

文章编号: 1000-8055(2005)01-0111-05

用数值计算方法对出口温度 与压力指数关系的研究

田学清, 黄伟光

(中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 通过对两种不同类型的燃气轮机燃烧室的数值计算, 研究了不同燃烧类型对燃气轮机燃烧效率模化试验中压力指数选取的影响, 结果表明压力指数除受到燃料、余气系数等影响之外, 燃烧类型对其也有很大影响。对于以碳氢化合物为燃料, 化学动力学控制类型燃烧室模化中 n 值相对较大, 范围为 $1.6 \sim 2.0$ 。当燃烧过程受扩散火焰控制时, n 值相对较小, 范围为 $1.0 \sim 1.4$ 。

关键词: 航空、航天推进系统; 出口温度; 压力指数; 数值计算

中图分类号: V 231.2

文献标识码: A

Numerical Study of the Relationship between Pressure Exponent n and Combustor Exit Temperature

TIAN Xue-qing, HUANG Wei-guang

(Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: By numerical simulation of two different gas turbine combustors, the selection of pressure exponent n in combustion efficiency simulation test was investigated. It is suggested that for hydrocarbon fuel, the pressure exponent n may be selected in the range of $1.6 \sim 2.0$, when the combustion process is reaction-controlled. When the combustion process is diffusion-controlled, the range of $1.0 \sim 1.4$ is suggested. The result is useful for the model test of gas turbine combustors.

Key words: aerospace propulsion system; exit temperature; pressure exponent; numerical calculation

燃气轮机燃烧室的工作过程非常复杂。由于目前燃烧室预研中的实验条件和科研条件的经费有限, 在燃烧室的设计过程中, 不能仅仅依靠现有的燃烧理论和经验以及在此基础上建立的燃烧室设计方法, 还必须在进行设计的同时进行大量的试验验证。为了降低试验成本、缩短试验周期, 就

需要根据模化理论进行模化实验。关于燃烧效率的模化已经建立了一些半理论、半经验的关系式, 并用于指导试验。在这些形式相似的关系式中, 对于模化中压力指数的选取有不同的结论^[1]。压力指数的物理意义为一个有效的化学反应级数, 除受到燃料、余气系数等影响之外, 燃烧的类型对其

收稿日期: 2004-04-05; 修订日期: 2004-05-08

联系人: 黄伟光

作者简介: 田学清(1978-), 男, 湖北荆州人, 中国科学院工程热物理研究所硕士生, 主要从事燃烧室模化方面研究

也有很大影响。本文通过对: (1) 化学动力学控制; (2) 扩散控制的两种类型燃烧进行数值模拟分析, 讨论燃烧效率模化中压力指数与燃烧类型的关系。对于碳氢燃料而言, 如果燃烧过程主要受化学反应动力学过程控制, 其压力指数 n 的值相对于扩散控制的燃烧室的值应取得较高, 当燃烧过程主要受到扩散混合过程控制时, 压力对燃烧过程的影响相对减少, n 就取得较小。

1 燃烧效率的模化理论

关于燃烧效率的模化, 主要从两种理论基础进行探讨, 一种是燃烧速度理论, 也叫火焰传播理论, 另一种是均相反应速率理论^[2,3]。

1.1 燃烧速度理论

燃烧速度理论假设: 燃烧特性由燃烧速度与气体速度的比值决定; 大尺度与小尺度的湍流脉动均对燃烧速度有影响。研究对象限于预混气体。由于小尺度湍流脉动加强了燃烧区域中的输运过程, 进而影响到燃烧速度:

$$S_T = k S_L \sqrt{Re} \quad (1)$$

其中 S_L 为层流燃烧速度, S_T 为考虑小尺度湍流脉动时的湍流燃烧速度, k 为常数, Re 为雷诺数。考虑大尺度湍流的影响, 湍流燃烧速度为:

$$S_T = \sqrt{2 \cdot S_L \cdot \tilde{u}} \quad (2)$$

其中: $\tilde{u}$ 为湍流脉动速度的均方根。

当燃料燃烧时其放出的全部热量为 $f q_m H_u$, 其中 f 为燃料-空气比, q_m 为进入燃烧室的空气质量流量, H_u 为燃料的低热值。而实际燃烧的放热为: $\rho A_F S_T C_p \Delta T$, 其中 ρ 为燃烧室入口空气密度, A_F 为火焰面积, C_p 为燃烧室混合气体质量定压热容, ΔT 燃烧引起的温度升高值。燃烧效率:

$$\eta = \frac{\rho A_F S_T C_p \Delta T}{f q_m H_u} \quad (3)$$

在简单分析的情况下, 假定燃料燃烧放热均用于使温度升高, 有 $f H_u = C_p \Delta T$, 而:

$$\eta = \frac{\rho A_F S_T}{q_m} =$$

$$\sqrt{\frac{2k \cdot \rho^2 \cdot A_F^2 \cdot \tilde{u} \cdot S_L \cdot Re^{0.5}}{q_m^2}} \quad (4)$$

又由于雷诺数

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{q_m D}{\mu A} = \frac{q_m D}{k^2 A T^{0.75}} \quad (5)$$

其中粘性系数随温度的变化为:

$$\mu = k_1 T^{0.75} \quad (6)$$

大尺度湍流中脉动速度均方根:

$$\tilde{u} = \sqrt{\frac{2k_2 g \Delta P}{\rho}} \quad (7)$$

式中: k_2 为压降中用于增强湍流脉动的百分数。

对于给定的燃料-空气比, S_L 与进口温度、压力有关:

$$S_L \propto f(T_1) P^{(n-2)/2} \quad (8)$$

动压头:

$$d = \frac{\rho U^2}{2g} = \frac{q_m^2}{2g A^2} \quad (9)$$

将公式(5)~(9)代入(4)式, 并考虑到燃烧室截面积 $A \propto A_F$, 整理可得到燃烧效率的表达式:

$$\eta \propto f(\alpha) \left[\frac{P^n f(T_1) A D}{q_m} \cdot \frac{k_2 \Delta P}{d} \right] \quad (10)$$

在燃料和余气系数相同、几何尺寸相同、进口温度相同的燃烧室模化中, 该表达式常常简化为:

$$\eta \propto f \left(\frac{P^n}{q_m} \right) \quad (11)$$

1.2 化学反应速率理论

Longwell 等^[2]考虑了一个稳态反应器, 未燃混合物以一定速度进入燃烧室后立刻与燃烧室内的气体均匀混合。对这样一个强烈扰动的燃烧过程来讲, 其燃烧过程主要由化学反应速率控制。对煤油在空气或在燃烧产物中得到的燃烧反应速率方程式, 得到反应级数为 1.75^[3], 如下关系式:

$$\frac{q_m}{V P^{1.75}} \propto \exp \frac{T_1}{b} \quad (12)$$

根据 Herbert 的经验公式^[3]:

$$b = 220 \left[\sqrt{2} \pm \ln \frac{\Phi}{1.03} \right] \quad (13)$$

式中: T_1 为进口温度, “+”和“-”分别对应 $\Phi < 1.03$ 和 $\Phi > 1.03$, Φ 为当量比。

2 化学动力学控制类型燃烧的数值模拟

本文通过采用不同压力指数对同一工作状态点进行不同压力下的模化, 通过比较其模化出口平均温度来评价不同压力指数的优劣。如果压力指数选取恰当, 计算所得的模化流量应能在一定的压力范围内使停留特征时间与化学反应特征时间的比值保持一定, 则模拟燃烧的效率应与原型燃烧室的燃烧效率保持一致, 其出口温度应与原型燃烧室的出口平均温度保持一致。

2.1 数学模型及化学反应机理

本文采用型化学反应动力学软件包 CHEM -

KN III^[4]中的相关模型和子程序, 采用 PSR^[5] (Perfectly Stirred Reactor) 模型对预混型燃烧室燃烧过程进行数值模拟。在该模型中, 反应器中的化学反应速率仅仅取决于化学反应动力学, 而不依赖于扩散混合过程。基本控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \dot{m}^{\circ\circ} - \dot{m}^{\circ} \tag{14}$$

组分守恒方程:

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{Y_k^{\circ} - Y_k}{\tau} + \frac{\omega_k W_k}{\rho} \tag{15}$$

$k = 1, \cdots, K_g$

式中: ρ 为密度, V 为反应器体积, $\dot{m}^{\circ\circ}$ 与 $\dot{m}^{\circ}$ 分别为入口与出口的质量流率。 Y_k° 与 Y_k 分别为第 k 种组分在入口与出口处的质量分数, W_k 为第 k 种组分的分子量, ω_k 为单位体积内第 k 种组分气相化学反应的摩尔生成率。 τ 为停留时间。

混合气体满足如下的状态方程:

$$p = \sum_{k=1}^{K_g} \rho R \frac{Y_k}{W_k} T_k \tag{16}$$

混合气体能量方程:

$$\begin{aligned} \bar{C}_p \frac{dT}{dt} = & \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{K_g} Y_k^{\circ} (h_k^{\circ} - h_k) - \\ & \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{K_g} h_k \omega_k W_k \end{aligned} \tag{17}$$

式中: h_k° 与 h_k 分别为入口与出口处第 k 种组分的比焓, $\bar{C}_p$ 为混合气体质量平均定压热容, 定义为: C_{pk} 为第 k 种气体的质量定压热容。

本文采用美国的 GR Mech3^[6] 机理, 由 53 种组分和 325 个基元反应构成。

2.2 燃料为 CH₄ 的数值模化试验

对一个化学反应控制的燃烧室用 PSR 模型进行了数值模化“实验”。选定一个工作状态作为模化的“原型”参数, 保持余气系数, 入口温度, 燃烧室尺寸等条件不变。逐步降低压力, 分别按照压力指数 $n = 1.15, 1.40, 1.60, 1.75$ 计算相应的模化流量, 然后比较在各个模化压力下由不同模化流量得到的模化结果(出口平均温度)。按照模化关系式(11), 当在低压下模化时, 流量随压力而降低, 同时当压力降低时化学反应速率随之降低, 如果模化的关系式(压力指数)选取恰当, 模拟燃烧室的效率应与原型燃烧室的燃烧效率保持一致, 其出口温度应与原型燃烧室的出口平均温度保持一致。从计算结果(见图 1)可以看到, 在所研究燃

烧室中采用甲烷气体为燃料时采用压力指数 $n = 1.6 \sim 1.75$ 进行模化较之 $n = 1.15, 1.40$ 可以使模化的结果在更加宽广的压力范围内与原型燃烧室的平均出口温度保持一致, 也就是说对于该类型的燃烧室内的 CH₄/Air 燃烧模化而言, 模化的压力指数选取 $1.6 \sim 1.75$ 比较合适。

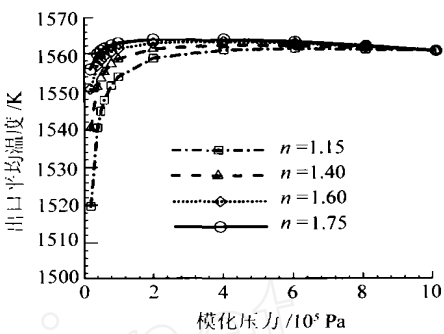


图 1 燃烧为甲烷时, 不同 n 指数下的出口温度随模化压力的变化曲线
Fig. 1 A average outlet temperature versus pressure under different pressure exponents (fuel-CH₄)

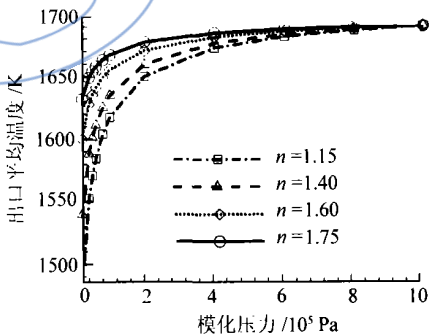


图 2 燃烧为合成气时, 不同 n 指数下的出口温度随模化压力的变化曲线
Fig. 2 A average outlet temperature versus pressure under different pressure exponents (synthetic gas)

2.3 合成气燃料的计算结果

对于成分如表 1 所示的合成气, 分别按照压力指数 $n = 1.15, 1.40, 1.75, 2.0$ 进行上述的计算, 其结果如下, 在预混型燃烧室中合成气/空气燃烧的模化, 采用 $n = 2.0$ 左右进行模化较之较小的值在更加宽广的压力范围内保持相同的出口温度, 也就是说对于该类型的燃烧室内的合成气/空气燃烧模化而言, 模化的压力指数选取 2.0 左右比较合适。

表 1 合成气成分
Table 1 Ingredient of synthesis gas

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂
18.3%	6.9%	2.5%	12.9%	3.0%	56.3%

表 2 同一类型燃烧室出口平均温度及相应采用不同压力指数的模化结果对比
Table 2 Comparison of simulation result in exit temperature of the same type combustor with different pressure exponent

模化压力/ P_a	0.3 P_0	0.5 P_1	0.8 P_2	0.3 P_0	0.5 P_1	0.8 P_2	0.3 P_0	0.5 P_1	0.8 P_2
压力指数 $n=1.00$	1 328	1 326	1 324.9	855	841	832.4	837	829	824.1
压力指数 $n=1.15$	1 330	1 326	1 325.1	897	867	847.6	862	844	832.8
压力指数 $n=1.75$	1 345	1 329	1 325.3	959	887	851.4	905	856	832.9
原型燃烧室出口温度/K	1 324.6			841.3			829.3		

对于化学动力学控制的燃烧室的模化中, 压力指数 n 的范围随燃料的不同而有所不同, 但范围大致在 1.6~2.0 之间, 如选取较小的 n 值如 1.15, 则模化的出口温度将在较大的范围内与“真实”燃烧室的出口温度有较大偏差。该结论与 Longwell 等以及 Woodward 的试验结论一致。Longwell 与 Weiss 给出碳氢化合物燃料在均匀球形反应器中最恰当的 n 值为 1.8, Woodward 在一组采用丙烷燃料, 并带有预混装置的燃烧室试验中, 得到 n 值在 1.6~1.7 之间^[7]。

3 扩散控制型燃烧的数值模拟

对于扩散控制型燃烧的数值计算, 采用 Fluent 公司的 Fluent6.0 进行, 湍流采用标准湍流模型, 燃烧采用有限速率化学反应/Eddy Dissipation 模型。燃烧室为轴对称结构, 燃料和空气分别喷入燃烧室中。在不同的入口温度、压力 P_0 、燃料及空气流量等条件下计算原型燃烧室的几个不同状态点。然后分别对其采用不同的压力指数进行模化计算。模化时保持燃烧室尺寸、燃料和空气入口温度, 余气系数相同, 然后分别根据压力指数为 $n=1.0, 1.15, 1.75$ 计算模化压力分别为 0.3 $P_0, 0.5 P_1, 0.8 P_2$ 时相对应的模化流量, 根据各模化流量计算出燃烧的平均出口温度, 与原状态点的出口平均温度进行对比。部分结果见表 2。由表 2 结果可见: 对于扩散控制的燃烧的模化, 压力指数选取 1.0 附近能获得较好的模化结

果。上述结论与 Woodward 在一组采用丙烷燃料的扩散控制型燃烧试验结论相一致。其实验结论指出最恰当的压力指数值 n 在 1.0~1.4 之间^[7]。

4 结论与展望

对燃气轮机燃烧效率模化试验中应采用的压力指数值通过数值模拟进行了分析, 其结论如下:

(1) 燃料对模化的压力指数有一定影响, 对于预混型燃烧中甲烷/空气混合物或合成气/空气混合物, 燃烧过程主要由化学反应动力学控制, 其压力指数的选取范围在 1.6~2.0 较为合适。对于扩散控制类型燃烧压力指数相对较小, 对于本任务所采用的燃烧则可以选择 1.0 左右较为适合。

(2) 传统燃气轮机燃烧通常是扩散控制型为主, 因此可以选择较低的 n 值进行模化。但随着环境污染问题的日益严重, 为降低燃气轮机燃烧的 NO_x 的排放而发展的干式低排放(DLE)燃烧室则采用了“贫预混”的方式, 至少 75% 的燃料在贫燃料预混条件下燃烧^[8]。在这种类型的燃烧室的效率模化试验中选取模化的压力项指数时, 就应选取较大的 n 值。

(3) 当几何尺寸保持不变, 在按照一定的压力指数进行低压模化时, 流量会随压力减少。在这种情况下应考虑在流场中某些 Re 数较小的区域(如气膜冷却孔), 应保持模化中流动不会由湍流变为层流而使流场的模化结果失去意义。



参考文献

[1] 姜伟, 赵士杭, 庞为, 等 燃气轮机原理、结构与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002

[2] 金如山 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988

[3] 侯晓春, 季鹤鸣, 刘庆国, 等 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002

[4] Greenhough V W, Lefebvre A H. Some Applications of Combustion Theory to Gas Turbine Development[C]. Sixth Symposium (International) on Combustion, 1956: 858~869

[5] Koutmos P, McGuirk J J. Isothermal Modeling of Gas Turbine Combustor: Computational Study [R]. Propulsion, 1983

[6] Kee R J, Rupley F M, Meeks E, et al CHEMKIN - III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gasphase Chemical and Plasma Kinetics [R]. Sandia National Lab Report No SAND 96- 8216, 1996

[7] Meeks E, Morfath H K, Grcar J F, et al Aurora: A Fortran Program for Modeling Well Stirred Plasma and Thermal Reactors with Gas and Surface Reactions [R]. Sandia National Lab Report No SAND 96- 8218, 1996

