

不同化学热力学建表参数对火焰面模型精度的影响研究

吴玉欣, 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: 火焰面模型通过对燃烧过程的降维可以大幅减少求解燃烧场中化学反应所需的计算量. 基于一维层流对撞火焰的数值解, 构建了层流稳态火焰面模型(SFM)的化学热力学数据表并用于射流火焰的数值模拟. 对所得到的火焰面数据表, 分别采用基于混合分数和标量耗散率(Z, χ_Z)以及预混火焰面生成流形(FGM)方法中的混合分数和反应进度变量(Z, Y_c)两种参数形式进行查表. 通过火焰面坐标变换的方法, 分析平面火焰中的流形特征, 研究使用不同参数形式查询火焰面数据库对所得到的模拟结果的影响. 两种查表方式得到的解与采用计算化学反应源项输运方程的直接数值求解方法(DNS)得到的解的对比结果表明, 使用(Z, Y_c)查表参数形式得到的解相比直接采用(Z, χ_Z)查表参数形式得到的解, 更接近于DNS方法得到的解.

关键词: 层流稳态火焰面模型; 火焰面生成流形; 火焰面坐标变换; 建表参数形式

中图分类号: TK172 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.11.011

引用格式: Wu Yuxin, Ye Taohong. Effects of different parametrization strategies to flamelet modeling accuracy [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11): 960-966.

吴玉欣, 叶桃红. 不同化学热力学建表参数对火焰面模型精度的影响研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11): 960-966.

Effects of different parametrization strategies to flamelet modeling accuracy

WU Yuxin, YE Taohong

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

Abstract: Application of flamelet model can lead to great reduction in computational cost through dimensional reduction of chemistry reacting system during combustion simulation. Steady laminar flamelet model was introduced into plan flame simulation, with both parametrization form (Z, χ_Z) and (Z, Y_c) applied. A general flamelet transformation was performed to explain the effects of different parametrization strategies to flamelet modeling accuracy by analyzing manifolds characteristic for planar flames. Solutions obtained by direct numerical simulation (DNS) were introduced as a reference to verify modeling accuracy. Comparisons between solutions obtained by different parametrization strategies show that application of (Z, Y_c) parametrization form can achieve more accurate solutions close to the DNS ones than (Z, χ_Z) form.

Key words: steady laminar flamelet model; flamelet generated manifold; flamelet generated transformation; flamelet parametrization strategy

收稿日期: 2014-04-24; 修回日期: 2014-06-01

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(51176178)资助.

作者简介: 吴玉欣, 男, 1987年生, 博士生. 研究方向: 层流火焰面模型. E-mail: wuyuxincae@163.com

通讯作者: 叶桃红, 博士/副教授. E-mail: thye@ustc.edu.cn

0 引言

火焰面模型的基本思路是选取能够表征燃烧场中当地火焰的特征标量,如混合物分数、反应进度标量等,并假设流动的时间尺度远远大于化学反应的时间尺度以及系统的组分、温度等热力学参数在特征标量的切向梯度很小.通过求解特征标量空间内的组分和温度方程可以建立以特征标量为坐标的化学热力学数据表.和流体数值模拟计算(CFD)耦合计算时,先求解特征标量的输运方程得到特征标量的值,然后查表可以直接得到相应的组分及温度分布.这样需要求解的方程的个数大大减少,可以有效降低计算量.

基于计算层流对撞火焰的稳态火焰面模型(SFM)^[1-2]被广泛引入层流和湍流火焰模拟中^[3-8],可以较好地捕捉以扩散机制为主的火焰结构特征.化学热力学建表可以直接使用基于混合分数和标量耗散率(Z, χ_z)的参数形式,也可以从火焰面生成流形(FGM)^[9]的思想出发,使用基于混合分数和反应进度变量(Z, Y_c)的火焰面参数形式.

对于包含多种火焰机制的复杂燃烧系统,用火焰面模型捕获局部反应层的火焰结构要复杂得多.层流扩散火焰面模型已在层流部分预混火焰模拟中^[10]得到了较好的应用.本文针对层流部分预混火焰,同时使用(Z, χ_z)和(Z, Y_c)两种查表参数形式,将得到的解与直接数值求解方法(DNS)得到的解进行对比,分析层流部分预混火焰模拟中的查表形式对模拟精度的影响.

1 火焰面物理模型

1.1 化学反应建库中的流形特征

对实际的复杂反应系统,由于含大量反应组分和反应步骤,对化学反应源项的积分所需的计算量难以承受,因此需要对反应系统进行降维处理,以减轻所需的计算负担.

由 Mass 等^[11-12]提出的固有低维流形方法(ILDM)是简化燃烧场中化学反应计算的有效方法.ILDM方法中只考虑化学反应时间尺度特征值中大尺度的影响,可将组分质量分数视为一组包含较少控制变量的函数.把反应空间分解为快反应子空间和慢反应子空间,并在慢反应子空间中构造流形,从而把整个反应系统近似表征为这个流形的函数.在实际反应中,反应路径会迅速逼近这个流形,

随后的反应就可以在流形上移动来表示.ILDM的求解公式可以表示为

$$\frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial t} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\psi}), \boldsymbol{\psi} = (T, p, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N) \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{\psi}$ 是由温度、压力和组分质量分数等表征燃烧系统的变量组成的矢量.

对由化学反应源项驱动的火焰结构,即忽略物理扩散效应的影响,可以使用一维的 ILDM 流形捕捉火焰特征.选取化学反应平衡解作为初始状态,可生成一维流形,对流形上的每一点的组分质量分数,选取反应进度变量 Y_c 反映流形的行进特征,则存在关系:

$$\frac{\partial Y_i}{\partial Y_c} = \frac{\dot{\omega}_i}{\dot{\omega}_{Y_c}} \quad (2)$$

式中, $\dot{\omega}_i$ 和 $\dot{\omega}_{Y_c}$ 分别表示组分 i 和反应进度变量 Y_c 的生成速率.此即为 ILDM 生成的一维流形上各个组分质量分数与反应速率之间存在的内在联系.

化学反应建表方法中,隐含假定了燃烧系统中的任意标量 ϕ_i ,包括温度和任意组分质量分数,可以表示为混合分数 Z 和反应进度变量 Y_c 的函数形式^[13],即 $\phi_i = \phi_i(Z, Y_c)$.物理空间组分 i 的质量分数 Y_i 输运方程可以转换至 Z - Y_c 坐标空间,

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial \tau} + \frac{\partial Y_i}{\partial Y_c} \dot{\omega}_{Y_c} = \frac{\rho \chi_{Y_c}}{Le_i} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Y_c^2} + \frac{\rho \chi_z}{Le_i} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \frac{2 \rho \chi_{z, Y_c}}{Le_i} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z \partial Y_c} + \dot{\omega}_i \quad (3)$$

式中,3个标量耗散率分别为 $\chi_z = D(\nabla Z)^2$, $\chi_{Y_c} = D(\nabla Y_c)^2$ 和 $\chi_{z, Y_c} = D \nabla Z \cdot \nabla Y_c$; Le_i 为组分 i 的刘易斯数; $\dot{\omega}_i$ 代表组分 i 的反应速率; D 为假设混合分数 Z 和反应进度变量 Y_c 的刘易斯数均为 1 时对应的扩散系数.

对组分输运方程(3),在稳态且假定组分 $Le_i = 1$ 的情况下,定义 3 个 Damköhler 数, $D_a^{DF} = \dot{\omega}_{Y_c} / \rho \chi_z$, $D_a^{PF} = \dot{\omega}_{Y_c} / \rho \chi_{Y_c}$, $D_a^{PPF} = \dot{\omega}_{Y_c} / \rho \chi_{z, Y_c}$.方程(3)可以转换为以下形式:

$$\frac{\partial Y_i}{\partial Y_c} = \frac{1}{D_a^{DF}} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \frac{1}{D_a^{PF}} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Y_c^2} + \frac{2}{D_a^{PPF}} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z \partial Y_c} + \frac{\dot{\omega}_i}{\dot{\omega}_{Y_c}} \quad (4)$$

对接近混合当量比处的快速反应区域,若化学反应时间尺度远小于输运过程,3个 Damköhler 数取值较大,因此有近似关系式

$$\frac{\partial Y_i}{\partial Y_c} \approx \frac{\dot{\omega}_i}{\dot{\omega}_{Y_c}} \quad (5)$$

任意组分 i 的质量分数随反应进度变量 Y_c 的

变化关系可以通过上式表示,近似服从一维 ILDM 方法中得到的组分反应速率之间存在的函数关系,此即为化学反应组分空间 $Z-Y_c$ 中的流形特征.

1.2 SFM 建表方法

为了捕捉火焰结构特征,采用求解一系列对撞火焰的 SFM 建表方法.层流稳态扩散火焰面方程为

$$\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_i = 0 \quad (6)$$

$$\rho\chi_z \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\rho\chi_z}{C_p} \frac{\partial C_b}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{1}{c_p} \sum_{i=1}^N h_i \dot{\omega}_i = 0 \quad (7)$$

式中, h_i 和 $\dot{\omega}_i$ 分别表示组分 i 的比焓和扩散输运系数; λ 表示混合物的热传导系数; C_p 表示混合物的平均比热容.混合分数标量耗散率 χ_z 随混合分数的分布采用^[2,14],

$$\chi_z = \chi_{st} \frac{\exp[-2(\operatorname{erfc}^{-1}(2Z))^2]}{\exp[-2(\operatorname{erfc}^{-1}(2Z_{st}))^2]} \quad (8)$$

求解火焰面方程(6)和(7)得到化学热力学数据表后,可以将其转化为 (Z, χ_z) 或 (Z, Y_c) 两种查表形式.

本文引入 Knudsen^[15]定义的火焰面指数 Λ 的概念, Λ 为 SFM 化学热力学表中指定的火焰面(当量混合处的温度为 $T_{Z_{st}} = T_{Z_{st}}^*$)的当量混合 Z_{st} 处 Y_c 值,即 $\Lambda = Y_c(Z_{st}, T_{Z_{st}}^*)$. Λ 在同一个火焰面上为常数.将组分输运方程由物理空间转到火焰面坐标 $Z-\Lambda$ 空间.

假定 $Le=1$,引入火焰传播速度的概念,转换后的组分输运方程为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial Y_i}{\partial \Lambda} \left[\rho \frac{\partial \Lambda}{\partial t} + (\rho u - \rho_u S_{L,u} n) \cdot \nabla \Lambda \right] \right)_a + \\ & \left(-\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} \right)_b + \\ & \left(\frac{\partial Y_i}{\partial \Lambda} [\rho_u S_{L,u} | \nabla \Lambda | - \nabla \cdot (\rho D \nabla \Lambda)] - \rho\chi_\Lambda \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \Lambda^2} \right)_c + \\ & \left(-2\rho\chi_{z,\Lambda} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z \partial \Lambda} \right)_d = \dot{\omega}_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\chi_\Lambda = D(\nabla \Lambda)^2$; $\chi_{z,\Lambda} = D \nabla Z \cdot \nabla \Lambda$; ρ_u 表示进口未燃气体的密度; $S_{L,u}$ 表征当地的火焰传播速度; \mathbf{u} 为速度矢量; $\mathbf{n} = \nabla \Lambda / |\nabla \Lambda|$. 方程(9)中 a 项表示非稳态项, b 项表示稳态扩散项, c 项表示稳态预混项, d 项表示交叉扩散项.

1.3 查表参数形式的讨论

火焰面方法保证精度的前提是,对化学热力学表中的任意组分的反应速率 $\dot{\omega}_i$,与本地流场中的参数之间耦合后必需满足方程(9)中的关系.为了确保模型的精度,捕捉燃烧场中对应的火焰特征,火焰面计算模型以及边界条件的选择需要对应真实燃烧场

中的火焰结构.本文讨论采用 SFM 模拟以稳态扩散特征为主的平面射流火焰时,采用不同化学热力学建表参数对模拟结果的影响.

1.3.1 (Z, χ_z) 参数形式

方程(9)中的 $\frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2}$, $\frac{\partial Y_i}{\partial \Lambda}$ 和 $\dot{\omega}_i$ 可从化学热力学表中直接获得,若稳态扩散项 b 的贡献远大于其余各项,方程可以简化为

$$\left[-\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} \right]_a = \dot{\omega}_i \quad (10)$$

使用 (Z, χ_z) 查火焰面数据库时,化学热力学表中给出 $\dot{\omega}_i = -\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2}$,可以满足方程(9),火焰面解可以达到理想的精度.当稳态扩散项对组分反应速率贡献不占主导时,继续使用 (Z, χ_z) 查表无法保证计算的精度,可通过求解输运方程得到的反应进度变量值 Y_c 替代 χ_z 作为火焰面查表参数.

1.3.2 (Z, Y_c) 参数形式

使用 (Z, Y_c) 形式查表的过程中,当地反应进度变量 Y_c 的取值可以通过计算 Y_c 的输运方程获得,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_c) + \nabla \cdot (\rho u Y_c) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_c) + \dot{\omega}_{Y_c} \quad (11)$$

将 Y_c 的输运方程(11)转换至 $Z-\Lambda$ 坐标得到类似方程(9)的形式,若其中的稳态扩散项 b 占主导,可以转换为以下形式:

$$-\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_c}{\partial Z^2} = \dot{\omega}_{Y_c} \quad (12)$$

$\dot{\omega}_i$ 和 $\dot{\omega}_{Y_c}$ 对应化学热力学表中的组分反应速率值,对任意组分的输运方程(9)存在关系:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{Y_c} \frac{\frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2}}{\frac{\partial^2 Y_c}{\partial Z^2}} = -\rho\chi_z \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} \quad (13)$$

此即为方程(9)在稳态扩散项 a 占主导情况下的形式,火焰面方法得到的解可以保证精度.

当扩散以外的其余各项对组分反应速率的贡献不可忽略时,为了方便讨论,将方程转换至 $Z-Y_c$ 坐标,组分 i 的输运方程可以转换为方程(4)的形式.对燃烧场中的快速反应区域,若 Damköhler 数取值很大,则有

$$\dot{\omega}_i \frac{\partial Y_i}{\partial Y_c} \approx \dot{\omega}_{Y_c} \quad (14)$$

对应的火焰面中 (Z, Y_c) 处的火焰结构,若依然满足 Damköhler 数取值很大的条件,即化学反应的

时间尺度远小于扩散运输的时间尺度,则化学热力学表中的 $\dot{\omega}_i$ 和 $\dot{\omega}_{Y_c}$ 数值,仍可以近似满足以上关系(见方程(5)),即符合节 1.1 讨论的燃烧场的内在一维流形特征.因此使用 (Z, Y_c) 参数形式相比于使用 (Z, χ_Z) 查表,可以潜在地提升火焰面模型的适用范围,从而提高模拟的精度.

2 射流火焰的模拟

本文选取层流部分预混射流火焰和层流高温伴流射流火焰作为模拟的算例,对使用扩散火焰面时采用的 (Z, χ_Z) 和 (Z, Y_c) 两种查表方式的模拟精度进行了对比.

2.1 层流部分预混射流火焰

层流部分预混射流火焰燃烧系统^[16]的配置为:与富氧空气流(氧气的体积分数为 25%)以某个部分预混当量比混合的燃料流,从一个非冷却的、内径为 5.5 mm、壁厚为 0.8 mm 的内铜管流入.标准空气(氧气体积分数 20.9%)从内铜管和与之同轴的内径为 47.6 mm 的外铜管形成的环腔流入.进口的具体参数如表 1 所示.

燃料进口侧的当量比 $\phi = 2.464$.对该部分预混火焰 DNS 解(网格数为 200×100)分析,取特定的火焰高度,得到温度以及燃料和氧化剂质量分数在混合分数空间分布的趋势如图 2 所示.由图 2 可以看出,存在两个梯度变化剧烈的区域,即火焰面反应层.图中左边的反应层接近当量比混合处,此处燃料和氧化剂质量分数的梯度方向相反,因此可视为扩散反应层.图中右边的反应层位于富燃区域,燃料和氧化剂质量分数的梯度方向相同,因此可视为预混

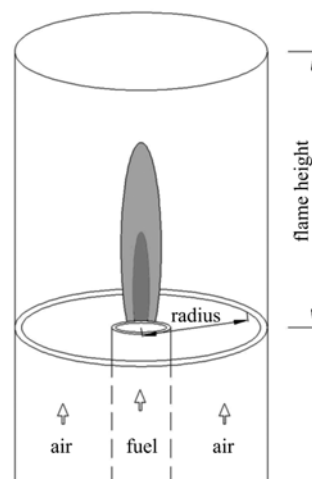


图 1 同轴部分预混射流火焰的装置示意图
Fig. 1 Sketch of the simulated laminar partially premixed jet flame

表 1 层流部分预混火焰射流进口条件配置
Tab. 1 Configurations of inlet jet for laminar partially premixed flame

	central jet	co-flow
Y_{CH_4}	0.147 69	0
Y_{O_2}	0.239 75	0.232
Y_{N_2}	0.612 56	0.768
temperature/K	298	298
velocity/($m \cdot s^{-1}$)	0.237 1	0.104 8

反应层.部分预混伴流火焰包括了主导反应的扩散反应层和接近中轴线处的预混反应层.扩散反应层由当地流场混合机制主导,与当地混合分数 Z 的标量耗散率 χ_Z 密切相关,预混反应层则主要受当地的化学反应特征驱动.

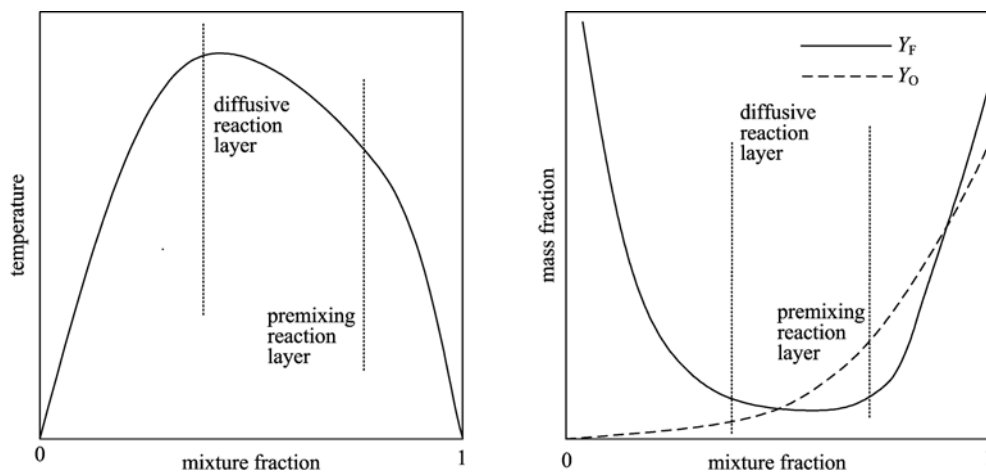


图 2 同轴射流火焰中的双火焰结构

Fig. 2 Twin flame structure in coaxial jet flame

本文使用 SFM 火焰面模型对求解的层流部分预混射流火焰进行化学热力学建表. 火焰面方程求解过程中, 在组分空间 Z 方向使用 100 个网格点, 建立化学当量比标量耗散率为 $\chi_{st} = 1, 4, 7, 10, 15, 20, 40, 100, 200, 400 \text{ s}^{-1}$ 的一系列对撞火焰面, 从而生成二维的化学热力学参数表. DNS 和采用火焰面模型计算时均采用基于 GRI1.2 的 DRM19 反应机理^[17], 物理空间的网格划分均为 200×100 . 分别采用 (Z, χ_z) 和 (Z, Y_c) 两种查询 SFM 火焰面数据库得到的解与 DNS 解对比. 计算时对靠近射流入口处的区域给出 $Y_c = 0.2$ 的初始分布, 相当于对初始燃料射流进口附近给出一段高温区以起到点火的效果.

图 3 给出了 (Z, χ_z) 和 (Z, Y_c) 两种参数形式得到的解的温度分布与 DNS 解的对比.

由图 3 可以看出, 对 SFM 模型数据库采用 (Z, Y_c) 参数形式查表, 相对于 (Z, χ_z) 形式对轴向火焰位置的预测更接近于 DNS 解. 进一步分析轴向的温度和主要组分质量分数随火焰高度的分布, 如图 4 所示. 图 4 给出了轴线方向 (Z, Y_c) 形式查表得到的温度、主要组分 CO_2 以及中间组分 CO 、 OH 质量分数的分布, 相对于直接使用当地标量耗散率查表的 (Z, χ_z) 查表方法, 更接近 DNS 方法得到的参照解. 火焰面内在的流形特征与当地流场的耦合隐含在求解 Y_c 输运方程的过程中, 对于燃烧场中受化学反应

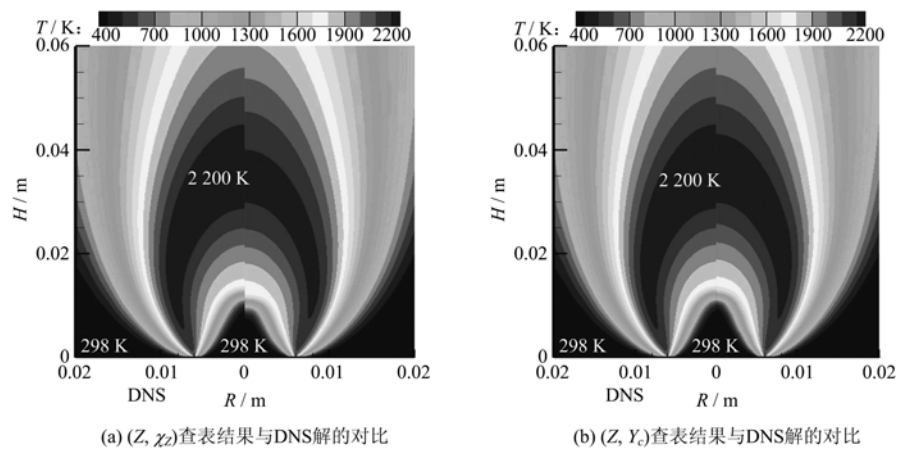
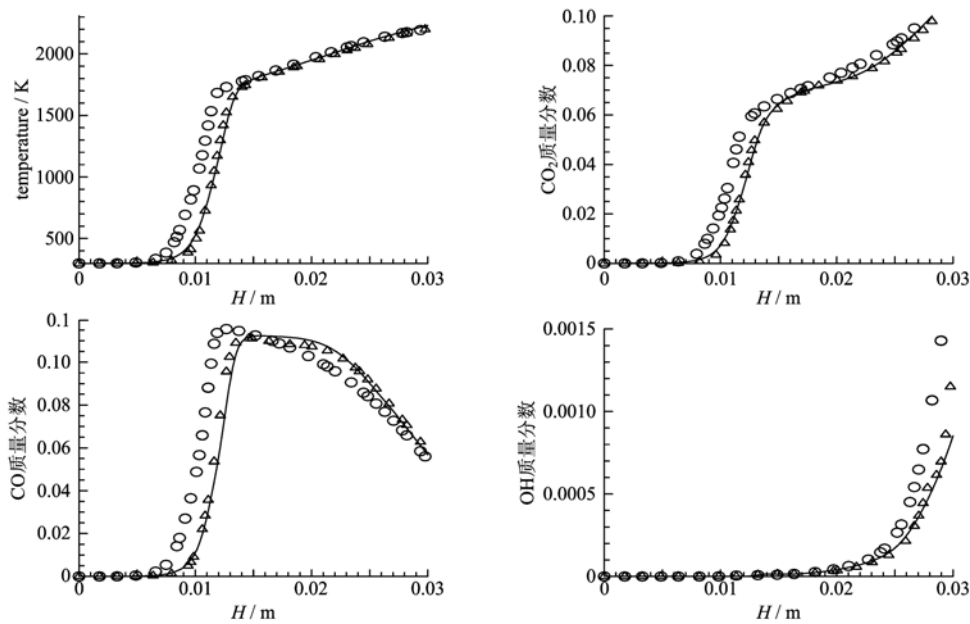


图 3 部分预混射流火焰温度分布云图对比

Fig. 3 Comparison of temperature profiles for partially premixed flame



实线: DNS 解; 圆圈: (Z, χ_z) 解; 正三角: (Z, Y_c) 解

图 4 部分预混射流火焰轴线温度和组分质量分数分布对比

Fig. 4 Comparison of temperature and mass fractions' distributions of centerline for partially premixed flame

驱动的预混特征区域,使用 (Z, Y_c) 参数形式查表可以捕捉火焰结构中受化学反应驱动的结构特征.

2.2 层流高温伴流射流火焰

选取计算的层流高温伴流射流火焰燃烧系统几何结构与之前讨论的部分预混射流火焰相同. 燃料进口处改为 CH_4 和 N_2 的混合气,同时大幅度提升伴流的温度,具体进口参数见表 2.

对高温伴流火焰,由于伴流温度的增加,火焰结构中的快速反应区域扩大,此区域中的化学反应时间尺度远小于扩散运输的尺度,火焰结构由化学反应驱动. 本文对求解的层流高温伴流射流火焰亦使用 SFM 火焰面模型进行化学热力学建表,求解火焰面方程所使用的网格信息与所求解的火焰面对应的化

表 2 层流高温伴流火焰射流进口条件配置
Tab. 2 Configurations of inlet jet for laminar high-temperature coflow flame

	central jet	co-flow
Y_{CH_4}	0.220	0
Y_{O_2}	0	0.068
Y_{N_2}	0.780	0.768
temperature/K	320	1350
velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.5	0.5

学当量比标量耗散率值与节 2.1 中采用的配置相同. 类似之前对部分预混火焰特征的分析,采用 (Z, χ_z) 和 (Z, Y_c) 两种查询 SFM 火焰面数据库得到的解与 DNS 解对比. 得到的模拟结果对比如图 5 和图 6

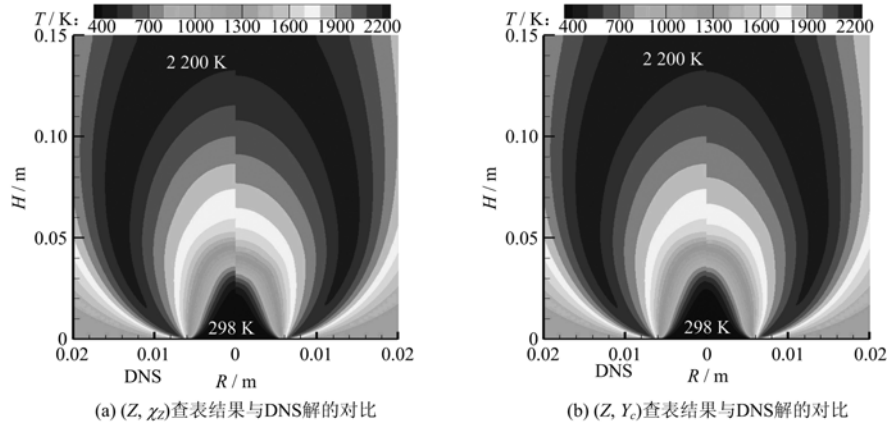
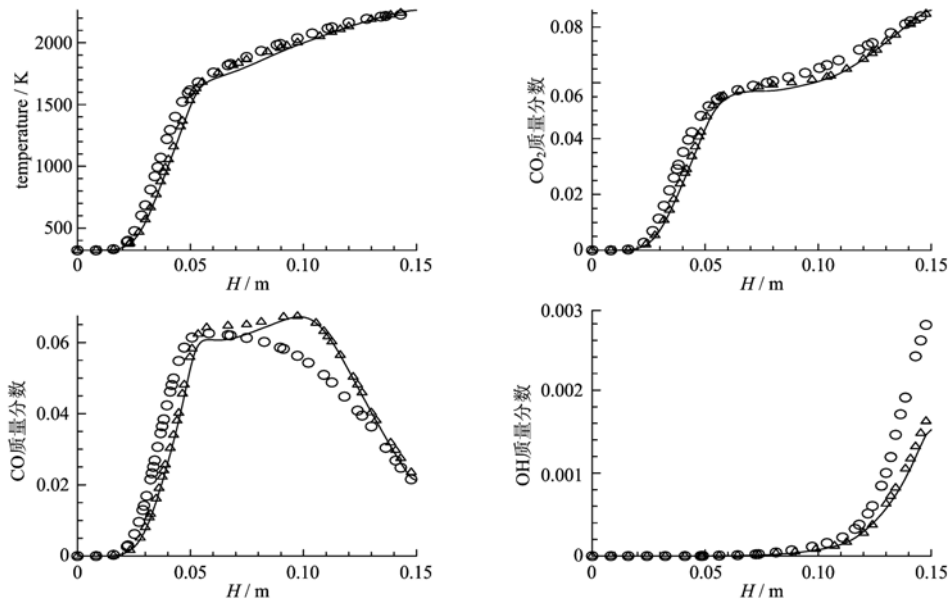


图 5 高温伴流射流火焰温度分布云图对比

Fig. 5 Comparisons of temperature profiles for high-temperature coflow flame



实线:DNS 解;圆圈: (Z, χ_z) 解;正三角: (Z, Y_c) 解

图 6 高温伴流射流火焰轴线温度和组分质量分数分布对比

Fig. 6 Comparison of temperature and mass fractions' distributions of centerline for high-temperature coflow flame

所示.

由高温伴流火焰的模拟结果可以得出,应用 SFM 模型的过程中,采用 (Z, Y_c) 参数形式查表可以更精确地捕捉火焰结构中受化学反应驱动的结构特征,从而提高数值模拟的精度.

3 结论

层流射流部分预混火焰和高温伴流火焰的模拟结果表明,采用 SFM 模型化学热力学建表之后,使用与预混 FGM 方法中相同的 (Z, Y_c) 查表参数形式得到的解,相对于直接采用 (Z, χ_z) 查表参数形式得到的解,更接近于直接求解包含化学反应源项输运方程的 DNS 解.使用 (Z, Y_c) 形式查询化学热力学表可以视为在火焰面模型中引入了火焰面流形的概念,从而可以准确地捕捉快速反应区域火焰结构中的内在流形结构,提高了对快速反应区域的火焰结构的模拟精度.

参考文献(References)

- [1] Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion [J]. Symposium (International) on Combustion, 1986, 21:1 231-1 250.
- [2] Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984, 10 (3): 319-339.
- [3] Pitsch H, Wan Y, Peters N. Numerical Investigation of Soot Formation and Oxidation under Diesel Engine Conditions [R]. SAE, 1995: 952357; doi: 10.4271/952357.
- [4] Marracino B, Lentini D. Radiation modelling in non-luminous nonpremixed turbulent flames [J]. Combustion Science and Technology, 1997, 128: 23-48.
- [5] Barths H, Peters N, Brehm N, et al. Simulation of pollutant formation in a gas-turbine combustor using unsteady flamelets [C]// Proceedings of the Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1998; 1 841-1 847.
- [6] Coelho P, Peters N. Unsteady modelling of a piloted methane/air jet flame based on the Eulerian particle flamelet model [J]. Combustion and Flame, 2001, 124(3): 444-465.
- [7] Pitsch H. Improved pollutant predictions in large-eddy simulations of turbulent non-premixed combustion by considering scalar dissipation rate fluctuations [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 1 971-1 978.
- [8] 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.
- [9] Oijen J V, Goey L D. Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds [J]. Combustion Science and Technology, 2000, 161 (1): 113-137.
- [10] Verhoeven L, Ramaekers W, Van Oijen J, et al. Modeling non-premixed laminar co-flow flames using flamelet-generated manifolds [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1): 230-241.
- [11] Maas U, Pope S B. Simplifying chemical kinetics: intrinsic low-dimensional manifolds in composition space [J]. Combustion and Flame, 1992, 88 (3): 239-264.
- [12] Maas U, Pope S B. Implementation of simplified chemical kinetics based on intrinsic low-dimensional manifolds [C]// Proceedings of the Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1992: 103-112.
- [13] Domingo P, Vervisch L, Veynante D. Large-eddy simulation of a lifted methane jet flame in a vitiated coflow [J]. Combustion and Flame, 2008, 152(3): 415-432.
- [14] Peters N. Turbulent combustion [M]. Cambridge university press, 2000.
- [15] Knudsen E, Pitsch H. A general flamelet transformation useful for distinguishing between premixed and non-premixed modes of combustion [J]. Combustion and flame, 2009, 156(3): 678-696.
- [16] Mohammed R K, Tanoff M A, Smooke M D, et al. Computational and experimental study of a forced, timevarying, axisymmetric, laminar diffusion flame [C]// Proceedings of the Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1998; 693-702.
- [17] Kazakov A, Frenklach, M. Reduced Reaction Sets based on GRI-Mech 1. 2 [EB/OL]. [2014-04-20]. <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.