

基于PaSR模型的低旋流燃烧大涡模拟^{*}

赖正鑫, 肖隐利, 宋文艳

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了深入理解低旋流流场特征和燃烧稳定性, 基于OpenFOAM平台, 采用动态 k 方程模型和有限速率PaSR模型对甲烷/空气预混低旋流燃烧进行了大涡模拟, 研究了气流入口速度、当量比和压力等流场参数对流场结构和燃烧非稳态特性的影响, 分析了流场大尺度结构与火焰相互作用。结果表明, 流场结构和火焰抬升高度受入口速度影响较小, 流场和火焰形态能够保持自相似性; 随着当量比和压力提高, 流场扩张性增强并在燃烧区下游产生回流区, 火焰稳定不依赖回流区, 根部火焰锋面形状由U形转变为W形, 火焰抬升高度降低。火焰锋面稳定在剪切层, 剪切层产生的周期性有序涡结构引起当地流场速度脉动和火焰表面褶皱, 反映了流场非稳态特性; 通过剪切层监测点瞬时轴向速度分析, 涡结构特征频率随速度增大而提高, 由250Hz提高至300Hz, 随当量比和压力提高而降低, 由250Hz降低至125Hz。

关键词: 低旋流燃烧; 非稳态特性; 有序结构; 特征频率; 大涡模拟

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 10-2260-16

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190397

Large Eddy Simulation of Low Swirl Combustion Based on PaSR Model

LAI Zheng-xin, XIAO Yin-li, SONG Wen-yan

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For the purpose of providing the scientific insights of the flow features and flame stability of low swirl combustion, large eddy simulations of premixed methane-air low swirl combustion are conducted using dynamic k -equation subgrid model and finite chemistry model PaSR under several flow conditions including different bulk velocity, equivalence ratio, and pressure based on OpenFOAM. From experimental measurements and large eddy simulation predictions, flow conditions effects on low swirl flow field structure and unsteady characteristics of combustion are performed. Additionally, interaction between large scale vortex structures and flame surface is also discussed. Flow field structure and flame lift off are scarcely influenced by bulk velocity, which suggests the self-similar feature of low swirl combustion under different inflow velocities. As increase of equivalence ratio and pressure, flow streams diverge and generate a recirculation zone in post-flame zone. Besides, the flame base exhibits a transformation from U shape to W shape with flame lift off distance decreases. The flame front is not dominated by recirculation zone but stabilizes in the shear layers, in which coherent vortex structures are periodically generated and result in both local velocity fluctuating as well as flame surface wrinkling. Characteristic frequencies of unsteady shear layer vortex structures are evaluated based on point data analyzing. The results

^{*} 收稿日期: 2019-06-11; 修订日期: 2019-09-09。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51576164)。

通讯作者: 赖正鑫, 博士生, 研究领域为航空发动机燃烧与流动。E-mail: laizhengxin2@163.com

引用格式: 赖正鑫, 肖隐利, 宋文艳. 基于PaSR模型的低旋流燃烧大涡模拟[J]. 推进技术, 2020, 41(10): 2260-2275.
(LAI Zheng-xin, XIAO Yin-li, SONG Wen-yan. Large Eddy Simulation of Low Swirl Combustion Based on PaSR Model[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10): 2260-2275.)

show that the characteristic frequencies raise from 250Hz to 300Hz with the increase of bulk velocity, and decline from 250Hz to 125Hz with the increase of equivalence ratio and pressure.

Key words: Low swirl combustion ; Unsteady characteristics ; Coherent structure ; Characteristic frequency ; Large eddy simulation

1 引言

现代航空发动机和燃气轮机燃烧室广泛采用强旋流组织燃烧,旋流在径向和轴向产生压力梯度,轴向速度降低导致轴向气流滞止和回流,这是强旋流流场中回流区产生的原因^[1-2],强旋流通过回流区高温气体回流持续引燃新鲜混气并维持火焰稳定。贫燃预混火焰能够降低燃烧温度,减少 NO_x 排放,在实际燃烧系统中应用广泛,但由于其当量比偏离化学恰当比而接近贫燃极限,容易引发火焰不稳定。研究表明贫预混火焰对于流场参数脉动和外部扰动都十分敏感,脉动可能导致燃烧释热率脉动,诱发声场振荡,多个物理场的脉动耦合使得燃烧不稳定增强,如声波、旋涡和熵波与火焰的相互作用诱发热声耦合振荡的产生等^[3-4]。热声耦合振荡加剧了火焰的不稳定性,并且产生的大幅度压力振荡可能会对设备本身的机械负载和热应力负载产生不利影响。强旋流不仅延长了高温气体在回流区中的驻留时间,导致污染物尤其是热力型 NO_x 排放量增加,并且容易诱发进动涡核(PVC)等流动不稳定,增强流场振荡,对燃烧稳定性产生不利影响。

低旋流燃烧技术(LSC)具有 NO_x 排放低、燃烧效率高、稳定性好的特点^[5],成为解决贫预混燃烧稳定性问题的理想方案之一,近年来获得了广泛关注^[6]。旋流器下游形成流动扩张区,气流速度在轴向压力梯度作用下持续衰减,Cheng等^[7]通过实验研究了常温、常压下低旋流燃烧的流场结构,发现在不同速度下流场保持自相似特性和自适应调节能力,预混火焰锋面不会随速度的变化而发生较大移动,而稳定在预混燃烧波传播速度与当地气流速度相等的位置,缩短了气体在高温区域驻留时间,降低了污染物生成。Hazeer等^[8]将LSC技术应用于索拉透平公司T70燃气轮机全环型燃烧室,实现了燃烧室抄底排放。Plessing等^[9]采用OH-PLIF和PIV最早开展了低旋流甲烷空气预混火焰湍流火焰传播速度的测量,建立了湍流火焰速度 S_t 与层流火焰速度 S_L 的关系式,进一步揭示了低旋流火焰的稳定机理。Day等^[10-11]通过光学测量研究了预混甲烷和氢气LSC火焰的局部褶皱特征,详细给出了LSC的火焰稳定机理和火焰前锋的特性。Karthik

等^[12]基于火焰自发光图像分析了LSC的火焰结构,测量了火焰抬升距离和扩张角随压力的变化,表明火焰形状在高压下随当量比变化更加敏感。

Cheng等^[13]的实验表明,LSC流场中旋涡破碎不足以产生强烈的回流,回流区的产生与否与混气成分组成、化学当量比、雷诺数以及几何结构相关,因而对于火焰稳定几乎没有影响。然而流场中的非稳态特征如速度和压力脉动、大尺度相干结构等却对低旋流燃烧特性和火焰形态有重要影响。Huang等^[14]通过实验研究表明,位于剪切层的环形涡结构使火焰边界不稳定并因此产生燃烧释热率波动和热声耦合。Tachibana等^[15]进一步说明火焰不稳定产生的原因在于新鲜混气与火焰之间的周期性运动的旋涡的作用,并且不稳定强度对于当地当量比分布极为敏感。Davis等^[16]研究了燃料性质对低旋流燃烧热声耦合的影响,表明加入氢气增加了压力的波动。Emadi等^[17]采用OH-PLIF研究了不同频率压力波动对火焰的影响,观察到了压力波与火焰表面的相互作用引起火焰表面曲率概率分布变化,并对比了剪切层和火焰根部的不同声学模态火焰表面密度(FSD)的差异。

随着湍流-燃烧相互作用研究的逐渐深入以及湍流燃烧模型的发展,数值模拟成为实验测量之外的重要研究手段。采用商业软件ANSYS Fluent基于雷诺平均(RANS)的部分预混燃烧模型,邓洋波等^[18-19]采用研究了低旋流燃烧特性和流场结构特征;Ouali等^[20-21]和柳伟杰等^[22]研究了当量比对低旋流燃烧和流动特性的影响,观察到了高当量比条件下中心回流区的产生。陈立等^[23-24]研究了速度、温度和压力等不同入口条件下的火焰稳定性,分析了低旋流流场结构以及火焰稳定性机理。由于燃烧过程的非稳态本质特征,RANS方法已经难以满足湍流燃烧过程数值模拟的需求。介于直接数值模拟(DNS)和RANS之间,大涡模拟(LES)能够在可接受的计算成本下获得比RANS更加准确的模拟结果,能够准确捕捉大尺度结构生成和演化等非稳态特征,近年来迅速发展成为模拟流动和燃烧最具潜力的方法^[25-26]。Petersson等^[27]和Nogenmyr等^[28-29]结合PIV,OH-PLIF和LES研究了常温常压条件下低旋流火焰特征,实验

观察到多种火焰形态,中心火焰锋面结构与层流预混火焰相似,剪切层存在分层燃烧,火焰不稳定并伴有局部火焰空洞;数值模拟采用有限速率部分搅拌反应器模型(PaSR)和G方程火焰面模型,准确捕捉到精细的流场结构和动态火焰特性,与实验结果相符。Nogenmyr等^[30]和Carlsson等^[31-32]采用激光多普勒测速技术(LDV)、OH-PLIF和相干反斯托克斯拉曼散射技术(CARS)结合G方程火焰面模型大涡模拟研究了低旋流火焰结构和火焰稳定机理,研究发现由于剪切层流动与火焰锋面的相互作用,大尺度褶皱火焰锋面存在周期性的生成和破坏;剪切层涡结构的产生与气流和火焰中循环产生的特定相干结构密切相关,有助于剪切层火焰的稳定。Shahsavari等^[33]采用动态增厚火焰模型(DTF)对不同当量比低旋流火焰进行了模拟,研究了当量比对流场大尺度相干结构和流场稳定性的影响。

为进一步在更加宽广的工作范围理解低旋流非稳态流动特征与燃烧特性及其相互影响,本文基于Nogenmyr等^[30]的实验结果,针对不同来流速度、当量比和压力等流场条件进行了大涡模拟,研究了流场结构、剪切层涡结构和火焰形态的演化规律,分析了流场参数对低旋流燃烧非稳态特性的影响。

2 数值模拟方法

2.1 LES方法及动态 k 方程亚网格模型

本文采用动态 k 方程模型作为LES亚网格模型,由于不假设局部亚网格能量生成和耗散率平衡, k 方程模型被认为在局部能量平衡不满足的区域比代数模型有更好的预测性能^[34]。三维反应流的控制方程,包括质量、动量、化学反应组分以及能量的守恒方程,用以描述对流、扩散以及化学反应^[35],具体为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\tau}_{ij} - \tau_{ij}^{\text{sgs}}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} - \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) \right) + \bar{\omega}_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}_s}{\partial x_i} - \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{h}_s - \tilde{u}_i \tilde{h}_s) \right) + \tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \bar{\omega}_T \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ρ 为密度, p 为压力, Y_k 为 k 组分的质量分数, h_s 为混合物显焓, Sc 和 Pr 分别为Schmidt数和Prandtl数, $\bar{\omega}_k$ 和 $\bar{\omega}_T$ 分别为组分和能量的化学反应源项。式

(2)中 τ_{ij} 为亚网格应力项,可以表示为

$$\tau_{ij}^{\text{sgs}} = -2\mu^{\text{sgs}} \tilde{S}_{ij} + \frac{2}{3} k_{\text{sgs}} \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\mu^{\text{sgs}} = \bar{\rho} C_k \Delta \sqrt{k_{\text{sgs}}} \quad (6)$$

式中 $\tilde{S}_{ij}$ 为应变率, μ^{sgs} 为亚网格粘度,本文取 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 为LES滤波宽度。亚网格湍动能 k_{sgs} 在 k 方程模型中通过其输运方程求得^[34]

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_{\text{sgs}}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial k_{\text{sgs}}}{\partial x_i} = -\tau_{ij}^{\text{sgs}} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \\ C_\epsilon \frac{k_{\text{sgs}}^{3/2}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_k}{\sigma_k} \frac{\partial k_{\text{sgs}}}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 σ_k 通常取1, C_k 和 C_ϵ 为两个模型参数,为更加合理地预测出湍动能,增强模型适用性,两个模型参数通过动态方法给出合理的值^[36]。

2.2 PaSR燃烧模型

化学反应是高度非线性的,经过滤波平均后产生了重要的高阶相关项如组分和能量的反应源项 $\bar{\omega}_k$ 和 $\bar{\omega}_T$,湍流燃烧模型关键在于准确地模化高阶相关项^[37]。本文采用PaSR模型模化化学反应相关源项,PaSR模型同时考虑了微尺度湍流过程和化学反应对燃烧的影响。细微结构的特征尺度相比于LES滤波尺度很小,因而对于一个网格单元,可以看成包含两部分的反应器:混合良好的化学反应区(R),不参与化学反应但与 R 进行质量和能量交换的区域(N)。因而网格单元的平均特性如组分浓度以及平均反应速率等可以表示为

$$Y_k = (1 - \kappa) Y_k^N + \kappa Y_k^R \quad (8)$$

$$\bar{\omega}_k = \kappa \dot{\omega}_k \quad (9)$$

$$\kappa = \frac{\tau_{\text{ch}}}{\tau_m + \tau_{\text{ch}}} \quad (10)$$

式中 κ 为反应区体积分数,反映了微尺度湍流过程与化学反应的相互作用。 $\dot{\omega}_k$ 和 $\bar{\omega}_k$ 为 k 组分在反应区的反应速率和网格平均反应速率。化学反应时间尺度 τ_{ch} 由反应动力学决定,分子混合时间尺度 τ_m 由湍流微尺度运动过程决定。 τ_{ch} 和 τ_m 表达式^[38]为

$$\frac{1}{\tau_{\text{ch}}} = \max \left\{ \frac{-\dot{\omega}_{\text{fuel}}}{Y_{\text{fuel}}}, \frac{-\dot{\omega}_{\text{O}_2}}{Y_{\text{O}_2}} \right\} \quad (11)$$

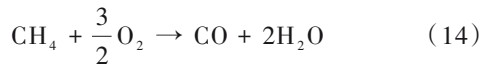
$$\tau_m = C_{\text{mix}} \sqrt{\frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho_\epsilon}} \quad (12)$$

式中 C_{mix} 为与湍流时间尺度相关模型参数。

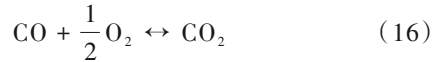
模型中化学反应释热源项 $\overline{\dot{\omega}_T}$ 通过组分与反应生成焓计算得到

$$\overline{\dot{\omega}_T} = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \overline{\dot{\omega}_k} \quad (13)$$

采用简化的甲烷两步反应机理来描述化学反应及 Arrhenius 速率,简化机理基于 GRI-Mech 2.11,对于甲烷-空气预混低旋流燃烧的适用性和准确性已得到验证^[27-29,33]



$$\dot{\omega}_1 = \rho^{1.5} A_1 e^{-T_{a1}/T} Y_{\text{CH}_4}^1 Y_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (15)$$



$$\dot{\omega}_2 = \rho^{1.5} A_2 e^{-T_{a2}/T} Y_{\text{CO}}^1 Y_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (17)$$

式中 $A_1 = 1.91 \times 10^9 \text{ m}^{1.5} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1.5} \text{ mol}$, $T_{a1} = 10072 \text{ K}$, $A_2 = 14.01 \times 10^8 \text{ m}^{1.5} \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1.5} \text{ mol}$, $T_{a2} = 6047 \text{ K}$ 。

2.3 计算域网格划分与计算方法

根据 Petersson 等^[27]和 Carlsson 等^[31]的实验构型,如图1所示,甲烷/空气预混气流经过旋流器内外两个通道,其中外侧为8个旋流叶片组成的环形旋流通道,旋流叶片出口安装角 $\alpha=37^\circ$,直径 $D=50 \text{ mm}$,中心为轴向射流通道的。实验测量显示外部旋流通道和中心射流通道的质量流量之比约为 1.5:1,旋流数 $S \approx 0.55$,当量比为 0.62。实验在 $T=300 \text{ K}$, $p=0.1 \text{ MPa}$ 条件下进行,燃烧器出口外部设置 600mm 直径过滤空气伴流,燃烧器出口设计为楔形,避免燃烧器出口处气流混合时流通面积变化影响。计算域为长 400mm,直径 400mm 的圆柱形区域,为减少旋流器叶片通道内流动的计算,对进口边界进行了简化,将预混气流

进口设置在旋流通道出口,环形旋流与轴向射流掺混长度 $L_r=60 \text{ mm}$,根据 LDV 结果分别给定环形旋流、射轴向流和空气伴流的特征轴向速度 v_1, v_2 和 v_3 ,并通过 $v_s = v_1 \cdot \tan \alpha$ 计算旋流的切向速度^[21]。

计算域离散采用非均匀结构网格,在燃烧器出口附近及剪切层进行了网格加密,总体网格单元数量约 2.8×10^6 ,图2展示了网格中心剖面。根据实验结果,燃烧区主要位于 $4.4D \times 2.4D \times 2.4D$ 区域,在此区域内网格单元尺寸设置为 1.5mm,这与根据 LDV 测量结果估计得到的燃烧器出口附近流场泰勒尺度 l_λ 相近。泰勒尺度 $l_\lambda = (10\nu k/\epsilon)^{0.5}$ 为湍动能耗散的特征尺度,表征了湍流流动中黏性耗散开始影响旋涡的长度尺度,因而作为 LES 的滤波尺度是合理的。在 $6D \times 4D \times 4D$ 区域,网格单元尺寸为 1.5~2.5mm;远离火焰区的计算域出口边界和侧面边界区域对燃烧反应影响很小,计算网格稀疏,网格单元尺寸约 3.0~4.0mm。

本文大涡模拟基于 OpenFOAM 开源 CFD 平台,采用有限体积法离散求解控制方程,扩散项采用二阶中心差分格式,对流项采用二阶 TVD 中心差分格式,时间项采用一阶隐式 Euler 格式,速度-压力耦合求解采用 PISO 算法,计算过程中动态调整时间步长,保证最大 Courant 数 < 0.5 ,时间步长 $\Delta t \approx 15 \sim 20 \mu\text{s}$ 。本文以低旋流火焰 LSF1 为基础,对多个状态的低旋流流动和燃烧进行了大涡模拟,研究了不同进口速度 (6.2m/s, 9.3m/s),不同当量比 (0.62, 0.7, 0.8, 1.0) 以及不同压力 (0.1MPa, 0.8MPa) 条件对低旋流流动和燃烧特性的影响。其中进口所有变量除压力外采用 Dirichlet 条件,压力采用 Neumann 条件;出口所有变量除压力外采用 Neumann 条件,压力采用 Dirichlet 条件,所有壁面看作无滑移壁面,周向伴流空气出口采用自由流边界。

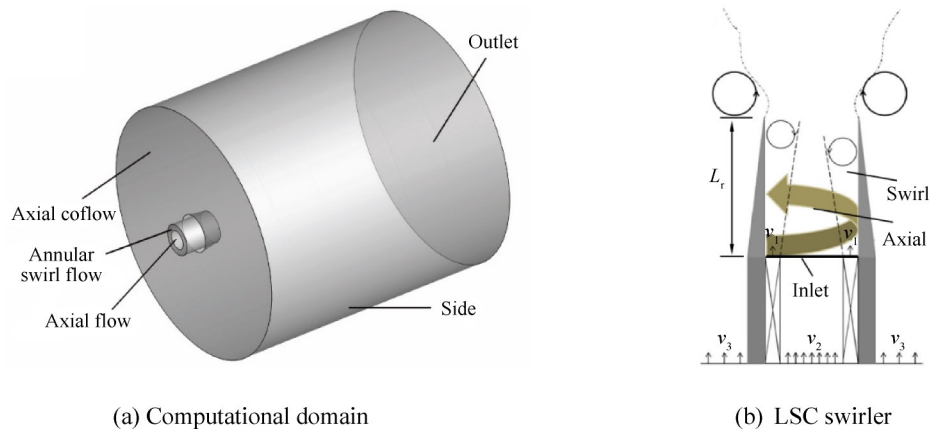


Fig. 1 Sketch of computational domain and LSC swirler^[31]

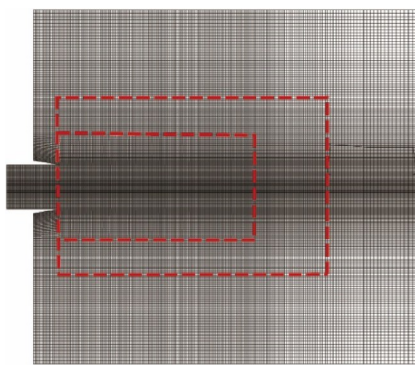


Fig. 2 Central section of computational grid

3 结果分析

3.1 数值方法验证

由于中心轴向射流与旋流以及旋流与外部伴流混合,流场中形成了内外两个剪切层,如图1所示,剪切层是LSC流场的重要特征,对燃烧特性有很大影响。本文以稳态RANS结果作为LES冷态初场,流场充分发展后开始统计和采样,统计和采样时间至少 5τ ,其中 $\tau=0.1s$ 为流场域特征流通时间。为验证计算网格的适用性,在外剪切层附近($X=50mm, r=35mm$)设置湍动能监测点,图3给出了监测点瞬时湍动能变化序列及相应频谱。图中可见在充分发展的流场中湍动能随时间平稳波动,湍动能的频率衰减符合Kolmogorov的 $-5/3$ 次方律,表明计算结果能够合理预测惯性子区中特性,因而计算网格满足LES计算湍流场的要求。

为验证数值模型的准确性,将LES统计平均结果与Nogenmyr等^[29]的实验数据和模拟结果进行了对比。Nogenmyr等^[29]同时采用了PaSR模型(F-LES)和G方程火焰面模型(G-LES)对低旋流燃烧实验构型LSF1进行了大涡模拟,为了研究进口边界条件对燃烧流场的影响,在G-LES中采用了两种方法对进口速度进行描述:(1)根据燃烧器出口上方1mm处的PIV测量结果作为边界条件,称为测量边界(M-BC)。

(2)单独对旋流器通道内流动进行模拟,根据旋流器叶片下游的速度采样统计结果作为边界条件,称为模拟边界(S-BC)。本文基于LSF1实验及模拟结果,通过改变进气速度、当量比和压力,研究了流场参数对低旋流流场结构和燃烧特性的影响,本文LES模拟结果以PaSR-LES表示。

图4和图5分别给出了六个轴向位置处的无量纲轴向速度和切向速度分布剖面。图中可见燃烧器出口下游的发散流场,气体流出后速度略有加速,最大轴向速度约 $2U_0$ (11.2m/s),而后逐渐衰减,速度峰值位置沿径向移动;速度脉动峰值随流场发展被逐渐减小。本文模拟准确预测了轴向速度的分布,仅在靠近燃烧器出口区域有稍高预测,整体来看与F-LES结果相近。在 $X=0.2D$ 和 $0.4D$,模拟结果准确捕捉到了内外剪切层位置,即径向上两个速度脉动峰值,其中 $0.3D < r < 0.4D$ 为内剪切层,速度梯度为正,位于中心轴向射流与环形旋流之间; $0.5D < r < 0.6D$ 为外剪切层,速度梯度为负,位于环形旋流与空气伴流之间。剪切层内速度梯度大,掺混作用强,由于Kelvin-Helmholtz不稳定性而生成大尺度涡结构^[39],这些大尺度涡结构与剪切层火焰稳定有直接关系,将在下文详细阐述。从速度统计结果来看,各种模型均能获得较为准确的预测结果,总体而言PaSR模型优于G方程火焰面模型。

图6为中心轴线上的平均温度和温度脉动分布,图中对比了实验数据与几种燃烧模型的预测结果,其中DTF-LES代表动态增厚火焰模型模拟结果^[33]。实验测量显示火焰抬升高度约 $0.6D \sim 0.8D$,对比F-LES,DTF-LES和G-LES模拟结果可见,采用有限速率模型PaSR和DTF能够更加准确捕捉到火焰锋面的位置,但DTF模型对于温度的预测值偏高;G-LES两种进口边界条件对燃烧区后部温度的预测出现明显差别;本文PaSR模型火焰抬升高度预测结果偏大,这可能是由于剪切层火焰锋面附近网格分辨率难以捕

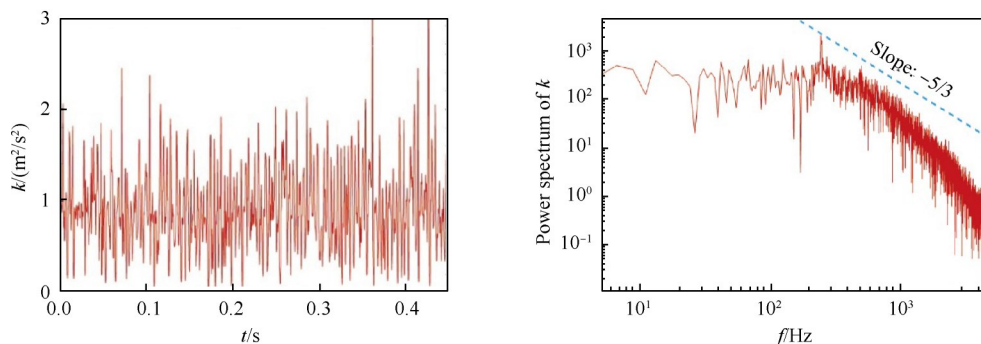


Fig. 3 Sequential turbulent kinetic energy and power spectrum ($X=50mm, r=35mm$)

提到所有燃烧反应微小特征尺度过程引起的。PaSR-LES 和 DTF-LES 对燃烧区温度脉动的预测较为合理,而 F-LES 和 G-LES 预测结果均高于实验值;在燃烧区后部,DTF 模型预测结果与 G 方程模型预测结果相近,PaSR-LES 则与 F-LES 接近。

3.2 流场参数对 LSC 流场结构的影响

为研究燃烧释热对流动的影响,对 LSF1 冷态流场进行了模拟,图 7 对比了 LSF1 燃烧流场与冷态流场的平均轴向速度分布,图中显示燃烧流场和冷态流场中均不存在回流区,表明回流区不是低旋流

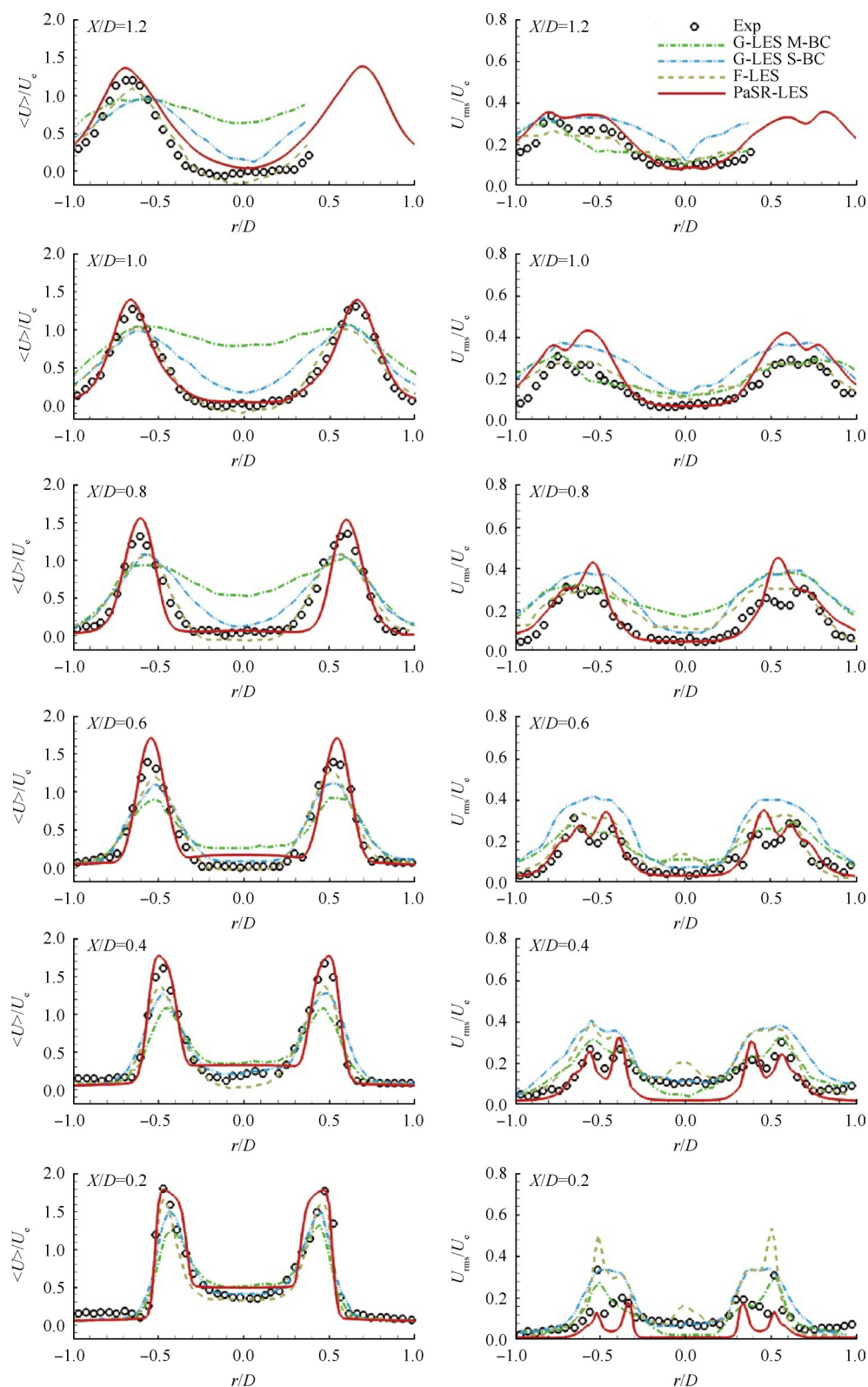


Fig. 4 Radial profiles of mean and fluctuating axial velocity at six axial locations

场的必要特征,对火焰稳定没有主导作用。图8对比了燃烧流场和冷态流场中心轴线上的平均轴向速度分布,结合图7并根据速度的变化趋势将燃烧器出口下游流场划分为四个区域,各区域分布范围如表1所示。在N1和R1,出口气流均受到旋流诱导的离心作

用,流动发散,轴向速度减小,燃烧流场扩张角度大,轴向速度衰减更加明显。在N2和R2,轴向速度增大,但冷态流场和燃烧流场中引起中心流场气流加速的原因不同:冷态流场中气体离开燃烧器出口,内剪切层位置经过短暂扩张后开始向中心轴线靠拢,

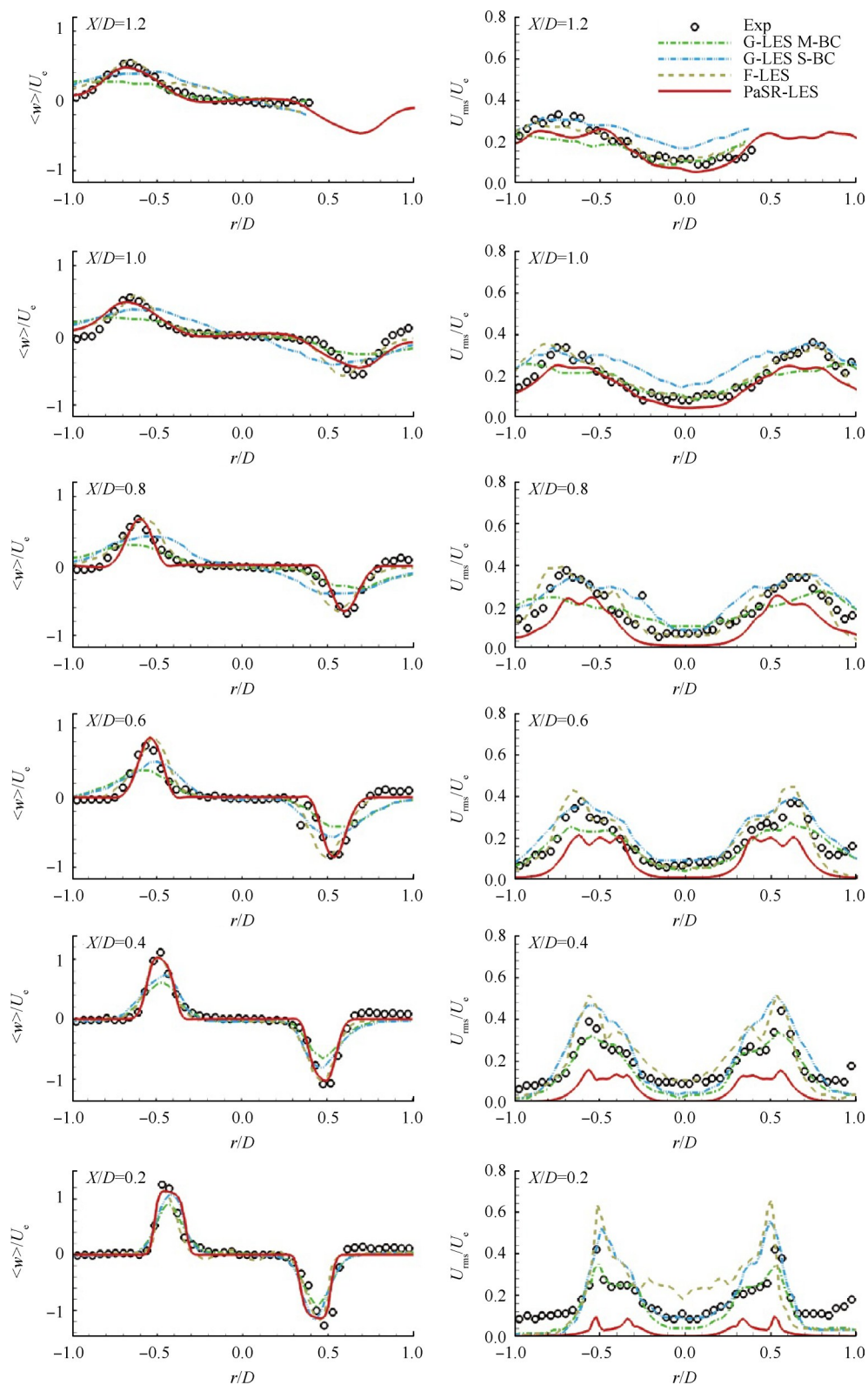


Fig. 5 Radial profiles of mean and fluctuating tangential velocity at six axial locations

内剪切层气流自周围向中心汇聚导致气流速度增大;燃烧流场中气体加速是由于火焰锋面后温度升高引起的气体受热体积膨胀。旋流运动和燃烧释热对轴向速度的影响是相反的,旋流流动发散使轴向流动速度减小,燃烧释热使气体体积膨胀、轴向流动速度增大,轴向速度的变化是两种作用相互竞争的结果,R2区域轴向速度增大表明在此区域内燃烧的影响占据主导地位。N3区域内剪切层影响减弱,旋流运动占据主导地位,因而流场存在略微扩张,中心区流速减小;R3区域高温气体沿径向扩张的同时与周围低温气体进行质量和热量交换,温度降低,因而速度减小。流场下游N4和R4区域,旋流运动和燃烧的影响减弱,流场中心气流主要受到内剪切层的影响。

图9对比了不同当量比和压力条件下流场平均

Table 1 Distribution of characteristic region of flow fields for reacting and non-reacting cases

Reacting	R1	R2	R3	R4
	0~1.75D	1.75D~2.6D	2.6D~3.18D	>3.18D
Non-reacting	N1	N2	N3	N4
	0~1.70D	1.70D~2.3D	2.3D~3.5D	>3.5D

轴向速度和轴向速度脉动,图中以实线标出了流场回流区边界。实验和数值模拟结果表明,燃烧反应主要活跃在 $X=2.0D$ 内,燃烧释热对火焰下游流场结构有重要影响。改变当量比和压力能够显著改变流场内释热分布特征,随着当量比增加,剪切层和流场中心轴向速度和速度脉动均显著增大,最大速度脉动达到5.5 m/s,剪切层内气体受热膨胀加剧导致剪切层宽度增大。增加进气速度对释热率几乎没有影响,因而流场结构对进气速度变化不敏感,轴向速度分布差异较小,流场结构保持了一定相似性^[23]。从图中可以看出,与 $\phi=0.62$ 相比, $\phi=0.7,0.8$ 和 1.0 流场中出口旋流射流在燃烧区下游存在明显的径向扩张,扩张角依次增大,并且由于旋流射流的扩张在流场中心形成了回流区。 $\phi=1.0$ 时由于旋流射流在出口扩张剧烈,在楔形锥面形成了附着的环形回流区。压力提高使燃气密度增大,燃烧区单位体积释热率增大引起气体流速增加,其对流场结构的影响与当量比相似;由于燃烧区下游气体掺混,在中心回流区边缘产生了较大的速度脉动,其中最大脉动约3.5m/s。图10给出了不同流场条件下中心轴线上平均轴向速度的变化规律:火焰上游旋流的作用使轴向速度几

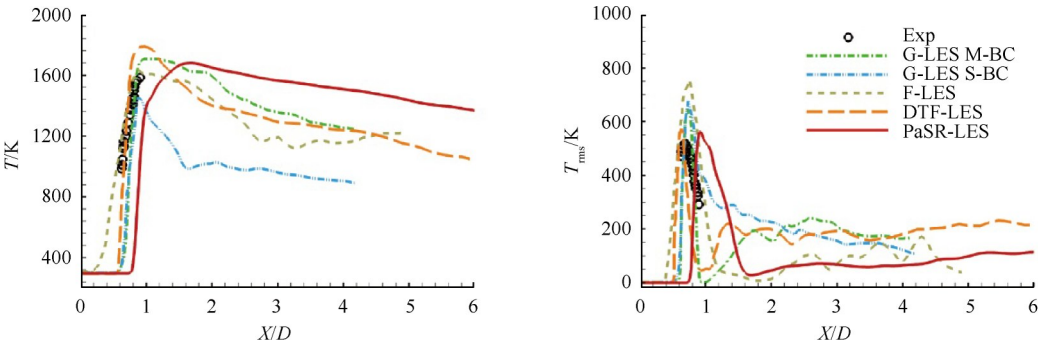


Fig. 6 Profiles of mean and fluctuating temperature along central axis

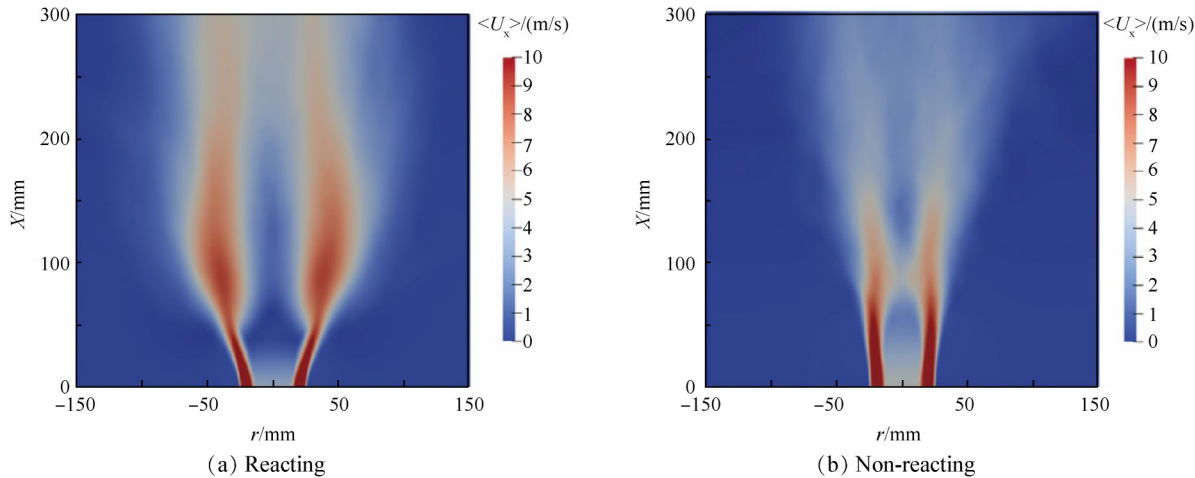


Fig. 7 Comparison of mean axial velocity contour for reacting and non-reacting cases

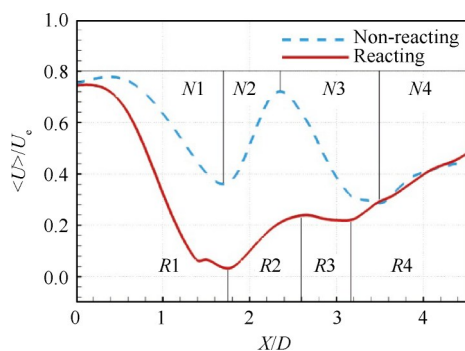


Fig. 8 Comparison of mean axial velocity profiles along axis for reacting and non-reacting cases

乎线性衰减,而在下游由于高温气流形成了明显的中心局部高速区($1D < X < 2D$),火焰区下游的最大轴向速度与当量比和压力提高存在正相关关系,这对流场中心火焰形态的变化有着重要影响,是引起火焰根部形状转变的主要原因。

3.3 流场参数对LSC燃烧特性的影响

图11给出了8个时刻流场瞬时温度分布,由于预混燃烧反应主要发生在火焰锋面附近薄层内,因而可以根据燃烧释热率 Q 来反映燃烧反应区的位置,图11以 $0.05Q_{\max}$ 等值线来标记火焰锋面的位置。图中可以看出燃烧器出口上方形成完全抬升火焰,火焰根部稳定在 $X=0.8D \sim 1.0D$,随流速变化而小幅度上下波动。火焰根部形状为U形,火焰锋面分为两部分:位于流场中心的前端锋面(Leading edge)和位于剪切层的后缘锋面(Trailing edge)。由于中心区域Karlovitz数(Ka)较小,前端锋面较为平滑(0.39s, 0.40s),火焰锋面受到瞬时低强度湍流影响出现小尺度褶皱(0.424s, 0.426s)。 Ka 数表示了化学反应时间尺度与湍流Kolmogorov时间尺度之比, Ka 数较小表明湍流旋涡难以穿透火焰锋面,因而难以影响火焰内部结构。后缘锋面主要位于内剪切层, Ka 数较大,火焰褶皱明显(0.426s, 0.428s)。由于剪切层速度梯

度和速度脉动较大,燃烧区气流与外部空气伴流掺混强烈,在燃烧区尾部,后缘锋面褶皱形成未完全燃烧的火焰微团,火焰微团随气流掺混从燃烧区脱落进入伴流空气继续燃烧(0.39s, 0.40s, 0.42s)。Carlsson等^[32]的实验表明,LSC火焰的两部分火焰锋面表现出不同的预混燃烧机制:靠近轴线的前端锋面没有燃料分层,火焰锋面几乎为平面,属于层流火焰面机制(Laminar flamelet regime);远离轴线的后缘锋面存在分层燃烧,火焰面褶皱明显,属于薄反应区机制(Thin-reaction zone regime),燃烧区存在局部熄火、复燃以及火焰空洞,数值模拟结果复现了实验观察到的现象,表明大涡模拟能够比较准确地捕捉到湍流-火焰相互作用的非稳态过程。

从实验数据和数值模拟结果来看,LSF1冷态和燃烧流场在燃烧器出口附近的中心区域形成气泡形低速区,能够观察到由于旋涡引起的瞬态小回流区。为进一步研究瞬态小回流区对火焰稳定的影响,图12对比了燃烧流场中同一时刻瞬态回流区与燃烧反应区的分布,回流区边界以零轴向速度的等值面表示,并给出了边界上的温度分布;燃烧反应区以 $0.1Q_{\max}$ 等值面表示,等值面上的温度脉动代表了释热率的脉动。可以看出,中心回流区的出现在时间上是间歇性的,没有明显的周期特性;在空间上是不连续的,回流区体积仅占整个流场域的极小部分,对整个流场影响有限。对比同一时刻燃烧区分布可知,燃烧区前端位于环绕中心轴线的内剪切层,释热率高而温度脉动剧烈;尾部由于气流掺混而延伸至外剪切层,形状不规则,释热率低而温度脉动较小。中心回流区主要位于燃烧区下游,并且回流强度较弱,难以对燃烧区产生影响,表明LSC火焰稳定机理与传统回流区稳焰机理不同,燃烧反应的持续进行不是依靠回流的高温气体作为持续点火源,而是由于流场中自由传播的预混燃烧波持续引燃反应物,火焰

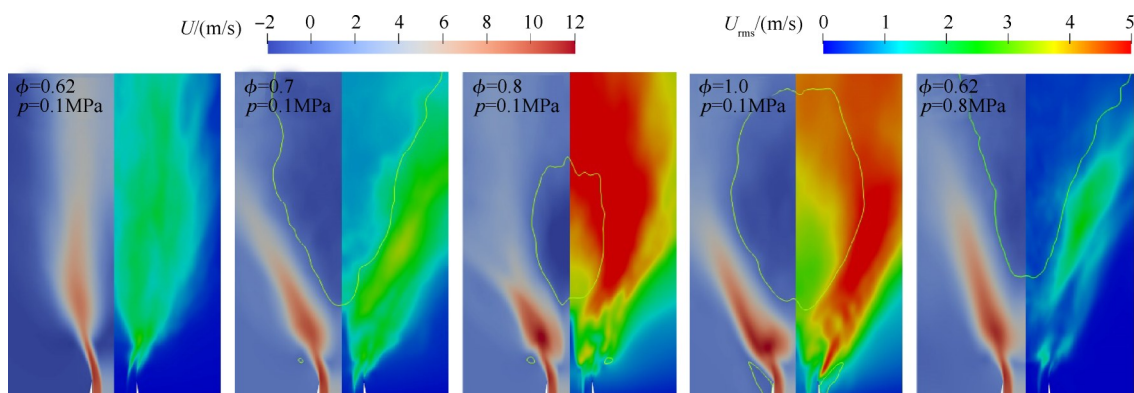


Fig. 9 Equivalence ratio and pressure effects on flow field (solid: recirculation zone)

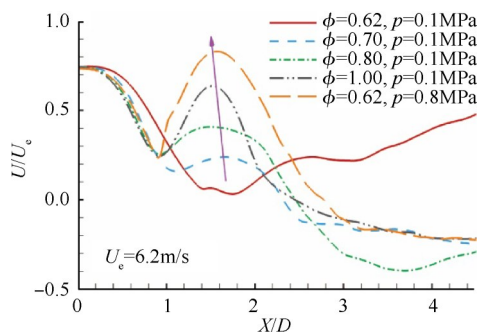


Fig. 10 Comparison of mean axial velocity profiles along axis under different conditions

锋面的稳定依靠预混燃烧火焰传播速度与当地气体流速的匹配。

为研究低旋流燃烧特性,图 13 对比了燃烧流场

内瞬时和平均 CH_4 分布,在图 14 中给出了同一时刻流场中燃料当量比和轴向速度脉动均方根分布以及瞬时火焰锋面的位置。其中燃料当量比根据碳氢氧三种原子的平衡定义为

$$\phi = \frac{X_{\text{CO}_2} + 2X_{\text{CH}_4} + X_{\text{CO}} + 0.5(X_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{H}_2})}{X_{\text{CO}_2} + X_{\text{O}_2} + 0.5(X_{\text{CO}} + X_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (18)$$

原子当量比为碳氢所需的氧原子与所有组分提供的氧原子之比,从而保证了当量比从反应物到燃烧产物穿越火焰锋面时能够保持守恒^[40]。从图中可见,燃烧器出口 CH_4 含量和当量比均匀;在流动过程中,中心部分气体穿越前端火焰锋面, CH_4 被迅速消耗,周围部分气体随旋流与伴流空气相互混合, CH_4 浓度降低并且出现当量比梯度分布。前端锋面稳定

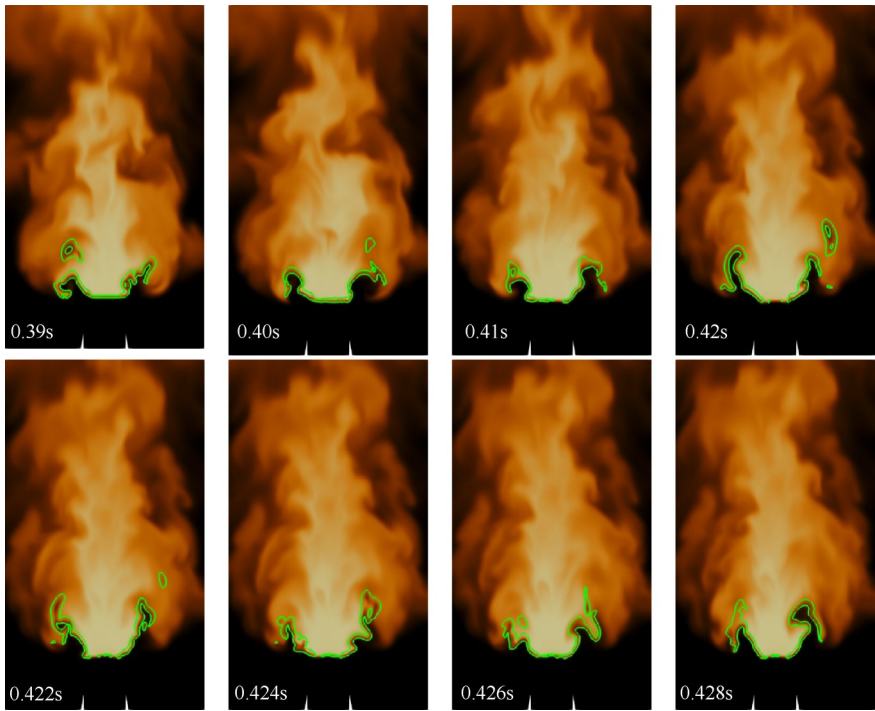


Fig. 11 Several instantaneous temperature contours of LSF1 (solid: $0.05Q_{\text{max}}$)

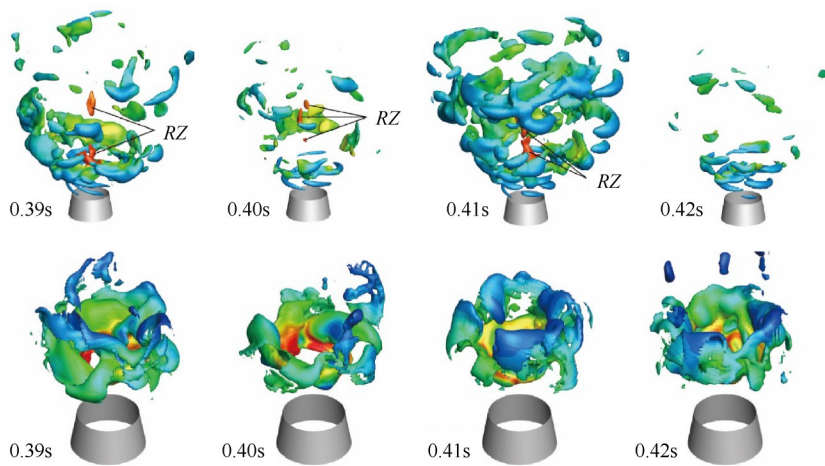


Fig. 12 Instantaneous recirculation zone (top) and reaction zone (down) (RZ: recirculation zone within post-flame zone)

在中心区域气泡形低速区内,反应区内燃料均匀,不存在当量比梯度,因而火焰锋面较为平滑,在湍流脉动作用下出现局部褶皱。后缘锋面主要稳定在内外剪切层,反应区内燃料分层,出现当量比梯度分布,燃烧与流动相互作用加强,火焰锋面褶皱加剧。随着后缘火焰锋面延伸至剪切层之外,CH₄浓度由于伴流稀释继续降低,此时燃烧稳定性下降,出现燃料微团脱落以及火焰空洞的产生。

图 15 为根据释热率等值面给出的平均流场中燃

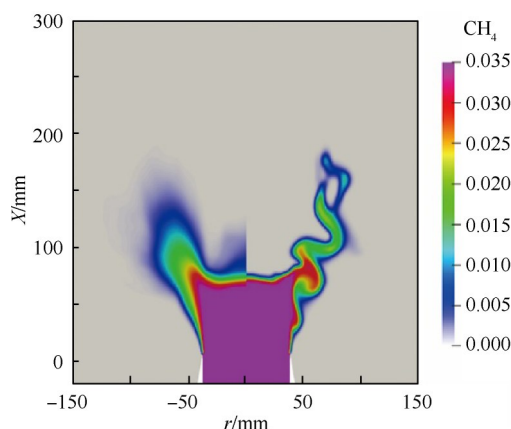


Fig. 13 Comparison of mean (left) and instantaneous (right) distribution of CH₄ ($t=0.424s$)

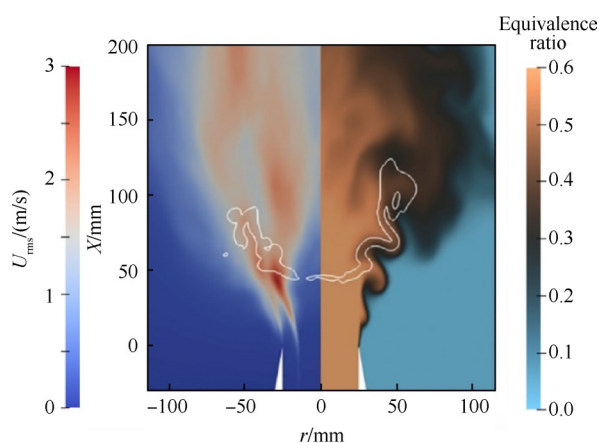


Fig. 14 Distribution of fluctuating axial velocity (left) and equivalence ratio (right) ($t=0.424s$, solid: instantaneous flame front)

烧区位置及形态,并给出了温度脉动分布 T_{rms} 。 $\phi=0.62$ 时,火焰锋面为 U 形,中心前端锋面较平滑,随着当量比增加,位于内剪切层的火焰锋面向上游移动,形成 W 形火焰锋面,火焰锋面对于流动敏感,剪切层温度脉动增加。当量比和压力增加,燃烧区容积释热率增大,预混火焰传播速度增加,火焰根部向上游燃烧器出口移动,火焰抬升高度降低,如图 16 所示,相比于速度和压力,燃烧特性对当量比的变化更为敏感。当 $\phi=0.62, 0.7$ 和 0.8 时为完全抬升火焰,当 $\phi=1.0$ 时,由于轴向射流的存在,中心区域仍为抬升火焰,但在外剪切层,火焰锋面已附着于燃烧器楔形出口表面,这可能是由于燃烧器外壁面的回流区引起的。

在预混火焰中,燃料经过火焰刷被迅速耗尽,火焰刷的厚度反映了燃料消耗速率,可以利用平均反应进度变量 $\bar{c}$ 来估计火焰刷厚度,即

$$\bar{c} = \frac{\bar{T} - \bar{T}_{min}}{\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min}} \quad (19)$$

式中 $\bar{T}$ 为平均温度, $\bar{T}_{max}$ 为最高平均温度, $\bar{T}_{min}$ 为最低平均温度,定义 $0.1 < \bar{c} < 0.9$ 为平均火焰刷厚度。如图 17 所示,数值模拟对于火焰刷厚度的预测普遍存在一定误差,但变化趋势能够得到了较好预测,随着速度、压力和当量比增大,湍流脉动增强了组分和温度输运,湍流燃烧速度增加,反应迅速,火焰刷厚度减小。 $\phi=1.0$ 与其余状态有所差别,温度和湍流燃烧速度持续增加,在剪切层形成了附着火焰,从温度脉动来看,主要燃烧区域由流场中心转移到外剪切层,这可能引起流场中心火焰刷厚度略有增大的原因。

3.4 大尺度非稳态结构与燃烧相互作用

大尺度结构和旋涡破碎是旋流运动的重要非稳态特征,由于低旋流流场的弱回流特点,回流区难以影响到燃烧火焰,而流场中的非稳态结构能够引起流场的脉动,进而影响到燃料混合、火焰锋面褶皱、燃烧释热率波动等,对火焰形态和燃烧特性有重要

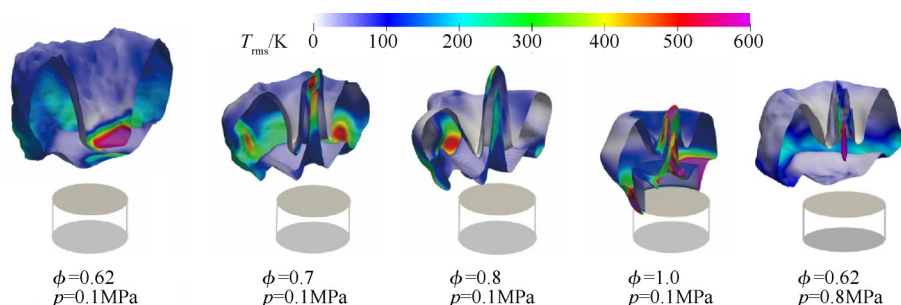


Fig. 15 Comparison of mean reaction zone presented by isosurface of heat release ($Q=0.05Q_{max}$)

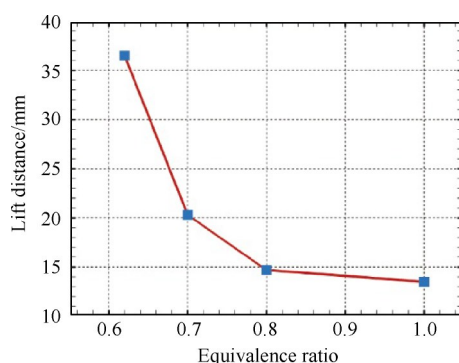


Fig. 16 Flame base lift-off height under different equivalence ratio

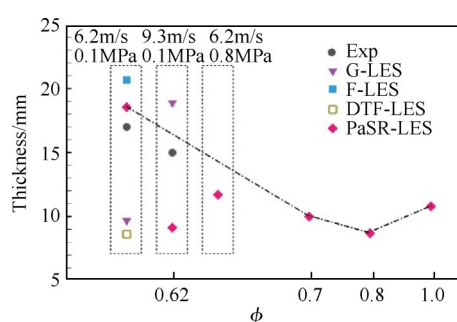


Fig. 17 Flow conditions effects on flame brush thickness

影响。

图 18 采用 λ_2 准则^[41]得到燃烧状态流场瞬时涡结构,从图中可以看出,燃烧器出口内外剪切层分别形成了内外两层旋向相同的周期性螺旋形涡结构。涡结构在燃烧器出口附近形状规则,存在较为稳定的涡距(h)和扩张角度(θ),在向下游运动的过程中逐渐破碎成不规则的随机分布小涡。涡结构的产生符合 Kelvin-Helmholtz 不稳定性特征,涡轴线与流线存在正交关系,周向四个螺旋形涡结构相对角度为 90° ,在沿流场中心轴线旋转的同时围绕自身的轴线旋转运动。

涡结构的生成和脱落是周期性的,这些涡结构是引起流场速度脉动的主要因素,图 19 描述了瞬态流场中内外剪切层。周期性的涡脱落在剪切层中产生有序的波状结构,一个周期内波状结构在流动方向上的运动距离大致为一个波长(λ),而在垂直于流动方向的波动距离可以定义为波动的幅度(η),表示引起速度脉动影响的范围。研究表明, λ 和 η 与 h 和 θ 密切相关,反映了流场中的非稳态脉动, $\lambda_{in} > \lambda_{out}$, $\eta_{in} < \eta_{out}$ 。在低旋流流场中,随着进口气流速度增大, λ 和 η 增大;随着当量比和压力提高, θ 增大, h , λ 和 η 减小。同时剪切层大尺度涡结构与燃烧相互作用是引起燃烧不稳定、释热率脉动和火焰表面褶皱的主要

原因,为了获得旋涡生成和脱落频率,在剪切层附近设置监测点提取流场瞬时速度,采用 FFT 变化得到特征频谱。图 20 和图 21 为 *LSFI* 冷态和燃烧状态内外剪切层速度频谱,冷态流场内外剪切层涡结构运动特征频率分别为 370Hz 和 200Hz;外剪切层大尺度结构主要由于旋流运动诱导生成,特征频率低而能量高,燃烧流场内外剪切层涡结构运动的特征频率分别为 250Hz 和 180Hz,结果与 Carlsson 等^[32]大涡模拟得到的特征频率相近($f_{in} \approx 210\text{Hz}$, $f_{out} \approx 175\text{Hz}$)。燃烧流场涡脱落的频率低于冷态流场,表明燃烧抑制了部分非稳态大尺度结构的生成。内剪切层特征频率随当量比的增加而减小,由 250Hz 减小至 125Hz;随速度增大而增大,由 250Hz 提高至 300Hz。结合 h 和 θ 的变化显示,燃烧热量释放加剧了流场的扩张以及火焰区下游速度脉动但抑制了燃烧器出口流场剪切层大尺度涡结构的生成,表明低旋流燃烧流场在贫燃条件下表现出强烈的非稳态性质,而当燃烧接近化学恰当比时,火焰更加稳定。

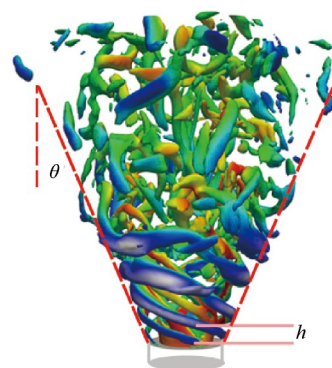


Fig. 18 Snapshot of instantaneous vortex structures

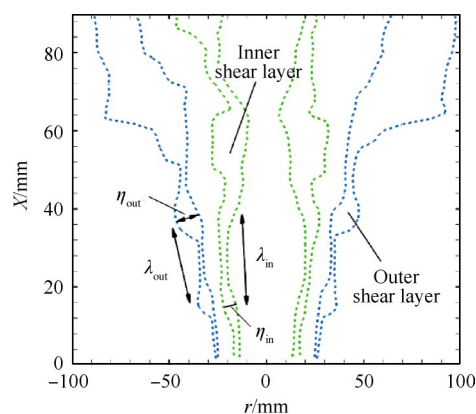


Fig. 19 Snapshot of instantaneous wavy structures within shear layers

为了研究剪切层内非稳态大尺度结构与火焰相互作用机理,图 22 给出了流场中的瞬态反应区分布,

三维流线表示出口气体流动方向。在环形旋流层的反应区存在两个对称分布的突出峰,两峰相对角度为 180° ;环形旋流沿中心轴线逆时针方向运动,旋流流线几乎垂直穿过反应峰表面,反应峰运动方向与旋流方向相反,突出峰表面温度脉动较大,表明该位置是燃烧反应进行的主要区域。图 23 和图 24 进一步展示了涡结构对燃料和火焰锋面的影响,位于轴向射流区外缘和环形旋流区外缘的内外剪切层分别产生了两组成对的涡结构,相对角度为 180° ,涡结构的根部围绕中心轴线旋转,旋向与旋流方向相反;涡

结构尾部延伸至流场下游燃烧反应区,形成突出的反应峰,改变了火焰锋面形状,突出峰在周向伴随涡结构同步旋转,突出峰的周期性运动是引起剪切层火焰锋面周期性褶皱变化的原因。 CH_4 等值面与反应区具有相似的形状,温度脉动区域与 CH_4 含量脉动区域基本一致,表明突出峰的形成和运动与流场中 CH_4 的分布很强具有相关性,从本质上来说,非稳态涡结构正是通过改变燃料的分布最终影响了燃烧特性和火焰形态。

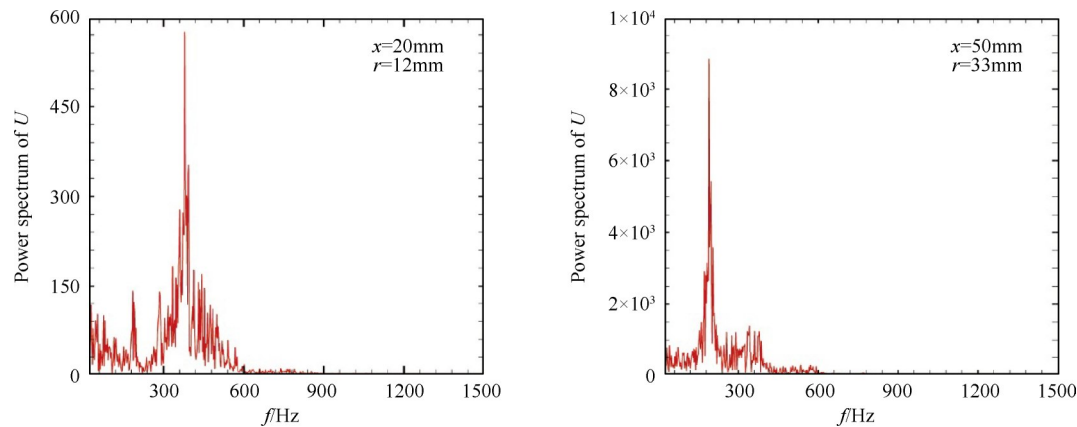


Fig. 20 Power spectra of axial velocity in inner (left) and outer (right) shear layers (LSF1, non-reacting)

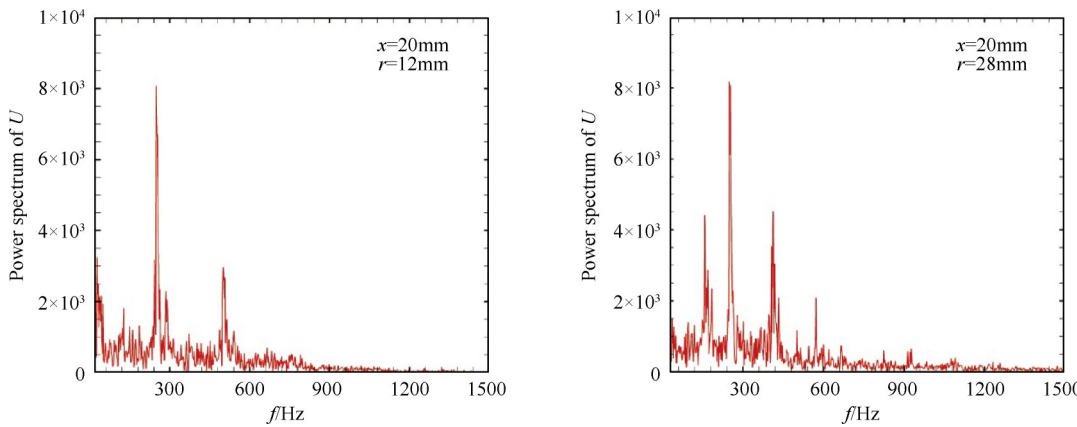


Fig. 21 Power spectra of axial velocity in inner (left) and outer (right) shear layers (LSF1, reacting)

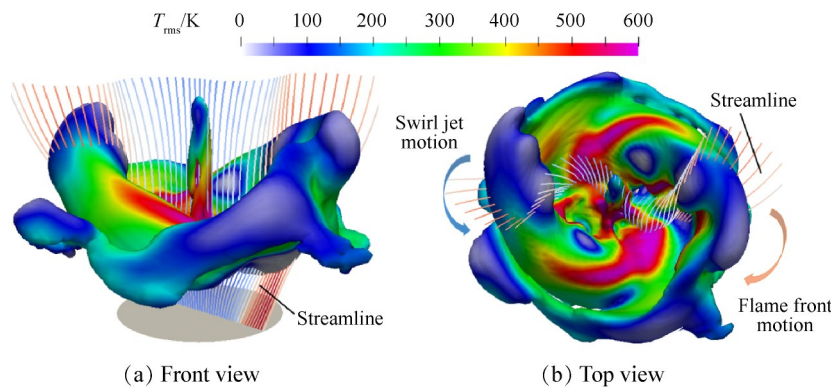


Fig. 22 Snapshot of instantaneous reaction zone presented by heat release

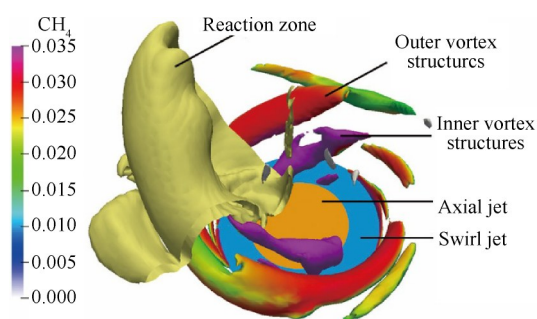


Fig. 23 Sketch of shear layer vortex structures effects on flame front

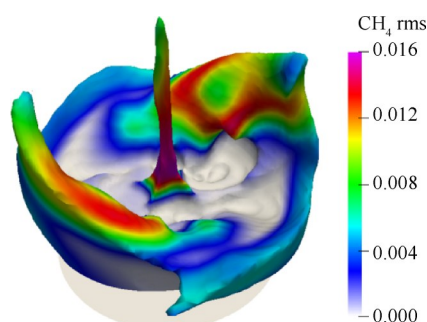


Fig. 24 Distribution of mass fraction iso-surface of CH_4 ($Y_{\text{iso},\text{CH}_4}=0.03$)

4 结 论

本文采用动态 k 方程模型和有限速率 PaSR 模型对低旋流燃烧进行了大涡模拟,研究了低旋流燃烧的基本性质,探讨了速度、当量比、压力等流场条件对低旋流燃烧和流场非稳态特性的影响,得出主要结论如下:

(1)低旋流燃烧形成U形抬升火焰,核心燃烧区不存在回流区,火焰稳定不依赖于回流区;火焰锋面存在两种不同的预混燃烧机制:中心区前端锋面没有燃料分层,火焰锋面光滑,属于层流火焰面机制;剪切层后缘锋面存在分层燃烧,属于薄反应区机制,火焰面褶皱明显并伴有局部熄火和复燃以及火焰空洞。

(2)来流速度对流场结构影响较小,流场能够保持自相似性。随着当量比和压力提高,流场流动扩张角度增大,形成回流区,火焰下游相邻区域气流受热膨胀加速作用明显,根部火焰形状由U形转变为W形,在流场中心形成突出的火焰锋面。

(3)增加来流速度、当量比和压力,燃烧区内湍流脉动增强了组分和温度输运,湍流燃烧速度加快,火焰刷厚度减小,火焰抬升高度降低。

(4)燃烧释热加剧流场扩张,抑制剪切层涡结构

的生成和运动,随当量比和压力提高而降低,涡结构特征频率由 250Hz 降到 125Hz;速度增大加剧了剪切层不稳定,涡结构特征频率由 250Hz 提高至 300Hz。涡结构的产生引起速度脉动和火焰表面褶皱,反映了剪切层流动和燃烧的非稳态性质,涡结构的周期性运动是影响根部火焰形态的主要原因。

致 谢:感谢国家自然科学基金面上项目的资助。

参考文献

- [1] Sarpkaya T. Turbulent Vortex Breakdown[J]. *Physics of Fluid*, 1995, 7(10): 2301-2303.
- [2] Spencer A, McGuirk J, Midgley K. Vortex Breakdown in Swirling Fuel Injector Flows[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(2).
- [3] Lieuwen T, Torres H, Johnson C, et al. A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(1): 182-189.
- [4] Lieuwen T. Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions: A Review[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(5): 765-781.
- [5] Cheng R K, Yegian D T, Miyasato M, et al. Scaling and Development of Low-Swirl Burners for Low Emission Furnaces and Boilers [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 1305-1313.
- [6] Mehmet Salih Celek, Ali Pinarbasi. Investigations on Performance and Emission Characteristics of an Industrial Low Swirl Burner while Burning Natural Gas, Methane, Hydrogen-Enriched Natural Gas and Hydrogen as Fuels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(2): 1194-1207.
- [7] Cheng R K, Littlejohn D, Nazeer W A, et al. Laboratory Studies of the Flow Field Characteristics of Low-Swirl Injectors for Adaptation to Fuel-Flexible Turbines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(2): 277-285.
- [8] Nazeer W, Smith K, Sheppard P, et al. Full Scale Testing of a Low Swirl Fuel Injector Concept for Ultra-Low NO_x Gas Turbine Combustion Systems [R]. *ASME GT* 2006-90150.
- [9] Plessing T, Kortschik C, Peters N, et al. Measurements of the Turbulent Burning Velocity and the Structure of Premixed Flames on a Low-Swirl Burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(1): 359-366.
- [10] Day M, Tachibana S, Bell J, et al. A Combined Computational and Experimental Characterization of Lean Premixed Turbulent Low Swirl Laboratory Flames I: Meth-

- ane Flames[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(1): 275–290.
- [11] Day M, Tachibana S, Bell J, et al. A Combined Computational and Experimental Characterization of Lean Premixed Turbulent Low Swirl Laboratory Flames II: Hydrogen Flames[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(5): 2148–2165.
- [12] Karthik P, Noble D, Seitzman J M, et al. Measurement of Flame Characteristics of a Low Swirl Burner at High Pressures and Velocities[R]. *AIAA* 2011–234.
- [13] Cheng R K, Littlejohn D. Laboratory Study of Premixed H_2 -Air and H_2 - N_2 -Air Flames in a Low-Swirl Injector for Ultra-Low Emission Gas Turbines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(3): 383–393.
- [14] Huang Y, Ratner A. Experimental Investigation of Thermoacoustic Coupling for Low-Swirl Lean Premixed Flames [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 365–373.
- [15] Tachibana S, Kanai K, Yoshida S, et al. Combined Effect of Spatial and Temporal Variations of Equivalence Ratio on Combustion Instability in a Low-Swirl Combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3299–3308.
- [16] Davis D W, Therkelsen P L, Littlejohn D, et al. Effects of Hydrogen on the Thermo-Acoustics Coupling Mechanisms of Low-Swirl Injector Flames in a Model Gas Turbine Combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3135–3143.
- [17] Emadi M, Kaufman K, Burkharter M W, et al. Examination of Thermo-Acoustic Instability in a Low Swirl Burner [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(39): 13594–13603.
- [18] 邓洋波, 刘 阳, 朱公志. 低旋流燃烧和流动特性数值模拟研究[J]. *大连海事大学学报*, 2009, 35(4): 99–102.
- [19] 邓洋波, 宋德彦, 徐 震, 等. 有限空间内低旋流流动与燃烧特性[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1546–1553.
- [20] Ouali S, Bentebbiche A, Belmrabet T. Numerical Simulation of Methane-Air Equivalence Ratio Effect on Premixed Low Swirl Stabilized Flame[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2015, 37(2): 747–760.
- [21] Ouali S, Bentebbiche A, Belmrabet T. Numerical Simulation of Swirl and Methane Equivalence Ratio Effects on Premixed Turbulent Flames and NO_x Apparitions [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(2): 987–998.
- [22] 柳伟杰, 葛 冰, 田寅申, 等. 当量比对甲烷预混低旋流燃烧的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2014, 20(1): 65–69.
- [23] 陈 立, 李祥晟, 杨 诏, 等. 气流入口条件对低旋流燃烧火焰稳定性的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(5): 114–119.
- [24] 陈 立, 李祥晟. 低旋流 CH_4/H_2 火焰的燃烧特性及稳定性机制研究[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(1): 72–78.
- [25] Dinesh K R, Kirkpatrick M. Study of Jet Precession, Recirculation and Vortex Breakdown in Turbulent Swirling Jets Using LES [J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38(6): 1232–1242.
- [26] Wang Z, Xu Y, Zhou Z, et al. LES Investigation of Swirl Intensity Effect on Unconfined Turbulent Swirling Premixed Flame [J]. *China Science Bulletin*, 2014, 59(33): 4550–4558.
- [27] Petersson P, Olofsson J, Brackman C, et al. Simultaneous PIV/OH-PLIF, Rayleigh Thermometry/OH-PLIF and Stereo PIV Measurements in a Low-Swirl Flame[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 46(19): 3928–3936.
- [28] Nogenmyr K J, Petersson P, Bai X S, et al. Large Eddy Simulation and Experiments of Stratified Lean Premixed Methane/Air Turbulent Flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1467–1475.
- [29] Nogenmyr K J, Fureby C, Bai X S, et al. Large Eddy Simulation and Laser Diagnostic Studies on a Low Swirl Stratified Premixed Flame [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 25–36.
- [30] Nogenmyr K J, Petersson P, Bai X S, et al. Structure and Stabilization Mechanism of a Stratified Premixed Low Swirl Flame [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 1567–1574.
- [31] Carlsson H, Nordström E, Bohlin A, et al. Large Eddy Simulations and Rotational CARS/PIV/PLIF Measurements of a Lean Premixed Low Swirl Stabilized Flame [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(10): 2539–2551.
- [32] Carlsson H, Carlsson C, Fuchs L, et al. Large Eddy Simulation and Extended Dynamic Mode Decomposition of Flow-Flame Interaction in a Lean Premixed Low Swirl Stabilized Flame [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2014, 93(3): 505–519.
- [33] Shahsavari M, Farshchi M, Arabnejad M. Large Eddy Simulations of Unconfined Non-Reacting and Reacting Turbulent Low Swirl Jets [J]. *Flow Turbulence and Com-*

- bustion, 2017, 98(3): 817–840.
- [34] Menon S, Yeung P K, Kim W W. Effect of Subgrid Models on the Computed Interscale Energy Transfer in Isotropic Turbulence [J]. *Computers and Fluids*, 1996, 25(2): 165–180.
- [35] Shahsavari M, Farshchi M. Large Eddy Simulation of Low Swirl Flames under External Flow Excitations [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2018, 100(1): 249–269.
- [36] Germano M, Piomelli U, Moin P, et al. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model [J]. *Physics of Fluids*, 1991, 3(3): 1760–1765.
- [37] Gicquel L Y M, Staffelbach G, Poinot T. Large Eddy Simulations of Gaseous Flames in Gas Turbine Combustion Chambers [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(6): 782–817.
- [38] Chomiak J, Karlsson A. Flame Liftoff in Diesel Sprays [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(2): 2557–2564.
- [39] García-Villalba M, Fröhlich J, Rodi W. Identification and Analysis of Coherent Structures in the Field of a Turbulent Unconfined Annular Swirling Jet Using Large Eddy Simulation [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(5).
- [40] Sweeney M, Hochgreb S, Dunn M, et al. The Structure of Turbulent Stratified and Premixed Methane/Air Flames I: Non-Swirling Flows [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(9): 2896–2911.
- [41] Jeong J, Hussain F. On the Identification of a Vortex [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 332(1): 339–363.

(编辑:梅 瑛)