

# 基于能值理论的多联产可持续性分析\*

韩波<sup>1</sup>, 代胜典<sup>1</sup>, 于戈文<sup>1,2</sup>, 丁健<sup>1,2</sup>, 王延铭<sup>1,2</sup>, 王玉清<sup>1,2</sup>, 郭小惠<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学 化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区煤化工与煤炭综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 针对生物质能源、联产以及碳捕获与储存 (CCS) 技术的应用对于化学工业可持续发展的重要影响, 首先构建了生物质与煤掺混共气化-费托合成油-电多联产系统模型, 计算并分析了带有/没有 CCS 时系统物质转换和能量利用效率。其次利用能值分析方法全面评估系统的环境友好度以及可持续性。结果表明: 对于带有 CCS 的多联产系统, 生物质比为 80% 时, 可持续性最佳; 对于没有 CCS 的多联产系统, 可持续性最佳的生物质比则为 60%。

**关键词:** 可持续发展; 能值分析; 多联产; 生物质能源; 烟分析

中图分类号: TQ529.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0037-07

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.005

## Sustainability analysis of polygeneration systems based on energy theory

HAN Bo<sup>1</sup>, DAI Shengdian<sup>1</sup>, YU Gewen<sup>1,2</sup>, DING Jian<sup>1,2</sup>, WANG Yanming<sup>1,2</sup>,  
WANG Yuqing<sup>1,2</sup>, GUO Xiaohui<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Coal Chemical Engineering & Comprehensive Utilization, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to address the important impacts of biomass energy, cogeneration and carbon capture and storage (CCS) technologies for the sustainable development of the chemical industry, a model of biomass-coal co-gasification-Fischer-Tropsch liquid-electricity polygeneration system was constructed. The efficiency of the system with/without CCS in terms of material conversion and energy utilization was calculated and analyzed. Secondly, the environmental friendliness and sustainability of the system were comprehensively evaluated using energy analysis method. The results show that the best sustainability is achieved with a biomass ratio of 80% for the polygeneration system with CCS and 60% for the PGP system without CCS.

**Key words:** sustainable development; energy analysis; polygeneration; biomass energy; energy analysis

为应对日益严峻的环境恶化问题, 联合国于 2015 年提出了《2030 年可持续发展议程》<sup>[1]</sup>, 旨在推动国际合作, 实现可持续发展。各国在科技发展、工业生产、社会生活等各个领域积极创新, 减少废物

产生和能源消耗, 同时保持经济增长和行业竞争力, 以实现社会的可持续发展<sup>[2]</sup>。产业升级和转型, 特别是化工行业的可持续升级转型, 是实现这一目标的关键<sup>[3]</sup>。其中, 生物质能源、煤的清洁利用和碳

\* 基金项目: 国家自然科学基金研究项目 (22062018); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费研究项目 (2023QNJS064)。

作者简介: 韩波, 男, 硕士研究生。

通信作者: 于戈文, 男, 教授, E-mail: yugw0214@163.com

收稿日期: 2024-12-20

捕获与储存 (CCS) 是非常重要的研究领域。

生物质能源因其低成本和可持续性,在减少化石燃料消耗和废弃物排放方面扮演着重要角色<sup>[4]</sup>。尽管生物质能源成分变化大、能量密度低,且受季节性因素影响,限制了其在大规模工业应用中的应用<sup>[5]</sup>,但其高 H/C 比在与传统化石能源共加工时能够加速反应并改善产品组成<sup>[6-8]</sup>。生物质与煤掺混共气化技术不仅提升了能源利用效率,还减少了环境污染,为实现能源可持续利用提供了切实可行的途径。

煤气化技术作为煤基多联产系统的核心,能够规模化生产气体燃料、液态燃料、化工原料及电力等多种能源产品<sup>[9-10]</sup>。与仅生产单一产品的系统相比,多联产系统在提高热能效率和增强环境可持续性方面展现出显著优势<sup>[11-12]</sup>。煤基多联产系统通过提高气化率和整合 CCS,能够进一步减少二氧化碳排放,提升系统可持续性。

在煤基多联产系统的物质和能量优化研究中,总能系统理论被广泛应用,对提高能量利用效率起到了重要作用<sup>[13]</sup>。随着对可持续性评价需求的增长,生命周期评价(LCA)和能值评价方法成为评估系统可持续性的重要工具<sup>[14]</sup>。LCA 在计算隐性环

境排放方面具有优势<sup>[15]</sup>,但在评估社会服务和自然生态系统服务方面存在局限<sup>[16]</sup>。能值评价方法提供了一种全面的可持续性评估框架,通过追溯产品或服务的起源,将所有输入资源转化为统一的评估基准。综合考虑生产系统对环境、经济和社会的影响,将所有资源和人力劳动的贡献纳入能值转化率的计算中,全面评估系统对自然资源和人类社会可持续发展的影响<sup>[17]</sup>。

通过设计生物质-煤共气化-费托合成油-电多联产系统,建立能值分析模型,分析不同生物质质量分数对多联产系统能力利用效率以及环境友好度,同时详细分析加入 CCS 对系统可持续生产的影响。

## 1 流程设计与能值分析框架

### 1.1 流程设计

通过研究以不同比例掺混的生物质和煤为原料,构建了一个综合的生物质-煤共气化-费托合成油-电多联产系统,如图 1 所示。该系统由 3 个核心部分组成:气化端、化工端和动力端,每个部分承担着系统不同阶段的关键功能。

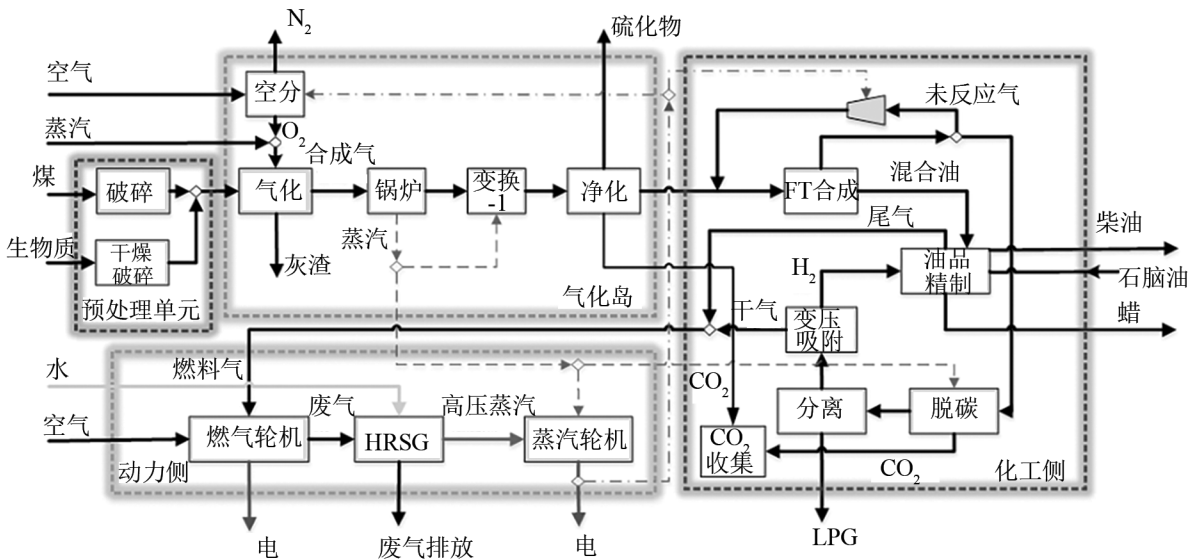


图 1 煤-生物质共气化-FT 合成油-电多联产系统流程

Fig. 1 Coal-biomass co-gasification-FT liquid-electricity system process

气化端包括空分单元、加压气流床气化单元、煤气变换单元和净化单元。将掺混的煤和生物质原料在气化炉中进行气化,随后,合成气通过低温甲醇洗涤,以去除  $H_2S$ 、 $CO_2$  等酸性气体组分。这也是系统

碳捕集和储存的主要工段。

化工端包括费托合成 (FTS) 单元、油品精制单元和硫回收单元。在 FTS 单元中,经过净化的合成气转化为烃类混合物。这些烃类混合物随后经过加

氢裂解和分离过程,生产出液化石油气(LPG)、柴油、石蜡和石脑油等产品。其中对 FTS 未反应气进行脱碳处理,与前面低温甲醇洗捕获的 CO<sub>2</sub> 共同储存。然后通过变压吸附(PSA)分离出纯度为 99.99% 的氢气,用于加氢裂解。

动力端由联合循环发电单元构成,燃气轮机所用燃料气来自于 FTS 的未反应气以及油品精致单元的小分子组成(如 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>,以及 C<sub>2</sub>~C<sub>3</sub> 的低碳烃)。另外,气化以及化工端副产的蒸气也用于蒸汽轮机发电。

### 1.2 能值分析框架

如图 2 所示,系统的能值输入分为 3 个主要部分:来自生物质、水和空气的可再生能值(R),来自煤的不可再生能值(N),包括成本和其他购买的能值输入(F),以及系统产品产出能值(Y)。能值评估过程包括定义研究区域、建立能值基线、收集输入和输出数据以及计算能值指标。

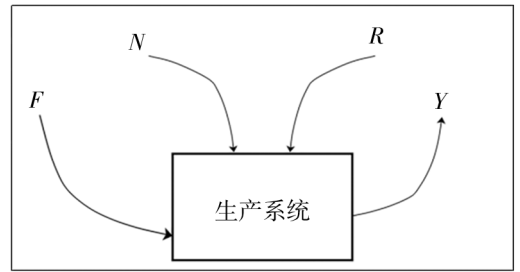


图 2 能值分析范围与边界框

Fig.2 Range and boundary of emerge analysis

## 2 建模

### 2.1 关键参数

#### 2.1.1 原料

气化原料中所使用的生物质为脱水木屑,而煤种选择了内蒙古东胜地区的煤炭。表 1 列出了煤和生物质的工业分析、元素分析以及低位发热量。

表 1 煤和木屑的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate of coal and sawduct

原料	工业分析/(质量分数,%)				LHV/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )
	FC <sub>d</sub>	V <sub>daf</sub>	A <sub>d</sub>	M <sub>d</sub>	
煤	62.46	31.77	5.78	8.61	28 873
生物质	18.06	70.14	3.94	7.86	18 313
原料	元素分析/(质量分数,%)				
	C	H	O	N	S
煤	73.31	4.38	12.56	0.84	0.13
生物质	48.88	6.29	31.27	1.7	0.06

#### 2.1.2 系统各自单元关键运行参数

气化单元、FTS 单元以及 IGCC 单元燃气轮机与蒸汽轮机的关键运行参数见表 2。

表 2 主要运行参数

Table 2 Main operational parameters

单元	参数	数值
气化	气化温度/°C	1 400
	气化压力/MPa	4.2
	反应器温度/°C	230
	反应器压力/MPa	2.5
FT 合成	CO 转化率/%	81
	CO <sub>2</sub> 选择性/%	28
	H/C 比/%	1

单元	参数	数值
联合循环发电	燃气轮机进口温度/°C	1 400
	燃气轮机出口温度/°C	706
	空气温度/°C	15
	空气压缩比/%	15.4
	空气压缩级等熵效率/%	87.5
	燃气轮机等熵效率/%	89.5

## 2.2 多联产系统分析评价方法

### 2.2.1 焓分析

在能值理论中,对于化工过程的能值计算是基

于有效能的,因此首先对系统的能量和非能量材料进行焓分析至关重要<sup>[18]</sup>。

焓包括物理焓( $Ex_{ph}$ )和化学焓( $Ex_{ch}$ )对于实际气体,物理焓计算包括剩余焓和熵,以符合焓和熵的热力学状态函数。PR方程用于FTS气体混合物,而RK-Soave方程用于液态烃混合物。物理焓的计算模型见公式1。

$$Ex_{ph} = \int_{T_0}^T \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) C_p dT + RT_0 \ln \frac{p}{p_0} + H^R - T_0 S^R. \quad (1)$$

式中: $C_p$ 是物质的恒压比热容, $J/(kg \cdot K)$ ;  $R$ 是气体常数,其值为 $8.3145, j/(mol \cdot K)$ ; 变量 $p$ 是系统压力, $Pa$ ;  $H^R$ 是剩余焓, $kJ/(mol \cdot K)$ ;  $S^R$ 是剩余熵, $kJ/(mol \cdot K)$ 。

化学焓基准采用龟山-吉田基准物体系<sup>[19]</sup>,环境温度 $T_0$ 为 $298.15 K$ ; 环境压力 $P_0$   $1.01325 \times 10^5 Pa$ 。

$$Ex_{ch} = 34215.87\omega(C) + 21.97\omega(N) + 116702.76\omega(H) + 18260.36\omega(S) - 13278.59\omega(O) - 298.15 \times 0.71768\omega(M) + 0.6276\omega(O) \times [32792.8\omega(C) + 141791.11\omega(H) - 17723.84\omega(O) + 16019.49\omega(S)]. \quad (2)$$

式中: $\omega(C)$ 、 $\omega(N)$ 、 $\omega(H)$ 、 $\omega(S)$ 、 $\omega(O)$ 为燃料中相应元素分析结果,% ;  $\omega(M)$ 为燃料工业分析中灰分,%。

## 2.2.2 能值分析

1) 能值产出率( $EYR$ ),如式(3):

$$EYR = \frac{R + N + F}{F}. \quad (3)$$

$EYR$ 是一个反映系统产出与其社会经济投入之间关系的比率,它衡量一个系统将投入转化为产出的效率。 $EYR$ 具备多重功能:不仅可以评估系统的可持续性能,还能用于对比在不同资源配置条件下的生产效率;同样,它也能用于评估在不同生产工艺中,特定产品产出的效率。

公式(3)中 $R$ 、 $N$ 、 $F$ 分别由公式(4)~(6)进行计算:

$$R = Em_{ExR} = Ex_A \times Tr_A + Ex_B \times Tr_B + Ex_W \times Tr_W. \quad (4)$$

式中: $Ex$ 为输入的焓, $Tr$ 为物质的能值转换率,下标A、B和W分别表示空气、生物质和水。

不可再生能源的计算公式:

$$N = Em_{ExC} = Ex_C \times Tr_C. \quad (5)$$

式中: $Ex_C$ 为煤的焓, $Tr_C$ 为煤的能值转换率, $C$ 为煤。生产成本能值计算公式:

$$F = \sum_{c=1}^c Z_c \times Tr_c. \quad (6)$$

式中: $Z_c$ 为生产成本, $Tr_c$ 为成本的能值转化, $c$ 为系统成本,包括(固定成本、建设成本、可变O&M成本和 $CO_2$  TS&M成本)。

2) 环境负载率( $ELR$ )

$$ELR = \frac{N + F}{R}. \quad (7)$$

$ELR$ 是一个衡量工业生态系统对环境的影响程度的指标,该指标反映系统在生产过程中对环境的总体压力。

3) 可持续指标( $ESI$ )

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}. \quad (8)$$

$ESI$ 是系统能值产出率与环境负荷率的比值,它被用来评估系统在特定条件下获取更高经济效益的能力和可持续性的水平,从而反映系统的可持续发展潜力。该指标揭示了系统在产出效率和环境影响之间的平衡状态:提高能值产出的效率以及减少环境负荷,这两个因素共同标志着系统可持续性水平的提升。

4) 能值转换率( $Tr$ )

$$Tr_i = \frac{Y_i}{E_i}. \quad (9)$$

$Tr$ 是指产品(能量、物质或货币)所包含的能值与其自身能量的比值,即单位产品中所拥有的能值, $i$ 表示不同的产品。

## 3 结果与讨论

图3(a)展示了不同生物质与煤混合比例下多联产系统的物料输入变化趋势。从图3(b)可以看出,由于生物质本身的含碳量低于煤,单纯使用生物质原料相比于煤减少约46.4%的油品产量, $CO_2$ 捕获量下降了34.2%。这一结果显示了生物质和煤在化学组成上的差异对产品产量的显著影响。图3(c)显示,系统中加入CCS技术后会导致发电量减少49%~54%。另外,这些数据表明,CCS技术的集成对电力生产和碳捕获效率有着显著影响。然而,CCS技术的引入虽然在一定程度上降低了发电量,但明显提高了系统的碳捕获能力,这对于减少温室气体排放和提高系统的可持续性具有重要意义。

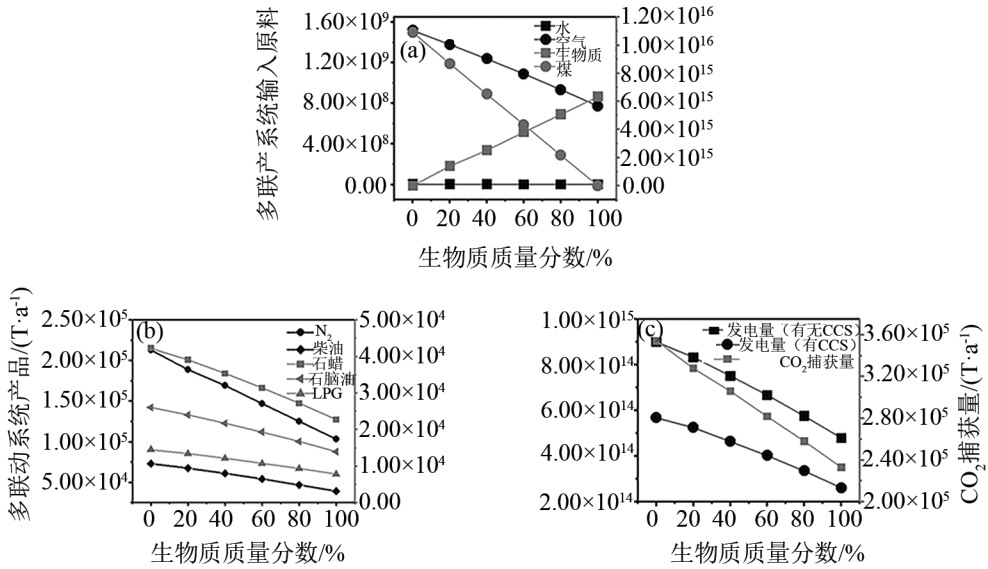


图3 不同生物质比例多联产系统输入/输出数据

Fig. 3 Input/output data for polygeneration systems with different biomass ratios

(a)原料;(b)产品;(c)发电量及CO<sub>2</sub>捕获量。

图4(a)、(b)展示了在有/无CCS技术的情况下,系统能值的变化趋势。随着混合物中生物质比例的增加,能值输入呈现下降趋势。这一现象可以归因于生物质相对于煤炭具有更低的单位能值。具体而言,生物质的单位能值较煤炭低71%。这种单位能值的差异直接影响了总能值输入,因为能值指数是基于系统输入的能量质量来计算的。值得注意

的是,采用CCS技术的系统和不采用CCS的系统相比较,能值高40%左右。这一差异可能与CCS技术在提高系统能效方面的潜力有关。CCS技术通过捕获和封存二氧化碳,减少了温室气体排放,从而提高了系统的能量利用效率。此外,CCS在运行过程中消耗大量电能也影响了系统的能量输出,进而导致能值的降低。

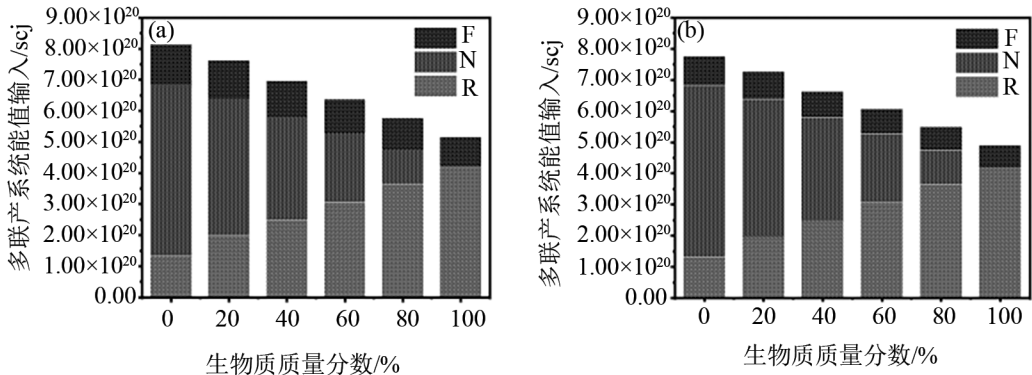


图4 不同生物质比例的多联产能值指数

Fig. 4 Emerge indicator for the polygeneration systems of different biomass ratios

(a)有CCS;(b)无CCS。

图5(a)、(b)呈现了内生物质比例增加时多联产系统EYR和ELR的变化趋势。具体而言,有CCS的多联产系统EYR从6.31下降至5.56,无CCS的

多联产系统EYR则从8.47下降至7.21,分别降低了11.9%和14.9%。ELR的变化更为显著,有CCS的多联产系统从5.15降至0.22,无CCS的多联产

系统从 4.86 降至 0.16, 分别降低了 95.7% 和 96.7%。*EYR* 与 *ELR* 的降低表明, 增加生物质比例对能值产出率的影响相对较小, 但对系统的环境负荷效率有显著提升作用。

此外, 图 5(a)、(b) 还揭示了系统从纯煤炭过渡到生物质时 *ESI* 的显著变化。有 CCS 的多联产系统 *ESI* 值从 1.23 增加到 25.37, 而无 CCS 的多联

产系统 *ESI* 值从 1.74 增加到 44.77。后者的 *ESI* 变化量明显大于前者, 这是由于 *ESI* 是 *EYR* 和 *ELR* 相互关联共同作用的结果。在可持续性研究中, *ESI* 在 1 到 10 的范围被广泛认可。有 CCS 的多联产系统, 最优 *ESI* 为 9.50, 此时生物质比例为 80%。无 CCS 的多联产系统, 最优 *ESI* 为 7.94, 此时生物质比例为 60%。

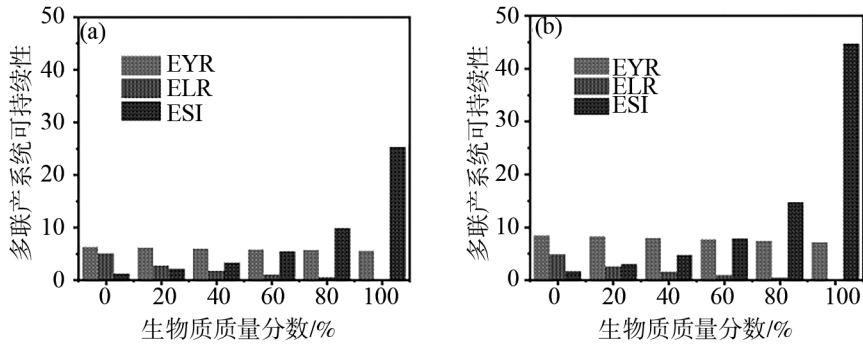


图 5 多联产系统可持续性指标

Fig. 5 Sustainable indicators for polygeneration systems

(a) 有 CCS; (b) 无 CCS。

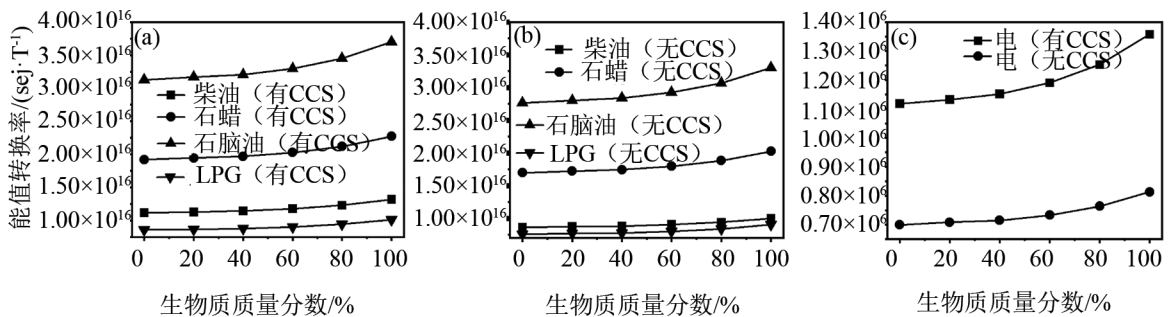


图 6 多联产产品能值转换率

Fig. 6 Emergent conversion efficiency of products of polygeneration systems

(a) 有 CCS; (b) 无 CCS; (c) 电。

从图 6 可以看出, 随着生物质混合比例的增加, 系统产品的能值转换率 ( $Tr$ ) 呈现出一致的上升趋势。当原料中生物质比率不断增加时,  $Tr$  不断升高, 原因在于能值输入的下降幅度大大高于产品能值的下降幅度。另外, 当原料中生物质比率不变时, CCS 的引入极大地提高了能值转换率。这一现象表明 CCS 虽然提高了系统能耗, 但是大大增加了整个多联产系统的能值输出。如图 6(c) 所示, CCS 的引入致使电力能值转换率增加了 60% 以上, 而在相同条件下无 CCS 时仅增加了 13.4%。此种差异主要

归因于 CCS 系统显著降低了发电量, 但并未对石油产品的生产产生负面效应。如图 6(a)、(b) 所示的油品能值转换率, 与电力能值转换率呈现出相同的变化趋势。在不同的产品中, 能值转换率的顺序为: 石脑油 > 石蜡 > 柴油 > LPG。LPG 具有最低的能值转换率, 这意味着其拥有最佳的能值转换效率。

## 4 结论

对生物质与煤共气化-费托合成油-电多联产系统进行了模拟计算与分析, 重点考察了不同生物质

比例、有/无 CCS 对多联产系统生产可持续性,结论如下:

1)在 FTS 分流比一定的条件下,随着生物质比例的增加,多联产系统的油品产量以及发电量均呈下降趋势。

2)随着生物质比例的增加,多联产系统在环境友好性方面展现出一定的优势。这一发现表明,在追求环境效益的同时,必须考虑系统能值产出的变化,尤其是在生物质比例增加的情况下。

3)生物质比例一定的情况下,加入 CCS 后,尽管系统总发电量有所降低,但系统的碳捕获能力显著提高,扩大了多联产系统 ESI 的有效范围,表明 CCS 的加入可以增强其在环境友好度以及可持续性方面的优势。

#### 参考文献:

- [1] ALESSANDRA C, ELEONORA G, CRISTINA C, et al. The role of sustainable energy and climate action plans: Synergies with regional sustainable development strategies for a local 2030 agenda[J]. *Environmental Development*, 2023, 47:100894.
- [2] SHUTTER Z. Conservation or revolution? The sustainable transition of textile and apparel firms under the environmental regulation: evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 382:135339.
- [3] LEE C C, ZHANG J, HOU S S. The impact of regional renewable energy development on environmental sustainability in China[J]. *Resources Policy*, 2023, 80:019951.
- [4] ZHOU L M, ZHANG G J, REINMÖLLER M, et al. Effect of inherent mineral matter on the co-pyrolysis of highly reactive brown coal and wheat straw[J]. *Fuel*, 2019, 239.
- [5] WEI J T, GONG Y, GUO Q H, et al. A mechanism investigation of synergy behaviour variations during blended char co-gasification of biomass and different rank coals[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131.
- [6] TCHAPDA A H, PISUPATI S V. A review of thermal co-conversion of coal and biomass/waste [J]. *Energies*, 2014, 7(3):1098.
- [7] WU Z Q, ZHANG J, FAN Y J, et al. Synergistic effects from co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with low-rank coal: a perspective based on the interaction of organic components[J]. *Fuel*, 2021, 306:121648.
- [8] 王丽,王喜明,陈义胜,等. 生物质高温水蒸气气化热力学模拟研究[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2017, 36(4):383.
- [9] CEN J M, FANG M X, WANG Q H, et al. Polygeneration technology of coal classification and its development prospect[J]. *Chemical Progress*, 2011(28):88.
- [10] 陈义胜,杨文明,庞赟估,等. 垃圾气化模拟研究[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2012, 31(2):189.
- [11] HUANG G P, LI Z Y, WANG J M. Development status of modern coal chemical industry in China and its impact on petrochemical industry[J]. *Chemical Progress*, 2015(124):295.
- [12] KNOOPE M M J, MEERMAN J C, RAMÍREZ A, et al. Futrue technological and economic performance of IGCC and FT production facilities with and without CO<sub>2</sub> capture: Combining component based learningcurve and bottom-up analysis[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16.
- [13] 金红光,张国强,高林,等. 总能系统理论研究进展与展望[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3):39.
- [14] ZADGAONKAR A L, MANDAVGANE A S. Framework for calculating ecological footprint of process industries in local hectares using emergy and LCA approach[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020, 22(10):1.
- [15] ZANG G Y, ZHANG J N, JIA J X, et al. Life cycle assessment of power-generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles [J]. *Renewable Energy*, 2020, 149.
- [16] JIANG J R, FENG X, YANG M B, et al. Comparative technoeconomic analysis and life cycle assessment of aromatics production from methanol and naphtha[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277:123526.
- [17] ALKHUZAIM L, ZHU Q Y, SARKIS J. Evaluating emergy analysis at the nexus of circular economy and sustainable supply chain management [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 254.
- [18] 黄宏. 低能耗捕集 CO<sub>2</sub> 煤基化工和电力联产过程设计与系统分析[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [19] 于戈文,王延铭,杨小丽,等. 基于 CO<sub>2</sub> 捕集的煤基费托合成油-动力多联产系统火用分析[J]. *化工进展*, 2017, 36(10):3682.

(责任编辑:张利萍)