第 34 卷第 1 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.34, No.1
2013 年 1 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Jan., 2013

IGCC 电站的过程模拟和性能分析

孟 靖 熊 杰 赵海波

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室，湖北 武汉 430074)

摘 要 整体煤气化联合循环 (IGCC) 系统是一种先进的高效、清洁、具有燃烧前碳捕捉功能的能源利用和转化系统。本文利用流程模拟软件 Aspen Plus 对基于干煤粉气化技术的 IGCC 电站 (电功率 250 MW_e) 进行模拟，并针对其中的 Shell 气化炉、常温湿法煤气净化系统、燃烧前 CO_2 捕捉系统等进行性能分析。通过灵敏度分析发现氧煤比是 Shell 气化炉性能的最重要影响因素，气化炉优化参数为：气化温度 1450~1500°C(热损失为 2%)，气化压力 4 MPa，氧煤比 0.72，蒸汽煤比 0.08，氧气纯度 99.5%；煤气净化系统的热煤气效率可达 94.48%，可回收显热 52.7 MW；M702F 燃气轮机净输出功 222.9 MW；三压再热式余热锅炉净输出功 70.6 MW；以神华煤为燃料时，不考虑碳捕捉的 IGCC 电站的能量转换效率可达到 46.37%，而考虑碳捕捉功能的 IGCC 电站的效率下降为 35.63% (降低 10.74%)。

关键词 整体煤气化联合循环；Shell 气化炉；Aspen Plus；碳捕捉；过程模拟

中图分类号：TK123 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-231X(2013)01-0040-05

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Process Simulation and Performance Analysis

MENG Jing XIONG Jie ZHAO Hai-Bo

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract Integrated Gasification Combined Cycle System (IGCC) is an advanced system for energy utilization and transformation for its high efficiency, low pollutant emission and carbon capture before combustion. In this paper, the IGCC plant (250 MW_e) is simulated by the commercial process simulation tool Aspen Plus, and the performance of Shell gasifier, wet gas purification system at room temperature and pre-combustion CO_2 capture system are analyzed. It is found that oxygen-coal ratio is the most important factor for Shell gasifier by means of sensitivity analysis, and the obtained optimization parameters are gasification temperature of 1450~1500°C (with heat loss of 2%), gasification pressure of 4 MPa, oxygen-coal ratio of 0.72, steam-coal ratio of 0.08, oxygen purity of 99.5%, respectively. In the case, the efficiency of hot coal gas in gas purification system would be up to 94.48% with sensible recycled heat of 52.7 MW. The net output of M702F gas turbine and three-pressure Heat Recover Steam Generator(HRSG) is 222.9 MW and 70.6 MW, respectively. In the case of using Shenhua coal as fuel, the energy exchange efficiency of IGCC plant is up to 46.37% without CCS, but decreased to 35.63% with CCS (with energy efficiency penalty of 10.74%).

Key words IGCC; Shell coal gasifier; Aspen Plus; CCS; process simulation

0 引 言

IGCC (整体煤气化联合循环发电) 是将含碳固体燃料进行气化，再将合成气净化后用于燃气－蒸汽联合循环的发电技术。该技术具有能量转换效率高、污染物近零排放等优点，在目前低碳经济和低碳社会得到广泛认可的形势下，IGCC 技术显现了较强的生命力。目前世界上已经有一些采用该技术的示范电站在运行，但是很多都没有达到预期的经济效益，对现有技术的改进和完善是目前非常迫切的任务 [1,2]。通过对其进行过程模拟和优化分析，可以得到系统合适的运行条件及评价系统的热力学性能。Pruschek 等 [3-6] 进行了 IGCC 的模拟和优化的一些工作，特别是 Kloster[5] 和 Göttlicher[6]、Meyer[7,8] 等人进行了有 CO_2 捕集工况和普通工况的 IGCC 电站的模拟，但他们并没有对其子系统进行优化分析。国内也有相关的研究，邓世敏等 [9,10] 对空分装置进行了模拟分析，沈玲玲等 [11,12]

收稿日期：2012-03-09；**修订日期**：2012-12-13

基金项目：国家自然科学基金重点项目 (No.50936001)；教育部新世纪优秀人才支持计划 (No.NCET-10-0395)

作者简介：孟 靖 (1989-)，女，学士，主要从事燃煤 CO_2 减排和环境热经济学方向的研究。**通信作者**：赵海波，教授，klinsmannzhb@163.com。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对气化炉进行模拟，从现有的研究结果中可以看出一些参数对气化结果的影响，但是这些工作主要是对独立子系统的模拟，而没有对整个 IGCC 进行的模拟。马顺勤 [13] 对整个 IGCC 系统进行了模拟分析，但其系统中采用的是 Texaco 气化炉，其效率比 Shell 气化炉的效率低。

本文基于 Aspen Plus 系统仿真软件平台对 IGCC 电站的进行过程模拟，并且选用干粉进料的 Shell 气化炉作为研究对象。气化效果不仅会影响经济效益，而且会对环境造成很大影响，因此对气化过程的灵敏度分析非常重要，可通过灵敏度分析确定最佳参数。本文重点分析了气化温度、氧煤比、蒸汽煤比以及氧气纯度 (包括直接通入空气情况) 对气化过程的影响，以及煤气净化过程中余热回收系统对系统效率的影响；进一步研究了 IGCC 电站考虑碳捕捉时的各项性能。

1 工艺流程与系统仿真模型

对于一个典型的 IGCC 电厂，其工艺过程如下：煤经气化成为中低热值煤气，经过净化除去煤气中的硫化物、氮化物和粉尘等污染物，变为清洁的气体燃料，然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧，被加热的气体用于驱动燃气轮机做功，燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水，产生过热蒸汽驱动燃气轮机做功 [1]。当考虑碳捕捉时，净化后的煤气经过水汽转化反应 (WGS) 等生成富含 CO_2 和 H_2 的合成气，通过物理吸附方法在燃烧前把 CO_2 捕捉分离出来，剩余的高浓度 H_2 气体可进入燃气轮机做功。

2 模型和分析

2.1 气化炉

2.1.1 气化炉建模　图 1 是 Aspen Plus 上的 Shell 气化炉流程图，反应器 Ryield 表示煤的裂解过程。GASIFIER 模块是 RGibbs 平衡反应器模型 [14]，RADIATE 模块将气化炉出口煤气冷却到 400°C。Ssplit 模块对气化炉产物进行气固分离。因为系统与

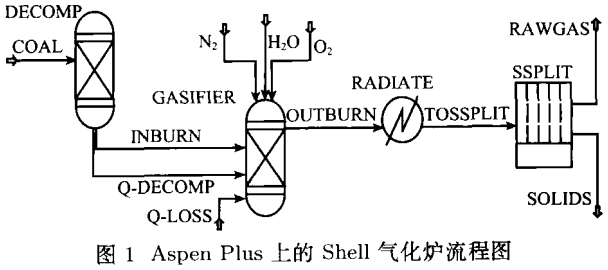

图 1 Aspen Plus 上的 Shell 气化炉流程图
Fig. 1 Flow diagram of the Shell gasifier model in Aspen Plus

表 1 具体运行参数
Table 1 Specific operating parameters

氧气纯度/%	氧煤比/kg/kg	热损失/%	煤流量/(kg/s)	氧气流量/(kg/s)	气化炉压力/MPa
99.5	0.7	2	24.5	17.15	4.0

表 2 神华煤气化模拟结果
Table 2 Simulation results of Shenhua coal

粗煤气温度/°C	粗煤气流量/(kg/s)	粗煤气的摩尔组分/%				冷煤气效率/%
		CO	H_2	CO_2	N_2	
1380.9	42.615	54.9	27.6	5.5	2.9	81.45

环境有热量传递，本文引入估算的 2%的热量损失用以修正模拟结果。由于 Shell 气化炉中碳的转化率可达到 99%，本文不提前设定碳的转化率，主要根据粗煤气温度和冷煤气效率来讨论气化结果。表 1 为该系统的输入数据，运行得出的粗煤气出口温度及成分组成见表 2。其中，冷煤气效率的定义为：冷煤气效率＝粗煤气的低位热值 × 产气率/1 千克湿煤低位热值。

2.1.2 气化炉灵敏度分析

1) 气化温度对气化结果的影响

为研究气化温度对气化过程的影响，引入了热损失这一参数，用热损失来表征气化温度的影响。在模拟过程中若不预先设定热损失，而直接设定气化炉温度为 1500°C，热损失为 1.28%，设定气化炉温度为 1400°C 时，热损失为 2.34%。本文模拟热损失由 0 变化到 3%时，气化产品的组成和温度计算结果见图 2 和图 3。随着热损失变大，气化炉温度和冷煤气效率呈逐渐降低趋势。在模拟过程中，一般取热损失为 2%[12]。

2) 氧煤比对气化结果的影响

对于一定的气化炉，在其他条件一定时，氧煤质量比过低，将使气化炉温度降低，碳转化率降低；氧煤质量比过高，将使煤气品质降低，此时存在一个最佳的氧煤质量比 [15]。由图 4 和图 5 可以看出，对于神华煤而言，氧煤比 (氧气质量/湿煤质量) 在 0.72 左右时，冷煤气效率较高，此时气化炉温度也比较合适。

3) 蒸汽煤比对气化结果的影响

保持煤粉质量不变，按照 0.7 的氧煤比输入，改变蒸汽的质量以模拟蒸汽煤比的影响，模拟结果如表 3 所示。随着蒸汽煤比增加，气化温度逐渐下降，冷煤气效率总体也是下降趋势。在实际工程中，当氧煤比一定时，蒸汽煤比质量太小会导致气化温度过高，所需设备材料的要求也相应提高，成本会增加。蒸汽煤比太大会导致气化温度低，冷煤气效率较低，

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

碳转化率下降。

4) 氧气纯度对气化结果的影响

模拟时改变氧气纯度而保持氧气总量不变，氧气质量流量随着氧气纯度降低而增加。结果如表 4 所示。氧气纯度增大时，气化温度一直降低，冷煤气效率逐渐增大。因此，氧气纯度较高对气化结果有利，目前比较成熟的空分装置其氧气纯度可达到 99.5%以上。为研究氧气纯度较低时的气化性能，将

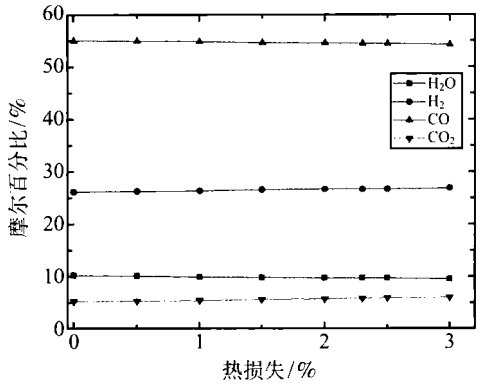

图 2 气化温度对气化组分的影响

Fig. 2 Gas components of various gasification temperatures

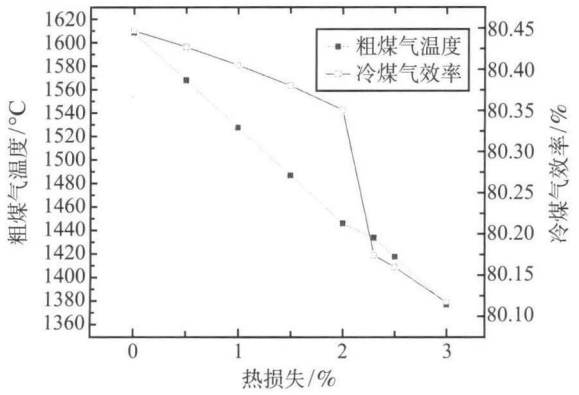

图 3 气化温度对气化结果的影响

Fig. 3 Gasification results of various temperatures

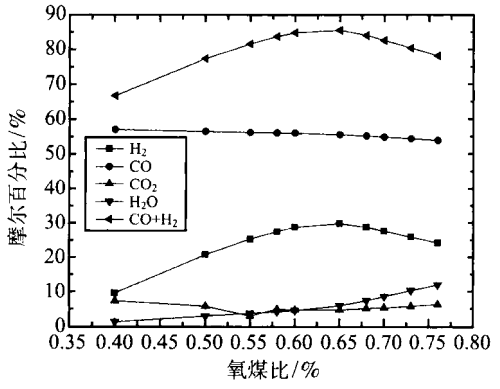

图 4 氧煤比对气化组分的影响

Fig. 4 Gas components of various oxygen-coal ratios

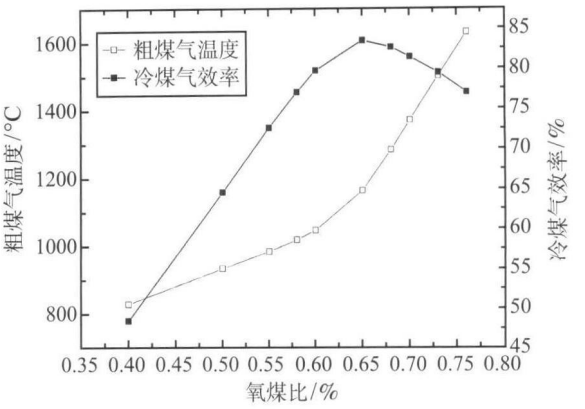

图 5 氧煤比对气化结果的影响

Fig. 5 Gasification results of various oxygen-coal ratios

表 3 蒸汽煤比对气化结果的影响

Table 3 Gasification results of various steam-coal ratio

蒸汽煤比	粗煤气初温/°C	煤气化摩尔百分比组成(粗合成气)/%			冷煤气效率/%
		H_2	CO	CO_2	
0.070	1484.0	26.3	55.7	5.4	80.08
0.080	1476.7	26.4	55.1	5.6	80.00
0.090	1469.6	26.4	54.5	5.8	80.00
0.095	1466.0	27.7	54.5	5.6	79.94
0.100	1462.5	27.7	54.2	5.7	79.95
0.110	1455.6	26.5	53.3	6.2	79.94

表 4 氧气纯度对气化结果的影响

Table 4 Gasification results of various oxygen purity

氧气纯度/%	氧气质量流量/(kg/s)	粗煤气初温/°C	煤气化组分摩尔百分比/%			冷煤气效率/%
			H_2	CO	CO_2	
95.0	17.872	1376.1	27.2	54.2	5.5	81.27
96.0	17.686	1375.0	27.3	54.3	5.5	81.31
97.0	17.504	1373.9	27.4	54.5	5.5	81.31
98.0	17.325	1372.6	27.6	54.7	5.4	81.40
99.0	17.150	1371.4	27.7	54.9	5.4	81.45
99.5	17.060	1370.8	27.7	54.9	5.4	81.54
20.9	84	1064.7	12.1	22.7	5.5	71.28

通入的高纯度氧气改为空气进行模拟，模拟结果如表 4. 可知虽然保持氧气总含量不变，但冷煤气效率降低了约 10%，且气化产物中含有大量氮气，超过了 50%，这将增加煤气净化工艺的成本和难度，对于 CO_2 捕捉也不利。但其优点是可以省掉投资成本和运行成本昂贵的制氧系统。

2.2 粗煤气净化

目前对 IGCC 的研究多集中在联合循环以及气化炉、余热锅炉等设备上，对其净化系统研究较少。实际上净化系统对 IGCC 的系统性能有着非常重要

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的影响。一方面气化影响整个系统的可靠性和寿命，另一方面粗煤气净化中的显热回收对系统的效率有很大影响。本文以常温湿法净化系统为研究对象，图 6 为 Aspen Plus 上的净化流程图，用 EVAPORAT 模块模拟废热锅炉回收粗煤气辐射冷却器和对流冷却器热量的过程，模块 1、2 模拟粗煤气/ 洁净煤气换热器，COOLER 是 COS 水解过程。用 SEP 模块来模拟 NHD(Selexol) 法煤气脱硫的过程，净化后的煤气成分如表 5 所示。可知净化后的煤气的脱硫率能达到要求值的 98%，热煤气效率 $\eta = 94.48\%$，其中 η =(净煤气发热量 + 净化系统回收的显热)/煤的低位发热量。该模拟中净化系统回收显热为 52.71 MW。

2.3 燃气轮机

该模拟使用三菱重工的 M701F 燃气轮机，如图 7 所示，COMPRESS 代表压气机，是 Aspen Plus 中的 COMP 模块，模块 BURN 模拟的是燃烧室；TURBINE 模拟的是透平。透平所做的功和压气机所耗的功进行运算得出燃气轮机的净功率。另外本文假设冷却空气全部从压气机的出口抽出，从透平的入口进入。在该模拟中，透平的入口温度和出口温度分别为 1380°C、557.8°C，燃气轮机安全可靠地运行。

2.4 余热锅炉和汽轮机

模拟采用三压再热锅炉 (图 7)，余热锅炉用 MHeatX 模型代替。燃烧室 BURN 用 RGibbs 模型，模块 COOL 模拟凝汽器。在单元操作模型已经选好的基础上，用物料流、热流、功流进行相关连接即可得到模拟对象的系统流程图。蒸汽输入参数如下：主蒸汽压力为 110×10^5 Pa，主蒸汽温度比燃气透平温度低 50°C，本文暂选 512°C。再热蒸汽压力为 22×10^5 Pa，低压蒸汽压力为 6×10^5 Pa，温度为 280°C。进入余热锅炉的省煤器的给水温度一般为 30~50°C，凝汽器压力为 5000 Pa，蒸汽轮机的等熵效率为 90%。

2.5 CCS 技术

CCS(Carbon Capture and Storage，二氧化碳捕获和封存) 被公认为是化石能源利用系统减排 CO_2 的合适选择，IGCC 电站可有效实现燃烧前 CO_2 捕获，此时，气化炉产生的粗煤气经过冷却、除尘、脱硫等工艺后，在水汽转换反应器中与蒸汽发生作用，产生的主要成分为二氧化碳和氢的精煤气。此时 CO_2

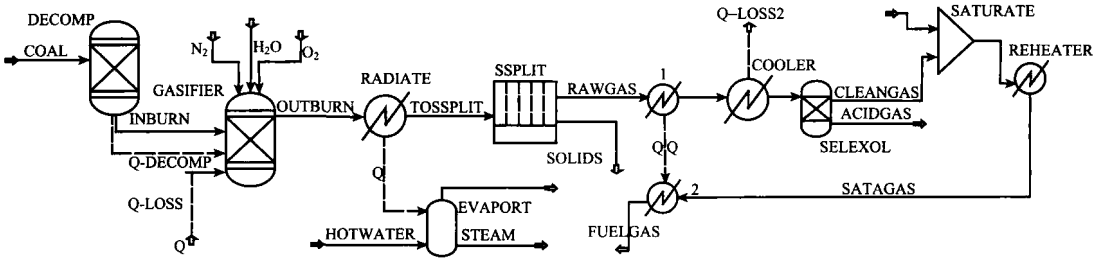

图 6 净化流程图

Fig. 6 Flow diagram of gas purification system

表 5 净化后煤气成分表

Table 5 Gas components after purification

组分	洁净煤气成分表 (湿基)/%				
	H_2O	H_2	CO	CO_2	N_2
摩尔分数	0.084	0.270	0.555	0.053	0.032

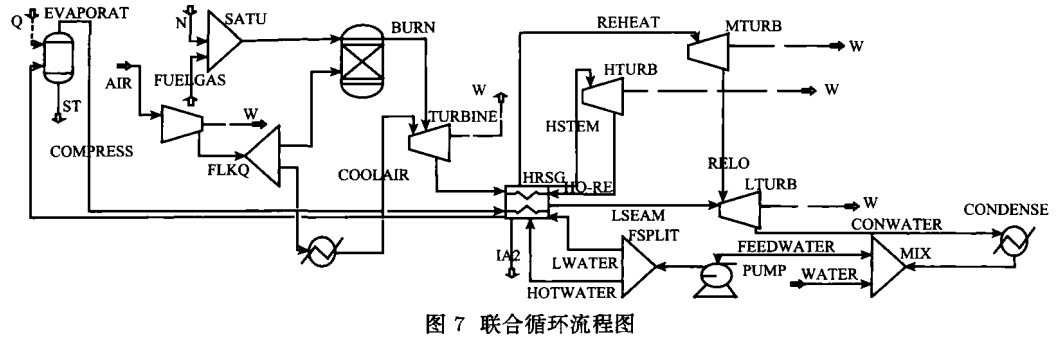

图 7 联合循环流程图

Fig. 7 Flow diagram of combined cycle model

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可通过物理吸附等方法被捕捉分离，经过压缩和干燥，最后运输到封存地。剩余的含氢气体，再被燃烧用于发电 [1]。在过程模拟中，在原有的 IGCC 系统中又添加了两个子系统，一个是两级的水煤气转换装置 (包括一个高温反应器和低温反应器)，另一个是 CO_2 分离、干燥和压缩系统。

2.6 模拟结果

根据以上各子系统模拟确定的优化运行参数，得到考虑碳捕获和不考虑碳捕获的 IGCC 电站的性能参数，如表 6 所示。整个 IGCC 电站的效率定义为净输出功率与单位时间输入的煤低热值的比值。可知不考虑碳捕获的 IGCC 系统的效率为 46.37%，考虑碳捕获的 IGCC 系统的效率为 35.63%。这个结果是和文献一致的 [16]。

表 6 联合循环的运行结果

Table 6 Simulation results of the combined cycles

性能参数	不考虑碳捕获的 IGCC 系统	考虑碳捕获的 IGCC 系统
燃气透平入口温度/°C	1380	1350
燃气透平出口温度/°C	557.8	543.3
余热锅炉排烟温度/°C	133.8	146
燃机净功/MW	222.884	212.579
汽轮机净功/MW	70.6	40.203
总功/MW	293.484	252.782
厂用电率	0.1187	0.2138
输出净功/MW	258.647	198.723

3 结 论

本文使用 Aspen Plus 软件对整个煤气化联合循环的全过程进行了模拟分析，相关结果与文献 [13] 基本相符，模拟结果可靠。鉴于气化炉的重要性，尤其对气化炉进行了深入的分析，得到了气化炉的最佳参数取值。对于神华煤来讲，气化炉温度可定在 1400~1500°C，氧煤比在 0.72 左右 (湿基)，蒸汽煤比可选 0.08~0.1，氧气纯度尽可能高。对于本文建立的 IGCC 系统，使用 Shell 气化炉、常温湿法净化系统、M701F 燃气轮机和三压再热式余热锅炉，得到不考虑碳捕获的 IGCC 系统的效率为 46.37%，而考虑碳捕获的 IGCC 系统的效率为 35.63%，其效率下降了 10.74%。该系统还有待在以后的工作中进一步优化，更好地对 IGCC 电站提供可参考的数据。

参 考 文 献

[1] 屈伟平. 清洁煤发电的 CCS 和 IGCC 联产技术 [J]. 化工装备技术, 2010, 31(3): 57–63
QU Weiping. CCS and IGCC Cogeneration Technology of Clean Coal Power Generation [J]. Chemical Equipment Technology, 2010, 31(3): 57–63

[2] 廖小花. IGCC 特点及减排 CO_2 方法 [J]. 东北电力技术, 2010(9): 45–47
LIAO Xiaohua. IGCC Characteristics and its Method for CO_2 Reducing [J]. Northeast Electric Power Technology, 2010(9): 45–47

[3] Zimmermann G, Haupt G, Oeljeklaus G, et al. Modern IGCC Stations as High Effective Means for CO_2 Reduction [R]. Joule Summary, USA, 1999

[4] Zimmermann G, Haupt G, Oeljeklaus G, et al. New Design of IGCC for Competitive Power Generation [R]. Gasification Technologies Conference. USA, 1998

[5] Kloster R. Thermodynamische Analyse und Optimierung von Gas-/Dampfturbinen-Kombi-Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung [D]. VDI, Reihe 6 Nr 409, Düsseldorf, VDI Verlag, 1999

[6] Göttlicher G. Energetik der Kohlendioxidrückhaltung in Kraftwerken [D]. VDI, Reihe 6 Nr 421, Düsseldorf, VDI Verlag, 1999

[7] Korobov D. Untersuchung der Wirkungsgradpotentiale von IGCC-Kraftwerk Skonzepten, Freiberger Forschungsheft A876 Energie [D]. TU Bergakademie Freiberg, 2003

[8] Ogriseck K. Untersuchungenvon IGCC Kraftwerkskonzepten mit Polygeneration und CO_2 Abtrennung [D] TU Bergakademie Freiberg, 2006

[9] 邓世敏, 段立强, 官亦标, 等. IGCC 系统中空分特性及其对整体性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 186–189
DENG Shimin, DUAN Liqiang, GUAN Yibiao, et al. Study on ASU Subsystem Characteristic and its Effects on IGCC Performance [J]. Journal of Engineering the Thermophysics, 2003, 24(2): 186–189

[10] 李素君, 陈红. 空气分离装置的模拟与优化 [J]. 辽宁化工, 2011, 30(11): 487–489
LI Sujun, CHEN Hong. Simulation and Optimization [J]. Liaoning Chemical Industry, 2011, 30(11): 487–489

[11] 沈玲玲, 姜秀民, 王辉, 等. IGCC 示范工程煤气化炉的数值模拟 [J]. 煤炭转化, 2009, 32(1): 14–19
SHEN Lingling, JIANG Xiumin, WANG Hui, et al. Numerical Simulation of Gasifier in An IGCC Demonstration Project [J]. Coal Conversion, 2009, 32(1): 14–19

[12] 张宗飞, 汤连英, 吕庆元, 等. 基于 Aspen Plus 的粉煤气化模拟 [J]. 化肥设计, 2008, 46(3): 14–18; 26
ZHANG Zongfei, TANG Lianying, LÜ Qinyuan, et al. Gasification-Simulation Based on Aspen Plus [J]. Chemical Fertilizer Design, 2008, 46(3): 14–18; 26

[13] 马顺勤. 基于 Aspen Plus 对整体煤气化联合循环系统的模拟 [D]. 华北电力大学, 2008
MA Shunqin. Simulation of Integrated Gasification Combined Cycle Based on Aspen Plus [D]. North China Electric Power University, 2008

[14] Perez-Fortes M, Bojarski A D, Velo E, et al. Conceptual Model and Evaluation of Generated Power and Emissions in an IGCC Plant [J]. Energy, 2009, 34: 1721–1732

[15] 王同章. 煤炭气化原理与设备 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
WANG Tongzhang. Principles and Coal Gasification Equipment [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2001

[16] Christian K, Hartmut S. Modelling of an IGCC Plant With Carbon Capture for 2020 [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 934–941

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net