两相燃烧的大涡模拟

周力行

清华大学工程力学系, 北京 100084

E-mail: zhoulx@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013-04-19; 接受日期: 2013-06-21

国家自然科学基金(批准号: 51266008)资助项目

摘要 两相燃烧大涡模拟研究正在取得迅速进展. 和雷诺平均模拟相比, 大涡模拟可以给出流动和火焰的瞬态结构, 并且很多情况下可以给出比雷诺平均模拟更准确的统计结果. 湍流燃烧大涡模拟的一个关键问题是亚网格模型, 特别是燃烧模型. 不同研究者提出了或者应用了不同的燃烧模型, 但是有的模拟结果缺乏仔细的实验验证, 有的统计结果和实验不符合. 提出了二阶矩(SOM)燃烧模型, 分别成功地用于气体湍流燃烧和液雾燃烧的大涡模拟, 显示其优于其他模型. 并对近年来气体燃烧、液雾燃烧、煤粉燃烧和油滴燃烧大涡模拟的研究给出了简要的综述.

关键词

大涡模拟
液雾燃烧
煤粉燃烧
油滴燃烧

1 引言

两相燃烧的大涡模拟(large-eddy simulation, LES)研究正在取得迅速进展, 被认为是未来有前途的工程中第二代 CFD 数值模拟工具. 和雷诺平均模拟(RANS 模拟)相比, LES 可以给出流动和火焰的瞬态结构, 并且在不少情况下可以给出比 RANS 模拟更准确的统计结果. LES 的关键问题之一是亚网格模型, 特别是亚网格燃烧模型. 在 LES 所用的燃烧模型方面, 不同研究者采用了不同的模型, 例如层流火焰面模型, EBU(EDC)模型, G 方程模型, 线性涡模型, 过滤的概率密度(FDF)模型, 加厚火焰模型等. 但是在不少情况下, 这些研究的统计结果缺乏仔细的燃烧热态实验的检验. 在有些情况下, 其统计结果和实验结果不符合. 因此 LES 的燃烧模型有待进一步研究. 本文作者提出了二阶矩(SOM)燃烧模型, 成功地用于气体燃烧和两相燃烧的大涡模拟, 显示其优于其他模型. 本文中对作者及其同事们近年来在气体燃烧、

液雾燃烧、煤粉燃烧和油滴燃烧大涡模拟取得的研究成果给出了简要的综述.

2 气体湍流燃烧的大涡模拟

对本研究组测量的甲烷-空气旋流扩散燃烧分别用 Smagorinsky-Lilly 亚网格应力模型, 二阶矩(SOM)亚网格燃烧模型和 EBU 燃烧模型进行了大涡模拟^[1], 并且用雷诺应力湍流模型和 SOM 燃烧模型进行 RANS 模拟. 对 LES 统计结果和 RANS 模拟结果进行了实验检验.

气体湍流燃烧大涡模拟过滤后的连续、动量、组分和能量方程是

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

引用格式: 周力行. 两相燃烧的大涡模拟. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 41–49

Zhou L X. Large-eddy simulation of two-phase combustion (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 41–49, doi: 10.1360/092013-239

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \bar{Y}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{Y}_s) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_j} \right) - \bar{w}_s - w_{sgs} - \frac{\partial g_{sgs}}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{h} \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_{sgs}}{\partial x_j}. \quad (4)$$

对其中的亚网格应力用 Smagorinsky-Lilly 模型, 即

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &\equiv \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad \tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \mu_t \bar{S}_{ij}, \\ \bar{S}_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|, \quad |\bar{S}| \equiv \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}, \end{aligned}$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}), \quad C_s = 0.1.$$

对亚网格物质流和热流用梯度模拟, 即

$$g_{sgs} = \rho (u_j Y_s - \bar{u}_j \bar{Y}_s) = \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_j}, \quad (5)$$

$$q_{sgs} = \rho (u_j T - \bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}. \quad (6)$$

过滤后的反应率是

$$\bar{w}_s = \bar{K} \bar{Y}_1 \bar{Y}_2, \quad \bar{K} = B \rho^2 \int \exp(-E/RT) p(T) dT. \quad (7)$$

对亚网格反应率用二阶矩亚网格(SOM-SGS)燃烧模型, 亚网格反应率反映了小尺度的温度和浓度脉动对反应率的影响, 就是

$$\begin{aligned} w_{sgs} &= \bar{w}_s \left(\frac{\bar{Y}_1 \bar{Y}_2'}{\bar{Y}_1 \bar{Y}_2} + \frac{\bar{K}' \bar{Y}_1'}{\bar{K} \bar{Y}_1} + \frac{\bar{K}' \bar{Y}_2'}{\bar{K} \bar{Y}_2} \right), \\ \overline{\phi \phi} &= c \mu_t \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \right) / \rho / \left(\frac{a}{\tau_r} + \frac{(1-a)}{\tau_c} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

其中 Φ , Ψ , ϕ 和 ϕ 分别代表 Y_1 , Y_2 和 K 的过滤值和脉动值.

$$\tau_r = 1/|\bar{S}|, \quad \tau_c = \left[B \rho (\bar{Y}_{O_2} + \beta \bar{Y}_{CH_4}) \exp(-\frac{E}{RT}) \right]^{-1}.$$

LES 中的 EBU 模型是

$$\bar{w}_s + w_{sgs} = c_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ \bar{Y}_{CH_4}, \frac{\bar{Y}_{O_2}}{\beta}, c_2 \frac{\bar{Y}_p}{1+\beta} \right\}, \quad (9)$$

其中的湍流脉动频率 ε/k 用亚网格值代替, 即 $\varepsilon/k = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$, 因此有

$$\bar{w}_s + w_{sgs} = c_1 \rho |\bar{S}| \min \left\{ \bar{Y}_{CH_4}, \frac{\bar{Y}_{O_2}}{\beta}, c_2 \frac{\bar{Y}_p}{1+\beta} \right\}. \quad (10)$$

甲烷-空气燃烧层流反应动力学的 Arrhenius 表达式是

$$w_{fu} = 1.0 \times 10^{10} \rho^2 Y_{ox} Y_{fu} \exp(-1.84 \times 10^4 / T). \quad (11)$$

对三维大涡模拟, 网格尺寸为 1~2 mm, $L \times D = 500$ mm $\times$ 120 mm 的计算域内总的网格数为 839595. 数值方法上采用压力-速度修正的 PISO 算法, 对时间项用二阶隐式差分格式, 对于对流项和扩散项用中心差分格式. 进口条件由实验确定, 出口条件为充分发展流动条件. 在近壁网格点用壁面函数近似.

分别用二阶矩亚网格燃烧模型(LES-SOM)和 EBU 燃烧模型(LES-EBU)进行了大涡模拟^[1]. 所给出的统计平均温度分布及其和实验值的对比见图 1. 由图 1 可见, LES-SOM 的模拟结果和实验值符合很好, 而 LES-EBU 的模拟结果显著地高估了燃烧的温度, 这是因为, 实际上 LES-EBU 的模拟没有考虑有限反应动力学.

SOM-SGS 模型的物理意义是反映了温度和浓度小尺度脉动对反应率的影响, 它有明显的作用, 不能被忽略, 而 LES-EBU 模型不能反映这个作用. 图 2 是 LES-SOM 给出的瞬态涡量云图. 旋流燃烧的大涡结构不同于等温旋流流动的, 也不同于射流燃烧情况下的.

图 3 和 4 分别是 LES-SOM 和 LEA-EBU 给出的瞬态温度云图. 把温度云图和涡量云图比较, 可以看到火焰位于高剪切区域, 大涡结构强化了化学反应. 旋流火焰结构和射流火焰的或者无旋分离流动火焰的不同, 旋流增大了火焰厚度. LES-SOM 给出的瞬态高温区比 LES-EBU 的宽.

3 乙醇-空气液雾燃烧的大涡模拟

本文作者及其同事对乙醇-空气液雾两相燃烧进行了大涡模拟^[2], 采用亚网格动能方程(SGS-k-equation)应力模型, 过滤的有限反应率(FR)燃烧模型和二阶矩亚网格(SGS-SOM)燃烧模型. 用文献中详细实验数据检验 LES 统计结果, 通过瞬态结果显示液雾燃烧的详细流动结构和火焰结构.

过滤后的液雾-空气两相燃烧的气体连续、动量、能量和组分方程是

图 1 甲烷-空气旋流扩散燃烧统计平均温度

图 2 瞬态涡量云图(LES-SOM)

图 3 瞬态温度云图(LES-SOM)

图 4 瞬态温度云图(LES-EBU)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = \bar{S}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \right) \\ & - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \sum_k \overline{\frac{\rho_k}{\tau_{rk}} (u_{ki} - u_i)} + \bar{u}_i \bar{S}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho \bar{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{h} \bar{u}_j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_{jsgs}}{\partial x_j} - \bar{q}_r + \bar{S}_h, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \bar{Y}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{Y}_s) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_j} \right) - \bar{w}_s - w_{sgs} - \frac{\partial g_{jsgs}}{\partial x_j} + \bar{\alpha}_s \bar{S}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$.

对亚网格应力用亚网格动能方程 (SGS-k-equation) 模型, 即

$$\tau_{ij} = -2\rho\nu_t(\bar{S}_{ij} - \frac{1}{3}\bar{S}_{kk}\delta_{ij}) + \frac{2}{3}\rho k^{sgs}\delta_{ij}, \quad (16)$$

其中的亚网格动能取决于

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{\rho} k^{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u} k^{sgs}}{\partial x_j} \\ & = P^{sgs} - D^{sgs} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_j} \right) \bar{W}^s, \end{aligned} \quad (17)$$

$$k^{sgs} = \frac{1}{2} \overline{(u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)}, \quad (18)$$

其中 k^{sgs} 是亚网格动能, $\nu_t = C_\nu (k^{sgs})^{1/2} \bar{\Delta}$ 是亚网格黏性, $\bar{\Delta}$ 是网格尺寸, P^{sgs} 是剪切产生项, $\bar{W}^s$ 是液雾的存在引起的产生或耗散项, $D^{sgs} = C_\varepsilon (k^{sgs})^{3/2} / \bar{\Delta}$ 是黏性耗散项. C_ν 和 C_ε 是经验常数, 取为 0.067 和 0.0916.

对亚网格热流和物质流用梯度模拟, 即

$$q_{jsgs} = \rho (\overline{u_j T} - \bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}, \quad (19)$$

$$g_{jsgs} = \rho (\overline{u_j Y_s} - \bar{u}_j \bar{Y}_s) = \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_j}. \quad (20)$$

对气相燃烧, 用两种燃烧模型. 一种模型是, 只考虑过滤后的有限反应率 (LES-FA), 忽略亚网格反应率, 即取 $w_{sgs} = 0$. 对乙醇-氧反应取一步统观反应机理

反应动力学 Arrhenius 表达式 w_s 是

$$w_{fu} = 8.345 \times 10^9 \rho^2 Y_{fu} Y_{ox} \exp[-1.26 \times 10^8 / (RT)]. \quad (22)$$

第二个燃烧模型中, 同时考虑过滤的反应率和亚网格反应率 $\bar{w}_s, w_{sgs}$. 过滤后的反应率是

$$w_{fu} = B \rho^2 Y_{ox} Y_{fuel} \exp(E / RT). \quad (23)$$

对亚网格反应率, 用作者提出的二阶矩燃烧模型 (LES-SOM). 它反映了温度和组分浓度的小尺度脉动对反应率的作用.

$$w_{sgs} = \bar{w}_s \left(\frac{\overline{Y_1 Y_2'}}{\bar{Y}_1 \bar{Y}_2} + \frac{\overline{K Y_1'}}{\bar{K} \bar{Y}_1} + \frac{\overline{K Y_2'}}{\bar{K} \bar{Y}_2} \right),$$

$$\overline{\phi \phi} = c \mu_t \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \right) / \rho / \left(\frac{a}{\tau_r} + \frac{(1-a)}{\tau_c} \right), \quad (24)$$

其中 ϕ, φ, Φ 和 Ψ 分别代表 Y_1, Y_2 和 K 的脉动值和过滤值. 脉动时间和反应时间是

$$\tau_r = 1 / |\bar{S}|, \quad \tau_c = \left[B \rho (\bar{Y}_{ox} + \beta \bar{Y}_{fuel}) \exp\left(-\frac{E}{R\bar{T}}\right) \right]^{-1}.$$

辐射传热的 P1 模型是

$$-\bar{q}_r = aG - 4a\sigma \bar{T}^4, \quad (25)$$

其中 σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, a 是吸收系数, G 是入射通量.

对液雾考察了两种情况, 一种是均匀粒径的液雾, 另一种是粒径不均匀的液雾, 其初始粒径分布划分成 100 个组. Sauter 平均粒径的定义是

$$r_{32} = \frac{\int r^3 dr}{\int r^2 dr} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} r_i^3}{\sum_{i=1}^{n_p} r_i^2}.$$

离散相拉氏模拟包括以下的常微分方程.

油滴动量方程

$$\frac{dx_{d,i}}{dt} = v_{d,i}, \quad \frac{dv_{d,i}}{dt} = \frac{F_{i,d}}{m_d}, \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{F_{i,d}}{m_d} &= \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{V_{rel}}{r_d} (u_i + u'_{p,i} - v_{d,i}) C_D, \\ V_{rel} &= |\tilde{u}_i + u'_{p,i} - v_{d,i}|. \end{aligned}$$

考虑气体流场中油滴形状的变化, 用一个 TAB 模型, 因此, 有

$$C_D = C_{D,sphere} (1 + 2.632y),$$

其中 $C_{D,sphere}$ 是球形油滴的阻力.

油滴能量方程为

$$m_d C_l \frac{dT_d}{dt} = 4\pi r_d^2 Q_d - \dot{m}_d L(T_d). \quad (27)$$

油滴蒸发方程为

$$\begin{aligned} \frac{dm_d}{dt} &= 4\pi \rho_l r_d^2 \frac{dr_d}{dt}, \\ \frac{dr_d}{dt} &= \frac{r_d^{v+1} - r_d^v}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中 r_d^{v+1} , r_d^v 分别是油滴蒸发前和蒸发后的直径. 对油滴蒸发中的传热传质用考虑 Stefan 流后的 Ranz-

Marshall 定律. 蒸发后油滴的直径是

$$\left(r_d^{v+1}\right)^2 = \max \left\{ 0.0, \left(r_d^v\right)^2 - \Delta t_{\text{evp}} \frac{(\rho D)_{\text{air}}^v}{\rho_d} \right. \\ \left. \times V_{\text{sh}}^v \frac{\ln \left[1 + B_d \left(T_d^v\right) \right] + \ln \left[1 + B_d \left(T_d^{v+1}\right) \right] }{2} \right\}, \quad (29)$$

其中 $V_{\text{sh}}^v = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc_d^{1/3}$. Re_d 是油滴的 Reynolds 数, Sc_d 是油滴的 Schmidt 数.

三维 LES 中对 $h=160 \text{ mm} \times D=200 \text{ mm}$ 的计算域, 网格尺寸为 1.3 mm , 网格数为 600000. 数值方法是 SIMPLE 算法. 时间项为二阶隐式格式, 对流项和扩散项为二阶迎风格式. 边界条件中取均匀进口气体速度, 油滴进口速度、喷雾角和浓度分布按实验值. 出口条件为充分发展流动条件.

模拟对象是文献[3]测量的乙醇-空气燃烧装置. 所得到的气体统计平均温度见图 5. 显然, LES-SOM 的结果比 LES-FA 的结果好, 说明小尺度的亚网格温度和浓度脉动对燃烧有影响, 不能忽略. 例如 LES-SOM 模拟预报出实验中观测到的 $r=0.016 \text{ m}$ 处的温度峰值, 而 LES-FA 模拟则不能给出这个峰值. 另一方面, LES-SOM 的结果比用最复杂的 PDF 输运方程的 RANS 模拟结果^[3]和实验结果的符合程度要好得多. 后者严重地低估了气体温度. 总体上看, 大涡模拟结果优于雷诺平均模拟的结果.

图 6 给出油滴的统计平均温度. 模拟值和实验值符合良好. 有一些较小的差别, 可能是由于实验中液雾进口条件的某些不确定性造成的.

图 7 是预报的瞬态涡量云图. 在进口燃料射流的剪切区域产生了拟序结构. 然后在下游处增强为大尺度涡, 最后逐渐减弱. 瞬态气体温度云图见图 8. 可以看到, 在高剪切区有高温形成, 而且有分散的火

图 5 乙醇-空气液雾燃烧的统计平均气体温度

图 6 统计平均的油滴温度

图 7 瞬态涡量云图

图 8 瞬态气体温度云图

焰小岛, 显示了油滴群燃烧的存在.

4 旋流煤粉燃烧的大涡模拟

最近国外对煤粉燃烧的大涡模拟进行了研究. 但是有的研究者报导的流化床中煤燃烧的所谓 DEM-LES 没有给出详细的流动和火焰结构, 而且网格尺寸很大, 以致其模拟更像是非定常的雷诺平均

模拟(URANS), 而不是真正的 LES. 有的研究者报道了煤粉-空气射流的 LES, 但是模拟结果缺乏仔细的实验检验. 尚未见到旋流煤粉燃烧大涡模拟的研究报导. 本文作者及其同事们用 Smagorinsky-Lilly 亚网格应力模型和 EBU 气体燃烧模型, 以及煤颗粒挥发和焦炭燃烧模型, 对旋流煤粉燃烧进行了大涡模拟^[4], 将 LES 统计结果用文献中实验数据进行了检验. LES 瞬态结果用以研究湍流和火焰结构及其相互作用.

煤粉燃烧大涡模拟所用的过滤后的气体连续、动量、能量和组分方程和上一节中的相同. 对亚网格应力用 Smagorinsky-Lilly 模型封闭. 对气体燃烧用 EBU 模型. 对亚网格热流和物质流用梯度模拟. 对颗粒挥发用双方程模型, 对焦炭燃烧用扩散-动力燃烧模型. 拉氏的颗粒动量和能量方程也和上一节中的类似.

在三维的计算域 $L=600$ mm, $D=200$ mm 中取网格尺寸 1~2 mm, 网格数为 1943214. 对数值方法用 PISO 的压力-速度修正算法, 对时间项、对流项和扩散项全用二阶隐式格式. 出口处边界条件采用压力出口条件. 近壁网格点中用壁函数近似.

LES 给出的统计平均的气体温度、二氧化碳和氧浓度见图 9~11. 可以发现, 和气体燃烧的情况

图 9 煤粉燃烧的气体温度

图 10 煤粉燃烧的 CO_2 浓度

图 11 煤粉燃烧的氧浓度

不同, 在煤粉燃烧的 LES 中, EBU 燃烧模型的效果还可以. 这是因为煤粉燃烧中焦炭燃烧的异相反应对放热和组分的变化起主要作用, 而挥发分气体燃烧起次要作用, 因此对气体燃烧模型的要求要宽松些.

图 12 给出瞬态涡量云图. 进口处涡量较高, 呈条带状. 下游处涡量较低. 近壁处有波纹状的拟序结构. 图 13 是瞬态颗粒浓度图. 大量的颗粒聚集在拟序结构周围. 下游处颗粒分布趋于均匀, 并且在近壁处浓度略高. 图 14 是瞬态气体温度云图. 高温区位于高颗粒浓度和拟序结构附近. 煤燃烧的高温区的发展比旋流气体燃烧的快, 这是因为进口处涡量比纯气体燃烧的更强, 该处颗粒释放的挥发份和 CO 的燃烧很强烈.

5 油滴燃烧的大涡模拟

单个油滴的蒸发和燃烧已经进行了多年的研究.

经典的球形折算薄膜理论以及改进的二维轴对称解析解得到一些对工程有用的总体规律, 但是对油滴周围的流动和火焰结构缺乏仔细的了解. 作者和合作者对单个乙醇油滴在空气中的蒸发和燃烧进行了大涡模拟^[5]. 模拟结果给出的瞬态火焰结构显示出三种燃烧状态——全包火焰、半包火焰和尾部火焰(图 15), 与作者在 20 世纪 60 年代的观测^[6]以及文献[7]用 PLIF 观测的结果(图 16)定性一致. 图 17 和 18 分别给出了 LES 给出的和文献[7]用 PLIF 观测的油滴燃料蒸气浓度云图, 二者也是定性一致, 而且显示出有燃烧时的浓度分布比无燃烧时的分布窄而长. 最有意思的是, 模拟结果给出了有蒸发和燃烧时的油滴阻力规律, 见表 1. 它不但比按照冷颗粒的 Wallis-Kliachko 公式的小得多, 也比按照经典的简化理论给出的、考虑质量变化引起的阻力减小系数 $\ln(1+B)/B$ 后的小得多.

图 12 旋流煤粉燃烧的瞬态涡量云图

图 13 旋流煤粉燃烧的瞬态颗粒浓度云图

图 14 旋流煤粉燃烧的瞬态温度云图

图 15 油滴燃烧的瞬态火焰结构(LES)
(a) $u=1$ m/s; (b) $u=2$ m/s; (c) $u=10$ m/s

图 16 PLIF 测量的油滴燃烧瞬态火焰结构^[7]
(a) $u=1$ m/s; (b) $u=2$ m/s; (c) $u=10$ m/s

图 17 油滴燃料蒸气瞬态浓度云图(LES)
(a) 无燃烧; (b) 有燃烧

图 18 PLIF 测量的油滴燃料蒸气瞬态浓度云图^[7]
(a) 无燃烧; (b) 有燃烧

表 1 油滴的阻力系数

V_{vel} (m/s)	C_{D0} (Wallis-Klichko 公式)	C_D (LES 模拟)	C_{D0} $\ln(1+B)/B$
0.2	3.950	1.100	2.370
1.0	1.960	0.344	1.176
4.0	0.963	0.235	0.576

6 结论

- 1) 大涡模拟中 SOM-SGS 燃烧模型比 EBU-SGS 燃烧模型好.
- 2) SOM-SGS 燃烧模型在两相燃烧大涡模拟中也显示了其优越性.
- 3) 在煤粉燃烧大涡模拟中 EBU 燃烧模型的效果尚可.
- 4) 油滴燃烧大涡模拟给出了和实验观测一致的瞬态火焰结构.
- 5) 有蒸发和燃烧的油滴阻力不但比冷油滴的小,而且比经典的变质量阻力减小规律给出的小.

参考文献

- 1 Hu L Y, Zhou L X, Large-eddy simulation of a swirling diffusion flame using a SOM SGS combustion model. *Numer Heat Tr*, 2006, B50: 41–58
- 2 Li K, Zhou L X, Chan C K. Studies of the effect of spray inlet conditions on flow and flame structures of ethanol-spray combustion by large-eddy simulation. *Numer Heat Tr*, 2012, A62: 44–59
- 3 Ge H W, Duwel I, Kronemayer H. Laser-based experimental and Monte Carlo PDF numerical investigation of an ethanol-air spray flame. *Combust Sci Tech*, 2008, 180: 1529–1547
- 4 Hu L Y, Zhou L X, Luo Y H. Measurements and simulation of swirling coal combustion. *Particuology*, 2013, 11: 189–197
- 5 Li K, Zhou L X. Large-eddy simulation of a combustng droplet, Abstract Book. In: 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, 2012. 223
- 6 周力行. 燃烧理论和化学流体力学. 北京: 科学出版社, 1986
- 7 Mercier X, Orain M, Grisch F. Investigation of droplet combustion in strained counter-flow diffusion flames using planar laser-induced fluorescence. *Appl Phys*, 2007, B88: 151–160

Large-eddy simulation of two-phase combustion

ZHOU LiXing

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

Large-eddy simulation (LES) of two-phase combustion is under its rapid development. In comparison with the Reynolds-averaged Navier-Stokes modeling (RANS modeling) LES can give instantaneous flow and flame structures and in many cases give more accurate statistical results. One of the key problems in LES is the sub-grid scale (SGS) models, in particular combustion models. Different investigators proposed or used different models. However, some modeling results are lack of detailed experimental validation, or some statistical results are not in agreement with experimental results. A second-order moment (SOM) combustion model was proposed by the present author and his colleagues, and it was successfully used in LES of gas combustion and two-phase combustion, exhibiting its superiority over other models. In this paper a brief review of our systematic studies in LES of gas combustion, spray combustion, coal combustion and droplet combustion is presented.

large-eddy simulation, spray combustion, coal combustion, droplet combustion

doi: 10.1360/092013-239