

# 基于污泥水热碳化的炭产品制备系统性能评估

赵禹翰<sup>1</sup>, 陈衡<sup>1\*</sup>, 郑淇薇<sup>1</sup>, 李金航<sup>1</sup>, 张国强<sup>1</sup>, 王新菊<sup>2</sup>, 刘可文<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 青海 西宁 810000;  
3. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

**摘要:**提出了一种基于污泥水热碳化的炭产品制备系统, 在处理污水污泥的同时实现了水热炭产品的制备, 实现了污水污泥的资源化利用。通过水热碳化、机械脱水、热干燥 3 个过程将污水污泥转化为水热炭产品, 与传统直接干燥法相比具有显著优势, 不仅进一步降低了水热炭产品的含水量且分离了有害物质, 提高了产品燃烧性能。采用 Aspen Plus 软件对该系统处理污水污泥制备水热炭产品的过程进行热力学建模, 并对仿真结果进行能量分析与经济性分析。结果表明, 系统制备水热炭产品能量利用效率为 52.01%, 系统的投资回收期为 2.73 年, 净现值达到 229 092.12 万元, 具有较高的能量利用效率与经济性。

**关键词:** 污水污泥; 水热碳化; 炭制备; 系统集成; 技术经济性

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)05-0237-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.05.039

## Performance evaluation on carbon products preparation system based on hydrothermal carbonization of sludge

ZHAO Yu-han<sup>1</sup>, CHEN Heng<sup>1\*</sup>, ZHENG Qi-wei<sup>1</sup>, LI Jin-hang<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qiang<sup>1</sup>,  
WANG Xin-ju<sup>2</sup>, LIU Ke-wen<sup>3</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Power China Qinghai Electric Power Engineering Co., Ltd., Xining 810000, China; 3. Beijing Electric Power Research Institute, Beijing Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Beijing 100075, China)

**Abstract:** A preparation system is proposed for carbon products based on hydrothermal carbonization of sludge, which realizes simultaneously the preparation of hydrothermal carbon products and the treatment of sewage sludge, thereby achieving the re-utilization of sewage sludge. Sewage sludge is converted into hydrothermal carbon products through three processes such as hydrothermal carbonization, mechanical dehydration, and thermal drying. Compared with the traditional direct drying method, this system further reduces the content of water in hydrothermal carbon products, separates harmful substances out and improves the combustion performance of the carbon products. Aspen Plus software is employed to conduct thermodynamic modeling for the process of preparing hydrothermal carbon products from sewage sludge in this system, and perform energy analysis and economic analysis on the simulation results. It is shown that the energy utilization efficiency of the system for preparing hydrothermal carbon products is 52.01%, the payback period of the system is 2.73 years, and the net present value reaches RMB 2.290 921 2 billion, indicating high energy utilization efficiency and economic feasibility.

**Key words:** sewage sludge; hydrothermal carbonization; carbon products preparation; system integration; techno-economics

随着城市化进程的加快, 生活污水和工业污水的产生必然增多。污水中的固体物质和污染物在污水处理过程中会发生沉淀, 形成污水污泥 (sewage sludge, SS)。为了从污水污泥中回收能量和资源, 各种稳定的替代方法, 如燃烧、气化和热解, 已经得到了广泛的研究<sup>[1]</sup>。然而污泥的高含水量和脱水性差, 需要大量能量输入的替代预处理技术<sup>[2]</sup>。因

此, 近年来, 开发一种有效的、可持续的污泥预处理方法受到了广泛的关注<sup>[2-3]</sup>。

龚为进等<sup>[4]</sup>认为水热氧化是一种非常有效的氧化技术, 反应前不需要对污泥进行脱水处理, 总结了催化水热氧化技术的进展以及在水热氧化反应中的应用, 简述了水热氧化处理过程中的资源化利用。闫志成等<sup>[5]</sup>通过对不同热解温度条件下污泥热解

收稿日期: 2024-08-23; 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52276006, 52106008)

作者简介: 赵禹翰 (2001-), 男, 硕士生; 陈衡 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为多能互补集成方法, 通讯联系人, heng@ncepu.edu.cn。

产物的元素、化学键和成分变化规律进行研究,初步推测了污泥热解过程中有机物和热解产物的转化规律和热解机理。瞿兆舟<sup>[6]</sup>以国内污泥碳化的工程应用情况为样本,进行了运营成本测算与分析,供污泥处理处置业内的技术、运营人员参考。周程<sup>[7]</sup>提出“热水解+高含固厌氧消化”工艺具有大幅提升厌氧消化效率的特点,可彻底实现污泥无害化,更好实现污泥减量化、稳定化和资源化。目前,污水污泥的资源利用方法是将污泥转化为有价值的物质,如肥料、能源或建筑材料<sup>[8]</sup>。而厌氧消化是一种利用微生物在厌氧条件下分解有机废物产生甲烷气体的处理方法<sup>[9]</sup>。污泥厌氧消化的沼气生产效率一般在 25%~60%<sup>[10]</sup>。

而利用热液碳化技术将污水污泥转化为高热值水热炭是近年来的热门研究方向。该技术的原理是在中温、高压水热条件下处理污水污泥,将其转化为稳定的碳质产品。与传统的热处理方法(热解、焚烧、气化)不同,水热液碳化不需要预先干燥,减少了能量损失。研究表明,水热碳化是一种放热化学过程,反应温度通常在 180~250℃<sup>[11]</sup>。300℃是污泥生物炭芳构化、石墨化的临界温度。热解温度低于 300℃时生物炭的碳结构、热稳定性与原污泥类似<sup>[12]</sup>。在实验室的反应时间一般在 30 min~1 h,在工业处理下可延长至数小时<sup>[13-14]</sup>,副产品主要是工艺水和少量不可凝气体(主要是二氧化碳)。水热碳化过程涉及水解、脱水、脱羧、缩合等反应<sup>[4]</sup>。在中温、高压水热条件下,有机物质被水解成脂肪酸、糖、氨基酸等小分子,然后立即进行脱水和脱羧反应。水解产物进行缩合和聚合,形成碳质产物,包括可溶性有机物质和固体碳。生物炭产率一般在 50%~80%。由于 HTC(hydrothermal carbonization)系统降低了生物炭的亲水性,冷却后的生物炭的机械脱水可以使含水量降低到 30%以下<sup>[15-16]</sup>。

本文中探讨了污水水热碳化的炭产品制备系统能将污水污泥转化为碳氢混合物的新思路,即污水污泥水热处理制造水热炭以满足燃煤电厂混烧生物炭的需求。本研究有助于促进污泥热液碳化技术,加快传统热能的改造,提高可持续性方面的发展。

## 1 碳产品制备系统

污水污泥经处理后能够成为可供燃烧的水热炭,本系统致力于通过化学工艺流程产生能够被运用于电厂燃烧的水热炭。污水污泥若在正常运行中

超过一定比例,不仅导致锅炉热效率降低,而且加剧锅炉系统内相关设备的腐蚀,对安全有害。为了提高污泥的燃烧效能,同时减轻共焚烧的相关危害,提出了一种新的系统设计。该设计将污水水热处理作为研究系统,试图设计出能与一个电厂的燃煤发电相结合的 HTC 系统,旨在通过较好的系统设计产生较好的水热炭产品,来提高共烧过程的利用率、整体效率和安全性。

首先,从锅炉系统中提取热一次空气来加热压缩后的湿污泥。当污水污泥的温度达到预定的水热反应温度时,被引入水热反应器。水热碳化是一种放热反应,应有效地利用释放的热量。而吹入系统的冷空气可以通过使用夹套反应器进行预热。反应器的内部部分用于水热碳化过程,而中间夹套空间用于冷空气的流动。在反应过程中形成的水热碳化混合产物具有较高的温度,原料可以利用该热能进行预热,从而降低热一次风的能量损耗,提高能量的利用率。然后,将经过换热后的水热碳化物进行减压,再进行工艺水分离,得到含水量高的水热炭产物。分离装置采用板框式压滤机,对脱水性能要求不过高。工艺水主要含有有机污染物、重金属等有害物质,需要经过有特殊功能的处理设备处理,以减少对环境的危害。最后,通过热风干燥将含水量降低到目标值。加热水热碳化物后的热一次风仍然具有较高的温度,干燥水热碳化物的冷空气可以继续与通过夹套空间的仍具有较高温度的热一次风空气交换热量,当热空气被加热到预定的温度时,被用来干燥水热炭。水热碳化物被送到储罐中储存。此外,含有水蒸气的排气口仍然具有相对较高的温度,可用于预热冷空气,从而实现余热回收。系统不仅降低了水热炭的含水量,还分离了有害物质,提高了燃烧性能,这就是与直接干燥相比污水污泥水热碳化处理的显著优势。

## 2 仿真模型构建以及验证

### 2.1 系统模拟

本文中使用成熟的工艺模拟软件 Aspen Plus V11 对 HTC 系统进行建模,并利用仿真模型对 HTC 系统进行性能分析。Aspen Plus 提供了一个广泛的化学成分库,并支持多个单元操作和反应器模型,能够准确地描述过程中涉及流体流动、传热、传质和化学反应等过程。模拟中采用的方法分别为 PSRK 和 STEAMNBS。PSRK 适用于高压和中高温模拟环境。污水污泥、水热炭化物和灰在定义过程中被认为是

非常规固体(NC 固体),它们的化学和物理性质使用“煤原”进行估计和“合并”。污泥和水热炭的物理性质方法与煤的物理性质方法一致。在模拟中使用的模块类型包括泵、加热器、反应器、阀门、压缩机和混合器。

本研究依据水热炭制备和热解的相关设计数据和文献,使用化学分析软件 Aspen Plus 对系统进行模拟和热力学分析。利用基本的工程关系,如质量平衡、能量平衡、相平衡、化学平衡和动力学反应来提供高精度的热力学循环过程仿真。

## 2.2 系统验证

基于 Aspen Plus 的污泥水热法系统仿真模型模拟如图 1 所示,HTC 系统可分为水热碳化、机械脱水和热干燥 3 个过程。本研究通过先前的参考文献设定系统的参数<sup>[17]</sup>,并将设计系统的模拟结果与文献中的计算结果进行分析比较,结果如表 1 所示。结果发现在排除选取原料本身物理性质具有差异性并考虑系统本身的误差外,该集成系统的模拟结果与文献仿真结果在允许误差范围内,说明了系统的合理性。

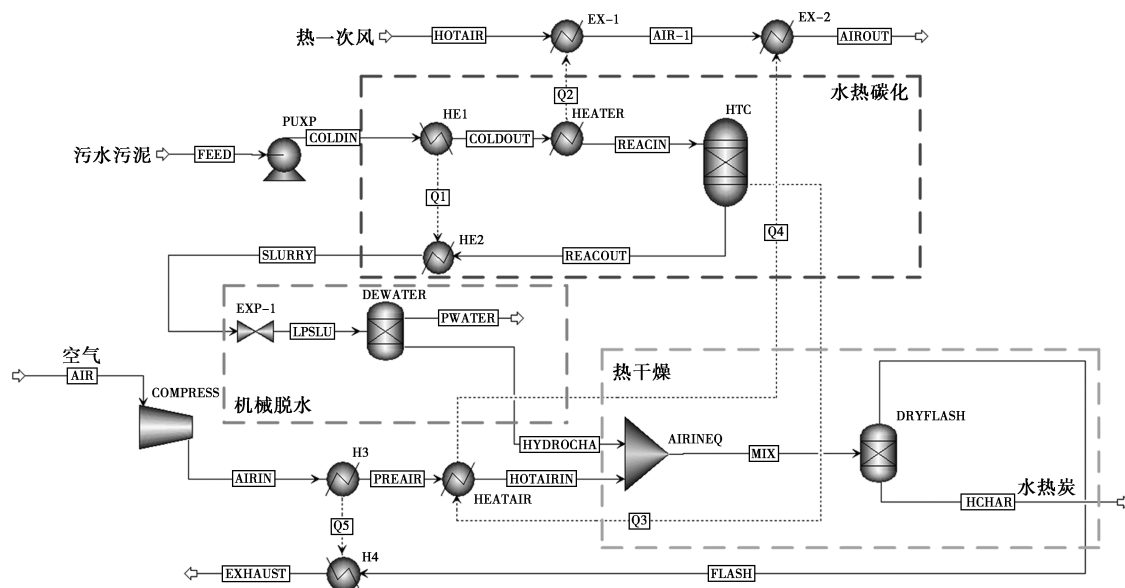


图 1 基于 Aspen Plus 的污泥水热法系统仿真模型

表 1 HTC 系统的模型验证

项目	参考	模型
SS 进口温度/℃	25.00	25.00
SS 进口压力/MPa	0.10	0.10
热一次风进口温度/℃	327.00	327.00
热一次风进口压力/MPa	0.10	0.10
冷一次风出口温度/℃	28.30	25.40
冷一次风出口压力/MPa	0.10	0.10
水热反应压力/MPa	4.50	4.50
设计水热反应温度/℃	250.00	200.00
空气入口温度/℃	25.00	25.00
空气入口压力/MPa	0.10	0.10
废气温度/℃	57.37	53.0
废气压力/MPa	0.12	0.12
热解产物固相分率	0.21	0.19
热解产物汽相分率	0.03	0.01
热解产物液相分率	0.76	0.80

## 3 分析方法

### 3.1 热值分析

高位发热量包括燃烧产物中全部水蒸气凝结成水所放出的气化潜热。而燃烧产物中水蒸气未凝结时,燃料所释放的热量成为低位发热量。

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - r(9H_{\text{ar}}/100 + M_{\text{ar}}/100) \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{net,ar}}$ 、 $Q_{\text{gr,ar}}$ 为物质收到基的低位、高位发热量,kJ/kg; $H_{\text{ar}}$ 、 $M_{\text{ar}}$ 为物质收到基的氢和水分,%; $r$ 为水的气化潜热,通常取 2 500 kJ/kg。

固体、液体物质发热量,一般用氧弹量热仪测出。没有测量工具时,可用经验公式:

$$Q_{\text{gr,ar}} = 339C_{\text{ar}} + 1256H_{\text{ar}} + 109S_{\text{ar}} - 109O_{\text{ar}} \quad (2)$$

式中, $C_{\text{ar}}$ 为物质收到基的碳,%。

### 3.2 热力学指标

通过 HTC 系统,使得 SS 经历了向具有更好燃烧性能的水热炭的转变。此外,该过程还需要用电量和热消耗。水热碳化效率( $\eta_{\text{HTC}}$ )是评估 HTC 系

统的性能指标。

$$\eta_{\text{HTC}} = (m_h \times LHV_h) / (m_{ss} \times LHV_{ss} + P_{ec} + P_{hc}) \quad (3)$$

式中,  $m_h$  和  $m_{ss}$  为水热炭和 SS 的消耗率, kg/s;  $LHV_h$  和  $LHV_{ss}$  为水热炭和 SS 的低位发热量, MJ/kg;  $P_{ec}$  和  $P_{hc}$  为 HTC 部分的用电量和热耗, MW。

### 3.3 经济性指标

需要估计 HTC 子系统的经济性。年度营运资金和其他成本以总投资的百分比表示, 其他成本包括设计与工程、建造过程人力物力花费以及应急费用。此外, 以动态回收期 (DPP) 和净现值 (NPV) 作为评价指标, 来评估 HTC 的可行性。DPP 的计算是基于项目的现金流, 用于确定从项目开始到收回总投资成本的时间。净现值表示为 HTC 系统生命周期净现金流量现值之和。

DPP 和 NPV 的计算公式如下所示:

$$\sum_{y=1}^{\text{DDP}} [(C_{in} - C_{out}) / (1 + \varepsilon)^y] = 0 \quad (4)$$

$$\text{NPR} = \sum_{y=1}^t [(C_{in} - C_{out}) / (1 + \varepsilon)^y] \quad (5)$$

式中,  $y$  是运营年份;  $C_{in}$  和  $C_{out}$  表示为  $y$  年的现金流入和现金流出, 万元;  $\varepsilon$  为折扣率;  $t$  为集成系统的使用寿命。

## 4 结果与讨论

### 4.1 系统参数

选择一个典型的污水污泥作为水热工艺的原料<sup>[18]</sup>, 采用的污水污泥原料的元素分析以及工业分析参数见表 2, 其含水量达到 80%, 低位发热量仅为 1.54 MJ/kg。水热碳化过程的产物为水热炭, 水热炭的元素分析以及工业分析参数见表 3, 其含水率降低到 8%, 低位发热量提高到 11.98 MJ/kg, 显著提高了干燥污水污泥的燃烧性能。

表 2 污水污泥原料的物理性质 (以收到基参数为基准)

项目	数值
工业分析 (质量分数)/%	
Mar	80.00
Aar	5.98
元素分析 (质量分数)/%	
Car	8.05
Har	1.05
Nar	1.22
Sar	0.20
Oar	3.50
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	1.54

表 3 水热炭产品的物理性质 (以收到基为基准)

项目	数值
工业分析 (质量分数)/%	
Mar	8.00
Aar	47.71
元素分析质量分数)/%	
Car	30.31
Har	2.48
Nar	4.69
Sar	0.46
Oar	6.35
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	11.98

HTC 系统的基本输入和输出参数见表 4, 52.78 kg/s 的污水污泥产生约 5.31 kg/s 的水热炭。日污泥处理能力约 4 560.19 t, 日产量 458.784 t。

表 4 HTC 系统的基本输入和输出参数

项目	数值
输入参数	
污水污泥消耗率/(kg·s <sup>-1</sup> )	52.78
热一次风空气温度/°C	327.00
热一次风空气压力/MPa	0.10
热一次风空气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	104.50
空气温度/°C	25.00
空气压力/MPa	0.10
空气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	343.06
输出参数	
生物炭产量/(kg·s <sup>-1</sup> )	5.31
工艺水流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	45.80
热一次空气温度/°C	28.30
冷一次风压力/MPa	0.10
冷一次风流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	104.50
废气温度/°C	57.37
废气压力/MPa	0.12
废气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	344.74

将污水污泥加压至 4.5 MPa, 从反应堆下游和热一次空气吸收热量, 达到 250°C 的反应条件后被送到 HTC 反应发生器。反应器的温度保持在恒定的 250°C, 停留时间约为 1 h 得到水解产物, 其中包括水热炭、生物油以及生物气。之后得到的水解产物被进一步输送。HTC 反应发生器输入和输出参数见表 5。

表5 水热反应发生器输入和输出参数

项目	数值
输入参数	
污水污泥流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	52.78
污水污泥温度/ $^{\circ}\text{C}$	250.00
污水污泥压力/MPa	4.50
污水污泥固相分率	0.20
污水污泥汽相分率	0.00
污水污泥液相分率	0.80
输出参数	
热解产物流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	52.78
热解产物流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	52.78
热解产物温度/ $^{\circ}\text{C}$	250.00
热解产物压力/MPa	4.50
热解产物固相分率	0.21
热解产物汽相分率	0.03
热解产物液相分率	0.76

在将热转移到原料后,反应混合物进行降压和机械脱水,通过节流装置压力得到降低,并且通过分离器分离出的含水率为30%的水热碳化物和工艺水废水,需进一步干燥至目标值。同时,空气以104.50 kg/s的流量被吹进,并吸收来自HTC反应器的热量和热一次风热量。当空气被加热到110 $^{\circ}\text{C}$ 时,与水热炭接触实现热干燥带走水分,最后通过分离器,可以得到含水量为8%的水热炭产品。热干燥过程的输入输出参数见表6。

表6 热干燥过程输入和输出参数

项目	数值
输入参数	
水热炭流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	6.98
水热炭温度/ $^{\circ}\text{C}$	61.86
水热炭压力/MPa	0.12
空气流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	343.06
空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	110.00
空气压力/MPa	0.12
输出参数	
水热炭流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5.31
水热炭温度/ $^{\circ}\text{C}$	94.79
水热炭压力/MPa	0.12
空气流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	344.72
空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	94.79
空气压力/MPa	0.12

## 4.2 热力学分析

为了描述系统内的能量流,对HTC系统中发生的能量流进行详细的分析,在HTC系统中,SS的能量输入为81.27 MW,用电量和热耗分别为8.47、31.83 MW。经过热液碳化、脱水和热干燥3个阶段,共损失58.35 MW的能量,产生含63.23 MW能量的水热炭。水热碳化效率的计算结果为52.01%。经过处理后污泥净发电效率远高于干污泥焚烧效率(一般约14%)<sup>[19]</sup>。

污泥水热法技术的优点之一是能够在相对较低的温度下去除和蒸发污泥中的水分。这包括水热反应中的脱水和冷凝等过程,以及碳化后的机械脱水和热干燥,减少了降低含水量所需的能量。此外,系统内余热的回收和再利用提高了工艺效率。以上分析表明,该系统可以实现SS的有效利用。

## 4.3 经济性分析

为了评估系统集成程序的可行性,并对系统进行经济评估,经济性分析的基本假设和数据见表7,该系统的生命周期假设为26 a,包括1 a的建设期和25 a的运行期。运行时间以每年5 700 h为基础。项目运营收入,即SS水热处理产生的收入主要来自政府的SS处理补贴以及售卖水热炭。

表7 HTC系统的经济分析参数

项目	数值
施工工期/a	1
运行周期/a	25
年运行时间/h	5700
SS政府补贴/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	238.03
SS运输费/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	31.03
电价/( $\text{元}\cdot\text{MWh}^{-1}$ ) <sup>[20]</sup>	384.31
水热炭产品销售价格/( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	366.97
运营和维修成本	占总投资成本的10%
其他成本	占总投资成本的20%
折现率/% <sup>[21]</sup>	8

每台设备的成本列于表8中。其中,设备的成本采用Willims法计算,其他设备的成本采用相关法计算。表9列出了经济分析结果。该HTC系统每年产生的运营和维修成本为5 651.81万元。该项目的利润来源是水热炭产品销售,每年处理1 083 046.00 t SS所产生108 961.2 t水热炭产品的收入为3 904.79万元,每年可获得25 779.32万元的政府补贴。考虑到所有因素时,综合系统每年产

生的净收入为 20 671.12 万元, DPP 为 2.73 a。25 a 寿命的系统 NPV 为 229 092.12 万元, 证实了综合系统的经济效益。

表 8 HTC 系统的采购设备参数

项目	设备类型	设备子类型	功能参数	数值
PUMP	泵和驱动器	离心式驱动器	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	42.66
			功率/kW	809.36
HE1-HE2	换热器	管壳式	面积/m <sup>2</sup>	444.06
HEATER-EX1	换热器	管壳式	面积/m <sup>2</sup>	100.54
HTC	压力容器	反应堆	容量/(t·d <sup>-1</sup> )	2776.96
EXP1	解压装置	阀门	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	42.66
DEWATER	过滤器	板架	容量/m <sup>3</sup>	1.40
COMPRESS	压缩机	离心的	功率/kW	7406.35
HE3-HE4	换热器	管壳式	面积/m <sup>2</sup>	2217.43
HEATAIR-EX2	换热器	管壳式	面积/m <sup>2</sup>	264.92
DRYFLASH	干燥器	直接接触式	面积/m <sup>2</sup>	180.00
HYDROCHAR TANK	油箱	浮顶	容量/m <sup>3</sup>	317.21
SLUDGE TANK	油箱	锥形顶	容量/m <sup>3</sup>	2314.13

表 9 系统经济性分析结果

项目	数值
总投资成本/万元	56518.13
设备成本/万元	39562.69
其他成本/万元	11303.63
年运营和维修成本/万元	5651.81
年 SS 运输费成本/万元	3361.17
年 SS 处理能力/t	1083046.00
SS 由政府补贴产生的收入/万元	25779.32
年水热炭产品销售收入/万元	3904.79
年净收入/万元	20671.12

## 5 结论

建立了基于 Aspen Plus 的污泥水热法工艺模型, 并利用该模型分析系统的能量平衡。主要结论总结如下。

(1) 基于在热解条件为 250℃ 和 4.5 MPa 环境下进行了约 1 h 的反应, 低位发热量仅为 1.54 MJ/kg 的污水污泥前后经历水热碳化、机械脱水以及热干燥过程, 转化为低位发热量为 11.98 MJ/kg 的水热炭产品, 显著提高了燃烧性能, 能够运用到商业中煤炭掺混燃烧中的水热炭。

(2) 通过对 HTC 系统进行能量分析与计算得出系统中能量流动平衡情况以及水热碳化效率为 52.01%。相比于干污泥焚烧, 污泥水热法利用反应条件以及系统内余热的回收实现了降低去除污泥中的水分所需的能量, 实现 SS 的有效利用。

(3) 对 HTC 系统进行了经济性分析与计算, 得出该系统拟运行周期 25 a 总投资成本 56 518.13 万元, 运行维修成本 5 651.81 万元, 年收入可达 20 671.12 万元。DPP 为 2.73 a, 25 a 寿命的系统 NPV 为 229 092.12 万元, 证实了 HTC 系统是一项很好的投资。

## 参考文献

- [1] Zhao P, Shen Y, Ge S, *et al.* Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 815-821.
- [2] Ha D T, Tran K, Trinh T T. New insights into the hydrothermal carbonization process of sewage sludge: A reactive molecular dynamics study[J]. *Fuel*, 2024, 361: 130692.
- [3] Tascia A L, Puccini M, Gori R, *et al.* Hydrothermal carbonization of sewage sludge: A critical analysis of process severity, hydrochar properties and environmental implications[J]. *Waste Management*, 2019, 93: 1-13.
- [4] 龚为进, 冀岳, 任远林, 等. 市政污泥水热氧化处理技术研究进展[J]. *河南科学*, 2022, 40(6): 898-903.
- [5] 闫志成, 许国仁, 李建政. 污水污泥热解过程中有机物转化机理研究[J]. *黑龙江大学: 自然科学学报*, 2017, 34(4): 450-458.
- [6] 瞿兆舟. 我国污泥碳化技术的探讨及工程经济测算[J]. *清洗世界*, 2024, 40(6): 195-198.
- [7] 周程. 市政污泥“热水解+高含固厌氧消化”处理工艺设计浅析[J]. *净水技术*, 2024, 43(S1): 177-183.
- [8] Chen Z, Hou Y, Liu M, *et al.* Thermodynamic and economic analyses of sewage sludge resource utilization systems integrating Drying, Incineration, and power generation processes[J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120093.
- [9] Shi Y, Xu J. A multi-objective approach to kitchen waste and excess sludge co-digestion for biomethane production with anaerobic digestion[J]. *Energy*, 2023, 262: 125243.
- [10] 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.
- [11] Wang L, Chang Y, Li A. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 423-440.
- [12] 范剑平, 李彦林, 陈晴空, 等. 热解温度对污泥生物炭碳结构及热稳定性的影响: “中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场”论文集(三)[C]. 重庆: 中国环境科学学会环境工程分会, 2022: 424-429.

(下转第 247 页)

明,该工艺可以有效处理丁腈橡胶废水,保证工艺稳定运行。

### 3 成本分析

本工程总投资 1 735 万元,包括建筑工程、设备采购等直接投资 1 500 万元,设计费、调试费、安装费等间接投资 235 万元。实际运行成本主要由人工费和电费组成。吨水运行人工费用为 0.12 元;吨水电价为 0.41 元;不可预见费用 1.21 元/m<sup>3</sup>;胶粒外运费用 0.11 元/m<sup>3</sup>;处理过程无需添加药剂也不会产生污泥等需要处置的二次污染,因此丁腈橡胶废水吨水运行成本为 1.85 元。

### 4 结论

(1)通过实验室分析结果可知,反应条件在初始 pH=8,臭氧产量 1 kg/(h·m<sup>3</sup>),臭氧浓度 20 mg/L,反应时间 60 min 下 COD 和拉开粉的去除效果最佳,含量分别能达到 1 300、50 mg/L 以下,满足该橡胶厂的实际要求。

(2)根据前期实验和橡胶厂水质特征及进出水浓度要求,确定工艺为收集+隔渣调节+溶气气浮+粗滤+超滤+臭氧接触氧化,在 60 d 内运行稳定,COD≤1 300 mg/L,拉开粉含量≤50 mg/L,Cl<sup>-</sup>≤300 mg/L,丙烯腈≤30 mg/L,石油类≤50 mg/L,对同类型橡胶废水处理建设具有借鉴意义,填补了国内臭氧氧化预处理丁腈橡胶废水的空白。

### 参考文献

- [1] 杨先味,马平生,赵瑛,等.微电解-Fenton 试剂氧化处理硬丁腈橡胶废水[J].水处理技术,2009,35(8):76-79.
- [2] 张媛,赵瑛,何琳,等.用混凝-微电解-催化氧化工艺预处理含拉开粉的丁腈橡胶废水[J].合成橡胶工业,2010,33(1):5-10.
- [3] 康同森,徐素琴,林雯.钙离子去除丁腈橡胶凝聚洗涤水中的拉开粉[J].兰化科技,1984,(4):237-241.
- [4] 宋可可,陈建铭,宋云华.锌镁铝类水滑石催化臭氧氧化降解吡啶废水的工艺研究[J].北京化工大学学报:自然科学版,2021,48(2):8-15.
- [5] 李立春,张国亮,许丹宇,等.Fenton/MBR/臭氧组合工艺处理丁苯橡胶废水[J].中国给水排水,2017,33(2):87-89,95.
- [6] 游洋洋,卢学强,许丹宇,等.催化氧化/组合生化工艺处理丁苯橡胶废水的中试[J].中国给水排水,2015,31(19):61-63,67.
- [7] 张圆春,赵增兵,陈波,等.超重力/O<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 工艺处理橡胶促进剂 M 废水研究[J].工业水处理,2019,39(12):55-58.
- [8] 张恺扬.天然橡胶加工废水深度处理回用工程实例[J].工业用水与废水,2016,47(2):62-65.
- [9] 常明,谭中侠.丁苯橡胶工业废水处理工程实例[J].工业用水与废水,2012,43(3):62-70.
- [10] 王莉.催化氧化-絮凝沉淀处理橡胶助剂废水工程实例[J].化学工程与装备,2009,6(6):138-140.
- [11] 李敏.Mn(II)@γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化臭氧氧化石化二级出水的应用研究[D].北京:中国环境科学研究院,2022.
- [12] 周洪政,刘平,张静,等.微气泡臭氧催化氧化-生化耦合处理难降解含氮杂环芳烃[J].中国环境科学,2017,37(8):2978-2985.
- [13] 王吉坤,李阳,陈贵锋,等.臭氧催化氧化降解煤化工生化进水有机物的实验及机理[J].化工进展,2021,40(10):5837-5844.
- [14] 赵延兴,王宪,姚晓宇,等.流体汽液相平衡混合规则研究进展[J].化工学报,2019,70(6):2036-2050.
- [15] 杨洪新,马文静,姜雪松,等.臭氧催化氧化工艺设备优化中试研究[J].中国给水排水,2021,37(21):89-93.■
- [16] 杨先味,马平生,赵瑛,等.微电解-Fenton 试剂氧化处理硬丁腈橡胶废水[J].水处理技术,2009,35(8):76-79.
- [17] Gao X, Chen H, Wei L, et al. Performance assessment of a hydrothermal treatment-based sewage sludge-to-electricity system integrated with a coal-fired power plant [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 300: 117957.
- [18] 李玉环.污泥活性炭的制备及其在污水中的应用研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2018.
- [19] Shi T, Abdul Moktadir M, Ren J, et al. Comparative economic, environmental and exergy analysis of power generation technologies from the waste sludge treatment [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286: 117074.
- [20] Zhang C, Liu C, Wang S, et al. Thermo-economic comparison of sub-critical organic Rankine cycle based on different heat exchanger configurations [J]. Energy, 2017, 123: 728-741.
- [21] Li T, Wang J, Chen H, et al. Performance analysis of an integrated biomass-to-energy system based on gasification and pyrolysis [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 287: 117085.■
- [13] Nizamuddin S, Baloch H A, Griffin G J, et al. An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1289-1299.
- [14] Peng C, Zhai Y, Zhu Y, et al. Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics [J]. Fuel, 2016, 176: 110-118.
- [15] Cavali M, Libardi Junior N, de Sena J D, et al. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159627.
- [16] Aragon-Briceño C, Požarlik A, Bramer E, et al. Integration of hydrothermal carbonization treatment for water and energy recovery from organic fraction of municipal solid waste digestate [J]. Renewable Energy, 2022, 184: 577-591.

(上接第 242 页)