

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.004

基于 VLES 的正十二烷喷雾数值模拟研究

周涛涛¹, 陈江锋¹, 韩省思², 孟顺¹, 张郁¹

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了研究超大涡模拟(very large eddy simulation, VLES)方法预测高压喷雾发展过程的能力, 文章采用 VLES 方法耦合离散相模型(discrete phase model, DPM)对桑迪亚国家实验室“Spray A”正十二烷喷雾射流进行数值研究。在与实验结果进行对比的基础上, 进一步比较 VLES 方法与分别采用雷诺时均(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)方法和大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法得到的预测结果。研究结果表明, VLES 方法耦合 DPM 能够较准确地预测出燃油雾化的发展过程, 在贯穿距、局部物理量以及喷雾形态上的预测结果优于 RANS 方法, 且计算量相较于 LES 方法大大降低。

关键词: 超大涡模拟(VLES); 离散相模型(DPM); 雾化; 贯穿距

中图分类号: V231.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)09-1176-08

Numerical simulation of *n*-dodecane spray based on VLES

ZHOU Taotao¹, CHEN Jiangfeng¹, HAN Xingsi², MENG Shun¹, ZHANG Yu¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the ability of very large eddy simulation(VLES) method to predict the development process of high-pressure spray, the VLES method coupled with discrete phase model (DPM) was used to numerically study the Spray A *n*-dodecane spray jet at Sandia National Laboratories. On the basis of comparison with the experimental results, the VLES results are further compared with the prediction results obtained by the Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation(RANS) method and large eddy simulation(LES) method respectively. The results show that VLES method coupled with DPM can accurately predict the development process of fuel atomization, and the prediction results in penetration, local physical quantities and spray morphology are better than those of RANS method, and the calculation amount is significantly lower than that of LES method.

Key words: very large eddy simulation(VLES); discrete phase model(DPM); atomization; penetration

燃料喷雾过程对燃油发动机的燃烧和排放特性起着至关重要的影响, 长期以来一直是内燃机领域的研究热点。数值模拟以其经济性和强大的信息获取能力, 越来越成为研究喷雾发展过程的重要手段^[1-2]。但喷雾是一个极其复杂的两相流问题, 涉及到气液两相间的相互耦合以及液滴之

间的碰撞、破碎和蒸发过程, 这给喷雾过程的精确模拟带来了很大困难。近年来, 美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories) 小组发动机燃烧网络(Engine Combustion Network, ECN)^[3] 针对柴油喷雾和汽油喷雾开展了代号为 Spray A 和 Spray G 的系列喷雾实验研究, 为喷

收稿日期: 2023-02-14; **修回日期:** 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51906055; 52106138); 中国博士后科学基金资助项目(2021M690181); 安徽省自然科学基金资助项目(2008085ME166)和合肥工业大学学术新人提升 B 计划资助项目(JZ2021HG TB0085)

作者简介: 周涛涛(1992—), 男, 山东菏泽人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师;

韩省思(1981—), 男, 河南泌阳人, 博士, 南京航空航天大学教授, 博士生导师;

张郁(1989—), 男, 河南洛阳人, 博士, 合肥工业大学副研究员, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: yuzhang2020@sina.com.

雾冷态流场和燃烧场的数值模拟提供了准确的标定数据^[4],使喷雾雾化及燃烧过程的数值模拟研究得到了快速发展。

在喷雾过程的数值模拟研究中,目前研究者多采用雷诺时均(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)方法^[5-7]。RANS 方法求解的是经过平均的流动控制方程,并以湍流模型模化脉动信息对平均量的影响,预测精度较差且得不到真实的瞬态流场。也有一些研究者采用了大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法^[8-10]对喷雾过程进行数值研究。LES 方法通过滤波手段过滤掉流场中的小尺度脉动,建立亚格子应力模型模拟小尺度脉动对可解尺度的影响,在对复杂流场的模拟中取得了不错的效果。虽然使用 LES 方法模拟喷雾过程可以得到较好的结果,但是 LES 方法对网格尺度的要求非常严格,使用比较粗糙的网格时会导致计算结果偏差较大。相关研究表明,采用 LES 方法计算喷雾将消耗相当大的计算资源。

为了在不降低计算精度的前提下使计算量减少,研究者发展了不同类型的联合 RANS 和 LES 的计算方法,如文献^[11]提出的分离涡模拟方法(detached eddy simulation, DES)、文献^[12]提出的尺度自适应模拟方法(scale adaptive simulation, SAS)以及近些年发展迅速的自适应湍流模化方法超大涡模拟(very large eddy simulation, VLES)^[13-14]和支持各滤波尺度的部分平均方法(partially-averaged Navier-Stokes, PANS)^[15]等。这些对于湍流的计算方法都在不同的领域中得到了应用,其中自适应湍流模化方法基于对当地可解尺度和湍流尺度的判断,通过施加分辨率函数实现当地 RANS、LES、直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)之间的切换。针对湍流场中存在着复杂尺度变化的特性,自适应湍流模化方法能够根据当地尺度差异自适应地选择合适的求解方法,不仅提高了预测精度,也大大降低了对网格尺度的要求。

目前采用 VLES 对高压喷雾射流的研究还很少。本文采用 VLES 方法耦合离散相模型(discrete phase model, DPM)对桑迪亚国家实验室 Spray A 喷雾流场进行数值模拟研究,验证 VLES 耦合 DPM 方法对燃油高压喷雾过程的预测可靠性,并与 VLES、RANS、LES 方法的预测效果进行比较。

1 数值模型

1.1 湍流模型 VLES $k-\omega$ 模型

本文采用文献^[13]中提出的基于标准的 $k-\omega$ 的 VLES 模型,通过引入一个当地分辨率控制函数 F_r 对一般的 RANS 模型的湍流黏度 μ_t 进行修正,控制函数 F_r 的形式为:

$$F_r = \min \left\{ 1.0, \left[\frac{1.0 - \exp(-\beta L_c/L_k)}{1.0 - \exp(-\beta L_i/L_k)} \right]^n \right\} \quad (1)$$

其中, L_c 、 L_i 、 L_k 分别为截断长度尺度、积分长度尺度、Kolmogorov 长度尺度。这些尺度的计算公式为:

$$L_c = C_x (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3},$$

$$L_i = \frac{k^{3/2}}{\beta_1^* k \omega}, \quad L_k = \frac{v^{3/4}}{\beta_1^* k \omega^{1/4}} \quad (2)$$

根据当地网格尺寸使 F_r 值在 0~1.0 之间变化,从而控制湍流的模化程度,自适应地选择 RANS、LES、DNS 模型进行计算。 F_r 趋向于 0, 这些区域模化湍流尺度占总湍流尺度的比例可以忽略,此时表现为 DNS 模型; F_r 趋向于 1.0, 此时恢复到 RANS 模型; F_r 值在 0~1.0 之间,表明此时网格尺度能捕捉到部分湍流尺度,只需要模化一部分湍流尺度,此时表现为 LES 模型。

在当前的 VLES $k-\omega$ 模型中,模型中湍动能 k 和湍流耗散率 ω 的输运方程与标准 $k-\omega$ 模型中的输运方程完全相同,由下式给出:

$$\frac{d\rho k}{dt} = P_k - \beta_1^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{d\rho \omega}{dt} = \frac{\gamma \omega}{k} P_k - \beta_2^* \rho k \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\mu_t = F_r \frac{\rho k}{\omega} \quad (5)$$

其中, P_k 为湍动能的生成项。 P_k 的计算公式为:

$$P_k = \mu_t |S|^2 \quad (6)$$

其中, $|S| = \sqrt{2S_{ij}^2}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ 。

公式中模型参数见表 1 所列。

表 1 VLES $k-\omega$ 模型参数

参数	数值	参数	数值
β	0.002	β_1^*	0.090
n	2	β_2^*	0.075
C_x	0.61		

1.2 离散相模型

柴油机喷雾过程包含了液滴的喷射、破碎、碰撞和蒸发等复杂的过程,均需要相应的模型来进行模化^[16]。本文以离散相模型 DPM 对液滴的位置、质量、动量以及温度进行追踪求解。在模拟喷雾的过程中,通过积分拉格朗日坐标系下的液滴颗粒微分方程求解离散相液滴的运动轨迹,离散相液滴的运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (7)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (8)$$

其中: u 为流体速度; u_p 为液滴的速度; μ 为流体动力黏度; ρ 为流体密度; ρ_p 为液滴密度; d_p 为液滴颗粒直径; Re 为相对雷诺数; C_D 为曳力系数。方程(7)中右边第 1 项为液滴受到的单位质量曳力,第 2 项为液滴受到的重力作用,第 3 项为液滴受到的其他力的作用。其他作用力包括热泳力、布朗力、Saffman 升力等,本文只考虑虚拟质量力(使颗粒周围流体加速而引起的附加作用力)和压力梯度力的作用。虚拟质量力和压力梯度力的表达式分别为:

$$F_{XV} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt}(u - u_p) \quad (9)$$

$$F_{XG} = \left(\frac{\rho}{\rho_p}\right) u_p \frac{\partial u}{\partial x} \quad (10)$$

对于离散相颗粒的分布,本文采用离散随机游走模型,考虑瞬时湍流速度脉动对颗粒轨迹的影响。在实际过程中,离散相颗粒所需的流场信息由连续相计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)计算网格插值求得,离散相颗粒的质量动量即为能量求解后传递给连续相中的方程求解。对于液滴雾化过程,采用的一次雾化模型为平口喷嘴雾化模型。对于二次雾化模型,考虑到 Taylor 类比破碎(Taylor analogy breakup, TAB)模型适用于低 weber 数的流体运动过程,对于喷雾的液相贯穿距的预测偏小,本文选择 Wave 模型模拟液滴的破碎过程,液滴的蒸发过程采用相平衡模型求解蒸发速率。所选择的喷雾子模型有一次雾化模型(the plain-orifice atomizer)、二次雾化模型(wave)、动力曳力模型(dynamic-drag model)以及液滴蒸发模型(diffusion-controlled)。

1.3 计算域及数值方法

本文计算喷雾射流是桑迪亚国家实验室开展的 Spray A 喷雾实验,实验所用燃料为正十二烷,

燃料从直径为 90 μm 的单孔喷油器喷入边长为 108 mm 的定容立方体空间内。将定容室简化为直径为 40 mm、长度为 80 mm 的圆柱体,喷嘴位置在空间中 Y-X 平面上,定义其所在面喷射方向为 z 轴负方向,喷嘴位置为坐标原点。采用 ICEM 软件基于 o-grid 网格划分方式对几何模型进行网格划分,如图 1 所示。

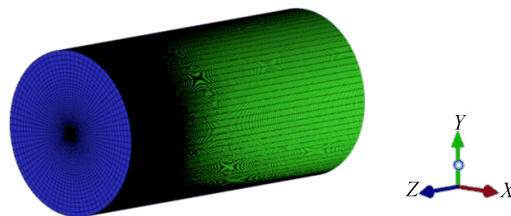


图 1 物理模型的网格划分示意图

在前人研究中已采用 RANS 和 LES 方法对 Spray A 进行了较多的数值计算。文献[17-18]建议使用 RANS 方法和 LES 方法时网格最小尺度分别要达到 250.0 μm 和 62.5~125.0 μm ;在文献[9]的 LES 研究中也对网格收敛性进行了研究,结果表明,最小网格尺寸为 62.5~125.0 μm 时预测结果较为准确。

本文对 VLES 方法进行网格收敛性研究,采用 Mesh1~Mesh4 共 4 套网格,网格最小尺寸为 42.5~125.0 μm 。值得说明的是,本文中网格只在射流核心区 and 剪切层附近进行加密,而在其他区域网格尺度较为稀疏,总的网格数量为 $5.40 \times 10^5 \sim 2.84 \times 10^6$ 。网格信息见表 2 所列。

表 2 网格信息

网格	最小网格尺寸/ μm	网格数量/ 10^6
Mesh1	125.0	0.54
Mesh2	90.0	1.14
Mesh3	62.5	2.16
Mesh4	42.5	2.84

采用 CFD 软件 ANSYS Fluent 进行数值模拟研究。根据 VLES 模型的建立过程,使用 Visual Studio 2017 中 C 语言模块进行用户自定义函数(user defined function, UDF)的编写,将编译好的 UDF 动态地连接到 Fluent 求解器上,并在相应的模型上选择使用。

研究采用针对瞬态问题的基于压力修正法的 PISO(pressure-implicit with splitting of operators)算法,对流项和扩散项均使用二阶迎风格式进行离散,对于时间的推进使用二阶隐式格式推进。

本文对 RANS、LES 以及 VLES 模型均设置

相同的边界条件,射流入口的燃油喷射压力为150 MPa、燃油温度为363 K。定义压力出口边界并对环境条件进行设置:环境温度为900 K;环境压力为6 MPa;环境密度为 22.8 kg/m^3 ;环境气体组分 N_2 、 CO_2 、 H_2O 的体积分数分别为89.71%、6.52%、3.77%。

2 计算结果及分析

2.1 VLES 网格收敛性和实验验证

本节分别采用 Mesh1、Mesh2、Mesh3、Mesh4 这4套网格进行计算,并将计算结果与喷雾蒸汽贯穿距、液相贯穿距以及特征速度值等实验数据进行比较。

将液相贯穿距定义为99%液体质量到喷口的最大距离,而对于蒸汽贯穿距,定义为从喷嘴出口到燃料蒸汽质量分数为其最大值0.1%位置的距离。本文所研究的燃油喷雾的特点是喷射压力高、喷嘴孔径小、喷射速度和质量流量大,能使燃油快速雾化和蒸发,液相贯穿距较小。对于喷雾的发展,从实验结果可以看到,在0.04 ms内液相贯穿距和蒸汽贯穿距达到了8.0 mm,之后观察到蒸汽和液体分离,然后在0.23 ms液相贯穿距基本稳定在10.8 mm左右,气相将继续发展。

VLES方法在不同网格下的喷雾贯穿距预测结果如图2所示。

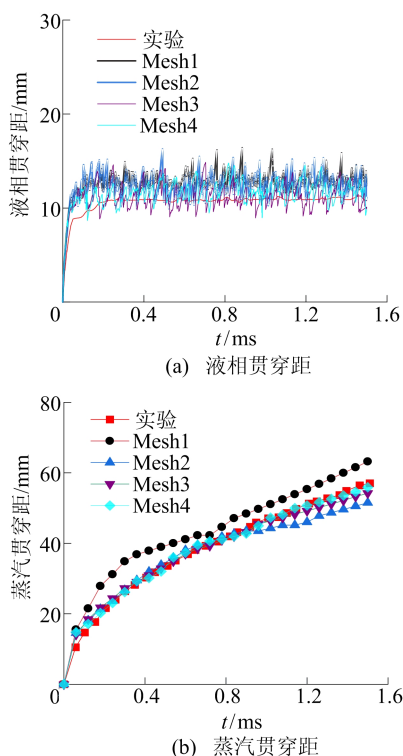


图2 VLES方法在不同网格下的喷雾贯穿距预测结果

从图2可以看出,采用 Mesh1 时即网格数量较少的时候,喷雾场的液相和气相贯穿距的预测结果都比实验结果偏大,随着网格数量的增加和最小网格尺寸的减小,Mesh3 和 Mesh4 所获得结果与实验值很接近,表明采用 Mesh3 对喷雾液相贯穿距和气相贯穿距的预测已经达到比较高的精度。

为进一步探究 VLES 对喷雾流场速度值的计算准确性,选取不同轴线位置上的速度值与实验结果进行比较。

鉴于 VLES 模拟得到的瞬时场速度波动较大,而实验数据是经过多次重复测量后得到的平均值,因此需对同一算例进行多次重复计算再进行系统平均^[17,19]。

本文基于 Mesh3 网格,分别在初始时刻对喷嘴设置不同液滴束数量,进行6次模拟计算,记为 injection1~injection6。在轴线以及喷嘴出口下游轴向方向25 mm($z=25 \text{ mm}$)、35 mm($z=35 \text{ mm}$)、45 mm($z=45 \text{ mm}$)处截取3条直线,将6次计算的结果进行平均处理,并与实验结果进行对比。

VLES $k-\omega$ 模型预测的速度分布云图如图3所示,其中,白线表示4条线的取值范围。

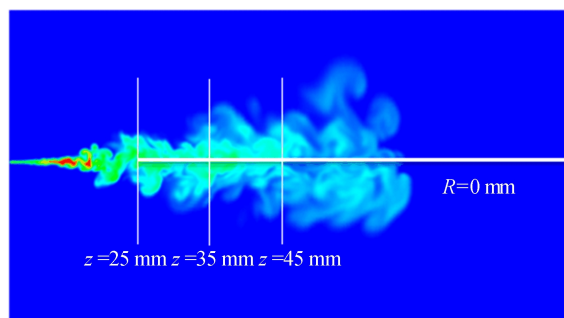


图3 VLES $k-\omega$ 模型预测的速度分布云图

VLES方法在1.5 ms时预测的不同位置径向速度和轴线速度的变化规律如图4所示。图4中:酒红色粗线为VLES计算平均值;灰色方格为实验值。

从图4可以看出:6次模拟计算预测的总体速度变化趋势比较类似,6次模拟结果平均后的速度与实验结果吻合较好;但从径向和轴线速度与实验值的对比来看,越向下游发展,轴线上的模拟结果相对于实验结果预测越低。但总体而言,VLES能较好地预测高压喷雾流场的速度发展过程。

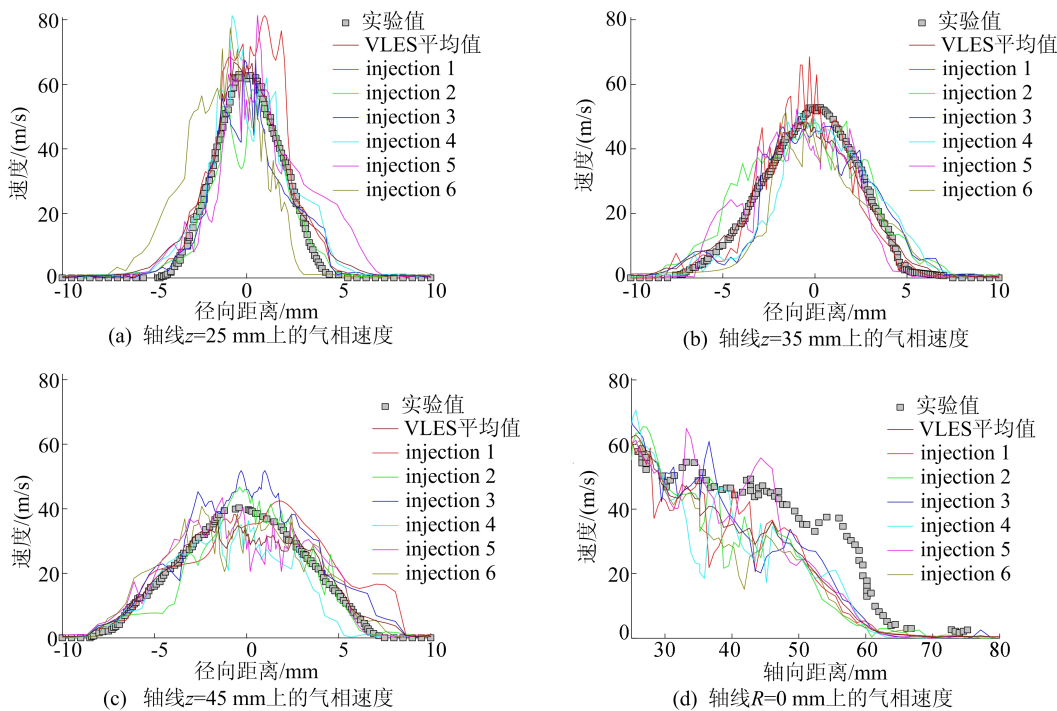


图 4 不同位置径向速度和轴线速度的变化规律

2.2 不同方法预测的结果比较

基于 RANS 和 LES 方法的验证^[10,17-18, 20-22]已有不少学者研究过,使用 RANS 方法时 Mesh3 对本文算例已足够致密,对 RANS 方法的网格独立性验证在此不再单独列出。但采用 LES 方法时对网格尺度要求很高,虽然 Mesh3 网格最小尺度达到了文献[9, 17-18]所建议的网格尺度,但网格只在射流核心区和剪切层附近进行了加密,而在其他区域网格尺度较为稀疏,总的网格数量为 2.16×10^6 ,相对于文献中超过 5×10^6 的 LES 计算网格仍要稀疏不少。本文基于 Mesh3 分别采用 RANS、LES 和 VLES 方法对“Spray A”进行模拟计算,RANS 方法采用两方程模型中的标准 $k-\omega$ 模型,LES 方法采用动态系数 Smagorinsky 模型。

VLES、RANS、LES 方法对喷雾贯穿距的预测结果如图 5 所示。从图 5 可以看出:RANS 和 VLES 预测的液相贯穿距发展规律与实验结果基本一致,并且偏差很小,由于 LES 对于网格和时间步长的要求很高,在此套网格下并不能较好地预测喷雾液相贯穿距,计算结果明显偏高。对于蒸汽贯穿距,可以明显看出,在同一套网格下,VLES 计算结果与实验结果最为接近,明显优于 LES 结果和 RANS 结果。

VLES 和 RANS 方法对不同位置径向速度和轴线速度的计算结果如图 6 所示。图 6 中:酒

红色实线表示 VLES 计算平均值;绿色实线表示 RANS 计算结果;灰色方格表示实验值。

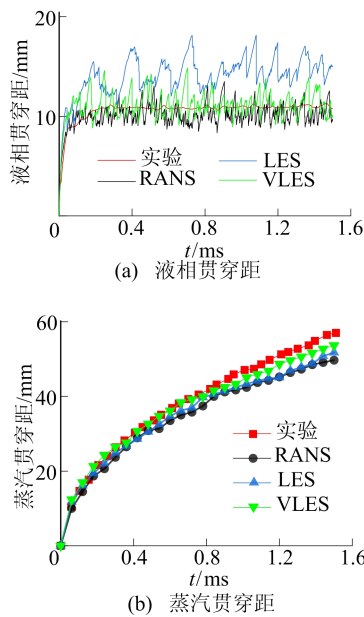


图 5 VLES、RANS、LES 方法对喷雾贯穿距的预测结果

从图 6 可以看出:VLES 和 RANS 计算得到的速度趋势大致与实验数据吻合;但是在上游区域 RANS 计算结果明显偏大,在下游速度又快速衰减,进而造成计算结果相较于实验结果偏小很多;VLES 方法由于采用了分辨率控制函数,对流场速度的预测精度明显得到了提高。

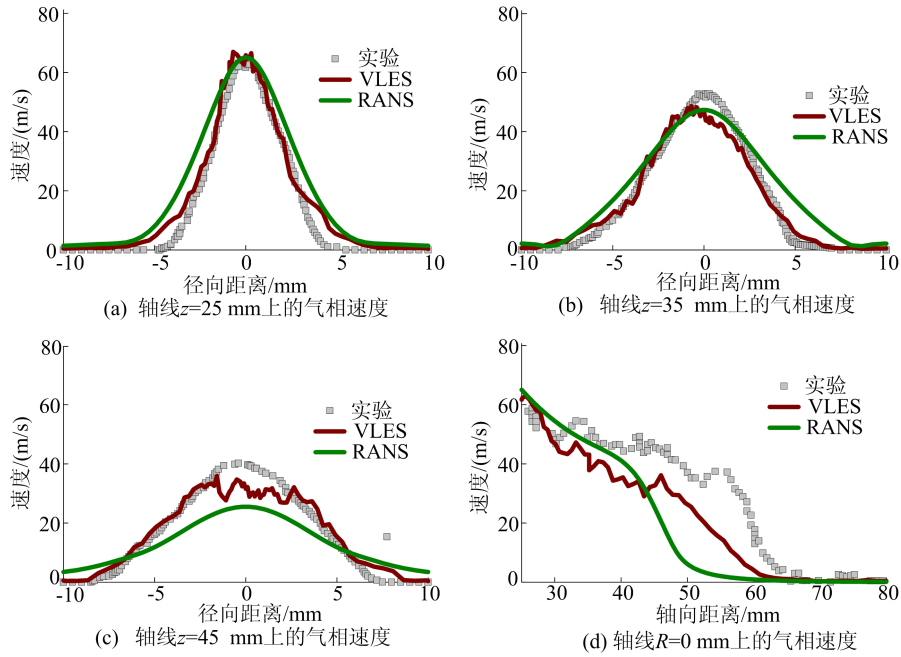


图 6 VLES 和 RANS 方法预测的速度结果

从正十二烷喷雾的蒸汽锥角预测结果可以进一步体现 VLES 相对于 RANS 的优势。VLES、RANS 和 LES 方法对喷雾蒸汽锥角的预测结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,3 种方法对于喷雾蒸汽锥角的预测结果都在允许的误差之内。LES 和 VLES 方法结果差距很小,与实验结果较为接近,但是 RANS 方法预测的喷雾蒸汽锥角相较于实验结果小了很多。

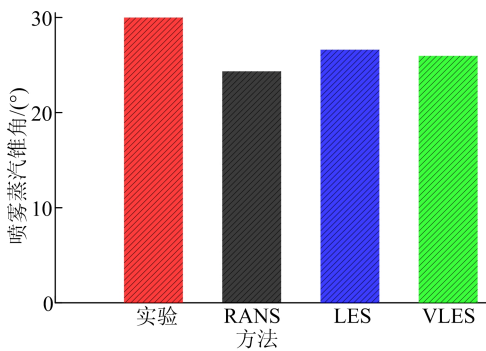


图 7 VLES、RANS 和 LES 方法对喷雾蒸汽锥角的预测结果

上述不同方法预测结果的比较体现了对平均场预测精度的差异,下面对不同方法预测的瞬时结果进行对比分析。

不同时刻蒸汽演变状态如图 8 所示。从图 8 可以看出:3 种方法都可以较好地模拟出喷雾在轴向和径向的发展过程,但 RANS 方法得到的是喷雾场的湍流平均信息,所得喷雾结构沿中心轴线成近似轴对称形状,不能复现如实验图像中所示的真实瞬态喷雾结构;而 LES 方法和 VLES 方

法更能真实地再现喷雾动态发展过程中的瞬态非对称结构。

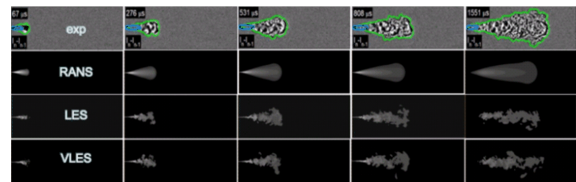


图 8 不同时刻 VLES、RANS 和 LES 方法预测的蒸汽形态演变

RANS、LES 和 VLES 3 种方法在 1.5 ms 时刻预测的温度、正十二烷质量分数和密度云图如图 9 所示,其中截面取自圆柱定容室中心的一个截面。

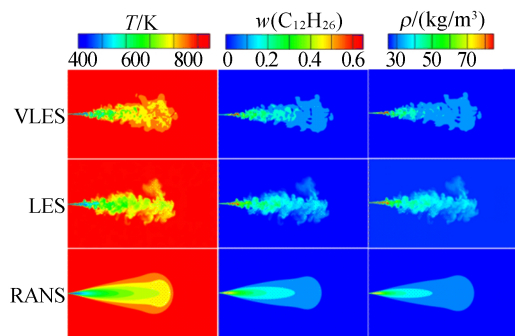


图 9 1.5 ms 时刻预测的温度、正十二烷质量分数和密度云图

从温度分布云图可以看出,随着径向距离的增大,温度出现了一个明显的变化,在 20 mm 后正十二烷的温度随着径向和轴向的发展而升高,但是变化不明显,喷雾轮廓上的温度接近环境。从正十二烷质量分数的分布云图可以看出,温度高的区域正十二烷的质量分数低,这是由于正十

二烷喷射的温度为 363 K, 喷射到圆柱定容室的温度为 900 K, 正十二烷不断地蒸发吸热, 喷雾的最外端最先受热变化为气态, 温度逐渐增大。从密度分布云图可以看出, 随着喷雾蒸汽贯穿距的增加, 径向扩散会逐渐减小, 但是这段区域里存在着少量未蒸发的正十二烷液体和大量的正十二烷蒸汽, 因此密度相较于环境密度偏大一些。对比 3 种湍流模型计算的结果发现, RANS 方法在液核区域预测的结果明显低于 LES 和 VLES 方法, 但是 LES 对于网格和计算时间步长皆有非常严格的要求, 需要非常强大的计算资源, 而 VLES 方法却能够使用较少的计算资源得到不错的预测结果。考虑到 VLES 方法与其他方法的差异性主要来自于分辨率函数 F_r 的实施, 因此本文将对流场中 F_r 值的分布进行分析。

1.5 ms 时刻分辨率控制函数 F_r 的分布情况如图 10 所示。

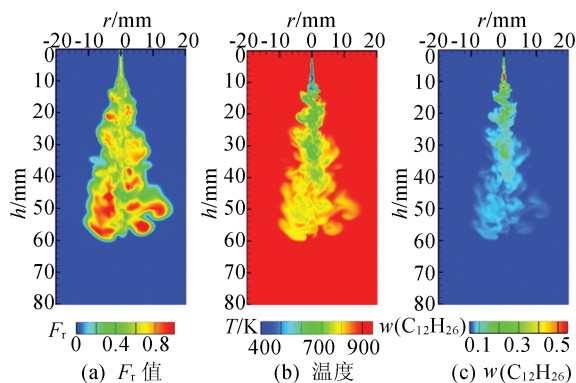


图 10 1.5 ms 时刻 F_r 值、温度、正十二烷蒸汽质量分数分布云图

喷嘴出口轴线附近 F_r 的值接近于 1.0, 从温度以及正十二烷蒸汽质量分数分布云图看出, 这个区域存在大量的液态燃料, 也是发生气液分离的区域, 液滴破碎以及蒸发产生了剧烈的湍流波动, 需要对湍流尺度全部进行建模, 因此此时的 VLES 切换到 RANS 模型。随着向下游发展, 可以发现在大部分蒸发区域里分辨率控制函数 F_r 的值在 0~1.0 之间, 表明此时的网格尺度能捕捉到部分的湍流尺度, 只需要模化一部分湍流尺度, 此时 VLES 表现为超大涡模拟。在喷雾的最外端由于湍流运动剧烈, 且此处网格尺度较大, F_r 值同样又趋近于 1.0。而在喷雾外侧的低速区域, F_r 趋向于 0, 这些区域模化湍流尺度占总的湍流尺度的比例可以忽略, 此时 VLES 表现为直接数值求解。由此可见, 通过分辨率函数 F_r 的施加, 使自适应湍流模化方法基于对当地可解尺度

和湍流尺度的判断实现当地 RANS、LES 和 DNS 之间的切换。根据当地尺度差异自适应地选择合适的求解方法, 不仅提高了预测精度, 也大大降低了对网格尺度的要求。

3 结 论

本文采用 VLES 方法耦合 DPM 对桑迪亚国家实验室“Spray A”喷雾射流进行了数值研究。VLES 数值结果与实验结果的对比表明, VLES 方法耦合 DPM 能够较准确地预测出燃油雾化的发展过程, 能够较准确地预测高压喷雾的流场分布、液相贯穿距、蒸汽贯穿距等喷雾参数。与 RANS 方法和 LES 方法模拟结果的比较表明, VLES 方法在贯穿距、局部物理量以及喷雾形态上的预测结果明显优于 RANS 方法, 且计算量比 LES 方法大大降低。总体来说, VLES 方法在高压喷雾问题的研究中是一种颇有潜力的数值方法。

[参 考 文 献]

- [1] ZHOU L, LUO K H, QIN W, et al. Large eddy simulation of spray and combustion characteristics with realistic chemistry and high-order numerical scheme under diesel engine-like conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 93: 377-387.
- [2] BAZDIDI-TEHRANI F, ZEINIVAND H. Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor[J]. Energy conversion and management, 2010, 51(1): 225-234.
- [3] Sandia National Laboratories. The ECN is an international collaboration among experimental and computational researchers in engine combustion[EB/OL]. <https://ecn.sandia.gov/cvdata/sitefiles/ecn-home.php>.
- [4] PICKETT L M, GENZALE C L, GILLES B, et al. Comparison of diesel spray combustion in different high-temperature, high-pressure facilities[J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(2): 156-181.
- [5] PEI Y, HAWKES E R, KOOK S, et al. Modelling n-dodecane spray and combustion with the transported probability density function method[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(5): 2006-2019.
- [6] BLOMBERG C K, ZEUGIN L, PANDURANGI S S, et al. Modeling split injections of ECN“Spray A” using a conditional moment closure combustion model with RANS and LES[J]. SAE International Journal of Engines, 2016, 9(4): 2107-2119.
- [7] D'ERRICO G, LUCCHINI T, CONTINO F, et al. Comparison of well-mixed and multiple representative interactive flamelet approaches for diesel spray combustion modelling[J]. Combustion Theory & Modelling, 2014, 18(1): 65-88.

(下转第 1212 页)

- [19] CAO X, SHEN F, ZHANG S, et al. Time delay bias between the second and third generation of BeiDou Navigation Satellite System and its effect on precise point positioning[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108348.
- [20] LEICK A, RAPOPORT L, TATARNIKOV D. GPS satellite surveying[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [21] WANNINGER L, BEER S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy[J]. *GPS Solutions*, 2014, 19(4): 639-648.
- [22] ZHANG B, TEUNISSEN P J, YUAN Y, et al. Joint estimation of vertical total electron content (VTEC) and satellite differential code biases (SDCBs) using low-cost receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413.
- [23] PETIT G, LUZUM B. The 2010 reference edition of the IERS conventions[C]//Reference frames for applications in geosciences. Berlin: Springer, 2013: 57-61.
- [24] KOUBA J. A guide to using International GNSS Service (IGS) products[J]. *IGS Website*, 2002, 4(3): 106.
- [25] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. *Astrodynamic*, 1991, 1992: 1647-1660.
- [26] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. *Bulletin Geodesique*, 1972, 105(1): 279-298.
- [27] BHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): 3-6.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1182 页)

- [8] SALEHI F, GHIJI M, CHEN L. Large eddy simulation of high pressure spray with the focus on injection pressure [J]. *The International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 82: 108551.
- [9] ARMIN W, VILLE V, OSSO K, et al. Large eddy simulations of high-velocity fuel sprays: studying mesh resolution and breakup model effects for Spray A[J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(5): 419-442.
- [10] BANERJEE S, RUTLAND C. On LES grid criteria for spray induced turbulence; SAE Technical Paper 2012-01-0141[R]. [S. l.]: SAE, 2012.
- [11] PAIK J, SOTIROPOULOS F, PORTE-AGEL F. Detached eddy simulation of flow around two wall-mounted cubes in tandem[J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2009, 30(2): 286-305.
- [12] MENTER F R, EGOROV Y. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions; part 1: theory and model description[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2010, 85(1): 113-138.
- [13] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model [J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(4): 1103-1108.
- [14] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 71(11): 1341-1360.
- [15] JEONG E, GIRIMAJI S S. Partially averaged Navier-Stokes (PANS) method for turbulence simulations; flow past a square cylinder[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(12): 121203.
- [16] 耿超, 张玉银, 徐斌, 等. 喷雾特性 CFD 仿真的准确性与效率的探讨[J]. *内燃机工程*, 2015, 36(6): 130-136.
- [17] SENECA P K, POMRANING E, RICHARDS K J, et al. An investigation of grid convergence for spray simulations using an LES turbulence model; SAE Technical Paper 2013-01-1083[R]. [S. l.]: SAE, 2013.
- [18] SENECA P K, POMRANING E, RICHARDS K J, et al. Grid-convergent spray models for internal combustion engine computational fluid dynamics simulations[J]. *Journal of Energy Resources Technology Transactions of the Asme*, 2014, 136(1): 2280-2285.
- [19] WEHRFRITZ A, KAARIO O, VUORINEN V, et al. Large eddy simulation of n-dodecane spray flames using Flamelet Generated Manifolds[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 113-131.
- [20] WEI H, ZHAO W, ZHOU L, et al. Large eddy simulation of the low temperature ignition and combustion processes on spray flame with the linear eddy model[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2018, 22(2): 237-263.
- [21] LI C, CRUA C, VOGIATZAKI K. Effect of the scale resolution on the two phase coupling characteristics of high speed evaporating sprays using LES/Eulerian-Lagrangian methodologies [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 120: 103060.
- [22] BANERJEE S, RUTLAND C J. Study of spray induced turbulence using large eddy simulations[J]. *Atomization & Sprays*, 2015, 25(4): 285-316.

(责任编辑 胡亚敏)