

烘焙对厨余垃圾堆肥特性影响

杨秋^{1,2}, 顾菁², 王亚琢², 袁浩然^{1,2}, 何明阳¹, 孙富安¹

(1. 常州大学, 江苏常州 213164; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要: 厨余垃圾数量的不断增加对环境造成了严重影响, 目前厨余垃圾堆肥化产生的厨余垃圾堆肥品质较差, 并且易对土壤造成污染。本文探讨厨余垃圾堆肥在五个不同烘焙温度(250 °C、300 °C、350 °C、400 °C和 450 °C)、停留时间 30 min 条件下获得固体产物的燃料品质和燃烧特性。结果表明, 烘焙对厨余垃圾堆肥样品燃料品质(元素分析、工业分析、热值、Cl 含量、质量产率和能量产率)和燃烧特性有明显影响。随着烘焙温度的升高, 烘焙固体产物的固定碳和 C 含量、热值等提高; Cl 含量降低, 可以有效抑制燃烧过程中二噁英前驱体的生成, 减少二次污染。烘焙后的厨余垃圾堆肥的燃烧放热主要在固定碳燃烧阶段, 总体燃烧放热量增加, 燃烧特性改善。厨余垃圾堆肥的烘焙温度宜选择 250~300 °C。烘焙预处理对厨余垃圾堆肥燃料特性有明显的改善作用, 可以实现厨余垃圾堆肥无害化、减量化和资源化利用。

关键词: 烘焙; 厨余垃圾堆肥; 生物质; 燃料品质; 燃烧特性

中图分类号: TK09; X705 **文献标识码:** A

Impact of Torrefaction on the Properties of Food Waste Compost

Yang Qiu^{1,2}, Gu Jing², Wang Yazhuo², Yuan Haoran^{1,2}, He Mingyang¹, Sun Fuan¹

(1. Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The increasing amount of food waste has serious impacts on the environment. At present, the quality of food waste compost is poor, such that soil is easily polluted. This study explores the fuel properties and combustion characteristics of solid products from torrefied food waste compost at five different torrefaction temperatures (250 °C, 300 °C, 350 °C, 400 °C and 450 °C) and a residence time of 30 min. The results show that torrefaction has a significant effect on the fuel properties (ultimate analysis, proximate analysis, HHV, Cl content, mass yield, and energy yield) and combustion characteristics of the food waste compost. The fixed carbon and C content, and HHV of the solid products from the torrefied food waste compost increase; the content of Cl decreases, which effectively inhibits generation of dioxin precursors during combustion and reduces secondary pollution. Heat generated during the burning of the food waste compost after torrefaction is mainly in the fixed carbon combustion stage. Following torrefaction, the overall combustion heat discharge increased and the combustion characteristics improved. The torrefaction temperature of the food waste compost should be between 250~300 °C. Torrefaction pretreatment improves the fuel characteristics of the food waste compost significantly. Food waste compost can be treated as solid fuels to achieve harmless, reduction and resourceful utilization of food waste compost.

Keywords: torrefaction; food waste compost; biomass; fuel properties; combustion characteristic

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-05-10

通讯作者: 袁浩然, 中国科学院广州能源研究所, 研究员, 研究方向为有机固废的清洁转化; E-mail: yuanhr@ms.giec.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09); 国家青年科学基金项目(51406207,

51606202, 51606200); 中国科学院青年创新促进会项目(2014320); “广东特支计划”科技青年拔尖人才项目(2014TQ01Z379)

本刊网址: www.ensci.cn

一、前言

中国经济的快速发展，加快了城市化进程，提升了人民生活水平，但也带来了大量的城市生活垃圾。据国家统计局统计，到2016年中国城市生活垃圾的年清运量为 2.04×10^8 t，且每年都在以8%~10%的速度增加[1]，庞大的生活垃圾若处理不当将会对环境造成严重污染。中国城市生活垃圾的组分复杂，厨余垃圾是其中最主要的组成部分，约占15.74%~85.8% [2]。厨余垃圾中的水分和有机物含量较高，使得厨余垃圾极易腐败滋生细菌，同时大量的厨余垃圾被用作家畜饲料易引起疾病的传播，威胁人类健康，因此厨余垃圾“无害化、减量化和资源化”成为人们关注的焦点。

目前，厨余垃圾的主要处理方式仍为填埋和堆肥[3]，填埋处理短期内解决了厨余垃圾问题，但该方法占用大量土地，资源化程度低且严重污染土壤和水源。厨余垃圾采用堆肥化处理技术可实现其资源化利用[4]，厨余垃圾堆肥(FWC，厨余垃圾经堆肥化处理后的固体产物)不仅可缓解我国化肥资源的短缺问题，同时减轻了厨余垃圾造成的环境污染，且厨余垃圾经堆肥化处理后含水率降低，堆料孔隙率和分散度提高。但FWC中含有较多难降解物质，使得堆肥品质低，且堆肥化后的厨余垃圾中油和盐含量较高，作为肥料使用时易破坏土壤结构，造成土壤板结和盐碱化[5]。因此，必须将厨余垃圾堆肥有效处理，才能最终实现厨余垃圾无害化、减量化和资源化处理。

烘焙预处理[6,7]是在缺氧或无氧的常压环境下将物质加热到200~300℃的慢速热解过程，经烘焙处理得到的固体产物具有较高的热值和较低的含水率，同时固体产物的易磨性、能量密度和燃烧性能均得到明显的提高。文献[8]以厨余为原料，在150~600℃的温度下，停留时间为0~50 min，研究烘焙厨余产物的燃料特性，发现通过烘焙减小O/C和H/C的比率，提升了固体产物的燃料品质，同时烘焙温度比停留时间对固体产物的燃料特性影响更大。文献[9]研究烘焙对城市固体废弃物的影响，发现随着烘焙温度的升高，固体产物的O和H含量减少，固定碳含量增加，燃烧特性改善。同时，烘焙降低了城市固体废弃物中的Cl含量，且随着烘焙温度的升高，Cl含量也随之减少。本文主要探

索烘焙温度对厨余堆肥的燃料品质(工业分析、元素分析、热值、能量产率和质量产率等)和燃烧特性的影响。

化石燃料总量下降，环境污染日益严重，人类正在寻找一种清洁、可再生、可替代化石燃料的可再生能源。生物质作为可再生、清洁的能源，将成为未来的替代能源。FWC热转化为燃料可以缓解能源危机，解决厨余垃圾处理问题。

二、实验材料和方法

(一) 原料选取

实验选取我国南方地区的FWC为原料，将样品粉碎至小于50目，烘干(105℃，24 h)至恒重，封装备用。样品(干基)的工业分析、元素分析，如表1所示。从表中可以看出，FWC的O和N含量较高，燃烧时易生成NO_x等气体，且较高的O含量造成FWC的能量品质较低。

表1 FWC原样的工业和元素分析

工业和元素分析 /%	干基 /%
挥发分	77.95
灰分	11.13
固定碳	10.92
C	45.36
H	6.65
O	32.99
N	3.70
S	0.17
Cl	1.38

(二) 烘焙实验

FWC的烘焙实验在管式炉中进行(见图1)，烘焙过程中，在石英舟内称量约10 g FWC，放置在石英管中，石英管两端管口处以橡皮塞密封。向管内通入流速为100 mL/min的高纯氮气(99.99%)约30 min，以确保管内无空气残留。分别在250℃、300℃、350℃、400℃和450℃五个温度点下进行烘焙实验，升温速率为10℃/min，终温保持30 min。以冰水混合物将气体焦油冷却成液体，留在锥形瓶中，NaOH溶液吸收气体产物中的HCl，最后气袋收集恒温过程中生成的尾气。烘焙实验结束后，取出石英舟称量固体产物质量，称重后的烘焙固相

产物,经球磨机粉碎至 100 目,分别命名为 T250、T300、T350、T400 和 T450。称量石英管和橡皮塞实验前后重量以计算液相产率。根据公式(1)计算 FWC 的固体与液体的质量产率,由差减法得出气体产率,根据公式(2)来计算固体产物的能量产率。

$$X_{\text{mass}}(\text{Mass Yield}) = m(\text{torrefied FWC}) / m(\text{raw FWC}) \times 100\% \quad (1)$$

$$X_{\text{energy}}(\text{Energy Yield}) = X_{\text{mass}} \times (HHV(\text{torrefied FWC}) / HHV(\text{raw FWC})) \times 100\% \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, X_{mass} (Mass Yield)和 X_{energy} (Energy Yield)分别为质量产率和能量产率; m (torrefied FWC)和 m (raw FWC)分别为烘焙 FWC 固体产物与液体产物质量和未烘焙 FWC 原样质量,g; HHV (torrefied FWC)和 HHV (raw FWC)分别为烘焙 FWC 固体产物与液体产物热值和未烘焙 FWC 原样热值,kJ/kg。

(三) 厨余堆肥的理化特性分析

利用 SX-G07123 型马弗炉进行工业分析,根据 ASTM D3175-11 和 ASTM D3174-11 标准分别测量挥发分和灰分含量,并由差减法计算固定碳含量。利用 Vario EL cube 元素分析仪进行元素分析,然后由差减法算出 O 含量。利用 WZR-1T-CII & IKA C2000 微电脑量热仪,以 ASTM D5865-03 为标准,测量热值。

为更准确检测样品中的 Cl 含量,将 Cl 分为可溶性 Cl 和不可溶性 Cl,并采用萃取法结合艾士卡法(GB/T3558—2014)分别测定可溶性 Cl 和不可溶性 Cl 的含量。样品经萃取处理后,滤液中的 Cl 为可溶性 Cl,而滤渣中的 Cl 为不可溶性 Cl,总 Cl 的含量为可溶性 Cl 与不可溶性 Cl 的总量。根据以

下公式计算 Cl 的绝对含量:

$$W_{\text{Cl-absolute}} = W_{\text{Cl-relative}} X_{\text{mass}} \quad (3)$$

式(3)中, $W_{\text{Cl-absolute}}$ (%) 和 $W_{\text{Cl-relative}}$ (%) 分别为可溶 Cl 或者不可溶 Cl 的绝对含量; X_{mass} 为烘焙固体产物的质量产率。

(四) 燃烧实验

选用 SDT650 型快速升温热重系统研究烘焙 FWC 固体产物和未烘焙 FWC 原样的燃烧特性。燃烧实验中,选用 Al_2O_3 坩埚装样,样品的质量为 10 mg,先将加热炉从室温升至 30 °C,并在此温度保持 30 min,后以 20 °C/min 的升温速率升温至最终温度 900 °C,空气流量为 30 mL/min。

三、结果与讨论

(一) 烘焙特性

烘焙生物质是一个慢速热解过程[10,11],整个烘焙过程可分为三个阶段,即加热、烘焙和冷却。在加热阶段,样品温度从室温升高至烘焙温度,当温度大于 100 °C 时,样品中自由水蒸发析出;继续升温至 200 °C 后,半纤维素最先分解,发生脱羟基反应,生成的结合水与少量轻质挥发分释放。在烘焙阶段,样品达到烘焙温度并停留一段时间,即烘焙作用阶段,半纤维素大量分解,纤维素发生解聚脱氧反应,此阶段失重最大。在冷却阶段,样品从恒温阶段冷却至室温,其理化性质趋于稳定。

表 2 为 FWC 在不同烘焙温度下的产物分布。从表 2 可得,烘焙温度对产物的质量产率影响较大;当烘焙温度增加,FWC 中的半纤维素分解[12],使得烘焙 FWC 固体产物质量产率逐渐减

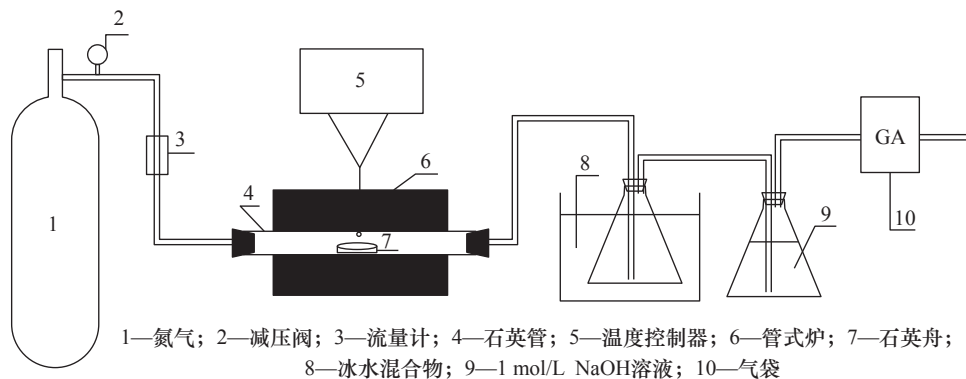


图 1 烘焙实验装置示意图

少，而大量含氧挥发物的释放促进液体产物质量产率的增加 [13]。当烘焙温度从 250 °C 升高至 300 °C 时，由于水分的损失和热分解反应生成挥发性气体 [14]，烘焙 FWC 固体产物质量产率从 77.32% 减少至 60.05%，而液体和气体产物质量产率分别从 18.44% 和 4.24% 提升至 21.78% 和 18.17%。烘焙温度继续升高，固体产物的质量产率低于 50%，大量的可燃组分从固体产物中脱除使其燃料品质降低，造成能源的浪费。

(二) 烘焙 FWC 固体产物的理化性质

未烘焙 FWC 原样中挥发分含量所占的比重较大为 77.95%，而灰分和固定碳含量则相对较小，分别为 11.13% 和 10.92%。由表 3 烘焙 FWC 固体产物的元素和工业分析可得到，烘焙温度对 FWC 的工业分析影响较大，随着烘焙温度的升高，烘焙 FWC 固体产物的灰分和固定碳含量逐渐增加，而含量最多的挥发分则显著地减少。T300 的固定碳含量与 FWC 原样相比提高了 2.1 倍，挥发分含量与 FWC 原样相比减少 36.5%。烘焙温度升高到 300 °C 前，烘焙作用占主导，水分、轻质组分和挥发性不凝气释放，挥发分含量减少。而 300 °C 后，热解反应增强，烘焙 FWC 固体产物中有机组分发生脱碳酸和脱羟基反应生成半焦，因而促进了固定碳含量的增加。烘焙 FWC 固体产物中挥发分含量降低，固定碳含量升高，燃料特性得以显著提升。

表 2 FWC 烘焙产物的质量产率

温度 / °C	固体 / %	液体 / %	气体 / %
250	77.32	18.44	4.24
300	60.05	21.78	18.17
350	47.89	31.92	20.19
400	36.76	37.95	25.29
450	30.30	45.06	24.64

灰分含量的增加归因于质量损失的增加引起碱金属物质的集聚，高灰分含量会增加燃烧过程中污染和结渣的风险，因此烘焙温度不宜太高。同时，研究人员发现并证明，生物质中的 O-H 基团的裂解和不饱和非极性物质的生成抑制了氢键的形成和水分的吸收 [15]，因而烘焙 FWC 固体产物疏水性增强，难以腐败、变质，便于作为燃料的运输和储存。

从表 3 可知，烘焙对 FWC 中的元素含量有明显的影响，温度越高影响越显著。经烘焙后，固体产物的 C 含量由于水分和轻质有机挥发分的挥发 [16] 呈现先增加后减小的趋势，T300 时达到最大为 55.32%，而当烘焙温度逐渐升高，热解反应逐渐增强（此温度范围内，烘焙反应向热解反应转变），烃类物质生成量增加使得固体产物中 C 含量减少。在烘焙过程中，FWC 原样发生含氧官能团分解以及脱羧基和脱羟基反应 [17~19]，生成 H₂O、CO 和 CO₂ 以及烃类（如甲烷）和含氧焦油等，使得烘焙 FWC 固体产物中 H 和 O 含量随着烘焙温度的升高而逐渐减小，从 T250 到 T300，烘焙 FWC 固体产物中的 O 含量快速减小。因此，烘焙可通过降低产物中 O 含量，提高烘焙 FWC 固体产物的能量密度，增加 C 含量，提升了 FWC 的燃料品质，达到能源化处理的目的。烘焙温度升高，固体产物中 N 和 S 含量均呈现减小趋势，其中 S 含量变化较大，从 T250 的 0.61% 减少到 T450 的 0.18%。烘焙使得 FWC 中的 S 和 N 含量减小，可有效降低燃烧过程中的 SO_x 和 NO_x 排放的可能性，实现 FWC 无害化处理。

燃料特性可用 O/C 和 H/C 摩尔比率进行评估，图 2 为未烘焙 FWC 原样和不同烘焙温度下烘焙 FWC 固体产物中的 O/C 和 H/C 摩尔比率。燃料中较低的 O/C 和 H/C 摩尔比率，可抑制燃烧过程中水蒸汽和烟雾的生成量，减少热力学能量损失，提升燃烧效率 [18]。随着烘焙温度的升高，FWC 固

表 3 烘焙 FWC 固体产物的元素和工业分析

固体产物	元素分析 / 干基, %					工业分析 / 干基, %		
	N	C	H	S	O	灰分	挥发分	固定碳
T250	4.36	51.69	6.44	0.61	21.90	15.00	69.20	15.80
T300	4.53	55.32	6.23	0.40	13.96	19.56	57.11	23.33
T350	4.27	54.71	5.65	0.27	9.93	25.17	45.07	29.76
T400	3.92	50.73	4.81	0.23	8.83	31.48	33.27	35.25
T450	4.08	44.19	3.22	0.18	10.97	37.36	21.05	41.59

体产物中 O/C 和 H/C 的摩尔比率逐渐减少。烘焙温度低于 300 °C 时, O/C 和 H/C 的摩尔比率急剧下降, 而当烘焙温度高于 300 °C 后, C 含量开始减少, O/C 的摩尔比率下降缓慢, 但在 T450 时有所增大, 而 H/C 的摩尔比率仍持续下降。烘焙温度高于 300 °C, O/C 和 H/C 的摩尔比率较低, 燃烧过程中水蒸气和烟气生成量低, 热力学能量损失减少, 燃烧效率提高, 因此烘焙可明显改善 FWC 的燃料特性。

FWC 中的可溶性 Cl 主要来源于 KCl 和 NaCl 等, 而不可溶性 Cl 主要来源于有机化合物, 图 3 为未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物 Cl 的绝对含量。从图中可知, 随着烘焙温度的升高, 易溶性 Cl 和不可溶性 Cl 均呈现减小的趋势。未烘焙 FWC 原样在 250 °C 下烘焙后, 易溶性 Cl 的绝对含量变化不大, 而不可溶性 Cl 从 0.16% 减小到 0.12%。在 250~350 °C 之间, 随着烘焙温度升高, 对不可溶性 Cl 的影响甚微, 而易溶性 Cl 有明显的减少, T300 中总 Cl 的绝对含量为 1.27%, 与未烘焙 FWC

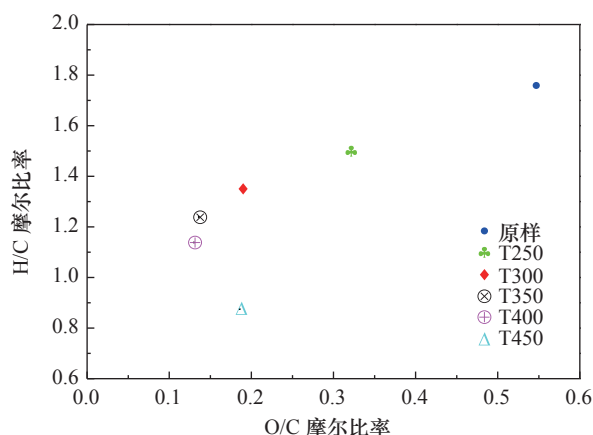


图 2 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的 O/C 和 H/C 摩尔比率

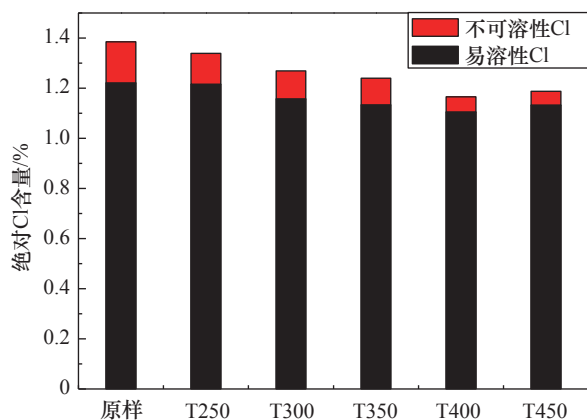


图 3 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物 Cl 的绝对含量

原样相比减少了约 0.11%。这主要是由于 Cl 与含氧官能团和自由基反应生成 HCl、CH₃Cl 和 Cl 焦油等 [20~23]。当烘焙温度在 400 °C 和 450 °C 时, 不可溶性 Cl 含量明显减少, 而易溶性 Cl 含量趋于稳定。烘焙 FWC 固体产物中 Cl 的绝对含量降低, 表明烘焙释放了 FWC 中的 Cl 元素, 减少烘焙产物燃烧过程中二噁英前驱体的排放, 避免二次污染。

能量产率是表征烘焙过程中 FWC 能量变化的有效参数, 可由质量产率和热值计算得出。图 4 是未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的热值和能量产率, 从图中可知烘焙 FWC 固体产物的热值得到明显的提升, 且随着烘焙温度升高, 固体产物的热值也随之增大, 在 300 °C 时达到最大为 24 783 kJ/kg。当烘焙温度高于 300 °C 后, 由于高温段的热解反应, 产物热值出现减小的趋势。而烘焙温度为 300~350 °C 时, 热解反应微弱, 热值减小较慢。烘焙温度高于 350 °C 后, 热解反应增强, 固体产物的热值明显减小, 因此对于 FWC 的烘焙温度过高易对热值产生负面影响。随着烘焙温度的升高, 烘焙 FWC 固体产物的能量产率从 87.83% 逐渐减小到 25.67%。当烘焙温度小于 300 °C 时, 烘焙 FWC 固体产物的能量产率在 73.9%~87.83%, 大部分的能量仍被保留在固体产物中。而当烘焙温度升高至 300 °C 以上时, 热解反应的加剧使得固体产物的能量产率逐渐减少到 60% 以下。烘焙是一个耗能的过程, 所以过高的烘焙温度不仅造成 FWC 能量的流失, 而且在烘焙过程中过多的能量消耗造成能源的浪费, 降低烘焙的经济可行性, 因此烘焙温度不宜偏高。

(三) 烘焙 FWC 固体产物的燃烧特性分析

本文根据样品的热重失重曲线及其微分曲线

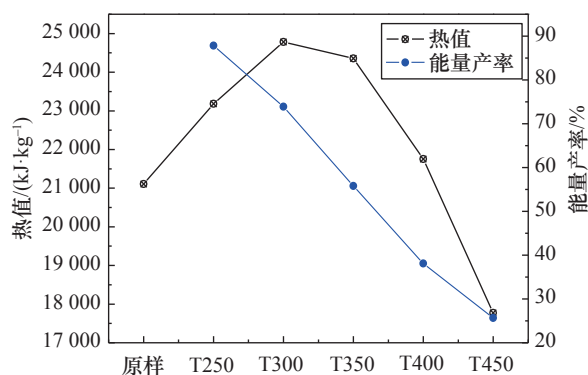


图 4 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的热值和能量产率

(TG-DTG 曲线) 定义法确定样品的着火点 (着火温度是衡量样品着火特性的重要特征点)。在 DTG 曲线上, 过峰值点 A 作垂线与 TG 曲线交于点 B, 过点 B 作 TG 曲线的切线交 TG 曲线起始平行线于点 C, 该点所对应的温度即为着火温度 (如图 5 所示)。若 DTG 曲线有多个峰就过曲线上的第一个峰值点作垂线, 与 TG 曲线的交点以确定着火点 [24]。图 6、图 7 和图 8 分别为 FWC 及其烘焙产物燃烧的 TG 曲线、DTG 曲线和热解放热量曲线 (DSC 曲线)。从图中可知, FWC 原样及其烘焙产物的燃烧可分为四个阶段 [25]。

第一阶段为水分析出阶段即干燥阶段, 样品温度从室温升到 150 °C, 该区间 TG 曲线变化平缓, 这是由于 FWC 为干基, 所以失重较小。水分的蒸发需吸收热量, 故样品燃烧的 DSC 曲线出现负值, FWC 原样峰值比烘焙后的 FWC 大, 吸热较多, 而烘焙使得 FWC 中的水分析出, 因此烘焙固体产物

吸热少, DSC 的峰值较小。

第二阶段为挥发分的释放与燃烧阶段, 温度范围在 150~420 °C, DTG 曲线出现第一个明显的峰值。该阶段低分子挥发物首先达到着火点并促进更多挥发物的燃烧, FWC 原样中的挥发分含量较高, 因而反应迅速且剧烈, 质量损失达 63%。经烘焙后, FWC 中的挥发分析出, 产物中挥发分含量减少, 着火点升高, 挥发分燃烧阶段失重减少。当烘焙温度高于 300 °C 后, 随热解反应的加剧, FWC 中大量的挥发分释放并伴随脱羧和脱羟基反应促进焦炭生成, T350、T400 和 T450 的挥发分失重峰值明显降低, 燃烧失重仅为 10%~15%, 这与工业分析的结果一致。此时 DSC 曲线出现第一个明显的峰, 即样品挥发分的燃烧, 并放出大量的热, DTG 曲线特性一致。从图中可得出, 由于 FWC 原样中较高的结合水含量以及烘焙固体产物更充分的燃烧, 经

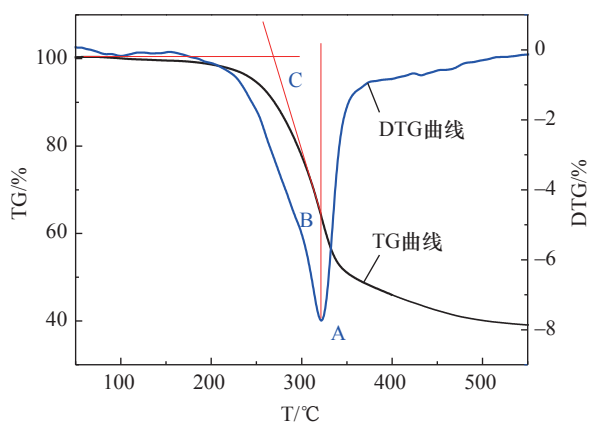


图 5 着火点的确定

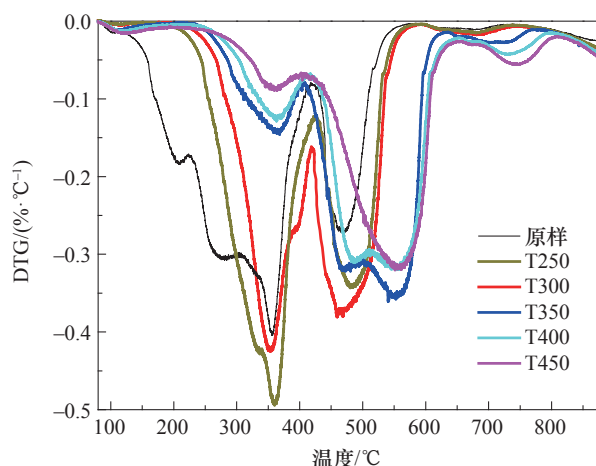


图 7 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的 DTG 曲线

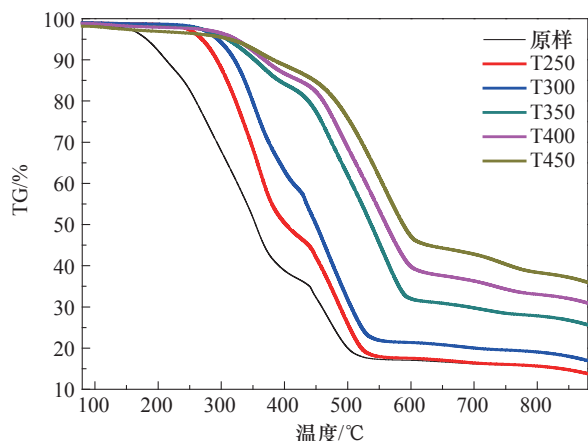


图 6 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的 TG 曲线

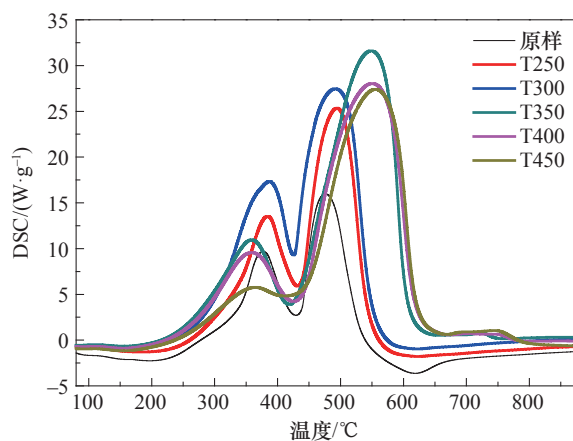


图 8 未烘焙 FWC 原样和烘焙 FWC 固体产物的 DSC 曲线

烘焙后 FWC 的挥发分燃烧阶段放热量均大于原样, 且 T250 和 T300 挥发分燃烧放热量较大, 此后烘焙温度升高而放热量降低。

第三阶段为固定碳燃烧阶段, 温度范围在 420~660 °C。挥发分的燃烧促进了 FWC 中固定碳的燃烧, 因而 DTG 曲线中第二个固定碳燃烧峰连接紧密。在固定碳燃烧的过程中, FWC 原样的失重较烘焙固体产物小, 失重峰值偏低。随着烘焙温度的升高, 烘焙产物的固定碳含量增加, 失重和失重峰值均有明显增大, 且 T300 失重峰值达最大。从 DSC 图中可以看出, 最大燃烧放热量出现在固定碳燃烧阶段, 而烘焙使得 FWC 中的固定碳含量增加, 挥发分含量减少, 因此烘焙固体产物在该阶段 DSC 曲线的峰面积和宽度增加。相对于 FWC 原样, 烘焙处理后样品的挥发分含量减少, 表面形貌改变, 燃烧所需时间缩小, 但放热量增加。而烘焙温度升高, 产物中固定碳含量增加, 燃烧放热量增加, 燃料品质提升。当烘焙温度高于 300 °C 时, 固定碳和灰分含量增加, 灰分含量的增加对碳燃烧有明显的促进作用, 因此该阶段 DSC 曲线峰面积随着烘焙温度的升高而增大。在燃烧过程中, 过高的灰分含量易引起结渣, 因此烘焙温度不宜高于 300 °C。

第四阶段为矿物质的分解 [26], 温度在 660~770 °C, 失重损失小于 5%。随着烘焙温度的升高, FWC 固体产物中灰分含量增加, 因此 DTG 曲线中 T450 的失重峰值最大。矿物质的分解是一个吸热的过程, 则 DSC 曲线为负值。

综合样品燃烧的整个过程可得出, 相比于 FWC 原样, 烘焙处理后的 FWC 燃料特性得以改善, 燃烧放热量明显增加。T350、T400 和 T450 的燃烧放热量虽大, 但能量产率较低, 烘焙时造成 FWC 中大量的能量流失, 并且过高的灰分带来的结渣和污染问题极大地限制了 FWC 作为燃料的利用, 因而最佳的烘焙温度范围为 250~300 °C。

四、结语

经研究发现, 烘焙对 FWC 的理化性质和燃料特性有很大的影响, 可作为 FWC 的预处理技术。

烘焙对 FWC 的工业分析和元素分析有显著影响, 与 FWC 原样相比, 随着烘焙温度升高, C 和固定碳含量增加, O、N、S、Cl 含量和挥发分含量

降低, 热值增大, 有利于 FWC 资源化利用, 减少二次污染, 实现无害化处理。

当烘焙温度升高, 能量密度得到提升, 但产物的质量和能量产率下降, 且烘焙是一个耗能的过程, 过高的烘焙温度会造成厨余堆肥能源的浪费, 因此烘焙温度不宜过高。

厨余堆肥及其烘焙产物的燃烧主要经历四个阶段: 预热脱水、挥发分燃烧、固定碳燃烧和矿物质分解。烘焙后厨余堆肥的燃料品质显著提升, 燃烧速率加快, 燃烧放热量也得到了明显的提升, 因此烘焙温度选择 250~300 °C 为宜。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics of the PRC. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [2] Zhou H, Meng A H, Long Y Q, et al. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 107-122.
- [3] 黄欣怡, 张珺婷, 王凡, 等. 餐厨垃圾资源化利用及其过程污染控制研究进展 [J]. *化工进展*, 2016, 35(9): 2945-2951.
Huang X Y, Zhang J T, Wang F, et al. Research progress in resource utilization of kitchen waste and its process pollution control [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(9): 2945-2951.
- [4] 席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 等. 厨余垃圾堆肥蓬松剂技术研究 [J]. *安全与环境学报*, 2003, 3(3): 41-45.
Xi B D, Liu H L, Meng W, et al. An improvement to domestic waste composting by adding different bulking agents [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(3): 41-45.
- [5] Pagans E, Barrena R, Font X, et al. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes, dependency on process temperature [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9): 1534-1542.
- [6] Arias B, Pevida C, Feroso J, et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass [J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(2): 169-175.
- [7] Park J, Meng J, Lim K H, et al. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 100(3): 199-206.
- [8] Poudel J, Ohm T I, Oh S C. A study on torrefaction of food waste [J]. *Fuel*, 2015, 140: 275-281.
- [9] Yuan H, Wang Y, Kobayashi N, et al. Study of fuel properties of torrefied municipal solid waste [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(8): 4976-4980.
- [10] Bergman P C A, Boersma A R, Zwart R W R, et al. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations [R]. Energy Centre of Netherlands, Report No ECN-C-05-013, 2005.
- [11] Uslu A, Faaij A P C, Bergman P C A. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics.

- Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation [J]. *Energy*, 2008, 33(8): 1206–1223.
- [12] Bridgeman T G, Jones J M, Shield I, et al. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties [J]. *Fuel*, 2008, 87(6): 844–856.
- [13] Mundike J, Collard F X, Görgens J F. Torrefaction of invasive alien plants: Influence of heating rate and other conversion parameters on mass yield and higher heating value [J]. *Bioresource technology*, 2016, 209: 90–99.
- [14] Sadaka S, Sharara M A, Ashworth A, et al. Characterization of biochar from switchgrass carbonization [J]. *Energies*, 2014, 7(2): 548–567.
- [15] Patel B, Gami B, Bhimani H. Improved fuel characteristics of cotton stalk, prosopis and sugarcane bagasse through torrefaction [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2011, 15(4): 372–375.
- [16] Zhang S, Hu B, Zhang L, et al. Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 119: 217–223.
- [17] Chen D, Li Y, Deng M, et al. Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 615–622.
- [18] Phanphanich M, Mani S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1246–1253.
- [19] Chen D, Zhou J, Zhang Q. Effects of torrefaction on the pyrolysis behavior and bio-oil properties of rice husk by using TG-FTIR and Py-GC/MS [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(9): 5857–5863.
- [20] Chen H, Chen X, Qiao Z, et al. Release and transformation characteristics of K and Cl during straw torrefaction and mild pyrolysis [J]. *Fuel*, 2016, 167: 31–39.
- [21] Rahim M U, Gao X, Wu H. A method for the quantification of chlorine in low-rank solid fuels [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(11): 6992–6999.
- [22] Rahim M U, Gao X, Wu H. Determination of chlorine in solid fuels using an improved Eschka method [J]. *Fuel*, 2014, 129: 314–317.
- [23] Rahim M U, Gao X, Wu H. Release of chlorine from the slow pyrolysis of NaCl-loaded cellulose at low temperatures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2891–2896.
- [24] 刘海力. 厨余垃圾的燃烧与热解特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学(博士学位论文), 2014.
- Liu H L. Study on combustion and pyrolysis characteristics of food waste [D]. Guangzhou: South China University of Technology (Doctoral dissertation), 2014.
- [25] Mi B, Liu Z, Hu W, et al. Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends [J]. *Bioresource technology*, 2016, 209: 50–55.
- [26] 朱波, 王贤华, 陈应泉, 等. 农业秸秆烘焙特性实验 [J]. *化工进展*, 2010 (s1): 120–125.
- Zhu B, Wang X H, Chen Y Q, et al. Experiment on torrefaction characteristics of agricultural straw [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010 (s1): 120–125.