

文章编号: 1000-8055(2023)01-0104-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210366

基于特征时间模型的高效喷雾燃烧数值模拟

尹 钰¹, 杨天威¹, 周 华², 任祝寅², 林宏军³, 尚守堂³

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084;

2. 清华大学 航空发动机研究院, 北京 100084;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 开展了基于特征时间(CTS)燃烧模型的高效喷雾燃烧数值模拟研究。基于 CTS 模型与层流有限速率燃烧模型对 CFM56 航空发动机模型燃烧室进行了两相数值模拟, 通过比较预测的火焰结构验证了 CTS 燃烧模型在喷雾燃烧中的适用性。通过采用 CTS 模型初始化燃烧场来提高有限速率燃烧模型的数值模拟效率, 提出了基于 CTS 燃烧模型结合降维方法的高效数值模拟方法。结果表明: CTS 燃烧模型较好预测了 CFM56 模型燃烧室的火焰形态和组分分布, 可为有限速率燃烧模型的数值模拟提供良好的初始解; 采用自适应建表(ISAT)方法可减小计算时间 90%, 在此基础上, 基于 CTS 模型初始化的稳态算例收敛时间减少 35%, 进一步结合降维方法收敛时间减少 40%, 证明了 CTS 模型具有提高喷雾燃烧数值模拟效率的潜力。

关 键 词: 特征时间燃烧模型; 有限速率燃烧模型; 喷雾燃烧; 燃烧室; 高效算法

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Efficient spray combustion simulations using the characteristic timescale model

YIN Yu¹, YANG Tianwei¹, ZHOU Hua², REN Zhuyin²,

LIN Hongjun³, SHANG Shoutang³

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The characteristic time scale (CTS) model was investigated for efficient and robust spray combustion simulations. This model was demonstrated in steady-state simulations of spray flames in an aero-engine model combustor, and the predicted temperature and species results were compared with those from the finite-rate combustion model to verify the feasibility of the CTS model in spray combustion. Combined with a dimension reduction method, the CTS model can be used to facilitate the finite-rate based calculations with full chemical kinetics by providing good initial conditions. The accelerating effect was investigated. Results showed that for the CFM56 model combustor considered, CTS yielded a realistic flame shape and reasonably predicted species distributions. The in situ adaptive tabulation (ISAT) approach reduced the calculation time by 90%. The convergence time of steady-state simulations with initialization based on the CTS model was reduced by 35% and then reduced by 40% if combined with the

收稿日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(91841302); 国家科技重大专项(2017-I-0004-0005)

作者简介: 尹钰(1994—), 女, 博士生, 主要从事湍流燃烧研究。

通信作者: 任祝寅(1978—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事湍流燃烧研究。E-mail: zhuyinren@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 尹钰, 杨天威, 周华, 等. 基于特征时间模型的高效喷雾燃烧数值模拟[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 104-115. YIN Yu, YANG Tianwei, ZHOU Hua, et al. Efficient spray combustion simulations using the characteristic timescale model[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 104-115.

dimension reduction method. Hence, the proposed characteristic timescale model was valuable in providing good initial conditions for finite-rate based combustion models and in improving the efficiency and robustness of spray combustion simulations.

Keywords: characteristic time scale model; finite-rate combustion model; spray combustion; combustor; efficient initialization implementation

喷雾燃烧是航空发动机、内燃机和液体火箭发动机等动力设备中重要的物理化学过程。喷雾燃烧通常涉及燃料喷入、一次/二次破碎、液滴蒸发、混合和气相燃烧等复杂物理化学过程^[1-2]。由于计算资源和高保真数值方法的迅猛发展, 喷雾燃烧数值模拟对研究燃烧室内相关物理化学过程和优化燃烧室设计发挥着越来越重要的作用。

喷雾燃烧数值模拟中, 对于液相模拟可采用拉格朗日体系下的离散相方法(discrete phase model, DPM)和欧拉体系下的连续相控制方程方法^[3-5], 当前使用较多的是DPM, 采用拉格朗日方法追踪液滴从进入到离开计算域的整个物理化学过程, 可以描述液滴的演化和分布, 不考虑液滴碰撞、破碎。对于气相燃烧模拟, 欧拉描述最为常用, 将流体视为一个连续体求解 Navier-Stokes 方程, 其中化学反应源项需要建模, 常用的湍流燃烧模型包含涡破碎模型(eddy break up, EBU)^[6]、层流有限速率模型(laminar finite rate, LFR)、涡耗散概念模型(eddy dissipation concept, EDC)^[7]、小火焰面模型^[8]以及输运概率密度函数模型(transported probability density function, TPDF)^[9]等。Wang 等^[10]在对悉尼射流喷雾火焰的 LES(large eddy simulation)计算中发现, 有限速率燃烧模型能够捕捉液滴蒸发与气相燃烧之间的相互作用, 可以提升对于热释放和气相温度的预测精度。Eckel 等^[11]对实验室尺度的旋流喷雾火焰进行了计算, 发现在主火焰区以外的区域, 有限速率效应显著, 采用基于组分输运的有限速率模型能够显著提升对于污染物的预测精度。在使用 EDC 模型模拟喷雾燃烧方面, 颜应文等^[12]和徐榕等^[13]用 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)分别模拟了折流燃烧室和双旋流燃烧室中的喷雾燃烧, 比较了 EBU 和 EDC 的预测性能, 发现模型表现依赖于模拟对象。在 TPDF 方法中, 气相组分由组分联合概率密度函数建模, 一般采用拉格朗日颗粒法进行数值求解。Heye 等^[14]在 LES 框架下模拟了乙醇喷雾火焰, 在定性上与实验值符合良好。Pei 等^[15]和 Honhar 等^[16]在 RANS 框架下比较了不同

的混合模型和化学机理对于喷雾燃烧预测结果的影响。

LFR、EDC 和 TPDF 等有限速率模型能和详细或骨架化学反应机理直接联立使用, 而详细化学反应动力学对准确预测着火延迟时间、火焰传播速度等燃烧特性和发动机近极限湍流燃烧现象如局部熄火、再燃等至关重要。当前, 基于有限反应速率的燃烧模型如 LFR 和 EDC 等逐步开始应用于发动机燃烧室三维数值模拟。然而详细化学反应动力学中组分的反应速率为温度、压力和组分摩尔浓度的 Arrhenius 指数函数形式, 并且大分子碳氢燃料反应机理通常涉及众多的中间组分和基元反应^[17], 反应时间尺度范围广^[18], 刚性强, 含详细化学反应动力学的发动机燃烧室三维数值模拟存在计算成本高的问题。因此, 开展化学反应动力学加速研究, 实现详细反应机理的高效高保真燃烧室数值模拟成为一个亟需解决的科学问题。

近年来, 研究人员在化学反应动力学加速方法方面取得了重要进展。针对反应源项和其他项共同求解的加速算法有自适应混合积分^[19]及稀疏自适应混合积分^[20]等。针对常微分方程组数值积分算法的加速方法有常微分方程组的快速求解器^[18]及网格聚集方法^[21]等。针对化学反应源项数值积分的加速方法^[22]有骨架机理及简化机理^[17]、降维方法^[23]、建表/查询类方法及动态自适应化学^[24]等。其中, 建表/查询类方法包括动态自适应建表方法^[25]、分段重复使用反应映射^[26]和人工神经网络^[27]等方法。

然而, 目前包含详细化学反应动力学的多维喷雾燃烧数值模拟的计算量依然较大, 较难满足工程应用中计算时效性的要求; 另外, 由于较强的湍流-蒸发-反应非线性耦合, 多维喷雾燃烧数值模拟容易发散, 鲁棒性差。在改进多维喷雾燃烧数值模拟的鲁棒性方面还没有形成系统性方法, 以提高鲁棒性为目的的各种热态燃烧场初始化方法还处在尝试阶段。

本文开展高效多维喷雾燃烧数值模拟研究, 采用特征时间燃烧模型^[28-30]提高喷雾燃烧数值模

拟的鲁棒性和效率。首先介绍基于组分输运方程的两相燃烧数值模拟方法,包括特征时间燃烧模型的简单介绍,接着介绍特征时间燃烧模型在 CFM56 模型燃烧室喷雾燃烧中的应用及其与有限速率燃烧模型结果的比较,分析该模型在喷雾燃烧数值模拟中的适用性。最后提出基于特征时间燃烧模型提供初始场的高效喷雾燃烧数值模拟方法,讨论该方法对基于有限速率燃烧模型的数值模拟效率的提升效果。

1 喷雾燃烧数值模拟方法

采用欧拉-拉格朗日方法模拟气液两相喷雾燃烧过程,对于气相采用欧拉方法,将流体视为连续体求解质量、动量、能量、组分方程;对于液相采用拉格朗日方法,通过拉格朗日粒子跟踪法来求解液滴演化。

在离散相模型中,液相由大量的离散液滴包表示,每个液滴包由一定数目具有相同性质的液滴组成。采用经典 Abramzon-Sirignano^[31] 有限导热模型来描述蒸发过程,不考虑热辐射对液滴加热和蒸发的影响。单个液滴的拉格朗日控制方程为

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_r} \quad (2)$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (3)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = k_c A_p \rho \ln(1 + B_m) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{x}_p$ 、 $\mathbf{u}_p$ 、 d_p 、 T_p 、 h_{fg} 、 m_p 、 c_p 、 A_p 分别是液滴的位置、速度、半径、温度、燃料蒸发潜热、质量、比定压热容、表面积, $\mathbf{u}$ 、 T_∞ 、 ρ 分别是气相速度、温度、密度。液滴响应时间 $\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d Re_d}$, C_d 是阻力系数, μ 是流体动力黏度, ρ_p 是液滴密度, 液滴滑移雷诺数 $Re_d \equiv \frac{\rho d_p |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{\mu}$ 。 h 和 k_c 分别是表面传热系数和质量输运系数, B_m 是斯伯丁传质数。

基于常用的点源假设,离散液滴相造成的质量、动量与能量的反馈以源项的形式出现在气相控制方程中。考虑离散相影响的气相输运方程为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = \bar{S}_\rho \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \bar{u}'_i \bar{u}'_j) + \bar{S}_{u_i} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{h}_s) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_{a=1}^{n_s} \left(\bar{\rho} \bar{h}_{s,a} D_a \frac{\partial \bar{Y}_a}{\partial x_j} \right) &+ \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} D_t \frac{\partial \bar{h}_s}{\partial x_j} \right) &+ \bar{\omega}_h + \bar{S}_h \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{Y}_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{Y}_a) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} (D_a + D_t) \frac{\partial \bar{Y}_a}{\partial x_j} \right] &+ \bar{\omega}_a + \bar{S}_{Y_a} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\bar{u}_i$ 、 $\bar{Y}_a$ 、 $\bar{h}_s$ 分别是密度加权的气相第 i 个方向平均速度、第 a 种组分平均质量分数、平均显焓。 $\bar{\rho}$ 、 $\bar{P}$ 是平均密度和平均压力, $\bar{S}_\rho$ 和 $\bar{S}_{u_i}$ 分别是气液两相交换质量和动量产生的源项。黏性应力张量分量 $\bar{\tau}_{ij}$ 定义为 $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ 。雷诺应力 $\bar{\rho} \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ 是未封闭项,采用经典的 Boussinesq 假设^[32] 建模。 λ 是气相热导率, D_a 是分子扩散系数, D_t 是湍流扩散系数, $\bar{\omega}_h$ 、 $\bar{\omega}_a$ 和 $\bar{S}_h$ 、 $\bar{S}_{Y_a}$ 分别是由于化学反应和气液两相耦合产生的源项。

气液两相耦合作用的源项为

$$S_\rho = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{dm_p}{dt} \quad (9)$$

$$S_{u_i} = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{d(m_p u_{p,i})}{dt} \quad (10)$$

$$S_h = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{d(m_p u_{p,i} u_{p,i})}{dt} + \frac{d(c_p m_p T_p)}{dt} \right] \quad (11)$$

$$S_{Y_a} = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{d(m_p Y_{p,a})}{dt} \quad (12)$$

式中 ΔV 是网格单元的体积, N 为网格内液滴数目, $\sum$ 表示对同一网格单元内所有液滴求和。

1.1 燃烧模型

燃烧模型指的是对组分输运方程中的化学反应源项 $\bar{\omega}_a$ 的封闭方法。本工作采用两种燃烧模型,分别为层流有限速率(LFR)模型与特征时间(CTS)模型,具体介绍如下。

层流有限速率燃烧模型忽略未解析的组分温

度脉动对反应源项的影响, 根据解析的平均量直接计算平均化学源项, 即

$$\bar{\omega}_a = \omega_a(\tilde{Y}, \tilde{T}) = M_{w,a} \sum_{r=1}^{n_r} \dot{\omega}_{a,r} \quad (13)$$

式中 $M_{w,a}$ 是第 a 种组分的摩尔质量, $\dot{\omega}_{a,r}$ 是第 a 种组分在第 r 个反应的单位体积摩尔生成速率。层流有限速率等模型适用于包含复杂化学的反应流, 可以与详细化学反应机理直接联立使用。然而碳氢燃料的详细化学反应机理通常涉及大量的组分和基元反应, 且这些组分和反应的时间尺度广, 刚性强, 包含详细化学反应机理的多维喷雾燃烧数值模拟成为一个庞大的强刚性、非线性体系, 计算量巨大。

特征时间燃烧模型是一种基于反应和湍流混合特征时间尺度的局部松弛模型, 假设局部热力学状态如组分质量浓度等以特征时间松弛到局部化学平衡状态或火焰面状态^[28-30]。特征时间燃烧模型最早应用于内燃机燃烧数值模拟, 因为需预先对局部化学平衡状态或火焰面状态建表, 该方法适用性较窄, 仅适用于能用极少数参数(例如混合分数)表征局部化学平衡状态或火焰面状态的模拟中。Ren 等^[33] 用动态自适应建表方法(ISAT)^[25,34] 大幅提高了局部化学平衡状态的计算效率, 把该模型推广到一般湍流燃烧模拟。

本文采用 Ren 和 Goldin 提出的特征时间燃烧模型, 该模型假设局部热力学状态如组分浓度等以特征时间松弛到局部化学平衡状态。具体来说, 在一个计算网格中, 设 $\tilde{Y}$ 表示组分的平均质量分数。在特征时间燃烧模型中, 由化学反应导致的第 a 种组分变化率由下式给出:

$$\bar{\dot{\omega}}_a = -\bar{\rho} \frac{\tilde{Y}_a - \tilde{Y}_a^{\text{eq}}}{\tau_{\text{char}}} \quad (14)$$

式中 $\tilde{Y}_a^{\text{eq}}$ 是局部热力学平衡状态下第 a 种组分的质量分数, τ_{char} 是同时考虑反应和湍流混合的特征时间尺度。式(14)体现了组分以特定的时间尺度趋向其对应的化学平衡状态。平衡状态下的质量分数 $\tilde{Y}_a^{\text{eq}}$ 由计算网格中的元素组成 $\mathbf{Z}^e$ 、压力以及焓完全确定。由于平衡组分 $\tilde{Y}_a^{\text{eq}}$ 的计算涉及到求解一组非线性约束方程, 通常计算成本很高。Ren 和 Goldin 采用 ISAT 将平衡组分与对应的元素 $\mathbf{Z}^e$ 、压力和焓在计算过程中进行自适应建表, 用于加速平衡计算, 解决了这一计算瓶颈。

在计算网格中, 特征时间尺度由下式计算:

$$\tau_{\text{char}} = \tau_{\text{flow}} + \tau_{\text{chem}} \quad (15)$$

式中 τ_{flow} 是流动时间尺度, τ_{chem} 是化学时间尺度。网格中的流动时间尺度 τ_{flow} 建模为

$$\tau_{\text{flow}} = k / (\varepsilon c_{\text{flow}}) \quad (16)$$

式中 k 是湍动能, ε 是湍流耗散率, c_{flow} 是湍流速率常数。网格中的化学时间尺度 τ_{chem} 建模为

$$\tau_{\text{chem}} = c_{\text{chem}} \min_f \frac{Y_f}{\omega_f} \quad (17)$$

式中 c_{chem} 是模型常数, 索引 f 表示指定的燃料组分列表, Y_f 是燃料组分的质量分数, ω_f 是燃料组分的净反应速率, $\min$ 表示在所有指定燃料组分中的最小值。引入化学时间尺度 τ_{chem} 可以考虑动力学的影响, 同时也防止预混燃烧进程过快。

1.2 自适应建表 (ISAT) 方法

自适应建表(ISAT)方法旨在通过对 n_x 维的自变量 Φ (热力学状态) 和 n_y 维的因变量 $f(\Phi)$ (反应步积分之后的热力学状态或者化学平衡计算之后的热力学平衡状态) 之间的映射关系以及 $n_y \times n_x$ 维的敏感性矩阵 $\mathbf{A}$ 进行建表, 自变量相近时进行查表来加速化学反应积分, 其中 $\mathbf{A}$ 的定义为 $A_{ij} = \partial f_i / \partial \Phi_j$ 。给定查询点 Φ^q , 如果表中存在与其状态接近的节点 Φ^n , ISAT 可以检索已存储的 Φ^n 、 $\mathbf{A}$ 和 $f(\Phi^n)$, 通过线性插值给出 $f(\Phi^q)$ 的近似值 $f_a(\Phi^q)$

$$f_a(\Phi^q) = f(\Phi^n) + \mathbf{A}(\Phi^q - \Phi^n) \quad (18)$$

ISAT 通过控制线性插值的近似值与真实值的差异来进行误差控制

$$\varepsilon \equiv |f_a(\Phi^q) - f(\Phi^q)| < \varepsilon_{\text{ISAT}} \quad (19)$$

式中 $\varepsilon_{\text{ISAT}}$ 为用户指定的误差阈值。ISAT 表中存储的信息是在计算过程中动态建成的, 在计算开始时表是空的, 随着计算过程节点以二叉树的格式动态加入到表中, 表中仅存储模拟过程中访问到的组分空间, ISAT 表可以进行动态更新。当表中的信息被频繁地重复使用时, 例如模拟统计稳态火焰时, 可以大量避免直接积分或者化学平衡计算的时间, ISAT 会显著提高计算效率。在本文中, 有限速率燃烧模型和特征时间燃烧模型均采用 ISAT 对化学反应源项积分或化学平衡计算进行加速。

1.3 组分输运方程的降维

近年来, 降维方法与建表/查询类方法结合使用从而降低详细化学动力学的 CFD 计算成本^[35]。

降维方法一般通过数值方法减少待求解的变量的数目来加快计算,在本文中化学反应机理中的全套 n_s 个化学组分被分为 n_{rs} 个代表组分和 n_{us} 个非代表组分($n_{rs} + n_{us} = n_s$),求解器只对 n_{rs} 个代表组分求解组分输运方程,从而实现组分输运方程的降维。同时采用 ISAT 方法将降维体系的信息制成表格,加快化学反应源项积分计算。降维方法可以在基于组分输运方程的 CFD 求解器或基于颗粒(如 PDF 方法)的 CFD 求解器中实现,组分输运方程的降维可以减少输运方程的求解个数,能有效提高计算效率。

降维方法需要指定一组代表组分来进行降维,本文依据组分质量分数取重要组分作为代表组分,即根据组分质量分数大小选取质量分数较大的 n_{rs} 个组分作为代表组分,求解其组分输运方程,其余组分为非代表组分,其输运方程不参与求解。研究了当量比为 0.5~1.5 的正十二烷/空气混合气的一维自由火焰传播过程,初始温度为 444 K,压力为 3.04×10^5 Pa,采用包含 31 组分的正十二烷骨架机理^[36]。图 1 展示了不同当量比条件下的层流火焰传播速度(S_l)和温度峰值(T_{max})变化,可以发现在当量比 $\phi=1.0$ 附近层流火焰传播速度和温度峰值最大。图 2 列出了不同当量比条件下组分的最大质量分数,为了方便读图只列出了质量分数相对较大的组分。在不同当量比条件下,最大质量分数始终处于前 20 位的 14 个组分分别为:CO、O₂、CH₄、CO₂、H₂O、C₆H₁₂、C₁₂H₂₆、C₃H₆、C₂H₄、H₂、OH、C₂H₂、O、H,在本工作中选取这些组分为代表组分。

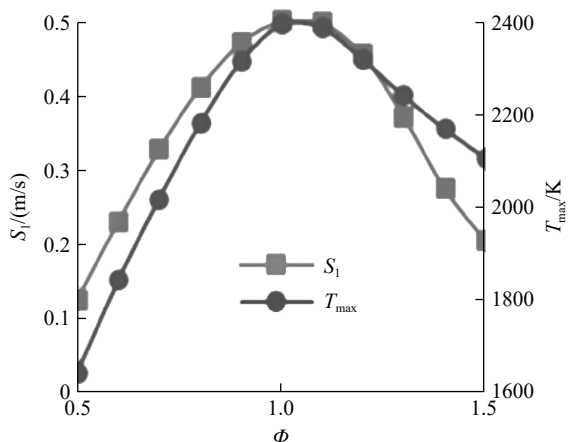


图 1 层流火焰传播速度和温度峰值随当量比的变化
Fig. 1 Laminar propagation flame speed and the maximum temperature as a function of the equivalence ratio from the freely propagating premixed flames

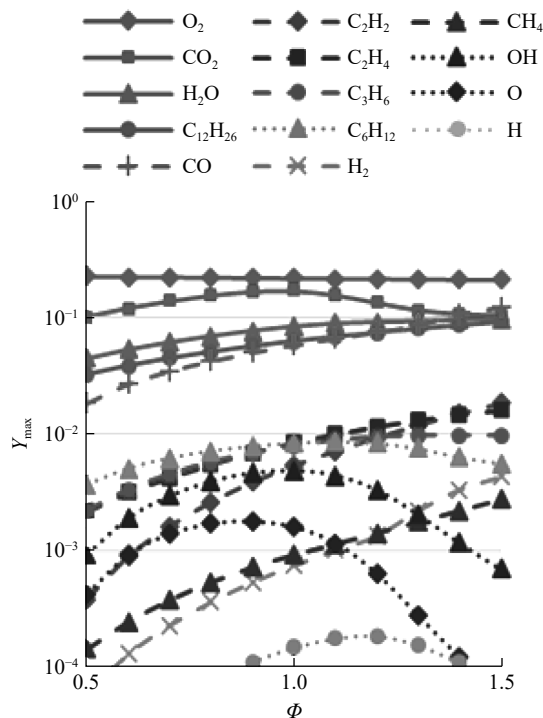


图 2 组分最大质量分数随当量比的变化

Fig. 2 The maximum mass fraction of species as a function of the equivalence ratio from the freely propagating premixed flames

2 模型燃烧室喷雾燃烧数值模拟

2.1 模型燃烧室算例设置

采用 CFD 商业软件 Fluent^[37] 对 CFM56 模型燃烧室开展三维喷雾燃烧数值模拟。计算采用约 2 000 万个非结构网格进行空间离散。喷雾以空心锥形分 30 股射流向计算域喷入燃料液滴,总质量流率为 7.85 g/s。整个计算域在初始化时分布满 444 K 的空气,入口处进气速度为 103.2 m/s。

采用欧拉-拉格朗日方法模拟气液两相喷雾燃烧过程。气相模拟采用基于压力的稳态求解器,流动求解器求解质量、动量、能量和组分的守恒方程。液相采用离散相模型进行建模,液滴包以给定速度和直径注入计算域。由于液相体积分数较低,液滴与液滴之间的相互作用可以忽略,因此不考虑液滴的碰撞、破碎。气相与液相之间存在双向耦合。物理模型和数值格式如表 1 所示。

对于气相化学反应,采用包含 31 种组分的正十二烷骨架机理^[36]。对于特征时间燃烧模型和有限速率模型,均采用 ISAT 对化学平衡计算或化学反应源项积分进行加速,ISAT 误差限取 10^{-4} 。

首先开展基于特征时间燃烧模型的喷雾两相燃烧数值模拟,研究化学时间尺度 τ_{chem} 取值对结

表 1 物理模型和数值格式
Table 1 Physical models and numerical settings

物理模型和数值格式	说明
求解器	基于压力的稳态求解器
湍流模型	Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型
离散格式	采用 semi-implicit method for pressure linked equation (SIMPLE) 算法对压力-速度进行耦合求解, 采用标准 2 阶离散格式对压力进行离散, 采用 2 阶迎风格式离散动量、组分和湍动能
DPM 模型	采用球形阻力定律计算颗粒受到的阻力, 采用随机游动方法计算湍流弥散的影响, 采用 Abramzon-Sirignano 模型对蒸发建模, 采用 Ranz-Marshall 方法对传热建模

果的影响, 然后分别在以特征时间燃烧模型的模拟结果做初始化和常规高温初始化的前提下采用层流有限速率燃烧模型进行数值模拟。研究将首先比较不同燃烧模型对火焰形态的预测, 验证特征时间燃烧模型在航空发动机两相燃烧数值模拟中的适用性和鲁棒性, 然后讨论基于特征时间燃烧模型的初始化方法对喷雾燃烧数值模拟的计算效率的影响。

2.2 化学特征时间对模拟结果的影响分析

选取燃料组分 $C_{12}H_{26}$ 建模化学时间尺度, 模型常数 c_{chem} 分别取为 0、1、100 三个不同的数值来验证特征时间燃烧模型在喷雾燃烧数值模拟中的适用性和鲁棒性。当 c_{chem} 取 0 时, $\tau_{char} = \tau_{flow}$, 意味着特征时间尺度完全由流动时间尺度决定, 隐含的假设是流动与化学反应相比, 后者的速率无穷快。 c_{chem} 大于 0 意味着在特征时间尺度的计算中引入了化学反应时间尺度, 考虑了有限反应动力学的影响, 例如: 当 c_{chem} 取 1 时, $\tau_{char} = \tau_{flow} + \min_f \frac{Y_f}{\omega_f}$ 。随着 c_{chem} 的进一步增大, 趋向化学平衡状态的速度进一步变慢, 特征时间尺度由化学时间尺度主导。对于某些特定问题, 通过调大 c_{chem} 可以避免燃烧进程被过快预测, 但是过分增大 c_{chem} 可能会引起收敛困难。图 3 展示了 CFM56 模型燃烧室基于特征时间燃烧模型模拟得到的沿轴线中心面的平均温度的结果。如图所示, c_{chem} 取 0、1、100 的特征时间燃烧模型均可以收敛到稳定燃烧的状态, 证明了特征时间尺度模型的鲁棒性。进一步观察可知, 当 c_{chem} 由 0 增加至 1 时, 高温区距离喷嘴出口的长度略微增加 3 mm, 当 c_{chem} 进一步增加至 100 时, 喷嘴出口附近的温度分布发生明显变化, 此时的结果与 LFR 类似 (LFR 结果见后文)。 c_{chem} 的取值对燃烧室出口附近的温度场几乎没有影响。这意味在当前的工况下, 停留时间远大于流动混合以及化学反应的时间尺度, 燃烧过程基本已经接近化学平衡。

衡量燃烧室出口温度分布常用的温度分布指

标主要有出口温度分布系数和径向温度分布系数。出口温度分布系数 δ_m , 定义为

$$\delta_m = \frac{T_{4,max} - T_4}{T_4 - T_3} \quad (20)$$

式中 $T_{4,max}$ 为燃烧室出口温度场中最高总温度, T_4 为燃烧室出口温度场平均总温度, T_3 为燃烧室进

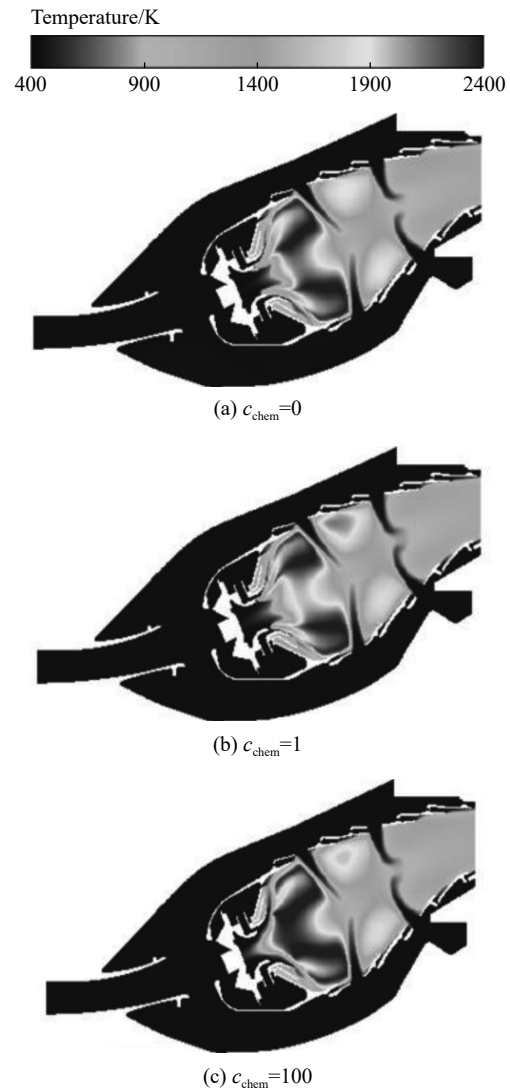


图 3 不同 c_{chem} 的特征时间燃烧模型的平均温度云图
Fig. 3 Contours of mean temperature from CTS model with different c_{chem}

口空气总温度。径向温度分布系数 δ_r , 定义为

$$\delta_r = \frac{T_{4r,\max} - T_4}{T_4 - T_3} \quad (21)$$

式中 $T_{4r,\max}$ 为燃烧室出口径向位置平均总温度的最高值。图 4 为出口径向位置平均温度图, 横坐标 $r/r_{\max}$ 为归一化半径, 如图所示 c_{chem} 的选取对出口温度场结果几乎没有影响, 在燃烧室壁附近能看到由于喷流冷却将温度降低到 500 K 以下, 燃烧室内部区域的温度分布相对均匀。根据燃烧室出口面温度模拟结果和燃烧室出口温度分布系数和径向温度分布系数的定义可计算出 δ_m 和 δ_r , 如表 2 所示。可见特征时间燃烧模型参数 c_{chem} 的选取对出口温度场的分布以及 δ_m 和 δ_r 的影响均较小。这与图 3 的结果一致, 意味着在当前的工况下, 燃烧过程基本已经接近化学平衡。

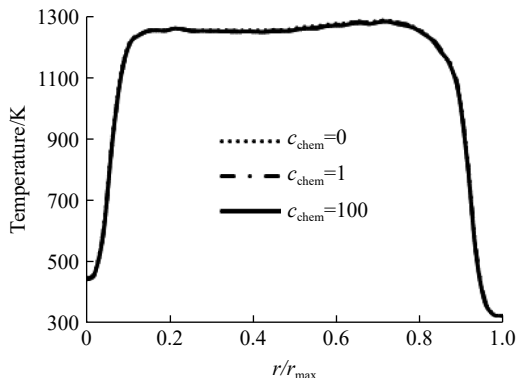


图 4 不同 c_{chem} 的特征时间燃烧模型的出口径向位置平均温度比较

Fig. 4 Comparison of temperature profiles at the exit plane from CTS model with different c_{chem}

表 2 出口温度分布系数 (δ_m) 和径向温度分布系数 (δ_r) 随 c_{chem} 的变化

Table 2 Variations of δ_m and δ_r with c_{chem}

参数	$c_{\text{chem}}=0$	$c_{\text{chem}}=1$	$c_{\text{chem}}=100$
出口温度分布系数	0.234 7	0.265 4	0.236 7
径向温度分布系数	0.167 6	0.169 2	0.166 9

基于特征时间燃烧模型的算例收敛速度较快, 模型常数 c_{chem} 分别取 0、1、100 的算例均能在 3 000 次迭代步内收敛到稳定燃烧状态。以上结果证实了特征时间燃烧模型在喷雾燃烧数值模拟中的适用性和鲁棒性。由于采用特征时间燃烧模型的主要意义在于能收敛到一个稳定燃烧状态, 预测得到一个大致的火焰形状, 从而为后续计算提供一个相对合理初始解, 因此 c_{chem} 的取值应该同时权衡收敛性、准确性与计算效率。基于上述考虑,

后续研究均选取 c_{chem} 为 1 进行分析。

2.3 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的结果比较

图 5 展示了 CFM56 模型燃烧室分别基于特征时间燃烧(CTS)模型和有限速率燃烧(LFR)模型模拟得到的沿轴线中心面的混合分数(Z)的结果。可以看到两种模型的预测结果在燃料液滴入口附近有较大差别, 特征时间燃烧模型的混合分数明显大于有限速率模型, 这是由于前者预测的温度更高, 因此, 蒸发速率更快, 燃料蒸汽的含量也更高; 在燃料蒸汽经过中心回流区的混合过程中, 两种燃烧模型的混合分数趋于一致。

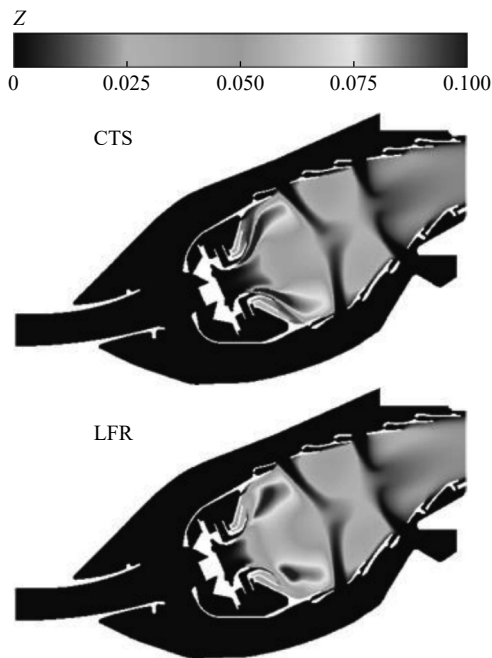


图 5 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的混合分数云图

Fig. 5 Contours of mean mixture fraction from CTS and LFR model

图 6 展示了 CFM56 模型燃烧室分别基于特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型模拟得到的沿轴线中心面的温度结果, 图 6(b)横截面是沿图 6(a)白色虚线所截垂直于轴线的面。如图所示, 两种模型预测的平均温度在喷嘴出口(燃料液滴入口)附近具有较为明显的差异, 采用 CTS 与 LFR 模型时, 低温区分别呈现 M 型与 V 型。在远离喷嘴出口的燃烧核心区域, 两种模型的预测接近, 至燃烧室出口附近, 两种模型的预测几乎相同。总体来说, CTS 模型预测的平均温度场在燃烧室内的大部分燃烧区域与 LFR 模型类似。

图 7~图 8 展示了 CFM56 模型燃烧室分别基

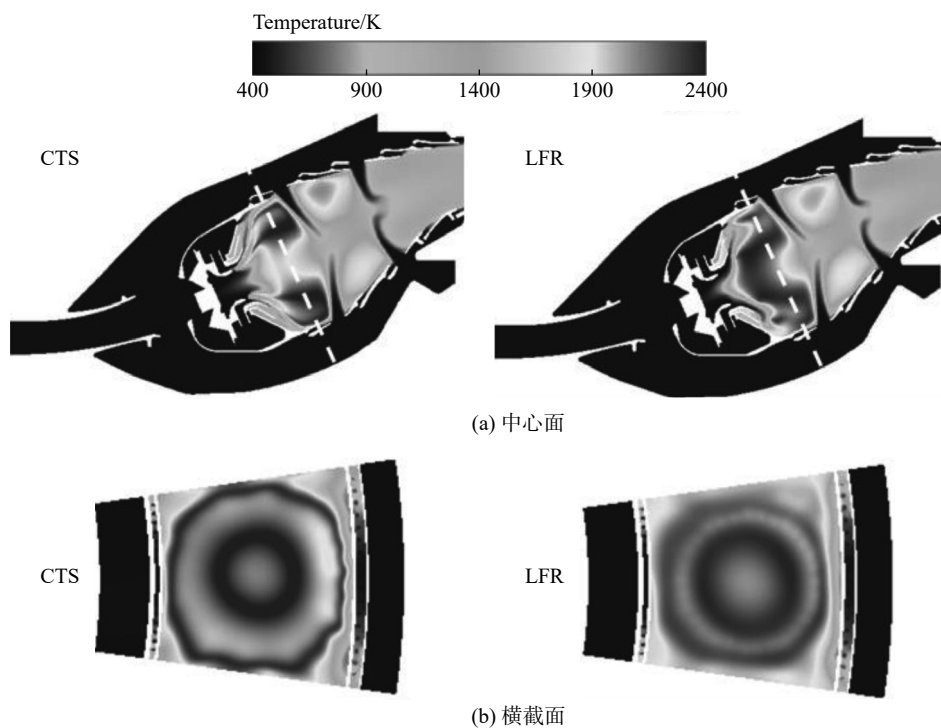


图 6 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的平均温度云图

Fig. 6 Contours of mean temperature from CTS and LFR model

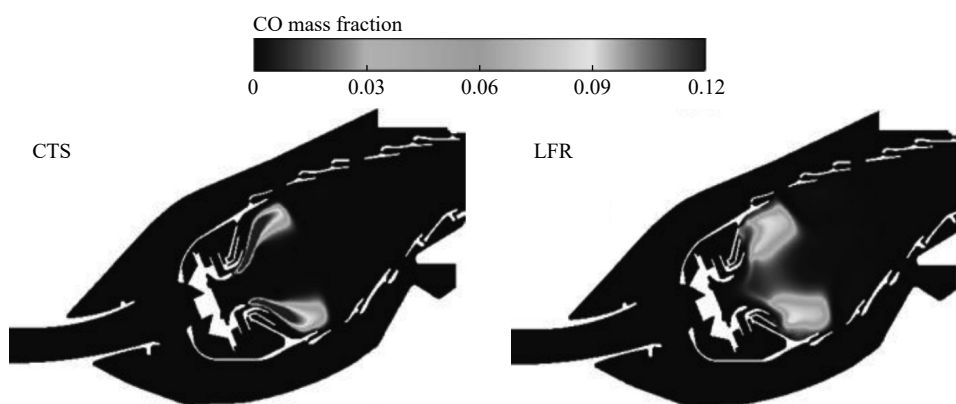


图 7 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的 CO 平均质量分数云图

Fig. 7 Contours of mean CO mass fraction from CTS and LFR model

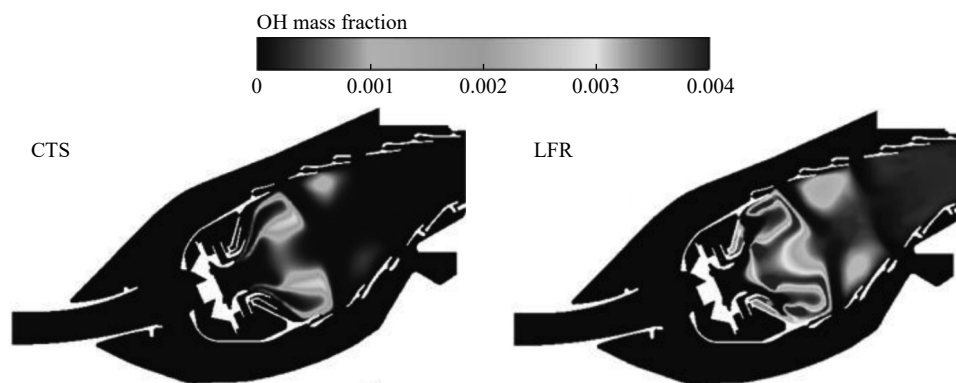


图 8 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的 OH 平均质量分数云图

Fig. 8 Contours of mean OH mass fraction from CTS and LFR model

于特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型模拟得到的沿轴线中心面的组分质量分数的结果。由于 CO 主要出现在富燃区(当量比小于 1 为贫燃区, 当量比大于 1 为富燃区), 贫燃状态时被消耗。因此, CO 表现出与混合分数相似的空间分布。相比于 LFR 模型, 由于 CTS 预测的混合分数更大, 因此, 后者预测的 CO 质量分数亦显著高于前者。两种模型预测的 OH 分布亦存在明显差异。具体说来, CTS 预测的 OH 显著低于 LFR, 这是由于 CTS 模型预测的组分趋向化学平衡状态而不是完全燃烧, 而化学平衡态的 OH 低于完全燃烧。

图 9~图 11 绘制了温度和组分质量分数在混合分数空间的散点图, 散点取自沿轴线中心面的数据点。如图所示, 特征时间燃烧模型的散点图接近化学平衡态, 富燃侧对应燃料液滴入口附近区域。相比于 LFR 模型, CTS 模型预测的混合分数的最大值更高, 分别为 0.11 与 0.2。这是由于 CTS 模型预测的平均温度更高, 造成更大的蒸发速率以及更高的混合分数。对有限速率燃烧模型, 散点图由两个分支组成, 全部位于火焰贫燃侧的左侧分支与特征时间燃烧模型的贫燃侧部分基本重合, 左侧分支这部分数据涵盖了几乎整个燃烧室回流区和下游区域。右侧分支显示随着温度升高混合分数增加, 对应于燃料液滴入口附近区域液滴在预热区的蒸发过程, 图 9 可以明显看到富燃侧由液滴蒸发引起的较大的数据分散度, 这是因为蒸发过程发生在离火焰前沿有一定距离的区域, 允许燃料蒸汽和氧化剂充分混合, 从而接近火焰前沿的区域产生了预混合、可变当量比的混合物, 特征时间燃烧模型由于液滴蒸发过快没有这个现象。图 10~图 11 是中间组分 CO 和 OH

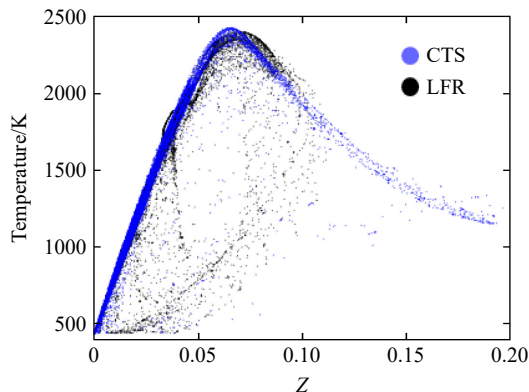


图 9 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的平均温度在混合分数空间的散点图

Fig. 9 Scatter plot of mean temperature versus mixture fraction from CTS and LFR model

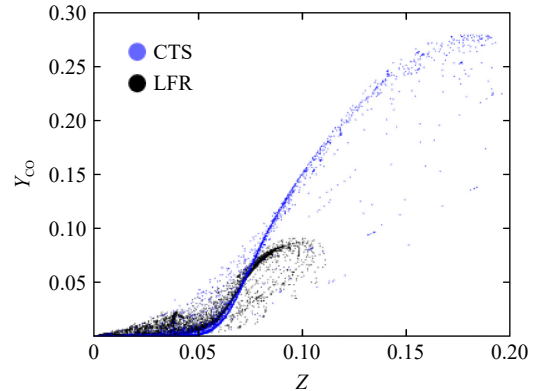


图 10 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的 CO 平均质量分数在混合分数空间的散点图

Fig. 10 Scatter plot of mean CO mass fraction versus mixture fraction from CTS and LFR model

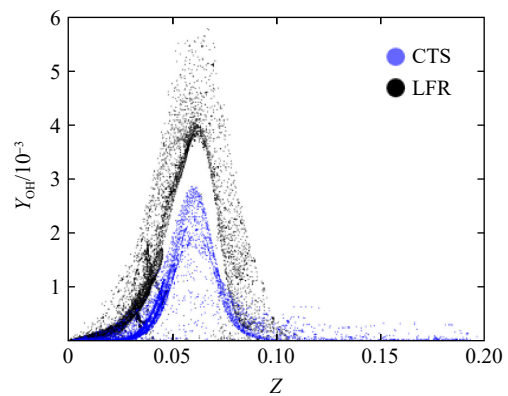


图 11 特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的 OH 平均质量分数在混合分数空间的散点图

Fig. 11 Scatter plot of mean OH mass fraction versus mixture fraction from CTS and LFR model

质量分数的散点图。对于 CO 而言, 给定相同的混合分数, 两种模型预测的 CO 质量分数较为接近, 只是由于 CTS 模型预测的混合分数的最大值更高, 造成其预测的 CO 质量分数的最大值也更高。对于 OH 而言, 给定相同的混合分数, CTS 模型预测的 OH 质量分数明显低于 LFR, 这是由于前者预测的组分趋向于化学平衡状态。

图 12 展示了 CFM56 燃烧室基于特征时间燃烧模型和有限速率燃烧模型的出口径向位置平均温度图, 如图所示特征时间燃烧模型与有限速率燃烧模型的结果相比, 由于组分趋向化学平衡而不是完全燃烧, 出口温度较低, 这也与中心面温度的比较情况类似。燃烧室出口温度分布系数和径向温度分布系数如表 3 所示, 有限速率燃烧模型的 δ_m 比特征时间燃烧模型的稍小一点。特征时间燃烧模型与有限速率燃烧模型的 δ_r 均在 20% 范

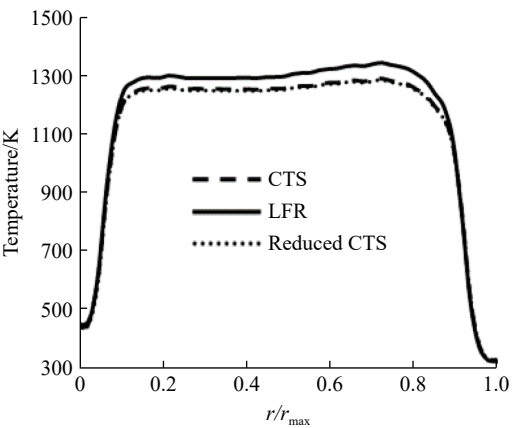


图 12 特征时间燃烧模型、有限速率燃烧模型和降维的特征时间燃烧模型的出口径向位置平均温度比较

Fig. 12 Comparison of temperature profiles at the exit plane from CTS, LFR and reduced CTS model

表 3 特征时间燃烧模型、有限速率燃烧模型和降维的特征时间燃烧模型的出口温度分布系数和径向温度分布系数

Table 3 Variations of δ_m and δ_r with CTS, LFR and reduced CTS model

参数	CTS	LFR	降维的 CTS
出口温度分布系数	0.265 4	0.251 3	0.270 9
径向温度分布系数	0.169 2	0.191 5	0.165 1

围内。结合图 6 中的结果,可以说明特征时间燃烧模型能够生成较准确的火焰结构,因此,能够为基于有限速率燃烧模型的喷雾燃烧数值模拟提供良好的初始解。

2.4 特征时间燃烧模型结合降维方法的高效数值模拟

为了提高特征时间燃烧模型的计算效率,进一步采用组分输运方程的降维方法。图 12 展示了 CFM56 模型燃烧室基于结合降维方法的特征时间燃烧模型模拟得到的出口径向位置平均温度图。如图所示,降维方法的应用没有对温度的收敛结果造成影响,并且出口温度分布系数和径向温度分布系数如表 3 所示。结合降维方法和未结合降维方法的特征时间燃烧模型的算例都是在大约 2 000 次迭代收敛到稳定燃烧状态,计算效率如表 4 所示,降维方法的应用能显著减小特征时间燃烧模型的平均每步迭代时间,相比于未降维的方法,单步迭代时间节省大约 34%。

基于以上分析,提出基于特征时间燃烧模型的高效喷雾燃烧数值模拟方法:以特征时间燃烧模型的模拟结果作为初始燃烧场(取代常规高温初始化),提高有限速率燃烧模型在喷雾燃烧数

表 4 特征时间燃烧模型、有限速率燃烧模型的计算效率比较

Table 4 Comparison of calculation efficiency of CTS and LRF model

参数	CTS ($c_{chem}=1$, ISAT)		高温初始化	
	降维	未降维	ISAT	无 ISAT
CTS 迭代步数	2 000	2 000	0	0
CTS 平均每步迭代时间/s	10.17	15.47	0	0
LFR 迭代步数	7 000	7 000	14 000	14 000
LFR 平均每步迭代时间/s	14.50	14.50	14.50	149
总计算时间比值	0.60	0.65	1	10.27

值模拟中的计算效率。为了定量分析计算效率,分别对基于特征时间燃烧模型初始化-有限速率燃烧模型和常规高温初始化-有限速率燃烧模型的方法对 CFM56 模型燃烧室进行了稳态 RANS 模拟,使用 392 个计算核进行并行计算,根据出口面平均温度偏差稳定在 0.5% 以内(脉动范围小于 10 K)判断算例收敛到稳定的燃烧状态。特征时间燃烧模型的算例约 2 000 步迭代收敛到稳定燃烧状态,采用常规高温初始化方法的有限速率燃烧模型的算例收敛到稳态需要约 14 000 步,而采用特征时间燃烧模型的算例收敛到稳态只需要约 7 000 步,收敛步数减少约 50%,采用不同初始化方法的算例的计算效率具体见表 4。如表 4 所示,ISAT 对计算有明显的加速效果,采用 ISAT 可以大幅减小计算时间约 90%。同时,基于特征时间燃烧模型初始化的算例与基于常规初始化的算例相比,由于收敛所需的迭代步数减少近一半,总计算时间节省约 35%,可以很大程度地提高基于有限速率燃烧模型的喷雾燃烧数值模拟的计算效率。结合降维方法能进一步减少特征时间燃烧模型数值模拟的平均每步迭代时间,总计算时间进一步节省到约 40%。需要说明的是,上述计算开销的分析中,特征时间燃烧模型使用的 $c_{chem}=1$ 。当使用 $c_{chem}=100$ 时,计算的每步迭代时间较大,加速效果有限。未结合降维方法时,总体计算时间节省 20%;结合降维方法时总体计算时间节省 35%。实际应用时,特征时间燃烧模型的意义主要在于提供合理的初始解以加速收敛。权衡收敛性与计算效率,并不建议选取 $c_{chem}=100$ 。

综上可以得出结论,结合降维方法的特征时间燃烧模型在喷雾燃烧数值模拟中的计算效率高,并且作为一种初始化方法能显著提高基于有限速

率燃烧模型的湍流喷雾燃烧数值模拟的计算效率。

基于特征时间燃烧模型的高效喷雾燃烧数值模拟方法可广泛应用于有限反应速率燃烧模型例如层流有限速率燃烧模型和涡耗散概念模型等,具有重要的实际意义。

3 结 论

本文将特征时间燃烧模型应用到喷雾燃烧数值模拟中,采用动态自适应建表方法加速化学平衡计算,开展高效多维喷雾燃烧数值模拟研究。

本文对 CFM56 航空发动机模型燃烧室进行了两相数值模拟,证明了特征时间燃烧模型在喷雾燃烧数值模拟中的适用性和鲁棒性,同时模型预测的火焰形态和组分分布与有限速率燃烧模型预测的结果相似,因此能为基于有限速率燃烧模型的数值模拟提供较为真实的初始解。本文开展了基于特征时间燃烧模型的高效喷雾燃烧数值模拟研究,采用自适应建表(ISAT)方法的算例的总计算时间能减小高达 90%。基于特征时间燃烧模型初始化的有限速率燃烧模型的算例与基于常规初始化的有限速率燃烧模型的算例相比,达到稳态需要的迭代步数减少约 50%,总计算时间节省约 35%,结合降维方法还能进一步减小特征时间燃烧模型数值模拟的平均每步迭代时间,总计算时间进一步减小约 40%。因此基于特征时间燃烧模型初始化-有限速率燃烧模型的数值模拟方法能大幅提高喷雾燃烧数值模拟的鲁棒性和计算效率。

参考文献:

- [1] MASRI A R. Turbulent combustion of sprays: from dilute to dense[J]. *Combustion Science and Technology*, 2016, 188(10): 1619-1639.
- [2] HEYE C, RAMAN V, MASRI A R. Influence of spray/combustion interactions on auto-ignition of methanol spray flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1639-1648.
- [3] JIANG X, SIAMAS G A, JAGUS K, et al. Physical modelling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(2): 131-167.
- [4] JENNY P, ROEKAERTS D, BEISHUIZEN N. Modeling of turbulent dilute spray combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(6): 846-887.
- [5] 何跃龙, 邓远灏, 颜应文, 等. 大涡模拟模型燃烧室燃烧性能计算[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(9): 1939-1947.
HE Yuelong, DENG Yuanhao, YAN Yingwen, et al. Large-eddy simulation of two-phase reacting flows and combustion performance in model combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(9): 1939-1947. (in Chinese)
- [6] SPALDING D B. Development of the eddy-break-up model of turbulent combustion[J]. *Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1977, 16(1): 1657-1663.
- [7] GRAN I R, MAGNUSSEN B F. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame: Part 2 influence of combustion modelling and finite-rate chemistry[J]. *Combustion Science and Technology*, 1996, 119(1/2/3/4/5/6): 191-217.
- [8] PETERS N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984, 10(3): 319-339.
- [9] POPE S B. PDF methods for turbulent reactive flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1985, 11(2): 119-192.
- [10] WANG Q, JARAVEL T, IHME M. Assessment of spray combustion models in large-eddy simulations of a polydispersed acetone spray flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3335-3344.
- [11] ECKEL G, GROHMANN J, CANTU L, et al. LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 207: 134-152.
- [12] 颜应文, 宋双文, 胡好生, 等. 折流燃烧室两相喷雾燃烧场数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(5): 1003-1010.
YAN Yingwen, HE Yuelong, HU Haosheng, et al. Numerical investigations of two-phase spray combustion flow fields in slinger annular combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(5): 1003-1010. (in Chinese)
- [13] 徐榕, 李井华, 赵坚行, 等. 湍流燃烧模型对双旋流燃烧室喷雾燃烧的影响[J]. *推进技术*, 2013, 34(3): 375-382.
XU Rong, LI Jinghua, ZHAO Jianxing, et al. Effects of turbulent combustion models on spray combustion flow of dual-stage swirler combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(3): 375-382. (in Chinese)
- [14] HEYE C, RAMAN V, MASRI A R. LES/probability density function approach for the simulation of an ethanol spray flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 1633-1641.
- [15] PEI Y, HAWKES E R, KOOK S. A comprehensive study of effects of mixing and chemical kinetic models on predictions of n-heptane jet ignitions with the PDF method[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2013, 91(2): 249-280.
- [16] HONHAR P, HU Y, GUTHEIL E. Analysis of mixing models for use in simulations of turbulent spray combustion[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2017, 99(2): 511-530.
- [17] LU T, LAW C K. Toward accommodating realistic fuel chemistry in large-scale computations[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(2): 192-215.
- [18] GOU X, SUN W, CHEN Z, et al. A dynamic multi-timescale method for combustion modeling with detailed and reduced chemical kinetic mechanisms[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(6): 1111-1121.
- [19] GAO Y, LIU Y, REN Z, et al. A dynamic adaptive method for hybrid integration of stiff chemistry[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(2): 287-295.
- [20] XU C, GAO Y, REN Z, et al. A sparse stiff chemistry solver based on dynamic adaptive integration for efficient combustion simulations[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 172: 183-193.
- [21] GOLDIN G, REN Z, ZAHIROVIC S. A cell agglomeration algorithm for accelerating detailed chemistry in CFD[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2009, 13(4): 721-739.
- [22] POPE S B, REN Z. Efficient implementation of chemistry in com-

- putational combustion[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2008, 82(4): 437-453.
- [23] KECK J C. Rate-controlled constrained-equilibrium theory of chemical reactions in complex systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1990, 16(2): 125-154.
- [24] LIANG L, STEVENS J G, FARRELL J T. A dynamic adaptive chemistry scheme for reactive flow computations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 527-534.
- [25] POPE S B. Computationally efficient implementation of combustion chemistry using in situ adaptive tabulation[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 1997, 1(1): 41-63.
- [26] TONSE S R, MORIARTY N W, BROWN N J, et al. PRISM: piecewise reusable implementation of solution mapping. An economical strategy for chemical kinetics[J]. *Israel Journal of Chemistry*, 1999, 39(1): 97-106.
- [27] CHRISTO F C, MASRI A R, NEBOT E M, et al. An integrated PDF/neural network approach for simulating turbulent reacting systems[C]//Symposium (International) on Combustion. Naples, Italy: the Combustion Institute, 1996:43-48.
- [28] REITZ R D, BRACCO F V. Global kinetics models and lack of thermodynamic equilibrium[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 53 (1/2/3): 141-144.
- [29] KONG S C, HAN Z, REITZ R D. The development and application of a diesel ignition and combustion model for multidimensional engine simulation[R]. Detroit, US: International Congress and Exposition, 1995.
- [30] RAO S, RUTLAND C. A flamelet time scale model for non-premixed combustion including chemical kinetic effects[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(1/2): 189-191.
- [31] ABRAMZON B, SIRIGNANO W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(9): 1605-1618.
- [32] HINZE J O. *Turbulence: an introduction to its mechanism and theory*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [33] REN Z, GOLDIN G M. An efficient time scale model with tabulation of chemical equilibrium[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158 (10): 1977-1979.
- [34] LU L, POPE S B. An improved algorithm for in situ adaptive tabulation[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(2): 361-386.
- [35] REN Z, GOLDIN G M, HIREMATH V, et al. Reduced description of reactive flows with tabulation of chemistry[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2011, 15(6): 827-848.
- [36] VIÉ A, FRANZELLI B, GAO Y, et al. Analysis of segregation and bifurcation in turbulent spray flames: a 3D counterflow configuration[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1675-1683.
- [37] ANSYS Incorporation. *ANSYS Fluent 19.0 theory guide*[R]. Canonsburg, US: ANSYS Incorporation, 2018.

(编辑: 王碧珺)