

# 整体煤气化联合循环 三压再热底循环系统变工况特性

陈晓利<sup>1</sup>, 吴少华<sup>1</sup>, 李振中<sup>2</sup>, 王阳<sup>2</sup>, 王颖<sup>1</sup>, 陈雷<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001;

2. 国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁省沈阳市 110034)

## Off-design Characteristics of Three-pressure With Reheat Bottom Cycle System in Integrated Gasification Combined Cycle

CHEN Xiao-li<sup>1</sup>, WU Shao-hua<sup>1</sup>, LI Zhen-zhong<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

2. National Power Plant Combustion Research Center, Shenyang 110034, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** The model of 200 MW integrated gasification combined cycle (IGCC) system was established by the software "ThermoFlex". The off-design characteristics of three-pressure with reheat bottom cycle system in IGCC were studied and effects of gas turbine's load, atmosphere temperature and air separation unit (ASU) integrated coefficient on characteristics of bottom cycle system were fully discussed. Results show that while in regulation manner of adjusting compressor inlet guide vanes (IGV) angle and keeping turbine inlet temperature ( $T_3$ ) constant to reduce gas turbine's load, main steam temperature and reheat steam temperature are firstly increased and then declined. Closing IGV angle can restrain pressure of high-pressure vapor-bag decline, and make exhaust steam dryness of low-pressure steam turbine rise, so this is beneficial to improve off-design characteristics of bottom cycle system. As atmosphere temperature increasing, pressure of high-pressure vapor-bag, steam flow inlet high-pressure cylinder and power of bottom cycle system all decline, but main steam temperature and exhaust steam dryness of low-pressure cylinder in steam turbine increase. Decreasing  $X_{as}$  can greatly enhance power of bottom cycle system, but slowly reduce exhaust steam dryness of low-pressure cylinder in steam turbine.

**KEY WORDS:** integrated gasification combined cycle (IGCC); three-pressure with reheat; bottom cycle system; off-design

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA05A110, 2006AA05A115)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2006AA05A110, 2006AA05A115).

characteristic

**摘要:** 采用 ThermoFlex 软件建立了 200 MW 级整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)系统模型, 研究三压再热流程的 IGCC 底循环系统变工况特性。详细讨论了燃气轮机负荷、大气温度和整体空分系数对底循环系统性能的影响。结果表明: 燃气轮机采用调节压气机进口可转导叶角度-等燃气透平初温的调节方式降负荷时, 随燃气轮机负荷降低, 主蒸汽温度和再热蒸汽温度先升高后降低, 关小压气机进口导叶角度可抑制高压汽包压力的下降, 同时使汽轮机低压缸排汽干度上升, 有利于提高底循环系统的变工况性能。随大气温度升高, 高压汽包压力、高压缸进汽量和底循环功率均降低, 而主蒸汽温度和汽轮机低压缸排汽干度升高。降低整体空分系数可以大幅度提高底循环系统功率, 但导致汽轮机低压缸排汽干度缓慢降低。

**关键词:** 整体煤气化联合循环; 三压再热; 底循环系统; 变工况特性

## 0 引言

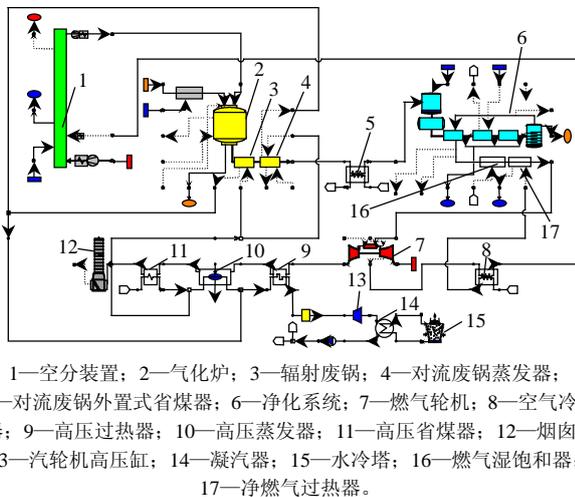
整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)系统为多种关键技术的有机集成, 主要由煤气化系统、煤气净化系统、空分系统、燃气轮机顶循环系统以及蒸汽底循环系统组成<sup>[1-2]</sup>。蒸汽底循环系统是 IGCC 系统的一个重要组成部分, 是 IGCC 系统一体化和各子系统匹配优化的关键点之一。一般 IGCC 的蒸汽底循环系统是由废热锅炉(heat recover steam generator, HRSG)和汽轮机以及联合循环的蒸汽系统和煤气化、煤气净化与处

理过程中涉及的蒸汽系统等组成的综合系统，其性能的优劣直接影响整个 IGCC 系统的性能。为此，各国学者对其从设计、优化等不同角度作了不少的研究<sup>[3-10]</sup>。底循环系统的主热源是燃气轮机的排热，其运行工况主要受燃气轮机排气参数的变化制约，因此，凡是导致燃气轮机参数变化的因素也是引起底循环系统变工况的原因。由于负荷、大气温度、整体空分系数和氮气回注系数的变化，燃气轮机一直都在变工况下运行，使进入 HRSG 的排气温度和流量经常发生很大的变化，同时，废热锅炉(简称废锅)产生的蒸汽量和参数也将发生变化，从而导致底循环系统经常处于变工况的状态，这将对机组的运行稳定性、安全性以及整体性能产生重要影响。

本文采用 ThermoFlex 软件建立了 200 MW 级 IGCC 系统模型，从系统的角度出发，着重研究了三压再热底循环系统的变工况特性，研究结果为 IGCC 电站系统的设计和运行提供参考。

### 1 模型建立及计算条件

图 1 为 200 MW 级 IGCC 系统模型简图，其中对净化系统和底循环系统进行简化。底循环系统如图 2 所示。IGCC 系统主要由气化岛、燃气轮机岛和常规岛组成，其中气化岛包括空分装置、气化炉和废锅、净化系统等。废锅包括辐射废锅、对流废锅蒸发器和对流废锅外置式省煤器；净化系统包括洗涤塔、燃气冷却器、粗燃气过热器、氧硫化碳、水解器、燃气终冷器和脱硫装置。燃气轮机岛由燃气湿饱和器、净燃气过热器、阀站、燃气轮机及其辅助设备组成。常规岛包括余热锅炉、汽轮机、凝汽器和水冷塔等。在本文的计算中，氮气不回注。



1—空分装置；2—气化炉；3—辐射废锅；4—对流废锅蒸发器；5—对流废锅外置式省煤器；6—净化系统；7—燃气轮机；8—空气冷却器；9—高压过热器；10—高压蒸发器；11—高压省煤器；12—烟囱；13—汽轮机高压缸；14—凝汽器；15—水冷塔；16—燃气湿饱和器；17—净燃气过热器。

图 1 IGCC 系统模型简图  
Fig. 1 Model of IGCC system

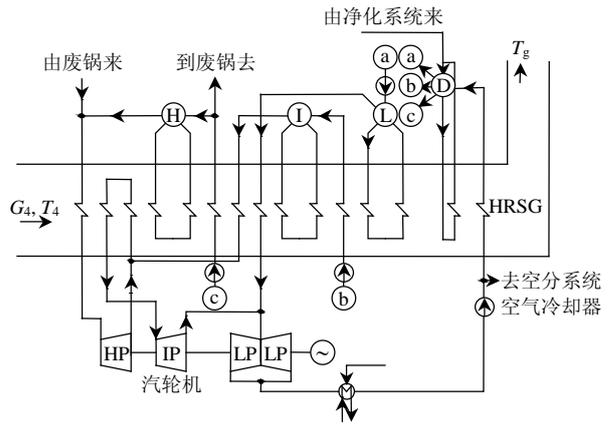


图 2 三压再热流程的底循环系统  
Fig. 2 Three-pressure with reheat bottom cycle system

气化炉采用水煤浆气化，煤质如表 1 所示。大气环境条件为杭州市的年平均值，大气温度 17.4 °C，大气压力 101.1 kPa，相对湿度 79%。采用 GE9171E 型燃气轮机，HRSG 和汽轮机都采用滑压运行方式。假定在不同计算工况下，合成气和汽水侧经系统内各设备时的压降不变，系统设计工况参数如表 2 所示。

表 1 煤质资料  
Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal

元素分析/%					$M_{ar}/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ/kg)$	流动温度/°C
C	H	N	S	O			
57.81	3.62	0.84	0.33	0.30	17.30	21.74	1260

表 2 IGCC 计算参数  
Tab. 2 Parameters of IGCC system

参数	数值
气化炉容量/(t/d)	2000
气化温度/°C	1311
水煤浆浓度/%	60.5
氧气纯度/%	99
燃气轮机功率/MW	128.3
压机机入口空气流量/(t/h)	1491
燃气轮机透平初温/°C	1129
气化压力/MPa	3.6
氧-煤比/(t/t)	0.756
碳转化率/%	98
汽轮机背压/kPa	5.0
燃气轮机效率/%	34.3
燃气轮机压比	12.4
燃气轮机排气温度/°C	548
汽轮机低压缸排汽干度/%	91
余热锅炉	
高/中/低压接近点温差/°C	5/5/16
高温端差/°C	23
高/中/低压窄点温差/°C	10/10/10

## 2 计算结果及分析

### 2.1 燃气轮机负荷变化对底循环系统性能的影响

IGCC 中蒸汽底循环系统为多热源，除燃气轮机排气余热外，还有废锅回收粗合成气的显热量和

空分系统空气冷却排热等。在本文的计算中,相对于燃气轮机的排气余热,空分系统空气冷却排热量非常小。而高压流程饱和蒸汽多数来自回收粗合成气的废锅,因此,在本文中蒸汽底循环系统的热源重点研究燃气轮机排热和废锅回收的显热量。

通常,燃气轮机负荷有3种调节方式,分别为:压气机进口可转导叶(inlet guide vanes, IGV)角度不调<sup>[11]</sup>、IGV角度调节时等燃气透平初温( $T_3$ )<sup>[12]</sup>调节和IGV角度调节时等燃气透平排气温度( $T_4$ )调节<sup>[13]</sup>。本文以IGV角度调节—等 $T_3$ 的调节方式为例,研究了底循环系统的变工况性能。

图3为燃气轮机负荷下降时,燃气轮机排气参数和废锅回收的显热量的变化规律。由图3可知,随燃气轮机负荷降低, $T_4$ 呈先增加后降低的趋势,而燃气轮机排气流量( $G_4$ )先快速降低后缓慢降低,转折点为80%负荷时。这是由于采用等 $T_3$ 调节时,随燃气轮机负荷降低,逐渐关小IGV角度,压比减小,使得 $T_4$ 逐渐升高,当降到80%负荷时, $T_4$ 达到最大值583.1℃,即限制值 $T_{4max}$ ,不再关小IGV角度,否则会使 $T_4$ 超温。另外,由于关小IGV角度,使压气机吸入的空气量减少,最终导致 $G_4$ 快速降低。此后,通过减小 $T_3$ 来适应负荷变化,使得 $T_4$ 随负荷的降低而降低,由于在此过程中,IGV角度保持不变,使得压气机吸入的空气量不变,因此,当负荷从80%降到40%时, $G_4$ 缓慢降低。

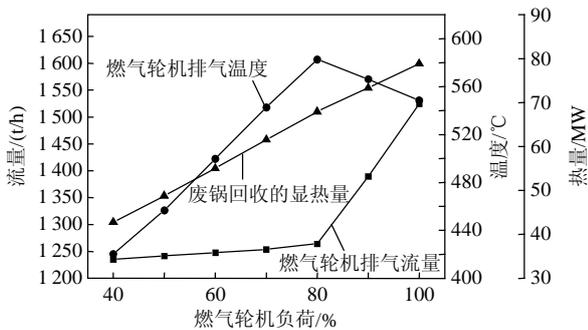


图3 燃气轮机负荷对底循环系统热源性能的影响  
Fig. 3 Effects of gas turbine's load on heat source of bottom cycle system

由于当煤种和氧煤比不变时,气化炉的气化温度不变,使得气化炉产生的合成气成分不变,即合成气的热值不变<sup>[14]</sup>。在计算过程中保证合成气的热值不变,通过调节合成气的流量来适应负荷的变化。由于燃气轮机负荷降低使气化炉的投煤量线性减少,即产生的合成气量线性减少,因此废锅回收的显热量也线性下降,见图3。

在蒸汽流程确定的情况下,IGCC负荷变化时,

底循环系统的性能变化取决于汽轮机进口蒸汽初参数(初压、初温和蒸汽流量)和汽轮机低压缸排汽干度。因此,首先要研究这4个变量变工况时的变化规律,进而研究底循环系统的变工况特性。

图4给出了底循环系统性能随燃气轮机负荷下降的变化规律。在HRSG的高温端差一定的情况下,汽轮机的主蒸汽温度受制于 $T_4$ ,因此,主蒸汽温度和再热蒸汽温度随燃气轮机负荷下降时的变化规律与 $T_4$ 相同,呈先增加后降低的趋势,在燃气轮机负荷为80%时,主蒸汽温度和再热蒸汽温度分别超温30和33℃,见图4(a)。因此,在汽轮机不允许进汽超温的条件下,HRSG的高压过热器和再热器出口要设置减温器来使之不超温。

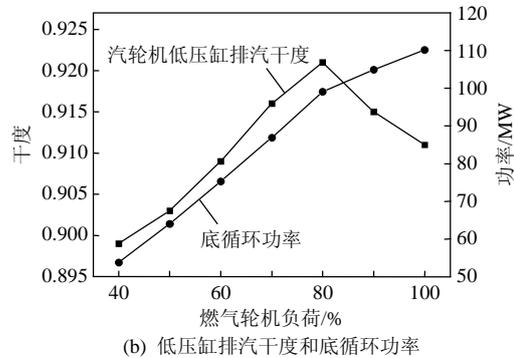
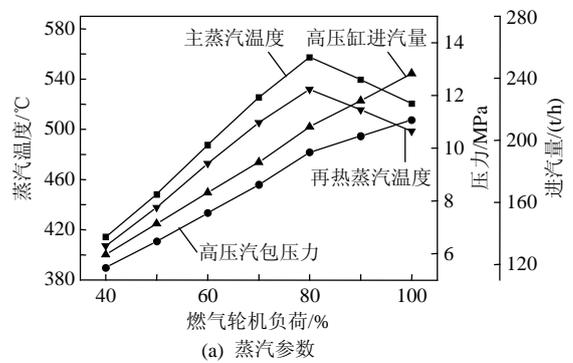


图4 燃气轮机负荷对底循环系统性能的影响  
Fig. 4 Effects of gas turbine's load on performance of bottom cycle system

由图4(a)可知,在HRSG和汽轮机采用滑压运行方式的情况下,当燃气轮机负荷从100%降到80%时,高压汽包压力缓慢降低,此时是通过关小IGV角度来适应负荷的变化。而从80%负荷降到40%时,IGV角度不再关小,高压汽包压力快速降低。这说明关小IGV角度可以抑制高压汽包压力的下降。由于68%的高压流程饱和蒸汽来自于回收粗合成气的废锅,因此汽轮机高压缸进汽量受废锅回收的显热量和燃气轮机排气参数变化规律的影响,随燃气轮机负荷的降低呈降低的趋势,见图4(a)。

汽轮机低压缸排汽干度是一个很重要的参数，干度过低会使末级叶片造成大的水冲蚀，直接影响机组的安全运行，并影响汽轮机效率。图 4(b)给出了汽轮机低压缸排汽干度随燃气轮机负荷下降的变化规律。由图 4(b)可知，当负荷从 100%降到 80%时，汽轮机低压缸排汽干度呈上升趋势，其原因主要是由于关小 IGV 角度使  $T_4$  升高，最终导致再热蒸汽温度上升。当负荷继续下降时，汽轮机低压缸排汽干度随负荷的下降而降低。另外，还可知汽轮机低压缸排汽干度在 60% 负荷以上高于设计值，这有利于减少汽轮机中湿汽损失和汽轮机末级叶片的安全运行。图 4(b)还给出了底循环系统功率随燃气轮机负荷下降的变化关系。由图 4(b)可知，随燃气轮机负荷的降低，底循环功率呈先缓慢降低后快速降低的趋势。这是由于在开始降负荷时，关小 IGV 角度，保持  $T_3$  不变，使得  $T_4$  高于设计值，从而提高了主蒸汽温度和再热蒸汽温度，这使得给水可以在 HRSG 中获取更多的能量，到汽轮机中做出相对较多的机械功。当负荷继续降低时，主蒸汽温度和再热蒸汽温度降低，使得底循环系统功率快速下降。综上所述，关小 IGV 角度可抑制高压汽包压力的下降，同时也使汽轮机低压缸排汽干度上升，有利于提高底循环系统的变工况性能。

### 2.2 大气温度变化对底循环系统性能的影响

燃气轮机是一种比功较小、空气流量较大的热机，因此大气温度的显著变化对燃气轮机的性能产生很大的影响，这使得燃气轮机的排气参数发生变化，进而影响底循环系统性能。图 5 给出了大气温度变化时， $T_4$ 、 $G_4$  和废锅回收的显热量的变化规律。从图 5 中可以看出，随大气温度的升高， $G_4$  和废锅回收的显热量明显降低，相反， $T_4$  却呈上升趋势。这是由于随大气温度的升高，空气的比容变大，致使吸入压气机的空气流量减少，进而使得  $G_4$  减少。

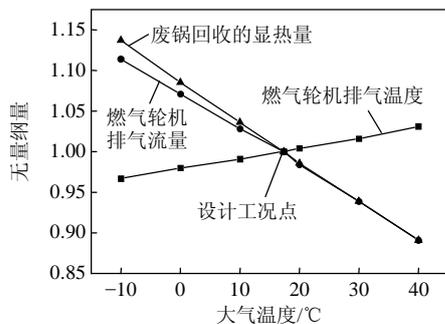


图 5 大气温度对底循环系统热源性能的影响

Fig. 5 Effects of atmosphere temperature on heat source of bottom cycle system

大气温度升高时，即使机组的转速和  $T_3$  保持恒定，压气机的压比也将有所下降，这将导致燃气轮机做功量减少，使得系统出力降低，导致系统投煤量降低，进而使废锅回收的显热量减少，相反  $T_4$  却有所增高。

图 6 给出了高压汽包压力、主蒸汽温度、高压缸进汽量、汽轮机低压缸排汽干度和底循环功率随大气温度的变化规律。从图 6 中可知，高压汽包压力、高压缸进汽量和底循环功率均随大气温度升高而降低。这是由于大气温度升高， $G_4$  和废锅回收的显热量明显降低，使给水在 HRSG 中获取的能量减少的缘故。而主蒸汽温度和汽轮机低压缸排汽干度随大气温度升高而升高，这是由于随大气温度增加， $T_4$  升高的缘故。

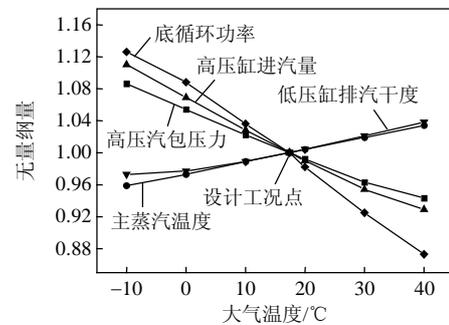


图 6 大气温度对底循环系统性能的影响

Fig. 6 Effects of atmosphere temperature on performance of bottom cycle system

### 2.3 整体空分系数对底循环系统性能的影响

整体空分系数( $X_{as}$ )为从燃气轮机压气机所抽空气量占空分装置所需空气量的比例<sup>[15]</sup>。独立空分系统的  $X_{as}=0$ ；整体空分系统的  $X_{as}=1$ ；部分整体空分系统的  $X_{as}=0\sim 1$ 。 $X_{as}$  决定了空分系统从燃气轮机的压气机抽气份额，通过改变燃气透平工质流量影响燃气轮机性能<sup>[16]</sup>，进而影响底循环系统的性能。在选定气化炉、空分装置及燃气轮机的条件下， $X_{as}$  是影响系统性能的关键因素之一。

图 7 给出了高压汽包压力、主蒸汽温度、高压缸进汽量、汽轮机低压缸排汽干度和底循环功率随  $X_{as}$  的变化规律。高压汽包压力、高压缸进汽量和底循环功率均随  $X_{as}$  升高而降低。这是由于增大  $X_{as}$ ，使进入燃烧室的空气量减少，如果保持  $T_3$  不变，则投入的燃料量要减少，则使废锅回收的显热量降低，另外，增大  $X_{as}$  意味着空分系统从压气机中所抽空气量增多，当  $X_{as}$  从 0 增大到 1 时，压气机抽气量从 0 增大到 250.5 t/h，使得燃气透平流量从 1619.1 减少到 1346.5 t/h，减少了 16.8%，而  $T_4$  从

538 增到到 568.3 °C, 仅增加了 5.6%。因此, 增大  $X_{as}$  使得给水在 HRSG 中获取的能量减少, 最终导致底循环功率降低。而由于  $X_{as}$  增大使  $T_4$  略有提高, 使得主蒸汽温度和汽轮机低压缸排汽干度随  $X_{as}$  的增加而升高。当  $X_{as}$  从 0 增加到 1 时, 汽轮机低压缸排汽干度从 0.909 增加到 0.917, 增加了 0.88%, 而底循环功率却从 111.5 降低到 103.9 MW, 降低了 6.9%, 因此, 在燃气轮机强度以及压气机安全性允许条件下, 降低  $X_{as}$  可以较大幅度增大底循环系统功率, 但也导致汽轮机低压缸排汽干度缓慢降低, 这不利于减少汽轮机中湿汽损失和汽轮机末级叶片的安全运行。

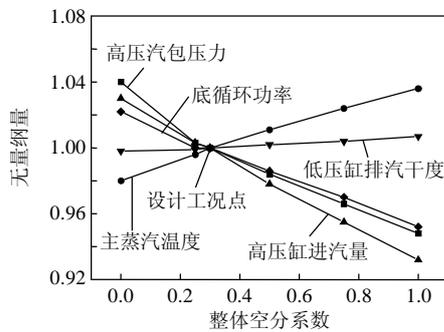


图7 整体空分系数对底循环系统性能的影响  
Fig. 7 Effects of  $X_{as}$  on performance of bottom cycle system

### 3 结论

本文采用 ThermoFlex 软件建立了 200 MW 级 IGCC 系统模型, 从系统角度出发计算并研究了三压再热流程的 IGCC 底循环系统变工况特性。详细讨论了燃气轮机负荷、大气温度和  $X_{as}$  对底循环系统性能的影响。研究表明:

1) 燃气轮机采用调节 IGV 角度—等  $T_3$  的调节方式降负荷时, 随燃气轮机负荷降低, 主蒸汽温度和再热蒸汽温度先增加后降低, 应设置减温器来使之不超温。关小 IGV 角度可抑制高压汽包压力的下降, 同时也使汽轮机低压缸排汽干度上升, 有利于提高底循环系统的变工况性能。

2) 随大气温度增加,  $G_4$  和废锅回收的显热量明显降低,  $T_4$  呈上升趋势, 这使高压汽包压力、高压缸进汽量和底循环功率均降低, 而主蒸汽温度和汽轮机低压缸排汽干度升高。

3) 随  $X_{as}$  增加, 高压汽包压力和高压缸进汽量降低, 相反主蒸汽温度升高。在燃气轮机强度以及压气机安全性允许条件下, 降低  $X_{as}$  可以较大幅度提高底循环系统功率, 但却使汽轮机低压缸排汽干

度缓慢降低。

### 参考文献

- [1] 段立强, 徐钢, 林汝谋, 等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 263-267.  
Duan Liqiang, Xu Gang, Lin Rumou, et al. New evaluation criterion of IGCC system performance integrating thermodynamics with environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 263-267(in Chinese).
- [2] 邓世敏, 危师让, 林万超. IGCC 系统专用单元模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 34-36.  
Deng Shimin, Wei Shirang, Lin Wanchao. Study on modeling typical parts of IGCC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 34-36(in Chinese).
- [3] 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.  
Duan Liqiang, Lin Rumou, Cai Ruixian, et al. Off design characteristic of bottom cycles system in IGCC[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(2): 26-30(in Chinese).
- [4] Johnson M S. Prediction gas turbine on-and off-design performance when firing coal-derived syngas[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Trans. of the ASME, 1992, 114(2): 380-385.
- [5] Dechamps P J, Pirard N, Mathieu P H. Part-load operation of combined cycle plants with and without supplementary firing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(6): 475-483.
- [6] 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(88): 373-375.  
Lü Zehua, Zhao Shihang, Shang Xuewei, et al. On-and off-design performance of three-pressure with reheat IGCC system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000, 15(88): 373-375 (in Chinese).
- [7] 林汝谋, 金红光, 段立强, 等. IGCC 中蒸汽系统流程与参数综合优化研究[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(2): 1-8.  
Lin Rumou, Jin Hongguang, Duan Liqiang, et al. Study on synthetical optimization of process parameters of steam cycle system in IGCC[J]. Gas Turbine Technology, 2003, 16(2): 1-8(in Chinese).
- [8] 林汝谋, 江丽霞, 段立强, 等. IGCC 中蒸汽系统的集成技术与设计原则[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(4): 32-39.  
Lin Rumou, Jiang Lixia, Duan Liqiang, et al. Compositive technology and design fundamental of steam turbine in IGCC[J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(4): 32-39(in Chinese).
- [9] 肖云汉, 蔡睿贤, 林汝谋. 联合循环中蒸汽底循环优化设计的方法与模型[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1): 1-4.  
Xiao Yunhan, Cai Ruixian, Lin Rumou. The method and model for optimizing design of steam bottoming cycle in combined cycles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(1): 1-4(in Chinese).
- [10] 吕泽华, 赵士杭, 尚学伟, 等. 三压再热汽水系统 IGCC 的变工况性能[J]. 燃气轮机技术, 1999, 12(4): 1-7.  
Lü Zehua, Zhao Shihang, Shang Xuewei, et al. Off-design performance of three-pressure with reheat IGCC system[J]. Gas Turbine Technology, 1999, 12(4): 1-7(in Chinese).
- [11] 张学镛, 王松岭, 陈海平, 等. 燃烧中低热值燃料时燃气轮机系统的应对方案及其性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 116-117.  
Zhang Xuelei, Wang Songling, Chen Haiping, et al. Adjustment

- strategy and performance analysis of gas turbine system when burning medium and low heat value fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 116-117(in Chinese).
- [12] 王德慧, 李政, 麻林巍, 等. 大型燃气轮机冷却空气量分配及透平膨胀功计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 180-185.  
Wang Dehui, Li Zheng, Ma Linwei, et al. Study on cooling air allocation and expander power calculation of large scale gas turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 180-185(in Chinese).
- [13] 江丽霞, 林汝谋, 郑莉莉, 等. IGCC 中燃气轮机全工况网络特性[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 669-672.  
Jiang Lixia, Lin Rumou, Zheng Lili, et al. The characteristics in all operating states of gas turbine in IGCC[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 669-672(in Chinese).
- [14] 陈晓利, 吴少华, 李振中, 等. 整体煤气化联合循环发电系统中气化参数对气化单元性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 1-6.  
Chen Xiaoli, Wu Shaohua, Li Zhenzhong, et al. Effects of gasification parameters on performance of gasification unit in integrated gasification combined cycle system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 1-6(in Chinese).
- [15] 陈晓利, 吴少华, 李振中, 等. 整体煤气化联合循环系统变工况特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 6-11.  
Chen Xiaoli, Wu Shaohua, Li Zhenzhong, et al. Research on off-design characteristics of integrated gasification combined cycle system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 6-11(in Chinese).
- [16] 邓世敏, 段立强, 官亦标, 等. IGCC 中空分系统特性及其对整体性能影响[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 186-189.  
Deng Shimin, Duan Liqiang, Guan Yibiao, et al. Study on ASU sub-system characteristic and its effects on IGCC performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 186-189(in Chinese).



陈晓利

收稿日期: 2010-12-22。

作者简介:

陈晓利(1982—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 IGCC 系统及多联产, chenxiaoli3@163.com;

吴少华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, “863”计划能源技术领域专家, 主要研究方向为清洁煤燃烧、烟气污染控制技术;

李振中(1956—), 男, 博士, 博士生导师, “863”计划能源技术领域专家, 研究方向为煤的燃烧、IGCC 及多联产技术。

(责任编辑 王庆霞)