

基于 RANS 求解的火焰面/反应进度 变量湍流燃烧模型研究

武文, 黄威, 赵平辉, 叶桃红

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:通过求解稳态一维拉伸层流扩散火焰面方程, 得到混合物分数及反应进度 $Z-C$ 双标量建表的层流火焰面数据库, 并结合混合物分数满足 β 分布及一阶近似的反应进度变量条件概率密度分布, 建立了湍流火焰面平均值数据库. 通过将双参数火焰面模型的查表和求解过程与 OpenFOAM 计算平台相结合, 发展了基于 RANS 方法的双参数湍流燃烧火焰面模型及数值计算求解器 ZCFoam. 对轴对称湍流射流 Sandia D 火焰的模拟表明, 计算给出的温度分布、主要组分的分布等与实验值吻合较好.

关键词:湍流扩散燃烧; 火焰面模型; 反应进度变量; OpenFOAM; 数值模拟

中图分类号: TK16 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.10.005

Study of RANS based flamelet/progress variable turbulent combustion model

WU Wen, HUANG Wei, ZHAO Pinghui, YE Taohong

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Laminar flamelet library was built up with steady state laminar stretched diffusion flames, indexed by the mixture fraction-progress variable. Then the β PDF of mixture fraction and first-order conditional PDF of the progress variable were employed to generate the mean turbulent flamelet library. By adding the library looking up and solving sections to OpenFOAM, a turbulent combustion solver named ZCFoam was developed based on RANS. A typical turbulent methane/air partially premixed jet flame was studied. The computational results indicate that the FPV approach could satisfactorily predict the flame structure, temperature and species' concentration fields.

Key words: turbulent diffusion flame; flamelet model; progress variable; OpenFOAM; numerical simulation

0 引言

Peters^[1]最早提出了湍流非预混燃烧的稳态火

焰面 SLF 模型, 将流场与化学反应计算解耦, 大大减少了计算时间, 在实际燃烧室的数值模拟中被广泛使用. 通过求解特征标量混合物分数空间中的一

维层流扩散火焰面方程,可以在实际算例计算之前建立组分、温度等标量与查表控制标量混合物分数 Z 和标量耗散率 χ 关系的二维数据表,数值计算燃烧时,可以通过查表及统计平均得到平均的燃烧场,计算量将大大减少. Stanford 大学的 Pierce 等^[2]在大涡模拟湍流火焰时提出的 FPV (flamelet/progress variable)模型是在一维稳态扩散火焰面模型思想基础上,引入第二个参数即反应进度标量来表征化学反应的局部熄火的中间状态,具备处理湍流火焰中的局部熄火及再点燃以及完全熄火现象的能力.该方法与 SLF 模型类似,也是通过查表控制标量(混合物分数—反应进度变量)建立火焰面数据库,在燃烧求解时直接查表得到各标量的值.国外一些学者在大涡模拟求解的基础上采用 FPV 方法,根据不同实际问题对该方法的细节进行发展,对一些湍流火焰进行了研究,得到了较好的模拟结果^[2-5].

计算软件平台 OpenFOAM 在国际上应用较广,国内近年来对其的关注程度也日益提高.其全称是 Open Field Operation and Manipulation,前身为 FOAM,后来作为开源代码公布到网上,任何人都可以自由下载其源代码^[6]. OpenFOAM 软件可以模拟复杂流体流动、化学反应、传热分析等现象,还可以进行结构动力学分析、电磁场分析以及金融评估等.其核心技术为一系列的高效 C++ 模块数据包,利用这些数据包可以构造出一系列有效的求解器、辅助工具和库文件,因此用户可以最大程度地拓展程序以实现用户自定义功能.

本文基于 FPV 模型的基本思想,发展了基于 RANS 的湍流燃烧模型并编制了层流稳态扩散火焰的求解程序、prePDF 统计平均求解程序和湍流燃烧计算求解器的整套求解程序.首先采用层流稳态扩散火焰建立了层流火焰面数据库;通过预处理的 prePDF 程序对混合物分数 Z 和反应进度变量 c 在混合物分数空间和反应进度变量空间分布的假定概率密度分布进行求解,得到统计平均后的湍流火焰面平均值数据库;然后利用 OpenFOAM 原有的湍流 RANS 求解模块,耦合双参数火焰面方法的查表和求解方法,构建了完整的双参数火焰面求解器 ZCFoam,并对 TNF workshop 火焰系列中轴对称湍流射流 CH_4/air 燃烧的典型算例 Sandia D 进行了数值研究.结果表明,本文发展的湍流燃烧模型及数值求解程序能够较好地模拟湍流扩散/部分预混火焰.

1 数学物理模型

流场采用密度加权的 Favre 平均的 N-S 方程求解,其中动量方程中的 Reynolds 应力项使用 $k-\epsilon$ 两方程模型进行模化.各标量(组分浓度、温度、反应进度变量及其源项)为混合物分数及其方差和反应进度变量的函数.通过求解层流扩散火焰建立层流火焰面数据库,再采用假定 PDF 的方法建立湍流燃烧中的各标量平均值与混合物分数、混合物分数的方差及反应进度变量的关系.

1.1 混合物分数的定义和其运输方程

混合物分数 Z 的定义采用 Bilger^[7]提出的基于所有组分扩散系数均相同的元素定义法.混合物分数及其方差的 Favre 平均运输方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_j\tilde{Z})}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_j}} - \bar{\rho}\tilde{Z}u_j'' \right) \quad (1) \\ \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z}''^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_j\tilde{Z}''^2)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho D \frac{\partial Z''^2}{\partial x_j}} - \bar{\rho}\tilde{Z}''^2u_j'' \right) - \\ & 2\bar{\rho}\tilde{Z}''u_j'' \frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_j} - 2\overline{\rho D \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2} \quad (2) \end{aligned}$$

式中,上标“ \sim ”表示 Favre 平均量,“ $''$ ”表示 Favre 平均的脉动量,“-”表示 Reynolds 平均量.

上述两方程中的脉动二阶关联项等采用如下模型模拟:

$$\left. \begin{aligned} -\bar{\rho}\tilde{Z}''u_j'' &= \frac{\mu_t}{\sigma_z} \frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_j}, \\ -\bar{\rho}\tilde{Z}''^2u_j'' &= \frac{\mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial\tilde{Z}''^2}{\partial x_j}, \\ \overline{\rho D \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2} &= C_{g^2} \bar{\rho} \frac{\epsilon}{k} \tilde{Z}''^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,模型系数的取值为^[8] $\sigma_z = 0.85$, $\sigma_g = 0.35$, $C_{g^2} = 2.0$.

1.2 反应进度变量的定义和其运输方程

由于反应进度变量需要能够描述反应的进程,因此要求其是化学反应系统中的非守恒量,其输运方程中的源项也需要由火焰面数据库给出.通常选用一些标量如组分的质量分数的线性组合或温度来定义.本文的反应进度标量 c 的定义及平均量的输运方程分别为

$$c = Y_{\text{CO}} + Y_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_c = \dot{\omega}_{\text{CO}} + \dot{\omega}_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\alpha})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_j\bar{c})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho}D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} - \bar{\rho}\tilde{c}^{\prime\prime}u_j^{\prime\prime} \right) + \bar{\rho}\tilde{\omega}_c \quad (6)$$

式中, $-\bar{\rho}\tilde{c}^{\prime\prime}u_j^{\prime\prime} = \frac{\mu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}$. 由于反应进度变量是非守恒量, 因此该方程存在反应源项, 由火焰面数据库按照式(5)并进行统计平均给出. 式(6)中的模型系数为 $\sigma_c = \sigma_z = 0.85$.

1.3 层流火焰面数据库的建立

以层流对撞扩散火焰计算各标量耗散率下的层流火焰面. 混合物分数空间 $Z^* \in [0, 1]$ 中的火焰面方程为:

$$-\frac{1}{2}\chi^* \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^{*2}} = \dot{\omega}_\varphi \quad (7)$$

带上标 * 的量为层流火焰面数据库中的查表特征标量. 标量 φ (代表温度或组分) 是混合物分数和标量耗散率的函数, 即 $\varphi = f(Z^*, \chi^*)$. 层流火焰面数据库 $\varphi = f(Z^*, \chi^*)$ 中每个 χ^* 对应一个 Y_{CO}^* 和一个 $Y_{CO_2}^*$, 因此可以按照式(4)给出的反应进度变量定义进行建表变量的替换, 采用 c^* 替代 χ^* 对火焰面数据库进行检索, 从而得到 $\varphi = f(Z^*, c^*)$ 的数据库, 该数据库中同时包含反应进度变量的源项 $\dot{\omega}_c$.

1.4 概率密度分布和湍流火焰面平均值数据库

在湍流扩散燃烧计算中, 通过假定对应于各层流火焰面数据库的混合物分数 Z^* 的概率密度函数 $\tilde{P}(Z^*)$ 和反应进度变量 c 的条件概率密度 $\tilde{P}(c^* | Z^*)$, 流场中的组分浓度和温度的平均值都可以由如下统计平均得到:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\tilde{Z}, \tilde{c}) = & \int_0^1 \int_0^{\infty} \varphi(Z^*, c^*) \tilde{P}(Z^* | \tilde{Z}, \tilde{c}) \tilde{P}(c^* | Z^*, \tilde{Z}, \tilde{c}) dZ^* dc^* \\ & (8) \end{aligned}$$

混合物分数的概率密度函数采用 β 分布^[2], 即假定

$$\tilde{P}(Z^* | \tilde{Z}, \tilde{c}) = \frac{Z^{*\alpha-1} (1-Z^*)^{\beta-1}}{\int_0^1 Z^{*\alpha-1} (1-Z^*)^{\beta-1} dZ^*} \quad (9)$$

式中的指数 α 和 β 由 \tilde{Z} 和 $\tilde{Z}^{\prime 2}$ 确定:

$$\alpha = \tilde{Z}\gamma, \beta = (1-\tilde{Z})\gamma, \gamma = \frac{\tilde{Z}(1-\tilde{Z})}{\tilde{Z}^{\prime 2}} - 1 > 0 \quad (10)$$

反应进度变量 c 的条件概率密度函数在不同研究中有多种假设形式, 通常采用一阶假设, 即假设其

脉动为 0, 且只与 Z 有关^[2,9], 符合 delta 分布:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{P}(c^* | Z^*, \tilde{Z}, \tilde{c}) &= \delta(c^* - \overline{(c^* | Z^*)}), \\ \overline{((c^* - \overline{(c^* | Z^*)})^2 | Z^*)} &= 0, \\ \tilde{c} &= \overline{(c^* | Z^*)} \end{aligned} \right\} (11)$$

将式(1), (2), (6)与 RANS 求解的连续方程、动量方程联立求解, 并利用火焰面数据库, 即可实现对湍流火焰的数值求解.

2 ZCfoam 求解器的构建

OpenFOAM 原有的燃烧求解器 reactingFoam 是基于部分良搅拌(PaSR)的可压缩化学反应求解器^[10]. 本文在其基础上利用其中基于 PISO 算法的湍流流动求解程序、热物性计算和温度求解部分, 编制了混合物分数 Z 和混合物分数的方差 $\tilde{Z}^{\prime 2}$ 的方程的求解程序、反应进度变量 c 的源项查表及其方程求解程序、各组分浓度的查表等程序, 构建了完整的双标量 Z 和 c 的火焰面求解程序 ZCfoam.

3 有值班火焰的 TNF workshop 射流 CH₄/air 火焰 Sandia D 的数值模拟

有值班火焰的 TNF workshop 射流 CH₄/air 火焰 Sandia C, D, E 和 F 来自于 Sydney 大学的 Masri 和 Dally 等的实验测量工作^[11]. 该系列火焰涵盖了湍流和化学反应相互作用的众多表征, 如火焰驻定、局部熄火与再燃、火焰吹熄、污染物(NO_x)排放等, 在湍流扩散火焰中非常具有代表性. 由于实验数据非常丰富, 可以为模型验证提供很好的参考依据, 这些火焰已成为燃烧研究的一系列标准火焰之一^[12-14].

火焰 Sandia C~F 是多组相同燃料、不同射流速度的火焰^[15], 其燃烧器的几何形状均相同, 进口分燃料射流进口、值班火焰进口和空气伴流进口三部分. 随着射流进口速度的提高, 局部熄火逐渐加强. 本文针对其中局部熄火程度较低的火焰 Sandia D 进行数值模拟研究. 燃料射流出口直径 $d = 7.2$ mm, 值班火焰射流进口直径 18.2 mm, 伴流空气直径 122.4 mm(17 d). 基于燃料射流出口直径 d 的燃料射流雷诺数为 22 400, 燃料为体积比 1:3 的 CH₄/air 混合气(部分预混当量比 $\phi_f = 0.77$), 当量混合物分数为 0.351. 燃料射流进口的平均速度为 49.6 m/s, 空气伴流进口平均速度为 0.9 m/s. 值班火焰是高温的贫燃预混燃烧产物, 其进口组分分布数据见表 1, 进口平均速度为 11.4 m/s.

表 1 值班火焰的组分和参数

Tab. 1 Species and parameters of the pilot

φ_f	0.77	Y_{H_2}	$1.29e-4$
Z	0.27	Y_H	$2.48e-5$
T	1 880 K	Y_{H_2O}	0.094 2
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.180	Y_{CO}	$4.07e-3$
Y_{N_2}	0.734 2	Y_{CO_2}	0.109 8
Y_{O_2}	0.054 0	Y_{OH}	0.002 8
Y_O	$7.47e-4$	Y_{NO}	$4.8e-06$

本文计算考虑各射流进口速度的分布,在上述平均进口速度的基础上,使用了 TNF workshop 提供的进口速度分布^[15],其分布曲线如图 2 中的实线.湍流输运由 $k-\epsilon$ 模型求解,模型参数参照原始模型的取值.进口的湍动能也根据图中的脉动速度给出,湍动能耗散率由湍动能相应长度尺度求得.反应进度变量在燃料流和氧化剂入口处均为 0,值班火焰入口为 0.113 87.混合物分数的方差在燃料流和氧化剂入口处均为 0,值班火焰入口根据火焰面数据库分析得到: $Z=0.27$ 的湍流火焰面数据库中,值班火焰射流入口的 $\overline{Z'^2}$ 取为 0.002 2 时温度、组分浓度等与值班火焰实验值吻合较好.计算区域的几何尺寸为:计算区域轴向长度 583.2 mm(81d),径向 122.4 mm(17d).网格结构如图 1 所示,网格总数 7440.

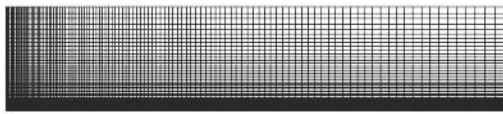


图 1 计算区域网格图

Fig. 1 Sketch map of computational zone mesh

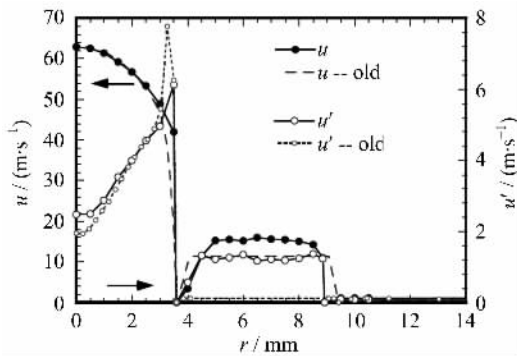


图 2 各射流进口的速度分布

Fig. 2 Velocity profile of the jets' inlet

3.1 结果分析

根据 Sandia C~F 系列火焰的燃料、氧化剂组

成和温度,采用 GRI 3.0 详细化学反应机理计算得到了相应的层流火焰面数据库 S 形曲线.图 3 是 S 形曲线的燃烧段,横坐标是标量耗散率,纵坐标为各层流火焰的最高温度.曲线的拐点位于 $\chi^* = 457 \text{ s}^{-1}$ 左右,上半部分代表稳定高温平衡燃烧,下半部分曲线代表燃烧中不稳定的燃烧状态.图 4 是各层流火焰面数据库中 c 的范围和 c 的源项的等值线图,实线包络线为层流火焰面数据库中 c 的最大值,虚线包络线为仅包含 S 形曲线稳定高温燃烧的上半支情况下层流火焰面数据库中 c 的最小值,点划线包络线为包含 S 形曲线上半支和不稳定燃烧的中间支情况下层流火焰面数据库中 c 的最小值.从理论上讲,包含 S 形曲线中间支的层流火焰面数据库其 c 的最小值均应为 0.当标量耗散率降到很小时,计算不稳定燃烧中间支的收敛性不佳,难以得到完全的熄火状态.因此本文在计算中,将反应进度小于层流火焰面数据库中 c 的最小值的情况按纯混合处理.图 4 的等值线也显示出了不稳定的中间燃烧状

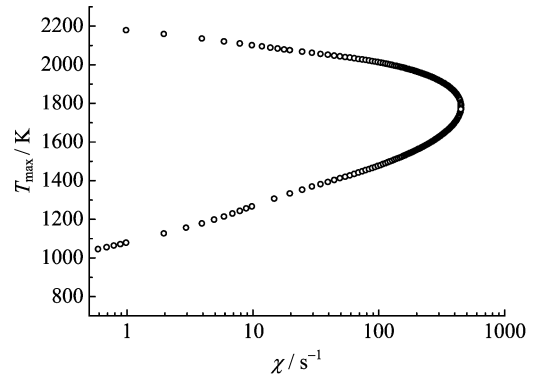


图 3 层流火焰面数据库 S 形曲线燃烧段

Fig. 3 Combustion sections of S-curve of laminar flamelet library

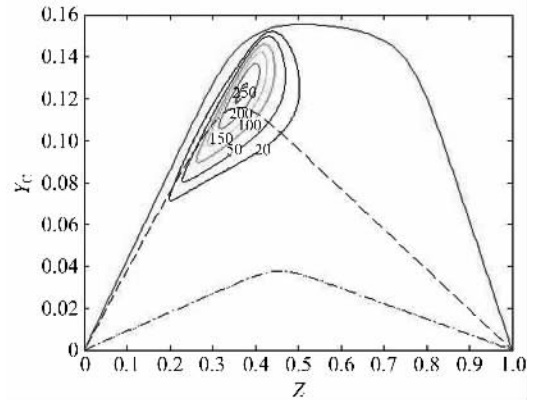


图 4 Z-C 空间中的 ω_c 等值线

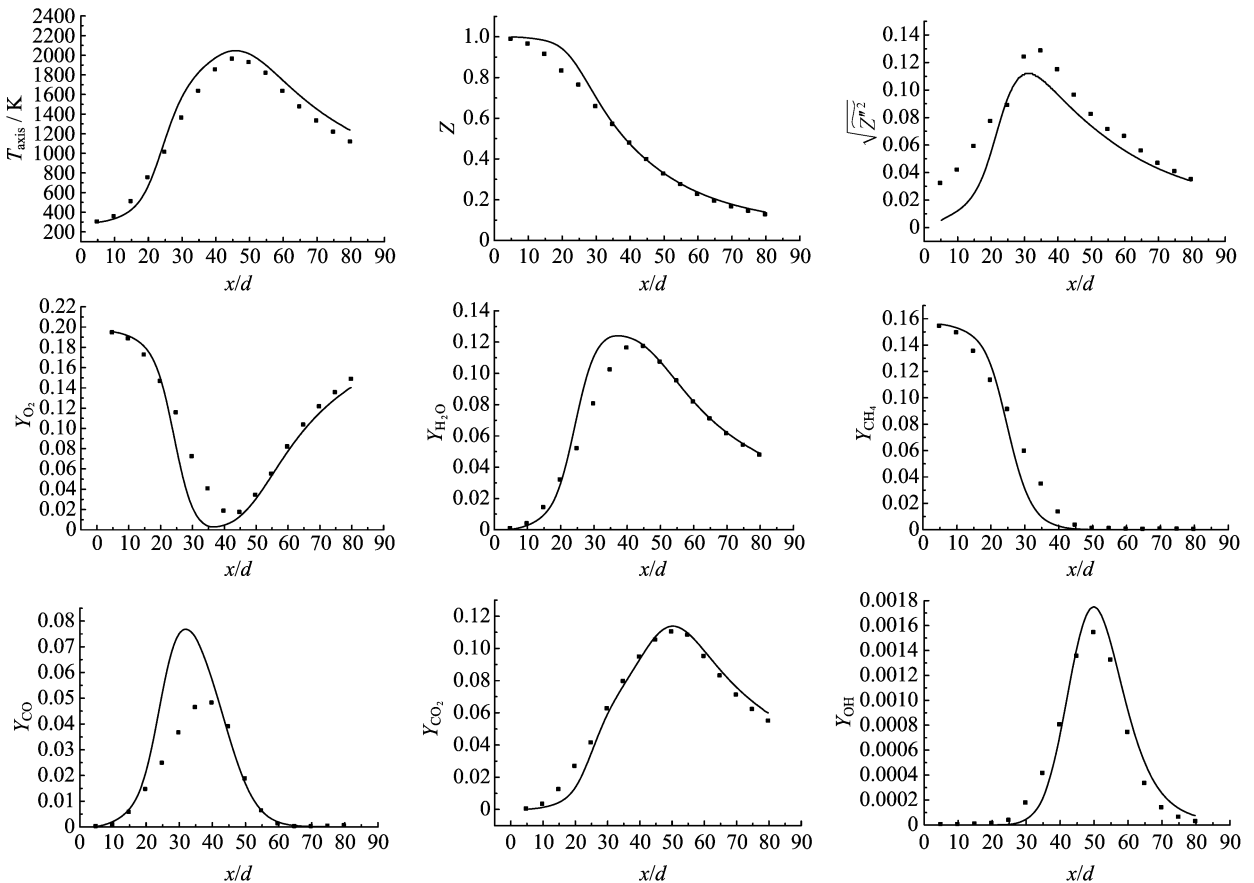
Fig. 4 ω_c contour in Z-C space

态对数据库的补充,因此层流火焰面数据库需要包含完整的稳定燃烧段和不稳定燃烧的中间状态,以描述完整的燃烧状态,如局部湍流脉动应变率过大导致的局部熄火及再点燃非平衡燃烧过程.本文在对层流数据库积分平均得到湍流燃烧平均值数据库时,做为初步研究,对上半支和中间支都采用相同的概率密度假定(见式(9)和(11)),但中间支代表的是物理上不稳定的燃烧状态,采用与上半支相同的概率密度假设,特别是 β 分布假设,是否合理值得进一步研究.

图 5 是 Sandia D 算例的计算结果沿对称轴的混合物分数、温度及主要组分质量分数分布曲线与实验值的对比,实验数据由点表示,计算结果由实线表示.表述火焰结构的重要参数温度和 OH 浓度的结果与实验值吻合得很好,最高温度和 OH 质量分数的最大值位置大约为 $48d$,与实验值的 $47d$ 非常接近.混合物分数、混合物分数的方差以及各主要组分的计算值在下游也与实验值相符,仅在进口段有

一定偏差,达到了较好的模拟效果.混合物分数在 x/d 约为 $10\sim 30$ 的范围内计算偏大,因此说明湍流混合过程计算不够准确,其原因在于湍流输运模型对圆射流计算的不准确,包括进口湍动能耗散率的边界条件的给定、湍流模型的选择和湍流输运模型中模型参数的选择.此外,本文基于查库的计算方法使得混合物分数的不准确将直接导致其他组分在该位置附近和实验值有偏差.由于输运方程中含有混合物分数的梯度,混合物分数方差在进口附近的计算偏差与混合物分数的计算有直接联系,同时也与进口值的设定有关.

从计算结果看, H_2O 及 CO 的峰值浓度位置较实验值偏前, CH_4 的浓度在 x/d 为 25 位置附近降低过快,说明在火焰前端一些基元反应速率偏大.本文采用给定的反应进度变量描述反应进程,因此即认为反应系统中反应进度变量变化的弛豫时间(由初始状态达到平衡状态的时间)最长,故反应进度变量通常选取部分燃烧产物的浓度线性组合来表征.



black square: experimental data, line: calculation result

图 5 轴线上 Z , $\sqrt{Z^2}$, T 和主要组分的分布曲线

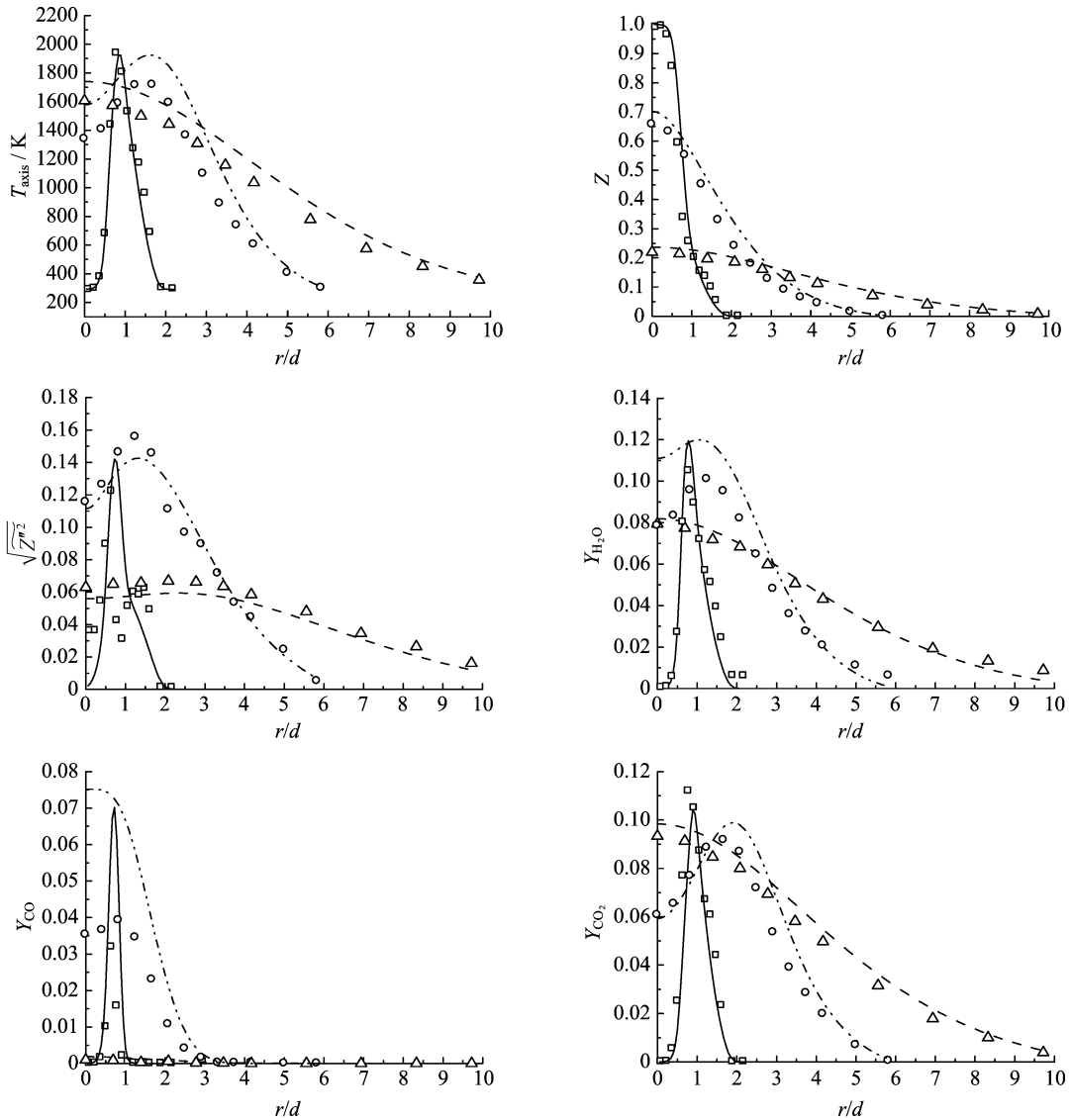
Fig. 5 Z , $\sqrt{Z^2}$, T and main species profile on the axis

但给定的反应进度变量不一定能够很好地描述反应过程,或多或少将提高弛豫时间大于该反应进度变量的组分的反应速率. Maas 等^[16]提出的 ILDM 方法从数学上严格保证了低维流形(即对应 FPV 方法中的混合物分数和反应进度变量所决定的数据库空间)的变化是系统中弛豫时间最长的. 与之相比,通过组分质量分数线性组合决定反应进度变量对计算的准确性有一定影响,需要开展反应进度标量选择的深入研究.

图 6 是 x/d 分别为 3, 30 和 60 的截面上混合物

分数、温度和主要组分分布曲线与实验值的对比. 空心方块和实线分别是 $x/d=3$ 截面上的实验值和计算值,空心圆点和双点划线分别是 $x/d=30$ 截面上的实验值和计算值,空心三角和虚线分别是 $x/d=60$ 截面上的实验值和计算值. 由图 6 可以看出,本文的计算结果在燃烧场的各个截面上都与实验值吻合得很好.

CO 浓度在轴线上和各截面都有一定差距. 王海峰等在文献[17]中用稳态火焰面模型、非稳态火焰面模型和 PDF 模型对 Sandia D 火焰进行了研



square: experimental data at $x/d=3$; solid line: calculation result at $x/d=3$;
 circle: experimental data at $x/d=30$; double dash line: calculation result at $x/d=30$;
 triangle: experimental data at $x/d=60$; dash line: calculation result at $x/d=60$

图 6 $Z, \sqrt{Z'^2}, T$ 和部分组分的分布曲线

Fig. 6 $Z, \sqrt{Z'^2}, T$ and some species profile at $x/d=3, 30, 60$

究,其中稳态火焰面在 CO 等中间产物的计算上也较大偏差.王海峰等认为其原因在于过高地估计了富燃料一侧的燃烧速率.在本算例中,燃料流是 CH_4 和空气的混合气体,燃料是部分预混的,但在实验中并没有发现预混燃烧的现象.因此,稳态火焰面模型过高地预测了部分预混区域的燃烧速率.而非稳态火焰面模型较好地克服了这一缺陷.本文也是由稳态火焰面出发建立火焰面数据库,因此解决这个问题需要进一步研究火焰面数据库的建立方法,以更好地描述燃烧过程.

上述对比结果表明,本文计算的燃烧场基本吻合实验结果,燃烧的最高温度等重要参数的计算结果很好,能够较好地模拟湍流射流火焰.在湍流火焰面建库方法、反应进度变量的选择、湍流模型的选择、混合物分数方差的边界条件等方面有待进一步研究.

4 结论

本文通过求解稳态一维拉伸层流扩散火焰面方程建立层流火焰面数据库,经统计平均处理得到湍流火焰面平均值数据库.在 OpenFOAM 平台上开发了基于 RANS 求解的 ZCFoam 求解器,并调用上述湍流火焰面平均值数据库模拟了典型的湍流射流火焰 Sandia D. 计算得到了较完整的火焰面数据库,对 Sandia D 火焰模拟能够较好地与实验相吻合.因此,双参数火焰面模型应用于湍流扩散/部分预混燃烧问题的 RANS 计算能够得到较好的效果.该模型在应用中遇到的火焰面建库方法、反应进度变量和湍流模型的选择以及进口条件的给定等问题值得进一步研究.本文的工作为后续研究局部熄火更强的 Sandia E,F 火焰等奠定了基础.

参考文献(References)

- [1] Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21: 1 231-1 250.
- [2] Pierce C D, Moin P. Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 504: 73-97.
- [3] Ihme M, Pitsch H. Prediction of extinction and reignition in nonpremixed turbulent flames using a flamelet/progress variable model: 1. A priori study and presumed PDF closure [J]. Combustion and Flame, 2008, 155: 70-89.
- [4] Ihme M, Pitsch H. Prediction of extinction and reignition in nonpremixed turbulent flames using a flamelet/progress variable model: 2. Application in LES of Sandia flames D and E [J]. Combustion and Flame, 2008, 155: 90-107.
- [5] Ihme M, Pitsch H, Bodony D. Radiation of noise in turbulent non-premixed flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32: 1 545-1 553.
- [6] OpenFOAM[CP/OL]. [2009-09-01]. <http://www.openfoam.com/>
- [7] Bilger R W, Starnner S H, Kee R J. On reduced mechanisms for methane air combustion in nonpremixed flames [J]. Combustion and Flame, 1990, 80(2): 135-149.
- [8] Jones W P, Whitelaw J H. Calculation methods for reacting turbulent flows: A review [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 1-26.
- [9] Michel J B, Colin O, Veynante D. Modeling ignition and chemical structure of partially premixed turbulent flames using tabulated chemistry [J]. Combustion and Flame, 2008, 152: 80-99.
- [10] OpenCFD. OpenFOAM Programmers Guide [EB/OL]. [2009-09-01]. <http://www.openfoam.com/docs/>.
- [11] Thermofluids Research Group [EB/OL]. [2009-06-01]. http://www.aeromech.usyd.edu.au/thermofluids/main_frame.htm.
- [12] 董刚,王海峰,陈义良.用火焰面模型模拟甲烷/空气湍流射流扩散火焰 [J]. 力学学报, 2005, 37(1): 73-79.
- [13] Kalmthout E Van, Veynante D. Direct numerical simulations analysis of flame surface density models for nonpremixed turbulent combustion [J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2 347-2 368.
- [14] Pitsch H, Steiner H. Large-eddy simulation of a turbulent piloted methane/air diffusion flame (Sandia flame D) [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(10): 2 541-2 554.
- [15] TNF workshop. Sandia/TUD Piloted CH_4 /air Jet Flames [EB/OL]. [2008-10-01]. <http://public.ca.sandia.gov/TNF/DataArch/Flamed.html>.
- [16] Maas U, Pope S B. Simplifying chemical kinetics: Intrinsic low-dimensional manifolds in composition space [J]. Combustion and Flame, 1992, 88: 239-264.
- [17] 王海峰,陈义良,刘明侯.湍流扩散燃烧的数值研究-PDF 方法和火焰面模型的性能比较 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26: 241-244.