

亚燃燃烧室两相反应流场的燃烧模型

黄日鑫¹, 谭永华²

(1 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 简要介绍 6 种可用于亚燃冲压发动机燃烧室计算模型的原理、特点及发展状况; 选用两个有代表性的涡耗散概念模型与局部化学平衡模型的计算结果进行分析对比。定量结果显示, 基于动力学反应机制的涡耗散概念模型对燃烧室流场的整体描述较好, 基于快速反应的局部化学平衡模型会出现燃烧室火焰面前移现象, 对于稳定器后方的流场计算结果, 二者是一致的。由于考虑的组分较少, 涡耗散概念模型计算的温度峰值要高于化学平衡模型的计算结果。两个模型计算的燃烧室室压、喷管出口总温等总体参数均与试验值接近。

关键词: 两相反应; 燃烧室; 有限速率; EDC; PDF; 燃烧模型

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0024-07

Combustion models for subsonic two-phase reacting flow in ramjet chamber

Huang Rixin¹, Tan Yonghua²

(1 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2 Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: The principle, features and development status of six combustion models are reviewed. Through a mass of computation experiments by different models, it is found that the main difference between these models in ramjet chamber is the reaction type on which the model based: fast chemistry reaction or finite rate reaction. The simulation results of two typical models (eddy dissipation concept model and Locally chemistry equilibrium model) show that finite rate models are more sophisticated, and fast reaction models may cause early combustion, but are in accord with each other very well once after the flame is held in the chamber. All integer parameters such as chamber static pressure and temperature in nozzle exit of both two models fit the experiment data well.

Key words: two-phase reacting flow; combustion chamber; finite rate; EDC; PDF; combustion model

收稿日期: 2008-01-07; 修回日期: 2008-02-21。

作者简介: 黄日鑫 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究领域为冲压发动机燃烧室技术。

1 引言

在亚燃冲压发动机研制过程中,需适当借助数值手段来研究燃烧室工作过程的细节。数值模拟与试验研究相结合为设计研制提供了高效且成本低廉的方法。数值计算有多种成熟的燃烧模型,且各有所长,模型的选用直接关系到数值模拟工作的质量。本文概括介绍、比较用于液体亚燃冲压发动机燃烧室数值计算的几个燃烧模型,并通过计算给出模拟结果的比较,为数值模拟工作提供一定的参考和借鉴。

液体亚燃冲压发动机燃烧室的流场为两相喷雾反应流场,燃烧兼具非预混和预混两种情形。燃油以液相形式进入气相流场,在流场中雾化蒸发并传播掺混,可以追踪液相在气相中的运动轨迹。燃油最终在燃烧室中形成合理的分布并参与燃烧。液相运动、蒸发及气相燃烧的整个过程很大程度上受控于湍流流动,常将湍流与燃烧分开来处理,再考虑二者的相互作用。

2 燃烧模型

用于亚燃冲压发动机燃烧室计算的燃烧模型有组分输运模型、非预混燃烧模型与概率密度函数(PDF)输运模型等。组分输运模型包括层流有限速率模型、涡耗散模型及其拓展模型-涡耗散概念模型;非预混模型包括局部化学平衡模型与层流小火焰模型。涡耗散模型、局部化学平衡模型与稳态层流小火焰模型均基于快速化学反应假设;层流有限速率模型、非稳态层流小火焰模型、涡耗散概念模型及PDF输运模型均可以包含有限反应速率的化学动力学因素。亚燃冲压发动机燃烧室工作时为近等压状态,模型在应用时可假设是等压的气相容积反应。

2.1 涡耗散与涡耗散概念模型

在库尔摩戈罗夫(Kolmogorov)湍流结构假设基础上,考虑燃烧混合物在流场中分布的间歇性,麦格努森与吉尔泰戈^[1]于1976年提出涡耗散模型。模型是针对当时的模型不能同时用于预混

与非预混燃烧的缺点而提出的。模型简单好用,可同时用于预混与非预混燃烧。涡耗散模型基于快速化学反应假设。在计算非预混燃烧时,认为燃料与氧化剂分别处于各自不同的涡中,化学反应速率很快,燃烧速率取决于氧化剂涡与燃料涡在分子尺度上的混合速率,即涡的耗散率。而在计算预混燃烧时,认为燃料与氧化剂会同时出现在同一个涡中,涡又被包含产物的涡分离着,此时,燃烧速率由当地的火焰传播速度决定。燃烧速率最终由氧化剂涡、燃料涡及产物涡中耗散率最小的一个决定。涡耗散模型可在多种条件下多种反应中使用,但当反应步数大于2时结果可能不准确。

涡耗散概念(EDC)模型是麦格努森在涡耗散模型的基础上提出的(1981年,1989年),模型的一大进步是将详细的化学反应机理包含进来。EDC模型依然依赖于湍流结构假设。假设湍流由一系列不同尺度的涡构成,湍动能在主流与较大尺度的涡相互作用时产生。动能随后在相邻尺度的涡结构中不断地传递,传递过程中有一小部分由于分子力对湍流的作用功而耗散成热,绝大部分的机械能在最小尺度的涡中耗散成热。湍动能的耗散具有较强的间歇性,集中发生在一些体积分数极小、尺度比最小的湍流尺度大的独立区域中,称为耗散区。不同尺度的涡可以由特征湍流速度与特征湍流长度两个特征量表征,即不同的涡结构对应着不同的特征湍流速度与湍流长度,这样可将湍流分为不同级别结构的涡。最高级别为主流,最小级别称为细微结构。细微结构的特征量具有一维或二维Kolmogorov尺度的量级,其余级别的结构均为中间结构,耗散区又称为细微结构区,因为它被细微结构占据着。各级结构之间的动能传递及热量耗散可以定量地描述^[2]。在EDC模型中,最高级结构的涡中几乎没有能量耗散成热,而大约3/4的能量耗散发生在细微结构中。

模型假设各组分在细微结构中是均匀分布的,只要反应物在细微结构中进行分子级的混合,且达到反应温度便立刻发生化学反应,反应物的消耗由分子的混合程度决定。EDC模型的主

要任务除建立湍流各级结构间的功热传递关系外,还确定发生化学反应的体积以及细微结构与周围流体间的传质速率。上标*与0分别代表细微结构与其周围的环境流体,细微结构所占的长度分数为:

$$\gamma = \left(\frac{3C_{D2}}{4C_{D1}^2} \right)^{1/4} \left(\frac{v^* \varepsilon}{k^2} \right)^{1/2} \approx 2.1377 \left(\frac{v^* \varepsilon}{k^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, C_{D1} 、 C_{D2} 为常数; v^* 为细微结构的运动粘度。细微结构所占的体积分数为 γ^3 。如果细微结构与环境流体间质量交换的时间尺度(也是分子混合的时间尺度)为 τ^*

$$\tau^* = \left(\frac{C_{D2}}{3} \right)^{1/2} \left(\frac{v^*}{\varepsilon} \right)^{1/2} \approx 0.4082 \left(\frac{v^*}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (2)$$

显然传质速率就可以简单地用 γ^3/τ^* 来表述,但麦格努森随后在1989年提出传质速率与 γ^2/τ^* 有关,这时平均反应速率的表达式为

$$\dot{\omega}_i = \frac{\gamma^2 X}{\tau^*} (Y_i^0 - Y_i^*) \quad (3)$$

式中, X 为发生反应的细微结构所占的分数,对于一步不可逆简单化学反应系统来说, X 与反应物及产物的质量分数有关,且不大于1。此时的表达式实际上是耗散模型的反应速率表达式。若假设 $X=1$,则可以摆脱单步化学反应的限制,引进更加详尽的化学动力学机理,平均反应速率为(Gran 1990):

$$\dot{\omega}_i = \frac{\rho \gamma^2}{\tau^* [1 - \gamma^3]} (Y_i^* - Y_i^0) \quad (4)$$

其中, Y_i^* 表示化学反应发生了 τ^* 时间后,细微结构中组分 i 的质量分数。在 τ^* 时间内,化学反应速率由阿累尼乌斯定律计算(公式8)。EDC模型包含详尽的反应机理时,大量阿累尼乌斯速率的积分运算是非常费时的,可以采用ISAT算法^[9]来提高计算效率;在首次计算反应速率时采用直接积分,然后将结果保存成ISAT表,在下次计算时查表插值即可。

2.2 非预混局部化学平衡模型

详细的化学反应机理会为燃烧计算带来较大

的刚性,由时均值乘积计算的反应速率也会产生高阶误差,不采用一定的算法很难收敛,而且要耗费大量的机时,这时可以选用简化的反应机理。事实上,在高温情况下,除了污染物与烟灰等的形成过程受控于有限反应速率外,一般碳氢燃料的反应速率都比混合速率快得多,这时快速反应假设便成立,同时认为系统达到了化学平衡状态。只要知道了压力和焓值就可以确定平衡组分、温度与混合物的密度。

非预混局部化学平衡模型假设化学反应系统为快速反应系统,系统局部各向同性,且达到化学平衡,所有的扩散系数相等。这样可以用一个守恒量的方程替代所有的组分方程,大大简化控制方程组,运算量也减小很多。所有热力学标量(如组分的质量分数、密度与温度)都可以建立与混合分数唯一确定的关系^[4]。守恒量有多种定义方式,有代表性的是混合分数(f),混合分数通常定义为归一化的某元素的质量分数。由于各组分的扩散系数相等,混合分数用任何元素来定义都是相同且惟一的,因此常用燃料中的元素来定义,输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \sum \frac{\partial(\rho u_j f)}{\partial x_j} = \sum \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) + S_m \quad (5)$$

式中, S_m 为液滴的质量源项; f 为时均量。

混合分数在湍流中有强烈的脉动,可视为一个随机量,于是人为地引入混合分数的概率密度函数(PDF),通过该密度函数来确定湍流作用影响下的混合分数的分布,所以非预混局部化学平衡模型也叫假定PDF模型。概率密度函数可以是双 δ 函数、截尾正态分布函数或 β 函数。工程上常用 β 函数, β 函数是混合分数与混合分数的脉动均方值(g)的函数,混合分数的脉动均方值的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho g)}{\partial t} + \sum \frac{\partial(\rho u_j g)}{\partial x_j} = \sum \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} \right) + \mu_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} g \quad (6)$$

式中, C_d 与 C_d 为常数。标量可由下面积分方程得到, H 由焓方程解出, $P(f)$ 即为 β 函数。

$$\phi = \int_0^1 \phi(f, H) p(f) df \quad (7)$$

值得注意的是,系统在近化学恰当反应或富燃时是远离化学平衡状态的,此时可以给定混合分数的富限值来保证燃烧不是过分的富燃,以免计算结果偏差太大。这样仅当混合分数低于富限值才进行化学平衡计算,超过则不计算。混合分数的富限值可取1~2倍的化学恰当混合分数值,在此范围内对结果的影响不大,可参考文献[4]中图1~图7。

EDC模型与化学平衡模型都是将流场视为等压、均相的气相反应,以当地的温度与压力作为反应的初始条件。与EDC模型相比,局部化学平衡模型绕过复杂的化学反应机理,避开求解大量的组分方程,同时可以计算中间产物与离解的影响,大大节省机时。为避免在计算中进行费时的标量积分运算(公式7),可以预先将混合分数与标量的对应关系计算成表,计算中查表插值即可。该模型的不足之处在于快速反应假设完全忽略燃料与氧化剂分子之间的相互扩散作用,不能准确模拟非平衡效应显著的点火、熄火及污染物形成等过程。

2.3 其他模型介绍

(1) 层流有限速率模型

层流有限速率模型中的化学反应速率遵循阿累尼乌斯定律,即

$$k_f = A T^B e^{-E_a/T} \quad (8)$$

可逆反应时,逆反应速率可由化学反应平衡常数计算。层流有限速率模型可用在层流火焰计算中,由于未考虑湍流脉动的影响,用于湍流燃烧则不准确。也可将有限速率模型与涡耗散模型结合使用,在计算中取两者速率较小的一个;由于有限速率模型存在计算刚性,这种联合模型不宜计算多步反应。

(2) PDF 输运模型

目前应用统计方法解决湍流燃烧问题的模型主要有两种,一种是已述的假定PDF模型,它的概率密度函数是人为引进的;另一种是Monte Carlo PDF模型,即PDF输运模型,它的概率密

度函数由Monte Carlo算法计算得到。PDF输运模型避开反应速率高度非线性带来的误差,对于每个空间位置与时间,3个速度分量、 N 个组分与温度构成一个任意 $3+N+1$ 维向量,该向量的分布函数也是 $3+N+1$ 维。波普(Pope)在1976年他的博士论文中推导了变密度质量分布函数两变量形式的二维输运方程。随后在1985年,他得到该函数全变量的输运方程^[9]。方程无需做任何假设便将详尽的化学动力学引进来,由于方程中包含的速度空间会给计算带来较大的花费,因此可不考虑速度空间而只考虑标量空间,这样概率分布函数变成 $N+1$ 维,经过适当的简化,忽略重力项、平均压力梯度项、剪切应力梯度项与压力脉动梯度项后得到组分PDF输运方程^[9]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho P) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j P) + \frac{\partial}{\partial \psi_i}(\rho \dot{\omega}_i P) = \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho \langle u''_j | \psi \rangle P] + \frac{\partial}{\partial \psi_i} \left[\rho \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial J_{ji}}{\partial x_j} | \psi \right\rangle P \right] (\rho P) \end{aligned} \quad (9)$$

方程中的各量为Favre平均量,方程左边分别为非稳态项、速度场中与平均速度对应的对流项、组分标量场中化学反应对应的对流项。方程右边分别为湍流对流项与分子扩散项。方程左边自动闭合,右边则需要进行简化,右边项的简化也正是建立该模型最大的难点所在,常用梯度扩散假设来简化。对于这样一个高维方程的求解,使用Monte Carlo算法来计算每个网格内的概率分布信息,再分步求解对流、扩散与化学反应过程^[7]。

PDF输运模型与EDC模型均可以计算多步化学动力学,能胜任有限速率影响显著的湍流燃烧的模拟计算,只是Monte Carlo算法使PDF输运方程的求解比较费时,容易产生一定的统计误差,同时对网格质量的要求也较高,目前一般只用于二维计算。PDF输运方程组较难对全体变量联立求解,现在只能将各变量分离求解。

(3) 非预混层流小火焰模型

层流扩散小火焰的概念最初由Williams提出,N Peters在总结大量前人研究成果的基础上提出应用于非预混扩散火焰的层流小火焰模型^[9]。

在快速反应假设失效时,即反应系统局部扩散时间的尺度变化较大,与化学反应的时间尺度相比不能忽略时;或是反应速率较慢,如污染物和烟灰等的形成时,小火焰模型同 EDC 模型与 PDF 输运模型一样,均可模拟计算非化学平衡效应显著的湍流扩散火焰。

层流小火焰模型发展了守恒标量方程,即混合分数方程,同时成功地引入包含非化学平衡效应项。混合分数的定义一般有两种,一种与假定 PDF 模型类似,基于元素守恒,这种定义未摆脱扩散系数相等的假设;另一种则绕过直面扩散系数相等的简化思想,直接给出混合分数的输运方程,以该方程来定义混合分数,这样,燃烧过程便可以考虑不同的扩散速率。

小火焰模型的精髓在于巧妙地通过坐标变换,将原来物理空间中的混合分数方程与温度方程转换成完全自由于原物理坐标的新方程,且新方程中的所有标量仅具混合分数一维属性,即混合分数空间上的层流小火焰方程。方程中的化学反应源项将详细的动力学机理包含进来;方程中的瞬时标量耗散率包含对流与扩散影响,带来原空间中的流场信息,将非化学平衡效应包含进来。

当非稳态项对标量耗散率的响应不敏感时(见文献 [8]),即小火焰对耗散率的响应是即时的,便可忽略非稳态项,得到稳态小火焰方程。稳态小火焰基于快速化学反应假设。而当点火、污染物形成或火焰被严重冲淡接近熄火时,化学反应偏离化学平衡较远,非稳态项不再可以忽略,这时为非稳态小火焰。求解非稳态小火焰时,可在稳态小火焰计算结果的基础上进一步采用欧拉非稳态小火焰模型计算。

与其他模型一样,小火焰模型的一个根本目标是将化学反应与湍流解耦^[9],这样便可以将由层流结构计算的小火焰用在湍流中。由于所有的标量仅由混合分数决定,所以混合分数恰好起到了联系层流与湍流的作用。与假定 PDF 模型类似,化学反应与湍流的相互作用可以通过统计的方法将层流小火焰嵌在湍流结构中。计算前可先建立小火焰库,再将各热力学量与混合分数及焓值的

对应关系建立成表,计算时用于查询插值,这样也使得小火焰模型的计算效率大大提高。

以上模型可以分为两类:基于快速反应的模型与基于有限速率反应的模型。涡耗散模型与局部化学平衡模型属于前者,层流有限速率模型、EDC 模型、PDF 输运模型则属于后者,小火焰模型则二者兼具。层流有限速率模型只计算阿累尼乌斯反应速率,完全忽略湍流与化学反应的相互作用;涡耗散模型只计算混合速率,不考虑化学动力学因素;涡耗散模型与层流有限速率模型联合使用既考虑了扩散过程又考虑动力学过程,在多数情况下不失为一个准确高效的方法,但目前的处理能力一般不超过两步反应;EDC 模型与 PDF 输运模型都能计算多步复杂的化学反应,前者似乎在计算量与对计算资源的要求上要小胜一筹;非预混局部化学平衡模型虽不能计算多步动力学过程,但它绕开化学反应机理的计算,计算效率较高且可以在计算中考虑中间组分及离解的影响;从计算方法的成熟与模型建立的完备程度上看,层流小火焰模型有着广阔的应用前景。

3 算例及分析

选用有代表性的 EDC 模型与局部化学平衡模型,对亚燃冲压发动机燃烧室两相反应流场进行二维数值仿真研究。计算选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,两相流计算采用欧拉-拉格朗日法。燃烧室中仅燃料蒸汽参与燃烧。将喷嘴假设为喷注点,计算给出初始喷注条件。气相组分受温度影响较大的物性参数给定为温度的多项式函数。EDC 模型采用 7 组分 4 步简化的总包反应机理,局部化学平衡模型考虑 18 种气相组分。计算均采用二阶迎风离散格式。EDC 模型采用速度与压力耦合求解,化学平衡模型采用 SIMPLE 算法求解。

计算结果显示,局部化学平衡模型由于基于快速反应假设,燃油一经喷出便发生化学反应,因此燃烧室中的火焰位置较 EDC 模型靠前;同时在喷油环后面的低速回流区中产生高温区域。这也是两个模型计算结果差别最大的地方。但稳定器后的流场,二者的计算结果基本一致。以下

给出基于混合分数的当量比分布、温度及组分浓度的定量比较结果。

取燃烧室中某环稳定器后缘至喷管入口的直线作为轴向特征截面, 同时在距离该环稳定器后缘一倍喷油环与稳定器间距处, 取一条径向直线作为径向特征截面。横纵坐标(xx, yy)为除以燃烧室某特征长度后的无量纲坐标。两个模型计算的当量比沿轴向截面的分布情况如图 1 所示。分布趋势基本一致, 燃油经稳定器后, 首先产生富油区, 然后经过回流区与新鲜空气掺混逐渐变贫, 最后维持在恒值附近。化学平衡模型计算的当量比较 EDC 模型稍大, 接近恒值的程度更好。

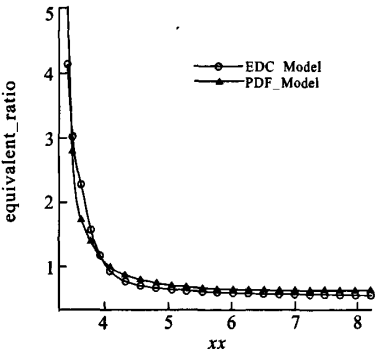


图 1 当量比沿轴向分布曲线

Fig.1 Axial distribution of equivalent ratio

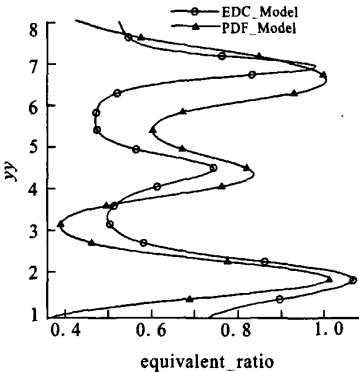


图 2 当量比沿径向分布曲线

Fig.2 Radial distribution of equivalent ratio

图 2 为当量比沿径向截面的分布状况。两个模型的计算结果相符较好, 贫、富油的趋势基本一致, 但比沿轴向分布的相符情况要差些。局部化学平衡模型计算的当量比在该径向截面上的分

布范围更宽, 而 EDC 模型的计算结果则要相对集中。

图 3 为稳定器后方温度沿轴向截面的分布规律。由于局部化学平衡模型在富油程度较大时造成较大误差, 因此预先给定一个富油程度的限定值, 该限定值使在靠近稳定器的后方并不进行化学平衡计算, 这就使得该区域的温度比 EDC 的计算值低。两个模型预测的温度峰值的出现位置是一致的, 只是 EDC 模型的计算结果要高一些, 因为 EDC 模型考虑的组分要比化学平衡模型少, 因此, 局部化学平衡对该温度峰值的预测是相对准确的。在燃烧室的下游区域, EDC 模型计算的温度值逐渐走低, 而局部化学平衡模型的计算结果则比较均衡。这是化学平衡模型假设组分与温度的扩散系数均相等造成的, 而 EDC 模型则充分考虑各组分以及温度的不同的扩散情况。

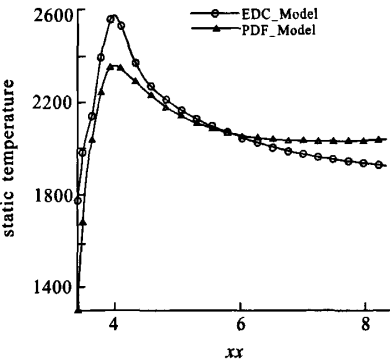


图 3 温度沿轴向分布曲线

Fig.3 Axial distribution of temperature

两个模型计算的组分浓度沿轴向分布见图 4 所示。其中 CO_2 、 H_2O 、 H_2 的分布趋势大体一致, CO 的分布趋势则相差较大。从分布趋势看, 计算结果差别较大的地方出现在靠近稳定器的后方, 由于这里燃油较富, 非化学平衡效应比较显著, 因此局部化学平衡模型无法给出正确结果。而在燃烧室的后段二者的差异明显变小, 吻合很好。笔者还应用层流小火焰模型、涡耗散模型、涡耗散与有限速率结合模型以及单步不可逆有限速率模型进行同一燃烧室的流场对比计算, 小火焰模型与涡耗散模型取得与局部化学平衡模型相

似的结果,而单步不可逆有限速率模型的计算结果与 EDC 模型一致。涡耗散与有限速率结合使用时,由于要在流场的每一点都比较两个反应速率,因此在喷油环与稳定器之间无法发生动力学反应的地方则依据涡耗散模型进行计算,该处的计算结果与局部化学平衡模型一致,而稳定器的后方化学反应主要受控于动力学反应,因此与 EDC 模型相近。

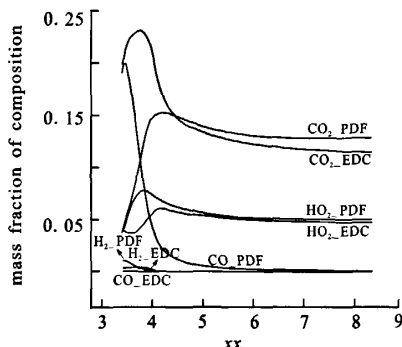


图 4 组分质量分数沿轴向分布曲线

Fig.4 Axial distribution of mass fraction of species

4 结束语

通过对 6 种燃烧模型的理论分析与比较,并针对亚燃冲压发动机燃烧室结构的特点,依据各模型对该种燃烧室计算结果的主要差别,可将模型分为两类:基于快速化学反应的模型与基于有限速率反应的模型。选取两类中有代表性的两个模型对亚燃冲压发动机燃烧室进行数值计算,得到以下结论:

(1) 基于有限速率反应模型计算的燃烧室温度场较为合理,而基于快速反应的模型计算的温度场相对保守,喷油环后有提前燃烧现象发生。

(2) 局部化学平衡模型无法计算流场中远离化学平衡的富油区域,对于稳定器后方相当大的燃烧室区域,局部化学平衡模型与 EDC 模型的计算结果基本一致。

(3) 由于局部化学平衡所采用的混合分数是守恒量,喷油环与稳定器之间的伪高温区对蒸发速率的影响并不会显著地影响混合分数在燃烧室

中的分布,因此除喷油环与稳定器之间区域的温度场以外,该模型计算的其他流场信息与基于化学动力学模型计算的同样具有较大的价值。

(4) 局部化学平衡模型计算效率较高,由于避开化学动力学的计算,大大节省机时。要使计算的温度值更加准确,EDC 模型可以考虑使用更加详细、更多组分的化学反应机理。

参考文献:

- [1] Magnussen B F, B H Hjertager. On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion [C]. In 16th Symp.(Int'l) on Combustion. The Combustion Institute, 1976.
- [2] Magnussen B F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow [R]. Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis. 1981.
- [3] Pope S B. Computationally Efficient Implementation of Combustion Chemistry Using In-Situ Adaptive Tabulation [J]. Combustion Theory and Modeling, 1997(1): 41-63.
- [4] Sivathanu Y R, Faeth G M. Generalized State Relationships for Scalar Properties in Nonpremixed Hydrocarbon/Air Flames[J]. Combustion and Flame, 1990(82): 211-230.
- [5] Pope S B. PDF Methods for Turbulent Reactive Flows[J]. Progress Energy Combustion Science. 1985(11): 119-192.
- [6] Bus H M, Gerlinger P, Brüggemann D. Monte Carlo PDF Simulation of Compressible Turbulent Diffusion Flames Using Detailed Chemical Kinetics [R]. AIAA99-0198, 1999.
- [7] Cao R, Pope S. Numerical Integration of Stochastic Differential Equations: Weak Second-Order Mid-Point Scheme for Application in the Composition PDF Method [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 185(1): 194-212.
- [8] Peters N. Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Pre-mixed Turbulent Combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984(10): 319-339.
- [9] Jones W P, White J W. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review[J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 1-26.

(编辑:王建喜)