

文章编号: 1000-8055(2005)01-0086-06

模型燃烧室紊流燃烧的大涡模拟

颜应文, 赵坚行

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用了两种不同的亚网格尺度燃烧模型对带 V 型稳定器的模型燃烧室紊流化学反应流动进行了大涡模拟, 用 $k-\epsilon$ 方程亚网格尺度模型确定亚网格紊流粘性, 为了考虑热辐射对燃烧室壁温和气流温度的影响, 运用热流法辐射模型估算热辐射通量, 用 SM PL E 算法和混合差分求解大涡模拟各守恒方程, 通过对两种不同亚网格尺度燃烧模型数值模拟结果与实验值的比较表明, 两种燃烧模型都与实验值较吻合, 但 G 方程小火焰模型要比亚网格 EBU 燃烧模型符合得更好些。

关键词: 航空、航天推进系统; 亚网格尺度燃烧模型; 大涡模拟; G 方程小火焰模型; V 型稳定器; 紊流化学反应流

中图分类号: V 231. 2

文献标识码: A

Large-Eddy Simulation of Turbulent Combustion in A Model Combustor

YAN Ying-wen, ZHAO Jian-xing

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Two different subgrid-scale combustion models were used for the Large-Eddy Simulation (LES) of turbulent chemical reaction flows in a model combustor with V-gutter flame holder. The subgrid eddy viscosity was determined by using $k-\epsilon$ -equation subgrid-scale (KSGS) model. To take into account the influence of heat radiation on wall temperature and gas temperature distributions, heat flux model was applied to predict heat flux distributions. The LES equations were solved with SM PL E algorithm and hybrid scheme. Comparison of numerical results with experimental data shows that the two different subgrid-scale combustion models can all be used to simulate the combustion, but the G-equation flamelet model is better than the EBU subgrid combustion model. These results provide confidence that the LES may lead to a better understanding of the combustion process.

Key words: aerospace propulsion system; subgrid-scale combustion model; Large-Eddy Simulation (LES); G-equation flamelet model; V-gutter flame holder; turbulent chemical reaction flow

收稿日期: 2004-03-22; 修订日期: 2004-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176017)

作者简介: 颜应文(1978-), 男, 湖南衡阳人, 南京航空航天大学能源与动力学院, 博士, 主要从事航空发动机燃烧研究

随着计算机计算能力的加强, 近年来数值模拟蓬勃发展, 要想完全了解紊流燃烧过程, 最根本的方法就是直接数值模拟(DNS), 但是目前计算机性能使得DNS 还不能应用于各种实际工程问题。而大涡模拟(L ES)以其准确性和可以接受的计算量已经成为模拟流场的一种具有一定应用前景的数值计算方法^[1]。本文通过采用两种不同的亚网格尺度燃烧模型即: G 方程小火焰模型和亚网格 EBU 燃烧模型, 来研究带V 型稳定器的燃烧室热态流场, 并把数值模拟的结果与实验结果进行了比较, 通过比较可知, G 方程小火焰模型能

模拟出燃烧室中火焰面上火焰的褶皱以及整个流场里的强烈紊流波动, 而亚网格 EBU 燃烧模型模拟的火焰表面比较光滑, 因此 G 方程小火焰模型模拟火焰面更符合实际情况, 适合于燃烧室中紊流燃烧流场的数值模拟。

1 大涡模拟控制方程

本文利用大涡模拟分析紊流反应流, 并通过梯度 Φ 扩散模型模化亚网格各相关项使LES 方程封闭。在直角坐标系下, 经过滤波函数滤波后的控制方程为^[1~4]:

连续方程:
$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:
$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial [\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_i + \bar{P} \delta_{ij} - \bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^{sgs}]}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

能量方程:
$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial [(\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{P}) \tilde{u}_i + \bar{q}_i - \tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} + H_i^{sgs}]}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

组分方程:
$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{y}_m}{\partial t} + \frac{\partial [\bar{\rho} \tilde{y}_m \tilde{u}_i - \bar{\rho} D_m \frac{\partial \tilde{y}_m}{\partial x_i} + \Phi_{i,m}^{sgs}]}{\partial x_i} = \bar{w}_m \tag{4}$$

式中各项可分别为:

粘性应力张量:
$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad ,$$

热通量张量:
$$\bar{q}_i = - K \partial \tilde{T} / \partial x_i \quad ,$$

亚网格应力张量:
$$\tau_{ij}^{sgs} = \bar{\rho} [u_i u_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j] \quad ,$$

亚网格热通量:
$$H_i^{sgs} = \bar{\rho} [E u_i - \tilde{E} \tilde{u}_i] + [\bar{P} u_i - \bar{P} \tilde{u}_i] \quad ,$$

组分对流量:
$$\Phi_{i,m}^{sgs} = \bar{\rho} [u_i y_m - \tilde{u}_i \tilde{y}_m]$$

为了确定亚网格应力张量 τ_{ij}^{sgs} , 可利用作为特征长度尺度的局部网格尺寸 Δ 和亚网格动能 k^{sgs} , 亚网格动能 $k^{sgs} = [u_k^2 - \tilde{u}_k^2] / 2$ 可从下式中求得^[1]:

$$\frac{\partial \bar{\rho} k^{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i k^{sgs})}{\partial x_i} = P^{sgs} - D^{sgs} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i P_{r_t} \partial k^{sgs} / \partial x_i)}{\partial x_i} \tag{5}$$

式中: P_{r_t} 为紊流 Prandtl 数, 可取为 0.9, 亚网格紊流强度与 k^{sgs} 关系为 $u'_{sgs} = \sqrt{2k^{sgs}/3}$, P^{sgs} 和 D^{sgs} 分别为亚网格动能方程中产生项与耗散项:

$$P^{sgs} = - \tau_{ij}^{sgs} \partial \tilde{u}_i / \partial x_j$$

$$D^{sgs} = C_\epsilon \bar{\rho} (k^{sgs})^{3/2} / \Delta$$

亚网格紊流粘性系数 $\nu_t = C_\nu (k^{sgs})^{1/2} \Delta$, C_ν 和 C_ϵ 为常数, 分别取为 0.2 和 0.916, 亚网格应力张量 τ_{ij}^{sgs} 模化后为:

$$\tau_{ij}^{sgs} = - 2 \bar{\rho} \nu_t (\tilde{S}_{ij} - 1/3 \tilde{S}_{kk} \delta_{ij}) + 2/3 \bar{\rho} k^{sgs} \delta_{ij}$$

可解尺度应变率张量:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{\partial \tilde{u}_i / \partial x_j + \partial \tilde{u}_j / \partial x_i}{2}$$

亚网格热通量 H_i^{sgs} 可按梯度- 扩散假设给出:

$$H_i^{sgs} = - \bar{\rho} \nu_t / P_{r_t} \partial \tilde{h} / \partial x_i$$

式中, $\tilde{h}$ 为单位质量可解尺度混合气体总焓:

$$\tilde{h} = \tilde{E} + \bar{P} / \bar{\rho}$$

亚网格组分尺度速度脉动项可模化为:

$$\Phi_{i,m}^{sgs} = - \bar{\rho} \nu_t / S_{c_t} \partial \tilde{y}_m / \partial x_i$$

式中, S_{c_t} 为紊流 Schmidt 数, $S_{c_t} = P_{r_t} L_{e_m}$, 其中 L_{e_m} 为组分 m 的 Lewis 数。



2 亚网格燃烧模型^[1]

在紊流化学反应流中,只有在燃料和氧化剂分子相互混合情况下才能发生化学反应,而分子间混合主要在小气团中进行,本文分别采用亚网格 EBU 燃烧模型和 G 方程小火焰模型模拟小尺度涡旋燃烧。

2.1 亚网格 EBU 燃烧模型

可利用亚网格 EBU 模型求得式(4)中脉动反应速率 $\overline{w_m}$ 。由于化学反应速率取决于燃料和氧的混合,因此反应速率受控于混合速率。可假设常规的 EBU 模型中分子混合所需要的时间与一个亚网格涡团完全被耗散所需的时间相同,这样认为亚网格流体混合时间与亚网格紊流动能 k^{sgs} 和它的耗散率 ϵ^{sgs} 之比成正比^[2]:

$$\tau_{mix} \sim k^{sgs}/\epsilon^{sgs} \sim C_{EBU} \overline{\Delta}/\sqrt{2k^{sgs}} \quad (6)$$

这样,混合时间尺度反应率为:

$$\overline{w_{mix}} = \min([O_2]/2, [\text{燃料}])/\tau_{mix}$$

有效反应速率为:

$$\overline{w_{EBU}} = \min(\overline{w_{mix}}, \overline{w_{kin}})$$

其中, $\overline{w_{kin}}$ 为 Arrhenius 反应速率,尺度常数 $C_{EBU} = 1_0$ 。

2.2 G 方程小火焰模型

描述依靠对流传输和正常燃烧进行传播的薄层火焰模型方程称为 G 方程,用以速度 s_L 进行传播的标量 G 来模拟火焰传播,守恒形式为^[1]:

$$\partial \rho G / \partial t + \nabla \cdot \rho \vec{u} G = - \rho_0 s_L^0 |\nabla G|$$

式中, $G(x, t)$ 是定义火焰位置的过程变量, s_L^0 为局部层流火焰传播速度, $\vec{u}$ 为速度矢量,在流场中 G 值在 $[0, 1]$ 范围内变化,并规定在未燃烧区域 G 为 1,在已燃烧区域 G 为 0,在薄层火焰区域内 G 为 G_0 ,并令 $0 < G_0 < 1$,因此上式是描述 $G = G_0$ 情况,该时候在火焰表面流体流动速度与层流火焰

传播速度 s_L 达到动力平衡,此时火焰是稳定的。

经 Favre-L ES 滤波后, G 方程可写为^[3~7]:

$$\frac{\partial (\overline{\rho G})}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{\rho G u_i})}{\partial x_j} = - \overline{\rho_0 s_L^0 |\nabla G|} - \frac{\partial [\overline{\rho (u_i G - \tilde{u}_i \tilde{G})}]}{\partial x_j} \quad (7)$$

利用梯度假设封闭上式,其中:

源项:

$$G^{sgs} = \overline{\rho (u_i G - \tilde{u}_i \tilde{G})} \approx - \overline{\rho v_i / S_c^c} \nabla \tilde{G}$$

不可解尺度输运项源项:

$$S^{sgs} = \overline{\rho_0 s_L^0 |\nabla G|} = \rho_0 u_t |\nabla \tilde{G}|$$

紊流火焰速度 u_t 由式:

$$\frac{u_t}{s_L} = \left[1 + \beta \frac{u_{sgs}^2}{s_L^2} \right]^{0.5}$$

获得:

$$u_{sgs}^2 = \left[\frac{2k_{sgs}}{3} \right]^{0.5}$$

式中: ν_t 为涡团粘性, S_c^c 为紊流 Schmidt 数。

因此,上述方程可写为:

$$\frac{\partial (\overline{\rho G})}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{\rho G u_i})}{\partial x_j} = - S^{sgs} - \frac{\partial (G^{sgs})}{\partial x_j} \quad (8)$$

由式 $\tilde{h} = C_p \tilde{T} + \Delta h_f \tilde{G}$ 可得 $\tilde{T} = \frac{\tilde{h} - \Delta h_f \tilde{G}}{C_p}$,其

中: $\Delta h_f = C_p (T_p - T_f)$, T_p 为燃气温度, T_f 为燃油温度。按照 G 方程模型基本假设,认为火焰面很薄,因此无须求解组分方程,设组分变化与 G 成比例^[6,7],但实际上组分的改变不仅与 G 有关,还与温度有关,故在本计算中仍然求解组分方程,其中化学反应速率可由 Arrhenius 关系式确定。

3 数值模拟方法

3.1 控制方程的离散

本文的研究对象如图 1 所示的带 V 型稳定器的模型加力燃烧室,由于所示的区域截面对称

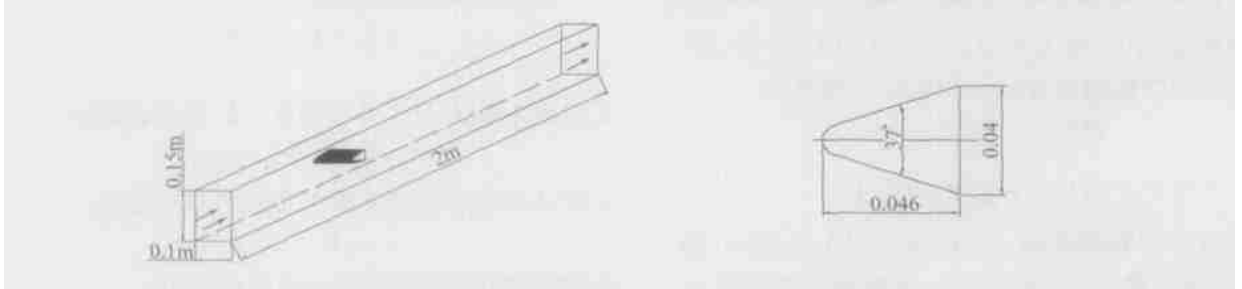


图 1 矩形燃烧室及 V 型稳定器示意图

Fig 1 Schematic of afterburner with V-gutter flame stabilizer

性, 本文取一个剖面进行二维热态流场计算。网格数为 $2\,000 \times 150$, 网格尺寸为 $\Delta x = \Delta y = 1.0 \times 10^{-3}\text{ m}$ 。在交错网格系统下, 采用控制容积法和混合差分格式对控制方程进行离散, 时间步长 $\Delta t = 0.005\text{ s}$, 应用 S M P L E 算法和 T D M A 进行逐线迭代, 求解 L E S 方程中各变量。

3.2 初始条件与边界条件

进口条件: 采用典型的 $1/7$ 指数函数进口速度分布作为初始条件; 法向速度为零。
出口条件: 采用 Sommerfeld 辐射无反射条件: $\partial \Phi / \partial t + U_{\text{out}} \partial \Phi / \partial y = 0$ 。其中 U_{out} 表示出口截面上平均法向速度^[3], 然后采用流量守恒修正。
壁面边界: 假定固体壁面处的轴向和横向速度为零。在壁面附近区域, 为了减少计算工作量, 本文采用壁面函数^[4], 建立壁面上各变量值与近壁区内部节点的各变量值之间关系。

4 计算结果及分析

本文采用两种不同的亚网格尺度燃烧模型对带 V 型稳定器的模型燃烧室紊流化学反应流动进行了大涡模拟, 并数值分析两种模型的所得的计算结果, 部分的结果如图 2~ 图 12 所示。

4.1 G 方程小火焰模型计算结果

图 2~ 图 7 为采用 G 方程火焰模型计算结果, 其中图 2~ 图 5 分别为温度 T , G , 速度 u 和燃油浓度 m_{fu} 等值线图, 图 6 和图 7 分别为稳定器后面温度 T 和速度 u 等值线局部放大图。从图 2 可以明显地看出已燃区域内温度分布不均匀, 虽然都是高温燃气区, 但温度变化具有一定的波动, 图 6 可以更加清晰的看出火焰面上温度的褶皱, 同样, 由图 4 和图 7 可知, 在火焰面上, 有明显的一系列小涡的不断演变过程, 这体现了采用 G 方程

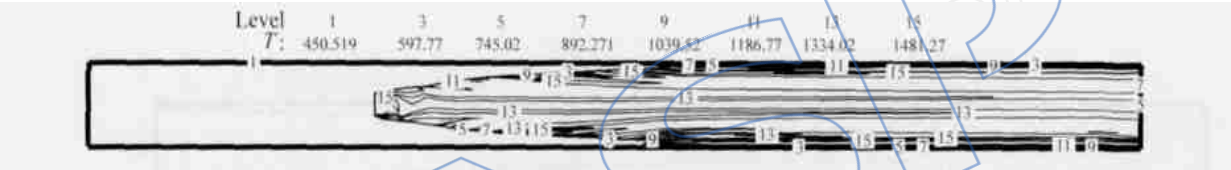


图 2 温度等值线图

Fig. 2 Contours of Temperature T

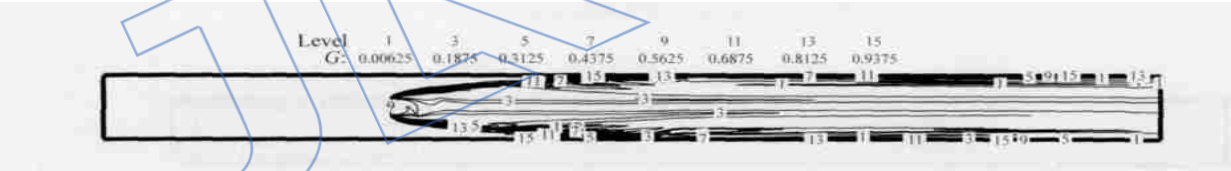


图 3 G 值等值线图

Fig. 3 Contours of G

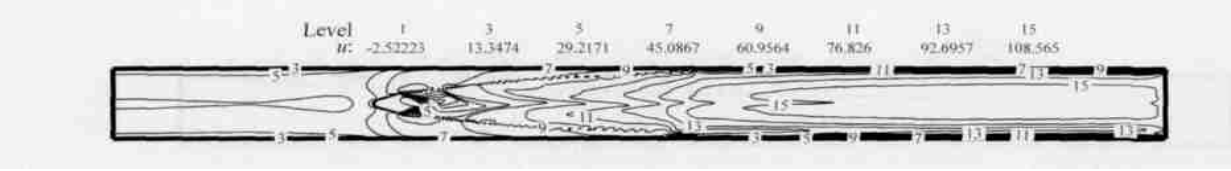


图 4 速度 u 等值线图

Fig. 4 Contours of Velocity u

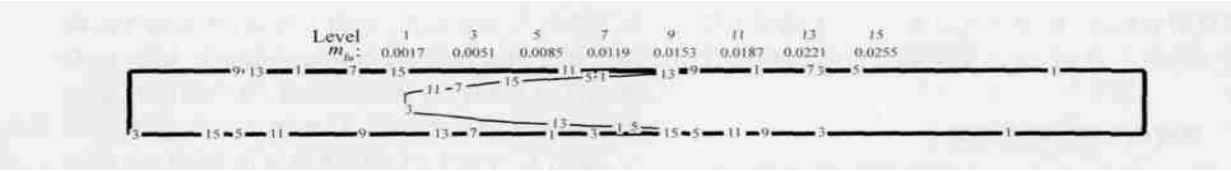


图 5 燃油浓度 m_{fu} 等值线图

Fig. 5 Contours of Fuel mass fraction m_{fu}

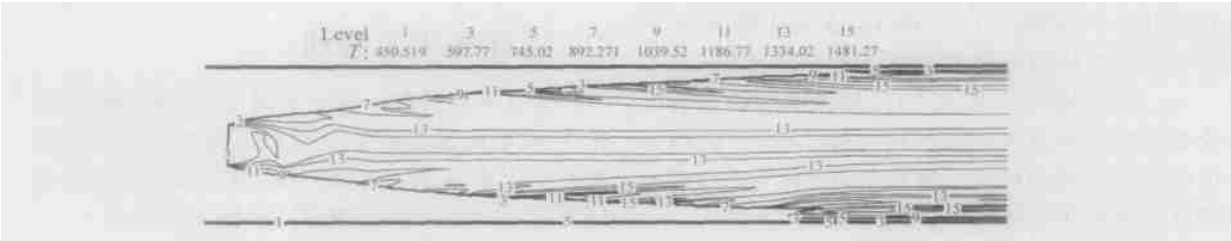


图 6 稳定器后温度 T 等值线图

Fig. 6 Contours of Temperature after stabilizer T

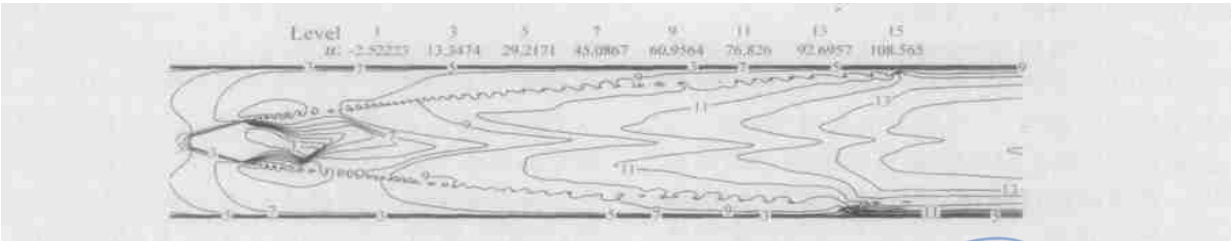


图 7 稳定器后面速度 u 等值线放大图

Fig. 7 Contours of Velocity u after stabilizer

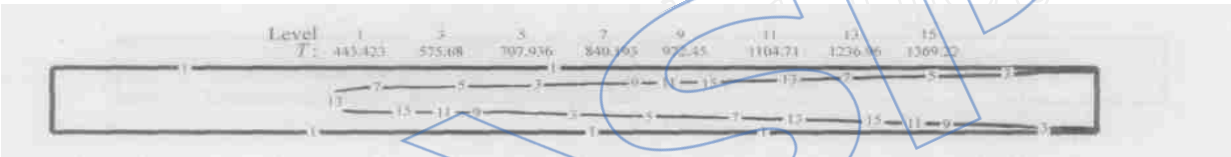


图 8 温度 T 等值线图

Fig. 8 Contours of temperature T

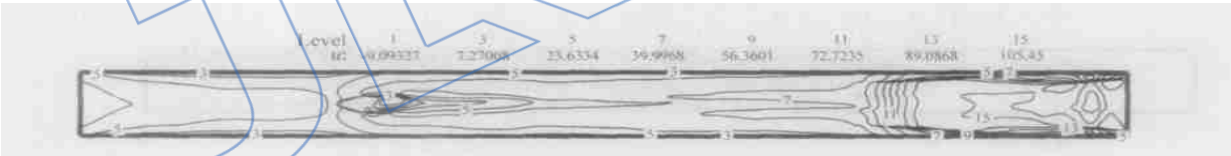


图 9 速度 u 等值线图

Fig. 9 Contours of Velocity u

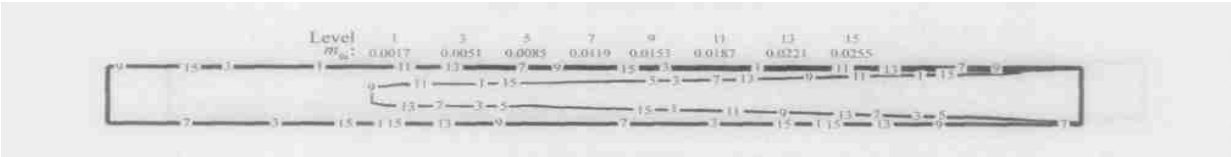


图 10 燃油浓度 m_{fu} 等值线图

Fig. 10 Contours of Fuel mass fraction m_{fu}

火焰模型的优点。由图 3 可以看出, 在火焰面上 G 值的变化也不规则, 这与实际燃烧过程火焰比较吻合。

4 2 亚网格 EBU 燃烧模型

图 8~ 图 10 为采用亚网格 EBU 燃烧模型的计算结果, 其中图 8~ 图 10 分别为温度 T 、速度 U 和燃油浓度 m_{fu} 等值线图, 图 11 为稳定器后面速

度等值线局部放大图。由图 8 可知, 高温燃气区域内温度分布比较均匀, 而且火焰面非常光滑, 由未燃烧区域直接过渡到燃烧区域, 这与实际燃烧室燃烧情况不怎么相吻合, 比较图 2、图 6 和图 8 可知, 采用 G 方程火焰燃烧模型更符合实际燃烧室中燃烧情况。从图 9~ 图 11 可以看出在火焰面上气流速度与燃个油浓度变化平滑, 这与图 4、图 5、

图 7 有较明显的不同。图 12 为采用两种亚网格燃烧模型计算的出口截面上温度值和实验值的比

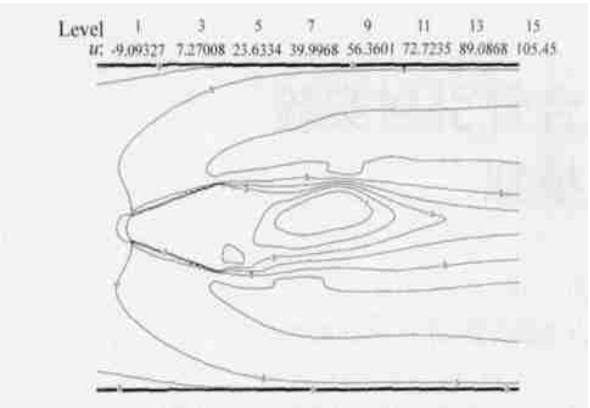


图 11 稳定器后速度 u 等值线图

Fig 11 Contours of V elocity u after stabilizer

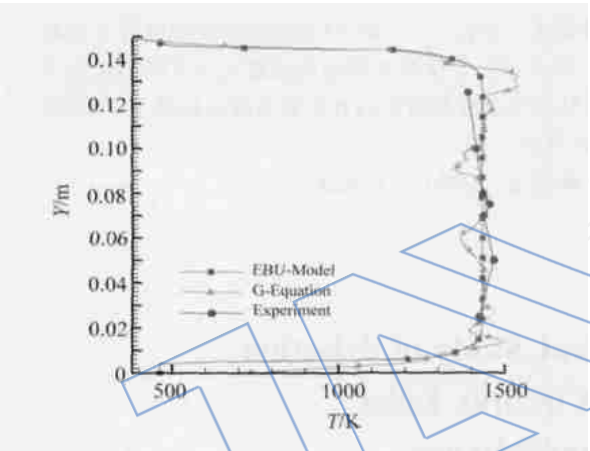


图 12 出口截面 EBU 模型、G 方程温度和实验的比较

Fig 12 Profiles of Temperature at the exit plane

较, 由图可见, 两种燃烧模型都能较好的模拟燃烧室燃烧过程, 但 G 方程模型要比 EBU 模型能更

好的模拟燃烧过程中的各种参数的紊流脉动情况。

5 结束语

本文通过两种不同亚网格燃烧模型来模拟带 V 型加力燃烧室的紊流燃烧过程, 并把计算所得的温度与实验值相比较, 结果表明, 两种亚网格燃烧模型都能模拟燃烧过程, 但采用 G 方程火焰模型能更好的再现火焰面上温度、速度等各参数的紊流脉动情况与实际燃烧过程更接近, 而亚网格 EBU 燃烧模型体现气流参数紊流脉动情况不如 G 方程, 因此可认为 G 方程燃烧模型更优于亚网格 EBU 燃烧模型。

参考文献:

[1] 赵坚行 燃烧的数值模拟[M] 北京: 科学出版社, 2002

[2] Kim W W, Menon S A New Dynamic One-Equation Subgrid-Scale Model for Large Eddy Simulations [R] . A IAA 95- 0356, 1995

[3] Ravikanth V R A, Richard H P. Large-Eddy Simulation of the Turbulent Flow Past A Backward Facing Step [R] , A IAA 2000- 0542, 2000

[4] Stone C, Menon S Simulation of Fuel-Air Mixing and Combustion in a Trapped-Vortex Combustor [R] . A IAA 2000- 0478, 2000

[5] Kim W W, Menon S, Mongia H C Large-Eddy Simulation of a Gas Turbine Combustor Flow [J] . *Combust Sci and Tech*, 1999, 143: 25~ 62

[6] Menon S Active Control of Combustion Instability in a Ram jet U sing Large-Eddy Simulations[R] . A IAA - 91- 0411, 1991.

[7] Menon S, Kim W W, Stone C Large-Eddy Simulation of Fuel-Air Mixing and Chemical Reactions in Swirling Flow Combustor[R] . A IAA 99- 3440, 1999