

研究论文

煤和焦炉气联供制合成天然气过程的建模、模拟与分析

满奕, 杨思宇, 萧鸿华, 钱宇

(华南理工大学 化学与化工学院, 广东 广州 510640)

摘要: 近年来中国的煤制天然气项目快速发展。然而煤制天然气项目的 CO₂ 排放量大、污水产量高难处理, 生产过程能效低。与此同时, 中国焦炭工业每年产生约 700 亿立方米的副产物焦炉气, 这些富氢的焦炉气大多被燃烧或直接排放进入大气, 对环境造成严重影响, 同时还浪费了巨大的经济价值。煤和焦炉气联供制天然气新工艺可有效解决这些问题。焦炉气与煤元素互补, 焦炉气中的氢气可用于调节合成气的氢碳比; 甲烷可通过甲烷干重整过程降低煤制烯烃过程排放的 CO₂, 提高碳元素利用率, 实现节能减排。本文针对煤和焦炉气联供制天然气这个新的工艺过程进行建模、模拟与分析, 发现新过程的能效比煤天然气过程提高了约 8 个百分点, 而 CO₂ 排放量则减少了约 60%。

关键词: 计算机模拟; 合成气; 系统工程; 焦炉气; 天然气

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151375

中图分类号: TQ 536.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 12—4941—07

Modeling, simulation and analysis for coal and coke-oven gas to synthetic natural gas

MAN Yi, YANG Siyu, XIAO Honghua, QIAN Yu

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Coal to synthetic natural gas (SNG) process is regarded as one of promising way to tackle with haze in north China and is developed rapidly in China. However, coal to SNG processes suffer from the high energy consumption and CO₂ emission due to the high carbon contents of coal. In China, there is 7×10^{10} m³ coke-oven gas (COG) produced in coke plants annually. Most of the hydrogen-rich COG is utilized as fuel or discharged directly into the air. Such situation is a waste of precious hydrogen resource and causes serious economic loss and environmental pollution either. The co-feed process of coal and COG to SNG is a promising solution for these problems. In the co-feed process, CH₄ of COG reacts with CO₂ in a dry methane reforming unit to reduce emissions and H₂ of COG can adjust the H/C ratio of syngas. This paper makes a modeling, simulation and system analysis for the co-feed process of coal and COG to SNG. The results show that the energy efficiency of the co-feed process increases by 8%, while at the same time, CO₂ emission is reduced by 60% in comparison to the conventional coal to SNG process.

Key words: computer simulation; syngas; systems engineering; coke-oven gas; natural gas

2015-08-31 收到初稿, 2015-09-30 收到修改稿。

联系人: 钱宇。第一作者: 满奕 (1988—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21136003, 21306056)。

Received Date: 2015-08-31.

Corresponding author: QIAN Yu, ceyuqian@scut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21136003, 21306056).

引 言

近年来,中国天然气消费量呈逐步上升趋势,过去 10 年天然气消费的平均增速达到 16%^[1]。2015 年,中国天然气产量有约 1500 亿立方米,另有页岩气产量 65 亿立方米,而天然气需求量为 2500 多亿立方米,中国天然气仍存在巨大的供需矛盾^[2]。

基于中国国情以及国家产业政策的鼓励,国内很多企业开始考虑发展煤制天然气(coal to SNG, CtSNG)项目。目前,中国已经建成 12 个 SNG 项目,总产能为 671 亿立方米/年^[3]。近年来,中国的工业界还计划投资更多的 SNG 项目,据不完全统计,目前有超过 30 家企业准备投资 SNG 项目,总产能超过 1200 亿立方米^[4]。

中国现有的煤制天然气工艺主要为煤间接制天然气。煤间接制天然气技术是利用褐煤等低价劣质煤为原料,通过煤气化、洗煤气、水煤气变换、酸性气体脱除、甲烷化等工艺生产 SNG。Li 等^[5]对煤制 SNG 全生命周期分析,发现 SNG 用作城市供热时,与燃煤供热路径相比,虽然 SNG 供热可以缓解中国城市因燃煤供热而导致雾霾污染,但 SNG 供热路径要比燃煤供热路径多消耗 90%煤炭资源,温室气体排放量高 65%。

造成煤制 SNG 过程,资源消耗和 CO₂ 排放量大的主要原因是,褐煤经 Lurgi 气化过程会产生大量的 CO₂,同时为提高合成气的氢碳比,粗合成气经过水煤变换单元将合成气中的 CO 转化为 H₂ 和 CO₂,这个过程就造成了大量的 CO₂ 排放和碳元素的浪费,同时消耗大量的能量。

在煤制 SNG 过程中,应用碳捕集及封存(CCS)技术可明显减排 CO₂。但是,应用 CCS 技术,会降低过程能效,例如,煤气化过程增加 CCS 后,能效降低了 10%左右^[6];同时产品成本也相应增加,Li 等^[5]研究发现,在 SNG 生产阶段加入 CCS 过程,其生产成本将增加 20%以上。这使得在煤化工过程中仅依靠增加 CCS 设施来减排 CO₂ 在工业界较难接受和广泛应用。

而另一方面,煤炭资源利用的一个重要产业——煤焦化产业,在生产焦炭的同时,副产大量的焦炉气。这一富氢资源,以往未能得到有效利用,甚至很多被直接排放浪费了。中国每年的焦炉气产量约为 700 亿立方米,除 20%被作为燃料直接燃烧外,大部分焦炉气被直接排放进入大气^[7]。焦炉气

主要组成包括 H₂ (55%~60%), CH₄ (23%~27%), CO (5%~8%), N₂ (3%~6%), CO₂ (<2%)以及一些烃类^[8]。由于焦炉气是一种富氢气体,因此通过焦炉气与煤气化合成气的原料和生产工艺互补,可制备具有合适氢碳比的合成气,可以减少 CO₂ 排放并提高能效,优化资源配置。许多学者对煤和焦炉气联供的化工和能源过程进行过研究^[9-11]。本文作者曾提出通过焦炉气辅助煤生产烯烃,减排 CO₂ 约 85%,通过能量集成将过程能效提高 10%^[12]。因此,利用煤和焦炉气联供生产 SNG,将是解决目前煤单独制 SNG 过程中所存在问题的有效解决途径。目前在建和已建成的煤制 SNG 项目,其周边分布众多煤焦化工厂,大量的焦炉气气源为煤和焦炉气联供生产 SNG 提供了原料保证。

在以上研究工作的基础上,本文作者根据“资源整合,组分互补,适度反应”的原则,利用煤炭和焦炉气两种资源氢碳比例成分互补特点,提出一个煤和焦炉气联供制天然气的概念流程^[13]。对焦炉气进行高值化利用,可以提高过程的经济效益。将焦炉气中的 H₂ 与煤气化后的合成气混合,可调节 H₂/CO 比以备化工合成,提高碳元素的利用效率;焦炉气中的 CH₄ 可用于干重整反应,回收煤气化过程中所产生的 CO₂,降低环境污染和提高 SNG 产量。对于过程的技术性能和可靠评估,有赖于准确的建模和模拟分析,以提供全流程计算模型以便于今后的评估和比较。因此,本文将对新的工艺流程进行建模、模拟与分析,找出煤和焦炉气联供的较优配比及其他重要系统参数,实现煤制天然气过程节能减排的效果。

1 煤和焦炉气联供制合成天然气过程

煤和焦炉气联供制天然气过程(coal and coke-oven gas to SNG, CGtSNG)工艺流程如图 1 所示。联供过程除包含原有的煤气化、洗煤气、酸性气体脱除、甲烷化等单元,取消了原有的水煤气变换单元,增加了焦炉气净化、焦炉气变压吸附和甲烷干重整单元。由焦炉气净化分离得到的甲烷,其中一部分进入甲烷干重整,与煤气化过程所产生的 CO₂ 反应,产生洁净的合成气,并降低系统碳排放;通过调整煤气化合成气、干重整合成气以及焦炉气中氢气的比例,就可以得到氢碳比为 3.05~3.2 的合成气。这样,合成气就不需要再进入煤单独制 SNG 过程中的水煤气变换单元,减少了系统的 CO₂

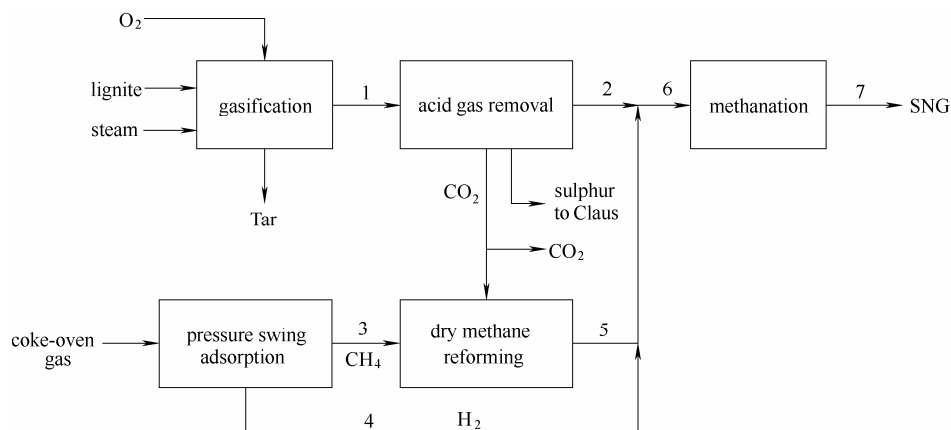


图1 煤和焦炉气联供制SNG系统工艺流程图

Fig.1 Schematic diagram of coal and coke-oven gas to SNG process

排放。煤和焦炉气联供制天然气过程，由于对煤气化过程产生的 CO_2 进行重新利用，因此整个过程的碳元素利用率可得到提高。

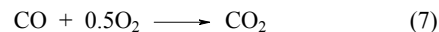
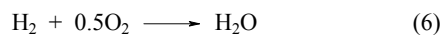
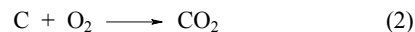
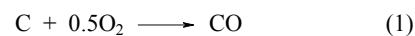
本文利用 Aspen Plus 对煤和焦炉气联供制天然气过程进行模拟，以便于后续的系统分析。联供过程主要包括 3 个子系统：（1）煤气化与净化系统；（2）焦炉气分离与甲烷干重整系统；（3）甲烷化系统。

1.1 煤气化与净化系统

煤气化与净化系统的本文参考大唐克旗煤制气项目，煤气化过程选取 Lurgi 碎煤加压气化技术作为建模的参考对象，净化过程主要包括洗煤气和酸性气体脱除两个单元，本文采用 Rectisol 低温甲醇洗技术作为建模的参考对象。煤气化与净化系统的工艺流程图如图 2 所示。

原煤与水蒸气、氧气共同进入气化炉，气化过

程发生的主要反应见式（1）～式（7）^[14]。气化过程产生的粗煤气的主要成分包括 CO 、 H_2 、 CH_4 、 H_2O 和 CO_2 ，还有一些硫化物、多碳烃、焦油、酚和氨等杂质。建模过程采用 Peng-Robinson 物性方法，并采用最小自由能反应器 RGibbs 作为煤气化过程反应器模型^[13]，所有产物合成以及整个反应过程所需热量在最小 Gibbs 自由能的条件下进行计算。



离开气化炉的粗煤气首先进入洗涤冷却器，除

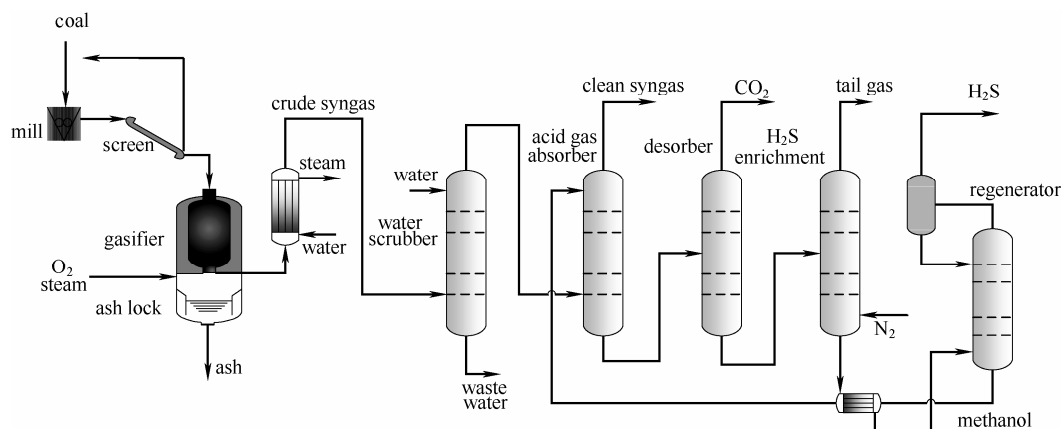


图2 煤气化与净化系统的流程图

Fig.2 Process flow diagram of coal gasification and syngas clean

去粗煤气中夹带的大部分颗粒物以及酚、氨等易溶于水的气体杂质，并将粗煤气的温度降至 200℃ 左右，之后粗煤气经废热锅炉产生 0.5 MPa 的低压蒸汽，并进入酸性气体脱除单元进一步净化。

酸性气体脱除单元采用低温甲醇洗技术，本文部分作者已在早先的工作中有所讨论和阐述，已有模型可供使用^[15]。

1.2 焦炉气分离与甲烷干重整系统

甲烷干重整是回收 CO₂ 的一种方法，极具应用前景^[16]。近年来随着对于重整过程研究的深入，很多研究者也将这一过程用于煤气化过程集成中。由于焦炉气中含有约 60% 的 H₂，在干重整的过程中，过量 H₂ 会抑制干重整的反应平衡。同时 H₂ 会与 CO₂ 发生逆水煤气变换的副反应而消耗合成气所需的 H₂，而这个逆反应与主反应都是吸热反应，因此会浪费 CH₄ 干重整过程中的能量^[17]。所以，洁净的焦炉气需通过气体分离，将 H₂ 从 CH₄ 中分离出来。本文采用变压吸附过程分离焦炉气中的 H₂ 和 CH₄。焦炉气分离与甲烷干重整系统的工艺流程如图 3 所示。

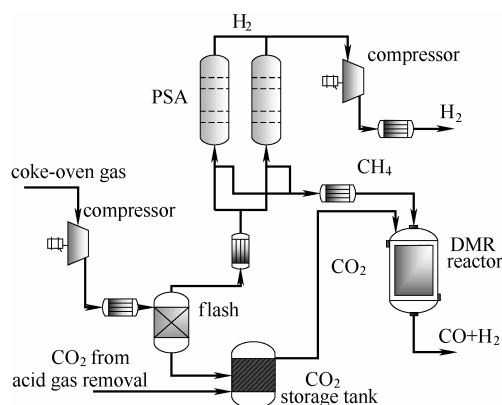
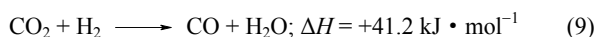
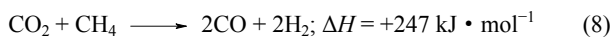


图 3 焦炉气分离与甲烷干重整系统的流程图

Fig.3 Process flow diagram of COG separation and DMR

干重整反应主反应和副反应见式(8)、式(9)，以 CO₂ 为原料与甲烷反应生成 H₂/CO 接近 1:1 的合成气。因此，这个反应不但可以降低 CO₂ 排放还可以提高合成气的产量，从而提高资源利用效率。干重整过程使用 Ni-Co 基催化剂，反应温度约 750℃，此时 CH₄ 和 CO₂ 的转化率可达到 95% 以上^[18]。甲烷重整过程的物性方法选取 Peng-Robinson 物性估算方程，重整反应器模型选用平推流反应器^[19]。



由煤气化产生的合成气、甲烷干重整产生的合

成气以及焦炉气中的 H₂，经混合得到甲烷化所需的合成气。通过调节煤和焦炉气的进料比，合成气的 H/C 比可达到 3~3.15，之后进入甲烷化过程。

1.3 甲烷化系统

甲烷化过程发生的主要化学反应见式(10)和式(11)。本文中甲烷化系统参考大唐克旗煤制气项目，采用 Davy 甲烷化工艺作为建模的参考对象，工艺流程如图 4 所示。Davy 甲烷化工艺为两段转化，第 1 段为大量转化，第 2 段为补充转化，每段两个反应器，前两个反应器采用串并联方式连接，第二甲烷化反应器出口的部分反应气作为循环气，经一系列换热器换热，在 150℃ 左右的情况下被循环压缩机提压，然后再与新鲜气混合进入第一反应器，以控制一段反应温升，同时利于带走甲烷化反应热。装置中甲烷化反应器与废热锅炉直接相连，采用废热锅炉和蒸汽过热器将反应热进行有效回收，副产中压过热蒸汽，反应器出口温度 600℃ 左右。甲烷化过程的物性方法选取 Peng-Robinson 物性估算方程，重整反应器模型选用平推流反应器^[19]。

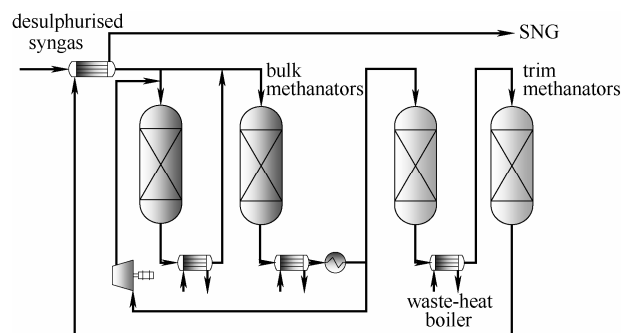
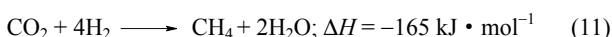
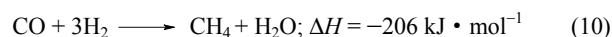


图 4 甲烷化系统的流程图

Fig.4 Process flow diagram of methanation

1.4 全流程模拟

本文利用 Aspen Plus 对煤和焦炉气联供制天然气过程进行模拟，以便于后续的系统分析。为便于和煤制 SNG 过程进行比较，本文参考大唐克旗 40 亿立方米煤制 SNG 项目，设定联供过程的 SNG 产量为 40 亿立方米，由此可计算出过程进料所需的煤和焦炉气，联供过程的进料情况见表 1。联供过程的各个单元操作参数和假设条件见表 2。

通过 Aspen 模拟，可以得到各物流流股的组成、温度和压力等关键参数，为后续的分析做准备。联供过程的物料平衡模拟结果见表 3。表 3 中的流股

表 1 联供系统的进料组成

Table 1 Feedstock for co-feed process

Raw material	Temperature/°C	Pressure/MPa	Mass flow/t · h ⁻¹
lignite	25	4.0	558
COG	25	2.5	470
water	25	0.4	1670
oxygen	40	4.0	94.5

表 2 联供系统的单元操作参数和假设条件

Table 2 Simulation conditions and assumptions

Item	Description
coal	lignite, 14.4 MJ · kg ⁻¹
gasification type	Lurgi, 6.8 MPa, 1300°C
oxidant consumption	0.84 kg · kg ⁻¹ dry base coal
carbon conversion ratio	98.5%
acid gas removal technology	Lurgi Rectisol
sulphur recovery	Claus (COS hydrolysis and H ₂ S oxidation)
COG separation	pressure swing adsorption
dry methane reforming	Ni-Co based catalyst, 0.11 MPa, 800°C
methanation	davy technology
high pressure steam	12 MPa, 535°C

标号见图 2 中的流股标号, 1~7 号流股分别代表: 1—粗煤气化合成气, 2—洁净煤气化合成气, 3—进入甲烷干重整单元的 CH₄, 4—H₂, 5—甲烷干重整合成气, 6—混合后的甲烷化合成气, 7—SNG 产品。

2 煤和焦炉气制 SNG 过程系统分析

2.1 联供过程的进料比

煤和焦炉气联供制 SNG 过程, 取消了煤单独

制 SNG 过程中原有的水煤气变换单元, 因此甲烷合成气将由煤气化合成气、甲烷干重整合成气以及焦炉气中的氢气混合得到。若焦炉气进料量不足, 将会导致合成气的氢碳比不能满足甲烷化要求, 从而降低 SNG 产品的收率, 同时 CO₂ 不能被完全吸收, 降低碳元素利用率同时对环境造成影响; 若焦炉气过量, 会导致合成气氢碳比过高, 多余的 H₂ 无法充分反应, 既浪费资源, 又为后续 SNG 产品的分离提纯增加了困难。因此, 需找到一个合适的焦炉气与煤的进料比, 实现资源能源的合理利用。

合成气的氢碳比决定了合成气能否进行 SNG 的合成, 甲烷化过程的合成气氢碳比为 3.05~3.2 时较优, 过高或过低都不利于 SNG 产品的分离与提纯。因此本文采用合成气的氢碳比作为分析联供过程进料比的限制条件。

对于联供过程, 煤的利用不仅影响资源能源效率, 也同时影响该过程的经济性能与环境影响。因此, 本文采用碳元素利用率来衡量煤的利用情况。碳元素的利用率可以通过计算每个反应单元出口的有效含碳组分与进口有效含碳组分的比值来确定^[6]。对联供过程来说, 进口有效含碳组分为煤[原料褐煤中的碳含量以 75% (质量分数) 计]和焦炉气中的甲烷, 出口的有效含碳组分为 SNG。联供过程的碳元素的利用率计算式见式 (12)。

$$f = \frac{F^{\text{out}}(\text{CH}_4)}{F^{\text{in}}(\text{Coal}) + F^{\text{in}}(\text{COG})} \times 100\% \quad (12)$$

式中, $F^{\text{in}}(\text{Coal})$ 、 $F^{\text{out}}(\text{SNG})$ 、 $F^{\text{in}}(\text{COG})$ 分别为原料煤中碳组分的摩尔流量、原料焦炉气中甲烷的

表 3 联供系统的模拟结果

Table 3 Simulation results of co-fees process

Steam No.	1	2	3	4	5	6	7
mole fraction							
N ₂	0.0060	0.0075	0	0	0	0.004	0.0009
O ₂	0.0050	0	0	0	0	0.0038	0.0001
Ar	0	0	0	0	0	0.0020	0.0063
H ₂ O	0.1352	0.1682	0	0	0	0	0.0034
CO	0.1445	0.1798	0.2432	0	0.1290	0.1810	0.0001
CO ₂	0.3189	0.1588	0.081	0	0	0.0268	0.0526
H ₂ S	0.0050	0	0	0	0	0	0
H ₂	0.3904	0.4858	0	1	0.7260	0.6060	0.0021
CH ₄	0	0	0.6756	0	0.1450	0.1780	0.9344
mole flow/kmol · h ⁻¹	33966.2	12945.4	10307.0	141000.0	165233.1	107606.9	72044.9
mass flow/t · h ⁻¹	763.9	222.7	188.0	282.0	1460.0	1682.7	1251.3
temperature/°C	150	235	25	25	135	25	25.0
pressure/MPa	2.8	2.7	1.3	1.3	1.95	3.15	2.3

摩尔流量、SNG 产品的摩尔流量, f 为联供过程的碳元素利用率。

焦炉气和煤进料比(质量比)对合成气氢碳比的影响见图 5。在进煤量不变时, 增加焦炉气的进料量, 甲烷合成气的 CO 组成逐渐下降, 合成气氢碳比逐渐升高。在焦炉气和煤的进料比达到 0.8~0.9 时, 合成气的氢碳比达到 3~3.1, 满足甲烷化要求。

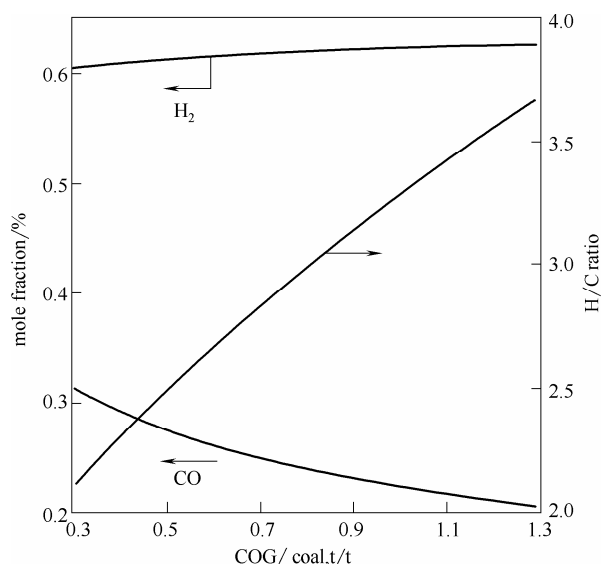


图 5 进料比对合成气氢碳比的影响

Fig.5 Effect of H/C ratio with change of feedstock ratio

焦炉气和煤进料比(质量比)对过程的碳元素利用率的影响见图 6。在进煤量不变时, 增加焦炉气的进料量, 过程排放的 CO₂ 迅速减小, 碳元素进入目标产物中, 碳元素利用率逐渐升高。当焦炉气

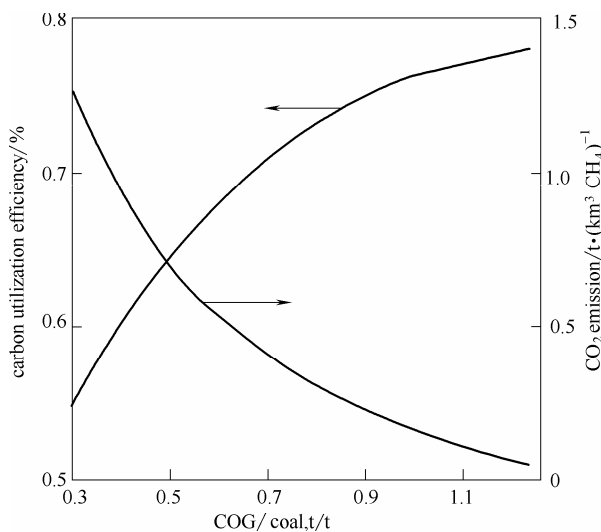


图 6 进料比对过程 CO₂ 排放和碳元素利用率的影响

Fig.6 Effect of CO₂ emission and carbon utilization efficiency with change of feedstock ratio

和煤进料比达到 0.9 以后, CO₂ 的排放量变化渐趋平缓。若再增大焦炉气的进料量, 就会造成原料气的浪费而降低碳元素利用率。

综合以上几方面的因素, 可以确定对于联供过程, 焦炉气和煤的进料比控制在 0.8~0.9 是较为合适的, 此时可减排 CO₂ 约 60%。

2.2 联供过程的能效分析

能量效率是输出产品的能量与系统能耗的比值。能量效率是评价系统整体的能量转化或转换过程的主要热力学效率指标, 其计算公式见式 (13)。

$$\eta = \frac{\sum E_o}{\sum E_i} \times 100\% \quad (13)$$

式中, E_i 、 E_o 分别代表系统投入和产出的总能量。

由 Aspen 模拟得到联供过程的产品单耗和能量消耗, 并经折标计算得到能量效率。联供过程虽然公用工程的消耗有所增加, 但由于回用了 CO₂, 节约了大量的原料煤, 因此相比煤制 SNG 过程, 其能效提高了约 8%, 结果如表 4 所示。

表 4 联供制 SNG 和煤制 SNG 过程的能耗和能效

Table 4 Energy efficiency of CtSNG and CGtSNG

Item	CtSNG ^[20]	CGtSNG	LHV ^①
consumption			
lignite/t	1.55×10^7	4.47×10^6	$14.4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
coke-oven gas/m ³	—	8.1×10^9	$17.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$
electricity/kW · h	2.65×10^8	7.3×10^8	$3.6 \text{ MJ} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
steam/t	5.8×10^6	1.04×10^7	—
water/t	1.83×10^7	6.42×10^6	—
products output			
SNG/m ³	4.0×10^9	4.0×10^9	$35.99 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$
CO ₂ emission/t	7.85×10^6	3.14×10^6	—
energy efficiency/%	54.7	62.9	—

① LHV: lower heating value.

3 结 论

本文对煤和焦炉气联供制 SNG 过程进行了建模、模拟和系统分析。新过程中, 焦炉气中的甲烷被引入甲烷干重整反应单元, 用于降低煤气化过程所产生的 CO₂, 焦炉气中的氢气用于调节合成气的氢碳比, 满足后续甲烷化反应的要求。通过系统分析, 确定焦炉气和煤的进料比(质量比)为 0.8~0.9 时, 系统在满足生产要求的条件下, 其排放和原料投入量都相对较小。煤和焦炉气联供制 SNG 过程具有的优势主要包括以下几点: (1) 通过煤和焦炉气的元素互补利用, 实现了对煤炭资源的有效利用,

避免了组分调整操作造成的有效元素浪费和能耗代价。同时,相比煤制SNG过程,联供过程减排CO₂约60%;(2)焦炉气辅助煤制烯烃过程的能效达到63.4%,比煤单独制烯烃过程的55.4%提高了约8个百分点;(3)将原本作为工业煤焦化工业废气的焦炉气加以利用,优化了资源配置。

References

- [1] Yang Shuhong (杨舒鸿), Ding Yanjun (丁艳军). Life cycle assessment on synthetic natural gas (SNG) technology [J]. *Modern Chemical Industry* (现代化工), 2012, **32**(9): 4-7.
- [2] National Bureau of Statistics (国家统计局). China Energy Statistics Yearbook (中国能源统计年鉴) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [3] Li Chuanri (李传锐), Liu Yongjian (刘永健), Li Chunqi (李春启), Zuo Yubang (左玉帮). Analysis of the present status, the policy and application development of coal to SNG in China [J]. *Chemical Industry* (化学工业), 2015, **33**(1): 1-9.
- [4] Li H, Yang S, Zhang J, Kraslawski A, Qian Y. Analysis of rationality of coal-based synthetic natural gas (SNG) production in China [J]. *Energy Policy*, 2014, **71**: 180-188.
- [5] Li H, Yang S, Zhang J, Qian Y. Coal-based synthetic natural gas (SNG) for municipal heating in China: analysis of haze pollutants and greenhouse gases (GHGs) emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.078>
- [6] Man Y, Yang S, Xiang D, Li X, Qian Y. Environmental impact and techno-economic analysis of the coal gasification process with/without CO₂ capture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **71**: 59-66.
- [7] Razzaq R, Li C, Zhang S. Coke oven gas: availability, properties, purification, and utilization in China [J]. *Fuel*, 2013, **113**: 287-99.
- [8] Qian Y, Man Y, Peng L, Zhou H. Integrated process of coke-oven gas tri-reforming and coal gasification to methanol with high carbon utilization and energy efficiency [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, **54**(9): 2519-2525.
- [9] Zheng Anqing (郑安庆), Feng Jie (冯杰), Ge Lingjuan (葛玲娟), Yi Qun (易群), Li Wenying (李文英). Modeling and optimization of polygeneration system with coke-oven gas and coal gasified gas by Aspen Plus (I) [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (4): 969-978.
- [10] Yi Qun (易群), Wu Yanli (吴彦丽), Fan Yang (范洋), Hu Changchun(胡长淳), Chu Qi (褚琦), Feng Jie (冯杰), Li Wenying (李文英). Economic evaluation of industrial chain extension solutions for coke oven gas to methanol and chemicals [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65** (3): 1003-1011.
- [11] Lin H, Jin H, Gao L, Zhang N. A polygeneration system for methanol and power production based on coke oven gas and coal gas with CO₂ recovery [J]. *Energy*, 2014, **74**: 174-180.
- [12] Man Y, Yang S, Zhang J, Qian Y. Conceptual design of coke-oven gas assisted coal to olefins process for high energy efficiency and low CO₂ emission [J]. *Applied Energy*, 2014, **133**: 197-205.
- [13] Man Y, Yang S, Qian Y. Conceptual design of coal and coke-oven gas co-feed process to synthetic natural gas with high efficiency and low emission [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015. Submitted.
- [14] Li S, Jin H, Gao L. Cogeneration of substitute natural gas and power from coal by moderate recycle of the chemical unconverted gas [J]. *Energy*, 2013, **55**: 658-667.
- [15] Liu X, Yang S, Hu Z, Qian Y. Simulation and assessment of an integrated acid gas removal process with higher CO₂ capture rate [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, **83**: 48-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.01.008>
- [16] Usman M, Wan Daud W M A, Abbas H F. Dry reforming of methane: Influence of process parameters—a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **45**: 710-744.
- [17] Man Yi(满奕), Yang Siyu(杨思宇), Xiang Dong(项东), Qian Yu(钱宇). Modeling, simulation and analysis for the co-feed process of coal and coke-oven gas to olefins [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65**(12): 4850-4856.
- [18] Aw M S, Zorko M, Črnivec I G O, Pintar A. Progress in the synthesis of catalyst supports: synergistic effects of nanocomposites for attaining long-term stable activity in CH₄-CO₂ dry reforming [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, **54**(15): 3775-3787.
- [19] Li S, Ji X, Zhang X, Gao L, Jin H. Coal to SNG: technical progress, modeling and system optimization through exergy analysis [J]. *Applied Energy*, 2014, **136**: 98-109.
- [20] Datang Energy and Chemical Co., Ltd (大唐能源化工). Coal to SNG project introduction of Datang Corporation in Chifeng, Inner Mongolia [R]. 2009.