

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.03.002

航空发动机燃烧室湍流两相燃烧模型发展现状

金捷 刘邓欢

(北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京,100191)

摘要:随着计算机、计算机辅助制造等技术的发展,数值模拟逐渐成为航空发动机设计手段之一。航空发动机燃烧室内是复杂的两相湍流燃烧过程,为了准确模拟这一过程,高精度两相湍流燃烧模型组成为航空发动机燃烧室设计师必要的工具。本文从两相湍流数值模拟角度出发,对概率密度函数输运方程模型、火焰面模型和二阶矩模型这 3 种常用的燃烧模型的发展现状进行简要综述。

关键词:概率密度函数方法;火焰面模型;二阶矩模型;大涡模拟

中图分类号:TK161 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)03-0303-07

Recent Advances in Turbulent Two-Phase Combustion Models

Jin Jie, Liu Denghuan

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China)

Abstract: With the development of computer technology and computer aided design, numerical simulation has gradually become one of the important tools in aero-engine design. In order to simulate the two-phase turbulence flow and combustion process in aero-engine combustor, high-accuracy turbulent combustion models are necessary in numerical study. This paper reviews three kinds of common combustion models applied in two-phase reaction flow simulation briefly, including probability density function method, flamelet model and second order moment model.

Key words: probability density function method; flamelet model; second-order moment model; large eddy simulation

随着计算机及计算技术的发展,航空发动机性能指标的不断提高,研制周期缩短,现代航空发动机燃烧室的设计技术逐渐形成以计算机模拟、诊断技术研究为主线,通过数值分析、模型实验验证和燃烧室试验综合对燃烧室进行优化的新的设计方法。计算机模拟在航空发动机燃烧室的设计工作中,所占比重越来越大。采用数值计算和试验手段

相结合,不仅有助于改进试验方案,而且可以大幅度减少试验工作量,缩短研制周期、减少研制经费,是一种有效而又经济的设计手段。

目前对两相湍流燃烧的数值模拟方法大致可以分为 3 类:(1) 直接模拟(Direct numerical simulation, DNS),通过直接模拟的手段可以解出在所有时间尺度上的流动和反应的准确解,不需要任何

收稿日期:2016-04-26; **修订日期:**2016-05-29

作者简介:金捷,男,博士,研究员,1968 年 3 月生,主要从事航空发动机主燃烧室、加力燃烧室和冲压发动机燃烧室设计和数值模拟技术研究,获省部级科技成果奖 3 项,发表学术论文 40 余篇,申请和授权发明专利 10 项,现任北京航空航天大学航空发动机数值仿真中心总师。

通信作者:金捷, E-mail: jinjie@buaa.edu.cn.

引用格式:金捷,刘邓欢.航空发动机燃烧室湍流两相燃烧模型发展现状[J].南京航空航天大学学报,2016,48(3):303-309. Jin Jie, Liu Denghuan. Recent advances in turbulent two-phase combustion models[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(3): 303-309.

假设条件,但是 DNS 在进行高雷诺数计算时,所需要的计算资源非常大,因此只能用其进行一些机理研究。(2) 被广泛应用于工程设计中的雷诺平均计算方法 (Reynolds average navier-stokes, RANS), 如 $\kappa\varepsilon$ 两方程湍流模型, 其计算资源需求低, 计算速度快, 满足工程应用中对经济性的要求。(3) 对计算资源的需求处于 DNS 和 RANS 之间的大涡模拟计算方法 (Large eddy simulation, LES), LES 的基本思想是通过对 N-S 方程进行滤波处理, 将所有的变量分为大尺度量和小尺度量, 其中大尺度量可以进行直接数值模拟计算, 因此只需要对过滤后的亚网格尺度下的小尺度量进行模拟。LES 的计算量虽然大于 RANS 模拟, 但是 LES 可以得到更加详细的流场信息, 这对于燃烧室中的非稳态计算是十分必要的。根据这些特点, LES 算法在可预见的未来有望成为燃烧室数值模拟中的主流算法之一。

航空发动机燃烧室内是复杂的气液两相湍流流动燃烧, 其中湍流、液滴、化学反应之间的相互作用非常复杂, 特别是在燃烧室头部, 湍流影响液滴的空间分布, 湍流混合和液滴蒸发都影响化学反应, 化学反应释放热量又影响液滴的蒸发以及湍流脉动。这是一个严重非线性耦合现象, 难以得到解析解, 只能数值求解。数值求解两相湍流燃烧场, 需要正确的湍流模型、湍流燃烧模型、两相模型、化学反应机理模型等。在预报模型组中, 湍流燃烧模型是决定准确度的关键之一, 本文将对目前在航空发动机燃烧室数值模拟工作中最常用的 3 种燃烧模型的发展现状进行简单的介绍。

1 概率密度函数输运方程

Pope^[1]于 1985 年首次提出概率密度函数输运方程 (Probability density function, PDF) 方法, 在经过 30 余年的不断发展和完善后, PDF 方法现在已经被广泛应用于湍流燃烧的数值模拟工作中。与其他燃烧模型不同, PDF 方法以完全随机的观点对待湍流燃烧问题, 求解的是标量和矢量的联合概率密度函数的输运方程, 对于湍流燃烧问题, 与湍流输运和化学反应速率有关的源项以封闭的形式存在, 可以精确计算, 因此无需进一步模拟^[2]。PDF 方法在计算时可以代入详细化学反应机理, 精确模拟详细的化学动力学过程, 因此非常适用于模拟诸如点火、熄火、湍流燃烧及污染物生成等需考虑湍流流动、复杂化学反应机理及其相互耦合的湍流反应流问题^[3]。

根据求解方程的不同, 可以将 PDF 方法分为 3 大类: (1) PDF 方法将流场中的速度场和标量场都通过概率密度函数输运方程来求解, 该方法无需额外的湍流模型或者燃烧模型来封闭控制方程, 可以精确求解出流场中的各项参数, 称之为速度-标量-频率联合 PDF 方法。(2) PDF 方法平均速度和平均能量用 Favre 平均方程求解, 脉动速度和化学热力学参数等用概率密度函数输运方程求解, 称之为速度-标量联合 PDF 方法。(3) 只对标量方程做 PDF 联立求解, 而速度场还需要额外的湍流模型来求解, 这类称之为标量联合 PDF 方法。这 3 类方法中, 速度-标量-频率联合 PDF 方法准确性最高, 但是计算量最大。标量联合 PDF 方法的计算速度最快, 在湍流燃烧的大涡模拟计算中应用最为广泛。

目前国内外关于 PDF 输运方程方法的主流求解方法, 是将输运方程转换为拉格朗日方程, 利用蒙特卡洛法来求解^[4]。相关研究资料有很多, 本文介绍 PDF 模型的另外一种解法。为了解决由拉格朗日法造成的计算量太大问题, 与现有的流体计算软件兼容性不好等缺点, 有研究者提出了欧拉随机场法 PDF 输运方程方法。随机场法 PDF 输运方程模型有两种发展, 分别由 Valino^[5] 和 Sabel'nikov 等^[6] 提出, 两者的物理和数学表达方式不同。目前燃烧界应用较多的是 Valino 的随机法 PDF 输运方程, 其表达式为

$$\begin{aligned} \bar{\rho} d\zeta_a^m = & -\bar{\rho} u_i \frac{\partial \zeta_a^m}{\partial x_i} dt + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma' \frac{\partial \zeta_a^m}{\partial x_i} \right) dt + \\ & \bar{\rho} \sqrt{\frac{2\Gamma'}{\rho}} \frac{\partial \zeta_a^m}{\partial x_i} dW_i^m - \frac{\bar{\rho}}{2\tau_{sgs}} (\zeta_a^m - \bar{\varphi}_a^-) dt + \bar{\rho} \omega_a^m (\zeta_a^m) dt \end{aligned} \quad (1)$$

Valino 最早对单一标量的随机法 PDF 输运方程进行了研究, 随后该方法被应用到了联合 PDF 方程的多个标量当中^[7]。Garmory 将该方法应用于两相湍流射流^[8] 和飞机尾气生产物^[9] 的模拟中, 并成功地利用 UDF 在 FLUENT 软件上实现了该方法的数值模拟运算。

不仅是在 RANS 计算中, 随机场法 PDF 输运方程模型也大量应用在大涡模拟计算领域。Jones 应用 Valino 的随机场法 PDF 模型, 进行了一系列的关于湍流燃烧的大涡模拟。文献^[10]对甲烷-空气扩散火焰进行了大涡模拟, 结果表明采用随机法的联合概率密度函数输运方程, 其模拟准确度有着显著的提升, 尤其是一些像温度之类和化学反应密切相关的标量。文献^[11]利用随机场法概率密度

函数输运方程模型,对一个带双旋流器的燃气涡轮发动机燃烧室简化模型进行了大涡模拟计算。计算中采用 IEM 小尺度混合模型来封闭 PDF 模型中的小尺度输运项,亚网格模型选择动态 Smagorinsky 模型。该计算得到了燃烧室内火焰的结构形状,并且对燃油喷雾情况进行了模拟,获得了燃油 SMD 的分布和变化情况,如图 1 所示。同时该文研究还表明,计算时随机场的数量会对计算精度产生影响,使用较多的随机场进行计算可以得到更加准确的结果,但是所需计算资源也会增加。文献[12]计算了发动机燃烧室的强迫点火,成功模拟出了成功点火和失败点火两种状态燃烧室内火焰的变化。文献[13]利用随机法对预混燃烧的旋流火焰进行了大涡模拟,结果与试验吻合得非常好,其精度甚至可以与 DNS 模拟相比拟。Jones 还利用随机法对其他诸如氢气^[14]、正庚烷^[15]等燃料的燃烧特性进行了大涡模拟,其结果均与试验相吻合。

通过上述这些研究工作可以知道,采用欧拉随机场法求解概率密度函数输运方程,在两相湍流燃

烧中有着良好的应用前景。该方法兼顾计算速度、计算准确性和泛用性,可以模拟湍流燃烧的燃烧特性、点火性能、燃烧产物生产等。PDF 输运方程模型,在广泛引用于两相湍流燃烧研究的同时,已不断地向工程应用领域推广,逐渐成为燃烧室数值模拟工作中的新工具。

2 火焰面模型

从化学动力学的角度来看,大多数湍流燃烧过程的反应速率都是很大的,即反应是快速的,但又不是无限快。这在几何上意味着,其反应区是一个厚度很小的薄层,燃烧反应的长度尺度和时间尺度均小于湍流微混合的尺度,即 Kolmogorov 尺度。火焰面模型便是从这一思想出发,认为实际的燃烧反应尺度远小于湍流的最小尺度,燃烧发生在非常薄的区域内。在这种尺度下的火焰实质上是受分子扩散和输运控制的层流火焰面,湍流火焰可以看作嵌入流场内的具有一维结构的层流火焰面的集合。火焰面的内部结构在空间中具有近似的一维结构,并且不依赖于时间变化。湍流会通过火焰的拉伸和卷曲影响火焰面的内部结构,但这些微团内部仍然保持层流火焰的结构。

火焰面模型的核心是求解混合分数和标量耗散率的火焰面方程,从而得到混合分数和标量耗散率与其他标量的关系,这样在对控制方程求解时,只需要求解混合分数输运方程,即可通过查询混合分数与标量的 PDF 文件,得到当地的包括各组份浓度以及温度在内的所有标量的信息。火焰面模型比 PDF 模型的计算速度快,可达两个量级以上。火焰面模型可以分为单参数火焰面模型、多参数火焰面模型和两相火焰面模型。

单参数火焰面模型方面,王海峰等^[16-17]研究了湍流扩散火焰,对比了稳态和非稳态的情况,结合详细化学反应机理,研究了湍流火焰结构、自由基和污染物排放的模拟结果,结果表明非稳态火焰面模型预测低浓度的 NO 排放更合理。金捷等^[18]结合详细化学反应机理,对煤油两相燃烧场进行了模拟,结果表明非稳态火焰面模型对浓度预报的结果较稳态火焰面模型更准确。Pitsch 等^[19]应用非稳态火焰面模型对一个简化的旋流燃烧室的污染物排放进行了预测,与试验结果的对比表明,可以对燃烧室内的组份进行比较准确的计算,特别是 CO 的排放与试验结果相符较好。叶桃红等^[20-21]对火焰面模型在湍流燃烧中的应用进行了详细的研究,提出了物理空间的火焰面模型方程,该模型可以考

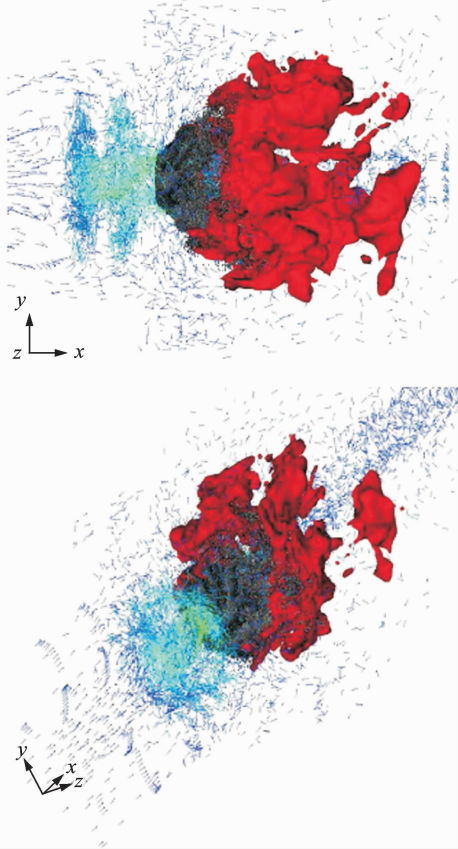


图 1 某时刻燃烧室内瞬时速度(箭头),液滴分布(黑色点)以及温度 $T=2100\text{ K}$ 等值面

Fig. 1 3-D plot of instantaneous velocity (arrows), droplet distribution (black dots) and temperature iso-contour for $T=2100\text{ K}$

虑多组份分子输运特性、Soret 效应等多种因素,从而提高了预报精度。

单参数火焰面模型计算简单,可以与详细化学反应机理结合。但是在模拟熄火、再燃、污染物形成时,误差较大。为了提高火焰面模型预报能力,Pierce 等^[22]提出了由混合分数和反应过程变量共同表征的双参数火焰面模型。过程变量是非守恒标量,代替标量耗散率,使火焰面数据库包含从熄火到稳态燃烧的所有信息。该模型同样可以结合详细化学反应动力学。Pierce 利用该方法,成功捕捉到了火焰的局部熄火及再燃现象。过程变量可以通过生成物的组份浓度计算关系来表达,也可以通过当地温度来计算。Ihme 等^[23]提出了一种统一过程变量的定义方法,并提出了基于组份浓度的统一过程变量的定义方程。叶桃红等^[24]基于开源程序发展了双参数火焰面模型的计算软件,研究了预混火焰,结果表明,混合物标量耗散率对火焰结构的影响较大,而反应进度标量耗散率对当量混合附近的结构影响较为明显。

在旋流液雾火焰中,有预混和扩散火焰同时并存的局面。Knudsen 等^[25]通过燃烧索引参数 θ 来判断燃烧情况

$$\theta = \frac{\partial_{\Delta} C [\rho_u S_{L,u} | \nabla \Delta | - \nabla \cdot (\rho D \nabla \Delta)]}{\rho \frac{xz}{z} \partial_z^2 C} \quad (2)$$

认为当 $\theta > 1$ 时,当地的燃烧主要为预混燃烧,反之当 $\theta < 1$ 时,当地的燃烧主要为扩散燃烧。罗坤等^[26]将该方法应用在甲烷-空气旋流燃烧的大涡模拟中,其计算结果优于采用单一火焰面模型的计算结果。据此罗坤认为,单纯的预混或者扩散燃烧比较少见,无论是典型的气相扩散燃烧还是气液两相燃烧,更多的是以预混和扩散并存的模式进行的。所以,构建复合火焰面模型,判断局部燃烧状态,再选择火焰面子模型,从而提高预报精度。

Gutheil 和 Sirignano^[27]指出,在传统火焰面方程中,各标量仅与混合分数和标量耗散率有关,而在液雾两相火焰中,液滴蒸发造成混合分数不再守恒,初始液滴的直径、喷射速度以及当量比都会对火焰面结构产生影响,为了提高火焰面模型在两相反应流中的准确度,应该在火焰面模型中进一步考虑燃料液滴的蒸发作用对火焰面的影响,这就是两相火焰面模型。基于这个理论,文献^[28, 29]对火焰面方程添加了液滴蒸发源项,进行坐标变换,将其转换到混合分数空间,得到考虑液滴蒸发的两相火焰面模型

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial Y_i}{\partial \tau} - \rho \frac{x}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} &= \dot{\omega}_i - [Y_i + \frac{\partial Y_i}{\partial Z} (1 - Z) - \\ \delta_i] S_m^* \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \rho \frac{x}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} &= \\ \frac{1}{C_p} (\omega_r + S_r) - [T + \frac{\partial T}{\partial Z} (1 - Z)] S_m^* & \quad (3) \end{aligned}$$

式中 S_m 为液滴蒸发源项。

罗坤通过直接数值模拟发现了蒸发源项与混合分数的函数关系式,再通过求解稳态小火焰方程式,从而得到了火焰面方程新增的源项对整个火焰面模型的影响。结果表明液滴的蒸发会对火焰结构产生非常大的影响,蒸发源项会在混合分数空间改变或者甚至产生新的反应区域,从而改变标量的值。因此,对于两相火焰面模型来说,蒸发源项应该要作为一个参数考虑进去。Gutheil 将上述方程整理成耗散项、混合项、蒸发项组合形式,添加到了气体控制方程中,并给出了每一项的具体算法。在 Gutheil 的研究中,这 3 个源项在转换到混合分数空间后,所构建的两相火焰面方程与传统的火焰面模型相比多了两个源项,其物理含义为液滴蒸发和混合/蒸发对火焰面的影响。通过将两相火焰面模型用于计算乙醇/空气的对流扩散燃烧,Gutheil 对新火焰面方程的 3 个源项对火焰面模型的影响程度进行了研究。研究结果表明,在喷雾一侧,蒸发项对于燃料蒸汽的影响最大(图 2),混合/蒸发项对于氧气以及二氧化碳排放的影响起主导地位,而耗散项在燃料液滴完全蒸发后的燃气一侧起主导地位。该结果说明对于扩散燃烧来说,液滴蒸发所造成的影响不可忽略,考虑两相作用是提高火焰面模型计算精度的一个新方向。

3 二阶矩模型

湍流燃烧的二阶矩模型可以看成是类似于湍流流动的封闭模型。二阶矩模型的特色是定量研究平均化学反应率表达式中的温度指数项的脉动关联,已经发展出多种形式,比较有特点的有代数二阶矩模型以及统一二阶矩模型。代数二阶矩模型其基本思路是:将瞬时化学反应速率进行雷诺分解,保留二阶关联量,令 $K = A \exp(-E_a/RT)$ 代表温度指数项,则平均化学反应速率可以用温度、浓度、 K 的平均量和脉动关联量表示,例如

$$\begin{aligned} \omega_a &= \overline{K} \overline{Y}_1 \overline{Y}_2 + \overline{Y}_2 \left(C_1 \frac{\mu_r}{\rho} \frac{\partial \overline{K}}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{Y}}{\partial x_i} \right) + \\ \overline{Y}_1 \left(C_2 \frac{\mu_r}{\rho} \frac{\partial \overline{K}}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{Y}}{\partial x_i} \right) &+ \overline{K} \left(C_3 \frac{\mu_r}{\rho} \frac{\partial \overline{K}}{\partial x_i} \frac{\partial \overline{Y}}{\partial x_i} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)为基本的代数二阶矩模型(ASOM),清

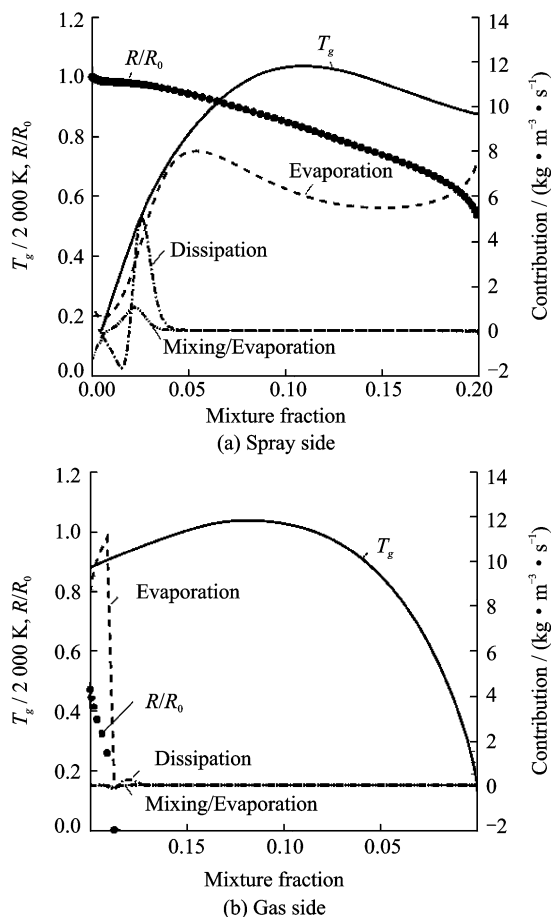


图2 3个源项对燃料蒸汽的作用影响

Fig. 2 Contributions for ethanol, spray side and gas side

华大学周力行教授及其研究组将该方程与详细化学反应机理结合^[30],对氢气-空气扩散火焰的温度模拟,其结果与试验符合较好。之后对该模型进行了若干改进,比如,考虑混合速率对反应速度的影响^[31]、考虑计算实际化学反应速率所需的比例因子、构建双尺度二阶矩模型等。

统一二阶矩模型的基本思想是利用一个统一形式的输运方程来描述包括反应率系数 k 的脉动和浓度脉动关联在内的各种关联量^[32]。该模型的时均化学反应速率的表达式为

$$\bar{\omega} = \rho^2 [(\bar{Y}_1 \bar{Y}_2 + \bar{Y}'_1 \bar{Y}'_2) \bar{K} + \bar{Y}_1 \bar{K}' \bar{Y}'_2 + \bar{Y}'_2 \bar{K} \bar{Y}'_1] \quad (5)$$

式中的 K 用概率密度函数积分得到,脉动关联用双时间尺度耗散封闭的统一形式的输运方程来封闭。周力行等对甲烷-空气扩散火焰进行数值模拟^[33],其对温度和 NO_x 的计算精度要高于 ASOM,且具有能模拟湍流和详细反应动力学的相互作用、计算量小的特点。王方等^[34]将统一二阶矩与3种只考虑温度或者浓度脉动的二阶矩模型

进行了对比研究,结果表示统一二阶矩模型的精度最高,因为化学反应速率与浓度间的脉动关联最为重要。之后王方等^[35]还利用直接模拟数据检验了二阶矩模型,在利用修正函数对壁面处的浓度进行修正后,模拟效果明显提高,但同时文章中也指出,耗散项需要进一步改正。二阶矩模型同样也可以应用在大涡模拟研究中。李科等^[36]基于二阶矩燃烧模型,对乙醇的液雾燃烧进行了大涡模拟研究,其计算统计温度与试验结果吻合较好,表明二阶矩模型在湍流液雾燃烧的大涡模拟中具有一定的适用性。

4 结束语

燃烧室内的燃烧过程是复杂的两相湍流燃烧过程,模拟结果的准确性极大程度依赖于湍流燃烧模型。对于燃烧模型的选择需要综合考虑计算资源、计算目的等。随着计算机技术的飞速发展,研究者们能够将更加准确的燃烧模型应用到模拟研究之中,从而获得更加真实、准确的流场数据,为工程设计提供支撑。

参考文献:

- [1] Pope S B. PDF methods for turbulent reactive flows [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1985, 11(2): 119-192.
- [2] 陈义良. 湍流燃烧中的概率密度函数方法[J]. 力学进展, 1990, 20(4): 478-487.
Chen Yiliang. PDF methods in turbulent combustion [J]. Advances in Mechanics, 1990, 20(4): 478-487.
- [3] 范周琴,孙明波,刘卫东. 湍流燃烧的概率密度函数输运方程模型研究[J]. 飞航导弹, 2010(5): 90-95.
Fan Zhouqin, Sun Mingbo, Liu Weidong. Study of PDF methods in turbulent combustion [J]. Winded Missile, 2010(5): 90-95.
- [4] Colucci P J, Jaber F A, Givi P, et al. Filtered density function for large eddy simulation of turbulent reacting flows [J]. Physics of Fluids, 1998, 10(2): 499-514.
- [5] Valino L. A field Monte Carlo formulation for calculating the probability density function of a single scalar in a turbulent flow [J]. Flow Turbulence and Combustion, 1998, 60(2): 157-172.
- [6] Sabel'nikov V, Soulard O. Rapidly decorrelating velocity-field model as a tool for solving one-point Fokker-Planck equations for probability density functions of turbulent reactive scalars [J]. Physical Review, 2005, 72(1): 016301. 1-016301. 22.

- [7] Hauke G, Valino L. Computing reactive flows with a field Monte Carlo formulation and multi-scale methods[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(15/16): 1455-1470.
- [8] Garmory A, Mastorakos E. Aerosol nucleation and growth in a turbulent jet using the stochastic fields method[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(16): 4078-4089.
- [9] Garmory A, Britter R E, Mastorakos E. Simulation of the evolution of aircraft exhaust plumes including detailed chemistry and segregation[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, 113(D8): D8303.
- [10] Mustata R, Valino L, Jimenez C, et al. A probability density function Eulerian Monte Carlo field method for large eddy simulations: Application to a turbulent piloted methane/air diffusion flame (Sandia D)[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(1/2): 88-104.
- [11] Jones W P, Marquis A J, Noh D. LES of a methanol spray flame with a stochastic sub-grid model[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2014, 35(2): 1685-1691.
- [12] Jones W P, Marquis A J, Vogiatzaki K. Large-eddy simulation of spray combustion in a gas turbine combustor[J]. *Computers & Fluids*, 2008, 161(1): 222-239.
- [13] Jones W, Navarromartinez S. Large eddy simulation of autoignition with a subgrid probability density function method[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 150(3): 170-187.
- [14] Jones W, Navarromartinez S. Study of hydrogen auto-ignition in a turbulent air co-flow using a Large Eddy Simulation approach [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 37(7): 802-808.
- [15] Jones W P, Navarro-Martinez S. Numerical study of n-heptane auto-ignition using LES-PDF methods[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2009, 83(3): 407-423.
- [16] 王海峰,陈义良. 采用考虑详细化学反应机理的火焰面模型模拟湍流扩散火焰[J]. *燃烧科学与技术*, 2004, 10(1): 77-81.
Wang Haifeng, Chen Yiliang. Flamelet modeling of turbulent non-premixed flame based on detailed chemical reaction mechanisms[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2004, 10(1): 77-81.
- [17] 王海峰,陈义良. 湍流扩散火焰的非稳态火焰面模拟[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(2): 329-332.
Wang Haifeng, Chen Yiliang. Unsteady flamelet modelling of turbulent non-premixed flame[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(2): 329-332.
- [18] 王慧汝,金捷,柳杨. 采用详细化学反应机理的火焰面模型模拟煤油两相燃烧流场[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(7): 1471-1479.
Wang Huiru, Jin Jie, Liu Yang. Flamelet modeling of two-phase kerosene combustion flow fields using a detailed chemical reaction mechanism[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(7): 1471-1479.
- [19] Ihme M, Pitsch H. An extended flamelet/progress variable method for LES of nonpremixed turbulent combustion [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit-Meeting Papers. [S. l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005: 2593-2606.
- [20] 武文,黄威,赵平辉,等. 基于RANS求解的火焰面/反应进度变量湍流燃烧模型研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010(10): 1016-1022.
Wu Wen, Huang Wei, Zhao Pinghui, et al. Study of RANS based flamelet/progress variable turbulent combustion model[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010(10): 1016-1022.
- [21] 赵平辉,叶桃红,陆阳,等. 一种新的层流扩散火焰面建库模型的研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(6): 1069-1072.
Zhao Pinghui, Ye Taohong, Lu Yang, et al. Study of a new method of the establishment of a database of laminar diffusion flamelet[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(6): 1069-1072.
- [22] Pierce C D, Moin P. Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004(504): 73-97.
- [23] Ihme M, Shunn L, Zhang J. Regularization of reaction progress variable for application to flamelet-based combustion models[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(23): 7715-7721.
- [24] 赵庆忠,叶桃红,吴玉欣. 基于混合物分数和反应进度变量的二维火焰面模型[J]. *燃烧科学与技术*, 2013(2): 181-186.
Zhao Qingzhong, Ye Taohong, Wu Yuxin. Two-dimensional flamelet model based on mixture fraction and progress variable[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013(2): 181-186.
- [25] Knudsen E, Pitsch H. A general flamelet transformation useful for distinguishing between premixed and non-premixed modes of combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 122(1): 1-15.

- tion and Flame, 2009, 156(3): 678-696.
- [26] 罗坤,王海鸥,樊建人,等. 旋流燃烧器复合小火焰模型的大涡模拟[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(1): 146-150.
Luo Kun, Wang Hai'ou, Fan Jianren, et al. Large eddy simulation of a swirl combustor with a combined flamelet model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(1): 146-150.
- [27] Gutheil E, Sirignano W A. Counterflow spray combustion modeling with detailed transport and detailed chemistry[J]. Combustion and Flame, 1998, 113(1/2): 92-105.
- [28] Luo K, Fan J, Cen K. New spray flamelet equations considering evaporation effects in the mixture fraction space[J]. Fuel, 2013, 103(1): 1154-1157.
- [29] Olguin H, Gutheil E. Influence of evaporation on spray flamelet structures [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(4): 987-996.
- [30] Zhou X, Sun Z, Brenner G, et al. Combustion modeling of turbulent jet diffusion H₂/air flame with detailed chemistry [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(12): 2075-2088.
- [31] 隋春杰,周力行,林博颖,等. 湍流非预混燃烧数值模拟的代数二阶矩模型[J]. 化工学报, 2014(2): 415-421.
Sui Chunjie, Zhou Lixing, Lin Boying, et al. Algebraic second-order moment model for simulation of turbulent non-premixed combustion[J]. CIESC Journal, 2014(2): 415-421.
- [32] 乔丽,周力行,陈兴隆,等. 湍流燃烧的统一二阶矩模型[J]. 燃烧科学与技术, 2002(4): 297-301.
Qiao Li, Zhou Lixing, Chen Xinglong, et al. A unified second-order moment model for turbulent combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002(4): 297-301.
- [33] Zhou L X, Qiao L, Chen X L, et al. A USM turbulence-chemistry model for simulating NO_x formation in turbulent combustion [J]. Fuel, 2002, 81(13): 1703-1709.
- [34] 王方,周力行. 几种二阶矩模型模拟湍流旋流燃烧的比较[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 143-146.
Wang Fang, Zhou Lixing. Comparison of various second-order moment models in modeling turbulent swirling combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 143-146.
- [35] 王方,周力行,许春晓,等. 用直接模拟数据检验 RANS 二阶矩燃烧模型[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1787-1790.
Wang Fang, Zhou Lixing, Xu Chunxiao, et al. Validation of rans second-order moment combustion model by direct numerical simulation database[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(10): 1787-1790.
- [36] 李科,周力行,Chan C K. 基于二阶矩燃烧模型的液雾燃烧大涡模拟[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(3): 521-524.
Li Ke, Zhou Lixing, Chan C K. Large-eddy simulation of ethanol spray combustion using a SOM combustion model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(3): 521-524.