

文章编号: 1000-8055(2006)05-0824-07

环形燃烧室两相喷雾燃烧的大涡模拟

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: 在三维任意曲线坐标系下采用欧拉 - 拉格朗日两相大涡模拟方法对环形燃烧室火焰筒气液两相紊流瞬态反应流进行数值模拟。采用椭圆偏微分方程生成三维贴体网格, 计算中所采用的数学度模型有: k 方程亚网格尺度模型估算亚网格紊流粘性; 亚网格 EBU 燃烧模型估算化学反应速率; 热通量辐射模型估算辐射换热。并在非交错网格体系下气相采用 SIMPLE 算法和混合差分格式求解, 液相采用随机离散模型 (Stochastic Separated Flow, 简称 SSF), 在拉格朗日坐标系下追踪各油珠群沿各自轨道运动、质量损失及能量变化。通过计算结果与实验数据相比较, 表明在三维贴体坐标系下对燃烧室火焰筒两相紊流油雾燃烧流场进行大涡模拟, 采用欧拉 - 拉格朗日两相大涡模拟方法能反映两相紊流化学反应流动及实际燃烧过程。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 欧拉 - 拉格朗日两相大涡模拟; 贴体网格; k 方程亚网格尺度模型; 亚网格 EBU 燃烧模型

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Large-eddy simulation of turbulent spray combustion in an 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 coordinate system, an Eulerian-Lagrangian two phase large-eddy simulation (LES) approach was employed to predict instantaneous gas-liquid two-phase turbulent combustion flows in an annular combustor. Three dimensional body-fitted grid was generated by using an elliptical grid generation procedure. The k -equation sub-grid scale model was used to simulate the sub-grid eddy viscosity, the EBU combustion sub-grid scale model was used to determine the chemical reaction rate, the six-heat flux model was applied to predict the radiant heat transfer. The gas phase was solved with SIMPLE algorithm and hybrid scheme in non-staggered grid system. A Stochastic Separated Flow formulation was used to track the droplet trajectories velocities, size and temperature history by using Lagrangian equations of motion and thermal balance. To avoid the need for detailed calculations in the near wall regions, wall functions was extended to the body-fitted coordinate system. The calculated and measured temperature profiles at outlet plane were in reasonable agreement. It shows that system, in arbitrary curvilinear coordinate

收稿日期: 2005-09-08; 修订日期: 2005-12-28

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, 湖南省衡阳市衡山县人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机燃烧方面的研究。

system, and an Eulerian-Lagrangian two phase LES formulation may be used to investigate turbulent two-phase reacting flows and combustion process in combustors.

Key words: aerospace propulsion system; Eulerian-Lagrangian two phase large-eddy simulation (LES); body-fitted grid; k -equation sub-grid scale model; EBU combustion sub-grid scale model

燃烧室是航空发动机的主要部件之一,发动机的性能和使用寿命很大程度上取决于燃烧室的性能设计,近年来对发动机的性能要求不断提高,对燃烧室性能要求也越来越高。但因燃烧室实验费用耗资巨大,而数值模拟以较低的成本、较短的周期的优势使其在燃烧室的设计中占着重要的地位。数值模拟方法通常有直接模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和雷诺平均数值模拟(RANS)三种,其中DNS因计算工作量太大,目前还不能用于实际工程应用,而RANS虽然在工程上得到广泛应用,但该方法不能研究化学反应与湍流相互作用的细观结构,为了更好地模拟湍流对燃烧的影响,本文采用大涡模拟方法分析气液两相反应流动^[1-3]。

由于本文研究对象为环形燃烧室火焰筒,其外形复杂,为了避免外形与坐标线不一致而带来的计算误差,因此采用三维贴体坐标系^[1,4,5]。燃油从喷嘴中喷出,经雾化、蒸发并与空气混合形成一定的燃油浓度分布。此混气形成过程好坏与燃

烧室中气体流动情况,气液两相之间质量、动量和能量之间交换,以及燃烧过程有着密切关系。

1 研究对象

本文的模拟对象为环形燃烧室火焰筒,所研究的气流为空气,在火焰筒进口处每 15°装有一个二级涡流器和喷嘴,喷嘴喷射燃油,在气动力作用下空气与燃油混合。由于涡流器和喷嘴周向均布,因此本文只研究 15°扇形区域,在火焰筒内外环面上各开有两个主燃烧孔、一个掺混孔以及 8 条有许多小孔组成的气膜冷却隙缝。这些孔进气主要用来分配燃烧及掺混用空气量,而缝隙进气用来冷却火焰筒壁面。

2 气相基本控制方程

在油雾燃烧流场中,经滤波后大涡模拟基本控制方程在贴体坐标系下通用形式为^[1,3,6]:

$$rJ \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho U \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho V \Phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\rho W \Phi) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma_\Phi}{rJ} (q_{11} \Phi_\xi + q_{12} \Phi_\eta + q_{13} \Phi_\zeta) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma_\Phi}{rJ} (q_{21} \Phi_\xi + q_{22} \Phi_\eta + q_{23} \Phi_\zeta) \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\Gamma_\Phi}{rJ} (q_{31} \Phi_\xi + q_{32} \Phi_\eta + q_{33} \Phi_\zeta) \right] + rJ S_\Phi + JS_{r\Phi} \quad (1)$$

对于三维两相反应流,其通用变量 Φ 分别为速度 u, v 和 w , 亚网格动能 k^{sgs} , 焓 h , 组分 y_m , 辐射通量 R_x, R_r, R_θ 。源项 $S_{r\Phi}$ 代表液相和气相之

间的相互作用, $rJ S_\Phi$ 为各方程源项,其中动量方程、能量方程和 k 方程具体表达式见表 1。

表 1 基本控制方程

Table 1 Basic Control equations

Φ	Γ_Φ	$rJ S_\Phi$	$S_{r\Phi}$
u	μ_e	$r[A_{1j} \frac{\partial (2/3 \rho k^{sgs} - p)}{\partial \xi_j}] + \frac{\partial}{\partial \xi_i} [\frac{r\mu}{J} A_{1j} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r\mu}{J} A_{2j} (A_{1i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_i} [\frac{r\mu}{J} A_{3j} (A_{1i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})] - \frac{2}{3} \mu_e \{ \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{1j} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{1j} (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{1j} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})] \}$	$F\xi$

Φ	Γ_Φ	$rJS\Phi$	$S_r\Phi$
v	μ_e	$r[A_{2j} \frac{\partial(2/3\rho k^{sgs} - p)}{\partial \xi_j}] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{J} A_{1j} (A_{2i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{J} A_{2j} (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{J} A_{3j} (A_{2i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})] - \frac{2}{3} \mu_e \{ \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{2j} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{2j} (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{2j} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})] \} - 2J\mu_e [\frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + \frac{v}{r}] + J\rho w^2$	F_η
w	μ_e	$A_{3j} \frac{\partial(2/3\rho k^{sgs} - p)}{\partial \xi_j} + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{J} A_{1j} (A_{3i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{J} A_{2j} (A_{3i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} - Jw)] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{\mu}{rJ} A_{3j} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + 2Jv)] - \frac{2}{3} \mu_e \{ \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{3j} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{3j} (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})] + \frac{\partial}{\partial \xi_j} [\frac{r}{J} A_{3j} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})] \} + \frac{\mu}{r} (A_{3i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i}) - \frac{\mu Jw}{r} - J\rho vw$	F_ξ
h	$\frac{\mu}{Pr}$	$\frac{\mu}{J} \{ 2[(A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})^2 + (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})^2 + \frac{1}{r^2} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + Jv)^2] + (A_{2i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i} + A_{1i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})^2 + (A_{1i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + \frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})^2 + (\frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} + A_{2i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} - \frac{Jw}{r})^2 \} - \frac{2\mu}{3J} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i} + A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} + \frac{Jv}{r} + \frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})^2 + 2rJa(R\xi + R\eta + R\zeta - 3\sigma T^4) + rJH_{fu} \frac{\dot{w}_m}{w_m}$	S_{ph}
k^{sgs}	μ	$\frac{\mu}{J} \{ 2[(A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})^2 + (A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})^2 + \frac{1}{r^2} (A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + Jv)^2] + (A_{2i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i} + A_{1i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i})^2 + (A_{1i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} + \frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i})^2 + (\frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} + A_{2i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i} - \frac{Jw}{r})^2 \} - \frac{2\mu}{3J} (A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i} + A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} + \frac{Jv}{r} + \frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i})^2 - \frac{2}{3} \rho k^{sgs} [A_{1i} \frac{\partial u}{\partial \xi_i} + A_{2i} \frac{\partial v}{\partial \xi_i} + \frac{Jv}{r} + \frac{1}{r} A_{3i} \frac{\partial w}{\partial \xi_i}] - rJ\rho \epsilon^{sgs}$	F_k

表中, $\mu_e = \mu + \mu_e$, $\xi_i = \xi, \eta, \zeta (i = 1, 2, 3)$, 雅可比行列式 J 以及它的代数余子式 A_{ij} 的定义见文献[1, 7]。对于能量方程中的化学反应速度 $\dot{w}_m$, 本文采用亚网格 EBU 燃烧模型估算, $\dot{w}_m = \min(\dot{w}_{mix}, \dot{w}_{kin})$, 其中 $\dot{w}_{mix} = 2 \sqrt{2} k^{sgs} / (C_{EBU} \bar{\Delta}) \min([O_2]/2, [燃料])$, $\dot{w}_{kin} = A_0 \rho^2 Y_1 Y_2 \exp(-E/RT)$ 。

3 液相控制方程

液相采用大涡模拟随机离散模型^[8] (Stochastic Separated Flow, 简称 SSF), 按模型对于稀疏气粒两相流动可在 Lagrange 坐标系下追踪各油珠群蒸发前沿各自轨道运动、质量损失及能量变化, 当颗粒小于某一尺寸后可认为全部蒸发, 并与气体完全混合。在欧拉坐标系下, 采用大涡模拟处理气相场, 由颗粒群沿轨道中阻力、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、能量及亚网格湍流动能源加入气相场中实现气相和液相间相互耦合。

(1) 在任意曲线坐标系下油滴运动方程为:

$$dU_{i,p}/dt =$$

$$(U_i - U_{i,p})/\tau_p + Jw_p(\xi_{i,r}w_p - \xi_{i,\theta}v_p/r) \quad (2)$$

(2) 采用四阶 Runge-Kutta 法求解上式可得到油滴速度 U_p, V_p, W_p , 按下列油珠轨道方程便可以确定油滴在计算平面内运动轨迹,

$$d\xi/dt = rJU_{i,p} \quad (3)$$

再根据逆变换可确定油滴物理平面内位置。

(3) 当油滴温度高于沸点时, 油滴受热蒸发, 其直径随时间变化的速率为:

$$dD_p/dt = C_D/(2D_p)(1 + 0.23Re^{0.5}) \quad (4)$$

(4) 当油滴温度低于沸点时, 油滴周围的高温气体对油珠加热, 温度随时间变化的规律为:

$$dT/dt =$$

$$6\lambda(2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3})(T_g - T_p)/(\rho D_p^2 C_{pp}) \quad (5)$$

(5) 油滴与气体相互作用源项

通过上述方程求得在计算区域内油滴速度、尺寸和温度后, 再计算每个控制容积中质量、动量和能量的变化, 求得油珠相与气相相互作用源项。将每个初始尺寸组的油珠各自源项迭加, 得出每个控

制容积中油珠和气体相间相互作用的总源项。

4 数值模拟方法

4.1 控制方程的离散

在非交错网格体系下,采用控制容积法和混合差分格式对通用控制方程(1)进行离散,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 0.001s,时间项离散采用全隐格式。

4.2 初始条件与边界条件

入口边界条件:根据设计要求,由初始条件算出旋流器后面速度。

出口边界条件:采用 Sommerfeld 辐射开边界条件^[9], $\partial \phi / \partial t + U_{com} \partial \phi / \partial y = 0$ 。其中 U_{com} 表示出口截面上速度加权平均值,通过数值计算表明,此出口边界条件能允许大尺度旋涡自由通过出口边界,而不产生非物理反射。然后再用流量守恒修正出口速度。

壁面边界:在燃烧室内外近壁区,为了减少计算工作量,本文采用壁面函数,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。

5 计算结果及分析

5.1 三维贴体网格的生成

本文采用椭圆偏微分方程法生成三维贴体网格(如图 1 所示),网格总数为 $144 \times 90 \times 51$,从图中可以看出在火焰筒内外环面主燃孔和掺混孔之间的相对位置和孔的大小,以及气膜冷却缝隙的相对位置,在火焰筒进口截面上,可以清楚的看到涡流器直径的大小及其相对位置。

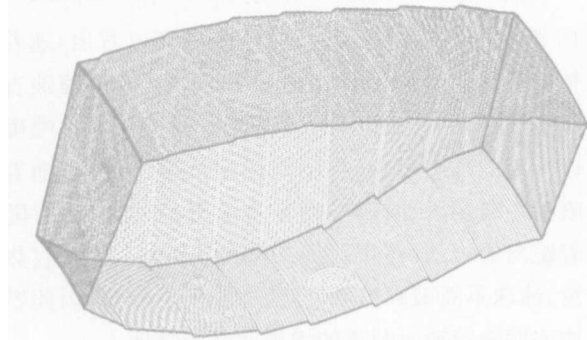


图 1 火焰筒整体网格图

Fig. 1 Grid of combustor

5.2 气液两相燃烧计算结果

本文对环形燃烧室火焰筒的两相燃烧流场进

行大涡模拟,图 2~图 13 为两相燃烧计算结果。

图 2 为 $K=22$ 截面主燃孔位置速度矢量图,从上下主燃孔进来的冷空气,形成一股气柱状的射流,在其后面也形成一个小的回流区;图 3 为 $K=33$ 截面掺混孔位置速度矢量图,即旋流器中心截面,可以看出从旋流器流出的旋转气流,由于空气粘性作用在火焰筒头部形成稳定的回流区,可作为点火源用,从掺混孔进来的冷却空气形成气柱状的射流,在其后面也有个小回流区;图 4 为 $K=22$ 主燃孔截面轴向速度脉动等值线图,与图 2 比较可知,在速度梯度变化大的主燃孔附近轴向速度脉动值明显较大,而在其它区域则速度脉动值较小;图 5 为 $K=33$ 掺混孔截面轴向速度脉动等值线图,与图 3 对照,同样在速度梯度变化较大的掺混孔附近及旋流器入口的旋流速度锥面上,由于速度梯度变化很大,因此轴向速度脉动值较大。

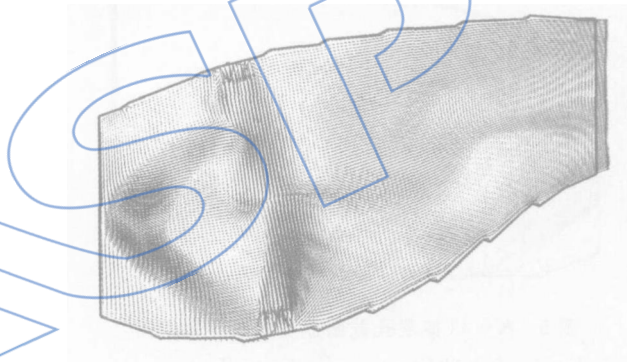


图 2 $K=22$ 主燃孔截面速度矢量图

Fig. 2 $K=22$ Velocity vector (primary holes)

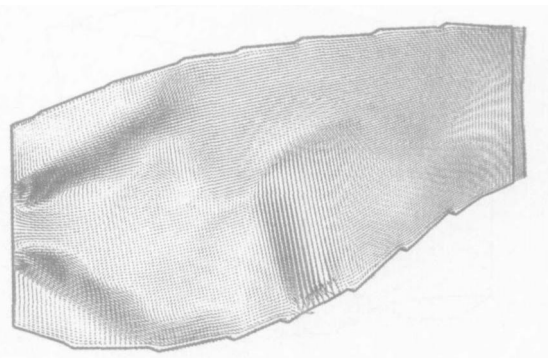


图 3 $K=33$ 掺混孔截面速度矢量图

Fig. 3 $K=33$ Velocity vector (dilution hole)

图 6 为同一直径油滴沿圆周 36 个不同喷嘴位置的轨迹图,从图中可以看出,油珠由空气雾化喷嘴以一定的喷雾角喷出后,随着油滴向燃烧室后面的运动,油滴向外喷射,形成一个喷雾锥,在油珠的运动轨迹上,随着在燃烧室中停留时间的增加,油珠不断吸热蒸发,油珠直径逐步变小,到一定距离时,油珠完全蒸发,因此油珠轨迹终止,

同时可以看出在每一组油滴运动过程中,受湍流与油珠的相互作用,油珠轨迹随湍流动脉。

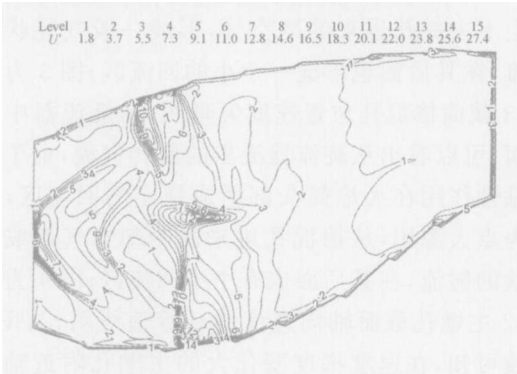


图 4 $K=22$ 主燃孔截面速度脉动等值线图
Fig. 4 $K=22$ Contour of velocity fluctuation (primary holes)

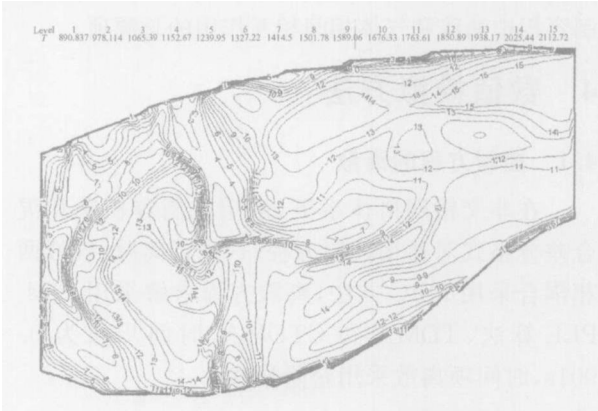


图 7 $K=22$ 主燃孔截面温度等值线图
Fig. 7 $K=22$ Contour of temperature (primary holes)

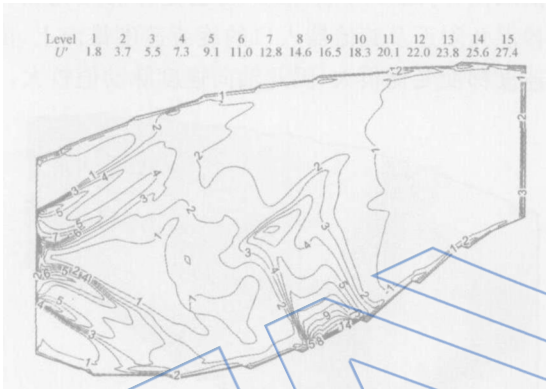


图 5 $K=33$ 掺混孔截面速度脉动等值线图
Fig. 5 $K=33$ Contour of velocity fluctuation (dilution hole)

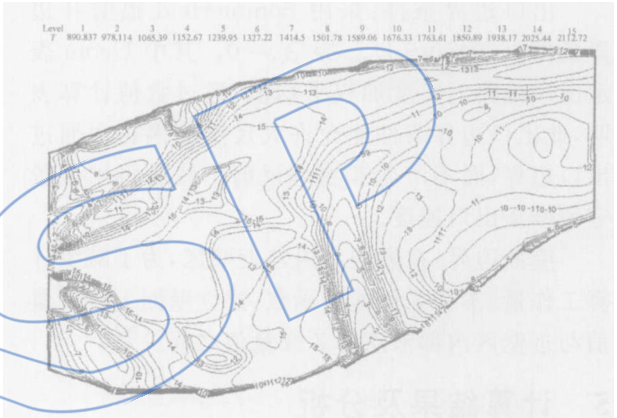


图 8 $K=33$ 掺混孔截面温度等值线图
Fig. 8 $K=33$ Contour of temperature (dilution hole)



图 6 同一直径不同位置的油珠轨迹
Fig. 6 Droplet trajectories of different ejecting fuel positions with the same diameter

图 7 为通过主燃孔 ($K=22$) 纵截面温度分布图,由图可知,从内外环上主燃孔进入气流给主燃区提供了燃烧所需的氧气,使旋流器后面已蒸发但还未完全燃烧的燃油充分燃烧,形成一个较高的高温区,从而达到主燃孔的作用;图 8 为通过掺混孔 ($K=33$) 纵截面温度分布图,此截面也是旋

流器中心截面,可以看出,旋流器中心形成的高温回流区成为稳定燃烧的点火源,从掺混孔进入的冷空气与高温燃气掺混,降低燃气温度,使燃烧室出口气流温度分布达到燃烧室后面燃气涡轮部件进口温度的要求。

图 9、图 10 和图 11 分别为 $I=5$ 、 $I=10$ 和 $I=13$ 截面燃油浓度等值线图,从图中可以看出,随着轴向距离的增加,燃油浓度逐步降低,燃油喷油直径逐渐变大,这是因为航空煤油经过空气雾化喷嘴以一定的角度喷出,在轴向燃油浓度为锥形,随着喷油距离的增加,燃油喷雾锥面直径变大,同时随着距离的增加,停留时间的增加,因此不断吸收热量,油珠不断破碎蒸发,燃油逐步蒸发燃烧,因此燃油浓度随着轴向距离的增加而逐渐降低。

图 12 为出口截面平均温度与所测量的温度的比较,从图中可以看出计算得到的温度比实验值要高,这是因为计算得到的为理想情况下的温度,而实际测量受很多实际因素的影响,因此计算得到的温度还是有一定的差别,但计算值与实验

值温度都是 h/H 在大约 $2/3$ 处,温度为最高,满足了燃烧室出口涡轮叶片的温度要求。图 13 为



图 9 $I=5$ 截面燃油浓度等值线图
Fig. 9 $I=5$ Contour of fuel concentration



图 10 $I=10$ 截面燃油浓度等值线
Fig. 10 $I=10$ Contour of fuel concentration

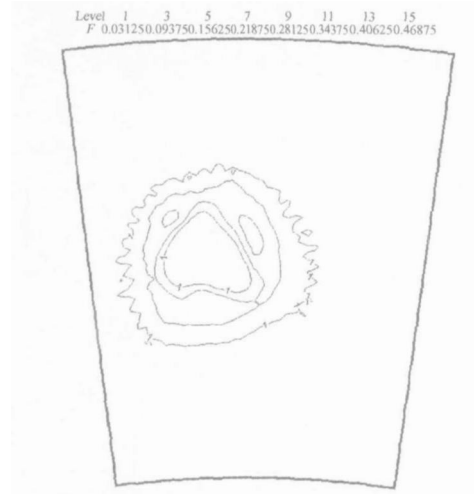


图 11 $I=13$ 截面燃油浓度等值线
Fig. 11 $I=13$ Contour of fuel concentration

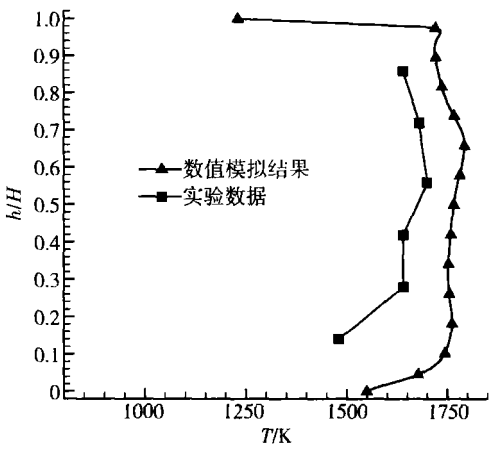


图 12 出口截面平均温度与实验值的比较
Fig. 12 Profiles of temperature at the outlet

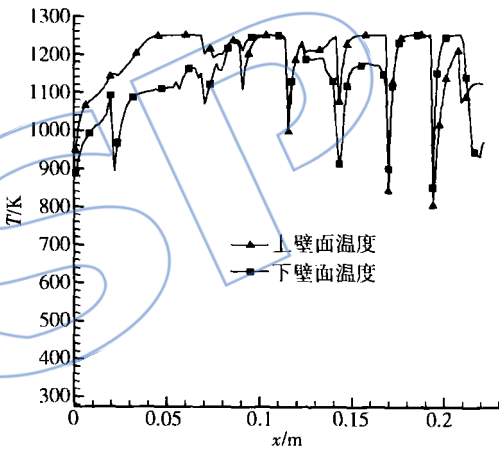


图 13 上下壁面温度的比较
Fig. 13 Distributions of wall temperature

上下火焰筒壁面温度的比较,可以看出上下壁温有很多锯齿形变化,这是由于壁面上气膜冷却缝隙对上下壁面温度的影响,当冷空气经气膜冷却缝隙进入火焰筒时,壁面附近的燃气温度降低,受壁面附近燃气温度降低的影响,壁面温度也相应降低,从而达到气膜冷却保护火焰筒壁面不致过热,因此形成了一系列的锯齿形温度分布。

6 结束语

本文在三维贴体坐标系下,采用欧拉 - 拉格朗日方法对环形燃烧室气液两相喷雾燃烧进行大涡模拟。采用 k 方程模型来模拟湍流亚网格尺度粘性,采用亚网格颗粒轨道模型来模拟两相喷雾燃烧过程中油珠的加热、蒸发及与空气的相互掺混过程,同时采用亚网格 EBU 燃烧模型来估算化学反应速率。通过对计算结果的分析以及与实验结果的比较,本文采用的三维贴体坐标系下的

两相喷雾燃烧模型能够真实反应实际燃烧室中的流动与两相喷雾燃烧过程,更好的了解燃烧室内喷雾燃烧过程中油珠与混气的相互掺混过程,为航空发动机的设计与研制提供依据。

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, Suresh M. A new dynamic one-equation sub-grid-scale model for large eddy simulations[R]. AIAA 95-0356, 1995.
- [3] Menon S, Pannala S. Subgrid simulations of reacting two-phase shear layers[R]. AIAA98-3318, 1998.
- [4] Thomas P D. Composite Three-dimensional Grids Generated by Elliptic Systems[J]. AIAA Journal, 1982, 20(9): 1195-1202.
- [5] Thompson J F. Grid Generation Techniques in Computational Fluid Dynamics[J]. AIAA Journal, 1984, 22(11): 1505-1523.
- [6] 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 Ying-wen, Zhao Jian-xing, Zhang Jing-zhou, et al. Large-eddy simulation of turbulent reaction flows in the combustor by three-dimensional body-fitted grid[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 219-222.
- [7] 雷雨冰, 赵坚行. 数值模拟环形燃烧室两相反应流场[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 6(3): 221-225.
Lei Yur-bing, Zhao Jian-xing. Numerical simulation of three-dimensional spray combustion in gas turbine combustor[J]. 2000, 6(3): 222-225.
- [8] Menon S. and Pannala S. Subgrid modeling of unsteady two-phase turbulent flows[R]. AAA 97-3113. 1997.
- [9] Avancha R V R, Pletcher R H. Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward step[R]. AIAA 2000-0542, 2000.