

整体煤气化联合循环系统中废热锅炉特性研究

王颖¹, 邱朋华¹, 吴少华¹, 李振中², 王阳², 庞克亮², 陈雷², 陈晓利¹

(1. 哈尔滨工业大学燃烧工程研究所, 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)

Syngas Cooler Characteristic in Integrated Gasification Combined Cycle System

WANG Ying¹, QIU Peng-hua¹, WU Shao-hua¹, LI Zhen-zhong², WANG Yang²,
PANG Ke-liang², CHEN Lei², CHEN Xiao-li¹

(1. Institute of Combustion Engineering of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

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

ABSTRACT: The syngas cooler including radiant syngas cooler (RSC) and convective syngas cooler (CSC), it is the high temperature cooling unit in integrated gasification combined cycle (IGCC) system. It can recover the raw syngas heat energy out of the gasifier to increase the system efficiency, so the study on the syngas cooler characteristic in IGCC system is of great significance. The 200 MW IGCC system model was established using Thermoflex software. From the view of system efficiency, the effect on the system performance with different syngas temperature out of CSC was studied firstly, and then the influence on the system performance with different steam parameter was calculated. The conclusions can be obtained from the calculated results: the system power and efficiency decrease with the increasing of raw syngas temperature out of the CSC; the system efficiency with syngas cooler generating superheated steam is better than the system with syngas cooler generating saturated steam; the system efficiency with syngas cooler generating high pressure steam is better than the system with syngas cooler generating intermediate pressure steam. Considering the cost and the system efficiency, the best steam parameter system scheme is the system with RSC and CSC generating high pressure saturated steam.

KEY WORDS: integrated gasification combined cycle (IGCC); syngas cooler; characteristic; system efficiency; steam parameter

摘要: 废热锅炉包括辐射废热锅炉(radiant syngas cooler, RSC)和对流废热锅炉(convective syngas cooler, CSC), 它

是整体煤气化联合循环(integrated gasification combined Cycle, IGCC)系统中的高温冷却单元, 可回收气化炉出口粗合成气热能, 以提高系统的效率, 所以研究 IGCC 系统中废热锅炉的特性是很有意义的。该文利用 ThermoFlex 软件建立 200 MW 级 IGCC 系统模型, 从系统效率角度出发, 首先研究对流废热锅炉出口合成气温度对 IGCC 系统性能的影响, 然后研究废热锅炉产生不同蒸汽参数对 IGCC 系统性能的影响。结果表明: 随着对流废热锅炉出口合成气温度的提高, 系统的发电功率和效率下降; 废热锅炉产生过热蒸汽的系统效率优于产生饱和蒸汽的系统效率, 废热锅炉产生高压蒸汽的系统效率优于产生中压蒸汽的系统效率; 综合考虑造价及其系统效率的影响, 推荐最佳的蒸汽参数方案为辐射废热锅炉和对流废热锅炉均产生高压饱和蒸汽的系统。

关键词: 整体煤气化联合循环; 废热锅炉; 特性; 系统效率; 蒸汽参数

0 引言

整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)技术具有高效、低污染、节水、可以实现多联产等优点, 是目前比较有发展前景的洁净的燃煤发电技术, 且可以为未来CO₂封存和捕集技术提供可能, 越来越受到人们的关注^[1-5]。

IGCC系统中的合成气高温冷却段是指从气化炉出口到除尘段的部分, 在这个区域的粗合成气具有较高的温度, 在净化之前必须降温, 其含有的大量显热能需要回收以提高系统效率。合成气高温冷却单元热回收装置是位于气化炉出口的辐射废热锅炉与其后的对流废热锅炉, 是IGCC系统中至关重要的部件。国际上几个典型的IGCC电站尽管配置并

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA05A110)。

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

不相同，但都设置了废热锅炉，主要的区别在于蒸汽参数、出口合成气温度以及换热器的设置。Tampa 电站废热锅炉出口粗合成气温度为 482 °C，产生 11.5 MPa 的饱和蒸汽^[6]，Buggenum 电站废热锅炉出口粗合成气温度为 250 °C，产生 12 MPa 的高压饱和蒸汽^[7]，Puertollano 电站废热锅炉出口粗合成气温度为 235 °C，产生 12.6 MPa 的饱和蒸汽^[8]。Wabash River 电站煤气余热锅炉出口煤气温度约 370 °C，产生约 11 MPa 的高压饱和蒸汽^[9]。废热锅炉可以有效地利用粗合成气的显热，使 IGCC 系统的净效率提高 3~5 个百分点^[10]。文献[11]研究了余热锅炉和废热锅炉之间的不同匹配换热方案对 IGCC 系统性能的影响。文献[12]对 IGCC 系统中的余热锅炉与废热锅炉的匹配优化进行了研究。文献[13]对 IGCC 电站废热锅炉研究和设计中的几个关键问题进行了总结和分析，并提出了相应的解决意见。文献[14]分析了煤气发生炉的运行现状，论述了在当前能源紧缺的情况下回收煤气发生炉废热的必要性和可行性。文献[15]用有效能分析的方法评价了德士古煤气化炉出口气体的热量回收及其净化 3 种流程。

本文利用 Thermoflex 软件建立 200 MW 级 IGCC 系统模型，从系统效率角度出发，研究 IGCC 系统中废热锅炉的特性，包括研究对流废热锅炉出口合成气温度对系统性能的影响，以及废热锅炉产生不同蒸汽参数对系统性能的影响。研究结果对工程应用具有一定的指导意义。

1 IGCC 系统模型的建立及其基本条件

考虑到运行安全性，本研究中的 IGCC 系统取消气/气热交换器的使用^[6]，经过废热锅炉回收热量后的粗合成气直接进入除尘系统除尘。空分系统采用的是部分整体化低压空分系统。气化炉采用的是广泛使用的水煤浆气流床气化炉，并采用纯氧气化。为了提高系统的效率，采用废热锅炉流程来回收气化炉出口合成气热量，产生蒸汽回送到三压再热式余热锅炉。净化系统包括除尘、氧硫化碳(carbonyl sulfide, COS)水解、脱硫及其低温净化单元等。余热锅炉与净化系统之间也存在汽水交换，以提高系统的效率。各个单元按照实际系统的工艺流程进行连接，建立整个 200 MW IGCC 系统模型，其示意图见图 1。

这种系统配置与美国 Tampa 的 IGCC 电站及我国华电集团在建的半山 IGCC 电站相同，所以此 IGCC 系统模型具有一定的代表性。

气化用煤的煤质分析见表 1。大气条件采用年平均平均值。采用部分整体空分，GE 9E 型燃气轮机。系统基本设计工况参数见表 2。

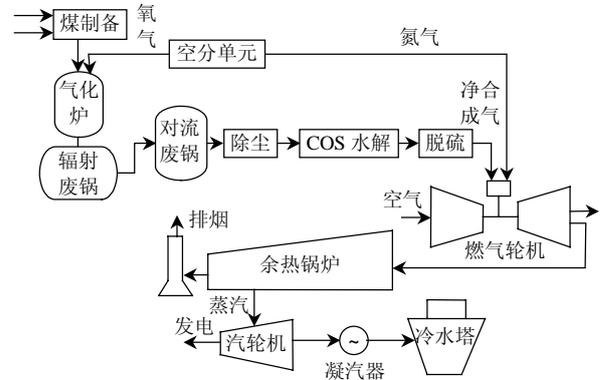


图 1 200 MW IGCC 系统示意图
Fig. 1 200 MW IGCC system

表 1 煤质分析

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal

元素分析/%						M _{ar} /%	Q _{net,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	流动温度/°C
C	H	N	S	O				
57.81	3.62	0.84	0.33	0.3	17.3	21.74	1260	

表 2 IGCC 系统设计工况

Tab. 2 On-design of IGCC system

参数	数值	参数	数值
大气压力/MPa	0.100 1	碳转化率/%	98
大气温度/°C	17.4	氧煤浆比/(kg/kg)	0.544
相对湿度/%	79	水煤浆浓度/%	60.5
气化压力/MPa	3.6	氮气回注系数/%	70
空分系数/%	30	辐射废热锅炉出口合成气温度/°C	700
氧气浓度/%	99	对流废热锅炉出口合成气温度/°C	350

2 IGCC 系统流程介绍和计算说明

IGCC 系统模型包括空分系统、气化炉、废热锅炉、净化系统、燃气轮机、余热锅炉、汽轮机及其辅助系统等。首先低压空分系统产生高纯度的氧气，氧气经过氧压机加压后与制备好的水煤浆一起泵入气化炉，产生高温高压的粗合成气。合成气的主要成分为 H₂、CO、CO₂、H₂O、CH₄、N₂、H₂S 和 COS，并且不含有焦油和酚类。粗合成气进入到辐射废热锅炉和对流废热锅炉，辐射废热锅炉和对流废热锅炉回收粗合成气的显热后，产生蒸汽回送到余热锅炉。净化系统布置在对流废热锅炉的下游，用来净化粗合成气，使之成为洁净的合成气。净合成气与回注的氮气一同进入燃气轮机燃烧室燃烧推动燃气透平做功。燃气轮机的高温排气进入余热锅炉，余热锅炉产生的蒸汽推动汽轮机做功，从而实现高效的煤气化燃气-蒸汽联合循环。

系统模型的计算是采用序贯模块法，并基于质

量和能量平衡。

IGCC系统计算的供电效率在39%左右,系统效率主要由于废热锅炉特性的不同而略有不同。系统的效率数值在目前正在运行的电站的效率范围内^[16],这完全可以证明本系统计算模型的有效性。

3 结果与讨论

3.1 对流废热锅炉出口合成气温度对系统影响

气化炉出口的高温粗合成气的冷却主要采用2种方法:一种就是直接激冷流程;另一种是废热锅炉流程,即通过废热锅炉回收合成气热量。粗合成气温度高于700℃时以辐射换热为主,温度较低时以对流换热为主,根据换热方式的不同,可以分为辐射废热锅炉和对流废热锅炉。

辐射废热锅炉和对流废热锅炉给水均来自余热锅炉高压省煤器,辐射废热锅炉出口粗合成气温度保持700℃不变,且辐射废热锅炉和对流废热锅炉均产生高压饱和蒸汽回送到余热锅炉,余热锅炉产生的蒸汽供汽轮机发电。根据后续净化流程,改变对流废热锅炉出口合成气温度(350~400℃),研究此温度变化对系统性能的影响。

从图2可以看出,随着对流废热锅炉(convective syngas cooler, CSC)出口合成气温度由350℃升高到400℃,汽轮机的功率是下降的,由114.92 MW下降到113.64 MW。由于辐射废热锅炉出口合成气的温度保持700℃不变,所以辐射废热锅炉产生的高压饱和蒸汽的流量变化不大,随着对流废热锅炉出口合成气温度的升高,粗合成气被对流废热锅炉回收的能量减少,产生的高压饱和蒸汽减少,由56.83 t/h减少到49.97 t/h。辐射废热锅炉和对流废热锅炉产生的高压饱和蒸汽总量随着对流废热锅炉出口合成气温度的升高而减少,由

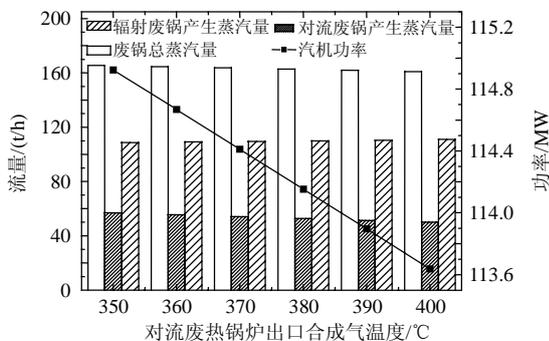


图2 CSC出口合成气温度对蒸汽流量及汽轮机功率影响
Fig. 2 Effect of CSC syngas temperature on steam flow and steam turbine power

165.53 t/h减少到160.87 t/h。所以废热锅炉高压饱和

蒸汽的产量的减少,导致汽轮机的功率减少。

从图3可以看出,随着对流废热锅炉出口合成气温度的升高,系统的发电功率和发电效率都是下降的。这是因为燃气轮机功率变化不大,而汽轮机功率由于高压饱和蒸汽产量的减少而减少,所以系统发电功率减少,由263.53 MW降低到262.64 MW,系统的发电效率由47.77%下降到47.54%。所以,当对流废热锅炉出口合成气温度由400℃减少到350℃时,系统的效率提高0.23个百分点。

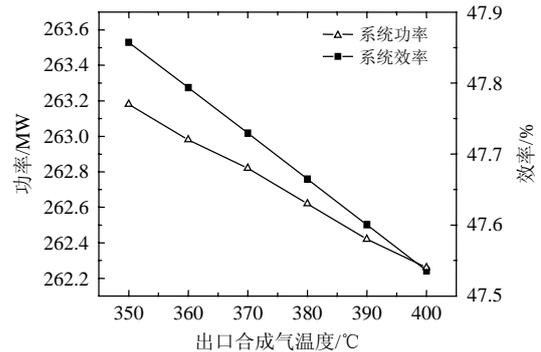


图3 CSC出口合成气温度对系统的影响

Fig. 3 Effect of CSC syngas temperature on system

3.2 不同废热锅炉蒸汽参数的IGCC系统比较

蒸汽参数关系到热回收的品质,废热锅炉的出口合成气温度则关系到热回收的量。一般为了提高系统的效率,IGCC系统中都尽可能地降低合成气出口温度以更好地回收显热。根据能量梯级利用原理,对废热锅炉在不同蒸汽参数下的热力性能进行比较,设定5种不同蒸汽参数的系统方案,见表3。

表3 不同工况下废热锅炉蒸汽参数设定方案

Tab. 3 Steam parameters schemes of different syngas cooler

方案	辐射废热锅炉(MPa/°C)	对流废热锅炉(MPa/°C)
Case1	高压过热蒸汽(9.575/508)	高压过热蒸汽(9.575/508)
Case2	高压过热蒸汽(9.575/508)	中压过热蒸汽(2.741/300.2)
Case3	高压饱和蒸汽(10.3/313)	高压饱和蒸汽(10.3/313)
Case4	中压过热蒸汽(2.741/300.2)	中压过热蒸汽(2.741/300.2)
Case5	中压饱和蒸汽(3.6/150.3)	中压饱和蒸汽(3.6/150.3)

5种工况均基于废热锅炉流程的IGCC系统,系统基本参数均相同,且辐射废热锅炉出口合成气温度保持700℃不变,对流废热锅炉出口合成气温度保持350℃不变。5种方案的区别在于辐射废热锅炉和对流废热锅炉给水是来自余热锅炉的高压省煤器或者中压省煤器。辐射废热锅炉或对流废热锅炉产生高压/中压过热蒸汽或者产生高压/中压饱和蒸汽。表4给出5种不同蒸汽参数的系统方案对IGCC系统性能的影响。

表 4 废热锅炉不同蒸汽参数 IGCC 性能
Tab. 4 IGCC system performances of different steam parameters of syngas cooler

参数	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
系统发电功率/MW	281.34	276.87	262.06	257.28	255.96
系统供电功率/MW	228.73	224.32	210.35	205.66	204.42
燃机功率/MW	148.48	148.48	148.47	148.47	148.48
汽轮机功率/MW	132.87	129.45	113.59	108.81	107.49
高压过热蒸汽/(t/h)	181.10	135.70	—	—	—
高压饱和蒸汽/(t/h)	—	59.18	160.80	—	—
中压过热蒸汽/(t/h)	—	—	—	149.30	—
中压饱和蒸汽/(t/h)	—	—	—	—	144.24
系统净效率/%	39.33	39.18	38.42	37.69	37.46

由表 4 可知,从系统效率角度出发,最佳的IGCC系统是废热锅炉出口参数均产生高压过热蒸汽的 Case1,此时系统的发电功率最大为 281.34 MW,系统的供电功率也最大为 228.73 MW,系统供电效率最高为 39.33%。5 种不同蒸汽参数的IGCC系统中,燃气轮机功率变化不大,可见废热锅炉产生蒸汽参数性质主要影响汽轮机出力,从而影响到整个系统。5 种不同废热锅炉出口参数的IGCC系统中,废热锅炉产生过热蒸汽的系统优于产生饱和蒸汽的系统,而且产生高压蒸汽参数的系统优于产生中压蒸汽参数的系统。所以 5 种废热锅炉出口参数的IGCC系统中,最佳的方案是Case1,而其中最差的方案是Case5,此系统供电功率最小为 204.42 MW,系统的净效率最低为 37.46%。

从图 4 中可以看出,5 种方案系统净效率由高到低依次为:辐射废热锅炉与和对流废热锅炉产生高压过热蒸汽的 Case1,辐射废热锅炉产生高压过热蒸汽与对流废热锅炉产生中压过热蒸汽 Case2,辐射废热锅炉与对流废热锅炉产生高压饱和蒸汽 Case3,辐射废热锅炉和与流废热锅炉产生中压过热蒸汽 Case4,辐射废热锅炉与对流废热锅炉产生

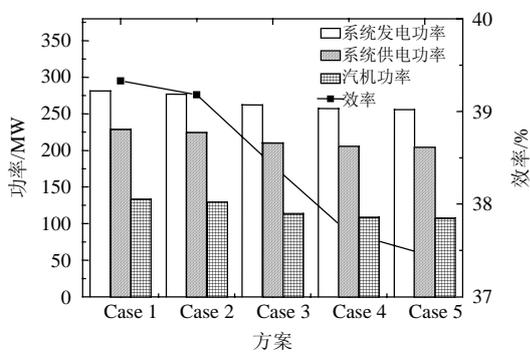


图 4 不同系统方案发电功率比较

Fig. 4 Comparison of power with different system scheme
中压饱和蒸汽 Case5。5 种方案的汽轮机功率、系

统供电功率及其系统发电功率的变化规律与系统净效率变化规律相同。

值得注意的是,当废热锅炉用于产生饱和蒸汽时,其蒸汽温度相对同压下过热蒸汽低得多,传热效果会有所改善,必然使废热锅炉造价降低,而且目前运行电站中废热锅炉也多用来产生饱和蒸汽。所以综合考虑废热锅炉的造价及其系统效率的影响,推荐最佳的蒸汽参数系统方案为 Case2,也就是废热锅炉均产生高压饱和蒸汽。

4 结论

1) 随着对流废热锅炉出口合成气温度由 350 °C 升高到 400 °C,汽轮机功率减少,系统发电功率减少,系统效率下降。

2) 废热锅炉产生过热蒸汽的系统效率优于产生饱和蒸汽的系统。

3) 废热锅炉产生高压蒸汽的系统效率优于产生中压蒸汽的系统。

综合考虑造价及系统效率的影响,推荐最佳的蒸汽参数方案为辐射废热锅炉和对流废热锅炉均产生饱和蒸汽回送到余热锅炉。

参考文献

- [1] Guillermo O G, Douglas P, Croiset E, et al. Technoeconomic evaluation of IGCC power plants for CO₂ avoidance[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15-16): 2250-2259.
- [2] Kanniche M, Bouallou C. CO₂ capture study in advanced integrated gasification combined cycle[J]. Science Direct, 2007, 27(16): 2693-2702.
- [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.
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).
- [4] 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).
- [5] 关键, 王勤辉, 骆仲泮, 等. 新型近零排放煤气化燃烧利用系统的优化及性能预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 7-13.
Guan Jian, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. Optimization and performance prediction of a new near zero emissions coal utilization system with combined gasification and combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 7-13(in Chinese).
- [6] Hornik M J. Tampa electric Polk power station integrated gasification combined cycle project final technical report[R]. West Virginia: The US Department of Energy Office of Fossil Energy, 2002.
- [7] Eurlings J, Th G M, Ploeg J E G. Process performance of the SCGP

- at Bbuggenum IGCC[C]. Gasification Technologies Conference, San Francisco, California, 1999.
- [8] Coca M T. Integrated gasification combined cycle technology: IGCC its actual application in Spain[R]. Spain: EICOGAS, 2003.
- [9] Dowd R A. Wabash river coal gasification repowering project [R]. West Virginia: The US Department of Energy Office of Fossil Energy, 2002.
- [10] Maurstad O. An overview of coal based integrated gasification combined cycle (IGCC) technology, MIT LFEE 2005-002-WP [R]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Energy and the Environment, 2005.
- [11] 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)气化炉合成冷却器与余热锅炉的匹配[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 471-474.
Gao Jian, Ni Weidou, 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]. Power Engineering, 2008, 28(3): 471-474(in Chinese).
- [12] 王颖, 邱朋华, 吴少华, 等. IGCC 系统中余热锅炉的优化研究[J]. 电站系统工程, 2009, 25(5): 31-32,35.
Wang Ying, Qiu Penghua, Wu Shaohu, et al. Study on optimization of HRSG in IGCC system[J]. Power System Engineering, 2009, 25(5): 31-32, 35(in Chinese).
- [13] 张广全. 对 IGCC 电站中废热锅炉技术的探讨[J]. 华电技术, 2008, 30(2): 29-33.
Zhang Guangquan. Exploration of the waste heat boiler technology on IGCC power generation[J]. Huadian Technology, 2008, 30(2): 29-33(in Chinese).
- [14] 弓朝红, 樊少波. 煤气发生炉废热利用技术分析[J]. 科技情报开发与技术, 2009, 19(7): 185-187.
Gong Chaohong, Fan Shaobo. Analysis on the technologies for coal-gas producer's waste-heat utilization[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2009, 19(7): 185-187(in Chinese).
- [15] 尹潜, 盛冠成, 胡建华, 等. 德士古气化过程的有效能分析[J]. 燃料化学学报, 1985, 13(2): 175-186.
Yi Qian, Sheng Guancheng, Hu Jianhua, et al. Availability analysis of texaco coal gasification process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1985, 13(2): 175-186(in Chinese).
- [16] Dennis R S, Shelton W W, Le P. Development of baseline performance values for turbines in existing IGCC applications [C]. ASME Turbo Expo 2007: Power for LandSea and Air, Montreal, Canada, 2007.



王颖

收稿日期: 2009-06-30。

作者简介:

王颖(1981—), 女, 博士研究生, 研究方向为 IGCC 系统静态特性研究, wying811111@126.com;

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

李振中(1956—), 男, 教授, 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 技术及其多联产等。

(责任编辑 车德竞)