

IGCC 发电技术及主要设备分析

李纪财, 曾成碧, 肖利

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 简要介绍了整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术的基本思想和特点。对用于 IGCC 系统的主要设备进行分析, 阐述了各部件在系统中的作用和特性, 指出 IGCC 系统设备与常规发电设备的差异以及由于技术不成熟所存在的一些问题, 并提出改进措施和发展方向。为 IGCC 系统进一步设计优化奠定基础。

关键词: 煤气化; IGCC; 主要设备

Abstract: The theory and characteristics of integrated gasification combined cycle(IGCC) is briefly introduced. Based on the analyses of the main equipment used in IGCC and their functions in the system, the differences between IGCC and the conventional generating set are pointed out as well as some problems of the immature technology. Thereafter, the improvement measures and the developing direction are proposed, which could build the foundation of further design and optimization for IGCC.

Key words: coal gasification; IGCC; main equipment.

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)02-0075-03

节能减排是中国经济可持续发展的保障。整体煤气化联合循环(IGCC - Integrated Gasification Combined Cycle)使煤气化成为中低热值煤气, 然后供到联合循环中去燃烧做功, 借以达到以煤代油或天然气的目的, 间接实现了煤在联合循环中作为燃料的应用。不仅具有较高的热效率, 同时具有良好的环保性能。目前, 它已成为国内外研究和发展的重点。

IGCC 为多种高新技术的集成, 主要包括高性能燃气轮机、煤的气化技术、煤气净化技术、空分装置、匹配协调的余热锅炉和汽轮机以及系统一体化优化等。由于工作条件变化很大, 构成部件与常规电力设备有很多不同, 因此有必要对其进行分析, 从而改进现有 IGCC 的某些关键技术及工作系统, 推动该技术尽快走向商业化。

氧或空气)发生气化过程, 成为中低热值煤气(以 CO、H₂ 为主要成分), 生成的煤气进入净化系统, 煤气中的颗粒、硫、汞等污染成分被分离出来, 净化后的煤气进入燃气轮机的燃烧室中燃烧并做功, 拖动发电机; 从燃气轮机排出的高温气体进入余热锅炉, 产生的蒸汽推动汽轮发电机组, 形成联合循环发电系统。其原理流程图如图 1。

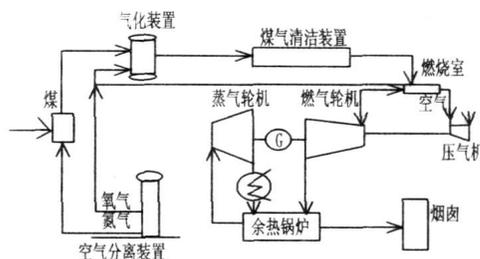


图 1 典型的 IGCC 流程图

1 IGCC 的基本思想

整体煤气化联合循环发电系统, 是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。它由两大部分组成, 即煤的气化与净化部分和燃气-蒸汽联合循环发电部分。第一部分的主要设备有气化炉、空气分离装置、煤气净化设备, 第二部分的主要设备有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。

IGCC 的工艺流程为: 煤(以水煤浆或干粉的形式)进入气化装置, 在气化装置中与气化介质(蒸汽、

整体煤气化联合循环中的“整体”有两个含义: ①在这个系统中, 气化炉所用的蒸汽和空气多数情况下都直接来自于系统内的汽轮机和燃气轮机。同时, 气化过程中产生的各种显热, 都在系统适当的工艺环节中充分地利用, 这样的系统是一个有机的整体; ②系统流程及系统内各处的参数都要从机组整体性能最优的角度仔细考虑和设计。

2 IGCC 发电技术的特点

IGCC 装置自 20 世纪 70 年代初期研发, 至今已有 30 多年了, 在整个技术的总体上已经取得了重大发展, 进行了商业示范运行, 取得了不少经验, 验证了其本身所具有的优势。除文献[2]中介绍的高效、环保等多种优点外, 还具有以下两点: ①能充分综合利用煤炭资源和煤化工结合成多联产系统, 便于与生产甲醇、醋酸、尿素等化工过程相结合, 使煤得以充分综合利用, 同时生产电、热、燃料气和化工产品, 有利于降低生产成本。②当天然气和石油枯竭时, 可用 IGCC 改造现有燃油气的联合循环。IGCC 也可用于对现有蒸气电站的增容改造, 便于实施电站的分阶段建设, 能有效的利用建设资金。

同其他技术一样, IGCC 也存在不足: ①由于某些技术尚未完全成熟, 致使其投资费用和发电成本较高, 单系列大机组的煤气化装置可用率尚存在问题, 尚不能强有力的与 FGD 的燃煤超临界机组竞争。②整体化要求高, 系统十分复杂, 在诸多的子系统中任何一个发生问题, 便会影响全局。

为此, 继续开发和改进现有 IGCC 的某些关键技术及其工作系统, 以求充分发挥 IGCC 装置的潜在优势, 确实是推动该技术走向商业化的当务之急。

3 IGCC 的主要设备分析

3.1 IGCC 的煤气化炉

气化炉及其系统是 IGCC 系统的关键部件, 它将煤炭、石油焦等转化为合成气。在气化炉中的反应是部分氧化反应, 投入气化炉中的气化剂只相当于完全燃烧所需量的 $1/5 \sim 1/3$, 生成的煤气主要成分是 CO 和 H_2 。对发电用途的气化炉, 主要要求是高的碳转化率和冷煤气效率、热煤气效率、大容量以及与发电设备运行的匹配性好等。在已经进行的试验和示范电站研究当中, 应用于 IGCC 电站的炉型有喷流床气化炉、流化床气化炉和固定床气化炉。

从目前的应用情况来看, 普遍看好的气化炉主要是以氧气为气化剂的喷流床气化炉, 其气化生产能力大, 生成的煤气热值较高, 适宜与发电工程相匹配。并且在已经进行的几个示范电站的运行过程中, 都表现出了较好的性能, 代表着发展趋势。

气化炉目前存在的不足: 一方面是可用率不高, 维护费用比较高; 另一方面, 采用纯氧作气化剂, 增加了整个系统的能耗和投资成本。采用低浓度的富氧做气化剂或者采用空气作气化剂的气化炉是一个发展方向, 但需要进一步研究和实践检验。研究和开发大容量的、能量转化率很高的煤的气化炉, 是最终实现 IGCC 发电方案的关键所在。

3.2 空分装置与空气侧系统整体化

为了供给气化炉所需的纯氧或高浓度富氧的气化剂, 需设置制氧空分设备及其系统, 空分设备主要包含 O_2 制备和 N_2 制备装置。在 IGCC 系统中, 通常需要制备高纯度的 O_2 (一般在 95% 以上) 作为气化剂; 对于干煤粉供料的气化装置, 还需要制备高纯度的 N_2 (纯度大于 99.9%) 用于煤粉的输送和飞灰再循环。制氧技术可以分成两大类: 低温制氧和常温制氧。低温制氧主要是基于深冷法制氧, 技术成熟可靠, 生产能力大, 所得氧气纯度高。目前对各种压力等级空分系统大多采用该方法分离空气以制取氧气。常温制氧方法现在还不具备大规模提供高纯度氧气的的能力。深冷的空分设备比较成熟, 但是投资比较高, 尤其是耗能太大。

目前正在研究使液 N_2 和液 O_2 先增压后气化的空分和基于离子转移膜技术的空分等低能耗、低投资的新型空分制氧技术, 将有效降低 IGCC 电站厂用电率, 提高净效率。

IGCC 中空分系统和燃气轮机系统组成的空气侧系统的整体综合优化对 IGCC 系统的热力性能、投资费用以及运行可靠性等都有很大影响。按照 IGCC 电站中制氧厂的高压空气来源, 空气侧整体化有独立空分、完全整体化和部分整体化三种一体化方式。相对于独立的空分系统而言, 完全整体化空分的 IGCC 具有显著的成本优势。此外, 整体化的 IGCC 能够减少空分的耗功, 从而电站的净出力会增加, 系统效率提高。但是由于完全整体化空分系统复杂, 可靠性会相对下降。另外整体化率过高, 导致电站启动较慢, 运行不灵活。而独立空分系统会使厂用电率增大, 但具有启动灵活、系统可靠等优点。部分整体化可兼顾两方面的优点。

目前 IGCC 电站较多倾向于采用部分整体化方式, 整体化率在 25%~50% 之间。空分系统同整个电站的整合, 以及如何降低空分系统造价, 降低空分系统能耗是需要进一步研究的问题。

3.3 IGCC 的净化系统

IGCC 的净化措施贯穿于整个系统中,包括燃料气化系统、粗煤气净化系统和燃气轮机联合循环系统等。其中,粗煤气净化系统是其核心部分。目前在 IGCC 中使用的粗煤气净化有常温湿法净化和高温干法净化。两者在工艺上都由除尘和脱硫两个环节组成,只是除尘和脱硫环节的技术细节不同。

现多采用常温湿法除尘脱硫工艺,常温湿法净化的优点是技术成熟,但在采用冷却方法利用煤气显热的过程中要产生一定的损失,影响到 IGCC 整体的效率。可采用显热回收系统,尽量减少粗煤气显热和潜热的损失。

高温净化粗煤气的显热利用较好,但还不成熟。高温除尘仍然是一个难题,因为在高温下,除了过滤,很难有效地除去煤气化中的细颗粒飞灰。目前已经开发出用陶瓷材料制成的各种过滤器,但是这些陶瓷过滤器普遍存在着设备庞大、使用寿命短、清灰困难的问题。高温脱硫也是一个障碍,有关的方法还都在研究之中。随着技术的不断发展,采用高温干法净化技术是提高系统效率的一个有效手段是发展 IGCC 的一项重要技术。

3.4 IGCC 的燃气轮机

IGCC 是以燃气轮机为主的联合循环,其热功转换利用的核心部件是燃气轮机,加入系统的全部或大部分热量先在高温区段借助燃气轮机实现高效热功转换,输出有效功,然后充分回收燃气轮机排热产生蒸汽,再在中、低温区段通过汽轮机实现热功转换、输出有效功。燃气轮机性能的提高是发展 IGCC 的前提。

目前,IGCC 中的燃气轮机多以现有的烧油气的燃气轮机为母型。但由于其所用燃料为中低热值的合成煤气,主要成分为 CO 、 H_2 ,并且含有较多的 N_2 、 CO_2 等惰性气体,不同于主要成分是 CH_4 ,所含杂质很少的天然气,这使得着火点、火焰传播速度以及燃烧产物的组成等燃烧特性发生变化。从而要求重新设计燃烧器,以保证点火迅速、燃烧稳定,燃烧效率高。燃料热值减小,在维持燃气透平的初温恒定不变的前提下,导致燃料的质量流率和容积流率增加,致使压气机有可能发生喘振现象。因此,需要对压气机和燃气透平等进行改造,以求使压气机与燃气透平的工质流量能够合理地匹配,并使压气机的工作点与喘振边界之间留有足够的喘振裕量。为此,可以单独修改压

气机的设计或燃气透平的设计,也可以同时改变压气机和燃气透平的运行条件,即改变压气机进口导叶的开启程度和燃气透平的进气温度。

3.5 IGCC 的汽轮机

IGCC 系统中蒸汽轮机多采用滑压方式运行和设计,采用全周进汽结构,不装调节级。启动完成后,蒸汽调节阀处于全开状态,一般不用它来调节负荷,汽轮机负荷将随燃气轮机负荷与燃料量变化而自动变化;当联合循环采用非再热循环时,汽轮机后几级蒸汽湿度会比常规火电站汽轮机者大,为此可借鉴核电站汽轮机除湿经验,在湿度大的区域设置排泄孔或疏水捕获栅;由于联合循环中一般不采用抽汽回热循环,汽轮机排汽流量与主蒸汽进口流量之比大大高于常规的汽轮机两流量之比,因此在相同功率等级时,其末级叶片就相对比较短;为了降低凝结水中溶解氧的含量,常规火电站多设置抽汽除氧器,联合循环则是在冷凝器或其附近设置除氧器增设凝结水再循环水系统或辅助蒸汽系统,利用 HRSG 热量或其它蒸汽热源来除氧,从而有效利用了燃气轮机排热。

由于 IGCC 中燃气轮机具有快速启停和变负荷能力,其汽轮机的设计也应适应这种变负荷的能力,同时还不影响其带基本负荷的性能。为了适应 IGCC 工作的需要,满足效率高、启动快的要求,必须继续探索其结构的设计问题。

3.6 IGCC 的余热锅炉

在 IGCC 中余热锅炉是回收燃气轮机的排气余热,借以产生推动蒸汽轮机发电所需蒸汽的换热设备,是整个联合循环系统中一个重要的有机组成部分,起承上启下的作用。其结构、性能以及参数都极大地影响到系统中其它设备乃至整个系统的性能。

目前,在 IGCC 中采用的余热锅炉与烧天然气或液体燃料的余热锅炉型联合循环中采用的余热锅炉基本类似,只是在 IGCC 中由于使用的合成煤气的发热量比较低,流经余热锅炉的燃气流量稍大,故可以多产生一些蒸汽。当然,在煤气的气化系统和除灰脱硫系统中还会附带产生一些饱和蒸汽,需要在余热锅炉中进一步过热,致使两者的换热面积之分配关系也会略有差异。

在今后先进联合循环的设计中,主蒸汽参数将逐步提高,以利用高效蒸汽循环的效率来抵偿不断增涨的燃料价格。但是压力越高,气包的筒壁就越厚,对于余热锅炉的高压锅筒来说,它将大(下转第 84 页)

过程中加强对该设备巡回检查,发现问题及时处理。

2) 一般情况下,当机组负荷在 300 MW 时,将其冷却水调整控制在 250~300 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 70~75 °C;当机组负荷在 200 MW 时,将其冷却水调整控制在 150~180 t/h,这样可以维持冷却水回水温度在 65~70 °C,在调整过程中应注意保证 6 号低加疏水温度应大于 7 号低加凝结水出水温度,这样既能满足负荷的需要,又能减少疏水管及凝结水管路的振动现象。

3) 在底灰冷却器、斗式提升机或刮板输灰机故障停运时,凝结水温度突然发生变化,很容易造成 6 号低压加热器的水位波动,如果不及时调整 8 号低压加热器的水位,会造成 8 号低压加热器水位过高而打开危急疏水,影响到整个低压加热器的稳定运行。因此,在发生以上故障时,应加强低压加热器的水位监视,及时修改 8 号低压加热器的水位设定值,使疏水畅通,故障消除后,恢复正常运行。

4) 在甩负荷或滑停时,应注意调整底冷器冷却水量,避免造成除氧器高水位事故的发生及除氧器水温急剧下降给机组带来不安全因素。

5) 对于灰控阀冷却水,因为灰控阀运行的环境温度很高(基本上是锅炉运行床温 890 °C 左右),其冷却水流量不能太小,否则,灰控阀得不到充分的冷却,

但又不能使其冷却水流量太大,否则,这部分的凝结水回水温度会很低。通过调整试验,维持灰控阀冷却水流量在 70 t/h 左右(阀门开度固定),回水温度尽管只能达到 43 °C,但能充分保证设备的安全,况且,其流量也较小,对凝结水温度影响不大,工况变化时,也不需要有很大的运行调整。

7 凝结水系统改造后的效果检验

凝结水系统改造后,通过一段时间的实际运行表明:系统改造既节约了另外设计安装底冷器冷却水系统的成本,降低了底灰的排放温度,降低了底灰系统各设备正常运行的环境温度,延长了设备的运行时间;同时因为回收了低灰的部分热量,降低了排渣热损失,提高了机组的经济性。另外冷却水温调整方便,消除了原设计带来的管路振动,提高了机组的安全性,给机组长期稳定运行创造了良好条件。

参考文献

- [1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 景朝辉. 热工理论及应用[M]. 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期:2007-11-01)

(上接第 77 页) 而笨重。如果在余热锅炉的高压部分采用直流锅炉的设计方案,那么就可以取消笨重的高压锅筒,使联合循环机组得以快速启动,并获得高效率。

4 结论

随着社会的进步,人们逐渐认识到能源的有限性和环境保护的重要性,研究和发展 IGCC 技术是基于建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要。IGCC 是 21 世纪火电动力发展的主要方向之一,也是中国开拓洁净煤发电新模式所需的高新技术。

IGCC 系统非常复杂,由于工作条件变化很大,构成部件与常规电力设备有很多不同,目前尚未完全成熟,还需要经历一个发展和完善的过程。前面对 IGCC 工作原理和特点做了简要介绍,对系统的主要设备进行分析,指出存在的一些问题,并提出改进方法和发展方向,从而为各构成部件做进一步的研究和

改进奠定基础。

参考文献

- [1] 段立强,徐钢,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, 12, 24(12).
- [2] 许世森. IGCC 与未来煤电[J]. 中国电力, 2005, 2, 38(2).
- [3] 董卫国. IGCC 发电和煤气化技术[J]. 电力设备, 2001, 3, 2(1).
- [4] 林汝谋,金红光,等. IGCC 中燃气轮机技术方案与设计优化[J]. 燃气轮机技术, 2001, 9, 14(3).
- [5] Robert Farmer. IGCC Power Generation Plants in Commercial stage of Development[J]. Gas Turbine World, 2004, 34(5).
- [6] 高健,倪维斗,等. IGCC 系统中空气气化炉与氧气气化炉的对比研究[J]. 燃气轮机技术, 2007, 6, 20(2).
- [7] 姚秀平. 燃气轮机及其联合循环发电[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [8] 迟全虎. IGCC 联合循环系统建模与设计优化研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004.

(收稿日期:2008-01-14)