

煤焦化学链气化流程模拟与系统炯分析

张 龙,何云龙,何德民,关 珺*
(大连理工大学化工学院,辽宁 大连 116024)

摘要:针对煤焦 CLG 流程,在 Aspen Plus 中搭建了包含干燥、热解、气化和再生单元的仿真模型,通过灵敏度分析探究工艺参数对系统气化性能的影响规律,并开展系统炯分析,揭示不同工艺参数下的炯损分布特征。结果表明,随着气化温度升高,系统的气化性能显著提升;900℃ 时系统基本达到热力学平衡,较 750℃ 工况,冷煤气效率从 54.1% 提升至 72.9%,炯效率从 67.9% 提升至 74.1%。对于氧碳比, $O/C=1.0$ 时,较 $O/C=0.5$ 工况,合成气产率增幅 41.1%,冷煤气效率从 51.3% 提升至 67.2%,炯效率从 62.8% 升至 74.1%。对于水碳比 $S/C=0.5$ 时,较 $S/C=0$ 工况,合成气产率增幅 38.1%,冷煤气效率从 67.3% 升至 83.2%,炯效率从 74.1% 升至 82.0%。系统炯分析表明系统炯损主要集中在气化单元和再生单元。研究结果为化学链气化工艺的工业化优化提供了理论参考。

关键词:化学链气化; Aspen Plus; 气化剂; 炯分析

中图分类号: TQ546

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0338-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.055

Process simulation and system exergy analysis of coal char chemical looping gasification

ZHANG Long, HE Yun-long, HE De-min, GUAN Jun*

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the coal char chemical looping gasification (CLG) process of coal char, a simulation model including drying, pyrolysis, gasification and regeneration units was built in Aspen Plus. The sensitivity analysis was used to explore the influence of process parameters on the gasification performance of the system, and the system exergy analysis was carried out to reveal the exergy loss distribution characteristics under different process parameters. The results show that with the increase of gasification temperature, the gasification performance of the system is significantly improved. At 900℃, the system basically reached thermodynamic equilibrium. Compared with 750℃, the cold gas efficiency increased from 54.1% to 72.9%, and the exergy efficiency increased from 67.9% to 74.1%. For O/C ratio, when $O/C=1.0$, compared with $O/C=0.5$, the syngas yield increased by 41.1%, the cold gas efficiency increased from 51.3% to 67.2%, and the exergy efficiency increased from 62.8% to 74.1%. For the steam-carbon ratio, when $S/C=0.5$, compared with $S/C=0$, the syngas yield increased by 38.1%, the cold gas efficiency increased from 67.3% to 83.2%, and the exergy efficiency increased from 74.1% to 82.0%. The system analysis shows that the exergy loss of the system is mainly concentrated in the gasification unit and the regeneration unit. The research results provide a theoretical reference for the industrial optimization of chemical looping gasification process.

Key words: chemical looping gasification; Aspen Plus; gasifying agent; exergy analysis

2024 年,中国煤炭产量已达 47.6 亿 t,国内能源消耗的 70% 源自煤炭^[1]。面对严峻的能源利用现状,迫切需要开发高效清洁利用煤炭的技术^[2]。化学链气化(chemical looping gasification, CLG)作为一项新兴的煤炭清洁高效转化技术,通过借助载氧体的晶格氧转移机制,将传统的单级氧化过程拆分为 2 个不同阶段,即煤还原为合成气以及载氧体通过氧化实现再生,重构了气化反应路径^[3-5]。该技术具有以下显著优势:通过晶格氧的选择性氧化有效避免了传统气化工序中氮气对合成气的稀释^[6];基于放热型载氧体再生机制,提高了能量效率^[7];与常规气化技术相比,预计可实现二氧化碳减排量达 80%^[8]。

目前国内外学者针对 CLG 流程的研究主要以实验室阶段和模拟计算 2 种方式开展^[9]; An 等^[10]研究表明, $CuFe_2O_4$ 载氧体相较于惰性床料,能够显著提高化学链气化反应速率。Wang 等^[11]利用赤泥开发了低成本的 Fe-Cu 复合载氧体,在煤的 CLG 过程中表现出优异的抗团聚能力。Ge 等^[12]研究发现当床层材料中氧化镍质量分数在 20%~50% 范围内,碳转化效率随着氧化镍质量含量的增加而提高。穆林等^[13]研究发现碱(土)金属的改性有助于提升载氧体的气化性能,经过改性的载氧体相较于天然铁矿石载氧体均表现出更优越的性能。张将等^[14]研究发现 $CuFe_2O_4$ 载氧体在 750~950℃ 范围内,晶格畸变导致氧缺陷增加,释氧度从 0.033 提升至

收稿日期:2026-03-17;修回日期:2026-06-08

作者简介:张龙(2001-),男,硕士生;关珺(1974-),女,博士,副教授,研究方向为煤的清洁高效利用,通讯联系人,guanjuan@dlut.edu.cn。

0.40,显著促进了 H_2 生成。吴宇婷^[15]研究发现水蒸气对 CLG 过程具有明显的促进作用,在适量的水蒸气条件下 H_2 产率和气化效率能够得到显著提高。Liu 等^[16]以氧化铁为载氧体研究了微藻的化学链气化,研究发现蒸气对 CLG 的影响体现在 2 个方面:作为气化剂,蒸气促进了合成气的产生,此外,蒸气还通过铁-蒸气反应提高了氢气产量。Xue 等^[17]使用 Aspen Plus 研究了基于铁基载氧体的 BCLG 流程,搭建的模型包括详细的动力学模型,并使用实验数据验证了过程模拟方法的有效性。Fernández 等^[18]在 Aspen Plus 中设计了基于 Ca-Cu 载氧体的 CLHG 工艺,评估了温度和压力对系统性能的影响。张坤等^[19]对煤热解-化学链气化耦合工艺进行模拟,结果表明该工艺热效率高于任一独立工艺。综上所述,目前 CLG 技术的实验室研究手段完善,但由于化学链气化全流程的复杂性和多模块特性,使得实验室研究效率较低,而采用模拟计算的方法可以提高研究效率和工艺迭代速度。

本研究着眼于煤焦 CLG 流程模拟,基于吉布斯自由能最小化原理在 Aspen Plus 软件中搭建了仿真模型,首先通过灵敏度分析探究气化温度、氧碳比、水碳比对气化性能的影响,再基于热力学第二定律开展了详细的系统焓分析。

1 研究方法

1.1 建模方法

本研究搭建的仿真模型分为干燥单元(DR)、热解单元(PR)、气化单元(FR)、再生单元(AR)4 部分。对于非常规组分,选择 HCOALGEN 和 DCOALIGT 用于计算非常规组分的焓值和密度。同时选择 PR-BM 物性方法计算常规混合和固体组分的热力学参数。

图 1 是在 Aspen Plus 软件中搭建的煤焦化学链气化工艺流程。在干燥单元采用 RStoic 模块模拟原煤的干燥过程;在热解单元采用 RYield 模块模拟煤的热解过程。根据焦油模拟蒸馏实验选取了 6 种模型化合物表示热解焦油组成^[20],组成如表 1 所示。热解气成分根据本课题组热解实验结果确定,组成如表 2 所示。在气化单元采用 RYield 和 RGibbs 模块联合模拟半焦的气化过程,利用 RYield 模块根据半焦的元素分析和工业分析将其转化为元素单质的形式,再计算组分参与的反应过程的热力学平衡。在再生单元,采用 RGibbs 模块模拟还原态载氧体被空气氧化再生的过程。为提高模拟系统的收敛性需对模型进行以下假设:①流程中所有单元均处于稳态运行;②忽略反应器的热损失;③灰分被

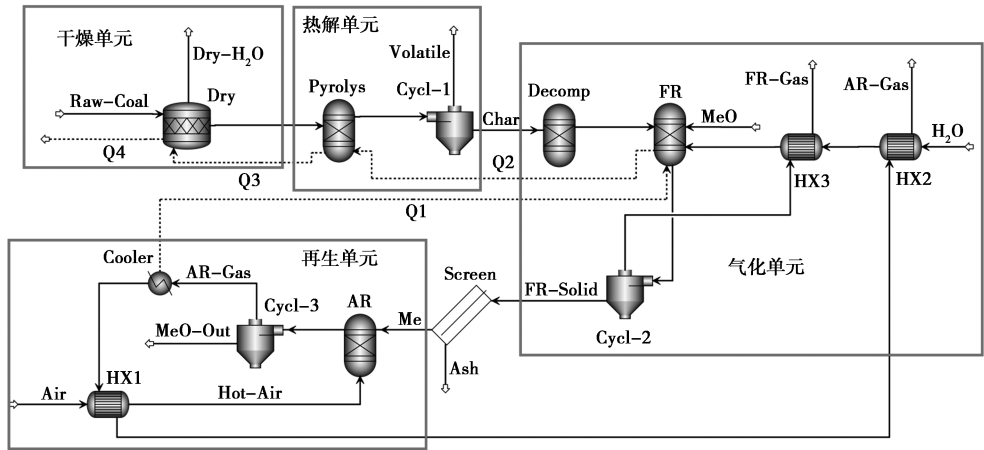


图 1 煤焦化学链气化工艺流程

表 1 焦油模型中各组分的组成(质量分数) %

C_7H_8	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}$	$\text{C}_{16}\text{H}_{10}$	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	C_{10}H_8
23.64	22.22	5.73	19.95	12.81	15.65

表 2 热解气模型中各组分的组成(质量分数) %

CO_2	CO	CH_4	C_2H_6	H_2
64.33	20.32	11.30	3.71	0.34

视为惰性组分;④煤和半焦的少量碱金属和其他微量元素等忽略不计。

1.2 原料和载氧体分析

在本文中化学链气化过程仿真中,原煤及半焦的工业分析和元素分析如表 3 所示。选用 Fe_2O_3 (质量分数 30%) 和 Al_2O_3 (质量分数 70%) 作为循环载氧体活性组分和惰性组分。

表3 原煤与半焦的工业分析和元素分析(质量分数)%

原料	工业分析				元素分析				
	M _{ad}	A _d	V _d	FC _d [*]	C	H	N	S	O [*]
原煤	9.60	16.07	42.59	41.34	68.76	5.14	1.19	0.51	24.40
半焦	1.10	22.54	28.46	49.00	78.85	3.99	1.81	0.77	14.58

注: * 通过差减法求得。

1.3 数据分析方法

1.3.1 气化性能分析方法

碳转化率(X_c)和冷煤气效率(CGE)用于评价CLG系统的气化性能。计算公式如下:

$$X_c(\%) = [(q_{CO} + q_{CO_2} + q_{CH_4})/q_c] \times 100\% \quad (1)$$

$$CGE(\%) = [(q_{syngas} \cdot V \cdot LHV_{syngas}) / (m_{char} \cdot LHV_{char})] \times 100\% \quad (2)$$

1.3.2 焓分析方法

系统焓分析是基于热力学第二定律的能量分析方法,由于所构建的CLG模型在稳态下运行,进行焓分析时,总焓由物理焓和化学焓组成,即:

$$E_x = E_{x,ph} + E_{x,ch} \quad (3)$$

常规组分的物理焓 $E_{x,ph}$ 和化学焓 $E_{x,ch}$ 分别由式(4)和式(5)计算:

$$E_{x,ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (4)$$

$$E_{x,ch} = n \sum [x_i(E_{x_i,ch}^\ominus + RT_0 \ln x_i)] \quad (5)$$

式中, n 为流股的总摩尔量; x_i 为组分 i 的摩尔分数; $E_{x_i,ch}^\ominus$ 为组分 i 的标准摩尔化学焓。

对于非常规组分,通常忽略其物理焓;化学焓 $E_{fuel,ch}$ 可根据燃料的低位热值估算,即:

$$E_{fuel,ch} = \beta \cdot LHV_{fuel} \quad (6)$$

$$\beta = 1.0064 + 0.1519H/C + 0.0616O/C +$$

$$0.0429N/C \quad (7)$$

式中, LHV_{fuel} 为燃料的低位热值; C 、 H 、 O 、 N 为燃料碳、氢、氧和氮元素的干基质量分数。

对于煤焦CLG流程而言产品为热解和气化单元的产物,所以焓效率 η_{ex} 由下式计算:

$$\eta_{ex} = [(E_{x,syngas} + E_{x,pyrogas} + E_{x,tar}) / (E_{x,coal} + E_{x,supply})] \times 100\% \quad (8)$$

式中, $E_{x,syngas}$ 为合成气的焓; $E_{x,pyrogas}$ 为热解气的焓; $E_{x,tar}$ 为焦油的焓; $E_{x,coal}$ 为原煤的焓; $E_{x,supply}$ 为额外补充的焓。

2 结果与讨论

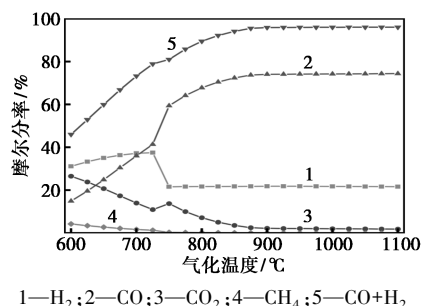
2.1 核心反应单元工艺分析

2.1.1 气化温度

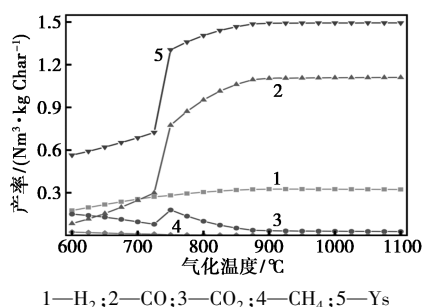
气化温度是影响煤焦化学链气化的重要因素。

在模拟条件为氧碳比0.9,无气化剂时,对气化温度在600~1100℃范围内进行了灵敏度分析。

图2(a)表明,随着温度的提升, CO 的摩尔分数逐步提高,反应温度的升高促进了碳的气化反应; H_2 的摩尔分数先下降后不变, CO_2 与 CH_4 的摩尔分数呈现相反趋势。图2(b)表示 CO 产率随温度上升显著提高, H_2 产率增长量较低,这是水煤气反应和逆水煤气变换反应共同作用的结果。合成气总产率(Y_s)在750℃后增速明显提高,至900℃时基本达到峰值。气化反应是强吸热过程,升高温度有利于气化反应的进行。



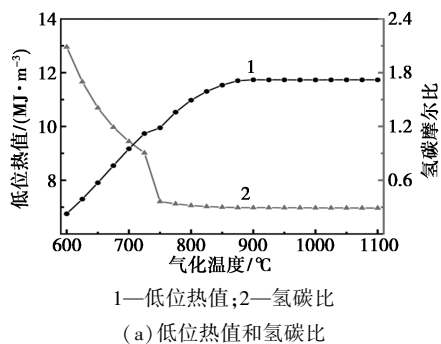
(a) 合成气组成



(b) 合成气产率

图2 气化温度对合成气组成和产率的影响

在图3(a)中展示了合成气热值随温度呈现升高趋势,这与合成气组成中($CO+H_2$)的摩尔分数变化一致。由图2可知, CO 浓度逐渐提高,而 H_2 浓度没有明显提升导致了氢碳比的下降。图3(b)表明了碳转化率和冷煤气效率随着温度升高先快速提升后在900℃左右达到最大值,升温促进了气化过



(a) 低位热值和氢碳比

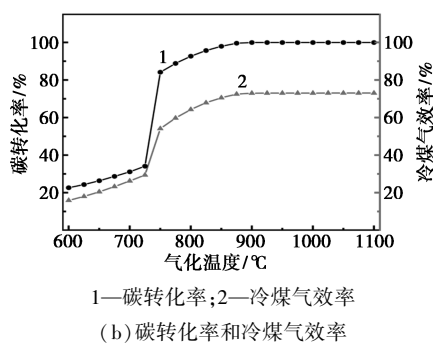


图3 气化温度对热值、氢碳比、碳转化率和冷煤气效率的影响

程,提高了气化效率,当温度大于 900℃ 后整体气化反应达到热力学平衡。

2.1.2 氧碳比

在模拟条件为气化温度 900℃,无气化剂时,对氧碳比在 0:1~1.5:1 范围内进行了灵敏度分析。

图 4 表明了随着载氧体的加入逐步释放晶格氧,有效促进了碳的气化,推动了 CO 产率提升, H_2 产率处于动态平衡状态但是摩尔分数逐渐降低;在 $O/C=0.9$ 时,CO 含量达到最大值,表明此时碳的不完全氧化与 Boudouard 反应达到平衡;在高 O/C 时,过量的载氧体促进了碳及 CO 的深度氧化,导致 CO 产率的下降和 CO_2 产率的提高, H_2 产率同样下降,这些因素共同导致了合成气中有效气的选择性下降。

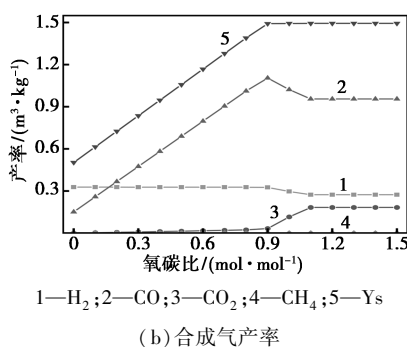
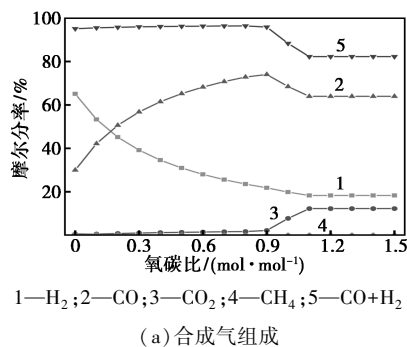


图4 氧碳比对合成气组成和产率的影响

从图 5(a)发现,在低 O/C 区间,CO 产率增加,合成气热值增加, H_2/CO 比逐渐降低;随着 O/C 增加,过量晶格氧引发 CO 与 H_2 的二次氧化,降低了合成气中有效气体的占比,导致合成气热值下降。图 5(b)表明,随着氧碳比的增加碳转化率均匀攀升;而冷煤气效率首先显著提高,后在 $O/C=0.9$ 时取得峰值(72.9%),在 O/C 超过 0.9 后,完全氧化反应导致冷煤气效率因 H_2 和 CO 的损失而下降至 66.9%。

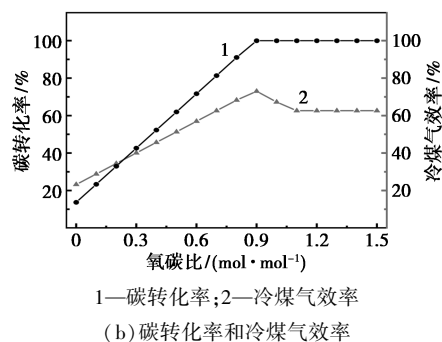
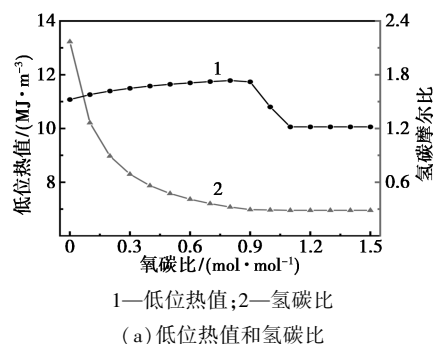
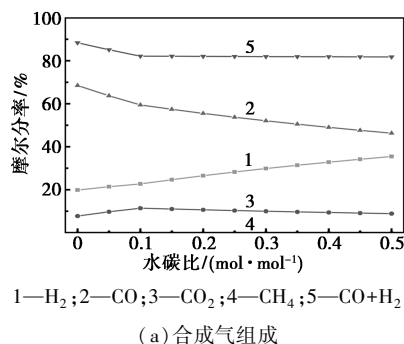


图5 氧碳比对热值、氢碳比、碳转化率和冷煤气效率的影响

2.1.3 水碳比

将水蒸气作为气化剂加入煤焦 CLG 中,核心作用在于提供气相介质,促进气相均相反应;并向系统中补充了氢元素,以提高氢气产率。在模拟条件设定为气化温度 900℃,氧碳比 1,对水碳比在 0:1~0.5:1 范围内进行了灵敏度分析。

图 6(a)表明,当 S/C 从 0.1 增至 0.5 时, H_2 和



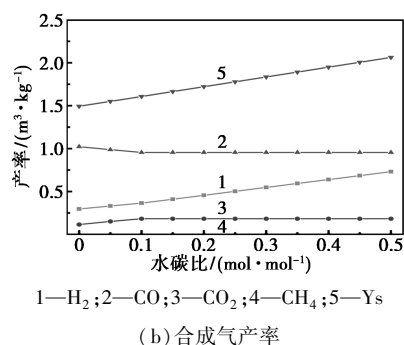


图 6 水碳比对合成气组成和产率的影响

CO₂ 的摩尔分数分别从 19.8% 和 7.7% 升至 35.4% 和 8.9%, 而 CO 的摩尔分数则从 68.5% 降至 46.3%, CO 与 H₂ 的总摩尔分数下降约 7%; 图 6(b) 表明 H₂、CO₂ 及合成气总产率均出现增长趋势, 而 CO 产率轻微下降, 这种气相成分变化归因于水蒸气解除了水煤气变换反应的温度抑制效应。

从图 7 中可以发现, 随着 S/C 的增加, 低位热值从 10.8 MJ/m³ 降至 9.6 MJ/m³, 氢碳比从 0.29 提升至 0.76, 表明合成气组成向富氢方向转变; 由于合成气总产率的提升, 冷煤气效率从 67.3% 提升至 83.2%, 烟效率从 74.1% 提升至 82.0%, 表明能量转化效率的提升。

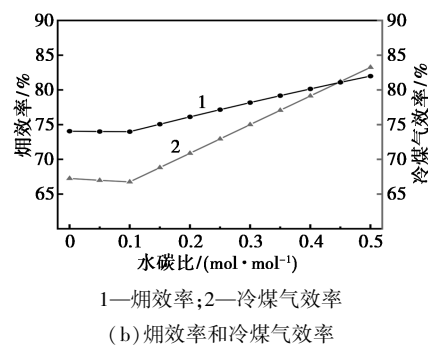
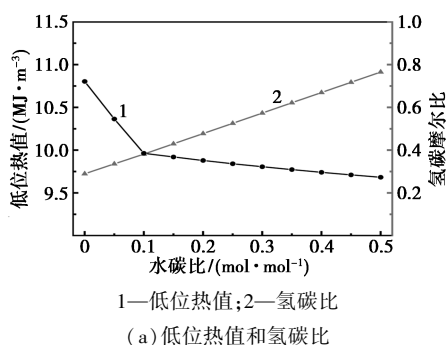


图 7 水碳比对热值、氢碳比、烟效率和冷煤气效率的影响

2.2 系统焓分析

2.2.1 气化温度

首先探究了模拟工况为氧碳比 1、无气化剂加入时, 对气化温度选取了 750、900℃ 2 个温度点进行比较。如表 4 所示, 随着反应温度由 750℃ 提升至 900℃, 碳转化率由 92.3% 提升至 100%, 实现了碳的完全转化; 合成气有效气含量的提升增加了合成气的焓值, 烟效率由 67.9% 提升至 74.1%, 表明高温工况在提升气化性能与能量品质利用效率方面更具优势。根据焓分析结果绘制出不同温度下的系统焓流图如图 8 与图 9 所示, 无论低温还是高温气化条件下系统的焓损失分布都集中在气化单元。

表 4 气化温度对工艺指标的影响

工艺指标	工艺条件	
	750℃	900℃
合成气产率/(kmol·h ⁻¹)	6.04	6.45
合成气热值/(MJ·m ⁻³)	9.93	10.80
碳转化率/%	92.3	100
能量输入/kW	0	6.7
烟效率/%	67.9	74.1

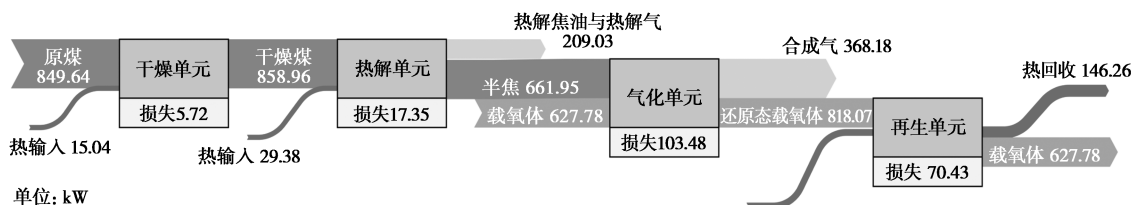


图 8 系统焓流图 (FRT = 750℃, O/C = 1, S/C = 0)

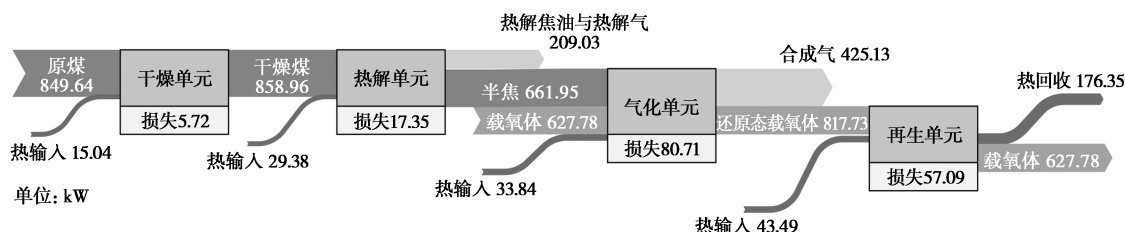


图 9 系统焓流图 (FRT = 900℃, O/C = 1, S/C = 0)

2.2.2 氧碳比

接着探究了氧碳比对化学链气化系统焓效率的影响,在模拟工况设定为气化温度 900℃、无气化剂加入时,对氧碳比选取了 0.5、1.0 2 个工艺点进行比较。如表 5 所示,随着氧碳比由 0.5 提升至 1.0,碳转化率由 62.02%提升至 100%;同时合成气产量增幅达 41.1%,这使得产品焓效率由 62.8%提升至 74.1%,表明适度提高氧碳比可改善系统碳转化程度与能量利用效率。在低氧碳比工况下,再生单元的焓损分布高达 48.9%,这是由于大量的残碳进入再生单元发生燃烧反应,导致碳化学能被消耗,显然

这对系统的能量利用是不利的,根据焓分析结果绘制出系统焓流程图如图 10 所示。

表 5 氧碳比对工艺指标的影响

工艺指标	工艺条件	
	O/C=0.5	O/C=1
合成气产率/($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)	4.57	6.45
合成气热值/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	11.64	10.80
碳转化率/%	62.02	100
能量输入/kW	0	6.7
焓效率/%	62.8	74.1

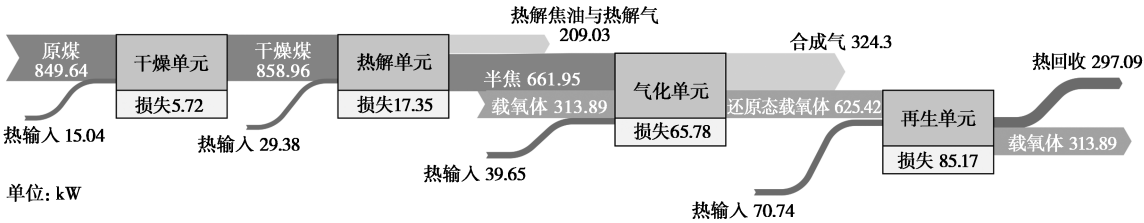


图 10 系统焓流程图(FRT=900℃,O/C=0.5,S/C=0)

2.2.3 水碳比

最后探究了水碳比对化学链气化系统焓效率的影响,在模拟工况设定为气化温度 900℃、氧碳比 1 时,对水碳比选取了 0、0.5 2 个工艺点进行比较。如表 6 所示,随着水碳比由 0 提升至 0.5,合成气摩尔流量增幅达 38.1%,这是由于水蒸气极大地促进了碳的气化反应以及水煤气变化反应。在水碳比 0.5 的工况下,由于水的气化以及达到反应温度需要吸收大量的能量,系统能量额外输入由 6.7 kW 提升至 47.1 kW,但产品焓效率仍由 74.1%提升至 82.0%。因此,适度引入水蒸气可显著提升合成气

产率与焓效率,根据焓分析结果绘制出系统焓流程图如图 11 所示。

表 6 水碳比对工艺指标的影响

工艺指标	工艺条件	
	S/C=0	S/C=0.5
合成气产率/($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)	6.45	8.91
合成气热值/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	10.80	9.68
碳转化率/%	100	100
能量输入/kW	6.7	47.1
焓效率/%	74.1	82.0

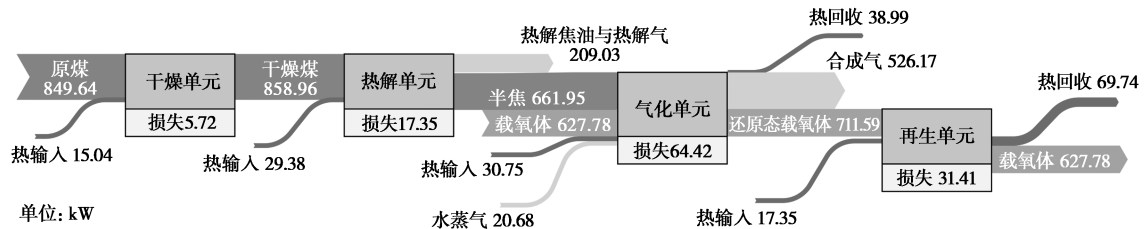


图 11 系统焓流程图(FRT=900℃,O/C=0.5,S/C=1)

3 结论

采用 Aspen 构建了煤焦 CLG 仿真模型,探究了不同工艺参数对气化性能的影响,并结合焓分析明确工艺参数与系统能量利用效率的关系,揭示系统焓损分布特征,核心结论如下。

(1) 气化温度 900℃ 时,较 750℃ 工况,碳转化

率由 92.3% 提升至 100%,冷煤气效率从 54.1% 提升至 72.9%,焓效率从 67.9% 提升至 74.1%。

(2) O/C=1.0 时,较 O/C=0.5 工况,合成气产率增幅 41.1%,碳转化率从 62.02% 提升至 100%,冷煤气效率从 51.3% 提升至 67.2%,焓效率从 62.8% 升至 74.1%。

(3) S/C=0.5 时,较 S/C=0 工况,合成气产率

增幅 38.1%,冷煤气效率从 67.3% 升至 83.2%, 烟效率从 74.1% 升至 82.0%。

参考文献

- [1] 中矿(北京)煤炭产业景气指数研究课题组,宋梅.2024—2025 年中国煤炭产业经济形势研究报告[J].中国煤炭,2025,51(2):1-12.
- [2] Wang W, Li Z, Lyu J, *et al.* An overview of the development history and technical progress of China's coal-fired power industry[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13(3):417-426.
- [3] Abdalazeez A, Li T, Liu X, *et al.* Investigation of BaFe_2O_4 oxygen carrier modified by supports in chemical looping gasification of bio-char[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49:238-251.
- [4] Zhang R, Li X, Dong R, *et al.* Modification of red mud using K/Ca doping to enhance its oxygen-donating performance in chemical looping gasification of biomass waste[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 200:108011.
- [5] Peng L, Dong S, Yang J, *et al.* Industrial solid waste as oxygen carrier in chemical looping gasification technology: A review[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 116:101694.
- [6] Qi J, Liu J, Chen G, *et al.* Hydrogen production from municipal solid waste via chemical looping gasification using CuFe_2O_4 spinel as oxygen carrier: An Aspen Plus modeling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 294:117562.
- [7] Fang S, Zheng X, Lin Y, *et al.* Evaluation of the chemical looping gasification characteristics of kitchen waste using CuFe_2O_4 and NiFe_2O_4 as oxygen carriers[J]. *Energy*, 2024, 312:133617.
- [8] Chisalita D A, Petrescu L, Galusnyak S C, *et al.* Environmental evaluation of hydrogen production employing innovative chemical looping technologies-A Romanian case study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(32):12112-12128.
- [9] Li Z, Xu H, Yang W, *et al.* Numerical investigation and thermodynamic analysis of syngas production through chemical looping gasification using biomass as fuel[J]. *Fuel*, 2019, 246:466-475.
- [10] An M, Guo Q, Ma J, *et al.* Chemical-looping gasification of coal with CuFe_2O_4 oxygen carriers: The reaction characteristics and structural evolution[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, 98(7):1512-1524.
- [11] Wang Y, Tian X, Zhao H, *et al.* The use of a low-cost oxygen carrier prepared from red mud and copper ore for in situ gasification chemical looping combustion of coal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 205:106460.
- [12] Ge H, Shen L, Feng F, *et al.* Experiments on biomass gasification using chemical looping with nickel-based oxygen carrier in a 25 kWth reactor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 85:52-60.
- [13] 穆林,李永麟,李延宇,等.碱(土)金属改性赤铁矿载氧体的化学链气化实验研究[J].燃烧科学与技术,2024,30(6):550-560.
- [14] 张将,沈来宏,冯璇,等. CuFe_2O_4 载氧体的释氧特性及其对煤化学链气化的影响[J].燃烧科学与技术,2019,25(3):220-228.
- [15] 吴宇婷.基于 Fe_2O_3 及其复合氧载体的生物质多元体系化学链气化特性研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [16] Liu G, Liao Y, Wu Y, *et al.* Characteristics of microalgae gasification through chemical looping in the presence of steam[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(36):22730-22742.
- [17] Xue S, Wang X. Process simulation of chemical looping gasification of biomass using Fe-based oxygen carrier: Effect of coupled parameters[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356:131839.
- [18] Fernández J R, Abanades J C. Optimized design and operation strategy of a CaCu chemical looping process for hydrogen production[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 166:144-160.
- [19] 张坤,王庆宇,何德民,等.煤热解-化学链气化耦合工艺流程模拟[J].化学工程,2019,47(6):74-78.
- [20] Chen X, Zheng D, Guo J, *et al.* Energy analysis for low-rank coal based process system to co-produce semicoke, syngas and light oil[J]. *Energy*, 2013, 52:279-288. ■
-
- (上接第 337 页)
- [6] 王海鸣,张润之,周家辉,等.离网式风光互补制氢合成绿氨系统容量配置优化分析[J].综合智慧能源,2024,46(11):73-82.
- [7] Wu Y, Zhao T, Tang S, *et al.* Research on design and multi-frequency scheduling optimization method for flexible green ammonia system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 300:117976.
- [8] Wei S, Espedal L, Balakin B V, *et al.* Experimental and numerical investigation of direct absorption solar collectors (DASCs) based on carbon black nanofluids[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2024, 37(6):665-686.
- [9] Wang J, Wen J, Wang J, *et al.* Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203:114779.
- [10] Zhou Z, Zhang S, Zhong Y, *et al.* A predictive control method for multi-electrolyzer off-grid hybrid hydrogen production systems with photovoltaic power prediction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 84:383-393.
- [11] Yu B, Fan G, Sun K, *et al.* Adaptive energy optimization strategy of island renewable power-to-hydrogen system with hybrid electrolyzers structure[J]. *Energy*, 2024, 301:131508.
- [12] Bouaboula H, Ouikhalfan M, Saadouni I, *et al.* Addressing sustainable energy intermittence for green ammonia production[J]. *Energy Reports*, 2023, 9:4507-4517.
- [13] Edmonds L, Pfromm P H, Amanor-Boadu V, *et al.* Green ammonia production-enabled demand flexibility in agricultural community microgrids with distributed renewables[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022, 31:100736. ■