

文章编号: 1000-8055(2008)04-0605-06

湍流燃烧模型对氢燃料超燃室流场模拟的影响

杨 阳¹, 邢建文², 乐嘉陵², 王金诺¹

(1. 西南交通大学 机械工程研究所, 成都 610031;

2. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘 要: 采用化学平衡的假定概率密度函数(PDF)模型和火焰面模型计算了德国宇航研究中心的超燃室反应流, 计算结果与有限速率反应模型的和实验的结果进行了对比. 使用有限体积法离散 Favre 平均的 N-S 方程, 湍流模型采用 $k\varepsilon$ 模型. 研究表明: (1) 有限速率反应模型在喷氢孔近场, 化学平衡的假定 PDF 模型在喷氢孔远场不能准确捕捉流场的细致结构, 而火焰面模型对全流场预测较好, 后两种模型的计算时间较有限速率反应模型节省约 38%; (2) 超燃室内湍流和燃烧相互作用不可忽略, 从预测精度和计算效率来看, 火焰面模型有较好的工程应用前景.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 超燃冲压发动机; 湍流燃烧; 超声速燃烧; 火焰面模型; 反应流; 数值模拟

中图分类号: V235.2

文献标识码: A

Effect of turbulent combustion model on simulation of hydrogen supersonic combustion

YANG Yang¹, XING Jian-wen², LE Jia-ling², WANG Jin-nuo¹

(1. Institute of Mechanical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The equilibrium chemistry model using assumed probability density function (PDF) and the flamelet model were adopted to numerically simulate the reactive flow field of the supersonic combustor of The German Aerospace Center. The calculated results were compared with those of the finite-rate chemistry model and the experiments. Finite volume method was used to discretize Favre-averaged Navier-Stokes equations, and $k\varepsilon$ turbulence model was employed. The results show: (1) the finite-rate chemistry model and the equilibrium chemistry model using assumed PDF cannot capture fine structures of near-field and far-field from the hydrogen injector, respectively, while the flamelet model can predict the flow field well, and computation time of the latter two models is saved about 38% over that of the finite-rate chemistry model; (2) the interaction between turbulence and chemistry in the reactive flow field of the supersonic combustor should not be ignored, and the flamelet model may have a bright prospect in engineering practices in terms of efficiency and accuracy.

Key words: aerospace propulsion system; scramjet; turbulent combustion; supersonic combustion; flamelet model; reacting flow; numerical simulation

收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2007-12-04

作者简介: 杨阳(1979-), 男, 四川泸州人, 博士生, 研究方向为超燃技术与流体机械.

超声速燃烧室内流场充满着激波、膨胀波、燃烧波、各种涡系、附面层及其相互之间的作用,对 CDF 模拟提出了很高的要求. 其中湍流脉动和燃烧间存在强非线性耦合,湍流通过强化混合影响平均化学反应速率,同时化学反应释热过程又影响着湍流,合理模拟这种相互作用对准确预测超燃室内的湍流反应流动尤其重要. 目前多数文献模拟超声速湍流燃烧时仍主要采用有限速率反应 (Arrhenius 公式) 模型,由于没有考虑湍流脉动对平均化学反应速率的影响,可能导致对流场的错误描述. 近年来吸气式高超声速技术发展迅猛,国际上非常重视对高速湍流燃烧的研究^[1-3],国内的研究人员也开始涉足这一领域^[4].

模拟湍流燃烧主要有三种基本方法^[4]:第一种是采用直接数值模拟 (DNS) 或大涡模拟 (LES),DNS 计算量极大目前只限于低 Re 数和小尺度空间内,LES 计算量虽比 DNS 小得多,但对复杂超声速湍流燃烧计算量仍太大,目前主要用于检验统观模型;第二种是联合概率密度函数 (PDF) 输运方程模拟,一般认为联合 PDF 方法是解决有限速率反应和污染物生成等诸类湍流燃烧问题合适和理想的方法,但由于联合 PDF 求解复杂且计算量大目前仍难以在工程上广泛应用;第三种是采用 Favre 平均 N-S 方程耦合湍流燃烧模型,由于可以考虑湍流和燃烧相互作用,这是目前针对复杂超声速燃烧比较可行和实用的方法. 其中使用的湍流燃烧模型代表性的有条件矩模型、火焰面模型和快速反应模型,这些模型在模拟精度、合理性和经济性上各有不同特点,如何针对超声速燃烧特点选择既合理又经济的模型是尚待解决和极具意义的问题.

条件矩模型^[5]采用条件平均标量处的化学反应速率模拟条件平均的化学反应速率,目前仍处在发展阶段,有待改进和完善. 火焰面模型^[4]将湍流火焰看作嵌入湍流流场内的局部具有一维结构的层流火焰的系综,湍流场中平均火焰结构由层流火焰面系综统计平均得到,从而将复杂化学反应动力学和湍流运动之间强烈的耦合关系解耦. 快速反应模型^[3]假定化学反应比湍流混合过程快很多,不考虑化学非平衡的影响. 本文采用火焰面模型和快速反应模型对德国宇航研究中心 (DLR) 的试验进行数值模拟,通过流场结构和流动参数的比较和分析,研究湍流燃烧模型对超声速燃烧数值模拟的影响.

1 湍流燃烧模型

1.1 化学平衡的假定概率密度函数模型

假定概率密度函数 (PDF) 方法是一种求解快速反应湍流非预混燃烧比较流行的方法,它假定化学反应瞬时达到平衡,为了预计中间产物,本文将假定概率密度函数方法和化学平衡计算结合起来. 假定各组分扩散系数相等 (在湍流流动中通常是一个良好的近似),组分方程简化为守恒标量 - 混合分数的单方程,该方程消去了化学反应源项,从而克服了组分方程中平均化学反应速率项和能量方程中平均释热速率项模拟的困难. 从混合分数方程可以推导混合分数平均值和方差的方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{f}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} f) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha} \nabla f \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} g) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} g) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha_g} \nabla g \right) + C_g \mu (\nabla f)^2 - C_d \frac{\epsilon}{k} g \quad (2)$$

式中,上标“ $\sim$ ”表示 Favre 平均; f 为混合分数, $\bar{\rho}$ 为平均密度, $\tilde{v}$ 为速度, μ 为湍流粘性系数; g 为混合分数的方差,常数 α , C_g 和 C_d 分别为 0.85, 2.86 和 2.0. 假定 f 服从 β 函数分布,该函数由混合分数的平均值和方差确定.

应用假定 PDF 方法建立湍流燃烧相互作用的封闭模型,已知混合分数的概率密度函数 $p(f)$,化学热力学参数 (组分质量分数、温度等) 的平均值可用公式

$$\bar{\phi} = \int \phi(f) p(f) df \quad (3)$$

求出. 其中 $\phi(f)$ 是混合分数 f 的函数,基于化学平衡可以求出. 由 (3) 式可见,化学热力学参数平均值是混合物分数的平均值和方差的函数, (3) 式积分在预处理中完成并存储为数据库,流场模拟需要计算化学热力学参数平均值时通过查询数据库插值得得,以显著节省计算时间. 但考虑到超声速流中,若使用数据库中的温度时,就不能计及速度和温度的强耦合作用,因此实际应用时,只有数据库中的组分质量分数被使用,当地的温度通过求解能量方程得到.

1.2 火焰面模型

火焰面模型通过在化学反应流场中求解一个无化学反应源项的守恒标量 - 混合分数的方程确定在某位置上出现火焰面的概率;对火焰面方程进行坐标变换,用混合分数 f 作为与火焰面垂直

方向的坐标,可得到在混合分数空间中受标量耗散率影响的火焰面方程.假定各组分的 Lewis 数等于 1,忽略热辐射损失的影响,层流扩散的火焰面结构可以用火焰面方程表示为

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i^n h_i S_i + \frac{1}{c_p} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{5}$$

式中, Y_i, S_i, h_i 分别为第 i 种组分的质量分数、化学反应速率和比焓; ρ, p, c_p 分别为密度、压力和定压比热容; χ 为标量耗散率,结合层流对撞射流火焰结构可将其表示为当量耗散率 χ_{st} 和混合分数 f 的函数,详细的方法可参见文献[4].求解(4)和(5)式表示的非定常火焰面方程的稳态解,得到层流火焰面数据库 $\phi = \phi(f, \chi_{st})$.然后,化学热力学参数的平均值用由层流火焰面系综得到

$$\tilde{\phi} = \iint \phi(f, \chi_{st}) p(f, \chi_{st}) df d\chi_{st} \tag{6}$$

为此还需给出 f 和 χ_{st} 的联合概率密度函数,通常假定两者统计独立,并忽略 χ_{st} 的脉动,认为其服从 δ 函数分布;同时假定 f 服从 β 函数分布,该函数通过求解混合分数平均值和方差方程(1),(2)式确定.(6)式二重积分很耗时间,在预处理中完成并存储为数据库,流场模拟需要计算化学热力学参数平均值时通过查询数据库插值求得,以显著节省计算时间.同前所述,为了计及速度和温度的强耦合作用,实际应用时只有数据库中的组分质量分数被使用,当地的温度通过求解能量方程得到.需要说明的是,超声速反应流中使用的火焰面数据严格讲需包含动能影响,考虑到目前计及动能影响的修正方法并不完备,本文使用不可压缩流的火焰面数据,由此生成的组分质量分数会存在一定误差.

2 计算和分析

2.1 物理模型和计算方法

本文物理模型是作为超燃经典算例被研究人员广泛引用的德国 DLR 实验^[1,4,6],该实验是专门为验证 CFD 软件具有的超燃冲压发动机反应流场模拟能力设计的.实验使用的直连式超燃冲压发动机燃烧室如图 1 所示.燃烧室入口高 50 mm,宽 40 mm,氢通过半楔角为 6°、长 32 mm 的支板上的 15 个喷孔喷出,喷孔直径为 1 mm,为了 2D 模拟将喷孔等效为相同面积的狭缝.支板楔尖坐标为 $x = 20\text{ mm}$ 和 $y = 25\text{ mm}$.来流和氢

喷注条件列于表 1.

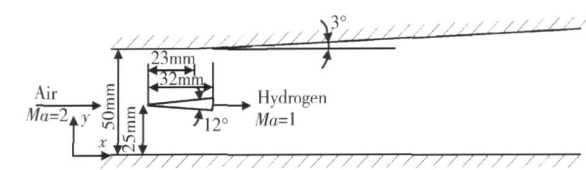


图 1 DLR 直连式超燃冲压发动机燃烧室示意图
Fig. 1 Sketch of DLR scramjet combustion chamber

表 1 来流和氢喷注条件
Table 1 Inflow conditions of the air and the hydrogen jet

	Air	Hydrogen
Ma	2.0	1.0
$u/(\text{m/s})$	730	1 200
T/K	340	250
$p/(10^5\text{ Pa})$	1	1
$\rho/(\text{kg/m}^3)$	1.002	0.097
Y_{O_2}	0.232	0
Y_{N_2}	0.736	0
$Y_{\text{H}_2\text{O}}$	0.032	0
Y_{H_2}	0	1
$k/(\text{m}^2/\text{s}^2)$	10	2 400
$\varepsilon/(\text{m}^2/\text{s}^3)$	650	10^8

为了对比有无湍流燃烧模型的影响,除了化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型,本文也使用通常的有限速率反应模型对流场进行数值模拟.三种模型均采用有限体积法求解积分形式的 Favre 平均 N-S 方程,使用有限速率反应模型时控制方程耦合了 n_s-1 个组分连续方程(n_s 为组分数),使用化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型时控制方程耦合了混合分数的平均值和方差的方程(不求解组分连续方程),三种模型均采用 $k-\varepsilon$ 模型,计算格式为隐式耦合的二阶迎风格式,具体方法参考文献[4].有限速率反应模型和火焰面数据库生成使用文献[7]的 7 组分 7 方程反应机理,组分为 $\text{H}_2, \text{H}, \text{O}_2, \text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O}$ 和 N_2 ,化学平衡的假定 PDF 模型使用的平衡组分也与此相同.

采用三块结构网格,网格节点数为 $51 \times 31 + 51 \times 31 + 173 \times 151$,喷孔及壁面加密至 10^{-5} m .给定来流和喷注氢的总压、静压和总温,来流和氢的湍流物理量 k 和 ε 同表 1,支板和燃烧室壁面采用绝热无滑移壁.

2.2 计算结果和分析

图 2 给出了实验阴影图片和三种模型计算的

密度等值线对比,可以看出三种模型均能捕捉到流场的基本特征.化学平衡的假定 PDF 模型得到的燃烧区在喷氢孔附近与实验吻合较好,在 $x > 100\text{ mm}$ 后得到的燃烧区明显小;有限速率反应模型得到的燃烧区与火焰面模型得到的燃烧区大致相当,两者之中火焰面模型与实验符合更好一些.

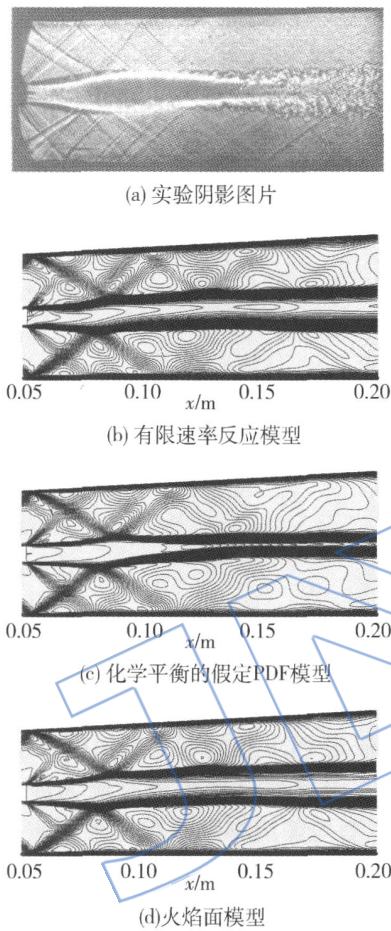


图 2 实验阴影图片与计算所得密度等值线分布对比

Fig. 2 Experimental shadow picture and computed density contour plots

图 3 对比了实验和三种模型计算的速度剖面.在沿 $y = 25\text{ mm}$ 的流向速度分布中,由于楔体的作用,流向速度先迅速降低,随后在喷氢孔附近由于氢的喷射而加速,在 $x = 165\text{ mm}$ 处,由于激波作用,速度降低随后增加,有限速率反应模型和火焰面模型都能较好反映这一流动特征,化学平衡的假定 PDF 模型不能捕捉该细致特征.在沿流向的三个截面上,有限速率反应模型和火焰面模型与实验结果基本一致,火焰面模型在 $x = 110\text{ mm}$ 流向截面上较有限速率反应模型吻合好些;化学平衡的假定 PDF 模型预测的流向速度偏大.

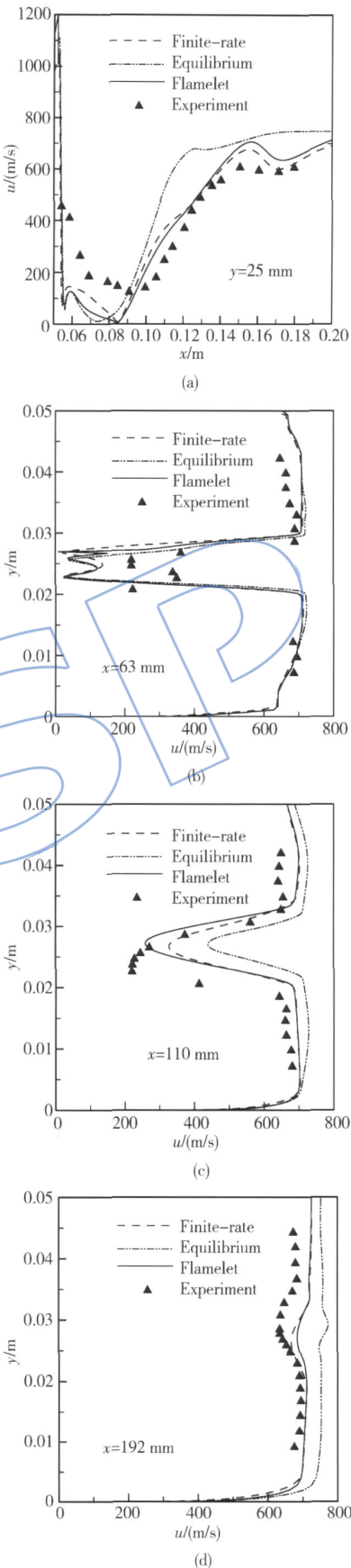


图 3 沿 $y = 25\text{ mm}$ 和沿流向三个截面速度剖面的实验和计算结果对比

Fig. 3 Computed and experiment velocity profiles at $y = 25\text{ mm}$ and at three different streamwise cross-section

图 4 给出了计算的脉动速度 $\sqrt{2/3k}$ 和 LDV 数据(速度分量 u 和 v 的方差)在三个流向截面上的分布. 在 $x = 110\text{ mm}$ 和 $x = 142\text{ mm}$ 流向截面, 三种模型得到的脉动速度与实验结果有差距, 这可能是由于入口边界处的湍流物理量 k 和 ε 难以准确给出, 以及湍流模型本身的局限性引起的. 相比有限速率反应模型, 化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型预测得好一些.

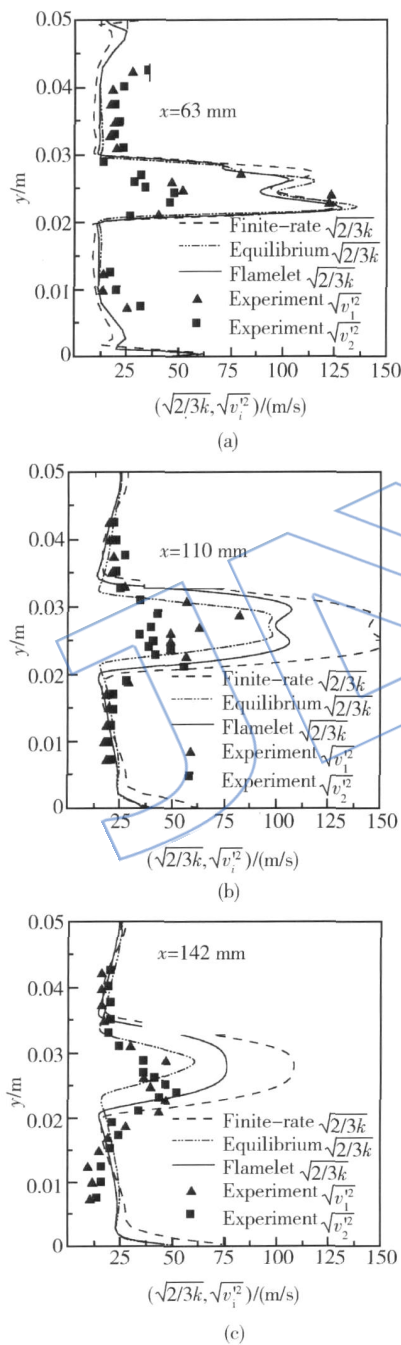


图 4 沿流向三个截面脉冲速度剖面的实验和计算结果对比

Fig. 4 Computed and experimental profiles of the velocity fluctuations at three different streamwise positions

图 5 给出了沿流向三个截面静温分布的计算和实验结果, 图 6 给出了主要产物 H_2O 的质量分数云图. 从截面静温分布来看, 在喷氢孔附近的截面 $x = 63\text{ mm}$ 上, 由于低温氢的喷入, 静温剖面 and H_2O 的质量云图应该呈双峰结构^[1], 化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型得到的静温剖面捕捉到了这一特征, 但有限速率反应模型仅有一个峰值, 并且化学平衡的假定 PDF 模型和有限速率

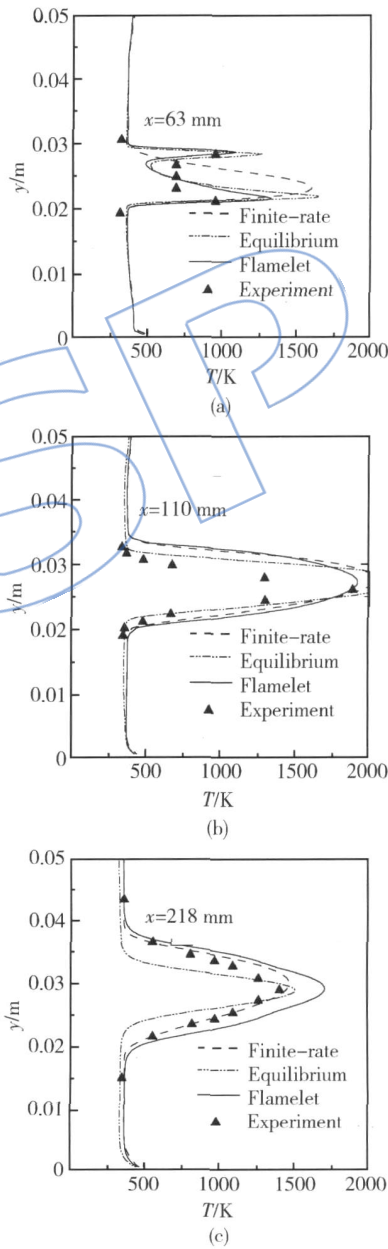


图 5 沿流向三个截面静温剖面的实验和计算结果对比

Fig. 5 Computed and experimental temperature profiles of at three different streamwise positions

反应模型预测的静温均偏高. 在 $x = 110\text{ mm}$ 截面上, 化学平衡的假定 PDF 模型预测的高温区最窄,

火焰面模型相比有限反应速率模型的结果与实验符合更为一致;在远离喷氢孔的 $x = 218 \text{ mm}$ 截面上,化学平衡的假定 PDF 模型预测的高温区与实验结果相比明显偏窄,火焰面模型和有限速率反应模型与实验结果吻合良好.从 H_2O 的质量分数云图也可以看出,在远离喷氢孔位置,化学平衡的假定 PDF 模型得到的燃烧区明显较其它两种模型窄.

综合图 3~图 6 分析,在喷氢孔附近 ($x = 63 \text{ mm}$),湍流脉动较为剧烈(见图 4),它和燃烧相互作用增大了喷氢孔附近的燃烧区域,使得不考虑湍流燃烧相互作用的有限速率反应模型预测的燃烧区域偏小.化学平衡的假定 PDF 模型过高估计了当地燃烧的剧烈程度,造成喷氢孔附近静温峰值偏高,同时在远离喷氢孔位置预测的燃烧区域明显偏小.火焰面模型由于同时考虑了湍流燃烧相互作用和化学非平衡的影响,对全流场的预测与实验符合较好.

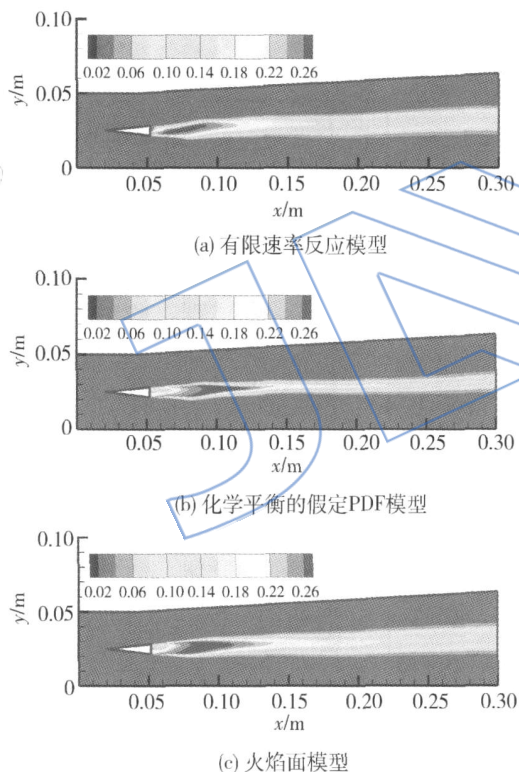


图6 生成 H_2O 的质量分数云图

Fig. 6 Contours of mass fraction of H_2O

由于不求解组分连续方程,化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型的单步计算时间相当,比有限速率反应模型节省约 38%,收敛步数大致相当(和初场的设置有关),在计算效率方面具有显著优势.

3 结 论

本文使用通常的有限速率反应模型和两种工

程应用上具有代表性的湍流燃烧模型 - 化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型,对 DL R 氢燃料超燃室反应流场进行了数值模拟,得到以下结论:

(1) 在喷氢孔近场,不考虑湍流燃烧相互作用影响的有限速率反应模型不能得到静温剖面的双峰结构;在喷氢孔远场,化学平衡的假定 PDF 模型预测的燃烧区域偏小;由于同时考虑了湍流燃烧相互作用和化学非平衡,火焰面模型对全流场的预测与实验符合较好.

(2) 由于不求解组分方程,化学平衡的假定 PDF 模型和火焰面模型的单步计算时间相比有限速率反应模型节省约 38%,在计算效率方面具有明显优势.

(3) 在氢燃料超燃流场中,湍流和燃烧的相互作用不可忽略,从预测的准确性和计算效率来看,火焰面模型有较好工程应用前景.

参考文献:

- [1] Oevermann M. Numerical investigation of turbulent hydrogen combustion in a scramjet using flamelet modeling [J]. Aerospace Science and Technology, 2000, 4: 463-480.
- [2] Chakraborty D, Paul P J, Mukunda H S. Evaluation of combustion models for high speed H_2/air confined mixing layer using DNS data [J]. Combustion and Flame, 2000, 121: 195-209.
- [3] Baurth R A, Alexopoulos G A, Hassan H A. Modeling of supersonic turbulent combustion using assumed probability density functions [J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(6): 777-786.
- [4] 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]. 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: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007.
- [5] 皱春, 郑楚光, 周力行. 条件矩模型模拟湍流扩散燃烧 [J]. 力学学报, 2002, 34(6): 969-977.
ZOU Chun, ZHENG Chuguang, ZHOU Lixing. Conditional closure model for simulation of turbulent diffusion combustion and nitric oxides formation [J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 34(6): 969-977.
- [6] Waidmann W, Alff F, Bohm M, et al. Supersonic combustion of hydrogen/air in a scramjet combustion chamber [J]. Space Technology, 1995, 15(6): 421-429.
- [7] Clutter J K, Mikolaitis D W, Shyy W. Effect of reaction mechanism in shock-induced combustion simulations [R]. AIAA Paper 98-0274.