

生物质连续水热液化制油中试平台研究

程肖帝^{1,2}, 艾仙斌^{1,2}, 阙志刚^{1,2}, 蒋海伟^{1,2}, 黄蓉^{1,2}, 张珂¹, 石金明^{1,2*}

(1.江西省科学院能源研究所, 温室气体核算与碳减排江西省重点实验室, 江西 南昌 330096;

2.江西省碳中和研究中心, 江西 南昌 330096)

摘要:开发了一种连续 HTL 中试平台(c-HTL), 集成了预处理、进料控制、温度控制、压力控制、多级分步分离以及微负压旋蒸-萃取联用技术为一体, 能够实现 100 kg/h 级生物质油连续生成和分离。以餐厨垃圾制油为例, 产油率达到 28%, 分离成本大大降低。进一步推广到城市污泥、畜禽粪便、木质素等原料高值化利用。有望实现更高的经济效益, 推动生物质能源的工业化应用进程。

关键词:生物质; 水热液化; 连续反应和分离; 中试平台; 生物质油

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0345-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.056

Study on a continuous-flow hydrothermal liquefaction pilot platform used for biocrude oil production from biomass

CHENG Xiao-di^{1,2}, AI Xian-bin^{1,2}, QUE Zhi-gang^{1,2}, JIANG Hai-wei^{1,2}, HUANG Rong^{1,2},
ZHANG Ke¹, SHI Jin-ming^{1,2*}

(1.Jiangxi Key Laboratory of Greenhouse Gas Accounting and Carbon Reduction, Institute of Energy Research, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2.Carbon Neutrality Research Center of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China)

Abstract: A pilot-scale continuous-flow hydrothermal liquefaction (c-HTL) platform was developed, which incorporates raw material pretreatment, feed control, temperature control, pressure control, multi-stage stepwise separation, and a combined technology of rotary evaporation under slight negative pressure and extraction. This platform enables the continuous production and separation of biocrude oil at a scale of 100 kg/h. Taking the production of biocrude oil from food waste as an example, the oil yield reaches 28% with a significant reduction in separation costs. The technology has been further extended to the high-value utilization of other feedstocks including municipal sludge, livestock and poultry manure, and lignin. It is expected to achieve higher economic benefits and accelerate the industrial application of biomass energy.

Key words: biomass; hydrothermal liquefaction; continuous reaction and separation; pilot-scale platform; biocrude oil

随着全球可再生能源需求的不断增加, 生物质资源利用的重要性日益凸显^[1-2]。生物质水热液化 (HTL) 制取生物质油是满足全球能源需求和减少碳排放的重要途径^[3]。然而, 现有的实验室规模技术难以满足 HTL 工业化需求, 亟待开发更高规模技术^[4-6]。间歇反应器具有设备简单、成本低下的优势, 但存在持续性和安全性的不足。连续管式反应器对设备和工艺要求更高^[7-8]。对生物质原料进行预处理, 降低颗粒硬度和尺寸, 以更好地适应动力设备和连续管式反应器的结构要求^[9]。此外, 目前的 HTL 反应后处理方法也难以实现连续性的要求, 消

耗了大量的人力成本。因此, 开发一种高效、稳定的中试平台及工艺, 对推动 HTL 工业化应用具有重要意义。

因此, 开发了一种反应和分离工艺均连续的 HTL (c-HTL) 中试平台, 并深入探讨了 3 个关键模块: 预处理、连续反应和后处理。在预处理模块, 生物质原料的颗粒大小和浓度至关重要。在连续反应模块中, 温度和压力是关键因素。在后处理模块, 采用了多步分级分离技术。从 c-HTL 中试平台运行中积累的数据和经验, 对推动生物质 HTL 技术的大规模工业应用起着至关重要的作用。

收稿日期: 2026-04-01; 修回日期: 2026-06-09

基金项目:江西省技术创新引导类计划项目(20244BDF60009); 江西省赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人项目(20232BCJ23007, 20243BCE51126); 江西省科学院基础研究重点项目(2022YJC1003); 江西省科学院省级基础研究项目(2023YSTZX02); 江西省新型研发机构补助(2023BCA01002)

作者简介:程肖帝(1993-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为生物质综合利用, kampfer@zju.edu.cn; 石金明(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为生物质资源利用, 通讯联系人, shijinming0012@163.com。

1 实验部分

1.1 预处理模块

根据不同生物质原料的特性,采用适宜的预处理手段^[10-11]。

1.1.1 含水率 $\leq 75\%$ 的生物质

如畜禽粪便,采用烘干、粉碎、过筛等步骤进行预处理,以降低颗粒尺寸,从而提高流动性及反应活性。先将生物质原料烘干至含水量 $\leq 1\%$,再将干物料切断及破碎,过筛 10~80 目,将过筛后的粉末物料兑水配成 1%~20% 固含率的料液,等待后续反应。

1.1.2 含水率 $>75\%$ 的生物质

如城市污泥,进行球磨和压滤处理,以保持物料的湿度并减小颗粒尺寸。先使用行星球磨机将生物质球磨 1~8 h,静置去除沉淀物。再使用压滤机进行压滤,滤布 10~80 目。滤液泵至 c-HTL 中试平台料液储罐内,等待后续反应。

c-HTL 中试平台实验中餐厨垃圾取自南昌洪城环境股份有限公司脱油后的餐厨垃圾,含水率 80%、孔径 10 目满足要求,不用进一步预处理,可直接用双液压缸螺杆泵输送入反应系统。

1.1.3 其他生物质

如纤维质或木质纤维质材料,通常先采用试剂浸渍处理,增加生物质内部的有效接触面积,再根据固含率大小选择合适预处理方法。

1.2 连续反应模块

c-HTL 中试平台主要包含了进料控制系统、温度控制系统和压力控制系统。各控制系统通过计算机程序整合在同一操作界面上,实现实时检测和控制^[12]。

1.2.1 进料控制系统

如图 1 所示,进料系统由 2 个带搅拌器的料液储罐、双液压缸螺杆泵、高压变频泵、液体流量计、电

磁阀、手动阀、阻尼器、单向阀等组成。通过料液储罐调节固含率并充分搅拌。进料管设有自下而上流动的扩径段或空腔结构,使较大颗粒通过重力沉降分离^[13]。

1.2.2 温度控制系统

采用多级加热策略^[14],包括预加热器、一级预加热器、二级预加热器等,确保物料逐步升温至 300℃ 左右,随后进入生物质液化器进行 HTL 反应,再进入冷却系统回收热量。

1.2.3 压力控制系统

c-HTL 中试平台反应压力的控制主要通过气液分离系统实现,使二级冷却液化后的料液在稳定压力下,进入气液分离系统中不间断地分离出液相产物和气相产物^[15-16]。

1.3 后处理模块

后处理模块包含气液分离、固液分离、萃取分离、旋蒸分离等步骤。本研究引入了多级分步分离技术、微负压旋蒸-萃取联用技术,以提升生物质油的分离质量和效率。

1.3.1 多级分步连续分离技术^[17]

c-HTL 中试平台反应后得到固含率为 2.5%~20% 的混合物,先通过气液分离釜对混合物进行气液分离,获得气相产物和初级液相产物;再通过离心分离设备对固含率 $>15\%$ 的初级液相产物进行固液预分离,获得预分离固相产物和固含率 $\leq 5\%$ 的次级液相产物;然后通过过滤设备对固含率 $\leq 15\%$ 的初级液相产物和固含率 $\leq 5\%$ 的次级液相产物的混合物进行分离,得到过滤后固相产物和固含率 $\leq 1\%$ 的过滤后液相产物;再选择合适的萃取设备进行萃取分离、富集。最后对萃取后有机相进行分离得到生物质油,并回收溶剂循环用于萃取。

1.3.2 微负压旋蒸-萃取联用技术

在微低于大气压条件下,选择合适的有机溶剂对过滤后液相产物进行连续萃取和旋蒸,以获得生物质油和水相产物。具体步骤见图 2^[18]。

过滤后液相产物和萃取溶剂分别通过液位差或离心泵形成的压力差进入萃取塔进行连续萃取,并不断分离输出为萃取相和萃余相;萃取塔中设有一个使萃取相连接外界大气的气压通道,通过此气压通道稳定萃取塔中萃取相和萃余相的分层位置,从而保证萃取过程的稳定性,并通过这个通道维持萃取塔输出的萃取相与旋蒸瓶之间的压力差,从而实现通过压力差输送萃取溶剂至旋蒸瓶中,并回收萃取相的挥发组分至旋蒸瓶中;萃取相通过旋蒸瓶与

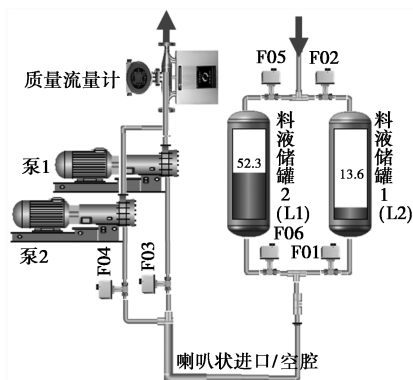


图1 进料控制系统

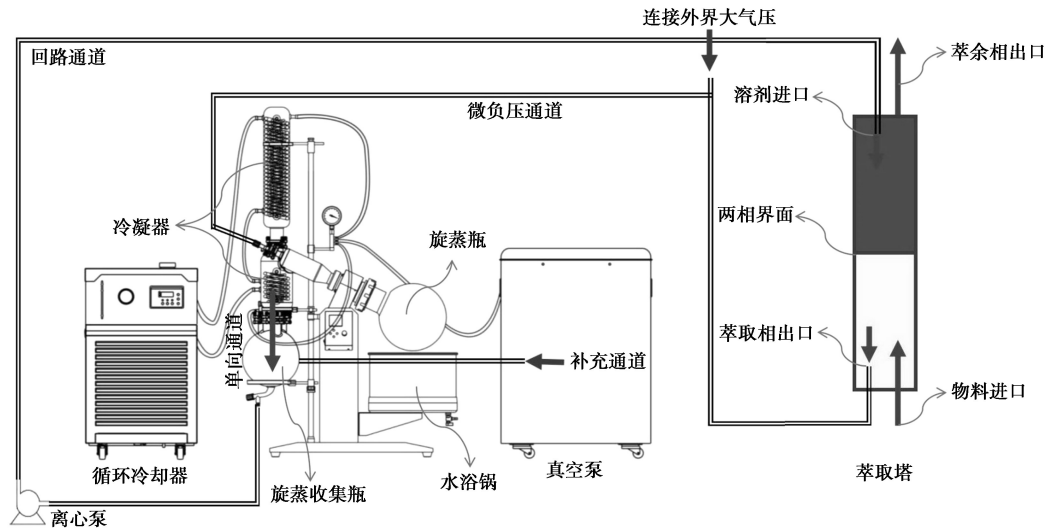


图 2 微负压旋蒸-萃取联用技术

萃取塔形成的压力差进入旋蒸仪中进行连续旋蒸,分离出生物质油,并不断冷凝输出回收溶剂。

2 结果与分析

2.1 c-HTL 中试平台关键技术研究

反应原料以餐厨垃圾为例,研究 c-HTL 中试平台关键技术。

2.1.1 餐厨垃圾制油关键技术参数

c-HTL 中试平台所用餐厨垃圾原料的含油率低于 0.5%,含水率 79.0%,粒径小于 10 目。表 1、表 2 展示了餐厨垃圾的工业分析和元素分析。

表 1 餐厨垃圾的工业分析 %

样品	固定碳	挥发分	水分	灰分
餐厨	25.32	61.87	7.05	5.76

表 2 餐厨垃圾的元素分析

样品	C/%	H/%	N/%	O*/%	S/%	HHV/(MJ·kg ⁻¹)
餐厨	46.23	3.60	3.71	46.23	0.24	12.51

注:O* 质量分数由差值法计算所得,下同。

由于 c-HTL 中试平台运行规模较大,先通过间歇釜实验研究生物质水热制油关键技术参数^[19]。如图 3 所示,反应时间 30 min、固含率 10%的餐厨垃圾生物原油的产率随反应温度升高呈现先增加后降低的趋势,在反应温度 300℃最高达到 48.9%。

餐厨垃圾原料热值仅约为 12.51 MJ/kg,水热液化后生物原油热值大幅提升,在 300℃下生物原油热值为 33.61 MJ/kg。因为生物原油中 C 和 H 含量明显增加,O 含量降低。

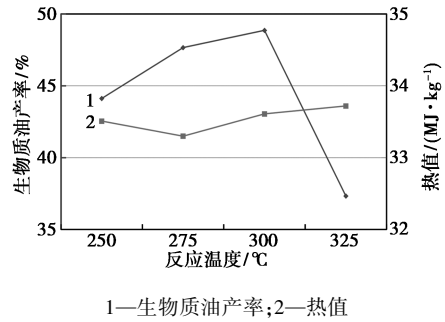


图 3 餐厨垃圾不同水热反应温度下生物原油产率和热值变化规律

如图 4 所示,温度过低主要发生水热炭化反应,有机质转为生物炭。温度过高更容易发生水热气化反应,进一步验证生物原油产率随温度呈现先增后降的趋势。

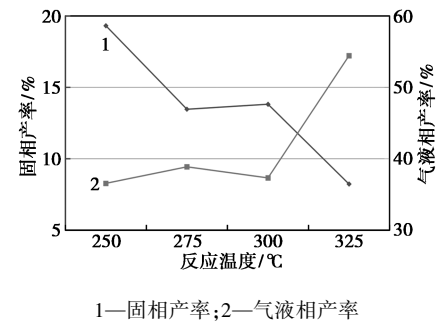
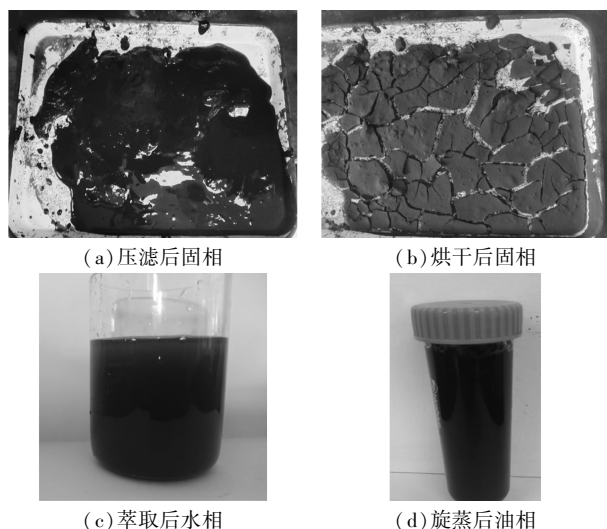


图 4 餐厨垃圾不同水热反应温度下固相产率和气液相产率变化规律

2.1.2 c-HTL 平台制油产品分析

c-HTL 平台实验表明,反应温度 300℃、停留时间 30 min、反应压力 10 MPa 下,固含率 10%餐厨垃圾 c-HTL 制油产油率可达到 28%。反应产物经多级分离去除固体残渣和水相,最终清洗得到油相,油

相回收率可达 9%^[20]。餐厨垃圾 c-HTL 中试产物如图 5 所示。



(a) 压滤后固相 (b) 烘干后固相
(c) 萃取后水相 (d) 旋蒸后油相
图 5 餐厨垃圾 c-HTL 产物

进一步对餐厨垃圾生物质油进行检测见表 3、表 4。餐厨垃圾生物质油的密度为 1 140 kg/m³, 酸值 49.44, 芳香指数 1 094, 主要成分以脂类、酮类为主。以上数据为优化餐厨垃圾反应参数和进一步应用于污泥、畜禽粪便、木质素等生物质原料中试制油提供指导。

表 3 餐厨垃圾生物质油的检测结果

检测项目	检测结果
水含量/%	痕迹
灰分/%	0.20
硫(S)/%	0.156
运动黏度(50℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	1.365
闪点	0~55℃ 未检出闪点, 55℃ 样品沸腾
弹热值/(MJ·kg ⁻¹)	25.228
硫化氢/(mg·kg ⁻¹)	<0.60
酸值/(mg·g ⁻¹)	49.44
倾点/℃	<-67
密度(15℃)/(kg·m ⁻³)	1140.3
碳芳香度指数	1094

表 4 餐厨垃圾生物质油的 GC-MS 结果

分子式	占比/%	名称
C ₅ H ₆ O	1.06	2-环戊烯-1-酮
C ₆ H ₈ O	2.31	2-甲基-2-环戊烯-1-酮
C ₆ H ₈ O	1.14	3-甲基-2-环戊烯-1-酮
C ₇ H ₁₀ O	1.13	3,4-二甲基-2-环戊烯-1-酮
C ₈ H ₁₂ O	1.57	3,4,4-三甲基-2-环戊烯-1-酮
C ₁₀ H ₁₀ O ₄	1.39	邻苯二甲酸二甲酯
C ₁₃ H ₂₆ O ₂	1.87	十二酸甲酯(月桂酸甲酯)
C ₁₅ H ₃₀ O ₂	1.23	十四酸甲酯(肉豆蔻酸甲酯)
C ₁₇ H ₃₄ O ₂	22.79	十六酸甲酯(棕榈酸甲酯)
C ₁₉ H ₃₄ O ₂	2.86	(E,E)-9,11-十八碳二烯酸甲酯
C ₁₉ H ₃₆ O ₂	20.70	(E)-9-十八碳烯酸甲酯(反式油酸甲酯)

C ₁₉ H ₃₆ O ₂	3.04	(Z)-9-十八碳烯酸甲酯(油酸甲酯)
C ₆ H ₉ NO ₂	8.95	1-乙基-2,5-吡咯烷二酮
C ₁₄ H ₁₆ N ₂ O ₂	34.60	六氢-3-(苯甲基)-吡咯并[1,2-a]吡嗪-1,4-二酮

2.1.3 餐厨垃圾生物原油升级提质

生物原油的升级提质包括催化加氢、脱氧脱氮和酯化降酸等^[21]。如表 5 所示, c-HTL 中试餐厨垃圾生物原油加氢脱氧提质后油品氧含量减少 26.89%, 而热值增加 15.8%^[22]。

表 5 加氢脱氧提质前后餐厨垃圾生物原油的元素分析

样品	C/%	H/%	N/%	O*/%/	S/%	HHV/(MJ·kg ⁻¹)
提质前	65.34	7.39	4.60	21.83	0.84	28.82
提质后	69.82	8.75	4.95	15.96	0.51	33.37

2.2 c-HTL 中试平台性能评估

平台性能评估从以下 3 个模块展开, 图 6 全面展示猪粪中试制油 3 个模块。

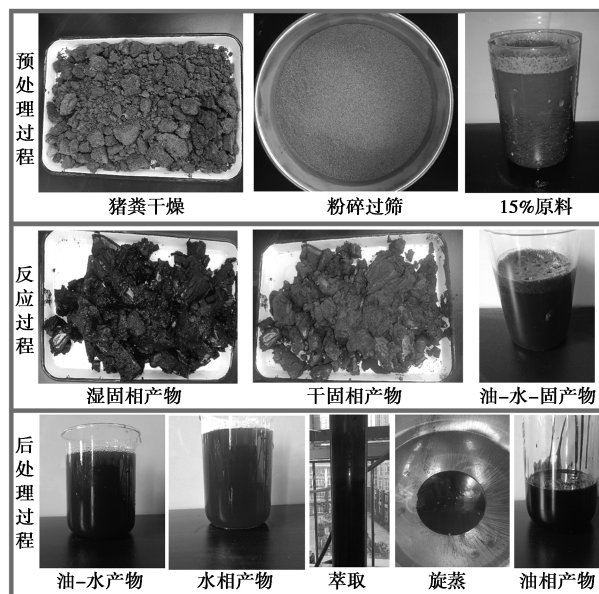


图 6 猪粪制油全流程

2.2.1 预处理模块的性能评估

针对生物质原料的物料特性, 选择合适的预处理手段, 比如浸渍处理, 粉碎、过滤等技术联用, 或球磨、压滤技术联用, 并提高预处理过程的连续化水平。

2.2.2 连续反应模块的性能评估

c-HTL 平台生物油产率: 污泥 8%、猪粪 10%、木质素 14%、餐厨垃圾 28%。其他反应参数以单位质量的餐厨垃圾干料为例, 详见表 6。连续反应模块自动化控制具有提升工作效率、降低成本和高安全性等特点。

表 6 c-HTL 中试平台反应数据
(以单位质量的餐厨垃圾干料为例)

项目	参数	项目	参数
原料固含率/%	10	反应温度/℃	300
物料反应前 pH	4.98	反应压力/MPa	10~14
物料反应后 pH	5.81	固体含水率/%	35.7
进料流量/(kg·h ⁻¹)	100		

2.2.3 后处理模块的性能评估

后处理模块采用气液分离、固液分离、油水分
离、溶剂分离和产物提纯等步骤,取得高效、降本、环
保和提质的处理效果。此外,与现有技术相比,连续
微负压旋蒸-萃取联用具有显著优势。如表 7 所
示,以分离 40 L 油水混合物为例,采用微负压旋蒸-
萃取联用,萃取和旋蒸总时间 40 min,不受设备容积
限制,可一次性连续进料并分离出油相,有效提升了
分离效率,并在分离过程中极大地减少溶剂使用和
溶剂排放,也减少了人力投入和环境影响。

表 7 c-HTL 中试平台分离数据

参数/方法	本方法	传统方法
设备容量/流量	最大流量 100 L/h 萃取塔,容量 40 L 旋 蒸仪	容量 40 L 萃取器+搅 拌器,容量 40 L 旋蒸仪
方法	微负压萃取旋蒸联 用,一次性连续式分离	20 L 油水混合物+20 L 溶剂:先萃取,再旋蒸, 重复进行 2 次
溶剂种类	二氯甲烷	二氯甲烷
原料总量	40 L	40 L
溶剂总量	7 L	40 L
萃取用量和次数	流量 60 L/h(循环)	20 L×2 次
萃取时间	40 min	80 min×2 次(含搅拌、 分层时间)
旋蒸时间		40 min×2 次
液体转移时间	0(连续转移,忽略不计)	30 min×2 次
总分离时间	40 min	5 h
溶剂回收率	82.1%	45.0%
实际溶剂用量	1250 mL	22 L
所需人员	1 人	3 人以上

3 绿色化与经济性分析

3.1 技术绿色化分析

技术绿色化评价指标包括碳足迹、污染物排放
和资源利用率等。碳足迹分析从全生命周期评估技
术路线的碳排放情况。c-HTL 平台目前反应和分
离的全过程能耗采用电能,单位时间运行的碳排放
为 57.8 kg CO₂。技术资源利用率主要包括废水循

环利用率、溶剂回收效率。c-HTL 平台具有高效资
源利用率,废水循环利用率 100%、溶剂回收效率
82.1%。同时,生物质原料的能源化利用也具有重
要减碳和降污价值。

3.2 技术经济性分析

c-HTL 平台的成本核算包括建设成本和运行
成本。初建建设成本和折旧成本 200~300 万元,但
长期运行和规模化生产后,初期建设成本和折旧成
本分摊比例下降。运行成本主要包括能耗成本和溶
剂成本等。其中,原料多为廉价的生物质废弃物,成
本可忽略不计。以处理脱油后的餐厨垃圾为原料,
c-HTL 平台生产生物原油的能耗成本约为 21.4
元/kg,溶剂成本约为 33.5 元/kg。此外,生物质废
弃物的资源化利用间接减少了污染物的处置成本,
还能创造高价值产品的额外收入,具有长远的社会
和经济价值。

4 结论

集成预处理、进料控制、温度控制、压力控制、多
级分步分离以及微负压旋蒸-萃取联用技术为一体的
c-HTL 中试平台,用于生物质 HTL 制油。并以
餐厨垃圾中试制油为例,产油率达到 28%,分离成
本大大降低。平台能进一步拓展应用到城市污泥、
畜禽粪便、木质素等生物质原料,扩大了生物质原料
的适用应用范围。c-HTL 平台具备 100 kg/h 连续
反应和分离 HTL 制油能力,对推动生物质水热液化
制油规模化应用和能源绿色转化具有重要意义。

参考文献

[1] Xu C.Roles of bioenergy and green hydrogen in large scale energy
storage for carbon neutrality[J].Engineering,2023,29:32-34.
[2] 李振京,李新月,韩沂杭,等.生物航煤生产工艺研究进展[J].
应用化工,2025,54(8):2127-2133.
[3] Chen W,Zhang Y,Lee T,*et al.*Renewable diesel blendstocks pro-
duced by hydrothermal liquefaction of wet biowaste[J].Nature Sus-
tainability,2018,1(11):702-710.
[4] Douglas C,Andrew J,Todd R H,*et al.*Conversion of a wet waste
feedstock to biocrude by hydrothermal processing in a continuous-
flow reactor:Grape pomace[J].Biomass Conversion and Biorefin-
ery,2017,7:455-465.
[5] Elliott D,Biller P,Ross A,*et al.*Hydrothermal liquefaction of bio-
mass:Developments from batch to continuous process[J].Biore-
source Technology,2015,178:147-156.
[6] Beims R,Hu Y,Shui H,*et al.*Hydrothermal liquefaction of biomass
to fuels and value-added chemicals:Products applications and chal-
lenges to develop large-scale operations[J].Biomass & Bioenergy,
2020,135:105510.

(下转第 354 页)

于提升系统温度与传质推动力,同时改善初始段湍动状态,促进脱氟总量与传质系数同步增加;但当喷淋密度超过 $49.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,液膜增厚与流动状态恶化导致气液接触效率下降,脱氟性能不升反降。

(3) 确定了协同优化操作区间。在本实验条件下,气速约 2.7 m/s 、喷淋密度 $33.3 \sim 41.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 为较优操作参数组合。该条件下湍动充分、传质推动力与传质系数协同作用最佳,可实现脱氟效率最大化。

(4) 研究对工程实践具有指导意义。实验验证了在保持一定气液接触状态与温度平衡的基础上,通过协调气速与喷淋量可实现对脱氟过程的有效调控,为空气封闭循环汽提脱氟工艺的工业放大与操作优化提供了关键理论与数据支持。

参考文献

- [1] 张洪,李军.净化湿法磷酸浓缩酸性含氟冷凝水回用工艺研究[J].无机盐工业,2026,58(1):67-73.
- [2] 段利中,高璐阳,王硕,等.湿法磷酸除氟制冰晶石[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(12):45-49.
- [3] 刘文凯,李彦春.湿法磷酸生产中氟资源回收利用提升改造[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(1):79-83.
- [4] 陈迎新.湿法磷酸生产中氟化物溢出行为强化及机理研究[D].武汉:武汉工程大学,2023.
- [5] 王巍,范丹,陈豆林,等.湿法磷酸脱氟工艺及氟资源回收利用研究进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):31-40.
- [6] 何宾宾.湿法磷酸中液相氟的赋存形态及其对氟回收的影响研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [7] 李朝波,刘志平,杨利春,等.湿法磷酸生产中氟硅资源循环经济技术研究与实践[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(6):84-88.
- [8] 李志祥,明大增,钟英.磷矿伴生氟资源的综合利用[J].磷肥与复肥,2008,23(1):64-66.
- [9] 赵晓飞.《推进磷资源高效高值利用实施方案》发布——磷化工行业剑指高端新材料[J].中国石油和化工,2024,(2):26-29.
- [10] 何宾宾.对我国磷氟协同发展的思考与建议[J].云南化工,2024,51(S1):20-24.
- [11] 刘帅杰,姜国庆,高璐阳.磷矿伴生氟资源生产氟化氢的前景分析[J].磷肥与复肥,2023,38(6):31-36.
- [12] 曹骥,张志业,王辛龙.磷化工副产氟硅酸的利用及无水氟化氢的生产研究进展[J].无机盐工业,2010,42(5):1-4.
- [13] 黄忠,何宾宾,张险峰,等.磷化工体系中氟资源回收工艺的系统协同与集成优化研究综述[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(8):70-74.
- [14] 付子启,张程,盛勇,等.有机溶剂浸取湿法磷酸脱氟渣制备磷酸的研究[J].无机盐工业,2022,54(7):129-134.
- [15] 欧健,李天祥,隋岩峰,等.工业含氟废气处理及资源回收的概述[J].无机盐工业,2021,53(5):39-46.
- [16] 杨文贡,首志欣,项双龙,等.磷化工中氟元素迁移转化规律及其回收利用现状[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(7):11-15,40.
- [17] 王喜恒,孙文哲.湿法磷酸过程氟回收技术研究进展[J].无机盐工业,2020,52(8):25-29.
- [18] 朱家骅,夏素兰,李季,等.空气循环气提浓缩脱水溶液挥发性杂质和制备结晶产品的方法与装置:CN 202011006416.6[P].2026-03-06.
- [19] 豆瑞刚,王文辉,朱家骅,等.尾气脱氨湍球塔临界流化速度研究[J].化学工程与装备,2014,(6):1-3.
- [20] Van der Sluis S, Schrijver A H M, Baak F P C, et al. Fluoride distribution coefficients in wet phosphoric acid processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(3):527-536. ■
- (上接第349页)
- [7] Wang H, Zhang M, Han X, et al. Production of biocrude oils from various bio-feedstocks through hydrothermal liquefaction: Comparison of batch and continuous-flow operations[J]. Biomass & Bioenergy, 2023, 173:106810.
- [8] Summers S, Valentine A, Wang Z, et al. Pilot-scale continuous plug-flow hydrothermal liquefaction of food waste for biocrude production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(31):12174-12182.
- [9] Ghadge R, Nagwani N, Saxena N, et al. Design and scale-up challenges in hydrothermal liquefaction process for biocrude production and its upgradation[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 14:100223.
- [10] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应预处理新方法:CN 202411327460.5[P].2024-09-23.
- [11] 程肖帝,周建平,石金明,等.一种湿料筛分装置及筛分控制方法:CN 202511786641.9[P].2025-12-01.
- [12] 程肖帝,黄蓉,石金明,等.一种连续生物质水热液化反应智能控制方法及其系统:CN 202510980898.1[P].2025-07-16.
- [13] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应进料方法和进料系统:CN 202510792109.1[P].2025-06-13.
- [14] 程肖帝,石金明,徐春保,等.一种连续管式水热液化反应器温度控制新方法:CN 202410751944.6[P].2024-06-12.
- [15] 程肖帝.一种生物质连续水热液化制油气液分离系统和方法:CN 202410428078.7[P].2024-04-10.
- [16] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种连续生物质水热液化反应稳压控制方法及系统:CN 202511513274.5[P].2025-10-22.
- [17] 程肖帝,石金明,艾仙斌,等.一种生物质水热液化反应后处理新方法:CN 202411616179.3[P].2024-11-13.
- [18] 程肖帝,石金明,徐春保,等.一种微负压旋蒸萃取联用连续分离的方法:CN 202510282450.2[P].2025-03-11.
- [19] 程肖帝,阙志刚,石金明,等.共水热液化关键参数对废弃稻秆与城市污泥制油的影响[J].能源研究与管理,2025,17(2):101-107.
- [20] 黄蓉,程肖帝,石金明,等.一种生物质连续水热液化制油清洗系统:CN 202510930859.0[P].2025-07-07.
- [21] 蒋海伟,俞成达,文震林,等.钢渣对蜈蚣草水热液化产油特性及砷固化影响研究[J].应用化工,2025,54(8):1997-2001.
- [22] Yang X, Li J, Xu Y, et al. Hydrodeoxygenation of lignin-derived biooil over NiMn/NC catalyst for bio-based liquid fuel[J]. Biore-source Technology, 2026, 445:134117. ■