# 反应机理对湍流预混值班火焰稳燃影响的研究\*

刘英杰<sup>1</sup>, 刘 潇<sup>2</sup>, 周 波<sup>3</sup>, 游滨川<sup>2</sup>, 郑洪涛<sup>2</sup>

(1. 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,黑龙江 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:针对反应机理对湍流预混值班火焰稳燃的影响,使用大涡模拟(LES)耦合输运概率密度(PDF)方法模拟了湍流射流火焰的燃烧流场。化学反应过程采用被广泛应用的SMOOKE(16组分,46步)和DRM22(22组分,104步)机理,概率密度输运的确定采用欧拉随机场来实现。计算结果表明, LES/PDF模型可以准确地模拟该类火焰的速度分布,火焰褶皱等结构。反应机理的点火延迟时间的准确 与否是模拟值班射流火焰的关键,预混射流出口处的小尺度掺混引起的点火和火焰传播过程是值班射流 火焰稳燃的关键。

关键词:湍流预混火焰;反应机理;大涡模拟;点火;燃烧稳定性 中图分类号: V231.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2020)10-2276-07 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190541

# Effects of Reaction Mechanism on Stabilization of Turbulent Premixed Pilot Flame

LIU Ying-jie1, LIU Xiao2, ZHOU Bo3, YOU Bin-chuan2, ZHENG Hong-tao2

(1. Aero Engine Academy 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 518055, China)

**Abstract**: Aiming at the effects of different reaction mechanisms on the flame stability, LES coupled transport probability density (PDF) method were used to simulate the combustion flow field of turbulent jet flame. The chemical reaction process uses SMOOKE (16 components, 46 steps) and DRM22 (22 components, 104 steps) mechanism which are widely used, and the probability density transport equation is achieved by Eulerian stochastic fields method. The results show that the LES / PDF model can accurately capture the velocity distribution, flame wrinkle and other small structures. The prediction of ignition delay time is the key factor to accurately simulate the pilot jet flame, and the auto-ignition and flame propagation process caused by small scale mixing at exit of jet are main mechanism of flame stability.

Key words: Turbulent premixed flame; Reaction mechanism; Large eddy simulation; Ignition; Combustion stability

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-08-01;修订日期: 2019-11-13。

作者简介:刘英杰,博士,高工,研究领域为燃烧的数值模拟。E-mail: yingjie1129@gmail.com

通讯作者:刘 潇,博士,副教授,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.反应机理对湍流预混值班火焰稳燃影响的研究[J].推进技术,2020,41(10):
 2276-2282. (LIU Ying-jie, LIU Xiao, ZHOU Bo, et al. Effects of Reaction Mechanism on Stabilization of Turbulent Premixed Pilot Flame[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(10):2276-2282.)

# 1 引 言

目前,石油资源的短缺与环境污染问题已成为 全球性问题。燃气轮机作为传统发动机,其污染物 排放问题,也得到越来越多学者的关注。为此,高性 能低污染已成为燃气轮机的重要设计指标<sup>[1]</sup>。贫燃 预混燃料的燃烧技术可以大大减少污染物的排放, 因此,各国学者们开展了燃气轮机贫燃预混燃烧室 的设计研究<sup>[2-5]</sup>。

与扩散火焰不同,贫燃预混火焰比较难以控制,容易受运行工况影响,可能形成燃烧不稳定引起的回火、熄火和燃烧振荡等问题。因此,需要深入地研究和理解预混湍流火焰的燃烧物理过程,如火焰传播,湍流和火焰的相互耦合作用和稳燃机理等。Dunn等<sup>[6-7]</sup>和Zhou等<sup>[8-9]</sup>对高卡洛维奇数(Ka)的湍流预混值班射流火焰进行了实验研究。实验所用燃烧器去除了真实燃烧室复杂的结构和旋流特性,利用值班火焰稳燃。Meier等<sup>[10-12]</sup>利用PIV和PLIF对CH<sub>4</sub>/空气预混的模型旋流燃烧室的速度温度组分等开展了定量研究,分析了不同当量比下的预混火焰的稳定性。这些定量的实验研究为后续数值模拟的模型开发和验证提供了非常有价值的丰富的实验数据。

CFD 是试验研究的补充和辅助研究方法,十分依 赖于计算机技术的发展,因此,湍流燃烧的大涡模拟 (LES)方法直到近十几年才开始大量使用。目前,针 对湍流燃烧模拟问题,LES是模拟准确性与计算时间 成本之间的最佳折中数值模拟方案。相对于RANS 湍流模型,LES可以捕捉到湍流燃烧中涡团的动态发 展规律,如燃机燃烧室中的振荡燃烧和热声耦合现 象:相对于DNS湍流模型,LES可以节省大量的计算 时间成本得到相对准确的模拟结果[13-15]。如何准确 模拟湍流流场和燃烧化学反应之间的相互耦合作用 是模拟湍流燃烧的最大困难与挑战。在模拟湍流燃 烧的过程中,化学反应的源项与湍流模型中对流项 同时存在非线性高阶矩阵建模问题。输运概率密度 模型(PDF)作为一种通用的燃烧模拟模型,可以模拟 预混非预混或部分预混,其最大的优势在于化学反 应源项是不需要模型封闭的,适合处理带有自点火、 局部熄火再燃和湍流火焰强烈的相互作用的燃烧问 题。湍流燃烧模拟需要用到化学反应机理来处理化 学反应动力学过程。根据化学反应过程的描绘完整 程度和机理可使用范围的宽度,化学反应机理可以 分为详细的和简化的化学反应机理。详细机理一般 包括上百种组分和几百至一千多个基元反应,能够 真实反映燃料燃烧化学本质,但是计算过程对硬件 要求比较高,同时,考虑到计算时间成本,大多数计 算都采用相对简化的燃烧机理。

本文使用 OpenFOAM 开源计算软件,利用输运型 PDF 湍流燃烧模型对 LUND 大学的 LUPJ 系列火焰进行了数值模拟,研究 LES/PDF 模型对高 Ka 数火焰的模拟效果,同时分析不同化学反应机理<sup>[16-19]</sup>(SMOOKE和 DRM22)对预测值班预混火焰的稳燃机理的影响。

### 2 数值方法

### 2.1 LES 湍流模型

大涡模拟湍流模型通过滤波函数将速度温度等 变量划分成两个部分,其中,滤波过后大尺度的变 量,在大涡模拟时采用直接求解的方式;剩下的小尺 度变量,则需采用数学模型封闭计算。本文模型经 过盒式滤波函数滤波后的纳维斯托克斯方程可表 示为

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho} \, \tilde{u}_i}{\partial x_i} = \overline{S}_{\rho} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{\rho} \, \tilde{u}_{i}}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \, \tilde{u}_{i} \tilde{u}_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\overline{\tau}_{ij} - \overline{\rho} \, \widetilde{u}_{i}' \widetilde{u}_{j}'\right) + \overline{S}_{u_{i}} (2)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho} \, \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{\rho} \, \tilde{h} \widetilde{u}_{j}\right)}{\partial x_{j}} =$$

$$\frac{D \overline{\rho}}{D t} - \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{q}_{j} + \overline{\rho} \, \widetilde{u}_{j}' \widetilde{h}''\right) + \overline{\tau}_{ij} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \overline{S}_{H}$$

$$(3)$$

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,方程(2)和(3)中的需要采用下式对二 阶矩项封闭

$$\overline{\rho} \, \widetilde{Y_k'' u_j''} = -\frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial \widetilde{Y}_k}{\partial x_i} \operatorname{or} \overline{\rho} \left( \widetilde{Y_k u_j} - \widetilde{Y}_k \widetilde{u}_j \right) = -\frac{\mu_{\text{SGS}}}{Sc_{\text{SGS}}} \frac{\partial \widetilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\overline{\rho}\,\widetilde{h''u_j''} = -\frac{\mu_i}{Pr_i}\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x_i} \text{ or } \overline{\rho}\left(\widetilde{hu_j} - \tilde{h}\tilde{u}_j\right) = -\frac{\mu_{\text{SCS}}}{Pr_{\text{SCS}}}\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x_i} \quad (5)$$

#### 2.2 亚格子模型

与雷诺时均的模型封闭相似,亚格子模型(SGS) 的应力项同样采用涡粘假设进行表述

$$R_{ij} = \overline{\rho} \left( \widetilde{u_i u_j} - \widetilde{u}_i \widetilde{u}_j \right) = -2\mu_{\rm SGS} \widetilde{S}_{ij}^{\rm D} + \frac{2}{3} \overline{\rho} \, k \delta_{ij} \qquad (6)$$

式中 $\mu_{scs}$ 为亚格子粘度,为了求解这个量,提出了 Smagrinsky 模型。

# 2.3 PDF燃烧模型

定义 $\psi = [Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_s}, h]$ 的单坐标点和单时间 点的联合概率密度函数 $\tilde{P}(\psi; x, t)$ ,经过计算,可以 获得该函数的输运方程

$$\overline{\rho} \frac{\partial \widetilde{P}(\psi)}{\partial t} + \overline{\rho} \, \widetilde{u}_{j} \frac{\partial \widetilde{P}(\psi)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial \psi_{\alpha}} \Big[ \overline{\rho} \, \dot{\omega}_{\alpha}(\psi) \, \widetilde{P}(\psi) \Big] = \\
- \frac{\partial}{\partial x_{i}} \Big[ \left\langle u_{i}'' \middle| \psi \right\rangle \overline{\rho} \, \widetilde{P}(\psi) \Big] + \frac{\partial}{\partial \psi_{\alpha}} \Big[ \left\langle \frac{\partial J_{i}^{\alpha}}{\partial x_{i}} \middle| \psi \right\rangle \widetilde{P}(\psi) \Big]$$
(7)

式中, $\langle \cdot | \psi \rangle$ 表示有条件的平均值。方程的左侧 表达式是数值封闭的,第一和第二项表示 $\tilde{P}(\psi; x, t)$ 沿着平均流线的输运,很明显化学反应的源项 $\dot{\omega}_{\alpha}$ 在 概率密度函数的输运方程中是数值封闭的,不再需 要任何假设和近似,这是概率密度函数模型的最大 优势。

平均交换相互作用模型(IEM)小尺度的混合模型在本文中应用,表示为

$$\left\langle \frac{\partial J_i^{\alpha}}{\partial x_i} \middle| \psi \right\rangle = \frac{1}{2} C_{\phi} \omega_i \left( \psi_{\alpha} - \tilde{\psi}_{\alpha} \right) \tag{8}$$

式中 $\omega_1$ 为湍流的频率, $C_{\phi}$ 是模型系数,对于不同的燃烧模式或火焰结构需选取不同的参数,本文取2.0。

因为概率密度函数模型的输运方程具有高维度 特点,本文利用欧拉随机场下的蒙特卡洛(Monte Carlo)方法对PDF方程进行求解。该方法假设燃烧流场 中存在的 $N_s$ 个标量, $\xi^n_{\alpha}(x,t)$ ,1  $\leq n \leq N_s$ 由 $N_s$ 个随机 场来表示,其中的不同标量演化过程要遵循下式的 随机微分方程(SDE)

$$\begin{split} \bar{\rho} \, \mathrm{d}\xi_{\alpha}^{n} &= -\bar{\rho} \, \tilde{u}_{i} \frac{\partial \xi_{\alpha}^{n}}{\partial x_{i}} \, \mathrm{d}t + \bar{\rho} \, S_{\alpha}^{r}(\psi^{n}) \mathrm{d}t + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( \Gamma_{\iota} \frac{\partial \xi_{\alpha}^{n}}{\partial x_{i}} \right) \mathrm{d}t - \\ &\frac{1}{2} \bar{\rho} \, C_{\phi} \omega_{\iota} \left( \xi_{\alpha}^{n} - \tilde{\phi}_{\alpha} \right) \mathrm{d}t + \bar{\rho} \, \sqrt{2 \frac{\Gamma_{\iota}}{\bar{\rho}}} \frac{\partial \xi_{\alpha}^{n}}{\partial x_{i}} \mathrm{d}W_{i}^{n} \end{split}$$
(9)

式中 $\bar{\rho} S'_{\alpha}(\psi^{(n)}) dt$ 为化学反应源项的增量,  $dW^{n}$ 是 一个向量随机过程。

要特殊说明的是,上述的随机场不是要模拟湍流和化学反应,而是要计算概率密度函数模型的输运方程中具有相同 PDF 的相同效果的随机系统。随机场是空间上连续可微的,时间上不可微。

#### 2.4 实验及计算边界条件

本文模拟的目标火焰为 LUND 大学的预混值班 火焰 LUPJ-165。LUPJ-165 系列火焰主要研究在 Ka 数很高的情况下湍流流动和火焰结构的耦合规律。 预混可燃气的射流速度从 11m/s 增加到 418m/s,火焰 形态由层流转变为湍流,Ka数包括了几十到上千,当 量比从 0.4 变化到 1。如图 1 所示,预混气 CH<sub>4</sub>/Air 通 过中间直径为 1.5mm 的管路射流喷入,中间管路的外 侧为直径 61mm 的用于稳定火焰的值班火焰,其组分 为当量比 0.9 时 CH<sub>4</sub>/Air 的燃烧产物,最外侧是常温常 压的空气伴流环境。具体的实验条件和详细火焰信 息见参考文献[8-9]。



chemical glow

对流项采用TVD格式,其余梯度项均采用二阶 精度的离散方法。预混气的入口使用发展充分的湍 流入口边界,目的是保证湍流流动空间和时间的相 关性。火焰的整体计算域是倒圆台形状,下侧直径 为70D(D为预混气管路直径),上侧直径为105D,高 度为70D,最小网格尺度0.03mm,网格尺度沿着径向 外侧和轴向上侧方向逐渐变大。本文采用出口回收 方式形成充分发展的湍流入口的方法<sup>[4,13]</sup>,与实验数 据对比的结果来看是比较准确的。

本研究做了一个简单网格分析,一个粗网格(直径方向261,最小0.05/0.03mm,轴向方向140,最小0.2mm,最终1.1×10<sup>6</sup>网格数),一个细网格(直径方向412,最小0.05/0.03mm,轴向方向410,最小0.06/0.03mm,最终4.2×10<sup>6</sup>网格数),粗网格计算结果显示,如图2所示,粗网格并不能捕捉到火焰剪切层处的涡系结构,火焰褶皱情况明显与实验数据不符,而细网格的结果与实验数据对比非常好,包括褶皱和速度对比。

# 3 计算结果与讨论

本文通过 CHEMKIN 计算软件进行了 GRI3.0 详 细机理、SMOOKE 简化机理与 DRM22 简化机理对比 验证,分析了不同机理在不同参数条件下的点火延 迟时间、熄火时的火焰拉伸率、层流火焰传播速度和 绝热燃烧温度的变化规律,并与实验数据进行了比



较,如图3所示。反应燃料为甲烷,详细机理GRI3.0 的模拟结果与实验结果吻合良好。

如图 3(a) 所示, 为混合燃料在不同初始温度下 的点火延时的谢苗诺夫(Semenov)曲线,其中,横坐 标为1000/T形式,纵坐标取对数形式。模拟结果表 明详细机理 GRI3.0 与简化机理 DRM22 与实验测得 的点火延迟时间较吻合,但简化机理DRM22模拟的 点火延迟时间随着反应温度的增加逐渐变短,最终 低于实验值。而简化机理 SMOOKE 模拟的点火延迟 时间结果较长,高于实验值一个数量级,但其趋势与 实验值保持一致。因此,简化机理SMOOKE的模拟 结果仅能作为参考,对火焰的点火过程描述的不够 准确。同时,如图3(b)所示,对比发现,简化机理 SMOOKE模拟的熄火拉伸率比详细机理 GRI3.0 的模 拟结果要大20%,这表明简化机理SMOOKE对火焰 的熄火过程描述的也不够准确。而简化机理DRM22 模拟的熄火拉伸率与详细机理GRI3.0的模拟结果相 一致。如图3(c)和3(d)所示,为不同当量比下层流 火焰传播速度和绝热火焰温度变化规律,从图中可 以看出三种反应机理与实验值变化规律吻合良好。 通过对比分析三种反应机理对不同火焰特性的模拟 结果发现,简化机理中DRM22的模拟结果与实验值 最为接近,较为准确;而简化机理SMOOKE的模拟结 果较差,尤其是对火焰的点火与熄火过程描述的不 够准确。文献[18]对更加简化的1步或2步的甲烷 总包机理进行模拟验证,研究表明总包反应机理的 模拟结果较差,与实验值偏差较大,包含20种组分以 上的甲烷反应机理才能较为准确地描述出火焰的燃 烧特性。

图 4 为 SMOOKE 机理模拟的预混值班火焰的中间组分 CH<sub>2</sub>O, HCO 和 OH 在中截面的分布,并与 PLIF 测得的预混值班火焰的实验数据进行了对比分析。 一般在燃料的燃烧过程中,把火焰分为预热区、反应 区、氧化区。在火焰的预热区中化学反应速率较低, 在区域中燃料逐渐分解成 CH<sub>2</sub>O。因此,可以把 CH<sub>2</sub>O 的分布区域认为是火焰的预热区;在火焰的反应区 化学反应速率较高,消耗大量 CH<sub>2</sub>O 生成 HCO 等中间 组分,并释放出大量的热量,使温度达到了最大值, 反应式为 CH<sub>2</sub>O + OH  $\rightarrow$  HCO + H<sub>2</sub>O,因此,可以把



Fig. 3 Effect of different mechanisms on combustion characteristics

释热率 HRR或 HCO 分布区域认为是火焰的反应区; 在火焰的氧化区中 HCO 等中间组分氧化成最终燃烧 产物,中间伴有 OH 活化基的产生。因此,可以把 OH 的分布区域认为是火焰的氧化区。



从图 5 可以发现,简化机理 SMOOKE 在燃料射流 出口处燃料中间产物质量分数很小,尤其是 HCO 低 于 1.7×10<sup>-5</sup>,这是表明在出口处化学反应速率很低,因 此化学反应释放的热量很低,点火延迟较长。如图 4 所示,本文对比了简化机理 SMOOKE 和简化机理 DRM22 在不同位置处的释热率(HRR)随反应温度的 散点图。可以发现,在 x=10mm 位置处简化机理 SMOOKE 模拟得到的 HRR 分布几乎为零,在 x=20mm 位置处简化机理 SMOOKE 模拟得到的 HRR 分布逐渐



Fig. 5 Scatter plot of heat release rate with reaction temperature

与简化机理DRM22分布保持一致。可以看出,当燃料出口射流速度逐渐增大时,简化机理SMOOKE点火延迟的缺点将会被放大,最终导致全局熄火。

图 6 为不同机理模拟的轴向和径向速度的分布。 可以发现,火焰的径向速度远小于轴向速度,这导致





燃料和值班火焰射流的剪切层处速度很高。简化机 理 DRM22模拟的轴向速度与简化机理 SMOOKE模 拟的轴向速度同实验值相比均较为吻合,这表明充 分发展的湍流入口能够准确模拟射流火焰的速度分 布,而且从图4的 CH<sub>2</sub>O分布也可以看出,燃料射流与 值班火焰形成了褶皱的剪切层;相比于简化机理 SMOOKE模拟的径向速度,简化机理 DRM22模拟的 径向速度与实验值更为吻合,简化机理 SMOOKE模 拟的径向速度沿径向发现下降缓慢,说明燃料射流 充分发展区域的火焰分布更宽,这是由于燃料在射 流出口处反应缓慢,受到值班级火焰加热集中在燃 料射流充分发展区域燃烧,热膨胀作用改变了火焰 分布。

图 7 为简化机理 DRM22 的模拟结果,右侧是 OH 和 CH<sub>2</sub>O 的 PLIF 实验值。火焰褶皱程度趋势和火焰 的高度都与实验测得数据较为吻合,OH 活化基分布 在燃料射流外围区域,直到 20D 左右。由于中间射流 在此突破了值班火焰的包裹作用,在速度作用下,OH 分布收缩然后再向径向方向扩散开来。根据 CH<sub>2</sub>O 的模拟结果与实验测得数据可以发现中间燃料射流 的形状。从所有的对比来看,在此网格尺度下,LES/ PDF 方法还是能够很好地捕捉湍流预混值班火焰的 细节结构特征和变化。



图 8 为 DRM22 机理模拟的火焰温度, HCO 和速 度的分布, 白线为涡量 3×10<sup>4</sup>的等值线。涡量的最高 值出现在燃料射流的初始阶段, 这是由于和值班火 焰速度差很大, 这种强剪切流必然会形成一对相反 的涡结构。随着射流的发展, 涡结构对周围环境不 断地卷吸, 会越来越大。流场中的涡结构及其运动 大大地促进了燃料射流和值班火焰的混合和热交 换, 可燃混气在值班火焰的作用下发生自燃, HCO 自 由基的出现说明此处已经存在放热反应, 温度升高, 火焰随着剪切层向下游传播, 实现稳燃作用。对比 不同机理的计算结果发现,剪切层内的小尺度掺混 引起的自燃和火焰传播是稳燃机理的关键。



# 4 结 论

本文对不同化学反应机理进行了对比计算,并 使用LES/PDF方法研究了湍流预混值班射流火焰的 稳燃机理。计算结论如下:

(1)简化机理 SMOOKE 的模拟结果中的点火延迟时间和熄火拉伸率与实验值偏差较大,对火焰的点火与熄火过程描述得不够准确。详细机理 GRI3.0和简化机理 DRM22 的模拟结果与实验值吻合良好,但简化机理 DRM22 的点火延迟时间随着温度的增加呈缩短趋势。

(2)对比分析了简化机理 SMOOKE 与简化机理 DRM22在不同位置上的释热率(HRR)随反应温度变 化散点图的模拟结果,对于燃料射流的前端的 HRR 分布,简化机理 SMOOKE的模拟结果几乎为零,并随 着燃料射流的发展,简化机理 SMOOKE的 HRR 逐步 与简化机理 DRM22 的 HRR 分布保持一致,可以发 现,当燃料射流速度逐渐增大时,简化机理 SMOOKE 点火延迟的缺点将会被放大,最终导致全局熄火。

(3)通过LES/PDF方法可以发现,DRM22机理可 以很好地模拟湍流预混值班火焰的涡结构。在燃料 射流的初始阶段,形成明显的涡结构。随着射流的 发展,涡结构对周围环境不断地卷吸,大大地促进了 燃料射流和值班火焰的混合和热交换,可燃混气在 值班火焰的作用下发生自燃。

## 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 Yuan-hao, YAN Ying-wen, 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.)

- [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.
- [4] 刘 潇.低排放燃烧室设计及预混燃烧特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [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).
- [6] Dunn M J, Masri A R, Bilger R W, et al. The Compositional Structure of Highly Turbulent Piloted Premixed Flames Issuing into a Hot Coflow [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 1779-1786.
- [7] Dunn M J, Masri A R, Bilger R W. A New Piloted Premixed Jet Burner to Study Strong Finite-Rate Chemistry Effects[J]. Combustion and Flame, 2007, 151(1): 46-60.
- Zhou B, Brackmann C, Li Q, et al. Distributed Reactions in Highly Turbulent Premixed Methane/Air Flames, Part I: Flame Structure Characterization [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(7): 2937-2953.
- [9] Zhou B, Brackmann C, Li Z, et al. Simultaneous Multi-Species and Temperature Visualization of Premixed Flames in the Distributed Reaction Zone Regime [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1409-1416.
- [10] Weigand P, Meier W, Duan X R, et al. Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: I. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions[J]. Combustion and Flame, 2006, 144(1): 205-224.

- [11] Meier W, Duan X R, Weigand P. Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: II. Turbulence-Chemistry Interactions[J]. Combustion and Flame, 2006, 144(1): 225-236.
- [12] Meier W, Weigand P, Duan X R, et al. Detailed Characterization of the Dynamics of Thermoacoustic Pulsations in a Lean Premixed Swirl Flame [J]. Combustion and Flame, 2007, 150(1): 2-26.
- [13] 刘 潇,龚 诚,李智明,等.大涡模拟燃烧模型在 扩散火焰中的对比研究[J].哈尔滨工程大学学报, 2018,39(3):496-502.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Cao R R, Pope S B. The Influence of Chemical Mechanisms on PDF Calculations of Nonpremixed Piloted Jet Flames [J]. Combustion and Flame, 2005, 143 (4): 450-470.
- [17] Smooke M D, Puri I K, Seshadri K. A Comparison Between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air [C]. Munich: Symposium (International) on Combustion, 1988.
- [18] Sung C J, Law C K, Chen J Y. Further Validation of an Augmented Reduced Mechanism for Methane Oxidation: Comparison of Global Parameters and Detailed Structure
  [J]. Combustion Science and Technology, 2000, 156(1): 201-220.
- [19] Duwig C, Nogenmyr K J, Chan C, et al. Large Eddy Simulations of a Piloted Lean Premix Jet Flame using Finite-Rate Chemistry [J]. Combustion Theory and Modelling, 2011, 15(4): 537-568.

(编辑:梅 瑛)