

# Influence of Steam-Water System's Design Modes on Overall Performance in IGCC

Hao Xie<sup>1,2</sup>, Zhongxiao Zhang<sup>1</sup>, Zhenzhong Li<sup>3</sup>, Lei Chen<sup>1,3</sup>, Lili Qi<sup>1</sup>, Guofeng Zhou<sup>1</sup>

1. Department of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. Department of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

3. NPCC Shenyang 110034, China

1. xiehao@njnu.edu.cn, 2. zhzhx222@163.com

**Abstract:** The 200MW IGCC (Integrated gasification combined cycle) system model was established and calculated. Complied with principle of integrity, the influences of different steam-water cycle modes and different matching schemes of HRSG with waste heat cooler on overall performance and local thermal characteristics in IGCC were discussed according to mass balance, energy balance and reaction equilibrium of each unit. Results show that three-pressure reheat steam-water cycle mode is beneficial to recycle waste heat of exhaust from gas turbine, to increase main steam parameters of steam turbine, and to boost overall performance in IGCC. Reasonable matching scheme of HRSG with waste heat cooler is designed according to principle of "temperature matching and step utilization of energy". The study can provide helpful references for designing and optimization of steam-water system in domestic model IGCC units.

**Keywords:** IGCC; steam system; HRSG; efficiency

## IGCC 汽水系统配置方式对整体性能的影响

谢浩<sup>1,2</sup>, 张忠孝<sup>1</sup>, 李振中<sup>3</sup>, 陈雷<sup>1,3</sup>, 戚利利<sup>1</sup>, 周国锋<sup>1</sup>

1. 上海理工大学 动力工程学院, 上海市 200093

2. 南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏省 南京市 210042

3. 国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁省 沈阳市 110034

1. xiehao@njnu.edu.cn, 2. zhzhx222@163.com

**摘要:** 建立 200MW 级整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电系统模型, 以整体性为原则, 基于各设备单元的物质平衡、能量平衡以及化学反应平衡对 IGCC 系统进行计算, 探讨不同汽水循环形式、不同余热锅炉与废热锅炉汽水配置方式对 IGCC 发电系统性能的影响。结果表明, 在本研究系统中, 选择三压再热汽水循环形式, 可进一步回收燃气轮机的排气余热, 同时提高了汽轮机的初参数, 有利于提高系统性能; 余热锅炉高压省煤器的汽水配置遵循“温度对口、能量梯级利用”的原则, 以获得较高的整体性能。研究结果为国内 IGCC 示范发电机组的汽水系统优化配置提供参考。

**关键词:** 整体煤气化联合循环; 蒸汽系统; 余热锅炉; 效率

### 1 引言

IGCC (整体煤气化联合循环) 汽水系统主要包括余热锅炉、蒸汽轮机及相关的辅助设备, 它几乎贯穿于整个 IGCC 系统之中, 对系统整体优化和各主要子系统匹配起着重要的作用。

然而, IGCC 中汽水系统的传热传质比常规联合循环要复杂许多。除了需要考虑燃机的排气余热外, 在带有废热锅炉的 IGCC 系统中, 还需要考虑气化工艺中

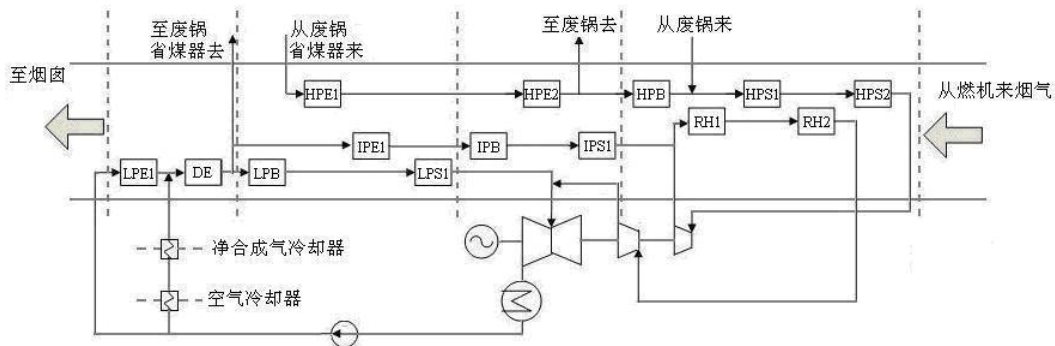
废热锅炉流程的显热利用和净化工艺中合成气冷却时显热和潜热利用; 采用整体化空分或部分整体化空分系统时, 还需要考虑空气冷却器的热量利用。总之, IGCC 中余热锅炉需要回收来自气化岛和燃机岛两部分的热量, 且各部分热量的数量和品位也有差别, 会对系统中的余热锅炉产生影响。因此, 只有结合 IGCC 整体性原则, 考虑汽水系统本身的热量平衡关系以及和其它子系统的相互关系, 去分析 IGCC 汽水系统配置方式对整体性能的影响才具有一定的意义。

国内、外对常规联合循环汽水系统的优化配置已经做了大量的研究工作<sup>[1-5]</sup>，主要分为两个方面：一是系统热力参数优化，二是汽水系统设备的技术经济优化。

在此基础上，对于IGCC汽水系统的优化配置研究也越来越受到人们的重视。文献<sup>[6-7]</sup>以双压再热和三压再热汽水系统组成的整体空分IGCC系统为研究对象，分析了燃气轮机不同调节规律和汽轮机不同运行方式对系统变工况性能的影响，并提出了IGCC蒸汽系统的合理运行方式。段立强<sup>[8-11]</sup>等人采用温区模型的概念，建立IGCC汽水循环系统的变工况特性模型，并开发程序软件；通过实例研究总结归纳了装置负荷变化并采用3种不同调节手段以及大气温度变化时的汽水循环系统变工况特性，揭示了一些主要变量典型变化规律及其对系统性能影响关系。高健等人<sup>[12-13]</sup>采用分别限定排烟温度和节点温差的方法，研究了IGCC设计工况下合成气冷却器与余热锅炉的匹配以及采用不同循环形式对电厂整体技术、经济性的影响。

在前面的研究基础上，本文以200MW级IGCC整体系统为研究对象，结合国外IGCC机组实际运行特点，研究汽水系统配置方式对整体性能的影响情况。为国内IGCC示范机组汽水系统的合理配置和优化运行提供参考。

## 1 IGCC 汽水系统的建立



LP, IP and HP denote low pressure, middle pressure and high pressure respectively; E, B and S denote economizer, evaporator and superheater respectively; RH denotes reheater

LP、IP 和 HP 分别表示低压、中压和高压；E、B 和 S 分别表示省煤器、蒸发器和过热器；RH 表示再热器

Figure 1. Schematic of water-steam system in IGCC

图 1. IGCC 汽水系统示意图

## 2 研究方法

采用序贯模块法对系统进行模拟计算，各单元操作模块按照相应的单元操作正常运行的情况而设计，

本IGCC汽水系统流程如图1所示。从凝汽器出来的凝结水一部分经空气冷却器和净合成气冷却器预热，另一部分直接进入余热锅炉省煤器，然后汇集进入除氧器。从除氧器出来凝结水分三路：一路进入废热锅炉省煤器，一路进入中压省煤器，还有一部分进入低压蒸发器。低压蒸发器产生的低压饱和蒸汽，部分作为除氧器工作蒸汽，剩余进入低压过热器进一步加热，产生的低压过热蒸汽与中压缸排汽一起进入蒸汽轮机的低压缸；中压省煤器的凝结水经中压蒸发器、中压过热器产生中压过热蒸汽，与汽轮机高压缸排汽混合后进入高温再热器继续加热，产生的再热蒸汽进入汽轮机的中压缸；高压省煤器的凝结水经高压蒸发器、高压过热器产生高压过热蒸汽，进入汽轮机的高压缸。

在基准算例的系统流程中，为了将气化岛的高温合成气热量有效转移至常规岛的汽水系统中，辐射废热锅炉和对流废热锅炉同时从余热锅炉高压省煤器处引入部分凝结水，在废热锅炉中吸热蒸发后，产生的蒸汽再次引入余热锅炉的高压蒸发器，与余热锅炉汽水系统汇合。

此外，粗合成气过热器、冷却水终冷器、粗合成气冷却器以及粗合成气湿饱和器的汽水侧组成一个小的、独立的汽水循环，在本系统计算中给予考虑但不作深入比较。

行逐个模块的计算时，前一模块的出口物流信息，作为后一模块的入口物流数据，直至完成整个热力系统的模拟<sup>[14]</sup>。

余热锅炉系统由于工质侧和烟气侧的流动方向相反，不同于传统的单向流动，因而在调用各个模块时，采用回路切断法，即在适当的地方切断回路，将切断处的变量作为迭代变量赋一假定值，然后依次调用单元模块进行序贯计算，得到其计算值，反复进行迭代，直到迭代变量的两次计算值一致。

本IGCC系统中，空分系统的整体化系数为30%，气化方式采用带辐射废热锅炉和对流废热锅炉的水煤浆气化，燃气轮机选择E级改烧合成气燃气轮机联合循环。在基准算例中，余热锅炉选用三压、再热、无补

燃、卧式余热锅炉，蒸汽轮机为三压再热蒸汽轮机。设计工况下，保证燃机100%负荷运行，高、中、低压段节点温差都设为10℃，高、中压段接近点温差设为5℃，低压段接近点温差设为16℃。

参照国外同级别IGCC发电机组的实际运行数据，输入合理的初始参数，以满足系统的质量和能量平衡以及各单元之间的耦合。在Thermoflex商用软件的设计工况（TD模式）下，进行热力计算，待热力核算平衡后，再利用ED模式对组成系统的各设备特性指标进行计算和评估，最后在OD模式下，计算系统的额定工况和变工况热力特性。设计工况的主要参数如表1所示。

Table 1. Primary parameters of design load  
表 1. 设计工况的主要参数

项目	单位	指标	项目	单位	指标
设计煤种	/	内蒙满世煤	空分整体化率	%	30
气化炉容量	t/d	2000	燃气轮机型号	/	GE9171E改造
气化压力	MPa	3.6	高压蒸汽压力	MPa	92.51
气化温度	℃	1311.7	中压蒸汽压力	MPa	24.52
水煤浆浓度	%	60.5	低压蒸汽压力	MPa	3.61
水-煤比	t/t	0.3669	高/中/低压节点温差	℃	10/10/10
氧-煤比	t/t	0.7390	高/中/低压节点温差	℃	16/5/5

### 3 结果与分析

#### 3.1 循环形式

本研究的IGCC发电系统中，燃气轮机的排气流量大于120 kg/s，排气温度高于510℃，适宜采用双压或三压的汽水流程系统。为此，本文设计了三种汽水循环形式：分别为三压再热（基准算例）、三压无再热和双压再热。

常规的联合循环机组燃机与汽机的功率比约为2:1，而在本IGCC工程中，由于气化岛高温合成气的热量被常规岛汽水系统有效利用，汽轮机的进汽量增加，汽轮机出力有了较大的提高，使得燃机与汽机的功率达到1~1.2:1，从图2可以看出，由于三种方案燃机负荷率都以100%条件下进行计算，因此燃机的发电功率基本不变，而汽机的发电功率有较大变化，从而影响到总的发电功率。系统总功率以及汽机功率占总功率比的大小顺序均为：三压再热>双压再热>三压无再热。

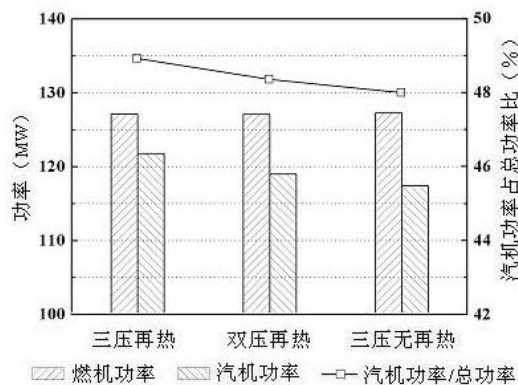


Figure 2. Influence of steam cycle modes on power distribution  
图 2. 循环形式对功率分配的影响

造成系统性能变化的深层原因是在不同汽水循环形式中，对高、中、低压段的汽水流量进行了重新分配，从而使得余热锅炉和蒸汽轮机的热量转换有所不同。从图3可以看出，废热锅炉产生的高压蒸汽量占总高压蒸汽流量的55%~70%，其中，辐射废热锅炉产生

的高压蒸汽量约为对流废热锅炉的两倍。中压蒸汽与低压蒸汽量相当，均只有高压蒸汽量的10%左右。

双压再热和三压再热相比，高压蒸汽流量有所降低，由于减少了中压级，低压蒸汽流量增加7.13t/h，同时由于引至废热锅炉的蒸汽焓有所降低，使得辐射废热锅炉和对流废热锅炉的蒸汽流量略有增加；三压无再热高压蒸汽流量有较大提高，主要是因为取消再热后，高压汽包蒸发量大幅提高，中压和低压蒸汽流量变化不大。

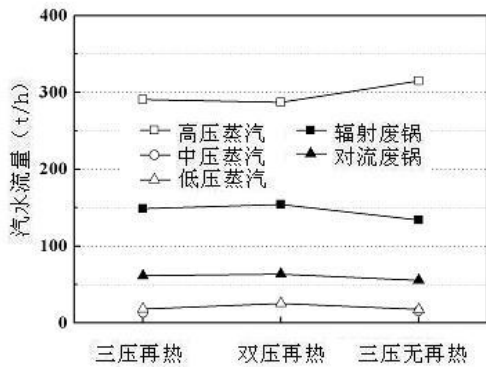


Figure 3. Influence of steam cycle modes on steam flow  
图 3. 汽水循环形式对汽水流量的影响

表2列出了200MW级IGCC系统额定工况下，三种汽水循环形式的燃气轮机效率  $\eta_{gt}$ 、余热锅炉效率  $\eta_h$ 、汽轮机效率  $\eta_{st}$  以及系统净效率  $\eta_{cc}^N$ 。

以氧气为气化剂的IGCC系统各效率可由以下公式求得<sup>[15]</sup>

$$\eta_{gt} = P_{gt} / Q_{gt}^c$$

$$\eta_{st} = P_{st} / (Q_{st1} + Q_{st2} + Q_{st3} + \Delta Q_{th} - Q_w)$$

$$\eta_h = (Q_{c1} - Q_{A2}) / (1 - P_{gt}^0 / Q_{gt}^c)$$

$$\eta_{cc}^N = \frac{\eta_{gt} \{ \eta_{st} + [Q_{st}^c / Q_{gt}^c + (1 - P_{gt}^0 / Q_{gt}^c) \eta_h] \eta_{st} \} (1 - \eta_e)}{(1 + Q_{st}^c / Q_{gt}^c)}$$

其中

- $Q_{gt}^c$  : 分配到燃气轮机中参与做功的热能, kJ/h;
- $Q_{st}^c$  : 分配到蒸汽轮机中参与做功的热能, kJ/h;
- $Q_{c1}$  : 进入余热锅炉高温烟气所携带的热能, kJ/h;
- $Q_{A2}$  : 余热锅炉排出烟气所携带的热能, kJ/h;
- $P_{gt}^0$  : 燃机轴端发电功率的热当量, kJ/h;
- $\eta_e$  : 厂用电率, %;
- $\eta_B$  : 气化炉效率, %。

Table 2. Influence of steam cycle modes on efficiency  
表 2. 汽水循环形式对效率的影响

循环形式	三压再热	双压再热	三压无再热
燃机效率(%)	32.9	33.0	33.0
余锅效率(%)	87.8	87.4	88.3
汽机效率(%)	37.8	37.0	36.7
系统净效率(%)	40.6	40.1	39.8

可以看出，三种方案中，燃机效率基本不变；系统净效率与汽机效率的高低顺序一致，均为：三压再热>双压再热>三压无再热，三压再热形式的系统净效率为40.4%，比双压再热高0.7%，而双压再热比三压无再热仅高0.3%左右，也印证了三压再热循环形式由于增加了余热锅炉的受热面积，充分回收了燃气轮机的排气余热，电厂的总体性能有所提高。

而余热锅炉当量效率反映了余热锅炉中高温烟气与汽水系统的换热情况。虽然三压无再热循环形式比三压再热形式少了一级再热器，但在相同气化岛和燃机岛运行特性的前提下，利用ED模式对不同汽水循环形式余热锅炉的各换热设备特性指标（如管排数、管径及换热面积等）进行了重新计算和评估，得出三压无再热循环形式的总换热面积反而比三压再热形式的大，因此排烟温度也就最低，对应的余热锅炉当量效率最高。

总之，由于三压无再热汽轮机低压末级叶片蒸汽干度没法保证，同时也是三种循环形式中系统净效率最低的一种，故三压无再热循环方式在本级别 IGCC 系统的设计方案中可不作考虑，而三压再热虽然比双压再热系统净效率高 0.5%，但由于三压余热锅炉的汽水系统比双压要复杂，增加了系统投资，需要通过经济技术比较进行确定。

### 3.2 余热锅炉与废热锅炉的汽水匹配方式

余热锅炉与废热锅炉的汽水匹配是指从余热锅炉不同省煤器出口位置抽取工质，在废热锅炉中与气化炉产生的高温合成气换热后，被送回到余热锅炉不同蒸发器出口位置，以回收利用气化岛的热量。

理论上可选择抽取和回送的位置有很多种，首先根据“温度对口、能源梯级利用”的原则，诸如辐射废热锅炉引入位置比对流废热锅炉引入位置还靠近低压段的匹配方式不予考虑；其次，由于系统效率下降过快，辐射废热锅炉和对流废热锅炉都与中压段或低压段匹配方式也不予考虑。在选用三压再热循环形式

的基础上，按照抽取和回送位置从高压段向低压段变化的顺序，代表性地选择了三种汽水匹配方案，如图

4 所示。

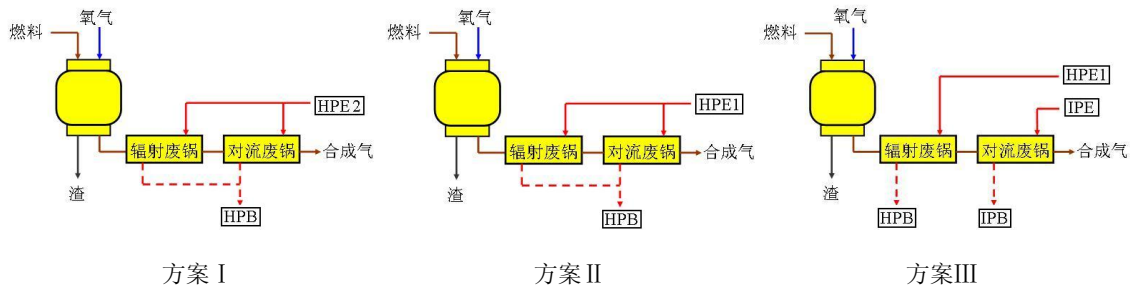


Figure 4. Matching schemes of HRSG with waste heat cooler  
图 4. 余热锅炉与废热锅炉汽水匹配方案设计

图 5 给出余热锅炉与废热锅炉配置方式对汽水流量的影响，随着废热锅炉抽取工质位置从高温、高压段向低温、低压段方向变化，高压蒸发器的汽水流量呈逐渐减少趋势，而中压蒸发器的汽水流量有所增加，对低压蒸发器汽水流量影响不大。主要是因为，随着匹换热器的给水温度下降，相同吸热量所需要的汽水流量会逐渐减小。如方案 III，此时废热锅炉产生的高压蒸汽量已占总高压蒸汽流量的 70% 左右，中压蒸汽量约占高压蒸汽量的 25%，不利于系统的经济运行。

3.2MW 被净合成气过热器利用，其余全部进入汽水系统。

Table 3. Influence of matching schemes on efficiency  
表 3. 配置方式对效率的影响

废热锅炉抽取方式	方案 I	方案 II	方案 III
燃机效率(%)	32.9	32.9	32.9
余热效率(%)	87.8	87.8	87.7
汽机效率(%)	37.8	37.5	37.2
系统净效率(%)	40.6	40.5	39.5

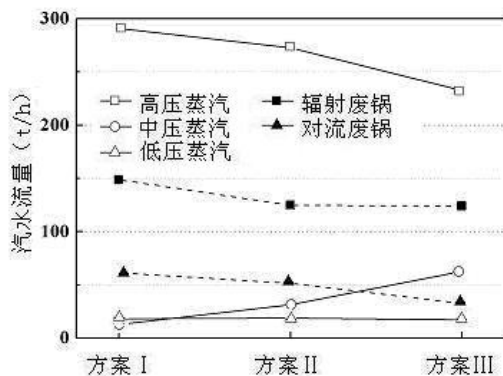


Figure 5. Influence of matching schemes on steam flow  
图 5. 配置方式对汽水流量的影响

由于计算工况均选择燃机 100% 负荷率运行，决定了气化炉至燃机段合成气的状态参数基本保持不变，因此汽水在废热锅炉中的吸热量也基本不受汽水配置方式的影响。计算得出：辐射废热锅炉吸热量约为 57.0MW，对流废热锅炉吸热量约为 23.5MW，对流废热锅炉省煤器吸热量约为 6.7MW，设置在燃机与空分之间的空气冷却器回收热量为 6.9MW，其中有

表 3 反映了三种汽水配置方式对 IGCC 系统各效率的影响。可以看出，随着废热锅炉抽取工质位置从高温、高压段向低温、低压段方向变化时，对燃机效率和余热锅炉效率影响不大，而汽机效率和系统净效率是逐渐降低的，其根本原因是只有当使用“温度对口、梯级利用”的传热匹配方案时，才能获得更高的系统效率。

由此可见，在相当级别 IGCC 系统中，为了有效地利用气化岛中高温合成气的热量，应该使余热锅炉高压省煤器中的高温给水与废热锅炉进行匹配换热，以获得较大的发电功率和较高的系统净效率。

#### 4 结论

(1) 在采用水煤浆气化并带有辐射废热锅炉和对流废热锅炉的 200MW 级 IGCC 系统中，不宜选择三压无再热余热锅炉，而三压再热的系统净效率虽然高于双压再热，但由于其初投资增加，还应通过经济技术评价进行确定。

(2) 汽水配置方式所造成 IGCC 整体性能变化的深层原因是对高、中、低压段的汽水流量进行了重新分配，从而使得余热锅炉和蒸汽轮机的热量转换有

所不同, 一般来说, 废热锅炉产生的高压蒸汽量占总高压蒸汽流量的 55%~70%, 中压蒸汽与低压蒸汽量相当, 约占高压蒸汽量的 10%。

(3) 通过三压再热 IGCC 系统的热力计算表明, 在相同的压力层次中, 尽可能利用余热锅炉中温度较高段的工质与废热锅炉中的高温合成气进行传热匹配, 可获得较高的系统供电效率。

(4) 在 IGCC 系统中, 汽水配置方式不会影响废热锅炉产生的总热量, 但由于对进入废热锅炉、余热锅炉各段的汽水流量分配产生较大影响, 故对各段热量分配产生影响, 从引起了系统整体性能的变化。可以看出, 高温合成气与余热锅炉中温度较高的部分进行传热匹配才能够获得较高的系统效率。

在 IGCC 汽水系统配置优化时, 不应完全沿用常规联合循环余热锅炉的参数, 应当充分考虑常规岛本身的热量平衡关系以及和气化岛、燃机岛汽水耦合的相互影响关系。

## References (参考文献)

- [1] Jiao Shujian. Gas steam combined cycle [M]. Beijing: China Machine Press, 2000(in Chinese).  
焦树建. 燃气-蒸汽联合循环[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] Yang Cheng, Yang Zeliang, Cai Ruixian. Analytical characteristics of HRSG with steam extraction [J], *Proceedings of CSEE*, 2007, 27(29): 1-6(in Chinese).  
杨承, 杨泽亮, 蔡睿贤. 单压过热蒸汽余热锅炉抽汽运行的解析特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 1-6.
- [3] Liu Xiangjie, Yin Chong, Hou Guolian, et al. Supervisory predictive control of boiler in combined cycle power plant[J], *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(20): 52-58(in Chinese).  
刘向杰, 殷冲, 侯国莲等. 联合循环电厂余热锅炉的监督预测控制策略[J], 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 52-58.
- [4] Christoph Koch, Frank Cziesla, George Tsatsaronis. Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms [J], *Chemical Engineering and Processing*, 2007, 46(3): 1151-1159.
- [5] Huang Huoji. Optimized design and off-design characteristics of steam system in HRSG [J], *China Science and Technology Information*, 2006, 04(in Chinese).  
黄伙基. 余热锅炉蒸汽系统的优化配置及其变工况运行特点[J]. 中国科技信息, 2006. 04.
- [6] Lu Zehua, Zhao Shihang, Shang Xuwei, et al. Design and off-design characteristics of three pressure and reheat steam system in IGCC[J], *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2000, 15(4): 373-375(in Chinese).  
吕泽华, 赵士杭, 尚学伟等. 三压再热汽水系统 IGCC 的设计工况和变工况性能[J]. 热能动力工程, 2000, 15(4): 373-375.
- [7] Zhao Shihang, Lu Zehuai, Sun Huaxiang. Off-design characteristics of two pressure and reheat steam system in IGCC [J]. *Journal of Power Engineering*, 2001, 21(2): 1156-1160 (in Chinese).  
赵士杭, 吕泽华, 孙华祥. 双压再热蒸汽循环的 IGCC 变工况性能[J]. 动力工程, 2001, 21(2): 1156-1160.
- [8] Duan Liqiang, Lin Rumou, Cai Ruixian, et al. Off-design characteristics of bottom cycle system in IGCC [J], *Proceedings of CSEE*, 2002, 22(2): 26-30 (in Chinese).  
段立强, 林汝谋, 蔡睿贤等. 整体煤气化联合循环(IGCC)底循环系统变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 26-30.
- [9] Xu Gang, Lin Rumou, Shao Yanjun et al. Study on universality and precision of gas turbine modeling[J], *Proceedings of CSEE*, 2005, 25(21): 106-111(in Chinese).  
徐钢, 林汝谋, 邵艳军等. 燃气轮机建模的通用性和精细性研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 106-111.
- [10] Duan Liqiang, Lin Rumou, Jin Hongguang, et al. Off-design performance characteristics of an integrated gasification combined cycle(IGCC) system [J], *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2001, 16(96): 582-590(in Chinese).  
段立强, 林汝谋, 金红光等. 整体煤气化联合循环(IGCC)系统变工况特性[J]. 热能动力工程, 2001, 16(96): 582-590.
- [11] L.Jiang, R.Lin, H.Jin, et al. Study on thermodynamic characteristic and optimization of steam cycle system in IGCC [J], *Energy Conversion and Management*, 2002, 43: 1339-1348.
- [12] Gao Jian, Ni Wei-dou, Li Zheng, et al. Option of IGCC system's key components and their influence on the power plant's overall performance: (III) Different arrangements of syngas coolers and HRSG[J], *Journal of Power Engineering*, 2007, 28(3): 471-474(in Chinese).  
高健, 倪维斗, 李政等. IGCC 系统关键部件的选择及其对电厂整体性能的影响——(3) 气化炉合成气冷却器与余热锅炉的匹配 [J]. 动力工程, 2007, 28 (3) : 471-474.
- [13] Gao Jian, Ni Wei-dou, Li Zheng, et al. Option of IGCC system's key components and their influence on the power plant's overall performance: (II) The HRSG [J], *Journal of Power Engineering*, 2007, 27 (6) : 985-989(in Chinese).  
高健, 倪维斗, 李政等. IGCC 系统关键部件的选择及其对电厂整体性能的影响——(2) 余热锅炉篇[J]. 动力工程, 2007, 27 (6) : 985-989.
- [14] Yang Youqi, Xiang Shuguang. Simulation and optimization of chemical process [M], Beijing, *Chemical Industry Press*, 2006(in Chinese).  
杨友麒, 项曙光. 化工过程模拟与优化[M], 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] Jiao Shujian. Theoretical foundation of gas steam combined cycle [M]. Beijing: *Tsinghua University Press*, 2003(in Chinese).  
焦树建. 燃气-蒸汽联合循环的理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.