

# 应用甲烷自热重整技术的燃气轮机循环焓分析

唐 强 张晓琴 侯世锋 阳绪东

(重庆大学 动力工程学院 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

**摘 要:** 提出了一种应用甲烷重整技术的燃气轮机新循环。首先 根据系统的工作过程 应用热力学平衡方法分析燃烧室反应的热平衡; 其次依据热力学第二定律, 研究了燃气轮机新循环焓效率的变化趋势。结果显示: 新循环燃烧消耗的甲烷量小于供给量, 与  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  重整消耗的甲烷量的变化趋势与反应平衡常数的大小有关。在相同燃料量的条件下 与简单循环相比 新循环的焓效率得到大幅提高, 涨幅为 5.05% - 15.57%。

**关 键 词:** 燃气轮机循环; 甲烷重整; 焓分析

中图分类号: TK472 文献标识码: A

## 引 言

天然气蒸汽重整技术历史悠久, 但是该技术用于动力系统却是很新, 而且有很好的效果, 其应用还在不断的发展中<sup>[1~3]</sup>。如化学回热的燃气轮机循环 (CRGT) 借助天然气重整反应有效利用透平排热来提高燃料热值和系统效率<sup>[4]</sup>。

燃烧室作为燃气轮机系统的 3 大核心部件之一, 其工作效率直接影响整台机组的性能。传统的简单循环中, 燃料与经过压缩的一次空气在燃烧室中混合燃烧, 产生了温度高达 1 800 ~ 2 300 K 的燃气, 此时, 二次冷却空气经通道壁面渗入与高温燃气混合, 使混合气体降低到适当的温度, 因此为了使混合气体温度满足燃气轮机叶片的要求, 通常过量空气系数较大, 使效率明显下降。

本研究对应用甲烷重整技术的燃气轮机新循环进行了热力学焓分析, 利用吸热的重整反应来吸收燃烧释放的热量, 减少冷却空气量。通过热力学计算对燃烧室进行焓分析, 应用该技术的新型燃气轮机循环; 再将其与传统的简单循环作比较, 分析并揭示新循环的热力性能。

## 1 系统简介

应用甲烷自热重整技术的燃气轮机新循环的工作流程为: 首先空气进入压气机中, 经过压缩后的空气(2)送入燃烧室。在燃烧室中, 反应体系中  $\text{CH}_4$  与  $\text{O}_2$  发生氧化进行放热反应产生  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ; 剩余  $\text{CH}_4$  与产生的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  在催化剂表面继续发生吸热的重整反应来吸收甲烷燃烧释放的高温热量, 使燃烧室出口的混合气体(3)温度降到透平入口所需的温度水平。之后混合气体进入燃气透平中做功, 废气(4)进入大气环境, 放热后完成循环。

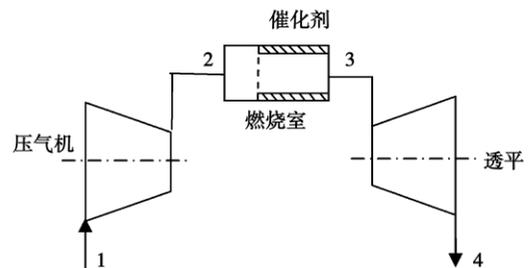


图 1 燃气轮机新循环系统流程图

Fig. 1 Flow path chart of a new gas-turbine circulation system

## 2 热力学计算方法及结果

### 2.1 独立反应数

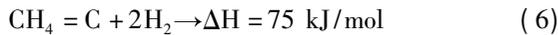
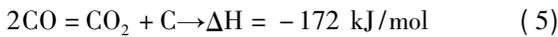
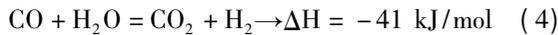
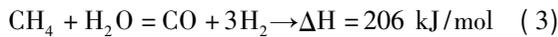
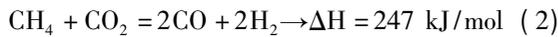
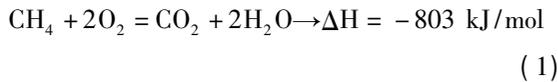
采用平衡常数法, 对燃烧室进行热力学计算。当燃烧室达到热力学平衡时, 甲烷自热重整的平衡体系共有  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  等 7 种物质, 共有元素 C、H、O、N 四种, 该平衡体系共有 7 个反应方程, 则其中 3 个为独立反应<sup>[5]</sup>, 可用反应式

收稿日期: 2010-02-08; 修订日期: 2010-12-08

基金项目: 重庆市重点基金资助项目 (CSTC 2009BA6067)

作者简介: 唐 强 (1973-) 男, 四川内江人, 重庆大学副教授, 博士。

(1) ~ 式(3) 表征体系 即:



式中:  $\Delta H$ —反应焓。

式(2) ~ 式(3) 的平衡常数与燃烧室出口温度  $T$  的关系见式(8)、式(9)。表 1 所示为不同温度下式(2)、式(3) 的反应平衡常数满足:

$$\ln K_p(2) = -28640.6/T + 6.597 \ln T - 43276T^{-2} - 4.3 \times 10^{-3}T - 10.1 \quad (8)$$

$$\ln K_p(3) = -22734.3/T + 8.16 \ln T - 4210T^{-2} - 4.42 \times 10^{-3}T - 27.06 \quad (9)$$

表 1 不同温度下各反应平衡常数

Tab. 1 Equilibrium constants of various reactions at different temperatures

$T/K$	$K_p(2)$	$K_p(3)$
1 073	130	50
1 173	1 453	404
1 273	10 890	2 320
1 373	59 401	10 149
1 473	250 979	35 626

## 2.2 反应平衡模型

设初始甲烷的量为  $n_0$  (mol) ,其中反应式(1) 消耗  $x$  (mol) ,反应式(2) 消耗  $y$  (mol) ,反应式(3) 消耗  $z$  (mol) 。则由上述方程可知 ,平衡时 ,进入燃气轮机的混合气组分为: 剩余的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  及  $\text{N}_2$  ,与完全燃烧反应相比 ,重整反应使混合气组分中增加了  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  。

用平衡组分的分压表示的平衡常数 ,通过气体状态方程 ( $pv = nRT$ ) 将气体组分分压换算成摩尔浓度 ,可得反应式(2)、式(3) 的平衡常数关系式为:

$$K_p(2) = \frac{\left(\frac{2y+z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right)^2 \left(\frac{2y+3z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right)^2}{\left(\frac{n_0-x-y-z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right) \left(\frac{x-y}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right)} = \frac{\varepsilon^2 \left(\frac{2y+z}{n}\right)^2 \left(\frac{2y+3z}{n}\right)^2}{\left(\frac{n_0-x-y-z}{n}\right) \left(\frac{x-y}{n}\right)} \quad (10)$$

$$K_p(3) = \frac{\left(\frac{2y+z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right) \left(\frac{2y+3z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right)^3}{\left(\frac{n_0-x-y-z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right) \left(\frac{2x-z}{n} \cdot \frac{p}{p^0}\right)} = \frac{\varepsilon^2 \left(\frac{2y+z}{n}\right) \left(\frac{2y+3z}{n}\right)^3}{\left(\frac{n_0-x-y-z}{n}\right) \left(\frac{2x-z}{n}\right)} \quad (11)$$

式中:  $p^0$ —标准大气压 ,MPa;  $p$ —反应压力 ,MPa;  $\varepsilon$ —压比  $\varepsilon = p/p^0$ 。

对于甲烷平衡转化率  $\varphi$  的定义为:

$$\varphi = (x + y + z) / n_0$$

## 2.3 燃烧室的热平衡

对于该循环 ,燃烧室出口温度达到某一定值时 ,燃烧室的热平衡的关系式为:

$$x \Delta H_1 - y \Delta H_2 - z \Delta H_3 = \sum_i n_i \times \Delta h_i \quad (12)$$

式中:  $n_i$ —生成气体组分的物质的量;  $\Delta h_i$ —各组分的焓值变化。

由给定的燃烧室出口温度可确定平衡常数的值 ,并给定  $\varepsilon$  ,代入式(10) ~ 式(12) 将其联立方程组 ,利用 Matlab 求解高次方程 ,可得  $x$ 、 $y$ 、 $z$  ,进一步可计算出燃烧室出口的气体组分、焓值。

## 2.4 结果与分析

### 2.4.1 温度和压比对甲烷燃烧量 $x$ 的影响

初始甲烷量为 1 kg/s ,即 62.5 mol/s ,由新系统燃烧室平衡关系可得 , $x$  随温度和压比的变化关系如图 2 所示。由图可见 ,当  $\varepsilon$  一定时 ,随着燃烧室出口温度  $T_3$  的升高燃烧  $x$  呈增大趋势 ,这是因为当温度升高时 ,所需消耗的燃料量增多才能保证释放更多的热量; 当  $T_3$  一定 ,压比  $\varepsilon$  增大时  $x$  减少。可知 ,甲烷燃烧量小于供给量 ,这表明新系统用于燃烧释放热量的消耗甲烷的量减小。

### 2.4.2 $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ 重整消耗量 $y$ 的变化趋势

图 3 为  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  重整消耗量  $y$  随着燃烧室出口温度  $T_3$  以及压比  $\varepsilon$  的变化趋势。由图可见 ,当  $\varepsilon$  一定时 ,随着  $T_3$  的升高  $y$  值逐渐增大;  $T_3$  一定时 , $\varepsilon$  增大时  $y$  逐渐减小 ,但是当温度升高时  $y$  随着压比减小的程度逐渐减缓。

这是因为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  发生的反应不仅是吸热的反应 ,而且是体积增大的反应 ,因此 ,温度升高对重整反应的正向进行有促进作用 ,增大压力对重整反应的正向进行起阻碍作用。

### 2.4.3 $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 重整消耗量 $z$ 的变化趋势

$\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$  重整消耗量  $z$  随着  $T_3$  以及  $\varepsilon$  的变化趋势如图 4 所示。由图可见  $z$  的变化与  $y$  的变化

趋势不同。具体变化为: 当  $T_3$  为 1 173 K 时 随着  $\varepsilon$  的增大  $z$  值逐渐减少; 1 273 K 时  $z$  出现先增后减的趋势; 随着  $T_3$  的升高  $z$  逐渐增大。由此可见,  $T_3$  越低 随着  $\varepsilon$  的增大  $z$  值处于下降趋势。

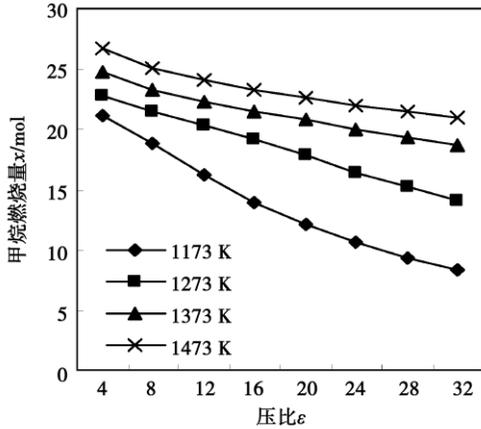


图 2  $T_3$  和  $\varepsilon$  对  $\text{CH}_4$  燃烧耗量的影响  
Fig. 2 Influence of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on methane combustion consumption quantity

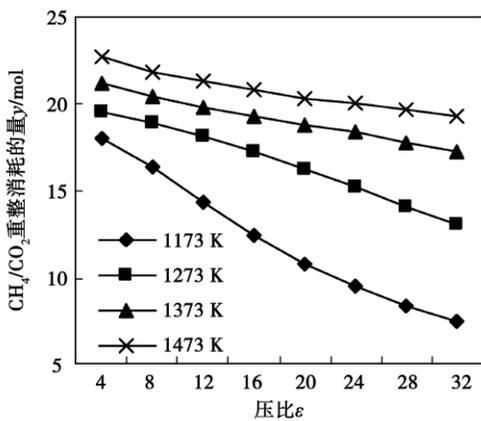


图 3  $T_3$  和  $\varepsilon$  对  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  重整量的影响  
Fig. 3 Influence of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on the  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  reforming quantity

这是因为当燃烧室出口温度升高时, 燃烧室中主要以燃烧放热为主, 重整吸收的热量减少, 即发生重整反应的甲烷量减少。由表 1 可知, 反应式(2)、式(3)的平衡常数在相同温度下相差很多, 且温度越高, 平衡常数的差距越大, 表明甲烷与  $\text{CO}_2$  发生的重整反应较为彻底, 甲烷与水蒸气的反应受甲烷燃烧释放热量与  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  重整反应吸收的热量的差值的限制, 其中, 1 173 K 对应的  $z$  值变化的趋势是临界值。

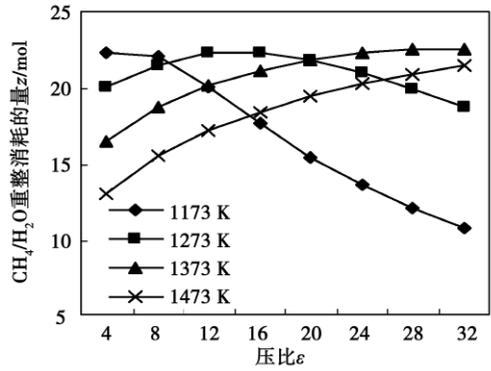


图 4  $T_3$  和对  $\varepsilon$  对  $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$  重整量的影响  
Fig. 4 Influence of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on the  $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$  reforming quantity

#### 2.4.4 温度和压比对甲烷转化率的影响

甲烷平衡转化率  $\varphi$  随着  $T_3$  以及  $\varepsilon$  的变化关系如图 5 所示。

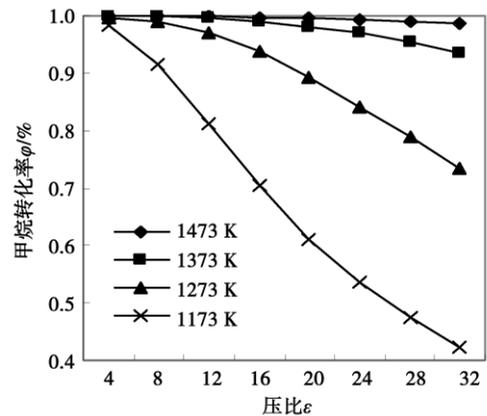


图 5  $T_3$  和  $\varepsilon$  对甲烷转化率的影响  
Fig. 5 Effect of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on the methane conversion rate

由图可知 随着  $T_3$  的升高  $\varphi$  逐渐增大; 随着压比的增大  $\varphi$  逐渐降低。当温度升高时, 燃烧反应占主导地位, 因此甲烷转化率渐趋于 1, 另外由于反应式(2)、式(3)都是体积增大的反应同时又是吸热反应, 其中甲烷与  $\text{CO}_2$  发生的重整反应较为彻底, 则可知升高温度能提高转化率, 升高压力却会导致转化率降低。

### 3 焓分析

#### 3.1 燃烧室焓分析

在燃烧室的热平衡计算的基础上, 考虑了燃气

温度较高时比热变化较大的特点,考虑了变比热的燃气热力性质,对燃烧室的焓损及焓效率进行分析。为了简化计算,先把燃气的质量分数转化为摩尔分数。为此,先求取燃气的气体常数  $R_g$ :

$$R_g = \sum_j \xi_j R_j$$

式中:  $\xi_j$ —燃气中各组分的质量分数,  $\xi_j = m_j/m_g$ ;  $M_g$ —燃气的摩尔质量,  $M_g = R_M/R_g$ ;  $x_j$ —摩尔分数,  $x_j = \frac{\xi_j/M_j}{\sum_i \xi_i/M_i}$ ;  $M_j$ —第  $j$  组元的摩尔质量。

燃烧室的焓耗损可由燃烧室的焓平衡中得出。以角码  $f$  代表燃料,  $g$  代表燃气,由焓平衡知焓耗损  $i_r$  为:

$$i_r = T_0 (m_g s_g - \alpha m_a s_a - m_f s_f)$$

式中:  $\alpha$ —过量空气系数。

由式:  $s_g(T_g, p_g) = \sum_j \xi_j s_j(T_g, p_g) - \sum_j \xi_j R_j \ln x_j$  的混合熵可以通过燃气的气体常数求取,而其它各项可借助  $\xi_j$  值及各气体熵值求取。燃料焓取为其高热值  $e_f$ , 则燃烧室的焓效率  $\eta_{e,c}$  为:

$$\eta_{e,c} = 1 - i_r/m_f e_f$$

### 3.2 循环焓效率

对于整个燃气轮机循环装置来讲,循环焓效率  $\eta_e$ :

$$\eta_e = W_{net}/m_f e_f \times 100\%$$

其中,  $W_{net} = W_T - W_C$ ;  $W_T$  为燃气透平做功量;  $W_C$  为压气机耗功量。

### 3.3 计算结果分析

#### 3.3.1 两种循环焓效率对比分析

图 6 为新循环与传统的简单循环焓效率随燃烧室出口温度  $T_3$  和压比  $\varepsilon$  变化的趋势。由图可见,新循环焓效率与简单循环变化趋势一致,均随着燃烧室出口温度的升高而上升,随着压比的增大先增大后渐趋于平缓;不同之处是新循环焓效率比简单循环的值大,且压比较大时,温度越高,焓效率提高的幅度越大,在所给定的条件下,新循环焓效率的涨幅为 5.05% ~ 15.57%。这是因为当  $T_3$  一定时,压比越小,燃烧室中需要释放的热量越多,重整反应吸收的热量越少,因此,压比较小时,新循环焓效率基本没有得到提高;压比越大,新循环焓效率提高幅度较大。

新循环焓效率之所以比简单循环的大,主要原因是燃烧室的焓效率对整个循环的焓效率影响最大,因为新循环的燃烧室中不仅有燃烧反应而且还有吸热的重整反应。

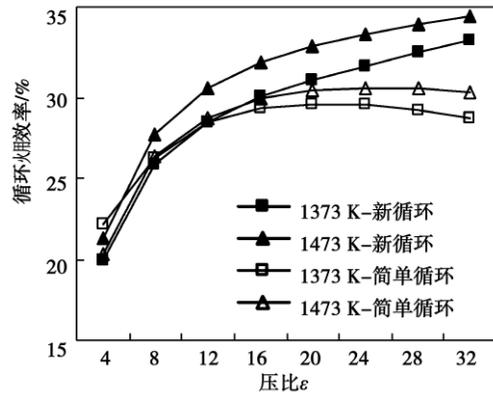


图 6  $T_3$  和  $\varepsilon$  对循环焓效率的影响

Fig. 6 Effect of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on the circulating exergy efficiency

#### 3.3.2 两种循环燃烧室焓效率对比

图 7 为新循环与传统简单循环燃烧室焓效率随燃烧室出口温度和压比变化的趋势。由图可见,新循环燃烧室的焓效率的值远比简单循环的大;新循环燃烧室焓效率随着  $T_3$  的升高呈下降趋势,随着压比的增大逐渐升高;而简单循环燃烧室焓效率随着  $T_3$  的升高和压比的增大逐渐升高。

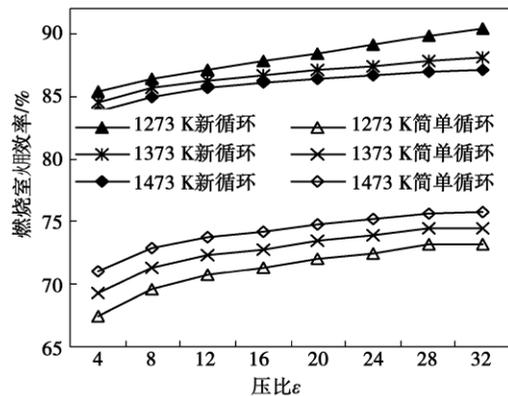


图 7  $T_3$  和  $\varepsilon$  对燃烧室焓效率的影响

Fig. 7 Effect of  $T_3$  and  $\varepsilon$  on the combustor exergy efficiency

产生这种现象的主要原因是新循环增加了吸热的重整反应,生成了 CO 和  $H_2$ ,其物性的不同使得燃烧释放的热量损失减少,不过随着燃烧室出口温度的升高,重整反应吸收的热量逐渐减少,因此对焓效率提高的程度逐渐减缓。

新循环燃烧室焓效率得到提高主要有以下几个原因:

- (1) 进口空气量  $G_a$ 。相对于 1 kg/s 的燃料量

而言,简单循环甲烷完全燃烧,为了使高温燃气的温度能够下降到透平入口叶片的要求,通常需要过量的空气量,透平初温  $T_3$  范围为 1 273 ~ 1 473 K 时,消耗空气量为 31.9 ~ 63.6 kg/s; 而新循环由于  $\text{CH}_4$  与  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  发生吸热的重整反应,来吸收甲烷燃烧释放的部分热量,因此用来冷却的二次空气的量减少,新循环空气量变化的范围是: 3.90 ~ 7.38 kg/s。可知新循环消耗的空气质量远远小于简单循环。

(2) 气体常数  $R_g$ 。由于新循环发生甲烷重整反应,生成的燃气与简单循环相比增加了有重整生成的气体  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ , 由于燃气组分的变化导致各组分质量分数发生变化,因此  $R_g$  不同,其随着  $T_3$  和  $\varepsilon$  的具体变化如图 8 所示。

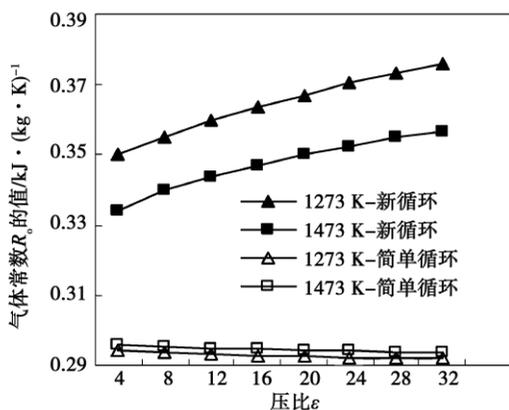


图 8 两种循环  $R_g$  随  $T_3$  和  $\varepsilon$  的变化趋势

Fig. 8 Variation tendency of  $R_g$  in both cycles with  $T_3$  and  $\varepsilon$

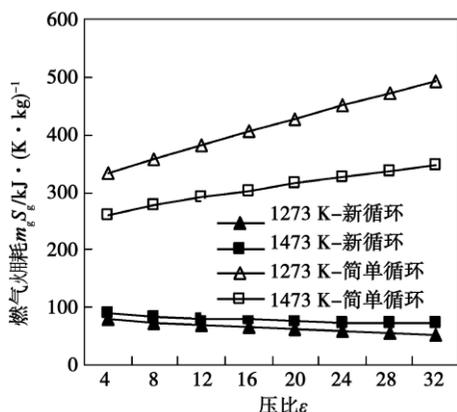


图 9 燃气焓耗与  $T_3$  和  $\varepsilon$  的关系

Fig. 9 Relationship of the gas exergy loss with  $T_3$  and  $\varepsilon$

可见,新循环  $R_g$  随着  $T_3$  的升高逐渐减小,随着  $\varepsilon$  的增大逐渐增大,但其值都比简单循环的值大,这不仅是造成新循环焓效率比简单循环高的原因之

一,同时使得新循环随着  $T_3$  的升高焓效率值逐渐减小。

(3) 燃气焓耗。两种循环燃气焓耗随  $T_3$  和  $\varepsilon$  变化的趋势,如图 9 所示。可见,与简单循环相比,新循环的燃气焓耗较小,这是因为新循环生成的混合气体组分中增加了  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  两种气体,使得燃气组分发生变化,并由此导致循环燃气流量减少,则新循环燃气焓耗减小。

## 4 结 论

(1) 在给定相同燃料量的条件下,新循环用于燃烧的燃料量小于供给量,这表明新系统用于燃烧释放热量的消耗甲烷的量减小,使得新循环空气消耗量减少。

(2) 新循环中,  $\text{CH}_4$  与  $\text{CO}_2$  重整消耗的量随着燃烧室出口温度  $T_3$  的升高逐渐增大; 随着压比  $\varepsilon$  的增大逐渐减小。  $\text{CH}_4$  与  $\text{H}_2\text{O}$  重整消耗的量变化趋势不是单一的,当  $T_3$  低于 1 173 K 时,随着  $\varepsilon$  的增大  $z$  值逐渐减少; 高于 1 173 K 时,  $z$  出现先增后减的趋势。

(3) 新循环焓效率比简单循环的值大,在所给定的条件下,新循环焓效率的涨幅为 5.05% ~ 15.57%。这主要是因为新循环燃烧室焓效率得到提高。

(4) 新循环燃烧室焓效率提高主要原因是空气流量的减少,以及燃气中有重整气体  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ , 由此导致的混合燃气常数的增大,以及燃气焓耗损的减小。

## 参考文献:

- [1] GAO Lin, JIN Hong-guang, LIU Ze-long, et al. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production [J]. Energy 2004, 29: 2359 - 2371.
- [2] MENG Xiang-yu, BAI Fei-fei, YANG Fu-sheng, et al. Study of integrated metal hydrides heat pump and cascade utilization of liquefied natural gas cold energy recovery system [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2010, 35: 1 - 10.
- [3] Gianfranco Chicco, Pierluigi Mancarelli A. Distributed multi-generation: a comprehensive view [J]. Renewable and Sustainable Reviews 2009, 13: 535 - 551.
- [4] 徐威, 林汝谋, 金红光等. 应用天然气重整技术的新型动力系统开拓研究 [J]. 热能动力工程 2005, 20(3): 221 - 225. XU Wei, LIN Ru-mou, JIN Hong-guang, et al. Development and study of a new type power system by using the natural gas reforming technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2005, 20(3): 221 - 225.
- [5] LI Yun-hua, WANG Ya-quan, ZHANG Xiang-wen, et al. Thermodynamic analysis of autothermal steam and  $\text{CO}_2$  reforming of methane [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2008, 33: 2507 - 2514.

( 辉 编辑)

plications. With a 310 MW unit in a thermal power plant serving as an example, an analysis of the steam turbine stage characteristic flow path area was conducted. Through a calculation of the deviation rate of the stage characteristic flow path area and the relative internal efficiency, the operating state of the steam turbine flow path was judged, arriving at a conclusion that the flow path area of No. 1 stage group of the steam turbine decreases, other stage groups are in normal work, the steam extraction pressure measurements of No. 7 and 8 section are not correct and it is possible that a certain amount of hot steam is leaked into the steam turbine from steam extraction ports of No. 5 and 6 section. On these basis, the authors have offered proposals to conduct an inspection and treatment during the overhaul of the steam turbine unit. It has been proven by the practice that the theoretical analytic results by using stage group characteristic flow path areas are in good agreement with the practical ones. **Key words:** thermal power plant, steam turbine, stage, flow path capacity, characteristic flow path area, application

应用甲烷自热重整技术的燃气轮机循环焓分析 = **Exergy Analysis of a Gas Turbine Cycle by Using the Methane Self-heat Reforming Technology** [刊, 汉] TANG Qiang, ZHANG Xiao-qin, HOU Shi-feng, YANG Xu-dong ( Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 165 ~ 169

Presented was a new gas turbine cycle by using the methane reforming technology. Firstly, according to the working process of the system, the heat balance of the reaction inside the combustor was analyzed by using the thermodynamic balance method. Secondly, based on the second law of the thermodynamics, the variation tendency of the exergy efficiency of the new gas turbine cycle was studied. The research results show that the amount of methane consumed in the combustion in the new cycle is smaller than that supplied, depending on the variation tendency of the amount of methane consumed in reforming of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  and the reaction equilibrium constant. Under the condition of a same fuel consumption rate, compared with a simple cycle, the exergy efficiency of the new cycle increases greatly, up by 5.05% - 15.57%. **Key words:** gas-turbine cycle, methane reforming, exergy analysis

IGCC 气化炉控制方案的仿真研究 = **Simulation Study of IGCC Gasifier Control Versions** [刊, 汉] WEI Jing, LIU Xiao-ling, ZHANG Li ( Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250013), WU Ke ( Guodian Nanjing Automation Stock Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 170 ~ 175

In the light of such dynamic characteristics of Alstom gasifiers as non-linear and multi-variable, two multi-variable control versions based on conventional PID controllers were proposed, which adopted different manipulation varia-