

燃煤气的闭式 STIG 循环的热力学分析*

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院) 陈安斌 王永青 尚德敏 严家骥

[摘要] 本文将煤气化技术用于闭式注蒸汽燃气轮机循环,对以煤气化产物为燃料的闭式注蒸汽循环进行了热力学分析,并与燃煤气的开式 STIG 循环做了比较,同时分析了回收水量的影响因素。

关键词 煤气化 水回收 STIG 循环

中图分类号 TK479.12

1 前言

注蒸汽燃气轮机 (STIG) 循环以其优越的性能一直倍受国内外研究者的青睐。然而, STIG 循环也存在着耗水量大、对回流的蒸汽水质要求高的不足^[1]。如果采用闭式循环,即用水回收装置将排气中的水蒸气回收,经过水处理后再供循环利用,就可以解决水耗、水质的问题。另外,现有 STIG 循环所用的燃料基本是石油或天然气,它们的储量将日益枯竭,因而燃煤 STIG 循环更具发展潜力。我国是产煤大国,电力工业耗煤量巨大,而大多数电站采用的是传统的火力发电,不仅效率低,而且对环境污染严重。所以在我国积极开发先进的清洁燃煤发电技术迫在眉睫。如果把先进的燃煤技术与闭式 STIG 循环结合起来,那么这种循环将不仅具有 STIG 循环的优越性能,而且可以充分利用我国储量相对丰富的煤炭资源,同时避免了水耗,使之成为新型的高效、低污染的动力循环。

目前世界上正研制和开发比较先进的燃煤发电技术是整体煤气化联合循环和增压流化床联合循环^[2]。本文将整体煤气化联合循环中的先进燃煤技术与注蒸汽循环以及水回收系统结合起来,对循环进行了热力学分析,就各参数对循环性能及回收水量的影响进行了探讨。

2 循环过程简介

整个循环系统如图 1 所示。煤在气化炉中形成粗煤气,经过热交换器,降温放热以加热给水产生回注用蒸汽,再经过脱硫、除尘变为洁净煤气,作为循环所用的燃料进入燃烧室。在燃烧室中煤气与空气燃烧后与注入的蒸汽混合,达到燃气轮机入口温度,再在涡轮中膨胀做功。余热锅炉一般不需要补燃,利用燃气轮机排气来加热处理过的水,使之变为过热蒸汽,注入燃烧室。从余热锅炉出来的排气再经过给水加热器和冷却冷凝器,将排气中的水蒸气冷却冷凝,回收的水经过水处理后经给水加热器加热供注蒸汽用。因此,这种循环是煤气化产物为燃料的闭式注蒸汽燃气轮机循环,简称 IGCSTIG (Integrated Gasification Closed Steam Injected Gas Turbine Cycle)。

3 循环分析

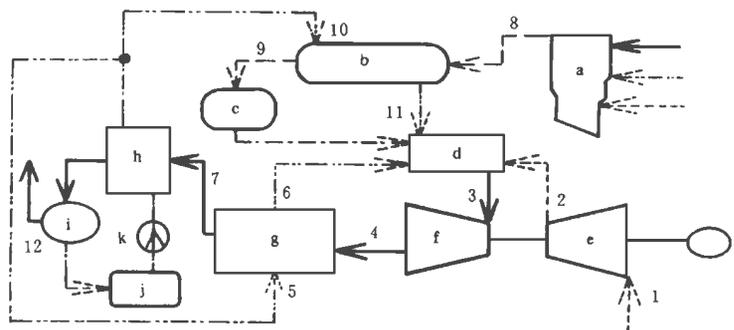


图 1 煤气化产物为燃料的闭式注蒸汽燃气轮机循环系统图

a. 气化炉 b. 热交换器 c. 煤气净化装置 d. 燃烧室 e. 压气机 f. 燃气透平
g. 余热锅炉 h. 给水加热器 i. 冷却冷凝器 j. 水处理系统 k. 水泵
— 水、水蒸气 — 空气 — 燃气
- - - 洁净煤气 - - - 粗煤气 — 煤

* 国家教委博士点基金资助项目

收稿日期 1997-09-04 收修稿 1997-10-04

煤炭的气化是在气化炉中进行的。一般情况下，经过除尘和脱硫的洁净煤气（循环所用燃料）成份有以下几种： H_2 、 CO 、 CO_2 、 N_2 、 Ar 、 CH_4 、 H_2O ；设各种成份相应的摩尔百分比为： m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_6 、 m_7 。

当燃料系数为 U 时，燃料中可燃成份的完全燃烧反应方程式如下：

$$m_1 U H_2 + \frac{m_1}{2} (O_2 + x N'_2) = m_1 U (H_2O + x N'_2) + \frac{m_1(1-U)}{2} (O_2 + x N'_2) \quad (1)$$

$$m_2 U CO + \frac{m_2}{2} (O_2 + x N'_2) = m_2 U (CO_2 + x N'_2) + \frac{m_2(1-U)}{2} (O_2 + x N'_2) \quad (2)$$

$$m_6 U C H_4 + 2m_6 (O_2 + x N'_2) = m_6 U (CO_2 + 2H_2O + 2x N'_2) + 2m_6(1-U)(O_2 + x N'_2) \quad (3)$$

上述三个反应中，总空气量为 $(m_1 + m_2 + 4m_6)(1+x)/2$ (kmol)，设由煤气化系统和余热锅炉产生的回注蒸汽与压气机进口空气的质量比分别为 X_{b1} 、 X_{b2} ，则注蒸汽总量为：

$$Y = \frac{M_a}{M_w} (X_{b1} + X_{b2}) \left(\frac{m_1}{2} + \frac{m_2}{2} + 2m_6 \right) (1+x) \text{ kmol} \quad (4)$$

式中 x 为大气中氮氧摩尔成份之比， $x = 3.7738$ ，

循环热效率： $Z = \frac{(w_t - w_c)}{Q}$

$$= \frac{(h_{g3} - h_{g4}) \left[\frac{(1+x)}{2} q + U_p + \left[\frac{(1+x)}{2} q \frac{M_a}{M_w} (X_{b1} + X_{b2}) \right] - (h_{a2} - h_{a1}) \frac{(1+x)}{2} q}{Q_l U_k / h}$$

$$= Z(f, X, X_{b1}, X_{b2}) \quad (10)$$

式中角标 a 、 g 分别表示空气和湿燃气（蒸汽燃气混合物）； Q_l 为煤的低位发热量； k 为气化炉每产生 1 kmol 粗煤气所耗煤的质量 (kg)； h 为煤气除尘脱硫后与除尘脱硫前的摩尔数之比； X 、 f 分别为系统的压比和温比。

循环输入参数：气化炉选择为 PRENFLO 气化炉^[3]，气化炉出口温度为 1473.15 K；煤气净化装置的进、出口温度分别为 473.15、413.15 K；煤种选择 Ensendorf 煤（德国）^[3]， $Q_l = 31150$ kJ/kg， $k = 10.35$ ， $h = 0.98$ ；清洁煤气的摩尔比 $m_1 \sim m_7$ 分别取 0.28、0.655、0.012、0.037、0.00045、0、0.015；压气机进口空气温度 20℃；压气机绝热效率和透平相对内效率均为 0.9；燃烧室和余热锅炉的压力损失系数分别为 0.03、0.02；取燃烧室效率为 0.98；冷却冷凝器和给水加热器总的压力损失系数为 0.03。

M_a 、 M_w 分别为空气和水蒸气的分子量

因此，进入透平做功的湿燃气总摩尔数：

$$x_p = \frac{(1+x)}{2} q + U_p + \frac{(1+x)}{2} q \frac{M_a}{M_w} (X_{b1} + X_{b2}) \quad (5)$$

式中 $p = \frac{m_1}{2} + \frac{m_2}{2} + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7$ ；
 $q = m_1 + m_2 + 4m_6$

下面以 U (kmol) 燃料（洁净煤气）为基准，计算 IGCSTIG 循环的比功和热效率，计算时所需的焓值参见文献 [4]。

压气机耗功： $w_c = (h_{a2} - h_{a1}) \frac{(1+x)}{2} q$ (6)

透平做功： $w_t = (h_{g3} - h_{g4}) \left[\frac{(1+x)}{2} q + U_p + \frac{(1+x)}{2} q \frac{M_a}{M_w} (X_{b1} + X_{b2}) \right]$ (7)

循环比功： $w = (w_t - w_c) / \left[\frac{(1+x)}{2} q M_a \right] = (h_{g3} - h_{g4}) \left[\frac{1}{M_a} + U_p / \left[\frac{(1+x)}{2} q M_a \right] + \frac{1}{M_w} \times (X_{b1} + X_{b2}) \right] - \frac{(h_{a2} - h_{a1})}{M_a} = W(f, X, X_{b1}, X_{b2})$ (8)

循环所需煤的热量： $Q = Q_l U_k / h$ (9)

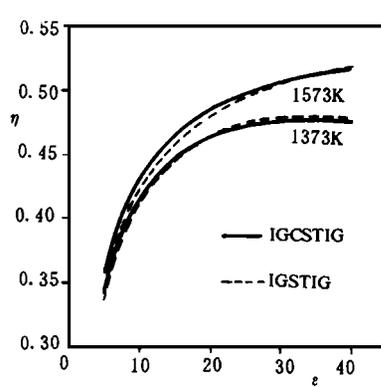


图 2 循环压比、燃气初温与热效率的关系

余热锅炉和煤气化装置的热交换器 b 的热端温差 Δt_{4-6} 、 Δt_{8-11} 越小，系统对余热的回收越充分，系统的热效率也越高。在下面的计算中， Δt_{4-6} 、 Δt_{8-11} 均取计算条件中所规定的气-气换热器温差最低值 20℃。

图 2 图 3 分别为其它参数优化条件下，

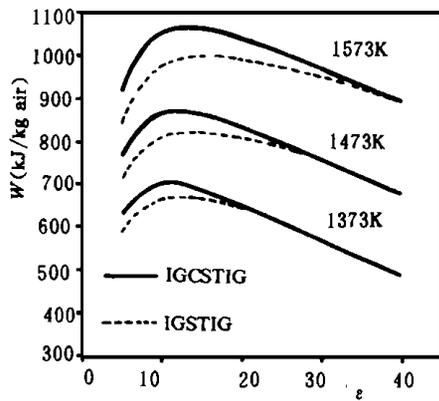


图 3 循环压比、燃气初温与比功的关系

IGCSTIG 循环与燃煤开式 STIG 循环 (IGSTIG) 的压比和初温与循环热效率及比功的关系

与其它燃气轮机循环相同,压比和温比是影响 IGCSTIG

性能的主要参数。由图 2 可以看出,压比一定时,热效率随初温的提高而提高;当初温为 1300℃,压比在 20~40 范围内,循环的热效率可达 48.5%~51.7%,而相同条件下,IGSTIG 循环的效率为 48%~51.9%,总体上讲二者热效率相差不多,当压比小于 30 时,闭式循环的热效率稍高于开式循环的热效率;当压比大于 30 时,闭式循环则稍低于开式循环,这是因为在高压比时,由于水的气化温度较高,使余热锅炉节点处温差减小,因而首先达到节点温差限制,而没有达到排气温度限制,但闭式循环由于给水加热器和冷却冷凝器的存在,使排气的压力损失系数增加,所以效率较开式循环略有降低;而当压比较低时,首先达到排气温度限制,闭式循环由于给水加热器的存在,使排气的部分余热得以有效回收,从而使注蒸汽量增加,效率较开式循环有所提高。当余热回收使效率增加与排气阻力使效率降低相等时,开闭式循环效率曲线出现重合点(图 2 中初温为 1300℃ 时,二者的热效率在压比为 30 附近重合)。

由图 3 可以看出,随着压比的增加,IGCSTIG 循环与 IGSTIG 循环的比功均先升高后逐渐降低,且前者的比功大于后者,随着压比增大,二者的差值逐步缩小,在较高压比时曲线几乎重合。这是因为压比较低时,由于排气余热得以有效回收,闭式循环的注蒸汽量比开式循环明显增多,所以比功较大,随着压比增加,虽然由于给水加热器和冷却冷凝器的存在使排气压力损失增加,但压力损失所占循环最高压力的比例越来越小,因而二者比功值也愈益接近。

下面分析回收水量的影响因素

燃料(洁净煤气)燃烧会产生水蒸气,且燃料中也含有水蒸气,当这部分水蒸气占排气的分压力与

冷却冷凝器出口处水蒸气所对应的饱和蒸气压相等时,即可实现回注水 100% 的回收。

当燃料系数为 U 时,从余热锅炉排出的湿燃气的总摩尔数 x_p 如式 (5) 所示。其中回注蒸汽的摩尔数为 Y (kmol), 见式 (4); 燃烧生成的水蒸气的摩尔数为 $(m_1 + 2m_6)U$ (kmol); 燃料中含有水蒸气的摩尔数为 m_7 (kmol)。

当温度为 T 时,对应的水蒸气的饱和蒸气压 $P_s = f(T)$,

设冷却冷凝器出口处排气中的水蒸气摩尔数为 x_s , 回收水的摩尔数为 x_r , 当外界大气压为 p_1 时,则有:

$$\frac{p_s}{p_1} = \frac{x_s}{x_p - x_r}$$

$$\text{即 } x_s = \frac{p_s(x_p - x_r)}{p_1} = \frac{f(T)(x_p - x_r)}{p_1} \quad (12)$$

$$\text{而 } x_r = Y + (m_1 + 2m_6)U + m_7 - x_s \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13), 解得:

$$x_r = \frac{p_1[Y + (m_1 + 2m_6)U + m_7] - f(T)x_p}{p_1 - f(T)} \quad (14)$$

设水回收率(即回收水量与回注水量之比)为 a , 则

$$a = \frac{x_r}{Y} = \frac{p_1[Y + (m_1 + 2m_6)U + m_7] - f(T)x_p}{Y[p_1 - f(T)]} \quad (15)$$

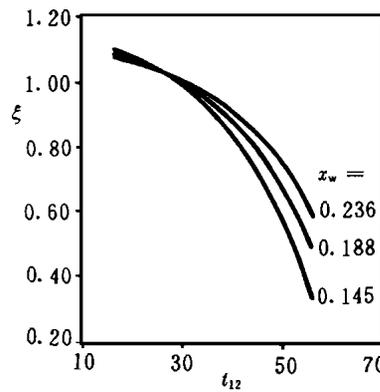


图 4 a 与 t_{12} 、 X_w 的关系

图 4 表示 $X_w = 30$, 初温为 1473 K 时, a 与冷却冷凝器出口温度 t_{12} 及注蒸汽比 $X_w (X_{b1} + X_{b2})$ 的关系

从图中可以看出,随着回注蒸汽量的增加,水回收的效果越显著,水回收率

越高。冷却冷凝器的出口温度 t_{12} 对回收水量的影响也很大,排气的温度越低,水回收率越高,在较低的出口温度下,注蒸汽比对水回收率的影响减小。当注蒸汽比分别为 0.145、0.188、0.236, t_{12} 分别为 29.02、29.92、30.88℃ 时,即可实现回注水的全部回收。而当 t_{12} 小于 29℃ 时,甚至有多于注蒸汽量的水冷凝下来,以致于水回收率 a 大于 1 (下转 266 页)

和受热面的接触更新状态有关,还与灰渣粒子的物理特性(如导热系数、粒径等)有关。根据现有试验数据及理论分析,可以得出如下结论:

(1)灰渣粒径越小,灰渣自身热阻越小,传热系数越高;

(2)螺旋轴转速越高,灰渣与受热面的接触更新越快,传热系数越高;

(3)水冷绞龙的结构,特别是螺旋叶片结构对灰渣的运动状态影响很大,即对换热效果影响较大,因此,必须对其进行结构优化,以获得较高的传热系数。

4 结论

(1)在 10 t/h 和 75 t/h 流化床锅炉上的试验及运行中,水冷绞龙运行正常,调节灵活,灰渣冷却效果好,可将高温炉渣从 900~950℃ 冷却到 120~150℃。

(2)冷却水系统的密封性能良好。在运行及试验期间,冷却水未发生泄漏事故,经受住了实际运行的考验。

(3)水冷绞龙结构、系统热膨胀,特别是螺旋叶片与其轴的热膨胀设计合理。螺旋叶片轴采用了独特的双层浮动衬板结构,有效地补偿了空心叶片与

管轴之间的膨胀,未发生因热膨胀问题而导致的绞龙扭曲、卡死以及焊缝撕裂等故障。

(4)水冷绞龙传热效果好,绞龙传热系数为 48.3~58.7 W/(m²·°C)。其换热过程主要发生在螺旋叶片上。在一定条件下,水冷绞龙的传热系数还可以提高。

(5)对不同的冷却渣量及冷却终温要求,设计时采用不同型号的水冷绞龙,运行中适当调整绞龙转速和冷却水流量,可以达到满意的效果。

综上所述,双轴水冷绞龙具有换热效果好,运行调节灵活,安装使用方便,便于灰渣的输送和综合利用,可减少灰渣的灰污染,热污染,改善运行条件等优点,非常适用于各种容量的流化床锅炉作为灰渣冷却装置,具有广阔的应用前景。

参考文献

- 1 刘焕彩.流化床锅炉原理与设计.武汉:华中理工大学出版社,1988
- 2 刘德昌,陈汉平等.流化床锅炉冷渣器概述.工业锅炉,1993,(1)
- 3 洪致育,林良民.连续运输机.北京:机械工业出版社,1982,12
- 4 Hanping Chen, Jidong Lu, et al. Test research of bed ash coolers for a 50 MWe CFB boiler. 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ASME, May, 1995

(上接 256页)

4 结论

本文将煤气化技术与闭式注蒸汽燃气轮机循环结合起来,构造了以煤气化产物为燃料的闭式注蒸汽燃气轮机循环(IGCSTIG),并对该循环进行了热力学分析,结果表明,IGCSTIG循环虽然增加了水回收装置,因而增大了排气阻力,但由于给水加热器的存在使低温排气余热得以有效回收,因而循环性能较燃煤开式 STIG 循环在较低压比时不仅没有下降反而稍有提高,在较高压比时二者性能则相差不多。利用冷却冷凝器使回注的水蒸气全部或大部分回收,解决了 STIG 循环水耗严重的问题。因此 IGCSTIG 循环是很有发展前途的燃煤发电循环。

参考文献

- 1 Nguyen HB, Otter A den. Development of gas turbine steam injection water recovery (SIWR) system. ASME Journal of Engineering For Gas Turbines and Power, 1994, 116: 68~74
- 2 U. S. Department of Energy. Environmental Characteristics of Clean Coal Technologies, 1992
- 3 焦树建.烧煤的燃气-蒸汽联合循环装置.清华大学出版社,1994
- 4 陈安斌,王永青,尚德敏,严家骥.煤气化产物为燃料的燃气热力性质研究.中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议,1996

作者简介 陈安斌 男 1969年生,现为哈尔滨工业大学热工教研室讲师,在职博士生。主要从事热力循环的研究。

通讯地址:150001 哈工大 513信箱 电话 6413230

面向对象的燃气轮机仿真建模 = **Target-oriented Gas Turbine Simulation and Model Establishment** [刊, 中] / Xie Zhiwu, Chen Delai, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 243~ 246

To give full play to the pivotal role of simulation technology in the whole-life cycle of a gas turbine, it is essential to employ a target-oriented method in the course of turbine simulation and model establishment. Following a review and summing-up of the experiences and lessons in the process mode and process mode modularized gas turbine simulation practice, this paper expounds the necessity of using the target-oriented method in this area and comments on the recent progress in the study of target-oriented gas turbine model establishment with three promising development tendencies being pinpointed. Key words: gas turbine, simulation, model establishment, target-oriented method

燃用褐煤气化燃料的燃气轮机电站 = (Vresova Czech Republic) = **Brown Coal Gasified Fuel-fired Gas Turbine Power Station (Vresova Czech Republic)** [刊, 中] / M. Moliere, P. Carros, E. Deramond (European Gas Turbines S A, GEC Alsthom) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 247~ 253

A comprehensive description is given of the present condition of two model 9E gas turbines installed in an existing brown coal gasification plant in Vresova of Czech Republic with emphasis on such aspects as optimized utilization of energy sources, fuel adaptability, environmental protection and favorable social impact, etc. Key words: integrated coal gas-based combined cycle, gas turbine, combined cycle, gasification of coal

燃煤气的闭式 STIG 循环的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of Coal Gas-fired Closed STIG Cycle** [刊, 中] / Chen Anbin, Wang Yongqing, Shang Demin, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 254~ 256, 266

With coal gasification technology being used for a closed cycle steam injected gas turbine a thermodynamic analysis is performed of a coal gasification product-fired closed STIG cycle, which is compared with a coal gas-fired open STIG cycle. In addition, analyzed are also water recovery influencing factors. Key words: coal gasification, water recovery, STIG cycle

注蒸汽燃气轮机最佳注汽量的研究 = **A Study of Optimum Steam Injection Rate for a Steam Injected Gas Turbine** [刊, 中] / Hu Zongjun, Wu Minglan (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 257~ 260

First, a thermodynamic analysis from the viewpoint of components heat balance is conducted of a steam injected gas turbine (STIG) with a corresponding thermodynamic process calculation model being set up. Within a wide range of pressure ratio $\pi = 8 \sim 48$ and turbine inlet temperature $TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$ a performance simulation has been carried out for the STIG. An in-depth and comprehensive study is conducted of the correlation of an optimum steam injection rate and gas turbine performance. Key words: gas turbine, steam injection, optimum steam injection rate, STIG technology

锅炉全炉膛火焰数字图象处理与监测系统开发与研究 = **Development and Study of a Boiler Furnace Flame Digital Image Processing and Monitoring System** [刊, 中] / Zou Yu, Lu Zhenzhong, Wang Shimin (South-eastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 261~ 263

In view of the inability to attain a design target in home-made thermal power plant boiler safety protection system with the current furnace safety safeguard system (FSSS) mainly based on the logic discrimination of contact signal magnitudes the authors have come up with a scheme featuring the introduction of an analog quantity into the FSSS. On this basis developed is a new generation of flame detection system based on digital image processing, which is capable of describing furnace flame combustion situation through an analog quantity mode. A detailed analysis has been given of the system scheme design, system configuration and industrial testing. Key words: boiler, furnace, protection, flame detection, image processing, digital treatment, compression