

# 贫燃催化燃烧燃气轮机的燃烧与系统性能分析

尹娟, 翁一武

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240)

## Investigation of Combustion and Systematic Performance of a Gas Turbine System With Lean Burn Catalytic Combustion Chamber

YIN Juan, WENG Yi-wu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** The flowsheet and characteristics of a lean-burn catalytic combustion gas turbine system were investigated. The simulation results were determined by utilizing improved plug flow reactor(PFR) model and validated by experimental data. The effects of operating parameters on catalytic combustion were analyzed. The system models were built in Aspen Plus and three independent design variables, i.e. compressor pressure ratio, regenerator effectiveness and turbine inlet temperature( $T_{IT}$ ) were selected to analysis the systematic performance. The main results show that: if effectiveness and  $T_{IT}$  are constant, the combustor inlet temperature decreases with the increasing of pressure ratio. In order to maintaining methane conversion, the methane concentration is increased and the thermal efficiency is reduced. It is a necessary condition to choose a reasonable  $T_{IT}$ . When  $T_{IT}$  and pressure ratio are constant, the lower the effectiveness is, the lower the thermal efficiency is. When the effectiveness is constant and lower than threshold value, the higher pressure ratio is, the more significant effects on the performance of catalytic combustion are.

**KEY WORDS:** lean burn catalytic combustion; gas turbine; modelling; performance

**摘要:** 介绍了贫燃催化燃烧燃气轮机系统的流程及特点。应用改进一维塞流数学模型, 进行催化燃烧数值模拟, 并用试验进行验证, 分析催化燃烧的影响因素。在 Aspen Plus 软件中建立了系统模型, 选择 3 个独立设计变量, 即压气机压比、回热器回热度以及透平入口温度, 进行系统性能分析。得到的主要结论有: 在回热度及透平入口温度一定的情况下, 随着压比的增加, 燃烧室入口温度降低。为保证甲烷转化率,

增加了甲烷浓度, 从而降低了系统热效率。合理优选透平入口温度, 对系统优化设计至关重要。透平入口温度及压比一定的工况下, 回热度越低, 系统热效率越低; 在回热度一定且小于临界值时, 压比越大, 对催化燃烧的影响越大。

**关键词:** 贫燃催化燃烧; 燃气轮机; 建模; 特性

## 0 引言

超低热值燃料气(ultra low heat value fuel, ULHVF)种类繁多, 总量巨大(包括煤矿通风瓦斯, 部分低热值沼气、秸秆气等生物质气和钢铁、化工、矿物燃烧生产过程中产生的低热值燃料气, 如高炉煤气)<sup>[1-2]</sup>。ULHVF 中甲烷的含量在 1%~5%, 这类燃料气通常很难点火燃烧, 很多直接排放到大气中。甲烷的温室效应是 CO<sub>2</sub> 的 23 倍, 直接排放 ULHVF, 将造成环境污染。同时, ULHVF 可被用来作为清洁能源, 若能有效利用这一资源, 将其转变成热能或电能, 节能减排所产生的效益将十分显著。

催化燃烧是处理 ULHVF 最有效的燃烧方法。同时, 催化燃烧可以在不降低甲烷转化率的前提下实现未燃烧碳氢化合物、CO 和 NO<sub>x</sub> 等污染物的超低排放甚至零排放<sup>[3]</sup>。催化燃烧是一项环境和能源共同驱动的燃烧技术。近年来, 催化燃烧在很多动力系统领域得到了广泛的应用, 尤其是燃气轮机系统。

当前催化燃烧燃气轮机的研究主要集中于富燃催化燃烧燃气轮机(rich burn catalytic combustion gas turbine, RBCCGT)工作特性的研究<sup>[4-6]</sup>, 其燃烧系统分为催化燃烧室和常规燃烧室 2 部分。在燃烧系统进口喷入燃料, 与空气预混后, 催化燃烧室中一部分燃料发生催化燃烧反应, 燃烧产物与未完全反应的燃料进入常规燃烧室继续燃烧。有关利用

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2010CB227301); 国家自然科学基金项目(90610019)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB227301); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(90610019).

ULHVF 的贫燃催化燃烧动力装置的基础性研究的报道很少。

催化燃烧是一个复杂的物理和化学过程,包括表面反应动力学、气相反应动力学以及质量、动量和能量的输运过程<sup>[7]</sup>。催化燃烧数值计算中所采用的数学模型最常用的主要有3种:三维N-S方程模型<sup>[8-9]</sup>、三维边界层方程模型<sup>[10-11]</sup>(boundary layer, B-L)及一维塞流模型<sup>[12-13]</sup>(plug flow reactor, PFR)。N-S方程模型是最全面的模型,能较真实地模拟出催化燃烧的主要特性。此模型主要为FLUENT计算软件所采用,联合CHEMKIN中化学反应机制,进行数值计算。此模型的缺点是计算时间长,而且关于催化燃烧对系统特性影响的问题,在现有的计算资源上很难进行研究<sup>[14]</sup>。B-L方程模型忽略了轴向扩散项,计算时间较N-S方程大为缩短。PFR模型忽略了径向温度、浓度、速度梯度,同时忽略轴向扩散项,计算时间最短、精度最低。但是,系统特性的研究工作中,PFR模型具有其他2种模型不具备的优势:利用简单的模型可以在短时间内分析不同运行参数对催化燃烧特性以及系统特性的影响<sup>[15]</sup>。为此,Zhu提出了改进PFR模型,在原模型基础上考虑了壁面与通道气流间的传热、传质,提高了PFR模型的计算精度,与二维模型的计算结果较吻合<sup>[16]</sup>。另外,对于新型燃气轮机循环的优化研究也得到越来越多的关注<sup>[17-18]</sup>。

本文采用改进PFR模型进行贫燃催化燃烧特性研究,并通过试验,探讨贫燃催化特性的影响因素,分析贫燃催化燃烧燃气轮机(lean burn catalytic combustion gas turbine, LBCCGT)系统的优化特性。

## 1 系统的循环流程及特点

本文研究的LBCCGT是以催化燃烧室作为唯一的燃烧装置,ULHVF作为主燃料的动力系统。系统启动时,经压气机压缩后的燃料气温度未能达到贫燃催化燃烧的起燃温度,因此系统中要设置常规燃烧室辅助系统启动<sup>[19]</sup>。燃料直接通入压气机内被压缩,温度压力上升后经回热器换热,温度达到催化燃烧的起燃要求后,由辅助燃烧室切换至催化燃烧室,ULHVF在催化燃烧室内进行反应,高温的烟气通入透平做功发电。系统如图1所示。

LBCCGT是为了利用ULHVF而专门研发的一种新型燃气轮机。由于ULHVF的性质,新型燃气轮机不论是在结构和性能上都与常规燃气轮机存在很多不同,如表1所示。

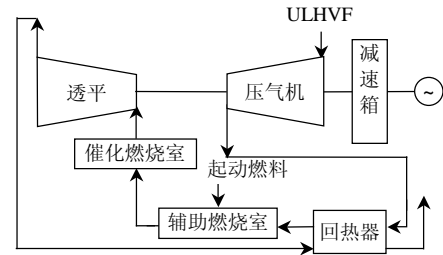


图1 LBCCGT系统图

Fig. 1 Schematic diagram of LBCCGT system

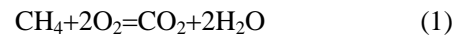
表1 LBCCGT与常规燃气轮机的特性对比  
Tab. 1 Comparison of features between the LBCCGT system and conventional gas turbine system

性质	LBCCGT	常规燃气轮机
工质进入方式	ULHVF直接 通入压气机	空气由压气机进入; 天然气喷入燃烧室
燃烧方式	催化燃烧	常规火焰燃烧
燃烧室结构	内置蜂窝结构	常规燃烧室
启动燃烧室	需要	不需要

## 2 催化燃烧室建模

在催化燃烧室建模时,做了如下假设。

- 1) 忽略径向温度、浓度、速度梯度。
- 2) 忽略轴向扩散。
- 3) 通道气流与固体壁面之间的流动不连续,因此连续性方程与能量守恒方程分别表达,2者依靠传热、传质系数经验公式耦合。
- 4) 催化燃烧室中发生的化学反应用一个总方程式表达



物质的量守恒方程:

气相

$$C_b v_m \frac{dY_{\text{CH}_4}}{dz} + \frac{4}{D_H} k_{m,\text{CH}_4} C_b (Y_{\text{CH}_4,b} - Y_{\text{CH}_4,s}) = 0 \quad (2)$$

固相

$$k_{m,\text{CH}_4} C_b (Y_{\text{CH}_4,b} - Y_{\text{CH}_4,s}) = \eta (-R_{\text{CH}_4})_s \quad (3)$$

式中

$$\eta = \left[ 1 + \left( \frac{1.002}{\phi^{0.9794}} \right)^{-1.307} \right]^{\frac{1}{1.307}} \quad (4)$$

能量守恒方程:

气相

$$-C_p v_m \rho \frac{dT_b}{dz} + \frac{4}{D_H} h (T_s - T_b) = 0 \quad (5)$$

固相

$$k_w \delta_w \frac{d^2 T_s}{dz^2} - h (T_s - T_b) - \eta \Delta H_R (-R_{\text{CH}_4})_s = 0 \quad (6)$$

边界条件

$$dT_s / dz = 0, \quad z = 0 \text{ 和 } z = l \quad (7)$$

动量守恒方程：

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{dP}{dz} \right) + v_m \frac{dv_m}{dz} + 2f \frac{v_m^2}{D_H} = 0 \quad (8)$$

化学反应速率方程<sup>[20]</sup>：

$$(-R_{CH_4})_s = 2.84 \times 10^8 \exp\left(\frac{-131\,000}{R_g T_s}\right) Y_{CH_4,s}^{0.72} \quad (9)$$

传热系数方程：

$$h = \frac{Nu \cdot k_f}{D_H} \quad (10)$$

传质系数方程<sup>[21]</sup>：

$$k_{m,CH_4} = \frac{Sh \cdot D_{CH_4,air}}{D_H} \quad (11)$$

式中， $c$  为气体摩尔浓度， $\text{mol/m}^3$ ； $v_m$  为气体流速， $\text{m/s}$ ； $Y$  为摩尔分数； $z$  为轴向坐标， $\text{m}$ ； $D_H$ 、 $\delta_w$  分别为通道水力直径、壁厚， $\text{m}$ ； $\eta$  为有效因子； $\Phi$  为 Thiele 模数； $\Delta H_R$  为反应热， $\text{J/mol}$ ； $C_p$  为定压比热， $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ； $\rho$  为密度， $\text{kg/m}^3$ ； $T$  为温度， $\text{K}$ ； $p$  为压力， $\text{Pa}$ ； $f$  为范宁摩擦系数； $k_f$ 、 $k_w$  分别为气体导热系数、固体壁面导热系数， $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ； $D_{CH_4,air}$  为甲烷在混合气中的分子扩散系数， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $Nu$ 、 $Sh$  分别为努塞尔数、舍伍德数； $h$ 、 $k_{m,CH_4}$  分别为传热、传质系数， $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 、 $\text{m/s}$ ；角标  $b$ 、 $s$  分别指通道气流、固体壁面。

### 3 催化燃烧试验装置

贫燃催化燃烧特性试验台如图 2 所示，包括高压气源、天然气供给装置、加热器、混合器、催化燃烧室、减压阀、背压调节阀，以及采样系统和气体分析装置。气体分析仪的测量范围  $\text{CH}_4$ ：0~100%；测量精度  $\text{CH}_4$ ：±2%。气体加热器采用金属外壳，气体在圆柱体金属容器内被加热，电阻丝缠绕于金

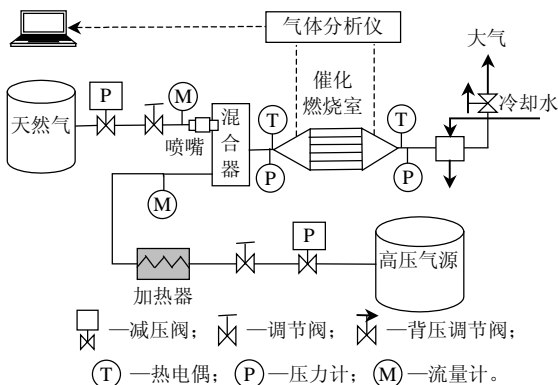


图 2 催化燃烧试验台示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of catalytic combustion bench-scale rig

属容器周围，由外加电源提供能量加热其中气体，气体的温度由电气电路来控制，达到目标加热温度。加热器的最高工作温度  $750\text{ }^\circ\text{C}$ ，误差±10 $^\circ\text{C}$ 。蜂窝载体布满催化燃烧器圆形内壁。由空压机输出压缩空气至储气罐。天然气经喷嘴喷射，与加热到一定温度的空气混合，混合物扩散到催化剂表面发生催化燃烧反应。调节阀门，配比试验需要的 ULHVF。反应后，烟气经过冷却排入大气。

常用的催化燃烧室可以归纳为 3 类：蜂窝整体式、填料床式和射流式。对于发电系统，蜂窝整体式催化燃烧室更适合，因为它有如下优点：压力损失小、接触面积大、机械强度高。蜂窝整体式催化燃烧室采用陶瓷或金属结构，基体单元由许多彼此隔离且与流动方向平行的细长通道组成，催化剂涂敷在基体结构内表面，催化反应发生在涂层上。催化燃烧装置的物性参数见表 2。试验中所用蜂窝整体式催化燃烧室如图 3 所示。

表 2 催化燃烧室的物性参数  
Tab. 2 Physical parameters and operating conditions of the catalytic combustor

物性参数	数值
长度/mm	375
水力直径/mm	90
孔直径/mm	1.27
基体单元壁厚/mm	0.18
催化剂/载体	(钙钛矿/Pt)/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$
Pt 负载量/%	0.8

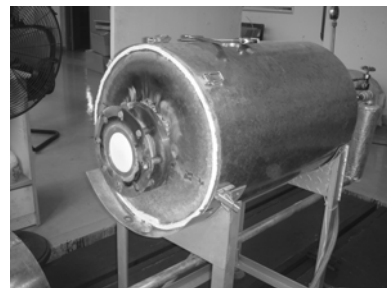


图 3 蜂窝整体式催化燃烧室  
Fig. 3 Honeycomb monolith catalytic combustor

### 4 结果分析

#### 4.1 模型验证

贫燃催化燃烧特性试验是在不同的进口温度、压力、流量以及体积浓度情况下，检测起燃温度与甲烷转化率的变化。起燃温度定义为甲烷转化率为 50% 时的温度。相关的试验结果与数值模拟结果如图 4、5 所示。试验中采用的催化剂为钙钛矿/Pt。由于贵金属价格昂贵，人们一直在研究用非贵金属化合物来取代或部分取代催化剂中的贵金属，以降低催化剂

的制造成本。近年来,钙钛矿型催化剂及相关氧化物被认为是具有巨大潜力的替代型催化剂<sup>[22]</sup>。

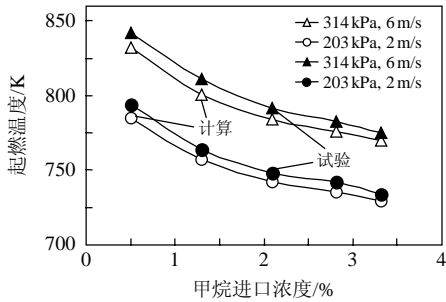


图4 工作参数对起燃温度的影响

Fig. 4 Effects of various operating parameters on ignition temperature

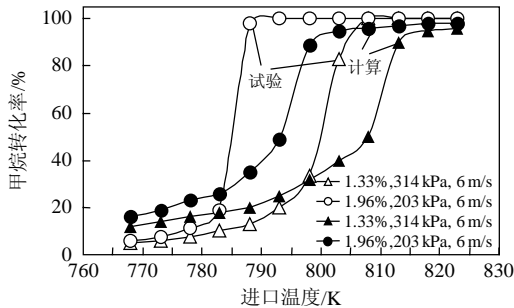


图5 工作参数对甲烷转化率的影响

Fig. 5 Effects of various operating parameters on methane conversion

图4表明进口浓度越高,起燃温度越低,催化燃烧反应越容易进行;压力及进口流速越高,对起燃温度的要求越高,催化燃烧反应越难进行。图5中2个工况的压力均为314 kPa,进口流速均为6 m/s,浓度分别为1.33%和1.96%。通过对比可以发现:进口温度越高或者进口浓度越高,甲烷越容易转化;低浓度工况下,提高进口温度能够提高甲烷转化率。

同时,试验结果与计算结果存在着差距。图4表明浓度越高,2种结果的差距越小;压力及进口流速越大,2种结果的差距越大。从图5中可以看出,由于起燃温度的差异,导致了甲烷转化率曲线的不吻合。

根据文献[16]中的结论,一维改进PFR模型计算得到的起燃温度应比二维模型计算结果偏高,是由于忽略径向温度梯度造成的,二维模型计算结果与试验结果更加吻合。图4中试验值略高于计算值,这是由于钙钛矿的催化活性较贵金属催化剂仍有一定差距。而公式(9)中反应速率公式是通过纯钯贵金属催化燃烧甲烷试验得到的。虽然受试验条件限制,影响了试验效果,但作为定性试验能够验证数

值计算的趋势。在进行试验结果和数值计算的结果对比分析之后,可以肯定,利用改进PFR模型进行催化燃烧特性分析是可行的。

#### 4.2 催化燃烧的影响因素

应用所建数学模型进行催化燃烧影响因素的分析,设计工况下的参数为:进口温度800 K,压力304 kPa,浓度1.5%,进口流速6 m/s,通道长度75 cm,水力直径50 cm。数值计算中分析每项参数对催化燃烧的影响时,只改变此参数,其他参数保持不变。计算结果如图6与图7所示。

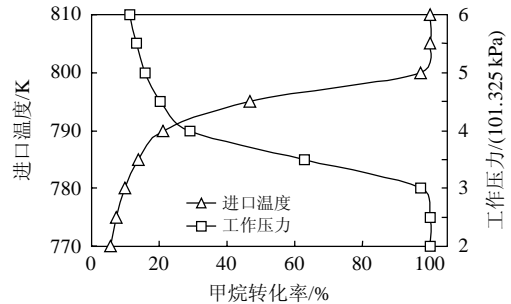


图6 进口温度与工作压力对甲烷转化率的影响

Fig. 6 Effect of inlet temperature and operating pressure on methane conversion

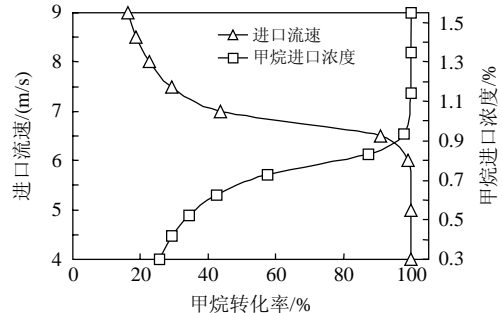


图7 进口速度与浓度对甲烷转化率的影响

Fig. 7 Effect of inlet velocity and methane mole fraction on methane conversion

进口温度是影响催化燃烧性能的重要参数。在低温区,催化燃烧强度和反应速率随进口温度的提高而加大;并存在一个进口温度的临界值,高于临界温度后,燃烧室的催化燃烧转化率将维持不变。

低压工况下,催化燃烧能维持100%的甲烷转化率;超过临界压力后,催化燃烧强度随压力的提高而降低。这是由于随着压力的增加,通道中气流流量增加,越来越多的气态燃料及氧气分子沿通道流动,而通道气流与涂有催化剂的壁面间的传热、传质性能降低,影响了催化燃烧反应<sup>[16]</sup>。

在气流进口流速较低的情况下,甲烷能够完全转化;高于临界进口流速后,甲烷转化率随进口流速的增加而逐渐降低。原因在于:高速流动减少了反应物在反应器中的滞留时间,燃料中部分甲烷还

没有与催化剂充分接触；同时，高速气流带走了反应的生成热，后续的催化燃烧更加艰难。

低甲烷浓度工况下，催化燃烧强度和反应速率随浓度的提高而增加；高于临界浓度后，催化燃烧转化率将维持不变。

研究表明，在一定设计工况下，促进贫燃催化燃烧的措施有：增加进口温度，增加进口浓度，降低进口流速，以及降低工作压力。

图 8 中无标记曲线表征了设计工况下，甲烷转化率沿通道长度的变化趋势。将设计工况下的工作参数分别提高或降低 10%，分析影响催化燃烧转化率的最敏感因素。

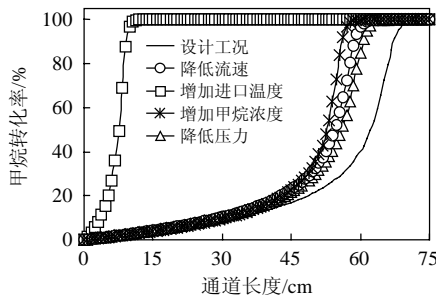


图 8 各种措施比较

Fig. 8 Comparisons of various methods

通过试验数据与数值计算结果的对比分析，可以得出，在部件的几何尺寸及工作条件满足设计要求的情况下，催化燃烧能够实现完全转化；燃烧室进口温度是影响催化燃烧转化率的最敏感因素。

## 5 LBCCGT 系统性能

### 5.1 计算说明

LBCCGT 系统的主要部件如图 1 所示。本文利用 Aspen Plus 模拟软件，并选择 RK-Soave 状态方程，进行系统的特性计算。除催化燃烧室采用自定义的用户单元操作模块外，其他设备均选用 Aspen Plus 内置的单元操作模块。压气机与透平选用 Compr 模块，换热器选用 Heatx 模块。选择用户单元操作模块 User，用 Fortran 语言编写一个子程序，涵盖改进 PFR 模型，建立催化燃烧室模块。

系统性能计算的设计值见表 3。主要选择 3 个独立设计变量，即压气机压比  $\pi$ ，回热器回热度  $\sigma$  以及透平入口温度  $T_{IT}$  进行系统性能优化分析。

### 5.2 压比与透平入口温度对系统性能的影响

常规燃气轮机回热循环中，提高  $T_{IT}$  可显著地提高系统热效率。LBCCGT 热力系统中，在回热度一定条件下，系统热效率、甲烷转化率及比功随  $\pi$ 、 $T_{IT}$  的变化关系如图 9 所示，可以看出：随着  $T_{IT}$  从

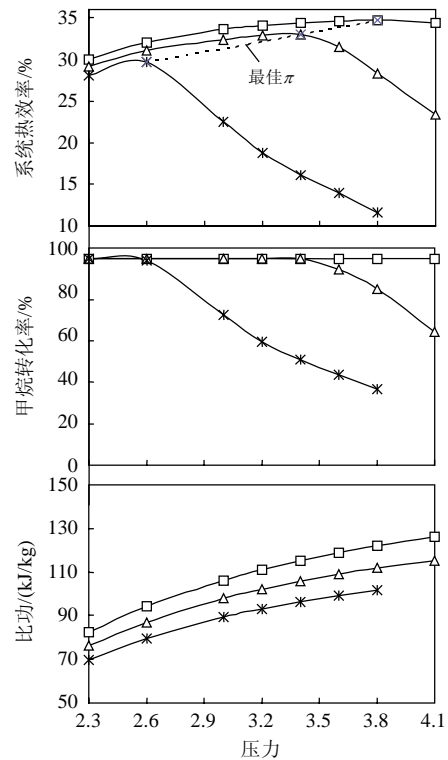
表 3 LBCCGT 系统性能优化计算设计值

Tab. 3 Parameters at design steady point of performance analysis of LBCCGT system

设备	参数	数值
压气机	等熵效率/%	85
	机械效率/%	95
	进口温度/K	293
催化燃烧室	进口通道压力损失系数/%	1.5
	压力损失系数/%	5
	长度/cm	75
	水力直径/cm	50
回热器	回热度	0.85
	冷端压力损失系数/%	3
	热端压力损失系数/%	3
	透平入口温度/K	1 080
透平	等熵效率/%	85
	机械效率/%	95

1 040 K 增加到 1 120 K，最佳  $\pi$  对应的效率升高，且最佳  $\pi$  增大； $T_{IT}$  为 1 120 K 的工况热效率一直占绝对优势，其最大热效率比另外 2 种工况分别提高了 1.7 个百分点及 4.9 个百分点。事实上，由于压气机技术的限制， $\pi$  超过 4.0 的离心压气机设计在目前实际工程中是较难实现的。考虑压气机的可实现性， $T_{IT}$  一定的情况下，随着  $\pi$  的增加，比功在计算范围内逐渐增加； $T_{IT}$  提高时，各  $\pi$  下的比功均增加。

$\sigma$  与  $T_{IT}$  一定时，随着  $\pi$  的增大，透平排气温度



□  $T_{IT}=1120\text{ K}$ ;  $\Delta$   $T_{IT}=1080\text{ K}$ ;  $*$   $T_{IT}=1040\text{ K}$ ;  $\delta=0.85$ 。

图 9 压比与透平入口温度对系统性能的影响  
Fig. 9 Effects of pressure ratio and turbine inlet temperature on the thermodynamic characteristics of LBCCGT system

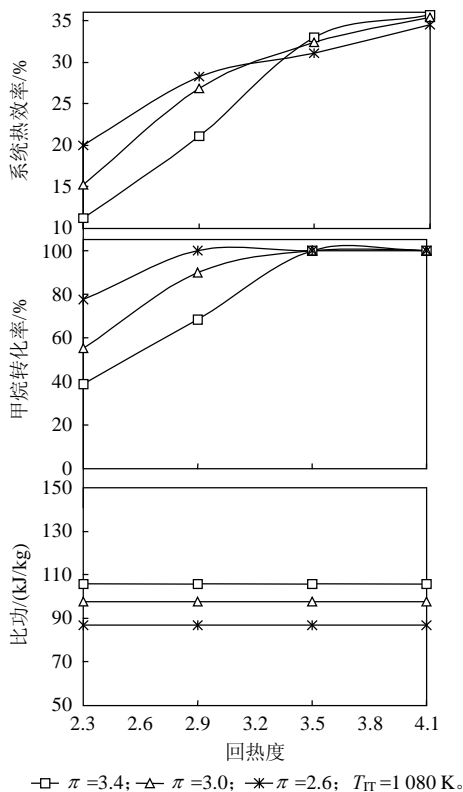
逐渐降低,从而降低回热器冷端的出口温度,即催化燃烧室入口温度  $T_{2a}$ 。根据 4.2 节的分析,  $T_{2a}$  对催化燃烧起着关键作用。 $T_{2a}$  低,对甲烷转化极其不利。为保证甲烷转化率,维持透平的入口温度,只能依靠增加甲烷浓度的措施克服低  $T_{2a}$  的不利影响。 $T_{IT}$  为 1080 K 条件下,随着  $\pi$  增大,  $T_{2a}$  不断减小,达到最大热效率后,甲烷转化率陡然降低,造成系统需求的甲烷浓度急剧增加,从而大大降低了系统热效率; $T_{IT}$  为 1040K 条件下,当  $\pi$  大于 3.8 时,催化燃烧熄火,系统不能正常工作。因而,低  $T_{IT}$  工况相对高  $T_{IT}$  工况的高效区域较窄、工作区域较窄。

从设计角度考虑,催化燃烧室中的催化剂 Pt/ $\gamma$ - $Al_2O_3$  在工作温度低于 850 °C 时具有良好的活性<sup>[20,23]</sup>。因而  $T_{IT}$  不宜太高。

研究表明: $\sigma$  及  $T_{IT}$  一定的情况下,随着  $\pi$  的增加,热效率先增大后减小,存在最佳  $\pi$ ,比功在计算范围内逐渐增加; $T_{IT}$  提高时,最佳  $\pi$  增加,且各  $\pi$  下的热效率均增加,比功均增加;合理优选  $T_{IT}$ ,对系统优化设计至关重要。

### 5.3 回热度与压比对系统性能的影响

$T_{IT}$  一定条件下( $T_{IT}=1080K$ ),系统热效率、甲烷转化率及比功随  $\sigma$  以及  $\pi$  的变化关系如图 10 所示,可



—□—  $\pi=3.4$ ; —△—  $\pi=3.0$ ; —\*—  $\pi=2.6$ ;  $T_{IT}=1080 K$ 。

图 10 回热度与压比对系统性能的影响

Fig. 10 Effects of effectiveness and pressure ratio on the thermodynamic characteristics of LBCCGT system

以看出:在  $\sigma$  一定且小于临界值 0.85 时,  $\pi$  越大,对催化燃烧的影响越大;在  $\sigma$  不同、 $\pi$  一定时,  $\sigma$  越低,系统热效率越低;相同  $\pi$  工况下,比功变化不大,随着  $\pi$  的增加,比功增加。

$T_{IT}$  及  $\pi$  一定的工况下,  $\sigma$  越低,  $T_{2a}$  降低。 $\sigma$  高于 0.85 时,3 种压比工况下,甲烷完全转化; $\sigma$  低于 0.85 时,由于  $T_{2a}$  降低,为保证甲烷转化率,维持透平的入口温度,只能依靠增加甲烷浓度的措施克服低  $T_{2a}$  的不利影响,从而大大降低了系统热效率。

从工程应用角度考虑,过高的回热度会导致回热器体积过大、造价很高、压损增大,如果实际所选取的回热器  $\sigma$  不是很高,可以适当降低  $\pi$ ,提高  $T_{2a}$ ,提高催化燃烧转化率,维持系统相对较高效率。

## 6 结论

1) 利用一维改进 PFR 模型进行催化燃烧特性分析是可行的。

2) 促进催化燃烧的措施有:增加进口温度、降低工作压力、增加进口浓度、降低进口流量(或流速)。在部件的几何尺寸及工作条件满足设计要求的情况下,催化燃烧能够实现完全转化。燃烧室进口温度是影响催化燃烧转化率的最敏感因素。

3) 回热度  $\sigma$  及透平入口温度  $T_{IT}$  一定的情况下,随着压比  $\pi$  的增加,催化燃烧室入口温度  $T_{2a}$  降低。为保证甲烷转化率,维持透平的入口温度,只能依靠增加甲烷浓度的措施克服低  $T_{2a}$  的不利影响,从而大大降低了系统热效率,甚至系统不能正常工作。因而,低  $T_{IT}$  工况相对高  $T_{IT}$  工况的高效区域较窄、工作区域较窄。同时,为保证催化剂具有良好的活性,  $T_{IT}$  也不宜太高。

4)  $T_{IT}$  及  $\pi$  一定的工况下,  $\sigma$  越低,系统热效率越低;在  $\sigma$  一定且小于临界值时,  $\pi$  越大,对催化燃烧的影响越大;如果实际所选取的回热器  $\sigma$  不是很高,可以适当降低  $\pi$ ,提高  $T_{2a}$ ,提高催化燃烧转化率,维持系统较高效率。

## 参考文献

- [1] 娄马宝. 低热值气体燃料(包括高炉煤气)的利用[J]. 燃气轮机技术, 2000, 13(3): 16-18.  
Lou Mabao. The application of low heat value fuel(including blast gas) [J]. Gas Turbine Technology, 2000, 13(3): 16-18(in Chinese).
- [2] 张学镭, 王松岭, 陈海平, 等. 利用粉煤灰吸收剂对烟气脱硫脱氮的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 110-116.  
Zhang Xuelei, Wang Songling, Chen Haiping, et al. Adjustment strategy and performance analysis of gas turbine system when burning medium and low heat value fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,

- 26(19): 110-116(in Chinese).
- [3] Groppi G, Tronconi E, Forzatti P. Investigations on catalytic combustors for gasturbine applications through mathematical model analysis[J]. *Applied Catalysis A: General*, 1996, 138(2): 177-197.
- [4] Hayashi S, Yamada H, Shimodaira K. High-pressure reaction and emissions characteristics of catalytic reactors for gas turbine combustors[J]. *Catalysis Today*, 1999, 26(3-4): 319-327.
- [5] Dalla Betta R A, Rostrup-Nielsen T. Application of catalytic combustion to a 1.5 MW industrial gas turbine[J]. *Catalysis Today*, 1999, 47(1-4): 369-375.
- [6] Kupper W J M, Blaauw E, Berg V D, et al. Catalytic combustion concept for gas turbines[J]. *Catalysis Today*, 1999, 47(1-4): 377-389.
- [7] 冉景煜, 胡建红, 张力, 等. 微细腔内甲烷湿空气预混催化重整产氢特性[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(8): 42-48.
- Ran Jingyu, Hu Jianhong, Zhang Li, et al. Characteristics of generating hydrogen from methane-wet air catalytic reforming reaction in the microcombustor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(8): 42-48(in Chinese).
- [8] Deutschmann O, Behrendt F, Warnatz J. Formal treatment of catalytic combustion and catalytic conversion of methane[J]. *Catalysis Today*, 1998, 46(2-3): 155-163.
- [9] Schmidt L D, Deutschmann O, Goralski Jr. C T. Modeling the partial oxidation of methane to syngas at millisecond contact times [J]. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 1998, 119(1): 685-692.
- [10] Deutschmann O, Schmid L D. Modeling the partial oxidation of methane in a short-contact-time reactor[J]. *AIChE Journal*, 1998, 44(11): 2465-2477.
- [11] Schwiedernoch R, Tischer S, Correa C, et al. Experimental and numerical study on the transient behavior of partial oxidation of methane in a catalytic monolith[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(3-6): 633-642.
- [12] Hickman D A, Schmidt L D. Steps in CH<sub>4</sub> oxidation on Pt and Rh surfaces: High-temperature reactor simulations[J]. *AIChE Journal*, 1993, 39(7): 1164-1177.
- [13] Goralski C T, Schmidt L D. Modeling heterogenous and homogeneous reactions in the high-temperature catalytic combustion of methane[J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(2): 5791-5807.
- [14] Tischer S, Correa C, Deutschmann O. Transient three-dimensional simulations of a catalytic combustion monolith using detailed models for heterogeneous and homogeneous reactions and transport phenomena[J]. *Catalysis Today*, 2001, 69(1-4): 57-62.
- [15] 曾文. 催化燃烧的数值模拟及其在均质压燃\_HCCI\_发动机中应用的基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- Zeng Wen. Numerical simulation of catalytic combustion and its application to HCCI engines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006(in Chinese).
- [16] Zhu H Y. Numerical modeling of methane combustion on Palladium catalyst for gas turbine applications[D]. College Park: University of Maryland, 2001.
- [17] 和彬彬, 段立强, 杨勇平. 回注蒸汽微型燃气轮机系统研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(14): 1-5.
- He Binbin, Duan Liqiang, Yang Yongping. Study on steam injected micro gas turbine system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(14): 1-5(in Chinese).
- [18] 苟晨华, 蔡睿贤, 洪慧. 新型甲醇燃料化学回热燃气轮机循环[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 1-5.
- Gou Chenhua, Cai Ruixian, Hong Hui. A new methanol fuel chemically recuperated gas turbine cycle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 1-5(in Chinese).
- [19] Yoshida Y, Oyakawa K, Aizawa Y, et al. A high-temperature catalytic combustor with starting burner[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(3): 543-549.
- [20] Kolaczkowski S T, Thomas W J, Titiloye J, et al. Catalytic combustion of methane in a monolith reactor: heat and mass transfer under laminar flow and pseudo-steady-state reaction conditions [J]. *Combustion Science and Technology*, 1996, 118(1): 79-100.
- [21] Incropera F P, DeWitt D P. *Fundamentals of heat and mass transfer*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 265-278.
- [22] 刘菊荣, 宋绍富. 汽车尾气净化技术及催化剂的发展[J]. *石油化工高等学校学报*, 2004, 17(1): 31-36.
- Liu Jurong, Song Shaofu. Development of purification technology and catalysts for automotive exhaust[J]. *Journal of petrochemical universities*, 2004, 17(1): 31-36(in Chinese).
- [23] Hayes R E, Kolaczkowski S T. *Introduction to catalytic combustion* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 45-46.



尹娟

收稿日期: 2009-08-11。

作者简介:

尹娟(1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为新能源动力系统仿真与分析, yinjuan@sjtu.edu.cn;  
翁一武(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源动力系统仿真与控制。

(责任编辑 王庆霞)