

低旋流预混燃烧稳燃机理的大涡模拟

刘英杰¹, 刘 潇², 周 波³, 张志浩², 郑洪涛²

(1. 中国航空发动机集团有限公司 中国航空发动机研究院, 北京 101304;

2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

3. 南方科技大学 力学与航空航天工程系, 广东 深圳 518055)

摘 要: 采用大涡模拟(LES)方法对比了高低旋流的预混燃烧特性,并分析了低旋流的稳燃机理。结果表明:LES耦合部分搅拌反应燃烧模型(PaSR)可以准确的捕捉旋流预混燃烧的细小火焰结构和流场分布。不同旋流强度引发不同的流场特性,低旋流诱发较弱的回流区,而高旋流会诱发很强的回流区,这种强烈的流场特征往往会引起振动频率极低的进动涡核拟序结构(PVC)。通过涡脱落和燃烧温度分布的瞬时耦合关系,发现火焰剪切层引起的内外涡脱落频率差是低旋流火焰稳定的最主要因素,低旋流燃烧受涡旋结构的影响交替出现 W 和 V 型火焰。

关 键 词: 大涡模拟; 低旋流; 涡旋; 进动涡核; 火焰稳定

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Large eddy simulation of low swirl premixed flame stabilization mechanism

LIU Yingjie¹, LIU Xiao², ZHOU Bo³,
ZHANG Zhihao², ZHENG Hongtao²

(1. Aero Engine Academy of China,

Aero Engine Corporation of China, Beijing 101304, China;

2. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Department of Mechanics and Aerospace Engineering,

Southern University of Science and Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: The large-eddy simulation (LES) method was used to compare the premixed combustion characteristics of high and low swirls, and the flame stability mechanism of low swirl was analyzed. Results showed that LES coupling with PaSR combustion model can accurately capture the small structures and flow field distribution of premixed flame. The low swirl flow had a weak recirculation zone (sometimes just a low velocity zone), while a high swirl flow produced a strong recirculation zone with a low frequency vibration of the precession vortex core (PVC). By analyzing the change of vortex and flame temperature field, it was found that vortices generated from swirl and center jet flow were the main factors of stability mechanism to stabilize flame in the low velocity region, forming alternating W and V flame.

收稿日期: 2019-07-29

作者简介: 刘英杰(1980—),女,高级工程师,博士,研究领域为燃烧的数值模拟。E-mail:yingjie1129@gmail.com

通信作者: 刘潇(1988—),男,副教授,博士,研究领域为燃烧室低排放和稳定性。E-mail:liuxiao_heu@163.com

引用格式: 刘英杰,刘潇,周波,等. 低旋流预混燃烧稳燃机理的大涡模拟[J]. 航空动力学报,2020,35(2):298-304. LIU Yingjie, LIU Xiao, ZHOU Bo, et al. Large eddy simulation of low swirl premixed flame stabilization mechanism[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 298-304.

Key words: large eddy simulation; low swirl; vortex; precession vortex core; flame stability

随着 NO_x 排放要求的日益严格,迫使燃气轮机燃烧室的设计指标不止是先前的单纯追求高效率,而是逐渐转变为高性能低污染^[1]。由于贫预混的燃烧方式能够很大程度降低火焰温度,故预混燃烧室的设计研究已经成为各国专家学者研究的焦点^[2-5]。

燃气轮机燃烧室的燃烧过程存在复杂剧烈的特点,为了保证该过程平稳进行,通常采用旋流的方式来稳定燃烧。但是高旋流产生的回流区会增加烟气在高温区内的停留时间,促进了热力型 NO_x 的生成。为了改善这种状况,Chan 等^[6]提出了低旋流预混燃烧的概念,为了深入研究低旋流燃烧的本质,伯克利国家实验室,Technische Universität Darmstadt 和 Lund 大学等利用等先进的实验设备对其展开了丰富的研究。Johnson 等^[7]利用不同激光测速的方法,测量发现低旋流火焰中并没有出现回流区,燃烧稳定且不易发生回火和吹熄,NO_x 排放极低。Littlejon 等^[8]在不同燃料(氢气)混合调节下,低旋流喷嘴能够产生低 NO_x 排放的稳定火焰。Petersson、Bohlin 和 Zhou 等^[9-11]先后使用粒子图像测速(PIV)、激光诱导荧光技术(PLIF)和相干反斯托克斯拉曼光谱(CARS)先后对不同雷诺数和不同当量比的低旋流甲烷预混火焰进行了 OH^{*}、燃料分布和温度的测量,为燃烧模型的发展提供了大量可靠的实验数据。国内学者对低旋流也有一些基础研究,如测量低旋流火焰吹熄极限^[12],旋流器安装角的影响^[13],不同当量比的预混低旋流火焰特性^[14]等。

数值模拟作为实验方法的补充,可以得到更多实验难以获得或无法获得的结果,如火焰放热率、湍流与火焰的相互作用和燃烧中间组分自由基分布等。综合考虑到计算能力与计算精度,LES 是计算成本和模拟准确度之间的佳折衷方法。相比于雷诺时均法(RANS)和直接数值模拟(DNS),LES 可以对湍流流场中涡旋结构运动特征进行动态捕捉,能够对燃烧室中的非稳态燃烧过程进行分析研究,同时也能保证较高的计算效率^[15-17]。Carlsson 等^[18-19]利用 LES 和 G 方程燃烧模型准确的模拟了雷诺数为 20 000 和当量比为 0.62 的低旋流火焰,温度场和速度场都与实验值吻合良好。Nogenmyr 等^[20]对比了不同燃烧模型对低旋流火焰的预测能力,结果显示 PaSR 湍

流燃烧模型能够更好的预测燃烧场特征。

本文基于开源计算软件 OpenFOAM 和 PaSR 燃烧模型,模拟对比了 Lund 大学的高(旋流数为 0.68)、低(旋流数为 0.38)旋流火焰的燃烧特性,并对低旋流的涡脱落和燃烧温度分布的瞬时耦合关系进行分析,明晰其稳定燃烧的机理。

1 数学与物理模型

1.1 LES 湍流模型

在 LES 模型中,每个变量都需要使用滤波函数进行滤波处理,滤波后的大尺度分量直接计算;小尺度分量,需要通过亚格子模型(SGS)进行模化。经过滤波后的 Navier-Stokes(N-S)方程为

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

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \widetilde{u_i'' u_j''}) + \bar{S}_{u_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{h} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{D \bar{p}}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{q}_j + \bar{\rho} \widetilde{u_j'' h''}) + \frac{\bar{\rho}}{\tau_{ij}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \bar{S} \quad (3)$$

上述方程可以得到,大涡模拟采用滤波函数处理过后的方程虽然在形式上与雷诺时均处理后的方程一致,但是其表示的含义却不尽相同,最大的区别大涡模拟模型的变量依然是瞬态值,而不是雷诺时均值。其中,式(2)和式(3)中的需要采用下式对二阶矩项封闭:

$$\bar{\rho} \widetilde{Y_k'' u_j''} = - \frac{\mu_t}{Sc_t} \cdot \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad \text{或} \quad \bar{\rho} (\widetilde{Y_k u_j} - \tilde{Y}_k \bar{u}_j) = - \frac{\mu_{sgs}}{Sc_{sgs}} \cdot \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\bar{\rho} \widetilde{h'' u_j''} = - \frac{\mu_t}{Pr_t} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \quad \text{或} \quad \bar{\rho} (\widetilde{h u_j} - \tilde{h} \bar{u}_j) = - \frac{\mu_{sgs}}{Pr_{sgs}} \cdot \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \quad (5)$$

其中 ρ 为密度, u 为速度, p 为压力, S 为源项, Y 为组分, μ 为黏度, Sc 为施密特数, Pr 为普朗特数, q 为能量, h 为焓值, 下标 t 为湍流, 方向 $i=1, 2, 3$, 方向 $j=1, 2, 3$, 组分 $k=1, 2, \dots, N$ 。

与雷诺时均的模型封闭相似,亚格子模型的应力项同样采用涡黏假设进行表述

$$R_{ij} = \widetilde{\rho(u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)} = -2\mu_{\text{sgs}} \tilde{S}_{ij} + \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \tag{6}$$

其中 μ_{sgs} 为亚格子黏度。

1.2 PaSR 燃烧模型

PaSR 模型^[21]是在良搅拌反应 (WSR) 模型上进行改进提出。PaSR 可以更好地复现真实燃烧,把燃烧过程的状态变化分为以下两个部分:化学反应动力学和湍流效应引起的变化。因此,化学反应时间尺度 τ_{chem} 和混合时间尺度 τ_{mix} 被加入到 PaSR 模型中,其处理思路是认为燃烧组分在 τ_{chem} 时间内理用 WSR 模型获得化学反应速率 $\bar{\omega}_r^{\text{wsr}}$,计算如下式:

$$\bar{\omega}_r^{\text{wsr}} \tau_{\text{chem}} = \bar{\omega}_r (\tau_{\text{chem}} + \tau_{\text{mix}}) \tag{7}$$

而实际的化学反应速率就可以用式(8)来表示

$$\bar{\omega}_r = a \bar{\omega}_r^{\text{wsr}}, \quad a = \frac{\tau_{\text{chem}}}{\tau_{\text{chem}} + \tau_{\text{mix}}} \leq 1 \tag{8}$$

混合时间尺度 τ_{mix} 为湍流状态下的燃烧组分需要混合所耗费的时间,可以表示为

$$\tau_{\text{mix}} = C_{\text{mix}} \frac{k}{\epsilon} \tag{9}$$

式中 k 为湍动能 (m^2/s^2); ϵ 为湍动能耗散率 (m^2/s^3); C_{mix} 为常数,对于不同的燃烧问题有不同的取值。

1.3 实验及计算边界条件

低旋流是指预混气体通过旋流数很低的叶片和中心孔板流道流入燃烧场,下游不会产生明显的回流区,以此降低燃烧产物滞留时间,降低 NOx 排放。如图 1 所示,Lund 大学的低旋流喷嘴由 8 个 38° 的旋流叶片,和 37 个 3.6 mm 直接小孔的孔板构成,喷嘴直径为 50 mm,与常规旋流

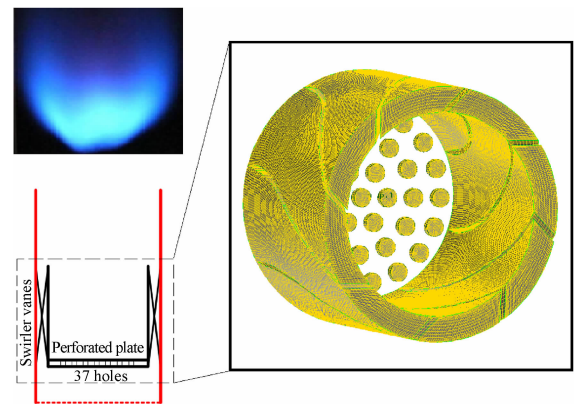
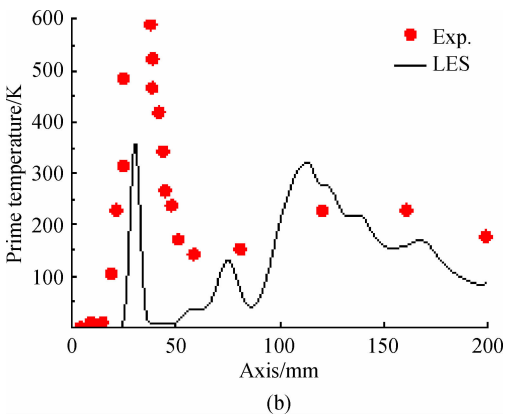
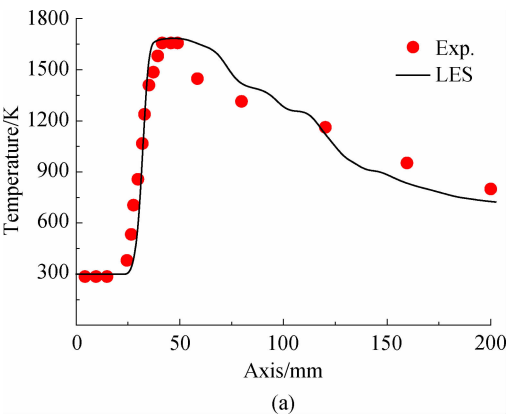


图 1 旋流燃烧器结构和网格示意图
Fig. 1 Swirling burner structure and grid

燃烧结构有所不同。实验做了雷诺数为 20 000 和 30 000 两个工况,当量比为 0.62,甲烷燃料,实验数据包括冷态和燃烧场的 PIV 数据,燃烧场的 OH、CH₂O、O₂、温度等数据。由燃烧的数码照片可以看出,低旋流燃烧是抬举火焰,高温区距离喷嘴有一小段距离,因此也不会烧喷嘴。计算域为边长 8D (D 为低旋流喷嘴直径) 的正方体,经过对低旋流喷嘴和火焰分布区域局部加密后,最小尺度为 0.3 mm,网格总数为 9 M。进口为预混气的质量流量入口,出口为压力出口。

2 计算结果与讨论

图 2 为雷诺数 $Re=20\,000$ 和当量比为 0.62 的温度和 O₂ 的平均和脉动量分布。如图 2 可得,在一定误差范围内,LES 耦合 PaSR 模型能够准确预测低旋流燃烧温度场和 O₂ 摩尔分数空间分布。O₂ 摩尔分数梯度较大的位置对应于温度梯度较大的位置,该位置为 CH₄ 发生剧烈的化学反应,随之大量热量被释放出来。在化学反应区域下游,燃料和空气的掺混越来越均匀,低到当地燃烧极限以下,放热反应无法继续维持,温度逐渐下降。温度和 O₂ 的方均根(RMS)分布位置与实验结果吻合程度良好,其峰值出现在火焰与湍流



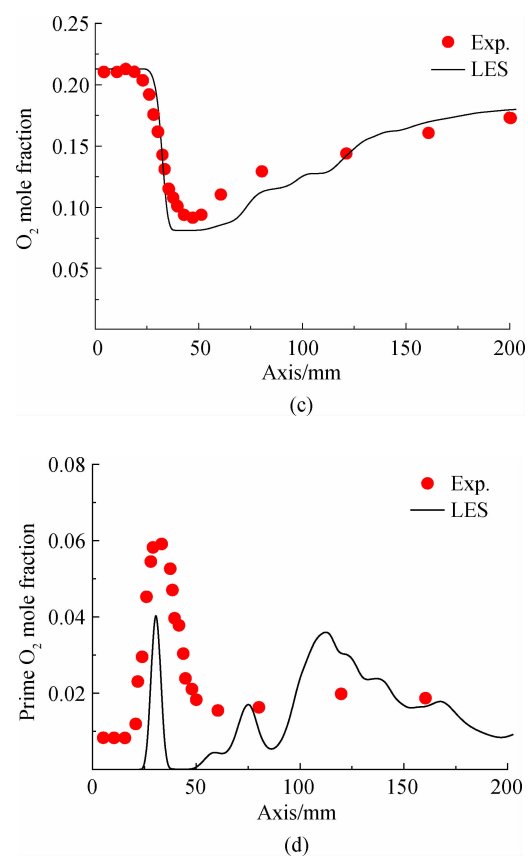


图 2 温度和 O_2 的时均与脉动量分布

Fig. 2 Time-averaged and pulsation distribution of temperature and O_2

作用最强烈的位置。

燃气轮机燃烧室或工业锅炉等燃烧设备大多采用高旋流来稳定火焰,依靠回流区卷吸下游的高温产物点燃新鲜混气。为了对低旋流火焰的稳定燃烧机理进行研究,本文也对比模拟了相同流动工况的高旋流(旋流数为 0.68)和低旋流(旋流数为 0.38)条件下的火焰,图 3 为两种工况下的冷态速度分布。图 3(a)为大涡模拟的轴向速度的瞬时分布,图 3(b)为轴向速度的时均场。如图所示,低旋流场的回流区强度很弱,最低速度为 -3 m/s ;高旋流产生很强的回流区,其强度和范围较低旋流工况要强得多,这也造成了两种旋流条件下火焰的稳燃机理差异。

高旋流的流动通常会形成进动涡核,进行低频的中心旋转运动,燃烧室内速度和压力会随之做周期性的波动变化,有可能会引发燃烧不稳定的现象。图 4 为中心线上 $H/D=1.2$ (H 为低旋流喷嘴出口下游距离)处的速度频率谱,低旋流形成的流场没有形成明显的低频峰值,即未形成进动涡核结构。高旋流场的频谱存在 40 Hz 左右的脉动主频,该主频是进动涡核的进动频率。

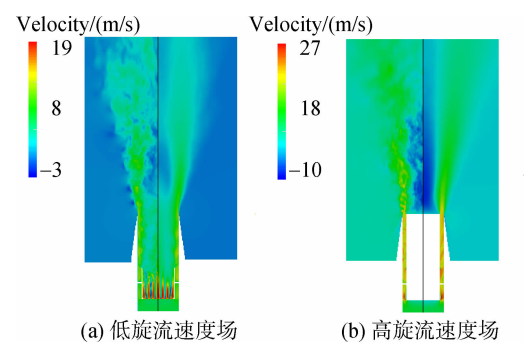


图 3 低旋流与高旋流速度场

Fig. 3 Low swirl and high swirl velocity field

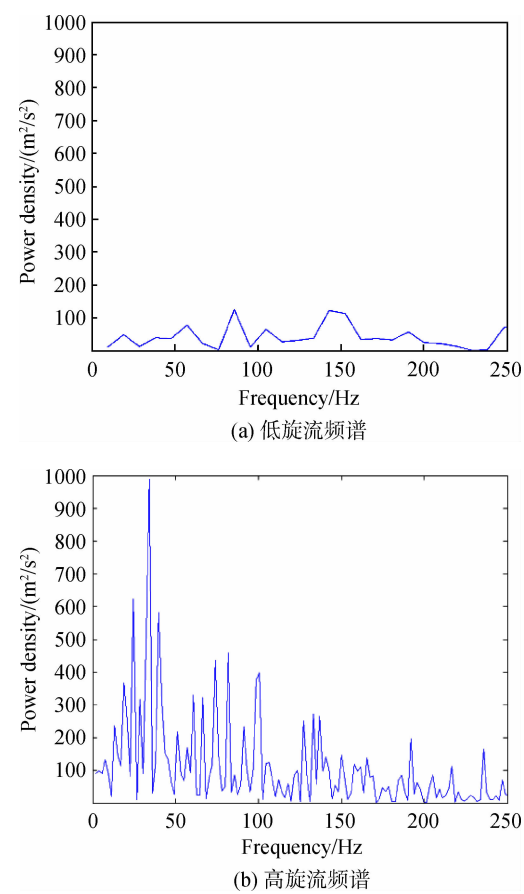


图 4 低旋流与高旋流的频谱图($H/D=1.2$)

Fig. 4 Low swirl and high swirl spectral diagram ($H/D=1.2$)

为了更直观地展现 PVC 的结构形态,可以用压力(p)等值面来显示涡旋的三维结构。图 5 为 -50 Pa 瞬时压力等值面。流场上游可以看到由旋流器出口形成的螺旋涡,迅速向下游发展并逐渐破碎成小尺度涡旋^[22]。在高旋流流场的下游,由于强烈的卷吸作用出现了大尺度的进动涡核结构,该结构绕着中心轴做周期性旋转,形成低频振动。这种现象也会引起低压区沿周向的运动,激起燃烧室内的速度及压力波动。

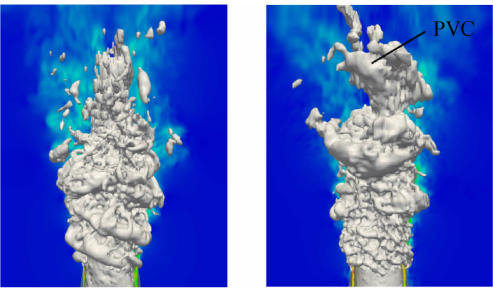


图 5 瞬时压力 -50 Pa 等值面
Fig. 5 Instantaneous pressure -50 Pa isosurface

从温度分布可以看出,低旋流火焰是托举火焰,如图 6 显示,托举火焰的火焰锋面远离燃烧室头部,可以很好地抑制喷嘴的烧蚀。高旋流燃烧室喷嘴下游存在很强的回流区,下游的高温产物被卷吸回来,对未燃气体进行预热并点燃预混气。而低旋流形成的是托举火焰,利用了湍流火焰速度与旋流流场的低速区的流场速度相等来稳定火焰。从燃料 CH_4 分布还可以看出明显的剪切层作用。

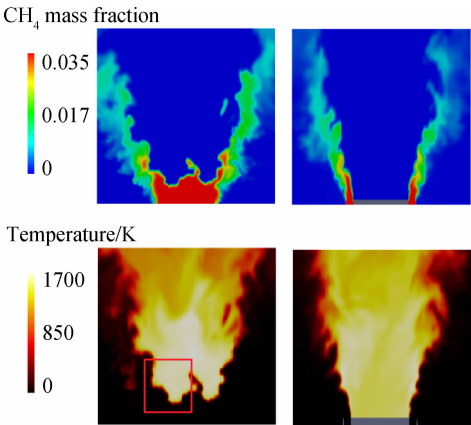
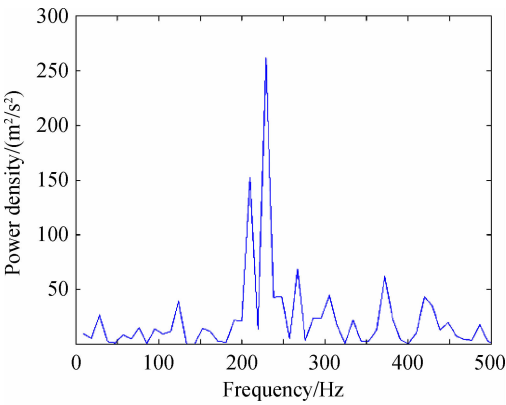


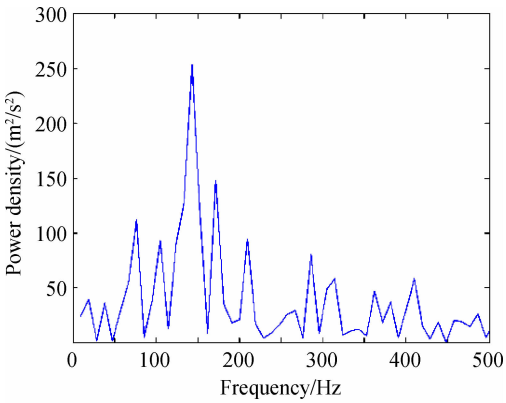
图 6 旋流流场中截面的燃料 CH_4 和温度分布
Fig. 6 CH_4 and temperature distribution in a swirling flow field

如图 7 所示,图中 r 为半径方向的距离,由于低旋流燃烧器的几何结构,其下游会产生内外剪切层,通过速度频谱分布可以看出,外剪切层存在 145 Hz 左右的脉动主频,而内剪切层存在 230 Hz 左右的脉动主频。

低旋流火焰根部的左侧部分随时间(t)发展(4 ms)的瞬时结构,如图 8 所示,将内剪切层所形成的顺时针旋转的涡脱落结构定义为内涡(如红色圆圈所示),外剪切层作用下形成的逆时针旋转结构为外涡(如蓝色圆圈所示),另外一侧火焰根部的涡系旋转方向则相反(图中没有显示)。从图



(a) $H/D=0.3, r/D=0.3$



(b) $H/D=0.2, r/D=0.6$

图 7 低旋流内外剪切层的频谱分析

Fig. 7 Spectrum of the inner and outer shear layers of low swirl

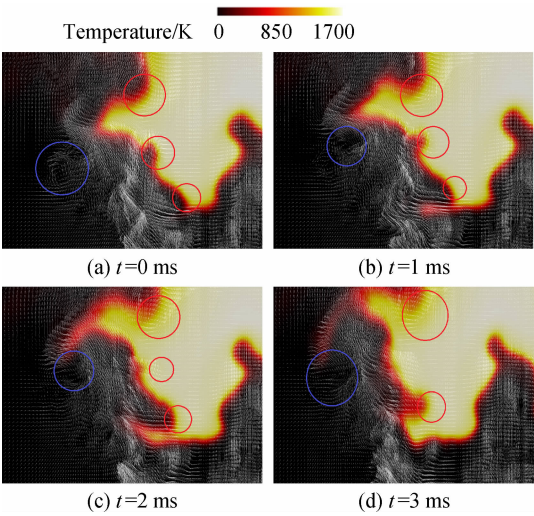


图 8 涡旋与火焰的相互作用

Fig. 8 Vortex interaction with flame

8 中能观察到火焰的变化过程,随着外涡的逆时针运动,流体被涡旋结构携带沿逆时针方向输运,火焰也受到流体流动的作用向外侧拉伸。顺时针的内涡将下游火焰的高温区向上游位置处输运,预热并引燃可燃极限内的新鲜混气。由于外涡的

频率低,涡旋尺度较大,并不能形成一连串的涡系,对火焰外部的卷吸作用是周期性的。内涡的脱落频率高较,内涡结构能够接连不断地产生,因此能够源源不断地补充高温燃烧产物来加热 CH_4 预混气,使火焰根部维持在相对稳定的低速区,达到稳定燃烧的效果。

由于内涡在靠近火焰锋面的位置,且内涡是顺时针旋转,涡系的一系列作用使两侧火焰逐渐向中心靠近,形成了 V 型火焰。一旦形成了 V 型火焰,中轴线位置处的热膨胀作用得到强化,使内涡强度削弱,火焰失去内涡的束缚又会向外延伸为 W 型火焰。如图 9 所示,内外涡的联合输运作用会形成 W 和 V 型火焰交替出现的现象,火焰会在低旋流喷嘴出口下游低速区位置稳定燃烧。

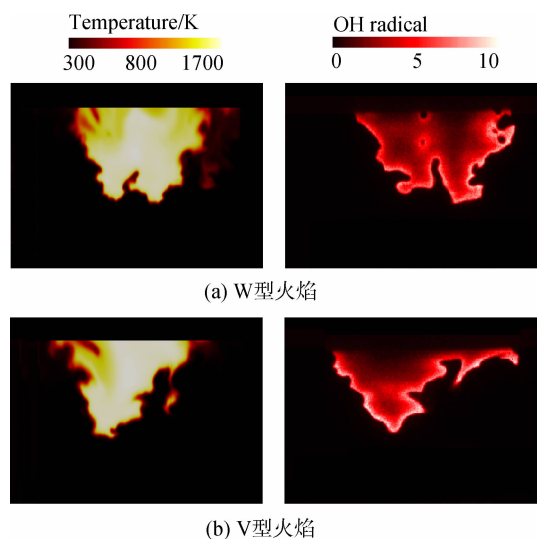


图 9 W 和 V 型火焰温度分布的模拟结果和 OH 实验分布

Fig. 9 Simulation results of W and V flame temperature distribution and OH experimental distribution

3 结 论

本文使用大涡模拟 (LES) 方法分析对比了高旋流和低旋流的稳定燃烧机理。结果如下:

1) 低旋流下游流场出现较弱的回流区,形成托举火焰,避免喷嘴的烧蚀。而高旋流会引发较强的回流区,并引发进动涡核 (PVC) 结构的低频振动。

2) 涡脱落和燃烧温度分布的瞬时耦合关系分析,发现火焰剪切层引起的内外涡脱落频率差是低旋流火焰稳定的最主要因素。

3) 由瞬时的温度及 OH 分布云图可以看出,低旋流火焰在内外涡系的共同作用下,交替出现 W 和 V 型火焰。

参考文献:

- [1] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [2] 邓远灏, 颜应文, 朱嘉伟, 等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3): 353-361.
DENG Yuanhao, YAN Yingwen, ZHU Jiawei, et al. Numerical study of two-phase spray combustion for lean premixed prevaporized low-emission combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3): 353-361. (in Chinese)
- [3] 刘强, 索建秦, 梁红侠, 等. 直混燃烧与 LPP 组合燃烧室数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2448-2454.
LIU Qiang, SUO Jianqin, LIANG Hongxia, et al. Numerical investigation of combination of direct mixing combustion and LPP combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2448-2454. (in Chinese)
- [4] KIM K T, LEE J G, QUAY B D, et al. Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(9): 1718-1730.
- [5] KOMAREK T, POLIFKE W. Impact of swirl fluctuations on the flame response of a perfectly premixed swirl burner[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(6): 061503. 1-061503. 7.
- [6] CHAN C K, LAU K S, CHIN W K, et al. Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl[J]. Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1992, 24(1): 511-518.
- [7] JOHNSON M R, LITTLEJONE D, NAZZER W A, et al. A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2867-2874.
- [8] LITTLEJONE D, CHENG R K. Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3155-3162.
- [9] PETERSSON P, WELLANDER R, OLOFSSON J, et al. Simultaneous high-speed PIV and OH PLIF measurements and modal analysis for investigating flame-flow interaction in a low swirl flame[C]// Proceedings of the 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal: Applied Optics, 2012: 9-12.
- [10] BOHLIN A, NORDSTRÖM E, CARLSSON H, et al. Pure rotational CARS measurements of temperature and relative O_2 -concentration in a low swirl turbulent premixed flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3629-3636.

[11] ZHOU B, Li Q, HE Y, et al. Visualization of multi-regime turbulent combustion in swirl-stabilized lean premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162 (7): 2954-2958.

[12] 尹航,戴韧,邹玉耐,等. 贫预混低旋流燃烧器吹脱极限和流场的测量[J]. *燃气轮机技术*, 2012, 25(2): 26-31.
YIN Hang, DAI Ren, ZOU Yunai, et al. Measurements of blow off limit and flow fields of low swirl lean premixed burners[J]. *Gas Turbine Technology*, 2012, 25(2): 26-31. (in Chinese)

[13] 尹航,戴韧,张建辉,等. 旋流器安装角对低旋流燃烧流场的影响[J]. *动力工程学报*, 2011, 31(9): 664-671.
YIN Hang, DAI Ren, ZHANG Jianhui, et al. Effect of vane setting angle of swirler on flow field of a low-swirl burner [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2011, 31(9): 664-671. (in Chinese)

[14] 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.
LIU Weijie, GE Bing, TIAN Yinshen, et al. Effect of equivalence ratio on methane pre-mixed low-swirl combustion[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, 20(1): 65-69. (in Chinese)

[15] WOLF P, BALAKRISHNAN R, STAFFELBACH G, et al. Using LES to study reacting flows and instabilities in annular combustion chambers[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2012, 88(1/2): 191-206.

[16] JONES W P, MARQUIS A J, VOGIATZAKI K. Large-eddy simulation of spray combustion in a gas turbine combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(1): 222-239.

[17] SUBRAMANIAN V, DOMINGO P, VERVISCH L. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(3): 579-601.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] GOLOVITCHEV V I, CHOMIAK J. Evaluation of ignition improvers for methane autoignition[J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 135(1/2/3/4/5/6): 31-47.

[22] 张宏达,张济民,韩超,等. 大涡模拟研究钝体有旋流流场的拟序结构[J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 1854-186.
ZHANG Hongda, ZHANG Jimin, HAN Chao, et al. Coherent structures of flow fields in swirling flow around a bluff-body using large eddy simulation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 1854-1864. (in Chinese)

(编辑:张 雪)