

文章编号:1000-8055(2012)01-0033-08

旋流预混燃烧室流动混合的大涡模拟

郑韞哲¹, 朱 民¹, 姜 羲²

(1. 清华大学 热能工程系

热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 兰卡斯特大学 机械系, 英国)

摘 要: 采用大涡模拟的方法研究旋流预混燃烧室中的流动及燃料空气混合过程. 选取亚格子湍动能模式为基准的涡黏模型, 通过模拟涡核的运动过程定性的表征了拟序结构的发展; 引入混合不均匀度的概率密度函数, 研究入口边界条件尤其是入口速度对于涡团破碎及混合程度的影响规律; 通过研究速度分量与燃料质量分数脉动的相关性, 分析了不同方向的速度脉动对于混合过程的影响因子. 这些均为进一步研究旋流预混燃烧室的燃烧不稳定性及污染物排放提供了理论上的指导.

关 键 词: 旋流预混燃烧室; 大涡模拟; 拟序结构; 混合不均匀度; 联合概率密度函数

中图分类号: TK472⁺. 6

文献标志码: A

Flow and air-fuel mixing processes in a premixed swirl combustor with LES

ZHENG Yun-zhe¹, ZHU Min¹, JIANG Xi²

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Engineering, Lancaster University, UK)

Abstract: Flow and air-fuel mixing processes in a premixed swirl combustor were studied with large eddy simulation (LES) method. Eddy viscosity model based on SGS (subgrid scale) turbulent kinetic energy model was selected to simulate the movement of vortex core, in order to characterize the qualitative development of coherent structures; with the introduction of unmixedness probability density function, the influences of inlet boundary conditions on eddy break-up and mixing were studied, especially the inlet velocity boundary condition; the correlation between velocity components and fuel mass fraction fluctuation shows the different velocity fluctuation factors for the mixing process. These conclusions provide useful information for further studying of premixed swirl combustor instability and pollutant emissions.

Key words: premixed swirl combustor; large eddy simulation (LES); coherent structure; unmixedness; joint probability density function

旋流预混燃烧室中的流动及燃料空气混合过程对于研究传热传质、燃烧效率、拟序结构及

NO_x 排放等具有重要意义. 旋流预混燃烧较为广泛地应用于各种推进系统中, 尤其是燃气轮机燃

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-06-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB210106)

作者简介: 郑韞哲 (1985—), 男, 河南郑州人, 博士生, 主要从事燃气轮机燃烧室的数值计算和稳定性研究.

E-mail: zwz03@mails. tsinghua. edu. cn

烧室. 利用旋流预混作用可以达到强化传热传质, 提高燃烧反应效率, 提高系统稳定性, 降低污染物排放等目的. 旋流对于燃烧室内两股或多股射流的相互作用和湍流混合有着显著的作用, 有些情况下可以提高混合, 而有些情况下则会抑制混合. 因此研究旋流条件下组分质量的湍流输运对于发展高效低污染的燃气轮机燃烧技术具有重要的工程应用意义, 是目前国内外学者研究的重点. Ying H 等^[1]针对旋流数对燃烧室回流区、涡场等的影响展开过分析, 认为适度增加旋流数有助于建立中心回流区, 而当旋流数超过某一限值, 则会导致回流区上移引起熄火. Fernandes E C 等^[2]研究了旋流数对进动频率等燃烧不稳定性的影响, 提出旋流不稳定频率由轴向输运控制转捩为径向输运控制的旋流数为 0.88. 此外, 入口边界条件对于贫预混燃烧的不稳定性也有很大影响, Ying H 及 Nasser S 等^[1,3]都在这方面进行过研究, 得到了回火点随入口速度及当量比的变化规律. 在数值计算方面, Kim J C 等人^[4]考量了网格质量对于大涡模拟燃烧室冷态及燃烧过程的影响, 提出了加密网格以捕捉涡结构的方法. 本文针对干式贫燃预混燃烧室中的旋流运动及燃料空气混合过程, 采用大涡模拟的方法研究了入口条件影响及组分标量输运等一系列湍流问题.

目前的湍流数值模拟方法主要有直接数值模拟、大涡模拟以及雷诺平均法. 其中直接数值模拟方法(direct numerical simulation, 简称 DNS)直接求解 Navier-Stokes (N-S) 方程, 无需引入模型, 但缺少计算机资源来实现高雷诺数复杂流动的数值模拟. 雷诺平均方法(Reynolds-averaged Navier Stokes, 简称 RANS)虽然可以用现有的计算资源实现高雷诺数复杂流动的数值模拟, 但计算精度较差. 20 世纪 70 年代问世的大涡模拟(Deardoff J W, 1973)^[5]在过去的 30 多年中不断完善, 应用经验逐渐积累, 有望在 20 年内实现高雷诺数复杂流动的计算^[6]. 大涡模拟方法(large eddy simulation, 简称 LES)相比传统的雷诺平均法在计算流体动力学(CFD)计算方面解析度更高, 更加符合真实流场的特征, 具有巨大的优势. 在燃气轮机燃烧室的数值计算中, Wang S W^[7]和 Grinstein F F 等^[8]都已成功地应用 LES 模拟了燃烧室的冷态及热态涡破碎过程, Menon S 等^[9]则将 LES 用于典型燃机(通用(GE)公司 LM-6000)的模拟中, 研究了旋流数及亚格子模型对模拟旋流燃烧室中燃料空气混合过程的影响,

取得了与实验符合很好的模拟结果. 这些都表明大涡模拟在燃气轮机燃烧室的模拟方面正在发挥着愈发显著的优势. 具体地说, LES 是通过建立数学滤波函数, 从湍流瞬时运动方程中将尺度比滤波函数尺度小的涡滤掉, 从而分解出描写大涡流场的运动方程. 而被滤掉的小涡对大涡运动的影响, 则是通过建立亚格子尺度模型(SGS)来体现. 在三种常用的滤波函数: 谱空间低通滤波, 高斯滤波和盒式滤波中, 盒式滤波由于其过滤量位于单元中心更符合有限体积法的计算思想, 而被采用有限体积法的算法所采纳^[10]. 本文第二部分将简单给出大涡模拟的数学物理模型, 第三部分是数值模拟的结果及讨论, 最后是全文的结论及展望.

1 数学物理模型

在大涡模拟中, 黏性应力张量 $\bar{\tau}_{ij}$ 的封闭方法决定了所属的亚格子模型类型. 本文计算选取了亚格子湍动能模式为基准的涡黏模型作为黏性应力张量的封闭方法, 即

$$\tau_{ij}^{\text{sgs}} = -2\bar{\rho}\nu_t(\bar{S}_{ij} - \bar{S}_{kk}\delta_{ij}/3) + 2\bar{\rho}k^{\text{sgs}}\delta_{ij}/3$$

其中上标 sgs 表示需要用亚格子模型封闭的项, S_{ij} 为拉伸率张量, δ_{ij} 为 Kronecker 函数, 亚格子涡黏系数 $\nu_t = C_v\Delta\sqrt{k^{\text{sgs}}}$, $C_v = 0.067$, Δ 为过滤体积. 该模型还需补充亚格子湍动能方程进行封闭.

大涡模拟求解的控制方程为

连续方程

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}\bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial \bar{\rho}\bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{u}_j + \tau_{ij}^{\text{sgs}} - \bar{\tau}_{ij}) = 0$$

能量方程

$$\frac{\partial \bar{\rho}\bar{E}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{E}\bar{u}_j + H^{\text{sgs}} + \bar{q}_j - (\bar{u}_i\bar{\tau}_{ij} + \sigma_i^{\text{sgs}})) = \bar{Q}^c$$

组分方程

$$\partial(\bar{\rho}\bar{Y}_m)/\partial t + \partial(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{Y}_m - \bar{\rho}\bar{D}_m\partial\bar{Y}_m/\partial x_j) + \Phi_{j,m}^{\text{sgs}} + \theta_{j,m}^{\text{sgs}}/\partial x_j = \bar{\omega}_m$$

以上方程中所有上标 sgs 的项都是亚格子尺度项, 反应了亚格子尺度的影响. 采用 ALE(arbitrary lagrangian-eulerian)方法求解, 计算组分包括 CH_4 , O_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 .

本文采用本实验室燃烧动力学实验台为研究

对象,该实验台主要研究燃气轮机燃烧室内流动、混合和燃烧等动力学过程及其相互作用^[11],图 1 及图 2 就是该实验台的局部照片。整个燃烧室分为预混段和燃烧段两部分,采用预混方式,通过旋流器将空气与燃料在预混段进行充分混合,喷入燃烧段中进行燃烧。在空气流道上装有旋流器,以使空气产生周向速度,更好地与燃料混合。旋流器后有 5 根轴对称的燃料柱,喷射燃料的方向为逆向空气来流,以促进燃料和空气均匀混合。三维计算模型几何参数与该实验台燃烧室完全一致:带有 8 片旋流叶片的旋流器,外径为 3.8 cm,内径为 1 cm,旋流数为 0.9;周向均匀分布的 5 根燃料柱,长宽高为 1.3 cm×0.5 cm×0.5 cm;长度为 2.5 cm 的预混段;燃烧段长度选取为 36.6 cm。

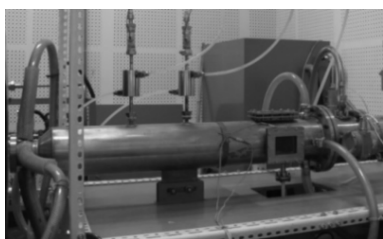


图 1 实验台燃烧段

Fig. 1 Combustion part of laboratory bench



图 2 喷嘴结构

Fig. 2 Nozzle structure

计算过程采用无滑移绝热壁面的边界条件,给定燃料及空气各自入口压力、温度、速度,在入口施加约 10% 的湍动能强度脉动。依据实验工况,所有算例中的燃料均为甲烷,每个入口压力均为 3×10^5 Pa,入口温度均为大气温度。原则上说,当大涡模拟的离散格式确定以后,数值精度仅取决于网格分辨率。粗糙的网格将使得亚格子模型所引入的模拟因素影响加大,整个计算结果不够准确。而过于细密的网格则会使 LES 的计算量接近 DNS,减弱引入亚格子模型降低计算量的优

势。因此合理的网格分辨率应是在保证精度的前提下,实现尽可能小的计算量。图 3、图 4 和图 5 显示采用分块结构化方法生成的网格(整体、喷嘴和剖面)。采用 3 种不同分辨率的网格:42 万稀网格,98 万中等网格和 200 万密网格来进行 LES 计算,三者计算得到的涡量场范围见图 6、图 7 和图 8。可以看到中等网格和密网格在捕捉最大及最小涡量的能力方面是一致的,而稀网格的分辨率明显低于其余两种。在考虑计算效率的基础上,最终选取中等网格作为后文中所有 LES 算例的计算网格。

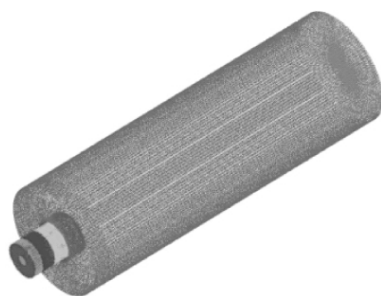


图 3 燃烧室网格图

Fig. 3 Combustion chamber mesh

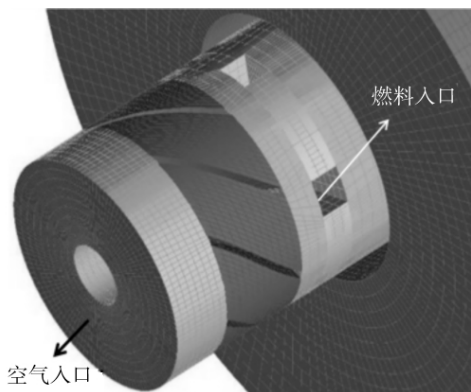


图 4 喷嘴网格

Fig. 4 Nozzle mesh

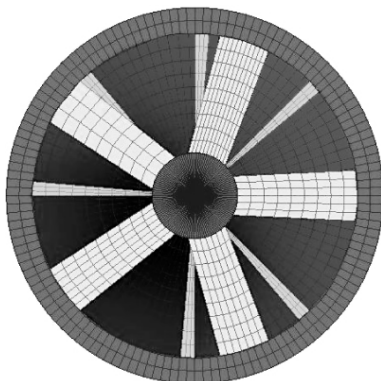


图 5 剖面网格

Fig. 5 Profile mesh

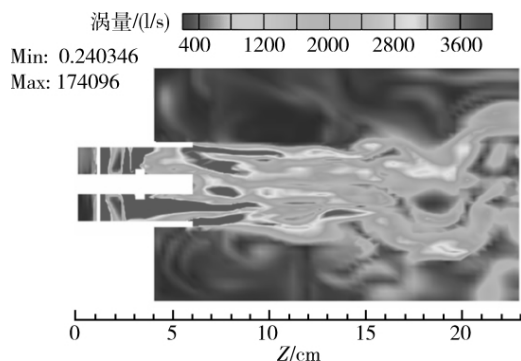


图 6 稀网格涡量场

Fig. 6 Thin grid vorticity field

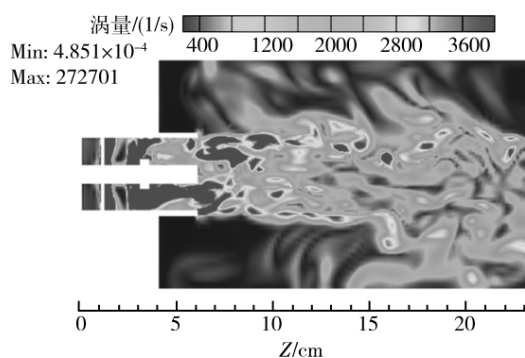


图 7 中等网格涡量场

Fig. 7 Medium grid vorticity field

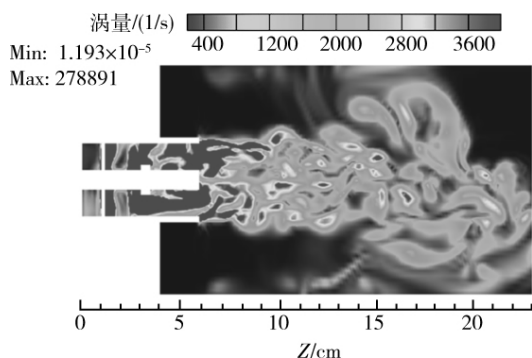


图 8 密网格涡量场

Fig. 8 Dense grid vorticity field

2 结果与讨论

在进行大涡模拟计算前,首先对 RANS 和 LES 的湍流模型的影响进行了评估.严格地说,不应直接比较 LES 和 RANS 的计算结果,因为一个是瞬时值,一个是时均值,需将 LES 的结果时均化后再进行比较.但实际上,由于任一时刻 RANS 的输出结果都是时均结果,所以也可以将这种时均值看成是 RANS 某种意义上的瞬时值.计算了标准 $k-\epsilon$, RNG(renormalization group) $k-\epsilon$

和亚格子模型下的流场,燃料与空气的供应当量比均为 1.0,其他入口条件完全相同,选取了计算稳定后的等当量比面(1.0)和轴向速度进行比较.

从图 9 可以看出亚格子模型的等当量比面的褶皱程度比两种雷诺平均法的结果更加明显,如果我们比较等涡面,也可以看到 LES 能捕捉更多的涡结构.和图 10(a),图 10(b)两图的对称性结果相比,图 10(c)中的轴向速度沿径向的非对称分布也表明亚格子模型在瞬态模拟上优于其他两种模型.综上所述 LES 比 RANS 对流场的描述更加细致,解析度更高,这也是 LES 的优势所在.在下面的讨论中,首先从 LES 的模拟结果中提取了涡核的信息进行分析.

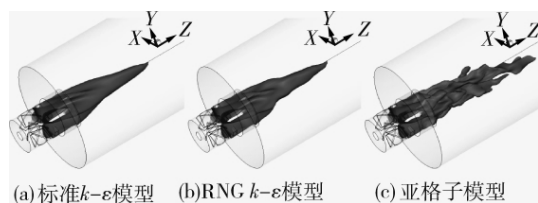


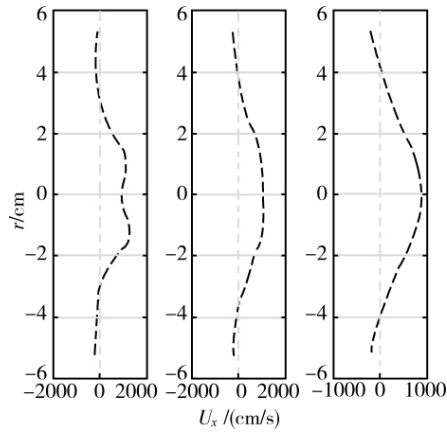
图 9 不同湍流模型的等当量比面(1.0)比较

Fig. 9 Iso-equivalence ratio face comparison

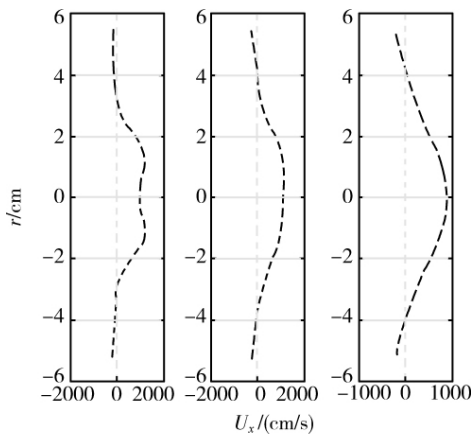
湍流运动的拟序结构对流场的混合、燃烧和噪声的影响一直是近年来研究的重点,对拟序结构的人为控制也逐渐引起人们的注意.大涡拟序结构在运动中,会把结构周围非湍流的流体卷吸进来.图 11 给出的是采用纹影仪拍摄本实验台甲烷空气混合的密度场变化情况,可以明显看到拟序结构的发展.

与拟序结构密切相关的物理量—涡核的运动变化规律对于研究湍流的输运至关重要.典型的定义涡核的方法有两种:涡向量法和速度梯度特征值法.其中第二种方法较第一种方法计算更加复杂,但能给出更真实的涡核分布,减少伪涡核.图 12 给出的就是用速度梯度特征值法得到的流场瞬态涡核分布,通过动态模拟涡核数量及分布的周期变化,尤其是沿轴向分布的伸缩性,可以定性地显示出拟序结构的发展过程,如合并、卷吸过程,这种仿真结果对于研究湍流涡团的运动及变化规律提供了很好的参考作用.

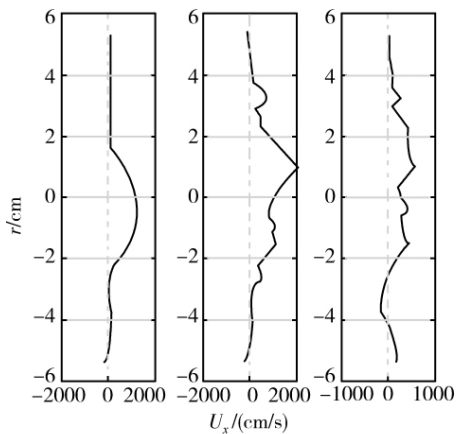
在得到涡核信息的同时,为了研究边界条件对湍流流场及混合过程的影响,针对不同燃料入口速度的冷态流动也进行了数值模拟.图 13 中的流线形象显示了燃料流与空气流的流动及混合过程,可以看到两者之间的相互交汇.下面将首先分



(a) 标准 $k-\varepsilon$ 模型



(b) RNG $k-\varepsilon$ 模型



(c) 亚格子模型

图 10 不同湍流模型的轴向速度比较:轴向位置
 $x/D=0.917, 1.333, 1.750$

Fig. 10 Axial velocity comparison at
 $x/D=0.917, 1.333, 1.750$

析入口速度对流动过程的影响. 图 14 给出了不同燃料入口速度在相同时刻的轴向及切向涡量场剖面图, 图 15 给出了不同轴向位置处的涡量沿径向的分布. 与纹影仪拍摄到的相同工况下的实验结

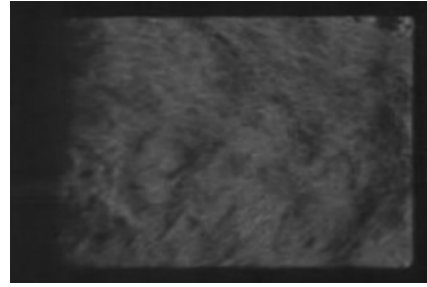


图 11 甲烷空气当量比混合密度梯度场

Fig. 11 Methane-air mixed density gradient field
at equivalence ratio 1.0

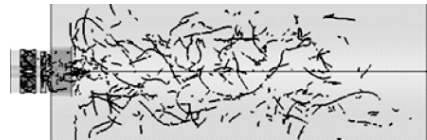


图 12 流场瞬态涡核分布

Fig. 12 Transient vortex core distribution

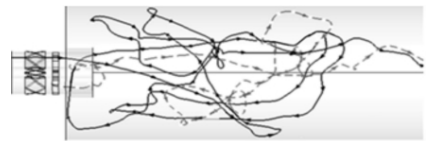


图 13 燃料流与空气流的流场及混合

(虚线:燃料流;实线:空气流)

Fig. 13 Mixing flow field of fuel and air
(dotted line: fuel flow; solid line: air flow)

果相比具有一致性.

图 14 和图 15 的涡量场分别定性及定量地显示了不同燃料入口速度对涡量场的影响. 入口速度的增加使得相同位置处的涡量加大, 即加大了涡破碎的程度, 而涡量场沿半径的分布也体现了入口速度增加有效的提高了涡团的扩散速度. 究其原因, 燃料是逆向喷入与空气混合的, 大的入口速度增加了相对速度, 相应地增加了动量梯度, 提高了下游的剪切应力, 因而会加剧涡团的破碎. 涡团破碎及扩散对于燃料空气的混合具有重要意义, 下节将就此展开定量的分析.

入口速度的改变对混合过程的影响也很显著, 这一点可以通过研究混合不均匀度的概率密度函数来说明. 采用 $\text{Fric T F}^{[12]}$ 对时间混合不均匀度 (unmixedness) 的定义

$$U = Y_f'' / \overline{Y_f} (1 - \overline{Y_f})$$

其中 $\overline{Y_f}$ 为流场中某点燃料质量分数的时均值, Y_f'' 为同一位置处燃料质量分数的脉动值. U 绝对值越接近于 0, 表明混合程度越好. 利用单步脉冲

函数^[8],采集流场中测点的有效数据,可以得到混
合不均匀度的概率密度函数 $P(U)$

$$P(U) = \sum_{i=1}^N [H(U_i - U) - H(U_i - U - \Delta U)] / N \Delta U$$

其中 H 为 Heaviside 函数,见图 16 和图 17.

图 16 为不同入口速度下得到的轴向混合不
均匀度的概率密度函数 PDF(probability density
function)曲线.可以看出随着入口速度的增加,混

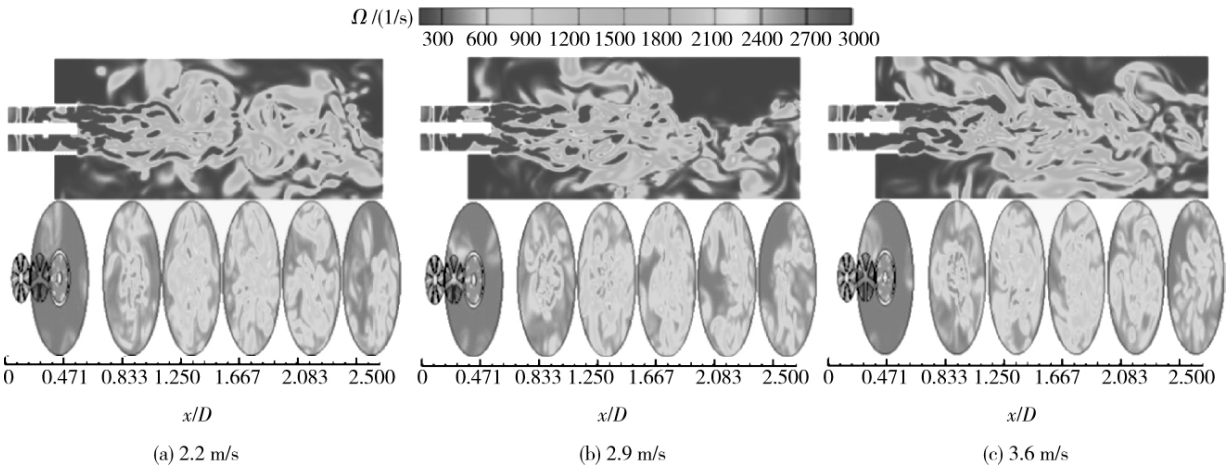


图 14 不同燃料入口速度的轴向及切向涡量场剖面图

Fig. 14 Axial and tangential vorticity field profile of different fuel inlet velocities

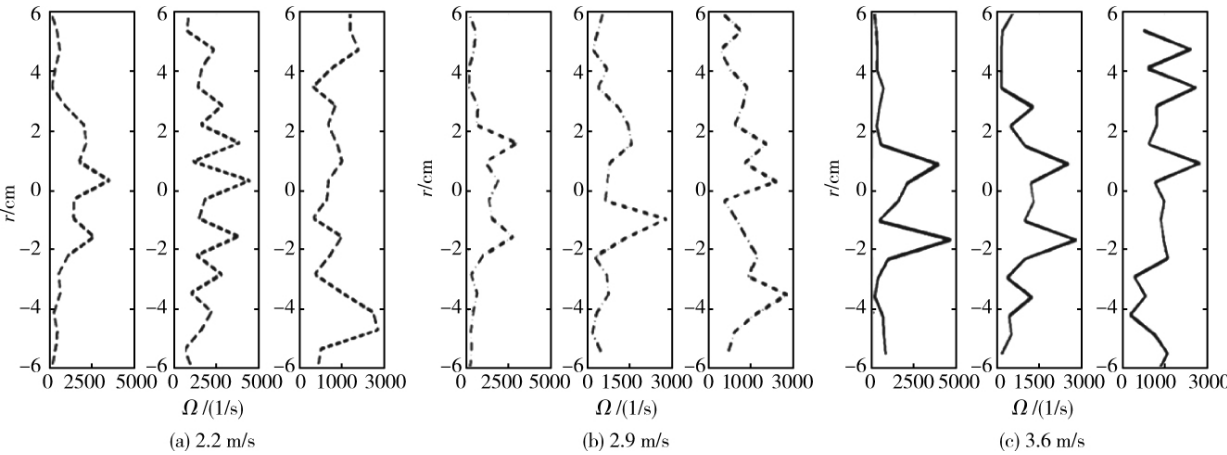


图 15 不同燃料入口速度的涡量分布:轴向位置 $x/D=0.917, 1.333, 1.750$

Fig. 15 Vorticity distribution of different fuel inlet velocities at $x/D=0.917, 1.333, 1.750$

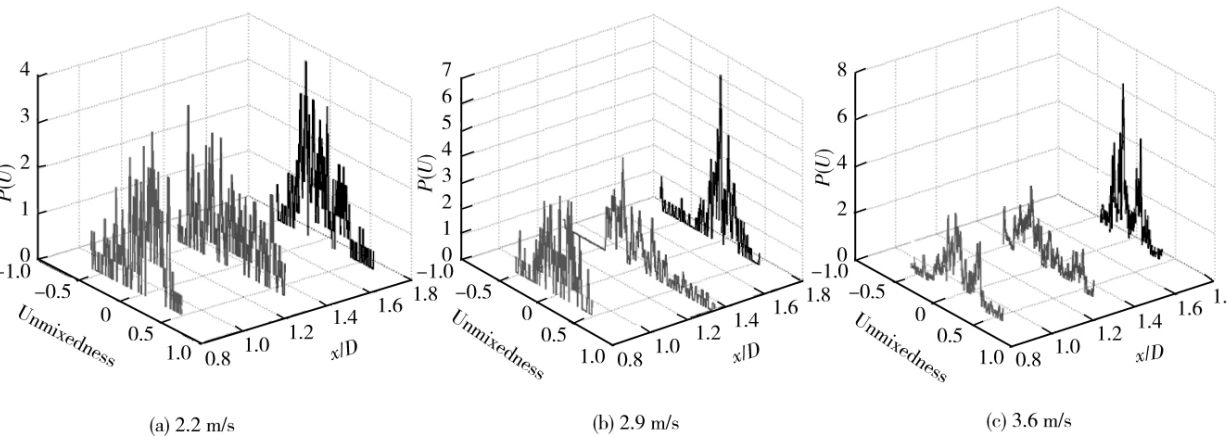


图 16 不同入口速度轴向混合不均匀度的概率密度函数分布

Fig. 16 Axial unmixedness PDF distribution of different inlet velocity

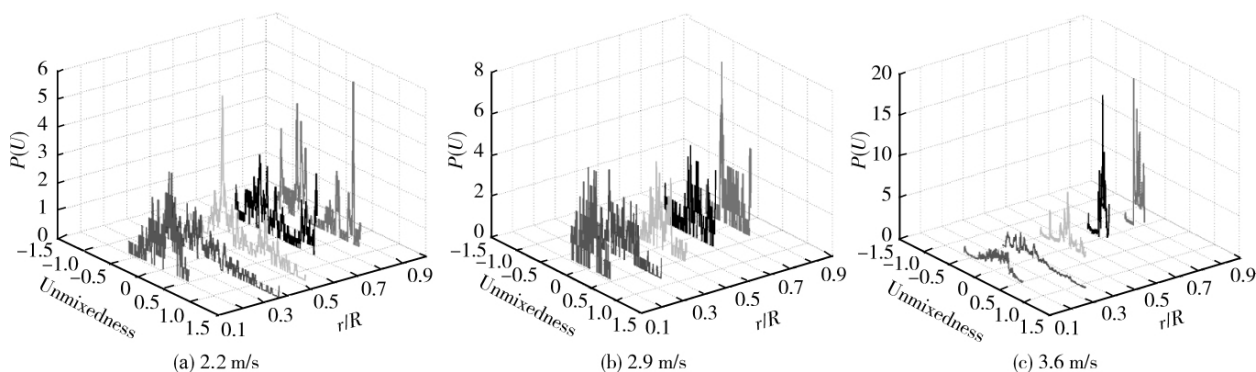


图 17 不同入口速度径向混合不均匀度的概率密度函数分布

Fig. 17 Radial unmixedness PDF (probability density function) distribution of different inlet velocity

合不均匀度的概率密度分布范围从 $[-1.0, 1.0]$ 逐渐缩小到 $[-0.5, 0.5]$,这一点在下游尤为明显.纵坐标显示了入口速度的增加使得概率密度函数峰值的量级也有所增加,即分布更加集中,这也表征了混合得更加均匀.结合上节入口速度对涡场的影响,可知涡团破碎程度和速度的增加使得燃料空气混合较好的区域向上游推进,即有助于全场混合程度和速度的提高.

图 17 为不同入口速度下得到的流场中某典型轴向位置处($x/D=0.917$)径向混合不均匀度的概率密度函数曲线.在分布范围和峰值大小方面可以得到和图 16 相一致的结论,即入口速度的增加使得分布更加集中,改善了径向混合不均匀度,这说明速度增加所引起的剪切应力的提高对于燃料的径向扩散起到了促进作用.

以上的分析表明速度场对于混合程度有着重要影响,更深入的分析则可以显示该影响的方向性性质.通过研究速度分量与燃料质量分数的相关性^[13],分析了不同方向的速度分量脉动对于混合过程的影响因子,即 $\langle u'_i Y'_f \rangle$ 的性质.

图 18 给出的就是流场中某典型点处($x/D=0.917, r/R=0.213$)的速度分量-燃料质量分数脉动的联合概率密度函数(Joint PDF)及对应的 xy 坐标平面上的等高线.对于联合概率密度函数来说,它的一个重要性质就是相关系数,即

$$r = \langle u'_i Y'_f \rangle / \{ \langle u'^2_i \rangle \langle Y'^2_f \rangle \}^{1/2}$$

由图 18 的模拟结果结合上述公式可以得到速度分量 u', v', w' 与燃料质量分数脉动 Y'_f 的相关系数分别为:0.0364, 0.3737 和 0.1663.可以看到径向速度分量与燃料质量分数的相关系数 $r\langle vY'_f \rangle, r\langle wY'_f \rangle$ 明显高于轴向速度分量与燃料质量分数的相关系数 $r\langle uY'_f \rangle$,这个结论可以从图 18 中的等高线分布中得到解释.虽然图 18(a)中的联合概率密度函数相比图 18(b), 18(c)两张图分布更广,但由于其在第一、二、四象限的分布具有对称性,正负相关抵消的结果使得轴向速度分量 u 对于燃料空气混合程度的贡献减弱,因此相关系数较低.这说明径向的速度梯度相对于轴向速度梯度来说,对于当地的混合程度有着更大的影响.

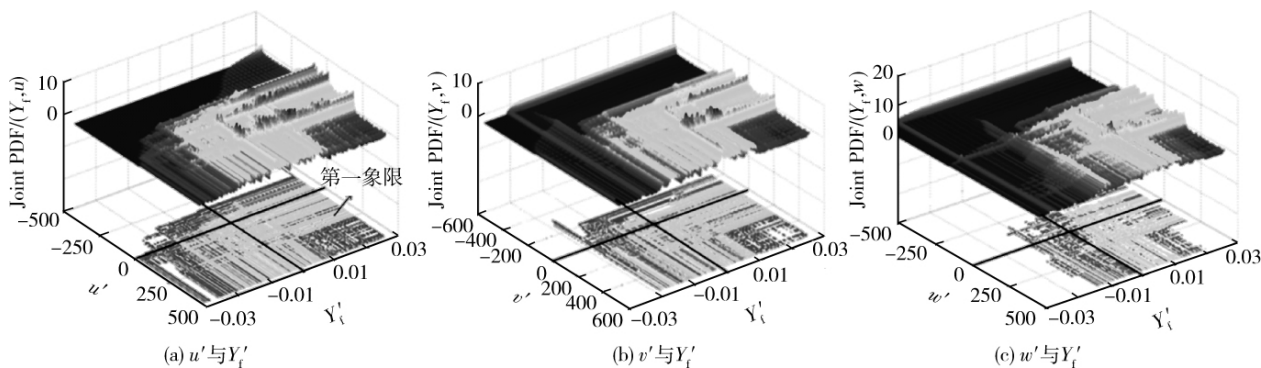


图 18 速度分量与燃料质量分数脉动的联合概率密度函数分布

Fig. 18 Joint PDF distribution of velocity component and fuel-mass fraction pulsation

3 结 论

为了研究旋流预混燃烧室中流动及燃料空气混合过程,选取大涡模拟的方法,在考虑计算精度及计算量的基础上,模拟了燃气轮机燃烧室实验台预混及燃烧段中的流动混合过程. 计算结果显示,通过研究涡核的运动变化规律可以定性地表征拟序结构的发展过程,为进一步研究拟序对于流场混合、燃烧和噪声的影响提供了依据. 较高的燃料入口速度,增加了燃料流与空气流的相对速度,提高了下游的剪切应力,加剧了涡团破碎的程度和速度. 研究径向和轴向混合不均匀度的概率密度函数变化规律,可以有效地表征入口速度的影响作用;速度分量与燃料质量分数脉动的相关性分析,有助于更好地研究组分标量输运的方向性,研究表明径向的速度梯度相对于轴向速度梯度来说,对于当地的混合程度有着更大的影响. 这些结论均为进一步研究旋流预混燃烧室的燃烧不稳定及污染物排放提供了理论上的指导. 在下一步的工作中,还将对旋流数、入口其他参数等对流场的影响展开研究. 同时,由于燃烧过程的模拟需将湍流与化学反应相耦合,分析燃烧模型、燃料物性等对燃烧室性能的影响将是下一步研究工作的重点.

参考文献:

- [1] Ying H, Yang V. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 1775-1782.
- [2] Fernandes E C, Heitor M V, Shtork S I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor. experiments[J]. Fluids, 2006, 40(2): 177-187.
- [3] Nasser S, Griffiths A J, Syred N. Numerical study of stability limits of premixed-swirl flames[C]// 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition. USA: Springer, 2009(5): 135-189.
- [4] Kim J C, Sung H G, Min D K. Large eddy simulation of turbulent flow field in a swirl stabilized annular combustor [C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. USA: Springer, 2009: 83-162.
- [5] Deardorff J W. The use of subgrid transport equations in a three-dimensional model of atmospheric turbulence[J]. Journal of Fluids Engineering, Transaction of the ASME, 1973, 95(2): 15-26.
- [6] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [7] Wang Shanwu, Yang V, Mongia H, et al. Modelling of gas turbine swirl cup dynamics, part5: large eddy simulation of cold flow[C]// 41st Aerospace Sciences Meetings and Exhibit. France: Springer, 2003: 165-183.
- [8] Grinstein F F, Fureby C. LES studies of the flow in a swirl gas combustor[C]// 41st Aerospace Sciences Meetings and Exhibit. Reno USA: Springer, 2003: 56-73.
- [9] Menon S, Kim W, Stone C. Large-eddy simulation of fuel-air mixing and chemical reactions in swirling flow combustor[R]. AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Norfolk, VA, U. S. : AIAA, 1999.
- [10] Sone K, Patel N, Menon S. Implementations of large-eddy simulation into KIVA code Part I: theory and formulation [M]. Georgia: Low Alomas Lab, 2008.
- [11] 张昊, 黄铮, 朱民. 自激振荡预混燃烧的实验研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 28-34.
ZHANG Hao, HUANG Zheng, ZHU Min. Experimental study of self-oscillation premixed combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 28-34. (in Chinese)
- [12] Fric T F. Effects of fuel-air unmixedness on NO_x emissions[J]. American Aeronautics & Astronautics, 1992(5): 33-45.
- [13] 刘难生, 陆夕云, 庄礼贤. 旋转效应对近壁湍流特性和流场结构的影响[J]. 中国科学, 2005, 35(1): 87-108.
LIU Nansheng, LU Xiyun, ZHUANG Lixian. Rotational effect on the near-wall turbulence characteristics and flow structure[J]. China Science, 2005, 35(1): 87-108. (in Chinese)