

# 废塑料超临界水气化高值资源化利用研究

姜悦宁 陈显烁 彭智意 李昀燃 高佳琦 白斌\*

辽宁科技大学土木工程学院

**摘要:** 针对塑料固废污染问题, 本文以实现其无害化处置与高值化利用为目标, 采用热力学模拟方法, 开展了废塑料超临界水气化系统高值资源化利用的能效研究。围绕废塑料所蕴含的丰富能源回收潜力, 构建了集氢、热、电联产为一体的超临界水气化处置系统, 并通过引入余热回收措施实现系统能量的自供给。在此基础之上, 系统开展了工艺参数的灵敏性分析, 重点考察温度、压力、物料浓度等关键参数对氢—热—电多联产性能的影响, 获得了气化系统的最优处置工艺。研究结果表明, 提高气化温度或降低物料浓度, 有助于提升系统处置焓效率, 增强产氢与电力输出能力, 但供热能力相应下降; 而提高反应压力则会降低系统焓效率, 此时系统输出产品以居民供热为主。通过对比不同工艺参数的影响规律, 最终确定该塑料固废转化氢—热—电多联产系统的最佳操作工艺为: 气化温度 700℃、物料浓度 5 wt%、反应压力 22 MPa。

**关键词:** 塑料固废; 高值资源化; 超临界水气化; 热力学分析

DOI:10.65976/3105-8450.2026.01.006

## Study on High-Value Resource Utilization of Waste Plastics via Supercritical Water Gasification

Jiang Yuening Chen Xianshuo Peng Zhiyi Li Yunran Gao Jiaqi Bai Bin\*

( School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning )

**Abstract:** To address the issue of plastic solid waste pollution, this study aims to achieve its harmless disposal and high-value utilization by employing thermodynamic simulation to investigate the energy efficiency of a supercritical water gasification system for waste plastics. Based on the substantial energy recovery potential of waste plastics, a supercritical water gasification system integrating hydrogen, heat, and power cogeneration was developed, and energy self-sufficiency was achieved through the incorporation of waste heat recovery. On this basis, a sensitivity analysis of process parameters was conducted, focusing on the effects of key parameters such as temperature, pressure, and feed concentration on the performance of hydrogen - heat - power cogeneration, thereby determining the optimal operating conditions of the gasification system. The results indicate that increasing the gasification temperature or decreasing the feed concentration enhances the system exergy efficiency and improves hydrogen production and power generation, while the heat supply capacity correspondingly decreases. In contrast, increasing the reaction pressure reduces the system exergy efficiency, under which condition the system output is dominated by residential heating. By comparing the effects of different process parameters, the optimal operating conditions for the plastic waste to hydrogen - heat - power cogeneration system were determined as follows: a gasification temperature of 700 ° C, a feed concentration of 5 wt%, and a reaction pressure of 22 MPa.

**Keywords:** Plastic solid waste; High-value resource utilization; Supercritical water gasification; Thermodynamic analysis

塑料是由高分子化合物制成的轻质、耐用、防水且易于加工成型材料, 能广泛应用于多种领域, 已成为现代生活中不可或缺的重要物质<sup>[1]</sup>。伴随着塑料消耗量的持续攀升, 如何有效处置塑料固废已成为亟待解决的环境难题。目前, 全球废塑料年均产量超过 3 亿吨<sup>[2]</sup>。

按当前趋势, 预计到 2050 年, 全球累计约 1.2 亿吨塑料废物将滞留于填埋场或自然环境中<sup>[3]</sup>。传统的废塑料处理与利用技术包括填埋法和焚烧法<sup>[4]</sup>, 其中填埋因降解性差, 会长期破坏土质通透性, 其有害物质溶出易引发二次污染, 造成土地资源浪费。焚烧处理虽能回收热

**基金项目:** 辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目经费支持(塑料固废的高值资源化利用)。

**作者简介:** 姜悦宁(2005—), 女, 研究方向为废塑料资源化利用。

**通讯作者:** 白斌, 副教授, 研究方向为碳基固废清洁转化。

能,但易生成二噁英、氯化氢等污染物,存在二次污染风险<sup>[4]</sup>。

超临界水气化技术为固废塑料的处理提供了新的思路<sup>[5]</sup>,其独特的物化性质及环境友好特性使其被广泛关注与研究<sup>[6]</sup>。Adetunji<sup>[7]</sup>等探讨了太阳能驱动微藻超临界水气化过程的热力学与经济性能的影响。Chen研究了超临界水气化技术在热力学、环境及经济方面的性能通过热化学方式将有机物转化为氢气等能源气体<sup>[8]</sup>。基于这一技术,本研究构建了一套超临界水气化多联产处置系统,实现氢、热、电三种能源的协同输出。将塑料固废转化为高热值燃气,并通过余热及转化产物的梯级利用,同步完成制氢、发电与供热。为探究系统运行的内在规律,为明确关键工艺参数对系统能源输出性能的调控规律,本研究通过热力学分析与灵敏性分析相结合的方法,深入探究其影响机制以期塑料固废处置技术的规模化推广提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 系统构建

围绕塑料固废的氢—热—电多联产目标,本研究基于热力学模拟软件构建了如图1所示的处置系统。首先废塑料与水充分混匀后形成浆料,由泵1加压至25MPa,随后送入换热器进行预热。预热完成的浆料被送入气化反应器,在超临界水环境下发生气化反应,生成富含H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等组分的高温高压合成气。气化产物进入透平发电1,降低压力并回收电能;随后分离出高纯H<sub>2</sub>,分离出的H<sub>2</sub>再经透平发电2进一步降压至常压,最终收集储存于氢罐中。分离H<sub>2</sub>后的剩余气体进入氧化反应器,发生氧化反应并释放大热,形成高温热流。高温热流首先通过换热器2,为经泵P2送来的高压水预热,使其达到气化反应所需温度;随后高温热流通过换热器4,为塑料浆料及后续分离出的水预热;剩余热量通过换热器5,生成水蒸气,可用于居民供热或其他用途。通过多环节耦合,实现了化学能、压力能与热能的梯级转化与利用。

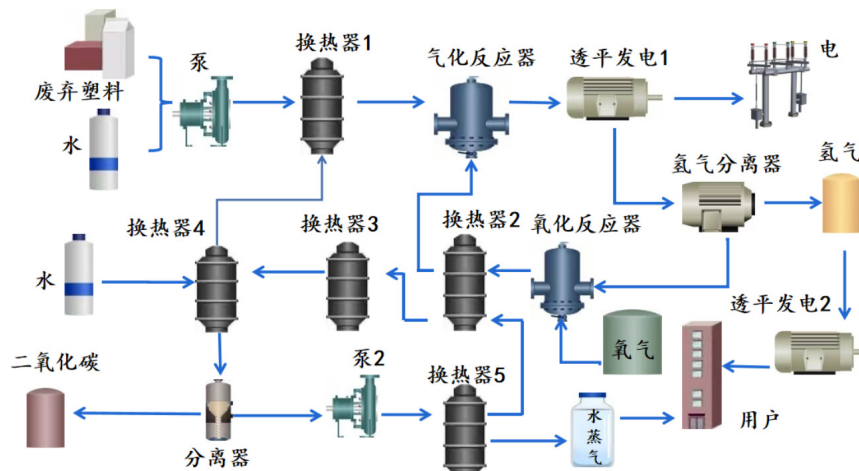


图1 系统流程图

### 1.2 模型验证

为保证气化模型设计的合理性,本研究将模拟计算值与前期实验结果进行了对比验证<sup>[9]</sup>。如图2所示,模型预测的气化产物组分与实验测定值表现出良好的一致性,均方根误差仅为0.02,表明模型预测结果与实际情况偏差较小。基于上述验证结果,可以确认本研究建立的模型具有较高的可靠性,能够为后续系统优化与性能分析提供可信的模拟支撑。

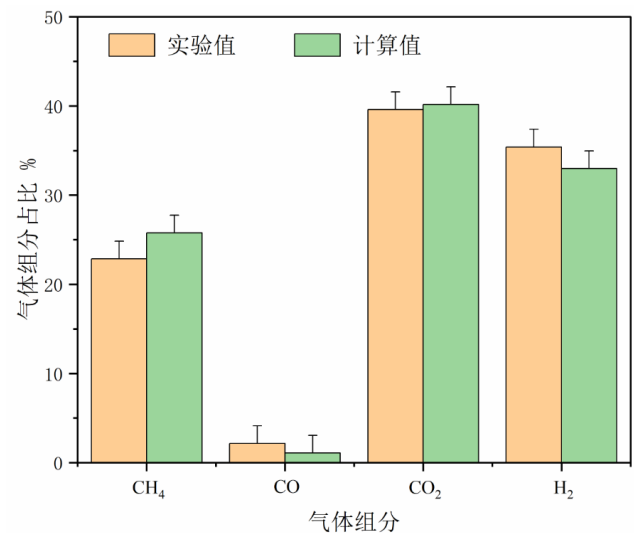


图2 系统模拟计算值与实验值的对比

(反应条件:温度700℃,压力22MPa,物料浓度5wt%)

### 1.3 模拟方法

本次实验采用抗冲击性聚苯乙烯(HIPS)塑料作为原料,其元素组成为C 84.45%、H 6.61%、N 7.12%、S 1.07%、O 0%。超临界水气化过程采用吉布斯自由能最小化反应器,选用Boston-Mathias修正的PR-BM方程确定物料性质<sup>[10]</sup>;计算假设忽略系统动能与势能影响,气化产物主要为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO和H<sub>2</sub>,硫、氮元素视作灰分排出,不参与反应。

### 1.4 焓分析计算

本次工作中焓分析仅考虑物理焓与化学焓,流动单

元总焓为二者之和。物理焓为物质从指定温压可逆转变为基态时的最大有用功，化学焓由系统与环境的化学不平衡产生，总焓计算公式如下：

$$E_{total,i} = E_{phy,i} + E_{chem,i} \quad (1)$$

$$E_{phy} = n \sum E_{phy,i} X_i \quad (2)$$

$$E_{phy,i} = X_i (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (3)$$

$$E_{chem,i} = x_i (e_i^{chem} + RT_0 \ln(n_i)) \quad (4)$$

式中， $E_{total,i}$  为物质  $i$  总焓能， $E_{phy,i}$  与  $E_{chem,i}$  分别为物质  $i$  的物理和化学焓能， $s$  是熵， $h$  是焓， $e_i^{chem}$  与  $n_i$  标准化学能和物质  $i$  的摩尔分数。

焓效率的计算公式如下：

$$\eta_{ex} = \frac{\sum E_{out,i} + W_{net}}{\sum E_{in,i}} \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

工艺参数的选取直接决定了系统的能量输出效率。

为确定最优的处置工艺条件，本研究对各关键工艺参数开展了灵敏性分析。以塑料浓度 5 wt%、反应压力 22 MPa、反应温度 700 °C 为基准工况，通过单因素变量法，考察物料浓度、反应压力、气化温度三大关键参数对系统产氢量、供热量、发电量及总焓效率的影响规律，从而识别出影响系统性能的关键敏感性参数。

### 2.1 物料浓度对系统能效产出的影响

在气化温度 700 °C、反应压力 22 MPa 条件下，考察物料浓度对系统性能的影响结果如图 3 所示。随物料浓度从 5 wt% 升至 13 wt%，系统产氢量从 36.03 kg/h 升至 39.46 kg/h，呈上升趋势，然而发电量从 224.81 kW 持续降至 220.43 kW，总焓效率从 56.01% 显著降至 20.34%。对比结果发现，物料浓度升高会显著降低系统总焓效率，小幅降低发电量与供热量，产氢量无明显提升，认为 5 wt% 为最优物料浓度，此时系统总焓效率与发电量均为最高。

### 2.2 反应压力对系统能效产出的影响

在物料浓度 5 wt%、气化温度 700 °C 条件下，考察反应压力 22-28 MPa 对系统性能的影响（图 4）。随反应压力从 22 MPa 升至 28 MPa，系统产氢量随反应压力升高呈缓慢递减趋势，产氢量从 38.82 kg/h 持续降至 33.65 kg/h；与产氢趋势相反，系统发电量与水蒸气供热量随压力升高呈稳步增长态势，总焓效率从 59.22% 显著降至 53.29%。对比分析认为，反应压力升高会降低系统产氢量与总焓效率，提升发电量与供热量，且压力对系统性能的影响幅度远小于物料浓度与气化温度。从热力学角度，22 MPa 为最优反应压力，此时系统总焓效率与产氢量均为最高。

### 2.3 气化温度对系统能效产出的影响

在物料浓度 5 wt%、反应压力 22 MPa 条件下，考察气化温度 500-700 °C 对系统性能的影响（图 5）。随气化温度从 500 °C 升至 700 °C，系统产氢量从 3.99 kg/h 大幅升至 36.02 kg/h，提升近 9 倍；总焓效率从 27.87% 显著升至 56.01%，提升近 1 倍；发电量从 156.79 kW 持续升至 224.81 kW，提升约 43%。比较发现，气化温度是影响系统性能的关键因素，温度升高可显著强化超临界水气化反应，大幅提升产氢量、总焓效率与发电量，发电量与产氢量呈正相关关系，二者在同一温度下同步最优，系统设计实现了化学能向电能、氢能的高效协同转化，同时验证 700 °C 为最优气化温度。

## 3 结论

本研究采用热力学分析软件构建了废塑料超临界水气化模型，提出了废塑料气化多联产氢—热—电高值利用系统，通过模型验证与单因素变量实验，系统评估物料浓度、反应压力、气化温度对系统产氢、供热、发电及总焓效率的影响。结合计算数据可知，气化温度是系统性能的

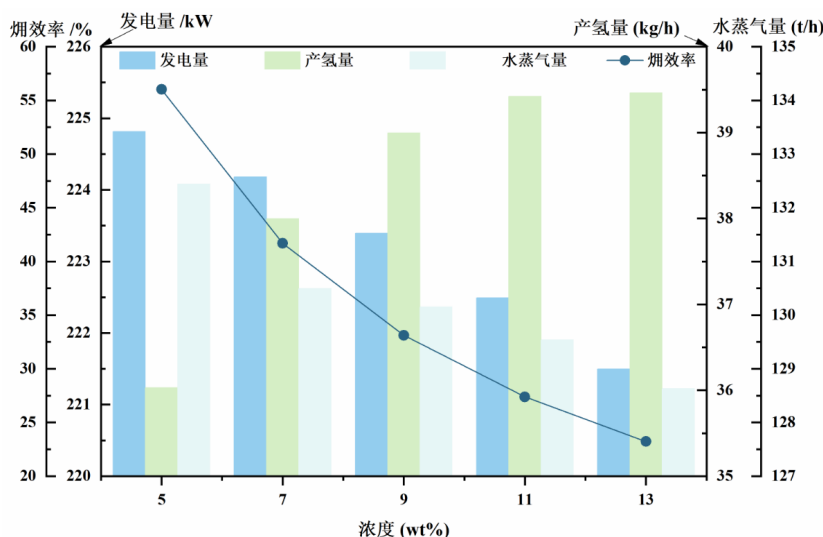


图 3 不同物料浓度的系统性能参数

(反应条件为：温度 700 °C，压力 22 MPa)

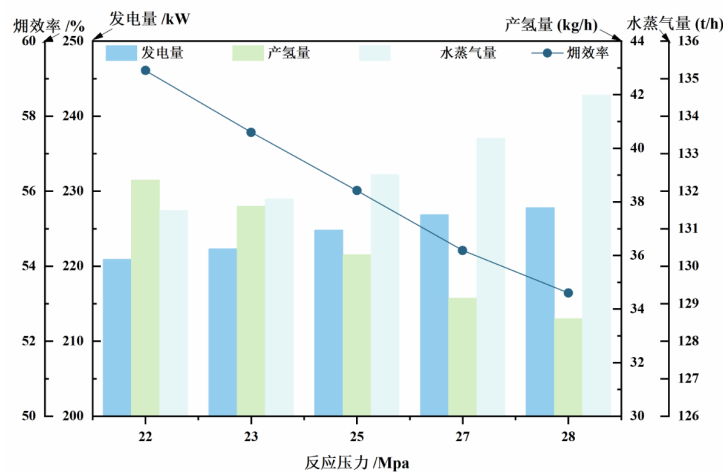


图4 不同反应压力的系统性能参数

(反应条件为: 物料浓度 5wt%, 反应温度 700℃)

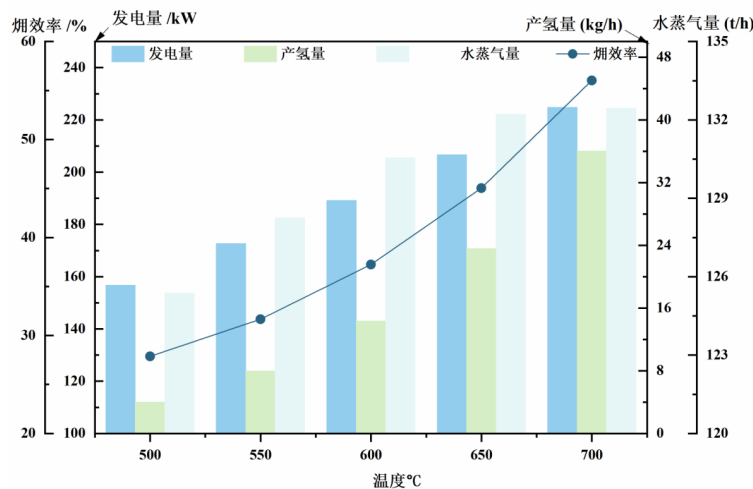


图5 不同气化温度的系统性能参数

(反应条件为: 物料浓度 5wt%, 压力 22MPa)

核心影响因素, 700℃时系统气化反应效率最优, 物料浓度升高会显著降低系统总烟效率, 5wt%为最优浓度, 此时系统热力学性能最佳。反应压力对系统性能影响相对温和, 压力升高会降低产氢量与总烟效率、提升发电量与供热量。综合三大关键工艺参数对系统氢—热—电多联产输出及热力学性能的影响, 确定系统最佳运行工况为气化温度 700℃、物料浓度 5wt%、反应压力 22MPa。

参考文献:

[1] 张金庆, 吕行, 徐英志, 等. 废塑料化学回收现状及研究进展 [J]. 化工进展, 2026, 3(23): 1-19.  
 [2] 李廉明, 潘煜, 宋焜, 等. 市政污泥与废塑料共热解特性及动力学研究 [J]. 可再生能源, 2026, 44(01): 8-16.  
 [3] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700782.  
 [4] 郭波, 许思思, 李评, 等. 废塑料的处理与利用技术研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 408-411.  
 [5] 金辉, 吕友军, 赵亮, 等. 煤炭超临界水气化制氢发电

多联产技术进展 [J]. 中国基础科学, 2018, 20(04): 4-9.  
 [6] 郑豪, 鱼涛, 屈撑园, 等. 超临界水的基本特性及应用进展 [J]. 化工技术与开发, 2020, 49(Z1): 62-66.  
 [7] Onigbajumo A, Taghipour A, Will G. Effects of process-thermal configuration on energy, exergy, and thermo-economic performance of solar driven supercritical water gasification [J]. Energy conversion and management, 2022, 251: 115002.  
 [8] Chen JW, Liang JM, Xu ZY. Assessment of supercritical water gasification process for combustible gas production from thermodynamic, environmental and techno-economic perspectives: A review [J]. Energy conversion and management, 2020, 226: 113497.  
 [9] 徐功迅, 陈伟, 方真. 生物质超临界水制氢研究进展 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(07): 24-35.  
 [10] Mansouri R, Boukholda I, Bourouis M. Modelling and testing the performance of a commercial ammonia/water absorption chiller using Aspen-Plus platform [J]. energy. 2015, 93(02): 2374-2383.