

研究报告

# 燃气轮机燃烧室效率模化试验中压力指数的研究

杨锐<sup>1</sup>, 王应时<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026;  
2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

**[摘要]** 通过对2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室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, 燃烧类型也有很大影响。对于以碳氢化合物为燃料, 化学反应控制类型燃烧室模化中  $N$  值相对较大, 大致范围为 1.6~2.0。当燃烧过程受扩散控制时,  $N$  值相对较小, 大致范围为 1.0~1.4。

**[关键词]** 燃烧室效率模化试验; 压力指数; 数值模拟

**[中图分类号]** TK477 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)10-0083-05

## 引言

燃气轮机燃烧室的工作过程非常复杂。在燃烧室的设计过程中, 不能仅仅依靠现有的燃烧室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方法<sup>[1]</sup>。压力指数代表一个有效的化学反应级数。它除受到燃料、余气系数等影响之外, 燃烧的类型也有很大影响。作者通过对 a. 化学反应控制; b. 扩散控制 2 种类型燃烧室进行数值模拟分析, 讨论燃烧室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动力学过程控制, 其压力指数  $N$  相对于扩散控制燃烧室的  $N$  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。因此在决定燃烧室效率模化试验的压力指数时, 除了其他因素外还应该考虑燃烧类型的影响。

## 1 燃烧效率的模化理论

关于燃烧效率的模化, 主要从两种理论进行探讨, 一种是火焰传播速度理论, 另一种是均相化学反应速率理论<sup>[2,3]</sup>。

### 1.1 火焰传播速度理论

火焰传播速度理论假设: 燃烧特性由火焰传播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火焰传播速度有影响。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, 进而影响到火焰传播速度:

$$S_t = kS_L \sqrt{Re}, \quad (1)$$

其中  $S_L$  为层流火焰传播速度,  $S_t$  为考虑小尺度湍流脉动时的湍流火焰传播速度,  $k$  为常数,  $Re$  为雷诺数。

考虑大尺度湍流的影响, 湍流火焰传播速度为

$$S_T = \sqrt{2 \cdot S_t \cdot \bar{u}}, \quad (2)$$

其中  $\bar{u}$  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  $fG_B H_u$ , 其中  $f$  为燃料-空气比,  $G_B$  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  $\rho$  为燃烧室入口空气密度,  $A_f$  为火焰面积,  $C_p$  为燃烧室混合气体定压比热,  $\Delta T$  为燃烧引起的温度升高值。燃烧效率:

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

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

$$\eta = \frac{\rho A_f S_T}{G_B} = \sqrt{\frac{2k \cdot \rho^2 \cdot A_f^2 \cdot \bar{u} \cdot S_L \cdot Re^{0.5}}{G_B^2}} \quad (4)$$

又由于雷诺数

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{G_B D}{\mu A} = \frac{G_B D}{k_1^2 A T^{0.75}} \quad (5)$$

其中粘性系数随温度的变化为

$$\mu = k_1^2 T^{0.75} \quad (6)$$

大尺度湍流中脉动速度均方根

$$\bar{u} = \sqrt{2k_2 \Delta P / \rho} \quad (7)$$

$k_2$  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:

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

$$\text{动压头} \quad d = \frac{\rho U^2}{2} = \frac{G_B^2}{2\rho A^2} \quad (9)$$

将式(5)~式(9)代入式(4), 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

$$\eta^2 \propto f(\alpha) \left( \frac{2k}{k_1} \frac{A_f^2}{A^2} \right) \left[ f(T_1) \cdot \frac{k_2 A D \Delta P}{d} \cdot \frac{P^N}{G_B} \right]^{0.5} \quad (10)$$

在燃料、余气系数、几何尺寸相同及进口温度均相同的燃烧室模化中, 该表达式常常简化为

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

## 1.2 均相化学反应速率理论

Longwell 等<sup>[2]</sup> 考虑了一个完全扰动反应器 (well stirred reactor), 未燃混合物以一定速度进入反应器后立刻与反应器内的气体均匀混合。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<sup>[3]</sup>, 如下关系式:

$$\frac{G_B}{VP^{1.75}} \propto \exp \frac{T_1}{b} \quad (12)$$

根据 Herbert 的经验公式<sup>[3]</sup>:

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

$T_1$  为进口温度, “+”、“-” 分别对应  $\phi < 1.03$  和  $\phi > 1.03$ ,  $\phi$  为当量比。

## 2 化学反应控制类型燃烧室的数值模拟

作者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。

### 2.1 数学模型及化学反应机理

作者采用美国 Sandia 国家实验室开发的大型化学反应动力学软件包 CHEMKIN III<sup>[4]</sup> 中的相关模型和子程序, 采用 PSR<sup>[5]</sup> (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

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = m^* - m \quad (14)$$

组分守恒方程

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{Y_k^* - Y_k}{\tau} + \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho} - Y_k \left( \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\bar{W}} \frac{d\bar{W}}{dt} \right) \quad (15)$$

$$k = 1, \dots, K_g$$

式中  $\rho$  为密度;  $V$  为反应器体积;  $m^*$  与  $m$  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;  $\dot{\omega}_k$  为单位体积内第  $k$  种组分气相化学反应的摩尔生成率;  $\tau$  为停留时间;  $\bar{W}$  为混合气体平均分子量。

混合气体满足如下的状态方程:

$$p = \rho R T \sum_{k=1}^{K_g} \frac{Y_k}{W_k} \quad (16)$$

混合气体能量方程

$$\bar{c}_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{K_g} Y_k^* (h_k^* - h_k) - \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{K_g} h_k \dot{\omega}_k W_k \quad (17)$$

$h_k^*$  与  $h_k$  分别为入口与出口处第  $k$  种组分的比焓,  $\bar{c}_p$  为混合气体平均比热, 定义为

$$\bar{c}_p = \sum_{k=1}^{K_g} Y_k C_{pk}, \quad c_{pk} \text{ 为第 } k \text{ 种气体的定压比热。}$$

在计算中作者应用美国加州大学 Berkeley 分校提出的 GRI-Mech3.0<sup>[6]</sup> 天然气燃烧化学反应动力学机理来表述化学反应过程。该机理由 53 种组分和 325 个基元反应构成。

### 2.2 燃料为甲烷的数值模化试验

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) 可知, 在所研究燃烧室中采用甲烷气体为燃料时选取压力指数  $N=1.6 \sim 1.75$  进行模化, 较之  $N=1.15, 1.40$  可以使得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  $\text{CH}_4$ /空气燃烧模化而言, 模化的压力指数选取  $1.6 \sim 1.75$  比较合适。

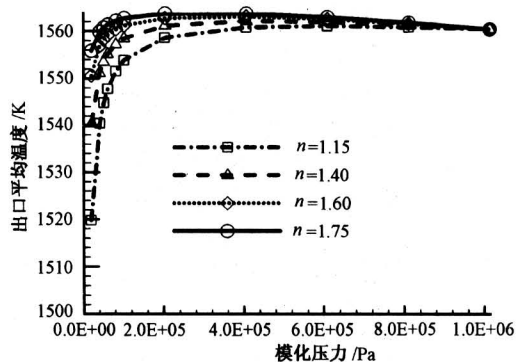


图 1 燃料为甲烷时, 不同  $N$  指数下的出口温度随模化压力的变化曲线

Fig.1 Average outlet temperature versus pressure under different pressure exponents (fuel- $\text{CH}_4$ )

### 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, 结果表明: 在预混型燃烧室中合成气/空气燃烧, 采用  $N=2.0$  左右进行模化较之较小的  $N$  值能在更宽广的压力范围内保持相同的出口温度, 也就是说压力指数选取  $2.0$  左右比较合适 (见图 2)。

表 1 合成气成分

Table 1 Composition of the synthetic gas $\varphi/\%$					
CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
18.3	6.9	2.5	12.9	3.0	56.3

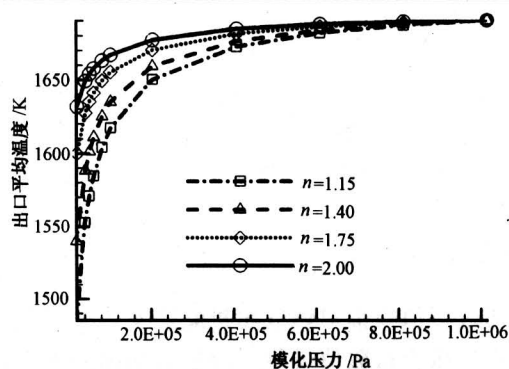


图 2 燃料为合成气时, 不同  $N$  指数下的出口温度随模化压力的变化曲线

Fig.2 Average outlet temperature versus pressure under different pressure exponents (synthetic gas)

对于化学反应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  $1.6 \sim 2.0$  之间, 如选取较小的  $N$  值, 比如  $1.15$ , 则模化的出口温度将与“真实”燃烧室的出口温度有较大偏差, 与 Longwell 等以及 Woodward 的试验结论一致。Longwell 与 Weiss 给出在完全扰动反应器中最恰当的  $N$  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  $1.6 \sim 1.7$  之间<sup>[7]</sup>。

### 3 扩散控制型燃烧室的数值模拟

对于扩散控制型燃烧室的数值计算, 采用 Fluent 公司的 Fluent6.0 进行, 湍流采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 燃烧采用 Laminar Flamelet 模型。燃烧室为轴对称结构, 甲烷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,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  $0.3P_0, 0.5P_0, 0.8P_0$  时相对应的模化流量,再根据各模化流量计算出燃烧室的平均出口温度并与原状态点的出口平均温度进行对

比。由表2结果可知:对于燃料为甲烷的扩散控制燃烧室的模化,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室试验结论相一致。其实验结论指出最恰当的压力指数值  $N$  在1.0~1.4之间<sup>[7]</sup>。

表2 采用不同压力指数时所得到的出口平均温度模化结果(甲烷燃料)

Table 2 Modeling results of the outlet temperature of the combustor (fuel-CH<sub>4</sub>)

压力指数		模化压力								
		0.3P <sub>0</sub>	0.5P <sub>0</sub>	0.8P <sub>0</sub>	0.3P <sub>0</sub>	0.5P <sub>0</sub>	0.8P <sub>0</sub>	0.3P <sub>0</sub>	0.5P <sub>0</sub>	0.8P <sub>0</sub>
平均出口温度/K	N=1.00	1328	1326.1	1324.9	855	841	832.4	837	829	824.15
	N=1.15	1330.1	1326.5	1325.1	897	867	847.6	862	844	832.8
	N=1.75	1345.4	1329.1	1325.3	959	887	851.4	905	856	832.9
原型燃烧室出口温度/K		1324.6			841.3			829.3		

## 4 结论与讨论

通过数值模拟对燃气轮机燃烧室效率模化试验中采用的压力指数值进行了分析,得出如下结论:

1) 燃料对模化的压力指数有一定影响,对于预混型燃烧室中甲烷\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室,压力指数相对较小,选用1.0左右较为适合。

2) 传统燃气轮机燃烧室通常是扩散控制型为主,因此可以选用较低的  $N$  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室的NO<sub>x</sub>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<sup>[8]</sup>。在这种类型的燃烧室的效率模化试验中应选取较大的  $N$  值。

3) 当几何尺寸保持不变,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流场中某些 Reynolds 数较小的区域(如气膜冷却孔),应保持模化中流动模式不会由湍流变为层流而使流场的模化结果失去意义。

致谢:本课题是根据中国科学院知识创新工程重大项目“煤炭联产系统中动力生产核心技术研发”和国家“八六三”计划“煤气化发电与甲醇联产系统关键技术的研发与示范”项目的需要提出并获得经费支持。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] Greenhough V W, Lefebvre A H. Some applications of combustion theory to gas turbine development [A]. Sixth Symposium (International) on Combustion [C]. Yale University, New Haven, Connecticut, 1956, 858~869
- [3] 周慧仙.燃气轮机燃烧室模化实验分析[A].上海市机械工程学会编.燃气轮机燃烧室试验技术专题学术会议论文选集[C].北京:中国工业出版社,1964
- [4] 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. SAND96-8216, 1996
- [5] Meeks E, Morfatf 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. SAND96-8218, 1996
- [6] Smith G P, Golden D M, et al. GRI-Mech 3.0 [EB/OL]. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech)
- [7] Woodward E C. Simulation study of idealized combustors [A]. Sixth Symposium (international) on Combustion [C]. Yale University, New Haven, Connecticut, 1956. 849~858
- [8] Wilson C. Sound solutions to combustion problems [J]. Modern Power Systems, 2002, 22(12):27~31

## Numerical Investigation of the Pressure Exponent in Gas Turbine Combustor Efficiency Similitude Study

Yang Rui<sup>1</sup>, Wang Yingshi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China;

2. Institute of Engineering Thermophysic, CAS, Beijing 100080, China)

[Abstract] The effect of combustion process on the pressure exponent  $N$  in gas turbine combustor efficiency similitude study is investigated by numerical simulation. It is suggested that for hydrocarbon fuel, the pressure exponent  $N$  may be selected as 1.6 ~ 2.0 when the combustion process is reaction-controlled. When the combustion process is diffusion controlled it may be selected as 1.0 ~ 1.4. The result of this paper would be useful for the modeling test of gas turbine combustor.

[Key words] combustor efficiency similitude study; pressure exponent; numerical simulation

(上接第 68 页)

[6] McGrattan K B, Forney G P, Foyd J E, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3), User's Guide. NISTIR 6784, [M]. 2002 Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002

[7] McGrattan K B, Forney G P, Foyd J E, et al. Fire

Dynamics Simulator (Version 3), Technical Reference Guide. Technical Report NISTIR 6783 [M], 2002 Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002.

[8] 高层民用建筑设计防火规范(GB50045—95)[S]. 2001. 34~42

## A Discussion and Study on the Center Shift Phenomena of a Building Fire-whirl

Chen Changkun, Yao Bin, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] Fire-whirl is a specific fire behavior, and has been taken as one important research area of fire safety. The earlier relative studies are mainly focused on the experimental reproduction of swirled flame and numerical simulation for the flame itself. However the behavior of fire-whirl is much different from the pure swirled flame. It is constructive to conduct performance-based fire protection analysis and design to understand these behaviors scientifically. In this paper, the behavior of building fire-whirl is studied, and an analytical method to describe and express the center shift phenomena of the building fire-whirl is presented. Combined with such method, the large eddy simulation (LES) technology is employed for numerical simulation of the center shift of fire whirl, and the important parameters such as average angular velocity, peak of temperature, location of the high-temperature center are obtained.

[Key words] fire-whirl; center shift; large eddy simulation; building