

工业技术

绿氢协同生物质的甲醇合成工艺构建与综合性能评价

谭仁敏¹, 王治红^{1*}, 沈晓燕², 汪程毅¹, 肖费龙¹, 李雪雯¹

(1. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川 江油 621709)

摘要:为实现农业废弃物资源化利用与甲醇低碳生产, 提出绿氢协同生物质制甲醇(GH-BTM)工艺, 耦合生物质气化、绿氢补充、甲醇合成精馏及有机朗肯循环余热回收过程, 并基于 Aspen Plus 建立全过程模拟模型。考察蒸汽/生物质比、气化温度、甲醇合成温度和绿氢补充量对系统性能的影响, 并与煤制甲醇(CTM)和绿氢辅助煤制甲醇(GH-CTM)工艺进行对比。结果表明, 绿氢补充可改善合成气组成, 提高甲醇合成性能。GH-BTM 的氢效率、能量效率和烟效率分别为 88.80%、81.79% 和 72.85%, 生命周期温室气体排放为 0.31 kg/kg, 较 CTM 和 GH-CTM 分别降低 90.31% 和 83.51%; 单位甲醇生产成本为 231.50 美元/t, 内部收益率为 23.77%。GH-BTM 工艺兼具低碳优势和经济可行性, 可为农业废弃物资源化与绿色甲醇生产提供参考。

关键词:生物质气化; 甲醇合成; 绿色氢气; 碳排放; 能量效率

中图分类号: TQ517.4; X382

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0216-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.035

Construction and comprehensive performance evaluation of a green hydrogen-assisted biomass-to-methanol process

TAN Ren-min¹, WANG Zhi-hong^{1*}, SHEN Xiao-yan², WANG Cheng-yi¹,
XIAO Fei-long¹, LI Xue-wen¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Chuanxibei Gasfield of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Jiangyou 621709, China)

Abstract: To promote agricultural waste utilization and low-carbon methanol production, a green hydrogen-assisted biomass-to-methanol (GH-BTM) process was proposed. A whole-process model integrating biomass gasification, green hydrogen supplementation, methanol synthesis and distillation, and organic Rankine cycle waste heat recovery was developed using Aspen Plus. The effects of steam-to-biomass ratio, gasification temperature, methanol synthesis temperature, and green hydrogen supplementation on system performance were investigated, and the proposed process was compared with coal-to-methanol (CTM) and green hydrogen-assisted coal-to-methanol (GH-CTM) processes. The results show that green hydrogen supplementation improves syngas composition and enhances methanol synthesis performance. The hydrogen efficiency, energy efficiency, and exergy efficiency of GH-BTM are 88.80%, 81.79%, and 72.85%, respectively. The life-cycle greenhouse gas emission is 0.31 kg CO₂/kg CH₃OH, the methanol production cost is 231.50 USD/t, and the internal rate of return is 23.77%, indicating favorable low-carbon performance and economic feasibility, and providing a reference for agricultural waste utilization and green methanol production.

Key words: biomass gasification; methanol synthesis; green hydrogen; carbon emissions; energy efficiency

在化石能源消耗和碳减排压力持续增加的背景下, 开发清洁、可持续的碳资源利用路线具有重要意义^[1]。生物质具有来源广泛、可再生和碳中性潜力, 可通过燃烧、热解、气化和液化等热化学转化技术加以利用^[2]。其中, 气化被认为是较具前景的生物质转化方式, 可将生物质转化为以 H₂、CO、CO₂ 和 CH₄ 为主的合成气, 并进一步用于燃料及化学品合成^[3]。

甲醇是一种重要的基础化工原料和清洁液体燃料, 相较于氢气具有储运安全性较高、应用场景广等优势^[4]。目前甲醇生产主要依赖化石燃料, 生产过程伴随大量 CO₂ 排放^[1-4]。为降低甲醇生产碳排

放, 研究人员围绕煤制甲醇、绿氢辅助煤制甲醇、CO₂ 加氢制甲醇以及生物质/煤共气化制甲醇等路线开展了研究, 并在提高碳效率、甲醇产率和降低 CO₂ 排放方面取得一定进展^[5-9]。然而, 煤基路线仍受化石碳源限制, CO₂ 加氢路线依赖低碳氢源, 单独生物质气化制甲醇则存在合成气氢碳比不足等问题。

利用可再生电力电解水制得的绿氢与生物质气化过程耦合, 可调节合成气氢碳比和化学计量数, 改善甲醇合成原料气组成, 从而提高甲醇合成性能并降低化石能源依赖^[9-10]。特别是以农业废弃物为碳源协同绿氢制备绿色甲醇, 不仅有助于缓解生物质

收稿日期: 2025-10-15; 修回日期: 2026-05-29

作者简介: 谭仁敏(2000-), 女, 硕士生; 王治红(1974-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为天然气化工, 通讯联系人, wzhsupu@swpu.edu.cn。

露天焚烧造成的环境问题,也可实现可再生碳资源的高值化利用^[11]。因此,本文中提出绿氢协同生物质制甲醇(green hydrogen-biomass to methanol, GH-BTM)工艺,耦合生物质气化、绿氢补充、甲醇合成精馏及有机朗肯循环余热回收过程,利用 Aspen Plus 建立工艺模型,考察气化温度、蒸气/生物质比、甲醇合成温度和氢气添加量对系统性能的影响,并从能量效率、烟效率、生命周期碳排放和经济性等方面与煤制甲醇(CTM)和绿氢辅助煤制甲醇(GH-CTM)工艺进行对比,为绿色甲醇制备和农业废弃物资源化利用提供参考。

1 过程模型

玉米秸秆是玉米生产过程中的主要农业副产品,我国年产量较大,具有良好的资源化利用潜力。本文中选取玉米秸秆作为生物质原料,其工业分析与元素分析结果见表 1。秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,具有可再生、来源广泛和碳中性潜力等特点,适合作为绿色甲醇合成的碳源^[2-3]。

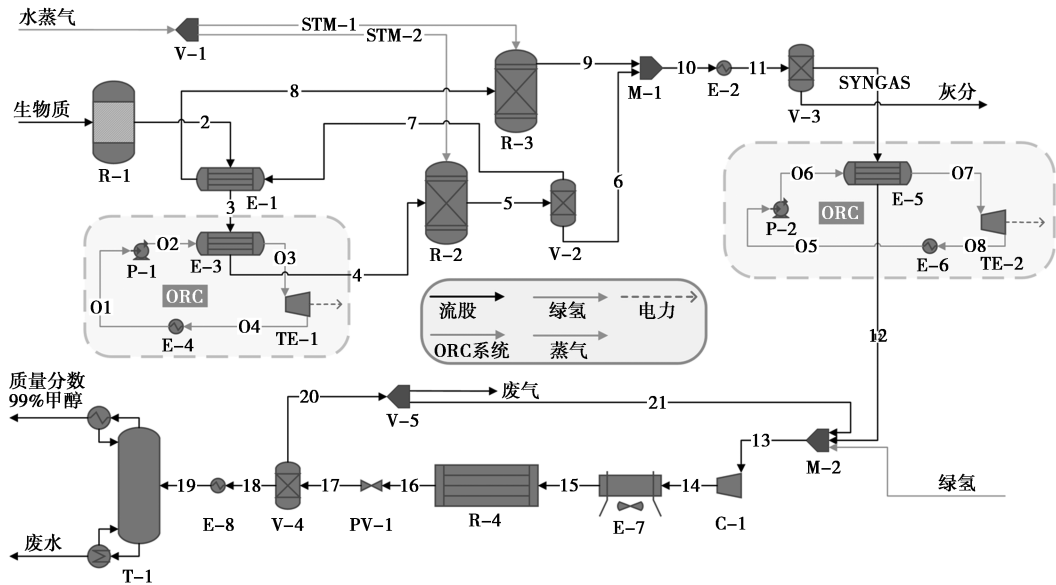
表 1 玉米秸秆样品工业分析与元素分析

工业分析		元素分析	
水分/%	5.00	C/%	46.50
固定碳/%	14.55	O/%	39.69
灰分/%	7.35	H/%	5.81
挥发物/%	78.10	S/%	0.11
LHV/(MJ·kg ⁻¹)	13.45	N/%	0.56

注:除水分外,其余分析数据均为干基质量分数。

1.1 工艺流程与模型假设

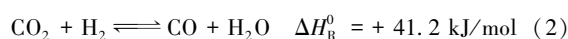
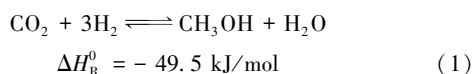
GH-BTM 工艺流程如图 1 所示,主要包括生物质气化、合成气净化、绿氢补充、甲醇合成与精馏以及有机朗肯循环(ORC)余热回收等部分。生物质首先经热解和气化生成以 CO、CO₂、H₂、CH₄ 为主的合成气;气化产物经冷却、分离和净化后,与外部绿氢混合以调节化学计量数;混合气经压缩和调温后进入甲醇合成反应器,反应产物经闪蒸和精馏获得质量分数为 99.9% 的精甲醇。同时,系统设置 ORC 单元回收工艺余热,以提高能源利用效率^[11]。



入 RGibbs 模块,并基于吉布斯自由能最小化原则模拟气化反应过程^[13-14]。

1.2.2 甲醇合成过程

甲醇合成过程采用 Lurgi Mega Methanol 工艺思路进行模拟,包括合成与精制 2 个部分^[4,15]。合成气与补充绿氢混合后,经压缩、换热进入甲醇合成反应器。本文中选用 RPlug 模块模拟甲醇合成过程,并采用 LHHW 动力学模型描述 Cu/ZnO/Al₂O₃ 催化剂表面的反应行为^[16-18]。甲醇合成主要涉及 CO₂ 加氢、逆水煤气变换和 CO 加氢反应:



合成气组成通常采用化学计量数 SN 和碳氧化物比 COR 表征:

$$SN = (y_{\text{H}_2} - y_{\text{CO}_2}) / (y_{\text{CO}} + y_{\text{CO}_2}) \quad (4)$$

$$COR = y_{\text{CO}_2} / (y_{\text{CO}} + y_{\text{CO}_2}) \quad (5)$$

式中, y 为组分摩尔分数。工业甲醇合成通常要求 SN 略高于 2.0^[15,18],本文中秸秆气化所得合成气 SN 为 1.23,需补充绿氢以提高合成气反应匹配度。

1.2.3 绿氢供应与余热回收模型

由于秸秆气化所得合成气化学计量数较低,难以直接满足甲醇合成对原料气组成的要求,因此需引入外部绿氢调节合成气中 H₂ 与碳氧化物比例。本文中采用文献建立的碱性电解槽模型描述绿氢供应过程^[10],所得绿氢主要由 H₂ 和少量 H₂O 组成,其中 H₂ 和 H₂O 的摩尔分数分别为 0.995 2 和 0.004 8。通过调节绿氢输入量,使气化合成气、循环气与绿氢混合后的原料气达到甲醇合成要求,混合气 SN 为 2.14, COR 为 0.60。

ORC 以 R245fa 为工质,由蒸发器、膨胀机、冷凝器和泵组成。膨胀机输出功、泵功耗及换热量根据物流焓差计算,泵和膨胀机采用等熵模型,膨胀机机械效率取 0.90。

1.3 系统性能评价方法

为综合评价 GH-BTM 工艺性能,本文中从元素利用率、能量效率、烟效率、单位产品能耗、氢耗、水耗、生命周期碳排放和经济性等方面进行分析,并与 CTM 和 GH-CTM 工艺进行对比^[11]。

1.3.1 元素利用效率

碳、氢元素利用率用于表征原料中碳、氢元素向甲醇产品的转化程度,分别定义为产品甲醇中碳、氢元素量与原料输入中对应元素总量的比值,计算式

如下^[5]:

$$\eta_{\text{C}} = (M_{\text{C}} \times n_{\text{C}} \times f_{\text{CH}_3\text{OH}}) / (m_{\text{biomass}} \times U_{\text{C}}) \quad (6)$$

$$\eta_{\text{H}} = (M_{\text{H}} \times n_{\text{H}} \times f_{\text{CH}_3\text{OH}}) / (m_{\text{biomass}} \times U_{\text{H}} + f_{\text{H}_2} \times M_{\text{H}_2}) \quad (7)$$

式中, η_{C} 和 η_{H} 分别为碳、氢元素利用效率; M 为元素的相对分子质量; f 为不同材料的摩尔流量; n 为甲醇中含有的原子数; m_{biomass} 为输入生物质的质量流量; U 为生物质最终分析提供的元素质量分数。

1.3.2 能量效率与烟效率

能量效率用于表征输入能量向目标产品及可利用能量输出的转化程度,计算中考虑生物质、绿氢、公用工程、甲醇产品及副产物流的低位热值和能量输入输出。烟效率用于评价系统能量利用质量,综合考虑物流的化学烟、物理烟和混合烟;系统烟效率定义为有效烟输出与总烟输入之比,烟损失用于识别主要不可逆环节^[11]。

1.3.3 单位产品能耗、氢耗与水耗

单位甲醇产品能耗用于反映生产单位甲醇所需外部能量输入,计算式为^[5]:

$$\text{ECPMP} = (E_{\text{cold,in}} + E_{\text{heat,in}} + E_{\text{ele,in}}) / m_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (8)$$

式中, $E_{\text{cold,in}}$ 、 $E_{\text{heat,in}}$ 和 $E_{\text{ele,in}}$ 分别为输入冷公用工程、热公用工程和电能; $m_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为甲醇产品质量流量。

单位甲醇产品氢耗和水耗分别表示为:

$$\text{HCTMP} = m_{\text{Hydrogen}} / m_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (9)$$

$$\text{WCPMP} = m_{\text{Water}} / m_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (10)$$

式中, m_{Hydrogen} 和 m_{Water} 分别为输入氢气和水的流量。

1.3.4 生命周期碳排放与经济性评价

本文中对 GH-BTM 工艺进行生命周期评价 (LCA),以量化从原材料获取、运输到精甲醇产品输出全过程的环境影响^[6,9]。系统边界包括生物质收集与运输、生物质气化、绿氢供应、甲醇合成与精馏过程,功能单位为 1 000 kg 精甲醇,评估范围未包含生物质种植及工厂建设阶段的能耗与排放。评价指标主要包括全球变暖潜能 (GWP100a) 等环境影响指标,其中温室气体排放用于表征不同工艺路线的低碳性能。

经济性分析边界与生命周期评价边界保持一致,以单位甲醇生产成本 (CMP) 和内部收益率 (IRR) 作为主要评价指标^[5-6]。CMP 定义为总年成本与年甲醇产量之比:

$$\text{CMP} = \text{TC} / m_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (11)$$

$$\text{TC} = \text{TCI} \times \text{CRF} + \text{TV} \quad (12)$$

式中, TC 为总成本; TCI 为总投资成本; CRF 为资本

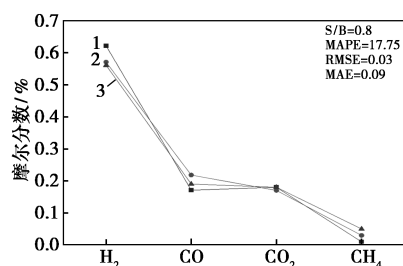
回收系数; TVC 为总可变成本; m_{CH_3OH} 为甲醇产品质量流量。

IRR 定义为项目净现值等于零时的折现率,当 IRR 高于基准贴现率时,项目具有经济可行性。经济评价主要参数为:项目寿命 25 a,折旧年限 10 a,贴现率 12%,折旧率 8%,年运行时间 8 000 h,税率 15%,电价 0.44 元/kWh,工业用水价格 0.25 元/t,蒸气价格 160 元/t,甲醇价格 2 500 元/t;涉及美元计价的经济性结果按 1 美元=7.2 元折算。

2 分析与结果讨论

2.1 气化模型准确性分析

为验证气化模型的可靠性,在 S/B 为 0.8、气化温度为 800~820℃ 条件下,将本文中模拟结果与文献数值模拟及实验结果进行对比,如图 2 所示^[19-21]。结果表明,本文中模型预测的 H_2 、 CO 、 CO_2 和 CH_4 含量与文献结果总体吻合,说明所建气化模型可用于后续参数分析。其中, H_2 含量略高于实验值, CO 和 CH_4 含量略低,可能与模型忽略焦油生成、灰分反应及部分副反应有关。



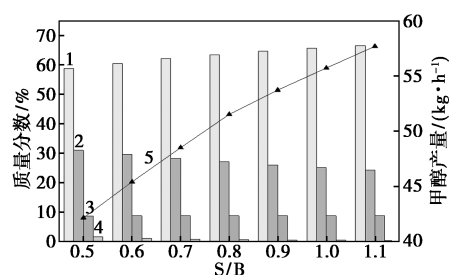
1—模拟结果;2—数值模拟结果;3—实验结果

图 2 气化模型结果与文献结果的合成气组成对比

2.2 关键参数影响分析

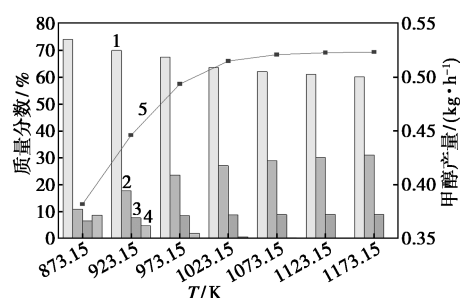
本研究考察了蒸气/生物质比 (S/B)、气化温度、甲醇合成温度和绿氢添加量对 GH-BTM 工艺性能的影响,结果如图 3 所示。随着 S/B 由 0.5 增至 1.25,蒸气参与水气变换和甲烷重整反应,有利于提高合成气中 H_2 含量及甲醇产量;但过量蒸气会稀释有效气体组分,并增加后续分离和能量消耗。

在 S/B 为 0.8 条件下,气化温度升高可促进生物质热解和甲烷蒸气重整反应,提高 H_2 和 CO 生成量,从而提升甲醇产量;但温度过高易引起灰分软化、结块等问题,因此需综合考虑气化效率和操作稳定性。甲醇合成温度对 CO 、 CO_2 和 H_2 转化率具有显著影响,低温有利于放热反应热力学平衡,而较高温度可提高催化反应速率;当温度继续升高时,受放



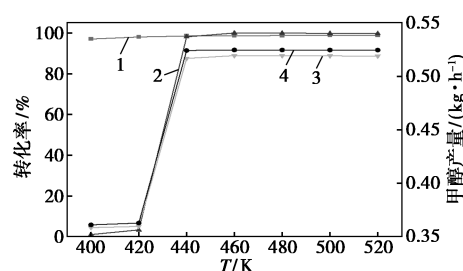
1— CO_2 ;2— CO ;3— H_2 ;4— CH_4 ;5— CH_3OH

(a) S/B 对合成气组成和甲醇产量的影响



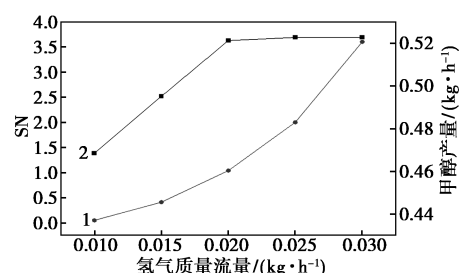
1— CO_2 ;2— CO ;3— H_2 ;4— CH_4 ;5— CH_3OH

(b) 气化温度对合成气组成和甲醇产量的影响



1— CO 转化率;2— CO_2 转化率;3— H_2 转化率;4— CH_3OH 收率

(c) 合成反应温度对 CO 、 CO_2 、 H_2 转化率及甲醇产量的影响



1—SN 值;2— CH_3OH 收率

(d) 氢气流量对 SN 值及甲醇产量的影响

图 3 关键操作参数对 GH-BTM 工艺性能的影响

热反应平衡限制及副反应影响,反应物转化率和甲醇产量出现下降趋势。绿氢添加量主要通过调节化学计量数 SN 影响甲醇合成性能,随着氢气流量增加, SN 升高,甲醇产量增加;当氢气继续过量时,甲醇产量增幅趋缓,说明过量补氢对产量提升作用有限。

2.3 能量效率与焓效率分析

基于 GH-BTM 工艺模型,对生物质气化单元和

甲醇合成精馏单元进行能量效率与烟效率分析^[11]。结果表明,生物质气化单元和甲醇合成精馏单元的烟效率分别为 60.90% 和 80.09%。其中,生物质气化单元的烟损失主要来源于热解和气化反应过程,说明高温热化学转化过程是该单元不可逆损失的主要来源;甲醇合成精馏单元中,甲醇合成反应器 R-4 的烟损失占该单元总烟损失的 87.01%,表明化学反应过程是影响系统烟效率的关键环节。

不同工艺路线的能量效率与烟效率对比如表 2 所示。CTM、GH-CTM 和 GH-BTM 的能量效率分别为 53.34%、57.16% 和 81.79%,烟效率分别为 48.45%、52.48% 和 72.85%。与 CTM 和 GH-CTM 相比,GH-BTM 的能量效率分别提高 53.33% 和 43.09%,烟效率分别提高 50.36% 和 38.81%。这主要是由于绿氢补充改善了合成气组成,提高了甲醇合成反应匹配度;同时 ORC 系统回收部分工艺余热,降低了外部能量需求,从而提升了系统整体能源利用水平。

表 2 CTM、GH-CTM 与 GH-BTM 的能量效率和烟效率比较

工艺	能量效率/%	烟效率/%
CTM	53.34	48.45
GH-CTM	57.16	52.48
GH-BTM	81.79	72.85

2.4 生命周期评估结果

采用生命周期评价方法对 CTM、GH-CTM 和 GH-BTM 工艺的环境影响进行比较,结果如表 3 所示。GH-BTM 工艺的生命周期温室气体排放为 0.31 kg/kg,显著低于 CTM 和 GH-CTM,较二者分别降低 90.31% 和 83.51%,表现出明显的低碳优势。

表 3 CTM、GH-CTM 与 GH-BTM 生命周期温室气体排放对比

工艺	生命周期碳排放/(kg·kg ⁻¹)
CTM	3.20
GH-CTM	1.88
GH-BTM	0.31

GH-BTM 的减排优势主要来源于可再生生物质碳源替代和绿氢补充。首先玉米秸秆作为可再生碳源,可降低煤炭等化石资源输入带来的碳排放;同时,绿氢补充改善了合成气组成,提高了碳资源向甲醇产品的转化效率,从而降低单位甲醇产品的生命周期温室气体排放。而 CTM 工艺以煤为主要碳源,

化石碳排放较高;GH-CTM 虽通过绿氢补充改善了原料气组成,但碳源仍以煤为主,因此减排潜力有限。

2.5 经济性与综合性能分析

GH-BTM 工艺经济性参数见表 4。由表 4 可知,GH-BTM 的总资本成本为 525.66 万美元,总运营成本为 171.88 万美元/a,设备总成本和总安装费用分别为 157.85 万、240.67 万美元。成本构成主要受设备投资、公用工程消耗及原料供应等因素影响,其中绿氢补充和 ORC 余热回收在提高系统能效的同时,也会影响系统投资与运行成本^[5-6,11]。

表 4 GH-BTM 工艺投资与运行成本参数

项目	数值
总资本成本/美元	5256590.00
总运营成本/(美元·a ⁻¹)	1718750.00
公用工程总成本/(美元·a ⁻¹)	36291.80
设备总成本/美元	1578500.00
总安装费用/美元	2406700.00
期望年回报率/%	20

不同甲醇生产工艺的综合性能比较见表 5。由表 5 可知,GH-BTM 的单位甲醇生产成本为 231.50 美元/t,低于 CTM 的 334.20 美元/t 和 GH-CTM 的 256.75 美元/t;其内部收益率为 23.77%,高于 CTM 和 GH-CTM,表明该工艺具有较好的经济可行性。GH-BTM 的经济优势主要来源于生物质碳源替代、绿氢调节合成气组成以及系统能效提升。

表 5 CTM、GH-CTM、GH-BTM 的综合性能比较

指标	CTM	GH-CTM	GH-BTM	行业标准 ^[5]
$\eta_c/\%$	39.23	68.14	51.91	36.30~38.40
$\eta_H/\%$	55.92	75.57	88.80	—
$\eta_{en}/\%$	53.34	57.16	81.79	41.00~55.00
$\eta_{ex}/\%$	48.45	52.48	72.85	48.65
ECPMP/(MWh·t ⁻¹)	12.46	11.62	6.58	11.39~14.64
HCTMP/(t·t ⁻¹)	—	0.0822	0.0509	—
WCPMP/(t·t ⁻¹)	1.53	1.21	1.24	7.61
LCA-GHG/(kg·kg ⁻¹)	3.20	1.88	0.31	—
CMP/(美元·t ⁻¹)	334.20	256.75	231.50	—
IRR/%	16.00	21.90	23.77	—

与 CTM 和 GH-CTM 相比,GH-BTM 在能量效率、烟效率、单位产品能耗和生命周期温室气体排放方面均表现出优势。GH-BTM 的能量效率和烟效率分别为 81.79% 和 72.85%,单位甲醇能耗为 6.58 MWh/t,生命周期温室气体排放为 0.31 kg/kg,较 CTM 和 GH-CTM 分别降低 90.31% 和 83.51%。综合来看,绿氢协同生物质制甲醇工艺可在提高可再

生碳资源利用效率的同时,降低甲醇生产过程碳排放和单位产品成本,具有较好的低碳化和经济应用潜力。

3 结论

提出了绿氢协同生物质制甲醇(GH-BTM)工艺,耦合生物质气化、绿氢补充、甲醇合成精馏及 ORC 余热回收过程,并基于 Aspen Plus 建立了全过程模拟模型。通过与文献实验及模拟结果对比,验证了生物质气化模型的可靠性,可用于后续工艺参数分析与系统性能评价。

关键操作参数对 GH-BTM 工艺性能具有显著影响。随着蒸气/生物质比、气化温度、甲醇合成温度和绿氢补充量的变化,合成气组成、化学计量数及甲醇产量均发生明显变化。其中,绿氢补充可有效提高合成气氢碳比和化学计量数,改善甲醇合成原料气组成,从而提升甲醇合成性能。

GH-BTM 工艺表现出较高的能源利用水平,氢效率、能量效率和烟效率分别为 88.80%、81.79% 和 72.85%。与 CTM 和 GH-CTM 相比,GH-BTM 的能量效率和烟效率均明显提高,主要归因于绿氢补充改善了合成气反应匹配度,同时 ORC 余热回收降低了系统外部能量需求。

GH-BTM 工艺具有显著的低碳优势和较好的经济可行性。生命周期温室气体排放为 0.31 kg/kg,较 CTM 和 GH-CTM 分别降低 90.31% 和 83.51%;单位甲醇生产成本为 231.50 美元/t,内部收益率为 23.77%。综合来看,GH-BTM 工艺可实现农业废弃物资源化利用、绿色氢能消纳和甲醇低碳生产的协同,具有一定推广应用潜力。

参考文献

- [1] IEA. Direct CO₂ emissions from primary chemical production in the Net Zero Scenario, 2010—2030 [EB/OL]. (2023-06-22) [2023-08-26]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-emissions-from-primary-chemical-production-in-the-net-zero-scenario-2010-2030-2>.
- [2] AlNouss A, McKay G, Al-Ansari T. A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112612.
- [3] AlNouss A, McKay G, Al-Ansari T. Production of syngas via gasification using optimum blends of biomass [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118499.
- [4] Lange J P. Methanol synthesis: A short review of technology improvements [J]. *Catalysis Today*, 2001, 64: 3-8.
- [5] Zhao Y, Liu Q, Duan Y, et al. A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 268: 115992.
- [6] Wang D, Meng W, Zhou H, et al. Green hydrogen coupling with CO₂ utilization of coal-to-methanol for high methanol productivity and low CO₂ emission [J]. *Energy*, 2021, 231: 120970.
- [7] Nguyen T B H, Zondervan E. Methanol production from captured CO₂ using hydrogenation and reforming technologies: Environmental and economic evaluation [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 34: 1-11.
- [8] Li S, Sun X, Liu L, et al. A full process optimization of methanol production integrated with co-generation based on the co-gasification of biomass and coal [J]. *Energy*, 2023, 267: 126566.
- [9] Wang T, Zhou T, Li C, et al. Biogas-to-methanol: A new green methanol production process based on anaerobic digestion of biomass [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 321: 119065.
- [10] Sánchez M, Amores E, Abad D, et al. Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 3916-3929.
- [11] Tera I, Zhang S, Liu G. A conceptual hydrogen, heat and power polygeneration system based on biomass gasification, SOFC and waste heat recovery units: Energy, exergy, economic and emergy (4E) assessment [J]. *Energy*, 2024, 295: 131015.
- [12] Francois J, Abdelouahed L, Mauviel G, et al. Detailed process modeling of a wood gasification combined heat and power plant [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 51: 68-82.
- [13] Mutlu Ö Ç, Zeng T. Challenges and opportunities of modeling biomass gasification in Aspen Plus: A review [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2020, 43: 1674-1689.
- [14] Mojaver P, Jafarmadar S, Khalilarya S, et al. Investigation and optimization of a co-generation plant integrated of gasifier, gas turbine and heat pipes using minimization of Gibbs free energy, Lagrange method and response surface methodology [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 19027-19044.
- [15] Bisotti F, Fedeli M, Prifti K, et al. Century of technology trends in methanol synthesis: Any need for kinetics refitting? [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60: 16032-16053.
- [16] Chinchén G C, Denny P J, Parker D G, et al. Mechanism of methanol synthesis from CO₂/CO/H₂ mixtures over copper/zinc oxide/alumina catalysts: Use of 14C-labelled reactants [J]. *Applied Catalysis*, 1987, 30: 333-338.
- [17] Lee J S, Lee K H, Lee S Y, et al. A comparative study of methanol synthesis from CO₂/H₂ and CO/H₂ over a Cu/ZnO/Al₂O₃ catalyst [J]. *Journal of Catalysis*, 1993, 144: 414-424.
- [18] Nestler F, Schütze A R, Ouda M, et al. Kinetic modelling of methanol synthesis over commercial catalysts: A critical assessment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 394: 124881.
- [19] Cerone N, Zimbardi F, Contuzzi L, et al. Experimental investigation of syngas composition variation along updraft fixed bed gasifier [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 221: 113116.
- [20] Yang S, Fan F, Wei Y, et al. Three-dimensional MP-PIC simulation of the steam gasification of biomass in a spouted bed gasifier [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 210: 112689.
- [21] Song T, Wu J, Shen L, et al. Experimental investigation on hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 36: 258-267. ■