

文章编号:1000-8055(2012)10-2200-05

全状态两相湍流燃烧模型及其检验

王 方, 黄 勇

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 在欧拉-拉氏体系中, 在传统点源两相湍流燃烧模型(TM)中考虑液滴带火燃烧状态, 提出全状态两相湍流燃烧模型(FSM), 并用甲醇-空气两相湍流射流火焰实验数据对两种模型进行检验, 对比结果表明: FSM 模型能够给出平均温度的双峰分布, 得到更合理的预报结果。

关 键 词: 液雾燃烧; 单油滴燃烧; 火焰结构; 湍流燃烧模型; 大涡模拟

中图分类号: V231.2; TK16

文献标志码: A

Full status two phase turbulent combustion model

WANG Fang, HUANG Yong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: In Euler-Lagrange frame, the individual droplet burning behavior was added into the traditional point source two phase turbulent combustion model (TM), and then a full status two phase turbulent combustion model (FSM) was presented. The two kinds of two phase turbulent combustion models were tested by a set of methanol air two phase turbulent spray jet flame experimental data. The comparison results between the computational prediction results and the experimental data show that the FSM model can give two peaks in the averaged temperature profile, as well as more reasonable predictions.

Key words: spray combustion; single droplet combustion; flame structure;
turbulent combustion model; large eddy simulation

航空发动机燃烧室中, 液体燃料要经过雾化后燃烧。对液滴燃烧状态的研究由来已久。早在上个世纪 50 年代 Spalding 对液滴燃烧进行了理论分析^[1], 60 年代周力行实验给出了液滴多种火焰状态, 如“降落伞火焰”等^[2], 70 年代 Chiu 等给出液滴火焰状态的定性判据^[3], 其后 Chiu 等^[4]和 Kuo^[5]根据液滴之间的距离定性分析了液雾群的燃烧状态, 表明两相火焰中液滴有多种燃烧状态。Russo, Gomez^[6]的瞬时摄影, Allen 等^[7]的平面

激光诱导荧光, Tsushima 等^[8]的激光断层摄影、当地 OH 化学发光、CH 谱带发射和油滴 Mie 散射等测量结果都证实在煤油等的两相火焰中存在单液滴带火燃烧情况, 其燃烧规律可随着时间和空间而变化。对于两相火焰中的液滴, Chiu^[9]给出了液雾射流火焰中分区燃烧的典型液滴燃烧状态; Borghi^[10]和 Chigier 等^[11]分析了两相火焰和液滴燃烧关系; Beck 等^[12]的实验结果证明单液滴燃烧状态和整个燃烧室性能相关。但目前尚无

收稿日期: 2012-02-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2200_030.html

基金项目: 国家自然科学基金(51106006); 英国皇家学会基金(AL120003)

作者简介: 王方(1972—), 女, 辽宁本溪人, 讲师, 博士, 主要从事燃烧室两相湍流流动及燃烧研究。

统一定量规律。

在目前占主导的欧拉-拉氏体系下的雷诺平均模拟(RANS),大涡模拟(LES)和直接模拟(DNS)中,都没有考虑液滴带火燃烧的情况,随着计算技术的发展,可以对传统模型进行拓展,从而实现更精确地模拟。

本文在传统已有模型基础上加上液滴着火燃烧判据和两相关联关系,提出全状态两相湍流燃烧模型,并用甲醇空气射流火焰实验数据检验。

1 全状态两相湍流燃烧模型

全状态两相湍流燃烧模型和传统两相湍流燃烧模型的对比示意图如图 1 所示。上面部分代表传统模型,液滴在被加热之后先是单纯升温,然后蒸发,蒸发出的燃料气和周围空气混合燃烧。下面部分代表新的全状态两相燃烧模型,增加了单液滴带火燃烧部分,对原有模型进行了拓展,着火点 B 和两相燃烧关系式是它与传统模型之间的主要差别。

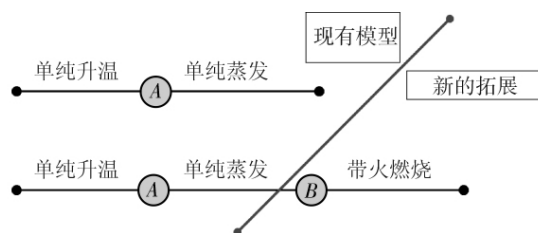


图 1 两相燃烧模型示意图

Fig. 1 Sketch map of two phase combustion models

根据 Chiu^[13], Chigier^[14], Kuo^[5], 和 ZHOU^[15] 的研究结果,采用点火延迟时间判断液滴着火状态,即用点火延迟时间和蒸发时间的比值作为判据,燃烧后,燃烧速率用直径平方率。点火延迟时间

$$\tau_i = A \exp\left(\frac{E}{RT_\infty}\right) C_{\text{oxygen}}^{-0.5} C_{\text{methanol}}^{-0.1} \quad (1)$$

其中 τ_i 是点火延迟时间, C_{oxygen} 和 C_{methanol} 是氧气和甲醇的质量分数, T_∞ 是液滴迭代中的局部初始环境温度, A 和 E 是模型常数,这里 $A = 2.1 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{mol}/\text{m}^2$, $E = 151.5 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。

对于液滴着火判据需要同时满足, $d_d > 0.001 \text{ mm}$; $T_\infty > 1200 \text{ K}$; 和 $\tau_e > \tau_i$ 。即液滴直径 d_d 大于 0.001 mm , 局部环境温度高于 1200 K , 以及蒸发时间长于点火时间。这里蒸发时间

$$\tau_e = d_{d0}^2 / k_e \quad (2)$$

其中 d_{d0} 是液滴初始直径, k_e 是模型常数^[16]。

在液滴燃烧之后,采用 D^2 定律

$$k_e = -d(d_d^2)/dt \quad (3)$$

2 气相湍流燃烧模型

在气相湍流燃烧中应用以前提出并检验的代数亚网格模型^[17-18]

$$\omega_{S,s} = \rho^2 \{ \tilde{Y}_{fu} [(\tilde{K} \tilde{Y}_{ox}) - \tilde{K} \tilde{Y}_{ox}] + \tilde{K} [(\tilde{Y}_{ox} \tilde{Y}_{fu}) - \tilde{Y}_{ox} \tilde{Y}_{fu}] + \tilde{Y}_{fu} [(\tilde{K} \tilde{Y}_{ox}) - \tilde{K} \tilde{Y}_{ox}] \} \quad (4)$$

$$R_{K,Y_s} = [(\tilde{K} \tilde{Y}_s) - \tilde{K} \tilde{Y}_s] = C_{K,Y_s} L_s^2 \frac{\partial \tilde{K}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{Y}_s}{\partial x_j} \quad (5)$$

化学反应机理

$$\omega_{fu} =$$

$$1.799 \times 10^{10} \rho^2 Y_{\text{CH}_3\text{OH}}^{0.25} Y_{\text{O}_2}^{1.5} \exp\left(\frac{-1.256 \times 10^8}{RT}\right) \quad (12)$$

3 实验算例和模拟方法

甲醇空气射流火焰^[19]的几何结构见图 2 所示,中心是标准压力旋流喷嘴,安装在直径为 D_1 的圆盘钝体中央,在 D_1 和 D_2 之间是环缝,外边是伴流,3 个实验工况的环缝空气进气量分别为: 0.477 L/s 和 9.52 L/s 。根据测量结果,在第 1 个工况喷嘴下游,液滴直径有的大于 $25 \mu\text{m}$,局部气相温度约为 1000 K ,气相速度约为 3 m/s ,液滴速度约为 14.5 m/s ,液滴雷诺数为 42 。根据 Chiu 的理论,存在单液滴带火燃烧状态。另外,根据点火延迟理论,也存在单液滴燃烧状态。因此,这个工况存在液滴带火燃烧状况,很适合全状态两相湍流燃烧模型的检验。

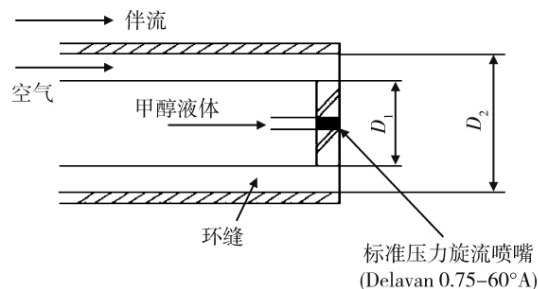


图 2 甲醇火焰结构示意图

Fig. 2 Domain of the methanol flame geometry

模拟区域长为 200 mm , 半径为 80 mm , 计算网格见图 3 和图 4。采用欧拉-拉式模拟方法。组分和能量方程采用 3 阶 MUSCL (monotonic up-stream-centered scheme for conservation laws) 格式,压力用 2 阶格式,动量方程用中心差分,2 阶时间格式。初始雾化用压力喷嘴模型,液滴碰撞和

二次破碎用 O'Rourke 方法和 TAB(the Taylor Analogy breakup model) 模型. 采用 P1 辐射模型. 液体和气体的初始温度均为 300 K, 甲醇黏度为 $0.0056 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, 表面张力为 0.0222 N/m , 比定压热容 c_p 是温度的函数. 气液双相耦合, 气相迭代 155 步就加入一次液相. 每个时间步迭代 40 次, 时间步长为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}$.

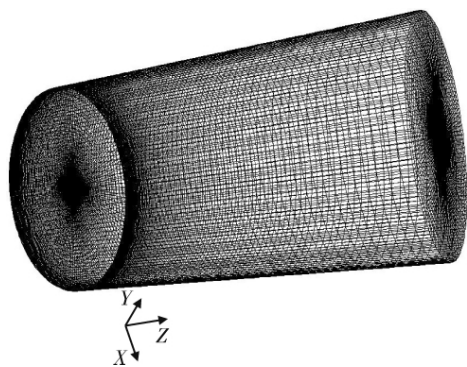


图 3 计算网格

Fig. 3 Mesh of the simulation domain

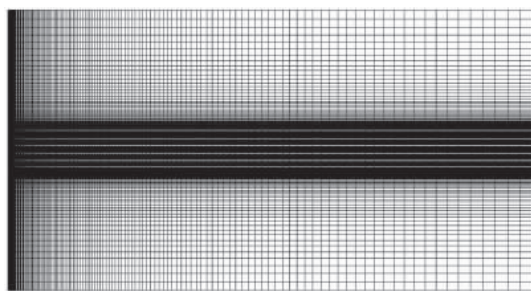


图 4 $z=0$ 平面网格

Fig. 4 Grid at $z=0$ plane

4 结果和讨论

目前, 欧拉-拉氏体系是液雾燃烧模拟主导方法, 其中的两相湍流燃烧模型可以和 RANS, LES 及 DNS 方法结合, 区别仅在于对脉动速度的处理. 考虑到计算量和模拟精度, 本文用 LES 和新的两相湍流燃烧模型结合, 成功检验之后再把新模型移植到 RANS 模拟方法中.

图 5 和图 6 是采用 FSM 模型的 LES 模拟得到温度和质量分数的瞬时云图, 图(a)和图(b)分别是空气流量为 0 L/s 和 4.77 L/s 的情况. 从图中可以看出, 环缝空气流量为 0 L/s 的时候, 从喷嘴出来的液雾经过较长的距离散开, 反应主要发生在喷嘴下游射流中心区域、以及雾锥外侧和伴流相遇的地方, 高温区更大. 环缝空气流量为 4.77 L/s 的时候, 安装喷嘴的圆盘起到钝体的作用,

周向涡强化了掺混, 在紧挨着喷嘴的区域反应区更为宽泛, 拟序结构更为强烈复杂.

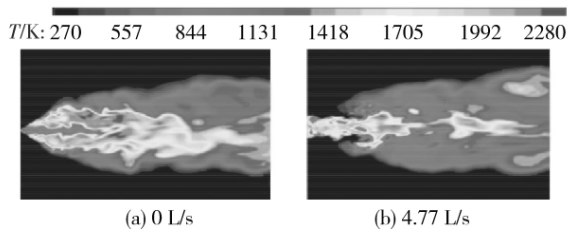


图 5 温度云图

Fig. 5 Contours of static temperature

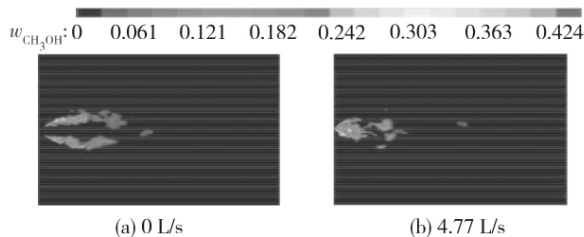


图 6 CH_3OH 质量分数云图

Fig. 6 Contours of mass fraction of CH_3OH

图 7~图 9 是 3 种情况的平均温度剖面对比图, 其中“□EXP”代表试验值, “—FSM”代表全状态两相湍流燃烧模型, “... KIM”代表文献采用的传统两相湍流燃烧模型的预报值^[20], “--TM”代表本文采用的传统两相湍流燃烧模型的预报值. 从图中可以看出, 在空气流量为 0 L/s 的时候, 在 3 个测量截面都存在温度的双峰分布, 如 $z=25 \text{ mm}$ 截面, 高温峰值分别发生在半径为 11 mm 和 23 mm 附近, 新的两相湍流燃烧模型 (FSM) 能够成功预报试验值的双峰分布, 峰值和位置都和试验值吻合, 而且在大部分区域, 新模型预报结果和实验值很接近, 传统模型的预报值只能给出一个峰值, 位置差别较大. 在空气流量为 4.77 L/s 和 9.52 L/s 的时候试验值只有一个高温峰值, 新模型、传统模型预报值和试验值都很接近. 本文对比的 (TM)、和文献使用的 (KIM) 传统两相湍流燃烧模型在空气流量为 0 L/s 时, 对工况只能给出单峰分布, 其中的原因在于新模型增加了对单液滴燃烧行为的模拟. 空气流量为 0 L/s 时, $z=25 \text{ mm}$ 截面的平均温度要高于空气流量为 4.77 L/s 时的, 这和瞬时云图的预报结果一致.

至此可见, 新的全状态两相湍流燃烧模型对已有的传统点源两相湍流燃烧模型进行了成功拓展, 扩大了适用范围, 可望应用于多种气液两相湍流燃烧情况.

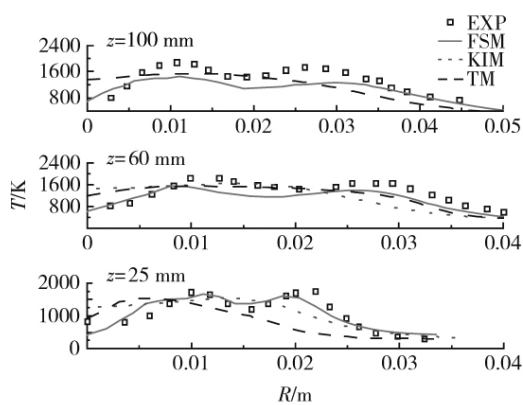


图 7 温度剖面图(流量 0 L/s)

Fig. 7 Temperature profiles (the air flow rate value is 0 L/s)

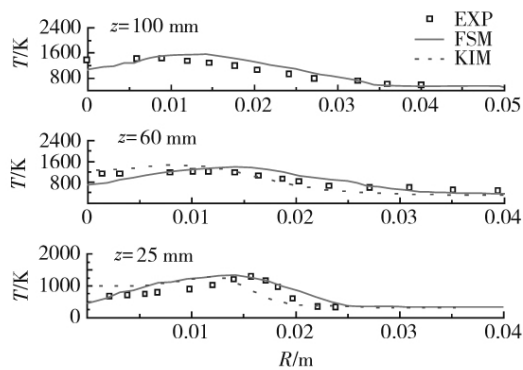


图 8 温度剖面图(流量 4.77 L/s)

Fig. 8 Temperature profiles (the air flow rate value is 4.77 L/s)

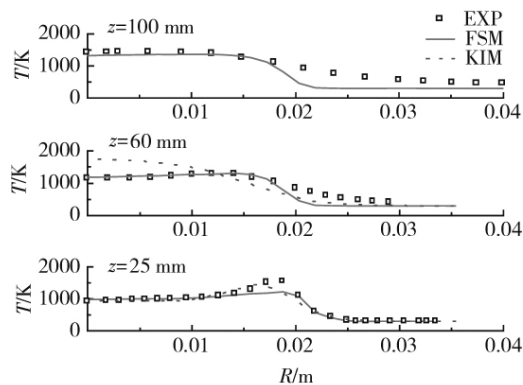


图 9 温度剖面图(流量 9.52 L/s)

Fig. 9 Temperature profiles (the air flow rate value is 9.52 L/s)

5 结 论

根据高速摄影等试验结果,在液体燃料燃烧

中存在单液滴独自带火燃烧状态,随着对计算精度要求的提高,在目前的欧拉-拉氏点源两相湍流燃烧模型中需要考虑这一情况.本文在前人工作基础上,提出了全状态两相湍流燃烧模型,将单液滴着火状态引入到点源两相湍流燃烧模型中,采用点火延迟概念判断液滴着火,直径平方关系处理着火后的两相关联,对已有两相湍流燃烧模型进行了拓展,扩大其适用范围.

为了突出模型差别,选择 LES 方法与新模型结合,采用存在单滴燃烧现象的一组甲醇空气射流火焰试验数据对新模型进行检验.对比结果表明,新模型能够成功预报喷嘴下游平均温度的双峰分布,预报结果与实验值接近,比本文的原有模型、文献传统模型的预报结果更为精确,证明本文提出的新模型具有合理性,可望应用于宽范围的两相湍流燃烧预报.

参考文献:

- [1] Spalding D B. The combustion of liquid fuels[J]. Symposium (International) on Combustion, 1953, 4(1): 847-864.
- [2] ZHOU Lixing. Studies on evaporation and combustion of single droplet and spray combustion[D]. Saint-Petersburg, Russia: Saint-Petersburg State Polytechnical University, 1961.
- [3] Chiu H H, Liu T M. Group combustion of liquid droplets[J]. Combustion Science and Technology, 1977, 17(3/4): 127-142.
- [4] Chiu H H, Kim H Y, Croke E J. Internal group combustion of liquid droplets[J]. Symposium (International) on Combustion, 1982, 19(1): 971-980.
- [5] Kuo K K. Principles of combustion[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [6] Russo S, Gomez A. Physical characterization of laminar spray flames in the pressure range 0.1–0.9 MPa[J]. Combustion and Flame, 2006, 145(1/2): 339-356.
- [7] Allen M G, McManus K R, Sonnenfroh D M. PLIF imaging measurements in high-pressure spray flame combustion[R]. AIAA 94-2913, 1994.
- [8] Tsushima S, Saitoh H, Akamatsu F, et al. Observation of combustion characteristics of droplet clusters in a premixed-spray flame by simultaneous monitoring of planar spray images and local chemiluminescence[J]. Symposium (International) on Combustion, 1998, 27(2): 1967-1974.
- [9] Chiu H H. Advances and challenges in droplet and spray combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4/5/6): 381-416.
- [10] Borghi R. Background on droplets and sprays[M]// Manna M, Vandromme D, Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Combustion and Turbulence in Two-Phase Flows, Lecture Series 1996-02. Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1996.

- [11] Chigier N A, McCreath C G. Combustion of droplets in sprays[J]. *Acta Astronautica*, 1974, 1(5/6): 687-710.
- [12] Beck C H, Koch R, Bauer H J. Investigation of the effect of incomplete droplet prevaporization on NO_x emissions in LDI combustion systems[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(5): 051504.
- [13] Chiu H H. A new droplet model for spray combustion[R]. AIAA 95-2427, 1995.
- [14] Chigier N A. Group combustion models and laser diagnostic methods in spray[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 51(2): 127-139.
- [15] ZHOU Lixing. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion[M]. Florida: CRC Press, 1993.
- [16] Vieille B, Chauveau C, Chesneau X, et al. High-pressure droplet burning experiments in microgravity[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(1): 1259-1265.
- [17] WANG Fang, ZHOU Lixing, XU Chunxiao. Large-eddy simulation of correlation moments in turbulent combustion and validation of the RANS-SOM combustion model[J]. *Fuel*, 2006, 85(9): 1242-1247.
- [18] WANG Fang, ZHOU Lixing, XU Chunxiao, et al. DNS-LES validation of an algebraic second-order-moment combustion model[J]. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 2009, 55(6): 523-532.
- [19] Friedman J A, Renksizbulut M. Investigating a methanol spray flame interacting with an annular air jet using phase-Doppler interferometry and planar laser-induced fluorescence[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117(4): 661-684.
- [20] Kim W T, Huh K Y, Friedman J A, et al. Numerical simulation of a steady hollow-cone methanol spray flame within an annular air jet[J]. *Combust Sci Technol*, 2001, 171(1): 119-139.