

# 基于低碳排放的 IGCC 发电模型研究

王春晶<sup>1,2</sup>, 刘元明<sup>3</sup>, 吴立新<sup>1,2</sup>, 陈贵锋<sup>1,2</sup>

- (1. 煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院 北京 100013;  
2. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室 北京 100013;  
3. 新汶矿业集团 山东 新泰 271200)

**摘要:** 整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术具有发电效率高、污染物排放低、节水性能先进、有利于实现 CO<sub>2</sub> 减排等特点,是国际上公认的洁净、高效的发电技术之一。建立了基于低碳排放的 IGCC 发电模型,并分别对 IGCC 发电系统的两部分(煤气化系统和燃气-蒸汽轮机联合循环发电系统)建立了评价子模型。通过模型,计算不同煤质的 IGCC 系统能效、供电标煤耗及单位电量 CO<sub>2</sub> 排放量,并将模型计算结果与国内电厂的煤气化粗煤气组成、国际上大型联合循环机组的热效率进行了对比,验证了模型的合理性和准确性。

**关键词:** 低碳排放; IGCC 发电技术; 评价模型

中图分类号: TD849; TK112

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2012)04-0082-04

## Research on IGCC evaluation model based on low-carbon emission

WANG Chun-jing<sup>1,2</sup>, LIU Yuan-ming<sup>3</sup>, WU Li-xin<sup>1,2</sup>, CHEN Gui-feng<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;  
2. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China;  
3. Shandong Energy Xinwen Mining Group Co., Ltd., Xintai 271200, China)

**Abstract:** IGCC has many great advantages such as high power generation efficiency, low pollutant and CO<sub>2</sub> emissions, perfect water-saving performance and the like. It's one of the cleanest and highest efficiency power generation system. Establish IGCC model based on low-carbon emissions, also develop the evaluation sub-model of IGCC-coal gasification system and gas-steam turbine combined cycle power generation system. Calculate the IGCC system efficiency, power supply standard coal consumption and unit power CO<sub>2</sub> emissions of different coal qualities with these models. Compare the raw gas composition and thermal efficiency calculated by the model with those of practical power plants at home and international large-scale combined cycle units. The results show that the calculation results of model is accurate and reliable.

**Key words:** low carbon emission; IGCC; evaluation model

IGCC 发电技术是将煤气化技术与燃气-蒸汽联合循环发电技术相结合的技术,实现了煤炭资源的高效、洁净利用,是洁净煤技术的重要发展方向之一。煤气化部分主要设备包括气化炉、废热锅炉、空

分装置、脱硫除尘设备等;燃气-蒸汽联合循环发电部分主要设备包括燃气轮机、蒸汽轮机和余热锅炉<sup>[1]</sup>。

IGCC 发电工艺流程如图 1 所示。

收稿日期: 2012-03-16 责任编辑: 孙淑君

作者简介: 王春晶(1985—),女,黑龙江望奎人,硕士研究生,从事洁净煤技术研究工作。

引用格式: 王春晶,刘元明,吴立新,等.基于低碳排放的 IGCC 发电模型研究[J].洁净煤技术,2012,18(4):82-85.

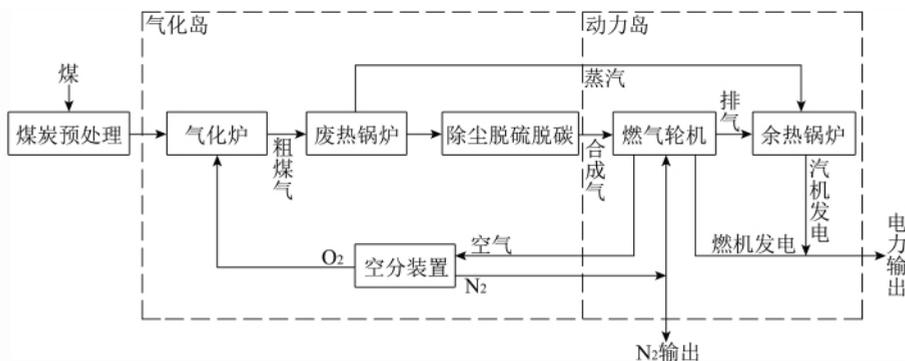


图1 IGCC 发电工艺流程

典型的 IGCC 发电技术为: 煤炭经预处理后进入气化炉, 气化为中低热值的粗煤气, 粗煤气经脱硫除尘装置, 除去煤气中的氮化物、硫化物、粉尘等, 净化后的煤气送入燃气轮机燃烧室燃烧, 驱动燃气透平做功。燃气轮机排气进入余热锅炉加热, 产生的过热蒸汽使蒸汽轮机做功<sup>[2]</sup>。

## 1 IGCC 发展现状

### 1.1 国外发展现状

IGCC 发电技术尚处于工业示范阶段, 目前全球正在建设和计划建设的 IGCC 电站共 50 座, 总装机容量达 25000 MW。

在产业化发展方面, 自 20 世纪 90 年代, 国际上先后投运了多套以煤为原料的 250 ~ 300 MW IGCC 电站示范装置。西班牙的 Puertollano 电站容量达 300 MW, 净效率达 43%, 气化炉规模达 2640 t/d, 采用 MDEA 脱硫、Claus 硫回收和尾气循环的净化方式。日本的 Nakoso 电站容量达 249 MW, 净效率达 42%, 气化炉规模达 1700 t/d, 采用 MDEA 脱硫和石膏硫回收的净化方式<sup>[3]</sup>。

### 1.2 国内发展现状

目前, 中国已经掌握了部分生产 200 ~ 400 MW 等级 IGCC 电站匹配的关键技术, 相关的关键技术、装备国产化进程也在加快, 包括煤气化炉、低热值燃气轮机、大型深冷空分设备等。目前华能、华电、中电投、大唐、国电五大发电集团正在积极发展 IGCC 项目。

中国正在筹建多座 IGCC 示范电站。中国首个自主设计的 IGCC 电站——华能“绿色煤电”天津 IGCC 电站示范工程一期 250 MW 级 IGCC 发电机组已于 2011 年投产<sup>[4]</sup>。

## 2 IGCC 评价系统

本文主要以 IGCC 发电系统为评价系统, 输入

为煤, 输出为电,  $CO_2$ ,  $NO_x$  等。分别对 IGCC 发电系统两部分建立了评价子模型, 煤气化系统(采用 Shell 气化工艺<sup>[5]</sup>) 如图 2 所示, 燃气-蒸汽轮机联合循环发电系统如图 3 所示。

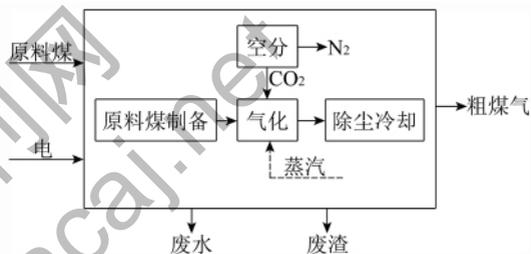


图2 煤炭气化系统

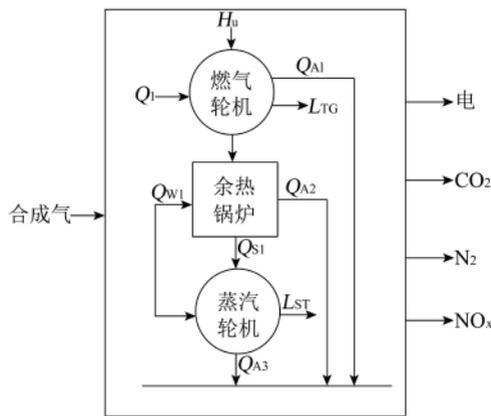


图3 燃气-蒸汽循环发电系统

## 3 评价模型的建立

### (1) 煤气化效率

$$\eta_{\text{气化}} = \frac{Q_{H_2} + Q_{CO} + Q_{N_2} + Q_{CO_2}}{Q_{\text{原料煤}}} \quad (1)$$

### (2) 燃气-蒸汽循环发电效率<sup>[6]</sup>

燃气-蒸汽联合循环热效率为

$$\eta_{CC} = \eta_{GT} + (\eta_B - \eta_{GT}) \eta_{HRSG} \cdot \eta_{ST} \quad (2)$$

$$\eta_{CC} = \frac{1.02\eta_T\beta(1-\pi^{m_2})\frac{\pi^{m_1}-1}{\eta_C}}{1.4 \times 1.02 \times (1-\pi^{m_1})} + (\eta_B - \frac{1.02\eta_T\beta(1-\pi^{m_2})\frac{\pi^{m_1}-1}{\eta_C}}{1.4 \times 1.02 \times (\beta-\pi^{m_1})}) \times \frac{T_4^* - T_5^*}{T_4^*} \times \eta_{ST} \quad (3)$$

式中  $\eta_B$  为燃气轮机燃烧室效率 %;  $\eta_{CT}$  为燃气轮机效率 %;  $\eta_{HRSG}$  为余热锅炉效率 %;  $\eta_{ST}$  为蒸汽轮机效率 %;  $\eta_C$  为压气机的内效率 %;  $\eta_T$  为燃气透平内效率 %;  $m_1 = (k_1 - 1)/k_1$ ;  $m_2 = (k_2 - 1)/k_2$ ;  $k_1 = \frac{k_{O_2}V_{O_2} + k_{N_2}V_{N_2}}{V_{O_2} + V_{N_2}}$ ;  $k_2 = \frac{k_{O_2}V_{O_2} + k_{N_2}V_{N_2} + k_{CO_2}V_{CO_2} + k_{H_2O}V_{H_2O}}{V_{O_2} + V_{N_2} + V_{CO_2} + V_{H_2O}}$  (双分子气体  $k=1.4$  三分子气体  $k=1.33$ );  $\pi$  为压比;  $\beta$  为温比;  $T_4^*$  为燃气轮机的排气温度, °C;  $T_5^*$  为余热锅炉排烟的温度, °C。

(3) IGCC 系统能效

$$\eta_{供} = \eta_{发} \times (1 - a) \quad (4)$$

式中  $a$  为厂用电率 %。

(4) 供电标煤耗

$$M_{标} = \frac{1000}{Q_{标} \eta_{供} / 3.6} \quad (5)$$

(5) 单位电量 CO<sub>2</sub> 排放量

$$W_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{\frac{M_{煤} \times Q_{net, ar} \times \eta_{供}}{3600} \times 1000} \quad (6)$$

$$M_{CO_2} = M_{煤} \times C_{ar} \times \gamma \times \frac{44}{12} \quad (7)$$

4 参数的选取

IGCC 发电模型主要参数的选取见表 1。

表 1 IGCC 发电模型主要参数

项目	参数	项目	参数
规模/MW	400	燃气轮机效率/%	37.1
蒸汽轮机效率/%	40	碳转化率/%	99
余热锅炉效率/%	85	厂用电率/%	14.5
燃烧室效率/%	100		

表 4 粗煤气组成

项目	温度/°C	压力/MPa	粗煤气组成/%					
			$\omega(CO)$	$\omega(H_2)$	$\omega(CO_2)$	$\omega(CH_4)$	$\omega(N_2)$	$\omega(H_2S)$
模型计算结果	1500	3.0	63.68	29.51	3.00	0.02	3.53	0.25
IGCC 电厂可研数据	1550	3.09	57.05	27.24	3.69	0.03	0	0.23

由表 4 可知 模型计算结果与国内某电厂中粗煤气组成基本一致。

煤质分析见表 2  $Q_{net, ar} = 24980$  kJ/kg。

表 2 煤质分析

$M_{ad}$	$A_{ad}$	$\omega(C_{ad})$	$\omega(H_{ad})$	$\omega(O_{ad})$	$\omega(N_{ad})$	$\omega(S_{ad})$
1.94	14.85	70.28	3.88	7.63	0.71	0.71

5 模型的计算结果

(1) 煤气化模型计算结果

Shell 气化温度 1500 °C 反应压力 3.0 MPa O<sub>2</sub> 纯度 99.6% Shell 气化规模 2600 t/d。煤气化模型计算结果见表 3。

表 3 煤气化模型计算结果

项目	体积分数/%	质量/t
CO <sub>2</sub>	3.00	297.43
H <sub>2</sub>	29.51	—
H <sub>2</sub> S	0.26	19.61
灰渣含碳量		29.83
CO	63.68	4017.69
CH <sub>4</sub>	0.02	0.72
气化效率	81.62	—
CO <sub>2</sub> 质量浓度/(g·m <sup>-3</sup> )		59.32
煤气/(万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		501.39

(2) IGCC 发电模型计算结果

IGCC 发电模型计算结果如下:

发电效率 $\eta_{发}$ /%	47.64
系统能效 $\eta_{供}$ /%	40.64
供电标煤耗 $M_{标煤}$ /(gce·kWh <sup>-1</sup> )	301.58
CO <sub>2</sub> 排放 $M_{CO_2}$ /(t·d <sup>-1</sup> )	6189.44
单位 CO <sub>2</sub> 排放 $W_{CO_2}$ /(g·kWh <sup>-1</sup> )	842.27
CO <sub>2</sub> 排放质量浓度 $\rho(CO_2)$ /(g·m <sup>-3</sup> )	307.22

6 模型的验证

(1) 煤气化粗煤气组成

煤气化模型计算结果与国内某电厂中粗煤气组成对比见表 4。

(2) 燃气-蒸汽联合循环机组效率

表 5 为国际大型联合循环机组的热效率。

表5 燃气-蒸汽联合循环机组热效率

制造商	联合循环型号	燃气轮机型号	配置方式	ISO 功率/MW	热效率/%	汽轮机性能状况
GE	S109FA	MS9001FA	1GT + 1ST	390.8	56.7	142MW/3P/R
	S109G	MS9001G	1GT + 1ST	420.0	58.0	3P/R
Siemens	GUDIS. 94. 3A	VG94. 3A	1GT + 1ST	385.5	57.1	120MW/3P/R
Mitsubishi	1* M701F	M701F	1GT + 1ST	397.7	57.0	132MW/3P/R

从表5可以看出,燃气-蒸汽联合循环机组的热效率一般在56.7%~58.0%,与模型计算结果(热效率为58.19%)基本一致。

模型计算供电效率与国外IGCC电站数据基本一致。本文建立的IGCC发电系统评价模型基本是正确、合理的。

### 7 结 论

(1) 通过IGCC发电技术模型可知,CO<sub>2</sub>的排放量主要与2个因素有关:一为系统CO<sub>2</sub>排放量;二为IGCC系统能效。因此,提高系统的能效、减少系统CO<sub>2</sub>排放量是减少单位电量的CO<sub>2</sub>的主要途径。

(2) 系统CO<sub>2</sub>排放量主要由两部分组成,包括燃气轮机产生的CO<sub>2</sub>和煤气化产生的CO<sub>2</sub>。煤气化产生的CO<sub>2</sub>浓度较高,易于捕集,对其捕集可减少CO<sub>2</sub>的排放量。

(3) 系统能效主要与气化效率、燃气-蒸汽联合循环发电效率及厂自用电率等有关。提高气化效率、燃烧室效率,减少厂自用电等可提高系统能效,

(上接第54页)

### 3 结 论

(1) 萃取热解液体产物中,O,S,N元素含量较高,其中O元素含量大于10%,正庚烷可溶物含量较高,大于70%。

(2) 萃取热解液体产物中酚类物质含量较高,大于50%。酚类物质中高附加值的低级酚含量高达70%以上,因此采用碱洗法首先将酚类化合物从液体产物中分离出来。

(3) 萃取热解产物的加工,应首先将酚类物质(尤其是低级醇)分离出来,为生产清洁燃料,后续加工应重视S,N元素的脱除。

参考文献:

[1] Lester E, Kingman S. The effect of microwave pre-heating on  
王春晶等:基于低碳排放的IGCC发电模型研究

减少单位电量CO<sub>2</sub>排放量。

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.  
 [2] 徐连兵. 整体煤气化联合循环发电技术的发展现状和前景[J]. 电力勘测技术 2005, 12(6): 8-11.  
 [3] 李现勇, 孙永斌, 李惠民. 国外IGCC项目发展现状概述[J]. 电力勘测设计 2009, 6(3): 28-33.  
 [4] 李琼玖, 杜世权, 廖宗富, 等. 我国燃煤发电污染治理的CO<sub>2</sub>捕集封存与资源化利用[J]. 化肥设计 2010, 48(6): 1-10.  
 [5] 张晓鲁, 李新春, 宿凤明, 廊坊IGCC热电联供项目脱碳示范技术方案研究[J]. 洁净煤技术 2012, 18(1): 63-67.  
 [6] 谢浩, 张忠孝, 李振中, 等. IGCC常规岛系统优化设计研究[J]. 洁净煤技术 2011, 17(6): 30-35.  
 five different coals [J]. Fuel, 2004, 83(14-15): 1941-1947.  
 [2] Li Y, Michels R, Mansuy L et al. Comparison of pressurized liquid extraction with classical solvent extraction and microwave assisted extraction-application to the investigation of the artificial maturation of Mahakam coal [J]. Fuel 2002, 81(6): 747-755.  
 [3] Kerst M, Andersson J T. Microwave-assisted extraction of polycyclic aromatic compounds from coal [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(7): 970-972.  
 [4] 陈红. 微波辅助溶剂对煤抽提机制研究及煤组成结构分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.  
 [5] 石智杰. 煤的溶剂热萃取及萃取物加氢液化的研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院北京煤化工研究分院, 2009.  
 [6] 陈亚妮, 刘弓. 微波辅助低温煤焦油馏分萃取-热解耦合神府煤的作用研究[J]. 洁净煤技术 2011, 17(6): 50-52.