

采用火焰面/反应进度变量方法模拟湍流燃烧

熊模友¹, 乐嘉陵², 黄 渊², 宋文艳¹, 杨顺华², 郑忠华²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所
高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 在自主开发的软件平台上添加了火焰面/反应进度变量方法,选取了两种反应进度变量分别对甲烷/空气的同轴射流燃烧室进行了数值模拟。将计算结果与稳态火焰面模型、文献参考值以及实验值进行了对比研究,结果表明:采用火焰面/反应进度变量方法能捕捉到稳态火焰面模型所不能预测到的火焰抬举等非稳态现象,得到的结果与文献参考值以及实验值出入很小,能准确反应真实的燃烧过程;另外不同反应进度变量的定义对计算结果有较大的影响,采用火焰面/反应进度变量方法对主要中间产物一氧化碳的预测比文献参考值更好,更接近于实验值。

关 键 词: 火焰面模型; 反应进度变量; 湍流燃烧; 火焰抬举; 局部熄火

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Flamelet/progress variable approach for turbulent combustion

XIONG Mo-you¹, LE Jia-ling², HUANG Yuan²,

SONG Wen-yan¹, YANG Shun-hua², ZHENG Zhong-hua²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Adding flamelet/progress variable approach to computation platform developed by ourselves, two kinds of progress variable were adopted to simulate methane/air co-axial jet combustor. Comparing the results with each other and also with steady flamelet model, literature reference and experiment result, it is indicated that the results of flamelet/progress variable approaches can compute unsteady phenomenon in combustion, such as lifted flame which can not be observed in steady flamelet model, and agree reasonably well with the literature reference and experiment result, namely, they can reflect the actual process of combustion accurately; at the same time it is learnt that different definitions of progress variables lead to different results; it is proved that flamelet/progress variable approaches do better in simulating main auxiliary production carbon monoxide, and are closer to experiment result.

Key words: flamelet model; progress variable; turbulent combustion; lifted flame; local extinction

在能源、动力及航空航天等领域,实际的燃烧过程几乎全是湍流燃烧。湍流会通过强化混合影

响化学反应的时平均反应速率,而化学反应又会通过放热过程影响湍流流动^[1]。如何定量描述这

种相互作用一直是人们关注的热点和问题的难点,从而发展出多种适用于不同情形的燃烧模型.其中,火焰面模型由于其独特的优点成为近年来计算湍流燃烧问题首选模型之一.

火焰面模型最早在国外发展而来,Peters^[2-4]提出的层流小火焰模型,将湍流火焰看成是由嵌入湍流流场内随机分布的局部具有一维结构的、薄的、层流小火焰的系综,从而通过层流火焰数据库及按照统计规律进行系综平均来处理湍流燃烧问题,并得到了广泛的应用.之后,斯坦福大学Pierce等^[5-6]将火焰面模型进行改进,用火焰面/反应进度变量(FPV)方法和大涡模拟(LES)相结合,经过算例验证,得到了和实验非常吻合的结果.Ihme和Pitsch^[7]采用FPV方法研究了湍流非预混燃烧中的火焰熄火和再点火过程,也取得了较好的结果.Pitsch和Raman等^[8-9]还采用扩展的火焰面模型计算了非预混的燃烧过程以及大涡模拟的方法计算了钝体非预混火焰.国内,近年来对火焰面模型的研究比较活跃,但是对火焰面/反应进度变量方法的研究较少,中国科学技术大学王海峰等^[10-12]对火焰面模型作了相关的研究对拉伸层流扩散火焰面进行了数值模拟,对湍流射流扩散火焰采用火焰面的方法进行了数值模拟.清华大学侯凌云等^[13]采用稳态火焰面模型对值班火焰进行了数值计算,得出了火焰面模型能较准确地计算湍流扩散燃烧的结论.中国科学技术大学陆阳^[14]在其博士论文中通过在OpenFOAM程序平台上添加火焰面求解器,分析了火焰面模型在多维燃烧计算流体动力学(CFD)中的准确性.2010年,中国科学技术大学武文等^[15]将基于雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方程求解的FPV方法添加到OpenFOAM平台,定义了反应进度变量为含碳元素的主要产物CO和CO₂质量分数之和的情况下计算了Sandia D火焰,其结果与实验值吻合较好.国防科学技术大学范周琴等^[16]采用FPV的方法,定义了反应进度变量为主要燃烧产物H₂O质量分数,计算了德国宇航中心的超燃发动机,取得了较满意的结果.国内外在采用FPV方法时有多种反应进度变量的定义形式,但在计算中怎样选取反应进度变量还没有形成一些指导性的意见.因此本文除了对FPV方法进行验证其优于稳态火焰面模型外,还将对反应进度变量C的选择进行探讨以使计算结果更优.

1 物理数学模型

1.1 火焰面/反应进度变量方法的物理模型

图1为生成层流火焰面数据库时最大温度随当量标量耗散率变化的S形曲线^[6].该曲线包含了3段,上面实线部分是稳定燃烧段,虚线表示非稳定燃烧段,火焰的局部熄火发生在该段;下面实线表示完全熄火状态.

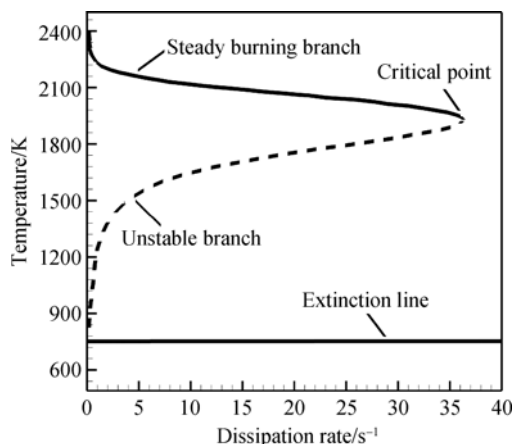


图1 最大温度随当量标量耗散率变化的S形曲线

Fig. 1 S-shape relation of maximum temperature and stoichiometric scalar dissipation rate

稳态火焰面模型只用稳定燃烧段生成火焰面数据库,因此不能捕捉到非稳态的燃烧现象,如火焰抬举等.火焰面/反应进度变量方法通过引入反应进度变量C来表征化学反应局部熄火的中间状态,在生成火焰面数据库时用C代替标量耗散率 χ_{st} ,因此生成的数据库既包含了稳定燃烧段也包含了非稳定燃烧段.

1.2 反应进度变量火焰面模型的数学模型

1.2.1 混合分数及其方差的输运方程

混合分数的输运方程为

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Z} \tilde{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\bar{\rho} D + \frac{\mu_t}{\sigma_z} \right) \nabla \tilde{Z} \right] \quad (1)$$

混合分数方差的输运方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}^2}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Z}^2 \tilde{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\bar{\rho} D + \frac{\mu_t}{\sigma_z} \right) \nabla \tilde{Z}^2 \right] + \\ 2 \frac{\mu_t}{\sigma_z} (\nabla \tilde{Z} \cdot \nabla \tilde{Z}) - \bar{\rho} C_k \frac{\epsilon}{k} \tilde{Z}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中上标“ $\sim$ ”表示 Favre 平均,“-”表示 Reynold 平均;系数^[17] $\sigma_z=0.7, C_k=2.0$.

1.2.2 反应进度变量的定义及其输运方程

由于反应进度变量是表述化学反应进行的程度,因此在选择反应进度变量时就要求其必须是非守恒量.对于采用详细机理计算湍流燃烧时,通常选用组分的质量分数进行线性组合,中国科学技术大学武文等选择了 CO 和 CO_2 的质量分数之和作为反应进度变量.考虑到 CO_2 和 H_2O 是燃烧的主要产物, CO 和 H_2 是燃烧主要中间产物,占有相对较大的比例.因此本文除了将 CO 和 CO_2 质量分数之和作为反应进度变量外,还选择了上述4种组分质量分数之和作为反应进度变量,分别定义为

$$C_1 = w_{\text{CO}} + w_{\text{H}_2} + w_{\text{H}_2\text{O}} + w_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_{C_1} = \dot{\omega}_{\text{CO}} + \dot{\omega}_{\text{H}_2} + \dot{\omega}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{\omega}_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

$$C_2 = w_{\text{CO}} + w_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{C_2} = \dot{\omega}_{\text{CO}} + \dot{\omega}_{\text{CO}_2} \quad (6)$$

反应进度变量 C 的输运方程为

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{C})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{C}\mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\bar{\rho}D + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \nabla \tilde{C} \right] + \bar{\rho}\dot{\omega}_C \quad (7)$$

式中 $\sigma_c = 0.7$.

1.2.3 湍流火焰面数据库的建立

采用原点取在等值面 $Z(x_i, t) = Z_{\text{st}}$ 上的一个局部坐标系,与火焰面面元垂直的方向定义为 x_1 ,与火焰面相切的两个方向为 x_2, x_3 ,由于化学热力学参数在 x_1 方向的变化比另两方向大的多,于是只考虑在 x_1 方向,则火焰面组分方程

$$\rho \frac{\partial w_i}{\partial t} = \frac{\rho \chi}{2Le_i} \cdot \frac{\partial^2 w_i}{\partial Z^2} + \rho \dot{\omega}_i \quad (8)$$

式中 $\chi = 2D(\partial Z / \partial x_1)^2$ 为标量的瞬时耗散率,代表了非平衡的影响,在混合分数空间中起扩散系数的作用. D 为扩散系数, Le_i 为第 i 种组分的刘易斯数,本文假定各组分刘易斯数相等且为1, $\dot{\omega}_i$ 源项生成率,是组分和温度的函数.

能量方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho c_p \chi \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \sum_{i=1}^{n_s} h_i \rho \dot{\omega}_i + q_r + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (9)$$

式中 c_p 表示比定压热容, h_i 和 $\dot{\omega}_i$ 分别表示第 i 种组分对应的生成焓和化学反应生成率, q_r 表示由于热辐射导致的热损失.本文中忽略了压力随时间的变化和辐射导致热损失的影响.

根据上述式(8)和式(9)两个方程,结合详细

的化学反应机理 GRI-Mech 2.11^[18],建立层流火焰面数据库 $\phi = \phi(Z, \chi_{\text{st}})$,此处, ϕ 为组分质量分数 w_i 或温度 T .再加上前面的式(3)或者式(5),可得到 $C = C(Z, \chi_{\text{st}})$ 或者 $\chi_{\text{st}} = \chi_{\text{st}}(Z, C)$,通过变换能得到层流火焰面数据库最终的形式为 $\phi = \phi(Z, C)$.

图2为本文在实际燃烧室计算边界条件下(见表1)生成层流数据库时的最大温度 T_{max} 与当量标量耗散率 χ_{st} 之间的 S 形曲线燃烧段,本文中最大当量标量耗散率约为 215 s^{-1} .

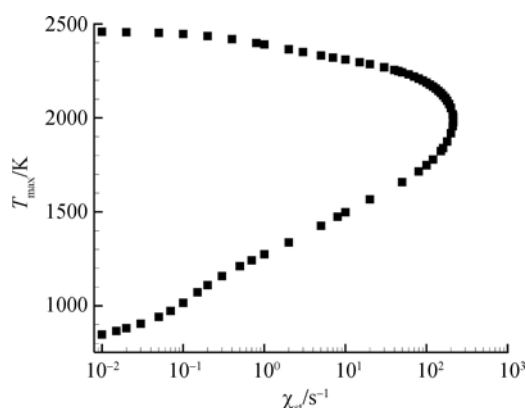


图2 最大温度随当量标量耗散率变化的 S 形曲线燃烧段

Fig. 2 S-shape of maximum temperature and stoichiometric scalar dissipation rate with combustion branch

表1 燃烧室几何尺寸及边界条件

Table 1 Geometry dimension and boundary condition of the combustor

R_1 / cm	R_2 / cm	R_3 / cm	R_4 / cm
3.157	3.175	4.685	6.115
$V_1 / (\text{m/s})$	$V_2 / (\text{m/s})$	$T_{\text{fuel}} / \text{K}$	$T_{\text{air}} / \text{K}$
0.9287	20.63	300	750
$p_{\text{in}} / \text{MPa}$	$T_{\text{wall}} / \text{K}$	$U / (\text{m/s})$	R / cm
0.38	500	20.63	4.685

湍流扩散火焰中的平均热力学参数可由层流火焰面作系综统计得到

$$\tilde{\phi}(x_i) = \int_0^1 \int_0^\infty \phi(Z, C) \tilde{P}(Z, C; x_i) dZ dC \quad (10)$$

而假定 Z 和 C 统计独立,且分别服从 beta 函数分布^[19]和 delta 分布^[5].则联合概率密度 $\tilde{P}(Z, C; x_i) = \tilde{P}(Z; x_i) \tilde{P}(C; x_i)$ 就可求出,从而能求出湍流扩散火焰中平均热力学参数组分和温度.特别指出,混合分数 Z 的概率密度需要均值 $\tilde{Z}$ 和方差 $\tilde{Z}''^2$ 才能求得.通过积分后的 $\tilde{\phi}$ 值及 $\tilde{Z}, \tilde{Z}''^2$ 和

$\tilde{C}$ 建立一个湍流火焰面数据库 $\tilde{\phi} = \tilde{\phi}(\tilde{Z}, \tilde{Z}''^2, \tilde{C})$.

2 湍流同轴射流燃烧室模拟结果及分析

2.1 湍流同轴射流燃烧室

计算采用的燃烧室是 Owen 等^[20]在 1976 年做的同轴射流燃烧室. 由于该实验构型具有相对简单的几何结构和边界条件, 同时在内部也具有较复杂的流动, 这样能精细地测量燃烧室内部的组分质量分数、温度、速度流动情况, 如图 3 所示.

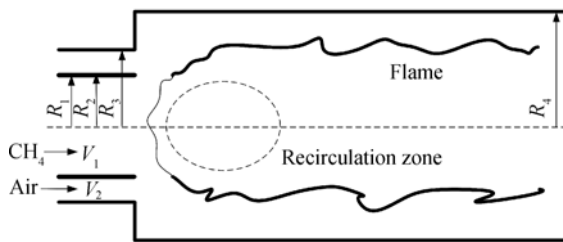


图 3 同轴射流燃烧室构型

Fig. 3 Configuration of co-axial jet combustor

根据图 3 所示, 其对应的几何尺寸及来流边界条件如下:

表 1 给出了燃烧室的几何参数以及计算所需的边界条件, 其中 R_1 为燃料入口半径, R_2 为氧化剂入口的内径, R_3 为氧化剂入口的外径, 燃料进口与氧化剂进口的壁面厚度则为 $R_2 - R_1$, R_4 则为圆形燃烧室的半径, V_1, V_2 分别为燃料和氧化剂进口速度, 燃烧室内的压力 p_{in} 控制为 0.38 MPa. 燃烧室的壁面温度 T_{wall} 保持在 500 K. 燃料假定为纯甲烷, 燃料温度 T_{fuel} 为 300 K, 空气假定是干燥的且被预热到 750 K (空气温度 $T_{air} = 750$ K) 再送入燃烧室. 由于空气/燃料具有较高的速率比, 燃烧室入口必将有回流区形成, 如图 3 所示.

定义 U 的值等于 V_2 为参考速度, R 的值等于 R_3 作为参考尺寸. 这样整个计算区域长度为 $9R$, 从进口到燃烧室的距离为 R , 燃烧室的长度为 $8R$. 所有固体边界均假设为不可渗透的绝热壁面. 计算网格划分如图 4, 全部采用结构网格. 考虑到燃烧室构型相对简单且采用的是 RANS 的方法, 对网格精细程度的要求远没有 LES 高, 故本文选取了比较适中的网格量, 约为 67 万.

在本文中, 流体流动控制方程采用有限体积法离散, 对流项的离散采用绝对稳定的 1 阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式离散, 流场中压力和速度的耦合采用 SIMPLE (semi-implicit meth-

od for pressure-linked equations) 算法求解, 湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 双方程模型.

2.2 结果分析

2.2.1 燃烧室计算中温度分布云图

图 5 为计算的温度的分布云图. 从上到下依次为以 C_1, C_2 为反应进度变量的 FPV 和稳态火焰面方法计算结果.

此温度云图能定性看出燃烧室内温度分布情况, 从进口到出口, 高温区域逐渐向燃烧室中心线附近扩散. 第 1 个和第 2 个温度云图是用 FPV 方法计算的结果, 可清楚看到燃烧区域并不是在燃料和氧化剂刚接触混合的地方, 而是向下游抬举了, 这是稳态的火焰面模型不能模拟到的火焰抬

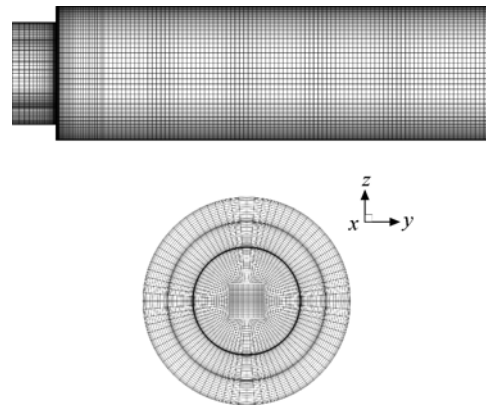


图 4 燃烧室计算网格

Fig. 4 Calculation mesh of combustor

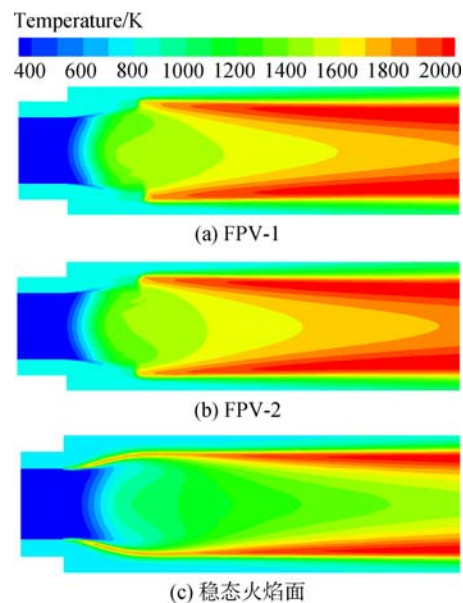


图 5 3 种燃烧模型计算的温度分布云图

Fig. 5 Temperature nephogram of three combustion models

举(lifted flame)现象,这是因为FPV方法生成火焰数据库时包含了S形曲线的下半段,此区域内火焰抬举等非稳态现象能捕捉到,这与实验结果是相符的.而在离燃烧室入口较远的区域,已达到稳定燃烧状态,在此区域稳态火焰面模型的结果和火焰面/反应进度变量方法的结果基本能吻合.

2.2.2 燃烧室计算中各参数在截面分布情形

以下各图中 r/R 中的 r 表示沿着燃烧室径向方向的距离,在燃烧室中心 r 为零,在壁面处 r 为最大值;而 x/R 中 x 表示沿着流动方向的距离,燃烧室突扩地方 x 为零,燃烧室出口取得最大值.FPV-1,FPV-2,Flamelet均表示在自开发平台上基于RANS的计算结果.FPV-1表示反应进度变量为 C_1 的FPV方法计算值;FPV-2表示反应进度变量为 C_2 的FPV方法计算值;其中 C_1 , C_2 的定义见上式(3)和式(5);Flamelet为稳态火焰面模型计算值;Ref.表示斯坦福大学Pierce^[5]在其博士论文中考虑了各组分流易斯数变化不为1的情况下,反应进度变量 C 定义为组分 CO_2 , H_2O 质量分数之和,化学机理采用GRI-Mech 3.0,基于LES的FPV方法计算值;Exp.表示Owen等^[20]的实验值.

图6为沿流向的速度 u 在各截面的分布情况,而 U 为表1中给出的参考速度.前面3个截面 $x/R=0.14, 0.38, 1.27$ 处,FPV-1,FPV-2和实验值(Exp.)、稳态火焰面模型值(Flamelet)以及文献^[5]参考值(Ref.)均吻合比较好,说明出现速度回流的区域和实验测得的数据是一致的,数值计算能准确捕捉到回流区.而在燃烧室离入口较远的第4截面 $x/R=4.67$ 处,FPV-1,FPV-2和稳态火焰面模型值在燃烧室中心区域和实验值有一定的差距.主要原因在于前面的截面速度主要受来流状态速度场的影响,所以前面截面速度基本没有差异,而后面的截面受燃烧的影响,回流

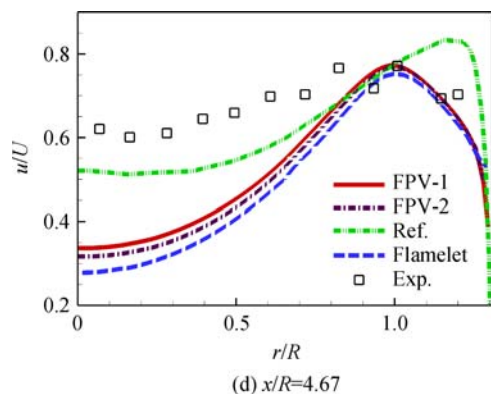
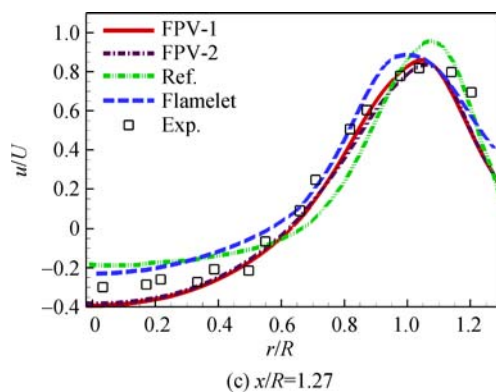
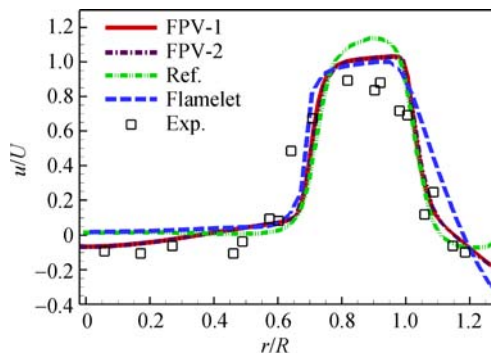
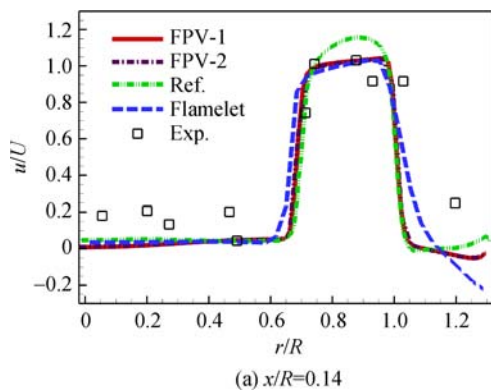


图6 速度 u 在各截面上的分布

Fig. 6 Distribution of velocity u in sections

区的大小、位置等都会有所影响,会导致一定的差异.文献^[5]参考值和实验值吻合更好,可能是文献中采用了LES的数值方法,在速度场的模拟上比RANS计算更精确,而本文采用的FPV-1方法在流场的计算上略优于FPV-2方法.

下面从图7混合分数在各截面的分布情况定量说明问题.所取的4个截面 $x/R=0.21, 3.16, 3.84, 7.41$ 可以看出,稳态火焰面模型计算值与实验值偏差较大,尤其是在燃烧室中心轴线附近区域.而FPV-1和FPV-2结果很接近,比flamelet模型结果要好,但与文献^[5]参考值和实验值吻合不是太好,尤其是前3个截面.这很可能是文献^[5]参考值中考虑了变刘易斯数的情况导致结

果更优的原因,因为文献[5]中在计算混合分数时也将各组分刘易斯数相等且为 1 的情况与变刘易

斯数的情况进行了比较,得到的结果也是刘易斯数相等且为 1 时的计算结果比实验值要高,也可能是文献[5]采用 LES 的方法计算混合分数的输运方程时比 RANS 更精确的缘故。

从图 8 温度 T 在各截面上的分布可知,前两个截面 $x/R=0.89$, $x/R=1.57$ 处,采用 FPV-1 和 FPV-2 的方法与实验结果最接近,比文献[5]参考值结果要好,比稳态火焰面模型也要好,因为稳态火焰面模型在燃料进口和空气进口附近捕捉不到火焰抬举等非稳态现象。而后面的两个截面由于远离进口区域,燃烧稳定,稳态火焰面模型也能准确地计算温度和组分等参数。只是边界条件中实验状态是等温壁面,本文的计算以及文献[5]中均采用了绝热壁面,导致在壁面附近和实验结果有少许的差别。而后面两个截面 $x/R=4.52$, 5.20 处,几种方法计算值和实验值均吻合较好,本文的 FPV-1, FPV-2 和 flamelet 计算值比实验值略低,可能是本文计算中没有考虑辐射的影响而导致计算温度偏低。

在本文中 w_p 指的是产物二氧化碳和水的质分数之和。参照下图 9。在截面 $x/R=0.21$ 处,文献[5]参考值均和实验值吻合较好,FPV-2 结果稍差于 FPV-1 的结果,FPV-1 结果和实验结果更加接近。而稳态火焰面模型结果最差,和实验相

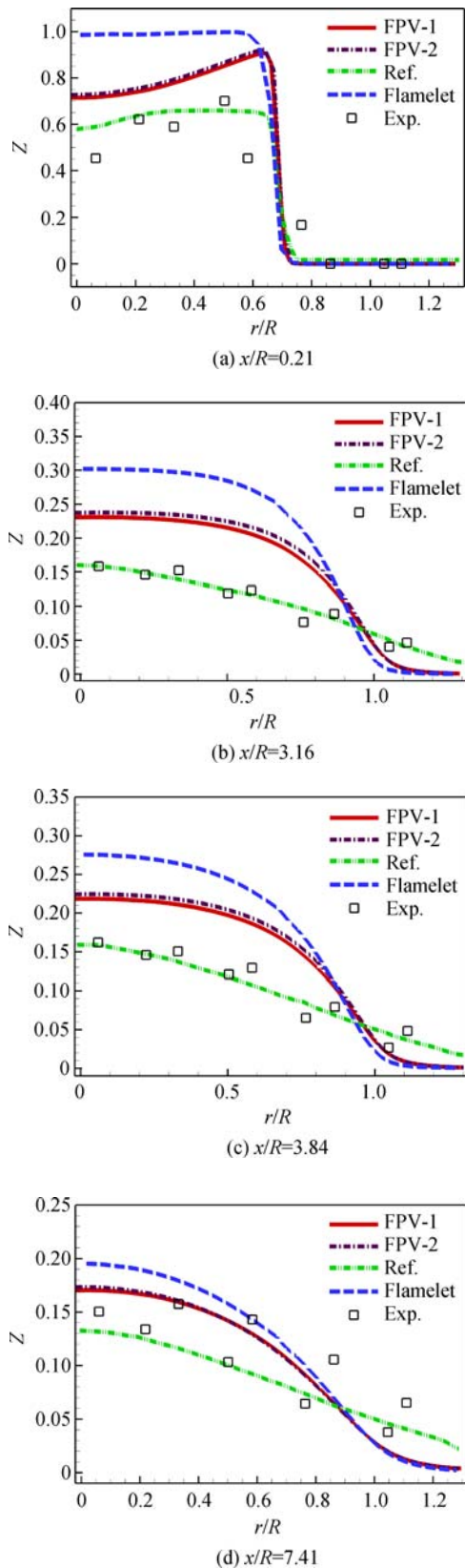
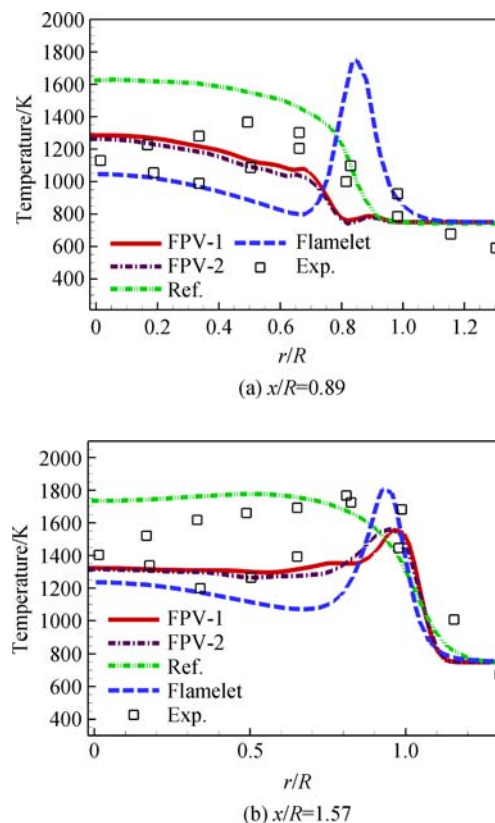
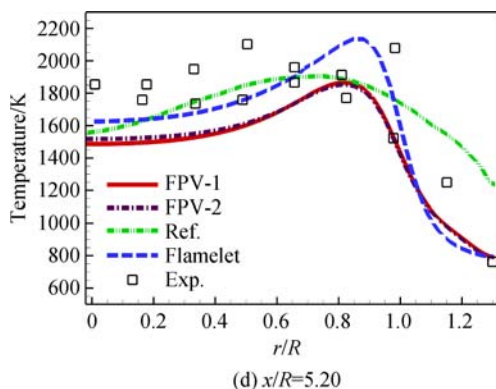
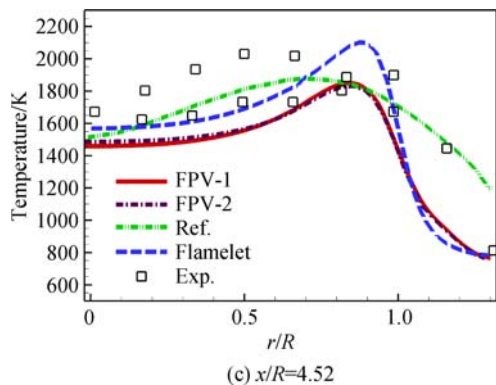


图 7 混合分数 Z 在各截面的分布

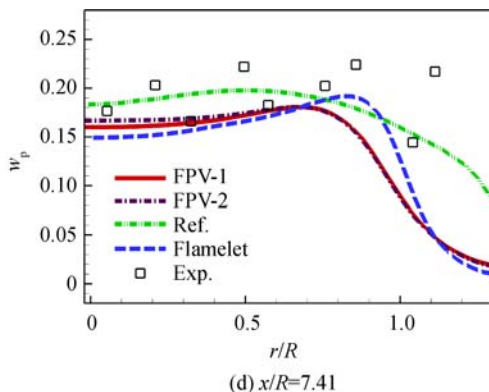
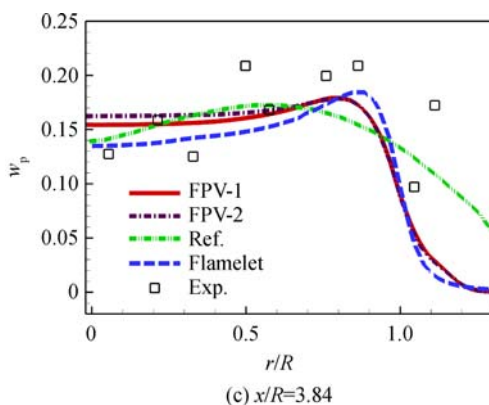
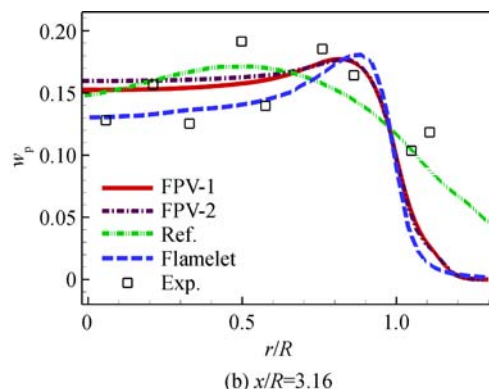
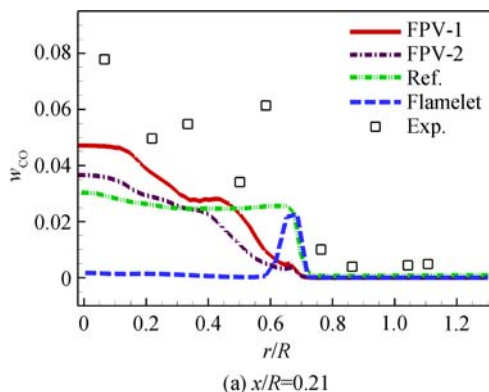
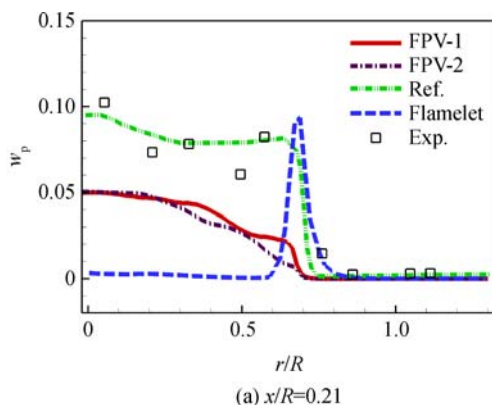
Fig. 7 Distribution of mixture fraction Z in sections



图8 温度 T 在各截面上的分布Fig. 8 Distribution of temperature T in sections

差较大,这是稳态火焰面模型在此处捕捉不到火焰抬举现象,其自身的缺陷所导致.而在后面的3个截面处,距离燃烧室进口较远,燃烧已达到稳定燃烧状态,稳态火焰面模型也能捕捉到此处的燃烧参数,所以各值均能吻合较好.

本文取了不同截面上 CO 的质量分数 w_{CO} 进行分析,参照图10,在截面 $x/R=0.21$ 处,FPV-1和实验值最接近,FPV-2和文献[5]参考值次之,它们分布趋势和实验值吻合,而稳态火焰面模型与实验值有一定差距,没有准确捕捉到 CO 的分布.后面3个截面处,文献[5]参考值与实验值均有较大的偏差,FPV-1的结果比FPV-2结果更

图9 Y_p 在各截面上的分布Fig. 9 Distribution of Y_p in sections

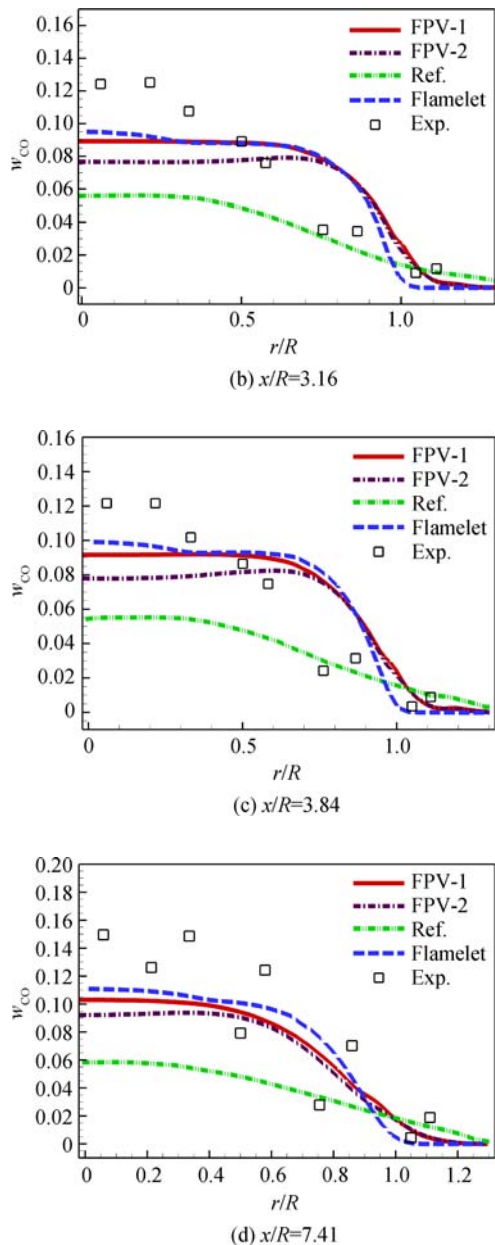


图 10 CO 质量分数在各截面上的分布

Fig. 10 Distribution of CO mass fraction in sections

优. FPV-1 和 FPV-2 以及稳态火焰面模型和实验结果吻合较好. 首先本文认为不管是 FPV-1 还是 FPV-2 定义的反应进度变量里均包含了 CO, 而文献中定义的反应进度变量是 CO_2 和 H_2O , 没有包含 CO, 这可能导致在预测 CO 质量分数时出现较大偏差. 另外, 还可能与选用的化学机理有关, 本文中 FPV 方法及稳态火焰面模型方法均采用的是 GRI-Mech 2.11 详细化学机理, 可能在计算重要中间产物 CO 时更加精确.

3 结 论

本文采用了两种关于不同反应进度变量的基

于 RANS 的火焰面/反应进度变量方法对同轴射流燃烧室进行了模拟计算, 得到了较好的结果, 具体结论如下:

1) 火焰面/反应进度变量方法计算结果比稳态火焰面模型计算结果更好, 和文献[5]参考值、实验值吻合程度更高. 能捕捉到稳态火焰面模型不能计算的火焰抬举等现象.

2) 反应进度变量 C 的定义不同对计算结果也有较大的影响. 总体上说, 本文选用反应进度变量 C_1 的 FPV-1 结果要优于采用 C_2 的 FPV-2 的结果. 两种反应进度变量计算得到的 CO 质量分数的分布均比文献[5]参考值更接近实验值. 因此作者认为如要更准确预测主要中间产物 CO 和 H_2 , 则定义反应进度变量时应考虑将其包含在内. 同时化学机理对组分的准确预测也有重要的影响.

3) 本文采用 RANS 的数值方法与火焰面/反应进度变量方法相结合计算湍流燃烧也能得到较高的计算精度.

尽管如此, 对火焰面/反应进度变量方法的研究还不完善, 比如对各组分刘易斯数不为 1 时流场参数的变化、反应进度变量 C 的定义以及 RANS 数值方法本身的精度问题, 差分格式等还需进一步研究. 计划下一步的工作是要用火焰面/反应进度变量方法与 LES 相结合来计算湍流燃烧问题, 并考虑各组分的刘易斯数不为 1 时对流场的影响以及辐射对流场温度的影响. 总体上说, 本文的工作取得了较满意的结果, 为后续继续研究湍流燃烧打下基础.

参考文献:

- [1] 张会强, 陈兴隆, 周力行, 等. 湍流燃烧数值模拟研究的综述[J]. 力学进展, 1999, 29(4): 567-575.
ZHANG Huiqiang, CHEN Xinglong, ZHOU Lixing, et al. A review on numerical modeling of turbulent combustion [J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(4): 567-575. (in Chinese)
- [2] Peters N. Turbulent combustion [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Peters N. An asymptotic analysis of nitric oxide formation in turbulent diffusion flames[J]. Combustion Science & Technology, 1978, 19(1): 39-49.
- [4] Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984, 10(3): 319-339.
- [5] Pierce C D. Progress-variable approach for large-eddy simulation of turbulent combustion[D]. Palo Alto, CA, US:

- Stanford University, 2001.
- [6] 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.
- [7] Ihme M, Pitsch H. Prediction of extinction and reignition in nonpremixed turbulent flames using a flamelet/progress variable model[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 155(1/2): 90-107.
- [8] Pitsch H. Extended flamelet model for LES of non-premixed combustion[R]. [s. l.]: Center for Turbulence Research, 2000.
- [9] Raman V, Pitsch H. Large-eddy simulation of a bluff-body-stabilized non-premixed flame using a recursive filter-refinement procedure[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142(4): 329-347.
- [10] 王海峰, 陈义良, 蔡晓丹, 等. 湍流射流扩散火焰的层流火焰面模拟[J]. *推进技术*, 2003, 24(1): 58-62.
WANG Haifeng, CHEN Yiliang, CAI Xiaodan, et al. Flamelet modeling of turbulent jet non-premixed flame[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(1): 58-62. (in Chinese)
- [11] 王海峰, 蔡晓丹, 陈义良. 基于火焰面的大涡模拟中条件标量耗散率的模型[J]. *燃烧科学与技术*, 2003, 9(5): 469-474.
WANG Haifeng, CAI Xiaodan, CHEN Yiliang. Models of the conditional scalar dissipation rate in flamelet-based large eddy simulations[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(5): 469-474. (in Chinese)
- [12] WANG Haifeng, CHEN Yiliang. Steady flamelet modelling of a turbulent non-premixed flame considering scalar dissipation rate fluctuations[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2005, 37(3): 133-153.
- [13] 侯凌云, 钟北京, 姜长青. 值班甲烷/空气射流火焰的小火焰模型模拟[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(6): 994-999.
HOU Lingyun, ZHOU Beijing, JIANG Changqing. Flamelet modeling of a pilot methane/air jet flame[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(6): 994-999. (in Chinese)
- [14] 陆阳. 燃烧计算中火焰面模型的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
LU Yang. A study on flamelet model in combustion simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [15] 武文, 黄威, 赵平辉, 等. 基于 RANS 求解的火焰面/反应进度变量湍流燃烧模型研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(10): 1016-1022.
WU Wen, HUANG Wei, ZHAO Pinghui, et al. Study of RANS based flamelet/progress variable turbulent combustion model[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(10): 1016-1022. (in Chinese)
- [16] 范周琴, 孙明波, 刘卫东. 超声速反应流火焰面/进度变量模型[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(8): 1750-1755.
FAN Zhouqin, SUN Mingbo, LIU Weidong. Flamelet/progress variable model for supersonic reacting flows[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(8): 1750-1755. (in Chinese)
- [17] 邢建文. 化学平衡假设和火焰面模型在超燃冲压发动机数值模拟中的应用[D]. 四川 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007.
XING Jianwen. Applications of chemical equilibrium and flamelet model for the numerical simulation of scramjet[D]. Mianyang Sichuan: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007. (in Chinese)
- [18] Bowman C T, Hanson R K, Davidson D F, et al. GRI-Mech 2.11[EB/OL]. [2015-02-10]. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [19] Liu F, Guo H, Smallwood G J, et al. A robust and accurate algorithm of the β -pdf integration and its application to turbulent methane-air diffusion combustion in a gas turbine combustor simulation[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, 41(8): 763-772.
- [20] Owen F K, Spadaccini L J, Bowman C T. Pollutant formation and energy release in confined turbulent diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1976, 16(1): 105-117.

(编辑: 王碧珺)