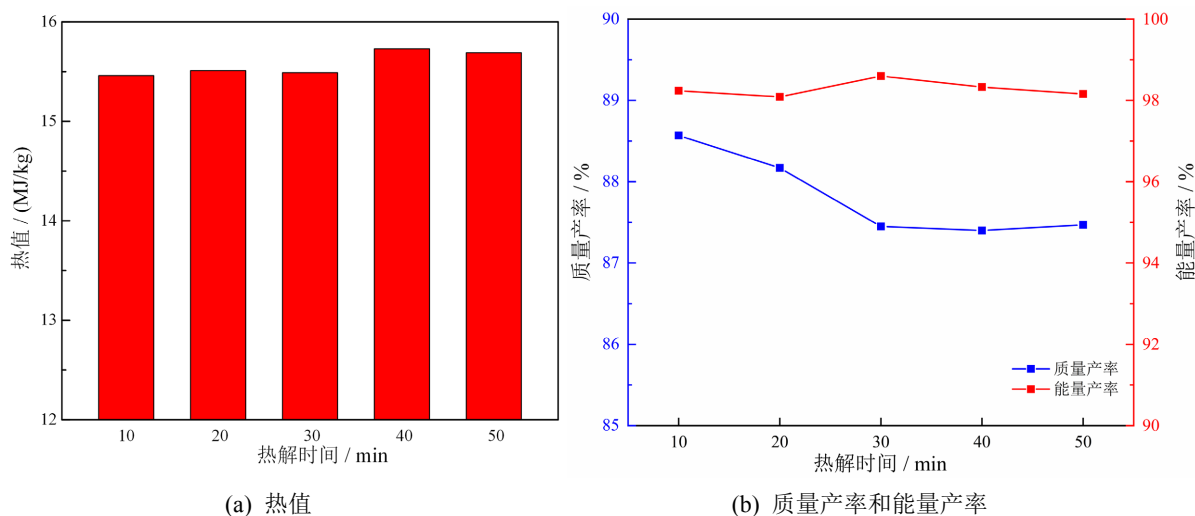


Figure 9. Calorific value and yield of solid products at different pyrolysis times

图 9. 不同热解时间固体产物的热值和产率

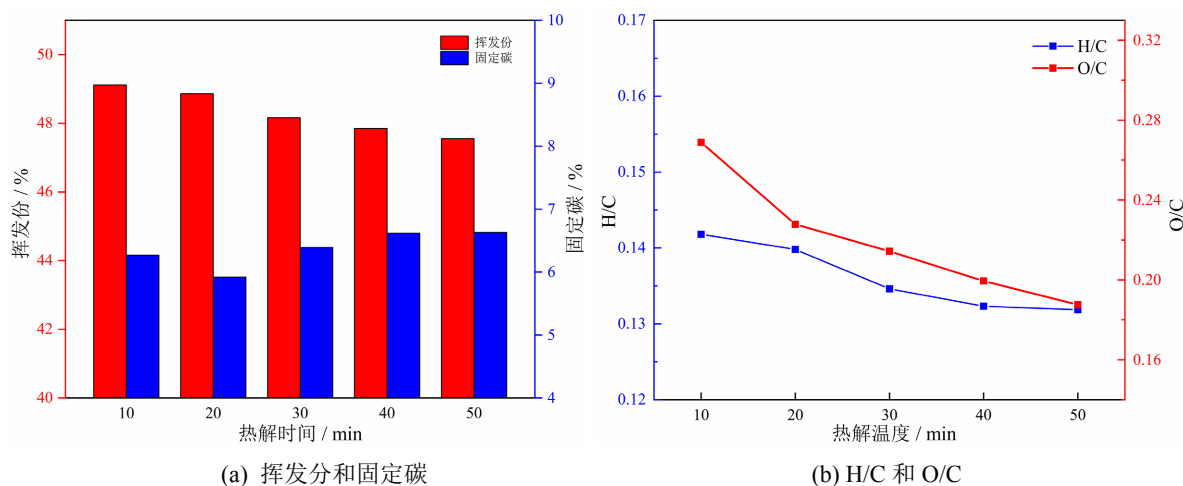


Figure 10. Industrial and elemental analysis of solid products at different pyrolysis times

图 10. 不同热解时间固体产物的工业和元素分析

#### 4. 结论

本文以污泥及塑料垃圾为原料,使用热压装置进行低温热解,通过 TG-DTG 曲线对燃烧过程进行描述,计算着火温度、燃尽温度、燃烧速率和综合燃烧性能指数,同时对热解固体产物的进行工业分析和元素分析,结合燃料热值及产率分析了不同原料配比、热解温度和热解时间得到的固体产物的燃烧特性,结论如下:

随着塑料添加比例的增加,热解固体产物的综合燃烧性能指数、燃烧速率、热值、挥发分增大,但是固定碳减小;H/C 略微下降,仅下降 0.03, O/C 下降明显,从 0.29 下降到 0.04;添加塑料可以明显改善燃料的质量产率和能量产率,但是塑料的添加比例对燃料的产率影响不大。

随着热解温度的增加,热解固体产物的综合燃烧性能指数、燃烧速率、热值和挥发分先增大后减小,固定碳逐渐增加,质量产率、H/C、O/C 逐渐降低,当热解温度小于 250℃,能量产率变化不大,但是当热解温度达到 300℃,能量产率发生骤降。

随着热解时间的增加，热解固体产物的综合性能指数略微减小，平均燃烧速率、热值、产率、挥发分、固定碳、H/C、O/C 变化不大。

塑料添加比例对热解固体产物的燃烧性能影响最大，当塑料添加比例较低时，塑料添加比例越大，固体产物的整体燃烧性能更好；热解温度次之，热解温度为 250℃时，固体产物的整体燃烧性能最优；热解时间对固体产物的燃烧特性影响不大，可以适当减少热解时间降低燃料生产成本。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(50876002)。

## 参考文献

- [1] Wang, R., Wan, S., Lai, L., *et al.* (2022) Recovering Phosphate and Energy from Anaerobic Sludge Digested Wastewater with Iron-Air Fuel Cells: Two-Chamber Cell versus One-Chamber Cell. *Science of the Total Environment*, **825**, Article ID: 154034. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154034>
- [2] Zhong, H., Liu, X., Tian, Y., *et al.* (2021) Biological Power Generation and Earthworm Assisted Sludge Treatment Wetland to Remove Organic Matter in Sludge and Synchronous Power Generation. *Science of the Total Environment*, **776**, Article ID: 145909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145909>
- [3] Ding, Z., Liu, J., Chen, H., *et al.* (2021) Co-Pyrolysis Performances, Synergistic Mechanisms, and Products of Textile Dyeing Sludge and Medical Plastic Wastes. *Science of the Total Environment*, **799**, Article ID: 149397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149397>
- [4] Duan, Z., Cheng, H., Duan, X., *et al.* (2022) Diet Preference of Zebrafish (*Danio rerio*) for Bio-Based Polylactic Acid Microplastics and Induced Intestinal Damage and Microbiota Dysbiosis. *Journal of Hazardous Materials*, **429**, Article ID: 128332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128332>
- [5] Sobik-Szołtysek, J., Wystalska, K., Malińska, K., *et al.* (2021) Influence of Pyrolysis Temperature on the Heavy Metal Sorption Capacity of Biochar from Poultry Manure. *Materials*, **14**, 6566. <https://doi.org/10.3390/ma14216566>
- [6] Ali, L., Palamanit, A., Techato, K., *et al.* (2022) Valorization of Rubberwood Sawdust and Sewage Sludge by Pyrolysis and Co-Pyrolysis Using Agitated Bed Reactor for Producing Biofuel or Value-Added Products. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 1338-1363. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15283-6>
- [7] Mahari, W.A.W., Awang, S., Zahariman, N.A.Z., *et al.* (2022) Microwave Co-Pyrolysis for Simultaneous Disposal of Environmentally Hazardous Hospital Plastic Waste, Lignocellulosic, and Triglyceride Biowaste. *Journal of Hazardous Materials*, **423**, Article ID: 127096. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127096>
- [8] Hou, J., Zhong, D. and Liu, W. (2022) Catalytic Co-Pyrolysis of Oil Sludge and Biomass over ZSM-5 for Production of Aromatic Platform Chemicals. *Chemosphere*, **291**, Article ID: 132912. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132912>
- [9] Nguyen, L.N., Hai, F.I., Dosseto, A., *et al.* (2016) Continuous Adsorption and Biotransformation of Micropollutants by Granular Activated Carbon-Bound Laccase in a Packed-Bed Enzyme Reactor. *Bioresource Technology*, **210**, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.014>
- [10] 刘义彬, 马晓波, 陈德珍, 等. 废塑料典型组分共热解特性及动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(23): 56-61.
- [11] Xu, X., Zhao, B., Sun, M., *et al.* (2017) Co-Pyrolysis Characteristics of Municipal Sewage Sludge and Hazelnut Shell by TG-DTG-MS and Residue Analysis. *Waste Management*, **62**, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.012>
- [12] Alwadai, N. and El-Bashir, S. (2022) Infrared Efficiency and Ultraviolet Management of Red-Pigmented Polymethylmethacrylate Photosensitive Greenhouse Films. *Polymers*, **14**, 531. <https://doi.org/10.3390/polym14030531>
- [13] Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., *et al.* (2022) Development of Ambient Cured Geopolymer Binders Based on Brick Waste and Processed Glass Waste. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 80755-80774. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21469-3>
- [14] Feng, X., Wu, D., Shen, X., *et al.* (2023) Activation of Sulfite by Metal-Organic Framework-Derived Cobalt Nanoparticles for Organic Pollutants Removal. *Journal of Environmental Sciences*, **124**, 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.035>
- [15] Udayanga, W.D.C., Veksha, A., Giannis, A., *et al.* (2019) Pyrolysis Derived Char from Municipal and Industrial Sludge: Impact of Organic Decomposition and Inorganic Accumulation on the Fuel Characteristics of Char. *Waste Management*, **83**, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.008>