

刘冠宏,臧宇飞,刘兵,等.餐厨废物水热反应减重的关键影响因素及运行参数研究[J].环境工程技术学报,2024,14(1):210-215.
LIU G H,ZANG Y F,LIU B,et al.Research on the key influencing factors and operating parameters for the weight reduction of kitchen waste achieved by hydrothermal reaction[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(1): 210-215.

餐厨废物水热反应减重的关键影响因素及运行参数研究

刘冠宏¹,臧宇飞¹,刘兵^{1*},陈飞勇¹,王静¹,史水合²,孙秀芹³,张瑞娜⁴

1.山东建筑大学资源与环境创新研究院

2.山东省菏泽生态环境监测中心

3.山东省煤田地质规划勘察研究院

4.上海环境卫生工程设计研究院有限公司

摘要 运用水热炭化工艺,研究不同温度(170~270 ℃)、停留时间(0~100 min)、料液比(1:1、1:3、1:9)对餐厨废物水热反应减重的影响,并对运行参数进行优化。结果表明:升高温度,餐厨废物的减重率也随之提高,且减重率均在91%以上;随着停留时间的延长,减重率在20~40和80~100 min时会有小幅度的增长,在0~100 min的停留时间内减重率从83.90%增至86.80%;料液比的增加会使减重率下降,料液比为1:9、1:3、1:1时,对应的减重率分别为91.60%~91.87%、86.20%~87.00%、83.90%~88.10%。液相产物COD测定结果表明,反应温度和料液比是影响液相产物COD的主要因素,随着反应的进行,液相产物COD先是逐渐减小并趋于平稳,后略有增加。试验得到的水热炭高位热值为30.50~31.90 MJ/kg,高于国家标准煤热值29.30 MJ/kg。

关键词 水热炭化;餐厨废物;生物炭;水热反应;减重率

中图分类号:X705 文章编号:1674-991X(2024)01-0210-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230188

Research on the key influencing factors and operating parameters for the weight reduction of kitchen waste achieved by hydrothermal reaction

LIU Guan hong¹, ZANG Yu fei¹, LIU Bing^{1*}, CHEN Fei yong¹, WANG Jing¹, SHI Shui he²,
SUN Xiu qin³, ZHANG Rui na⁴

1.Resources and Environment Innovation Institute, Shandong Jianzhu University

2.Heze Ecological Environment Monitoring Center of Shandong Province

3.Shandong Coalfield Geological Planning Research Institute

4.Shanghai Environmental Engineering Design and Research Institute

Abstract Using the hydrothermal carbonization process, the effect of varying temperatures (170 to 270 ℃), residence time (0 to 100 min), and solid-water ratios (1:1, 1:3, and 1:9) on the weight reduction of hydrothermal reaction of kitchen waste was researched, and the operating parameters were optimized. The findings of this test revealed that as the temperature rose, the weight loss rate of kitchen waste increased, reaching a value of over 91%. The weight loss rate increased slightly as the residence time extended from 20 to 40 minutes and from 80 to 100 minutes. During the residence times of 0 to 100 minutes, the weight loss rate increased from 83.90% to 86.80%. A higher solid-water ratio would have a negative impact on the weight loss rate. The corresponding weight loss rates were 91.60% to 91.87%, 86.20% to 87.00% and 83.90% to 88.10% at solid-water ratios of 1:9, 1:3 and 1:1, respectively. The solid-water ratio and the reaction temperature were the main factors affecting COD of the liquid products, which initially gradually decreased and leveled off as the reaction progressed before slightly increasing. This was demonstrated by the results of COD measurement of the liquid products. The higher heating value of hydrochar obtained in the test was 30.50 to 31.90 MJ/kg, which was greater than the national standard coal calorific

收稿日期:2023-03-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0105800);住房和城乡建设部研究开发项目(2021-K-113);山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME236);山东省高端人才项目支持计划(0031504);教育部春晖计划项目(202202031)

作者简介:刘冠宏(2000—),男,硕士研究生,主要从事有机废物资源循环研究, guanhongliu015@163.com

* 责任作者:刘兵(1982—),男,教授,博士,主要从事环境模型开发与工艺模拟研究, b-liu@sdjzu.edu.cn

value of 29.30 MJ/kg.

Key words hydrothermal carbonization; kitchen waste; biochar; hydrothermal reaction; weight loss rate

餐厨废物是指在饮食加工、服务等活动中, 由于食品损失和浪费而产生的有机废物^[1]。餐厨废物一般具有含水率高、有机质含量高、含油量高、热值低、极易产生恶臭气味的特点^[2], 其处理方式主要有卫生填埋、焚烧发电、粉碎直排。其中卫生填埋操作简单, 但填埋后会产生大量渗滤液, 容易造成二次污染, 与废物资源化、无害化处理理念不符。焚烧发电使餐厨废物中的有机质彻底氧化为灰烬, 实现了减量化处理, 但餐厨废物含水率高、热值低, 容易造成焚烧不充分而产生污染气体, 添加助燃剂又不符合经济性的要求^[3]。传统填埋、焚烧工艺不能很好地应对高含水率的餐厨废物^[4], 处理过程还会造成大量的温室气体排放, 目前全生命周期的食物损失和浪费造成温室气体排放已经达到全球食物系统排放总量的 1/2^[5]。

水热炭化技术是将餐厨废物置于密闭的反应釜内, 在一定反应温度(180~350 ℃)的条件下, 利用反应釜自身产生的压力^[6], 让餐厨废物中的水达到亚临界条件, 从而分解成水合氢离子和氢氧根离子, 并具有酸碱催化作用^[7]。水一方面作为反应介质, 另一方面以反应物、催化剂或是能量传递介质的形式参与到水热反应中^[8]。餐厨废物经过水解、脱水、脱羧、聚合及芳香化等反应^[9-10], 最终转化为高利用价值的水热炭。此外, 由于在反应过程中达到了 121 ℃ 以上的高温条件, 导致反应体系内自压力增大, 从而实现高压灭菌处理, 彻底消除了包括废物中的潜在病原体等所有生物风险^[11], 实现餐厨废物减量化、无害化、资源化处理。水热炭化技术也为餐厨废物的末端处理提供了一种创新性的碳减排和碳固定思路。

为了解决水热反应减重效果不稳定、反应时间长、工艺参数难以控制等问题, 黄玉莹等^[12]考察了反应温度和停留时间对水热炭化产物的影响; 高英等^[13]对水热技术的温度、停留时间和压力进行了综述研究。基于先前学者对水热反应的研究, 以餐厨废物水热反应减重为研究对象, 除了考察温度和停留时间对水热反应的影响外, 将料液比(原料中固相和液相的质量之比)作为另一影响因素进行探究与分析; 同时, 研究不同运行参数对减重率和液体产物的化学需氧量(COD)的影响。试验结果对于进一步提高水热反应技术的稳定性和可控性, 推广其在餐厨废物资源化利用中的应用, 促进城市生态环境建设和实现“双碳”目标具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验餐厨废物的成分和投加比例主要参考吕锦怡等^[14-15]对学校食堂餐厨废物组成的调查, 同时结合周俊等^[16-17]对餐厨废物成分的分析, 具体如表 1 所示。

表 1 餐厨废物试验原料成分及投加比例

Table 1 Composition and dosage ratio of kitchen waste test raw material

名称	模拟组分	投加比例(质量比)/%	备注
芹菜	高纤维蔬菜垃圾	10	
油菜	低纤维蔬菜垃圾	10	
白菜	高水分蔬菜垃圾	10	
橘子皮	低水分果皮类	10	去除果肉
香蕉皮	高纤维果皮类	10	去除果肉
苹果核	果核类	5	去除果肉
鸭肉	动物蛋白类	5	熟制
猪肉	动物蛋白类	5	熟制
豆腐	植物蛋白类	5	熟制
馒头	淀粉类	25	熟制
花生油	油脂类	5	

1.2 试验方法

水热炭化反应在 5 L 间歇式高压反应釜中进行。餐厨废物和纯净水按料液比混合, 搅拌均匀后取 1 kg 置于反应釜中, 通入高纯 N₂(≥99.999%), 以 0.3 m³/s 的流速吹扫釜体 10~15 min, 确保形成缺氧或无氧环境。使用电加热, 升温速率约为 1.5 ℃/min。反应产物使用真空抽滤机进行固液分离, 固体产物放入 105 ℃ 烘箱内烘干 24 h 至恒重(0.5 h 失重比例小于 0.5%), 液体产物用离心管留样测定 COD。

1.2.1 水热反应温度试验

在停留时间 30 min、料液比 1:9 条件下, 设置反应温度为 170、190、210、230、250、270 ℃ 共 6 组试验。测定固液混合产物和固体产物的质量, 推算减重率及产物的三相质量占比, 检测固体产物水热炭的热值。

1.2.2 水热反应停留时间试验

在反应温度 210 ℃、料液比 1:2 条件下, 设置停留时间为 0、20、40、60、80、100 min 共 6 组试验, 达到目标温度后开始计时。测定固液混合产物和固体

产物的质量,推算减重率及产物的三相质量占比。

1.2.3 水热反应料液比试验

在停留时间 30 min, 230、250、270 °C 3 个温度区间条件下,按料液比 1:3 和料液比 1:1 进行试验。与 1.2.1 节中 230、250、270 °C 3 个温度下的试验结果对比,进而得到料液比为 1:9、1:3、1:1 的 9 组数据。测定固液混合产物和固体产物的质量,推算减重率及产物的三相质量占比。

1.3 分析方法

固体产量(Y_s)为烘干后的焦相产物质量(m_0)。

液体产量(Y_l)计算公式如下:

$$Y_l = m_1 - m_0 \quad (1)$$

式中 m_1 为反应结束后混合产物质量, g。

气体产量(Y_g)计算公式如下:

$$Y_g = m_2 - m_1 \quad (2)$$

式中 m_2 为反应前装入反应釜的原料总质量, g。

减重率(R_w)计算公式如下:

$$R_w = \frac{m_3 - m_0}{m_3} \times 100\% \quad (3)$$

式中 m_3 为反应前固体原料的质量, g。

参照 HJ/T 399—2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》^[18],采用多参数水质测定仪 [LH-3BA(V12), 连华科技]测定 COD。

2 结果与分析

2.1 反应温度对减重率的影响

反应温度对三相占比以及减重率的影响见图 1。从图 1 可以看出,餐厨废物水热炭化的液体产物占绝大部分,并且随着反应温度的升高其占比逐渐减小;固体产物占比始终不足 1%,随着反应温度的升高,固体产物占比有降低的趋势;气体产物占比会随着反应温度的升高而增加。反应温度升高,加速了餐厨废物炭化的过程,导致有机质进一步分解进入液相当中;同时导致溶解在液相中的单糖、氨基酸和有机酸等化合物分解,并产生少量气体^[19]。

温度是水热反应最大的影响因素之一,当反应温度升高,减重率得到提升,170 °C 时减重率最小,为 91.23%;270 °C 时减重率最大,达到了 91.87%。其原因是温度升高加速了脱水和脱羧反应,从而使原料分解造成质量损失^[20]。

2.2 停留时间对减重率的影响

停留时间对三相占比以及减重率的影响见图 2。从图 2 可以看出,固体产物占比在 20~40 和 80~100 min 的停留时间段表现出小幅度下降,整体变化幅度小于 1%。由于加热过程缓慢,一些反应达到动态平

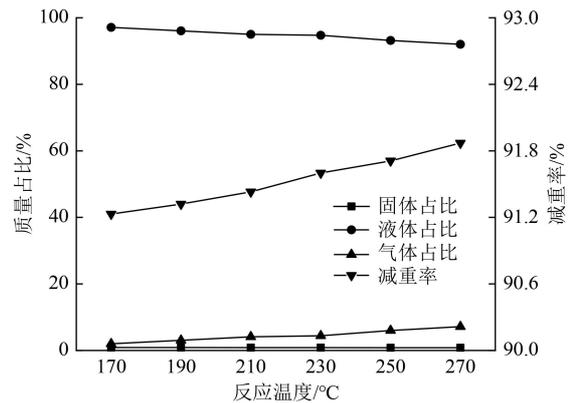


图 1 反应温度对三相占比以及减重率的影响

Fig.1 Effect of reaction temperature on the proportion of the three phases and the weight loss rate

衡的情况会发生在目标温度之前,故在达到目标温度后延长停留时间对固体产物的影响相对较小^[21]。液体产物占比在 0~60 min 内会随着停留时间的增加而不断下降,并逐渐被气体产物所取代。这是由于随着停留时间的增加,液体中的小分子物质有更多的分解时间,从而导致气体产物的占比从 7.39% 上升到 21.05%。然而,在停留时间达到 60~100 min 时,随着自压逐渐增大,反应平衡向着气体物质重新转化为液体物质的方向倾斜,进而导致液体产物的占比从 73.58% 升至 94.39%,而气体产物的占比则从 21.05% 减至 1.20%。水热炭化中的脱羧反应导致气体产物主要由 CO_2 组成,无法提供有效的经济价值,但对揭示水热炭化过程中潜在的关键机理具有重要意义^[22]。

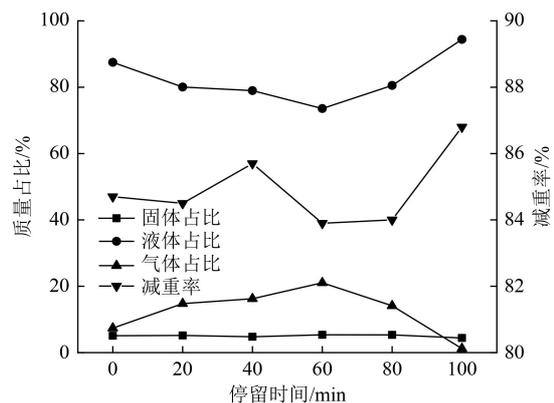


图 2 停留时间对三相占比以及减重率的影响

Fig.2 Effect of residence times on the proportion of the three phases and the weight loss rate

停留时间为 0~20 min 时,减重率变化不明显,保持在 84% 左右;20~40 min 时,减重率增至 85.70%,表明原料在此时间段内的反应比较充分,有利于炭的生成,成炭率相对较高;40~60 min 时,随着停留时间的增加,系统中的小分子物质经历一系列聚合-缩

合反应,在固体产物表面聚合生成二次炭^[23],导致减重率降至 83.90%;在 60~80 min 时,减重率基本稳定在 84.00%;80~100 min 时,由于固体产物的溶解,减重率增至 86.80%。

2.3 料液比对减重率的影响

料液比对三相占比以及减重率的影响见图 3。从图 3 可以看出,当料液比从 1:1 降至 1:3 时,固体产物占比从 5.96%~8.05% 降至 3.25%~3.46%;料液比再降至 1:9 时,固体产物占比进一步降至 0.81%~0.84%。表明原料含水率的增加导致聚合物在液相中集聚成核更加困难,从而导致固体产物占比减少。随着料液比的增加,液体产物的占比增加,而气体产物占比呈递减趋势。这是由于原料中液相含量增加导致聚合物更易溶解于液相中,并且更多的单糖、氨基酸、有机酸等小分子物质也更倾向于溶解在液相中而不是转化为气体产物。因此,减小料液比会抑制固体产物的产生,提高减重率,并且对气体产物的产生也起到了一定的掣肘作用。

料液比是水热反应的主要影响因素之一。减小料液比最终会使减重率增加。料液比为 1:1、1:3、1:9 时,对应的减重率分别为 83.90%~88.10%、86.20%~87.00%、91.60%~91.87%。反应中,水不仅是溶剂,而且作为一种催化剂和反应物参与反应,其具有液体的流动性同时也具备气体的渗透性^[24],在反应过程中可以起到传质作用。在 1:9 的料液比下,随着原料中液相占比的增加,H₃O⁺和 OH⁻浓度提高,推动了脱水、脱氢、脱羧、脱氧等反应的发生^[25],并促进更多的单糖、寡糖、有机酸溶于液相中^[4]。部

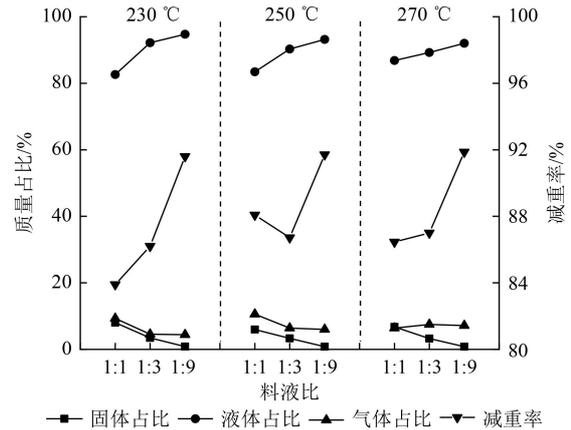


图 3 料液比对三相占比以及减重率的影响

Fig.3 Effect of solid-water ratios on the proportion of the three phases and the weight loss rate

分酸性成分还可作为原位催化剂促进水热反应的进行^[26],进一步提高减重率。

2.4 液相产物 COD

有机质经水热炭化处理,首先会在液相中溶解,然后发生水解反应^[27]。根据试验结果,在相同的停留时间下,温度的升高加速了有机质的溶解。如图 4(a) 所示,当温度达到 230 °C 后 COD 先减少,这表明有机质的水解速率加快;温度继续升高至 250 °C 后,COD 呈增加趋势。这是因为更高的温度有利于有机质水解成最稳定的产物(如单糖和乙酸)^[28],而这些稳定产物的 COD 通常高于原始有机质,从而导致 COD 增加。其中在料液比为 1:3,反应温度为 230 与 270 °C 条件下的 COD 相同,在排除人为因素的情况下,分析原因是数值间的微小差异极难被机

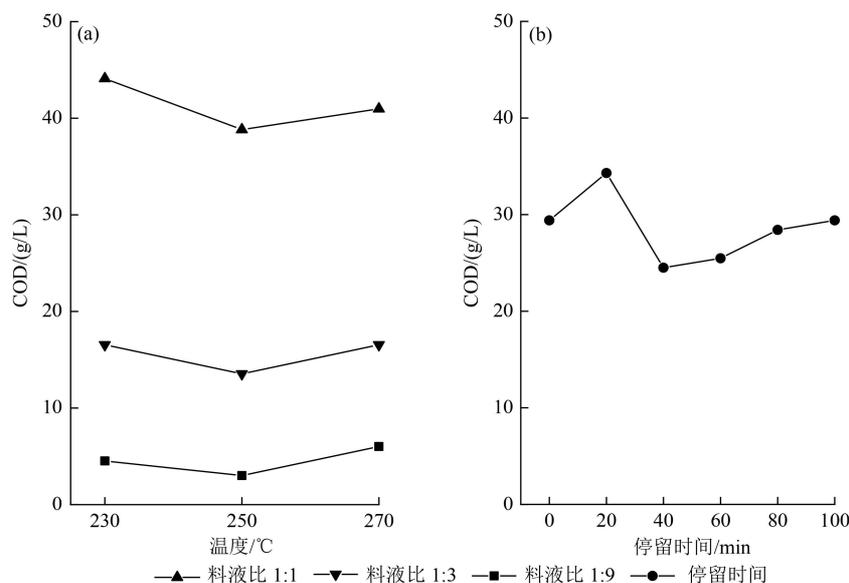


图 4 运行参数对液相产物 COD 的影响

Fig.4 Effect of operating parameters on liquid phase product COD

器检测到,造成数值极为接近而无法区分。料液比的减小会导致 COD 下降。反应温度为 230~270 °C 时,水热反应较为完全,有机质含量稳定。减小料液比会导致液相产物不同程度地增加,一方面强化了催化作用,使更多的有机质溶解于液相产物中,另一方面也会对液相中的有机质浓度起到稀释作用。

由图 4(b)可知,当停留时间为 0~20 min 时,COD 会有小幅度提升,之后逐渐下降;停留时间达到 40 min 后,随着停留时间的增加,COD 逐渐增加并趋于稳定,最终达到 29.4 g/L。

2.5 固体产物水热炭的资源化

水热炭是废生物质在无氧或缺氧环境下,经水解、脱水、脱羧、缩合、芳香化等一系列反应^[29],最终得到的含碳量很高的固体物质,基本属于纯炭。众多研究证明水热炭具有很高的热值^[30-31]。张莹等^[32]用餐厨垃圾制备水热炭,得到水热炭热值为 23.9~28.3 MJ/kg;乔娜^[33]采用玉米芯和松子壳作为原料进行水热炭化反应,得到二者水热炭的热值分别为 22.04 和 23.83 MJ/kg;黄玉莹等^[12]以稻草为原料进行水热炭化研究,得到的水热炭热值为 20.87~23.86 MJ/kg,均大于褐煤的热值(8.38~16.76 MJ/kg),因此水热炭具有代替煤作为固体燃料的潜能^[34],并且无需特殊处理即可用作清洁燃料。由于生物质炭的高反应性,水热炭的燃尽温度远低于褐煤,这意味着水热炭更容易被点燃,燃烧过程中产生的碳损失更小,并且可以释放出更多的热量^[35]。

在温度为 210~270 °C、停留时间为 30 min、料液比为 1:9 的条件下,探究餐厨废物水热炭的热值,结果见图 5。由图 5 可知,随着反应温度的升高,水热炭的产率减少,但含碳量增加,因而水热炭的热值也相应提高。餐厨废物水热炭高位热值为 30.50~

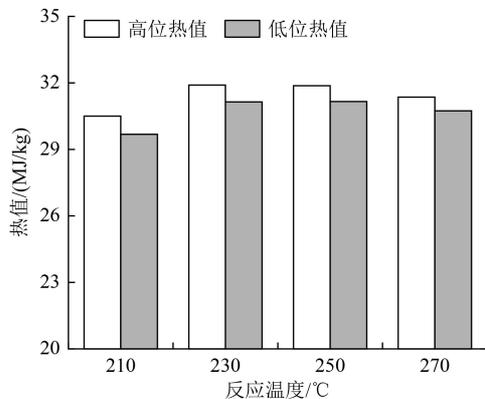


图 5 不同温度下水热炭的热值

Fig.5 Calorific value of hydrothermal carbon at different temperatures

31.90 MJ/kg,超过国家标准煤热值(29.31 MJ/kg),显示出良好的资源化利用潜力。

3 结论

(1)在 170~270 °C 的反应温度内,提高水热反应温度可以增加餐厨废物的减重率并且减重率均在 91% 以上。在 0~100 min 的停留时间内,随着停留时间的延长,在 20~40 和 80~100 min 时减重率会有小幅度的增长,总体上减重率从 83.90% 增至 86.80%。减小料液比会使减重率增加,料液比为 1:9 时减重率最高达到 91.87%

(2)料液比与液相产物呈正相关,料液比从 1:1 减至 1:9,液相产物的 COD 显著下降。

(3)餐厨废物水热炭的热值大于褐煤,且超过标准煤热值,具有良好的资源化利用潜力。

参考文献

- [1] 张庆芳,杨林海,周丹丹.餐厨垃圾废弃物处理技术概述[J].中国沼气,2012,30(1):22-26.
ZHANG Q F, YANG L H, ZHOU D D. Overview on food waste treatment technology[J]. China Biogas, 2012, 30(1): 22-26.
- [2] 邓俊.餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J].环境工程技术学报,2019,9(6):637-642.
DENG J. Harmless treatment and resource utilization of kitchen waste development status and trend[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(6): 637-642.
- [3] 杜志勇.城市餐厨垃圾处理技术现状与展望[J].农业工程,2020,10(5):52-56.
DU Z Y. Current status and prospects of urban kitchen waste treatment technology[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(5): 52-56.
- [4] 赵坤.餐厨垃圾水热碳化工艺及产物性质研究[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
- [5] ZHU J Y, LUO Z Y, SUN T T, et al. Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems[J]. Nature Food, 2023, 4(3): 247-256.
- [6] 李恒,石岩,迟铭书,等.水热碳化技术处理废弃生物质的研究进展[J].太阳能,2022(1):14-19.
LI H, SHI Y, CHI M S, et al. Research progress of hydrothermal carbonization technology in the treatment of waste biomass[J]. Solar Energy, 2022(1): 14-19.
- [7] 阚玉娜,陈冰炜,翟胜丞,等.生物质水热碳化及其功能化应用研究进展[J].化工新型材料,2021,49(12):43-49.
KAN Y N, CHEN B W, ZHAI S C, et al. Research progress on hydrothermal carbonization of biomass and its functional application[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(12): 43-49.
- [8] KRYLOVA A Y, ZAITCHENKO V M. Hydrothermal carbonization of biomass: a review[J]. Solid Fuel Chemistry, 2018, 52(2): 91-103.
- [9] SHARMA H B, SARMAH A K, DUBEY B. Hydrothermal

- carbonization of renewable waste biomass for solid biofuel production: a discussion on process mechanism, the influence of process parameters, environmental performance and fuel properties of hydrochar[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 123: 109761.
- [10] 刘路. 水热碳化在废弃生物质资源化中的应用研究进展[J]. *当代化工研究*, 2020(22): 131-132.
- LIU L. Research progress of hydrothermal carbonization in waste biomass resourcefulization[J]. *Modern Chemical Research*, 2020(22): 131-132.
- [11] HOSSAIN M S, BALAKRISHNAN V, RAHMAN N N N A, et al. Treatment of clinical solid waste using a steam autoclave as a possible alternative technology to incineration[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(3): 855-867.
- [12] 黄玉莹, 袁兴中, 李辉, 等. 稻草的水热碳化研究[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(5): 1963-1968.
- HUANG Y Y, YUAN X Z, LI H, et al. Study on hydrothermal carbonization of rice straw[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(5): 1963-1968.
- [13] 高英, 石韬, 汪君, 等. 生物质水热技术研究现状及发展[J]. *可再生能源*, 2011, 29(4): 77-83.
- GAO Y, SHI T, WANG J, et al. Research status and development of hydrothermal technology for biomass[J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(4): 77-83.
- [14] 吕锦怡, 解晓双, 何彩桥, 等. 学校食堂餐厨垃圾组分及生化指标分析[J]. *深圳职业技术学院学报*, 2016, 15(3): 59-61.
- JINYI, XIE X S, HE C Q, et al. Component and biochemical indexes of kitchen waste from school canteen[J]. *Journal of Shenzhen Polytechnic*, 2016, 15(3): 59-61.
- [15] 潘丽爱, 张贵林, 水晶, 等. 餐厨垃圾特性的试验研究[J]. *粮油加工*, 2009(9): 154-156.
- [16] 周俊, 王梦瑶, 王改红, 等. 餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望[J]. *生物资源*, 2020, 42(1): 87-96.
- ZHOU J, WANG M Y, WANG G H, et al. Research status and prospect of food waste utilization technology[J]. *Amino Acids and Biotic Resources*, 2020, 42(1): 87-96.
- [17] 孔芹, 孙伟伟, 蒲文鹏, 等. 江苏省某市餐厨垃圾组分及成分调查分析[C]//2015年中国环境科学学会学术年会. 北京: 中国环境科学学会, 2015.
- [18] 环境保护部. 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法: HJ/T 399—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [19] ALVIRA P, TOMÁS-PEJÓ E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(13): 4851-4861.
- [20] KOJIĆ M M, PETROVIĆ J T, PETROVIĆ M S, et al. Hydrothermal carbonization of spent mushroom substrate: physicochemical characterization, combustion behavior, kinetic and thermodynamic study[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 155: 105028.
- [21] ZHANG C Y, MA X Q, CHEN X F, et al. Conversion of water hyacinth to value-added fuel via hydrothermal carbonization[J]. *Energy*, 2020, 197: 117193.
- [22] MARZBALI M H, KUNDU S, HALDER P, et al. Wet organic waste treatment via hydrothermal processing: a critical review[J]. *Chemosphere*, 2021, 279: 130557.
- [23] HE C, GIANNIS A, WANG J Y. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: hydrochar fuel characteristics and combustion behavior[J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 257-266.
- [24] 吕秋颖. 餐厨垃圾水热碳化和热解及其生命周期评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [25] 程虎, 张佳鹏, 宋洋, 等. 水热炭在土壤环境中的应用研究进展和展望[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(6): 1202-1209.
- CHENG H, ZHANG J P, SONG Y, et al. The application of hydrochar in soil environment: study progress and prospects[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(6): 1202-1209.
- [26] FALCO C, BACCILE N, TITIRICI M M. Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons[J]. *Green Chemistry*, 2011, 13(11): 3273-3281.
- [27] 赵志敏. 剩余污泥水热碳化液资源化利用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [28] 王治军, 王伟. 污泥热水解过程中固体有机物的变化规律[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(7): 1-5.
- WANG Z J, WANG W. Transformation regularity of organic solids in sludge thermal hydrolysis process[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(7): 1-5.
- [29] FUNKE A, ZIEGLER F. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2010, 4(2): 160-177.
- [30] KAMBO H S, DUTTA A. Comparative evaluation of torrefaction and hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for the production of solid biofuel[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 746-755.
- [31] 吴艳皎, 李伟, 吴琼, 等. 水热炭的制备、性质及应用[J]. *化学进展*, 2016, 28(1): 121-130.
- WU Y J, LI W, WU Q, et al. Preparation, properties and applications of hydrochar[J]. *Progress in Chemistry*, 2016, 28(1): 121-130.
- [32] 张莹, 谷萌, 孙捷, 等. 餐厨垃圾水热炭化产物分配规律及液固产物特性研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 239-249.
- ZHANG Y, GU M, SUN J, et al. The product distribution of hydrothermal carbonization of food waste and the characteristics of liquid-and solid-products[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 239-249.
- [33] 乔娜. 玉米芯和松子壳的水热碳化及其产物吸附性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [34] LUCIAN M, FIORI L. Hydrothermal carbonization of waste biomass: process design, modeling, energy efficiency and cost analysis[J]. *Energies*, 2017, 10(2): 211.
- [35] AKARSU K, DUMAN G, YILMAZER A, et al. Sustainable valorization of food wastes into solid fuel by hydrothermal carbonization[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292: 121959. ⊗