文章编号：1000-8608(2018)02-0111-07

具有蒸发喷雾过程的大涡数值模拟

单聪慧， 徐宝鹏*

（大连理工大学 能源与动力学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 采用大涡数值模拟方法对不同气体密度条件下无蒸发和有蒸发燃油喷雾进行了数值模拟，重点研究喷雾形状、喷雾贯穿距离以及粒子索特平均半径的预测值与计算网格的相关性以及亚网格脉动速度对喷雾过程的影响. 计算公式采用单方程亚网格湍流模型、ETAB破碎模型和基于粒子云的碰撞模型. 在有无蒸发两种喷雾条件下贯穿距离和索特平均半径的预测值与实验值吻合较好，并实现了预测值与计算网格无关性. 亚网格脉动速度对喷雾贯穿距离和索特平均半径影响较小，但是影响喷雾形状和粒子分布. 具有蒸发的喷雾贯穿距离与无蒸发喷雾情况类似，但是由于蒸发作用，索特平均半径预测值表现出波动现象.

关键词： 燃油喷雾；大涡数值模拟；蒸发；网格相关性；碰撞模型

中图分类号： TK402 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201802001

0 引 言

燃油的喷雾过程（喷射、雾化和蒸发）及其与空气的混合过程对燃油发动机（内燃机和燃气轮机）的燃烧过程和排放有着至关重要的影响. 喷雾过程决定燃料在燃烧室内的分布，进而控制燃烧特性，比如点火延迟、自燃、放热率和污染物质形成等. 发动机氮氧化物 NO_x 的排放是目前主要控制的污染物，其生成量与火焰温度成指数增加关系，喷雾粒子的不均匀分布会引起燃料当量比分布不均匀，在燃烧室内部产生局部“热点”，生成大量 NO_x. 为此，燃油喷雾过程的研究对燃烧室设计具有十分重要的意义[1-2].

喷雾过程的数值模拟是一项复杂的任务. 喷雾过程是一种复杂的两相流问题，喷雾粒子通过与气体的动量交换诱导出具有大尺度湍流涡的湍流空气射流，由于两相流的双向耦合作用，空气射流会影响喷雾粒子的空间分布. 此外，喷雾由尺寸各异的大量喷雾粒子组成，喷雾粒子的破碎、碰撞和蒸发过程进一步加剧了问题的复杂性.

文献中喷雾过程的数值模拟通常采用雷诺时间平均（RANS）方法[3-5]. Subramaniam 等[5]用最为流行的内燃机数值模拟 KIVA-3V 计算程序，利用 RANS 方法对无蒸发喷雾过程进行了详细的数值模拟，研究发现利用 KIVA-3V 中的数值模型无法得到与计算网格分辨率无关的喷雾贯穿距离. 由于 RANS 方法将空气射流中的大尺度湍流涡从控制方程中平均掉，利用湍流模型间接模拟大尺度湍流涡对喷雾过程的影响，模拟结果容易产生较大计算误差[5].

随着计算机计算能力的不断提高，大涡数值模拟（LES）方法逐渐成为数值模拟的主流方法. LES 方法通过滤波函数将小尺度湍流涡从控制方程中过滤掉，滤波后的控制方程直接对大尺度湍流涡进行求解，被滤波掉的小尺度湍流涡对直接求解的大尺度湍流涡的影响通过亚网格（SGS）湍流模型进行模拟. 由于 LES 方法对大尺度湍流涡由控制方程直接进行求解，更适合对燃油喷雾过程进行数值模拟[6-9]. 徐宝鹏和单聪慧利用 LES 方法对 Hiroyasu 等[10]无蒸发柴油喷雾过程进行了数值模拟，计算出与计算网格分辨率无关的喷雾贯穿距离.

文献中的喷雾数值模拟[3-9]都是以无蒸发燃油喷雾过程为研究对象，本文采用 LES 方法对

收稿日期： 2017-08-01； **修回日期：** 2018-01-24.
基金项目： 大连理工大学重大项目培育基金资助项目（DUT17ZD307）.
作者简介： 单聪慧（1991-），女，硕士，助理工程师，E-mail：shanchll@163.com；徐宝鹏*（1969-），男，博士，教授，博士生导师，E-mail：baopengxu@dlut.edu.cn.

Naber 等[11]实验中无蒸发和有蒸发的燃油喷雾过程进行大涡数值模拟，研究不同气体压力对喷雾过程的影响、计算结果与计算网格分辨率的相关性以及 SGS 脉动速度对预测结果的影响.

1 数学模型

本文求解经过空间滤波的具有亚网格源项和喷雾源项的可压缩、多组分 Navier-Stokes 控制方程组. 亚网格源项模拟被空间滤波掉的小尺度湍流涡对直接求解的大尺度湍流涡的影响，此源项由亚网格湍流模型封闭. 本文采用单方程亚网格湍流模型[12]，根据此模型求解出的亚网格湍流动能可以计算出 SGS 脉动速度，根据此脉动速度徐宝鹏等提出了一种气液两相双向耦合模型[13]，计算 SGS 脉动速度对喷雾过程的影响.

喷雾相采用欧拉-拉格朗日法和蒙特卡罗法进行模拟[14]，喷雾粒子在流场中作为点源项与由控制方程求解的气相进行质量、动量和能量的双向耦合. 控制方程中的喷雾源项根据喷雾方程确定[15]. 此外，本研究中忽略燃油的一次雾化，假定喷雾粒子的初始直径等于喷嘴直径，喷雾粒子的雾化采用 ETAB 破碎模型[4]模拟；粒子之间的碰撞采用由徐宝鹏等提出的基于粒子云的碰撞模型[16]模拟，此碰撞模型可以大大减弱计算结果与计算网格的相关性；喷雾粒子的蒸发由基于 Frossling 相关公式的蒸发模型[17]模拟. 有关数学模型和数值计算方法的详细介绍见文献[13].

2 问题描述

本文采用的无蒸发和有蒸发喷雾的计算数据分别如表 1、2 所示，其中无蒸发喷雾考虑 4 种计算工况，有蒸发喷雾计算 3 种工况，所有计算数据取自文献[11].

表 1 无蒸发算例计算数据

Tab. 1 Computational data for non-evaporating cases

工况	气体背压 p/MPa	气体密度 ρ_g/(kg·m^{-3})	喷雾出口速度/(m·s^{-1})
1	0.48	3.6	478
2	1.98	14.8	479
3	4.04	30.2	475
4	16.61	124.0	479

实验喷雾在封闭圆形缸体内进行，由于壁面对中心喷雾的影响可忽略不计，计算区域采用如图 1 所示 4.0 cm×4.0 cm×13.8 cm 的长方体. 喷雾起始位置位于长方形顶部中心位置，喷雾方向与重力方向一致. 为研究预测结果的网格敏感性，计算采用 3 种不同密度的网格，如表 3 所示. 初始计算流场为静止状态，采用无滑移绝热固体壁面边界条件. 喷入计算区域的燃油粒子半径设定为喷油孔半径，由 ETAB 破碎模型实现燃油雾化过程. 计算采用可变时间步长，为保证计算精度和稳定性，计算时间步长的选取满足条件 $C<0.2$.

表 2 有蒸发算例计算数据

Tab. 2 Computational data for evaporating cases

工况	气体背压 p/MPa	气体密度 ρ_g/(kg·m^{-3})	喷雾出口速度/(m·s^{-1})
1	0.95	3.3	478
2	4.04	13.9	475
3	17.10	58.6	479

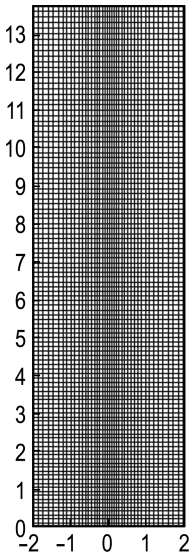


图 1 计算网格

Fig. 1 Computational mesh

表 3 计算网格数据

Tab. 3 Data for the computational meshes

网格	N_X	N_Y	N_Z	D_X/mm	D_Y/mm	D_Z/mm
精细网格	51	51	120	0.4	0.4	0.9
标准网格	41	41	110	0.6	0.6	1.0
粗网格	31	31	100	0.9	0.9	1.2

3 计算结果与分析

3.1 无蒸发喷雾形状

图 2 为 4 种计算工况在不同时刻的无蒸发喷

雾前视图. 喷雾的形状是随喷射时间不断变化的，在喷射后期喷雾锥的角度基本保持不变，因此图中的显示时刻对应于各计算工况燃油喷射基本结束的时刻. 计算出的喷雾锥角随着气体密度增加而增大. 由于喷雾粒子与空气之间的动量交换，喷雾过程引发空气射流，在开尔文霍茨曼不稳定性的作用下诱导出大尺度湍流涡导致射流发生摆动(如图 3 所示). 由于气液两相之间的相互耦合作用，摆动的空气射流引起喷雾锥发生摆动现象.

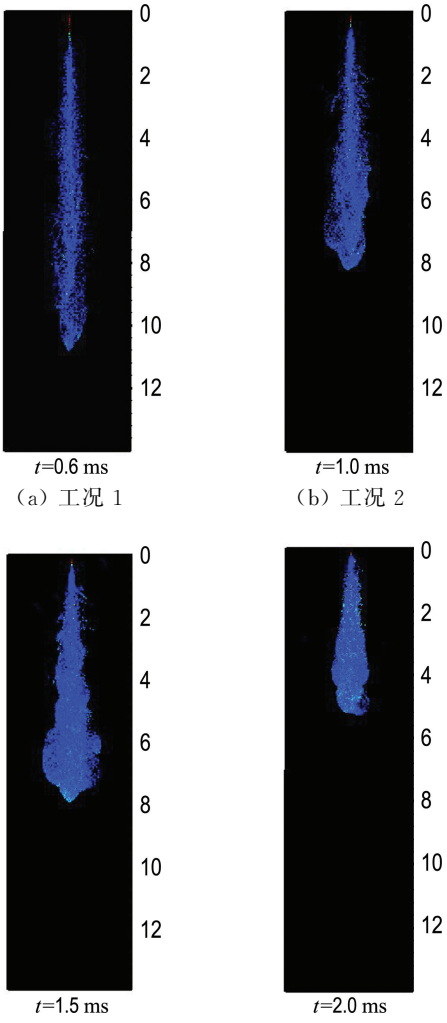


图 2　不同工况下不同时刻无蒸发喷雾前视图

Fig. 2　The front view of the sprays for non-evaporating cases at different moments

3.2　无蒸发喷雾贯穿距离

喷雾贯穿距离(D)定义为喷射点与喷雾中最远粒子的垂直距离. 如图 4 所示，横轴为时间(t)，由于空气阻力与密度成正比，喷雾贯穿距离随气体密度的增大而减小. 计算值除了在最大气体密

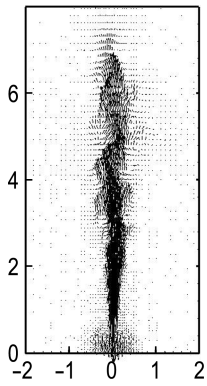


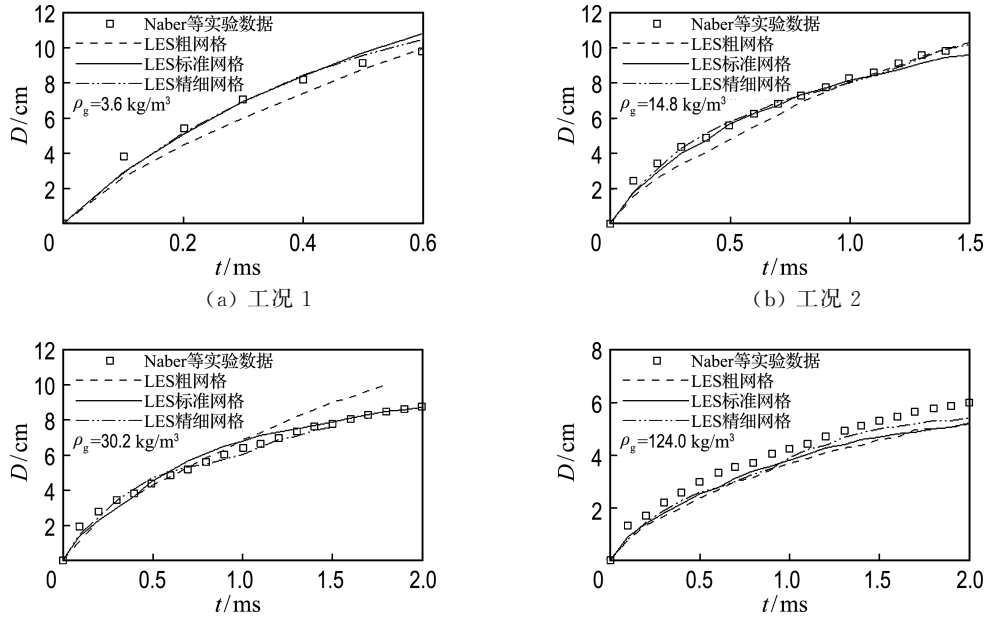
图 3　无蒸发喷雾 $t=1.5$ ms 速度矢量(工况 3)

Fig. 3　Velocity vector of the non-evaporating spray at $t=1.5$ ms (Case 3)

度工况下略小于实验值以外，在其他工况下与实验值吻合良好，并表现出良好的网格无关性. 对于计算工况 1，由于气体密度较低喷雾贯穿距离较大，采用粗网格时喷雾粒子所占据的网格单元总体积远大于喷雾所占据的真实体积，因此喷雾粒子诱导出的气体速度较低，从而使预测的喷雾贯穿距离小于实验值；而其他两种网格分辨率与粗网格相比可更好地分辨喷雾粒子与气体之间的动量交换，预测值更加接近实验值.

3.3　无蒸发喷雾索特平均半径

喷雾索特平均半径(SMR，R_S)表征了喷雾的雾化性能，SMR 越小表明雾化效果越好，对喷雾的蒸发时间影响较大. 图 5 为距喷射点不同距离(D_{in})的索特平均半径的预测值，由于无实验值可以进行对比分析，本文只对其变化趋势进行分析. 虽然喷雾贯穿距离对计算网格分辨率较为敏感，但是预测的 SMR 表现出更好的网格无关性. 对于气体密度较小的计算工况，由喷射点喷出的燃油粒子具有明显的雾化延迟现象；随着气体密度的增加，雾化延迟时间缩短. 经过雾化延迟后，喷雾粒子进入雾化区在空气阻力的作用下实现快速雾化，在此区内粒子雾化起主导作用，粒子碰撞引起的粒子半径增加可以忽略不计，因此 SMR 快速降低到最小值 R_{Smin}，R_{Smin} 随着气体密度的增加(气体阻力的增加)而减小. 喷雾粒子经过雾化区后，由于粒子密度高，粒子碰撞转为主导作用，导致 SMR 逐渐增大，这一区域称为粒子稠密区，气体密度越大这一区域表现越明显. 粒子离开稠密区后，由于粒子密度降低以及气液两相的相对速度较小，粒子的破碎和碰撞达到平衡状态，

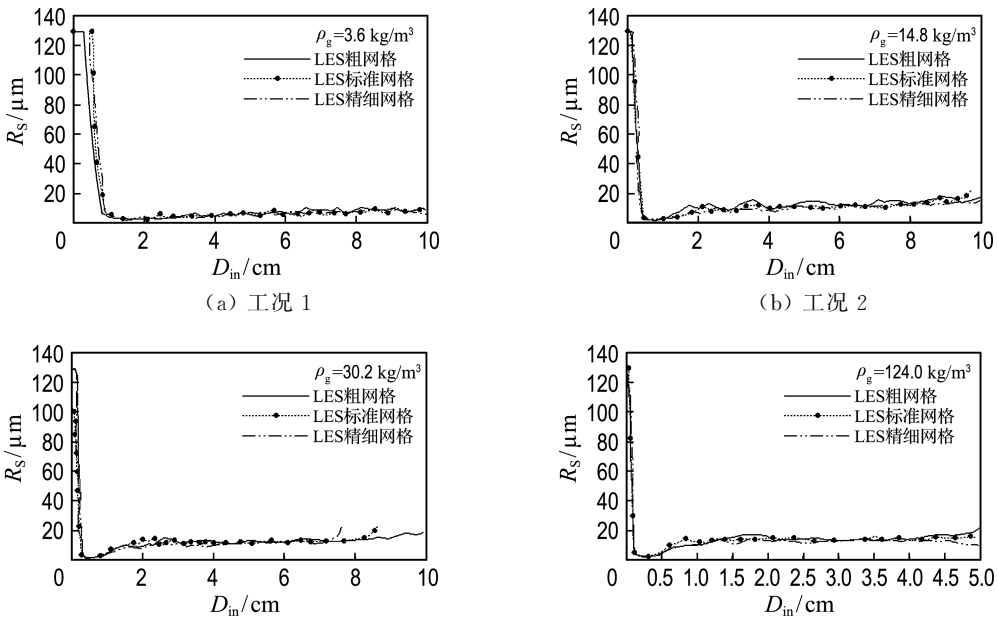


(a) 工况 1 (b) 工况 2

(c) 工况 3 (d) 工况 4

图 4 无蒸发喷雾贯穿距离

Fig. 4 Spray tip penetration for the non-evaporating cases



(a) 工况 1 (b) 工况 2

(c) 工况 3 (d) 工况 4

图 5 无蒸发喷雾距喷射点不同距离的索特平均半径预测值

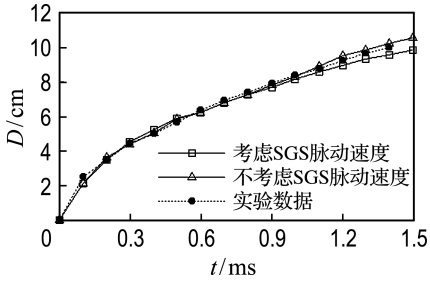
Fig. 5 Predicted SMR for the non-evaporating cases at different locations downstream the injection point

SMR 几乎保持不变，这一区域称为平衡区，平衡区内的 SMR 同样随着气体密度的增加而增大.

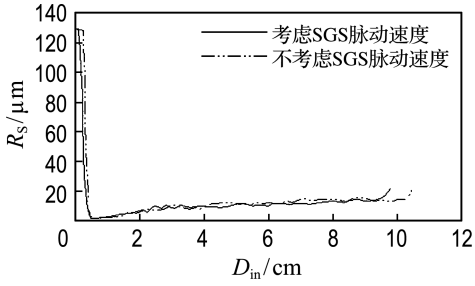
3.4 SGS 脉动速度的影响

本文采用基于 SGS 脉动速度的气液两相双向耦合喷雾模型，计算中考虑了 SGS 脉动速度对喷雾粒子运动的影响. 为了研究 SGS 脉动速度对喷雾贯穿距离及 SMR 的影响，以工况 3 为对象，采用精细网格，分别计算了有无 SGS 脉动速度的喷雾过程，计算结果如图 6 所示. 计算表明 SGS 脉动速度对喷雾贯穿距离和 SMR 影响较小，可以忽略不计. 然而，由于 SGS 脉动速度使喷雾粒子分布更为均匀，所以在不考虑 SGS 脉动速度情

况下预测出的贯穿距离和 SMR 略大一些.



(a) 喷雾贯穿距离

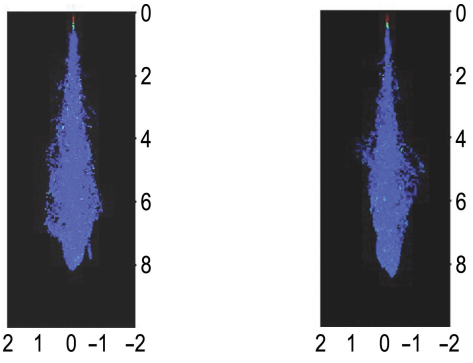


(b) SMR

图 6　SGS 脉动速度对喷雾贯穿距离和 SMR 的影响

Fig. 6　The effect of SGS fluctuating velocity on spray tip penetration and SMR

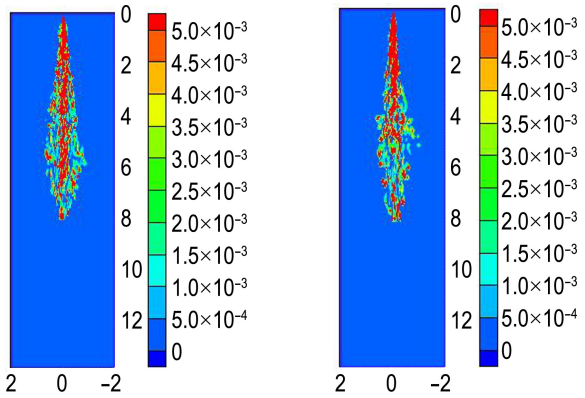
图 7 显示 SGS 脉动速度对喷雾形状的影响. 在喷射点附近液滴喷射速度较大，诱导出的 SGS 脉动速度较高，对喷雾粒子的分布影响更为显著. SGS 脉动速度使粒子分布更为分散，不考虑 SGS 脉动速度的影响的喷雾锥角预测值比考虑 SGS 脉动速度情况下的预测值减少 28%. 图 8 显示 SGS 脉动速度对液滴质量密度(定义为在网格单元中喷雾粒子的质量与网格单元体积的比值)分



(a) 考虑 SGS 脉动速度　　(b) 不考虑 SGS 脉动速度

图 7　SGS 脉动速度对喷雾形状的影响

Fig. 7　The effect of SGS fluctuating velocity on spray shape



(a) 考虑 SGS 脉动速度　　(b) 不考虑 SGS 脉动速度

图 8　SGS 脉动速度对液滴质量密度分布的影响

Fig. 8　The effect of SGS fluctuating velocity on droplet mass density distribution

布的影响，从图中可以看出在不考虑 SGS 脉动速度时，喷雾粒子集中分布于喷雾核心区域，SGS 脉动速度使喷雾粒子分布更趋均匀. 最常用的代数型 SGS 模型(如 Smagorinsky 模型[18])中缺少 SGS 脉动速度信息，所以无法直接考虑 SGS 脉动速度效应.

3.5　有蒸发的喷雾贯穿距离和索特平均半径

图 9 为有蒸发的喷雾贯穿距离与实验值的对比，计算网格采用标准网格精度. 计算结果与无蒸发喷雾情况的变化趋势相似，总体来说预测值与实验值吻合较好，虽然在喷雾后期由于蒸发作用在低气体密度工况下的预测值略大于实验值，在高气体密度工况下的预测值略小于实验值，但是在喷雾前期预测值与实验值吻合很好.

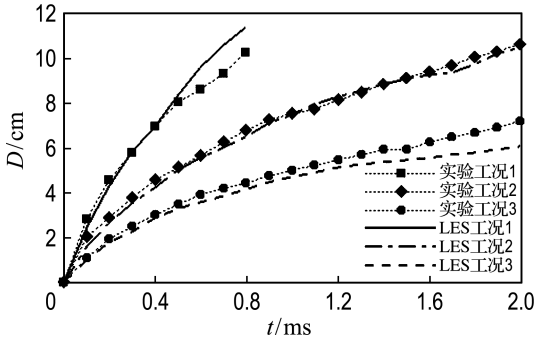
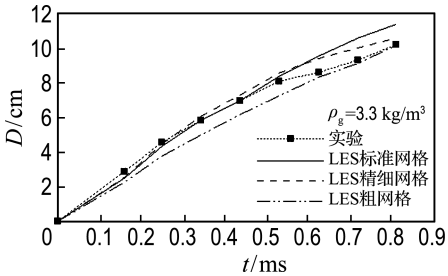


图 9　有蒸发的喷雾贯穿距离

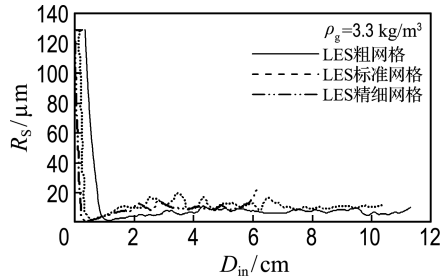
Fig. 9　Spray tip penetration for evaporating cases

有蒸发喷雾计算的网格敏感性分析针对表 2 中的计算工况 1 进行，计算结果如图 10 所示. 结果表明采用标准网格和精细网格对喷雾贯穿距离的预测值很接近，实现了计算结果与计算网格的

无关性验证. 计算的 SMR 在粗网格条件下具有更长的雾化延迟区,而标准网格和精细网格预测的雾化延迟以及雾化区十分接近,在喷雾平衡区内由于蒸发作用,采用标准网格和精细网格的 SMR 出现波动现象,但是变化趋势基本一致.



(a) 喷雾贯穿距离



(b) SMR

图 10 有蒸发喷雾的网格敏感性验证

Fig. 10 Grid sensitivity study for evaporating spray

4 结 语

本文采用大涡数值模拟方法对无蒸发和有蒸发两种喷雾情况进行数值模拟. 数值预测结果与实验数据得到了良好的吻合,并得出了喷雾贯穿距离和 SMR 的预测值与计算网格分辨率收敛的结果.

大涡数值模拟成功捕捉到由喷雾过程诱导出的具有大尺度湍流涡的空气射流,大尺度湍流涡对喷雾形状和粒子分布有重要影响. 在大尺度湍流涡的作用下喷雾过程具有摆动特征,喷雾可分为雾化延迟区、雾化区、粒子稠密区和平衡区. 为保证数值模拟精度,计算网格分辨率应足以分辨喷雾粒子与气相之间的动量交换. SGS 脉动速度对喷雾贯穿距离和 SMR 影响较小,但是影响喷雾形状和粒子的均匀分布. 有蒸发喷雾的贯穿距离与无蒸发喷雾情况类似,但是由于蒸发作用,SMR 预测值在平衡区内出现波动现象.

参考文献:

[1] AZETSU A, DODO S, SOMEYA T, *et al*. A study on the structure of diesel spray (2-D visualization of the non-evaporating spray) [J]. **COMODIA**, 1990, **90**:199-204.

[2] TAKAGISHI S, TAKAHASHI T, DAN T, *et al*. Analysis of flow field in diesel fuel sprays by particle-image velocimetry [J]. **Transactions of the JSME**, 1990, **65B**(631):1128-1133.

[3] NIKLAS NORDIN P A. Complex chemistry modeling of diesel spray combustion [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2001.

[4] TANNER F X. Liquid jet atomization and droplet breakup modeling of non-evaporating diesel fuel sprays [C] // **SAE Technical Papers, 1997, International Congress and Exposition**. Warrendale: SAE International, 1997.

[5] SUBRAMANIAM S, O'ROURKE P J. Numerical convergence of the KIVA-3 code for sprays and its implications for modeling: Report UR-98-5465 [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1998.

[6] 周 磊,解茂昭,贾 明. 燃油喷雾过程的大涡模拟研究[J]. 内燃机学报, 2009, **27**(3):202-206.
ZHOU Lei, XIE Maozhao, JIA Ming. Application of large eddy simulation to a diesel spray [J]. **Transactions of CSICE**, 2009, **27**(3):202-206. (in Chinese)

[7] APTE S V, GOROKHOVSKI M, MOIN P. LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup [J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2003, **29**(9):1503-1522.

[8] 周 磊,解茂昭,贾 明,等. 不同亚网格尺度应力模型在燃油喷雾大涡模拟中的应用[J]. 内燃机学报, 2011, **29**(1):29-35.
ZHOU Lei, XIE Maozhao, JIA Ming, *et al*. Application of different sub-grid models in the large eddy simulation of diesel sprays [J]. **Transactions of CSICE**, 2011, **29**(1):29-35. (in Chinese)

[9] 徐宝鹏,单聪慧. 燃油喷雾的大涡模拟[J]. 热科学与技术, 2016, **15**(6):462-466.
XU Baopeng, SHAN Conghui. Large eddy simulation of fuel sprays [J]. **Journal of Thermal Science and Technology**, 2016, **15**(6):462-466. (in

Chinese)

[10] HIROYASU H, KADOTA T. Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber [J]. **Bulletin of the JSME**, 1976, **19**(135):1064-1072.

[11] NABER J D, SIEBERS D L. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays [C] // **SAE Technical Papers, 1996, International Congress and Exposition**. Warrendale: SAE International, 1996.

[12] MENON S, YEUNG P K, KIM W W. Effect of subgrid models on the computed interscale energy transfer in isotropic turbulence [J]. **Computers and Fluids**, 1996, **25**(2):165-180.

[13] 徐宝鹏,曾佑杰,马宏宇,等. 燃气轮机模型燃烧室的大涡模拟 [J]. 航空发动机, 2014, **40**(3):14-18.
XU Baopeng, ZENG Youjie, MA Hongyu, *et al*. Large eddy simulation of a gas turbine model combustor [J]. **Aeroengine**, 2014, **40**(3):14-18. (in Chinese)

[14] DUKOWICZ J K. A particle-fluid numerical model for liquid sprays [J]. **Journal of Computational Physics**, 1980, **35**(2):229-253.

[15] WILLIAMS F A. Spray combustion and atomization [J]. **Physics of Fluids**, 1958, **1**(6):541-546.

[16] 徐宝鹏,WEN J. 一种基于粒子云概念的喷雾粒子碰撞模型[J]. 内燃机学报, 2014, **32**(3):216-222.
XU Baopeng, WEN J. A droplet collision model based on the concept of particle cloud [J]. **Transactions of CSICE**, 2014, **32**(3):216-222. (in Chinese)

[17] O'ROURKE P J. The KIVA computer program for multidimensional chemically reactive fluid flows with fuel sprays [C] // GLOWINSKI R, LARROUTUROU B, TEMAM R. **Numerical Simulation of Combustion Phenomena**. New York: Springer Verlag, 1985:74-89.

[18] 周力行,胡砾元,王　方. 湍流燃烧大涡模拟的最近研究进展[J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(2):331-334.
ZHOU Lixing, HU Liyuan, WANG Fang. Recent advances in LES of turbulent combustion [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2006, **27**(2):331-334. (in Chinese)

Large eddy simulation of evaporating spray

SHAN Conghui, XU Baopeng*

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Large eddy simulation approach is employed to simulate fuel sprays with and without evaporation under different gas densities, and emphasis is placed on spray shape, the grid dependency of predicted spray tip penetration and Sauter mean radius (SMR) and the effect of sub-grid scale (SGS) fluctuating velocity on spray process. The numerical formulation adopts single equation SGS turbulence model, ETAB breakup model and collision model based on particle cloud. The predicted spray tip penetration and SMR are in good agreement with experimental data, and grid-independent results are achieved for both non-evaporating and evaporating sprays. It is found that SGS fluctuating velocity has little influence to the predictions of both spray tip penetration and SMR, but affects the spray shapes and particle distribution. The predicted spray tip penetration behaves similarly for both non-evaporating and evaporating sprays, although the prediction of SMS shows more vigorous fluctuations for the evaporating case due to the effect of evaporation.

Key words: fuel spray; large eddy simulation; evaporation; grid dependency; collision model