餐厨垃圾水热处理中试装置的开发与产物分析

包 蕊[1]，王树众[1]，龚卫勇[2]，王 涛[3,4]，杨健乔[1]，段远望[1]
(1.西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室，陕西 西安 710049；2.广东叶沅环保科技有限公司，广东 惠州 516002；3.陕西圣昊朗道科技有限公司，陕西 西安 712000；4.陕西科技大学 机电工程学院，陕西 西安 710021)

摘 要：作为一种高效的热转化方法，水热处理技术在对餐厨垃圾以及其他有机废弃生物质进行无害化处理和价值提升方面，展现了广阔的应用潜力。文章对亚临界水热处理技术开展了深入研究，研发了餐厨垃圾水热处理工业化装置，该装置的处理量可达 10 t/d，设备的投资成本为 327.94 万元。餐厨垃圾水热处理后的生物油产率为 9%，热值为 38.63 MJ/kg，生物油中低沸点(<343 ℃)馏分的占比可达 82.62%，表明水热处理后的生物油具有作为替代燃料的潜力；水相产率为 85%，水相可调配成腐殖酸有机液体肥料；利用该装置每处理 1 t 餐厨垃圾可获利 1 302.93 元，该装置的投资回收期为 0.84 a。餐厨垃圾水热处理工业化装置攻克了餐厨垃圾等有机固废中无机组分高效分离、余热梯级回收利用等核心技术，还系统性解决了餐厨垃圾水热处理技术工业化面临的技术瓶颈。

关键词：水热；废物处理；再生能源；中试装置；生物油；有机液肥
中图分类号：TK6 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)12-1563-08

0 引言

随着我国居民生活水平的提高，餐厨垃圾的产生量呈现出逐年上升的趋势。有研究指出，到 2025 年，我国的餐厨垃圾产生量将高达 1.7 亿 t[1]。传统的餐厨垃圾处理技术有粉碎直排法、填埋法、焚烧法、厌氧发酵法、堆肥法等[2]。粉碎直排法不仅会加大城市污水污泥处理负荷，还易导致管网堵塞，造成水质污染和生态环境破坏；填埋法存在综合回收利用率低、占用大量土地、引发渗滤液污染水质等问题；焚烧法的能耗高，同时产生二噁英等二次污染物；厌氧发酵法存在周期长、转化效率低的问题，若有机组分未进行充分转化就排放，还存在环境风险；堆肥法存在周期长，无害化不彻底的问题。综上所述，传统技术具有一定的局限性，存在种种弊端，甚至可能造成二次污染问题，无法应对当前国内餐厨垃圾处理问题的巨大挑战。因此，结合餐厨垃圾自身的固有属性，开发一种能彻底实现餐厨垃圾减量化、资源化和无害化的新型处理技术迫在眉睫。

作为一种高效的热转化方法，水热处理技术在对餐厨垃圾以及其他有机废弃生物质进行无害化处理和价值提升方面，展现了广阔的应用潜力。应用亚临界水热技术处理餐厨垃圾，具有以下显著优势：水热液化技术通过加压使水保持亚临界状态，避免了水气化相变过程的能耗，特别适用于高含水率的有机固废的处理；反应速度快，无害化更彻底，高温、高压条件可彻底杀灭餐厨垃圾中的病原体。尽管国内外在生物质的水热转化研究方面已经取得了一定进展[3]，但大型工业化水热处理案例仍然罕见。这主要是因为该技术面临诸多挑战，包括有机和无机物料分离困难、有机物料加热和输送易堵塞、运行成本高、油品质量不佳以及废水处理难度大等问题。具体来说，餐厨垃圾中混杂的塑料包装、金属餐具和纸盒等，不仅影响水热处理的效率，还可能导致设备故障。此外，餐厨垃圾中含有的大分子有机物在加热过程中容易产生焦化和结垢现象，从而增加了系统堵塞的风险。同时，将反应物料加热至 200~300 ℃，会导致整个系统的能耗增加。从油品质量的角度来看，部分未完全水解的大分子有机物含有氮、氧元素，会导致生

收稿日期：2024-06-03。
基金项目：国家自然科学基金项目(52176162)。
作者简介：包 蕊(1995-)，女，博士研究生，主要从事生物质亚/超临界水热转化技术及其高效绿色资源化利用研究。
E-mail：baorui@stu.xjtu.edu.cn

成的生物油粘度升高、酸值增大。另外,水热处理后的废水表现为高化学需氧量和高盐分含量,采用常规的生化处理或膜浓缩技术难以实现有机物和无机盐的同步处理。深入研究和解决上述技术瓶颈,对推进水热处理技术的工业化应用至关重要。

本文研发了一套处理量可达 10 t/d 的餐厨垃圾水热处理工业化装置,同时对餐厨垃圾水热处理后的生物油及水相的性质开展了深入研究。通过试验验证了餐厨垃圾水热处理工业化装置的可行性和可靠性,有效解决了水热处理技术在大规模工业化应用中遇到的技术瓶颈,为餐厨垃圾的资源化回收和能源化利用奠定了基础。

1 工业化装置开发

1.1 工艺流程

本文设计开发的处理量为 10 t/d 的餐厨垃圾水热处理工业化装置如图 1 所示。该装置主要分为预处理单元、水热转化反应单元、产物冷却降压分离单元以及有机水溶肥调配单元。

预处理单元:餐厨垃圾通过垃圾车或垃圾桶,

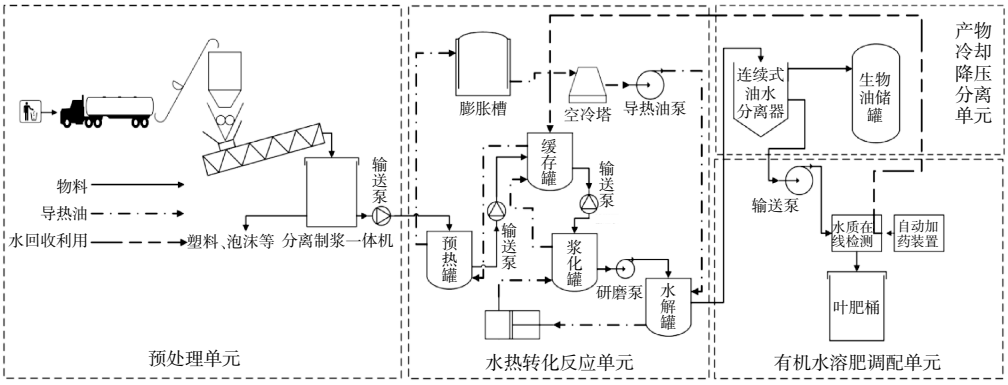


图 1 餐厨垃圾水热处理流程

Fig.1 Hydrothermal treatment process of food waste

被举升装置输送到进料料斗中。料斗中的物料经过撕碎机进行第一次破碎处理,然后固相物料经上料螺旋输送到分离制浆一体机,水相物料经水箱缓存后同样泵送到分离制浆一体机中。在分离制浆一体机中,餐厨垃圾中掺混的塑料、泡沫等轻质杂质被分离出来,经过水洗装置后进入回收桶,剩下的餐厨垃圾被制成毫米级粒径的浆状物质,进入反应模块进行四级热水解反应。

水热转化反应单元:餐厨垃圾首先定量输送到预热罐,该容器的作用是对预处理后的物料进行存储,并利用多余的热量进行一级预热。然后物料被输送到缓存罐,缓存罐作用是二级预热以及第一次分油,经过 80 ℃热水解后,物料中的甘油三酯成分被分离出来,剩余的餐厨垃圾经过研磨泵处理后,输送至浆化罐。研磨泵将固体颗粒研磨至 20 μm 粒径,并在浆化罐内充分均匀制浆。在浆化罐中,物料进行三级预热,加热至 160 ℃,然后输送到水解罐内,进行四级预热,并发生高温热水解反应(反应温度为 280 ℃,反应时间约为 30 min),物料中的有机质转化为生物油。反应完成后的物料开始进行余热回收,通过中间换热介质,水解罐依次与浆化罐、缓存罐和预热罐进行热量交换,实现三级余热回收,最大程度回收反应热量,实现节能减排。

产物冷却降压分离单元:包括燃气/电双模导热油加热系统和空冷塔,用于系统升/降温。产物分离采用连续式油水分离器,分离后的生物油存储在生物油储罐。

有机水溶肥调配单元:完成换热后的物料进入后处理单元,在连续式油水分离器中分离出来的水相经过输送泵进入叶肥桶进行有机水溶肥调配,调配后的肥料可用于土壤施肥。

1.2 本系统的技术优势

本套餐厨垃圾水热处理工业化装置的日处理量为 10 t,年处理量可达 3 000 t,可用于处理约 4 000 km^2 地区居民产生的餐厨垃圾。该装置的生物油产率为 9%,水相(可调配成有机液肥)产率为 85%,真正意义上实现了餐厨垃圾的无害化、资源化处理。同时,本系统具有以下技术优势。

①餐厨垃圾混合物料有机-无机物高效分离

由于我国垃圾分类政策执行力度有限,餐厨垃圾原料中普遍含有塑料包装袋、金属刀叉、纸盒等固废,在进行水热处理前,须将上述物质与餐厨垃圾进行彻底分离。本装置设有餐厨垃圾高效预处理系统,可高效分选塑料袋、金属等,同时降低了餐厨垃圾的含水率,提高了系统运行的安全可靠性,降低了运行成本。该技术成功攻克了我国餐厨垃圾难以自动化分离的瓶颈问题,实现了有机餐厨垃圾浆料持续稳定供应的目的,为餐厨垃圾连续式水热处理装置的运行提供了保障[4]。

②以中间介质换热为核心的系统余热梯级回收

餐厨垃圾中含有大量大分子有机物,而水热处理反应的温度高达 200~300 ℃(能耗较高),如果采用燃气加热或电加热方式直接对浆料进行加热,易出现结焦、结垢甚至堵塞管路的现象。为解决该问题,设计开发了系统余热梯级回收技术,设置物料三级预热装置,通过中间换热介质将完成热水解反应后的高温物料的热量依次传递到多个预热装置中,加热过程采用小温差快速升温加热,换热过程采用逆流布置进行高效换热,实现冷态物料的梯级预热升温。该技术成功攻克了高粘度有机固废的预热结焦问题,通过梯级回热有效降低了运行成本,提升了有机固废高温水热处理装置长期连续运行的安全稳定性。

③反应产物的能源化、资源化利用

该装置可将水热处理过程产生的生物油以及可燃性烃类气体进行燃烧放热,作为物料预热的能量来源,实现能源化利用。由于这些生物油燃料是通过水热处理反应从有机固废中转化而来的,而非来自于化石燃料,属于低碳燃料,为实现“碳中和”提供了发展思路。水相产物含有大量有机物质(总有机碳含量可达 27 000 mg/L),这些有机物质是肥料中的重要组成部分,通过添加其他元素可调配成满足国家标准的腐殖酸水溶性有机肥(NY1106-2010),实现资源化利用。

2　中试装置产物分析

餐厨垃圾取自惠州市市区内的餐馆,餐厨垃圾中粗蛋白、粗脂肪、纤维素、半纤维素、木质素和糖类的含量分别为 18.89%,19.33%,5.36%,17.05%,8.93%和 23.15%,灰分、挥发分和固定碳的含量分别为 7.29%,78.49%和 14.22%。1 t 餐厨垃圾经过水热液化中试装置处理后,可产生 90 kg 生物油,850 kg 水相(可调配成有机液体肥料),因此,生物油产率为 9%,水相产率为 85%。

2.1　产物分析表征方法

采用 EA3000 型元素分析仪测定生物油中的有机元素,通过差值计算氧含量。使用 METTLER TOLEDO TGA/DSC3+型同步热分析仪 [温度为 10~800 ℃,升温速率为 15 ℃/min,载气(高纯 N_2)流量为 40 mL/min]对生物油进行热重分析及馏分分析。采用 GCMS-QP2010 Ultra 型气相色谱-质谱联用仪(入口温度、离子源温度和界面温度分别为 250,230,280 ℃,总压力为 65.2 kPa,总流量为 14 mL/min, 线速度为 36.8 cm/s, 吹扫流速为 3.0 mL/min) 对生物油进行定性分析。采用 Bruker VERTEX70 型 FT-IR 光谱仪对生物油中主要有机成分的官能团进行分析,波数为 4 000~400 cm^{-1}。

采用 Multi N/C2100S 型总有机碳分析仪[3]对液相产物进行总有机碳分析。采用 LH-3BN 型智能总氮分析仪测定总氮含量。采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)测定总磷含量。采用Optima 8000 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定 Na,K,Mg,Ca 的含量。采用 NexION 350D 型电感耦合等离子体质谱仪 [4](ICP-MS)测定 Fe,Al,Cu,Zn,Mn,Mo,Ni,Cd,As,Sr,Ti,Cr,Hg 和 Pb 的含量。

2.2　生物油元素和热值分析

对餐厨垃圾和水热处理中试装置产生的生物油进行性质分析,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:餐厨垃圾经过水热处理后,C,H 元素的含量显著升高,C 元素含量由 45.37%

表 1　餐厨垃圾原料与生物油的元素和热值分析

Table 1 Elemental and higher heating value analysis of food waste and bio-oil

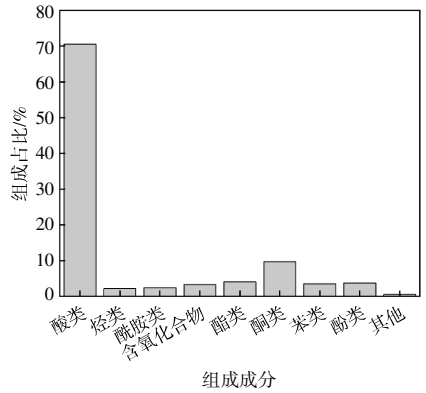
原料	元素分析/%					元素比			热值
	C	H	N	S	O	H/C	O/C	N/C	MJ/kg
餐厨垃圾	45.37	6.21	3.97	0.52	43.93	0.136 9	0.968 3	0.087 5	16.37
生物油	72.71	11.49	2.72	0.15	12.94	0.158 0	0.177 8	0.037 4	38.63

增加到72.71%,H元素含量由6.21%增加到11.49%;N,S,O元素的含量显著下降,N元素含量由3.97%降至2.72%,S元素含量由0.52%降至0.15%,O元素含量由43.93%降至12.94%;生物油的热值可达到38.63 MJ/kg,与石油的热值相当[5]。

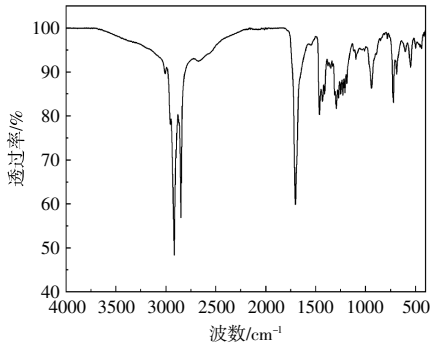
2.3 生物油性质分析

生物油性质分析结果如图2所示。

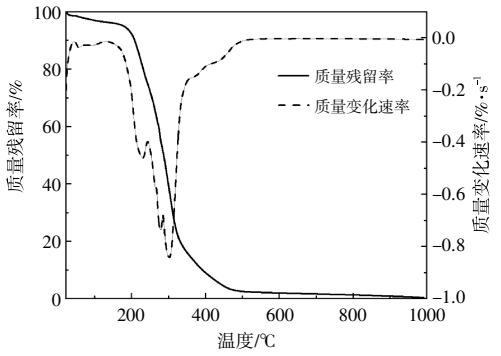
从图2(a)可以看出,餐厨垃圾水热生物油的主要组分为酸类、酮类、酯类、酰胺类、烃类等物质。其中,酸类物质可达到70.53%,脂肪酸类物质主要来自脂肪的水解,而酰胺类物质主要是通过脂肪酸和NH_3(氨基酸脱氨基产物)或有机胺(氨基酸脱羧基产物)脱水缩合反应生成。酰胺类物质进入生物油中,会增加生物油的氮元素含量[6]。生物油中还检测到了少量的烷烃,占比在2.2%。



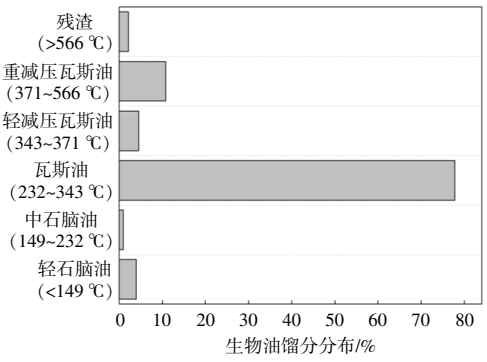
(a)组成成分



(b)傅里叶红外光谱



(c)热重分析



(d)馏分分析

图2 生物油性质分析

Fig.2 Analysis of bio-oil properties

相比于离子色谱,傅里叶红外光谱不受生物油组分沸点的限制,可以提供更多的生物油官能团信息[7-9]。从图2(b)可以看出:3 005 cm^{-1}处的峰是由于苯环的C-H对称和非对称伸缩振动;2 922,2 852,1 464,1 378 cm^{-1}处的峰表明生物油中存在大量的C-H,主要来源于生物油中的脂肪族化合物;1 709 cm^{-1}和1 651 cm^{-1}处是C=O伸缩振动的特征峰,主要来源于羧酸、酰胺和酯类等物质;1 244,1 117,966 cm^{-1}处的峰值来源于酸和酯类的C=O;721 cm^{-1}处的尖锐峰表明了长链烃类化合物的存在;1 551 cm^{-1}和1 409 cm^{-1}处的峰是由于N-H的弯曲振动和C-N的伸缩振动。

从图2(c)可以看出,生物油的热解过程分为两个步骤,在0~175 ℃,是生物油中水分的蒸发,在175~500 ℃,是生物油中组分的热分解,最大的重量损失发生在200~500 ℃。生物油的热解过程主要包括3个阶段:0~200 ℃为初始阶段,主要是生物油中轻质组分和水分的析出;200~500 ℃为热解的主要阶段,此时生物油中的有机成分经历裂解过程[10],导致质量损失达到91.15%;超过500 ℃为缓慢热解阶段,此时热解的速度明显减缓,尽管温度经历了较大幅度的提升,但生物油的质量减少却相对较少,仅为3.97%,这个阶段的失重主要归因于重组分的分解,以及热解过程中产生的焦油发生了二次裂解(形成灰分)[11]。

根据沸点的不同,石油可分为轻石脑油(沸点<149 ℃)、中石脑油(沸点为149~232 ℃)、瓦斯

油(沸点为 232~343 ℃)、轻减压瓦斯油(沸点为 343~371 ℃)、重减压瓦斯油(沸点为 371~566 ℃)和残渣(沸点>566 ℃)[12]。从图 2(d)可以看出,大部分餐厨垃圾水热生物油落在瓦斯油 (77.75%)和重减压瓦斯油(12.10%)馏程范围内,生物油中低沸点(<343 ℃)馏分的含量可达到 82.62%。对于水热处理生物油的应用而言, 轻石脑油可以作为汽油的组成部分;中石脑油可用于喷气发动机;瓦斯油可用于生产柴油、取暖油和一些化工原料;重减压瓦斯油通常用于燃料油、柴油和润滑油的制造。综上可知,水热处理生物油作为替代燃料具有巨大潜力[13]。

2.4　水相分析及调配制肥

餐厨垃圾经过水热处理后, 所得水相的性质见表 2。

表 2　水相性质及腐殖酸水溶性肥料调配方案

Table 2 Aqueous phase properties and formulation strategy for humic acid water-soluble fertilizer

水相分析与调配方案	项目	数值
水相性质	总有机碳含量/g·L^{-1}	26.94
	总氮含量/g·L^{-1}	5.73
	总磷含量/g·L^{-1}	3.50
	总钾含量/g·L^{-1}	1.21
	微量元素总含量/g·L^{-1}	2.65
	pH	5.47
	含固率/%	4.82
	重金属总含量/mg·L^{-1}	<0.066
调配成腐殖酸水溶性肥料需添加的营养物质(以 1 t 餐厨垃圾为例)	腐殖酸/kg	120
	硫酸铵/kg	293.84
	磷酸二氢钾/kg	12.69
	硫酸钾/kg	14.45

由表 2 可知, 水相的 pH 为 5.47, 含固率为 4.82%,水相中总有机碳、总氮、总磷和总钾的含量分别为 26.94,5.73,3.50,1.21 g/L。水相中的微量元素包括 Na,Mg,Fe,Al,Mn,Ti,Cr,Ca,Zn,Cu,Ni,Sr 等, 其总含量为 2.65 g/L, 重金属(As,Co,Cd,Hg,Pb)总含量小于 0.066 mg/L。

餐厨垃圾经过水热处理产生的水相中含有氮、磷、钾和微量元素,可调配成腐殖酸水溶性肥料。根据水相的性质和国标《NY1106-2010 腐殖酸水溶性肥料》的规定,1 t 餐厨垃圾产生的水相产物若要调配成腐殖酸水溶性肥料, 需要向水相中添加腐殖酸原液 120 kg, 硫酸铵 293.84 kg,磷酸二氢钾 12.69 kg,硫酸钾 14.45 kg。将餐厨垃圾经过水热处理产生的水相调配成腐殖酸水溶性肥料的方法颠覆了国内外传统的观念, 该方法通过高温水热处理餐厨垃圾, 将植物难以直接吸收的大分子物质迅速转换成易于利用的小分子形式,这一过程涉及到化学能量的转换。通过引入能量增强剂, 制造出能替代传统化学肥料的有机水溶性肥料, 这种肥料属于促进作物增产的环保型产品。它不仅能有效地改善土壤质量、增加作物产量、控制植物病害,还能提升作物的质量,进而促进生态系统的健康循环,实现环境保护、经济收益与社会利益的协调发展。

3　经济性核算

3.1　设备价格

餐厨垃圾水热处理系统主要包括进料料斗、双轴撕碎机、U 型螺旋输送机和分选制浆机、预热罐、缓存罐、浆化罐、水解罐、产物分离器、叶肥调配罐、导热油加热系统等设备,主要设备清单见表 3。

表 3　餐厨垃圾水热处理系统主要设备清单

Table 3 Main equipment list for the food waste hydrothermal treatment system

设备名称	投资成本/万元
进料料斗	22.04
双轴撕碎机	4.56
U 型螺旋输送机	7.22
分选制浆机	19.76
离心泵(物料输送)	5.7
研磨泵	20.14
隔膜泵	3.8
预热罐	22.8
缓存罐	7.6
浆化罐	20.14
水解罐	72.96
磁力搅拌器	26.6
导热油加热系统	76
产物分离器	4.56
叶肥调配罐	8.74
臭气处理系统	5.32
总投资成本	327.94

3.2　经济效益评估

对餐厨垃圾水热处理系统的经济效益进行评估,结果见表 4,5。

餐厨垃圾水热处理工艺的运行成本包括燃料动力费、腐殖酸水溶性肥料的调配成本、除臭单元药剂费用、收运成本、人工成本和装置折旧费。由表 4 可知,每处理 1 t 餐厨垃圾,餐厨垃圾水热处

表 4 餐厨垃圾水热处理系统的运行成本

Table 4 Operating cost of the food waste hydrothermal treatment system

项目	说明	成本/元·t^{-1}
燃料动力费	电费和天然气费	247
腐殖酸水溶性肥料调配成本	腐殖酸原液和氮、磷、钾肥料	1 355
除臭单元药剂	植物液喷淋剂每日用量为 0.36 kg,单价为 30 元/kg;氢氧化钾每日用量为 3.6 kg,单价为 7.8 元/kg	3.9
收运成本	收集餐厨垃圾所产生的人工、运输以及管理成本等	70
人工成本	装置运行期间处理餐厨垃圾所产生的人工费用	10.17
装置折旧费	设备折旧费按照运行 10 a 计算,均摊到处理餐厨垃圾的费用	109
	合计	1 795.07

表 5 餐厨垃圾水热处理系统的收益

Table 5 Economic benefits of the food waste hydrothermal treatment system

项目	说明	收益/元·t^{-1}
餐厨垃圾处理费	根据地域差异,处理餐厨垃圾可获得 300~500 元/t 的政府补贴	400
生物油收益	按 280 ℃水解条件下 9%的产油率(湿基物料)计算,生物油的售价为 2.5 元/kg	225
腐殖酸水溶肥收益	按国标水溶肥计算	2 473
	合计	3 098

理工艺的运行成本为 1 795.07 元。

餐厨垃圾水热处理工艺的收益包括餐厨垃圾处理费收益、生物油收益和腐殖酸水溶肥收益。由表 5 可知,每处理 1 t 餐厨垃圾,餐厨垃圾水热处理工艺的收益为 3 098 元。

结合表 4,5 可知,利用本文设计的餐厨垃圾水热处理工艺处理 1 t 餐厨垃圾所获得的利润为 1 302.93 元。整套装置的投资成本为 327.94 万元,装置的餐厨垃圾年处理量可达 3 000 t,因此,经过 0.84 a 即可完成投资成本的回收。

4 应用前景

餐厨垃圾亚临界水热处理技术是一项高效的处理有机固体废弃物的方法,可实现有机固体废弃物的无害化和资源回收。该技术的广泛推广应用,将使我国在难降解有机废物的处理领域实现质的飞越,产生巨大的环境效益和社会效益,这些效益主要体现在以下方面。

①解决有机固废处理问题,保护生态环境。经过水热处理,可彻底将有机固废中的病毒、细菌全部灭活,有效抑制病原体的蔓延传播;同时去除了有机固废中的硫醇、硫醚类物质,避免了堆肥产生的有机质腐烂发臭引发的环境污染;在餐厨垃圾处理过程中,不产生废水、废气、废渣,同时也避免了噪音污染,因此是一种环保型的处理技术。

②作为低碳技术,有助于“碳中和”的实现。由于生物油燃料是通过水热反应从有机固废中转化而来,而非来自于化石燃料,属于低碳燃料,为我国能源部门实现“碳中和”提供了发展思路,有助于抑制全球变暖进程。

③节约土地资源。由于水热处理技术的水热反应速度快,与好氧、厌氧技术相比,处理时间显著降低(好氧技术需 2~3 周完成反应,而水热处理仅需 30~60 min);与焚烧技术相比,节约了尾气、飞灰处理装置的占地。采用水热处理技术替代传统好氧堆肥、焚烧技术,能有效降低设备所需空间,从而节省土地使用。

④增加就业岗位,增加政府财政税收。以我国当前餐厨垃圾年产量 1.3 亿 t 计算,需要 50 t/d 处理装置约 85 000 套,按照单套装置劳动定员 9 人计,可提供 70 余万个就业岗位。如果计算上游装备制造、下游叶肥销售及物流运输等配套行业,则能够提供更多就业岗位,有效缓解当前就业市场紧张程度,为社会稳定做出贡献。

5 结论与展望

本文对亚临界水热处理技术开展了深入研究与技术攻关,开发了有机固废中无机组分高效分离、余热梯级回收利用等核心关键技术,从而系统地解决了餐厨垃圾水热处理技术工业化面临的瓶颈问题。该餐厨垃圾水热处理工业化装置的处理量可达 10 t/d,餐厨垃圾水热处理后的生物油产

率为 9%,生物油的热值为 38.63 MJ/kg,与石油热值相当;水相的产率为 85%,水相可调配成腐殖酸有机液体肥料。该装置的设备投资成本为 327.94 万元,每处理 1 t 餐厨垃圾可获利1 302.93 元,投资回收期为 0.84 a。

餐厨垃圾水热处理工业化装置的建成为我国年产量高达 1.3 亿 t 的餐厨垃圾的处理提供了有效解决方案。餐厨垃圾经过亚临界水热处理后,致病菌、病毒被彻底灭活,蛋白质、脂肪、糖类等有机固废被高效转化为生物油,液相产物被制成植物叶面肥,气相产物作为燃料实现了能源化利用,做到了三废零排放。这项技术将推动我国在处理高浓度难分解有机废物领域实现跨越式发展,并带来巨大的经济、环境和社会效益。

参考文献:

[1] 刘伟利,吴佳源,袁越,等.餐厨垃圾厌氧消化处理及影响因素分析[J].低碳世界,2024,14(1):7-9.

[2] 胡世梯,姚赛,易志刚,等.餐厨垃圾厌氧沼渣处理及资源化利用研究进展[J].四川环境,2023,42(4):366-372.

[3] Hossein S,Hamed K S P,Mona D,et al. Biomass to biofuels using hydrothermal liquefaction:A comprehensive review [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2024,189:113976.

[4] 吴福祥,刘欢.基于水力旋流制浆技术的餐厨垃圾预处理工程应用[J].环境科技,2024,37(2):30-33.

[5] Jelena I, Emilija V, Malisa A, et al. Pyrolysis of corn stalks:The potential of using bio-oil as a fuel[J].Journal of the Serbian Chemical Society,2024,89 (12):1675-1687.

[6] Bao R,Wang S,Feng J,et al. A review of hydrothermal biomass liquefaction:Operating parameters,reaction mechanism, and bio-oil yields and compositions[J]. Energy & Fuels,2024,38(10):8437-8459.

[7] 陈荣杰,王龙洲,李清海,等.响应曲面法优化木质素水热转化生产生物油 [J]. 可再生能源,2023,41(3):285-290.

[8] 刘光蓉,李静,黄强.云南小粒咖啡壳水热液化产物分析[J].生物质化学工程,2023,57(4):53-59.

[9] 张洪伟,张顺元,张克江.生物质水热处理研究进展[J].生物质化学工程,2024,58(1):67-76.

[10] 刘思梦,张守玉,孙梦圆,等.水热/水热氧化处理过程中棉秆三组分对其热解行为的影响[J].可再生能源,2023,41(10):1279-1286.

[11] 杨天华,刘正,李秉硕,等.三种木质素水热处理制备生物油实验研究[J].燃料化学学报(中英文),2023,51(8):1084-1095.

[12] 舒迪.餐厨垃圾水热处理制取生物油/焦的研究[D].杭州:浙江大学,2019.

[13] Bao R,Wang S,Feng J,et al. Comprehensive utilization for hydrothermal conversion products of food waste[J]. Journal of Cleaner Production,2024,453:142115.

Development and product analysis of pilot-scale hydrothermal treatment system for food waste

Bao Rui[1], Wang Shuzhong[1], Gong Weiyong[2], Wang Tao[3,4], Yang Jianqiao[1], Duan Yuanwang[1]
(1.Key Laboratory of Thermal Flow Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.Guangdong Yeyuan Environmental Protection Technology Co.,Ltd., Huizhou 516002, China; 3.Shaanxi Shenghao Langdao Technology Co.,Ltd., Xi'an 712000, China; 4.School of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: As a highly efficient thermochemical conversion method, hydrothermal treatment technology demonstrates broad application potential for the harmless disposal and value-added utilization of food waste and other organic biomass residues. In this paper, subcritical hydrothermal treatment was systematically investigated, and a polit-scale hydrothermal treatment system for food waste was developed with a processing capacity of 10 t/d and a total capital investment of 3.279 4 million yuan. The bio-oil yield obtained from food waste hydrothermal treatment system reached 9%, with a higher heating value of 38.63 MJ/kg, and low-boiling-point fractions (<343 ℃) accounted for 82.62% of the bio-oil, indicating its strong potential as an alternative fuel. The aqueous-phase yield was 85%, and the aqueous products could be formulated into humic acid-based liquid organic fertilizer. Economic evaluation showed that a net profit of 1 302.93 yuan could be achieved per ton of food waste treated, with an investment payback period of 0.84 years. The developed industrial hydrothermal treatment system successfully overcame several core technologies, including the efficient separation of inorganic components from organic solid waste and the cascade recovery and utilization of residual heat. Moreover, the system provides an integrated solution to key technological bottlenecks that have hindered the industrialization of food waste hydrothermal treatment. Furthermore, it systematically resolved the technical bottlenecks facing the industrialization of food waste hydrothermal treatment technology.

Keywords: hydrothermal; waste treatment; renewable energy; pilot-scale system; bio-oil; organic liquid fertilizer