

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.003

贫油直喷燃烧室回火的数值研究^{*}

曹 敏, 张文普^{*}

(浙江大学 航空航天学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对燃烧稳定性中的回火问题,对贫油直喷燃烧室的回火特性进行了研究。燃烧中的回火指的是火焰从燃烧室传入到了预混区中的这样一种现象,它包含了声波、湍流、燃烧之间的复杂的相互作用,是燃烧研究中的关键问题之一。利用 Fluent 中的混合分数/PDF 平衡化学反应模型对贫油直喷燃烧室进行了大涡模拟,分别计算了冷态和热态下的流场,捕捉了贫油直喷燃烧室内回火的动态过程,其中亚格子模型采用 WALE 模型,燃油射流采用离散相模型。研究结果表明,大涡模拟能够较好地反映流场分布情况,贫油直喷燃烧室内存在中心回流区,模拟结果与实验结果吻合较好;贫油直喷燃烧室中的回火发生在中心流区域,回火时,中心回流区向上游移动,这促使了火焰的向上游传播,并最终导致了回火的发生。

关键词:燃气轮机;贫油直喷燃烧室;大涡模拟;回火;回流区

中图分类号:TH122;V43

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1111-06

Numerical investigation of flame flashback in LDI combustor

CAO Min, ZHANG Wen-pu

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of flashback in combustion stability, a large eddy simulation was used to investigate the flashback characteristic of lean direct injection combustor. The flashback here was referred to a phenomenon that the flame propagates from the combustor into the premixed zone, which contains complex interaction among the sound waves, turbulence and reactions. It is one of the key issues in the combustion research. The mixture fraction/PDF equilibrium chemistry model and discrete phase model with software Fluent were adopted to simulate the cold flow and hot flow, and the flashback was observed. WALE model was used as the sub-grid model. The results indicate that large eddy simulation can predict the flow field well, there exists a central recirculation zone in the LDI combustor, numerical results are in good agreement with experimental data, flame flashback in LDI combustor occurs around the centerline and during flashback, the central recirculation zone moves upstream, which pulls the flame upstream propagation, and finally leads to flashback.

Key words: gas turbine; lean direct injection (LDI) combustor; large-eddy simulation; flashback; recirculation zone

0 引 言

近年来,随着环境问题的日益突出和环保意识的不断增强,世界各国均制定了严格的大气污染物排放标准,低污染燃烧技术成为了具有发展前景的关键技术之一。在燃气轮机和航空发动机设计中,贫油直喷燃烧技术(LDI, Lean Direct Injection)因具有污染程度

低、燃烧效率高等优点^[1-2],已成为了当前燃烧技术发展的重点之一。但贫油直喷燃烧技术也有自身的局限性,那就是容易产生振荡燃烧、回火以及熄火等不稳定燃烧现象。其中,回火是指火焰从燃烧室内传入到预混区中的这样一种现象,它会使喷嘴等部件因温度过高被烧毁,甚至导致燃烧系统的崩溃。

许多专家学者都对回火问题进行了研究^[3-6],总结

收稿日期:2014-05-06

基金项目:国防基础科研计划资助项目(A1420080144)

作者简介:曹 敏(1989-),男,浙江金华人,硕士研究生,主要从事流体力学及燃烧传热方面的研究。E-mail:caomin6688@163.com

通信联系人:张文普,男,副教授,硕士生导师。E-mail:wpzhang@zju.edu.cn

出 4 种典型的回火机理,它们是边界层回火、中心流回火、燃烧不稳定引起回火以及燃烧诱发的旋涡破碎引起回火。Lewis and von Elbe^[7]研究了层流条件下的边界层回火,得出了回火的临界速度梯度表示方法。Guin^[8]对湍流火焰中心流回火进行了研究,得出这种回火是由于湍流火焰传播速度大于当地流动速度导致的;Keller 等^[9]人对截面为长方形、具有后台阶的燃烧室内回火现象进行了研究,发现了 3 种逐渐增强的不稳定现象,最后出现的强烈的不稳定引起了回火;Fritz 等人^[10]对旋流火焰的回火问题进行了研究,发现旋流火焰回火发生在中心流而不在边界层。实验中 LDV 的测量结果表明,稳态时中心流的轴向速度要远高于火焰的传播速度,如果没有其他因素的影响,不可能发生中心流回火。后经 LDV 测量证实,是由于燃烧诱发的旋涡破碎导致了中心流的速度发生了变化,进而引起回火。因此,他们认为 CIVB(燃烧诱发旋涡破碎)是旋流火焰回火的主要原因。

本研究以贫油直喷燃烧室^[11]为研究对象,应用 FLUENT 软件对燃烧室内的冷态和热态流场进行计算,然后改变入口条件和当量比来研究回火现象,分析回火时流场和火焰的相互作用。计算中采用的湍流模型为大涡模拟,其中亚格子模型为 WALE 模型;燃烧模型为混合分数/PDF 平衡化学反应模型;流场中的射流及雾化过程采用离散相模型。

1 物理模型和计算方法

1.1 物理模型

1.1.1 离散相方程

燃油的喷雾燃烧包括射流喷雾和燃烧两个过程,通常用分布函数 f 来对射流液滴进行描述。射流模型不仅考虑到了液滴间、液滴和气体以及液滴和固壁间的相互作用,而且还能计算由动量变化和蒸发等引起的独立变量的变化。射流方程的表达式为^[12]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_x \cdot (fv) + \nabla_v \cdot (fF) + \frac{\partial}{\partial r}(fR) + \frac{\partial}{\partial T_d}(fT_d) + \frac{\partial}{\partial y}(f\dot{y}) + \frac{\partial}{\partial \dot{y}}(f\dot{y}) = f_{\text{coll}} + f_{\text{bu}} \quad (1)$$

式中:分布函数 f —液滴的离散程度,它包括了 11 个独立变量、3 个位置变量 x 、3 个速度变量 v 、液滴半径 r 、温度 T_d 、时间 t 、形变量 y 及其对时间的导数 $\dot{y}$; $f(x, v, r, T_d, y, \dot{y}, t) dv dr dT_d dy d\dot{y}$ —在位置 x , 时间 t 时,在速度区间 $(v, v + dv)$, 半径区间 $(r, r + dr)$, 温度区间 $(T_d, T_d + dT_d)$, 形变参数区间 $(y, y + dy)$ 和 $(\dot{y}, \dot{y} + d\dot{y})$ 下的单位体积内的可能液滴数; $F = dv/dt$ —单个液滴的加速

度; R —液滴半径变化率;

f_{coll} 和 f_{bu} 是由液滴碰撞和破裂引起的。射流方程在模拟中通过离散相模型来求解。

1.1.2 亚格子模型

亚格子模型对大涡模拟的结果具有重要的影响。传统的 Smagorinsky 模型对近壁面处流动的模拟不能取得令人满意的结果,这主要是因为没有考虑到壁面对亚网格湍流黏性的影响。在这一点上, WALE 模型优化了近壁面处亚网格黏性的计算方法,使得预测结果更加合理、真实。

WALE 模型中涡黏度的定义如下:

$$\nu_t = (C_w \bar{\Delta})^2 \cdot G_\gamma^{3/2} / [(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + G_\gamma^{5/4}] \quad (2)$$

式中:黏性算子 $G_\gamma = S_{ij}^d S_{ij}^d$, 其中: $S_{ij}^d = (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2)/2 - \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2/3$, $\bar{g}_{ij} = \partial \tilde{u}_i / \partial \tilde{x}_j$; 模型常数 C_w 取为 0.325。

1.1.3 燃烧模型

针对贫油直喷燃烧室而言,空气经过叶片后与燃料混合,进入到燃烧室中燃烧,这种燃烧方式适合采用混合分数/PDF 平衡化学反应模型来计算。

混合分数/PDF 平衡化学反应模型假定化学反应已达到化学平衡状态,单元内的组分及其性质由湍流混合强度控制,所涉及的化学反应体系通过化学平衡来计算。该方法不直接求解组分和能量的输运方程,而是通过求解混合分数的输运方程来获得组分和温度场。混合分数的定义为:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (3)$$

式中: Z_i —元素 i 的质量分数; $Z_{i,ox}$ —氧化剂在入口处的值; $Z_{i,fuel}$ —燃料在入口处的值。

混合分数 f 是一个守恒的标量,包含时均项 $\bar{f}$ 和脉动项 f' , 可写作 $f = \bar{f} + f'$ 。时均混合分数 $\bar{f}$ 的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (4)$$

式中: S_m —指质量由液体燃料或反应颗粒传入气相中的源项; $\bar{v}$ —平均速度。

平均混合分数脉动均方值 $\overline{f'^2}$ 的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (5)$$

式中: σ_f 、 C_g 、 C_d —常数,分别取 0.85、2.86 和 2.0。

在计算中,湍流和化学反应之间的相互作用通过 PDF 模型来考虑。根据概率密度函数 $p(f)$ 可以计算出相关变量的时均值,计算表达式为:

$$\bar{\varphi}_i = \int_0^1 p(f) \varphi_i(f) df \quad (6)$$

式中: $\bar{\varphi}_i$ —组分摩尔分数、温度等。

1.2 几何模型及网格划分

本研究的计算模型为三维贫油直喷燃烧室,包括旋流器和燃烧室两部分。旋流器主要由6个叶片和收缩-扩张文丘里管构成,中心为燃料喷嘴,其三维模型如图1所示。叶片的内径为9.3 mm,外径为22.1 mm,叶片外缘与轴线的交角为60°。叶片的几何形状由方程决定,方程如下:

$$\tan\theta = r \cdot \tan\theta_0 / R_0 \quad (7)$$

式中: r —叶片上该点处的半径; R_0 —叶片外缘处的半径; θ_0 —叶片外缘处与中心轴线的夹角。

燃烧室是一长方体,其横截面为50.8 mm × 50.8 mm的正方形。空气流过6个叶片后在扩张段与燃料混合,进入燃烧室中燃烧。建模时坐标原点设在旋流器出口平面的中心,轴线方向为Z轴。

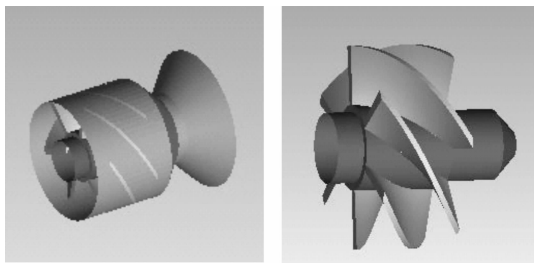


图1 旋流器

网格划分时对叶片周围以及喷嘴附近等流动剧烈的地方进行了加密处理,同时对壁面处的网格进行了细化。网格总数为 1.14×10^6 ,以六面体网格为主,网格划分如图2所示。

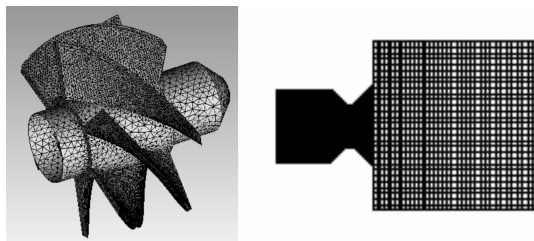


图2 网格划分

1.3 边界条件

本研究先对贫油直喷燃烧室进行了冷态计算,计算中给定空气速度为20.14 m/s,湍流强度为5%,密度为 1.19 kg/m^3 ,温度为294.28 K;然后引入颗粒相计算热态流场,在热态计算中,连续相的边界条件与冷态计算时相同,颗粒相的设置如下:燃料采用 $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ 作为煤油的替代物^[11],液滴初始速度为20 m/s,温度为350 K,颗粒粒径使用实验中对Parker Hannifin LDI燃

油喷嘴测得的数据,它满足Rosin-Rammler分布,在 $4.18 \mu\text{m} \sim 93.2 \mu\text{m}$ 之间18组分布,其SMD(Sauter Mean Diameter)为 $32 \mu\text{m}$,喷雾锥度为90°,质量流率为 $4.15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 。出口为压力出口边界条件,壁面条件设为绝热、无滑移。

2 计算结果与讨论

2.1 冷态计算结果

本研究将计算结果与实验结果^[13]进行比较,冷态轴向速度沿径向的分布如图3所示。图3表示的是不同轴向位置处的轴向速度沿径向的分布。从图3中可以看出,计算值与实验值吻合的较好,除了3 mm轴向位置处有一定的偏差,其余地方曲线的变化规律与实验结果基本一致。造成3 mm横截面位置处出现差异的原因,主要是由于在靠近旋流器出口处流动的变化非常剧烈,计算中使用的网格不能够很好地捕捉该处的流动特征而引起的。从图3中还可以看到,回流速度峰值随着轴向距离的增加逐渐减小。

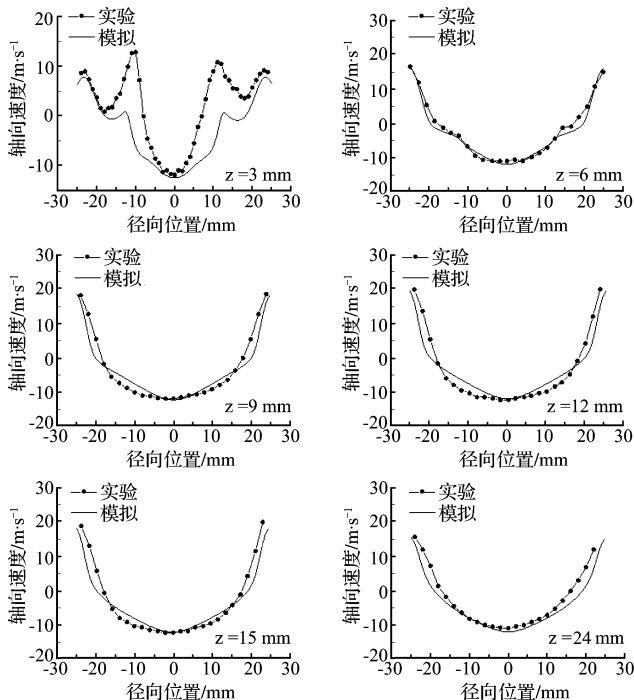


图3 冷态轴向速度沿径向的分布

中截面上的轴向速度分布图如图4所示。图4直观地表示了中心回流区的结构。从图4中可以看出,在燃烧室靠近入口的位置,形成了中心回流区,回流区基本围绕着重心线分布。回流区的形成与强旋流有直接的关系。本研究计算模型的旋流数在1.0左右,属于强旋流。在强旋流的作用下形成了足够大的逆压梯度,导致发生了涡的破碎(vortex breakdown),产生逆

向流动从而形成中心回流区。中心回流区是旋流燃烧器的一个典型特征,控制着冷的来流反应物和热的燃烧产物之间的混合程度,它对稳定火焰起着至关重要的作用。

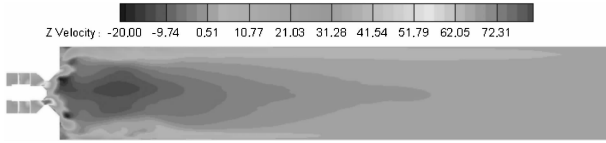


图 4 中截面上的轴向速度分布图

2.2 热态计算结果

2.2.1 稳定火焰的计算

燃烧室的热态计算是在冷态计算的基础上,加入了离散相模型来考虑两相之间的热量/质量传递以及相互作用,使用的燃烧模型为混合分数/PDF 平衡化学反应模型。在计算中,空气速度为 20.14 m/s,燃料的质量流率为 4.15×10^{-4} kg/s,此时当量比为 0.75。

燃烧室内的温度分布如图 5 所示。从图 5 中可以看到此时火焰处于稳定状态,呈紧凑型结构,并位于燃烧室入口附近。对应的 OH 基分布如图 5(b) 所示。文献[14-15]提出 OH 基的分布可以作为判断火焰锋面的标准,因为 OH 基作为燃烧中间产物,其浓度发生突然增加的地方正是火焰锋面所在的位置。因此,从图 5 中的 OH 分布可以看出,此时火焰锋面位于燃烧室入口附近。

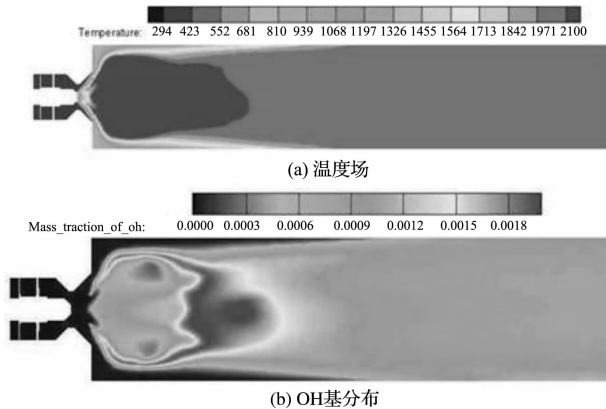


图 5 稳定火焰的温度场及 OH 基分布

取不同横截面处径向方向上的一系列点,作轴向速度和径向速度沿径向的分布图,分别如图 6(a)、6(b) 所示。图 6(a) 中,在 $Z = 3$ mm 位置处,计算得出的速度峰值要高于实验值,造成这种不同主要有实验和模拟两方面的原因。在实验研究中,Cai 等人^[13]提到对旋流器出口附近的气相测量比较困难,因为存在着大动量的小液滴,它们并不能很好地跟随气相的流动;特别是在有化学反应的情况下,燃烧的热释放加快

了流场的流动,这使得数据的测量更加艰难。另外,由于喷嘴附近流动十分复杂,包括液滴的雾化和蒸发等过程,要准确地模拟这些现象比较困难,这导致了喷嘴附近的模拟结果与实验值存在一定的偏差。在距离燃烧室入口较远的位置,LES 计算结果和实验结果吻合的较好。LES 对中心回流区径向宽度的预测稍大于实验值,但这种差距随着轴向距离的增加逐渐减小;从图 6(a) 还可以看出,随着轴向距离的增大,速度分布变得更加平坦,与实验结果也更加接近。

图 6(b) 中,LES 得出的径向速度分布与实验结果定性的一致,曲线变化规律相同,但在速度峰值大小的预测上存在差异,但这种差异随着轴向距离的增加逐渐缓解。在 $Z = 3$ mm 处,LES 计算的径向速度峰值大小要高于实验值,产生这种现象的原因与对轴向速度的分析相同;而在 $Z = 60$ mm 处,计算值与实验值则基本相同。

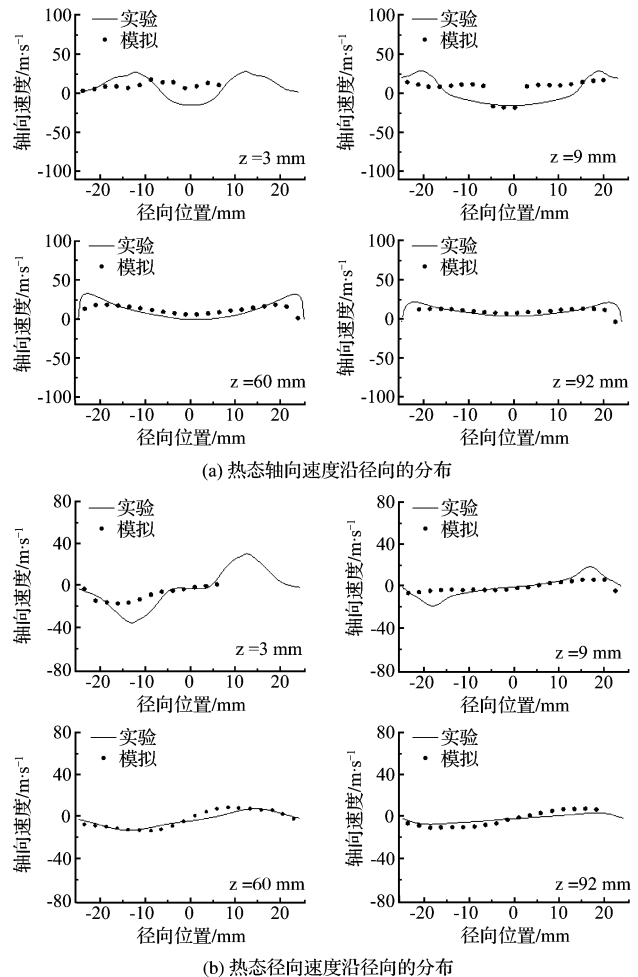


图 6 热态轴向速度和径向速度沿径向的分布

2.2.2 回火的研究及分析

本研究在得到上述的稳定火焰后,将空气速度改变为 5.1 m/s,燃料的质量流率改变为 1.4×10^{-4} kg/s,此时当量比为 0.98,其他条件保持不变。以下各图

中标注的时间是以改变工作条件后开始计时的,即稳定火焰对应于 $t=0$ 。

回火过程中温度和 OH 基随时间的变化过程如图 7(a)、7(b)所示。从图 7(a)、7(b)中可以看到,火焰进入到了旋流器的扩张段内,几乎到达喷嘴的位置,这说明了贫油直喷燃烧室内发生了回火现象。

回火时,中心截面上的轴向速度随时间的变化过程如图 7(c)所示。稳定火焰对应于 $t=0$ 时刻,从图 7(c)中可以看出此时中心回流区的位置紧靠燃烧室入口平面,在旋流器的扩张段内未出现回流现象。在改变入口条件后($t>0$),回流区开始向上游移动,并最终几乎到达了喷嘴位置。旋流器扩张段内回流区的形成,使得

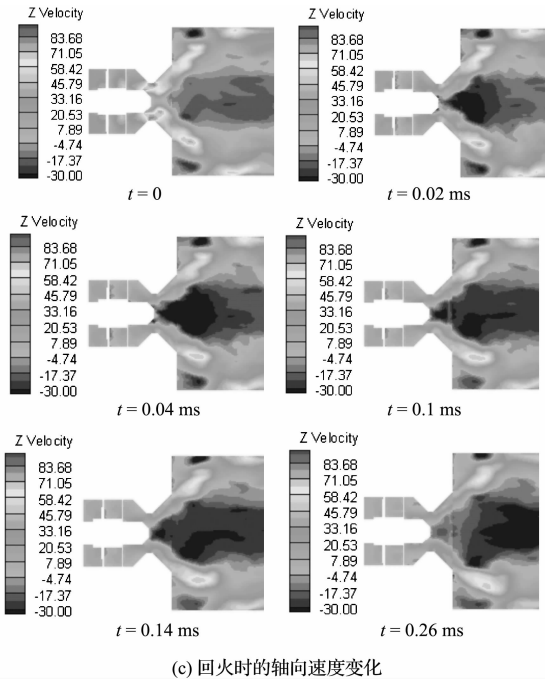
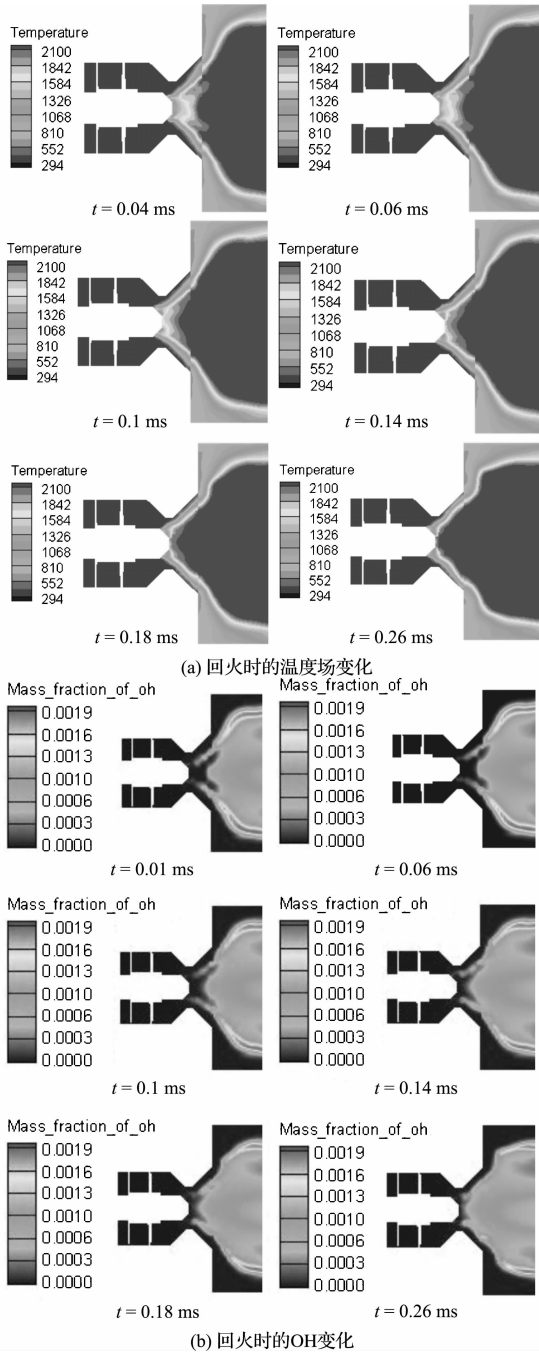


图 7 回火时温度场(a)、OH 基(b)和轴向速度(c)的变化过程

该区域中的轴向速度发生了明显的变化,与之前相比降低了许多。对比分析图 7(a)和图 7(c)中 $t=0.04$ ms, $t=0.1$ ms, $t=0.14$ ms 时中截面上温度场和轴向速度的分布,可以看出上游位置处产生回流运动的时间要早于火焰锋面到达该位置的时间,火焰跟随着回流区向上游运动,这说明了上游位置处回流区的产生为火焰的向上游传播创造了条件,最终导致了回火的发生。

从图 7(a)、7(b)可以看出,回火发生在中心流区域。结合图 7(c)可以分析得出,在整个回火过程中,旋流器扩张段壁面附近的轴向速度始终为较高的数值,并且这部分区域的 OH 基没有发生突变,始终很低,表明在此处没有剧烈的化学反应的发生,未出现火焰的向上游传播,即没有发生边界层回火。从图 7(c)可以看出,在回火过程中,轴向速度值没有出现大幅度的振荡因而也不属于燃烧不稳定性引起的回火。同时,从图 7(c)中还可以看到,回火时中心回流区出现了较大的变化,从燃烧室向喷嘴处移动。由于在当量比超过了临界当量比时,燃烧的作用会使得上游处的流线发生伸张,从而引起旋涡破碎发生在上游位置处,进而导致回流区向上游移动,由此推断本次计算中观察到的回火现象可能是由燃烧诱发的旋涡破碎所引起的。

3 结束语

(1)大涡模拟很好地捕捉了贫油直喷燃烧室内的流动特性,在强旋流的作用下,燃烧室内形成了中心回

流区;燃料和空气的质量流量和当量比与回火有重要影响,在稳定火焰的状态下,减小流量、增大当量比会引发回火。

(2)贫油直喷燃烧室内的回火发生在中心流。在回火过程中,中心回流区的向上游移动先于火焰的传播,火焰随着回流区向上游运动,最终导致了回火的发生。

(3)通过合理控制燃料和空气的流量可以预防回火的发生,同时,在设计时应尽量避免混合区内有较低的轴向速度区域存在以提高抗回火的能力。

参考文献(References):

- [1] TACINA R R. Low NO-x potential of gas turbine engines [J]. **AIAA**,1990(90):50-53.
- [2] SHAFFAR S, SAMUELSEN G. A liquid fueled, lean burn, gas turbine combustor injector [J]. **Combustion science and technology**,1998,139(1):41-57.
- [3] SOMMERER Y, GALLEY D, POINSOT T, et al. Large eddy simulation and experimental study of flashback and blow-off in a lean partially premixed swirled burner[J]. **Journal of Turbulence**,2004,5(3):37-37.
- [4] KIESEWETTER F, KONLE M, SATTELMAYER T. Analysis of combustion induced vortex breakdown driven flame flashback in a premix burner with cylindrical mixing zone [J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**,2007,129(4):929-936.
- [5] KIESEWETTER F, HIRSCH C, FRITZ J, et al. Two-dimensional flashback simulation in strongly swirling flows [J]. **ASME Turbo Expo**,2003(2):293-300.
- [6] KONLE M, WINKER A, KIESEWETTER F, et al. CIVB flashback analysis with simultaneous and time resolved PIV-LIF measurements [C]. 13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics,2006.
- [7] LEWIS B, VON E G. Stability and structure of burner flames [J]. **The Journal of Chemical Physics**,2004,11(2):75-97.
- [8] GUIN C. Characterisation of autoignition and flashback in premixed injection systems [C]. RTO Meeting proceedings, 1999.
- [9] KELLER J, VANEVELD L, KORSEHELT D, et al. Mechanism of instabilities in turbulent combustion leading to flashback [J]. **AIAA Journal**,1982,20(2):254-262.
- [10] FRITZ J, KRONER M, SATTELMAYER T. Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone [J]. **Journal of engineering for gas turbines and power**,2004,126(2):276-283.
- [11] IANNETTI A C, LIU N-S, DAVOUDZADEH F. The effect of spray initial conditions on heat release and emissions in LDI CFD calculations [C]. 46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibi,2008.
- [12] JIANG X, SIAMAS G, JAGUS K, et al. Physical modeling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays [J]. **Progress in energy and combustion science**,2010,36(2):131-167.
- [13] CAI J, JENG S-M, TACINA R. The structure of a swirl-stabilized reacting spray issued from an axial swirler [C]. 43 rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [14] TANGERMANN E, PFITZNER M, KONLE M, et al. Large-eddy simulation and experimental observation of combustion-induced vortex breakdown [J]. **Combustion Science and Technology**,2010,182(4-6):505-516.
- [15] KONLE M, SATTELMAYER T. Interaction of heat release and vortex breakdown during flame flashback driven by combustion induced vortex breakdown [J]. **Experiments in fluids**,2009,47(4-5):627-635.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

曹 敏,张文普. 贫油直喷燃烧室回火的数值研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1111-1116.

CAO Min, ZHANG Wen-pu. Numerical investigation of flame flashback in LDI combustor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(9): 1111-1116.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>