

# 整体煤气化联合循环(IGCC)系统变工况特性

段立强, 林汝谋, 金红光, 蔡睿贤

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 作者分析了影响 IGCC 系统变工况的因素, 基于通用性模块化建模思想, 建立了 IGCC 系统变工况特性模型和开发出相应程序软件。通过大量的计算, 得出三种调节方式下系统随负荷与大气温度变化时的变工况特性曲线簇, 揭示了系统特性随主要变量变化关系。

**关 键 词:** 整体煤气化联合循环(IGCC); 变工况; 系统特性

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A

## 1 前言

整体煤气化联合循环(IGCC)为一种先进洁净发电系统, 由于它具有高效、低污染等优点而备受关注, 现已进入商业验证阶段, 并正向着更高的发展阶段迈进<sup>[1]</sup>。

IGCC 是一个由多种技术、多个设备组成的复杂系统(见图 1), 虽然近年来各国学者都对它从不同的角度、用不同方法进行研究, 但至今理论研究仍不充分, 且多数研究侧重于设计工况。实际上由于种种原因, 机组更多的是处于偏离设计工况的状态, 因此, 进行变工况特性的研究就更为重要与实用, 目前已有一些关于 IGCC 系统或其子系统变工况方面的研究<sup>[2~4]</sup>。本文作者从整个系统的角度出发, 研究 IGCC 系统变

工况的特性, 旨在深入探讨系统性能随负荷和外界环境条件变化关系, 从而为研究 IGCC 系统运行特性和控制规律提供完整信息和基础数据。

## 2 影响变工况的因素探讨

IGCC 系统变工况问题的重点在于其燃气轮机的变工况。对 IGCC 中燃气轮机特性模型方程组进行自由度分析, 不难看出它比一般的燃气轮机有更多的独立变量, 后者只有两个独立变量, 而 IGCC 中燃气轮机却有五个独立参数。(1) 燃气透平初温  $T_3$ : 它是影响燃气轮机性能的最关键参数, 在负荷变化时常作为调节变量。(2) 压气机进口可转导叶

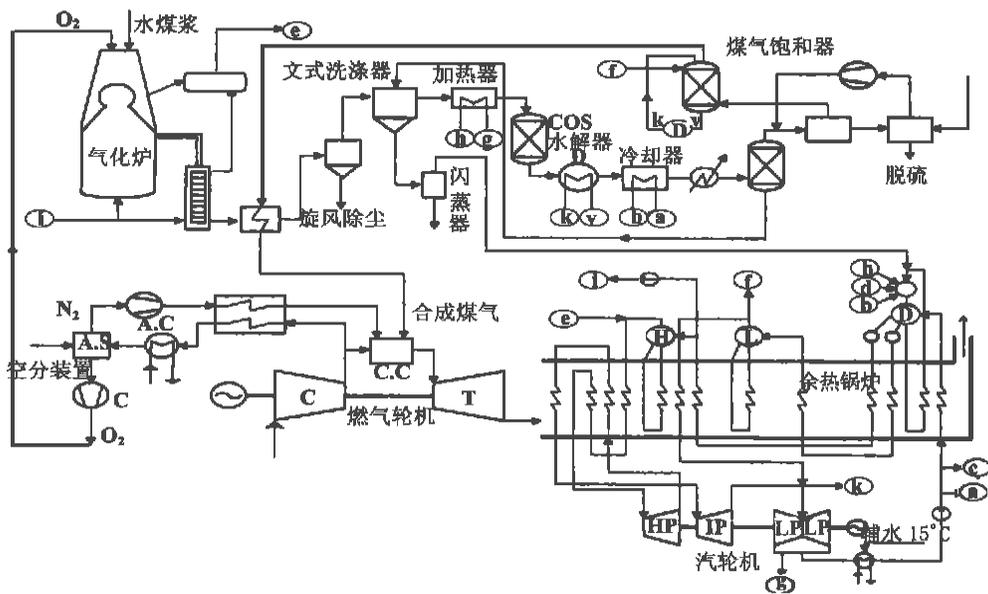


图 1 IGCC(双压再热蒸汽系统)系统典型流程示意图

安装角度  $\alpha$ :  $\alpha$  角变化会使压气机特性发生变化, 从而使各部件间匹配发生变化, 因而它也可作为调节

参数。(3) 氮气回注系数  $X_{gn} = G_{n2}/G_n$  ( $G_{n2}$ —回注到燃机的氮气流量,  $G_n$ —空分系统生产氮气总量): 氮气回注系数直接影响燃气轮机燃烧室的流量, 因此影响透平的流量, 最终影响燃气轮机的出力、效率和变工况性能。(4) 整体空分系数  $X_{as} = G_{as2}/G_{as}$  ( $G_{as2}$ —由压气机抽取给空分系统的空气量,  $G_{as}$ —空分系统用的总空气量): 整体空分系数决定了空分系统从燃气轮机压气机抽气的份额, 从而影响燃气轮机各部件之间匹配、出力与效率。(5) 透平通流面积调整系数  $SS$ : 从广义来理解, 应是燃气透平和压气机通流能力的匹配关系。

因此从理论上说, 任何引起上述五个参数变化的因素都是影响 IGCC 中燃气轮机变工况的主要因素, 也是影响 IGCC 系统变工况的主要因素。特别是下列因素会引起上述五个中一个或几个变量发生变化: (1) 机组负荷的变化; (2) 大气温度的变化; (3) 部件性能的变化。

### 3 联合循环系统理论建模

IGCC 系统变工况特性研究的基础和核心问题是理论建模, 本研究集体应用模块化、方程化、通用化建模的方法, 建立了各主要部件和系统的通用特性模型<sup>[5~7]</sup>。

#### 3.1 气化炉、煤气净化和空分系统变工况性能模型

采用黑匣子模型, 做了一定的假定, 子系统进出口工质满足质量、能量平衡方程。

#### 3.2 压气机特性模型

通过大量部件特性的统计归纳和理论分析, 推导出压气机特性方程的通用函数形式, 并汇集实测数据回归求得相关系数, 拟合成公式, 以便计算应用。

$$\epsilon = F(G_a, \alpha); \eta_c = F(G_a, \alpha) = F(\epsilon, \alpha);$$

$$G_a = F(\epsilon, \alpha) \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$ —压比;  $\eta_c$ —效率;  $G_a$ —空气流量;  $\alpha$ —压气机进口可转导叶角度。

#### 3.3 燃气透平特性模型

采用理论分析和实验规律归纳相结合方法推出燃气透平稳态全工况特性通用模型(准椭圆方程), 比现有同类方程(包括 Flügel 公式)在适用范围与精度方面都有较大的改进, 可适用于不同级数、不同流动状态、转速一定的透平情况。

$$\frac{G_{g3} \sqrt{T_{g3}/P_{g3}}}{SS \cdot G_{g30} \sqrt{T_{g30}/P_{g30}}} = \frac{\sqrt{a_z + b_z \pi_t - \pi_t^2}}{\sqrt{a_z + b_z \pi_0 - \pi_0^2}} \quad (2)$$

式中:  $G_{g3}$ —透平流量;  $T_{g3}$ —透平前温;  $P_{g3}$ —透平入口压力;  $\pi_t$ —透平膨胀比;

常数  $a_z$ 、 $b_z$  取决于透平级数, 平均反动度以及工质热物性; 下标 0 为设计工况点。

#### 3.4 燃烧室的数学模型

由于 IGCC 系统中燃气轮机燃烧室有别于普通燃气轮机的燃烧室, 除燃用低热值合成煤气外, 还考虑压气机抽气、氮气回注, 该模型考虑了压气机抽气、氮气回注的情况。

$$G_{g3}(H_{g3} - H_{g25}) = (G_2 + G_{11})(H_a - H_{a25}) + G_f(H_u + Dh_f) \quad (3)$$

式中:  $(H_{g3} - H_{g25})$ —透平入口燃气相对 25 °C 焓值差;  $G_2$ —燃烧室入口空气流量;  $G_{11}$ —冷却空气量;  $(H_a - H_{a25})$ —空气相对焓值差;  $G_f$ —煤气与氮气的混合流量;  $(H_u + Dh_f)$ —混合燃料气热值加显热。

#### 3.5 余热锅炉变工况特性模型

根据“温度对口, 梯级利用”原则建立余热锅炉温区模型, 由于在变工况过程中, 换热器的换热面积是不会改变的, 所以主要考虑换热系数的变工况即可。烟气侧对流换热系数  $a_g$  对换热系数的影响最大, 其比值可简化为下式<sup>[8]</sup>:

$$\frac{a_g}{a_{g0}} = \left(\frac{G_g}{G_{g0}}\right)^m \cdot \left(\frac{T_g}{T_{g0}}\right)^n \quad (\text{其中 } m = 0.6, n = 0.6) \quad (4)$$

式中:  $T_g$ 、 $T_{g0}$ 、 $G_g$ 、 $G_{g0}$ ——分别为某温区烟气在变工况与设计工况下的平均温度与流量。

#### 3.6 蒸汽透平全工况特性模型

蒸汽透平第  $i$  级和第  $i+1$  级进汽点之间机组前后压力 ( $P_i$ ,  $P_{i+1}$ )、级前温度  $T_i$  与流过级组的蒸汽流量  $G_d$  在变工况前后满足下面 Flügel 公式:

$$\frac{G_d}{G_{d0}} = \sqrt{\frac{P_i^2 - P_{i+1}^2}{P_{i0}^2 - P_{i+1,0}^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{i0}}{T_i}} \quad (5)$$

工况变动时, 高中压缸蒸汽透平相对内效率认为不变, 低压缸蒸汽透平效率对末级蒸汽湿度变化影响进行了修正<sup>[9]</sup>。

建立了单元模块模型后, 根据各种系统的具体特点, 通过一定手段建成实现一定功能的系统变工况特性模型, 并采用序贯模块法求解。

## 4 实例研究及计算结果分析

本文作者以 400 MW 级 IGCC 系统为实例来进行

变工况研究,燃气轮机采用燃用天然气的大型机组为母型,气化炉采用喷流床气化工艺(水煤浆供料、98%纯度富氧的气化剂),采用成熟的低温湿法净化系统,蒸汽底循环为双压再热系统.对该系统进行了大量的计算.着重研究了机组负荷变化和大气温度变化时,IGCC联合循环系统变工况特性的一般性规律.

#### 4.1 负荷变化时系统的变工况特性

当负荷变化时,对燃气轮机采取不同的控制规律,其变工况特性就大不相同.一般来说,燃气轮机可采用三种调节方式:IGV不调节、IGV调节等 $T_3$ 调节和IGV调节等 $T_4$ 调节.

(1)图2~图4是当 $X_{as}$ 和 $X_{gn}$ 组合确定时,三种调节方式下,燃气轮机的 $T_3$ 、 $T_4$ 和 $G_4$ 随负荷降低(负荷系数 $X_n = N_{gt}/N_{gt0}$ )的变化情况.它们均随着负荷的下降而下降.IGV不调节时,由于采用了直接降低 $T_3$ 的措施降低负荷,因此, $T_3$ 和 $T_4$ 下降要比IGV可调时快得多.而由于IGV不调节时,IGV角度始终保持最大开度,所以 $G_4$ 降低要比IGV可调时缓慢得多.

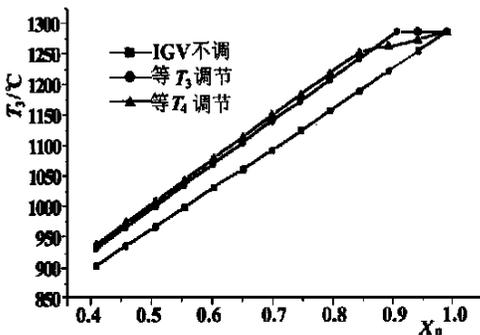


图2 三种调节方式下,透平初温随负荷降低的变化曲线

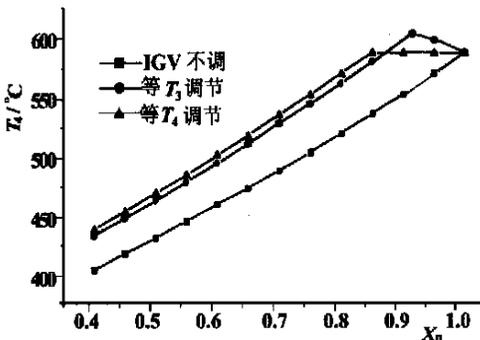


图3 三种调节方式下,透平排温随负荷降低的变化曲线

(2)图5表示三种调节方式下,余热锅炉变工况

采用滑压运行方式时,高压锅筒压力 $P_{ssh}$ 随负荷下降的变化关系.IGV不调节时 $P_{ssh}$ 下降迅速,而IGV调节时 $P_{ssh}$ 降得慢一些.可见,通过调节压气机进口可转导叶角度,可以抑制高压汽包压力的下降.

(3)图6表示不同调节方式下,高压缸进口主蒸汽温度 $T_{sh0}$ 随负荷下降的变化关系.由图可知,IGV可要比不调好,它减慢了 $T_{sh0}$ 下降速度,将有利于提高底循环的变工况性能.

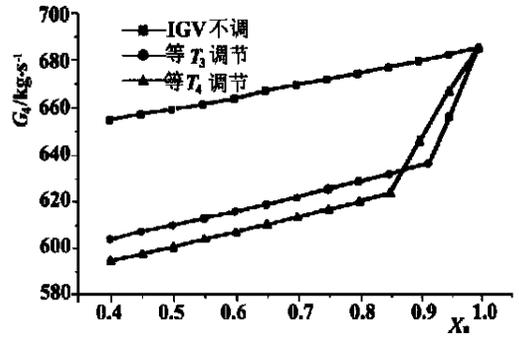


图4 三种调节方式下,燃气透平排气量随负荷降低的变化曲线

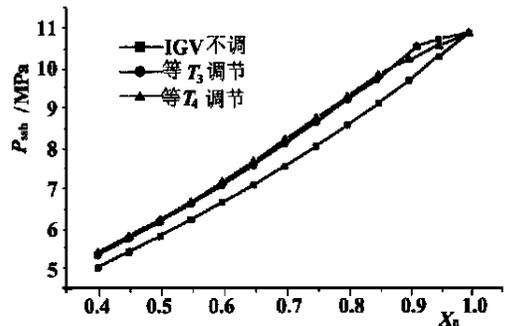


图5 不同调节方式下,高压汽包压力随负荷降低的变化曲线

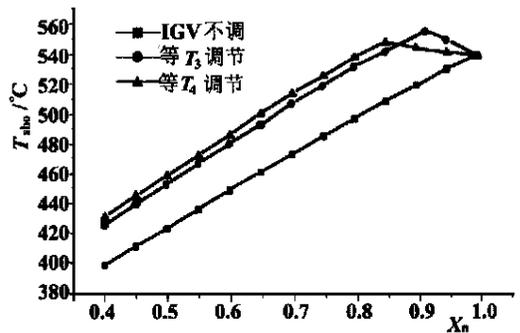


图6 三种调节方式下,主蒸汽温度随负荷降低的变化曲线

(4)图7表示三种调节方式下,IGCC系统效率 $E_{fig}$ 随负荷下降的变化关系( $X_{as} = 0.48, X_{gn} =$

0.87)。由图可知,  $E_{fig}$  均随着负荷的下降而下降, 但 IGV 可调要比不调时更有利于提高整个 IGCC 系统的效率。

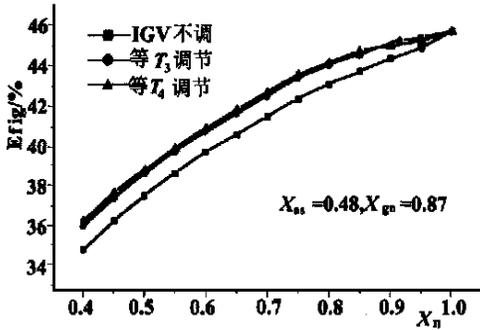


图 7 三种调节方式下, IGCC 系统效率随负荷降低的变化曲线

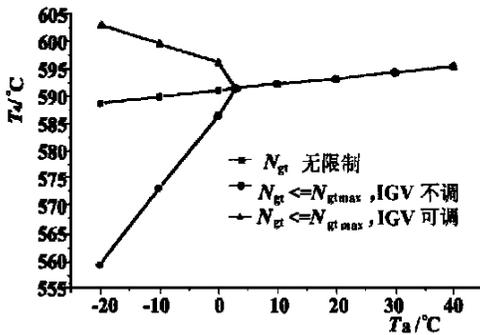


图 8 不同调节方式下, 燃气轮机透平排气温度随大气温度变化曲线

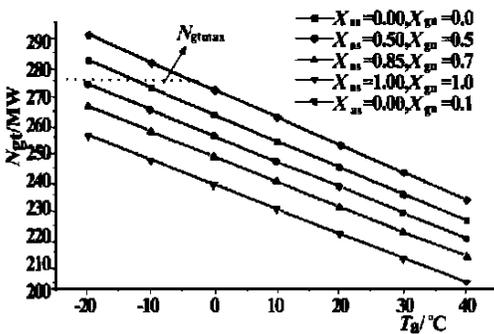


图 9 不同整体化方案的 IGCC 系统的燃气轮机功率随大气温度变化关系

#### 4.2 大气温度变化时系统的变工况特性

在计算设计工况时, 大气温度  $T_a$  是假定不变的。但在实际运行时  $T_a$  是经常变化的。本文作者研究了  $T_a$  从  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  ~  $40\text{ }^\circ\text{C}$  范围内系统的变工况特性。

(1) 图 8 为  $X_{as} = 0.7, X_{gn} = 1.0$  时,  $N_{gt}$  无限制、 $N_{gt}$  受限制 IGV 可调与 IGV 不调节三种方式情况下,  $T_4$  随  $T_a$  的变化情况。从图中可以看出, 燃气轮机最

大功率  $N_{gt_{max}}$  不受限制时,  $T_4$  随着  $T_a$  的降低而降低; 当  $N_{gt_{max}}$  受限制后, 在 IGV 可调时,  $T_4$  随 IGV 角度的关小而上升, 这是由于压比降低的缘故; 在 IGV 不调时, 由于  $T_3$  降低,  $T_4$  降低较快。

(2) 图 9, 10 分别为不同  $X_{as}$  与  $X_{gn}$  组合方案的 IGCC 系统的燃气轮机功率 ( $N_{gt}$ ),  $E_{fig}$  随  $T_a$  变化关系。由图可知它们都随  $T_a$  降低而不断升高; 不同  $X_{as}$  与  $X_{gn}$  的 IGCC 系统  $N_{gt}$  和  $E_{fig}$  随  $T_a$  变化的趋势基本相同; 随着设计工况的  $X_{as}$  增大和  $X_{gn}$  的减小, IGCC 中燃机达到最大功率限制值  $N_{gt_{max}}$  的大气温度  $T_{a_{min}}$  对应值下降(见图 9 中虚线所示)。

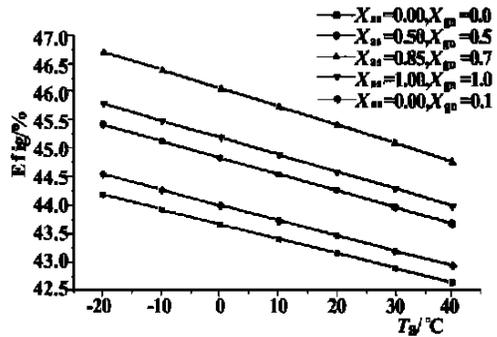


图 10 燃气轮机不限制最大功率时, 不同  $X_{as}$  和  $X_{gn}$  组合的 IGCC 系统效率随大气温度变化曲线

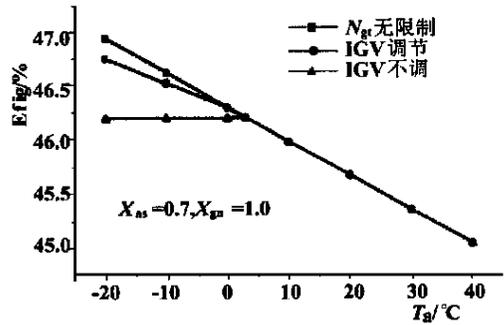


图 11 不同调节方式下, IGCC 系统效率随大气温度变化曲线

(3) 图 11 表示不同调节方式下, IGCC 系统效率  $E_{fig}$  随  $T_a$  的变化关系。由图知  $N_{gt}$  无限制时,  $E_{fig}$  随  $T_a$  的减小而明显上升。  $N_{gt_{max}}$  限制后, IGV 可调要比 IGV 不调时效率高。

#### 5 小结

(1) 本文基于独立变量概念, 详细分析归纳了 (下转第 590 页)

二恶英的分布。可见, 随床温增加飞灰和底渣中二恶英毒性当量值降低, 高温有利于使二恶英完全分解。

表 4 灰渣中二恶英的分布/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

	床温 970 °C		床温 920 °C	
	底渣	旋后飞灰	底渣	旋后飞灰
I-TEQ	0.05	0.57	0.06	1.03

## 6 结论

(1) 城市生活垃圾与煤在循环流化中混烧, 当垃圾与煤掺烧比  $R$  恒定时, 随温度升高,  $\text{NO}_x$ 、 $\text{NO}$  排放浓度增加,  $\text{N}_2\text{O}$  排放浓度降低,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$  和  $\text{Cl}_2$  排放浓度基本不变, 飞灰和底渣中二恶英含量减少。

(2) 随掺烧比  $R$  增加,  $\text{NO}_x$ 、 $\text{NO}$  和  $\text{SO}_2$  排放浓度降低,  $\text{Cl}_2$  排放浓度增加,  $\text{HCl}$  基本不变,  $\text{N}_2\text{O}$  随  $R$  增大先降低, 随  $R$  进一步增大,  $\text{N}_2\text{O}$  排放浓度略有增加。

注: 本文中  $\text{mg}/\text{m}^3$  均为毫克每标准立方米。

### 参考文献:

[1] LISK D. Environment implications of incineration of municipal solid waste and disposal [ J ] . *Sci Total Environ*, 1998, 74 ( 1 ): 39-66.  
 [2] VOGG H. Behavior of (heavy) metals in the incineration of municipal

wastes [ J ] . *Intern Chemical Engineering* 1987, 27 ( 2 ): 177-182.  
 [ 3 ] BROWN R, PETTIT K, MUNDY K, *et al.* Incineration; the british experience [ J ] . *Chemosphere*, 1990, 20 ( 10-12 ): 1785-1791.  
 [ 4 ] VASSILEN S V, BRAKEMAN-DANHEUX C, LAURENT THIE-MANN, *et al.* Behavior, capture and inertization of some trace elements during combustion of refuse-derived char from municipal solid waste [ J ] . *Fuel*, 1999, 78 ( 10 ): 1131-1145.  
 [ 5 ] ARSEN J DARNARY. Statistical record of the environment (second edition) [ M ] . Gale Research Inc, Detroit, Washington, D C, London; 1994.  
 [ 6 ] 陈鲁言. 香港、广州、佛山和北京市政垃圾的成份比较及处理策略 [ J ] . *环境科学*, 1997 ( 2 ): 58-61.  
 [ 7 ] MUKADI L, GUY C, LEGROS R. Prediction of gas emissions in an internally circulating fluidized bed combustor for treatment of industrial solid wastes [ J ] . *Fuel*, 2000, 79 ( 9 ): 1125-1136.  
 [ 8 ] KIIPINEN P, HUPA M. Homogeneous  $\text{N}_2\text{O}$  chemistry at fluidized bed combustion conditions: A kinetic modeling study [ J ] . *Combustion and Flame* 1991, 85 ( 1 ): 94-100.  
 [ 9 ] TUIGOARD. Nitrous oxide from combustion [ D ] . Lyngby: Technical University of Denmark, 1991.  
 [ 10 ] DE SOETE. Heterogeneous  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NO}$  formation from nitrous atoms during coal char combustion [ A ] . **23rd Symposium ( international ) Combustion** [ C ] . Pittsburgh: The Combustion Institute, 1990.  
 [ 11 ] 冯波. 流化床煤燃烧中氧化二氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 生成与分解机理研究 [ D ] . 武汉: 华中理工大学, 1994.

(渠 源 编辑)

(上接第 585 页)

影响 IGCC 系统变工况的因素。

(2) 采用模块化建模方法, 建立了 IGCC 系统变工况特性模型, 并开发出相应程序软件。

(3) 结合实例进行了大量计算, 揭示了 IGCC 采用不同调节方式时系统性能随负荷和大气温度变化的规律。计算结果表明, IGV 可调时要比不调时更有利于改善系统的变工况性能。

### 参考文献:

[ 1 ] 段立强, 林汝谋, 金红光 等. 整体煤气化联合循环 (IGCC) 技术进展 [ J ] . *燃气轮机技术*, 2000 13 ( 1 ): 9-17.  
 [ 2 ] JOHNSON M S. Prediction of gas turbine on-and off-design performance when firing coal-derived syngas [ J ] . *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114 ( 4 ): 380-385.  
 [ 3 ] 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.

[ 4 ] 杨勇平, 郭喜燕, 林汝谋, 等. 400MW 级 IGCC 机组变工况性能计算 [ J ] . *工程热物理学报*, 1999, 20 ( 4 ): 417-420.  
 [ 5 ] 胡剑辉. 总能系统全工况理论建模及新算法研究 [ D ] . 北京: 中国科学院, 1997.  
 [ 6 ] 卢绍光, 林汝谋. 燃气透平稳态全工况特性通用模型 [ J ] . *工程热物理学报*, 1996, 17 ( 4 ): 404-407.  
 [ 7 ] 胡剑辉, 林汝谋. 联合循环中蒸汽汽底循环系统稳态全工况特性模型及计算分析 [ J ] . *工程热物理学报*, 1997, 18 ( 3 ): 277-280.  
 [ 8 ] DECHAMPS P J, PIRARD N, MATHIEU. 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.  
 [ 9 ] BOLLAND O. A comparative evaluation of advanced combined cycle alternatives [ J ] . *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1991, 113 ( 2 ): 190-197.

(渠 源 编辑)

整体煤气化联合循环(IGCC)技术的发展和應用= **The Development and Application of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology** [刊, 汉] / LI Xian-yong, XIAO Yun-han, CAI Rui-xian (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—575 ~ 578

A series of major problems have been encountered during the process of commercialization of integrated gasification combined cycle (IGCC) systems. In this regard the authors expound the main measures, which were currently adopted by various countries to solve these problems by way of lowering cost and introducing key technologies. They also described the advances achieved therein. Meanwhile, an analysis is given of the potential applications of IGCC in China. **Key words:** integrated gasification combined cycle (IGCC), cost reduction, development of key technologies

燃煤催化剂的研究与应用= **Research and Application of Coal Catalysts** [刊, 汉] / MA Zhen-xing, GUO Ju-xiou, LI Jing, et al (Power Engineering Department, Shandong University, Jinan, Shandong Province, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—579 ~ 581

A broad overview is given of the theory and applied research of coal catalysts pursued both at home and abroad. Their effectiveness in energy saving and environmental protection is highlighted along with some problems in their research and applications. Pertinent measures taken to solve these problems are also presented. **Key words:** catalyst, coal, combustion

整体煤气化联合循环(IGCC)系统变工况特性= **Off-design Performance Characteristics of an Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) System** [刊, 汉] / DUAN Li-qiang, LIN Ru-mou, JIN Hong-guang, CAI Rui-xian (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—582 ~ 585, 590

An analysis is given of the factors influencing the off-design behavior of an integrated gasification combined cycle (IGCC) system. Based on the idea of generalized modular modeling set up was an off-design performance characteristic model of an IGCC system with the relevant programs and software being developed. Through a great deal of calculations off-design performance characteristic curves were obtained, showing the change of the system performance with load and ambient temperature under three kinds of regulation modes. These curves reveal the variation of system characteristics with the change of main variables. **Key words:** integrated gasification combined cycle, off-design condition, system characteristics

城市生活垃圾(MSW)与煤混烧过程中气体污染物的排放= **Gaseous Pollutants Emissions during the Process of Mixed Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and Coal** [刊, 汉] / DONG Chang-qing, JIN Bao-sheng, ZHONG Zhao-ping, XIAO Rui, et al (Education Ministry Key Lab of Clean Coal-based Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—586 ~ 590

Tests involving the mixed burning of municipal solid waste and coal were conducted on a 0.2 MW circulating fluidized bed. During the tests an on-line measurement of the emissions concentration of  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ , HCl and  $\text{Cl}_2$  was performed. An exploratory study was undertaken of the effect of municipal solid waste and coal mixed burning ratio (R) and temperature on gaseous pollutant emissions. The test results indicate that during the mixed burning process  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{SO}_2$  emissions will decrease and  $\text{Cl}_2$  emission concentration increase in case the municipal solid waste feeding amount was increased. With the mixed burning ratio R being kept constant and the temperature increased there will be an increase in the  $\text{NO}_x$  and NO emissions. Meanwhile, there will also be a decrease in  $\text{N}_2\text{O}$  emissions while the emission concentration of  $\text{SO}_2$ , HCl and  $\text{Cl}_2$  remains basically unchanged and the dioxin content in fly ash and bottom slag will decrease. **Key words:** municipal solid waste, circulating fluidized bed, mixed burning, dioxin