

超燃冲压发动机燃烧室三维化学 反应流场的数值模拟*

梁剑寒 王承尧

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 采用LU隐式方法强耦合求解有限体积法离散的完全N-S方程及组分方程, 数值模拟超燃冲压发动机燃烧室内的化学反应流场。计算中采用了AUSM通量分裂格式, 两方程的化学反应模型和Baldwin-Lomax代数湍流模型。计算结果与可能的实验结果进行了比较。

主题词: 冲压进气燃烧室, 超音速燃烧, 三维流, 反应动力学, 数值仿真

分类号: V235.213

3D NUMERICAL SIMULATION OF SUPERSONIC REACTING FLOWS IN SCRAMJET COMBUSTOR

Liang Jianhan Wang Chengyao

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: A three-dimensional numerical code has been developed to simulate supersonic reacting flows in scramjet combustor. The code employs an implicit, finite volume, Lower-Upper (LU), and time-marching method to solve the complete Navier-Stokes and species equations in a fully coupled and efficient manner. An upwind flux split method named AUSM is adopted to get crisp representations of shock and discontinuities. A global chemistry model is used to simulate the chemical reaction of hydrogen and air. Baldwin-Lomax algebraic turbulence model is used to enclose the governing equations. To testify the reliability of the code, the numerical results are compared with available experimental data.

Subject terms: Ram air combustor, Supersonic combustion, Three dimensional flow, Reaction kinetics, Numerical simulation

1 引言

超燃冲压发动机燃烧室内的流场非常复杂, 包含有燃料的湍流混合, 旋涡的生成与破裂, 横向喷流与超音速主流的干扰等一系列复杂流动现象。为了能较好地模拟这个复杂流场, 我们采用了雷诺平均的完全N-S方程及组分方程, 并用LU隐式方法对方程组进行强耦合求解。计算中采用了两步总包化学反应模型及Baldwin-Lomax代数湍流模型。计算得到了流场的温度、压力分布及各组分的质量浓度分布。

* 收稿日期: 19960813, 修回日期: 19961018

2 控制方程

三维笛卡尔坐标系下的 N-S 方程与组分方程可写为以下矢量形式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(E - E_v)}{\partial x} + \frac{\partial(F - F_v)}{\partial y} + \frac{\partial(G - G_v)}{\partial z} = H \quad (1)$$

其中 Q 、 E 、 F 、 G 、 E_v 、 F_v 、 G_v 和 H 的表达式从略。

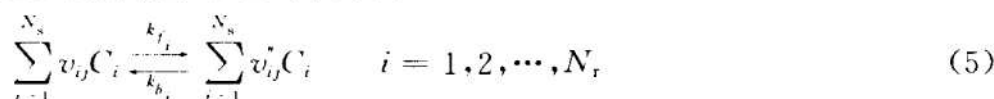
为了简单,假设各组分间的等效扩散系数相同,假设 Lewis 数为 1.0,而且 $\rho D = \mu / Pr$ 。压力和温度可从以下几个方程迭代求解

$$e = \sum_{i=1}^{N_s} Y_i h_i - \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (2)$$

$$h_i = h_{f,i}^0 + \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT \quad (3)$$

$$p = \rho R_u T \sum_{i=1}^{N_s} \frac{Y_i}{W_i} \quad (4)$$

这里 $h_{f,i}^0$ 是组分 i 的生成焓, $C_{p,i}$ 是组分 i 的定压比热容, W_i 是相对分子质量。方程 (4) 是混合气体的状态方程。各组分的等压比热容、热传导系数可由多项式拟合求得,如 $k_i = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \alpha_4 T^4$ 。多项式的系数可见于文献 [1]。分子粘性系数可由 Wilke's 混合定律得到。涉及 N_s 种组分, N_r 个基元反应的化学反应可表示为



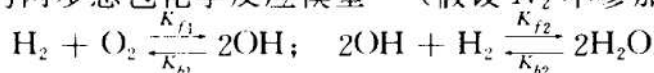
这里 C_i 是组分 i 的摩尔浓度, $k_{f,i}$ 与 $k_{b,j}$ 是由 Arrhenius 公式给出的化学反应速率常数, ν_{ij} 及 ν_{ij}^* 是反应物和生成物的化学计量系数。

$$k_{f,i} = A_{f,i} T^{B_{f,i}} e^{-E_{f,i}/RT}; \quad k_{b,j} = A_{b,j} T^{B_{b,j}} e^{-E_{b,j}/RT}$$

第 j 个基元反应中组分 i 浓度变化率及 i 组分总的质量生成率分别为

$$(\dot{C}_i)_j = (\nu_{ij}^* - \nu_{ij})(k_{f,i} \prod_{i=1}^{N_s} C_i^{\nu_{ij}} - k_{b,j} \prod_{i=1}^{N_s} C_i^{\nu_{ij}^*}); \quad \omega_i = W_i \sum_{j=1}^{N_r} (\dot{C}_i)_j$$

在本文中采用了 5 组分的两步总包化学反应模型^[2] (假设 N_2 不参加反应), 可表示如下



为了控制方程的封闭采用了 Baldwin-Lomax^[3] 代数湍流模型, 并假定 $Pr_t = Sc_t = 0.9$ 。

3 AUSM⁺ 通量分裂格式与 LU 隐式方法

本文采用有限体积法离散积分形式的控制方程。其中无粘通量用 AUSM⁺ 格式离散, 粘性通量用二阶中心差分离散。AUSM⁺ 通量分裂格式是 Liou^[4] 于近两年提出的。这将输运通量与压力通量分开, 对线性与非线性场分别处理。它在粘性层中的耗散要比矢通量分裂 (FVS) 小得多, 而且它的随意性 (Robustness) 比通量差分分裂 (FDS) 更好。同时它比较容易实现, 而且推广至化学非平衡流也相对简单。AUSM⁺ 格式可简述如下

$$f_{1,2} = m_{1,2} \frac{\alpha_{1,2}}{2} (\Phi_L + \Phi_R) - \frac{\alpha_{1,2}}{2} |m_{1,2}| \Delta_{1,2} \Phi + p_{1,2} \quad (6)$$

$$\Delta_{1/2} = (\quad)_R - (\quad)_L; \quad m_{1/2} = M_L^+ + M_R^-$$

$$M_{L/R}^\pm = \begin{cases} \frac{1}{2}(M \pm |M|), & \text{if } |M| \geq 1 \\ \pm \frac{1}{4}(M \pm 1)^2 \pm \beta(M^2 - 1)^2, & \frac{1}{16} \leq \beta \leq \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$p^\pm = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 \pm \text{sign}(M))p, & \text{if } |M| \geq 1 \\ \frac{1}{4}(M \pm 1)^2(2 \mp M)p \pm \alpha M(M^2 - 1)^2 p, & -\frac{3}{4} \leq \alpha \leq \frac{3}{16} \end{cases}$$

$$\alpha_{1/2} = \min(\alpha_L, \alpha_R); \quad \alpha_{L/R} = \alpha^{*2} / (\max(|u|, \alpha^*)); \quad \alpha^* = \sqrt{\frac{2(\gamma - 1)h_t}{(\gamma - 1)}}$$

其中, h_t 是比总焓, M 为马赫数。

为了获得单调解我们选择完全迎风的二阶 MUSCL 方法, 插值变量为 $W = (\rho, u, v, w, e, Y_i)$ 。则

$$W_L = W_j + \frac{1}{2}\Psi(r_j)(W_j - W_{j-1}); \quad W_R = W_{j+1} - \frac{1}{2}\Psi\left(\frac{1}{r_{j+1}}\right)(W_{j+2} - W_{j+1})$$

其中 $r_j = \frac{\Delta_{j+1/2} W_i}{\Delta_{j-1/2} W_i}$; Ψ 为限制器函数, 可选择 Minmod 或其它函数。

LU 隐式方法是近年来发展的一种适于定常流计算的简单、高效的迭代法。它避免了块矩阵的求逆, 因而耗时较少。这对包含大量组分方程的化学非平衡流计算显得尤为重要。本文采用的 LU-SGS 方法详细介绍可见文献 [5]

4 结果与讨论

为了验证程序的可靠性, 我们选择了动压比为 $Q=0.36$ 的实验数据^[6]与计算结果进行对比, 由图 1 可见二者符合得较好。

然后我们计算如图 2 所示外形的横向喷氢的化学反应流场。入口来流静温为 1300K, 喷流压力比为 8, 静温为 700K。计算中下壁面采用绝热、无滑移条件, 计算域上边界和左、右边界 ($Z=0$ 和 $Z=Z_{\max}$) 采用对称条件。图 3 显示了 XY 面 ($Z=0$) 上的压力等值线图, 图中数值为无量纲的压力值。图 4 为速度矢量图, 由喷流引起的分离区以及它诱导的弓形激波清晰可见。图 5 为温度分布, 壁面温度最高, 这是因为采用了绝热壁条件; 弓形激波后的温度也较高, 这是激波诱发的燃烧放热所致。图 6 显示了不同横截面上的速度矢量, 由喷流引起的旋涡很明显。图 7 为不同横截面的 H_2 质量组分分布, H_2 的扩散很明显。图 8 是不同横截面上的 H_2O 质量组分分布。

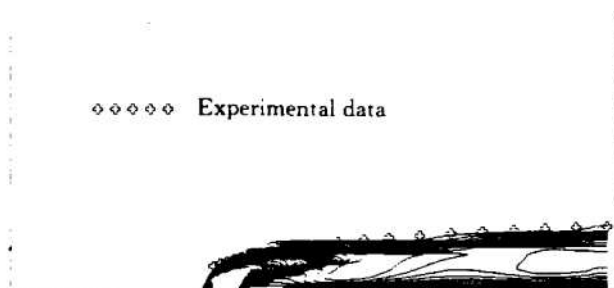


Fig. 1 Comparison of predicted and experimental jet penetration depth

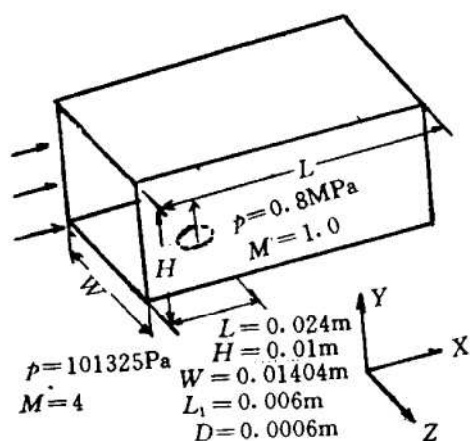


Fig. 2 Reacting flow computation configuration

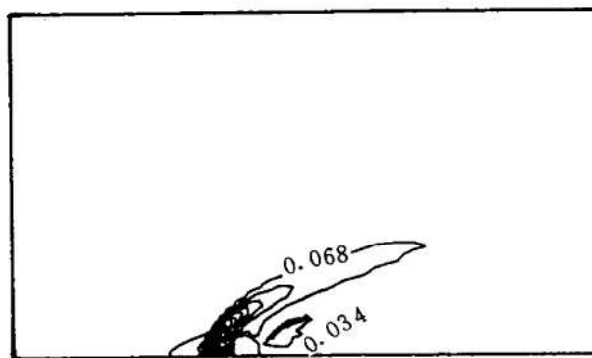


Fig. 3 Pressure contour on the XY plane

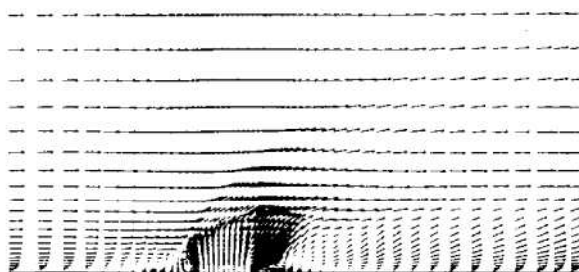


Fig. 4 Velocity vector at XY plane

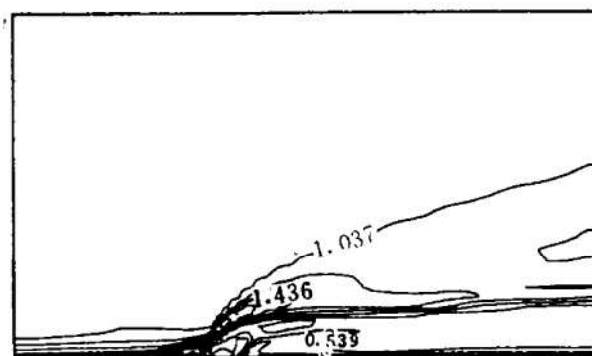
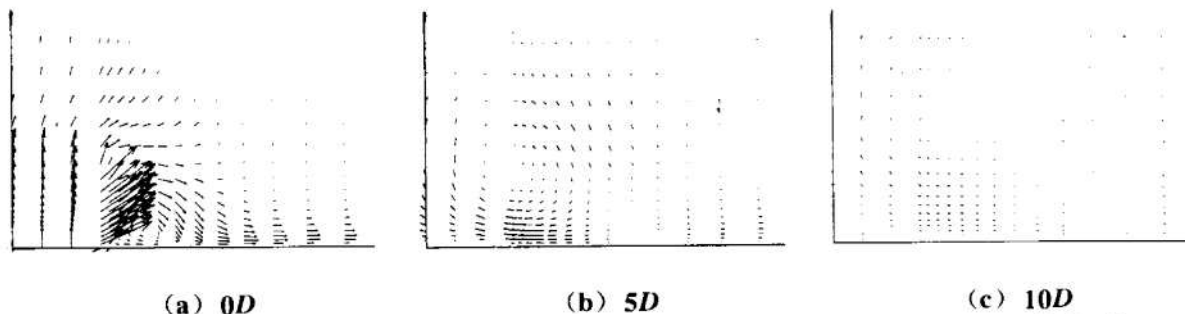
Fig. 5 Temperature contour on the XY plane (T/T_∞)

Fig. 6 Velocity vector at cross-stream plane 0D, 5D, 10D downstream of the jet

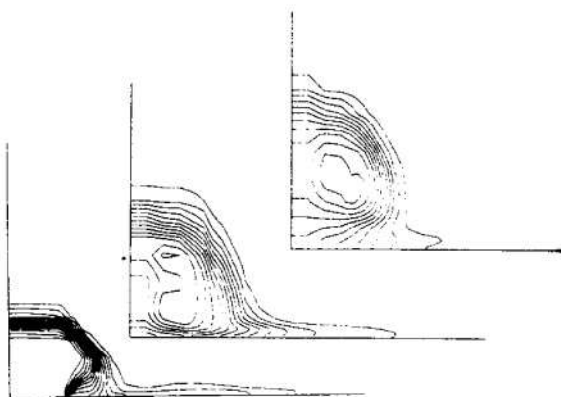
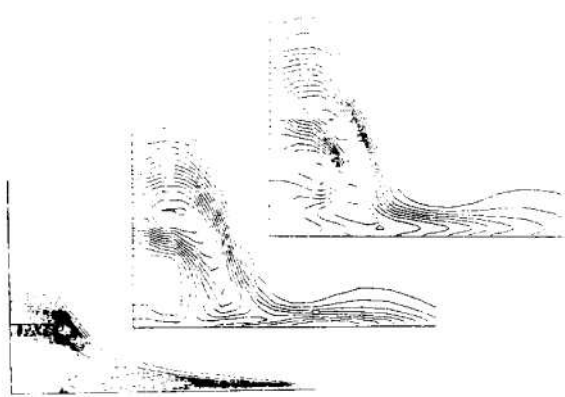
Fig. 7 H_2 mass fraction contour at cross-stream plane at 0D, 5D, 10D downstream of the jet

Fig. 8 Water mass fraction contour at cross-stream plane at 0D, 5D, 10D downstream of the jet

(下转第 13 页)

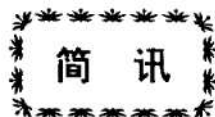
参 考 文 献

- 1 Lewis J H. Propulsive efficiency from an energy utilization standpoint. J Aircr., 1976, 13: 299
- 2 Clarke J M, Horlock J H. Availability and propulsion. J Mech Eng Sci, 1975, 17: 223~232
- 3 Szargut J, Morris D R, Steward F R. Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publishing Corp, 1988

(上接第4页)

参 考 文 献

- 1 Gordon S, McBride B J. Computer program for the calculation of complex equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks, and chapman-jouguet detonations. NASA SP-273, 1976
- 2 Rogers R C, Chinitz W. Using a global hydrogen-air combustion model in turbulent reacting flow calculations. AIAA Journal, 1983, 21: 586~592
- 3 Baldwin B S, Lomax H. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows. AIAA 78-257
- 4 Liou Meng-Sing. Progress toward an improved CFD method: AUSM⁺. AIAA 95-1701
- 5 Imaly S T. Nonequilibrium thermo-chemical calculations using a diagonal implicit scheme. AIAA 91-0468
- 6 McDaniel J C, Graves J Jr. A laser-induced fluorescence visualization study of transverse sonic fuel injection in a non-reacting supersonic combustor. AIAA 86-0570



新的有希望的氧化剂 ——二硝酰胺铵 (ADN)

二硝酰胺铵 (ADN) 分子式为 $\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$, 不含卤素, 能量密度高, 高温稳定性好, 作为推进剂, 燃烧不产生烟, 是复合推进剂中最有希望的替代氧化剂之一。

据美国推进与动力杂志载文, 英国剑桥大学用高速摄影方法研究了 ADN 与 GAP 粘合剂的冲击响应。结果表明, ADN 的粉末比高氯酸铵稍稍敏感 (在他们所用的落锤仪上)。试验还发现, ADN 能被高熔点粗砂 ($60\mu\text{m}$ 硬玻璃粉) 和脆性聚合物敏化, 高密度聚乙烯可抑制其爆燃。

(文战元)