

旋流燃烧室内多组分气体湍流混合的数值模拟^{*}

张 健, 魏 星

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 为合理地描述旋流条件下组分质量的湍流输运, 将考虑湍流-旋流相互作用的新代数质量流通量模型与新代数 Reynolds 应力模型结合, 构成了新代数应力/质量流通量模型。应用该模型对旋流燃烧室内两股不同组分射流的相互作用与湍流混合进行了数值模拟, 得到了与实验相符合的气体轴向与切向速度、轴向与切向脉动速度均方根值和氢气浓度分布。模拟结果与 $k-\varepsilon$ 模型的结果进行了对比。

关键词: 湍流混合; 燃烧室; 旋流; 数值仿真

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2009) 05-0528-05

Numerical simulation of turbulent mixing of multi-species gas in a swirl combustor

ZHANG Jian, WEI Xing

(School of Aerospace, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract For describing turbulent transport in swirling flows, a new algebraic turbulent mass flux model (AFM) accounting for swirl-turbulence interactions is incorporated with the new algebraic Reynolds stress model (ASM). It forms a new algebraic stress/flux model (ASM/AFM). The new ASM/AFM is applied to the simulation of turbulent mixing and interactions of two multi-species jets in a swirl combustor. The calculated distributions of gas axial and tangential velocities, axial and tangential fluctuating velocities, and helium concentration are in agreement with the measured test data. These results are compared with that obtained by the $k-\varepsilon$ model.

Key words Turbulent mixing; Combustor; Swirl flow; Numerical simulation

1 引 言

旋流燃烧较广泛地应用于各种热动力工程装置和推进系统中, 利用旋流可以达到强化传热传质, 提高燃烧与反应效率, 降低污染物排放等目的。已有的实验表明, 旋流对于燃烧反应装置内化学组分的迁移与扩散具有显著的影响。旋流对于燃烧室内两股或多股射流的相互作用和湍流混合也有显著的作用, 有些情况下可以提高混合, 而有些情况下则会抑制混合。因此研究旋流条件下组分质量的湍流输运规律对于发展高效低污染旋流燃烧技术具有重要的工程应用意义。

为定量预测旋流流动中多组分流体的湍流扩散与混合, 文献中已建立或应用了多种描述旋流条件下湍流质量输运的理论模型, 其中包括 $k-\varepsilon$ 模型和 Reynolds 应力/标量通量输运方程模型等^[1,2]。 $k-\varepsilon$ 模型未能合理地考虑湍流-旋流的相互作用, 对旋流条件下多组分气体湍流扩散与混合的预报与实验符合得不好。Reynolds 应力/标量通量输运方程模型的计算要优于 $k-\varepsilon$ 模型, 可得到与实验相符合的结果。但当需求解的组分方程数为 s 时, 该模型涉及的偏微分方程数目比 $k-\varepsilon$ 模型多 $3s+5$ 个, 计算量很大。

考虑湍流-旋流相互作用的新代数 Reynolds 应力模型^[3]已在旋流燃烧室内湍流流动的模拟中得到了

* 收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-11-26。

基金项目: 国家自然科学基金 (50576044)。

作者简介: 张 健 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究领域为湍流多相流动与燃烧。

E-mail: jianzhang@mails.tsinghua.edu.cn

应用,取得了与实验相符合的结果^[4-5]。本文以此模型为基础,进一步发展了考虑湍流-旋流相互作用的新代数湍流质量流通量模型。将新代数质量流通量模型与新代数 Reynolds 应力模型相结合,构成新代数应力-质量流通量模型。应用该模型对旋流燃烧室内两股不同组分射流的相互作用与湍流混合进行了数值模拟,并将模拟结果与文献中的实验数据进行了对比。

2 数学模型和计算方法

2.1 数学模型

从轴对称圆柱坐标系中的标量通量输运方程模型出发,将其转化为关于湍流质量流通量的代数方程。在转化过程中,不仅保留输运方程中的压力-标量梯度项和产生项,也保留其中与旋流有关非梯度对流输运项,而对扩散项和梯度型对流项则采用 Rodi 平衡近似^[6]进行简化,由此可得到新代数质量流通量模型的表达式。对于本文所研究的旋流燃烧室内的多组分气体湍流流动与混合,在大部分区域满足 $\alpha \gg \epsilon$, $w \gg v$ 和 $\partial/\partial r \gg \partial/\partial x$ 的条件,于是可将新代数质量流通量模型进一步简化为下述的显式表达式

$$\overline{v'Y_s'} = -D_{t,r} \frac{\partial \overline{Y_s}}{\partial r} \quad (1)$$

$$\overline{u'Y_s'} = -\frac{k}{C_{1\phi}} \left[\frac{\partial \overline{Y_s}}{\partial x} \overline{u'^2} + \frac{\partial \overline{Y_s}}{\partial r} \overline{u'v'} + \left(1 - C_{2\phi} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \overline{v'Y_s'} \right] \quad (2)$$

$$\overline{w'Y_s'} = -\frac{k}{C_{1\phi}} \left[\frac{\partial \overline{Y_s}}{\partial r} \overline{v'w'} + \left(1 - C_{2\phi} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \overline{v'Y_s'} + \alpha \frac{w}{r} \overline{v'Y_s'} \right] \quad (3)$$

式中 x 和 r 分别为轴向和径向坐标, α , ϵ , w 和 u' , v' , w' 分别为气体轴向、径向、切向平均和脉动速度, $\overline{Y_s}$ 和 $\overline{Y_s'}$ 分别为气体组分的平均和脉动质量分数, k 和 ϵ 分别为气体湍能和湍能耗散率。式(1)中径向湍流扩散系数 $D_{t,r}$ 的表达式为

$$D_{t,r} = \frac{\left| \frac{k}{C_{1\phi}} \overline{v'^2} + \alpha \overline{v'w'} \right|}{1 + ab} \quad (4)$$

式中

$$a = \left| 1 - C_{2\phi} + d \frac{w}{r} \right| \left| \frac{k}{C_{1\phi}} \right|^2 \quad (5)$$

$$b = \left| 1 - C_{2\phi} \right| \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + \alpha \frac{w}{r} \quad (6)$$

以上各式中, α , $C_{1\phi}$ 和 $C_{2\phi}$ 为模型常数。若给定 Reynolds 应力的各分量,则按式(1)~(6)可依次求出湍流质量流通量的各分量。由于简化形式的新代数应力模型给出的也是各应力分量的显式表达式^[3],因此将二者结合得到的简化形式的新代数应力-质量流通量模型给出了 Reynolds 应力和湍流质量流通量各分量的显式代数表达式。

对建立在轴对称圆柱坐标系中的湍流旋流流动与多组分混合的平均控制方程组采用上述简化形式的新代数应力-质量流通量模型进行封闭。由此导出的控制方程包括连续、轴向、径向与切向动量、湍能、湍能耗散率和组分质量分数方程。略去各一阶矩上的平均号“—”,这些方程均可表示成如下的通用形式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \Phi \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho v \Phi \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_{\Phi x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Gamma_{\Phi r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right] + S_{\Phi} \quad (7)$$

式中 Φ , $\Gamma_{\Phi x}$, $\Gamma_{\Phi r}$ 和 S_{Φ} 分别代表通用变量、轴向与径向通用扩散系数及通用源项。

2.2 数值解法与计算工况

对湍流旋流流动与多组分混合的控制方程组采用有限容积法^[7]数值求解。使用交错网格系,除速度分量 u 和 v 定义在交错网格节点上,其余变量均定义在主节点上。在对各控制方程的离散化中,对对流项与扩散项采用混合格式,对源项进行负斜率线性化。各变量的离散化方程组采用逐线扫描的 TDMA 亚松驰迭代法求解,压力-速度的耦合迭代采用 SIMPLE 算法^[7]。

本文模拟的对象为进口处有中心射流与环形旋流射流的旋流燃烧室。如图 1 所示,空气经放置在环形通道的旋流器进入燃烧室内,氢气和空气的混合气由中心管喷入燃烧室内。燃烧室长度为 0.76 m,直径为 0.125 m。中心管直径(D_j)为 8.73 mm,环形通道内径为 0.053 m,旋流器叶片的角度为 66°。计算选取与文献[8-9]一组实验工况相同的参数。环形进口处空气射流的轴向与切向速度按实验条件取为均匀分布,分别为 8.3 m/s 和 18.6 m/s。中心进口处氢气与空气混合气射流的轴向速度取为 36.5 m/s,氢气质量分数为 0.554。环形与中心进口处的气体径向速度均为 0。

数值计算的求解域按轴对称性取为旋流燃烧室的半个纵向截面。采用不均匀网格划分,沿燃烧室轴

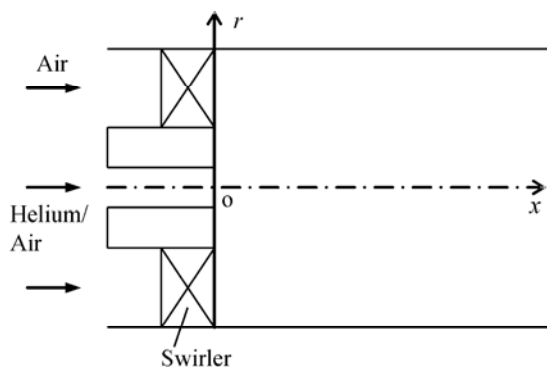


Fig 1 Swirl combustor

向和径向分别布置了 85 个和 24 个节点。为便于与实验数据对比,在实验测量截面处布置了轴向网格节点。在变量变化较为剧烈的区域,如进口、壁面和轴线附近节点布置得较密,沿径向比沿轴向节点布置得相对较密。网格的划分应使得两相邻节点的间距随 x 或 r 呈单调上升或下降的变化趋势,这样有助于迭代计算的收敛。

3 结果与讨论

计算中除采用新代数应力/质量流量模型外,还同时使用 $k-\varepsilon$ 模型进行了对比计算。图 2~图 8 给出了新代数应力/质量流量模型和 $k-\varepsilon$ 模型得到的计算结果及其与文献 [8~9] 实验数据的比较。

图 2 为氦气体积分数在五个不同截面处沿径向分布的计算结果与文献 [9] 实验值的比较。可以看到,新代数应力/质量流量模型的结果与实验相符合,表明氦气一直富集在轴线附近,沿径向的扩散较慢。而 $k-\varepsilon$ 模型的结果则与实验符合不好,得到的氦气浓度在下游截面处较快地趋于均匀。这说明对于旋流条件下组分浓度分布的预报,新代数应力/质量

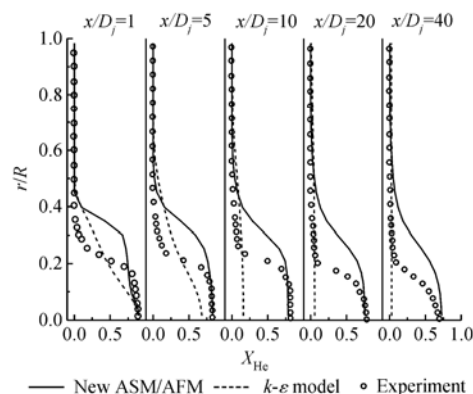


Fig 2 Comparison of calculated helium volume fraction with measured data

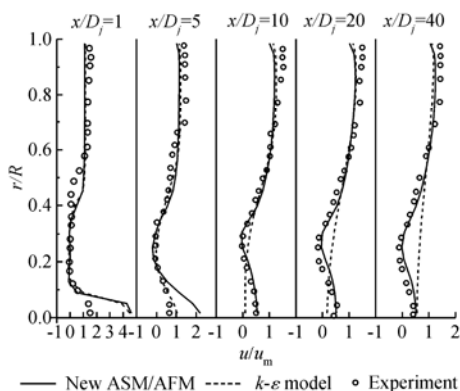


Fig 3 Comparison of calculated gas axial velocity with measured data

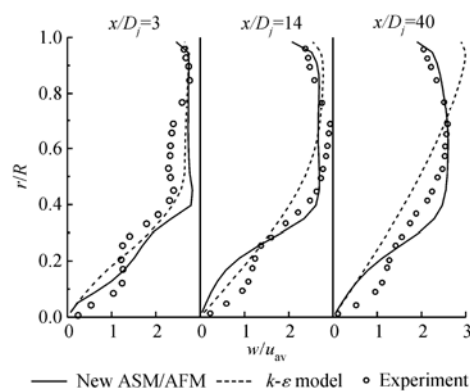


Fig 4 Comparison of calculated gas tangential velocity with measured data

流量模型要明显优于 $k-\varepsilon$ 模型。但在 $r/R = 0.2 \sim 0.4$ 处,新代数应力/质量流量模型的预报结果与实验仍有偏差,前者一般要大于后者。这可能与燃烧室的进口条件近似取为均匀分布有关,同时也说明需要对新代数质量流量模型作进一步的改进。

图 3 为气体轴向速度在五个不同截面处沿径向分布计算结果与文献 [9] 实验值的比较。图中的轴向速度均采用计算和实验各自得到的各截面上的平均轴向速度 (u_m) 进行了无量纲化。可以看到,新代数应力/质量流量模型的结果与实验相符合,在靠近下游的三个截面上,计算值几乎与实验值相一致。该模型预报出了燃烧室内的环状回流区。但在 $x/D_j = 1$ 和 5 截面的中心区域即 $r/R < 0.1$ 处,计算得到的轴向速度则比实验偏大,这与在进口处将各变量取为均匀分布有关。 $k-\varepsilon$ 模型对气体轴向速度的计算在靠近下游的截面上与实验值符合得不好,未能预报出环状回流区。

图 4 为气体切向速度在三个不同截面处沿径向分布的计算结果与文献 [8] 实验的比较。图中的切向速度采用旋流器上游处的空气平均轴向速度 $u_{av} = 6.8 \text{ m/s}$ 进行了无量纲化。可以看到,新代数应力/质量流量模型的计算结果与实验相符合,预报出了切向速度的 Rankine 涡结构。而 $k-\varepsilon$ 模型的计算与实验尚有差异,未能预报出切向速度的 Rankine 涡结构。

图 5 为气体轴向脉动速度均方根值在五个不同截面处沿径向分布的计算结果与文献 [9] 实验值的比较。可以看到,新代数应力/质量流量模型的结果与实验相符合,仅在靠近进口处的中心区域与实验有一定的偏差。 $k-\varepsilon$ 模型预报的轴向脉动速度在靠近下游的截面处比实验值明显偏大,高估了轴向速度

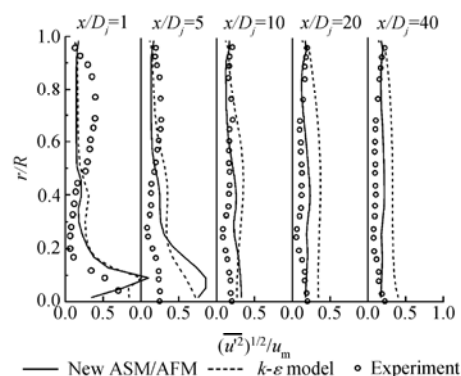


Fig 5 Comparison of calculated gas axial fluctuating velocity with measured data

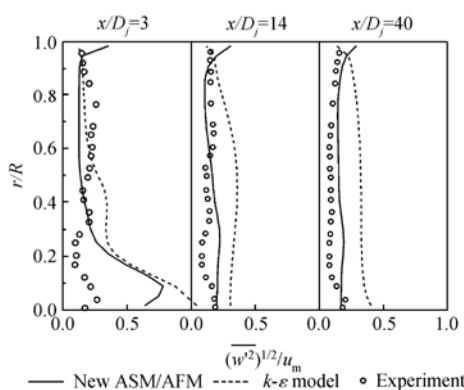


Fig 6 Comparison of calculated gas tangential fluctuating velocity with measured data

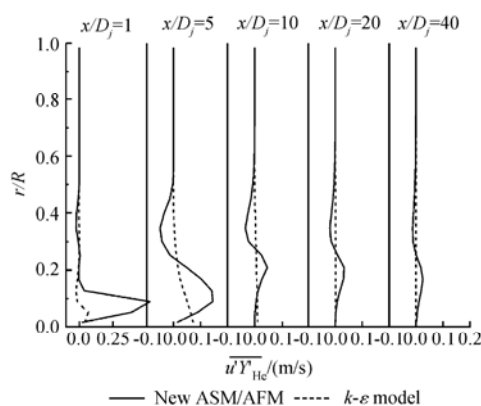


Fig 7 Calculated axial turbulent mass flux for helium

的湍流脉动。

图 6 为气体切向脉动速度均方根值在三个不同截面处沿径向分布的计算结果与文献 [8] 实验值的比较。新代数应力/质量流量模型的模拟结果与实验值相符合, 仅在上游截面的中心区域与实验有一定的偏差。比较图 6 和图 5 可以看出, 该模型预报出了旋流条件下湍流脉动的各向异性。 $k-\varepsilon$ 模型的预报结果则比实验偏大, 且无法反映出湍流脉动的各向异性。

图 7 给出氦气轴向湍流质量流量分布的计算结果。可以看到, 新代数应力/质量流量模型计算出的轴向湍流质量流量在各截面上一直保持着—个峰值和低谷值, 这个峰值约位于靠近轴线的 $r/R = 0.2$ 处, 而此处的氦气浓度梯度恰好较大。 $k-\varepsilon$ 模型计算得到的轴向湍流质量流量仅在上游截面处有一定的数值, 在靠近下游的截面上则已趋近于 0。

图 8 给出氦气径向湍流质量流量分布的计算结果。可以看到, 在上游截面处, $k-\varepsilon$ 模型要大于新代数应力/质量流量模型的计算结果。在靠近下游的截面上, 新代数应力/质量流量模型计算出的径向湍流质量流量的峰值出现在 r/R 约为 0.2 处, 即出现在氦气浓度梯度较大的区域。而 $k-\varepsilon$ 模型的计算结果则在 $r/R = 0.5 \sim 0.8$ 处有一个峰值。

4 结 论

(1) 对旋流燃烧室内氦气/空气直流射流与空气旋转射流的相互作用与湍流混合的数值模拟结果表明, 采用新代数应力/质量流量模型可预报出与实验相符合的气体轴向与切向速度、轴向与切向脉动速度均方根值和氦气浓度分布。

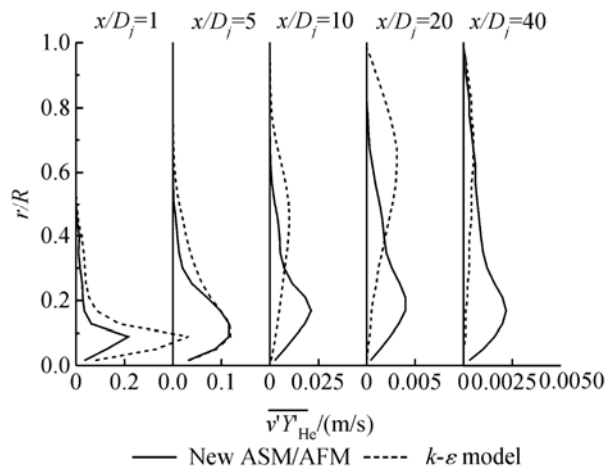


Fig 8 Calculated radial turbulent mass flux for helium

(2) 新代数应力/质量流量模型比 $k-\varepsilon$ 模型的模拟结果有较明显的改进。采用后者预报的气体轴向与切向速度和氦气浓度分布均与实验有一定的偏差, 预报的轴向与切向脉动速度均方根值则均比实验值偏大。

(3) 新代数应力/质量流量模型预报的轴向与径向湍流质量流量在各截面靠近轴线处均有峰值出现。而 $k-\varepsilon$ 模型预报的轴向湍流质量流量在下游截面处均趋近于零, 预报的径向湍流质量流量的峰值在下游截面处则移向近壁区域。

参考文献:

- [1] Hirai S, Takagi T, Higashiya T. Numerical prediction of flow characteristics and retardation of mixing in a swirling flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(1): 121~130
- [2] Hogg S, Leschziner M A. Second-moment-closure calcu-

- lation of strongly swirling confined flow with large density gradients [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1989, 10(1): 16~ 27.
- [3] Zhang J Nieh S Zhou L X. A new version of algebraic stress model for simulating strongly swirling turbulent flows [J]. *Numerical Heat Transfer B*, 1992, 22(1): 49 ~ 62
- [4] Lei Y, Zhang J Zhou L X. Simulation of swirling turbulent flows of coaxial jets in a combustor [J]. *Numerical Heat Transfer A*, 2000, 37(2): 189~ 199
- [5] Zhang J Lei Y, Zhou L X. Simulation of coaxial jet interaction in a swirl combustor [J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176(1): 23~ 43
- [6] Rodi W. A new algebraic relation for calculating the Reynolds stresses [J]. *Z Angew Math Mech*, 1976, 56(2): 219~ 221
- [7] Patankar S V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* [M]. Washington DC: Hemisphere, 1980
- [8] Ahmed S A, So R M C, Mongia H C. Density effects on jet characteristics in confined swirling flow [J]. *Experiments in Fluids*, 1985, 3(4): 231~ 238
- [9] Ahmed S A, So R M C. Concentration distributions in a model combustor [J]. *Experiments in Fluids*, 1986, 4(2): 107~ 113

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 517 页)

- [4] 范学军, 俞 刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析 [J]. 推进技术, 2006, 27(2). (FAN Xue-jun, YU Gang Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2).)
- [5] 范学军, 俞 刚. 超临界煤油超声速燃烧特性实验 [J]. 推进技术, 2006, 27(1). (FAN Xue-jun, YU Gang Experiments on supersonic combustion of supercritical kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(1).)
- [6] Fan X J Yu G, Li J G, et al Investigation of vaporized kerosene injection and combustion in a supersonic model combustor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(1).
- [7] Gordon S M McBride B. Computer Program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications [R]. NASA 1994-1311.
- [8] Ely J F, Huber M L. NIST standard reference database 4- NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures [R]. *National Inst of Standards Gaithersburg, MD*, 1990
- [9] Yu G, Li J G, Zhang X Y, et al Experimental investigation of flameholding mechanism and combustion performance in hydrogen-fueled supersonic combustors [J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(10).
- [10] 俞 刚, 李建国, 赵 震, 等. 超声速模型燃烧室中气化煤油喷注研究 [J]. 推进技术, 2005, 26(2). (YU Gang LI Jian-guo ZHAO Zhen et al Investigation of vaporized kerosene injection in a supersonic model combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(2).)
- [11] Heiser W H, Pratt D T. Hypersonic airbreathing propulsion [R]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, Washington, DC*, 1994
- [12] Eckert E R G. Engineering relations for heat transfer and friction in high-velocity laminar and turbulent boundary layer flow over surfaces with constant pressure and temperature [R]. *Transactions of the ASME*, 1956
- [13] Zhong F Q, Fan X J Yu G, et al Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [R]. *AAA 2008-4615*

(编辑: 梅 瑛)