

IGCC 系统燃气轮机变工况对气化岛性能的影响

周国锋¹, 张忠孝¹, 李振中², 戚利利¹, 陈雷², 陈晓利²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:采用 Thermoflex 软件建立 200 MW 级 IGCC 系统模型, 简要地对气化岛设计参数进行了分析, 并对燃气轮机在 100% ~ 40% 负荷下的气化岛变工况进行计算, 分析比较气化岛主要设备性能参数的变化。结果表明: 燃气轮机负荷降低时, 在氧碳比不变的条件下, 入气化炉的煤浆量和氧气的量都减小, 空分系统等耗功减少; 废锅出口合成气温度、压力降低, 废锅吸热功率也同时减少, 废锅蒸汽做功能力下降; 脱硫系统吸收塔入口合成气温度降低; 燃气湿饱和器出口合成气压力降低, 导致合成气中 H₂O 的体积分数减小, 不利于减少 NO_x 排放。

关键词:IGCC; 气化岛; 废热锅炉; 燃气轮机; 变工况

中图分类号: TM611.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2010)06-0040-05

整体煤气化联合循环(IGCC)发电系统, 是将煤气化技术和高效的联合循环发电技术相结合的先进动力系统。IGCC 技术既有高发电效率, 又有极好的环保性能, 是一种有发展前景的洁净煤发电技术。

IGCC 发电系统主要由气化岛、燃机岛和常规岛组成, 其中燃机岛和常规岛都是常规的成熟技术。气化岛包括气化炉、空分装置、废热锅炉、合成气净化设备等, 为后续设备提供燃料和蒸汽。气化炉工作状况直接影响燃气轮机的工作状况, 废热锅炉通过回收合成气的显热影响 IGCC 系统效率, 并影响常规岛中余热锅炉的蒸汽热能, 进而影响蒸汽轮机的效率。因此, 研究气化岛在不同负荷下的工作特性具有重要意义。国内外学者对联合循环的变负荷运行进行了大量研究。杨勇平等^[1]建立了 400 MW 级 IGCC 机组的变负荷性能数学模型, 并对 100% ~ 60% 负荷 5 种工况进行了变工况计算。吕泽华等^[2]分析了燃气轮机采用不同调节规律和汽轮机采用不同运行方式时对系统变工况性能的影响。林汝谋等^[3-4]研究了基于

全工况特性的 IGCC 联合循环设计优化新方法, 应用全工况和独立变量概念分析系统设计优化特点和全工况特性规律。刘可^[5]研究了燃用合成煤气的燃气轮机变工况特性。Johnson. M. S^[6]研究了燃气轮机性能参数对 IGCC 系统的影响。Schoen Peter^[7]建立了 IGCC 系统动态模型并得出重要单元的动态特性。陈晓利^[8], 陈雷^[9], 王颖^[10]分别应用商业软件分析了燃气轮机变工况下 IGCC 系统特性。

笔者利用 Thermoflex 软件建立了以水煤浆气化为基础的 200 MW 级 IGCC 系统模型, 简要分析了气化岛设计参数, 主要对燃气轮机 100% ~ 40% 负荷下的气化岛变工况进行计算, 分析比较气化岛主要设备性能参数变化。研究结果可为 IGCC 电站的设计和运行提供参考。

1 模型建立和设计工况参数的确定

1.1 模型建立

图 1 为 200 MW 级 IGCC 系统示意。系统采用空

收稿日期: 2010-09-25

作者简介: 周国锋(1983—), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事洁净煤技术和 IGCC 系统气化岛方面的研究。E-mail: zhoughuofeng100@126.com

分整体化系数为 30% 的部分整体化低压空分,采用水煤浆加压气化炉,利用辐射和对流废锅回收粗合成气显热,合成气净化部分采用旋风分离器、洗涤塔、COS 水解器、NHD 脱硫装置等,采用三压再热式余热锅炉以提高系统效率。汽水侧流程如下:对流废锅省煤器利用余热锅炉的高压给水回收一部分合成气显热,然后该部分水进入余热锅炉高压省煤器。从余热锅炉高压省煤器出来的高压水大部分进入辐射废锅和对流废锅蒸发器,回收一部分合成气显热,被加热蒸发后进入余热锅炉高压过热器。

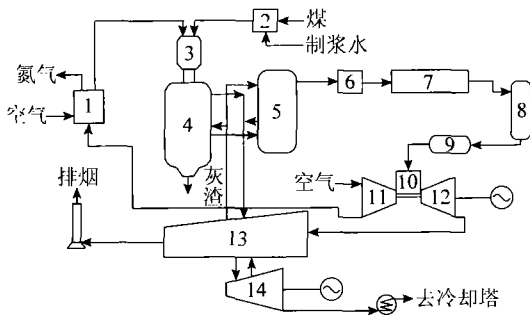


图 1 200 MW 级 IGCC 系统示意

1—空分系统;2—煤制备系统;3—气化炉;4—辐射废锅;5—对流废锅;6—高压省煤器;7—净化系统;8—燃气湿饱和器;9—净燃气过热器;10—燃烧器;11—燃机压气机;12—燃气轮机;13—余热锅炉;14—蒸汽轮机

1.2 设计工况参数的确定

设计工况大气条件取实验地(杭州)年平均温度 17.4 °C,大气压力为 101.17 kPa,相对湿度为 79%。假设各计算工况下碳转化率、水煤浆质量分数和氧气纯度不变,系统气化炉用煤的煤质分析见表 1,系统设计参数见表 2。

表 1 煤质的元素分析和工业分析

元素分析/%					M_{ar}	$Q_{net,ar}$	FT
$\omega(C)$	$\omega(H)$	$\omega(N)$	$\omega(S)$	$\omega(O)$	/%	/(MJ·kg ⁻¹)	/°C
57.81	3.62	0.84	0.33	9.29	17.3	21.74	1260

表 2 IGCC 系统的设计参数

参数	数值	参数	数值
气化压力/MPa	3.6	粗合成气热值/(kJ·kg ⁻¹)	7945
气化温度/°C	1311	辐射废锅出口温度/°C	650
碳转化率/%	98	对流废锅出口温度/°C	350
水煤浆质量分数/%	60.5	高压省煤器出口温度/°C	260
氧气纯度/%	99	燃机出力/MW	122
氧碳比	0.97	汽机出力/MW	112
粗合成气/(t·h ⁻¹)	170.4		

(1) 气化压力的确定。气化炉单炉生产能力与 $P^{1/2}$ 成正比^[10],加压气化生产强度高,对燃气输配和后续化学加工有明显的促进作用,但气化压力应与后续工艺压力相适应,以节省动力消耗。该系统为了降低 NO_x 排放,采用非深度湿化再加 SCR 的方案,压力降到 1.9 MPa,然后送入燃机,根据以上分析,选择气化压力为 3.6 MPa。

(2) 水煤浆质量分数的确定。水煤浆质量分数是指水煤浆中固体煤的质量分数,它直接影响水煤浆的着火性能和热值。水煤浆质量分数越大,越容易点燃且发热量越高。但质量分数的提高不仅增加了制浆成本,而且还会提高水煤浆的黏度进而影响水煤浆存储的稳定性、运输的流动性、雾化及燃烧效果。一般将德士古炉水煤浆质量分数控制在 60%~70%^[11]。煤种不同,水煤浆最佳质量分数也不同,系统采用的煤种的最佳水煤浆质量分数为 60.5%。

(3) 气化温度的确定。由于气化炉采用液态排渣方式,因此在较低温度下操作时,气化炉内灰渣黏度偏高,极易引起渣口的堵塞造成排渣困难,导致气化炉停炉;在较高温度下操作时,气化炉内灰渣黏度偏低,在炉内不能形成稳定流动的黏性保护膜,并且耐火材料会慢慢溶解扩散进入流动的煤灰中而排出气化炉,这将缩短气化炉内耐火层的运行周期。因此,气化温度不能过低也不能过高,一般为超过煤种流动温度的 30~50 °C^[11],系统所选煤种的流动温度为 1260 °C,因此,确定气化温度为 1310 °C 左右。

(4) 氧碳比的确定。氧碳比是指气化过程中氧耗量与煤中碳消耗量的比值。系统中的氧碳比是指入炉氧气中氧原子消耗的物质的量与煤中碳原子消耗的物质的量的比值,是一个无量纲量,它是影响气化反应的关键因素之一。氧碳比越大氧消耗量就越大,从而影响经济指标^[11]。

图 2 为气化压力 3.6 MPa、水煤浆质量分数 60.5% 时,氧碳比对气化温度、冷煤气效率等的影响。从图 2 可以看出,氧碳比为 0.97 时对应的气化温度为 1311 °C。故氧碳比选择 0.97 是比较理想的。

(5) 废热锅炉出口温度的确定。洗涤塔的工作温度大约在 170 °C,不宜太低,以避免粗合成气中部分氨盐在洗涤前析出。若要提高热效率须将 1311~170 °C 之间的热能尽量吸收。在洗涤除尘过程中

需喷入大量除盐水,部分水汽化须吸收大量的气化潜热。所以到洗涤除尘前,粗合成气温度至少要保持保持在 260 ℃ 才能使洗涤后的温度达到 170 ℃,故高压省煤器出口温度定为 260 ℃。根据美国 TAMPA 公司 IGCC 系统和采用 SHELL 技术的 IGCC 系统的经验,将水冷壁式辐射废锅合成气出口温度定为 650 ℃,水管式对流废锅合成气出口温度定为 350 ℃。

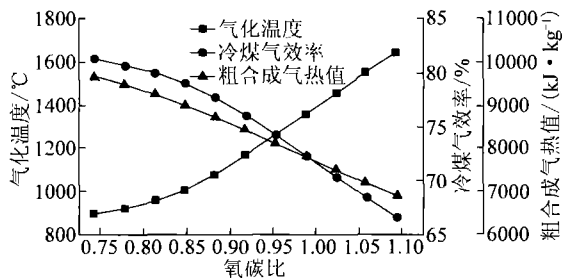


图2 氧碳比对气化温度、冷煤气效率等的影响

2 结果与讨论

根据 IGCC 系统基本参数的选取,利用 Thermoflex 软件计算燃气轮机 100%、90%、80%、70%、60%、50%、40% 负荷,7 种工况下系统的主要性能,结果如图 3 所示。

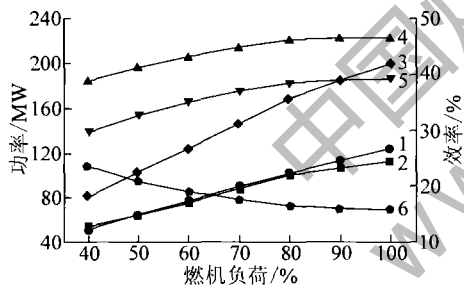


图3 燃机变工况下系统总体性能

1—燃气功率;2—汽机功率;3—电厂净功率;
4—电厂发电效率;5—电厂供电效率;6—厂用电率

从图 3 可以看出,燃机负荷从 100% 降到 40%, 汽轮机负荷从 100% 降到 48%, 电厂发电效率从 46.52% 降低到 38.88%, 电厂供电效率从 39.23% 降低到 29.71%, 厂用电率从 15.67% 升高到 23.57%, 可见系统在低负荷下运行时效率恶化严重。电厂效率和汽机功率在燃机负荷从 100% 降低到 80% 过程中下降较慢,而后下降较快,这是由于为了提高低负荷下的系统效率,在降负荷的开始阶段逐渐关小低压气机静叶(IGV),提高了燃气轮机的

排烟温度,在之后的过程中不再调节 IGV。

2.1 燃气轮机变工况对入炉流量等的影响

燃机变工况对入炉流量的影响如图 4 所示。入气化炉的煤浆量、氧量都减小,并且在 80%~40% 负荷间接近线性变化。因为燃机负荷降低时进入燃烧室合成气的量必然要减小,考虑到整个系统的经济性,入炉的煤浆量和氧量都应相应地减少,降负荷过程中氧碳比保持不变以保证气化炉内温度、压力和合成气热值稳定。燃机负荷从 100% 降低到 40%,对应的收到基煤量减小到满负荷的 54%, 供电标煤耗从 319 g/kWh 升高到 422 g/kWh,可以看出燃机负荷降低,经济性随之下降。

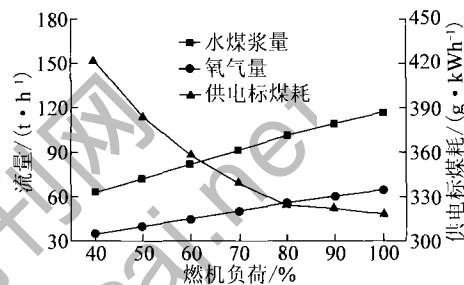


图4 燃机变工况对入炉流量等的影响

2.2 燃气轮机变工况对空分、气化系统耗电的影响

气化需要的纯度 99% 的氧气由空分提供,空分耗电巨大,空分的选择及运行方式直接影响厂用电率。燃机变工况对空分、气化系统耗电等影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着燃机负荷的降低,入气化炉的煤浆和氧气的减少,空分系统和气化系统耗电相应减少,进而引起厂用电量减少。但是,燃机负荷降低到 40%,空分耗电降低到满负荷的 68%, 气化系统耗电降低到满负荷的 54%,这也解释了图 4 所示的燃机负荷降低时厂用电率反而升高这一现象。

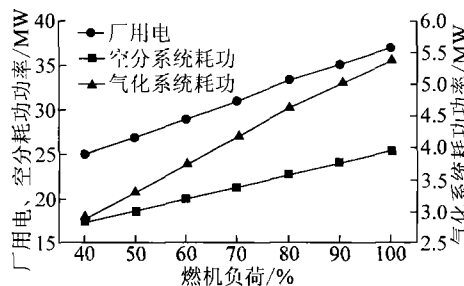


图5 燃机变工况对空分、气化系统耗电等影响

2.3 燃气轮机变工况对废热锅炉的影响

废热锅炉与常规岛联系紧密,废锅回收的粗合成气显热被汽轮机利用,其工作性能直接影响到电厂的经济性。燃气轮机变工况对废热锅炉的影响如图6所示。

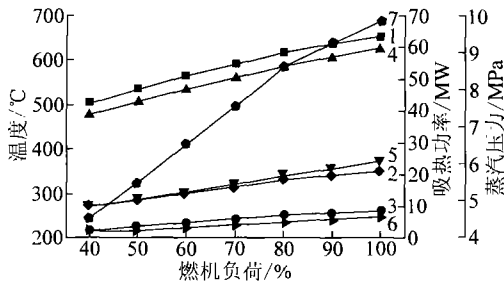


图6 燃机变工况对废锅的影响

1—辐射废锅出口温度;2—对流废锅出口温度;3—高压省煤器出口温度;4—辐射废锅吸热;5—对流废锅吸热;
6—高压省煤器吸热;7—废锅蒸汽压力

从图6可以看出,燃机变负荷对废热锅炉影响很大,具体表现为:随着燃机负荷的降低,辐射废锅、对流废锅和高压省煤器出口合成气温度都下降,并且它们的吸热功率也同时减少,废锅蒸汽出口压力降低。具体表现在:燃机负荷从100%下降到40%,辐射废锅出口合成气温度从651℃降低到501℃,辐射废锅吸热从59.48 MW下降到38.73 MW;对流废锅出口合成气温度从350℃降低到270℃,对流废锅吸热从24.07 MW下降到9.66 MW;高压省煤器出口合成气温度从261℃降低到217℃,高压省煤器吸热从6.77 MW下降到2.09 MW;废锅蒸汽出口压力从9.83 MPa下降到4.55 MPa,蒸汽品质降低,做功能力降低;并且这些参数在燃机负荷80%处是一个转折点,负荷100%~80%变化较慢,负荷80%~40%变化较快。由于在低负荷下废锅出口合成气温度低于设计温度,负荷降低时 K^+ 、 Na^+ 盐析出的位置前移,更容易结渣,所以低负荷下要注意废锅的安全。

2.4 燃气轮机变工况对吸收塔入口合成气温度的影响

表3给出了燃机变工况下脱硫系统吸收塔入口合成气的温度。设计工况下吸收塔入口温度要求在37~40℃,当燃机负荷从100%降低到40%时,入口合成气温度从37.5℃降低到33.9℃,进而影响脱硫系统的工作。根据表3的规律,可以将设计

工况吸收塔入口合成气温度定在接近工作温度范围的上限,并合理调整以保证低负荷下脱硫系统正常、高效率的工作。

表3 燃机变工况对吸收塔入口合成气温度的影响

负荷/%	温度/°C	负荷/%	温度/°C
100	37.5	60	35.1
90	37.0	50	34.5
80	36.5	40	33.9
70	35.8		

2.5 燃气轮机变工况对燃气湿饱和器出口参数的影响

从净化系统出来的燃气需要通过一个燃气湿饱和器,将燃气加热并湿饱和,以提高燃机的效率和降低 NO_x 生成量。燃机变负荷对燃气湿饱和器出口参数的影响如图7所示。

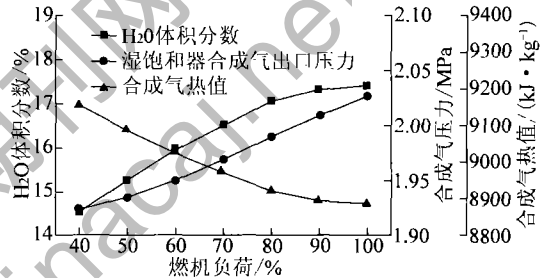


图7 燃机变工况对燃气湿饱和器出口参数的影响

从图7可以看出,燃机负荷从100%降低到40%,燃气湿饱和器出口合成气中 H_2O 的体积分数从17.4%减小到14.5%,同时合成气热值增大,产生这种变化的原因是湿饱和器出口合成气压力从2.03 MPa降低到1.92 MPa。更重要的是合成气中 H_2O 体积分数减小,偏离了最佳值,不利于减少 NO_x 的排放。为了保证系统的稳定运行,应尽量减小负荷变化引起的进入燃烧室前的合成气压力的变化。

3 结 论

(1)燃气轮机负荷从100%降低到40%,入炉收到基煤量从100%减小到54%,氧碳比保持不变,供电标煤耗从319 g/kWh升高到422 g/kWh,空分系统耗电从100%减少到68%,厂用电率从15.67%升高到23.57%,系统低负荷下运行经济性差。

(2)燃气轮机变负荷对废热锅炉影响很大:燃机负荷从100%降低到40%,辐射废锅、对流废锅和高压省煤器出口合成气温度都下降,并且它们的吸

热功率也同时减小,废锅蒸汽出口压力从 9.83 MPa 下降到 4.55 MPa,做功能力下降。

(3) 燃气轮机负荷从 100% 降低到 40%, 脱硫系统吸收塔入口合成气的温度从 37.5 °C 降低到 33.9 °C, 要做出合理调整以保证脱硫系统的正常工作。

(4) 燃气轮机负荷从 100% 降低到 40%, 燃气湿饱和器出口合成气压力降低导致合成气中 H_2O 的体积分数从 17.4% 减小到 14.5%, 造成合成气热值增大, 并且不利于减少 NO_x 的排放。所以, 为了保证系统的稳定运行, 应尽量减小负荷变化引起的进入燃烧室前的合成气压力的变化。

参考文献:

- [1] 杨勇平, 郭喜燕, 林汝谋, 等. 400MW 级 IGCC 机组变工况计算[J]. 工程热物理学报, 1997, 120(4): 417 - 420.
- [2] 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.
- [3] 林汝谋, 段立强, 金红光, 等. IGCC 系统全工况设计优化新方法[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 541 - 545.
- [4] 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.
- [5] 刘可. 燃用合成煤气的燃气轮机变工况变工况特性研究[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2009.
- [6] JOHNSON MARK SCOTT, P.J. D. The effects of gas turbine characteristics on integrated gasification combined-cycle power plant performance [D]. Stanford: Stanford University, 1990.
- [7] Peter Schoen. Dynamic Modeling and Control of Integrated Coal Gasification Combined Cycle Units [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1993.
- [8] 陈晓利, 吴少华, 李振中, 等. 整体煤气化联合循环系统中燃气轮机的变工况特性[J]. 动力工程学报, 2010, 30(3): 230 - 234.
- [9] 陈雷, 张忠孝, 李振中, 等. 燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响[J]. 热能动力工程, 2009, 24(3): 313 - 319.
- [10] 王颖, 邱朋华, 吴少华, 等. 基于燃气轮机变工况的 IGCC 系统特性研究[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(3): 25 - 28.
- [11] 许世森, 张东亮, 任永强. 大规模煤气化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 122 - 125, 150 - 153, 168 - 175.

Influence of off-design gas turbine on performance of gasification island in IGCC system

ZHOU Guo-feng¹, ZHANG Zhong-xiao¹, LI Zhen-zhong², QI Li-li¹, CHEN Lei², CHEN Xiao-li²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. National Power Plant Combustion Research Center, Shenyang 110034, China)

Abstract: A system model of 200MW IGCC is established with the Thermoflex software. Briefly analyze the design parameters of the gasification island. Off-design characteristics of the gasification island are mainly analyzed when gas turbine load varies from 100% to 40%. The results show that with the reduction of gas turbine load, the gasifier inlet parameters fall at constant O/C ratio and the power consumption such as air separation system reduces; at the same time the syngas temperatures out of the radiation syngas cooler, convective syngas cooler and the high-pressure economizer fall; besides heat absorption power, steam pressure out of waste heat boiler and the entrance temperature of the absorption tower in the desulfurization system decrease; syngas pressure out of syngas saturator decreases which lead to decrease in volume fraction of H_2O , and the syngas heating value increases which is no help for keeping down the NO_x .

Key words: IGCC; gasification island; waste heat boiler; gas turbine; off-design