基于 FGM 模型的同轴射流非预混火焰大涡模拟

范瑞虎,张 腾,李井华,颜应文

(南京航空航天大学能源与动力学院,江苏南京210016)

摘 要:为研究燃气轮机模型燃烧室的非预混燃烧流场,采用大涡模拟方法分别结合火焰面生成流形模型(FCM) 和部分预混稳态火焰面模型(PSFM)对甲烷/空气同轴射流非预混燃烧室开展了数值模拟研究,并与试验结果进行 对比。结果表明:FCM所预测的速度分布、混合分数分布、燃烧产物及 CO 分布与试验结果更符合;两种模型均能 捕捉到燃烧室中的火焰抬举现象;燃烧过程中的火焰结构较为复杂,同时存在预混燃烧区域和扩散燃烧区域,扩散 燃烧主要分布在化学恰当比等值线附近,预混燃烧区域主要分布在贫油区。

关键 词:大涡模拟;火焰面生成流形;火焰面模型;非预混火焰

第38卷第5期

2023 年 5 月

中图分类号:V231.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2023. 05. 005

[引用本文格式]范瑞虎,张 腾,李井华,等. 基于 FGM 模型的同轴射流非预混火焰大涡模拟[J]. 热能动力工程,2023,38(5): 42-49. FAN Rui-hu, ZHANG Teng, LI Jing-hua, et al. Large eddy simulation of co-axial jet non-premixed combustion using FGM model [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(5):42-49.

Large Eddy Simulation of Co-Axial Jet Non-Premixed Combustion Using FGM Model

FAN Rui-hu, ZHANG Teng, LI Jing-hua, YAN Ying-wen

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code:210016)

Abstract: In order to study non-premixed combustion flow field of gas turbine model combustors, large eddy simulations (LES) of a methane/air co-axial jet non-premixed combustor were performed coupled with flamelet generated manifolds (FGM) model and partially premixed steady flamelet model (PSFM) respectively, and the LES results were compared with experimental data. The results show that the results of FGM model such as velocity profiles, mixture fraction profiles, combustion product and CO mass fraction profiles agree better with experimental data; two models can both capture the lift-off flame phenomenon in the combustor; the structure of the flame is complicated, in which premixed combustion and diffusion coexist, and diffusion flames are mostly around stoichiometric isolines while premixed flames are mainly in lean regions.

Key words: large eddy simulation (LES), flamelet generated manifolds (FGM), flamelet model, non-premixed flame

收稿日期:2022-11-29; 修订日期:2022-12-23

基金项目:国家科技重大专项(2017 - Ⅲ - 0006 - 0031);国家自然科学基金(91741118)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017 - III - 0006 - 0031); National Natural Science Foundation of China (91741118)

作者简介:范瑞虎(1996-),男,南京航空航天大学硕士研究生.

通讯作者:李井华(1981-),女,南京航空航天大学副教授.

引 言

湍流燃烧广泛存在于工业生产与日常生活中, 是全世界燃烧领域学者的研究重点^[1]。数值模拟 作为研究湍流燃烧问题的重要方法,在近几十年得 到了充分发展。按照混合方式,燃烧模式可分为预 混燃烧、非预混燃烧以及部分预混燃烧。在实际的 燃烧装置中,由于强烈的湍流作用可能同时存在多 种燃烧模式,因此在进行大涡模拟(LES)研究时需 要采用合适的亚网格燃烧模型,来描述湍流与化学 反应之间的相互作用^[2]。

对于非预混燃烧的大涡模拟,国内外学者提出 了多种亚网格燃烧模型。其中,基于火焰面概念的 化学热力学建表方法可以在耦合详细化学反应机理 的同时大大降低求解湍流燃烧时所需的计算量,因 此得到了研究者的广泛关注和应用。常用的火焰面 模型有稳态火焰面模型(Steady Flamelet Model, SFM)^[3],火焰面/反应进度变量模型(Flamelet/Progress Variable Model, FPV)^[4], 火焰面生成流形 (Flamelet Generated Manifolds, FGM)方法^[5]等。由 于化学反应时间一般小于湍流时间尺度,非预混火 焰主要表现为由湍流混合过程所控制,因此基于混 合分数来表征全场化学信息的 FGM 模型被普遍使 用,并在后续发展中结合反应进程变量用于多模态 湍流燃烧的数值预测^[6-7]。Olbricht 等人^[8]采用假 定盒式滤波函数积分的预混 FGM 建表方法对燃气 轮机模型燃烧室的非预混抬举火焰进行了 LES 模 拟研究,该方法相比假定 Beta 函数积分方法减少了 建表参数,总体上与试验结果也符合较好。Nakod 等人^[9]分别采用预混 FGM 与 SFM 研究了 4 种不同 的湍流扩散/预混火焰,结果表明,FGM 所预测的组 分分布与温度分布等与试验结果符合更好,且 FGM 模型可以预测出火焰抬举现象。Ketelheun 等人^[10] 采用 LES/FGM 方法模拟了悉尼大学钝体火焰,并 对 NO_x建立输运方程,提高污染物预测准确度。国 内学者多采用 FGM 模型用于简单火焰,如本生灯火 焰^[11-12]、Sandia 火焰^[13]或预混火焰^[14-15]等的研 究,对于具有强湍流和强剪切的非预混或部分预混 的多模态火焰研究较少。

本文分别采用火焰面生成流形(FGM)方法和

部分预混稳态火焰面模型(PSFM),在 FLUENT 软件中对带有突扩结构和回流的甲烷/空气同轴射流 非预混火焰开展大涡模拟数值模拟研究,并将两种 燃烧模型的预测结果与试验结果进行了对比分析。

1 数学模型

1.1 亚网格湍流模型

对 LES 中未封闭的亚网格应力项,采用涡粘 假设:

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} \, \widetilde{u_i u_j} - \bar{\rho} \, \widetilde{u}_i \, \widetilde{u}_j = -2\mu_i \widetilde{S}_{ij} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \quad (1)$$

式中:"-"代表均值;"~"代表均方差。

粘性系数 μ_t 采用 WALE 模型模化^[16],以更准 确地模拟近壁面流动:

$$\mu_{\iota} = \bar{\rho} L_{s}^{2} \frac{(S_{ij}^{d} S_{ij}^{d})^{3/2}}{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^{d} S_{ij}^{d})^{5/4}}$$
(2)

式中: L_s 一亚网格长度尺度,取 $L_s = \min(\kappa d, C_w \Delta); C_w$ 一WALE 模型常数取为 0.325; \tilde{S}_{ij} 一 应变率张量:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$S_{ij}^d \mathfrak{K} \boxplus \mathfrak{H}:$$
(3)

$$\begin{cases} S_{ij}^{d} = \frac{1}{2} \left(\tilde{g}_{ij}^{2} + \tilde{g}_{ji}^{2} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tilde{g}_{ij}^{2} \\ \tilde{g}_{ij} = \frac{\partial \tilde{u}_{i}}{\partial x_{i}} \end{cases}$$
(4)

1.2 亚网格燃烧模型

1.2.1 FGM 模型

FGM 模型的基本思想与稳态层流火焰面模型 类似,都是将复杂化学反应的多维空间投影到由几 个特征变量描述的低维空间中,由此可以在考虑详 细反应机理的同时减少输运方程个数,降低计算量。 对于非预混燃烧和部分预混燃烧,通常采用混合分 数 Z 和反应进度变量 C 作为特征变量,来构建 FGM 层流扩散火焰面数据库。层流火焰面数据库中的热 力学状态参数可写为 $\varphi(Z,C)$ 。通过对混合分数 Z与反应进度变量 C 的分布函数采用假定 PDF 的方 法来考虑湍流的统计特性。假定 Z 与 C 的分布为 Beta 分布,则对层流火焰面数据库积分可以得到:

$$\tilde{\varphi} = \iint \varphi(Z, C) P(Z, C) \, \mathrm{d}Z \mathrm{d}C \tag{5}$$

最终得到由混合分数 \tilde{Z} 及其均方差 $\widetilde{Z''}$ 与反应 进度变量 \tilde{C} 及其均方差 $\widetilde{C''}$ 组成的四维 PDF 数据表:

$$\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi}(\tilde{Z}, \widetilde{Z''^2}, \tilde{C}, \widetilde{C''^2})$$
(6)

同时,在数值计算中,需要求解混合分数 \tilde{Z} ,反 应进度变量 \tilde{C} 及其均方差 $\widetilde{C''^2}$ 的输运方程:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_{j}\tilde{Z})}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\bar{\rho}\left(\frac{\lambda}{c_{p}} + \frac{\mu_{t}}{Sc_{t}}\right)\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_{j}}\right) (7)$$
$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{C})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_{j}\tilde{C})}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\bar{\rho}\left(\frac{\lambda}{c_{p}} + \frac{\mu_{t}}{Sc_{t}}\right)\frac{\partial\tilde{C}}{\partial x_{j}}\right) + \bar{\rho}\tilde{\omega}_{c}$$
(8)

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\ \widetilde{C''^2})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\widetilde{u}_j\ C''^2)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho}\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial\ \widetilde{C''^2}}{\partial x_j}\right) + C_{\varphi}\ \frac{\mu_t}{Sc_t}\left(\frac{\partial\ \widetilde{C}}{\partial x_j}\right)^2 - \frac{\bar{\rho}C_{\varphi}}{\tau_{turb}}\ \widetilde{C''^2}$$
(9)

式中: λ —分子导热系数; c_p —混合气体比定压热容; Sc_t —湍流施密特数; ω_c —反应进度变量的源项,采 用有限速率/Zimont 湍流火焰速率模型封闭^[17]; $C_{\varphi} = 2.0; \tau_{turb}$ —湍流时间尺度。

在 LES 中,混合分数均方差 $\widetilde{Z''^2}$ 进行模化:

$$\widetilde{Z''^2} = C_{\rm var} L_s^2 \left(\frac{\partial \widetilde{Z}}{\partial x_j}\right)^2 \tag{10}$$

式中: C_{var} 一模型常数,取 0.5_{\circ}

1.2.2 部分预混稳态火焰面模型

文献[4]的研究已经表明,采用基于混合分数 Z 和标量耗散率 x 的非预混稳态火焰面建表方法无法 描述湍流火焰中的火焰抬举、局部淬熄等现象。因 此在 FLUENT 软件中采用部分预混稳态火焰面模型 (PSFM),该模型假设火焰面无限薄,通过引入反应 进度变量 C 来描述未燃状态、已燃状态及其中间过 程。首先求解一维层流扩散火焰面方程,建立层流 火焰面数据库,再通过假定 PDF 函数对其进行积 分,生成湍流火焰面数据库。由此,湍流燃烧流场中 的化学热力学参数 $\tilde{\varphi}$ (如组分质量分数,温度等)可 根据混合分数 \tilde{Z} 、混合分数均方差 $\widetilde{Z''^2}$ 以及反应进度 变量 \tilde{C} 在三维数据库中查表得到:

$$\tilde{\varphi} = \tilde{\varphi}(\tilde{Z}, Z''^{2}, \tilde{C})$$
(11)

部分预混稳态火焰面模型在数值求解时需求解 混合分数 Z 和反应进度变量 C 的输运方程,对混合 分数均方差进行模化。

2 研究对象与计算设置

采用甲烷/空气同轴射流燃烧室作为研究对象, 结构如图 1 所示。Owen 等人^[18]于 1976 年对该燃 烧室进行了详细的试验研究,提供了丰富的试验数 据如速度分布、温度分布以及产物浓度分布等。该 燃烧室结构尺寸如表 1 所示,工况如表 2 所示。其 中, R_1 为燃料进口内径, R_2 为燃料进口外径, R_3 为 空气进口外径, R_4 为燃烧室内径,R为空气进口内 径。长度和速度的无量纲参考量分别取空气管路外 径 R = 46.74 mm 与空气进口速度 U = 20.93 m/s。 试验中火焰筒长度为 1 000 mm,依照文献[6-7]取 400 mm,约8.5R;火焰筒上游长度延伸 2R。此外, 试验中燃料进口为含甲烷(CH₄摩尔分数 96.14%) 的天然气,本文简化为纯甲烷^[4,6-7]。



图 1 甲烷/空气同轴射流燃烧室几何结构 Fig. 1 Geometry of the methane/air co-axial jet combustor

表1 几何尺寸(mm)

Tab. 1 Geometry dimensions (mm)

R_1	R_2	R_3	R_4	R	火焰筒长度
31.57	31.75	46.85	61.15	46.74	400

Tab. 2 Operating conditions

参数	空气	甲烷
质量流量/kg·s ⁻¹	0.137	0.007 2
速度/m·s ⁻¹	20.63	0.928 7
温度/K	750	300
压力/MPa	0.38	0.38
当量比	0.9	0.9

对该燃烧室基于 O 型剖分划分了三维结构化 网格,网格总量约460万,中心截面和径向截面网格

如图 2 所示。结合文献[19] 基于 GRI-mech3.0 发展的 30 组分、184 步反应的骨架反应机理,对 FGM 与 PSFM 分别生成湍流火焰数据库。动量方程采用 有界中心差分格式离散,标量方程采用二阶迎风格 式离散,时间项采用有界二阶隐式格式推进。对燃烧室进口采用质量流量进口,由于试验中未测量进口的湍流脉动信息,因此在计算中并未叠加人工湍流,而是使其经过 2*R* 的长度自由发展为湍流;对出 口采用自由出流边界条件。时间步长取 1 × 10⁻⁵ s, 在燃烧流场经过约 3 个流通时间达到统计定常后, 取 3 个流通时间统计平均流场。



图 2 计算域网格示意图 Fig. 2 Mesh of the computational domain

3 计算结果及分析

将 LES 下 FGM 模型与 PSFM 模型的统计平均 结果与试验结果进行对比。为不失一般性,在不同 流向截面上,对数值模拟的数据采取周向平均的方 式得到其沿半径方向的分布。试验中针对不同变量 选取的测量截面如图 3 所示。其中,混合分数、燃烧 产物与 CO 的统计截面与图中产物测量截面相同。



Fig. 3 Schematic diagram of the testing sections

3.1 统计结果

图 4 为流向截面 x/R 分别为 0.14,0.38,1.27 与 4.67 位置处的时均轴向速度与脉动均方根的径 向分布。由于空气和甲烷的速度差异比较大,在二 者的强剪切作用下,甲烷管道的出口附近会形成一 个回流区。从速度分布中可以看到,在前3个流向 截面处,FGM 与 PSFM 模型所预测的速度分布基本 相同,并且均与试验符合较好,两种模型均很好地捕 捉到了回流区。在 *x*/*R* = 0.38 处,试验测得的速度 值在 *r*/*R* < 0.5 时为负值,表明该位置处存在回流 区,FGM 所预测的回流速度较小,而 PSFM 所预测 的速度为正值,表明 PSFM 所预测的回流区起始位 置更靠后。在下游较远的 *x*/*R* = 4.67 截面处,FGM 所预测的速度分布与试验符合很好,而 PSFM 所预 测的速度分布与试验误差较大,这是由于上游速度 场主要取决于来流状态,而下游速度场会受到燃烧 放热影响,PSFM 模型所预测的湍流速度场与燃烧



图 4 轴向速度场在不同流向截面上的径向分布 Fig. 4 Radial profiles of the axial velocity field on different stream sections

在 x/R = 0.14,0.38 两个截面上,两种模型所预 测的轴向速度脉动均方根在分布趋势上与试验相 同,但脉动速度值与试验相比较小,这可能是由于在 LES 模拟时未加入进口湍流脉动导致的。在 x/R = 1.27 位置处,两模型所预测的脉动均方根在分布和 大小上均与试验符合很好。在下游较远处的 x/R = 4.67 截面处,PSFM 所预测的脉动均方根比试验值 偏大,而 FGM 所预测的分布与试验符合较好。总体 上看,FGM 所预测的速度场要优于 PSFM。

图 5 为混合分数 Z 在不同流向截面上的径向 分布。燃烧室内混合分数呈径向中心高而近壁面处 低的趋势。随着轴向距离的增加,燃料与空气充分 混合,混合分数的分布趋势趋于平缓。在靠近燃料 射流出口处(x/R = 0.21),两种模型所预测的混合 分数与试验值相比偏高,但 FGM 预测值与试验值更 接近,表明 PSFM 所预测的甲烷射流与空气射流之 间的掺混更弱,这从图4(b)轴向速度脉动均方根的 分布中(x/R = 0.14,0.38 截面)也可以看出。由于 两种模型在射流出口附近所预测的湍流脉动小,因 此导致燃料与空气间的掺混程度小,所预测的混合 分数偏大。在下游两种模型的预测结果相差不大, 在燃烧室中心轴线附近(r/R = 0~0.5)预测值与试 验值相比偏小,越靠近外侧与试验值越接近。



图 5 混合分数 Z 在不同流向截面上的径向分布 Fig. 5 Radial profiles of the mixture fraction Z on different stream sections

图 6 为不同流向截面上的径向温度分布。在 x/R = 0.89 与 1.57 处,在燃烧室中心轴线附近 (r/R = 0~0.4)FGM 与 PSFM 预测的温度与试验值 相比稍高,这可能是由于试验在测量温度时的误差 或者未考虑辐射影响导致的^[4]。在辐射影响较小 的下游 x/R = 4.52,5.20 两个位置处,两种模型所预 测的温度分布与试验值符合很好。与文献[4]采用 SFM 方法的结果不同,本文中两种模型均能够预测 出该燃烧室中火焰抬举的结构。



图7为燃烧产物 CO₂和 H₂O 的质量分数 $y_p(y_p = y_{CO_2} + y_{H_2O})$ 在各流向各截面上的分布。在 x/R为0.21 截面处,两种模型所预测的燃烧产物质量分数 在中心轴线附近($r/R = 0 \sim 0.6$)与试验值相比稍低。FGM 预测的产物质量分数与试验值更接近,一 方面是因为该位置处所预测的质量分数偏大,另一 方面是由于回流区会携带大量的已燃气体以提供稳 定的点火源。两种模型所预测的回流区起始位置靠 后导致此处燃烧产物质量分数偏低。两种模型所预 测燃烧产物在 x/R为3.16和3.84两个截面上分布 相差不大,与试验值符合很好。在靠近燃烧室出口 x/R = 7.41截面上,PSFM 所预测的燃烧产物质量分 数在 r/R > 0.6的位置比试验值小很多,而 FGM 所 预测的燃烧产物质量分数分布与试验值差异很小。



CO 是甲烷燃烧时富燃区的重要中间产物。图 8 为 CO 质量分数在各流向截面上沿轴向的分布。 在燃烧室中心处,由于氧气质量分数大,处于富燃状 态,因此 CO 的质量分数较大。而沿径向随着氧气 量的增加燃烧生成 CO₂增多,因此 CO 质量分数逐渐 减小。在 *x*/*R* = 0.21 处两模型所预测的 CO 质量分 数偏低,其中 FGM 结果与试验值更接近。在下游*x*/*R* 为 3.16,3.84 与 7.41 位置处燃烧室中心轴线附近, PSFM 预测的 CO 质量分数与试验值符合较好,但在 其他位置处 FGM 预测结果与试验值更接近。总体 上,FGM 预测的 CO 质量分数分布与试验更接近。





Fig. 8 Radial profiles of CO mass fraction on different stream sections

3.2 瞬时结果

图 9 为中心截面上的瞬时温度分布云图。两种 模型都能够预测出该燃烧室的抬举火焰结构。由于 空气与燃料射流间的相对速度比较高,两股射流之 间会产生强烈的剪切作用,从而在燃料射流的出口 形成了回流区,该回流区充当着钝体稳焰的作用,回 流的燃烧产物和高温已燃气可为来流空气与甲烷提 供一个稳定的点火源。



Fig. 9 Instantaneous temperature contour on center section

为进一步研究该燃烧室的火焰燃烧模态,引入 火焰索引^[20](Takeno Flame Index,FI)或称为火焰指 数,来区别火焰处于预混燃烧状态还是非预混燃烧 状态。火焰索引的定义为:

$$FI = \frac{\nabla Y_{CH_4} \cdot \nabla Y_{O_2}}{|\nabla Y_{CH_4}| \cdot |\nabla Y_{O_2}|}$$
(12)

由于火焰索引并不能区分是否处于纯混合状态 还是燃烧状态,因此为准确识别火焰区域,类比文献 [21]采用反应速率作为火焰索引的定义,采用 OH 基浓度作为火焰索引:

$$\mathrm{FI}_{\mathrm{OH}} = Y_{\mathrm{OH}} \cdot \mathrm{FI} = Y_{\mathrm{OH}} \cdot \frac{\nabla Y_{\mathrm{CH}_{4}} \cdot \nabla Y_{\mathrm{O}_{2}}}{|\nabla Y_{\mathrm{CH}_{4}}| \cdot |\nabla Y_{\mathrm{O}_{2}}|} \qquad (13)$$

其中,FI_{0H} > 0 为火焰处于预混燃烧状态,FI_{0H} < 0 为火焰处于扩散燃烧状态。

图 10 为中心截面处的火焰索引。其中,等值线 为化学反应恰当比对应的混合分数(Z_{st} = 0.055)。 可以发现,燃烧过程中既有预混燃烧区域又有扩散 燃烧区域,扩散燃烧区域主要分布在化学恰当比等 值线附近,而预混燃烧区域主要分布于贫油区(即 化学恰当比等值线外侧)。由于两股射流相对速度 较大,二者之间的强剪切作用使得湍流强度较大,导 致火焰结构较为复杂,既有孤立的扩散火焰和预混 火焰,又有二者相连的火焰结构。此外,燃烧过程中 还出现了火焰不连续的区域,表明存在由于湍流脉 动强烈而导致的局部熄火现象。两种模型都能捕捉 到抬举火焰现象,所预测的火焰结构相似,但 PSFM 模型的结果的回流区内部存在着扩散火焰。



图 10 中心截面处火焰索引分布云图 (等值线 Z_{st} = 0.055)

Fig. 10 Flame index contour on center section (isoline: $Z_{st} = 0.055$)

4 结 论

采用火焰面生成流形(FGM)模型和部分预混 稳态火焰面模型(PSFM),对甲烷/空气同轴射流燃 烧室,开展了大涡模拟数值研究,并与试验结果进行 了对比,结果表明:

(1) FGM 所预测的速度分布、混合分数分布、 燃烧产物分布以及 CO 分布与试验更为符合,两种 模型所预测的温度分布相差不大。

(2) 燃烧过程中的火焰结构较为复杂,同时存 在着预混燃烧区域和扩散燃烧区域,扩散燃烧主要 分布在化学恰当比等值线附近,预混燃烧区域主要 分布于贫油区。

(3)两种模型均能预测出强剪切流动导致的抬 举火焰结构以及局部熄火现象。

参考文献:

[1] FIORINA B, MERCIER R, KUEENE G, et al. Challenging modeling strategies for LES of non-adiabatic turbulent stratified combustion $[\,J\,].$ Combustion and Flame, 2015, 162(11) $\,:\!4264$ – 4282.

- [2] 周力行,胡砾元,王 方. 湍流燃烧大涡模拟的最近研究进展
 [J]. 工程热物理学报,2006,27(2):331-334.
 ZHOU Li-xing, HU Li-yuan, WANG Fang. Recent advances in LES of turbulent combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27 (2):331-334.
- [3] PETERS N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984, 10(3):319-339.
- [4] PIERCE C D, MOIN P. Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 504:73 - 97.
- [5] OIJEN J A V, GOEY L P H D. Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds[J]. Combustion Science & Technology, 2000, 161(1):113-137.
- [6] 杨金虎. FGM 预混及部分预混湍流燃烧模型研究与应用[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2012. YANG Jin-hu. Research and application of FGM premixed and partially premixed turbulent combustion models[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics),2012.
- [7] 宋 帅. 基于 FGM 的多模态湍流燃烧大涡模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

SONG Shuai. Large eddy simulation of multimodal turbulent combustion based on FGM[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2014.

- [8] OLBRICHT C, STEIN O T, JANICKA J, et al. LES of lifted flames in a gas turbine model combustor using top-hat filtered PFGM chemistry[J]. Fuel, 2011, 90(7):100 - 107.
- [9] NAKOD P, YADAV R, RAJESHIRKE P, et al. A comparative computational fluid dynamics study on flamelet-generated manifold and steady laminar flamelet modeling for turbulent flames [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136 (8): 081504 – 081512.
- [10] KETELHEUN A, OLBRICHT C, HAHN F, et al. NO prediction in turbulent flames using LES/FGM with additional transport equations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2975 - 2982.
- [11] 杨金虎,刘富强,毛艳辉,等.部分预混湍流燃烧模型的本生火焰计算验证[J].工程热物理学报,2012,33(10): 1793-1797.

YANG Jin-hu, LIU Fu-qiang, MAO Yan-hui, et al. A partially premixed combustion model and its validation with the turbulent Bunsen flame calculation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10):1793 – 1797.

 [12] 唐 军,宋文艳. 基于 FGM 和附加输运方程的 NO 数值模拟 方法研究[J]. 推进技术,2017,38(7):1523-1531.
 TANG Jun, SONG Wen-yan. Numerical study of NO formation with FGM and an additional transport equation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(7): 1523 - 1531.

- [13] 韩 超,张 培,叶桃红,等.不同湍流预混燃烧模型在本生 灯火焰中的比较[J].推进技术,2014,35(8):1086-1093.
 HAN Chao, ZHANG Pei, YE Tao-hong, et al. A Comparison of three different turbulent premixed combustion models in Busen flames[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(8): 1086-1093.
- [14] 夏朝阳,宛鹏翔,韩省思,等. 基于 FGM 的旋流预混燃烧室超 大涡模拟[J]. 工程热物理学报,2021,42(5):1334-1341.
 XIA Zhao-yang, WAN Peng-xiang, HAN Xing-si, et al. Very large eddy simulation of swirling premixed combustor based on FGM[J].
 Journal of Engineering Thermophysics, 2021,42 (5):1334-1341.
- [15] 夏朝阳,韩省思,毛军逵. 基于 FGM 的湍流射流扩散火焰超 大涡模拟[J]. 工程热物理学报,2021,42(2):529-533.
 XIA Zhao-yang, HAN Xing-si, MAO Jun-kui. Very large eddy simulation of turbulent jet diffusion flame based on FGM[J].
 Journal of Engineering Thermophysics,2021,42(2):529-533.
- [16] NICOUD F, DUCROS F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. Flow Turbulence & Combustion, 1999, 62(3):183 - 200.

- [17] ZIMONT V, POLIFKE W, BETTELINI M, et al. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high Reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 120(3): 526 - 532.
- [18] OWEN F K, SPADACCINI L J, BOWMAN C T. Pollutant formation and energy release in confined turbulent diffusion flames[J].
 Symposium on Combustion, 1977, 16(1):105 – 117.
- [19] LU T, LAW C K. A criterion based on computational singular perturbation for the identification of quasi steady state species: a reduced mechanism for methane oxidation with NO chemistry[J]. Combustion and Flame, 2008, 154(4):761-774.
- [20] YAMASHITA H, SHIMADA M, TAKENO T. A numerical study on flame stability at the transition point of jet diffusion flames
 [J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(1): 27 - 34.
- [21] PATEL N, MENON S. Simulation of spray-turbulence-flame interactions in a lean direct injection combustor [J]. Combustion and Flame, 2008, 153 (1/2):228 - 257.

(丛 敏 编辑)

英国科里奥公司在全球范围内加大海上风电部署

据官网报道,科里奥(Corio)发电公司加入了全球海上风能联盟,这是一个由丹麦政府、国际可再生能源 机构和全球风能理事会建立的国际联盟。该联盟于去年在埃及举行的 COP27 会议上成立,旨在通过政治动 员和创建全球实践社区,成为全球推广海上风电的驱动力。

该联盟将考虑如何在2030年之前提供至少380GW的海上风电容量,在首个十年中平均每年提供 35GW,从2030年开始每年至少提供70GW,最终在2050年实现2000GW海上风电容量的全球目标。迄 今已加入该联盟的政府包括澳大利亚、比利时、哥伦比亚、丹麦、德国、爱尔兰、日本、荷兰、挪威、英国和美国。

Corio 公司将作为行业领先代表之一加入联盟,并承诺与联盟成员合作,在全球范围内加强海上风电的部署。Corio 公司于2022年4月成立,是麦格理绿色投资集团的一部分。该公司总部位于伦敦,拥有约 30 GW的海上风电管道。全球风能理事会首席执行官本·贝克维尔表示,Corio 公司完全有能力带来消除技术障碍所需的专业技术,并帮助扩大新兴市场海上风电的部署。

(孙嘉忆摘译自 https://www.powerengineeringint.com)