

氢/碳氢燃料超声速燃烧的数值模拟*

徐 旭, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 采用隐式上、下三角分解 (Lower-Upper Decomposition) 的算法, 结合对组分连续方程中化学反应源项的点隐式处理, 求解了多组分的 N-S 方程组, 得到了二维和三维条件下的超声速掺混及燃烧的数值模拟结果, 通过与水平喷射氢气及预燃煤油等算例的验证, 计算结果与实验数据基本符合。在此基础上进行了垂直喷射氢气的三维超声速燃烧的数值模拟, 计算结果显示了氢气在超声速空气中掺混、燃烧的过程。该程序可进一步用来模拟超燃冲压发动机燃烧室内的复杂流场。

关键词: 超音速燃烧; 氢燃烧; 碳氢燃料; 数值仿真; 高超音速冲压发动机

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2002) 05-0398-04

Numerical simulation on combustion of hydrogen/ hydrocarbon in supersonic airstream

XU Xu, CAI Guo-biao

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The 2D and 3D supersonic combustion flowfields of hydrogen/ hydrocarbon were numerically studied. Two benchmark cases, including parallel injection of hydrogen and pre-burned kerosene were used to test the codes. The computational results of the supersonic mixing and combustion were compared with the available experimental data. The codes were then used to simulate the 3D vertical injection of hydrogen in a supersonic airstream. The supersonic mixing and combustion process of hydrogen can be observed clearly and the distributions of the combustion products are reasonable. The codes are proven to be capable of simulating the complex flowfields of scramjet combustor.

Key words: Supersonic combustion; Hydrogen fuel; Hydrocarbon fuel; Numerical simulation; Hypersonic ramjet engine

1 引 言

超声速燃烧是超燃冲压发动机最为关键的技术问题。开展大型实验所需设备和经费庞大, 而且难以覆盖整个超燃冲压发动机的飞行范围。因此, 开展超声速燃烧的数值模拟工作, 用以指导实验设计、帮助实验分析、扩展研究范围都是必需的。这已成为目前国内外研究超声速燃烧的一种基本手段。氢燃料超声速燃烧及强化技术已有广泛的研究^[1,2], 碳氢燃料燃烧时的化学反应过程很复杂, 但对已雾化煤油和高温富油燃气在超声速燃烧室中扩散混合, 燃烧的数值

模拟, 也取得了初步进展^[3,4]。

数值模拟的关键是计算的精度、效率和稳定性, 尤其是只有模拟精度达到一定的水平, 才能被工程应用所接受。本文运用不同类型的算例对所发展的超声速燃烧计算程序进行测试, 通过与实验数据的对比达到标定程序的目的, 为进一步开展超燃燃烧室内的流动模拟作准备。

2 数值计算方法

计算采用上、下三角分解算法^[5~7]。一般曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 下, 包含化学反应的多组分三维 N-S

* 收稿日期: 2002-05-30; 修订日期: 2002-06-26。基金项目: 国家自然科学基金 (10072010) 和航空基金 (00A51070) 资助项目。

作者简介: 徐 旭 (1969—), 男, 博士后, 副教授, 研究领域为火箭发动机、超燃冲压发动机工作过程仿真。

方程组可表示为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F - F_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(G - G_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial(H - H_v)}{\partial \zeta} = S \quad (1)$$

对其进行时间、空间离散,并对反应源项进行点隐式处理^[8]可得:

$$\{I + \beta \Delta t (D_{\xi} A + D_{\eta} B + D_{\zeta} C - Z)\} \delta U = - \Delta t RHS \quad (2)$$

式中 A, B, C 分别为对流通量 F, G, H 的雅可比, Z 为源项 S 的雅可比, 右手项 RHS 包括对流项的显式部分和粘性项及源项。对 A, B, C 按其特征值正负进行分裂, 如: $A = A^+ + A^-$, A^+, B^+, C^+ 特征值非负, A^-, B^-, C^- 特征值非正, 则进行差分计算时可根据特征值的正负选择前插或后差^[7], 得

$$\{I + \beta \Delta t (D_{\xi}^+ A^- + D_{\xi}^- A^+ + D_{\eta}^+ B^- + D_{\eta}^- B^+ + D_{\zeta}^+ C^- + D_{\zeta}^- C^+ - Z)\} \delta U = - \Delta t \cdot RHS \quad (3)$$

运用单侧一阶前插和后差, 上式可表示成以下形式:

$$(D + L + U) \delta U = - \Delta t \cdot RHS \quad (4)$$

式中对角阵

$$D = I + \beta \Delta t (A_{i,j,k}^+ - A_{i,j,k}^- + B_{i,j,k}^+ - B_{i,j,k}^- + C_{i,j,k}^+ - C_{i,j,k}^- - Z)$$

下三角阵 $L = -\beta \Delta t (A_{i-1,j,k}^+ + B_{i,j-1,k}^+ + C_{i,j,k-1}^+)$

上三角阵 $U = \beta \Delta t (A_{i+1,j,k}^- + B_{i,j+1,k}^- + C_{i,j,k+1}^-)$

上式可近似分解成

$$(D + L) D^{-1} (D + U) \delta U = - \Delta t \cdot RHS \quad (5)$$

相当于求解以下方程:

$$\left. \begin{aligned} (D + L) \delta U^* &= - \Delta t \cdot RHS \\ (D + U) \delta U &= D \delta U^* \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上述方程可以很方便地运用 Gauss-Seidel 迭代法求解, 计算量与显式计算格式相当, 而计算时间步长可以大大增加, 计算效率得到极大提高。

3 算例

3.1 水平喷射氢气的二维超声速燃烧

计算条件与文献[1]中的实验条件相同: 来流空

气/水蒸气混合气体静压 1.0×10^5 Pa, 静温 1270.0 K, 马赫数 2.44, 氢气静压 1.0×10^5 Pa, 静温 254.0 K, 马赫数 1.0。计算中使用的化学动力学模型是文献[1]给出的 7 组分、8 反应模型。

图 1 为计算网格, 网格数为 65×65 。实验时, 燃气加热的空气从上方进入计算域, 氢气从下方喷入, 喷孔高度为 4 mm。为了补偿附面层的影响, 实验中采用了渐扩型实验段。图 2 为流场等压线与氢氧根的分布。从图 2(a) 中可见, 氢气喷入后, 没有立即燃烧, 在经历了一段感应期(约 0.2 ms)后, 开始燃烧, 出现一道燃烧波, 压力明显上升。相应地, 燃气中的 OH 明显增多, 如图 2(b) 所示。图 3 是某计算截面处部分燃烧产物的摩尔分数与实验结果的对比, 计算得到的水的峰值与实验测量符合良好。

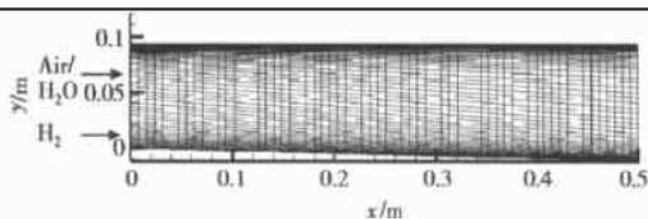


Fig. 1 Computational grids for parallel injection of H_2

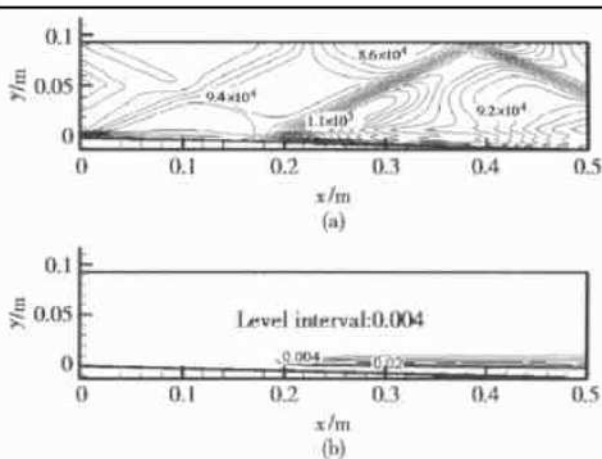


Fig. 2 Flow fields of parallel injection of H_2

(a) Pressure contours (unit: Pa);

(b) Mass fraction contours of OH

3.2 水平喷射预燃煤油的二维超声速燃烧

计算条件与文献[3]的实验条件相一致。来流空气压力 0.977×10^5 Pa, 温度 491.9 K, 马赫数 2.09, 预燃燃气压力 1.731×10^5 Pa, 温度 1771.9 K, 马赫数 1.25。实验中, 经过预燃的煤油水平喷射进入二维超声速燃烧室, 与来流空气进行掺混和二次燃烧。计算中分别使用了甲烷(CH_4)和乙烯(C_2H_4)来代替煤油分解后的

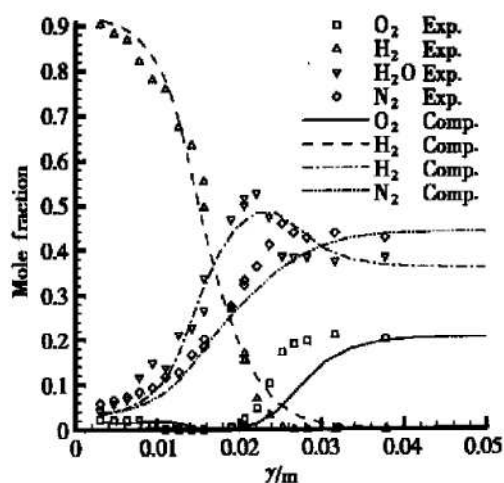


Fig. 3 Mole fractions of species
at station $x = 0.356$ m

主要成分,使用了一步和两步反应模型^[9]来模拟燃烧室内的化学非平衡过程。计算网格数为 200×45 ,如图4。计算得到的燃烧室上、下壁面压力分布如图5所示。从图上可以看到:

(1) 甲烷的反应结果与乙烯的掺混(无反应)结果比较接近,都与实验测得的压力分布符合,这说明,燃烧室内二次燃烧进行得很不充分,没有明显的由燃烧导致的压力上升出现,燃烧效率比较低。

(2) 乙烯的计算结果显示了明显的压力上升,说明有显著的燃烧发生,但与实验测得的压力分布不一致,说明从预燃室出来的燃气不如乙烯易于燃烧。

(3) 使用单步和两步反应模型的计算结果无明显差异。

3.3 垂直喷射氢气的三维超声速燃烧

计算条件: 来流空气静压 1.01×10^5 Pa, 静温 1300.0 K, 马赫数 4.0, 氢气静压 8.0×10^5 Pa, 静温 700.0 K, 马赫数 1.0。图6为其计算域及计算网格,网格点数为 $97 \times 49 \times 33$ 。化学动力学模型同算例1。

从图7所示的 y 向各截面的压力分布图上可以明显地看到氢气的喷入在主流空气中产生一道强烈的弓形激波,波后压力明显上升。计算结果还显示了该激波在下壁面反射。图8(a)所示的 X 向各截面上水的质量分数分布可以清楚地反映氢气的燃烧情况。在初始喷射面($x = 0.019$ m),氢气首先在喷流与空气的接触面上开始燃烧,生成一定量的水。在喷孔下游截面,水的质量分数逐渐增加,同时在 y, z 方向的分布范围也逐渐扩大。图8(b)所显示的 OH 分布也显示了同样的规律。本文的计算结果与文献[3]的计算结果很接近。

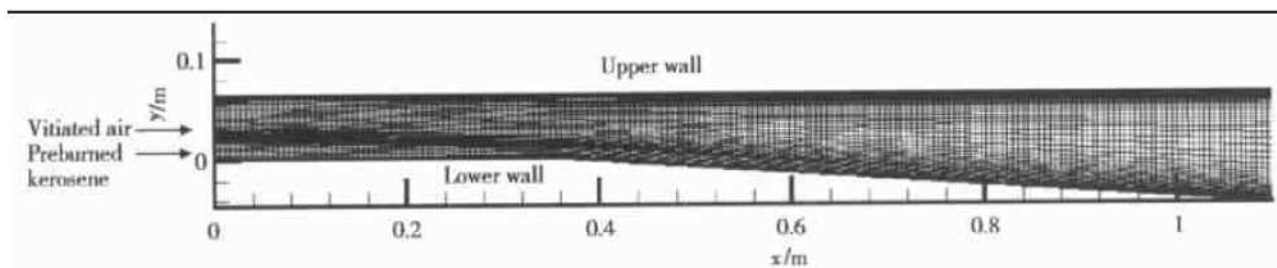


Fig. 4 Computational grids for parallel injection of pre-burned kerosene

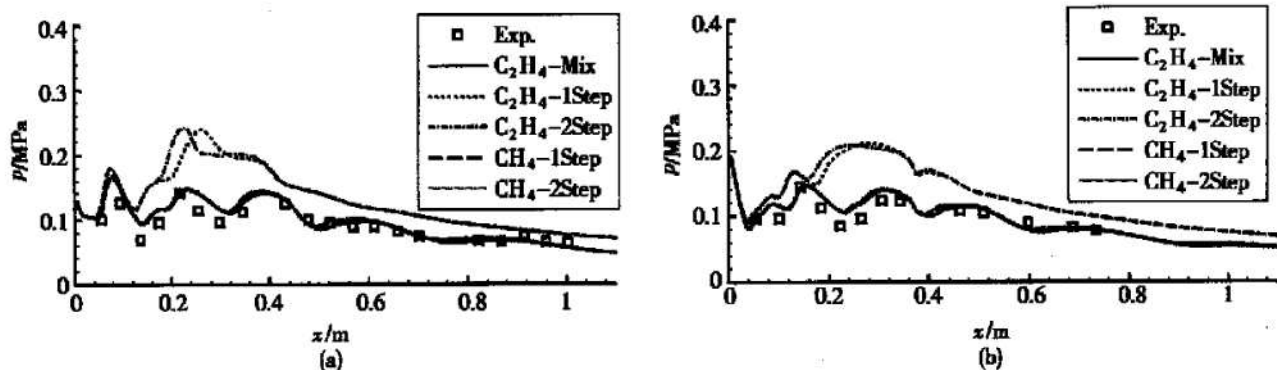


Fig. 5 CFD predicted wall pressure vs. experimental data

(a) Upper wall pressure distribution; (b) Lower wall pressure distribution

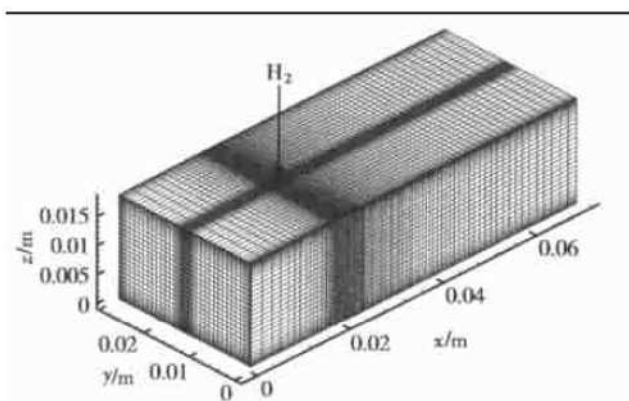


Fig. 6 Computational grids for 3D hydrogen injection

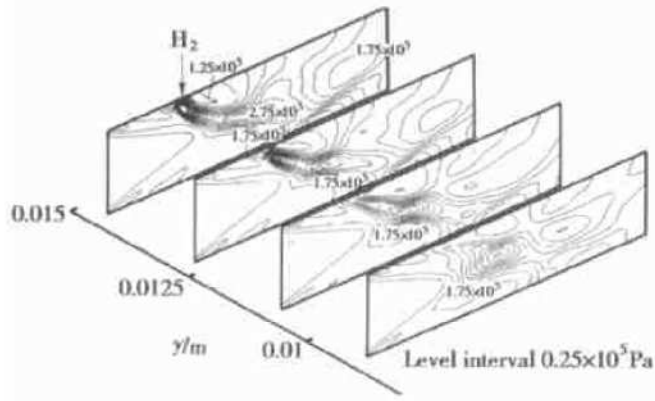
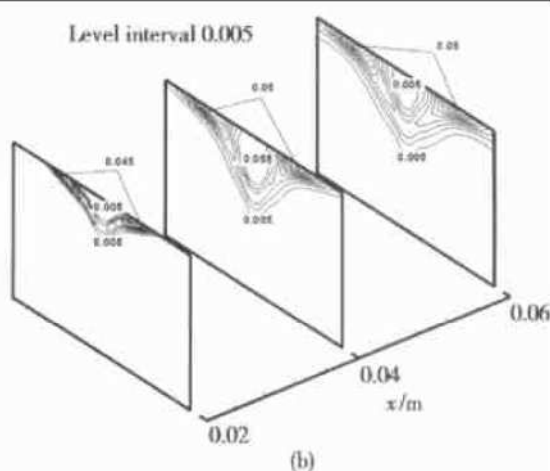
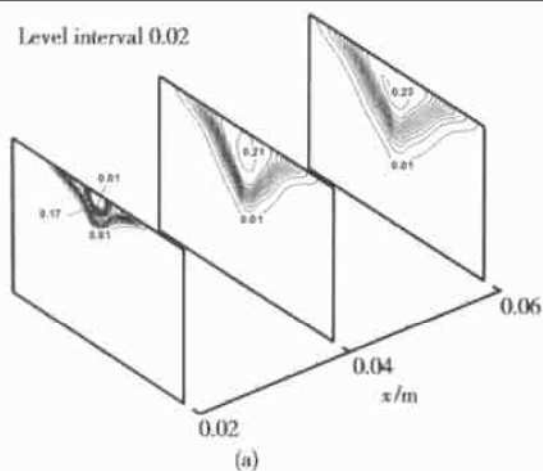


Fig. 7 Pressure distribution on Y-planes

Fig. 8 Mass fraction of OH, H₂O on x-planes(a) Mass fraction of H₂O; (b) Mass fraction of OH

4 结 论

经过多个氢/碳氢燃料超声速燃烧算例的验证,本文所发展的程序可以用于超声速燃烧的数值模拟,并具有一定的精度。

进一步的工作包括:

(1) 模拟超燃燃烧室内超声速燃烧的过程,获得燃烧室稳定燃烧时的性能参数;

(2) 针对使用碳氢燃料的超燃冲压发动机的实际情况,开展燃烧室内气、液两相的超声速燃烧模拟。

参考文献:

- [1] Evans J S, Schexnayder C J. Critical influence of finite rate chemistry and unmixedness on ignition and combustion of supersonic H₂ air stream[J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(2).
- [2] 徐胜利, 岳朋涛, 张梦萍. 采用斜坡凹槽稳焰器强化 H₂ 超燃的数值研究[J]. *推进技术*, 2001, 22(6).
- [3] 王 春, 司徒明, 马继华, 等. 高温富油燃气超声速燃烧数值模拟[J]. *推进技术*, 2000, 21(2).

- [4] 岳朋涛, 张梦萍, 徐胜利. H₂ 引燃雾化煤油超燃混合的数值模拟[J]. *推进技术*, 2001, 22(6).
- [5] Jameson A, Yoon S. Lower-Upper implicit scheme with multiple grids for the Euler equations[J]. *AIAA Journal*, 1987, 25(7).
- [6] Yoon S, Jameson A. Lower-Upper symmetric gauss-seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations[J]. *AIAA Journal*, 1988, 26(9).
- [7] Shuen J S. Upwind differencing and LU factorization for chemical non-equilibrium Navier-Stokes equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 99: 233~250.
- [8] Bussing T R A, Munman E M. Finite-volume method for the calculation of compressible chemically reacting flows[J]. *AIAA Journal*, 1988, 26(9).
- [9] Charles K, Westbrook, Dryer F L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984, 10: 1~57.

(编辑: 朱立影)