

基于Aspen Plus的气流床煤气化炉建模 及其变工况特性研究

王轶男, 吕佳阳, 陈衡*, 张国强, 徐钢, 翟融融

(热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Research on Modeling and Variable Operating Condition Characteristics of Entrained Flow Coal Gasifier Based on Aspen Plus

WANG Yinan, LÜ Jiayang, CHEN Heng*, ZHANG Guoqiang, XU Gang, ZHAI Rongrong

(Beijing Key Laboratory of Emission Surveillance and Control for Thermal Power Generation (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 【目的】研究整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)电站中煤气化炉的运行机理, 分析和优化煤气化炉的关键运行参数。【方法】基于Aspen Plus建立了气流床煤气化炉的稳态热力学模型, 并与文献中数据进行比对, 验证了模型准确性, 在此基础上, 开展了对煤气化炉关键参数敏感性的研究。【结果】热力学模型适合对稳态的煤气化过程进行模拟, 具有模拟结果准确、建模简单和计算量不大的优点。【结论】敏感性分析的结果表明: 氧煤比是影响煤气化过程的最主要的运行参数, 氧气不足和氧气过多都会造成合成气有效成分的产量减少, 建立的Shell气化炉模型的最佳氧煤比在0.85左右; 水煤比也是影响煤气化过程的关键参数, 气化炉内能量充足时, 增加输入水的量可使合成气中含有更多的氢气, 而能量不足时过多的水也会导致合成气有效成分的减少。

关键词: 燃煤发电; 整体煤气化联合循环(IGCC); 煤气化; Aspen Plus; 热力学模型; 气流床煤气化炉

ABSTRACT: [Objectives] This research aims to investigate the operational mechanism of a coal gasifier within an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant, with a focus on analyzing and optimizing key operational parameters. [Methods] A steady-state thermodynamic model of the gasifier was developed using Aspen Plus. The model's accuracy was validated by comparing its simulation results with published data. A sensitivity analysis was then conducted

to assess the impact of key gasifier parameters. [Results] The thermodynamic model demonstrates the suitability for simulating steady-state coal gasification processes. The model exhibits high accuracy, simplified structure, and efficient computational performance. [Conclusions] The sensitivity analysis reveals that the oxygen-to-coal ratio holds the most significant influence on the coal gasification process. Both insufficient and excessive oxygen levels result in a reduction of syngas active ingredient production. The optimal oxygen-to-coal ratio for the Shell gasifier model is determined to be approximately 0.85. Water-to-coal ratio also plays a critical role in the gasification process. When sufficient energy is present within the gasifier, increasing the water input leads to higher water content in the syngas, potentially increasing hydrogen concentration. However, excessive water input under energy-constrained conditions can decrease the effective composition of the syngas.

KEY WORDS: coal-fired power generation; integrated gasification combined cycle (IGCC); coal gasification; Aspen Plus; thermodynamic model; entrained flow coal gasifier

0 引言

我国的能源结构具有明显的“富煤、贫油、少气”的特点, 这决定了我国长久以来以煤为主的能源生产和消费结构^[1-4]。国家统计局2023年度数据显示, 在2023年, 我国共消费了相当于57.20亿t标准煤的能源, 其中煤炭消费量占比达到55.3%^[5]。使用煤炭造成的污染物排放给自然环境带来了巨大的压力, 燃煤引起的CO₂排放占我

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0009-0009)。

Project Supported by National Science and Technology Major Project of China (J2019-I-0009-0009).

国化石燃料排放总量的80%左右^[6]，但为满足我国日益增长的能源需求，解决我国能源结构调整带来的能源安全挑战，“去煤化”、寻找其他能源替代煤炭的做法在短期内无法完全实现^[7]。在未来的一段时间内，煤炭仍将在我国的能源生产和消费中扮演重要的角色。据统计，2020年我国能源消费和工业生产共排放CO₂约1.15×10¹⁰ t，其中电力行业的碳排放占到了40%^[8]，所以，清洁、高效、低碳的燃煤发电技术的需求十分迫切。

整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)发电技术是被国际学界公认的最具潜力的洁净燃煤发电技术之一，IGCC发电系统的发电效率有希望超过50%，比当前超超临界发电机组效率提高1%~3%；且IGCC发电技术可在燃烧前实现污染物与CO₂的脱除，理论上可在更低能量消耗的情况下实现更少的污染物排放。因此，IGCC发电技术在能源利用效率和污染物控制方面有着明显的优势，是目前最有希望实现温室气体减排的燃煤发电技术之一^[9]。处于示范运行阶段的天津IGCC电站已表现出发电效率高、可进行多联产等优点，其污染物排放达到天然气电站水平^[10]。但是现阶段IGCC发电技术仍有着系统复杂、技术处于发展期、成本较高等问题，距离大规模的工业应用还有一定距离^[11]。

国内外关于煤气化炉建模方面的研究较多。李国智等^[12]针对水煤浆的水分在气化炉中蒸发吸热导致热效率降低的问题，设计了一种旋梯式螺旋折流板换热器预热水煤浆，利用低品位热能提高气化炉的进料温度，优化了水煤浆气化炉的设计。马娟等^[13]基于气化反应平衡理论，结合煤气化和热力学方面的相关研究成果，给出了一种适用于气流床煤气化炉的合成气组分计算方法。汪洋等^[14]基于Aspen Plus工业流程模拟软件，运用吉布斯自由能最小化方法建立了气流床煤气化炉的模型，研究了气化参数对气化反应的影响程度。郑志行等^[15]建立了Shell气化炉的热力学模型，计算结果表明氧煤比是影响气化反应的最主要因素，与试验结果吻合良好。朱莎弘等^[16]基于Aspen Plus建立了气流床煤气化炉的稳态流程模型，该模型考虑了气化炉辐射废锅中合成气的进一步反应，并利用建立的模型分

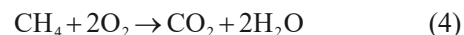
析了氧煤比对合成气产量和温度的影响情况。Ismail等^[17]基于计算流体力学建立了煤气化炉的动态模型，考虑了气化过程中煤粉颗粒的大小变化和焦炭燃烧等细节，通过与实验数据的比较，得出了比较准确的煤气化炉模型。Cao等^[18]采用了2种建模方法建立煤气化炉模型，气化反应的核心部位使用计算流体力学建模，水和合成气热交换的部分则用了常规的方程建模，并利用此模型提出了一种优化的气化炉喷嘴设计方案。

参考上述文献中的研究方案，本文针对IGCC电站煤气化部分的核心设备煤气化炉开展研究，通过化工流程模拟软件Aspen Plus建立煤气化炉的稳态热力学模型，并分析了其主要参数的敏感性。研究结果可为研究IGCC整体系统提供参考。

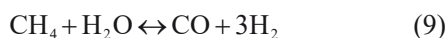
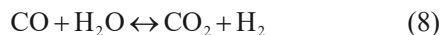
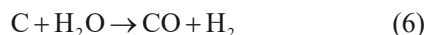
1 煤气化流程简介

目前已经工业化的煤气化技术按照气化炉的床型主要可分为固定床、流化床和气流床3类，其中气流床煤气化炉的优点是产气量更大、合成气的温度和压力更高、气化效率高、污染物排放少和煤种适应性强，是3种煤气化技术中最受重视的，也是最适合IGCC电站使用的煤气化技术^[19]。气流床煤气化技术的特点是煤粉随气化剂被高速喷入气化炉，气化炉内部的反应温度很高，一般在1300℃左右，煤粉在喷入的瞬间被干燥和热解，热解产物再进行一系列复杂的气相反应和气固反应^[20]。参考文献[21]的煤裂解模型，煤热解的产物主要有煤焦、CH₄、CO、CO₂、H₂、H₂O、NH₃、H₂S等气态和固态物质，这些物质首先与O₂进行燃烧反应，O₂在几十毫秒的时间内被消耗殆尽，之后的主要反应为气态物质与固态焦炭之间的气化反应，整个煤气化过程约为几秒^[22]，从气化的结果来看，煤粉在气化炉内被部分氧化，粗合成气的主要成分为CO和H₂。气化过程进行的主要反应如下。

氧气参与的燃烧反应：



焦炭的气化反应、水煤气反应、甲烷重整反应：



2 基于 Aspen Plus 的气化炉建模

2.1 建模过程

利用 Aspen Plus 建立气流床气化炉的模型，需要进行如下假设：

1) 气化炉内的反应达到平衡状态，且气化炉内的温度、压力、组分浓度分布均匀。

2) 气化炉输出的合成气组成只包括 CO、H₂、N₂、H₂O、CO₂、H₂S、CH₄、Ar、COS、NH₃ 和 HCN，不考虑其他气体的生成。

3) 气化产生的灰渣包含煤的灰分和未反应碳，其中的灰分为惰性组分，在气化炉中不参与任何反应；未反应碳以碳单质的形式存在，其质量按照碳转化率计算得出。

首先进行模型的基础设置，选择适合煤气化模拟的 PR-BM 物性方法(一种采用带有 Boston-Mathias 函数的 Peng-Robinson 立方状态方程来计算所有热力学性质的方法)，添加模型使用的化学组分信息，煤和灰分由于成分不明确，被定义为非常规组分，需要单独为它们选择物性方法，并补充煤的发热量。然后添加需要使用的计算模块，使用收率反应器 RYield(DECAMP 模块)模拟热解过程，需要定义其可能的产物及其产量的计算方法，本模型热解产物的产量根据煤的元素守恒进行计算；使用吉布斯反应器 RGibbs(GASIFIER 模块)模拟气化过程，吉布斯反应器根据最小吉布斯能原理运行，使用时只需给出可能的产物和反应条件即可计算得到产量；使用换热器(B2 模块)模拟合成气的冷却，使用分流器(SEP 模块)模拟合成气除灰的过程，再配合辅助的混合器和分流器构成了模型的基本架构。最后连接计算模块之间的流股并补充输入流股的组分、温度、压力等数据，对于输入的煤，还需提供其元素分析、工业分析和硫分分析的参数以支持后续的模拟计算。本文建立的气流床气化炉模型如图1所示。

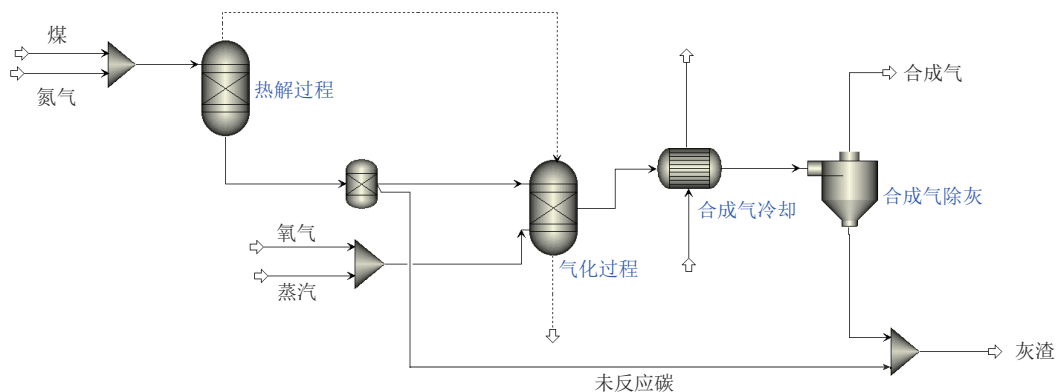


图1 气流床气化炉的煤气化流程模型

Fig. 1 Coal gasification process model of entrained flow coal gasifier

2.2 建模参数及模型校验

使用了文献[23]中煤气化炉设计数据作为建模参数，建立了煤粉气化炉与水煤浆气化炉的化工流程模型，两者的主要差异在于采取了不同的进料方式，在煤粉气化炉的气化过程中，煤粉由氮气携带，吹入气化炉中，而水煤浆气化炉的气化过程中，煤和水以一定的比例制成水煤浆，喷

入气化炉，在 Aspen Plus 模型中两者的进料流股不同、气化炉的运行条件不同，其余部分均相同。

建模所采用的气化炉设计参数如表1、2所示，输入煤的干燥基元素分析和工业分析结果如表3所示，Shell 气化炉入炉煤含水量5%，Texaco 气化炉入炉煤含水量12%。

表1 Shell气化炉的设计参数

Tab. 1 Design data of Shell gasifier

| 参数 | 入炉煤 | | 氧化剂(氧气) | | 输煤气体(氮气) | | 气化蒸汽 | | 气化条件 | | | 熔渣 | | | | |
|----|------------|----------|---------|----------|----------|----------|--------|-------|----------|---------|----------|------|------|--------|--------|----------|
| | 煤种 | 流量/(t/h) | 压力/MPa | 流量/(t/h) | 压力/MPa | 流量/(t/h) | 压力/MPa | 温度/°C | 流量/(t/h) | 气化温度/°C | 气化压力/MPa | 氧煤比 | 水煤比 | w(碳)/% | w(灰)/% | 流量/(t/h) |
| 数值 | Illinois#6 | 530.71 | 2.41 | 428.2 | 2.4 | 38.1 | 3.07 | 325 | 14.51 | 1371 | 2.4 | 0.89 | 0.03 | 4.3 | 95.7 | 52.62 |

表2 Texaco气化炉的设计参数

Tab. 2 Design data of Texaco gasifier

| 参数 | 入炉煤 | | 氧化剂(氧气) | | 水煤浆 | | 气化条件 | | | 熔渣 | | | |
|----|------------|----------|---------|----------|-----------|--------|---------|----------|------|-----|--------|--------|----------|
| | 煤种 | 流量/(t/h) | 压力/MPa | 流量/(t/h) | 耗水量/(t/h) | 质量分数/% | 气化温度/°C | 气化压力/MPa | 氧煤比 | 水煤比 | w(碳)/% | w(灰)/% | 流量/(t/h) |
| 数值 | Illinois#6 | 572.9 | 4.14 | 444.07 | 184.61 | 66.5 | 1315.6 | 4.0 | 0.96 | 0 | 0 | 100 | 50.35 |

表3 煤的成分分析

Tab. 3 Analysis of coal composition %

| 参数 | C_d | H_d | O_d | N_d | S_d | A_d | F_{Cd} | V_d |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 数值 | 69.6 | 5.2 | 10 | 1.3 | 3.9 | 10 | 51.3 | 38.7 |

注: C_d 为碳元素质量分数; H_d 为氢元素质量分数; O_d 为氧元素质量分数; N_d 为氮元素质量分数; S_d 为硫元素质量分数; A_d 为灰分质量分数; F_{Cd} 为固定碳质量分数; V_d 为挥发分质量分数。

通过比较合成气组分的比例和流量对所建立的气化炉模型进行校验,模拟计算结果与文献[23]中数据的对比情况见表4、5,可以看出模型计算的结果与设计数据相比各项的误差均不大,说明所建模型可以比较准确地计算气化炉生产合成气的过程。

表4 Shell气化炉模拟结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results of Shell gasifier

| 组分 | 体积分数/% | | 质量流量/(t/h) | |
|----------------------|--------|-------|------------|--------|
| | 设计数据 | 模拟数据 | 设计数据 | 模拟数据 |
| CO | 60.3 | 60.62 | 788.81 | 792.9 |
| H ₂ | 30.0 | 29.69 | 28.12 | 27.94 |
| N ₂ | 3.6 | 3.68 | 46.72 | 48.12 |
| H ₂ O | 2.0 | 2.13 | 16.78 | 17.89 |
| CO ₂ | 1.6 | 1.38 | 33.11 | 28.38 |
| H ₂ S | 1.2 | 1.21 | 18.6 | 19.28 |
| AR | 1.1 | 1.14 | 21.32 | 21.2 |
| COS | 0.1 | 0.10 | 3.63 | 2.76 |
| CH ₄ | — | 0.04 | 0.45 | 0.28 |
| NH ₃ +HCN | 0.1 | 0.01 | 1.36 | 0.08 |
| 合计 | 100 | 100 | 958.9 | 958.83 |

表5 Texaco气化炉粗煤气模拟结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation results of Texaco gasifier

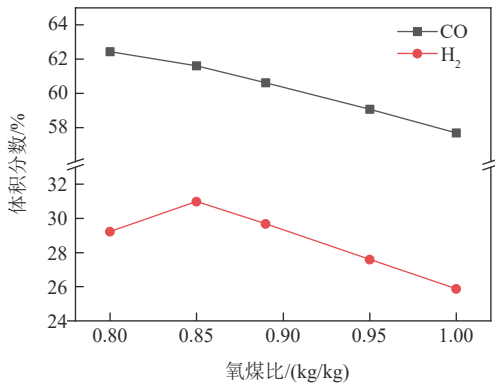
| 组分 | 体积分数/% | | 质量流量/(t/h) | |
|------------------|--------|-------|------------|---------|
| | 设计数据 | 模拟数据 | 设计数据 | 模拟数据 |
| CO | 40.8 | 42.30 | 649.1 | 674.57 |
| H ₂ | 29.6 | 28.97 | 33.57 | 33.25 |
| H ₂ O | 17.0 | 17.83 | 174.64 | 182.92 |
| CO ₂ | 10.2 | 8.92 | 254.01 | 223.61 |
| H ₂ S | 1.0 | 1.02 | 19.5 | 19.70 |
| N ₂ | 0.7 | 0.76 | 10.89 | 12.17 |
| CH ₄ | 0.3 | 0.01 | 2.72 | 0.13 |
| NH ₃ | 0.2 | 0.01 | 1.81 | 0.03 |
| AR | 0.1 | 0.12 | 2.72 | 2.77 |
| COS | 0.1 | 0.06 | 2.27 | 2.02 |
| 合计 | 100 | 100 | 1151.24 | 1151.17 |

3 煤气化关键参数敏感性分析

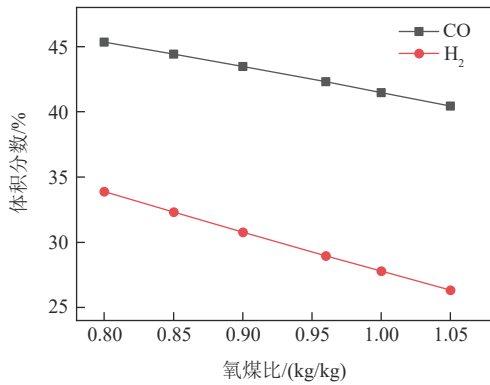
根据对煤气化炉运行参数的相关研究,影响合成气成分最主要的操作参数是气化剂与煤的比例,即氧煤比与水煤比,其中水煤比在煤粉气化炉中体现为蒸汽煤比,在水煤浆气化炉中体现为水煤浆浓度。基于前文建立的模型,在气化炉反应温度不变的前提下,分析了氧煤比和水煤比对合成气成分和产量的影响,结果可为运行参数的选择提供参考。

3.1 氧煤比对气化过程的影响

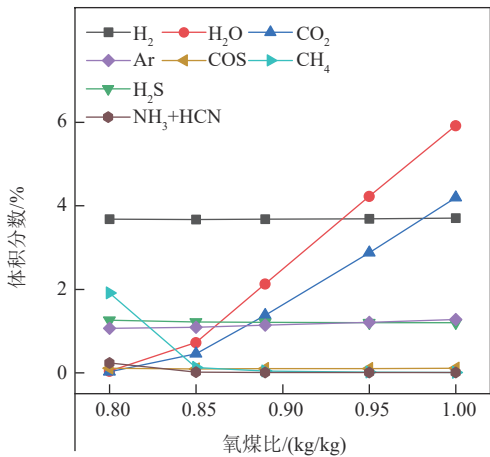
在模型中保持煤的输入量不变,令氧煤比在设计数据的附近波动,Shell气化炉的设计氧煤比为0.89,波动范围为0.80~1.00, Texaco 气化炉的设计氧煤比为0.96,波动范围为0.80~1.05。图2为氧煤比变化对合成气组分和产量的影响,可以看出,氧煤比对粗煤气主要成分(CO、H₂、H₂O、CO₂)产量的影响非常显著,随着氧煤比增大,粗煤气中的CO与H₂量呈先增大后减小的趋势,氧煤比有比较明显的理论最优值,这是因为煤气化反应本质上是煤的部分氧化反应,氧煤比较小时氧气不足,气化反应未能充分进行,氧煤比较大时氧气过多,碳元素和氢元素被彻底氧化为CO₂和H₂O。从模拟结果来看,Shell气化炉的最佳氧煤比在0.85左右, Texaco 气化炉合成气有效成分产量最高的点没有出现在0.80~1.05的范围内,而应该在0.80以下,结合气化炉型式考虑,水煤浆气化炉由于携带煤粉投入气化炉大量的水,这些水也起到了氧化剂的作用,但是氧气不足也会影响气化反应初期的燃烧放热过程,而燃烧过程没有在本文建立的模型中有所体现,所以出现了水煤浆气化炉最佳氧煤比较低的结果。



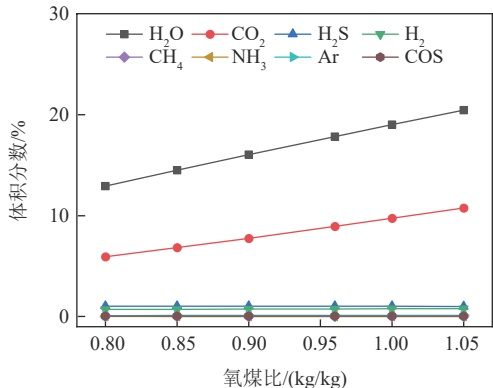
(a) CO和H₂体积分数的变化(Shell气化炉)



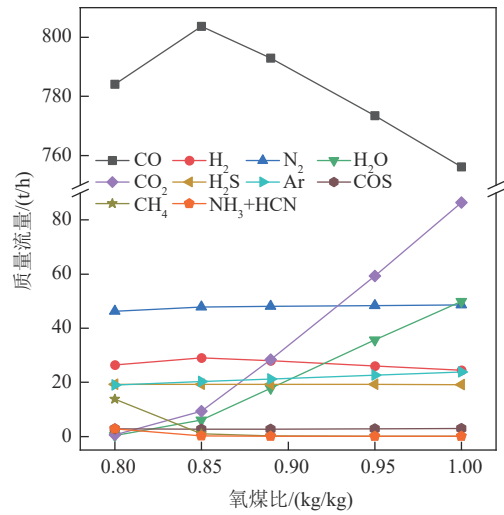
(b) CO和H₂体积分数的变化(Texaco气化炉)



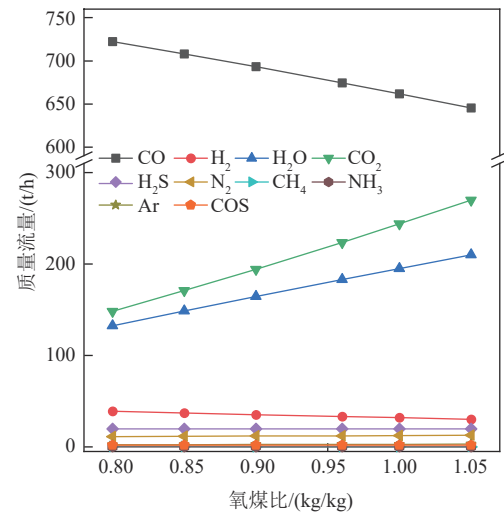
(c) 除CO和H₂以外粗煤气组分体积分数的变化(Shell气化炉)



(d) 除CO和H₂以外粗煤气组分体积分数的变化(Texaco气化炉)



(e) 粗煤气各组分质量流量的变化(Shell气化炉)



(f) 粗煤气各组分质量流量的变化(Texaco气化炉)

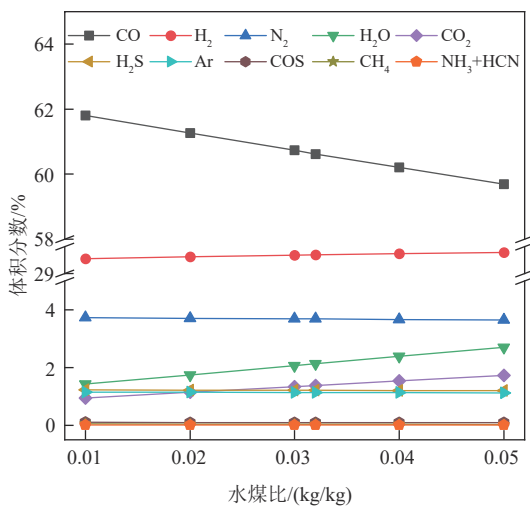
图2 氧煤比对粗煤气组分和质量流量的影响

Fig. 2 Effect of oxygen-coal ratio on raw gas fraction and mass flow rate

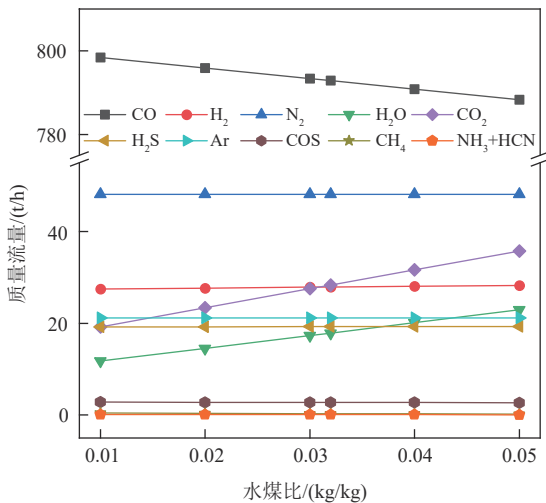
3.2 水煤比对气化过程的影响

与氧煤比敏感性的研究方法类似，保持煤的输入量不变，使水煤比在设计数据附近波动，Shell气化炉的设计水煤比为0.03，波动范围设置在0.01~0.05，Texaco气化炉的设计水煤浆浓度为66.5%，设置其波动范围为55%~70%。图3为水煤比变化对合成气组分和产量的影响，可以看出，水煤比对合成气组分和产量的影响弱于氧煤比的影响，进入气化炉的水增多时，考虑到气化炉中式(8)的反应，气化炉中水的增多应该使水煤气反应向正向进行，从而产生更多的H₂，但模型的计算结果却是在2种气化炉中均呈现出CO的产量减

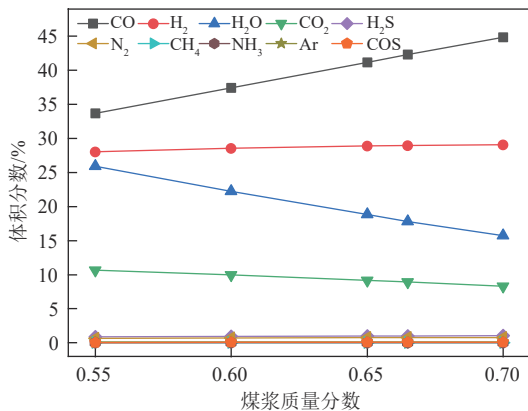
少, 粗合成气中 H_2O 和 CO_2 的量增大的趋势, 其原因在于水煤气反应的正反应会消耗气化炉中的能量, 而气化炉中水的增加会使合成气的焓值增大, 热值相应地减小, 因此增加进入气化炉的水量无法使合成气中 H_2 的含量明显增加。



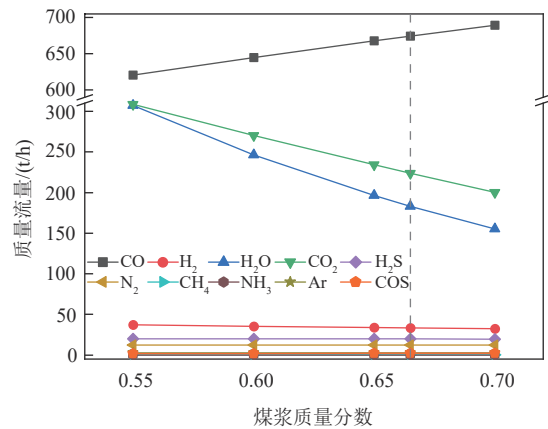
(a) 粗煤气组分体积分数的变化(Shell气化炉)



(b) 粗煤气组分质量流量的变化(Shell气化炉)



(c) 粗煤气组分体积分数的变化(Texaco气化炉)



(d) 粗煤气组分质量流量的变化(Texaco气化炉)

图3 水煤比对粗煤气组分和质量流量的影响

Fig. 3 Effect of water-coal ratio on raw gas fraction and mass flow rate

4 结论

基于 Aspen Plus 建立了2种典型气流床煤气化炉的热力学平衡模型, 与文献中的设计数据对比, 验证了模型的准确性。在后续的关键参数敏感性分析过程中, 分析了氧煤比和水煤比对合成气生产情况的影响, 比较了2种煤气化炉的不同之处。具体结论如下:

1) 氧煤比是影响合成气生产最主要的因素, 氧气的量基本决定了气化过程进行的程度, 氧气不足和氧气过多都会影响合成气有效成分的产量, 可以通过模拟或运行的方法分析最佳的氧煤比, 根据建立的 Shell 气化炉模型, 其最佳氧煤比应在 0.85 左右。

2) 水煤比对气化过程的影响也很明显, 投入更多的水会使合成气携带更多热力学能, 而热值相应减小, 若不增加气化炉的进煤量, 增加水的量会使合成气的水分和二氧化碳的量增加, 有效成分减少。

3) 热力学模型适合对稳态的煤气化过程进行模拟, 模拟结果准确, 建模简单, 计算量不大, 而若要更加准确地分析运行参数变化的影响, 则应该建立更加复杂和真实的系统, 或者选择更适应其他特殊情况的建模方法。

参考文献

[1] 杨勇平. 燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究

- 综述[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 308-315.
- YANG Y P. Review of basic research on energy clean and efficient utilization in coal-fired power systems[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 308-315.
- [2] 赵春生, 杨君君, 王婧, 等. 燃煤发电行业低碳发展路径研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 547-553.
- ZHAO C S, YANG J J, WANG J, et al. Research on low-carbon development path of coal-fired power industry[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 547-553.
- [3] 郑明辉, 宋民航, 王金星. “双碳”目标下燃煤机组转型目标与技术分析[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 14-22.
- ZHENG M H, SONG M H, WANG J X. Objective and technical analysis of coal-fired unit transformation under dual carbon goals[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 14-22.
- [4] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.
- ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of “carbon peak and carbon neutralization” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [5] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. (2024-01-01)[2024-08-22]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- National Bureau of Statistics. National data[EB/OL]. (2024-01-01) [2024-08-22]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [6] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术2035发展趋势与战略对策研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 132-140.
- SUN X D, ZHANG B, PENG S P. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132-140.
- [7] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625-1636.
- WU Q, TU K, ZENG Y F, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy(coal)industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [8] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 309-319.
- YAN G, ZHENG Y X, WANG X S, et al. Pathway for carbon dioxide peaking in China based on sectoral analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 309-319.
- [9] 杨硕. 基于煤炭气化的洁净煤发电技术探讨[J]. 电工技术, 2022(5): 200-202.
- YANG S. Discussion on clean coal power generation technology based on coal gasification[J]. Electric Engineering, 2022(5): 200-202.
- [10] 柳康, 许世森, 李广宇, 等. 基于整体煤气化联合循环的燃烧前CO₂捕集工艺及系统分析[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4897-4907.
- LIU K, XU S S, LI G Y, et al. Technological process and system analysis of pre-combustion CO₂ capture based on IGCC[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(12): 4897-4907.
- [11] 王赞宇. 整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)中煤粉气化系统的特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- WANG Z Y. Study on characteristic of integrated gasification combined cycle gasification system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [12] 李国智, 王松江, 肖娟. 水煤浆预热技术的煤气化系统热经济性敏感性分析与优化[J]. 煤炭转化, 2021, 44(5): 39-46.
- LI G Z, WANG S J, XIAO J. Sensitivity analysis and optimization on thermo-economic performance of coal-water slurry gasification system with preheating technology[J]. Coal Conversion, 2021, 44(5): 39-46.
- [13] 马娟, 郭琴琴, 曹勇辉, 等. 基于平衡态模型的煤气组分预测方法研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(1): 8-12.
- MA J, GUO Q Q, CAO Y H, et al. The research of gas components prediction method based on equilibrium theory[J]. Boiler Technology, 2015, 46(1): 8-12.
- [14] 汪洋, 代正华, 于广锁, 等. 运用Gibbs自由能最小化方法模拟气流床煤气化炉[J]. 煤炭转化, 2004, 27(4): 27-33.
- WANG Y, DAI Z H, YU G S, et al. Simulation of entrained-flow bed coal gasifier by the method of gibbs free energy minimization[J]. Coal Conversion, 2004, 27(4): 27-33.
- [15] 郑志行, 李谦, 张家元, 等. 基于Aspen Plus的Shell气流床工业气化炉模拟[J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2152-2160.
- ZHENG Z H, LI Q, ZHANG J Y, et al. Simulation

- of industrial Shell entrained flow bed by Aspen Plus[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 2152-2160.
- [16] 朱莎弘, 杨欣华, 张双铭, 等. 基于 Aspen Plus 的废锅流程粉煤气化炉稳态流程模拟[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1376-1383.
ZHU S H, YANG X H, ZHANG S M, et al. Steady state simulation of coal gasification with radiant syngas cooler based on Aspen Plus[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1376-1383.
- [17] ISMAIL T M, SHI M, XU J, et al. Assessment of coal gasification in a pressurized fixed bed gasifier using an ASPEN plus and Euler-Euler model[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7(3): 516-535.
- [18] CAO Z, LI T, ZHANG Q, et al. Systems modeling, simulation and analysis for robust operations and improved design of entrained-flow pulverized coal gasifiers[J]. Energy, 2018, 148: 941-964.
- [19] 王辅臣, 于广锁, 龚欣, 等. 大型煤气化技术的研究与发展[J]. 化工进展, 2009, 28(2): 173-180.
WANG F C, YU G S, GONG X, et al. Research and development of large-scale coal gasification technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2): 173-180.
- [20] 吴治国. 煤气化原理及其技术发展方向[J]. 石油炼制与化工, 2015, 46(4): 22-28.
WU Z G. Coal gasification principle and its technology development direction[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2015, 46(4): 22-28.
- [21] MERRICK D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal: the evolution of volatile matter [J]. Fuel, 1983, 62(5): 534-539.
- [22] 吴学成, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 气化参数影响气流床煤气化的模型研究(I): 模型建立及验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 124-128.
WU X C, WANG Q H, LUO Z Y, et al. Modelling on effects of operation parameters on entrained flow coal gasification (I): model establishment and validation[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2004, 38(10): 124-128.
- [23] 焦树建. 论 IGCC 电站中气化炉型的选择[J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(2): 5-14.
JIAO S J. Choice of gasifier's pattern for IGCC power plant[J]. Gas Turbine Technology, 2002, 15(2): 5-14.

收稿日期: 2023-06-26。

修回日期: 2023-09-03。

作者简介:



王轶男

王轶男(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多能互补系统集成、能源系统技术经济性分析, wyn97@ncepu.edu.cn;



陈衡

陈衡(1989), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多能互补系统集成、能源系统技术经济性分析、电力大数据分析 & 智能优化、配电网提质增效, 本文通信作者, heng@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 杨阳)