

# IGCC 系统中合成气回热换热器的设计分析

Design and analysis of the syngas heat exchanger in IGCC system

祁宁  
QI Ning

(国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110034)

(National Power Plant Combustion Engineering Research Center, Shenyang 110034, China)

**摘要:**IGCC 系统中最主要的热回收装置之一是合成气回热换热器。由于经过了水洗等工艺,合成气回热换热器中的合成气不但具有一定的显热,而且其所含潜热量也是相当可观。对不同类型回热器、回热器的不同换热方式、回热器的不同布置方案的 IGCC 系统进行了分析和计算,根据能量梯级利用理论,采用专用的热平衡软件,综合考虑回热器对 IGCC 系统经济性、安全性、效率的影响,给出了全热回收方式 IGCC 系统中的合成气回热器的设计建议。

**关键词:**IGCC;合成气;回热换热器;能量梯级利用

**中图分类号:**TK 472+.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1674-1951(2008)04-0019-04

**Abstract:**Syngas heat exchanger was one of the most important waste heat recover equipments in IGCC system. The syngas in the heat recover exchanger after being scrubbed had a great deal of obvious heat and considerable latent heat. This paper analyzed IGCC systems with different types, different heat transfer modes and different layout schemes of heat recover exchangers, according to the theory of energy cascade utilization and using special heat equilibrium software, and considered the impact of exchanger on the economical efficiency, safety and heat efficiency of IGCC system, and gave reasonable design suggestions for whole heat recover exchanger in IGCC system.

**Key words:**IGCC; syngas; heat recover exchanger; energy cascade utilization

## 0 引言

整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术用于燃煤发电或结合多联产,具有效率高、环境友好等优势。IGCC 系统中,煤气化炉出口的粗合成气一般都具有较高的温度,因而有大量显热能需要回收以提高效率。最主要的热回收装置是位于气化炉出口的辐射式废热锅炉与其后的对流式废热锅炉。受高温净化技术发展的限制,在经过了水洗工艺后,此阶段的合成气不但具有一定的显热,而且其所含潜热量也相当可观,这些热量包括对流式废热锅炉出口到洗涤塔前合成气的显热、洗涤塔后到脱硫工艺前的合成气显热以及合成气中水蒸汽的潜热。回收这部分热量有相当大的技术难度。根据 IGCC 系统整体

性强的特点,需要设计一些特殊换热器对粗合成气的热量进行回收,用于回热合成气。

## 1 系统描述及合成气回热系统热源情况

IGCC 根据气化技术可分为水煤浆气化和干粉气化,2 个系统的组成区别很大,水煤浆气化的冷煤气效率约为 75%,而采用干粉气化的冷煤气效率约为 81%。主要原因是采用水煤浆气化组成的系统中,合成气中的水蒸汽含量要高于干粉气化组成的系统,因此,对于采用水煤浆气化的 IGCC 系统,合成气的热量回热系统就显得更加必要。由于在净化中的热量品位低、热量多,不适合用于发电,因此,将合成气中含有的热量在净化过程中取出用于加热净化后的合成气,使其达到燃机对合成气入口的温度要求,是合成气回热系统的主要目标。本文研究的系统是采用水煤浆气化为气化单元的系统,该系统

的主要流程如图 1 所示。

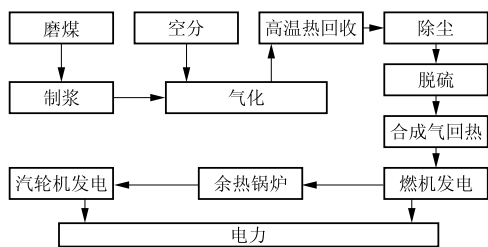


图 1 水煤浆气化系统流程图

系统采用水煤浆加压气流床气化工工艺,煤浆浓度约 60%,IGCC 系统的空分整体化率为 50%,空分的压缩机提供 50% 的空气量,其余 50% 的空气从燃机压气机中抽取。空分氮气回注到燃机中用以控制氮氧化物的排放。

根据国内合成气净化的技术发展水平,合成气采用常温湿法脱硫工艺是比较现实的<sup>[1]</sup>,因此,合成气从水洗工序出来后必须进行降温,按照常温湿法脱硫的工艺要求,合成气的温度一般要降低到 38℃ 以下,经过脱硫后的合成气要经过回热才能达到燃机入口的温度要求。根据系统中的实际情况并结合能量梯级利用的要求,系统中可用于合成气回热系统的热源有 3 种。

(1) 粗合成气。由于系统中对流式废热锅炉内部布置的是蒸发受热面,产生的是高压蒸汽,因此,从对流式废热锅炉出口排出的粗合成气具有较高的温度,可以作为合成气回热系统的热源。

(2) 经过水洗的粗合成气。系统采用的是水煤浆加压气流床气化工工艺,粗合成气中有大约 20% 的水蒸汽,水洗除尘后,合成气的温度降低到 170℃ ~ 180℃,部分洗水也蒸发进入到合成气中,而在脱硫前需要将合成气的温度降低到 38℃ 左右,以符合常温湿法脱硫工艺的要求。在降温的过程中将有合成气的显热和合成气中水蒸汽凝结的潜热需要被移出,同时燃气轮机入口的燃料气要求为 220℃ 以下,此处的热量可以用于作为合成气回热系统的热源。

(3) 燃机抽气及余热锅炉部分。燃机抽气是将燃气轮机压气机中的部分经过压缩的高压空气抽出以提供给空分系统作为原料气使用,燃机压气机末级高压空气的温度约为 380℃,当将这部分空气作为空分的原料气时,要经过降温。因此,这部分空气的显热也可以作为合成气回热系统的热源。在 IGCC 系统中,位于常规岛的余热锅炉用于回收燃机排气的热量,这部分热量根据需要可以作为合成气回热系统的热源。

## 2 回热换热器的布置方案及优化

根据热源的不同,回热换热器的布置方案有 3 种。

(1) 在水洗前设置粗合成气与净合成气换热的气/气换热器。

(2) 在水洗后设置粗合成气与净合成气换热的气换热器,经过换热的净合成气还要与燃机抽气的热空气进行换热,以提高热量的利用效率。

(3) 利用水洗后的合成气加热外部给水,然后将外部给水喷入脱硫后的低温净合成气中,提高合成气的温度,然后通过汽轮机冷凝水最终对净合成气进行过热,实现合成气的回热。

3 种方案的合成气换热系统如图 2、图 3、图 4 所示。

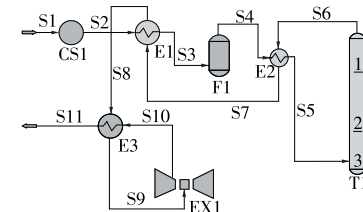


图 2 第 1 种方案合成气换热系统图

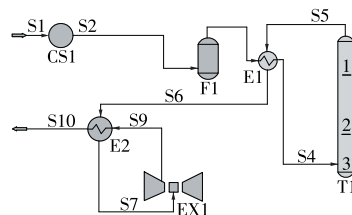


图 3 第 2 种方案合成气换热系统图

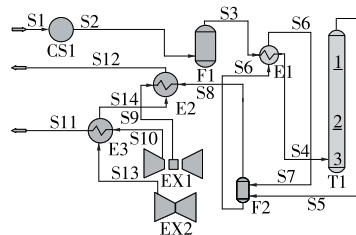


图 4 第 3 种方案合成气换热系统图

方案 1 和方案 2 的主要区别是方案 2 中取消了方案 1 中的粗合成气与净合成气的换热器。原因是粗合成气在经过水洗工艺前含有细灰,运行中易出现灰渣堵塞。美国 Tapma 电站的 IGCC 系统采用了方案 1 的设计,出现堵塞后的停炉清理过程中,沉积的灰渣吸收空气中的水分,对换热器的管子造成严重腐蚀。运行中曾多次出现管子泄漏造成粗合成气混入净合成气中而停炉,并导致燃气轮机损伤。

方案1的优点是系统的热量利用充分。粗合成气在水洗前的温度较高,换热器的运行温差比较大,能够将净合成气的温度提高到一个较高的水平,且设备的换热面积可以设计的较小,设备体积和造价较低。缺点是系统的安全性较低,可能对整个IGCC系统的稳定运行带来隐患。

方案2的优点是在水洗后的粗合成气中灰尘的含量较低,不易造成换热器的堵塞,设备的安全性较高。缺点是粗合成气经过水洗后温度较低,换热器的换热温差较小,设备需要较大的换热面积,设备体积和造价将明显提高;同时,由于经过水洗后的合成气中的热量大量以水蒸汽的潜热形式存在,因此,合成气回热换热器变成了冷凝器,设计比较复杂。

方案3中应用燃气湿化饱和器实现合成气的回热,优点是避免了净合成气被粗合成气污染,同时由于是直接的接触换热,换热效率要高于换热器。缺点是湿化塔的造价要高于换热器,其后部要设置合成气过热设备,用以防止由于燃气饱和而存在的合成气在燃气轮机阀站部位出现的结露问题。

在主要系统参数统一的情况下,IGCC系统总的供电效率顺序为:方案1 > 方案3 > 方案2。安全运行的评估结果是方案3 > 方案2 > 方案1。投资比较的结果是方案3 > 方案2 > 方案1。

在合成气回热系统的设计中,粗合成气与净合成气进行换热时,应有效地避免由于换热器泄漏造成的净合成气污染。可采用间接换热的设计方式,利用中间介质实现换热。这种设计由于增加了间接换热,系统总的换热效率将降低,设备投资将有所提高。设计方案1中采取间接换热的方式,位于对流式废热锅炉后的换热器存在泄漏,而此处的高温热源为未经过水洗的粗合成气,合成气中含有的细灰容易在换热器中沉积,对设备造成冲刷磨损,引起系统停机,将造成巨大损失;因此,根据国外IGCC的运行经验,方案1在不能解决泄漏问题的条件下,不能轻易采用。

根据以上分析,方案2和方案3是可行的。

### 3 回热换热器设计优化

#### 3.1 换热器结构选择

IGCC系统中合成气回热换热器的结构选择要参考化工系统的换热器设计技术,换热器按照传热特性分为间壁式、直接接触式和蓄热式3种类型。

间壁式按照结构分为列管式、夹套式、板式和套管式等;直接接触式分为冷却塔、再沸器等。

根据IGCC合成气回热系统的要求,合成气回热换热器的传热形式应该选择间壁式,方案3中的合成气湿化饱和器为直接接触式。常用间壁式换热器的应用条件见表1。

根据IGCC系统中合成气的操作条件一般超过3.0 MPa的特点,建议采用列管式换热器,具体采取哪种结构要根据使用的位置来确定。如果要使用板式等其他结构的换热器,设计中要充分考虑操作压力,应认真核算设备的强度。

#### 3.2 换热器设计优化

优化设计换热器设备的目的是提高其传热效率;简化结构,降低成本;延长设备使用寿命。实际设计中,这些目的不能同时达到,因此,对不同的设计优化应进行权衡,以决定最终采用的设计方案。

根据传热的基本公式  $Q = KF\Delta t$  可知,传热量  $Q$  的增加可以通过提高传热系数  $K$ 、扩展传热面积  $F$  和加大传热温差  $\Delta t$  来实现。

(1) 扩展传热面积以增加传热。这种方式的应用不是靠增大设备的体积或者增加设备台数来实现的,根据目前管壳式换热器的研究进展<sup>[3,4]</sup>,合理地提高单位设备体积的传热面积的有效方法有:采用螺旋槽管、波纹管、翅片管等。各种异形传热管设计的主要目的是提高换热面积,从改进传热面结构和布置等方面出发加大传热面积,以达到换热设备高效紧凑的目的。其中,采用翅片管的方法在工程中应用较多。采用各种不同结构的换热管,可以在不增加设备体积的情况下使设备的有效换热面积提高2~3倍。但是,在设计中要综合考虑使用异形换热

表1 常用间壁式换热器应用条件<sup>[2]</sup>

| 换热器结构 | 操作压力/MPa   | 标准               | 备注           |
|-------|------------|------------------|--------------|
| 固定管板式 | 0.25 ~ 6.4 | JB/T 4515 - 1992 | 换热介质温差小,结构简单 |
| 列管式   | 浮头式        | 1.0 ~ 6.4        | 便于清洗,结构复杂    |
|       | U型管式       | 1.0 ~ 6.4        | 不便于清洗,结构较简单  |
| 板式    | 板式         | < 2.5            | 结构紧凑         |
|       | 螺旋板式       | < 1.6            | 换热效果好,结构简单   |

管带来的不利影响,因为采用异形管时,换热器中的流场将会产生变化,设备的阻力、积灰结垢条件将会变化,有可能影响设备的正常运行。

(2) 提高传热系数也是增强传热的积极措施。传热过程的总热阻是各分项热阻的叠加,要改变传热系数就要分析传热过程的各项热阻。在换热设备中一般都采用金属薄壁的设计(金属壁的热阻很小,可以忽略不计)。为方便说明,可以先不考虑污垢热阻,传热的总传热系数可以写成

$$K = \left( \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^{-1} = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}, \quad (1)$$

式中,  $a_1, a_2$  分别为换热器管壁的内、外传热系数。

为了确定哪个对  $K$  值的影响比较大,以  $K$  值对它们分别求偏导,得到

$$K'_1 = \frac{a_2^2}{(a_1 + a_2)^2}, \quad (2)$$

$$K'_2 = \frac{a_1^2}{(a_1 + a_2)^2}. \quad (3)$$

式(2)和式(3)分别表示了传热系数随  $a_1$  和  $a_2$  的增长率,当  $a_1 > a_2$  时,假设  $a_1 = na_2 (n > 1)$ ,可以得到  $K'_2 = n^2 K'_1$ ,由此可以看出,提高  $a_2$  对增强传热的效果更加有效。

在 IGCC 合成气回热系统中,无论是冷却器还是加热器都是气相同液相的换热。一般气相的换热系数较低,同时由于扩展传热面积及加大传热温差要受到设备和工艺条件的限制,因此,对于 IGCC 合成气回热系统中的换热器的设计主要是优化气相侧的传热,提高气相的传热系数,具体的方法有 3 种。

1) 改变流体流动情况。通过提高流体的流动速度增加湍流程度,如在管壳式换热器壳层中加装各种隔板<sup>[5]</sup>等。还可以在管内或管外加装各种插入物以增加扰动,但要防止出现系统阻力增加明显、通道堵塞等问题。

2) 改变物流物性。这种方法不适合在 IGCC 合成气回热换热器中使用。

3) 改变换热表面情况。主要有增加表面粗糙度、改变换热面的形状和大小等方法。改变换热表面的粗糙度不仅有利于管内物流的换热,也有利于凝结换热。在 IGCC 合成气回热系统中的取热段由于存在水蒸汽的冷凝过程,因此,增加换热器合成气侧换热表面的粗糙度可以加强换热。

(3) 增大传热温差以增强传热的途径在应用中受到实际工艺和设备条件的限制。传热温差增大将使整个系统的不可逆性增加,降低热力系统的可用

能,因此,要兼顾整个热力系统能量的合理利用,将其安排在系统的优化里面考虑比较合适。

综合以上各种换热器增强传热措施,IGCC 合成气回热换热器的优化设计应该在满足工艺要求的条件下,使换热器的一个或者数个指标达到最佳。优化的步骤为:确定优化约束条件,如阻力、造价等→建立换热器各参数之间的关系式→联立各关系式进行求解,最后确定优化后的参数→验算。

换热器一般可以选取的可变设计参数是管长、管径、翅片高度、翅片数量、流动阻力、设备安装费用等。可变参数设定的越多,计算最优化条件的过程越复杂,计算的工作量也越大。目前,换热器本体的参数可以通过 CFD 软件进行模拟,回归后给出方程;造价等经济参数可以通过材料费用、加工费用进行核算给出其与设备结构方面参数的关联公式。

由于在合成气冷却段布置的换热器具有部分冷凝器的作用,设计中要对设备的腐蚀方面给予重视。

## 4 结束语

在以水煤浆气化为基础的 IGCC 发电系统的设计中,对于合成气回热系统的设计,建议利用经过除尘后的合成气的热量及燃机抽气的热量为合成气回热系统的取热热源。对于将水洗前的粗合成气作为热源的情况要慎重。

合成气回热换热器的具体设备的优化,可以采用翅片管的设计,可对传热管表面进行粗糙化处理,对合成气侧进行模拟计算,分析各种提高传热系数的手段。设计优化中要考虑工程的具体工艺和物料的组成情况,对于具有凝结水的位置的腐蚀问题应给予重视。最后,要将经济因素引入到设计中,选择经济性最优的设计。

## 参考文献:

- [1] 许世森,李春虎,郜时. 煤气净化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 中国石化集团上海工程有限公司. 化工工艺设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [3] 洪蒙纳,邓先和. 管壳式换热器管程强化传热研究进展[J]. 广东化工,2005,32(3):41,42.
- [4] 崔海亭,姚仲鹏. 螺旋槽纹管研究及应用[J]. 石油化工设备,2001,30(2):34-36.
- [5] 陈姝,高学农,徐妮,等. 管壳式换热器新型管支撑结构在传热强化方面的进展[J]. 广东化工,2006,33(6):18-22.

(编辑:刘芳)

## 作者简介:

祁宁(1972-),男,河北献县人,国家电站燃烧工程技术研究中心高级工程师,从事电力环保研究方面的工作。