

超声速气流中轴向涡强化 混合及燃烧的数值研究*

陈坚强 张涵信 高树椿

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳, 621000)

摘 要: 通过求解 N-S 方程, 数值计算了扩张圆管内的非平衡流动, 并研究了超声速混合和燃烧的强化技术。结果表明, 在超声速领域, 预旋燃料方式是一种比较有效的强化技术。

主题词: 超音速冲压喷气发动机, 燃烧效率, 强化混合⁺, 数值分析

分类号: V235.21

THE STUDIES OF THE ENHANCEMENT TECHNIQUES OF MIXING AND COMBUSTION IN SUPERSONIC FLOWS

Chen Jianqiang Zhang Hanxin Gao Shuchun

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, 621000)

Abstract: The viscous nonequilibrium swirling flows in a divergent duct are simulated by solving N-S equations, and the enhancement techniques of mixing and combustion in supersonic flows are investigated. The results show that the swirling of fuel is an effective enhancement method for supersonic mixing and combustion.

Subject terms: Supersonic combustion ramjet engine, Combustion efficiency, Enhancement mixing⁺, Numerical analysis

1 引 言

氢燃料超声速燃烧中冲压发动机 (Scramjet engine) 设计中, 由于气体燃料同由进气道进入燃烧室的气流相混合的时间尺度与氢 (H_2) 燃料燃烧时间尺度相比要长的多, 因此, 提高燃料的混合和燃烧效率就成了燃烧室设计的关键^[1]。在超声速气流中, 燃料与空气的相互混合常常受诸多方面因素^[2]的影响而变得较为困难, 并随着飞行马赫数的不断提高, 燃料和空气的混合效率就会变得更低。因此, 对超声速燃烧, 减少燃烧室长度, 强化燃料与空气的混合, 提高其混合和燃烧效率就成了关键问题。如何增强燃料与空气的混合和燃烧, 已有多种技术^[2], 本文仅讨论预旋燃料技术, 即预先给燃料施加旋涡运动, 再进行喷射, 从而强化混合。这种技术在亚、跨声速领域都已取得成功, 但对用于超声速领域, 观点各不相同^[3,4]。本文通过对超声速燃料预旋流场的数值模拟, 结合旋涡运动的理论分析来阐述这一问题。

* 收稿日期: 19961116, 修回日期: 19970120, 本课题属国家自然科学基金资助项目

2 控制方程、化学反应模型和数值方法

2.1 控制方程

由于考虑的是 H_2/O_2 燃烧问题, 故采用非平衡化学反应及包含各组元方程的完全 N-S 控制方程。在任意坐标系 (τ, ξ, η, ζ) 下, 无量纲化的 N-S 方程可写成如下守恒形式:

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} \right) + \hat{S}$$

无量纲化的气体状态方程为:

$$p = \rho \bar{R} T, \quad \bar{R} = \beta_1 \sum (f_i / M_i)$$

这里, $\beta_1 = R_0 T_\infty / V_\infty^2 \bar{M}_\infty$, $\beta_2 = k_\infty T_\infty / \mu_\infty V_\infty^2$, $\beta_3 = \rho_\infty D_\infty / \mu_\infty$ 和 $Re = \rho_\infty V_\infty L / \mu_\infty$ 为四个无量纲参数。上述方程组及表达式中各量所代表的物理意义及相应的无量纲值同文献 [5]。

2.2 化学反应模型

采用由 Moretti^[6] 提出的 7 组元 (H_2 , O_2 , N_2 , H_2O , O , H , OH), 8 反应模型 (具体反应式略)。大量的数值试验表明^[7], 上述化学反应模型在模拟 H_2/O_2 燃烧这类非平衡流流动时是合适的。至于扩散系数的取法可参见文献 [5]。

2.3 边界条件

物面上采取无滑移条件 ($u=v=w=0$), 假设物面为绝热 ($\frac{\partial T}{\partial n}|_w=0$) 和完全无催化的 ($\frac{\partial f_i}{\partial n}|_w=0$); 出口边界采取一阶外推。

2.4 数值方法

为加速计算收敛速度, 以 ENN 格式为基础, 采用了张涵信建议的混合通量分裂法, 从而大大简化隐式计算量。另外, 采用点隐式方法来克服因化学生成源项的出现而引起的刚性方程求解的困难, 略去中间的推导过程 (详见文献 [5]), 可得到如下的计算格式:

$$(N - \Delta \tau \cdot D_{ijk}^n) \delta \hat{U}_{ijk}^{n+1} - \frac{\Delta \tau}{\Delta \xi} \hat{A}_{i-1,jk}^{+n} \delta \hat{U}_{i-1,jk}^{n+1} - \frac{\Delta \tau}{\Delta \eta} \hat{B}_{ij,k-1}^{+n} \delta \hat{U}_{ij,k-1}^{n+1} - \frac{\Delta \tau}{\Delta \zeta} \hat{C}_{ijk-1}^{+n} \delta \hat{U}_{ijk-1}^{n+1} = -\Delta \tau \cdot (RHS)_{ijk}^n$$

$$N \cdot \delta \hat{U}_{ijk}^{n+1} + \frac{\Delta \tau}{\Delta \xi} \hat{A}_{i+1,jk}^{-n} \delta \hat{U}_{i+1,jk}^{n+1} + \frac{\Delta \tau}{\Delta \eta} \hat{B}_{ij,k+1}^{-n} \delta \hat{U}_{ij,k+1}^{n+1} + \frac{\Delta \tau}{\Delta \zeta} \hat{C}_{ijk+1}^{-n} \delta \hat{U}_{ijk+1}^{n+1} = N \cdot \delta \hat{U}_{ijk}^{n+1}$$

在计算 RHS 时, 对流部分采用 Steger 分裂的显式 ENN 格式, 粘性项采用二阶中心格式计算。

3 数值结果和分析

以扩张圆管内的旋涡运动研究了这一强化技术。设管进口半径为 R , 管长 $4R$, 出口半径 $2R$, 管壁母线为直线。来流条件为: $T_\infty = 2000K$, $p_\infty = 10^5 Pa$, 半径小于 $R/2$ 范围内介质为作旋转运动的氧气, 其余区域为不旋转的氢气, 采用图 1 所示的无量纲柱坐标 x, r , 这里 R 为无量纲坐标的参考量, 进口速度剖面按照 Burgers 旋涡的速度分布给出, 具体形式如下:

$$0 \leq r \leq 0.5, \quad \begin{cases} u_\theta = \frac{4}{r}(1 - e^{-r^2}) \\ u_r = 0 \\ u = e^{-r^2} \end{cases} \quad (\text{氧气介质}); \quad r > 0.5, \quad \begin{cases} u_\theta = 0 \\ u_r = 0 \\ u = 4e^{-r^2} \end{cases} \quad (\text{氢气介质})。$$

式中 u , u_r 和 u_θ 是轴向、径向和周向的速度分量。再设进口处轴上的马赫数为 2, 雷诺数 $Re = 4.25 \times 10^4$ (以氧气介质物理量为特征量), 计算网格见图 2, 网格数为 $23 \times 23 \times 39$ (流向 $\times$ 法向 $\times$ 周向)。

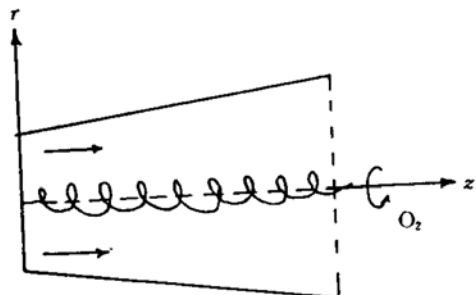


Fig. 1 Schematic of pre-swirling flowfield

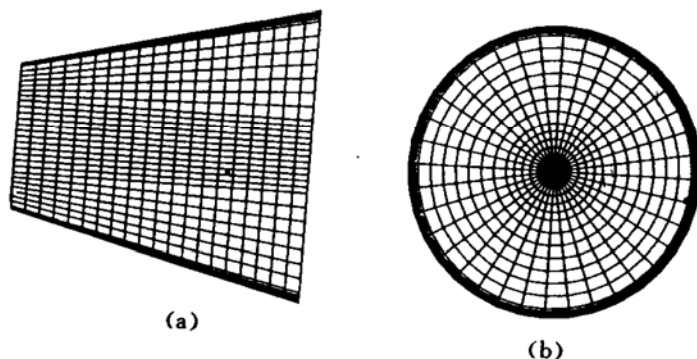


Fig. 2 Computational grid

(a) Longitudinal grid (b) Cross grid

按张涵信^[8]的旋涡沿其轴向演变的理论, 当超声速旋涡在顺压区时, 其涡轴附近的流动是向外转的。如果轴向速度为超声速且作旋涡运动的氧气气流是处于顺压区, 则当它向前运动时将不断向外旋转扩张, 于是就加强了和周围不旋转的氢气的混合。我们选择扩张管道的目的就是希望管内的流动处于顺压, 但是由于两股超声速气流的相互作用, 在流场中会产生激波, 随之出现一个逆压区, 即实际上在顺压区之间要夹着一个反压区。尽管如此, 我们推测还是有可能达到提高燃烧效率的目的。有关旋涡运动性质的描述, 可参见文献 [9], 本文只对其中的混合及燃烧效率问题进行讨论。

图 3 为中心纵向剖面上的等组分线图。对应不旋转状态, 由于流场中不存在的旋转运动, 等值线一律向下流散开; 而对有预旋情形, 在顺压区, 等值线向外散开, 而在逆压区, 又向内收拢, 与在文献 [9] 中叙述的横截面流线形态是一致的。比较各组分的变化区域, 不难发现, 有预旋时, 两种介质的混合区更宽, 燃烧更充分。有旋转时各组分剧烈变化的区域散的比较开, 相互间的混掺区域比较大 (不象无旋情况, 主要限于两种介质的接触面附近), 从而扩大了反应区域, 起到了提高燃烧效率的作用。

为了进一步考察预旋对反应程度的影响, 对物理量作一比较。图 4 为在 $z/R=2.0$ 的剖面上, 沿 r 方向 O_2 , H_2 , H_2O 三种组分的分布。从中不难得到, 当有预旋时 ($m \neq 0$), 在同一 r 位置上, O_2 和 H_2 的值较小, 表明它们因燃烧而消耗的比较厉害, 相应的 H_2O 分子的值就比较大, 其曲线相对来说要饱满些, 因而就反应程度 (即燃烧程度) 而言, 有预旋比无预旋要剧烈。再分析图 5 中表示燃烧效率 (定义为给定剖面上变成原子或离子形态的氢的摩尔数占氢总摩尔数的百分比) 沿轴向分布的曲线可以看出, 在旋转强时相应的燃烧效率就高, 这再次说明预旋燃料方式是一种比较有效的混合强化技术。

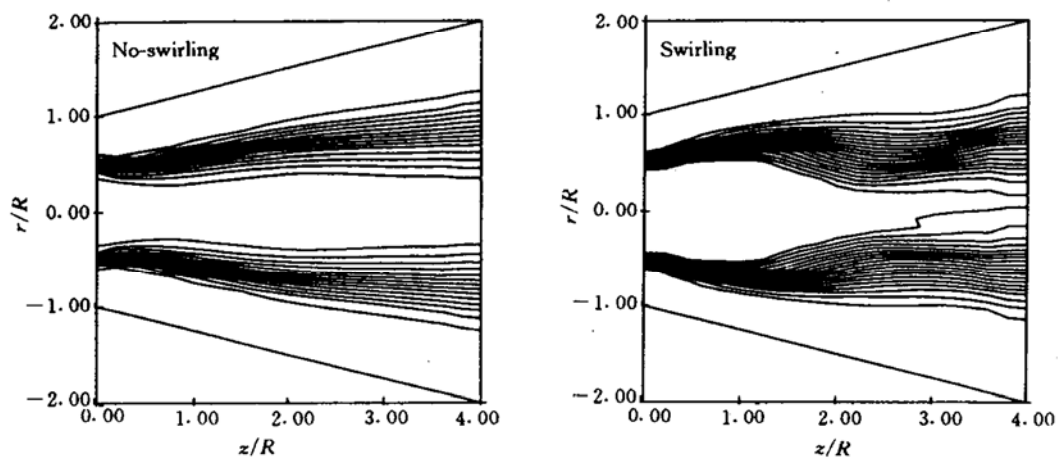


Fig. 3 (a) Iso-mass fraction (O_2) contours at middle longitudinal section

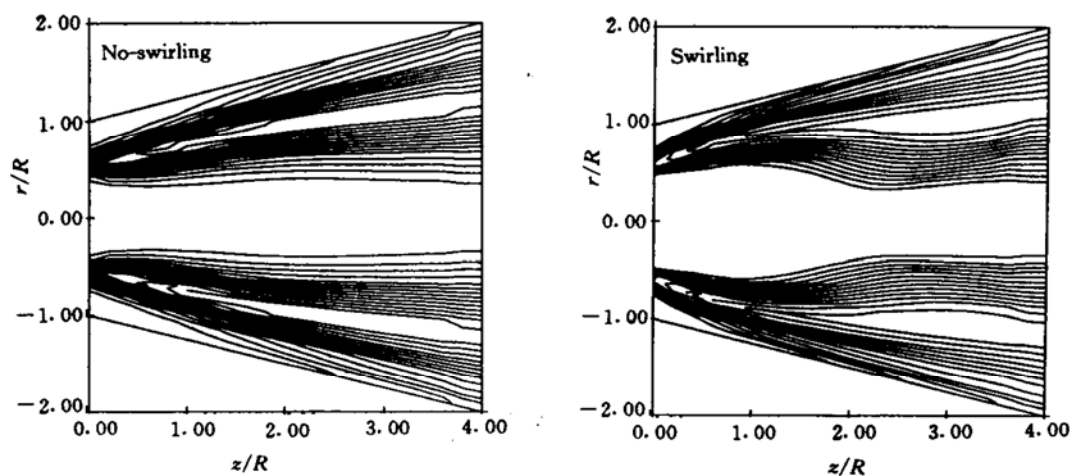


Fig. 3 (b) Iso-mass fraction (H_2O) contours at middle longitudinal section

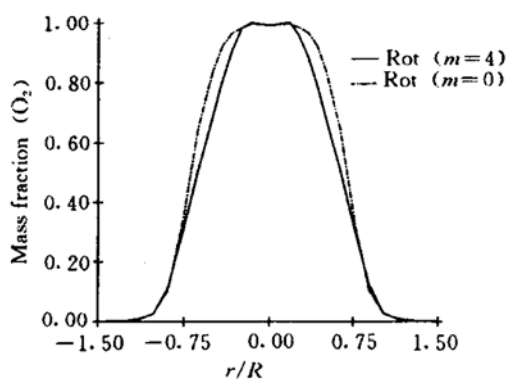


Fig. 4 (a) Mass fraction (O_2) distribution along radial direction ($z/R=2.0$)

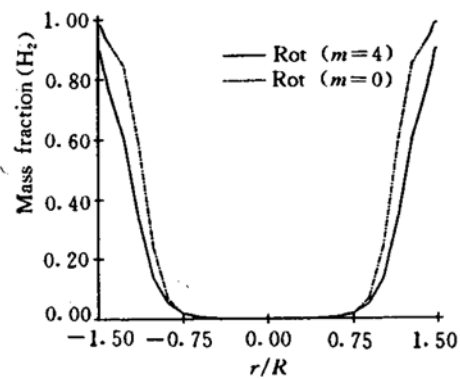


Fig. 4 (b) Mass fraction (H_2) distribution along radial direction ($z/R=2.0$)

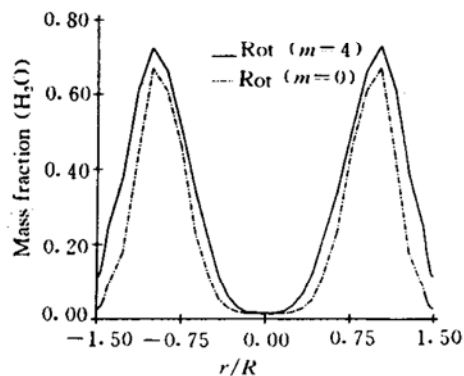


Fig. 4 (c) Mass fraction (H_2O) distribution along radial direction ($z/R=2.0$)

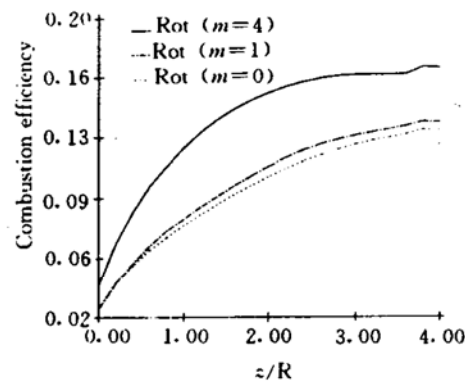


Fig. 5 Axial distribution of combustion efficiency

参 考 文 献

- 1 Fujimori T, Kawai M. Numerical predication of two and three dimensional sonic gas transverse injections into supersonic flow. AIAA 96-0159
- 2 胡欲立, 刘 陵. 超音速混合及燃烧的强化技术. 推进技术, 1994(5): 23~27
- 3 Gutmark E. Noncircular jet dynamics in supersonic combustion. J of Propulsion and Power, 1989, 5(5): 529~533
- 4 Naughton J. An experimental study of the effect of streamwise vorticity on supersonic mixing enhancement. AIAA 89-2456
- 5 陈坚强. 超声速燃烧流动和旋涡运动的数值模拟: [学位论文]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 1995
- 6 Moretti G. A new technique for the numerical analysis of nonequilibrium flows. AIAA J, 1965, 3(2): 223~229
- 7 张涵信, 陈坚强, 高树椿. H_2/O_2 燃烧的超声速非平衡流动的数值模拟. 宇航学报, 1994, 15(2): 14~23
- 8 张涵信. 亚、超声速旋涡流动特征的定性分析研究. 空气动力学学报, 1995, 13(3): 259~264
- 9 陈坚强, 张涵信. 管道中超声速旋涡运动的数值模拟. 空气动力学学报, 1996, 14(3)