



移动扫码阅读

崔东旭, 胡晓宇, 刘现宁, 等. 基于 Aspen Plus 模拟的生活垃圾气化电化学提质制二甲醚系统评估[J]. 能源环境保护, 2025, 39(3): 167-175.

CUI Dongxu, HU Xiaoyu, LIU Xianning, et al. Evaluation of Municipal Solid Waste Conversion to Dimethyl Ether via Gasification and Electrochemical Upgrading System Based on Aspen Plus Simulation[J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(3): 167-175.

## 基于 Aspen Plus 模拟的生活垃圾气化 电化学提质制二甲醚系统评估

崔东旭<sup>1,2</sup>, 胡晓宇<sup>1</sup>, 刘现宁<sup>1</sup>, 武朝阳<sup>1</sup>, 徐越<sup>2</sup>,  
于梦竹<sup>3</sup>, 周建斌<sup>1</sup>, 陈登宇<sup>1,\*</sup>

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 2. 东南大学能源与环境学院能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏南京 210096; 3. 南京环境集团有限公司, 江苏南京 210026)

**摘要:** 生活垃圾转化为高价值的二甲醚可以减少 CO<sub>2</sub> 排放。为了评估其反应特性, 简化合成气提质工艺流程, 优化系统工艺参数, 采用 Aspen Plus 模拟了生活垃圾气化-电化学提质制备二甲醚系统, 计算了二甲醚产率和系统运行中 CO<sub>2</sub> 的减排效果。研究使用生活垃圾为原料, O<sub>2</sub> 为气化剂, 分别对比了收到基和干燥基下生活垃圾的不同气化特性, 探究了不同的气化氧当量和气化温度对系统性能的影响, 例如二甲醚产量、水蒸气产量、O<sub>2</sub> 产量和 CO<sub>2</sub> 减排量等。结果表明, 在收到基生活垃圾气化时, 合成气中 CO<sub>2</sub> 和水蒸气含量过高, 导致电化学提质后氢碳比大于 2, 不能满足合成气要求, 因此, 选择干燥基生活垃圾进行模拟计算。随着气化氧当量的增加, 二甲醚产量、水蒸气产量、O<sub>2</sub> 产量和 CO<sub>2</sub> 减排量均不断增加; 而气化温度的升高, 使得二甲醚产量和 CO<sub>2</sub> 减排量先增加后趋于稳定, 水蒸气产量和 O<sub>2</sub> 产量则先增加后减少。系统的最佳反应工艺参数为气化氧当量 0.275、气化温度 850 °C。在此条件下, 消耗生活垃圾 100 kg/h, 可产生二甲醚 51.44 kg/h、水蒸气(300 °C)288.19 kg/h 和 O<sub>2</sub> 33.99 kg/h, 并减少 CO<sub>2</sub> 排放 196.81 kg/h。本研究为生活垃圾的无害化和资源化利用提供了参考。

**关键词:** 生活垃圾; 气化; 氧当量; 气化温度; 二甲醚

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)03-0167-09

### Evaluation of Municipal Solid Waste Conversion to Dimethyl Ether via Gasification and Electrochemical Upgrading System Based on Aspen Plus Simulation

CUI Dongxu<sup>1,2</sup>, HU Xiaoyu<sup>1</sup>, LIU Xianning<sup>1</sup>, WU Zhaoyang<sup>1</sup>, XU Yue<sup>2</sup>,  
YU Mengzhu<sup>3</sup>, ZHOU Jianbin<sup>1</sup>, CHEN Dengyu<sup>1,\*</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education,  
School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Nanjing Environmental Group Co., Ltd., Nanjing 210026, China)

收稿日期: 2024-12-18

修回日期: 2025-01-20

接受日期: 2025-01-22

DOI: 10.20078/j.eep.20250202

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52076112); 江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20240675)

第一作者: 崔东旭(1995—), 男, 辽宁铁岭人, 讲师, 主要研究方向为生物质气化-固体氧化物燃料电池。E-mail: cuidx@njfu.edu.cn

\*通讯作者: 陈登宇(1985—), 男, 安徽太和人, 教授, 主要研究方向为生物质热化学转化。E-mail: chendy@njfu.edu.cn

**Abstract:** The conversion of municipal solid waste into high-value dimethyl ether can reduce carbon dioxide emissions. Aspen Plus was used to simulate the preparation of dimethyl ether from municipal solid waste gasification and electrochemical upgrading in order to evaluate its reaction characteristics, simplify the syngas upgrading process, and optimize system parameters. The dimethyl ether yield and carbon dioxide emission reductions were calculated during system operation. Using municipal solid waste as a raw material and oxygen as a gasifying agent, the gasification characteristics were compared between the as-received and dry bases. The effects of varying gasification oxygen equivalence ratios and gasification temperatures on system performance were investigated, focusing on dimethyl ether, steam, and oxygen production, as well as carbon dioxide emission reductions. The results showed that the contents of carbon dioxide and water vapor in the syngas were excessively high during the gasification of municipal solid waste in the as-received state, resulting in a hydrogen-to-carbon ratio greater than 2 after electrochemical upgrading, which did not meet syngas requirements. Therefore, the dry base of municipal solid waste was selected for simulation. Increasing the gasification oxygen equivalence ratio increased dimethyl ether, steam, and oxygen production, as well as carbon dioxide emission reduction. A lower gasification oxygen equivalence ratio led to incomplete gasification, while an excess of oxygen causes over-oxidation, resulting in higher energy consumption. With the increase in gasification temperature, the production of dimethyl ether and carbon dioxide emission reduction first increased and then stabilized, while steam and oxygen production first increased and then decreased. At lower gasification temperatures, a high hydrogen-to-carbon ratio of syngas was observed. A higher gasification temperature led to a decrease in steam and oxygen production. The optimal reaction process parameters of the system were a gasification oxygen equivalent ratio of 0.275 and a gasification temperature of 850 °C. At this time, consuming 100 kg/h of municipal solid waste produced 51.44 kg/h of dimethyl ether, 288.19 kg/h of steam (300 °C), and 33.99 kg/h of oxygen, which could reduce carbon dioxide emissions by 196.81 kg/h. It can be concluded that gasification of municipal solid waste in the dry base results in higher quality syngas. Higher production of steam, oxygen, and dimethyl ether can be achieved. Due to the conversion of carbon from municipal solid waste into liquid fuel, carbon dioxide emission reduction is achieved at the same time, demonstrating good environmental benefits. This study provides a reference for the harmless treatment and resource utilization of municipal solid waste.

**Keywords:** Municipal solid waste; Gasification; Oxygen equivalent ratio; Gasification temperature; Dimethyl ether

## 0 引 言

随着我国城市化进程的加速,城市生活垃圾清运量不断增加<sup>[1]</sup>。生活垃圾来源包括厨余垃圾、可回收垃圾、园林绿化垃圾等。厨余垃圾和园林绿化垃圾均属于生物质,生活垃圾的有效利用将直接降低 CO<sub>2</sub> 排放。据《中国统计年鉴 2022》,2021 年我国城市生活垃圾清运量约为 2.487 亿 t,比 2020 年增长了 5.776%。生活垃圾的处理方法包括生物化学法<sup>[2]</sup>、热化学法<sup>[3]</sup>、电化学法<sup>[4]</sup>等。目前采用热化学转化技术处理生活垃圾受到广泛重视。热化学转化技术可以在缺氧或厌

氧气氛下对生活垃圾进行高温分解<sup>[5]</sup>,将其转换成甲醇、二甲醚等高价产品,达到生活垃圾无害化和资源化处理的目的<sup>[6-8]</sup>。

二甲醚可用作冷冻剂、发泡剂、溶剂、柴油等的替代品<sup>[9-10]</sup>,同时也是一种关键的化工原料,既能由化石能源等原料制取,也可以通过固体废弃物或生物质等可再生原料气化合<sup>[11-13]</sup>。目前二甲醚的合成工艺分为合成气-甲醇-二甲醚工艺(二步法合成)和合成气-二甲醚工艺(一步法合成),二步法合成工艺趋于成熟且得到了广泛使用。利用生活垃圾制备二甲醚主要分为 2 步:第一步,垃圾气化产生合成气,合成气制成甲醇;第二步,由

甲醇脱水制备二甲醚<sup>[14]</sup>。利用垃圾气化制备二甲醚,既可以减少对传统能源的消耗,又可以实现生活垃圾的合理利用。需要注意的是,根据甲醇的合成反应,要求合成气中的氢碳比( $H_2-CO_2$ )/( $CO+CO_2$ )为2左右, $H_2$ 和 $CO_2$ 的总含量大于70%, $CO_2$ 含量小于10%<sup>[15-17]</sup>,因此需要对生活垃圾气化产生的合成气进行提质处理,以满足甲醇合成要求。目前 Aspen Plus 被广泛应用于模拟生活垃圾的气化过程<sup>[18-19]</sup>。陈露露等<sup>[20]</sup>利用 Aspen Plus 模拟了流化床生物质气化合成二甲醚系统,但是对于合成气的提质处理并没有提供详细的解决方案。PARVEZ 等<sup>[12]</sup>通过 Aspen Plus 探究了 $CO_2$ 对生物质气化合成二甲醚系统的增强作用,在合成气的提质过程中,利用水气变换反应提高了合成气中的 $H_2$ 含量,再使用乙醇胺吸收过量的 $CO_2$ 。这种提质方法涉及的设备繁多,工艺流程复杂。

固体氧化物电解池(SOEC)可以直接将气体中的水蒸气转化成 $H_2$ 和 $O_2$ ,将 $CO_2$ 转换成 $CO$ 和

$O_2$ <sup>[21]</sup>,简化合成气提质工艺流程,并且为气化反应提供纯氧。

本文基于 Aspen Plus 模拟了生活垃圾气化制二甲醚的过程,对比了收到基和干燥基下生活垃圾的气化特性,探究了气化氧当量和气化温度对系统性能的影响,确定了系统的最佳反应工况,进一步提高了气化技术经济性<sup>[22]</sup>,为生活垃圾气化的工程实践提供参考。

## 1 原料分析与计算模型

### 1.1 原料分析

系统采用生活垃圾作为气化原料,质量流量为100 kg/h,干燥基生活垃圾的元素分析和工业分析结果见表1。根据表1的数据,计算了收到基生活垃圾的元素分析和工业分析,见表2。后续根据分析结果分别对干燥基和收到基生活垃圾进行非标准物质定义。

表1 干燥基生活垃圾的元素分析与工业分析<sup>[23]</sup>

Table 1 Ultimate analysis and proximate analysis of municipal dry-base solid waste<sup>[23]</sup>

| 参数 | 元素分析/%             |                    |                    |                    |                    | 工业分析/%         |                |                |                 | 热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------|
|    | w(C <sub>d</sub> ) | w(H <sub>d</sub> ) | w(O <sub>d</sub> ) | w(N <sub>d</sub> ) | w(S <sub>d</sub> ) | M <sub>d</sub> | A <sub>d</sub> | V <sub>d</sub> | FC <sub>d</sub> | Q <sub>d</sub>            |
| 数值 | 35.05              | 4.11               | 21.40              | 2.14               | 0.23               | 0              | 36.52          | 54.20          | 9.28            | 8.15                      |

表2 收到基生活垃圾的元素分析与工业分析

Table 2 Ultimate analysis and proximate analysis of received base municipal solid waste

| 参数 | 元素分析/%              |                     |                     |                     |                     | 工业分析/%          |                 |                 |                  | 热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------------|
|    | w(C <sub>ar</sub> ) | w(H <sub>ar</sub> ) | w(O <sub>ar</sub> ) | w(N <sub>ar</sub> ) | w(S <sub>ar</sub> ) | M <sub>ar</sub> | A <sub>ar</sub> | V <sub>ar</sub> | FC <sub>ar</sub> | Q <sub>ar</sub>           |
| 数值 | 18.47               | 2.17                | 11.28               | 1.13                | 0.12                | 47.28           | 19.25           | 28.57           | 4.89             | 6.10                      |

气化氧当量是指在气化反应中,实际供给的氧气量与完全燃烧理论所需的氧气量之比,它是气化反应中的一个重要参数,对气化炉的放热量、合成气成分、气化效率都有显著的影响。根据式(1)计算生活垃圾完全燃烧理论氧气量 $V$ 。结合表1和表2的元素分析,收到基生活垃圾和干燥基生活垃圾完全燃烧理论氧气量分别为 $0.39 m^3/kg$ 和 $0.74 m^3/kg$ 。

$$V = 1.87w(C) + 5.55w(H) + 0.70w(S) - 0.70w(O) \quad (1)$$

式中: $V$ ——物料完全燃烧理论氧气量, $m^3/kg$ ;

$w(C)$ ——物料碳元素含量,%;

$w(H)$ ——物料氢元素含量,%;

$w(S)$ ——物料硫元素含量,%;

$w(O)$ ——物料氧元素含量,%。

### 1.2 计算模型

由于生活垃圾的气化过程十分复杂,因此在建模前做出如下假设:(1)所有反应器均为稳态运行<sup>[24]</sup>;(2)所有气体均视为理想气体;(3)气化炉中的反应是等温反应。

利用 Aspen Plus 对生活垃圾气化制二甲醚系统进行了模型构建,模型如图1所示。生活垃圾作为一种非标准物质被引入模型,根据上述的元素分析和工业分析对其进行定义。生活垃圾裂解为 $H_2O$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ 、碳、硫、灰分等物质,与 $O_2$ 一起送入气化炉(GASFER,吉布斯反应器, $1.2 \times 10^5 Pa$ )进行气化反应。补充纯氧作为气化介质, $O_2$ 给入

温度为 25 ℃。气化炉放出的热量促进水蒸气的生成,自产水蒸气温度为 300 ℃。气化反应产物在净化反应器(REMOVE, 化学计量反应器, H<sub>2</sub>S、SO<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、HCl 和 NH<sub>3</sub> 的转化率分别为 99.99%、99.9%、99.9%、100% 和 100%)中进行脱硫、脱硝和脱氯,利用 CaO 和 ZnO 去除合成气中的 H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub> 和 HCl。净化后的气体进入电解池反应器(CATHODE, 化学计量反应器, H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的转化率分别为 95% 和 80%), H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 通过电解转化为 H<sub>2</sub>、CO 和 O<sup>2-</sup>, O<sup>2-</sup> 到达阳极(ANODE)生成 O<sub>2</sub> 并释放电子。提质后的合成气进入甲醇

合成反应器(SYNM, 化学计量反应器, CO 和 CO<sub>2</sub> 的转化率分别为 95% 和 85%), H<sub>2</sub> 与 CO 或 CO<sub>2</sub> 发生反应生成甲醇。甲醇等混合物进入合成反应器(SYND, 化学计量反应器, 甲醇的转化率为 99%)生成二甲醚。此时,尾气中仍存在部分可燃性气体,因此使用燃烧反应器(COM, 化学计量反应器, H<sub>2</sub>、CO 和 CH<sub>4</sub> 的转化率均为 100%)进行燃烧,生成水蒸气。系统的主要评估参数为气化炉放热量、合成气组分、CO<sub>2</sub> 减排量、二甲醚产量、单位二甲醚产量电耗、水蒸气产量和 O<sub>2</sub> 产量。

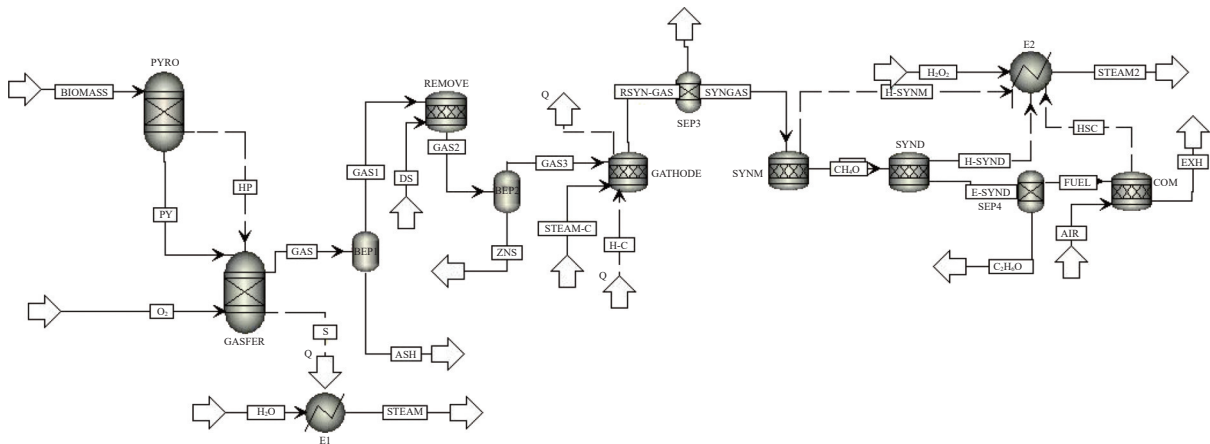


图 1 生活垃圾气化合成二甲醚系统

Fig. 1 Schematic diagram of dimethyl ether production from municipal solid waste gasification

## 2 结果与讨论

### 2.1 气化氧当量对收到基生活垃圾气化系统性能的影响

气化氧当量在生活垃圾的气化反应中具有多方面的作用。氧当量的适当增加可以提高气化效率和合成气品质,增加放热量,但是过高的氧当量会导致可燃气体的过度燃烧,降低合成气的品质,在后续调节合成气的氢碳比中消耗更多的能量,不利于后续甲醇和二甲醚的生成。气化反应是强吸热反应,在生活垃圾的气化过程中会不断消耗热量。因此需要对气化氧当量进行调节,既要保证气化炉能够自发反应和正常运行,也要保证气化效率和合成气品质,满足后续的合成需求。收到基生活垃圾的含水量高,热值相对较低,可能会在气化效率、气体组分等方面产生不利影响。图 2 为不同气化氧当量下,收到基生活垃圾气化时气化炉的放热量(气化温度为 850 ℃)。气化氧当量从 0.250 增加到 0.350,气化炉的放热量从 13.24 kW

上升到了 30.77 kW。收到基生活垃圾气化时,气化炉一直处于放热状态,说明氧化反应不断加剧,反应所释放的热量足够支持气化反应的正常进行,同时还有余热。此外,由于收到基生活垃圾的含水量较高,需要消耗额外的热量进行水分蒸发。气化时也需要供给更多的 O<sub>2</sub>, 所以气化氧当

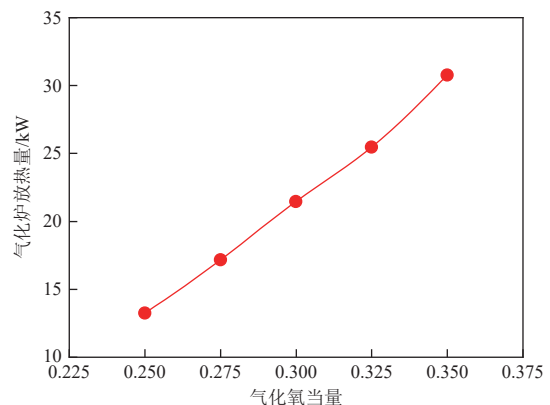


图 2 不同气化氧当量热解-气化炉的总放热量

Fig. 2 Total heat release of pyrolysis-gasifiers with different gasified oxygen equivalents

量相对较大。

图3为不同气化氧当量下,收到基生活垃圾气化炉和电解池反应器出口气体的组分。随着气化氧当量的增加,气化炉出口燃气中 $H_2$ 和 $CO$ 的含量逐渐减少, $H_2O$ 和 $CO_2$ 含量逐渐增加。这主要是因为通入的 $O_2$ 变多,促进了氧化反应,导致更多的 $H_2$ 和 $CO$ 被氧化为 $H_2O$ 和 $CO_2$ 。同时,气体流量也不断增加,气化氧当量在0.250~0.325时,增加的速度较快,之后增加速度放缓。适当地增加氧当量可以促进气化反应,随着氧当量的进一步增加,反应逐渐趋于平衡,此时再增加氧当量

不会显著改变反应的气体组分和产量,甚至可能会导致更多的可燃气发生燃烧,降低合成气品质。此外,由于生活垃圾水分含量高,有利于气化反应中 $H_2$ 的生成,所以气化炉出口燃气中 $H_2$ 含量明显高于 $CO$ 含量。相较于气化炉出口气体,电解池反应器出口气体中 $H_2$ 和 $CO$ 的含量明显增加, $H_2$ 含量接近70%, $CO$ 含量在25%左右,二者含量之和高于70%; $H_2O$ 和 $CO_2$ 的含量明显减少,均小于5%。此时燃气品质已经满足合成甲醇的要求。

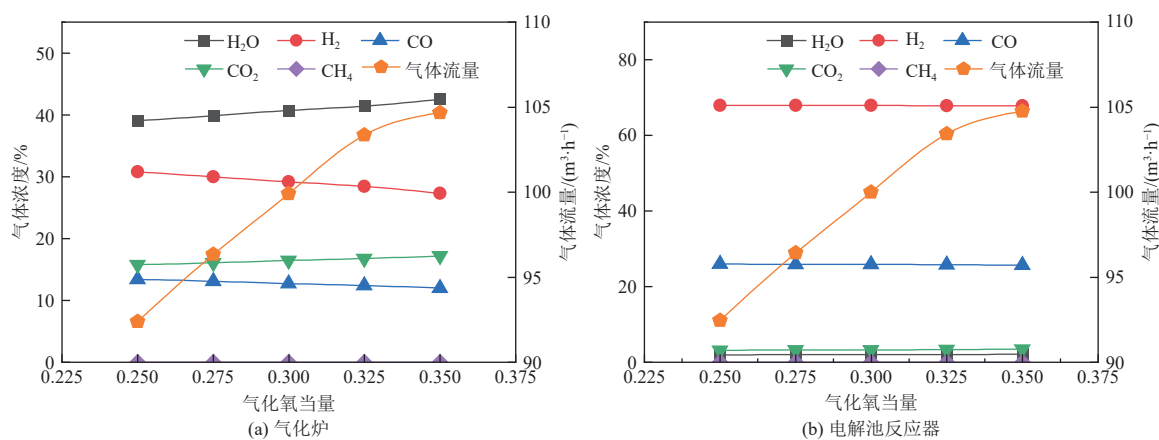


图3 收到基生活垃圾气化时不同氧当量下反应器出口主要气体组分

Fig. 3 Main gas compositions at reactor outlet for different oxygen equivalents for municipal solid waste gasification under received base

除了 $H_2$ 和 $CO$ 的含量要求,氢碳比也是衡量甲醇合成气是否合格的重要指标。此外,为了更好地评价系统,本文对 $CO_2$ 减排量、二甲醚产量、 $O_2$ 产量等关键性能指标进行了分析。 $CO_2$ 减排量指系统产生的二甲醚所含碳元素折算的 $CO_2$ 质量流量。图4(a)显示了不同气化氧当量下,合成气的氢碳比变化。随着气化氧当量的增加,氢碳比处于2.200~2.225之间, $CO_2$ 减排量也不断增加。氧当量在0.250~0.325时,增加的速度较快,之后增加速度放缓,这是因为气化反应已经逐渐趋于平衡,合成气的流量增长缓慢。图4(b)为不同气化氧当量下的二甲醚产量和单位二甲醚产量电耗。随着气化氧当量的增加,二甲醚产量也不断增加,随着气化反应逐渐趋于平衡,二甲醚的增加速度也逐渐缓慢。单位二甲醚产量电耗不断增加,且增加速度越来越大,这是因为收到基生活垃圾含水量较高,气化炉出口燃气中的水蒸气含量过高,在电解过程中消耗了大量的电能,从而导致

单位二甲醚电耗过高。图4(c)为不同气化氧当量下的水蒸气和 $O_2$ 产量。随着气化氧当量的增加,收到基生活垃圾的转换率变高,系统的放热量不断增加,所以水蒸气产量不断上升。氧当量在0.250~0.325时, $O_2$ 增长较快,之后增长速度减慢,这也是由气化反应趋于平衡所造成的。

由上述分析可知,收到基生活垃圾气化合成气中的 $H_2$ 含量较高,氢碳比大于2,不满足合成气要求。降低氢碳比可以减少电解池反应器的反应时间,但是会导致合成气中的 $CO_2$ 含量过高。因此收到基生活垃圾不适合气化合成二甲醚。

## 2.2 气化氧当量对干燥基生活垃圾气化系统性能的影响

图5为不同气化氧当量下,干燥基生活垃圾气化炉(气化温度为 $850\text{ }^\circ\text{C}$ )和电解池反应器出口的气体组分。由于生活垃圾已经进行了干燥处理,所以燃气中的水蒸气含量较少,仅占5%~10%。随着气化氧当量的增加,气化炉出口燃气

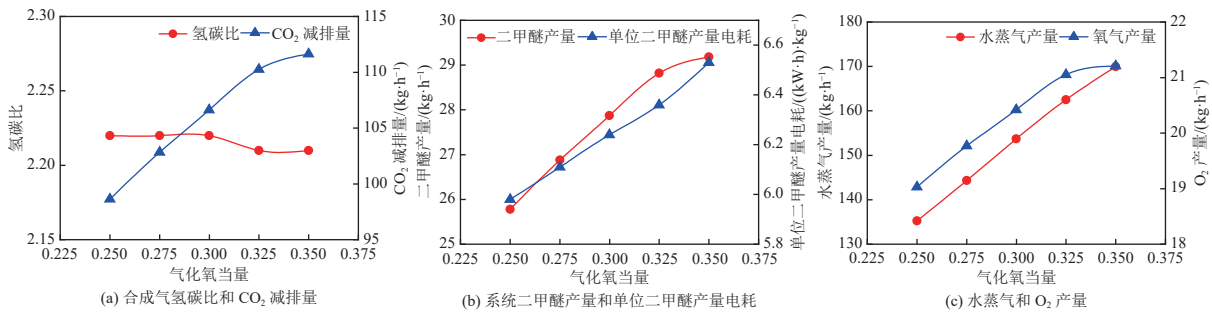


图 4 收到基生活垃圾气化时不同氧当量下系统性能

Fig. 4 System performance of different oxygen equivalents for municipal solid waste gasification under received base

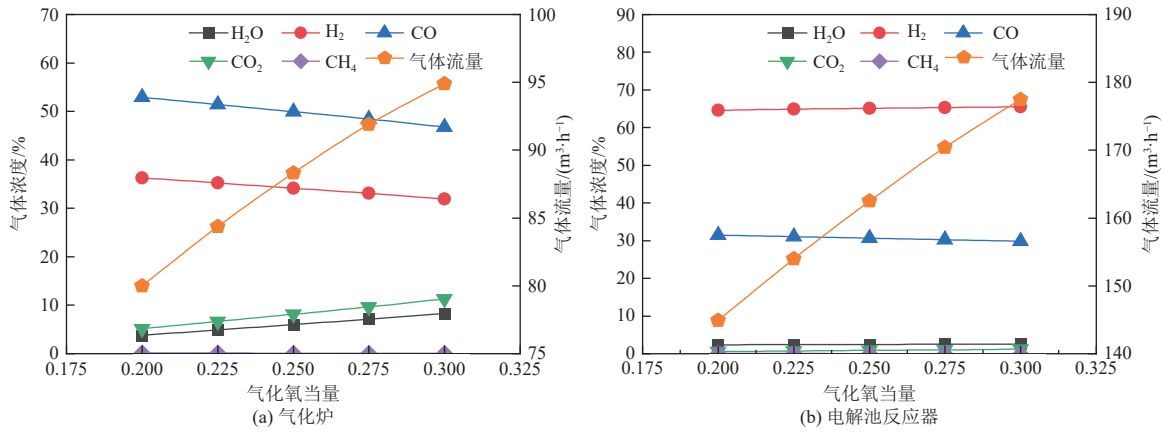


图 5 干燥基生活垃圾气化时不同氧当量下反应器出口主要气体组分

Fig. 5 Main gas compositions at reactor outlet for different oxygen equivalents for municipal solid waste gasification under dry base

中  $H_2$  和  $CO$  的含量逐渐减少,  $H_2O$  和  $CO_2$  含量逐渐增加。由于干燥基水分的减少, 气化反应中的  $H_2$  产量减少, 所以燃气中的  $H_2$  含量明显小于  $CO$ 。同时, 随着气化氧当量的增加, 气化反应加剧, 气体流量不断上升。电解池反应器出口气体中,  $H_2$  含量明显增加, 达到 65% 左右,  $CO$  含量在 30% 左右,  $H_2O$  和  $CO_2$  的含量明显减少, 均低于 3%,  $H_2$  和  $CO$  的含量之和超过了 70%, 燃气品质已经满足合成甲醇的要求。

随着氧当量的增加,  $CO$  含量下降, 合成气的氢碳比略有上升, 但仍处于 2.00~2.08 之间, 达到甲醇合成气的要求。此外, 随着氧当量的增加,  $CO_2$  减排量也不断增加, 减排效果良好。图 6(b) 显示, 随着气化氧当量的增加, 二甲醚产量和单位二甲醚产量电耗均不断增加。图 6(c) 显示, 随气化氧当量的增加, 水蒸气和  $O_2$  产量也一直上升。关于气化氧当量的选取, 氧当量过低会导致干燥基生活垃圾气化不完全, 气化效率低, 过高会使氧化反应加剧, 降低合成气品质, 增加设备运行成

图 6(a) 为不同气化氧当量下合成气的氢碳

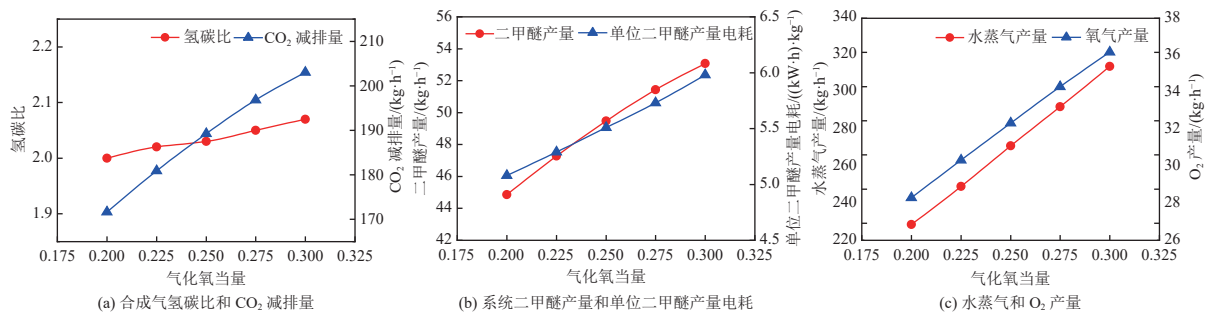


图 6 干燥基生活垃圾气化时不同氧当量下系统性能

Fig. 6 System performances under for different oxygen equivalents for municipal solid waste gasification under dry base

本。综合各种性能参数考虑, 选用气化氧当量 0.275 作为气化炉的运行参数, 此时合成气氢碳比为 2.05, 二甲醚产量为 51.44 kg/h, 单位二甲醚产量电耗为 5.73 (kW·h)/kg, CO<sub>2</sub> 减排量为 196.81 kg/h, 水蒸气产量为 288.19 kg/h, 氧气产量为 33.99 kg/h。

### 2.3 气化温度对干燥基生活垃圾气化系统性能的影响

在生活垃圾的气化反应中, 气化温度对气化效率、气体组分等都有直接影响。图 7 为不同气化温度下, 干燥基生活垃圾气化炉(气化氧当量为 0.275)和电解池反应器出口气体的组分。在 750~850 °C 之间, 随着气化温度的增加, 气化炉出口燃气中 H<sub>2</sub> 和 CO 的含量逐渐增加, H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 含量逐渐减少, 气体流量也不断增加, 这是因为气

化反应是强吸热反应, 高温有利于反应的正向进行, 倾向于生成更多 H<sub>2</sub> 和 CO, 干燥基生活垃圾的转换效率和气化反应效率也随之提高。当温度高于 850 °C, CO 的含量增加趋于平缓, H<sub>2</sub> 含量开始略微下降, H<sub>2</sub>O 含量出现上升趋势, CO<sub>2</sub> 含量下降速度放缓。这是因为气化过程中会发生水煤气变换反应, 具体为 CO 和 H<sub>2</sub>O 反应生成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub><sup>[25]</sup>, 该反应是放热反应, 温度过高时会导致反应逆向进行, 造成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 的少量消耗以及 CO 的上升, 同时气体流量也在 900 °C 之后出现了下降。温度在 750~950 °C 之间时, 电解池反应器出口气体中 H<sub>2</sub> 含量增加到 65% 左右, CO 含量在 30% 左右, H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的含量均在 5% 以下, 此时 H<sub>2</sub> 和 CO 的含量之和已经高于 70%, 达到合成甲醇的要求。

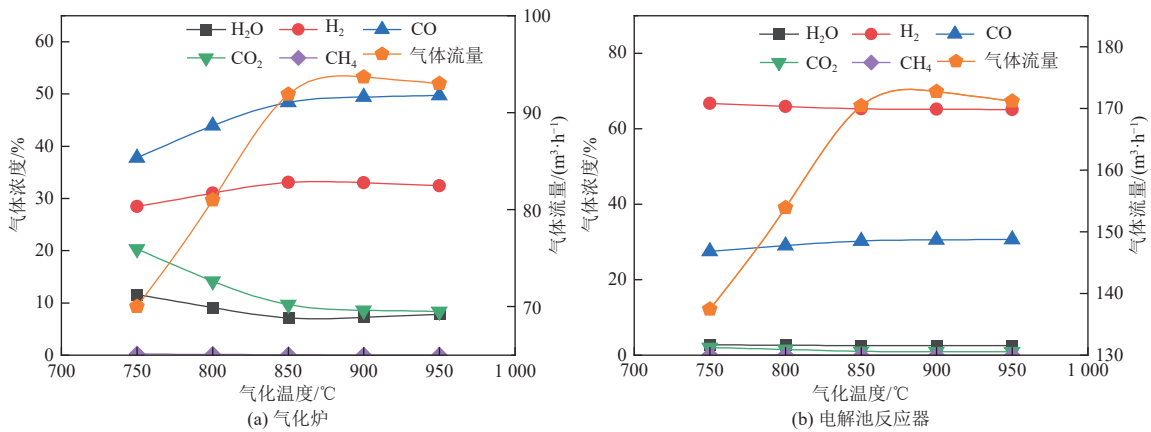


图 7 干燥基生活垃圾气化时不同气化温度下反应器出口主要气体组分

Fig. 7 Main gas compositions at reactor outlet at different gasification temperatures for municipal solid waste gasification under dry base

图 8(a) 为不同气化温度下合成气的氢碳比。随着气化温度的上升, 氢碳比不断下降, 在 850 °C 后趋于平缓, 这是因为气化温度在 750~850 °C 时, CO 的增加速度大于 H<sub>2</sub> 的增加速度, 从而导致了氢碳比的下降。850 °C 之后, 气体含量几乎不发

生改变, 氢碳比也不再变化。同时, 随着气化温度的上升, CO<sub>2</sub> 减排量呈现先上升后平缓的趋势。图 8(b) 中, 随着气化温度的上升, 二甲醚产量不断增加, 850 °C 后趋于平缓, 因为气化温度增加, 促进了气化反应正向进行, 导致甲醇和二甲醚产量

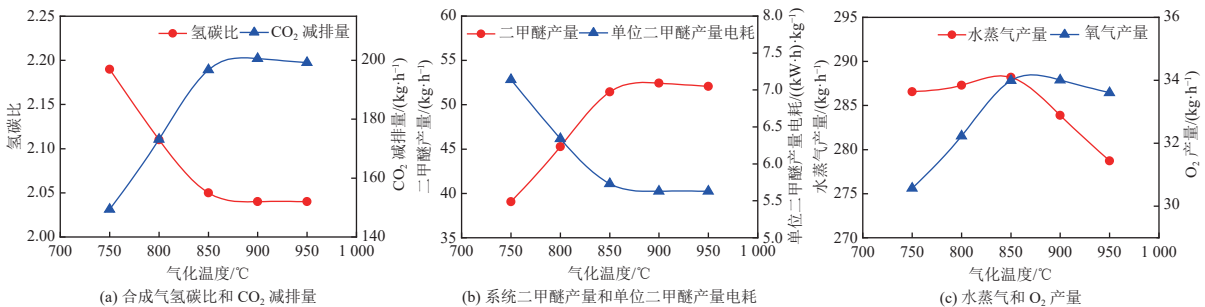


图 8 干燥基生活垃圾气化时不同气化温度下系统性能

Fig. 8 System performances at different gasification temperatures for municipal solid waste gasification under dry base

增加,之后反应逐渐趋于平衡,产量和电解电耗不再增加,且由于二甲醚产量的增加速度大于电解电耗的增加速度,所以单位二甲醚产量电耗会呈现先下降后平缓的趋势。图 8(c)为不同气化温度下的水蒸气和 O<sub>2</sub> 产量。随着气化温度的增加,气化反应正向进行,吸热反应加剧,气化炉放热量逐渐减小,导致了水蒸气产量先上升后下降; O<sub>2</sub> 产量呈现先上升后平缓的趋势,因为随着温度的升高,气化反应逐渐趋于平衡。综合考虑各种系统性能,当气化温度为 850 ℃ 时,气化炉运行效果最佳,此时合成气氢碳比为 2.05,二甲醚产量为 51.44 kg/h,单位二甲醚产量电耗为 5.73 (kW·h)/kg, CO<sub>2</sub> 减排量为 196.81 kg/h,水蒸气产量为 288.19 kg/h, O<sub>2</sub> 产量为 33.99 kg/h。

### 3 结 论

利用 Aspen Plus 模拟了生活垃圾气化制二甲醚系统,对比了收到基生活垃圾和干燥基生活垃圾的气化特性,探究了气化氧当量和气化温度对系统性能的影响,主要结论如下。

(1) 由于合成气的氢碳比过高且无法合理调节,收到基生活垃圾不适合气化制二甲醚,使用干燥基生活垃圾更为合适。

(2) 最佳气化氧当量为 0.275,氧当量过低会导致气化反应不完全,过高会导致合成气氢碳比过高,不利于二甲醚的合成。

(3) 最佳气化温度为 850 ℃,气化温度过低会导致合成气氢碳比过高,过高会导致水蒸气产量和氧气产量的下降。

(4) 最佳工艺参数下,消耗 100 kg/h 的干燥基生活垃圾可产生 51.44 kg/h 的二甲醚,288.19 kg/h 的水蒸气和 33.99 kg/h 的 O<sub>2</sub>,可减少 196.81 kg/h 的 CO<sub>2</sub> 排放。

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨若辰,姜磊,佟灿,等.城市生活垃圾气化及灰渣结渣特性研究[J].能源环境保护,2025,39(2):170-181.  
YANG Ruochen, JIANG Lei, TONG Can, et al. Study on municipal solid waste gasification and ash residue slagging characteristics[J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(2): 170-181.
- [2] CHO E J, TRINH L T P, SONG Y, et al. Bioconversion of biomass waste into high value chemicals[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122386.
- [3] JEREMIÁŠ M, POHOŘELÝ M, SVOBODA K, et al. Gasification of biomass with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O mixtures in a catalytic fluidised bed[J]. *Fuel*, 2017, 210: 605-610.
- [4] LIU Wei, LIU Congmin, GOGOI P, et al. Overview of biomass conversion to electricity and hydrogen and recent developments in low-temperature electrochemical approaches[J]. *Engineering*, 2020, 6(12): 1351-1363.
- [5] 郝彦龙,侯成林,付丽霞,等.生活垃圾无害化处理工程设计实例[J].环境工程,2020,38(2):135-139.  
HAO Yanlong, HOU Chenglin, FU Lixia, et al. Engineering design of a municipal solid waste disposal project[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(2): 135-139.
- [6] ALVES O, CALADO L, PANIZIO R M, et al. Techno-economic study for a gasification plant processing residues of sewage sludge and solid recovered fuels[J]. *Waste Management*, 2021, 131: 148-162.
- [7] ROH PIN L, LUDWIG GEORG S, HUANG Qiuliang, et al. An analysis of waste gasification and its contribution to China's transition towards carbon neutrality and zero waste cities[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2021, 49(8): 1057-1076.
- [8] CUI Dongxu, WU Shiliang, YOON S J, et al. The influence mechanism of alkali metal salt potassium carbonate enrichment on NiO/YSZ anode of SOFC[J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 227: 107123.
- [9] CLAUSEN L R, ELMGAARD B, HOUBAK N. Techno-economic analysis of a low CO<sub>2</sub> emission dimethyl ether (DME) plant based on gasification of torrefied biomass[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4831-4842.
- [10] HAMELINCK C N, FAAIJ A P C. Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 111(1): 1-22.
- [11] ARCOUMANIS C, BAE C, CROOKES R, et al. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review[J]. *Fuel*, 2008, 87(7): 1014-1030.
- [12] PARVEZ A M, WU Tao, LI Sheng, et al. Bio-DME production based on conventional and CO<sub>2</sub>-enhanced gasification of biomass: A comparative study on exergy and environmental impacts[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 110: 105-113.
- [13] PARVEZ A M, MUJTABA I M, WU T. Energy, exergy and environmental analyses of conventional, steam and CO<sub>2</sub>-enhanced rice straw gasification[J]. *Energy*, 2016, 94: 579-588.
- [14] PEINADO C, LIUZZI D, SLUIJTER S N, et al. Review and perspective: Next generation DME synthesis technologies for the energy transition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147494.
- [15] GANESH I. Conversion of carbon dioxide into methanol—A potential liquid fuel: Fundamental challenges and opportunities (A review) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 221-257.



- [16] MARTIN O, MARTÍN D A J, MONDELLI D C, et al. Indium oxide as a superior catalyst for methanol synthesis by CO<sub>2</sub> hydrogenation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(21): 6261–6265.
- [17] WANG Li, YI Yanhui, GUO Hongchen, et al. Atmospheric pressure and room temperature synthesis of methanol through plasma-catalytic hydrogenation of CO<sub>2</sub>[J]. *ACS Catalysis*, 2018, 8(1): 90–100.
- [18] 吴松, 党文波, 史晓军, 等. 基于 Aspen Plus 的 MSW 气化熔融工艺全流程模拟研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(1): 184–193.  
WU Song, DANG Wenbo, SHI Xiaojun, et al. Whole process simulation of MSW gasification and melting system based on Aspen Plus[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(1): 184–193.
- [19] 张藤元, 冯俊小, 冯龙. 基于 Aspen Plus 的生活垃圾热解气化模拟及正交优化 [J]. *环境工程*, 2022, 40(2): 113–119.  
ZHANG Tengyuan, FENG Junxiao, FENG Long. Simulation and orthogonal optimization on pyrolysis and gasification of msw based on Aspen Plus[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(2): 113–119.
- [20] 陈露露, 肖军, 宋国辉, 等. 生物质气化合成二甲醚系统的火用分析 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2): 314–320.  
CHEN Lulu, XIAO Jun, SONG Guohui, et al. Exergy analysis of dimethyl ether synthesis via biomass gasification[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(2): 314–320.
- [21] 徐越, 李桃, 肖睿. 生物质气化耦合固体氧化物燃料电池研究现状及前景分析 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(6): 1–11.  
XU Yue, LI Tao, XIAO Rui. A review on development status and prospects of biomass gasification integration with solid oxide fuel cells[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(6): 1–11.
- [22] YOU Siming, OK Y S, TSANG D C W, et al. Towards practical application of gasification: A critical review from syngas and biochar perspectives[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(22-24): 1165–1213.
- [23] 陈巨辉, 王振名, 李丹, 等. 不同含水率下的生活垃圾气化特性模拟 [J]. *化工进展*, 2024, 43(9): 4900–4908.  
CHEN Juhui, WANG Zhenming, LI Dan, et al. Simulation of gasification characteristics from municipal solid waste under different moisture content[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(9): 4900–4908.
- [24] 柏静儒, 李启凡, 吴海涛, 等. 基于 Aspen Plus 抚顺式油页岩干馏过程模拟方法研究 [J]. *化工进展*, 2017, 36(1): 121–128.  
BAI Jingru, LI Qifan, WU Haitao, et al. Simulation of Fushun type retort for oil shale processing method using Aspen Plus[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(1): 121–128.
- [25] ALI JAMRO I, CHEN Guanyi, BALOCH H A, et al. Optimization of municipal solid waste air gasification for higher H<sub>2</sub> production along with the validation *via* kinetics and statistical approaches[J]. *Fuel*, 2022, 322: 124137.