

# IGCC 系统中燃机岛优化研究

陈晓利<sup>1,2</sup>, 郭波<sup>2</sup>, 张东晓<sup>3</sup>, 吴少华<sup>1</sup>, 李振中<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2. 国家电网燃烧工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 中国华电集团公司, 北京 100035)

**摘要:**为提高 IGCC 系统的功率和效率, 需要对系统进行优化。采用 Thermoflex 软件从系统的角度出发对燃机岛进行了优化研究。研究表明: 等燃气轮机排气温度( $T_4$ )调节为燃气轮机的最佳调节方式。合理搭配压气机抽气比例和  $N_2$  回注量可提高 IGCC 的系统效率, 最佳匹配为整体空分系数 0.2 和  $N_2$  回注系数 0.6。采用燃气湿饱和法为主,  $N_2$  稀释为辅的  $NO_x$  排放控制方案有利于提高系统效率, 最佳控制方案为燃料湿饱和法+ $N_2$  回注系数 0.6+整体空分系数 0.2。

**关键词:** IGCC; 燃机岛; 调节方式;  $NO_x$ ; 优化

中图分类号: TM611; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)03-0067-04

整体煤气化联合循环(IGCC)发电是将固体煤气化、净化与燃气—蒸汽联合循环发电相结合的一种洁净煤发电技术, 由于其具有较高的热效率、优良的环保性能、可实现多联产和多联供等诸多优点而备受关注, 现已成为当今世界能源动力领域的研究热点与前沿<sup>[1-3]</sup>。IGCC 系统主要由气化岛、燃机岛和常规岛组成。其中燃机岛的主要设备为燃气轮机。虽然燃气轮机有成熟的产品系列, 但当标准燃气轮机用于 IGCC 发电时, 由于燃料和工艺系统与常规联合循环存在差异, 燃气轮机及燃料系统应进行改造。改造的要求包括: 燃气轮机燃烧室应适应中低热值合成气的燃烧特性; 压气机或燃气透平应满足燃料流量增加的要求; 采用降低排气中  $NO_x$  含量的措施; 本体的辅助系统应满足中低热值合成气的特性要求。另外, 不同的燃气轮机调节方式, 将导致 IGCC 系统效率呈现不同的趋势。而燃机岛与空分系统还存在着密切的联系。所以, 优化燃机岛对研究整个 IGCC 系统的优化具有重要的意义。目前已有一些关于燃机岛及 IGCC 系统优化方面的研究<sup>[4-11]</sup>。笔者采用 Thermoflex 软件从系统的角度

出发对燃机岛系统进行了优化研究, 主要包括燃气轮机调节方式的优化、燃机岛和空分系统的匹配优化、 $NO_x$  控制方法优化。

## 1 模型建立及计算条件

采用 Thermoflex 软件建立了 200 MW 级 IGCC 系统模型。模型采用水煤浆气化, 配有辐射废锅和对流废锅的全显热回收、湿式水洗除尘、常温 NHD 脱硫和 DOS(络合铁法)硫回收工艺技术; 选用 GE9171E 型燃气轮机、三压再热式余热锅炉和蒸汽轮机。

在上述系统的基础上, 采用不同的低  $NO_x$  燃烧工艺, 同时合成气在进入燃气轮机燃烧室之前的换热过程也做了相应的调整。具体工艺如图 1 所示。

煤质分析见表 1, 系统计算条件见表 2。

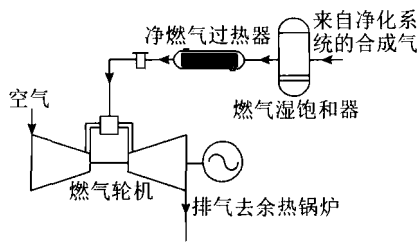
表 1 煤质分析

元素分析/%					$M_{ar}/\%$	$Q_{net,ar}/$	流动温
$\omega(C)$	$\omega(H)$	$\omega(N)$	$\omega(S)$	$\omega(O)$	%	(MJ·kg <sup>-1</sup> )	度/℃
57.81	3.62	0.84	0.33	0.3	17.3	21.74	1260

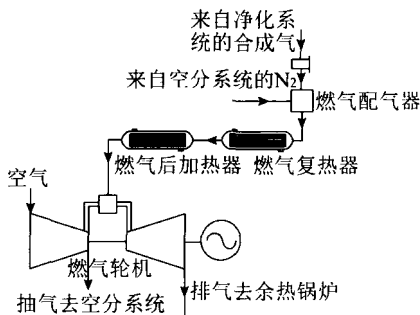
收稿日期: 2011-01-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2006AA05A110, 2006AA05A115)

作者简介: 陈晓利(1982—), 女, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事 IGCC 系统设计及优化集成。E-mail: chenxiaoli3@163.com



(a) 燃气加湿饱和工艺



(b) N<sub>2</sub>稀释工艺

图1 不同的低 NO<sub>x</sub> 燃烧工艺

表2 IGCC 计算参数

参数	数值
气化炉处理量/(t·d <sup>-1</sup> )	2000
气化温度/℃	1311
水煤浆浓度/%	60.5
氧气纯度/%	99
燃气轮机功率/MW	128.3
压气机入口空气流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1491
燃气轮机透平初温/℃	1129
汽轮机排汽干度/%	92
气化压力/MPa	3.6
氧-煤质量比(l/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/℃	540

## 2 计算结果及分析

### 2.1 燃气轮机调节方式的优化

不同的燃气轮机调节方式不但影响燃气轮机的工作状况,而且将影响与之密切相关的余热锅炉(HRSG)和汽轮机的运行工况。因此,当负荷变化时对燃气轮机采取不同的调节方式,其变工况特性也大不相同。因此,优化燃气轮机调节方式有利于提高燃气轮机的性能。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(IGV)角度不调和IGV角度调节,而IGV角度调节时又可分为等燃气透平初温( $T_3$ )调节和等燃气透平排气温度( $T_4$ )调节<sup>[12]</sup>。

图2为3种调节方式下,燃气轮机主要参数随燃气轮机负荷降低的变化曲线。图2(a),(b)分别给出了 $T_3$ , $T_4$ 的变化规律,由图2(a),(b)可知,IGV角度不调时,随燃气轮机负荷的降低, $T_3$ 和 $T_4$ 均呈下降趋势。而等 $T_3$ 调节时,随燃气轮机负荷的降低, $T_3$ 先不变后降低,而 $T_4$ 先增加后降低,转折点为80%负荷。等 $T_4$ 调节时,从额定负荷工况起,随燃气轮机负荷降低,通过关小IGV角度适应负荷变化,以保持 $T_4 = T_{40}$ 不变,并减缓 $T_3$ 的下降趋势。当负荷降到70%之后,IGV角度达到最小值,不能再关小,此后随负荷下降, $T_3$ 和 $T_4$ 都下降。

图2(c)为3种调节方式下,燃气透平排气量 $G_4$ 随负荷变化曲线。IGV不调时,随着负荷降低, $G_4$ 直线下降。而IGV可调时,在IGV角度关小区域, $G_4$ 随着负荷降低降的很快,这是由压气机的入口空气流量和进入燃烧室的合成气量同时减小导致的。而当IGV角度不变的区域, $G_4$ 随负荷降低缓慢减小。

图3给出了3种调节方式对系统效率的影响。由图3可知,IGV调节时,系统效率比IGV不调时降

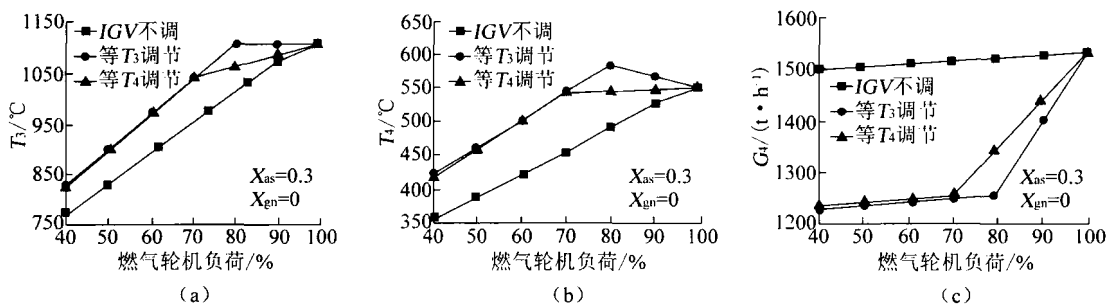


图2 3种调节方式下燃气轮机参数随燃气轮机负荷的变化

低缓慢一些。3种调节方式下,等 $T_3$ 调节时的系统效率最高,略高于等 $T_4$ 调节,系统效率随燃气轮机负荷变化的规律大致相同,均呈先缓慢降低后快速降低,转折点分别在80%和70%时。

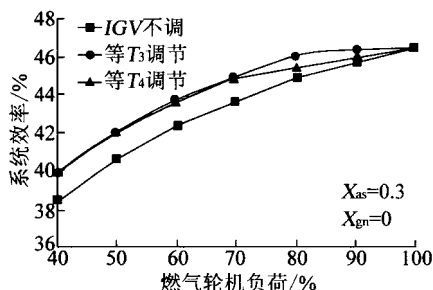


图3 3种调节方式下系统效率随燃气轮机负荷的变化

由分析可知,与IGV不调相比,通过调节IGV角度,使 $T_3$ 在部分负荷内保持不变或缓慢降低,进而减缓了系统效率的下降速度,更有利于提高系统的性能。虽然等 $T_3$ 调节时的系统效率略高于等 $T_4$ 调节,但等 $T_3$ 调节时主蒸汽温度易出现严重超温,因此选择等 $T_4$ 调节为最佳调节方式。

## 2.2 燃机岛和空分系统的匹配优化

IGCC系统中燃机岛与空分系统密切相关。而空分系统中最关键的参数就是整体空分系数 $X_{as}$ 和 $N_2$ 回注系数 $X_{gn}$ 。

$X_{as}$ 和 $X_{gn}$ 对燃气轮机和系统的功率、效率和运行稳定性都产生很大的影响,而且采用 $N_2$ 回注还可以减少燃机 $NO_x$ 的排放。另外, $X_{as}$ 和 $X_{gn}$ 对IGCC系统中各种品位能量的综合梯级利用、余热废热利用以及各部件协调匹配都有重大影响,因此是系统设计优化的重要变量。

图4为 $X_{as}$ 和 $X_{gn}$ 对系统效率的影响。

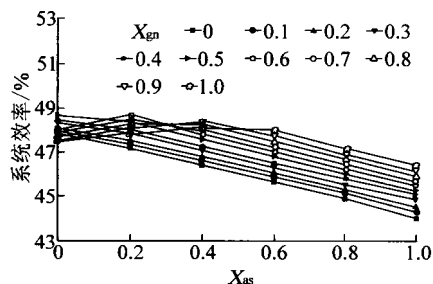


图4  $X_{as}$ 和 $X_{gn}$ 对系统效率的影响

由图4可知,在一定的 $X_{as}$ 条件下,IGCC系统效率随着 $X_{gn}$ 的增大而上升;当 $X_{gn} \leq 0.4$ 时,在每条等 $X_{gn}$ 线上系统效率随着 $X_{as}$ 提高而下降。特别值得注意的是,当 $X_{gn} > 0.4$ 时,在等 $X_{gn}$ 线上将出现一个最

佳的 $X_{as}$ ,该点对应着最高的系统效率,且该点随着 $X_{gn}$ 的增大逐渐向较大的 $X_{as}$ 方向移动。这是由 $X_{as}$ 降低时的最低喘振裕度限制而造成的。由图4可以看出,IGCC的最高系统效率48.61%出现在 $X_{as} = 0.2$ 和 $X_{gn} = 0.6$ 的交叉点上。

## 2.3 $NO_x$ 排放控制方法优化

燃气轮机满负荷运行时,由于燃烧区温度较高,致使燃烧空气中的 $N_2$ 和 $O_2$ 容易生成 $NO_x$ 。当燃气轮机燃用低热值的合成气时,通常采用扩散燃烧的方式。而常见的降低 $NO_x$ 排放的方法有燃料湿饱和法、注蒸汽(伴随稀释)法、 $CO_2$ 或 $N_2$ 稀释法等。笔者针对燃料湿饱和法(方案1)、 $N_2$ 稀释法(方案2)以及同时采用燃料湿饱和法和 $N_2$ 稀释法(方案3)进行比较和分析。

方案1采用燃料水蒸汽饱和的方法降低 $NO_x$ 排放,独立空分系统,且 $N_2$ 不回注。方案2采用 $N_2$ 回注+20%部分整体空分。方案3采用燃料湿饱和法+60% $N_2$ 回注+20%部分整体空分。

表3为3种 $NO_x$ 控制方案的比较。由表3可知,方案2比方案1的燃气轮机功率和系统功率分别高出2571 kW,1023 kW。但方案1的系统净功率比方案2的增加了15653 kW,供电效率提高了3.18%。

表3  $NO_x$ 控制方案比较

项目	方案1	方案2	方案3
	加湿饱和	$N_2$ 稀释	加湿饱和+ $N_2$ 稀释
燃气轮机功率/kW	136007	138578	148580
系统功率/kW	246072	247095	262363
系统净功率/kW	201349	185696	214011
发电效率/%	47.81	47.83	48.61
供电效率/%	39.12	35.94	39.63
厂用电量/kWh	44724	61400	48353
厂用电率/%	18.18	24.85	18.43

方案3略优于方案1,系统净功率增加了12662 kW,供电效率提高了0.51%。因此方案3为最佳方案。

## 3 结 论

采用Thermoflex软件从系统的角度出发对燃机岛进行了优化研究,分别对燃气轮机调节方式、燃机岛和空分系统的匹配、 $NO_x$ 控制方法进行了优化。

(1) 与  $IGV$  不调相比,  $IGV$  可调时更有利于提高系统效率。虽然等  $T_3$  调节时的系统效率略高于等  $T_4$  调节, 但等  $T_3$  调节时主蒸汽温度易出现严重超温, 因此等  $T_4$  调节为最佳调节方式。

(2) 合理搭配压气机抽气比例和  $N_2$  回注量能更充分利用系统中的潜热和显热, 提高 IGCC 的系统效率, 最佳匹配为整体空分系数 0.2 和  $N_2$  回注系数 0.6。

(3) 采用燃料湿饱和法和  $N_2$  稀释法为辅的  $NO_x$  控制方案, 既能够达到控制  $NO_x$  排放的要求, 又有利于提高系统效率。优化后的  $NO_x$  控制方案为燃料湿饱和法和  $N_2$  回注系数 0.6 + 整体空分系数 0.2。

#### 参考文献:

- [1] Garcia G O, Douglas P, Croise E, et al. Technoeconomic evaluation of IGCC power plants for  $CO_2$  avoidance[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15-16): 2250-2259.
- [2] Descamps C, Bouallou C, Kanniche M. Efficiency of an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant including  $CO_2$  removal[J]. Energy, 2008, 33(6): 876-881.
- [3] 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.
- [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, 1992, 114(2): 380-385.
- [5] Jiang L, Lin R, Jin H, et al. Study on thermodynamic characteristic and optimization of steam cycle system in IGCC[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9-12): 1339-1348.
- [6] 潘纪儒, 吴强, 李硕平. 200MW 级 IGCC 电厂动力岛主机特性分析及参数优化[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(1): 11-15.
- [7] 沈又幸, 李硕平. IGCC 电厂设备及系统优化部分关键点的探讨[J]. 燃气轮机技术, 2008, 21(3): 11-14.
- [8] 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(3): 475-483.
- [9] 王铁成, 邹积国. 不同的燃气轮机调控方案对燃气-蒸汽联合循环电站性能的影响[J]. 热能动力工程, 2001, 16(92): 205-207.
- [10] IGCC 电站  $NO_x$  排放控制与系统效率的提高[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 18-21.
- [11] 林汝谋, 段立强, 邓世敏, 等. IGCC 联合循环系统全工况特性分析研究[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(1): 1-8.
- [12] 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.

## Study on gas turbine island optimization in IGCC system

CHEN Xiao-li<sup>1,2</sup>, GUO-Bo<sup>2</sup>, ZHANG Dong-xiao<sup>3</sup>, WU Shao-hua<sup>1</sup>, LI Zhen-zhong<sup>2</sup>

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

2. National Power Plant Combustion Research Center, Shenyang 110034, China;

3. China Huadian Corporation, Beijing 100035, China)

**Abstract:** Optimize IGCC system in order to enhance power and efficiency of IGCC system. Analyze the gas turbine island optimization methods from the point of system with the software ThermoFlex. The results show that regulation mode for keeping  $T_4$  constant is optimal. Rationally arranging ASU integrated coefficient ( $X_{as}$ ) and nitrogen reinjection coefficient ( $X_{gn}$ ) can increase efficiency of the IGCC system. The best match is  $X_{as}=0.2$  and  $X_{gn}=0.6$ . The control scheme of  $NO_x$  emission which mainly relies on syngas moisturized supplemented by nitrogen reinjection can enhance efficiency of IGCC system. The best control scheme is syngas moisturized,  $X_{gn}=0.6$  and  $X_{as}=0.2$ .

**Key words:** IGCC; gas turbine island; regulation mode;  $NO_x$ ; optimize