

# 湍流燃烧数值模拟研究的综述

张会强 陈兴隆 周力行 陈昌麒\*

清华大学工程力学系, 北京 100084

\* 香港理工大学应用数学系, 香港

**摘要** 对湍流燃烧数值模拟的研究进行了综合评述, 其中涉及直接数值模拟 (DNS)、大涡模拟 (LES)、随机涡模拟、概率密度函数输运方程模拟、条件矩模型、简化概率密度函数模型、关联矩模型以及基于简单物理概念的一些唯象模型等几个重要方面. 对全面了解湍流燃烧数值模拟的研究现状及前景提出了看法.

**关键词** 湍流燃烧, 数学模型, 数值模拟

## 1 引言

在能源、动力、航空和航天等工程领域, 经常遇到的实际燃烧过程几乎全部都是湍流燃烧过程. 在湍流燃烧中, 湍流流动过程和化学反应过程有强烈的相互关联和相互影响. 湍流通过强化混合而影响着时平均化学反应速率, 同时化学反应放热过程又影响着湍流, 如何定量地来描述和确定这种相互作用是湍流燃烧研究的一个重要内容.

组份方程和能量方程中的源项是化学反应源项. 化学反应中组份的生成 (消耗) 率或能量的释放速率是反应物浓度和反应流体温度的强非线性函数. 由于湍流影响, 化学反应中组份浓度和温度以及化学反应速率都是随时间而脉动的, 因此在湍流燃烧的数值模拟中, 不仅面临着湍流流动所具有的问题以及脉动标量的输运方程如何处理的问题, 还面临着湍流燃烧所特有的, 与脉动量呈确定的强非线性函数关系的脉动标量即时平均化学反应速率的模拟. 湍流燃烧模拟最基本的问题是反应速率的时均值不等于用时平均值表达的反应速率.

目前湍流燃烧模拟的方法有直接数值模拟 (DNS)、大涡模拟 (LES)、随机涡模拟、概率密度函数输运方程模拟、条件矩模型、简化概率密度函数模型、关联矩模型、基于简单物理概念的一些唯象模型等. 这些模型在模拟精度、合理性和经济性上各有不同特点, 但是如何寻找一种既合理而又经济的模型, 是尚待解决的问题.

## 2 湍流燃烧的直接数值模拟 (DNS)<sup>[1,2]</sup>

DNS 方法用于湍流燃烧, 可以仔细地考虑和了解湍流与燃烧的相互作用. 但是与纯流动过程相比, 燃烧使得这一方法的应用更为困难, 一方面燃烧使得流场内流体的温度和组成有一个

收稿日期: 1998-05-28, 修回日期: 1999-01-28

很大的变化,以至于决定网格尺寸的相关湍流尺度难以确定;另一方面燃烧本身可能在时空上引入一些足以与湍流尺度相比拟的尺度(如火焰厚度,反应时间).因此,在湍流燃烧的直接数值模拟中,除了简单几何形状和低 Reynolds 数外,还有低 Damköhler 数的限制,否则,就要对火焰面进行跟踪和采用自适应加密网格.湍流燃烧过程的直接数值模拟为人们认识火焰面在温度的作用下的皱折过程、标量的逆梯度输运机理、预混燃烧的火焰结构以及扩散燃烧统观模型的检验上提供了一个重要的手段,并已在这些方面取得很大的进展<sup>[3]</sup>.当然,由于 DNS 所需计算量很大,只限于尺寸很小空间内低  $Re$  数情况,因此目前尚无法用于工程问题.

### 3 湍流燃烧的大涡模拟 (LES)<sup>[1,2,4]</sup>

LES 是在湍流的大涡尺度和小涡尺度 (Kolmogorov 尺度) 之间选一滤波宽度对 N-S 方程进行滤波,把所有流动变量分成大尺度量和小尺度量,对大尺度量进行直接模拟,而对小尺度量采用亚网格尺度模型进行模拟.这样一来,LES 用于湍流燃烧时是否能够成功就取决于燃烧过程的尺度.在许多我们感兴趣的燃烧系统中,反应区具有和 Kolmogorov 尺度一样或还要小的量级,而这些量级的尺度恰恰被 LES 滤掉了,需要借助模型来模拟.这样,湍流燃烧大涡模拟的精确度和有效性就值得怀疑,因此亚网格尺度模型对湍流燃烧的大涡模拟至关重要,这方面已经并继续需要开展大量的研究<sup>[5,6]</sup>.LES 所需计算量虽比 DNS 小得多,但是对复杂的工程流动仍然计算量很大,因此目前主要用于检验统观模型.

### 4 湍流燃烧的 PDF 输运方程模拟<sup>[4,7]</sup>

用 PDF 方法研究湍流燃烧问题已有二十多年的历史.PDF 方法是把标量脉动关联矩、矢量脉动关联矩、标量矢量脉动关联矩以及非线性的化学反应源项的封闭建立在确定标量和矢量的联合概率密度函数之上,无需模拟,但是 PDF 输运方程本身的分子混合项和随机速度项仍需通过模拟加以封闭.该方法在有限反应速率的燃烧过程和考虑详细反应动力学(如污染物生成问题)中具有很强的优势.依据概率和统计理论可以严格建立湍流燃烧系统中变量的联合概率密度函数的输运方程.就相空间的变量而言,联合概率密度函数大致可分为 3 种类型,它们分别是标量的联合概率密度函数、标量和矢量的联合概率密度函数及标量和矢量与耗散率的联合概率密度函数.在第一类联合概率密度函数中,因其中不包含速度场的信息,所以湍流速度场需用其它方法(如  $k-\epsilon$  模型)来确定,同时这类联合概率密度函数输运方程中的对流项也是不封闭的,需引入模型.在第二类联合概率密度函数中,由于其中包含了速度,因此不仅联合概率密度函数输运方程中的对流项是封闭的,而且湍流流动的输运方程也是封闭的(即湍流模型也是不需要的).但是在以上两类联合概率密度函数的输运方程中均包含有概率密度函数无法封闭的压力脉动梯度项及由分子粘性和分子扩散引起的 PDF 的分子输运项,这些都需要引入模型加以封闭.从这个意义上讲,PDF 方法又是一种需要模型的方法.在这些项的封闭模型中需要湍流尺度参数,显然前两类概率密度函数中并没有(或包含)这个量,正是基于这一点,出现了包含湍流耗散率的第三类联合概率密度函数,从而使这类概率密度函数所引入的模型是自封闭的,无需经验的尺度参数.联合概率密度函数的输运方程是难以用有限容积、有限差分法和有限元等方法来数值求解的,目前比较可行的一种数值方法是 Monte-Carlo 法.在该方法中,动量和标量的输运方程被转化为 Lagrangian 方程.概率密度函数并不是被直接求解出来,而是由大量的具有速度和标量值以及满足上述 Lagrangian 方程的计算颗粒统计来获得.对复杂机理的有限反应速率的化学反应流来说,这种数值方法会引致巨大甚至无法实现的计算量.总之,

最近十多年以来, PDF 方法在模型建立、封闭和数值方法方面均取得了很大进展和一些成功的应用. 文献 [8] 用输运方程的 PDF 方法成功预报了湍流预混燃烧中的逆梯度运输的现象. 文献 [9] 用 PDF 方法预报了湍流火焰从点火开始的早期发展阶段. 同时, PDF 输运方程的数值模拟在湍流预混燃烧和湍流扩散燃烧方面的应用均得到了广泛研究<sup>[10,11]</sup>. 应该说 PDF 方法是解决有限反应速率和污染物生成等诸类湍流燃烧问题的最合适和最理想的方法, 但联合概率密度函数求解的复杂性和计算量之大给其在工程中的广泛应用带来了很大的困难. 近几年来, 输运方程的概率密度方法在封闭 Reynolds 应力的速度模型、近壁模型和封闭分子扩散项的湍流混合模型方面取得了一些进展, 同时在高马赫数流动和大涡模拟的亚网格尺度模型中也得到了应用<sup>[12]</sup>.

## 5 湍流燃烧的条件矩封闭 (Conditional Moment Closure) 模型

湍流燃烧的条件矩封闭模型是由 Klimenko<sup>[13]</sup> 和 Eulger<sup>[14]</sup> 各自独立提出来的, 并在近来得到了比较多研究<sup>[15~18]</sup>. 它的关键是引入一个守恒标量作为条件变量, 这样平均值和脉动矩就成为该守恒标量的条件矩. 尽管引入条件变量增加了问题的维数, 但是, 对很多情况, 条件矩在流动的某些方向上基本保持不变<sup>[14,17,18]</sup>, 而对另外一些情况, 沿某些方向对设定的条件概率密度函数加权的守恒方程进行积分可以消去一些项<sup>[14,15]</sup>, 这就使问题得到了很大的简化. 条件矩封闭方法最突出的优点就是能够有效地将反应动力学和流动的非均匀性解耦, 同时保持了标量耗散即微尺度混合的影响, 它可以模拟相当复杂的反应动力学. 在扩散燃烧中, 通常取混合分数为条件变量, 而在预混燃烧中, 通常取反应度为条件变量. 条件平均得到的方程和传统的矩方程形式很相似, 可以利用传统的数值计算方法和程序. 目前条件矩封闭方法在湍流燃烧以及污染物预报<sup>[15,16]</sup> 等方面都得到了令人满意的进展. 但是条件矩封闭方法也有其弱点: (1) 数值积分过程中计算量相当大, (2) 时均湍流反应率用级数展开的方法, 不可避免会带来较大的误差, 从而实际计算中得到的结果比 PDF 输运方程的模拟结果要差. 总的说来, 条件矩封闭方法是一种很有应用前景的湍流燃烧模拟方法, 目前仍还处在发展阶段, 有待改进和完善.

## 6 湍流燃烧的简化 PDF 模型

湍流燃烧的简化或设定 PDF 模型既用于快速反应的燃烧系统, 也用于有限反应率, 如  $\text{NO}_x$  生成的预报. 在这种情况下, 总可以找到一个或两个标量来完全描述燃烧系统的化学热力学状态参数, 建立这些标量的输运方程以及假定它们脉动的概率密度函数, 从而通过概率积分就可以完全确定湍流燃烧过程中所有标量的时平均特性. 因此, 这类模型被称之为预先给定的 PDF 模型, 即简化的 PDF 模型. 也可以看成上述第一类联合概率密度函数在相空间为单变量或双变量时的一种求解方式. 属于这种模型的有湍流燃烧的层流小火焰模型和湍流预混燃烧的 BML 模型.

### 6.1 湍流燃烧的层流小火焰模型<sup>[2,19,20]</sup>

层流小火焰模型是既可用于湍流预混燃烧, 又可用于湍流扩散燃烧的一类湍流燃烧模型. 它把湍流火焰看成嵌入湍流流场内的局部具有一维结构的薄的层流火焰的一个系综. 在该模型中, 化学反应的时间尺度与湍流流动的 Kolmogorov 时间尺度相比要小, 即燃烧是在湍流的最小涡团的一个脉动周期内完成. 因此, 湍流燃烧的层流小火焰模型是一种基于快速反应假设的模型, 在火焰面内以分子扩散和输运过程为主. 构成湍流火焰系综的层流火焰是用摄动法建立起

来的。即用摄动法建立一个以摄动量为参变量的层流燃烧的化学热力学状态参量与某一个标量之间的数据库,当然,除了摄动法以外,也可以通过层流燃烧实验来确立这个数据库。在层流小火焰模型中,这个标量必须是输运量,且其输运方程中没有化学反应源项。摄动参量是可以由湍流状态参数所表征的变量。在湍流燃烧中,以上述输运标量时均值及其脉动的均方值确定预先给定的概率密度函数中的待定参数,然后利用上述数据库对输运标量进行概率积分来确定湍流燃烧时的化学热力学状态。层流小火焰模型在湍流预混燃烧和湍流扩散燃烧中的具体形式有很大的不同。在湍流扩散燃烧中,输运方程中无化学反应源项,可以唯一地确定燃烧状态的守恒标量是混合分数,摄动参量是标量的耗散率。当化学反应速度无限大时,反应面无限薄,对于一步简单反应来说,燃烧的化学热力学状态与混合分数的关系可以用简单的解析表达式来描述。以此作为数据库的湍流燃烧模型又称之为湍流燃烧的反应(火焰)面模型。实际燃烧系统很难满足反应速度无限大的限制,因此,这个模型具有较小的应用价值。在反应速度很大但不是无限大时,标量的耗散率为零对应于化学热力学平衡状态,此时的数据库可以化学热力学平衡计算来建立,以此为数据库的湍流燃烧模型称之为湍流燃烧的局部瞬时平衡模型。比较而言,该模型就有较高的实用价值,但是着火、灭火、烃类和CO燃烧及污染物生成等都不处于局部瞬时化学平衡。与这两个模型相比,以层流扩散燃烧时标量耗散率为摄动参变量所确立的层流燃烧状态与混合分数之间关系为数据库的湍流扩散燃烧的层流小火焰模型则有了很大的改进。湍流预混燃烧的层流小火焰模型却不像其在湍流扩散燃烧中那样简洁明了,因为在湍流扩散燃烧中,混合分数概念易于建立,从而很容易确定火焰面的位置。在湍流预混燃烧的层流小火焰模型中,输运方程中无源项的可以唯一确定燃烧状态的守恒标量是描述火焰面位置的标量,摄动变量为使层流火焰面皱褶的变形率。不论是在湍流扩散燃烧中,还是在湍流预混燃烧中,首先层流小火焰模型的快速反应假定较切合实际燃烧系统;其次大的标量耗散率或火焰面变形率又可引致灭火,因此,具有预报着火、灭火的能力;最后层流燃烧数值模拟可以考虑详细的化学反应动力学过程和分子输运过程,因此,该模型具有良好的发展前景和实用价值。在层流小火焰模型中常常采用的预先假定的概率密度函数形式有双 $\delta$ 函数分布<sup>[21]</sup>、截尾高斯分布<sup>[22]</sup>和 $\beta$ 函数分布<sup>[23]</sup>。双 $\delta$ 函数分布形式简单,待定参数易于确定,引入计算量小,但有时却会得到一些明显不合理的计算结果<sup>[24]</sup>,如温度变化的双峰分布。截尾高斯分布形式复杂,待定参数难以确定,引入计算量大,但和标量的实际脉动状况相比,要比双 $\delta$ 函数分布合理一些。尽管可以通过查表确定待定参数,但仍然是一种计算量大且难以应用的一种概率密度函数。 $\beta$ 函数分布的待定参数易于确定,但积分运算和函数本身的一些奇点给其应用带来一定的困难<sup>[25]</sup>。在这三种概率密度函数中,目前用的比较多的是 $\beta$ 函数分布。文献<sup>[26]</sup>提出一种多点 $\delta$ 函数分布,其待定参数易于确定,引入计算量小,计算结果较为合理。

## 6.2 湍流预混燃烧的 BML 模型<sup>[1,27]</sup>

Bray 和 Moss 提出了湍流预混燃烧的热力化学的 Bray-Moss (BM) 模型<sup>[28]</sup>,后又扩展为湍流预混燃烧的气动热力化学的 Bray-Moss-Libby 模型<sup>[29]</sup>。在这类模型中,湍流燃烧场被分为未燃区和已燃区,两区之间为一薄的火焰面隔开。对这种燃烧特征用标量反应度来描述,在未燃区反应度为 0,在已燃区反应度为 1,在两区之间的薄的火焰面内其值介于 0 与 1 之间。BM 模型的关键是认为预混燃烧系统的所有热力化学状态参数都是反应度(和焓)的函数。这样描述湍流预混燃烧系统的方程除了连续方程和动量方程以外,就只需要反应度(和焓)的方程。对这组方程采用时平均的方法模拟湍流问题。引入概率密度函数来确定湍流燃烧的热力化学状态参

数的时平均值 (或质量加权平均值) 和封闭与之相关的脉动关联矩. 概率密度函数的相空间如果为反应度 (和焓), 则称之为 BM 模型, 如果为反应度、焓和速度, 则称之为扩展的 BM 模型即 BML 模型. 在 BM 模型中所采用的概率密度函数为  $\delta$  函数. 在反应度和焓的输运方程中都有化学反应源项, 因为化学反应速率是组份浓度和温度的函数, 因而也就是反应度 (和焓) 的函数. 尽管引入了反应度和焓的联合概率密度函数, 但作为 BM 模型及 BML 模型最基本的一个假设是反应度和归一化的焓介于 0 和 1 之间的概率远远小于 1, 因此通过对反应度进行概率积分的方法来封闭化学反应源项的途径是不合适的. 这样一来, 在 BM 模型和 BML 模型中平均化学反应速率的封闭是一个重要的问题, 需引入模型. 常见的模型有与反应度的耗散率相关联的模型、与火焰面的扫过频率相关的模型和与火焰面的伸屈因子相关的模型. 综上所述, BM 模型及 BML 模型也是基于快速反应假设的一种简化 PDF 模型, 不过考虑了有限化学反应速率的化学动力学因素的影响. 它在非均匀流场中的湍流预混燃烧系统<sup>[30]</sup>、非等焓的湍流预混燃烧系统<sup>[31]</sup>以及非稳态湍流预混燃烧系统<sup>[32]</sup>中都有成功的应用. 但该模型尚较少用于工程实际中的燃烧问题.

### 7 湍流燃烧的关联矩模型<sup>[33]</sup>

湍流燃烧的关联矩模型可以看成是类似于湍流流动的封闭模型. 它对反应速率表达式中的非线性指数项进行级数展开, 从而该非线性指数项的脉动量可以表示成温度脉动量的无穷级数. 该级数只有在  $E/RT \ll 1$  和  $T'/T \ll 1$  时才是收敛的. 然而在许多实际燃烧系统中  $E/RT \gg 1$ , 同时  $T'$  也并非总是远远小于  $T$ . 因此这种级数展开的方法有严重的误差. 在上述两个条件得到满足, 即级数收敛时, 对二级双组元的简单反应来说, 化学反应速率时平均封闭的问题就转化为  $\overline{Y_f'Y_o'}$ ,  $\overline{Y_f'T_o'}$ ,  $\overline{T'Y_o'}$  和  $\overline{T'^2}$  等四个二阶标量脉动关联矩的封闭问题. 通常建立它们的输运方程, 并应用梯度模拟对其中一些项进行模拟, 以使这些输运方程封闭. 因此, 在湍流燃烧的关联矩封闭模型中, 常常需要引入六个二阶标量脉动关联矩的微分方程, 把这种模型也叫作关联矩的输运方程模型. 当然这些方程的引入会使计算机的储量和计算时间大为增加, 因此, 又提出了一种关联矩的代数模型, 即将相关二阶标量脉动关联矩的输运方程中的对流项和扩散项忽略, 并认为化学对脉动关联的影响是次要的, 从而可以得到这些二阶标量脉动关联矩的代数表达式. Khalil<sup>[34]</sup> 对无旋同轴射流射入突扩燃烧室的湍流燃烧问题用 EBU-Arrhenius 模型、扩散控制的简化 PDF 模型及只有浓度脉动的关联矩输运方程封闭模型进行了对比研究.

### 8.1 湍流预混燃烧的 EBU 模型<sup>[21,38]</sup>

在 Spalding 提出的湍流预混燃烧的 EBU (Eddy-Break-Up) 模型中, 认为湍流燃烧区由未燃气和已燃气的微团组成, 它们的破碎导致这两种微团的迅速接触, 并在二者的交界面上发生化学反应. 因此, 假定湍流燃烧时化学反应的速率取决于未燃气和已燃气微团在湍流作用下破碎成更小微团的速率, 即湍流燃烧过程由湍流混合过程来控制. 因此湍流燃烧区化学反应过程的快慢取决于湍流混合过程的速率, 并认为这个混合过程不受释热的影响. 进一步假定微团破碎的速率与湍流脉动动能的衰变速率成正比. 从而, 可以给出化学反应速率决定于湍能及其耗散率和浓度脉动的均方根值的一个简单表达式. 浓度脉动的均方根既可以由微分方程来求解, 也可以取为燃料、氧化剂和燃烧产物浓度时均值的最小值<sup>[39]</sup>. 在该模型中, 显然过分突出了湍流混合对燃烧速率的决定作用, 而忽略了分子输运和化学反应动力学过程的作用. 因此, 该模型只适用于高雷诺数的湍流燃烧过程. 尽管如此, 流场中温度不高并没有燃烧的区域, 该模型仍可能给出错误的预报结果. 为此引入用时均参数确定的化学反应速率. 此时, 化学反应速率取为 EBU 湍流混合速率和平均参数的 Arrhenius 机理的反应速率的最小值. 因此该模型又称之为 EBU-Arrhenius 模型. 用 EBU 模型对湍流回流燃烧进行了数值预报, 燃烧效率和速度场与实验符合得较好, 而预报和实测的温度场只是定性上一致<sup>[40]</sup>. 文献 [41] 结合实验对 EBU 的模型常数进行了细致的研究, 并给出了模型系数合理的取值或表达式. 与其它湍流燃烧模型相比 EBU-Arrhenius 模型十分简单, 且易于使用. 因此在冲压发动机、液体火箭发动机及煤粉燃烧炉等实际燃烧系统的数值模拟中都有广泛的应用.

### 8.2 湍流预混燃烧的拉切滑模型<sup>[21]</sup>

Spalding 提出的拉切滑 (stretch-cut-and-slide) 模型可以看成是 EBU 模型的改进和发展. 它基于由不同比例的未燃气和已燃气组成的流体微团在湍流作用下被反复进行拉伸、切割和滑动而使其不均匀程度不断减少以及在微团内部的已燃气和未燃气的交界面上存在着层流火焰这两个假设. 它比 EBU 模型更合理, 更准确. 但其模型表达式很复杂, 使用起来很困难, 远没有 EBU-Arrhenius 模型应用得广泛. 文献 [42] 用此模型计算了平面管道内钝体后端流预混火焰的扩张角, 计算结果表明该扩张角与来流预混气的状态无关, 并与实验符合得很好.

### 8.3 湍流燃烧的 ESCIMO 模型<sup>[43,44]</sup>

Spalding 提出的 ESCIMO 湍流燃烧理论是分析湍流扩散和预混燃烧的另一基于观察的唯象模型. ESCIMO 是卷吞 (Engulfment)、拉伸 (Stretching)、相干 (Coherence)、相互作用和化学反应 (Interdiffusion 和 Interaction) 以及运动观察者 (Moving observer) 词头的缩写. 该理论认为在湍流燃烧过程中, 在大尺度湍流作用下, 一种流体被另一种流体所卷吞, 卷吞一旦发生之后, 这两种流体相互粘附, 互不分离. 随后相互粘附的流体层不断受到拉伸, 其长度增加, 厚度减小. 卷吞和粘附在一起的流体层在拉伸过程中, 流体层内部及其交界面上同时发生着扩散和反应过程. ESCIMO 理论采用的是拉格朗日方法, 包括经历和统计两个部分. 但由于这一模型纯属物理概念上若干现象的叠加, 计算量很大, 很难用于回流和旋流流动的实际工程问题. 所以后来作者本人也放弃了这种模型, 转而研究湍流燃烧的双流体模型<sup>[40]</sup>.

## 9 湍流燃烧的随机涡模拟

随机涡方法是求解 N-S 方程的一种数值方法. 它是在拉格朗日体系中来考察输运变量的空间梯度. 其基本方程不是速度及标量的输运方程, 而是涡量和标量空间梯度的输运方程. 数值

求解时,把输运变量(或其梯度)离散成载运着输运变量及其输运特性的一系列流体单元的系统<sup>[45]</sup>。因此,这种方法特别适用于那些在湍流燃烧中具有很大梯度的变量。同时,在欧拉体系中那些与网格尺度相关联的限制也就可以避免。这使它具有能够处理高 Reynolds 数和高 Peclet 数流动的优势<sup>[2]</sup>。目前随机涡方法用于湍流燃烧时有交界面方法(Interface methods)和直接拉格朗日法(Direct Lagrangian methods)。前一种方法只适用于极薄火焰面的湍流预混燃烧,无需标量梯度的输运方程,但需要火焰的传播方程来确定火焰面的位置;后一种方法对湍流燃烧的反应区结构没有限制,既适合于湍流预混燃烧,又适于湍流扩散燃烧,和前一种方法相比,它要求解标量梯度的输运方程,实际上这种方法可以看成是一种直接数值模拟(DNS)方法<sup>[45]</sup>。Chorin<sup>[46]</sup>及严传俊和许成岗<sup>[47]</sup>用前一种方法对湍流预混燃烧进行数值研究。Ghoniem 等人<sup>[48]</sup>用后一种方法对扩散和预混燃烧进行了数值研究。总的来说,随机涡方法仍是比较新的一种方法,尚处于形成阶段。最主要的原因是定性上描述尚可,定量上精度尚难以确定<sup>[45]</sup>。就已得到的结果而言,只能给出合理的现象。其主要问题是:(1)涡旋尺寸分布的确定有任意性;(2)未考虑含能涡和耗散涡的差别;(3)尚难以用于三维问题。

## 10 结论

到目前为止,已经研究和发展的不同的湍流燃烧模型,总的趋势是寻找更为合理的模拟有限速率详细反应动力学与湍流相互作用的方法,然而对同时满足工程应用中的合理性和经济性而言,尚缺乏令人满意的模型,因此仍需进一步进行研究。直接模拟和大涡模拟仍然是计算量很大的模拟方法,离工程应用尚有相当的距离,但它们在揭示机理、检验和完善工程模型方面有十分重要的价值和前景。输运方程的概率密度函数方法因其对湍流关联矩的自封闭而具有极大的优势,但求解的复杂性和计算量之大给其广泛应用带来了很大的困难。层流小火焰模型、BML 模型、EBU 模型仍将是工程上广泛应用的模型,特别是预混燃烧的 EBU 模型和扩散燃烧的简化的 PDF 模型。关联矩与概率密度函数封闭方法相结合是工程能够接受并有潜力的研究方向。唯象湍流燃烧模型中的拉切滑模型和 ESCIMO 模型则已经很少应用和不会再有进一步的发展。湍流燃烧的离散涡方法仍需很大的发展。

## 参 考 文 献

- 1 Libby P A, Williams F A. Fundamental aspects and review. In: Libby P A, Williams F A, ed. *Turbulent Reacting Flows*. Academic Press, 1993. 1~62
- 2 Givi P. Model free simulations of turbulent reactive flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, 15: 1~107
- 3 Robert W Bilger. New directions in turbulent combustion research, In: *Proceedings of the First Asian-Pacific Conference on Combustion*, Osaka, Japan, May, 1997. 1~8
- 4 Pope S B. Computations of turbulent combustion: progress and challenges. In: *23rd Symposium (Int) on Combustion*, 1990. 591~612
- 5 Jaber F A, James S. A dynamic similarity model for large eddy simulation of turbulent combustion. *Physics of Fluids*, 1998, 10(7): 1175~1177
- 6 Colucci P J, Jaber F A, Givi P. Filtered density function for large eddy simulation of turbulent reacting flows. *Physics of Fluids*, 1998, 10(2): 499~515
- 7 Dopazo C. Recent developments in PDF methods. In: Libby P A, Williams F A, ed. *Turbulent Reacting Flows*. Academic Press, 1993. 375~474
- 8 Anand M S, Pope S B. Calculations of premixed turbulent flames by PDF methods. *Combustion and Flame*, 1987, 67: 127~142
- 9 Pope S B, Cheng W K. Statistical calculations of spherical turbulent flames. In: *21st Symposium (Int) on*

Combustion, 1986. 1473~1481

- 10 Pope S B, Cheng W K. The stochastic flamelet model of turbulent premixed combustion. In: 22nd Symposium (Int) on Combustion, 1988. 781~789
- 11 Chen J Y, Kollmann W. Chemical models for PDF modeling of hydrogen-air nonpremixed turbulent flames. *Combustion and Flame*, 1990, 79: 75~99
- 12 Pop S B. New developments in PDF modeling of nonreactive and reactive turbulent flows. In: Proceedings of the Second International Symposium on Turbulent, Heat and Mass Transfer, Delft, The Netherlands, June, 1997. 35~45
- 13 Klimenko A Yu. Multicomponent diffusion of various admixtures in turbulent flow. *Fluid Dyn*, 1990, 25: 327~343
- 14 Bilger R W. Conditional moment closure for turbulent reacting flow. *Phys Fluids*, 1993, A5(2): 436~473
- 15 Klimenko A Yu, Bilger R W. Conditional Moment Closure for Turbulent Combustion. to be published in Progress in Energy and Combustion Science, 1999
- 16 Kronenburg A, Bilger R W, Kent J. H. Second-order conditional moment closure for turbulent jet diffusion flames. In: 27th Symposium (International) on Combustion, 1998
- 17 Swaminathan N, Bilger R W. Assessment of combustion submodels for turbulent nonpremixed hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*, 1998, 116(4): 519~545
- 18 Swaminathan N, Dally B B. Cross stream dependence of conditional average in elliptic region of flows behind a bluff-body. *Physics of Fluids*, 1998, 10(9): 2424~2426
- 19 Bray K N C, Peters N. Laminar flamelets in turbulent flames. In: Libby P A, Williams F A, ed. Turbulent Reacting Flows. Academic Press, 1993. 63~114
- 20 Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984, 13: 319~339
- 21 Spalding D B. Mathematical models of turbulent flames; a review. *Combustion Science and Technology*, 1976, 13: 3~25
- 22 Lockwood F C, Naguib A S. The prediction of the fluctuation in the properties of free, round-jet, turbulent diffusion flame. *Combustion and Flame*, 1975, 24: 109~124
- 23 Richardson J M, Howard H C, Smith R W. The relation between sampling-tube measurements and concentration fluctuations in a turbulent gas jet. In: 4th Symposium (Int) on Combustion, 1952. 814~817
- 24 Jones W P, Whitelaw J H. Calculation methods for reacting turbulent flows: a review. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 1~26
- 25 Chen Ching-Shun, Chang Keh-Chin, Chen Jyh-Yuan. Application of a robust  $\beta$ -PDF treatment to analysis of thermal NO formation in nonpremixed hydrogen-air flame. *Combustion and Flame*, 1994, 98: 375~390
- 26 Zhou L X, Zhang H Q, Lin W Y. A multi- $\delta$ -PDF model of turbulent combustion. In: Proc of the First Asian-Pacific Conference on Combustion, Osaka, Japan, 1997. 194~197
- 27 Bray K N C, Libby P A. Recent developments in the BML model of premixed turbulent combustion. In: Libby P A, Williams F A, ed. Turbulent Reacting Flows. Academic Press, 1993. 115~152
- 28 Bray K N C, Moss J B. A Unified statistical model of the premixed turbulent flame. *Acta Astronautica*, 1977, 4: 291~319
- 29 Bray K N C, Libby P A, Masuya G, Moss J B. Turbulent prediction in premixed turbulent flames. *Combustion Science and Technology*, 1981, 25: 127~140
- 30 Bray K N C, Libby P A, Moss J B. Unified modeling approach for premixed turbulent combustion——Part I: general formulation. *Combustion and Flame*, 1985, 61: 87~102
- 31 Bray K N C, Libby P A. Passage times and flamelet crossing frequencies in premixed turbulent combustion. *Combustion Science and Technology*, 1986, 47: 253~274
- 32 Maly R R, Bray K N C, Chew T C. An integral time scale of evolution for non-stationary turbulent premixed flames. *Combustion Science and Technology*, 1989, 66: 139~147
- 33 Pratt D T. Mixing and chemical reaction in continuous combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1976, 1: 73~86
- 34 Khalil E E. On the prediction of reaction rates in turbulent premixed confined flames. AIAA Paper, 80-0015, 1980
- 35 Liao C, Liu Z, Liu C. Implicit Multigrid Method for Modeling Turbulent Diffusion Flames with Detailed Chemistry. UCD.CCM, Rep No 16, 1994
- 36 周力行. 湍流燃烧的新二阶矩模型. *工程热物理学报*, 1996, 17(3): 353~356
- 37 Chen X L, Zhou L X, Zhang J. A new second-order moment model for simulating methane-air turbulent combustion, To be present at the Second Asian-Pacific Conference on Combustion, Tainan, Taiwan, China



- 38 Spalding D B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. In: 13th Symposium (Int) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1971. 649~657
- 39 Magnussen B F, Hjertager B H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In: 16th Symposium (International) on Combustion, 1976. 719~729
- 40 周力行著. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 41 赵坚行, 易勇. 紊流燃烧模型数值模拟与实验研究. 工程热物理学报, 1994, 15(1): 99~103
- 42 范维澄. 平面管道内钝体后湍流预混火焰的数值分析. 中国科技大学学报, 1982, 12: 13~16
- 43 Spalding D B. A General theory of turbulent combustion. AIAA Paper 77-141, AIAA 15th Aerospace Meeting, Los Angeles, January, 1977
- 44 Spalding D B. The influence of laminar transport and chemical kinetics on the time-mean reaction rate in a turbulent flow. In: 17th Symposium (Int) on Combustion, 1978. 431~440
- 45 Givi P. Spectral and random vortex methods. In: Libby P A, Williams F A. Turbulent Reacting Flows. San Diego: Academic Press, 1993. 475~572
- 46 Chorin A J, Ghoniem A F, Oppenheim A K. Numerical modeling of turbulent flow in premixed combustion. In: 18th Symposium (Int) on Combustion, 1981
- 47 许成岗. 离散涡法及其在湍流反应流和二相流中的应用. [博士论文]. 西安: 西北工业大学, 1992
- 48 Ghoniem A F, Heidarinejad G. Effect of two-dimensional shear layer dynamics on mixing and combustion at low heat release. *Combustion Science and Technology*, 1990, 72: 79~89

## A REVIEW ON NUMERICAL MODELING OF TURBULENT COMBUSTION

Zhang Huiqiang    Chen Xinglong    Zhou Lixing    C.K. Chan\*

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\* Department of Applied Mathematics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

**Abstract** The studies on numerical modeling of turbulent combustion are reviewed, which include direct numerical simulation, large eddy simulation, discrete-vortex simulation, PDF transport equation model, conditional moment closure model, simplified-PDF model, correlation-moment closure model and models based on intuitive and physical concepts. The paper presents author's views on the current status and development of numerical simulation of turbulent combustion.

**Keywords** turbulent combustion, mathematical model, numerical simulation