

# 燃气轮机化学回热循环仿真研究

谭智勇, 刘顺隆, 郑洪涛

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001, tan\_zhy@163.com)

**摘要:** 为系统研究燃气轮机化学回热循环的性能, 在循环过程热力学分析的基础上, 建立了燃气轮机化学回热循环数学模型, 并针对某型三轴燃气轮机利用 MATLAB/Simulink 软件进行了仿真计算, 得出了燃气轮机化学回热循环变工况性能. 结果表明: 燃料发生蒸汽转化反应提高了其热值, 装置循环效率相对提高量可达 32% 以上; 在装置输出功率不变的情况下, 涡轮进口温度下降明显, 可以大幅度提高燃机寿命, 且排气温度大幅度降低; 在保证燃机结构几何尺寸不变的条件下, 该循环的共同工作线将向着远离压气机喘振边界移动, 对于提高压气机喘振裕度是有利的.

**关键词:** 化学回热循环; 燃气轮机; 仿真研究; 性能分析

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0148-04

## Simulation research of chemically recuperated gas turbine

TAN Zhi-yong, LIU shun-long, ZHENG hong-tao

(School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, tan\_zhy@163.com)

**Abstract:** To study the performance of chemically recuperated gas turbine (CRGT) system, based on the thermodynamic analysis, the mathematical model of a three-axis CRGT system was established with the use of MATLAB/Simulink software. Simulation results show that the steam reforming reaction in the fuel occurs and increases the calorific value, which can increase the relative efficiency of devices by more than 32%. Under the constant output power, the inlet temperature of the turbine drops obviously, which can prolong the service life of the gas turbine system and cut down the exhaust temperature substantially. With the same geometrical structure of the turbine, the engine operating line can work far away from the stall margin, which is beneficial to the improvement of compressor surge margin.

**Key words:** chemical recuperation; gas turbine; simulation; performance analysis

化学回热循环比普通回热循环具有更高的循环热效率, 且其回热深度不受压气机压比的限制<sup>[1-3]</sup>. 文献研究结果表明, 该循环的热效率可以达到 50% 以上, NO<sub>x</sub> 排放量降到  $1 \times 10^{-6}$  g/m<sup>3</sup> 以下<sup>[4-5]</sup>. 但这些研究主要集中在循环总体热力学性能方面, 没有给出较完整的数学模型和循环的变工况性能.

本文在循环热力学分析的基础上, 给出较完整的数学模型, 并针对某型三轴燃气轮机利用 MATLAB/Simulink 软件进行了仿真计算, 得出了

燃气轮机化学回热循环初步变工况性能.

### 1 化学回热循环的热力过程分析

从热力学的角度看, 化学回热循环在注蒸汽循环(STIG)的基础上增加了化学回热器, 以提高燃料的热值和特性<sup>[5-6]</sup>. 图 1 给出了化学回热循环的温-熵图. 化学回热循环包含了以下几个过程: (1) 燃气轮机的“Brayton 循环”过程, 即  $1_a - 2_a - 3_g - 4_g - 1_a$  过程. (2) 蒸汽轮机的“Rankine 循环”过程, 即  $8_w - 11_s - 13_s - 3_s - 4_s - 8_s$  过程. (3) 化学回热过程. 燃气在  $4_g - 5_g$  过程中的放热量和蒸汽在  $4_s - 5_s$  过程中的放热量, 该热量在化学回热器中被燃料和水蒸汽吸收发生蒸汽转化反应提高燃料热值. 其中,  $2_a - 2_a'$  过程包含的面积代表

收稿日期: 2008-05-19.

基金项目: 国防动力基础科研计划资助项目(GTDP-0716).

作者简介: 谭智勇(1973—), 男, 副教授, 博士;

刘顺隆(1939—), 男, 教授, 博士生导师.

的热量等于化学回热器产生裂解燃料的热值提高部分,对于常规回热循环,回热度受到  $T_{4g}$  的限制,而化学回热度则不受该温度值的限制。(4) 蒸汽产生过程。补水经过预热器和饱和器吸收燃气低端余热,温度达到补水压力下的准饱和温度;饱和水在闪蒸器中发生闪蒸产生饱和蒸汽。为了保证蒸汽能够注入燃烧室,必须确保蒸汽压力为燃烧室压力的 1.1 ~ 1.3 倍。

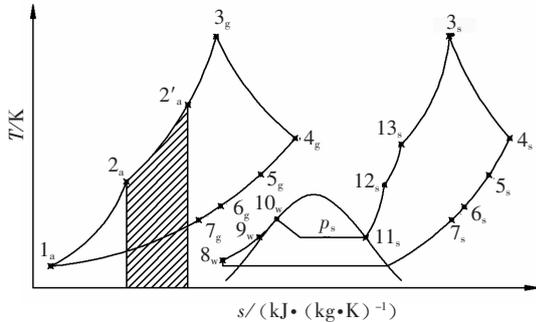


图1 化学回热循环温熵图

## 2 化学回热循环数学模型

燃气轮机化学回热循环主要包括燃气轮机本体、化学回热器和蒸汽发生器 3 个分系统,其中:燃机本体包括压气机、燃烧室和涡轮 3 个主要部件;蒸汽发生器包括水饱和器、蒸汽过热器和闪蒸器等部件<sup>[7-10]</sup>。

### 2.1 化学回热循环中燃气轮机数学模型

#### 2.1.1 压气机模块

在燃气轮机性能计算中,压气机和涡轮的特性通常都是以特性曲线的形式给出,以压比和折合转速为自变量,压气机的流量和效率的函数表达式为

$$\pi_c = f(\bar{G}_{c_1}, \bar{n}_c), \quad \eta_c = f(\bar{G}_{c_1}, \bar{n}_c).$$

质量守恒方程为

$$G_{c_1} = G_{c_2};$$

能量守恒方程为

$$G_{c_1} h_{c_1} - G_{c_2} h_{c_2} + N_c = 0.$$

式中:  $G_{c_1}, G_{c_2}$  分别为压气机进出口空气流量,  $h_{c_1}, h_{c_2}$  分别为压气机进出口空气焓值,  $N_c$  为压气机消耗的功率。

本文采用神经网络法拟合压气机和涡轮的特性曲线,并根据循环工质的变比热关系,求出部件进、出口的流量  $G_{c_1}, G_{c_2}$ , 出口的温度  $T_{c_2}$  及功率  $N_c$ 。

#### 2.1.2 涡轮模块

涡轮的相关计算表达式为

$$\pi_T = f(\bar{G}_{T1}, \bar{n}_T),$$

$$\eta_T = f(\bar{G}_{T1}, \bar{n}_T),$$

$$G_{T1} = G_{T2},$$

$$G_{T1} h_{T1} - G_{T2} h_{T2} - N_T = 0,$$

式中:  $G_{T1}, G_{T2}$  分别为涡轮进出口空气流量,  $h_{T1}, h_{T2}$  分别为涡轮进出口空气焓值,  $N_T$  为涡轮产生的功率。

#### 2.1.3 燃烧室模块

假定燃烧室内部近似为均匀场,忽略容积内流体同外界的传热,并且近似认为容积内部的压力、温度相等,燃烧室中遵守质量守恒和能量守恒。

质量守恒方程

$$G_{cc_1} + G_f + G_s - G_{cc_2} = 0,$$

式中:  $G_{cc_1}, G_{cc_2}$  分别为燃烧室进出口流量;  $G_f$  为燃料消耗量;  $G_s$  为注入燃烧室的过量蒸汽量。

能量守恒方程:

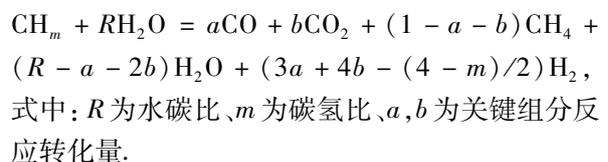
$$G_{cc_1} h_{cc_1} + G_f h_f + G_f (H_u + \Delta H_r) \eta + G_s h_s - G_{cc_2} h_{cc_2} = 0,$$

式中:  $h_{cc_1}, h_{cc_2}, h_f, h_s$  分别为燃烧室进口空气焓值、燃烧室出口燃气焓值、燃料显焓、注入燃烧室的过量蒸汽量的焓值,  $H_u, \Delta H_r$  分别为燃料的燃烧热值、燃料蒸汽转化反应后热值的增加值,  $\eta$  为燃烧效率。

### 2.2 化学回热器数学模型

燃料在化学回热器与蒸汽发生蒸汽转化反应,提高了燃料的热值。该反应过程为强吸热反应,热量来源为燃气轮机排气余热。反应过程热和产物组分由反应总方程式决定。本文中化学回热器数学模型按照以下原则建立:以化学反应计量通式代替质量平衡方程,以反应过程热代替能量平衡方程,不计对外的热量耗散。

蒸汽转化反应化学计量通式:



能量平衡方程:

$$\Delta H_r = \sum_i v_i \Delta H_{fR} - \sum_i v_i \Delta H_{fP},$$

式中:  $\Delta H_{f_i}$  为组分  $i$  的生成焓;  $R, P$  分别指原料和产物;  $v_i$  为各组分的化学计量数。

由于化学计量通式由关键反应的平衡常数所决定,因此必须补充平衡常数计算式:

$$K_1 = \frac{P^2 y_{\text{H}_2}^3 y_{\text{CO}}}{y_{\text{CH}_4} y_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{P^2 n_{\text{H}_2}^3 n_{\text{CO}}}{n_{\text{CH}_4} n_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad K_2 = \frac{y_{\text{CO}_2} y_{\text{H}_2}}{y_{\text{CO}} y_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}}{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

### 2.3 蒸汽发生系统数学模型

高压闪蒸系统主要由蒸汽过热器、水饱和器、一级闪蒸器、二级闪蒸器、给水预热器等组成。

#### 2.3.1 闪蒸器模块

闪蒸过程具有两相流特征,其入口流体为经

饱和器加热后的高压饱和水,出口为对应闪蒸压力下的饱和蒸汽和浓缩水。

质量守恒方程为

$$G_{b(j-1)} - G_{bj} - G_{sj} = 0 .$$

式中:  $G_{b(j-1)}$ 、 $G_{bj}$ 、 $G_{sj}$  分别为第  $j$  级闪蒸器进口饱和水流量、出口的浓缩水流量、出口饱和水蒸汽流量。

能量守恒方程为

$$G_{b(j-1)}h_{b(j-1)} - G_{bj}h_{bj} - G_{sj}h_{sj} = 0 .$$

式中:  $h_{b(j-1)}$ 、 $h_{bj}$ 、 $h_{sj}$  分别为第  $j$  级闪蒸器进口饱和水的焓值、出口的浓水焓值、出口饱和水蒸汽焓值。

### 2.3.2 换热器模块

换热器模块主要包括蒸汽发生系统中的水预热器、饱和器和蒸汽过热器。主要假设为:换热器为逆流型,管壁内外温度相等,流体不可压,忽略流体的轴向传热,同一截面的流体参数相同,冷热流体热量传递方式主要为对流换热,换热器的换热效率恒定。

质量守恒方程为

$$G_o - G_i = 0 .$$

式中:  $G_i$ 、 $G_o$  分别为换热器进出口工质流量。

能量守恒方程为

$$G_o h_o - G_i h_i - q = 0 .$$

式中:  $h_i$ 、 $h_o$  分别为换热器进出口工质焓值; $q$  为换热器内的交换热量。

## 3 化学回热循环仿真与分析

应用 MATLAB/Simulink 软件,针对某型三轴燃气轮机,基于上述化学回热循环部件的数学模型,搭建了燃气轮机化学回热循环仿真模型,模型中包含了燃气轮机本体模型、蒸汽发生模型、燃料蒸汽转化过程模型以及涡轮特性工作点处理模型和湿燃气(水蒸气和燃气混合气)比热容处理模型。

本文利用该仿真模型,对 CRGT 循环进行了仿真计算,计算过程采用保持涡轮设计点工作特性不变和维持机组功率基本不变,降低燃气初温的方案。根据计算结果,分析了不同工况燃气轮机化学回热循环各参数(压气机压比、燃烧室出口温度、涡轮出口温度等)的变化规律,图 2~9 为燃气轮机化学回热循环性能的变化关系曲线。

经计算,可得到如下分析结果:

1) 燃气轮机化学回热循环,可以大幅度地提高装置循环效率,最大效率相对提高量可达 32%,但是随着工况的降低,提高率降低。这是由于低负荷下涡轮出口燃气温度较低,不利于燃料蒸汽转化,化学回热效果变差。

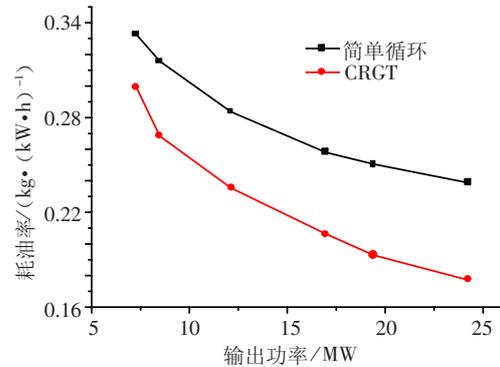


图2 燃机耗油率变化曲线

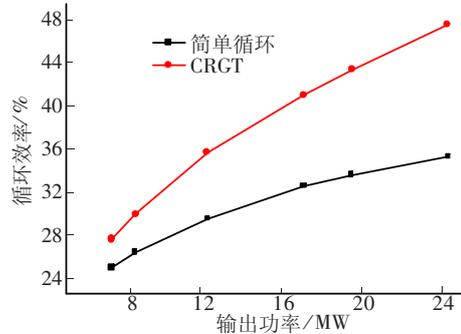


图3 燃机循环效率变化曲线

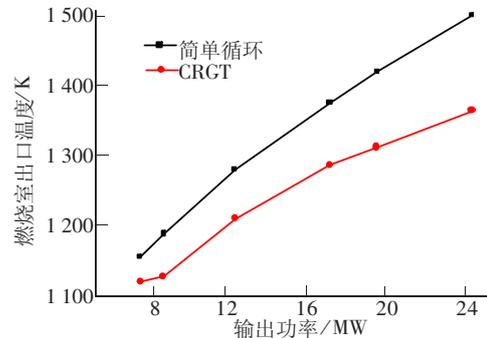


图4 燃烧室出口温度变化曲线

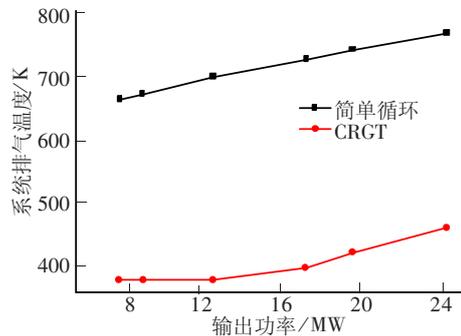


图5 燃机排气温度变化曲线

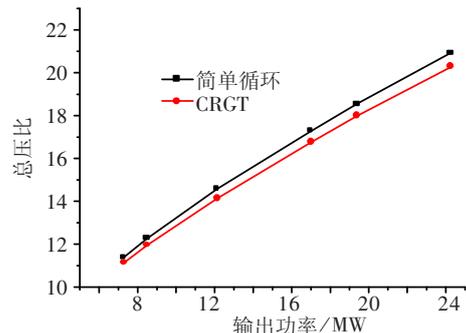


图6 压气机压比变化曲线

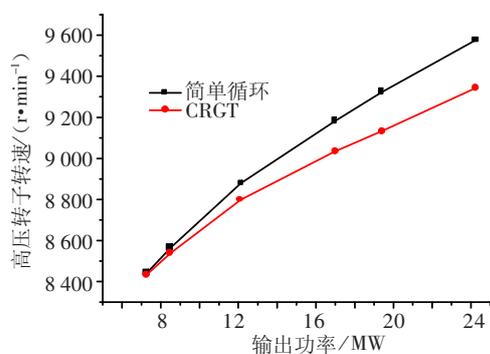


图7 高压轴转速变化曲线

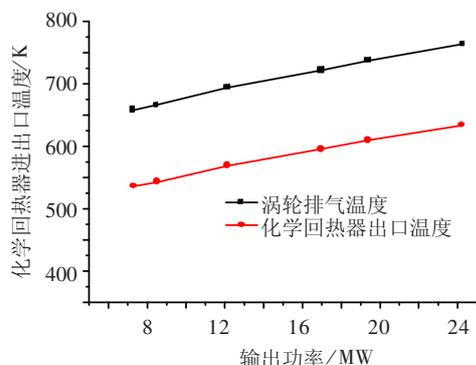


图8 排气温度与功率关系曲线

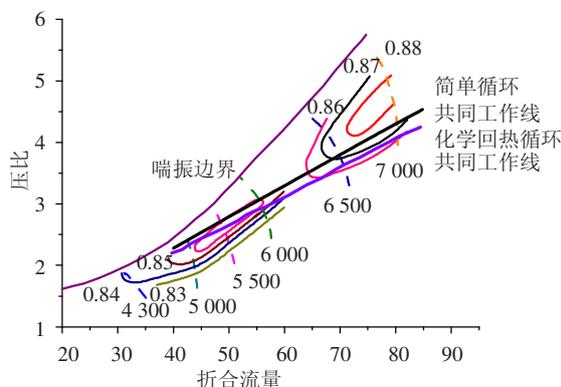


图9 燃气轮机共同工作线

2) 在该循环中涡轮流量增加,但在不改变燃机结构的条件下,应适当降低涡轮进口温度,此时转子转速有所降低,压气机的压比和流量相应降低,且高压涡轮和高压压气机的变化比低压涡轮和压气机变化的明显,动力涡轮的变化最小;工况越高,变化越明显.另外,由于转子转速的降低,燃气轮机的工作特性线与简单循环相比较,将向着远离压气机的喘振边界移动,这对于提高压气机的喘振裕度是非常有利的.

3) 在本文的计算条件下,涡轮进口温度下降明显.在100%负荷情况下,降幅可达约140 K.同时燃气轮机排气余热的利用深度较高,最后的排气温度较低,在100%负荷下,排温仅仅150℃.

## 4 结 语

1) 燃气轮机化学回热循环是一种不依赖于压气机压比的先进循环,其余热利用深度高.根据本文的计算模型,循环最大热效率相对提高量可达32%,是能源危机背景下一种非常有发展前景的循环方式.

2) 该循环在不降低输出功率的前提下,可以大幅度降低涡轮进口温度,有利于提高燃气轮机的寿命;同时,该循环中燃气轮机的共同工作线向着远离喘振线的方向移动,可以提高运行的喘振裕度,提高燃机的机动性能.

## 参考文献:

- [1] NAKAGKI T, OGAWA T. Development of chemically recuperated micro Gas turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125:391-397.
- [2] KESSER K F, HOFFMAN J W. Analysis of a basic chemically recuperated gas turbine power plant [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116:277-284.
- [3] 肖云汉,蔡睿贤,林汝谋. 化学回热循环的热力学优化[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(增刊): 1-4.
- [4] 李志敏,张密林,刘顺隆. CRGT循环的热力学性能分析[J]. 化学工程师, 2001, 82(1): 28-30.
- [5] CARAPPELLUCCI R, MILAZZO A. Thermodynamic optimization of a reheat chemically recuperated gas turbine [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 2936-2953.
- [6] HARVEY S, KANE N. Analysis of a reheat gas turbine cycle with chemical recuperation using ASPEN[J]. Energy Convers, Mgmt, 1997, 38(15-17): 1671-1679.
- [7] CAI Ruixian, JIANG Lixia. Analysis of the recuperative gas turbine cycle with a recuperator located between turbines[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, (26): 89-96.
- [8] ALMAN S T, HOFFMAN M A. A methane-steam reformer for a basic chemically recuperated gas turbine [J]. Transactions of the ASME, 1995, 117:16-22.
- [9] 倪维斗. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京:科学出版社, 1996:196.
- [10] 余义红,孙丰瑞,张仁兴. 基于MATLAB的面向对象的燃气轮机动态仿真研究[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(1): 53-55.

(编辑 杨波)