

固废及生活垃圾高温气化制氢工艺流程模拟研究

程 健¹, 常 苏², 宫玉柱³, 李维虎³, 朱 璇¹, 李丹丹⁴

¹西安热工研究院有限公司, 陕西 西安

²济宁职业技术学院经济管理系, 山东 济宁

³华能山东发电有限公司众泰电厂, 山东 泰安

⁴新泰光大环保能源有限公司, 山东 泰安

收稿日期: 2025年1月2日; 录用日期: 2025年2月16日; 发布日期: 2025年2月28日

摘 要

在“碳达峰、碳中和”的时代背景下, 使用城市固废及生活垃圾制“绿氢”技术具有明显优势和发展潜力。本文通过Aspen Plus软件建立了固废及生活垃圾高温气化制氢系统模型, 研究了热解温度、气化剂组成及比例对合成气组份的影响。模拟结果表明: 当含水率为55.43%的垃圾干燥至含水率15%, 干燥温度180℃, 气化温度800℃以上, 熔融温度1500℃, 气化剂为水蒸气和氧气, 总气化剂系数为0.3 (水蒸气40%, 氧气60%)时, 热解气化所需能量为112204.1 MJ·h⁻¹, 合成气摩尔流量为377.232 kmol/h, 可燃气体摩尔流量为280.37 kmol/h, 氢气的摩尔比为34.34%, 一氧化碳摩尔比为29.76%, 甲烷10.22%, 合成气低位热值为11.14 MJ·m⁻³。城市固废及生活垃圾制备的“绿氢”可进一步合成“绿氨”应用于火电掺氨燃烧实现减碳降碳。

关键词

固废垃圾, 高温气化, Aspen Plus

Simulation Study on the Process Flow of High-Temperature Gasification of Solid Waste and Household Waste for Hydrogen Production

Jian Cheng¹, Su Chang², Yuzhu Gong³, Weihu Li³, Xuan Zhu¹, Dandan Li⁴

¹Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Department of Economic Management, Jining Polytechnic, Jining Shandong

³Zhongtai Power Plant, Shandong Power Generation Co., Ltd., Huaneng Group, Tai'an Shandong

文章引用: 程健, 常苏, 宫玉柱, 李维虎, 朱璇, 李丹丹. 固废及生活垃圾高温气化制氢工艺流程模拟研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(2): 224-238. DOI: 10.12677/aep.2025.152029

⁴Xintai Guangda Environmental Protection Energy Co., Ltd., Tai'an Shandong

Received: Jan. 2nd, 2025; accepted: Feb. 16th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

In the context of “carbon peak, carbon neutral”, the use of municipal solid waste (MSW) to produce “green hydrogen” technology has obvious advantages and development potential. In this paper, hydrogen production from plasma gasification of solid waste and domestic waste is modeled by Aspen Plus, and ammonia synthesis is simply simulated using hydrogen. The effects of pyrolysis temperature, gasifier composition and ratio on syngas composition are investigated. The simulation results showed that when the water content of the waste is 55.43%, the moisture content after drying is 15%, the drying temperature is 180°C, the gasification temperature is 800°C, melting temperature 1500°C, the gasification agents are water vapor and oxygen, and the total gasification agent coefficient is 0.3 (40% for water vapor and 60% for oxygen), the energy required for pyrolysis and gasification is 112204.1 MJ·h⁻¹, and the molar flow rate of the produced gas is 377.232 kmol/h, the molar flow rate of combustible gas is 280.37 kmol/h, the molar ratio of hydrogen is 34.34%, the molar ratio of carbon monoxide is 29.76%, methane is 10.22%, and the low-level calorific value of syngas is 11.14 MJ·m⁻³. The “green hydrogen” produced from MSW can be further synthesized into “green ammonia” for use in power plants ammonia blending combustion to achieve carbon reduction and emission reduction.

Keywords

Solid Waste, High-Temperature Gasification, Aspen Plus

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国民经济的快速发展及生活消费水平的提高,城市固废生活垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)产生量也在不断增加[1]-[3],我国 MSW 产生量由 2010 年的 1.58 亿吨[4]增加到 2020 年的 2.35 亿吨[5],预测到 2030 年全国的 MSW 产生量将达到 4.09 亿吨[6],城市垃圾污染引起的环境和生态安全问题已经十分严峻。目前,垃圾焚烧可实现垃圾减量化,在减少占地的同时,可进行发电,创造一定经济效益,但垃圾焚烧并不能完全实现垃圾的无害化处理[7]-[10]。

固废垃圾高温气化技术作为近几年发展起来的一种全新技术[11][12],采用分选干燥及高温气化,几乎能将垃圾等固体废物中的有机物完全气化并转化成合成气(主要为 CO 和 H₂),而无机物则可转变成无害的玻璃体灰渣,能够实现垃圾处理过程污染物的“零排放”。高温气化技术应用于城市垃圾的处理在国外已有工业化运行装置,被证明是一种可靠的垃圾处理措施[13][14]。

袁国安等[15]用上吸式固定床对生活垃圾木质组分进行了气化实验,对气化气、低位热值和气化效率进行研究分析。陈翀等人[16]利用 Aspen Plus 软件建立了两种不同类型的垃圾气化反应器,一种是上吸式固定床反应器,另一种不同的是不将燃烧段的烟气引入气化段,研究了不同气化温度和过量空气系数下,燃烧段的烟气对气化气组分、LHV 和碳转化率的影响。Tungalag 等人[17]提出了一种新型的垃圾热解-等离子体气化 Aspen Plus 平衡模型,开发了 Aspen Plus Fortran 子程序,主要是通过化学方程式的理论产

率概念, 将 MSW 在热解阶段分解为热解气、碳氢化合物和焦油化合物在内的多种气体种类。王海明等人[18]提出了一种 MSW 蒸汽气化 - 直接熔融的方法, 将气化过程中产生的部分氢气提取出来, 被用于熔融区与纯氧燃烧, 以提供灰渣熔融所需要的能量。

已有文献大多数是对 MSW 干燥、热解、气化、飞灰处理的部分研究, 主要针对的是不同气化温度、不同气化剂以及不同气化剂配比对气化产物合成气以及碳转化率的影响, 对飞灰处理部分大多是对飞灰熔融温度和捕渣因素的分析, 而对气化熔融工艺系统模块之间的影响和每个反应器间物质流、能量流的联动变化过程研究不足。

本文采用 Aspen Plus 模拟软件, 对垃圾热解气化全流程进行模拟, 主要对垃圾干燥温度、垃圾含水率、气化温度、不同气化剂对工艺流程节点参数、物质流和能量流的影响, 为 MSW 热解气化工艺参数优化提供依据, 助力我国 MSW 热解气化技术的开发与应用。

2. Aspen Plus 模型建立

2.1. 物性方法的选择

该气化系统中选择的物性方法是 PR-BM, 因为 PR-BM 方法适用于烃和轻气体(如 CO_2 , H_2S 和 H_2), 在气体处理方面非常适用, 并且可以处理高温、高温高压的情况。

系统中的常规组分有 H_2 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 、 C 、 S 、 Cl_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 HCL 、 NH_3 、 SO_2 、 SO_3 、 H_2S 、 NO 、 NO_2 、焦油等物质; 非常规组分有生活垃圾、灰分等物质, 非常规固体组分选用焓模型(HCOALGEN)和密度模型(DCOALIGT)。

2.2. 用户模型

1) 模型假设

由于垃圾气化过程是一个复杂的过程, 为了简化模拟过程, 所以对模型做出了如下假设:

- (1) 流程中所有模块的反应瞬间完成且均处于稳定运行状态;
- (2) 反应器内各处压力相同, 无压降;
- (3) 半焦中只包含碳和灰分, 焦油的成分仅有甲苯和萘两种, 无其他组分;
- (4) 灰分以及惰性物质不参与反应;
- (5) 生成的合成气中只考虑 H_2O 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 。

2) 用户模型

(1) 在垃圾干燥部分编写了 Fortran 语句, 并内嵌至 RStoic 反应器模块, n 为垃圾含水率, Fortran 语句如下:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{ODRY} &= 15 \\ \text{CONVE} &= (\text{H}_2\text{OIN} - \text{H}_2\text{ODRY}) / (100 - \text{H}_2\text{ODRY}) \end{aligned}$$

(2) MSW 在热解反应器(RYield 模型)中分解为常规组分 C 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 S 、 Cl_2 、 H_2O 和灰分, 各常规组分产率通过 Fortran 语句控制, 具体如下:

$$\begin{aligned} \text{FACT} &= (100 - \text{WATER1}(1)) / 100 \\ \text{ASH} &= \text{ULT}(1) / 100 * \text{FACT} \\ \text{C} &= \text{ULT}(2) / 100 * \text{FACT} \\ \text{H}_2 &= \text{ULT}(3) / 100 * \text{FACT} \\ \text{N}_2 &= \text{ULT}(4) / 100 * \text{FACT} \end{aligned}$$

$$Cl_2 = \text{ULT}(5)/100 * \text{FACT}$$

S = ULT(6)/100*FACT

$$O_2 = \text{ULT}(7)/100 * \text{FACT}$$

$$\text{WATER} = \text{WATER1}(1)/100$$

2.3. 模型组成

本文中高温气化主要分为干燥、热解和气化三个部分:

- 1) 干燥器：采用化学计量反应器 RStoic 模型；
- 2) 热解反应器：采用收率反应器 RYield 模型，适用于动力学未知的情况；

3) 气化燃烧反应器：采用平衡反应器 RGibbs 模型，依据 Gibbs 最小能原理，计算趋近于平衡温度时各组分的含量，不考虑动力学因素。

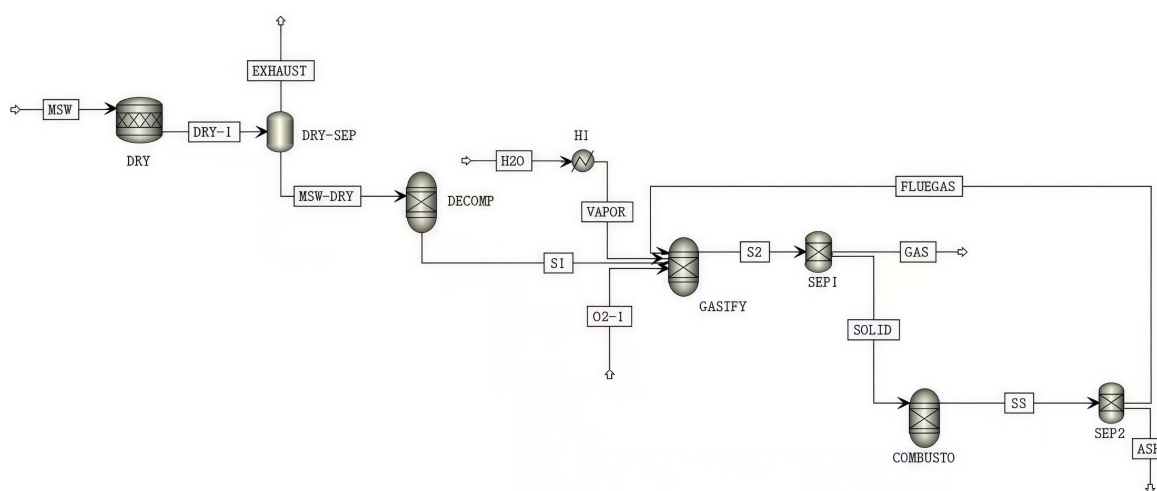


Figure 1. Simulation flowsheet of urban household waste gasification process flow

图 1. 城市生活垃圾气化工艺流程模拟图

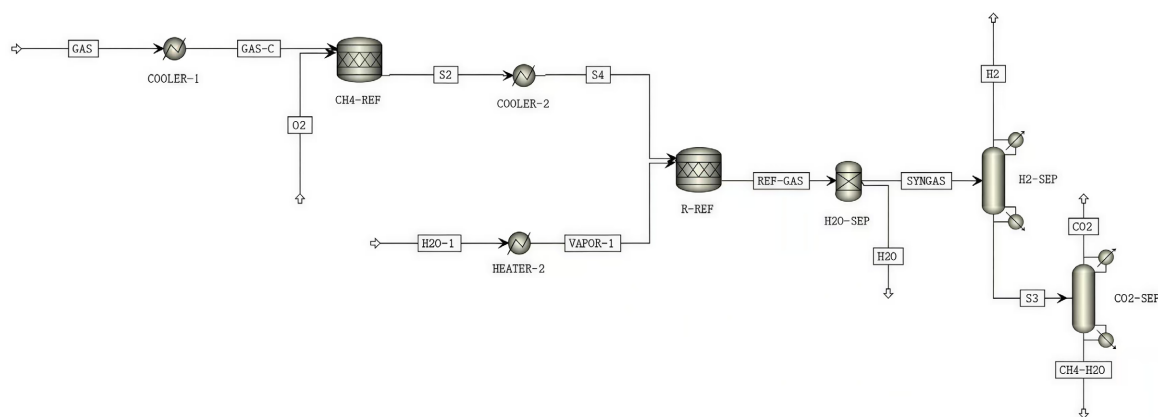


Figure 2. Simulation flowsheet of methane reforming process after gasification

图 2. 气化后甲烷重整化流程模拟图

城市生活垃圾高温气化过程流程模拟如图 1 所示, 含有水分的垃圾(MSW)进入到干燥器(DRY)中, 将垃圾含水量降至 15%, 随后通过 Flash2 将水蒸气与干燥后的垃圾分离, 被干燥的垃圾进入热解反应器

(DECOMP)中,根据其工业分析和元素分析将其分解为水分、灰分以及各元素对应的单质,分解后的 MSW 进入气化反应器(GASIFY)中,模拟气化过程,其中气化剂(水蒸气和氧气)分别输入,气化反应的产物进入分离器(SEP1)模块将半焦与合成气分离,分离后将半焦在 1500℃ 进行熔融气化(COMP),目的是达到飞灰的熔融造渣条件。

由于甲烷部分氧化重整的放热量较小,其能量效率比蒸汽转化高,因此本项目甲烷重整选择部分氧化的方法,如图 2 所示,模拟的流程为:将垃圾气化后的合成气先经过冷却器(COOLER),再进入甲烷重整反应器(CH₄-REF)进行部分氧化重整反应,重整后的气体经过冷却进行 CO 变换反应,变换后分离合成气中水蒸气,再分别分离出 H₂ 和 CO₂。

3. 模拟结果分析与讨论

3.1. 垃圾含水率与干燥温度对系统热平衡的影响

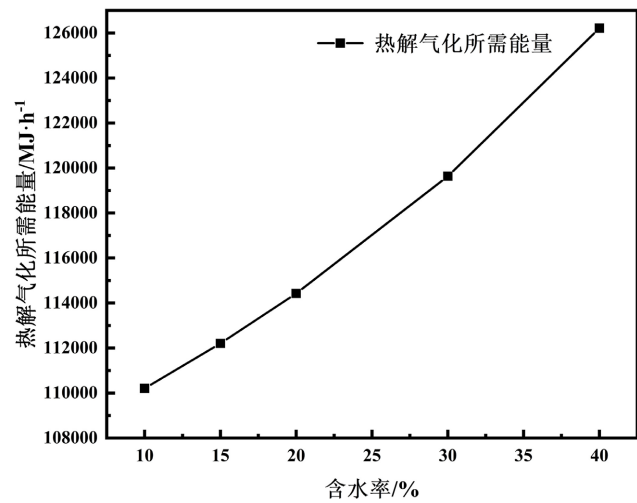


Figure 3. The effect of MSW moisture ratio on the energy required for pyrolysis gasification

图 3. 垃圾含水率对热解气化所需能量的影响

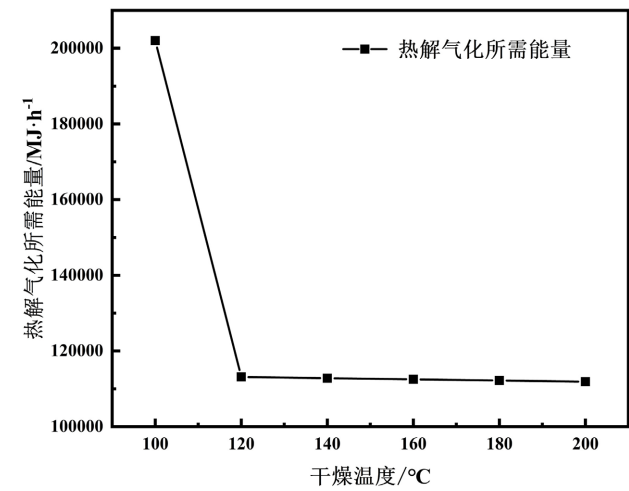


Figure 4. The effect of MSW drying temperature on the energy required for pyrolysis gasification

图 4. 干燥温度对热解气化所需能量的影响

针对我国目前高水分、低热值垃圾的气化熔融处理,垃圾干燥脱水这一阶段是必不可少的。气化剂为水蒸气和氧气,且气化剂/垃圾为 0.3,气化温度为 800°C ,熔融温度为 1500°C 下不同垃圾干燥温度 ($100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$)、垃圾含水率 ($10\%\sim 40\%$) 对流程的影响。如图 3 所示,随着垃圾含水率的降低,热解气化阶段所需外界能量输入在减少,因此减少热解气化阶段所需外界能量输入应降低垃圾含水率。

如图 4 所示,随着垃圾干燥温度上升,热解气化阶段所需外界能量输入在减少,所以在干燥阶段应尽可能提高垃圾干燥温度(垃圾干燥阶段[19] [20]温度应小于 200°C ,否则会发生低温水煤气反应),可以减少能量的输入。

3.2. 最佳气化温度的确定

在 MSW 气化全流程模拟前需要确定合适的气化温度,这样才能更好使垃圾气化效果达到最佳。本节所研究的是气化温度为 $600^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 下垃圾气化的效果,如图 5 为气体摩尔组成随气化温度的变化曲线,主要表现为甲烷的含量在减少,氢气、一氧化碳、二氧化碳的含量在增加,因此气化所得的气体产物的总摩尔流量随热解温度上升而增加。

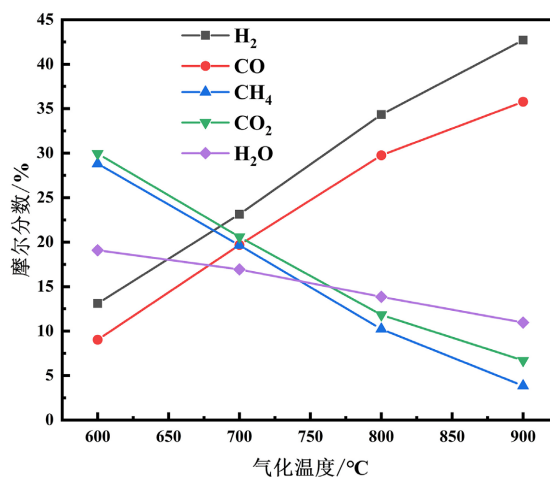


Figure 5. The curve of syngas mole fraction with temperature
图 5. 合成气摩尔分数随气化温度的变化曲线

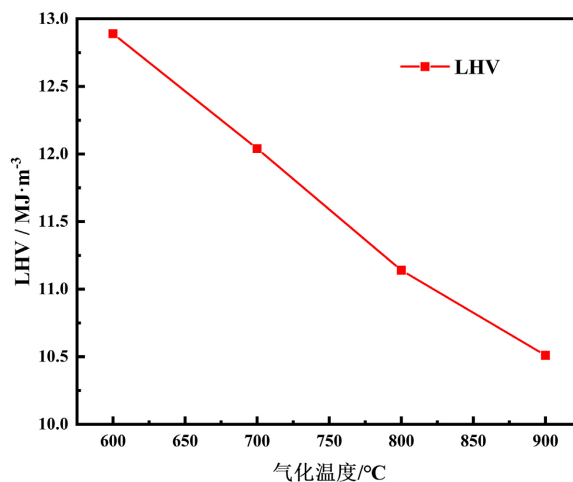


Figure 6. The curve of low calorific value of syngas with temperature
图 6. 合成气低位热值随气化温度的变化曲线

如图 6 为低位热值随气化温度变化曲线, 在 $600^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 范围内, 随着温度增加, 合成气的低位热值不断降低。

综合考虑合成气的摩尔组成和合成气的低位热值, 确定最佳气化温度为 800°C 。

3.3. 气化剂对垃圾气化的影响

在气化剂不同时, 气化产物的摩尔分数也有明显的变化, 其中氢气的变化最为明显, 因为当水蒸气作为气化剂时, 为气化时提供了大量的氢元素, 而气化剂为氧气时, 主要是氧气与碳发生反应生成一氧化碳和二氧化碳, 氧气也会消耗一定量的氢气, 总的表现为以水蒸气为气化剂的可燃性气体摩尔流量大于以氧气作为气化剂的可燃性气体的摩尔流量。由此可以得出, 当垃圾气化时不同种类的气化剂对气化气产物有着非常重要的影响。

1) 水蒸气作为气化剂

由图 7、图 8 可以得到, 以水蒸气作为气化剂时, 随着气化剂系数的增加, 合成气中 H_2 呈现出先增加后减少的趋势, CO 和 CH_4 均不断降低, CO_2 小幅度增加, 合成气中水含量增加很快, 同时合成气的低位热值随水蒸气量增加而减少, 综合考虑, 水蒸气/垃圾 = 0.3 时, 合成气最优。

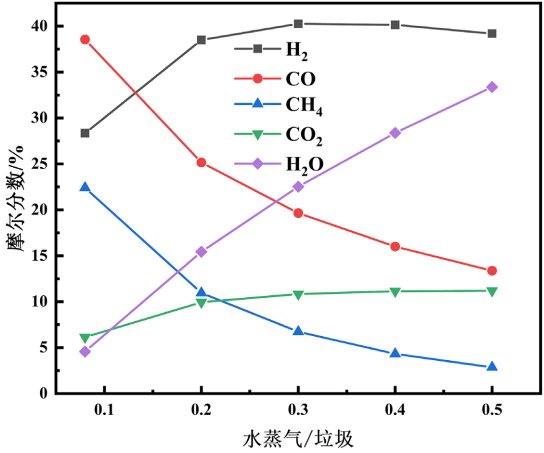


Figure 7. The curve of syngas mole fraction with water vapor coefficient
图 7. 合成气摩尔分数随水蒸气系数的变化曲线

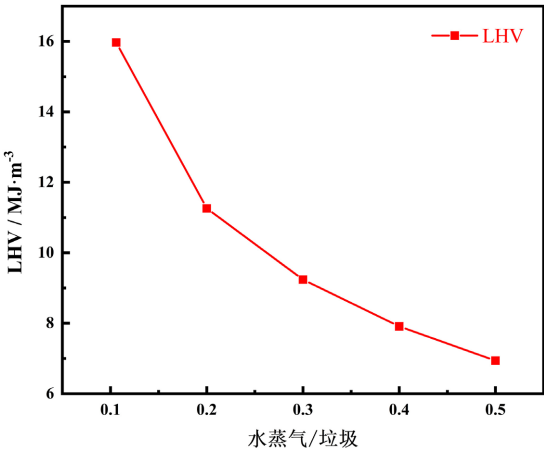


Figure 8. The curve of low calorific value of syngas with water vapor coefficient
图 8. 合成气低位热值随水蒸气系数的变化曲线

2) 氧气作为气化剂

由图 9、图 10 可以得到, 以氧气作为气化剂时, 随着气化剂系数的增加, 合成气中 H_2 呈现出先增加后减少的趋势, CO 和 CH_4 均不断降低, CO_2 和水不断增加, 同时合成气的低位热值随氧气量增加而减少, 综合考虑, 氧气/垃圾 = 0.3 时, 合成气最优。

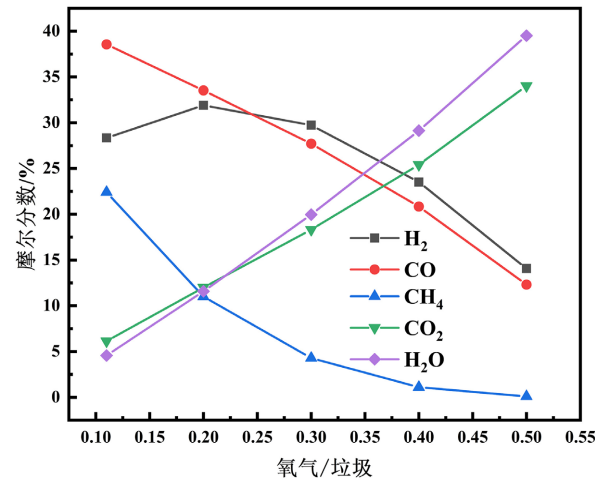


Figure 9. The curve of syngas mole fraction with oxygen coefficient
图 9. 合成气摩尔分数随氧气系数的变化曲线

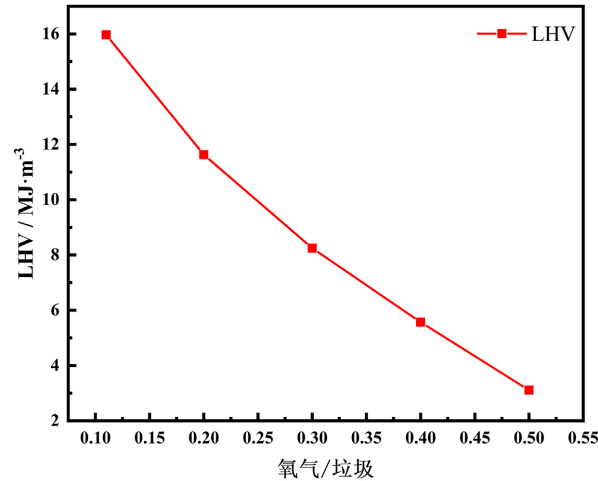


Figure 10. The curve of syngas low calorific value with oxygen coefficient
图 10. 合成气低位热值随氧气系数的变化曲线

Table 1. Data for different gasifying agents
表 1. 不同气化剂数据表

	低位热值/ $MJ \cdot m^{-3}$	合成气流量/ $kmol \cdot h^{-1}$	热解气化阶段所需能量/ $MJ \cdot h^{-1}$
水蒸气	9.24	525.26	129977.7
氧气	8.25	388.51	90429.2

当气化剂系数都为 0.3 时, 以氧气作为气化剂时, 碳转化率高于水蒸气作为气化剂, 因为气化时发生氧气与碳的氧化反应, 使碳含量减少, 同时放出大量的热, 所以在热解气化阶段以氧气作为气化剂时所

需通入的能量就较少。以水蒸汽作为气化剂时,可燃性气体含量增多,其低位热值较高,具体见表 1。

3) 氧气和水蒸气同时作为气化剂

由于以氧气和水蒸气分别作为气化剂时各具优缺点,因此模拟了以氧气和水蒸气同时作为气化剂对合成气组成和低位热值的影响。

(1) 水蒸气 50%, 氧气 50%

由图 11、图 12 可知,当水蒸气与氧气在总气化剂中各占一半时,随着总气化剂增加,合成气摩尔流量由 392.37 kmol/h (气化剂系数 0.3)逐步增加到 526.72 kmol/h (气化剂系数 0.5)。可燃气体总摩尔流量先增加后减少,合成气低位热值降低,合成气中 H_2 、CO 和 CH_4 此类可燃气体也不断减少。当总气化剂系数为 0.4 时,合成气摩尔流量为 464.42 kmol/h,可燃气体摩尔流量为 299.08 kmol/h,合成气低位热值为 $8.8 MJ \cdot m^{-3}$,各组份摩尔分数为: H_2 35.97%, CO 22.73%, CH_4 5.69%, CO_2 13.66%, H_2O 21.94%,其中 $CO + H_2$ 58.71%,总可燃气 64.4%。

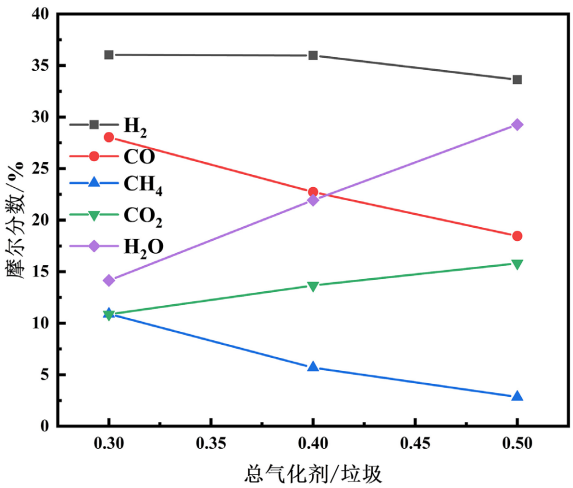


Figure 11. The curve of syngas mole fraction with gasification agent coefficient for 50:50 of vapor and oxygen

图 11. 气化剂中水蒸气/氧气比为 50:50 时合成气摩尔分数变化曲线

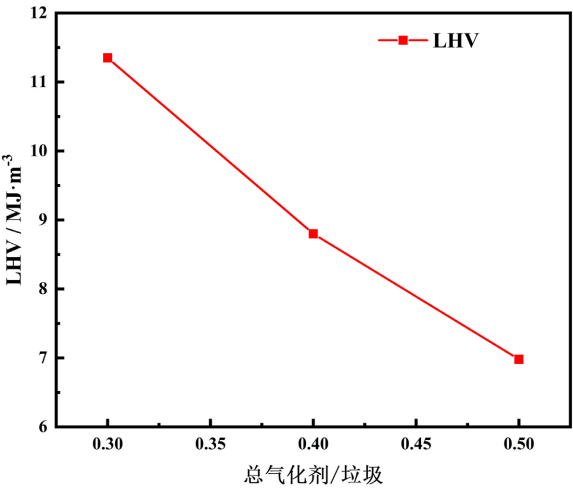


Figure 12. The curve of syngas low calorific value with gasification agent coefficient 50:50 of vapor and oxygen

图 12. 气化剂中水蒸气/氧气比为 50:50 时合成气低位热值变化曲线

(2) 水蒸气 40%, 氧气 60%

由图 13、图 14 可知, 当水蒸气占总气化剂 40%, 氧气占 60%, 随着总气化剂增加, 合成气摩尔流量由 377.232 kmol/h (气化剂系数 0.3) 增加到 495.639 kmol/h (气化剂系数 0.5)。可燃气体总摩尔流量不断减少, 合成气低位热值降低, 合成气中 H_2 、CO 和 CH_4 此类可燃气体不断减少。当总气化剂系数为 0.3 时, 合成气摩尔流量为 377.232 kmol/h, 可燃气体摩尔流量为 280.37 kmol/h, 合成气低位热值为 $11.14 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, 各组分摩尔分数为: H_2 34.34%, CO 29.76%, CH_4 10.22%, CO_2 11.83%, H_2O 13.85%, 其中 CO + H_2 64.1%, 总可燃气体 74.32%。

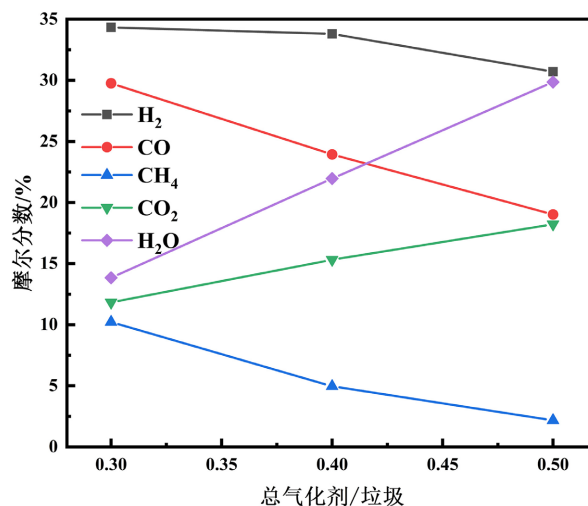


Figure 13. The curve of syngas mole fraction with gasification agent coefficient 4:6 of vapor and oxygen

图 13. 气化剂中水蒸气/氧气比为 40:60 时合成气变化曲线

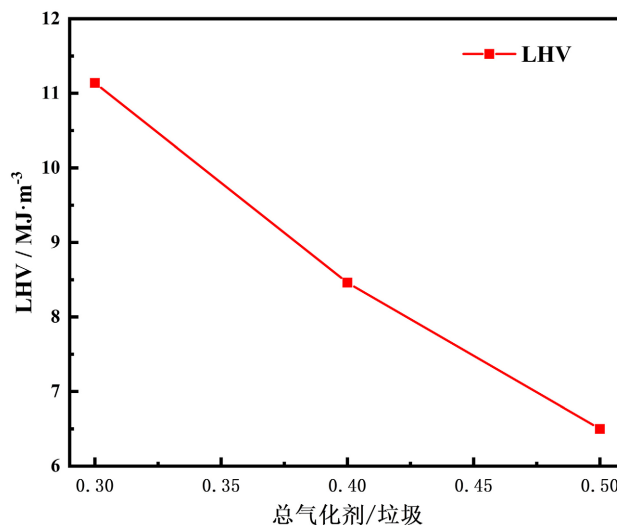


Figure 14. The curve of syngas low calorific value with gasification agent coefficient 4:6 of vapor and oxygen

图 14. 气化剂中水蒸气/氧气比为 50:50 时合成气的低位热值变化曲线

(3) 水蒸气 60%, 氧气 40%

由图 15、图 16 可知, 当水蒸气占总气化剂 60%, 氧气占 40%, 随着总气化剂增加, 合成气摩尔流

量由 407.57 kmol/h (气化剂系数 0.3)增加到 557.1 kmol/h (气化剂系数 0.5)。可燃气体总摩尔流量先增加后减少, 合成气低位热值降低, 合成气中 H_2 摩尔分数先增加后减少、 CO 和 CH_4 此类可燃气体不断减少。当总气化剂系数为 0.4 时, 合成气摩尔流量为 486.71 kmol/h, 可燃气体摩尔流量为 320.75 kmol/h, 合成气低位热值为 $9.11 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 各组分摩尔分数为: H_2 37.97%, CO 21.56%, CH_4 6.37%, CO_2 12.23%, H_2O 21.87%, 其中 $\text{CO} + \text{H}_2$ 59.53%, 总可燃气体 65.9%。

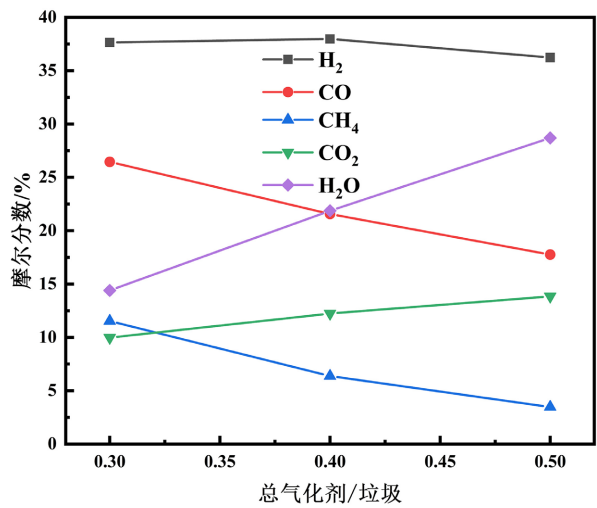


Figure 15. The curve of syngas mole fraction with gasification agent coefficient 6:4 of vapor and oxygen

图 15. 气化剂中水蒸气/氧气比为 6:4 时合成气组分摩尔分数变化曲线

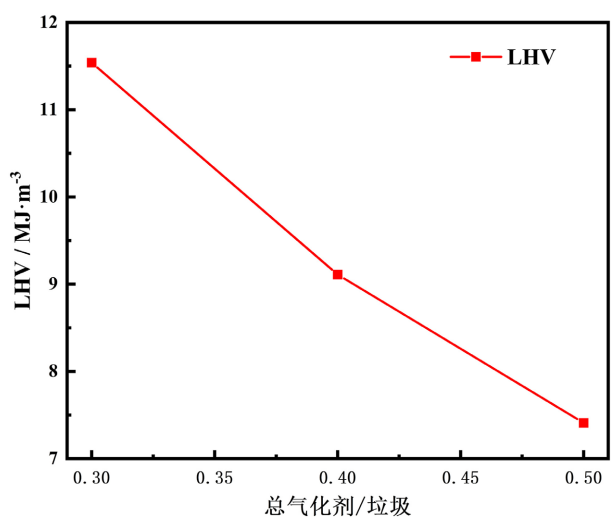


Figure 16. The curve of syngas low calorific value with gasification agent coefficient 6:4 of vapor and oxygen

图 16. 气化剂中水蒸气/氧气比为 6:4 时合成气低位热值变化曲线

3.4. 最佳工况的确定

在确定了最佳热解温度后, 对 MSW 气化工艺的基本工况进行模拟, 研究其基本工况下气化产物、低位热值、气化温度以及系统能量参数, 为下一步研究不同参数对 MSW 气化工艺的影响打下基础。本节所研究的是在垃圾含水率为 55.43%, 干燥后含水率 15%, 干燥温度为 180°C , 气化温度为 800°C , 熔

融温度 1500℃，气化剂为水蒸气和氧气且总气化剂系数为 0.3，其中水蒸气 40%，氧气 60%，此时热解气化所需能量为 112204.1 MJ·h⁻¹。

由图 17 最佳工况下合成气摩尔分数图，可以看出：垃圾气化后的主要合成气产物有 H₂O、H₂、CO、CO₂、CH₄，氢气的摩尔流量最大依次是一氧化碳，其中水、二氧化碳和甲烷的摩尔流量相对较少，具体见表 2。垃圾气化后的产物主要以氢气和一氧化碳为主，且为可燃性气体，此时合成气的低位热值为 11.14 MJ/Nm³。

Table 2. Data of syngas after MSW gasification

表 2. 垃圾热解气化后合成气数据表

合成气量	377.232 kmol/h	8454.8 Nm ³ /h
气体组分	摩尔分率	
H ₂	34.34 %	
CO	29.76 %	
CH ₄	10.22 %	
CO ₂	11.83 %	
H ₂ O	13.85 %	

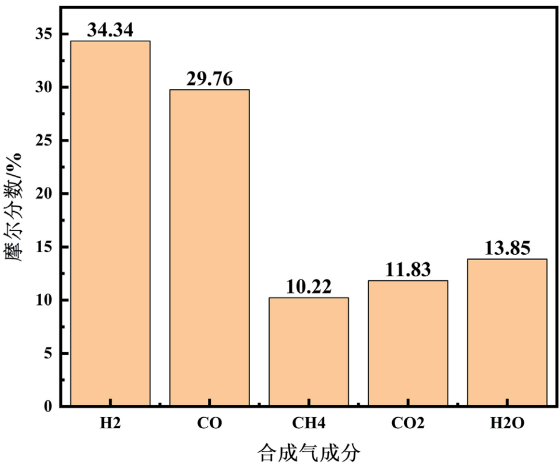


Figure 17. The mole fraction of syngas under optimal operating conditions
图 17. 最佳工况下合成气的摩尔分数

3.5. 热解气化后合成气后续处理

Table 3. Data for syngas after methane reforming

表 3. 合成气甲烷重整后数据表

合成气量	448.57 kmol/h	10053.7 Nm ³ /h
气体组分	摩尔分率	
H ₂	44.35 %	
CO	32.76 %	
CH ₄	0.86 %	
CO ₂	9.95 %	
H ₂ O	11.65 %	

Table 4. Data for syngas after methane reforming and CO conversion (anhydrous)
表 4. 甲烷重整 + CO 变换后(无水)数据表

合成气量	539.892 kmol/h	12100.4 Nm ³ /h
气体组分	摩尔分率	
H ₂	63.8 %	
CO	0.3 %	
CH ₄	0.7 %	
CO ₂	35.2 %	

考虑到固废及生活垃圾制氢在项目应用时，氢气作为阶段性产品，因此本文模拟了合成气简单地甲烷重整化和 CO 变换过程，经过甲烷重整化后合成气摩尔流量为 448.57 kmol/h，其中 CO 146.963 kmol/h，H₂ 198.958 kmol/h，见表 3，再通过水汽变换反应将 CO 变换为 H₂ 和 CO₂，变换后 H₂ 344.451 kmol/h，见表 4。

3.6. 氢气下游产品

合成气经过甲烷重整与 CO 变换后，再通过湿法气体分离技术将 H₂ 与 CO₂ 分离，得到的纯氢气，氢气与二氧化碳均可直接外售。

从以下几个方面考虑，也可将氢气用来合成氨。

- 1) 安全性和储存效率：由于氢气具有极低的密度和极高的易燃易爆性，使得单独储存氢气存在较大的安全风险和技术挑战。相比之下，氨(NH₃)的储存和运输技术要求相对较低。氨的自燃温度较高(650℃)，高于氢气(520℃)，且氨在常温下为气态，便于储存。
- 2) 储运成本：氢气的高压压缩或低温液化需要大量能量，且储存容器的要求极高，导致储存和运输成本高昂。而氨的储存和运输技术相对成熟，液氨的储存和运输条件比氢气更为经济和安全。
- 3) 化学稳定性：氨的化学稳定性较高，不易发生爆炸，适合长途运输和储存。此外，氨可以作为肥料直接使用，增加了其应用的灵活性和实用性。
- 4) 密度：氨的体积能量密度高于氢气，意味着在相同的体积下，氨可以包含更多的氢气，便于更高效的运输和储存。

城市固废生活垃圾制备的绿氢可进一步合成氨，将来自空分装置的氮气与氢气混合，经过多级压缩催化合成 NH₃。经过简单模拟计算，若年操作时间以 7200 h 计，预计年产合成绿氨约 26,750 吨(H₂ 5558.4 × 10⁴ Nm³)，具体产量见表 5。MSW 气化制氢合成的绿氢可应用于燃煤电站的掺氨燃烧实现减碳降碳。

Table 5. The yield of H₂, CO₂, and ammonia
表 5. H₂、CO₂ 及合成氨产量

名称	单位小时产量		年产量(7200 h)
	摩尔量	质量/标准体积	
H ₂	344.451 kmol/h	7720 Nm ³ /h	5558.4 × 10 ⁴ Nm ³ /a
CO ₂	190.116 kmol/h	4261.02 Nm ³ /h	3067.9 × 10 ⁴ Nm ³ /a
合成氨	218.152 kmol/h	3715.26 kg/h	26750 t/a

2024 年 7 月国家发改委、国家能源局发布《煤电低碳化改造建设行动方案(2024-2027 年)》，提出利用绿氨实施燃煤机组掺烧绿氨发电，替代部分燃煤，并要求改造建设后煤电机组应具备掺烧 10%以上绿

氨能力。城市固废生活垃圾属于可再生资源，气化得到的绿氢可进一步合成绿氨，应用于燃煤电站的掺氨燃烧实现减碳降碳。

4. 结论与建议

本文对固废垃圾气化中不同燃料参数和操作参数对全流程的影响进行模拟，通过研究分析了不同条件下对各个节点的参数，得到以下结论：

- 1) 当垃圾含水率越低，干燥温度越高(小于 200℃)，对热解气化阶段越有利，其所需外界能量输入越少。
- 2) 当垃圾气化温度达到 800℃左右，其效果达到最佳，合成气中氢气的摩尔比为 34.34%，一氧化碳摩尔比为 29.76%，甲烷 10.22%。
- 3) 以水蒸气作为气化剂，气化温度为 800℃，当水蒸气系数为 0.3 时，气化效果最好；以空气作为气化剂，气化温度为 800℃，当空气系数为 0.3 时，气化效果最好。
- 4) 当气化剂系数都为 0.3 时，以氧气作为气化剂时，碳转化率高于水蒸气作为气化剂。以水蒸气作为气化剂时，可燃性气体含量增多，其低位热值较高。
- 5) 以水蒸气和空气混合气作为气化剂是一种既经济又高效的方法，当总气化剂系数为 0.3 时，合成气摩尔流量为 377.232 kmol/h，可燃气体摩尔流量为 280.37 kmol/h，合成气低位热值为 11.14 MJ·m⁻³，其中 CO + H₂ 64.1%，总可燃气 74.32%。
- 6) 垃圾含水率为 55.43%，干燥后含水率 15%，干燥温度为 180℃，气化温度为 800℃，熔融温度 1500℃，气化剂为水蒸气和氧气且总气化剂系数为 0.3，其中水蒸气 40%，氧气 60%，此时热解气化所需能量为 112204.1 MJ·h⁻¹，合成气的低位热值为 11.14 MJ/Nm³。
- 7) 城市固废生活垃圾制备的绿氢可进一步合成氨，年产量约 26,750 吨(H₂ 5558.4 × 10⁴ Nm³)，合成的绿氢可应用于燃煤电站的掺氨燃烧实现减碳降碳。

基金项目

本研究得到陕西省秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-59)的资助。

参考文献

- [1] Bhatt, M., Chakinala, A.G., Joshi, J.B., Sharma, A., Pant, K.K., Shah, K., *et al.* (2021) Valorization of Solid Waste Using Advanced Thermo-Chemical Process: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article 105434. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105434>
- [2] Ding, Y., Zhao, J., Liu, J., Zhou, J., Cheng, L., Zhao, J., *et al.* (2021) A Review of China's Municipal Solid Waste (MSW) and Comparison with International Regions: Management and Technologies in Treatment and Resource Utilization. *Journal of Cleaner Production*, **293**, Article 126144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126144>
- [3] Zhang, D.Q., Tan, S.K. and Gersberg, R.M. (2010) Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Journal of Environmental Management*, **91**, 1623-1633. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
- [4] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [5] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [6] 徐帆帆. 城市生活垃圾典型组分分级热解气化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [7] 埃德·道奇, 谭亚军. 等离子气化技术在垃圾处理中的应用[J]. 中国环保产业, 2010(10): 59-61.
- [8] 黄耕. 等离子气化技术在固体废物处理中的应用[J]. 中国环保产业, 2010(6): 43-45.
- [9] 王希, 张春飞, 王晓婷, 等. 城市生活垃圾等离子气化技术研究进展[J]. 现代化工, 2012, 32(12): 20-24.
- [10] Boulos, M.I. (1991) Thermal Plasma Processing. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **19**, 1078-1089. <https://doi.org/10.1109/27.125032>

-
- [11] 吴承康. 我国等离子体工艺研究进展[J]. 物理, 1999, 28(7): 388-393.
- [12] Heberlein, J. and Murphy, A.B. (2008) Thermal Plasma Waste Treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**, Article 053001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/5/053001>
- [13] Gomez, E., Rani, D.A., Cheeseman, C.R., Deegan, D., Wise, M. and Boccaccini, A.R. (2009) Thermal Plasma Technology for the Treatment of Wastes: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials*, **161**, 614-626. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.017>
- [14] 林小英, 李玉林. 等离子体技术在固体废弃物处理中的应用[J]. 资源调查与环境, 2005, 26(2): 128-131.
- [15] 袁国安, 彭安稳. 生活垃圾木质组分固定床连续气化特性[J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 63-71.
- [16] Chen, C., Jin, Y., Yan, J. and Chi, Y. (2013) Simulation of Municipal Solid Waste Gasification in Two Different Types of Fixed Bed Reactors. *Fuel*, **103**, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.075>
- [17] Tungalag, A., Lee, B., Yadav, M. and Akande, O. (2020) Yield Prediction of MSW Gasification Including Minor Species through ASPEN Plus Simulation. *Energy*, **198**, Article 117296. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117296>
- [18] Wang, H., Ren, R., Liu, B. and You, C. (2022) Hydrogen Production with an Auto-Thermal MSW Steam Gasification and Direct Melting System: A Process Modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 6508-6518. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.009>
- [19] 吴凯. 层状 Au/ α -MoC 负载催化剂催化低温水煤气变换反应[J]. 物理化学学报, 2018, 34(1): 3-4.
- [20] 李志, 杜学森, 汪宇, 等. 低温等离子体催化水煤气变换反应: 催化剂载体的影响[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(8): 2202-2211.