

文章编号: 1000-8055(2008)07-1161-07

大涡模拟模型环形燃烧室污染特性

颜应文, 赵坚行, 张靖周, 刘 勇
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在任意曲线坐标系下, 采用大涡模拟模型环形燃烧室两相燃烧流场中污染物的生成. 用亚网格涡破碎(EBU)燃烧模型估算化学反应速率; 分别用 NO 亚网格动力学模型与 CO 亚网格模型来模拟 NO 和 CO 的生成; 采用随机离散模型模拟气液两相湍流流动, 两相之间耦合采用 PSIC 算法. 计算结果与瞬态速度场、出口温度和污染物质量分数分布的实验数据比较吻合, 表明大涡模拟方法和亚网格模型可以用来预估实际燃烧室两相喷雾燃烧流场和污染物生成过程.

关 键 词: 大涡模拟; 模型环形燃烧室; 亚网格污染物生成模型; 随机离散模型

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Large eddy simulation of pollution formation in model annular combustor

YAN Ying-wen, ZHAO Jian-xing, ZHANG Jing-zhou, LIU Yong

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In three dimensional arbitrary curvilinear coordinates, large eddy simulation (LES) approach was employed to simulate pollution formations in the model annular combustor. The k -equation subgrid scale model was used to simulate the subgrid eddy viscosity, the eddy-break-up(EBU) combustion subgrid scale model was applied to prediction of the chemical reaction rate, the NO subgrid scale pollutant formation model was employed to the evaluation of the rate of NO formation, and a two-step turbulent combustion subgrid scale model was applied for calculating CO concentration. A stochastic separated flow formulation was applied to prediction of instantaneous gas-liquid two-phase turbulent combustion flows. The numerical simulation results were in reasonable agreement with the experimental instantaneous velocity profiles in the primary zone, temperature and pollution concentration profiles at the outlet. It shows that the LES method and subgrid scale pollution formation models in this study can be used to investigate turbulent two-phase combustion and pollution formation processes in combustors.

Key words: large eddy simulation (LES); model annular combustor; subgrid scale pollution formation model; stochastic separated flow formulation (SSF)

近几十年来军用和民用航空燃气涡轮发动机的迅速发展, 发动机性能参数日益提高, 向高推比

与大流量方向发展, 发动机排放到大气中的污染物也日益增多. 燃气轮机排放的污染物主要有一氧化

收稿日期: 2007-06-21; 修订日期: 2007-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(50176017); 高等学校博士学科点专项科研基金(20070287041)

作者简介: 颜应文(1978-), 男, 湖南衡山人, 讲师, 博士, 从事发动机燃烧计算与实验.

碳(CO)、一氧化氮(NO)、未燃碳氢化合物(UHC)等,这些污染物对人类及生态环境造成严重危害,为了防治大气污染,可采用数值模拟方法研究污染物排放,了解燃烧过程污染物生成机理,发展低污染燃烧技术.为此,文献[1]利用组合NO与CO亚网格生成模型,大涡模拟全尺寸DOE-HAT燃烧室污染特性,计算所得NO与CO质量分数随当量比变化趋势与实验值相当一致.文献[2]采用CFD-ACE+商业软件、两步亚网格概率密度函数模型与MPI并行算法,大涡模拟燃气轮机燃烧室NO与CO的排放特性,文献[3-4]分别采用以两步反应为基础的亚网格EBU模型大涡模拟估算贫油预混低污染LM-6000燃烧室与加力燃烧室的CO质量分数分布,计算结果与实验数据符合较好.

本文采用大涡模拟^[5-8]方法研究模型环形燃烧室湍流两相喷雾燃烧过程中污染物CO和NO的排放.

1 研究对象

为了加工方便,本文把环形燃烧室简化为矩形燃烧室,如图1所示,该燃烧室包括二级突扩扩压器、内外冷却通道以及火焰筒.火焰筒上下壁上各开有1排主燃孔、1排掺混孔和8排气膜冷却孔,主燃孔为3个,掺混孔为2个,气膜孔是由许多小孔组成.因其结构形状复杂,为了更好地模拟燃烧室几何形状,本文在任意曲线坐标系下数值分析气液两相燃烧过程中污染物的生成.

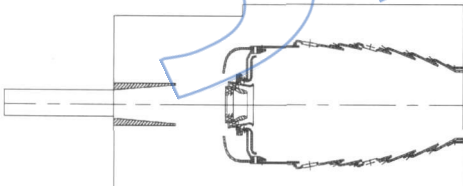


图1 模型燃烧室结构示意图

Fig 1 Schematic drawing of the model combustor

2 污染物生成亚网格尺度模型

了解航空发动机燃烧室中污染物NO和CO的生成情况,工程上普遍采用常规统计平均方法来预估污染物的排放.为了更好的提高预报精度,本文采用大涡模拟方法,对两相喷雾燃烧流场中污染物NO和CO进行数值模拟.

2.1 NO亚网格生成模型

在实际燃烧室中因燃气温度较高,燃烧生成的NO主要是“热力”NO.又因NO的生成与湍流

燃烧过程有关,其生成机理比较复杂,特别是在大涡模拟情况下NO亚网格生成模型还不够成熟.本文采用一种考虑湍流因素的亚网格动力学模型^[4]来估算NO质量分数.

按该模型,组分NO可由下列NO的输运方程来求解

$$\frac{\partial m_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_{NO}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_{NO}} \frac{\partial m_{NO}}{\partial x_i} + R_{NO} \right) \tag{1}$$

式中NO的质量相对分数 m_{NO} 的源项 R_{NO} 确定时,可由考虑化学动力学因素的 $R_{NO,1}$ 和湍流因素的 $R_{NO,2}$ 两源项中取其小值

$$R_{NO} = \min(|R_{NO,1}|, |R_{NO,2}|) \tag{2}$$

其中 $\bar{R}_{NO,1}$ 根据Zeldovich机理可表示为

$$\bar{R}_{NO,1} = 1.58 \times 10^{14} / \sqrt{T} \exp(-67535/T) \sqrt{\bar{\rho}} \sqrt{m_{O_2} m_{N_2}} \tag{3}$$

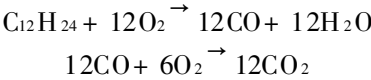
考虑湍流的影响,式(2)中 $\bar{R}_{NO,2}$ 可表示为

$$\bar{R}_{NO,2} = C_{NO} \bar{\rho} m_{NO} \epsilon^{gs} / k^{gs} \tag{4}$$

其中 C_{NO} 为模型系数; m_{O_2} 和 m_{N_2} 分别为氧和氮的质量相对分数; $\bar{\rho}$ 为气流密度; T 为气流温度, k^{gs} 为亚网格尺度动能, ϵ^{gs} 为亚网格动能消耗率.

2.2 CO亚网格生成模型

研究表明,CO的生成直接与燃烧过程有关,它的生成速率不仅受化学动力学控制,而且还受湍流的影响^[4].为了简化,目前常采用的化学反应机理为两步或四步化学反应,所采用的CO亚网格生成模型常有:亚网格EBU模型^[4],组合CO亚网格生成模型^[1]等.本文采用两步化学反应机理来预估煤油-空气混气燃烧中CO质量分数,其反应机理为



为了考虑湍流对化学反应的影响,在预估CO时还要求解混合分数 f ,燃油成分 m_{fu} 等.

$$\frac{\partial m_{CO}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} u_i m_{CO}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_{CO}} \frac{\partial m_{CO}}{\partial x_i} \right) + \bar{R}_{CO} \tag{5}$$

其中源项为: $\bar{R}_{fu} = \bar{w}_m = \min(\bar{w}_{mix}, \bar{w}_{kin})$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{CO} &= \min[A \bar{\rho} m_{CO} (m_{O_2} m_{H_2O})^{0.5} \exp(-E/RT), \\ &\quad C_{CO} \bar{\rho} m_{CO} \epsilon^{gs} / k^{gs}] \\ \bar{R}_{CO} &= \frac{336}{168} \bar{R}_{fu} - \bar{R}_{CO} \end{aligned} \tag{6}$$

把式 (6) 求得的 CO 生成速率 R_{CO} 代入式 (5), 可得 CO 质量分数.

3 气相大涡模拟基本控制方程

实际航空燃气轮机燃烧室内气流流动很复杂, 都为两相湍流旋流燃烧流动. 对于两相喷雾燃烧流场, 按 Favre 滤波得到在贴体坐标系下气相大涡模拟基本控制方程^[9] 为

$$J \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho U \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \Phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho W \Phi) =$$
$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{11} \Phi_{\xi} + q_{12} \Phi_{\eta} + q_{13} \Phi_{\zeta}) \right] +$$
$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{21} \Phi_{\xi} + q_{22} \Phi_{\eta} + q_{23} \Phi_{\zeta}) \right] +$$
$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{31} \Phi_{\xi} + q_{32} \Phi_{\eta} + q_{33} \Phi_{\zeta}) \right] + JS_{\Phi} + JS_{P\Phi}$$

(7)

上式中通用变量 Φ 分别为速度 u, v 和 w , 亚网格动能 k^{sgs} , 焓 h , 组分 $m_{\text{NO}}, m_{\text{CO}}, m_{\text{fu}}$ 和混合分数 f , 六通量辐射模型中的三个辐射通量 R_x, R_y, R_z . $S_{P\Phi}$ 代表气液两相之间相互作用的源项, JS_{Φ} 为各方程源项, 各方程的源项见文献[9], 雅可比行列式 J 以及 q_{ij} 的定义见文献[8 10].

本文采用 k 方程亚网格尺度模型来模拟湍流亚网格粘性 $\mu_s = C_{\mu} \rho (k^{sgs})^{1/2} \Delta$, 湍流有效粘性为 $\mu_e = \mu_t + \mu_s$, 其中 μ_t 为层流粘性.

对于燃料组分方程中的化学反应速度 $\dot{w}_{fu}$, 本文采用亚网格 EBU 燃烧模型^[9 10] 估算

$$\dot{w}_{fu} = \min(\dot{w}_{mix}, \dot{w}_{kin})$$

(8)

其中 $\dot{w}_{mix} = \sqrt{2k^{sgs}} / (C_{EBU} \Delta) \min(m_{O_2}/2, m_{fu})$, $\dot{w}_{kin} = A_0 \bar{\rho} m_{fu} m_{O_2} \exp(-E/RT)$.

4 液相控制方程

燃油经喷嘴喷出, 与双级旋流器进来的空气进行掺混、加热、蒸发, 并燃烧. 为了模拟气液两相之间的质量、动量以及能量交换, 液相采用大涡模拟随机离散模型^[5] (Stochastic separated flow, 简称 SSF), 该模型在 Lagrange 坐标系下追踪各油珠群沿各自轨道运动、质量损失、动量及能量变化, 当油珠直径小于某一尺寸后可认为油珠已经蒸发, 并与气体完全混合. 在 Euler 坐标系下, 采用大涡模拟方法处理气相流场, 把油珠颗粒群沿轨道中受的阻力、蒸发或燃烧引起的颗粒群速度、温度及尺寸变化作为质量、动量、能量的源项加入气相场中, 从而实现气液两相之间相互耦

合^[5, 9 10].

5 数值模拟方法

5.1 控制方程的离散

在非交错网格体系下, 采用控制容积法对通用控制方程 (7) 进行离散, 其中时间项采用二阶隐式差分格式, 对流项采用二阶精度 QUICK 格式离散, 气液两相耦合采用 PSIC 方法, 离散方程求解采用 SIMPLE 算法, TDMA 和 CTDMA, 时间步长为 0.001 s.

5.2 初始条件与边界条件

入口边界条件: 根据实验工况, 给定矩形燃烧室扩压器入口参数: 温度 500 K, 压力 0.13 MPa, 流量为 0.28 kg/s, 航空煤油从喷嘴中喷出, 与双级旋流进来的空气混合、燃烧, 进口油气比为 0.015 18.

出口边界条件: 对于整体燃烧室出口采用 Sommerfeld 辐射开边界条件, $\partial \phi / \partial t + U_{\text{out}} \partial \phi / \partial y = 0$. 其中 U_{out} 表示出口截面上速度加权平均值. 然后再用流量守恒修正出口速度.

壁面边界: 在整体燃烧室壁面附近区域, 为了减少计算工作量, 本文采用壁面函数.

6 结果及分析

6.1 矩形燃烧室三维贴体网格的生成

本文通过求解椭圆型偏微分方程组生成三维贴体网格. 网格共分成前置扩压器、突扩段、上冷却通道、下冷却通道和火焰筒等 5 个子区域, 如图 2 所示, 区域之间的数据传递采用多区域耦合法. 网格总数为 $271 \times 101 \times 49$. 图 3 为火焰筒的三维贴体网格, 可以看出 8 段气膜冷却缝隙、旋流器出口、上下壁面各 3 个主燃孔和 2 个掺混孔.

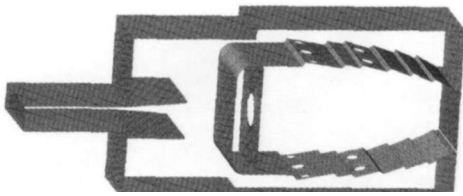


图 2 矩形燃烧室三维贴体网格
Fig 2 Three dimension body fitted grid of combustor

6.2 两相喷雾燃烧流场污染物生成数值模拟结果

图 4~ 图 16 为大涡模拟两相喷雾燃烧流场部分计算结果. 其中, 图 4~ 图 6 分别为矩形燃烧室 $K=25$ 截面上的瞬态流线图、速度矢量瞬态图和速度矢量时均图. 由图可知, 在扩压器上下突扩

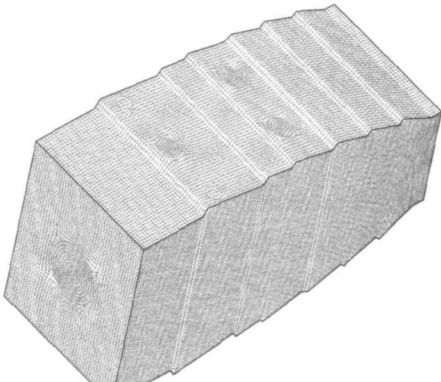


图 3 火焰筒三维贴体网格

Fig 3 Three dimension body fitted grid of flame tub

腔内有一对明显的涡旋, 它们可根据进气状态变化自动进行调整, 使火焰筒进口流场比较稳定, 体现了短突扩压器的优越性. 在火焰筒头部从旋流器进来旋转气流与主燃孔进入空气流相互作用形成中心回流区. 内外冷却通道的冷却空气从火焰筒上下壁面上 8 条气膜冷却缝隙进入火焰筒内, 对其壁面进行冷却. 比较图 5 和图 6 可知, 因大涡模拟可直接计算大尺度涡旋不规则随机脉动, 故在图 4 与图 5 的瞬态图上可以看到在火焰筒头部湍流脉动形成的一些随机的涡旋. 但经时间平均后脉动速度影响减弱或消失, 故在图 6 时均图上看不到随机的涡旋以及一些细小的气流速度变化.

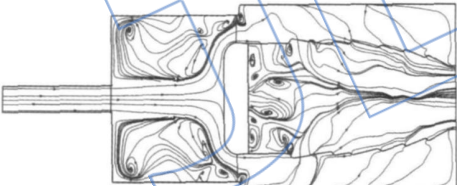


图 4 矩形燃烧室 $K = 25$ 截面速度瞬态流线图

Fig. 4 Velocity streamline snapshot of combustor at $K = 25$ section

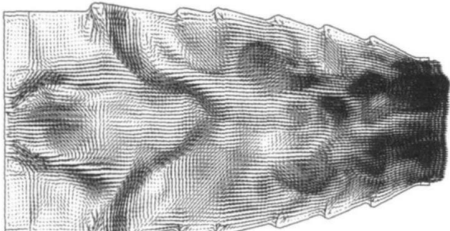


图 5 火焰筒 $K = 25$ 截面速度矢量瞬态图

Fig 5 Velocity vector snapshot of flame tube at $K = 25$ section

图 7 (a) 旋流器中心截面 ($K = 25$) 为火焰筒主燃区速度矢量局部放大图, 图 7 (b) 是由 PIV 测量的中心截面 ($K = 25$) 瞬时速度矢量图, 比较此

两图可知, 大涡模拟所得的主燃区速度分布与实验结果基本相符, 计算结果回流区范围稍小些, 但回流区比 PIV 测量的回流区更对称.

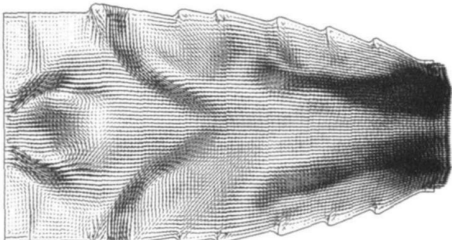


图 6 火焰筒 $K = 25$ 截面速度矢量平均图

Fig 6 Velocity vector time average of flame tube at $K = 25$ section

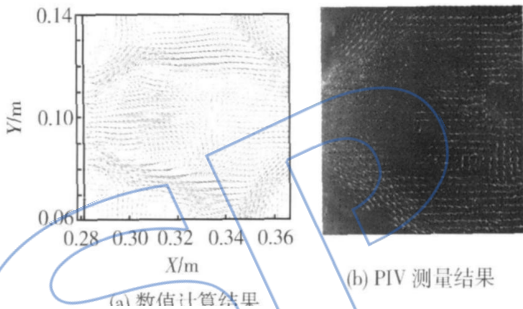


图 7 旋流器中心截面 ($K = 25$) 瞬时速度矢量图

Fig 7 Velocity vector at the middle section after swirler

图 8 和图 9 分别为火焰筒 $K = 25$ 截面上瞬态和时均温度云图, 在旋流器后面的中心回流区中, 存在一个高温区, 此高温回流区可作为稳定的点火源. 新鲜空气从主燃孔流入火焰筒, 在主燃区与燃油混合进行燃烧; 从上述瞬态图与时均图比较可知, 由于大涡模拟可以考察因燃烧增强的湍流脉动参数对气流温度随时间变化的情况, 故在瞬态图 8 中可以观察到涡结构对皱折火焰面以及不规则高温区的影响. 而在时均图 9 中, 时间平均后脉动参数影响减弱或消失, 有些温度的细观结构被抹平, 高温区表面要光滑些. 图 10 为出口截面上温度分布图, 数值计算结果与实验测量结果相比较, 数值计算结果与实验测量结果基本相符合.

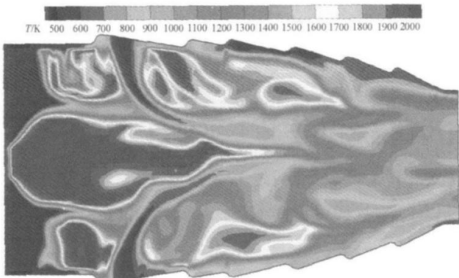


图 8 火焰筒 $K = 25$ 截面瞬态温度云图

Fig 8 Temperature contour snapshot at $K = 25$ section

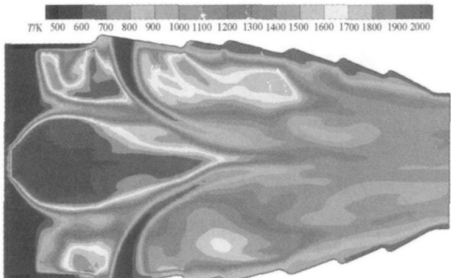


图 9 火焰筒 $K = 25$ 截面时均温度云图

Fig 9 Temperature contour time average at $K = 25$ section

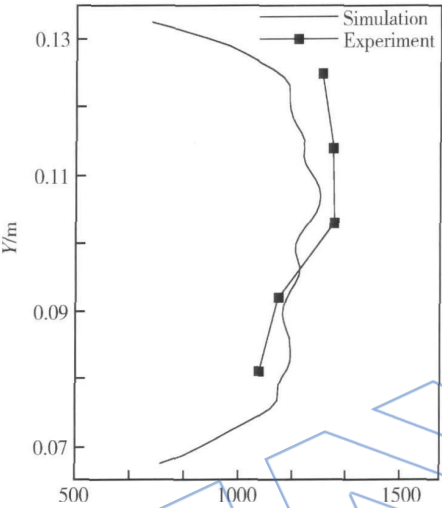


图 10 出口截面上温度分布图

Fig 10 Exit temperature distribution of flame tube

图 11 和图 12 分别为火焰筒 $K = 25$ 截面上污染物 NO 瞬态和时均质量分数云图, 可以看出在旋流器出口的中心截面上, 由于存在火焰筒的高温燃气回流区, 因此在这个区域内, 污染物 NO 质量分数较高, 在其它区域因温度较低, 污染物 NO 质量分数相对也较低. 这变化趋势与热力 NO 生成机理相符. 同样, 比较瞬态图 11 和时均图 12 可知, 由于瞬态温度变化影响 NO 生成速率, 故在图 11 中可看到 NO 脉动变化情况, 而在图 12 中因时均温度关系, 看不到 NO 细观变化.

图 13 和图 14 分别为火焰筒 $K = 25$ 截面上污染物 CO 质量分数瞬态和时均云图, 在喷嘴喷出的油珠轨迹附近, CO 质量分数最高, 这是由于在油珠轨迹附近, 燃油质量分数最高, 处于富油状态, 氧气缺少, 燃油来不及完全燃烧引起的. 在火焰筒内沿着轴向长度增加, 混气燃烧时间也相应增长, 另外, 经主燃孔与掺混孔进入空气流补充氧气, 使未烧完的燃油继续燃烧, CO 也被氧化 CO₂, 燃烧逐趋完全, CO 排放也相应下降. 比较瞬态图 13 和时均图

14 可知, 由于瞬态脉动参数变化影响 CO 生成速率, 故在图 13 中可观察到 CO 细观变化情况, 而在图 14 中因脉动参数被时间平均, 看不到湍流脉动随时间变化对 CO 排放的影响.

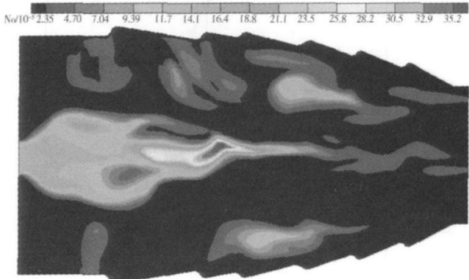


图 11 火焰筒 $K = 25$ 截面 NO 瞬态质量分数云图

Fig 11 NO contour snapshot at $K = 25$ section

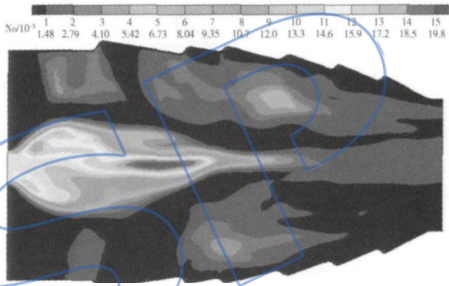


图 12 火焰筒 $K = 25$ 截面 NO 质量分数时均云图

Fig 12 NO contour time average at $K = 25$ section

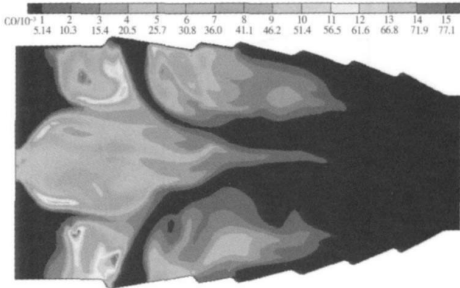


图 13 火焰筒 $K = 25$ 截面 CO 瞬态质量分数云图

Fig 13 CO contour snapshot at $K = 25$ section

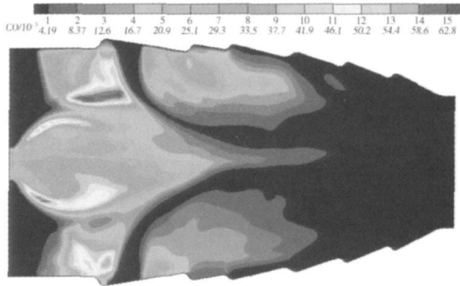


图 14 火焰筒 $K = 25$ 截面 CO 质量分数时均云图

Fig 14 CO contour time average at $K = 25$ section

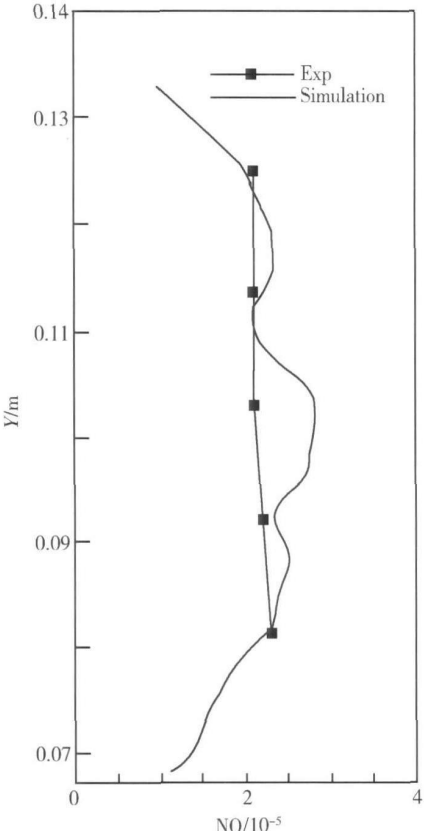


图 15 出口截面上污染物 NO 质量分数分布
Fig 15 Exit NO distribution of flame tube

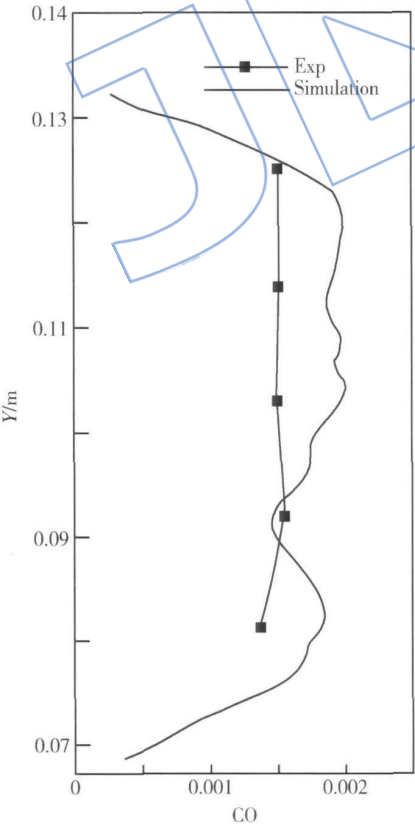


图 16 出口截面上污染物 CO 质量分数分布
Fig 16 Exit CO distribution of flame tube

图 15 和 16 分别为出口截面上污染物 NO 和 CO 质量分数分布图, 数值计算结果与气体分析仪测量的数据基本吻合。

从上述给出的各种变量(速度、温度、污染物 NO 和 CO)的瞬态图和时均图可以看出, 大涡模拟能考察到湍流燃烧脉动的细观结构, 此法对进一步了解燃烧室内湍流两相燃烧过程以及污染物生成机理很有用。

7 结束语

1) 本文采用大涡模拟方法在三维贴体坐标系下对带短突扩压器、内外环冷却通道以及火焰筒的模型环形燃烧室内两相喷雾燃烧流场中的污染物 NO 和 CO 排放进行数值模拟. 计算结果与实验数据基本相吻合表明本文所用的计算方法与数学模型合理可靠。

2) 从本文所得的各变量瞬态分布图和时均分布图相比较表明, 大涡模拟虽比 RANS 计算工作量 大些, 但可得到真实的瞬态流场, 而且计算精度高, 更适合模拟环形燃烧室湍流燃烧问题, 在目前计算条件下, 它是一种具有广阔工程应用前景的数值计算方法。

参考文献:

[1] Eggenspieler G, Menon S. Large eddy simulation of pollutant emission in a DOE-HAT combustor[R]. AIAA 2003 309, 2003.

[2] Cannon S M, Smith C E. LES predictions of combustor emissions an aero gas turbine engine[R]. AIAA 2003 4521, 2003.

[3] Grinstein F F, Fureby C. LES studies of the flow in a swirl gas combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30: 1791-1798.

[4] 颜应文, 赵坚行. 加力燃烧室污染特性的大涡模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(1): 68-72.

YAN Yingwen, ZHAO Jianxing. Large eddy simulation of pollutant performance in an afterburner[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(1): 68-72. (in Chinese)

[5] Menon S, Pannala S. Subgrid simulations of reacting two phase shear layers[R]. AIAA98 3318, 1998.

[6] Avancha R V R, Pletcher R H. Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward step[R]. AIAA 2000 0542, 2000.

[7] 颜应文, 赵坚行. 模型燃烧室紊流燃烧的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 86-91.

YAN Yingwen, ZHAO Jianxing. Large eddy simulation of turbulent combustion in a model combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 86-91. (in Chinese)

[8] 颜应文, 赵坚行, 张靖周, 等. 三维贴体坐标系下燃烧室热态流场的大涡模拟[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 219-222.
YAN Yingwen, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou, et al. Large eddy simulation of turbulent reacting flows in the combustor by three dimensional body fitted grid[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 219-222. (in Chinese)

[9] 颜应文, 赵坚行, 张靖周, 等. 燃烧室两相流场亚网格燃烧模型的研究[J]. 力学学报, 2006, 38(6): 784-790.
YAN Yingwen, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou, et al. Subgrid scale combustion models for two phase combustion flow in an annular combustor[J]. Chines Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(6): 782-790. (in Chinese)

[10] 颜应文, 赵坚行, 张靖周, 等. 环形燃烧室两相喷雾燃烧的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 824-830.
YAN Yingwen, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou, et al. Large eddy simulation of turbulent spray combustion in an annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 824-830. (in Chinese)