

基于DTF和REDIM技术构建的亚网格 燃烧模型及其验证*

徐 亮¹, 王 平², 余 倩¹, 侯天增¹, 王海连³, 陈明敏³, 何 磊³

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏大学 能源研究院, 江苏 镇江 212013;

3. 上海电气燃气轮机有限公司, 上海 201199)

摘 要: 将反应扩散流形 (REDIM) 技术与动态火焰增厚 (DTF) 模型结合起来, 构建了一种新的湍流预混燃烧模型。用该模型对PRECCINSTA燃烧器全局当量比分别为0.75和0.83的两种贫燃预混旋转火焰开展大涡模拟计算, 将计算结果与原DTF模型计算结果以及实验结果进行对比研究, 着重分析了速度、温度以及CO₂质量分数的径向分布情况。研究表明: 新模型的计算结果与实验结果吻合良好, 由于新模型求解的组分输运方程数目减少, 计算效率比原DTF模型约提高15%; 理论上, 新模型可推广应用子部分预混火焰的计算, 只要采用合适的REDIM化学反应表格, 如二维的REDIM表格。

关键词: 大涡模拟; 反应扩散流形; 动态火焰增厚模型; 贫燃预混旋转火焰; 燃气轮机燃烧室

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 02-0347-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.170766

A Sub-Grid Scale Combustion Model Based on DTF and REDIM Method and Its Validation

XU Liang¹, WANG Ping², YU Qian¹, HOU Tian-zeng¹, WANG Hai-lian³, CHEN Ming-min³, HE Lei³

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. Shanghai Electric Power Generation Group, Shanghai 201199, China)

Abstract: The reaction-diffusion manifold (REDIM) technique is utilized in combination with the dynamically thickened-flame (DTF) model, which forms a new turbulent premixed combustion model. Then the new model was used to calculate two lean premixed swirling flames in PRECCINSTA combustor via large eddy simulation, with equivalence ratios 0.75 and 0.83, respectively. The radial profiles of velocity, temperature and CO₂ mass fraction were analyzed and compared with the results from original DTF model and the experimental data. The results are in good overall agreement with the corresponding experiment. Since less species transport equations are solved in REDIM-DTF model, the computational efficiency of it is about 15% higher than the original DTF model. In theory, the new model can also be applied to simulate partially premixed flames, as long as an appropriate REDIM chemistry look-up table is used, e.g. two-dimensional REDIM table.

Key words: Large eddy simulation; Reaction-diffusion manifold; Dynamically thickened-flame model; Lean premixed swirling flame; Gas turbine combustion chamber

* 收稿日期: 2017-11-23; 修订日期: 2018-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51576092; 91741117); 江苏省自然科学基金 (BK20151344)。

作者简介: 徐 亮, 硕士, 研究领域为湍流燃烧、大涡模拟。E-mail: 1150807317@qq.com

通讯作者: 王 平, 博士, 教授, 研究领域为湍流燃烧、大涡模拟。E-mail: pingwang@ujs.edu.cn

1 引言

燃烧室是航空航天发动机的重要组成部分之一,采用数值模拟方法对燃烧室内的各种燃烧现象进行研究已经成为推动燃烧技术发展的一个重要手段,能够大大缩短燃烧室的研制周期^[1]。大涡模拟(LES)技术能够通过合适的亚网格燃烧模型来预测不稳定性、熄火、再点火及其它不稳定现象,在过去几年中作为燃烧模拟工具已经越来越重要^[2]。西北工业大学的周瑜等^[3]在自有CFD平台上采用动态亚网格湍流模型对一种径向双旋流环形燃烧室的单个头部构型冷态流场进行了大涡模拟,探索真实航空发动机燃烧室内流场结构。南京航空航天大学的颜应文等^[4]在三维任意曲线坐标系下,采用欧拉-拉格朗日两相大涡模拟方法对模型燃烧室气液两相瞬态喷雾燃烧过程进行大涡模拟并行计算研究。北京航空航天大学的王方等^[5]为验证所采用的代数二阶矩亚网格(ASOM-SGS)燃烧模型的合理性,用该燃烧模型对文献中测量的钝体后方丙烷-空气预混燃烧进行了大涡模拟计算。随着计算机性能的不断提升,LES将被越来越多地用于燃烧行业的设计阶段中。然而,目前依旧面临着一些问题。在湍流燃烧的大涡模拟中,一个充分考虑化学反应动力的合适的亚网格燃烧模型是必需的。例如,甲烷和空气燃烧的详细化学反应机理GRI-Mech 3.0涉及53种组分及325个反应^[6],直接利用这种详细的反应机理虽然能够精确地描述火焰的状态,但计算工作量十分巨大。如何解决湍流计算与详细化学反应机理耦合的问题至关重要,因此有必要发展一种能够在降低计算量的同时又能保持较高计算精度的合适的亚网格燃烧模型。

目前,已经形成多种用于燃烧化学的机理简化方法。在固有低维流形(Intrinsic Low-Dimensional Manifold, ILDM)方法^[7]的基础上,Bykov和Maas教授提出了一种新的机理简化方法:反应扩散流形^[8-9](Reaction-Diffusion Manifold, REDIM)技术。该方法在简化机理的同时充分考虑了分子的扩散过程,克服了ILDM方法的诸多不足之处,解决了化学反应与分子输运过程的耦合问题。因此,既适用于快速的燃烧反应,也适用于扩散过程控制化学反应进程的慢速的燃烧反应。使用REDIM方法来简化反应机理,获得低维流形,可以产生不同维数的简化坐标系。通过这些简化坐标系及生成的热力学查询表,可以确定反应的其他变量,包括反应的速率。一般

来说,求解反应速率的方程式都是高度非线性化的,通过查询列表来确定反应速率是非常可行的,可以避免求解复杂的方程式。

REDIM方法可以与动态火焰增厚(Dynamically Thickened-Flame, DTF)模型结合起来。DTF模型是一种广泛采用的燃烧模型^[10],适用于预混、扩散及部分预混三种燃烧模式的计算,通过修改化学反应速率指前因子常数和扩散系数,人为增加火焰厚度^[11],使得火焰面可被LES计算网格求解。该模型的计算结果对网格精度的影响不甚敏感,具有一定的网格独立性。但是,DTF模型需要求解组分输运方程,其中的反应源项需通过Arrhenius公式计算。为了控制计算工作量,DTF模型通常仅考虑极少数步的简化反应机理。

通过DTF模型来描述控制体内各热力学变量的分布情况,再结合REDIM方法简化反应机理获得的低维化学反应列表,可以有效解决详细化学反应机理与湍流计算的耦合问题。本文首次基于DTF和REDIM技术构建了一种新的用于大涡模拟的湍流预混燃烧模型,并用该模型对PRECCINSTA燃烧器^[12-13]全局当量比 $\phi = 0.75$ 和 $\phi = 0.83$ 的两种旋转预混火焰展开计算,将计算获得的结果与原DTF模型以及实验结果进行对比研究,以验证新模型REDIM-DTF的性能。

2 亚网格燃烧模型及数值方法

2.1 动态火焰增厚(DTF)模型

在湍流火焰的LES计算中,火焰反应区通常要小于网格单元的最小尺寸,这给计算模拟带来很大的影响。针对这一问题,Butler等^[14]提出了火焰增厚模型,通过修改化学反应速率指前因子常数和扩散系数,人为增加火焰厚度,使得火焰面可被LES网格计算求解,如图1所示。图中 δ_L^0 为层流火焰厚度, S_L^0 为层流火焰传播速度, δ_L^1 为火焰增厚模型中求解得到的火焰厚度, S_T 为湍流火焰传播速度,参数间的关系为

$$\delta_L^1 = F\delta_L^0, S_T = ES_L^0 \quad (1)$$

火焰增厚模型是在热扩散系数之前乘以增厚因子 F ,相应的火焰厚度也就增厚了 F 倍,使得计算网格能够捕捉到火焰面上的信息,也就是让火焰面可以被更多的网格所覆盖。为了保持火焰的传播速度不变,反应速率就需要减小 F 倍。但是,增厚因子 F 的存在会使Damköhler数减小,人为增加火焰的厚度

会影响火焰燃烧与湍流运动之间的相互作用,小尺度的涡流不再能够使火焰锋面褶皱。为了解决亚网格模型中增厚效应的影响,Colin等引入一个褶皱效能函数 $E^{[15]}$,重新获得一个准确的湍流火焰燃烧状态,由此火焰增厚模型中需要求解的组分输运方程为

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_k u_j}{\partial x_j} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_k E F \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + \frac{E}{F} \dot{\omega}_k(Y_i, T)$$

$$F(n) = n \Delta x / \delta_L^0 \quad (3)$$

式中 E 为效能函数, F 为增厚因子, Y 为组分的物质浓度, $\dot{\omega}$ 为反应速率, D 为扩散系数, T 为温度。其中 E 和 F 值均是实时变化的,是时间和空间的函数,在每一次的时间步中两者的数值都需要进行更新。 F 值可以通过式(3)确定,其中 Δx 为局部网格尺寸。通过调整增厚因子 F ,可以使得增厚火焰锋面被 n 个网格所求解。 n 值通常位于5~10内,基于课题组前期的研究结果^[11-12,16],并且为了与原DTF模型的计算相对应,在此取 n 为5。从式(1)可知,火焰增厚模型中求解得到的火焰厚度是层流火焰厚度的 F 倍,而湍流火焰传播速度是层流火焰传播速度的 E 倍。

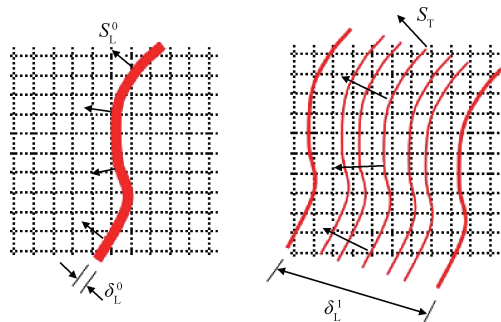


Fig. 1 Contrast before and after flame front artificial thickening

文献[17]在火焰增厚模型的基础上提出了动态火焰增厚模型的概念,介绍了一个动态地调整 F 值的过程,在远离火焰面的地方 F 值为1,即不需要对火焰面进行增厚,而靠近火焰面的地方 F 值则会相应增大,从而能够获得一个实际的输运系数。本研究将这个动态调整的过程通过式(4)完成。

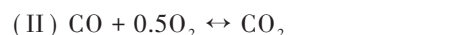
$$F_{\text{dyn}} = 1 + (F(n) - 1) \tanh(10Q_a/Q_{a,\text{max}}) \quad (4)$$

式中 $F(n)$ 可以通过式(3)计算获得, $\tanh$ 为双曲正切函数, Q_a 是式(5)反应(I)的当地反应速率; $Q_{a,\text{max}}$ 为 Q_a 的最大值,可以通过对相应的一维层流火焰模拟计算获得^[16]。倘若相应地调整式(4)中的常

数10,该动态过程也可以通过式(5)反应(II)的当地反应速率 Q_b 进行计算。

在前期的研究工作中,本研究组采用DTF模型与2sCM2两步机理相结合的方法,对相同的PREC-CINSTA火焰进行了计算,结果与实验值吻合良好^[11]。

2sCM2机理是常用的甲烷/空气两步反应机理^[18]。该机理只考虑六种组分(CH_4 , CO_2 , CO , O_2 , N_2 , H_2O)及两步反应



式中(I)为不可逆反应,描述了 CH_4 的氧化过程;(II)为可逆反应,描述了 CO 和 CO_2 之间的相互转化。

2sCM2机理充分考虑了中间产物 CO ,能够对 CO_2 和 CO 之间的平衡状态有一个很好的预测。该机理曾被用来计算层流预混合火焰,计算结果表明,在当量比为0.5~1.0内,对层流火焰厚度、速度和火焰温度的预测与详细机理的结果非常吻合^[18]。

然而,采用该方法需要求解多个组分输运方程,计算工作量大,如果使用更详细步数的简化反应机理,计算量会更大。本文构建的REDIM-DTF模型只需求解一个 CO_2 质量分数的输运方程,方程中的其他变量值如 $\dot{\omega}$, ρ 等都可以从一个一维REDIM表中插值获得,有效减少了计算量。

2.2 反应-扩散流形(REDIM)技术

为了简化详细化学反应机理,减少计算量,Maas等提出了ILDM方法^[7]。ILDM方法在简化机理时假设系统是空间均匀场,并且化学反应源项占据主导地位。该方法完全忽视了分子扩散过程对反应进程的影响,因此不能很好地模拟对流和扩散过程控制化学反应进程的慢速的燃烧反应,例如湍流预混火焰的预热区。

针对ILDM方法的诸多不足和缺陷,Bykov和Maas在ILDM方法的基础上新近发展了一种机理简化方法:REDIM方法^[8-9]。使用REDIM方法生成低维流形时,摒弃了ILDM方法的假设,充分考虑了分子输运过程与化学反应的耦合过程。REDIM方法是建立在求解热力学-动力学空间中低维流形进化方程的基础上^[8-9,19]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = (1 - \psi_\theta \psi_\theta^*) \left\{ F(\psi) - \frac{d}{\rho} \chi \times \psi_{\theta\theta} \times \chi \right\} \quad (6)$$

式中热化学状态矢量 ψ 用来描述热力学-动力学空间,是一个或多个简化坐标系的函数,简化坐标系矢量为 θ , ρ 表示密度, χ 表示 θ 的空间梯度矢量,

$F(\psi)$ 表示化学反应源项矢量, ψ_θ 表示 ψ 在 θ 处的偏微分矩阵, ψ_θ^* 表示 ψ_θ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵^[9], $\psi_{\theta\theta}$ 表示 Hessian 矩阵, d 表示分子扩散系数, 符号“ $\times$ ”是两个具有三阶张量的矢量乘法的缩写。

为了生成 REDIM 列表, 必须先确定空间梯度值 χ , 详细的方法可以参考文献[8-9]。对于一维的 REDIM 查询表, 初始的空间梯度值可以通过详细的化学机理对一维层流火焰进行模拟来确定。当然, 可以使用迭代过程来更新并最小化梯度初始估计的影响^[9]。本文中, 梯度估计值是通过计算一个层流火焰来获取的。

从理论上讲, REDIM 方法可以使用任意维数的简化坐标系。本文所计算的火焰是完全预混甲烷/空气燃烧火焰, 当量比是恒定的并且没有出现局部熄火的现象, 因此采用一维简化坐标系是足够的, 即采用一个参变量表示的热力学查询表。其参变量是 CO_2 的质量分数, 通过 CO_2 质量分数可以描述化学反应的进度。其他组分, 如 CH_4 , CO , O_2 , H_2O , N_2 的质量分数, 以及密度, CO_2 的生成速率等都可以通过插值热力学查询表来确定。图 2 是 $\phi=0.75$ 时所使用的一维 REDIM 查询表中给出的密度、 CO_2 的生成速率随 CO_2 质量分数的变化关系。需要指出的是: 该化学反应表格也可以采用其它组分的质量分数来作为简化坐标, 比如 H_2O 。

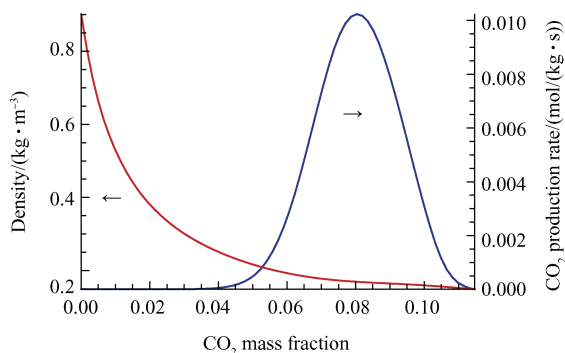


Fig. 2 Other variables associated with the CO_2 mass fraction for case $\phi=0.75$

在对湍流火焰进行 LES 计算时, 不能直接调用此一维查询列表。因为 REDIM 方法生成的低维流形是用简化方法表示的热力学-动力学空间内的火焰结构, 需要采用合适的方法将低维流形与湍流场耦合起来。本文将 REDIM 方法与 DTF 模型结合起来, 使用 REDIM 方法简化甲烷/空气详细反应机理 GRI-Mech 3.0 获得以 CO_2 质量分数为参变量的一维简化流形, 再通过 DTF 模型求解如式(7)所示的 CO_2 质量

分数输运方程来描述控制体内 CO_2 质量分数的分布情况, 然后通过式(8)所示的形式插值一维 REDIM 查询表来确定反应的其他变量值, 其中 Φ 表示反应过程中除 CO_2 质量分数外的其他热化学变量, 从而构建了一种新的 REDIM-DTF 亚网格燃烧模型, 使得整个计算过程中的守恒控制方程简化为连续性方程、动量方程以及 CO_2 质量分数输运方程, 与原先 DTF 模型中需要通过 Arrhenius 公式来对组分输运方程中的化学源项进行封闭不同, 在 REDIM-DTF 模型中, CO_2 质量分数输运方程中的反应源项可以直接通过插值 REDIM 表来获取, 有效降低了计算成本。

$$\frac{\partial \rho Y_{\text{CO}_2}}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_{\text{CO}_2} u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{\text{CO}_2} \frac{\partial Y_{\text{CO}_2}}{\partial x_j} \right) + \frac{E}{F} \dot{\omega}_{\text{CO}_2}^{\text{REDIM}}(Y_{\text{CO}_2}) \quad (7)$$

$$\Phi = \Phi^{\text{REDIM}}(Y_{\text{CO}_2}) \quad (8)$$

2.3 数值方法

本文所有的模拟计算都是在自有有限体积 LESOCC2C 程序^[20]下完成的。LESOCC2C 程序求解的是无量纲低马赫数可压缩 N-S 方程, 空间域的离散采用二阶中心差分法, 时间域上的离散则采用三阶龙格-库塔(Runge-Kutta)法, Favre 过滤动量方程中的亚网格雷诺应力通过变密度动力 Smagorinsky 模型来确定^[21], 亚网格标量通量通过梯度扩散模型来计算, 利用分块的结构化网格通过 MPI(Message Passing Interface) 技术实现多核心的并行计算。

3 燃烧器结构与计算设定

为了验证构建的 REDIM-DTF 新模型, 用该模型对 PRECCINSTA 燃烧器^[12-13]旋转预混火焰开展 LES 计算。Meier 已经对该燃烧器展开了详细的实验研究^[22], 为在实际条件下验证各种 LES 模型, 获得了丰富的基准数据。PRECCINSTA 燃烧器是一个燃气轮机模型燃烧器, 其几何结构如图 3 所示, 包括一个集气室, 一个带有 12 个通道的径向旋流器, 一个长方体燃烧室还有一个圆柱形排气尾管。这里使用的参考长度是锥形通道出口直径 $D=27.85\text{mm}$, 如图 3 所示。甲烷通过小孔进入旋流器, 与来流的干燥空气迅速混合, 在进入燃烧室前已经充分混合。

本文计算的 PRECCINSTA 火焰是全局当量比为 $\phi=0.75$ 和 $\phi=0.83$ 两种贫燃预混旋转火焰, 两种火焰的进口压力均为 0.1MPa , 入流速度为 11m/s , 雷诺数 $Re=30522$ 。对于 $\phi=0.75$ 的情况, 初始温度为 320K ,

而对于 $\phi=0.83$ 的情况,初始温度为325K。从详细的实验数据分析得出,本文所计算的两种火焰($\phi=0.75$ 和0.83)均不会出现热声不稳定现象,因此本文求解的是低马赫数N-S方程。由于方程中消除了声波的影响,本文没有将集气室以及排气尾管外部的环境纳入计算域。

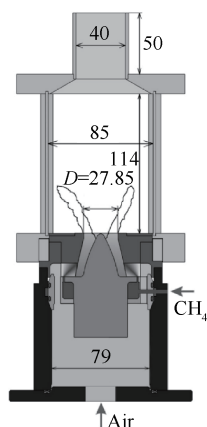


Fig. 3 Schematic diagram of PRECCINSTA burner (mm)

在模拟计算中,对于壁面,本文使用了无滑移绝热的边界条件。在进口处施加一个无波动的均匀速度场,来与实验状态的流速相匹配。在气流通道中,湍流逐步形成并达到充分发展状态,计算域的出口位于排气尾管的末端,在这里施加了一个对流出口边界条件。

计算所用的网格为分块贴体结构网格,覆盖了整个锥形进气通道和燃烧室。整个计算域被分成423块,网格单元总数为380万,如图4所示,文献[23]通过详细的网格分辨率研究表明本计算中网格的划分是合理的。

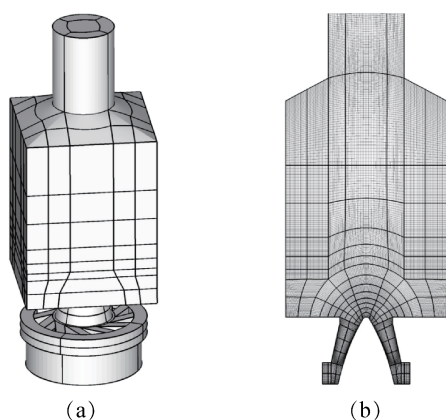


Fig. 4 Schematic diagram of meshing in computational domain with thicker solid lines showing the block boundaries

4 计算结果与分析

对于 $\phi=0.75$ 的情况,轴向和径向的平均速度以

及对应的均方根波动在不同轴向位置处的分布情况如图5和6所示。为了方便比较计算结果及实验值,以锥形通道出口处混合气的整体速度 $U_b=20\text{m/s}$ 对速度变量进行无量纲化。计算结果与实验数据总体上吻合较好。图5(a)中轴向平均速度峰值的位置显示了一个扩张的火焰面,可以清楚地看到,在流场中部存在着一个较大的速度小于0的区域,这就是中央回流区(Central Recirculation Zone, CRZ)。在 $x=1.5\text{mm}$ 处存在着两个剪切层,一个位于环形射流与周围流体之间,另一个位于射流与中央回流区之间。越往下游,剪切层的强度变得越弱,与此同时新鲜的反应物不断地被消耗。图5(b)显示的轴向速度均方根波动值与实验结果同样吻合良好,剪切层的位置大体上预测得都比较准确。在靠近锥形通道出口的位置,由于存在着较大的速度梯度,峰值的大小要低于实验结果,因此在该部位要划分更细的网格来进行处理。

图6(a)中LES计算得到的平均径向速度再一次与实验值吻合良好。从图中可以看出,径向速度的梯度较小,峰值的位置及大小还有分布情况都预测得非常准确。在中央回流区的地方,有一块比较平缓的区域。这里的平均径向速度和速度梯度均接近于0,表明在计算过程中没有出现不稳定的涡核进动^[24](Precessing Vortex Core, PVC)的现象。图6(b)中,均方根波动的峰值位置都预测地比较合理,即使在最初的两个轴向位置处(x 为1.5mm和5mm)都很好预测到径向分布中出现的双峰,这对正确预测初始的混合过程和火焰在中心体上的固定位置非常重要。在轴向位置 $x=15\text{mm}$ 之前,峰值的大小都略微小于实验的结果,但是继续往下游,又和实验值吻合得很好。

对于 $\phi=0.83$ 的情况,温度和 CO_2 质量分数的时间平均值以及对应的均方根波动在不同轴向位置处的径向分布情况如图7和图8所示。图7(a)和(b)分别展示了温度的均值和均方根波动在径向的分布情况。从图中可以看出,LES计算的结果与实验值总体上比较吻合。越往下游区域,更多的新鲜反应物被消耗,火焰锋面的两侧也越来越接近。相应地,平均温度的最小值也随着 x 的增加而增大。在 $x>40\text{mm}$ 的地方,燃烧基本上都停止了,因此平均温度的径向分布曲线也变得更加平缓,这对于图8(a)所示的 CO_2 质量分数的径向分布情况以及 H_2O 质量分数(未示出)的分布情况同样吻合。从 x 为15mm和20mm处峰值

变化的位置可以看出,实验测得的火焰锥面要更宽。在 $x \leq 15\text{mm}$ 的外部区域,LES 预测得到的温度值要比实验结果高大约 400K 。这是因为在模拟计算时,假设壁面处是绝热的,忽略了热量散失到外部环境中的情况。

在图 7(b)中展示的温度均方根波动的径向分布图显示,在上游区域,峰值较窄,预测的大小要稍高于实验值。而往下游区域,LES 预测得到的温度均方根波动值要低于实验测量的结果,如 $x \geq 40\text{mm}$ 的区域。通过观察 LES 的动画,发现 $x \geq 40\text{mm}$ 处很少有火焰面存在,基本上处于焰后区域,因此温度的波动很小。

图 8(a)显示了 CO_2 平均质量分数的径向分布情况, CO_2 是焰后区域出现的主要组分。可以看出,LES

的计算结果与实验结果吻合良好。对于图 8(b)所示的 CO_2 质量分数均方根波动的分布情况,考虑到正确捕获这个数量比较困难,可以认为 LES 的结果与实验值的总体吻合程度是令人满意的。

通过上述的对比分析可以看出:由 REDIM-DTF 新模型与原 DTF 模型计算得到的结果均与实验值吻合良好,都能够很好地描述湍流预混火焰的燃烧状态,对峰值的大小和位置的预测也都比较准确,与实验结果十分贴近,两者的计算结果差距很小,几乎可以忽略不计。由于用新模型计算的统计平均时间较短,再加上实验测量过程中的一些误差,在某些变量的均方根波动值预测方面结果不是很理想,后面本研究组将做进一步的研究分析。

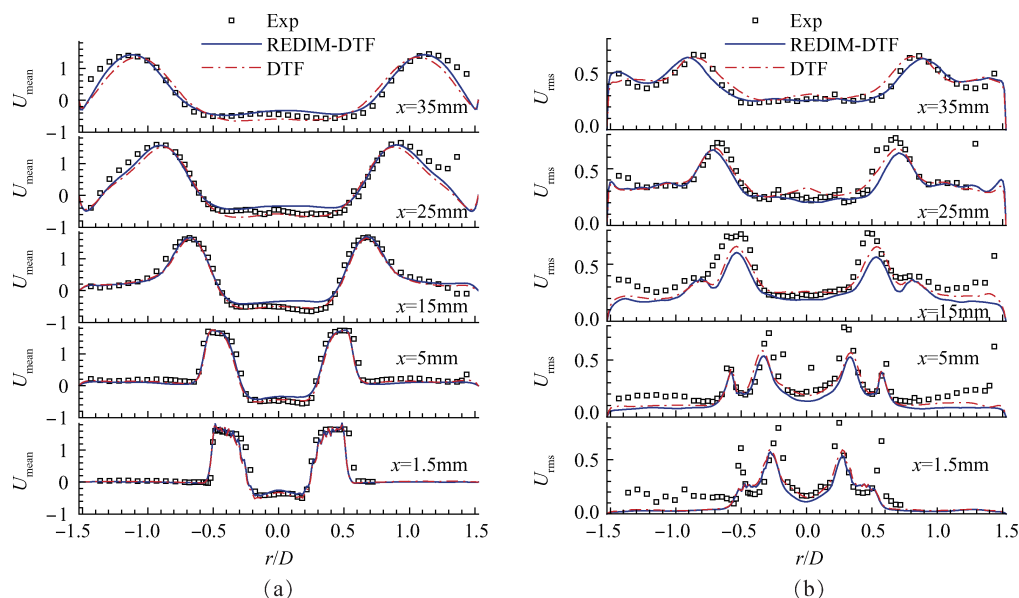


Fig. 5 Radial profiles of mean and RMS fluctuations of axial velocity for case $\phi=0.75$

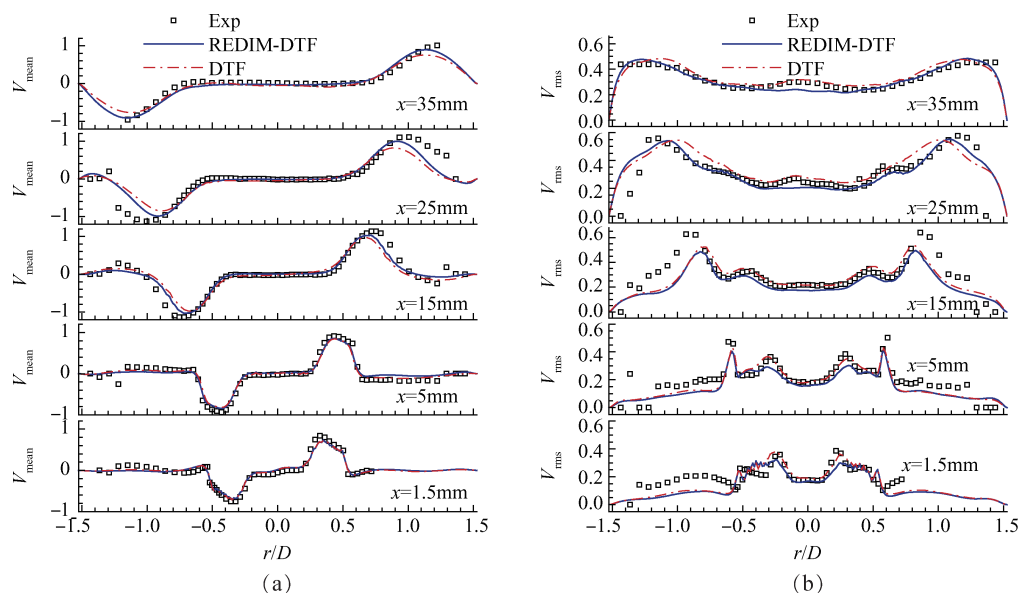


Fig. 6 Radial profiles of mean and RMS fluctuations of radial velocity for case $\phi=0.75$

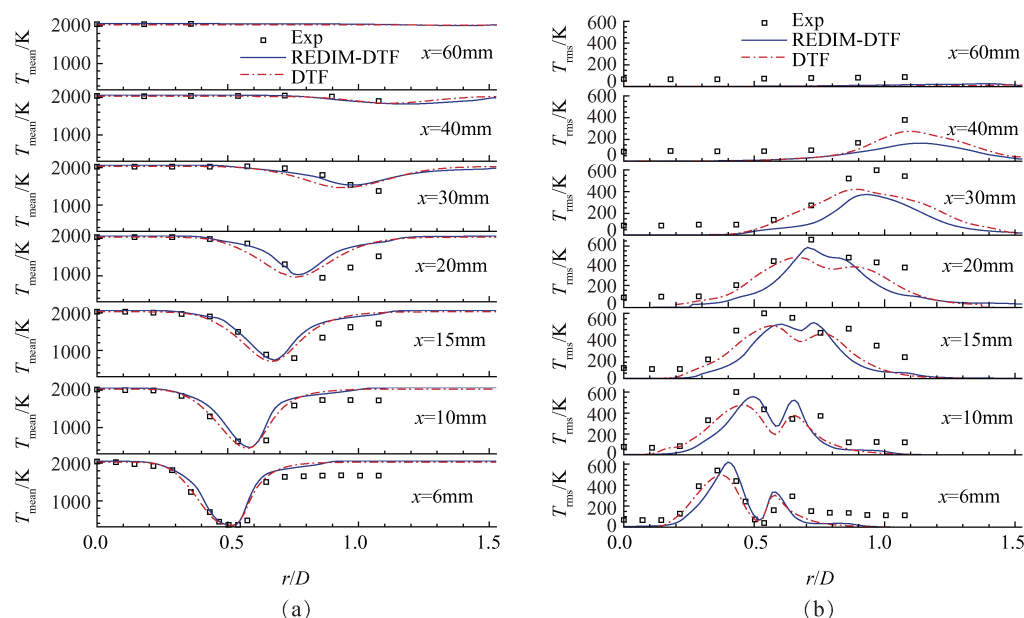


Fig. 7 Radial profiles of mean and RMS fluctuations of temperature for case $\phi=0.83$

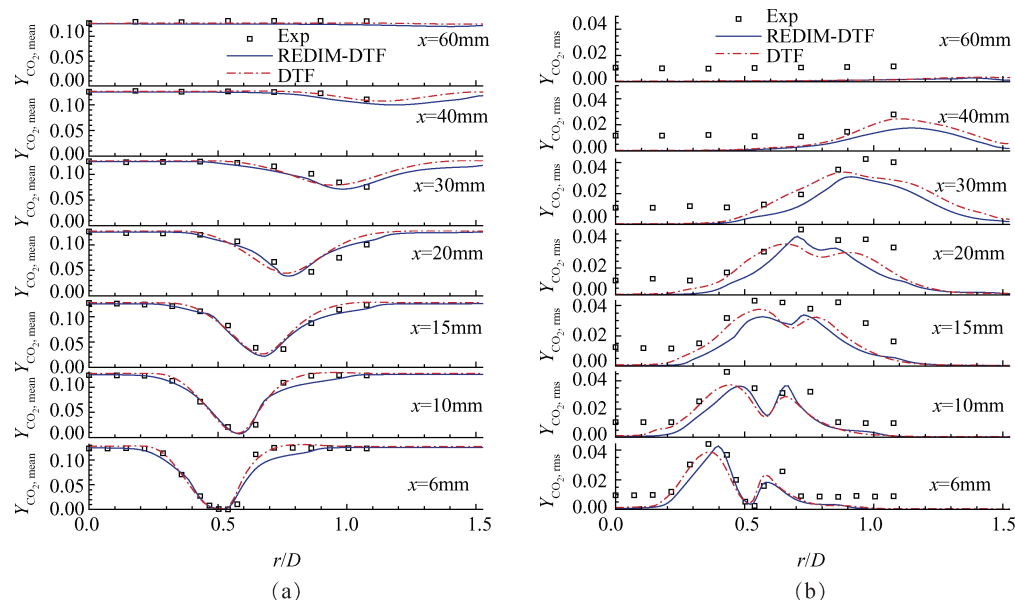


Fig. 8 Radial profiles of mean and RMS fluctuations of the CO_2 mass fraction for case $\phi=0.83$

5 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)由REDIM-DTF新模型计算得到的速度、温度以及 CO_2 质量分数的变化趋势与实验测得的结果总体上吻合良好,并且与原DTF模型计算得到的结果十分接近,说明用该模型来计算湍流预混火焰是完全可行的。

(2)由于REDIM-DTF新模型只需求解一个 CO_2 质量分数输运方程,而原DTF模型要求解更多的组分输运方程,因而REDIM-DTF新模型的计算效率有较大提升,有效降低了计算成本。

(3)理论上,REDIM-DTF新模型可以很容易推广应用到更复杂的火焰状态计算,比如富燃料火焰($\phi>1$)及部分预混合火焰等,当然这需要更多维的REDIM表格。

致 谢:感谢国家自然科学基金面上项目和江苏省自然科学基金资助。

参考文献:

- [1] 杨金虎. FGM预混及部分预混湍流燃烧模型研究与应用[D]. 北京:中国工程热物理研究所, 2012.
- [2] Fureby C. Towards the Use of Large Eddy Simulation in Engineering [J]. *Progress in Aerospace Science*, 2008, 44: 381-396.

- [3] 周 瑜, 乐嘉陵, 陈柳君, 等. 径向双旋流燃烧室流场结构大涡模拟研究[J]. 推进技术, 2017, 38(4): 909-917. (ZHOU Yu, LE Jia-ling, CHEN Liu-jun, et al. Large Eddy Simulation of Aeroengine Combustor with Counter-Rotating Swirler [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(4): 909-917.)
- [4] 颜应文, 刘 勇, 赵坚行, 等. 模型燃烧室两相燃烧大涡模拟的并行计算[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 431-437. (YAN Ying-wen, LIU Yong, ZHAO Jian-xing, et al. A Parallel Alogorithm for Large Eddy Simulation of Two-Phase Reacting Flows in Model Combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(4): 431-437.)
- [5] 王 方, 周力行, 许春晓, 等. 预混燃烧大涡模拟和燃烧模型的检验[J]. 推进技术, 2008, 29(1): 33-36. (WANG Fang, ZHOU Li-xing, XU Chun-xiao, et al. Large-Eddy Simulation of Premixed Combustion and Validation of the Combustion Model [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(1): 33-36.)
- [6] Smith G P, Golden D M, Frenklach M, et al. GRI Version 3.0[EB/OL]. <http://combustion.berkeley.edu/grimech/version30/text30.html>, 1999.
- [7] Maas U, Pope S B. Simplifying Chemical Kinetics: Intrinsic Low-Dimensional Manifolds in Composition Space [J]. *Combustion and Flame*, 1992, 88: 239-264.
- [8] Bykov V, Maas U. The Extension of the ILDM Concept to Reaction-Diffusion Manifolds [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2007, 11(6): 839-862.
- [9] Bykov V, Maas U. Problem Adapted Reduced Models Based on Reaction-Diffusion Manifolds (REDIMs) [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 561-568.
- [10] 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: 2199-2213.
- [11] Wang P, Fröhlich J, Maas U, et al. A Detailed Comparison of Two Sub-Grid Scale Combustion Models via Large Eddy Simulation of the PRECCINSTA Gas Turbine Model Combustor [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164: 329-345.
- [12] 王 平, 侯天增, 余 倩. 火焰增厚燃烧模型计算旋转预混火焰的参数敏感性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(2). (WANG Ping, HOU Tian-zeng, YU Qian. Large Eddy Simulation of the Premixed Swirling Flames with Thickened-Flame Model: a Sensitivity Study [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(2).)
- [13] Kelsall G, Troger C. Prediction and Control of Combustion Instabilities in Industrial Gas Turbines [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24: 1571-1582.
- [14] Butler T D, O'Rourke P J. A Numerical Method for Two-Dimensional Unsteady Reacting Flows [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1977, 16: 1503-1515.
- [15] 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(7): 1843-1863.
- [16] Wang P, Fröhlich J, Maas U. Impact of Location and Flow Rate Oscillation of the Pilot Jet on the Flow Structures in Swirling Premixed Flames [J]. *Journal of Turbulence*, 2010, 11(11): 1-19.
- [17] Léger J P, Poinso T, Veynante D. Dynamically Thickened Flame LES model for Premixed and Non-Premixed Turbulent Combustion [C]. *Stanford: The 2000 Summer Program*, 2000.
- [18] Selle L, Lartigue G, Poinso T, et al. Compressible Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion in Complex Geometry on Unstructured Meshes [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 137: 489-505.
- [19] 王蔡军, 陆少杰, 王 平. 基于REDIM方法构建的亚网格燃烧模型及其应用[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4948-4959.
- [20] Wang P, Platova N A, Fröhlich J, et al. Large Eddy Simulation of the PRECCINSTA Burner [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 70: 486-495.
- [21] Moin P, Squires K, Cabot W, et al. A Dynamic Sub-Grid Scale Model for Compressible Turbulence and Scalar Transport [J]. *Physics of Fluids*, 1991, 3: 2746-2757.
- [22] Meier W, Weigand P, Duan X R, et al. Detailed Characterization of the Dynamics of Thermoacoustic Pulsations in a Lean Premixed Swirl Flame [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150: 2-26.
- [23] Wang P, Fröhlich J, Maas U. LES of Turbulent Premixed Swirling Flames in Complex Geometry Using Thickened-Flame Type of Models [C]. *Cardiff: The 5th European Combustion Meeting*, 2011.
- [24] 张济民, 韩 超, 张宏达, 等. 钝体绕流有旋流中回流区与进动涡核的大涡模拟[J]. 推进技术, 2014, 35(8): 1070-1079. (ZHANG Ji-min, HAN Chao, ZHANG Hong-da, et al. Large Eddy Simulation of Swirl Flow around Bluff Body with Central Recirculation Zone and Precession Vortex Core [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(8): 1070-1079.)

(编辑:朱立影)