

绿色甲醇多工艺模拟及其经济性和碳排放分析

沈蓝欣¹, 林董静¹, 吴可荆², 孙小毛³, 吴剑^{1,3*}

(1. 浙江农林大学数学与计算机科学学院, 浙江 杭州 311300;

2. 四川大学新能源与低碳技术研究院, 四川 成都 610207;

3. 浙江臻泰能源科技有限公司, 浙江 丽水 321404)

摘要:基于36万t/a的绿色甲醇工艺模型,对煤制甲醇(CTM)、生物质制绿色甲醇(BTM)和CO₂直接加氢制绿色甲醇(CHTM)3种工艺的能耗、经济性以及碳排放进行分析。结果表明,BTM单位能耗相较于CTM和CHTM分别减少了10%和14.8%,单位成本相较于CHTM减少了26.9%。BTM和CHTM均表现为近零碳排放特征,全生命周期单位甲醇碳排放分别为0.142、0.167 t/t,远低于CTM的3.84 t/t。

关键词:绿色甲醇;经济分析;全生命周期碳排放;过程模拟;工艺对比

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)08-0235-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.041

Multi-process simulation of green methanol: Analysis on economy and carbon dioxide emission

SHEN Lan-xin¹, LIN Dong-jing¹, WU Ke-jing², SUN Xiao-mao³, WU Jian^{1,3*}

(1. College of Mathematics and Computer Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China;

2. Institute of New Energy and Low-carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610207, China;

3. Zhejiang Zhentai Energy Technology Co., Ltd., Lishui 321404, China)

Abstract:Based on a 360 000 t/a green methanol process model, the energy consumption, economy and carbon dioxide emission of coal to methanol (CTM), biomass to green methanol (BTM) and CO₂ direct hydrogenation to green methanol (CHTM) processes are analyzed. It is found that the unit energy consumption of BTM is 10% and 14.8% less than those of CTM and CHTM, respectively, and the unit cost of BTM is 26.9% less than that of CHTM. Both BTM and CHTM show near-zero carbon dioxide emission, with their full life-cycle carbon dioxide emission are 0.142 tons and 0.167 tons per ton of methanol, respectively, much lower than the 3.84 tons of CTM.

Key words: green methanol; economic analysis; full life-cycle carbon dioxide emission; process simulation; process comparison

甲醇作为重要的基本有机原料之一,广泛应用于工业、农业、制造业和精细产品加工等各个领域^[1]。我国主要采用煤制甲醇(coal to methanol, CTM)生产工艺^[2],伴随着大量的温室气体排放,亟需开发低碳替代路径。根据国际可再生能源署(IRENA)建议^[3],绿色甲醇作为替代方案之一,其原料全部来源于可再生资源,主要包括生物质制甲醇(biomass to methanol, BTM)路线和CO₂加氢制甲醇(CO₂ to methanol, CHTM)路线。

目前,已有研究多采用Aspen模拟、生命周期评估或技术经济分析对绿色甲醇路线进行评价。Liu

等^[4]通过LCA对“液态阳光”甲醇和传统方法进行对比,结果表明CTM的环境影响最严重,而100%清洁能源可有效改善影响。Harris等^[5]运用技术经济评估法研究比较了BTM和CHTM的技术经济性,结果表明BTM具备较高成熟度和商业潜力。然而现有研究大多聚焦单一维度,缺乏系统性、多指标的对比分析。

为弥补上述不足,本文中采用工业规模的流程模拟方法,系统对比CTM、BTM和CHTM3种工艺,从能耗、成本及碳排放等维度开展评估,进一步探讨原料价格和规模对运行成本的影响,并深入解

收稿日期:2024-10-28;修回日期:2025-06-09

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2500400);中央引导地方科技发展资金项目(2023ZY1032)

作者简介:沈蓝欣(2000-),女,硕士生;吴剑(1985-),男,博士,副教授,研究方向为清洁能源、氢能,通讯联系人,wujian@zafu.edu.cn。

析各路线碳排放构成,为绿色甲醇的推广应用提供参考。

1 方法

1.1 模型设计

1.1.1 煤/生物质制甲醇

CTM 工艺选用煤炭作为原料, BTM 工艺选用玉米秸秆作为原料, 基准条件下, CTM 和 BTM 工艺规模均为 36 万 t/a 甲醇。CTM 和 BTM 工艺均可分为气化、酸性气体脱除、水煤气变换和甲醇合成及精馏单元。工艺流程如图 1 所示, 模型的关键参数如表 1 所示。

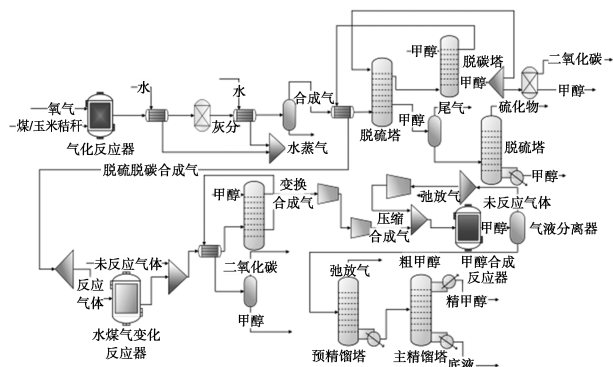


图 1 煤/生物质制甲醇工艺流程

表 1 模型关键设计参数

设计参数	CTM	BTM
原料进量/(t·h ⁻¹)	58	90
气化温度/°C	1250	800
气化压力/MPa	4.8	0.1
合成温度/°C	250	250
合成压力/MPa	6	6
甲醇摩尔分数/%	99.9	99.7
甲醇产量/(kg·h ⁻¹)	45303.9	45456.8

1.1.2 二氧化碳直接加氢制甲醇

CHTM 工艺的 CO₂ 原料来自生物质火力发电烟气捕集过程, 氢气原料来自基于可再生电力的 AWE 电解水制氢过程。CHTM 工艺主要分为 AWE 电解水制氢、甲醇合成和精馏单元, 工艺规模也为 36 万 t/a 甲醇。工艺流程如图 2 所示, 模型的关键参数如表 2 所示。

1.2 分析方法

1.2.1 能耗分析

本研究的能耗主要包括压缩机功耗、低温制冷、

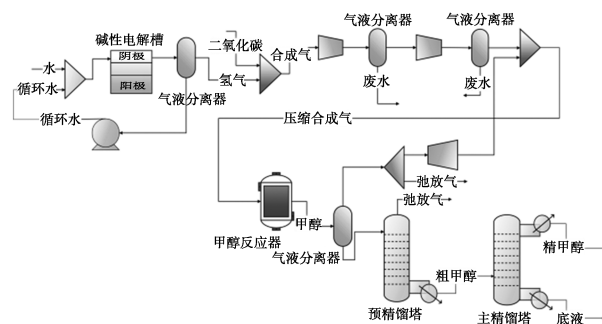


图 2 CO₂ 加氢制甲醇工艺流程

表 2 CHTM 模型关键设计参数

设计参数	CHTM	设计参数	CHTM
电解温度/°C	80	合成压力/MPa	6
电压力/MPa	3	甲醇摩尔分数/%	99.8
合成温度/°C	250	甲醇产量/(kg·h ⁻¹)	45211.3

再沸器供热、电解槽功耗及原料产生的能耗等, 能耗 E_x 计算如下:

$$E_x = \eta Q_{\text{steam}} + \varphi Q_{\text{cool}} + Q_{\text{chill}}/\zeta + E_{\text{compr}} + E_{\text{em}} + E_{\text{O}_2} + E_{\text{AWE}} + E_{\text{CCUS}} \quad (1)$$

式中, $\eta=0.314$ 为卡诺效率; $\varphi=8.5 \times 10^{-3}$ 为冷却水循环泵的功耗系数; $\zeta=2.4$ 为制冷系数。

1.2.2 经济分析

本研究的经济分析以总资本投资和产品成本作为评价指标。设备投资可通过费用系数法进行估算^[6](式 2)。总资本投资采用系数比例法进行估算^[7-8](式 3)。表 3 为 3 种工艺的设备投资基础数据^[8-11]。

$$EI = EI_j^{\text{ref}} \times (S/S_{\text{ref}})^{\text{sf}} \quad (2)$$

$$TCI = EI \times (1 + \sum_i RF_i) \quad (3)$$

表 3 甲醇工艺路线设备投资基本数据

工艺路线	单元	基准物	基准规模	规模因子	基准投资/百万元
CTM	煤气化	日给煤量	39.2 kg/s	0.67	484.00
	水煤气变换	变换气	30697 kmol/h	0.67	244.00
	酸性气体净化	CO ₂ 和 H ₂ S	32.5 kg/s	0.70	417.00
	甲醇合成	进料气量	10.81 kmol/s	0.67	126.00
	甲醇精馏	甲醇进料量	3.66 kg/s	0.67	12.04
BTM	生物质气化	生物质进量	2000 t/d	0.65	481.80
	水煤气变换	CO 和 H ₂	8819 kmol/h	0.65	120.00
	酸性气体净化	CO ₂	1227 kmol/h	0.65	124.00
CHTM	AWE	H ₂ 产量	1000 m ³ /h	0.80	9.00
	CC	CO ₂ 产量	62.26 t/h	0.67	87.14
	甲醇合成	进料气量	10.81 kmol/s	0.67	142.80

产品成本主要包括原料、公用工程、操作与维护、折旧等。本文中以单位产品为基准,计算公式如下:

$$PC = C_R + C_U + C_{LAB} + C_{O\&M} + C_{DC} + C_{POC} + C_{AC} + C_{DSC} \quad (4)$$

其中公用工程费包含水费、电费以及低压蒸气费,计算公式如下:

$$C_U = (Q_{steam} V_{steam})/\varepsilon + (\varphi Q_{cool} + Q_{chill}/\zeta + E_{compr})V_{elec} + \theta Q_{cool}/\omega V_{water} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon=2.2$ GJ/t 为蒸气的供热能力; $\omega=60$ MJ/t 为冷却水的冷却能力; $\theta=3\%$ 为循环水系统的水损耗率。

1.3 碳排放计算

本文中采用“从摇篮到坟墓”的原则,将全生命周期分为原料获取、原料运输、甲醇生产以及甲醇终端使用阶段,碳排放计算公式如式(6)所示,系统边界如图3所示。本文中的碳排放核算不考虑装置的生产 and 装配过程,主要考虑的是生产过程的全生命周期碳排放。

$$CM_{Methanol} = (EM_{ac} + EM_{transp} + EM_{mp} + EM_{terminal})/Y_{methanol} \quad (6)$$

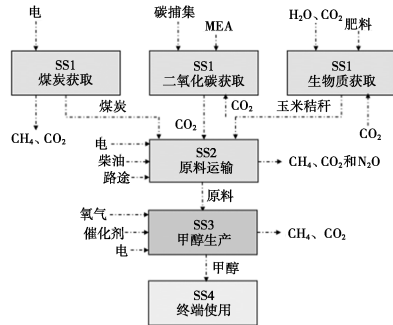


图3 甲醇系统边界图

1.3.1 CTM 碳排放计算

(1) 煤炭开采

煤炭开采过程的碳排放包括逃逸甲烷的直接排放和采煤机、输送机等电气设备造成的间接排放,则煤炭开采过程中的排放量按下式计算:

$$EM_{ac} = Q_{coal} \times EF_{cm} + Q_{coal} \times ELI_{cm} \times EF_{electr} \quad (7)$$

(2) 煤炭运输

本研究假设煤炭运输距离为 600 km,采用混合运输方式并考虑不同类型车辆的驱动源^[12],煤炭运输过程中的排放量计算如下:

$$EM_{transp} = \sum_{j=1}^2 (EF_{transp,j,coal} \times D_{j,coal} \times Q_{coal}) \quad (8)$$

(3) 甲醇生产阶段

甲醇生产过程的排放总量由尾气直接排放、用

电间接排放 2 部分组成。计算公式如下:

$$EM_{mp} = EM_{direc} + EM_{electr} \quad (9)$$

其中, EM_{direc} 包括工艺尾气和电站锅炉的排放。 EM_{electr} 为电力消耗造成的间接排放,计算公式如下:

$$EM_{electr} = ER \times EF_{electr} \quad (10)$$

(4) 甲醇终端使用

甲醇的终端使用考虑甲醇燃烧时产生的碳排放,计算公式如下:

$$EM_{terminal} = Q_{MeOH} \times EF_{MeOH} \quad (11)$$

BTM 和 CHTM 在甲醇生产阶段及终端使用阶段的碳排放计算方法与 CTM 相同,本文中不再赘述。

1.3.2 BTM 碳排放计算

(1) 玉米秸秆获取阶段

玉米秸秆的生长过程中包括吸收的二氧化碳,农业投入产生的二氧化碳以及收集玉米秸秆过程中产生的二氧化碳,计算公式如下:

$$EM_{ac} = EM_{born} + EM_{input} + EM_{collect} \quad (12)$$

在生物质的生长期,生物质吸收的二氧化碳量与其组成中的碳量直接对应,因此每千克生物质中碳的含量相当于从大气中移除的二氧化碳量,本文中玉米秸秆的含碳量取 45.97%。

本阶段玉米种植过程涉及的农业投入数据包括水、化肥、农药、天然气等^[13],收集时涉及的资源消耗主要是电力和柴油^[14-16],采用 3 种工艺使玉米秸秆更加稳固,计算公式如下:

$$EM_{input} = \sum_{j=1}^7 (EF_{input,j} \times Input_{value}) \quad (13)$$

$$EM_{collect} = \sum_{j=1}^3 (EF_{collect,j} \times Collect_{value}) \quad (14)$$

(2) 生物质运输阶段

玉米秸秆的运输方式设定为公路运输,运输平均距离为 75 km,计算公式如下:

$$EM_{transp} = EF_{transp} \times D_{corn} \times Q_{corn} \quad (15)$$

1.3.3 CHTM 碳排放计算

(1) 二氧化碳捕集阶段

该阶段的碳排放主要包括捕集过程中的碳排放、电力排放以及捕集的二氧化碳量^[17],MEA 溶剂的碳排放因子为 0.002 742 kg/MJ^[18],计算公式如下:

$$EM_{ac} = EM_{CCUS} + EM_{MEA} + EM_{electr} \quad (16)$$

(2) 气体运输及压缩阶段

本系统中的运输及压缩阶段主要是氢气和二氧化碳气体的运输及压缩,计算公式如下:

$$EM_{transp} = EM_{transp,H_2} + EM_{transp,CO_2} + EM_{compress} \quad (17)$$

H_2 采用长管拖车运输方式,满载氢气质量

350 kg^[19],每百公里耗油量为 25 L,CO₂ 运输过程的碳排放与运输距离及单位能耗相关,管道运输电耗为 1.3 kWh/(t·km)^[20],氢气和二氧化碳的压缩过程仅考虑压缩机产生的碳排放,即电力消耗的排放,计算公式如下:

$$EM_{\text{transp}_H_2} = Q_{H_2}/Q_{\text{full}} \times D_{H_2} \times \text{Disel}_{\text{dw}} \times \rho \times EF_{\text{diesel}} \quad (18)$$

$$EM_{\text{transp}_CO_2} = D_{CO_2} \times EM_{\text{electr}_CO_2} \times EF_{\text{electr}} \quad (19)$$

$$EM_{\text{compress}} = ER_{\text{compress}} \times EF_{\text{electr}} \quad (20)$$

2 结果与讨论

2.1 单位能耗对比分析

根据流程模拟和式(5),能耗计算结果如表 4 所示。CTM、BTM 和 CHTM 生产的甲醇单位能耗分别为 1.40、1.26、1.48 t/t MeOH。BTM 路线以生物质为原料,因结构疏松、气化活性高,所需气化温度较低,且原料热值远低于煤,因此原料能耗显著低于 CTM,表现出最低的单位能耗。CHTM 中氢气由 AWE 电解水提供,受限于 60%~75%的效率及电解过程中低品位热量难以回收,电能损失较大。同时,由于 CO₂ 加氢反应所需氢气量较大,导致电力消耗显著上升。尽管 CHTM 工艺中不存在气化及净化过程,系统流程较简洁,但氢气制备与碳捕集的能耗较高,使得单位能耗高于 CTM。

表 4 CTM、BTM 和 CHTM 的能耗比较

	CTM	BTM	CHTM
蒸气	-65.2 GJ	48.9 GJ	-12.6 GJ
冷却水	2.85 GJ	4.65 GJ	4.26 GJ
制冷	87.2 GJ	97.2 GJ	4.41 GJ
压缩机	91.6 GJ	101.4 GJ	137.7 GJ
电解槽	—	—	1514.9 GJ
碳捕集	—	—	320.4 GJ
制氧	49.3 GJ	33.4 GJ	—
原料	1697.7 GJ	1392.4 GJ	—
单位能耗(CE ^①)	1.40 t/t MeOH	1.26 t/t MeOH	1.48 t/t MeOH

注:①单位中 CE 指标准煤。

从表 4 中的能耗分解可以看出,CTM 高温反应产生多余蒸气,不仅满足自身需求,还可对外输出,但也带来额外热损失;BTM 则为蒸气净输入,系统余热利用较为充分;而 BTM 粗合成气中 CO₂ 含量为 CTM 的 1.56 倍,冷却及脱除负荷增加,导致制冷与冷却水能耗上升。CTM 和 BTM 主要以 CO 加氢为主,氢气消耗量低。此外,CHTM 虽无气化与净化过

程,其合成余热所产蒸气亦可满足系统用热并实现外供,此外,由于高氢气需求及 MEA 吸收法带来的附加能耗导致压缩机与碳捕集系统能耗显著。总体而言,尽管 CHTM 流程相对简化,但由于氢气用量大、碳捕集耗能高和余热利用不足,系统总能耗最高。

2.2 单位成本对比分析

在年产 36 万 t 甲醇规模下,CTM、BTM 和 CHTM 的总投资分别为 26.7 亿、36.1 亿、30.4 亿元,其中 BTM 单位甲醇产量投资最高,为 9 964 元/(t·a⁻¹)。其主要原因在于玉米秸秆热值较低,需更大量原料以满足产量要求,导致气化炉放大、合成气气量增大,从而使下游分离净化设备体积与投资显著增加。相比之下,CTM 技术成熟、流程优化,单位投资最低,为 7 381 元/(t·a⁻¹);CHTM 虽然流程简洁、设备种类少,但受限于电解槽成本,单位投资为 8 389 元/(t·a⁻¹),处于中间水平。

在年产 36 万 t 甲醇规模下,CTM、BTM 和 CHTM 的产品成本分别为 1 958、2 618、3 584 元/t,主要成本分布如表 5 所示。CTM 与 BTM 的原料与公用工程成本占比分别为 80.8%和 81.5%,CHTM 中原料及公用工程成本占比升至 85%。因此原料费用和公用工程是生产过程的主要成本来源。这里需要说明,用于电解水制氢的电力在 CHTM 路线中按照原料成本计。对比来看,BTM 的原料成本为 CTM 的 1.34 倍,CHTM 则为 CTM 的 1.83 倍,主要因 BTM 所用玉米秸秆热值较低,原料消耗量大;CHTM 则因电解水制氢导致电力成本显著增加。公用工程方面,BTM 电耗较高,较 CTM 增加约 11.7%,主要源于冷却与压缩负荷加大;而 CHTM 以电解与碳捕集替代气化及水煤气变换单元,较 BTM 节约 8.4%的水耗和 28.4%的电耗。

表 5 CTM、BTM 和 CHTM 的产品成本比较 元/t

单元	CTM 工艺	BTM 工艺	CHTM 工艺
原料	897.36	1189.43	2793.10
公用工程(水、电)	696.52	945.81	256.53
折旧费	94.91	127.69	132.64
单位成本	1958.00	2618.00	3584.00

表 6 显示原料成本在总成本中占比最高,通过改变主要原料的价格,分析可得当煤价低于 1 000 元/t 时,CTM 成本优势明显;当煤价高于 1 500 元/t 时,低于 600 元/t 的玉米秸秆价格和低于 0.2 元/kWh 的绿电价格,可以使绿色甲醇具有良好的成本优势。

表6 CTM、BTM、CHTM成本比较

煤制甲醇		生物质制甲醇		二氧化碳加氢制甲醇	
煤价/ (元·t ⁻¹)	甲醇 成本/ (元·t ⁻¹)	玉米 秸秆价/ (元·t ⁻¹)	甲醇 成本/ (元·t ⁻¹)	绿电电价/ (元·kWh ⁻¹)	甲醇 成本/ (元·t ⁻¹)
700	1958	600	2618	0.1	1457
1000	2358	800	3031	0.2	2521
1500	3025	1000	3444	0.3	3584
2000	3692	1200	3857	0.4	4647

表7显示,甲醇单位生产成本随规模扩大而下降。CTM和BTM对规模变化更敏感,主要因设备投资较高。例如,产能从10万t/a降至2万t/a时,CTM的操作维护费和折旧费增幅分别高出CHTM 12.43%和6.43%,BTM则高出17.8%和11.9%。因此,CHTM的单位成本对规模变化的敏感性最低。

表7 不同规模的甲醇单位成本对比 元/t

规模	CTM	BTM	CHTM
2万t/a	2741	3446	3830
10万t/a	2235	2937	3631
36万t/a	1969	2618	3584

2.3 单位碳排放对比分析

基于从摇篮到坟墓的LCA原则,并采用排放因子法对3种甲醇合成工艺进行碳排放核算,结果见表8。CTM工艺的单位甲醇碳排放量为3.84t/t,处于文献报道的范围内,且明显高于BTM和CHTM工艺。煤炭开采及生产过程中的直接排放为主要来源,前者因逃逸气体和高电耗导致大量排放,后者由于低温甲醇洗释放大量的CO₂,同时气化后的合成气氢碳比偏低,经水煤气变换调节后,有57%的CO被转化为CO₂,导致排放量显著增加,成为生产环节的最大碳排放源。

表8 CTM、BTM和CHTM各阶段碳排放比较 t/t

	CTM	BTM	CHTM
原料获取阶段	1.040	-3.096	-1.648
原料运输阶段	0.018	0.014	0.128
甲醇生产阶段	1.407	1.849	0.312
终端使用阶段	1.375	1.375	1.375
总碳排放	3.84	0.142	0.167

相比之下,BTM工艺的单位甲醇碳排放量为0.142t/t,具有一定的近零碳排放特征。在原料获

取阶段,碳来源于光合作用从大气中吸收的二氧化碳。由于BTM需要80%的CO来进行水煤气变换,产生的CO₂比CTM多排放了15tCO₂,因此BTM生产过程中的碳排放最高。综合来看,由于BTM吸收的CO₂与释放的CO₂基本上相抵,因此能够实现近零碳排放。

CHTM工艺的单位甲醇碳排放量是0.167t/t,表现为近零碳排放特征。原料CO₂来自生物质碳捕集过程,表现为负碳排放。此外,CHTM工艺中的氢气是利用绿电通过碱性电解槽电解水产生的,因此整个氢气生产过程中的碳排放可忽略不计。由于在合成过程弛放气中释放少量CO₂,因此存在一定的碳排放。

3 结论

本研究从能耗、总投资、成本以及生命周期碳排放对绿色甲醇进行了分析评估,并与CTM工艺进行对比。结果表明,BTM工艺相较于CTM和CHTM具有最低的单位能耗,为1.26t/t,这是由于生物质的低热值和更加高效的余热利用。基准条件下,CTM的投资最低,为7381元/(t·a⁻¹);由于生物质消耗量大导致装置尺寸更大,BTM工艺的投资最高。由于工艺成熟程度高,CTM的生产总成本最低。但当CHTM的绿电价格低于0.2元/kWh、BTM的生物质原料价格低于600元/t时,绿色甲醇具有良好的经济性。BTM和CHTM均具有近零碳排放特征,全生命周期单位甲醇碳排放量分别为0.142、0.167t/t。

参考文献

- [1] Yang C J, Jackson R B. China's growing methanol economy and its implications for energy and the environment [J]. *Energy Policy*, 2012, 41: 878-884.
- [2] Li J, Ma X, Liu H, et al. Life cycle assessment and economic analysis of methanol production from coke oven gas compared with coal and natural gas routes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 299-308.
- [3] International Renewable Energy Agency. Innovation outlook: Renewable methanol [R]. Germany: IRENA, 2021.
- [4] Liu J, Zhao J, Wei H, et al. Comparative environmental assessment of methanol production technologies: A cradle-to-gate life cycle analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 302: 118128.
- [5] Harris K, Grim R G, Huang Z, et al. A comparative techno-economic analysis of renewable methanol synthesis from biomass and CO₂: Opportunities and barriers to commercialization [J]. *Applied Energy*, 2021, 303: 117637.

(下转第245页)

- Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 81–92.
- [2] 韩飞超,汪旭,张荣,等.石灰石—石膏湿法烟气脱硫废水处理工艺的优化改造[J].中国给水排水, 2016, 32(14): 99–102.
- [3] Meng S C, Cao J, Chen G D, *et al.* Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1143–1151.
- [4] 霍飞羽.电厂脱硫废水回用及零排放技术研究进展[J].现代化工, 2024, 44(9): 64–68.
- [5] 韦飞,刘景龙,王特,等.燃煤电厂脱硫废水零排放技术探究[J].水处理技术, 2017, 43(6): 34–36.
- [6] 中华人民共和国国务院.水污染防治行动计划: 国发[2015]17号[A]. 2015.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. HJ 2301—2017 火电厂污染防治可行技术指南[S].北京: 中国环境出版社, 2017.
- [8] 安雪峰,刘广建,陈海平.燃煤电厂脱硫废水热法零排放系统设计及分析[J].洁净煤技术, 2022, 28(6): 175–183.
- [9] 陈程,陈鑫,徐凤,等.燃煤机组脱硫废水零排放物料—能—水耦合机制及优化[J].化工学报, 2021, 72(11): 5800–5809.
- [10] 段守保,韩平,刘彩霞.多效蒸发工艺处理火电厂脱硫废水的影响研究[J].东北电力技术, 2023, 44(3): 40–44.
- [11] 麻晓越,梁秀广.基于余热利用的脱硫废水浓缩减量技术研究[J].现代化工, 2023, 43(S1): 76–80.
- [12] 刘敏,刘平元,赵亮.燃煤机组脱硫废水多效蒸发浓缩工艺的模式建立及模拟[J].发电设备, 2020, 34(3): 179–183.
- [13] 刘锋瑞.脱硫废水低温高效蒸发浓缩技术研究[D].太原: 山西大学, 2023.
- [14] 王仁雷,王丰吉,戴瑜,等.300 MW 机组脱硫废水旁路蒸发干燥系统性能试验研究[J].工业用水与废水, 2021, 52(3): 23–26.
- [15] 吴伟.脱硫废水喷雾干燥在电厂的实际应用[J].上海节能, 2021, (9): 1033–1037.
- [16] 冉初萌.烟气余热蒸发浓缩干燥技术在电厂脱硫废水零排放中的应用[J].机电信息, 2020, (35): 75–77.
- [17] 侯致福,魏晓仪,邢树涛,等.300 MW 机组低温余热闪蒸脱硫废水零排放技术应用研究[J].华电技术, 2020, 42(3): 31–36.
- [18] 谭天恩,窦梅,等.化工原理(上册)[M].4版.北京: 化学工业出版社, 2013.
- [19] 陈宝明.660 MW 循环流化床燃煤电站热力系统优化及提效研究[D].南京: 东南大学, 2020.
- [20] 江成林.循环流化床锅炉建模及效率计算[D].天津: 天津大学, 2016.
- [21] 刘岗,黄玉妹,沈洪洪,等.低温省煤器联合暖风器在 630 MW 超临界机组锅炉烟气余热利用系统中的应用[J].上海电力学院学报, 2019, 35(4): 373–378.
- [22] 江成林,李士雨.基于 Aspen Plus 的循环流化床锅炉效率的计算[J].计算机与应用化学, 2015, 32(9): 1109–1112.
- [23] 樊泉贵,阎维平,闫顺林,等.锅炉原理[M].2版.北京: 中国电力出版社, 2013.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S].北京: 中国环境科学出版社, 2012. ■

(上接第 239 页)

- [6] Li G, Liu Z, Liu F, *et al.* Thermodynamic analysis and techno-economic assessment of synthetic natural gas production via ash agglomerating fluidized bed gasification using coal as fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(51): 27359–27368.
- [7] Zhang Z, Delcroix B, Rezazgui O, *et al.* Simulation and techno-economic assessment of bio-methanol production from pine biomass, biochar and pyrolysis oil[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44: 101002.
- [8] 雷昕儒.煤气化合成气调制制备甲醇的过程模拟、技术经济分析和生命周期评价[D].合肥: 安徽大学, 2020.
- [9] Gao R, Zhang C, Lee Y J, *et al.* Sustainable production of methanol using landfill gas via carbon dioxide reforming and hydrogenation: Process development and techno-economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122552.
- [10] Hamelinck C N, Faaij A P C, den Uil H, *et al.* Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential[J]. Energy, 2004, 29(11): 1743–1771.
- [11] 李贵贤,曹阿波,孟文亮,等.耦合 SOEC 的 CO₂ 制甲醇过程设计与评价研究[J/OL]. 化工学报, [2025–06–09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.TQ.20230718.1214.002.html>.
- [12] Ou X, Yan X, Zhang X. Using coal for transportation in China: Life cycle GHG of coal-based fuel and electric vehicle, and policy implications[J]. Int J Greenh Gas Con, 2010, 4: 878–887.
- [13] Wang S, Li C, Hu Y, *et al.* Assessing the prospect of bio-methanol fuel in China from a life cycle perspective[J]. Fuel, 2024, 358: 130255.
- [14] Ji J, Zhang H, Peng D, *et al.* Estimation of typical agricultural machinery emissions in China: Real-world emission factors and inventories[J]. Chemosphere, 2022, 307: 136052.
- [15] Huang X, Cheng L, Chien H, *et al.* Sustainability of returning wheat straw to field in Hebei, Shandong and Jiangsu provinces: A contingent valuation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 1290–1298.
- [16] Poluzzi A, Guandalini G, Guffanti S, *et al.* Flexible power & biomass-to-methanol plants: Design optimization and economic viability of the electrolysis integration[J]. Fuel, 2022, 310: 122113.
- [17] 汪志和,张明俊,杨平,等.离子液体在 CO₂ 捕集中的开发与应用[J].能源化工, 2024, 45(1): 16–20.
- [18] Lacy R, Molina M, Vaca M, *et al.* Life-cycle GHG assessment of carbon capture, use and geological storage (CCUS) for linked primary energy and electricity production[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 42: 165–174.
- [19] 罗仁英.煤制氢气生命周期碳足迹研究[D].北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [20] 轩昂,刘骏,彭维珂,等.面向煤制氢电厂 CCUS 改造的规划方法及碳足迹评估[J/OL]. 中国电机工程学报, [2025–06–09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240492>. ■