

# 低热值气体燃料燃烧室数值模拟 与试验研究

何敏, 杨灵, 冯大强, 屈成泽

(中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)



何敏(1976),男,硕士,工程师,从事航空发动机燃烧试验研究。

收稿日期: 2009-06-24

## 1 引言

世界能源格局不断变化,天然气价格不断上涨,与此同时,焦化、煤炭等企业附带产出了大量焦炉煤气、煤层气等一些中、低热值可燃气体。为了安全起见,对低热值燃料大多采取放空和点燃排放的办法,这不仅仍然给环境造成极大污染,也造成能源的巨大浪费。因此,开发以中、低热值气体为燃料的燃气轮机必将产生巨大的社会效益和经济效益,所以

**摘要:**以某型航空发动机燃烧室为研究对象,对低热值燃料燃烧室进行了数值模拟和试验研究。采用 RNG  $k-\epsilon$  模型、小火焰紊流燃烧模型和 P-1 辐射模型,预估了紊流特性、化学反应速率和辐射通量;应用 SIMPLE 算法,对离散方程进行求解。计算结果与试验数据比较表明二者基本吻合,这说明计算方法合理,可用来估算低热值燃料燃烧室的燃烧性能。

**关键词:**低热值燃料;燃烧室;数值模拟;航空发动机;试验

## Numerical Simulation and Experimental Investigation of Aeroengine Combustor Burning Low Calorific Value Gas Fuel

HE Min, YANG Ling, FENG Da-qiang, QU Cheng-ze  
(China Gas Turbine Establishment, Jiangyou 621703 Sichuan, China)

**Abstract:** The numerical simulation and experimental investigation of an aeroengine combustor burning low calorific value gas fuel were conducted. The turbulent flow characteristics, the chemical reaction rate and the radiation flux were preliminarily evaluated by the RNG  $k-\epsilon$  model, the flamelet turbulent flow combustion model, and the P-1 radiation model. The discretization equations were solved by the SIMPLE algorithm. The calculation results are correspondence with the experimental data. This show the method can be used to estimate the combustion performance of the combustor burning low calorific value fuel.

**Key words:** low calorific value fuel; combustor; numerical simulation; aeroengine; experiment

越来越受到广泛的重视<sup>[1-3]</sup>。

气体燃料的来源和产地不同,其热值也就不同,一般称小于  $7536.24 \text{ kJ/m}^3$  为低热值,  $1800 \sim 15072.48 \text{ kJ/m}^3$  为中热值,而大于  $15072.48 \text{ kJ/m}^3$  为高热值<sup>[4]</sup>。黄磷尾气是黄磷在生产过程中排放的尾

气,主要成分为  $\text{CO}$ ,约占 90%左右,其余为水蒸气、粉尘、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )、磷(P)等组分。在燃机实际运行中,黄磷尾气经除尘、干燥、净化等工艺处理,最终进入燃烧室燃烧的基本上为纯的  $\text{CO}$ ,其热值约为  $10000 \text{ kJ/kg}$ ,属低热值燃料。

本文对某型发动机低热值燃料

燃烧室进行了数值模拟和试验研究,所采用的燃料为纯CO气体<sup>[9]</sup>。

## 2 数学模型

某型发动机燃烧室内的流动包含射流、混合流、强旋流及曲壁边界层等一些复杂紊流流动,雷诺数  $Re$  较高,因此湍流模型选择使用 RNG  $k-\varepsilon$  模型。

RNG  $k-\varepsilon$  模型基于重整化群理论,把紊流视为受随机力驱动的输运过程;通过频谱分析,消去其中的小尺度涡,并将其影响归并到黏粘性中,从而得到所需尺度上的输运方程。在高  $Re$  时, RNG 模型的紊流动能  $k$  及其耗散率  $\varepsilon$  的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = G_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = & C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 1} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

紊流涡旋黏性系数为

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

紊流动能产生项为

$$G_k = 2\mu_T \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

时均应变率为

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\bar{u}_i / \partial x_j + \bar{u}_j / \partial x_i + \bar{u}_i \bar{u}_j}{2} \quad (5)$$

5个模型系数为<sup>[9]</sup>

$$C_\mu = 0.085$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42 - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68, \sigma_k = 0.7179$$

$$\sigma_\varepsilon = 0.7179$$

其中

$$\eta = Sk/\varepsilon, S = (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$$

$$\eta_0 = 4.38, \beta = 0.015$$

耗散率  $\varepsilon$  方程源项系数  $C_{\varepsilon 1}$

引入了1个附加产生项,该项主要是考虑流动中的不平衡应变率,能及时反映主流流动情况,对具有大应变率的流动、强曲率影响和壁面约束的紊流分离流动都起着重要作用<sup>[9]</sup>。由于该模型在一定程度上考虑了紊流的各向异性效应,间接改善了对  $\varepsilon$  的模拟,增强了对较复杂紊流(旋流等)流动的预测能力。

本文研究的低热值气体燃料的燃烧与液态燃料的燃烧都属于扩散燃烧,但气态燃料的扩散燃烧与液态燃料的扩散燃烧不同,气体燃料的燃烧中不包含气液2相燃烧,不必先雾化、蒸发再与空气混合。

虽然低热值气体燃料的燃烧不像气液2相燃烧那样复杂,但要对其进行数值计算,必须进行简化,即利用燃烧模型模拟复杂的燃烧过程。由于低热值气体燃料燃烧室内的流动属于湍流流动,其燃烧受湍流脉动的影响,各随机变量如化学组分、气流温度、密度等都是时间和空间连续变化的函数。使用小火焰模型来描述湍流燃烧随机过程,可以大大减少计算时间和计算量。文献[8]采用小火焰模型对低热值燃料的燃烧速率进行模拟,与试验结果吻合得很好,因此,本文选择小火焰模型。

混合分数表示为原子质量分数

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (6)$$

式中:  $Z_i$  为元素  $i$  的质量分数;下标  $ox$  表示氧化剂流入口处的值;  $fuel$  表示燃料流入口处的值。

如果所有组分的扩散系数相等,上式对所有元素都是相同的,且混合分数定义是惟一的。因此,混合分数等于燃料流元素质量分数。

混合分数与组分质量分数、密度及温度之间的关系可表示为

$$\rho \frac{1}{Le} \frac{\varepsilon}{2} \frac{d^2 T}{df^2} = \frac{(-\Delta h)}{C_p} \sum w_i \quad (7)$$

式中:  $Le$  为路易斯数;  $w_i$  为化学组分  $i$  的质量生成率;  $\varepsilon$  为耗散率; 组分质量分数、密度和温度与混合分数的函数关系细节依赖于对系统化学反应的描述。

对于小火焰模型来说,质量混合分数的计算由 PDF 概率密度函数得到。PDF 密度函数为

$$\bar{m}_i = \int m_i(f, \varepsilon) P(f, \varepsilon) d\varepsilon df \quad (8)$$

式中:  $P(f, \varepsilon)$  为概率密度函数。

## 3 试验

### 3.1 试验装置和方法

试验装置包括空气系统、电加热系统、燃料系统、冷却水系统、测试系统及燃烧室试验件等。

燃料系统的试验原理如图1所示。

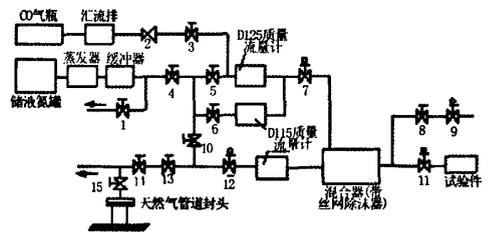


图1 某型发动机燃烧室低热值气体燃料试验原理

试验用的 CO 气体纯度大于 99.5%, 热值约 10000 kJ/kg, 属于低热值燃料。CO 气体从储存 CO 的标准钢瓶引出, 通过汇流排汇集到一起后, 经减压阀 2、手动阀 3 进入 DI25 质量流量计, 由其测量流量, 再经电动阀 7 进入混合器, 最后经电动阀 11 进入试验件。为防止 CO 中混入空气(进入试验件会发生危险), 在试验中, 于供 CO 之前, 用氮气通过电动阀 11 排出燃料管道内的空气。

燃烧室试验件由前后测量转接段、单管燃烧室(如图 2 所示)、双燃料喷嘴(如图 3 所示)、高能点火系统等主要部件组成。在前测量转接段上, 设置了进口气流总压、静压和总温测点; 在后测量转接段上, 设置了位移机构, 用以测量燃烧室出口温度和总压。

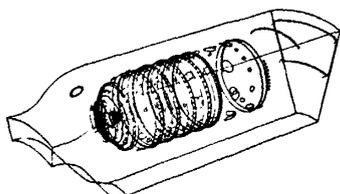


图 2 单管燃烧室

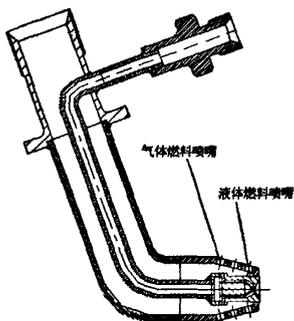


图 3 双燃料喷嘴

模拟成分在试验时, 先向试验件提供煤油, 并在常压点火; 着火后, 调节试验件进口空气状态; 待试验件进口空气调节到试验

状态后, 向试验件内供 CO 气体进行燃烧, 同时, 减少燃油供应直至停止供油, 再进行试验状态调节。

### 3.2 计算结果及分析

纵切面燃烧室内气流的速度矢量如图 4 所示。从图中可以看到, 从环腔内通过主燃孔进入火焰筒的气流流速很高, 在主燃孔附近处形成 1 个气柱状的射流, 有着明显的穿透深度, 对经旋流器的气流有着明显的阻滞作用, 这有利于回流区的形成; 经主燃孔射入火焰筒的空气有一小部分进入火焰筒头部的回流区, 大部分则顺流流向下游; 火焰筒内气流的低速区主要是在火焰筒头部, 由旋流器进入火焰筒的气流和经主燃孔进入火焰筒的气流在火焰筒头部形成 1 个明显的回流区, 回流区内气流速度很低, 而在掺混区的则速度较高。

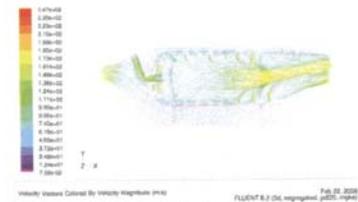


图 4 纵切面燃烧室内气流的速度矢量

纵切面燃烧室内的温度如图 5 所示。从图中可以看到, 火焰前锋在回流区与顺流区的过渡处, 且随着气流流动向火焰筒中心处集中, 且火焰拖长。燃烧室出口温度分布与试验结果比较, 其燃烧室出口温度分布趋势基本相同, 中心区域温度较高, 如图 6 所示。

燃烧效率随余气系数的变化如图 7 所示。对燃烧效率可采用温升法(即实际温升与理论温升的比值)计算, 其表达式为

$$\eta = \frac{T_{14} - T_{13}}{T_{14th} - T_{13}} \quad (9)$$

式中:  $T_{14}$  为实际燃烧室出口平均温度;  $T_{13}$  为燃烧室入口平均温度;  $T_{14th}$  为理论计算的(完全燃烧时)燃烧室出口平均温度, 利用燃烧过程前后的焓值守恒计算得到<sup>[9]</sup>。

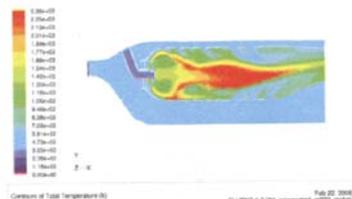
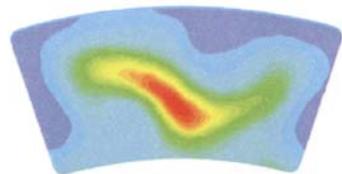


图 5 纵切面燃烧室内温度



(a) 试验结果



(b) 计算结果

图 6 燃烧室出口温度场分布

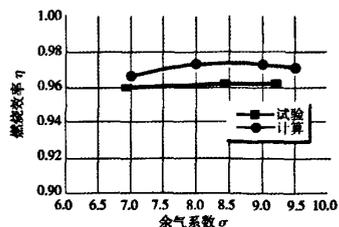


图 7 燃烧效率随余气系数的变化

当余气系数约为 8.5 时, 其火焰筒头部为化学恰当比。从图 7 中可以看到, 数值(下转第 44 页)

表1 燃气轮机间冷回热部分参数

型号	循环特征	低压压比	高压压比	涡轮前温度 /K	间冷温降 /°C	回热温升 /°C	热效率 /%	功率 /kW
WR-21	间冷回热	3.88	4.44	1500	106	227	41.16	19686
LMS100	间冷	3.39	12.40	1516	96	18	44.20	100000

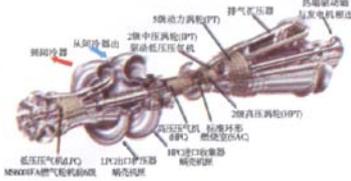


图6 LMS100 燃气轮机

由表1可见,WR-21燃气轮机高压压气机和低压压气机的压比相差不大,使得间冷后的高压压气机出口温度远远低于动力涡轮的出口温度,使回热温升值较大,为进行回热循环创造了条件;LMS100燃气轮机高压压气机压比远大于低压压气机压比,使得间冷后的高压压气机出口温度与动力涡轮的出口温度相差不大,回热温升值小,没有条件进行回热循环。

经研究发现,太行航空发动机具备形成完整的舰船用燃气轮机型谱的条件。由其发展大功率、高效率舰船用燃气轮机,要充分利用母型航机成熟的核心机部件。太行发动机高、低压压比相差较大,对保持太行发动机核心机不变的燃气轮机改进方案来说,选择与LMS100燃气轮机同样的间冷循环会收到明显的效果。目前,正在进行采用间冷(IC)方案的航改舰船用燃气轮机研究,并

表2 与世界同档功率先进燃气轮机技术参数比较

参数	间冷燃气轮机方案	WR-21	MT-30	LM6000PC
功率/kW	39984	24880	35482	42138
热效率/%	42.4	42.1	39.8	42.1
装舰对象		英45型导弹驱逐舰	DD1000驱逐舰	DD21航母

注:在ISO状态下,不考虑进、排气损失。

进行了大功率、高效率间冷燃气轮机的方案论证,所确定的1.0工况下间冷燃气轮机的性能见表2。

#### 4 结束语

分析国内外ICR燃气轮机发展现状,可以认为中国开发大功率、高效率间冷燃气轮机不仅是十分必要的,而且可以实现的。

#### 参考文献

[1]朱行健,王雪瑜.燃气轮机工作原理及性能[M].北京:科学出版社,  
[2]梁春华.ICR舰船用燃气轮机WR-21的技术特点[J].航空发动机,2006,33(1):55-58.  
[3]张忠文.舰船燃气轮机技术的发展途径[J].航空发动机,2009,35(6).

(上接第41页)计算求得的燃烧效率略高于试验值,由于未考虑对外界环境的对流换热,因此也会对计算结果产生一定的影响。

#### 4 结束语

本文的数值计算结果有助于了解燃烧室内在燃烧低热值气体燃料时的燃烧流动情况,可为低热值气体燃料燃烧室设计和试验提供参考。但数值计算模型是按照绝热考虑的,未考虑机匣壁面与外界空气的对流换热,因此本文的研究方法还需进一步改进。

#### 参考文献

[1]朱世澜.国外中、低热值气体燃料开发及应用于燃气轮机的概况[J].燃气轮机技术,1991,4(2):16-22.  
[2]Gaseous fuels Capability of Industrial Gas Turbines [C].ASME Paper No 85-IGT-129.  
[3]Development and Application of Industrial Gas Turbines for Medium-Btu Gaseous Fuels [C].ASME Paper No 85-GT-28.  
[4]焦树建.燃气-蒸汽联合循环[M].北京:机械工业出版社,2000.  
[5]冯大强,等.中低热值燃料燃烧技术研究[J].航空发动机,2010,36(1).  
[6]Speziale C G,Thangam S. Analysis of an RNG Based Turbulence Model for Separated Flows [J].Int. J. Engng. Sci.,1992. 30(10):1379~1388.  
[7]陈庆光,徐忠,张永建. RNG k-ε 模式在工程紊流数值计算中的应用[J].力学,2003,24(1):88-95.  
[8]Takahisa Yamamoto, Low Heating Value Fuel Combustion:Flamelet Combustion Model and NO Formation [J].Journal of Propulsion and Power,2006,22(1).  
[9]金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1988:17.