

不同湍流预混燃烧模型在本生灯火焰中的比较^{*}

韩 超, 张 培, 叶桃红, 陈义良

(中国科学技术大学 热科学与能源工程系, 安徽 合肥 230027)

摘 要: 湍流预混燃烧的大涡模拟数值计算近来受到很大的关注, 为了进一步发展湍流预混燃烧模型, 利用正在发展的湍流预混燃烧模型等值面集合的G函数方法、层流预混火焰生成流型的化学热力学建表FGM方法、G函数/FGM耦合方法三种燃烧模型, 对甲烷/空气湍流本生灯火焰进行了大涡模拟计算, 并对上述燃烧模型进行了比较。大涡模拟结果表明, G函数方法能够较为准确捕捉火焰的传播特性, FGM方法能够捕捉到火焰和湍流的相互作用, 但无法准确预测火焰的传播特性。而耦合的方法既可以捕捉火焰的传播特性, 又能够捕捉到火焰和湍流的相互作用。

关键词: 湍流预混火焰; 本生灯火焰; G函数; 火焰面数据库

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 08-1086-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.08.011

A Comparison of Three Different Turbulent Premixed Combustion Models in Busen Flames

HAN Chao, ZHANG Pei, YE Tao-hong, CHEN Yi-liang

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

Abstract: Turbulent premixed combustion modeling in large eddy simulation (LES) has attracted a lot of attention. In order to develop turbulent combustion model, in this work, three combustion models including G-equation, flamelet generated manifolds (FGM) method and the coupled G-FGM method were applied to simulate the turbulent methane/air Busen flame using LES. The predictions of these models were compared in detail. The results indicate that G-equation method could capture the flame propagation precisely. FGM method takes the interaction of turbulence and flame into consideration but cannot predict the flame propagation exactly. The coupled levelset/FGM method could have both advantages so that it has potential applications.

Keywords: Turbulent premixed flame; Busen flame; G function; Flamelet table

1 引 言

在燃烧设备中, 预混火焰近来受到很大的关注, 燃料和氧化剂在进入燃烧区之前已经充分混合。相比于扩散火焰, 预混火焰尤其是贫燃的预混火焰, 能

够显著降低污染物的排放, 同时燃烧室的温度也更为均匀, 但也容易产生不稳定燃烧现象。随着数值计算方法的发展, 大涡模拟(LES)逐渐成为模拟湍流燃烧的重要方法^[1]。大涡模拟能够直接计算出湍流场中非正常的大尺度运动, 而小尺度脉动采用模型

^{*} 收稿日期: 2013-08-07; 修订日期: 2013-09-25。

基金项目: 国家自然科学基金(51176178); 国家自然科学基金重点基金(50936005)。

作者简介: 韩 超(1992—), 男, 硕士生, 研究领域为湍流燃烧。E-mail: danielhc@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 叶桃红(1966—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为湍流燃烧。E-mail: thye@mail.ustc.edu.cn

进行模化^[2]。然而用于湍流燃烧场的数值模拟时,因为化学反应总是发生在湍流最小的尺度内,化学反应的尺度往往小于LES的网格尺度,LES方法仍然遇到和RANS方法一样的困难,即过滤后的组分方程中,化学反应源项仍需要燃烧模型进行封闭。

工业燃烧室中的预混燃烧多属于皱褶火焰面燃烧机制或者薄反应区机制^[3]。由于湍流预混燃烧中存在火焰传播的现象,同时湍流和化学反应有强烈的相互作用,现有的模型依据相应的假设主要分为四类^[4,5]:(1)假设反应主要受湍流混合控制,这类模型有涡旋破碎(EBU),涡旋耗散(EDM)模型等,此类模型在预测预混火焰时存在明显的不足;(2)求解概率密度函数(TPDF)输运方程的方法,这类方法计算量很大,考虑详细化学反应机理时对计算资源要求很高,同时PDF方程中小尺度混合模型仍然不够完善;(3)加厚火焰面模型^[6],这种方法通过对计算的火焰进行数值加厚,使得反应区在LES的网格尺度内可解,缺点是改变了火焰的动力学特性;(4)火焰面的方法,包括BML分析模型、火焰面密度模型、等值面集合的G函数方法^[7,8]以及基于层流火焰面概念构建化学热力学数据库^[9]的方法等。

基于火焰面概念的湍流预混燃烧模型,可以考虑详细的化学反应机理,计算量也不大,受到广泛的关注。其中,等值面集合G函数方法是将预混火焰面看作是流体面,并定义 $G=G_0$ 的等值面作为火焰面的位置。对湍流火焰传播速度进行适当模化后,通过G函数的变化就能够追踪到火焰在湍流场中的变化,能够较好地预测火焰传播特性。应用G函数时,通常的做法是直接距火焰面的距离构建化学热力学数据表,但在薄反应区的燃烧机制中,这种方法不能很好的考虑湍流对预热区的影响^[10]。基于层流火焰面概念构建化学热力学数据库方法将化学反应的多维空间映射到低维空间,如利用混合物分数和化学反应进度作为查找数据库的参数,并利用假定的概率密度函数表示湍流的影响。该方法不仅能够考虑详细的化学反应机理,同时计算量也较小。但是由于LES网格尺度比火焰面厚度大很多,该方法不能很好预测火焰的传播特性。为了能够同时准确预测火焰的传播特性和湍流对火焰的作用,Moureau^[11]和Knudsen^[10]等将G函数方法和火焰面数据库进行耦合,使得能够更为准确的预测湍流预混火焰。

湍流本生灯火焰是校验湍流燃烧模型准确性的重要预混火焰。Chen^[12]详细测量了不同雷诺数下的

本生灯火焰,给湍流预混燃烧模型的验证提供了丰富的实验数据。国际上很多学者利用该实验数据对燃烧模型进行研究^[4,7,13-20]。本文基于该实验中的F3火焰,分别利用G函数方法和火焰面建库方法计算了湍流本生灯火焰,并基于Knudsen^[10]的方法将二者进行耦合,并将计算结果与实验数据进行了详细的比较,分析各个模型的优缺点。

2 火焰简介

文献[12]详细报道了湍流本生灯F3火焰的测量和对实验数据的分析。图1为本文模拟的本生灯火焰实验装置示意图^[12],中心射流是当量比 $\phi=1$ 的甲烷/空气预混气,其内径 $D=12\text{mm}$,射流的平均速度为 $U_0=30\text{m/s}$,中心射流的雷诺数 Re 约为24200。在射流周围是用当量比 $\phi=1$ 的 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 已燃气作为值班火焰,直径为 $5.76D$,其平均速度为 1.5m/s 。在值班火焰的外围设置有水冷却,使得值班火焰进口温度低于对应的绝热火焰温度。燃烧器外围是空气伴流,平均速度为 0.22m/s 。

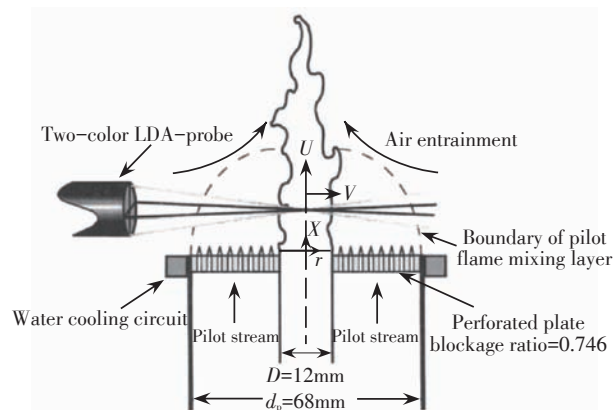


Fig. 1 Experimental setup of Busen burner^[12]

3 数学物理模型

流场采用密度加权过滤后的N-S方程求解,其中动量方程中的亚格子应力项使用动态Smagorinsky模型模化。燃烧场分别利用三种模型进行求解:(1)G函数方法,通过求解G函数确定火焰面的位置,并计算相应温度方程的反应源项;(2)基于层流预混火焰的化学热力学建表FGM(Flamelet Generated Manifold)方法,求解混合物分数及其方差和反应进度变量及其方差的输运方程。组分浓度、温度等化学热力学参数采用化学热力学数据库结合假定概率密度函数的方法进行模化,通过查表得到组分的质量分

数和温度等参数值;(3)G函数和FGM耦合方法。

3.1 模型1:G函数方法

用G函数求解湍流预混燃烧的方法中,火焰前锋的位置由标量 $G=G_0$ 等值面给出。Peters^[8]推导了对皱褶火焰面以及薄反应区燃烧机制都适用的火焰前沿 $\tilde{G}=\tilde{G}_0$ 的方程。在火焰面的两侧定义函数 $\tilde{G}$ 为距火焰面的距离,使等值面函数具有明确的物理意义: $\tilde{G}=0$ 为火焰面, $\tilde{G}<0$ 表示未燃气, $\tilde{G}>0$ 表示已燃气。 $\tilde{G}$ 的控制方程为^[7]

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{G} = \bar{\rho} S_T \left| \nabla \tilde{G} \right| - \bar{\rho} D_i \tilde{\kappa} \left| \nabla \tilde{G} \right| \quad (1)$$

式中 D_i 为湍流扩散系数, $\tilde{\kappa}$ 为平均火焰前锋的曲率 $\tilde{\kappa} = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \tilde{G}}{|\nabla \tilde{G}|} \right) \Big|_{\tilde{G}=\tilde{G}_0}$ 。 S_T 为湍流火焰传播速度,可以用下面的模型进行模化^[7]

$$\frac{S_T - S_L}{S_L} = \frac{\tilde{v}_\Delta}{S_L} b_3 \sqrt{\frac{Da_\Delta / Sc_\Delta}{1 + Da_\Delta b_3^2 / (b_1^2 Sc_\Delta)}} \quad (2)$$

式中常数 $b_1=2.0$, $b_3=1.0$, 亚格子施密特数 $Sc_\Delta = 0.5$, 湍流 Da 数 $Da_\Delta = \frac{S_L \Delta}{\tilde{v}_\Delta l_F}$, 亚格子脉动速度 $\tilde{v}_\Delta = v_{\Delta,\Delta} / \Delta$, $v_{\Delta,\Delta}$ 利用动态的 Smagorinsky 模型给出, Δ 是网格尺度, l_F 为层流火焰厚度。

在求解得到过滤的 $\tilde{G}$ 函数后,需要将其与燃烧场进行耦合。一种合理的假设是反应放热主要发生在火焰面上,可以给出温度输运方程及其反应源项^[21]

$$\bar{\rho} D_i \tilde{T} = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{T}) + \nabla \tau_{\tilde{T}}^{\text{res}} + \bar{\rho} \tilde{\omega}_T \quad (3)$$

$$\tilde{\omega}_T = (\tilde{T}_{\max} - \tilde{T}) \frac{S_L}{2l_F} (1 + \tanh \frac{\tilde{G}}{\tilde{G}^2}) \quad (4)$$

式中 $\tilde{G}^2 = 0.2 \Delta^2 \left| \nabla \tilde{G} \right|^2$ 表征湍流火焰面的厚度, $\tilde{T}_{\max}$ 是当地能够达到的最高温度。由于实验中采用水冷导致值班火焰有热损以及与空气伴流混合的影响,本文计算 $\tilde{T}_{\max}$ 时,先计算不同当量比即不同总焓 H 的一维平面预混火焰,然后将得到的已燃气与空气作为一维对撞射流的边界条件进行混合,可得到 $T_{\max}$ 关于总焓 H 和混合物分数 Z 之间函数关系的数据表。引入混合物分数 Z 是为了考虑空气伴流与已燃气混合的影响。并通过假定混合物分数和总焓在流场中的概率分布来表征湍流的统计特性。在本文中,混合物分数假定为 β 分布,总焓 H 假定为 δ 分布,可得到最高温度的数据表 $\tilde{T}_{\max}(\tilde{Z}, \tilde{Z}^2, \tilde{H})$ 。在数值计算中,先求解过滤后的混合物分数、混合物分数方

差以及总焓的输运方程(5)~(7),利用得到的总焓 $\tilde{H}$ 和混合物分数 $\tilde{Z}$ 及其方差 $\tilde{Z}^2$ 查取数据表得到 $\tilde{T}_{\max}$ 。

$$\bar{\rho} D_i \tilde{Z} = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{Z}) + \nabla \tau_{\tilde{Z}}^{\text{res}} \quad (5)$$

$$\bar{\rho} D_i \tilde{Z}^2 = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{Z}^2) + \nabla \tau_{\tilde{Z}^2}^{\text{res}} - 2 \bar{\rho} \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{Z} - \bar{\rho} \chi_Z^{\text{res}} \quad (6)$$

$$\bar{\rho} D_i \tilde{H} = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{H}) + \nabla \tau_{\tilde{H}}^{\text{res}} \quad (7)$$

式中 $\tau_{\tilde{\phi}}^{\text{res}}$ 为亚格子项,利用动态模型计算得到,即 $\tau_{\tilde{\phi}}^{\text{res}} = \bar{\rho} \tilde{D}_i \nabla \tilde{\phi}$, $\tilde{D}_i$ 利用动态模型确定^[21]。在标量的方差方程中,方程右端项分别为扩散项、亚格子输运项 $\nabla \tau_{\tilde{Z}^2}^{\text{res}}$ 、产生项 $-2 \bar{\rho} \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{Z}$ 以及耗散项 $\bar{\rho} \chi_Z^{\text{res}}$ 。亚格子输运项采用梯度输运假设结合动态模型确定系数的方法计算。混合物分数的亚格子标量耗散率利用模型 $\chi_Z^{\text{res}} = \frac{C_{\chi_e} C_{\chi_\mu} v_\Delta^2}{Sc_i C_\mu \Delta^2} \tilde{Z}^2$ 计算,其中 $C_{\chi_e} = 2$, $\frac{C_{\chi_e}}{C_\mu} = 2$, 湍流施密特数 $Sc_i = 0.4$ ^[24]。

通过上述方法得到温度后,利用状态方程得到密度。这种方法直接求解了温度方程,在合理的湍流火焰传播速度模型下,G函数能够较准确预测火焰的传播特性,并给出温度分布,但是无法计算组分质量分数的分布。

3.2 模型2:化学热力学建表FGM方法

FGM方法是通过求解一维预混层流火焰构建化学热力学数据表。对于特定当量比下的预混火焰,温度和组分等化学热力学参数 ϕ 可以表示为反应进度 Y_c 的函数,即 $\phi = \phi(Y_c)$, $Y_c = Y_{H_2} + Y_{H_2O} + Y_{CO} + Y_{CO_2}$ 。由于值班火焰和空气伴流混合的影响,需要计算不同当量比下预混火焰的化学热力学参数,本文用混合物分数 Z 和反应进度 Y_c 两个参数构建出数据表,即 $\phi = \phi(Y_c, Z)$ (定义当量比 $\phi=1$ 的甲烷/空气的预混气的混合物分数 $Z=1$,空气的混合物分数 $Z=0$),表中的化学热力学参数包括组分质量分数、密度、组分的反应速率以及分子输运和热物性参数以及反应进度的反应源项 $\tilde{\omega}_c$ 等。

为了考虑湍流的统计特性,需要假定混合物分数和反应进度变量在流场中的概率分布。首先对 Y_c 进行归一化处理,即 $c = \frac{Y_c}{Y_{\text{eq}}(Z)}$, $Y_{\text{eq}}(Z)$ 是达到化学平衡时的反应进度;然后假定 Z 和 c 统计独立,守恒的标量混合物分数 Z 假定成 β 分布是合适的^[22],反应进度变量分布也假定为 β 分布。对层流数据表 $\phi = \phi(Z, Y_c)$ 进行积分可得到

$$\tilde{\phi} = \iint \phi P_\beta(\tilde{Z}, \tilde{Z}^2) P_\beta(\tilde{c}, \tilde{c}^2) dZ dc$$

这样就得到了湍流火焰面数据表 $\tilde{\phi}(\tilde{Z}, \tilde{Z}^2, \tilde{c}, \tilde{c}^2)$ 。

针对值班火焰中水冷却造成的热损,本文首先通过求解总焓的湍流输运方程,再利用混合物总焓的公式 $H = C_p(T - T_{\text{ref}}) + H_{\text{ref}}^0$ 计算得温度分布, H 是总焓, H_{ref}^0 是参考温度 $T_{\text{ref}} = 298\text{K}$ 下的生成焓, C_p 从数据表中查取得到。因此,模型2的预混火焰面建表方法除了要求解上述方程(5)~(7)外,还要求解反应进度及其方差的输运方程

$$\bar{\rho} D_{\text{I}} \tilde{Y}_{\text{C}} = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{Y}_{\text{C}}) + \nabla \tau_{\tilde{Y}_{\text{C}}}^{\text{res}} + \bar{\rho} \tilde{\omega}_{\text{Y}_{\text{C}}} \quad (8)$$

$$\bar{\rho} D_{\text{I}} \tilde{Y}_{\text{C}}^2 = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D} \nabla \tilde{Y}_{\text{C}}^2) + \nabla \tau_{\tilde{Y}_{\text{C}}^2}^{\text{res}} - 2\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{Y}_{\text{C}}'' \nabla \tilde{Y}_{\text{C}} - \bar{\rho} \chi_{\text{Y}_{\text{C}}}^{\text{res}} + 2\bar{\rho} \tilde{Y}_{\text{C}}'' \tilde{\omega}_{\text{Y}_{\text{C}}} \quad (9)$$

上述方程中各个项的模型同模型1中类似方程的模化。 $\tilde{Y}_{\text{C}}^2$ 的输运方程中源项 $\tilde{Y}_{\text{C}}'' \tilde{\omega}_{\text{Y}_{\text{C}}}$ 储存在数据表中,计算时直接查取得到。

求解得到 $\tilde{Y}_{\text{C}}$ 和 $\tilde{Y}_{\text{C}}^2$ 后,为了进行查表,需要按照反应进度 c 定义进行无量纲化^[25],即

$$\tilde{c} = \frac{\tilde{Y}_{\text{C}}}{\tilde{Y}_{\text{ceq}}(Z)} \quad (10)$$

$$\tilde{c}^2 = \frac{\tilde{Y}_{\text{C}}^2 \frac{\tilde{Y}_{\text{ceq}}^2}{\tilde{Y}_{\text{ceq}}^2} + \tilde{Y}_{\text{C}}^2 (\frac{\tilde{Y}_{\text{ceq}}^2}{\tilde{Y}_{\text{ceq}}^2} - 1)}{\tilde{Y}_{\text{C}} (\tilde{Y}_{\text{ceq}} - \tilde{Y}_{\text{C}})} \quad (11)$$

式中 $\tilde{Y}_{\text{ceq}}(Z)$ 是不同混合物分数下达到化学平衡时 $\tilde{Y}_{\text{C}}$ 的值。根据 $\tilde{Z}$, $\tilde{Z}^2$, $\tilde{c}$, $\tilde{c}^2$ 进行查表得到相应位置的各个组分的平均质量分数和密度。

3.3 模型3:G函数和FGM的耦合方法

直接用G函数计算预混火焰时,可以用距离函数方法来构建化学热力学数据表,但在模拟薄反应区燃烧机制的湍流预混火焰时存在缺陷,因为在薄反应区燃烧机制中,湍流对预热区的结构有影响,因而假设火焰结构只与距火焰面的距离有关是不准确的^[10]。因此有必要将G函数和FGM进行耦合,这样G函数能够预测火焰的传播特性,而通过求解 Y_{C} 的方程能够捕捉到湍流对火焰结构的影响^[10,11]。而耦合的方法是将 Y_{C} 方程的化学反应源项与G函数进行耦合,即 $\tilde{\omega}_{\text{C}} = \tilde{\omega}_{\text{C}}(\tilde{c}_{\text{C}})$ 。

文献[10]详细给出了G函数和FGM进行耦合的方法:在求解得到G函数后,假定在 $\tilde{G}=0$ 处 $\tilde{c}=0.5$,在火焰面两侧 $\tilde{c}$ 随离火焰距离成线性分布,通过距离的概率积分可得反应进度和离火焰前锋距离的函数 $\tilde{c}_{\text{C}} = \tilde{c}_{\text{C}}(G)$,利用 $\tilde{c}_{\text{C}}$ 以及求解得到混合物分数等参数

查预混火焰的数据表得到反应进度输运方程的反应源项 $\tilde{\omega}_{\text{C}} = \tilde{\omega}_{\text{C}}(\tilde{c}_{\text{C}})$,将G函数方法和FGM方法有效结合起来。利用耦合得到的反应进度变量源项,求解反应进度的输运方程得到反应进度变量并查表得到密度、组分等其他热力学参数。本文利用模型3进行计算时,化学热力学建表方法同前面的FGM建表方法,采用文献[10]中给出的函数 $\tilde{c}_{\text{C}} = \tilde{c}_{\text{C}}(G)$ 代替FGM方法中的反应进度变量,查表得到反应进度源项;用与模型2相同的方法计算值班火焰热损,模型3中需要求解方程(1)和(5)~(9),反应进度变量的无量纲化同FGM方法。

4 数值方法

本文采用有限差分方法对控制方程进行求解,空间和时间均采用交错网格以提高差分格式的精度和数值求解的稳定性,扩散项采用二阶中心差分格式,对流项采用动能守恒的二阶中心差分格式,既减少数值耗散,又能提高程序稳定性;时间导数采用二阶半隐式离散方法。G函数方程采用QUICK格式求解。标量方程采用三阶的Weno格式求解。

对本生灯火焰开展大涡模拟计算时,计算区域在轴向、径向、周向分别为 $20D \times 6D \times 2\pi$ 。轴向和径向采用 336×108 个非均匀网格,在射流进口处最密,最小网格尺寸约为 0.2mm ,可以满足LES计算该本生灯火焰的要求^[7,16],并在剪切层中进行了加密,周向采用32个均匀网格。将周向网格加密到64后,统计结果基本不变。计算的时间步长使CFL数在0.5以下,在燃烧场经过约3个Flowtime(1个Flowtime等于 L/U , L 是轴向计算区域的长度,为 $20D$, U 是值班火焰的速度为 1.5m/s)达到统计定常后统计了约4个Flowtime。

本文计算区域出口及周围边界均采用对流边界条件,射流入口通过预先计算一段周期性边界条件的充分发展管流,并取截面上瞬时速度场作为燃料射流的进口条件。对于温度和总焓的进口条件,中心射流和空气的温度均为 298K ,而值班火焰的进口,实验中温度分布不均匀,在数值计算中,有取 1950K ^[14],也有取 1936K ^[13]的,也有取 1785K ^[26]的,计算结果稍有差异,但在本文中进口温度均设定为 1800K ,总焓进口是对应温度为 1800K 的总焓的值。反应进度的进口条件是根据实验条件以及反应进度的定义计算得到的,即中心燃料流和空气伴流中 $Y_{\text{C}}=0$,值班火焰

是甲烷/空气的燃烧产物,经计算得到 $Y_c=0.267$ 。

5 结果与讨论

5.1 火焰位置和形状

图2(a)~(c)是用三种模型计算得到的瞬时火焰面的位置和形状。火焰面的位置用 $\tilde{G}=0$ 或者 $\tilde{c}=0.5$ 表示。火焰呈现出高度的皱褶,在火焰顶部皱褶的更厉害。三种模型预测出的火焰长度基本相同,用 $\tilde{G}=0$ 表示火焰面时皱褶的更多。

图2(d)是模型3计算得到的平均火焰面的位置,即 $\langle \tilde{G} \rangle = 0$ 的位置。图中说明了火焰存在曲率的影响,特别是在火焰的底部由于管壁和热损的影响,以及在火焰的顶部由于脉动使得该部分曲率的影响会比较大。因而在计算本生灯火焰时需要考虑曲率的影响,模型1和模型3通过求解G函数方程考虑了曲率的影响,而模型2没有考虑曲率的影响,这也是模型2计算结果偏差较大的可能原因之一。

5.2 统计结果

图3为不同轴向位置上无量纲平均轴向速度、径向速度、湍动能和温度的径向分布,其中 U_0 是射流的进口平均速度 $U_0=30\text{m/s}$, k_0 是实验给出的射流进口湍动能值 $k_0=3.82\text{m}^2/\text{s}^2$, 无量纲温度定义为 $\langle T_{\text{non}} \rangle = (\langle T \rangle - T_0)/(T_{\text{ad}} - T_0)$, $T_{\text{ad}}=2248\text{K}$ 是当量比 $\phi=1$ 的甲烷/空气预混气绝热火焰温度, $T_0=298\text{K}$ 。从图中可以看出,三种模型均可以较好的计算燃烧释热膨胀导致的平均轴向速度分布;而径向速度分布稍有差异,模型1计算得到的平均径向速度与实验值均符合得很好,模型2给出的平均径向速度比实验值稍

大,模型3给出的径向速度则偏小。由于径向速度很小,比轴向速度小一个量级,混合层或湍流火焰厚度内的径向速度分布通常难以计算准确。另外,导致径向速度计算结果不同也可能是由于三种模型计算密度的方式不同引起的,模型1是在计算得到温度方程后利用状态方程求得的,密度平均值计算较为准确,而模型2,3中的密度是利用预混火焰面数据库查得的,可能存在偏差。由于密度的不同,导致速度场的计算结果稍有差异。对于湍动能,模型2计算结果最好,而模型1的结果偏差较大。这可能是由于模型2通过假定概率分布的方法,考虑了湍流和火焰面的相互作用,对密度脉动有较好的捕捉,从而湍动能计算较为准确;而模型1中假定热量全部在火焰面附近产生,并没有考虑湍流和热膨胀的相互作用,使计算得到的湍动能结果偏差较大。

对于平均温度分布,模型3预测的最准确,和实验值符合的很好。模型2能够预测出已燃气后的温度,但对温度的变化梯度或者火焰厚度预测的偏差较大,这是由于LES的网格尺度无法求解火焰面,不能准确捕捉到火焰的传播速度,因而温度分布的计算结果与实验值差距较大。而模型1中,尽管在 $x/D=8.5$ 处与实验值符合较好,但在 $x/D=4.5$ 和 6.5 处与实验值差别较大,这可能是热量全部在火焰面附近产生的假设不完全符合实际,使得已燃气的温度偏大。与模型1和2相比,模型3通过求解G方程保证了能够较为准确的预测出火焰传播特性,并通过假定反应进度的概率分布和求解反应进度的方程考虑了湍流和火焰的相互作用,从而能够给出更好的温度分布。

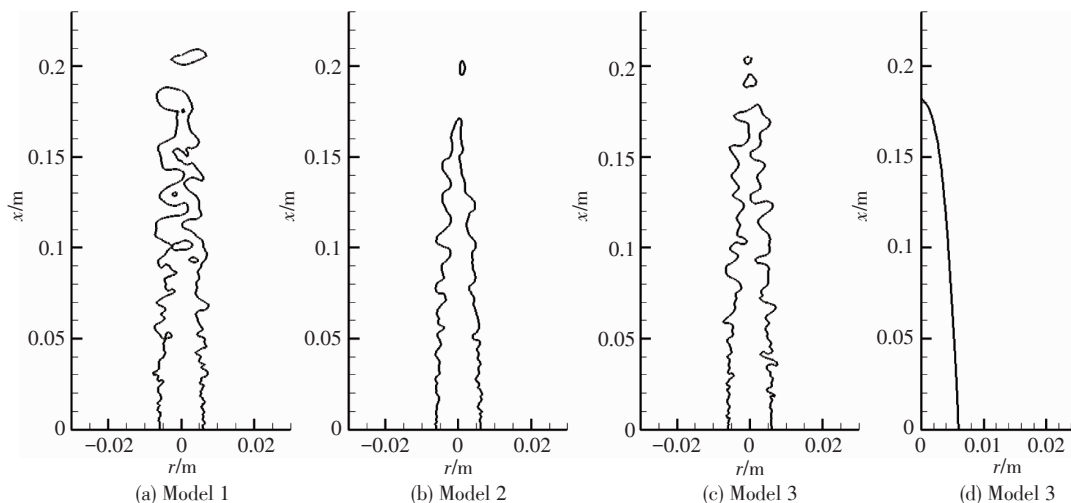


Fig. 2 Flame location and structures from the three different combustion models

总之,模型1通过给出合理的湍流火焰传播速度表达式,能够较好预测预混火焰的传播特性,但这种模型过于简单,同时也不能给出组分的分布;而本文的模型2计算较为简单,但不能准确预测火焰的传播

特性,火焰厚度也偏小;模型3运用G函数能够较好预测出火焰的传播特性,同时又考虑了湍流与火焰的相互作用,特别是湍流对预热区的影响,因而对于计算湍流预混火焰是一种较好的模型。

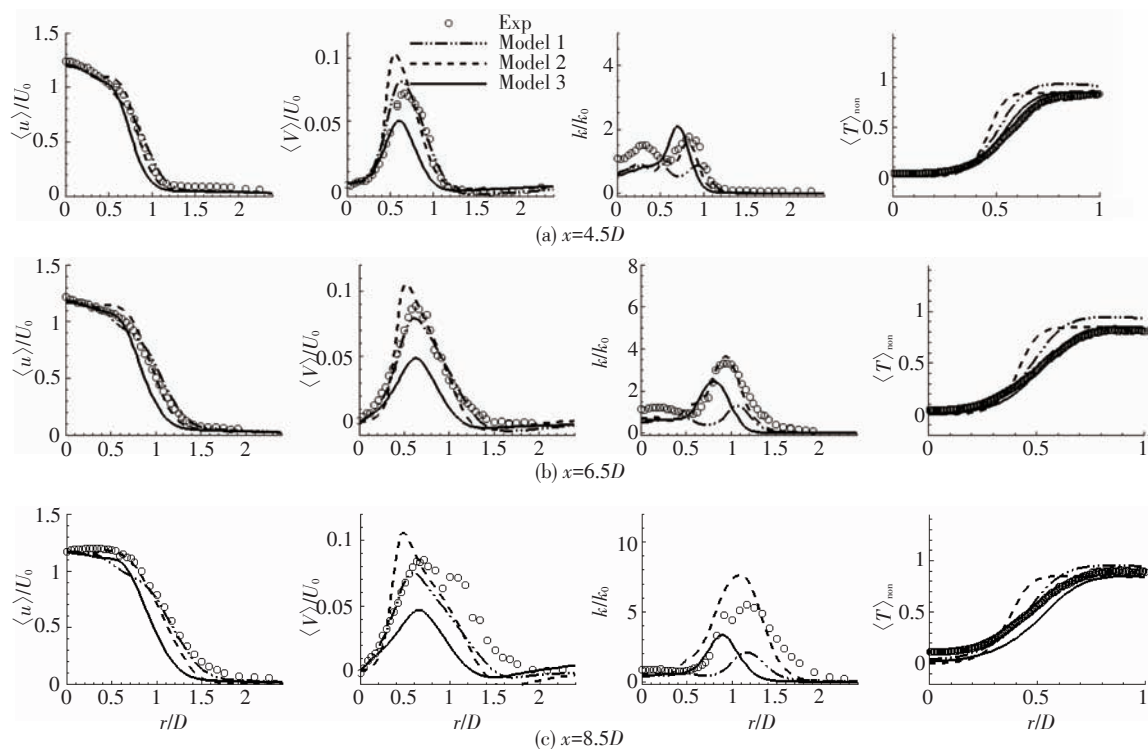


Fig. 3 Radial distribution of mean axial and radial velocity, turbulent energy and temperature at different axial locations

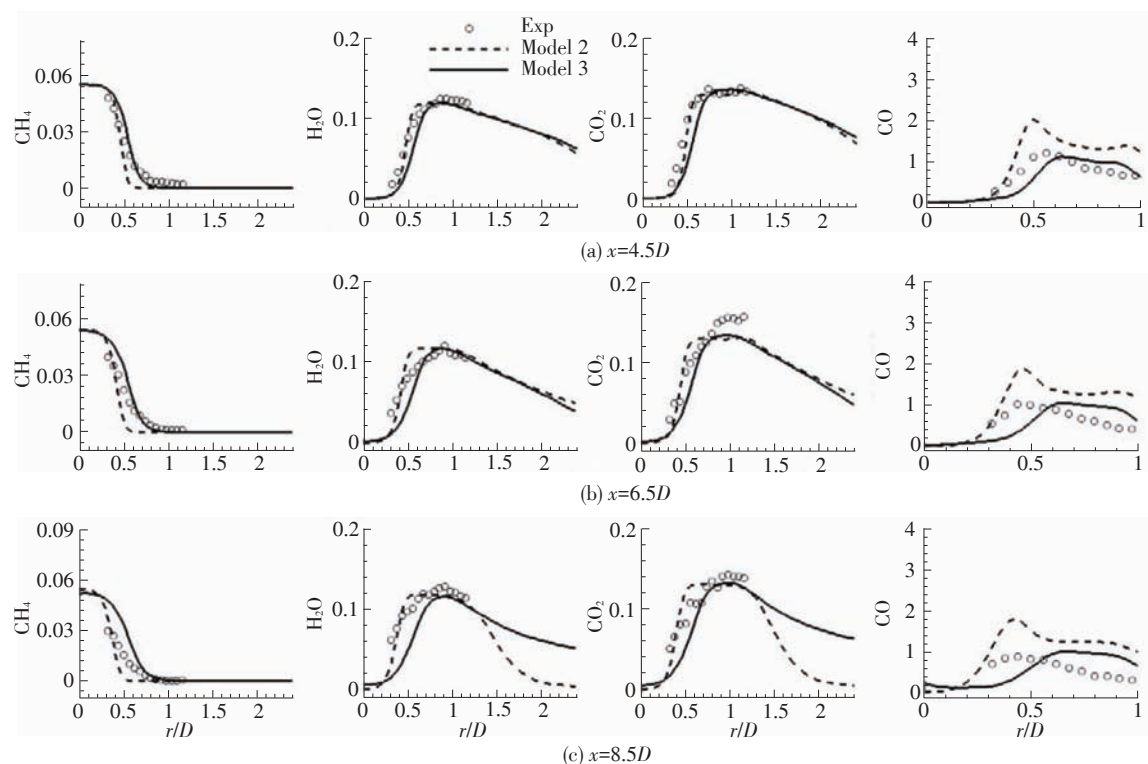


Fig. 4 Radial distribution of mass fractions of CH_4 , H_2O , CO_2 , CO at different axial locations

图4表示的是不同轴向位置上组分 CH_4 , H_2O , CO_2 , CO 的平均质量分数在径向的分布。从图中可以看出,尽管模型2能够计算出组分分布的趋势,但是无法准确预测组分的变化梯度,这是由于不能准确捕捉到火焰的传播速度,因而组分计算结果与实验值差距较大。而模型3相比模型2有较大的改进,这是由于模型3中通过等值面集合的G方法较好的预测了火焰传播速度。

5.3 温度梯度

温度梯度表征着火焰面的厚度,图5显示的是温度梯度 δ_T 在不同轴向位置的分布,其中 $\delta_T = \partial(T_{\text{non}})/\partial r$ 。从图中看出,模型3预测的火焰厚度比模型1和2有较大改进,与实验值更接近。说明模型3能更为准确的预测出湍流预混火焰的结构,其结合了模型1和模型2的优势。模型2预测的温度梯度与实验值偏差很大,这是由于LES的网格尺度无法求解火焰面,无法准确表征火焰面的结构。

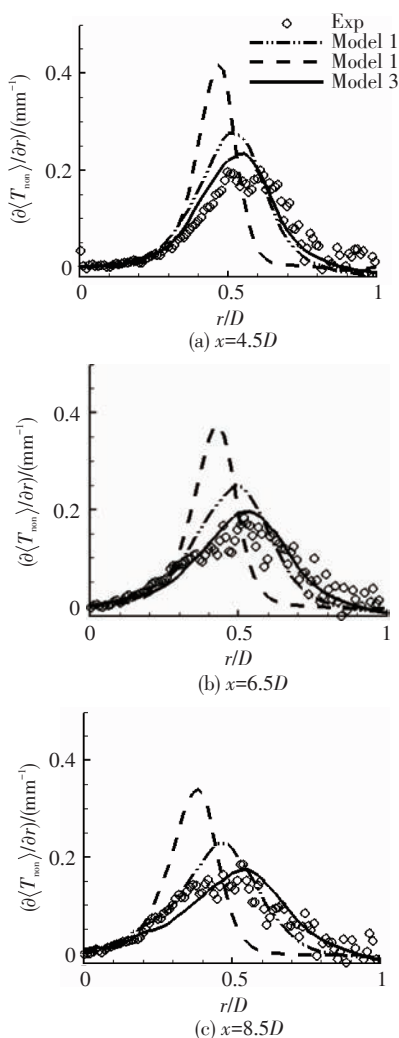


Fig. 5 Radial temperature gradient at different axial locations

6 结论

本文分别用湍流预混燃烧模型中的G函数方法、FGM方法以及G函数/FGM耦合模型开展了湍流本生灯火焰的大涡模拟,通过和实验数据的比较,可以得出如下结论:

(1)G函数方法通过流体面的动力学方程和较合理的湍流火焰传播速度模型,能够较好预测预混火焰的传播特性,但这种模型有赖于湍流火焰传播速度模型的准确性,同时也不能给出组分的分布;

(2)本文的FGM方法计算量小,相对简单,考虑了湍流和火焰的相互作用,但由于大涡模拟中网格尺度比火焰厚度大很多,不能较好计算火焰的传播特性,计算得到的火焰厚度也偏小,需要发展更为合理的模型,如标量耗散率以及概率密度函数的合理模型;

(3)G函数/FGM耦合模型运用G函数能够较好预测出火焰的传播特性,同时又考虑了湍流与火焰的相互作用,特别是湍流对预热区的影响,可以给出更加合理的组分和温度分布以及火焰厚度,是计算湍流预混火焰的较好选择。

参考文献:

- [1] Pitsch H. Large-Eddy Simulation of Turbulent Combustion [J]. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 2006, 38: 453-482.
- [2] Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows [M]. Berlin: Springer, 2000.
- [3] Veynante D, Vervisch L. Turbulent Combustion Modeling [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, 28 (3): 193-266.
- [4] Schneider E, Sadiki A, Janicka J. Modeling and 3D-Simulation of the Kinetic Effects in the Post-Flame Region of Turbulent Premixed Flames Based on the G-Equation Approach [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2005, 75 (1-4): 191-216.
- [5] Poinot T, Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion [M]. Philadelphia: RT Edwards Incorporated, 2005.
- [6] Colin O, Ducros F, Veynante D, et al. A Thickened Flame Model for Large Eddy Simulations of Turbulent Premixed Combustion [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12: 1843-1845.
- [7] Pitsch H, Duchamp de Lageneste L. LargeE-Eddy Simulation of Premixed Turbulent Combustion Using a Level-Set Approach [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 2001-2008.
- [8] Norbert Peters. Turbulent combustion [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- [9] Fiorina B, Gicquel O, Vervisch L, et al. Premixed Turbulent Combustion Modeling Using Tabulated Detailed Chemistry and PDF [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 867–874.
- [10] Knudsen E, Kim SH, Pitsch H. An Analysis of Premixed Flamelet Models for Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22: 109–115.
- [11] Moureau V, Fiorina B, Pitsch H. A Level Set Formulation for Premixed Combustion LES Considering the Turbulent Flame Structure [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(4): 801–812.
- [12] Chen Y C, Peters N, Schneemann G A, et al. The Detailed Flame Structure of Highly Stretched Turbulent Premixed Methane–Air Flames [J]. *Combustion and flame*, 1996, 107(3): 223–244.
- [13] Herrmann M. Numerical Simulation of Turbulent Bunsen Flames with a Level Set Flamelet Model [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(1): 357–375.
- [14] Kolla H, Swaminathan N. Strained Flamelets for Turbulent Premixed Flames II: Laboratory Flame Results [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1274–1289.
- [15] De A, Acharya S. Large Eddy Simulation of a Premixed Bunsen Flame Using a Modified Thickened–Flame Model at Two Reynolds Number [J]. *Combustion Science and Technology*, 2009, 181(10): 1231–1272.
- [16] Wang G, Boileau M, Veynante D. Implementation of a Dynamic Thickened Flame Model for Large Eddy Simulations of Turbulent Premixed Combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(11): 2199–2213.
- [17] Salehi M M, Bushe W K. Presumed PDF Modeling for RANS Simulation of Turbulent Premixed Flames [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2010, 14(3): 381–403.
- [18] 杨成仁, 侯凌云, 傅维标. 预混湍流燃烧的 level-set 小火焰库方法研究 [J]. *航空动力学报*, 2003, 3(18): 258–262.
- [19] 杨金虎, 刘富强, 毛艳辉, 等. 部分预混湍流燃烧模型的本生火焰计算验证 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 10(33) 1793–1797.
- [20] 杨金虎, 刘富强, 徐 纲, 等. 基于层流小火焰和 beta-PDF 的预混燃烧模型 [J]. *航空动力学报*, 2012, 27(005): 1005–1014.
- [21] Paravento F. A Robust Numerical Model for Premixed Flames with High Density Ratios Based on New Pressure Correction and IMEX Schemes [J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, 229(12): 4613–4647.
- [22] 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(1): 70–89.
- [23] Pierce C D, Moin P. A Dynamic Model for Subgrid-Scale Variance and Dissipation Rate of a Conserved Scalar [J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10: 3041–3044.
- [24] Pitsch H, Steiner H. Large–Eddy Simulation of a Turbulent Piloted Methane/air Diffusion Flame (Sandia Flame D) [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12: 2541–2554.
- [25] Galpin J, Angelberger C, Naudin A, et al. Large–Eddy Simulation of H₂–Air Auto–Ignition Using Tabulated Detailed Chemistry [J]. *Journal of Turbulence*, 2008, (9): 1–21.
- [26] De A, Acharya S. Large Eddy Simulation of a Premixed Bunsen Flame Using a Modified Thickened–Flame Model at Two Reynolds Number [J]. *Combustion Science and Technology*, 2009, 181(10): 1231–1272.

(编辑:张荣莉)