

文章编号:1674-2974(2016)08-0008-08

非对称喷嘴喷雾模拟网格适用性研究*

杨小龙^{1†}, 张泽坪¹, 陈征¹, 徐光辉²

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300380)

摘要:离散油滴模型(DDM)和拉格朗日油滴-欧拉气体(LDEF)算法的喷雾数值模拟对网格具有很强的依赖性. 对某非对称三喷孔喷嘴的喷雾过程进行了网格参数适用性研究, 分析了网格依赖性的来源, 探讨了网格形式以及径向、轴向、周向网格尺寸变化对喷雾的影响, 与实验数据对比了喷雾形态和贯穿距离, 并研究了对索特直径的影响. 分析了不同网格长宽比的影响. 结果表明, 非对称三喷孔喷嘴的喷雾数值仿真中, 极坐标类型的网格具有更好的适用性. 随着网格尺寸减小, 贯穿距离和索特直径基本都呈现增大的趋势, 但径向尺寸对贯穿距离的影响稍大于轴向尺寸. 网格尺寸和长宽比存在一个最优值使得模拟的贯穿距离与实验值拟合得最好.

关键词:喷雾特性; 网格适用性; 数值模拟; 离散油滴模型; 拉格朗日油滴-欧拉气体算法
中图分类号:TK427 **文献标识码:**A

Study of Grid Dependency of Spray Simulation on an Asymmetric-nozzle

YANG Xiao-long^{1†}, ZHANG Ze-ping¹, CHEN Zheng¹, XU Guang-hui²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;
2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300380, China)

Abstract: Spray simulation using Lagrangian-Droplet and Eulerian-Fluid (LDEF) method and the Discrete Droplet Model (DDM) has been proved to be of grid dependency. The grid effects on the spray simulation of an asymmetric three-hole nozzle were studied. First, the sources of grid-dependency were analyzed. The effects of grid types and different grid sizes of radial, azimuthal and axial directions on the spray process were investigated by comparing the spray shape and liquid penetration distance with experiment data. And the grid effect on the Sauter Mean Diameter (SMD) was studied. Finally, the aspect ratio between the radial and the axial directions of the grid was optimized. The result has shown that, for the asymmetric three-hole nozzle spray simulation, the polar mesh has better performance among the different mesh forms. With the decrease of the grid size on three directions, the spray tip penetration and SMD basically present the tendency of increase, while the radial grid size shows greater influence than the axial size. The spray tip penetration fits best with experimental data when the grid size and the aspect ratio are optimized.

Key words: spray characteristic; grid dependency; numerical simulation; Discrete Droplet Model (DDM); LDEF method

* 收稿日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10502029), National Natural Science Foundation of China(10502029); 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ3018)

作者简介: 杨小龙(1973-), 男, 湖南桃源人, 湖南大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: xyangusc@163.com

液体燃料在高速射流过程中的喷雾破碎对发动机喷雾的发展以及混合气的形成都起着主导作用,因此燃料喷雾效果的好坏对发动机的燃烧效率的提高、尾气排放的降低和运行稳定性的保持都有很大影响。近些年来,随着计算流体动力学(CFD)的发展,通过对液滴的湍流扩散、蒸发、碰撞和破碎等过程建立一系列的子模来对发动机喷雾过程进行数值模拟的方法已经获得广泛的应用。其中大多都在离散油滴模型(DDM)基础上,利用拉格朗日油滴-欧拉气体的方法(LDEF)来对喷雾两相流动进行数值模拟^[1]。然而,许多研究表明,拉格朗日油滴-欧拉气体方法对网格具有很强的依赖性^[2-4]。Abani 和 Post 等^[5-6]指出了 LDEF 方法网格依赖性的两个主要来源:喷雾的破碎模型和气液动量耦合。

目前,由于传统发动机多采用单喷油器中间布置结构,其喷油器喷孔大多都是对称的,所以过去对喷雾过程网格依赖性的研究主要集中在单孔或具有对称性的喷嘴,而对置活塞对置气缸发动机由于其双喷油器侧面布置、相对喷射的结构特点,通常采用非对称三喷孔喷嘴的特殊结构^[7-9],网格对其喷雾模拟的影响有待进一步验证。本文通过仿真与实验相结合的方法,对某非对称三喷孔喷嘴的喷雾数值仿真过程进行了网格类型以及网格尺寸的适用性研究。

1 燃油喷雾实验

为了研究非对称三喷孔喷嘴的喷雾特性并对其进行标定,本文进行了喷雾可视化试验,所研究的非对称三喷孔(图中黑点)喷嘴几何位置如图 1 所示。

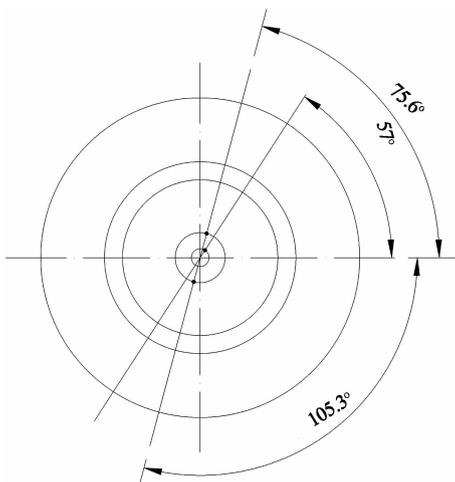


图 1 喷嘴示意图

Fig. 1 The schematic of nozzle

测试系统如图 2 所示,实验装置主要包括定容燃烧弹、纹影系统、高压共轨供油系统、CCD 摄像机及其控制器等。试验中采用燃油单次喷射测量仪对喷雾量进行测量,测量结果采用多次测量取平均值的方法^[10]。

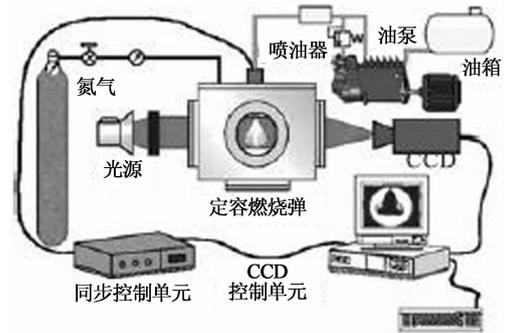


图 2 实验台示意图

Fig. 2 The schematic of test bench

实验中采用的非对称喷嘴其喷孔直径为 0.2 mm。供油系统为博世的高压共轨供油系统,系统提供最大可达 160 MPa 轨压。喷射燃油为 5# 柴油,喷射燃油温度为 60 ℃。考虑到单次喷雾之间的误差,实验对同一工况和时间点下 5 张照片的贯穿距离进行平均处理。为了得到精准的尺寸参照,拍照前使用尺寸标定板对喷雾照片的尺寸进行精确标定。

2 网格对喷雾模拟的影响

网格依赖性的两个主要来源:喷雾的破碎模型和气液动量耦合。关于喷雾模拟中液滴碰撞的模型,其网格依赖性主要是由于在碰撞概率计算中的不足所造成的,目前碰撞的模型主要有 O'Rourke 模型、Schmidt 模型和 Nordin 模型。其中应用最广泛的是 O'Rourke 模型,该模型将流体按其尺寸分布分成若干计算粒子,而每个计算粒子中包含许多具有相同特征的液滴,离散液滴被认为均匀分布于计算网格中,液滴发生 n 次碰撞的概率服从 Poisson 分布,半径分别为 r_1^n 和 r_2^n 的粒子发生碰撞的可能性 p_n 为:

$$p_n = 1 - p_0 = 1 - e^{-\left[\frac{N_2^n}{V_{ijk}^n} \pi (r_1^n + r_2^n)^2 |v_1 - v_2| \right] \Delta t} \quad (1)$$

式中: N_2^n 为计算粒子中的液滴数; V_{ijk}^n 为粒子所在计算网格单元的体积; r_1^n , r_2^n 为两个粒子的半径; $|v_1 - v_2|$ 为两粒子间的相对速度。

由上述分析可以看出,由于网格体积 V_{ijk}^n 的存在,使得碰撞频率随网格体积变化而变化,减小网格

单元尺寸能够增大液滴数密度进而可以提高液滴碰撞频率,但同时这也减少了网格单元内的计算粒子数,使得网格单元内或整个喷雾区域内能发生碰撞的粒子对数减少,进而对喷雾液滴的速度、平均液滴尺寸以及液滴尺寸分布产生影响。另外,当网格尺寸减小到与液滴尺寸相当的时候,每个网格最多只有一个粒子,此时的碰撞模型就不再起作用,使得喷雾数值计算结果产生失真现象。

在气液动量耦合方面, Abani 等^[2]指出在气液两相动量转化的过程中,由于网格单元与实际喷雾区域不一致,会出现实际喷雾区域只占网格单元部分空间的情况,这样使计算网格单元与实际喷雾区域之间产生扩散误差,这些误差能够抑制气液间动量转化作用,进而对喷雾贯穿距离的估算造成偏差。文华^[11]在其研究中也指出,由于喷雾粒子引起的动量等源项被均匀地分配在粒子所在的计算单元中,对于网格中未受喷雾影响的区域也能分配到喷雾源项,这将导致数值扩散误差的形成,进而对喷雾形态、贯穿距离等特性造成影响。

徐海涛^[12]、成传松^[13]等人也指出,在 DDM 喷雾模型中,气液动量耦合算法也会使得喷雾计算过程对网格形成依赖性。这主要是因为气液耦合过程中最近节点法的采用,这种算法将喷雾油滴所在空间位置的气相参数取为动量单元所对应节点参数,将计算得到的气相源项均匀地分布于油滴所在单元或者动量单元中,将动量单元中心节点的速度做为其气相速度。在计算液滴相对速度时,这种算法将粒子和动量单元速度的差值作为其相对速度。这些过程都使不同网格形式、网格尺寸、网格节点位置及其走向下的气相速度以及气液相对速度产生差异,进而使喷雾计算过程对网格产生很强的依赖性。另外,在气液耦合相互作用源项的求解过程中,由于单元内颗粒源法的采用,也使得其求解过程中对网格体积大小产生了依赖性。

综上所述,基于 DDM 模型和 LDEF 算法的喷雾数值仿真对网格具有很强的依赖性,且模型与算法间关系复杂,目前没有定论,因此探究适合非对称喷射的网格类型以及网格尺寸对其喷雾计算有很重要的价值。

3 计算模型及边界条件

燃油雾化先后经历了破碎、湍流扰动、变形、碰撞聚合和碰壁等一系列物理变化过程。本文采用的

喷雾模型如表 1 所示。

在仿真计算中,定容燃烧弹(容弹)网格的边界设定为 20 ℃ 的温度边界,气体为空气,初始温度为 20 ℃,为了便于调节背压,实验中选择了化学性质稳定的氮气作为填充介质来近似代替空气,用以模拟燃油与空气混合的全过程。实验中共轨压力 160 MPa,喷射背压 4 MPa,喷射脉宽 1 200 μs ,湍流流动模型选取了标准 $k-\epsilon$ 双方程模型。为保证喷雾的充分发展,本文设定容弹为直径 120 mm,高 200 mm 的圆柱体,喷嘴设在顶面中心处。

表 1 喷雾模型的选择

Tab. 1 The selection of spray models

模型类型	模型名称
二次破碎模型	KH-RT
湍流扩散模型	Enable
粒子相互作用模型	O'Rourke
碰壁模型	Disable
蒸发模型	Dukowicz

4 计算结果与分析

4.1 网格类型的影响

由于拉格朗日油滴-欧拉气体法(LDEF)对网格结构具有一定的依赖性,同时网格类型(拓扑结构)对计算准确性与稳定性也有较大影响,因此找到合适的网格形式对模拟研究至关重要。为此,基于喷雾仿真中常见的 3 种网格形式,本文创建了 3 种不同的网格类型(分别为网格 a, b, c),如图 3 所示。

3 种网格形式下分别所对应的喷雾形态如图 4 所示,喷雾贯穿距离为 5 mm。由图 4 可知,极坐标形式的网格 b 所对应的喷雾形态与实验效果最为接近。这是因为极坐标的网格其节点走向与喷雾主流方向贴近,径向的气相速度与径向网格的方向一致,处于气相单元中的油滴所受到的气相作用力也同径向网格方向一致。另外,网格 b 的生成方式本身就对喷雾的核心区进行了细化处理。这也有利于喷雾形态的模拟。而网格 a 和网格 c 一样,在喷雾过程中都出现“分叉”情况,这主要是由于在 DDM 喷雾模型中气液耦合过程采用了最近节点法所造成的^[13]。

通过贯穿距离的比较可以看出,网格 b 与实验测得的贯穿距离拟合得非常好,但在喷雾前期与实验测得的贯穿距离稍有差别,这可能是由于仿真过程中简化了初始破碎模型使得喷射初期液滴的速度较小所致。由图 5 喷雾贯穿距离对比也可以看出,网格 a 和网格 c 的贯穿距离明显小于实验值,这主要

是由于喷雾区域网格尺寸较大,网格节点求解出的阻力增大,油束的贯穿距离减小. 气液相对速度增大,进而使得喷雾液滴所受的运动

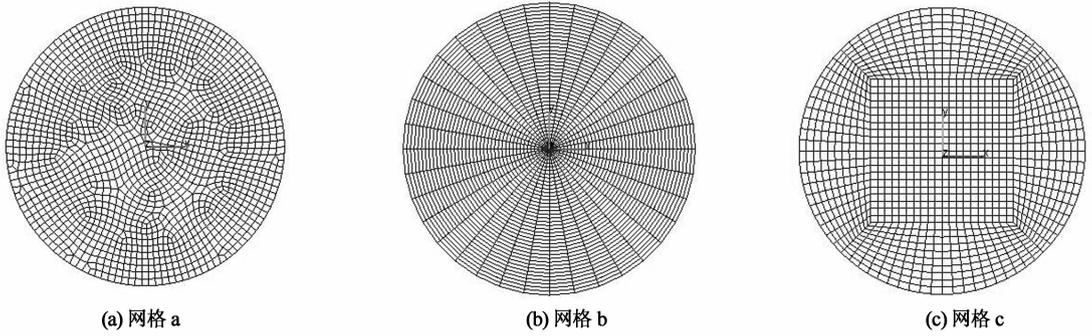
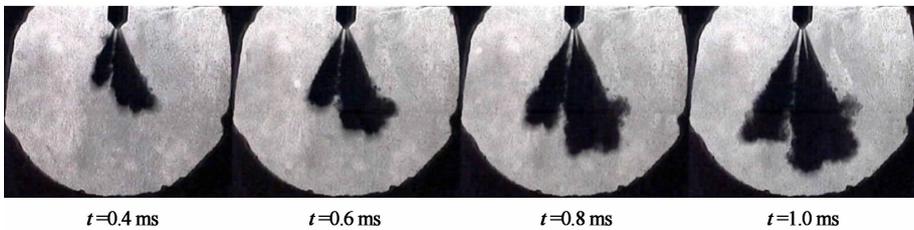
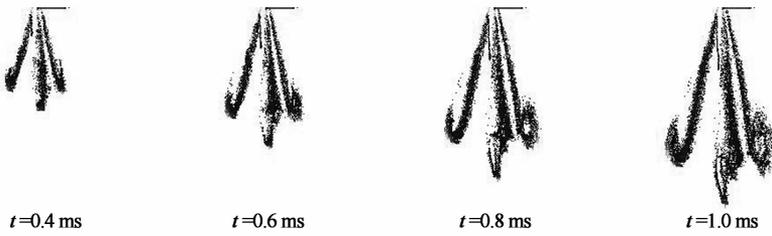


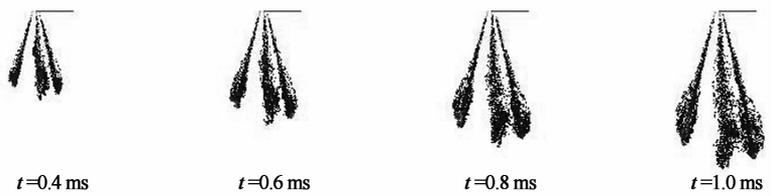
图 3 3 种网格截面图
Fig. 3 The sections of three types of grid



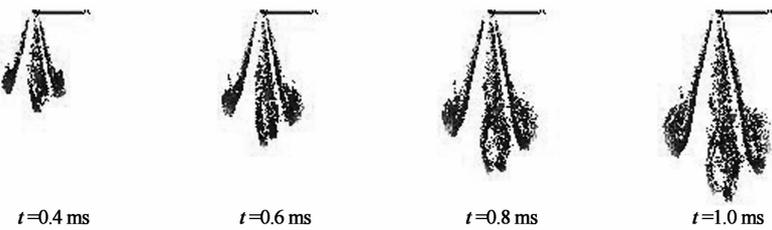
(a) 实验图



(b) 网格 a



(c) 网格 b



(d) 网格 c

图 4 喷雾形态对比
Fig. 4 Comparison of spray form

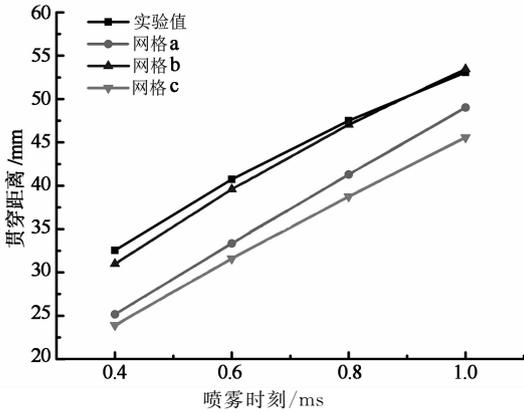


图5 喷雾贯穿距离对比

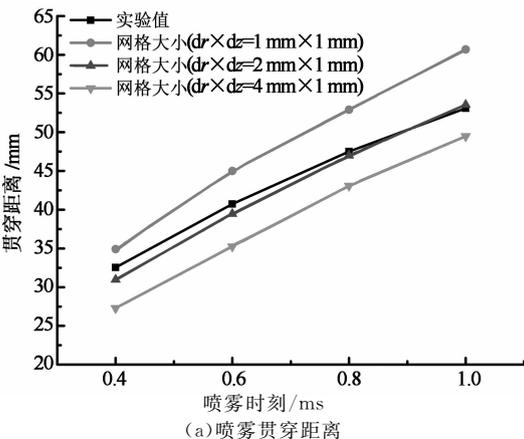
Fig. 5 Comparison of spray penetration

4.2 网格尺寸参数的影响

基于拉格朗日油滴-欧拉气体框架下的喷雾数值仿真,网格尺寸以及源网格截面的长宽比(这里定义为径向与轴向网格尺寸之比)对计算结果有着重要影响^[14-15].为了更准确地了解其适应性,这里分别从径向 $d(r)$,轴向 $d(z)$,周向 $d(\theta)$ 尺寸及长宽比(即径向与轴向之比 $d(r)/d(z)$)这4个面对其进行研究.考虑到4.1节算例中,网格b具有更好的适用性,以下计算均以网格b为基础进行分析,边界条件同上.网格b截面及尺寸说明如图6所示.

4.2.1 径向网格尺寸变化

为了研究径向尺寸变化对喷雾特性的影响,本文建立了周向夹角为 10° ,轴向网格尺寸 1 mm,径向网格尺寸分别为 1, 2, 4 mm 的网格单元.不同径向网格尺寸下的喷雾贯穿距离和索特直径如图7所示.



(a) 喷雾贯穿距离

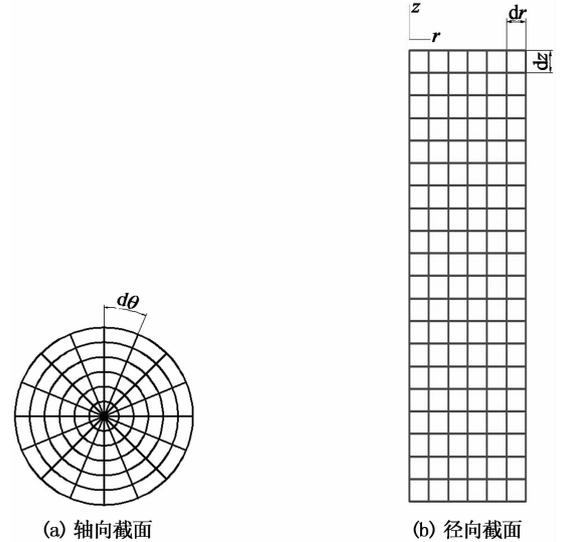
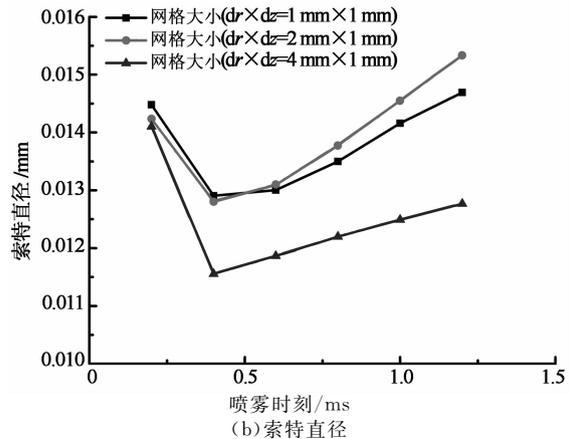


图6 网格b截面图

Fig. 6 The grid section of b volume

通过对贯穿距离的比较可知,当径向尺寸为 2 mm(10 倍于孔径直径)时,仿真值与实验结果符合较好.通过对图7中贯穿距的比较还可以看出,喷雾的贯穿距离随着径向网格尺寸的增大而减小,这与 Barroso^[4]等研究的结果是一致的,这主要是由于动量扩散误差会随着网格尺寸的增大而增大,较大的动量扩散误差会使得气相流场计算失真,贯穿距离缩短.由图7(b)可知,当径向尺寸过大时,其索特直径会明显小于网格尺寸较小的索特直径值.



(b) 索特直径

图7 不同径向网格尺寸下的喷雾贯穿距离和索特直径对比

Fig. 7 Comparison of spray penetration and SMD under different grid sizes on radial direction

4.2.2 轴向网格尺寸变化

图8为径向尺寸固定为 1 mm,轴向尺寸 $d(z)$ 分别为 1, 2, 4 mm 下的贯穿距离和索特直径的仿真

结果.

通过对贯穿距离和索特直径的比较分析可以发现,和径向网格变化对喷雾贯穿距离的影响一样,喷

雾的贯穿距离也随着轴向网格尺寸的增大而减小. 但与径向尺寸影响有所不同,当轴向网格为 4 mm (20 倍孔径)时,仿真值与实验值较为接近,但其喷雾形态与实验有较大的差别,如图 9 所示,这或许是由于“瘦长”计算网格内的湍流涡团的无规则运动使得液滴在其网格中运动受到轴向的随机干扰力较大造成的. 另外,在气液动量耦合算法中由于相对速度会带来附加阻力 F_N , 这也会使得液滴运动偏离正常轨迹,造成喷雾形态失真. 从图 8 中也可看出,轴向尺寸变化对索特直径的影响与径向尺寸变化对索特直径的影响也有所不同. 虽然随着轴向网格尺寸的增加,索特直径也逐渐变小,但在尺寸较小时(小于 10 倍喷嘴直径),轴向尺寸变化对索特直径的影响仍然比较显著.

由图 10 可知,不论是贯穿距离还是索特直径都随着周向夹角的减小而增大. 在贯穿距离的比较中,当周向夹角越来越小时,贯穿距离的差值减小,并趋近某一个常数. 在索特直径的比较中,当角度较小时,其值也呈现比较接近的趋势. 从喷雾贯穿距离和喷雾形态对比发现,当喷雾夹角等于 10° 时,其数值仿真结果与实验值最为接近.

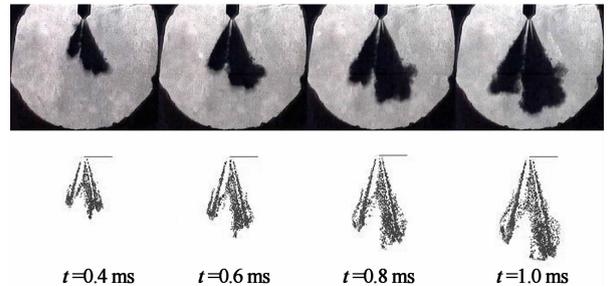


图 9 轴向尺寸为 4 mm, 径向尺寸为 1 mm 时的喷雾形态
Fig. 9 Spray shape of the cell with 4 mm axial size, 1 mm radial size

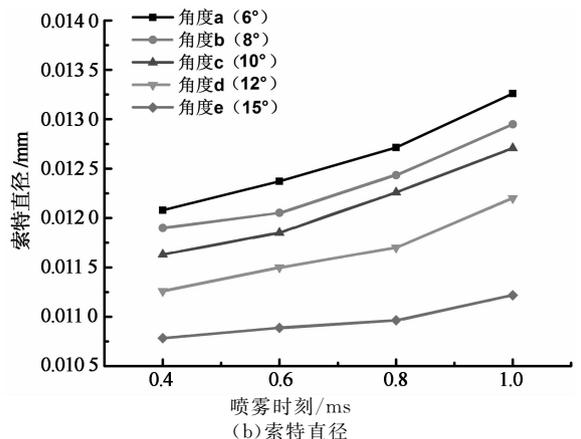
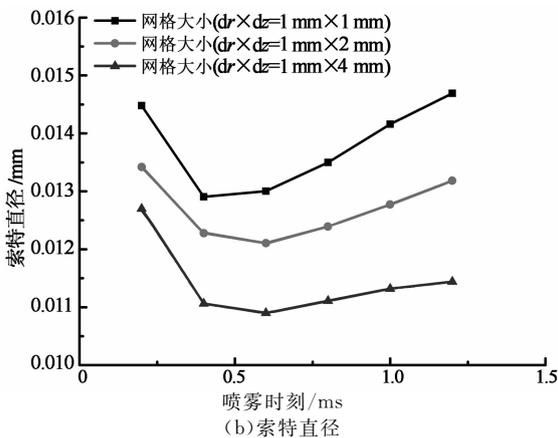
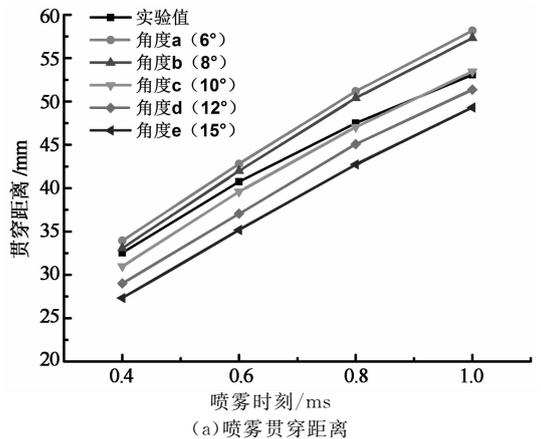
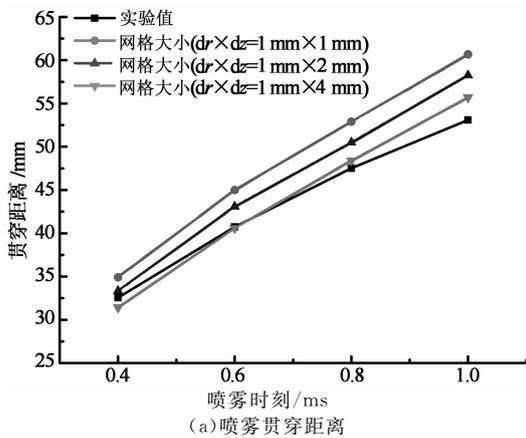


图 8 不同轴向网格喷雾贯穿距离和索特直径对比
Fig. 8 Comparison of spray penetration and SMD under different grid sizes on axial direction

图 10 不同周向网格喷雾贯穿距离和索特直径对比
Fig. 10 Comparison of spray penetration and SMD under different grid sizes on azimuthal direction

4.2.3 周向网格尺寸变化

为了比较周向网格尺寸对喷雾特性的影响,本节选取径向与轴向尺寸均为 2 mm,周向夹角 $d(\theta)$ 分别为 $6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ 和 15° 的不同网格进行研究,其结果如图 10 所示.

4.2.4 网格长宽比的影响

在上文的分析比较中都只考虑了某一方向尺寸变化对喷雾贯穿距离和索特直径的影响,而网格 b 是基于扫掠法由图 6(b)所示源网格截面旋转生成的^[14],其截面上不同长宽比($d(r)/d(z)$)也对计算结果有着重要影响^[15].因此,这里进一步研究了不同长宽比对喷雾模拟的影响.由于长宽比取值范围比较大,这里只选了部分长宽比,如表 2 所示.固定周向夹角为 10° .喷雾贯穿距离的仿真结果如图 11 所示.

表 2 网格单元尺寸
Tab. 2 The grid cell size

网格	$d(r) \times d(z)$ /(mm×mm)	$d(r)/d(z)$
1	1×1	1
2	1×2	0.5
3	1×4	0.25
4	2×1	2
5	2×2	1
6	2×4	0.5
7	4×1	4
8	4×2	2
9	4×4	1

通过图 11 中不同网格尺寸下喷雾贯穿距离的比较可以看出,当径向尺寸为 2 mm(10 倍于孔径)、长宽比为 1~2 时,喷雾贯穿距离的仿真结果与实验结果均最为接近.

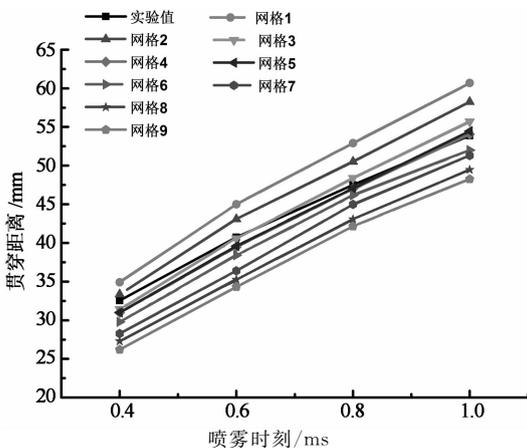


图 11 不同网格尺寸下喷雾贯穿距离对比

Fig. 11 Comparison of spray tip penetration under different mesh size

另外,通过网格 1,2 与 5,6 的比较还可以发现不同径向尺寸下,长宽比对贯穿距离的影响有所不同,当径向尺寸较小时,网格的长宽比对喷雾贯穿距离的影响较大.然而对于不同轴向尺寸,长宽比对贯

穿距离的影响较小.

通过图 11 中不同横向尺寸网格(网格 1,2,3)对喷雾贯穿距离的影响与不同径向尺寸网格(网格 1,4,7)对喷雾贯穿距离的影响的比较可以发现,横向尺寸与径向尺寸的变化对喷雾贯穿距离的影响程度是不同的.径向尺寸变化对贯穿距离的影响比较明显,而网格的轴向尺寸变化对贯穿距离的影响较小.

5 结论

本文对某三孔非对称喷嘴喷雾模拟的网格依赖性进行了详细研究,探讨了网格类型、三方向上网格尺寸变化以及源网格径向与轴向网格尺寸之比对喷雾数值仿真的影响.喷雾模型采用了 DDM 模型,计算方法采用了拉格朗日油滴-欧拉气体方法.结果表明网格对计算影响较大,关系复杂,对不同喷嘴及工况需仔细选择.

1) 由于气液动量耦合算法对喷雾特性具有较大影响,不同的网格形式在计算气体对液滴作用力时会形成不同程度的误差,对于本文非对称三孔喷嘴算例,极坐标形式网格因为其节点走向与喷雾主流方向以及径向气相速度和处于气相单元中油滴所受到的气相作用力同径向网格方向的一致性,使得极坐标网格在喷雾数值仿真中具有更好的适用性.

2) 数值模拟中,3 个方向的网格尺寸变化对喷雾贯穿距离影响的趋势比较类似,贯穿距离都随着网格尺寸的增加而减小,但不同方向上的网格尺寸对贯穿距离的影响不同.径向尺寸变化对喷雾的影响较为明显.

3) 网格长宽比对贯穿距离有一定的影响.不同径向尺寸或轴向尺寸时长宽比对贯穿距离的影响程度也不一样.对于本算例而言,通过比较发现,当径向尺寸为 2 mm,网格长宽比在 1~2 时,喷雾贯穿距离和喷雾形态与实验拟合情况最好.

参考文献

- [1] KRUGER C, STEINER R, KRAUS E, *et al.* Demands on CFD models of mixture preparation and combustion in IC engines for industrial purposes[C]//Fifth World Congress on Computational Mechanics. Vienna: Institution of Mechanical Engineers, 2002: 285-287.
- [2] ABANI N, KOKJOHN S, PARK S W, *et al.* An improved

- spray model for reducing numerical parameter dependencies in diesel engine CFD simulations[R]. Washington DC:SAE International,2008: 2008-01-0970.
- [3] HUI-YA Z, YU-SHENG Z, BO X, *et al.* Extension of o'rouke droplet collision model: application to diesel spray of single-hole injector[R]. Washington DC:SAE International, 2006: 2006-01-3335.
- [4] BARROSO G, SCHNEIDER B, BOULOUCHOS K. An extensive parametric study on diesel spray simulation and verification with experimental data[R]. Washington DC:SAE International, 2003: 2003-01-3230.
- [5] ABANI N, MUNNANNUR A, REITZ R D. Reduction of numerical parameter dependencies in diesel spray models[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(3): 1-9.
- [6] POST S, IYER V, ABRAHAM J. A study of near-field entrainment in gas jets and sprays under diesel conditions[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(2): 385-395.
- [7] 强永平, 李耀宗, 白洪林, 等. 组合喷射对双对置二冲程发动机燃烧过程影响的计算研究[J]. 车用发动机, 2014(5): 46-53. QIANG Yong-ping, LI Yao-zong, BAI Hong-lin, *et al.* Influence of combined injection on OPOC two-stroke engine combustion[J]. Vehicle Engine, 2014(5): 46-53. (In Chinese)
- [8] 赵晓辉, 张翼, 许俊峰, 等. OPOC 发动机研究综述[J]. 内燃机与配件, 2012(11): 24-26, 29. ZHAO Xiao-hui, ZHANG Yi, XU Jun-feng. OPOC engine research summary [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2012(11): 24-26, 29. (In Chinese)
- [9] 王豪, 赵振峰, 赵长禄, 等. 对置活塞二冲程缸内直喷汽油机混合气形成的数值研究[J]. 车用发动机, 2015(4): 43-48. WANG Hao, ZHAO Zhen-feng, ZHAO Chang-lu, *et al.* Numerical simulation on mixture formation of opposed-piston two-stroke GDI engine[J]. Vehicle Engine, 2015(4): 43-48. (In Chinese)
- [10] 袁文华, 潘剑峰, 李德桃, 等. 燃烧过程动态可视化装置的研制[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 74-78. YUAN Wen-hua, PAN Jian-feng, LI De-tao, *et al.* The development of combustion process dynamic visualization facility [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2005, 32(3): 74-78. (In Chinese)
- [11] 文华. 基于 CFD 的柴油机喷雾混合过程的多维数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学能源与动力工程学院, 2004: 42-55. WEN Hu. Multi-dimensional numerical modeling of spray mixing process in diesel engines based on CFD [D]. Wuhan: School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2004: 42-55. (In Chinese)
- [12] 徐海涛. 直喷式柴油机喷雾混合机理、建模及三维数值模拟[D]. 武汉: 华中理工大学能源与动力工程学院, 1998: 30-45. XU Hai-tao. Spray mixing mechanism, modeling and 3D numerical simulation of direct injection diesel engine [D]. Wuhan: School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 1998: 30-45. (In Chinese)
- [13] 成传松, 李云清, 王艳华, 等. 喷雾仿真中的网格依赖性[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1964-1969. CHEN Chuan-song, LI Yun-qing, WANG Yan-hua, *et al.* Investigation of the grid dependency from the spray simulation [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 1964-1969. (In Chinese)
- [14] 房芳. 基于多扫掠的六面体网格划分算法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2007: 26-38. FANG Fang. The research of hexahedral mesh generation algorithm based on multi-sweep [D]. Nanjing: School of Mechanic and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 26-38. (In Chinese)
- [15] 漆文邦, 郑超. 基于单元不同长宽比网格划分的有限元误差分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(2): 108-110. QI Wen-bang, ZHENG Chao. A study of sensitivity to mesh distortion of isoparameter elements[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(2): 108-110. (In Chinese)