

新型全混合式厨余垃圾生物干化工艺效能实证研究

严祥瑞¹,辛立庆¹,王昊书^{1,2},马 壮²,秦 勇¹,吴伟祥^{1*} (1.浙江大学环境与资源学院,浙江 杭州 310058; 2.浙江传超环保科技有限公司,浙江 杭州 311100)

摘要: 开发了一种新型连续进料全混合式厨余垃圾生物干化工艺,通过中试试验探究了该工艺运行效能及其对物料温度、含水率和热值的影响规律。结果表明,该工艺可显著缩短升温时间,维持物料 $>50^{\circ}\text{C}$ 的高温区段 20h/d;在最佳运行条件(通风速率 $0.171\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{h})$,最低控制温度 45°C ,干化周期 7d)下,厨余垃圾含水率可降至 $(34.86\pm 1.71)\%$,水分单位去除量达 $(716\pm 23)\text{kg}_{\text{水}}/\text{t}_{\text{垃圾}}$,运行能耗仅为 $77.91\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}_{\text{垃圾}}$,低位热值高达 $(6681\pm 119)\text{kJ}/\text{kg}$,满足垃圾焚烧进炉要求,可有效实现厨余垃圾快速衍生燃料化。

关键词: 厨余垃圾; 连续式全混合式生物干化工艺; 效能; 低位热值

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)07-3291-07

Empirical study on the performance of the novel full-mixed kitchen waste biodrying. YAN Xiang-rui¹, XIN Li-qing¹, WANG Hao-shu^{1,2}, MA Zhuang², QIN Yong¹, WU Wei-xiang^{1*} (1.College of Environmental and Resource Sciences, Zhenjiang University, Hangzhou 310058, China; 2.Zhejiang Transfer Environmental Protection Technology Co., Ltd, Hangzhou 311100, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3291~3297

Abstract: The research developed a continuously full-mixed biodrying process of kitchen food waste. Impacts of the process performance on matrix's temperature, moisture content and calorific values etc. were investigated at the pilot-scale. Results showed that it could not only significantly shorten start-up heating time, but also maintain high-temperature zone ($>50^{\circ}\text{C}$) of the matrix temperature during the continuous operation of the biodrying for 20h/d. Under the optimal operation condition, such as ventilation volume of $0.171\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{h})$, heating temperature of 45°C and retention time of 7d, the moisture content of kitchen food waste could be reduced to $(34.86\pm 1.71)\%$ with a unit water removal rate of $(716\pm 23)\text{kg}_{\text{water}}/\text{t}_{\text{waste}}$ and energy consumption of $77.91\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}_{\text{waste}}$. The low calorific value of its derived fuel reached up to $(6681\pm 119)\text{kJ}/\text{kg}$, which fulfilled the requirement for waste incineration and could rapidly convert kitchen waste to feed for fuel.

Key words: kitchen waste; continuously full-mixed biodrying process; performance; low calorific value

据统计,厨余垃圾占我国生活垃圾总量的 60% 左右,含水率高达 70%~80%^[1-3]。受设施处理能力规划、审批与建设时效等因素限制,预计在相当长的一段时期我国厨余垃圾将无法完全通过厌氧产沼或堆肥进行资源化利用。借助现有焚烧设施,通过生物干化实现厨余垃圾资源能源化利用是一条切实可行的途径。该技术利用生化反应热和强制通风加速水分蒸发,实现物料含水率的快速脱除^[4-5]和低位热值的显著提升^[6-7],制备衍生燃料(RDF)^[8]。

从已有的批次式厨余垃圾生物干化研究来看,通常需要 2~3d 的升温时间才能达到 50°C 以上,干化周期普遍为 10~15d;脱水效率低,水分单位去除量仅为 $280\sim 570\text{kg}_{\text{水}}/\text{t}_{\text{垃圾}}$ ^[9-14],导致技术成本高、效能低,难以实现工程化应用。本研究根据往复式翻堆螺旋实现新旧物料全混合机械结构设计理念,开发了一种连续进料全混合式生物干化工艺,探究该工艺运

行效能及其对物料温度、含水率、热值的影响规律,以为厨余垃圾生物干化工艺优化及工程化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

厨余垃圾(新鲜物料)来源于杭州市余杭区生活垃圾分类收集站,经破碎挤压脱水后进入设备进行处理,试验时间为 7~9 月。破碎脱水预处理后的厨余垃圾理化性质如表 1 所示,物料含水率 76.63%,总有机质含量(VS/TS)为 77.97%,高、低位热值分别为 13700, 1605kJ/kg,低位热值远低于 4180kJ/kg《生活垃圾焚烧

收稿日期: 2020-11-28

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03006);浙江省重点研发计划项目(2021C03024)

* 责任作者, 教授, weixiang@zju.edu.cn

炉及余热锅炉》^[15]中生活垃圾焚烧进炉标准。

表 1 破碎脱水预处理后的厨余垃圾理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the kitchen garbage after crushing and dehydration

指标	数值	指标	数值
粒径(cm)	3~5	高位热值(kJ/kg)	13700
含水率(%)	76.63±5.45	低位热值(kJ/kg)	1605
VS/TS(%)	77.97±3.99	C/N	9.6
蛋白质(kg/t)	118.67±1.79	半纤维素(kg/t)	107.13±8.11
脂质(kg/t)	89.90±6.94	纤维素(kg/t)	159.45±8.89
淀粉(kg/t)	51.69±2.72	木质素(kg/t)	57.15±4.75

1.2 试验装置

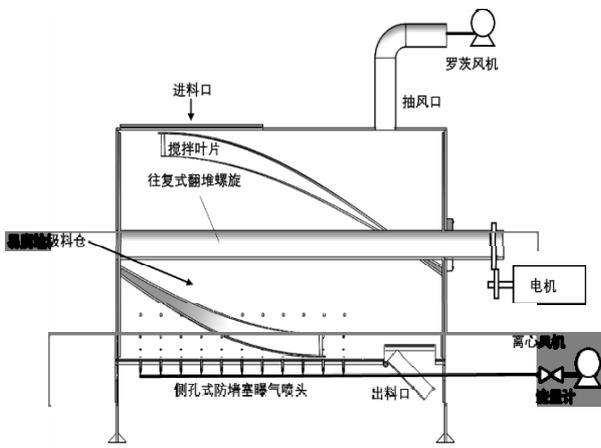


图 1 生物干化试验反应器剖面示意

Fig.1 Schematic diagram of biodrying equipment

表 2 生物干化试验反应器各零部件功率(kW)

Table 2 Power of each system of biodrying equipment(kW)

加热装置	离心风机	电机	变频器 I	变频器 II	罗茨风机
9.00	1.50	1.50	1.50	1.50	0.45

中试试验采用自主研发的连续进料全混合式生物干化反应器(图 1)^[16]。反应器为 U 型槽结构,长 1.5m,底部直径 0.8m,U 型槽高 0.9m,有效容积约为 1.2m³,设计处理能力为 100kg/d,设计干化周期为 7d,具备混合、翻堆、曝气、抽湿、辅热及智能控制等功能。反应器外壁设有辅助加热装置,保障物料最低控制温度;U 型槽底部设有侧孔式防堵塞曝气喷头,连接流量计和离心风机,实现定量曝气;反应仓中心配备往复式翻堆螺旋,搅拌叶片呈螺旋状并与 U 型槽壁面贴合,实现零死角往复式翻炒搅拌方式;反应仓顶部设有抽风口,连接罗茨风机,用于抽风除湿;设

有智能控制柜,变频器控制 I 和 II 分别控制电机和罗茨风机的功率,实现智能化控制搅拌和曝气。各零部件能耗如表 2 所示。

1.3 试验方法

1.3.1 反应器启动 向生物干化反应器内进新鲜物料 700kg,按新鲜物料与菌剂质量比例 10:1 接种,充分搅拌混合。启动阶段设定搅拌间隔为 60min,每次搅拌时间 1min,转速 8r/min;通风频次为 30min/h,风量为 60m³/h;每 30min 通过罗茨风机于抽风口负压抽吸反应仓内高湿空气 1min。

维持上述操作参数,确保微生物快速生长繁殖,期间适当进料但不出料,确保反应器内物料总量维持在 600~650kg;每日对物料含水率、温度等参数进行监测,当反应仓内物料含水率降低至 45%且物料温度高于 50℃时,结束反应器启动阶段。

1.3.2 生物干化试验 通过启动阶段物料含水率变化计算物料损失质量,设计每日进新鲜物料约 100kg,出旧物料约 30kg。进料后立即通过搅拌装置快速混合新旧物料。根据已有研究^[17]结合本试验要求,设置 3 组通风量、最低控制温度等辅助功能控制参数方案,具体如表 3 所示。反应器在每个控制参数下正常稳定运行 7d 后,开始每组正式试验。当物料温度低于设定最低控制温度时,开启辅助加热系统。每个处理组均在第 0h 开启辅热系统 2h,A 组和 B 组在第 14h 第 2 次开启辅热系统,即 A 组和 B 组合计辅热 4h,C 组辅热 2h。每组生物干化试验设置 3 次平行。

表 3 生物干化试验运行控制方案

Table 3 Operation control scheme of biodrying process

处理组	通风量 [m ³ /(kg·h)]	通风频次 (min/h)	最低控制温度 (℃)	搅拌频次 (min/h)
A	0.100	30	55	1
B	0.136	30	50	1
C	0.171	30	45	1

1.4 样品采集与测定

每天定时监测各处理组生物干化反应器内物料的温度、含水率、VS/TS 和热值。

温度采用 0.8m 探针式温度计直接插入反应器内四角及中心处,每 2h 测定 1 次,取平均值;每 4h 取样 1 次,以处理时间进行标记(0-样品为进料前物料,0+样品为进料后混合物料,24 样品即处理后产

物),物料含水率采用烘箱干燥法,105℃下烘至恒重测定;VS/TS 采用灼烧法(550℃)烧至恒重测定^[18];物料热值测定参考《煤的发热量测定方法》^[19]。

1.5 数据处理

水分去除量^[20]为处理过程中脱除水分的质量,忽略生物干化过程中物料干物质质量变化,则水分去除量计算公式如式(1):

$$m_{(x,y)} = \left(1 - \frac{1 - c_x}{1 - c_y}\right) \cdot m_0 \quad (1)$$

式中, $m_{(x,y)}$ 为水分脱除量,kg; c_x 、 c_y 为第 x 、 y h 含水率,%; m_0 为物料初始质量,取 700kg。

水分单位去除量为处理后每吨垃圾脱除水分的质量,以新鲜易腐垃圾处理量为基准,计算公式如式(2):

$$w = \frac{m_{(0,24)}}{b} \quad (2)$$

式中, w 为水分单位去除量,kg 水/t 垃圾; b 为设备处理总量,t/d。

实际有机质量为反应器内所有物料中有机质的总质量,假设生物干化过程中物料干物质中灰分质量不变,则实际有机质量计算公式如式(3):

$$m_s = \frac{m_0 \cdot (1 - c_0) \cdot (1 - s_0)}{1 - s_x} \cdot s_x \quad (3)$$

式中: m_s 为实际有机质量,kg; s_0 为初始有机质含量,%; s_x 为第 x h 有机质含量,%。

生物干化过程能耗的计算公式如下:

$$a = \frac{(P_1 + P_2) \cdot t_1 + (P_3 + P_4) \cdot t_2 + P_5 \cdot t_3 + P_6 \cdot t_6}{b} \quad (4)$$

式中, a 为吨处理能耗,kW·h/t; P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 分别为电机、变频器 I、离心风机、变频器 II、辅热系统、罗茨风机的功率,kW; t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为每日搅拌、通风、加热、抽风总时长,h/d。

试验数据采用 Microsoft Excel 2016、Origin 2018 和 SPSS v.20.0 进行分析处理。

2 结果与讨论

2.1 新型生物干化工艺对物料温度的影响

反应器内物料温度的变化可以直观反映好氧生物干化过程中微生物代谢活动的剧烈程度^[21]。如图 2 所示,由于操作参数的差别,3 个处理组的物料温度存在显著差异($P < 0.01$)。A、B、C 处理组的通风量逐渐递增,A 组物料温度基本高于 B 组,C 组最低,验

证了通风量与物料温度的负相关联系^[22-23],在满足微生物好氧活动需求的情况下,通风量高的处理组物料温度相对较低。此外,A 组在第 4~18h 维持了 55℃的最低控制温度,B 组和 C 组在第 2~20h 维持在 50℃和 45℃以上,且辅热次数均不超过 4h,说明在控制方案中根据通风量设计最低控制温度参数,可有效降低辅热时间节省能耗,并保障物料温度,确保反应器正常运行。

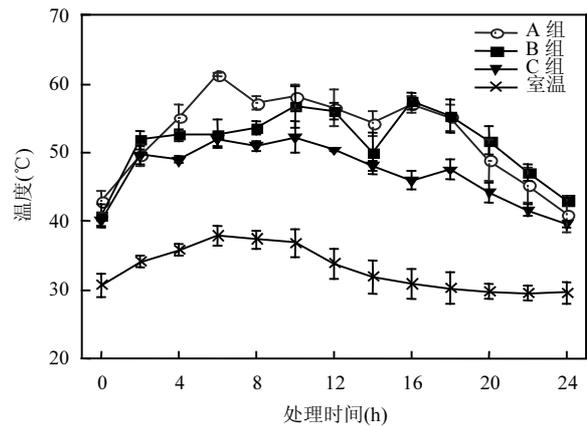


图 2 不同处理组的物料温度变化情况

Fig.2 Changes of pile temperature in different treatments

总体而言,3 个处理组物料温度及环境温度变化趋势基本相同,均在进料结束后 2h 内(辅热系统开启 2h)由 40℃左右快速升温至 50℃以上并保持 10h 以上,第 16h 以后物料温度逐渐下降,最终回到 40℃左右。辅热开启前(即 20~24h),物料温度缓慢下降至 40℃;辅热开启后,物料温度上升迅速;辅热结束后,温度仍有明显上升趋势,并在高通风量下维持 50℃以上高温 8~20h,说明短暂的物料辅热可以有效缩短了物料温度积累过程,促进干化体系微生物的生长代谢活动,激发生物热产生从而维持了物料高温环境,这与前人的研究结论^[24]相似。在整个干化周期内,反应器内物料温度长期稳定保持在 40~60℃,有助于好氧微生物生长繁殖,更是其代谢活性长效保持的反馈^[25]。在进料后,物料的适量辅热升温 and 含水率的调节有助于快速提高微生物量及其代谢活性^[26],进而维持物料高温环境,缩短了批次试验中堆体升温 and 微生物活化时间,与设计初衷基本吻合。而每个处理组后期物料温度的下降,可能与快速利用型物质的消耗、环境温度和物料含水率的下降有关,但仍可维持在 40℃以上的中温环境。

对比现有生物干化技术 2~3d 的升温期^[9-14],连续进料全混合式生物干化工艺具有升温迅速的特点,升温期仅为 2h,连续反应过程中物料温度可始终保持在 40℃以上,其中 50℃以上高温区段可以维持 8~20h/d,有助于物料内部水分转化和表面水分的快速脱除。

2.2 新型生物干化工艺对物料含水率的影响

由图 3、表 4 可见,由于中试试验材料来源于日常分类产生的厨余垃圾,不同处理组物料组分、性质差异客观存在,造成进料前、后物料含水率增量存在差别。本试验进料后混合物料含水率仅为 40%~50%,不仅可以避免过高含水率降低物料孔隙率而阻碍通风供氧^[27],还为好氧微生物生长代谢提供了适宜的环境,保障物料升温并维持较高温度^[4]。同时,反应器内物料含水率长期保持在 50%以下,基本无自由水下渗产生渗滤液,所有脱除水分均通过空气对流散发。

表 4 表明,3 个处理组物料含水率持续下降,进料后 0~12h(7:00~19:00)间反应器内物料脱水速率高于 12~24h(19:00~次日 7:00),这可能是由于 0~12h 间物料和环境均处于高温时段,且日间空气湿度普遍较低,利于水分脱除。进料后至次日出料期间,A、B 和 C 3 组反应器内混合物料含水率分别由 43.05%、42.45% 和 41.52% 降低至 35.93%、36.89% 和 34.86%。A 组水分单位去除量最高(775kg 水/t 垃圾),而 B

组和 C 组水分单位去除量则相对较低,分别为 617、716kg 水/t 垃圾,说明在供氧充足的情况下,维持相对较高的物料温度有助于提升水分蒸发速度^[28],这可能是由于往复无轴螺旋在搅拌过程中,不断将底部物料翻抛至料仓顶部,极大程度地增加堆体内部高温物料与空气接触时间,充分发挥了高温环境下水分蒸发速率更快的优势。C 组物料温度最低,但高通风量增加了空气携水总量^[29],也实现了较高的水分单位去除量。B 组的物料温度低于 A 组,弱化了水分蒸发速度;B 组的通风量低于 C 组,导致空气携水总量较低,因此,B 组水分单位去除量弱于 A 组和 C 组,并存在较大的差异。

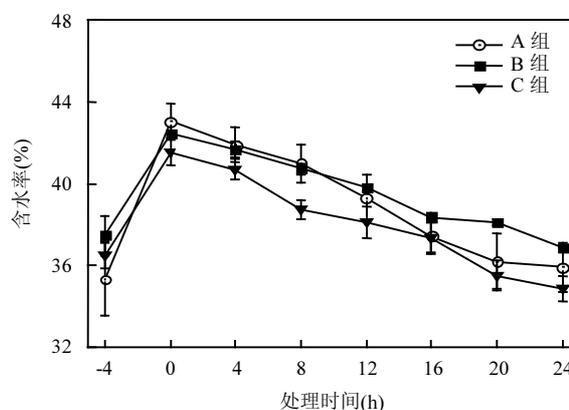


图 3 不同处理组物料含水率变化情况

Fig.3 Changes of moisture content in different treatments

表 4 不同处理组各阶段物料含水率及水分单位去除量

Table 4 Water content and unit water removal at each stage of different treatments

指标	A	B	C
新鲜厨余垃圾含水率(%)	77.55±3.31	78.55±3.04	77.88±1.59
混合后物料含水率(%)	43.06±2.33	42.45±0.07	41.52±1.69
处理产物含水率(%)	35.93±3.28	36.90±0.09	34.86±1.72
0~12h 水分去除量(kg)	42.97±6.53	30.69±4.26	41.64±2.46
12~24h 水分去除量(kg)	34.57±0.36	30.98±5.74	29.97±3.60
水分单位去除量(kg 水/t 垃圾)	775.40±65.36	616.81±18.39	716.24±22.72

总体而言,相较于现有生物干化技术在 10~15d 的处理周期实现 280~570kg 水/t 垃圾的水分单位去除量^[9-14],连续进料全混合式生物干化工艺使含水率 76.63% 的新鲜物料经过该反应器 7d 干化周期的处理后,含水率降低至 35.89%,水分单位去除量最高可达(775±65)kg 水/t 垃圾,工艺脱水效果显著提升。整个试验中反应器持续运行时间接近 2 个月,期间运行状态稳定。在整个试验过程中,反应器物料含水率持续

下降但降幅较低,理论上可在当前负荷基础上适当提升额定处理量,通过优化工艺参数进一步缩短干化周期。

2.3 新型生物干化工艺对物料有机质含量的影响

物料的有机质含量(即 VS/TS)的变化情况可以反映好氧生物干化过程中的有机物降解速率和微生物代谢活动^[30-31]。由表 5 可见,进料混合后的物料有机质含量为 73~76%,略低于新鲜物料。0~12h 间 3

组有机质降低量为 1.55~1.96%,高于 12~24h 的降低量,说明 0~12h 期间微生物代谢活性相对较高,有机质降解量更多,物料得以维持在 50℃以上的高温,12~24h 有机质降解量相对较少,导致该阶段物料温度逐渐降低.试验结束后 3 组物料有机质含量分别为 71.23%、69.55%和 68.65%(无显著性差异),

其中 A 组有机质含量较高,可能具备更高的高位热值.此外,处理结束后 A 组的实际有机质量下降了 39kg,明显高于 B 组和 C 组,这些有机质可能被降解并释放了更多的生化反应热用于物料升温和水分脱除,这与 A 组高物料温度和高水分单位去除量相吻合.

表 5 不同处理组物料有机质变化情况

Table 5 Changes of organic matter in different treatments

处理组	0h		12h		24h	
	有机质含量(%)	实际有机质量(kg)	有机质含量(%)	实际有机质量(kg)	有机质含量(%)	实际有机质量(kg)
A	73.45±0.98	292.76±3.88	72.23±0.71	265.42±5.08	71.23±2.05	252.94±5.38
B	71.49±1.37	290.91±2.87	70.68±0.37	269.66±1.40	69.55±0.86	258.21±2.22
C	70.50±2.69	291.56±8.38	69.77±0.60	268.95±3.34	68.65±0.64	257.84±2.39

2.4 新型生物干化工艺对物料热值的影响

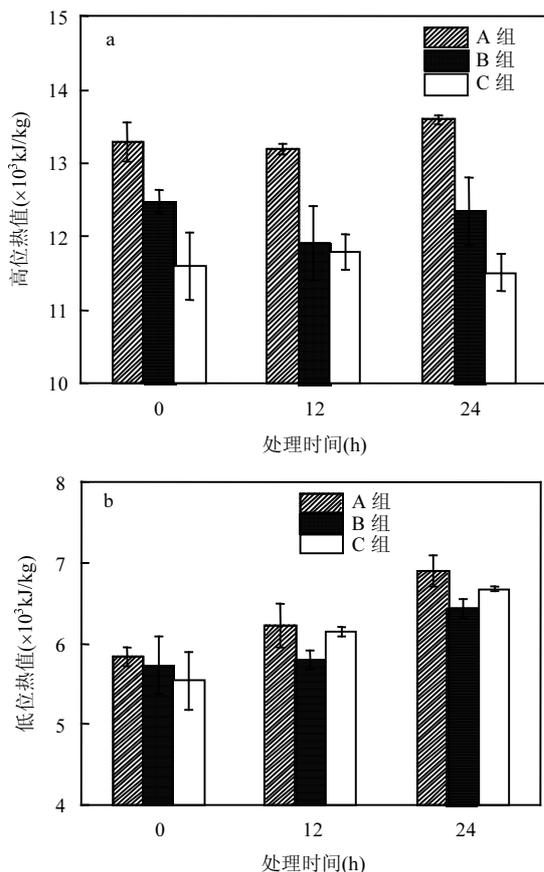


图 4 生物干化过程不同处理组物料高位热值与低位热值
Fig.4 Changes of high and low calorific values of matrix in biodrying process

热值是评价生活垃圾燃烧性能的重要指标,与物料的含水率和有机质含量有关^[32].由图 4 可见,破碎脱水后新鲜物料的平均高位热值和低位热值分

别为 13700,1600kJ/kg,具备较高的燃烧潜力,但低于《生活垃圾焚烧炉及余热锅炉》^[15]中生活垃圾焚烧进炉标准,无法作为燃料直接焚烧.由于 3 个处理组物料的有机质含量逐渐减少,高位热值也呈下降趋势($P<0.05$),A、B、C 组处理后产物的高位热值分别为 13598,12352,11511kJ/kg.根据低位热值计算方法,物料的低位热值与高位热值呈正相关,与其含水率呈负相关.3 个处理组高位热值和含水率均逐渐降低,导致处理后产物的低位热值无显著性差异,分别为 6906,6442,6681kJ/kg.

新鲜物料进入反应器与剩余物料混合后,低位热值由 1605kJ/kg 提升至 5702kJ/kg,经过生物干化处理后可达到 6676kJ/kg,远高于 4180kJ/kg,即满足《生活垃圾焚烧炉及余热锅炉》^[15]中生活垃圾焚烧进炉标准.

2.5 不同控制参数能耗对比

如表 3 所示,3 个处理组能耗差异主要来源于通风量和加热时长控制参数.A 组和 B 组虽然通风量较低,但为了维持最低控制温度,辅热系统产生了较高的能耗(总能耗中辅热能耗占比超过 50%),能耗超过 90kW·h/t,远高于 C 组的 77.91kW·h/t(C 组总能耗中辅热能耗仅占 33%).A 组在辅热系统帮助下保持了物料高温环境,其脱水能力最好,但 C 组通过增加通风、适当降低物料温度也可以实现较好的除水效果,故对于本生物干化反应器而言,C 组兼具高效低耗特点,所采用的控制参数更为适合.后续研究中可优化辅热策略,放弃最低控制温度的设计,仅将辅热

用于进料后物料的增温,以进一步降低运行能耗。

总体而言,本生物干化工艺最佳操作参数为通风速率 $0.171\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{h})$,最低控制温度 45°C 。该控制参数下工艺垃圾处理能耗仅为 $77.91\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,远低于市

场上电热烘干设备吨能耗($150\sim 250\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$)^[4,7],工艺中辅热系统仅需 $25\sim 50\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ (含热损耗),2 种工艺外源热能输入的差值应是微生物好氧活动释放的生物热输入。

表 6 不同处理组能耗情况

Table 6 Energy consumption of different treatments

处理组	电机频率 (Hz)	电机使用时长 (h)	离心风机功率 (kW)	离心风机使用 时长(h)	抽风时长 (h)	辅热时长 (h)	辅热能耗 (kW·h)	总能耗 (kW·h)	每吨垃圾处理 能耗(kW·h/t)
A	25	0.4	0.84	12	0.8	4	36	65.34	93.34
B	25	0.4	1.14	12	0.8	4	36	68.94	98.48
C	25	0.4	1.44	12	0.8	2	18	54.54	77.91

2.6 与其他生物干化工艺对比

现有生物干化工艺均存在 2~3d 的升温期^[9-14],升温过程中物料温度较低,极大程度限制了水分蒸发速度,导致干化周期长、脱水效率低。新型厨余垃圾全混合式生物干化工艺通过新旧物料全混合机械结构和辅热策略大幅度提高了升温速度,并保障反应器运行过程中物料温度均高于 40°C 。

相较于现有生物干化工艺,新型工艺将干化周期由 $10\sim 15\text{d}$ ^[7]缩短至 7d,水分单位去除量仍高达 $716.24\text{kg}_{\text{水}}/\text{t}_{\text{垃圾}}$,远高于生物干化其他文献中的 $280\sim 570\text{kg}_{\text{水}}/\text{t}_{\text{垃圾}}$ ^[9-14],其处理能耗仅 $77.81\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ 。新型工艺产物低位热值达 $6676\text{kJ}/\text{kg}$,略低于其他文献中 $6000\sim 8000\text{kJ}/\text{kg}$,可能是因为文献中采用的易腐垃圾热值较高($2400\sim 3200\text{kJ}/\text{kg}$)^[7,12]。

然而,本研究尚未对搅拌频率、辅热模式和进料粒径开展深入优化。今后的研究应聚焦探讨如何提升搅拌翻堆、通风曝气及辅热模式等控制参数或模式在生物干化过程中的联动效应,并研制针对易降解有机质的耐高温微生物菌剂,以期更加有效地强化微生物生长繁殖、代谢活动和水分脱除能力,进一步提升厨余垃圾生物干化处置效能。

3 结论

3.1 本研究基于厨余垃圾全混合发酵的设计理念,强化了快速升温、快速脱水的工艺特点,干化周期缩短至 7d,水分单位去除量高达 $716.24\text{kg}_{\text{水}}/\text{t}_{\text{垃圾}}$,干化效能显著优于现有生物干化工艺。

3.2 在最佳运行条件下(通风速率 $0.171\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{h})$,最低控制温度 45°C),处理能耗仅为 $77.91\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$,

产物低位热值远高于《生活垃圾焚烧炉及余热锅炉》(GB/T 18750-2008)中规定的生活垃圾焚烧进炉标准。

参考文献:

- [1] 杨娜,邵立明,何晶晶.我国城市生活垃圾组分含水率及其特征分析[J].中国环境科学,2018,38(3):1033-1038.
Yang N, Shao L M, He P J. Study on the moisture content and its features for municipal solid waste fractions in China [J]. China Environmental Science, 2018,38(3):1033-1038.
- [2] 韩泽东,李相儒,毕峰,等.我国农村生活垃圾分类收运模式探究——以杭州市为例[J].农业环境科学学报,2019,38(3):688-695.
Han Z D, Li X R, Bi F, et al. Classified collection and transportation patterns of rural domestic wastes in China: A case study of Hangzhou [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019,38(3):688-695.
- [3] Li X, Bi F, Han Z, et al. Garbage source classification performance, impact factor, and management strategy in rural areas of China: A case study in Hangzhou [J]. Waste Management, 2019,89(APR.):313-321.
- [4] Velis C A, Longhurst P J, Drew G H, et al. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering [J]. Bioresource Technology, 2009,100(11):2276-2747.
- [5] Adani F, Baido D, Calcaterra E, et al. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste [J]. Bioresource Technology, 2002,83(3):173-179.
- [6] Perazzini H, Freire F B, Freire F B, et al. Thermal treatment of solid wastes using drying technologies: a review [J]. Drying Technology, 2016,34(1):39-52.
- [7] 李相儒.农村厨余垃圾生物干化与腐熟工艺初探[D].杭州:浙江大学,2019.
Li X R. Study on bio-drying and composting of rural biodegradable waste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [8] 齐琪,袁京,李赞,等.生活垃圾制备 RDF 工艺参数及其热特性研究[J].中国环境科学,2017,37(3):1051-1057.
Qi Q, Yuan J, Li Y, et al. Processing parameters and thermal characteristics of RDF based on municipal solid waste [J]. China

- Environmental Science, 2017,37(3):1051-1057.
- [9] 赵卫兵,汪家权,胡淑恒,等.城市垃圾生物干化最佳工艺参数的优化研究 [J]. 环境工程, 2015,33(8):97-100.
Zhao W B, Wang J Q, Hu S H, et al. Optimization of processing parameters of organic msw bio-drying by orthogonal tests [J]. Environmental Engineering, 2015,33(8):97-100.
- [10] Jing Yuan, Yun Li, Wang Guo-ying, et al. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amendments during kitchen waste biodrying [J]. Bioresource Technology, 2019, 284(284):56-64.
- [11] N, N, Ahmad, et al. Biodrying of municipal solid waste under different ventilation periods [J]. Environmental Engineering Research, 2016, 21(2):145-151.
- [12] 袁京,张地方,李赞,等.外加碳源对厨余垃圾生物干化效果的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(2):628-635.
Yuan J, Zhang D F, Li Y, et al. Effect of external carbon sources on biodrying of kitchen waste [J]. China Environmental Science, 2017, 37(2):628-635.
- [13] 郭强,黄文雄,程海静.通风温度对生活垃圾生物干化脱水的影响 [J]. 再生资源与循环经济, 2014,7(8):33-36.
Guo Q, Huang W X, Cheng H J. Effect of bio-drying with various ventilation temperature on high-water-content municipal solid waste [J]. Recycling Research, 2014,7(8):33-36.
- [14] 张晨,李杨杨,董黎明,等.预加热对柠檬酸脱水污泥冬季生物干化的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2928-2037.
Zhang C, Li Y Y, Dong L M, et al. Effect of pre-heating on bio-drying of citric acid dewatered sludge in winter [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2928-2037.
- [15] GB/T 18750-2008 生活垃圾焚烧炉及余热锅炉 [S].
GB/T 18750-2008 Municipal solid waste incinerator and boiler [S].
- [16] 浙江大学.无升温期连续进料全混合式的生物干化设备及方法:中华人民共和国, 201911311862.5 [P]. 2019-12-18.
Zhejiang University. Full-mixed biodrying equipment and method with continuous feeding without heating period: China, 201911311862.5 [P]. 2019-12-18.
- [17] 韩竞耀,何晶晶,张冬青,等.通风量和翻堆对生活垃圾好氧生物干化的影响 [J]. 环境卫生工程, 2008,(3):23-25.
Han J Y, He P J, Zhang D Q, et al. Influence of airflow rate and turning on aerobic bio-drying of domestic waste [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2008,(3):23-25.
- [18] Liqing X, Zhaohui G, Xiyuan X, et al. Feasibility of anaerobic digestion for contaminated rice straw inoculated with waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2018,266:45-50.
- [19] GB/T 213-2008 煤的发热量测定方法 [S].
GB/T 213-2008 Determination of calorific value of coal [S].
- [20] 黄文雄,苏红玉,黄丹丹,等.通风方式对高含水率垃圾生物干化的影响 [J]. 中国环境科学, 2012,32(8):1480-1486.
Huang W X, Su H Y, Huang D D, et al. Effect of aeration modes on high water content municipal solid waste bio-drying [J]. China Environmental Science, 2012,32(8):1480-1486.
- [21] Hassen A. Microbial characterization during composting of municipal solid waste [J]. Bioresource Technology, 2001,80(3):217-225.
- [22] 张风,任勇翔,张海阳,等.投加方式和通风速率对脱水污泥堆肥效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2018,12(8):238-244.
Zhang F, Ren Y X, Zhang H Y, et al. Influence of feeding mode and aeration rate on dewatered sludge aerobic composting [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018,12(8):238-244.
- [23] Huilinir C, Villegas M. Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge [J]. Water Research, 2015,82(1):118-128.
- [24] Ma J, Zhang L, Mu L, et al. Energetic enhancement of thermal assistance in the cooling stage of biodrying by stimulating microbial degradation [J]. Waste Management, 2019,89(4):165-176.
- [25] Tom A P, Pawels R, Haridas A. Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content [J]. Waste Management, 2016,49(3):64-72.
- [26] 马闯,扈斌,刘福勇,等.有机废弃物好氧堆肥过程中微生物及酶活性变化状况综述 [J]. 环境工程, 2019,37(9):159-164,187.
Ma C, Hu B, Liu F Y, et al. Review on changes of microorganisms and enzyme activities during aerobic composting of organic waste [J]. Environmental Engineering, 2019,37(9):159-164,187.
- [27] 刘盛萍,俞志敏,吴克,等.生物垃圾堆肥的影响因素及反应动力学研究 [J]. 安徽农业科学, 2011,39(15):8965-8966.
Liu S P, Yu Z M, Wu K, et al. Study on the influencing factors and kinetics of bio-waste composting [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011,39(15):8965-8966.
- [28] Cesar H, Perez J. A new model of batch biodrying of sewage sludge, Part 2: Model calibration and validation [J]. Drying Technology: an International Journal, 2017,35(5):666-679.
- [29] 席北斗,李英军,张晓萱,等.垃圾堆肥工艺过程动态模拟及优化研究 [J]. 环境工程学报, 2005,6(2):20-23.
Xi B D, Li Y J, Zhang X X, et al. Study on dynamic simulation of composting processes for domestic solid wastes [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005,6(2):20-23.
- [30] 罗维,陈同斌,高定,等.混合堆肥过程中挥发性固体含量的层次效应及动态变化 [J]. 环境科学, 2004,25(3):155-159.
Luo W, Chen T B, Gao D, et al. Stratification of volatile solid content and its dynamics in the process of co-composting [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2004,25(3):155-159.
- [31] 何晶晶.固体废物处理与资源化技术 [M]. 北京:高等教育出版社, 2011.
He P J. Solid waste treatment and resource technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [32] 任超峰,方朝军,夏小栋,等.城市生活垃圾固体回收燃料在中国的发展前景 [J]. 现代化工, 2019,(9):1-4.
Ren C F, Fang C J, Xia X D, et al. Development prospect of solid recovery fuels from municipal solid wastes in China [J]. Modern Chemical Industry, 2019,(9):1-4.

作者简介: 严祥瑞(1996-),男,湖北宜昌人,浙江大学硕士研究生,主要从事厨余垃圾减量资源化研究.发表论文 2 篇。