

文章编号:1000-8055(2013)11-2430-10

气助式直接喷射喷油器动态喷雾场 数值模拟及试验

程 强, 张振东, 谢乃流

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 为了研究小型飞机发动机气助式直接喷射 (air-assisted direct injection, AADI) 喷油器喷雾形态及发展规律, 采用数值模拟和高速摄影技术对其动态喷雾场进行研究. 以锥阀运动的物理学模型为数值计算的移动边界条件, 结合动网格技术对 AADI 喷油器动态喷雾场的速度分布、静动压分布和不同时刻雾化颗粒的空间分布进行动态数值模拟分析. 以 0.2 ms 为步长, 对 3.0 ms 内不同锥阀开启时刻的喷雾形态、雾化颗粒和贯穿距离进行了试验和仿真对比分析. 结果表明: 采用 CFD 仿真模拟技术可对 AADI 喷油器动态喷雾场的速度分布、压力分布、喷雾形态等参数进行定性分析, 有利于揭示喷雾的发展规律, 同时通过对喷雾粒径和贯穿距离的定量对比分析, 表明了仿真计算的精确性, 数值模拟计算与试验结果误差小于 5%, 满足工程应用的要求.

关 键 词: AADI 喷油器; 数值模拟; 高速摄影; 动网格; 喷雾形态

中图分类号: V231.2; TK411.5

文献标志码: A

Numerical simulation and experiment on air-assisted direct injection injector dynamic spray field

CHENG Qiang, ZHANG Zhen-dong, XIE Nai-liu

(School of Energy and Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the spray form and development law of the air-assisted direct injection (AADI) injector of small aircraft engines, numerical simulation and high-speed photography technology were used to study the dynamic spray field. The physics model of cone valve motion was defined as the moving boundary conditions of numerical calculation. The spray velocity distribution, static and dynamic pressure distribution and spatial distribution atomization particles at different times of AADI injector were analyzed by dynamic grid. The spray pattern, atomization and penetration were compared by experiments and simulations in 3ms every 0.2ms. Results show that CFD simulation technology was used to analyze velocity distribution, pressure distribution, spray pattern and other parameters of the dynamic spray field of AADI injector, helping to reveal the development rule of the spray; moreover, through quantitative comparison analysis of the particle sizes and penetration distance, the accuracy of simulation calculation was shown. The deviation of numerical simulation and experimental results is less than 5%, meeting the requirements of engineering applications.

收稿日期: 2013-04-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51275309); 上海市教委科研创新项目(13YZ110); 上海市研究生创新基金(JWCXSL1201); 上海工程技术大学校基金项目(2011xy28)

作者简介: 程强(1985—), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事内燃机燃油喷射系统及内燃机燃烧与排放研究.

E-mail: jonny_cheng@126.com

Key words: AADI injector; numerical simulation; high-speed photography; dynamic grid; spray pattern

AADI 喷油器利用压缩空气与液体燃料之间的耦合作用,实现燃油颗粒的破碎和雾化,能有效地减小燃油雾化颗粒,改善混合气形成质量,改善发动机的燃烧状态,降低排放。目前除了应用于小型航空发动机外,在汽车发动机上也有所应用。由于其喷射过程涉及到燃油和压缩空气两相流动且其燃油雾化形态受锥阀运动影响较大,对其进行动态喷雾场的数值模拟具有一定的难度。目前国内外学者针对动态喷雾场的数值模拟相对较少,其中 Costa 等^[1]采用数值模拟的方法对多孔 GDI(gasoline direct injection)喷油器不同喷射压力和不同时刻的喷雾特性和颗粒分布进行了研究,但是并未深入分析燃油雾化形态随时间的变化规律;YANG, Aleiferis 等^[2-3]采用高速摄影技术对加入凝胶推进剂的旋流式喷油器的喷雾特性进行了试验研究,对燃油雾化形成过程的形态变化进行了描述,但只是进行试验研究并未进行数值模拟计算;Costa 等^[4]采用 CFD 软件并结合 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法对 GDI 喷油器的雾化特性进行了模拟计算,但并未采用连续动态

模型进行数值模拟,而是采用离散模型进行动态化处理。采用连续动态模型时需要准确的连续函数解析式,而且要求采样步长可以任意修改,而本模型的锥阀位移函数无法实现,故采用离散模型对锥阀的动态喷雾过程进行处理。

本文采用 CFD 软件 Fluent 中的 UDF(undefined function)模块建立 AADI 喷油器的动态喷雾模型并进行动态喷雾场仿真模拟,根据不同时刻锥阀抬升高度所对应的雾化形态进行仿真与试验对比分析,以验证该仿真计算模型的准确性,为工程应用提供参考。

1 AADI 喷油器模型及工作原理

图 1 为 AADI 喷油器结构示意图,其工作原理为由低压进气道喷射的燃油与压缩空气在混合腔内混合,由气助雾化喷嘴以一定的压力直接喷射到燃烧室内,形成可燃混合气。AADI 喷油器的结构由两个部分组成:一部分是负责燃油喷射的低压汽油喷油器;另一部分为负责混合气体喷射的气助雾化喷嘴。

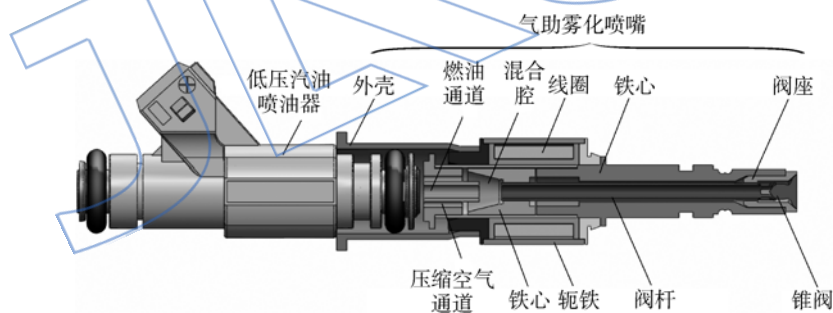


图 1 AADI 喷油器结构示意图

Fig. 1 Schematic of AADI injector structure

气助雾化喷嘴内部的压缩空气通过气轨进入混合腔,腔内压力一般为 $0.55 \sim 0.65 \text{ MPa}$ ^[5]。低压汽油喷油器将燃油以一定的压力喷入气助雾化喷嘴的混合腔内,利用燃油喷射的动能促进与压缩空气之间的作用进行预混合,当发动机 ECU (electronic control unit) 给出喷油信号时,气助雾化喷嘴在电磁力的作用下打开,混合压缩气喷入气缸,形成一股飘浮在空气中裹挟着油滴的气流,从而实现“软喷雾”^[6]。

2 AADI 喷油器锥阀运动分析

AADI 喷油器中的气助雾化喷嘴采用电磁阀

结构对其锥阀进行驱动,因此其运动过程为电、磁、机械、液力场等多场耦合作用的过程,在进行动态仿真计算之前需对其运动特征进行分析,将锥阀运动过程作为动态喷雾场耦合数值模拟的动态边界条件。

气助雾化喷嘴电磁线圈的等效电路如图 2 所示,磁路结构简图如图 3 所示。根据基尔霍夫电压平衡方程、麦克斯韦尔磁路方程、虚功原理、达朗贝尔运动方程及胡克定律可以导出下列描述气助雾化喷嘴动态过程的解析方程组^[7-10]:

$$U_0 = i(t)R + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$F_{\text{mag}} = \frac{\partial W_{\text{co-energy}}}{\partial x} = \frac{C_2 N^2 i^2}{2 [C_1 + C_2 (g_{\text{max}} - x)]^2} \quad (2)$$

$$F_{\text{flu}} = p \cdot A \quad (3)$$

$$F_{\text{spring}} = k \cdot (l - s) \quad (4)$$

通过联合式(1)~式(4)可计算气助雾化喷嘴锥阀随时间变化的运动方程为

$$F_{\text{mag}} - F_{\text{flu}} - F_{\text{spring}} - mg = m\ddot{x} \quad (5)$$

式中 U_0, R, i, L, N 分别为等效电路中电压、线圈电阻、线圈电流、电感、线圈匝数; C_1, C_2 为与磁阻有关的常量; $W_{\text{co-energy}}$ 为电磁力所做的虚功, g_{max}, x 分别为气助雾化喷嘴工作气隙和运动位移, $F_{\text{mag}}, F_{\text{spring}}, F_{\text{flu}}, p, m, A, k, l, s$ 分别为电磁力、弹簧力、液压力、燃油压力、运动件质量、锥阀截面积、弹簧刚度、弹簧总长、弹簧预压量。

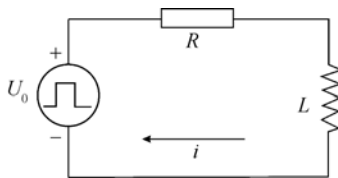


图 2 等效电路图

Fig. 2 Sketch of equivalent circuit

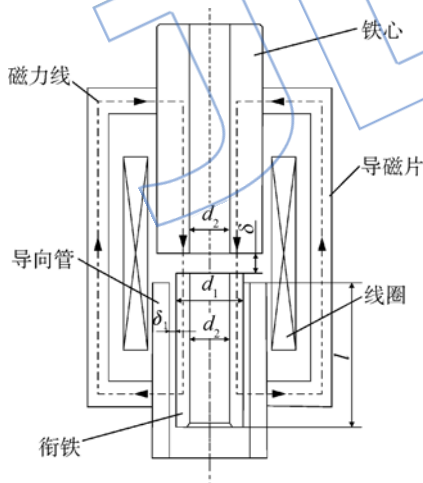


图 3 磁路结构简图

Fig. 3 Schematic of magnetic circuit structure

本文所研究的 AADI 喷油器本质上是一种常闭电磁阀,因此采用 Matlab 软件对式(5)进行微分方程求解,为了验证该方程的准确性,采用动态位移测试法^[11-12],利用精密位移传感器对喷油周期为 5.0 ms,脉宽为 3.0 ms 时的锥阀运动位移进行验证,试验与计算所得锥阀位移曲线如图 4 所示。由图可知,测试结果与计算结果有一定的偏

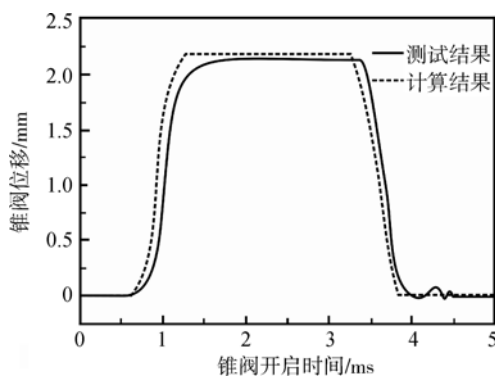


图 4 锥阀位移曲线

Fig. 4 Cone valve displacement curves

差,这主要是由于计算过程中忽略了摩擦、撞击、液压波动等因素,但最大误差小于 5%,因此,计算结果可用于对气助雾化喷嘴动态喷雾过程的模拟。

3 气助雾化喷嘴锥阀模型及网格划分

3.1 气助雾化喷嘴锥阀模型

图 5 为气助雾化喷嘴锥阀内部流道结构,其主要由混合气进口、流道、喉管及混合气出口 4 个部分组成。

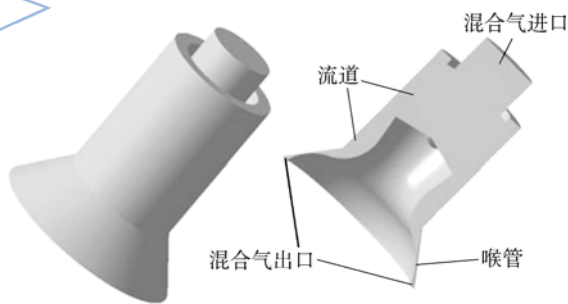


图 5 锥阀内部流道结构

Fig. 5 Internal flow structure of cone valve

3.2 动网格技术

气助雾化喷嘴锥阀运动造成型腔内的油气混合气的运动边界发生变化,在仿真计算过程中需要采用移动边界条件进行计算。根据动网格守恒方程对每个迭代步中变化的边界情况自动完成网格的更新,并采用 Fluent UDF 或者型函数对初始网格、造成边界的运动方式、参加运动的区域进行定义。在每个控制体中,采用广义标量 φ 的守恒方程进行动网格的划分^[13]。

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} =$$

$$\int_{\partial V} \Gamma \nabla \varphi \cdot dA + \int_V S_\varphi dV \quad (6)$$

式中 ρ 为燃油密度, u 为燃油速度, u_g 为动网格的速度, S_φ 为源项, Γ 为扩散系数, dV 为控制边界。

3.3 网格模型

图 6 为气助雾化喷嘴计算区域的几何网格模型,为了提高动态喷雾场的计算的对比性,定容弹(constant volume bomb,CVB)设计成与试验定容弹形状及容积相同,定容弹尺寸为 $170\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$,气助雾化喷嘴按照试验要求安装在定容弹的顶部中间位置。为了保证计算结果的准确性,模型网格划分全部采用非结构动网格。图 7 为气助雾化喷嘴局部动网格结构,以锥阀的

开启和关闭位置为动网格的边界条件,采用动态分层模型对其进行网格划分^[14],在保证计算精度和计算效率的同时,对局部网格进行细分,如图 7 所示。

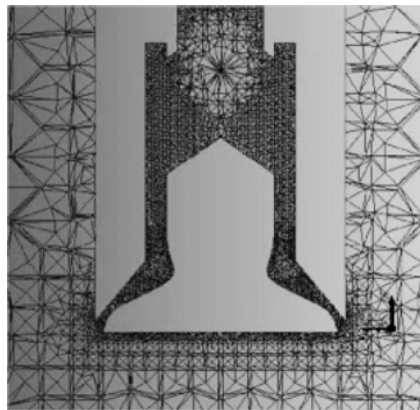


图 7 气助雾化喷嘴局部动网格结构

Fig. 7 Local dynamic grid structure of air-assisted sprayed injector

4 数值模拟与试验验证

4.1 试验测试系统

图 8 所示为试验测试系统示意图,本试验采用 Photron 公司的 Fastcamsa1.1 高速摄影机,其主要性能参数如下:帧频为 10 000 帧/s,分辨率为 $768\text{ 像素} \times 768\text{ 像素}$ 。照明光源采用日本 USHIO 公司的 500W 氙灯 UXL-500SX。激光粒度仪采用珠海欧美克仪器有限公司的 DP-02 型滴谱仪,其性能参数如下:测试范围为 $1 \sim 1500\text{ }\mu\text{m}$,重复性

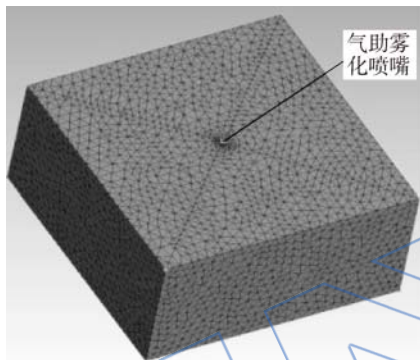


图 6 气助雾化喷嘴计算区域的几何网格模型

Fig. 6 Computational region geometry grid model of air-assisted sprayed injector

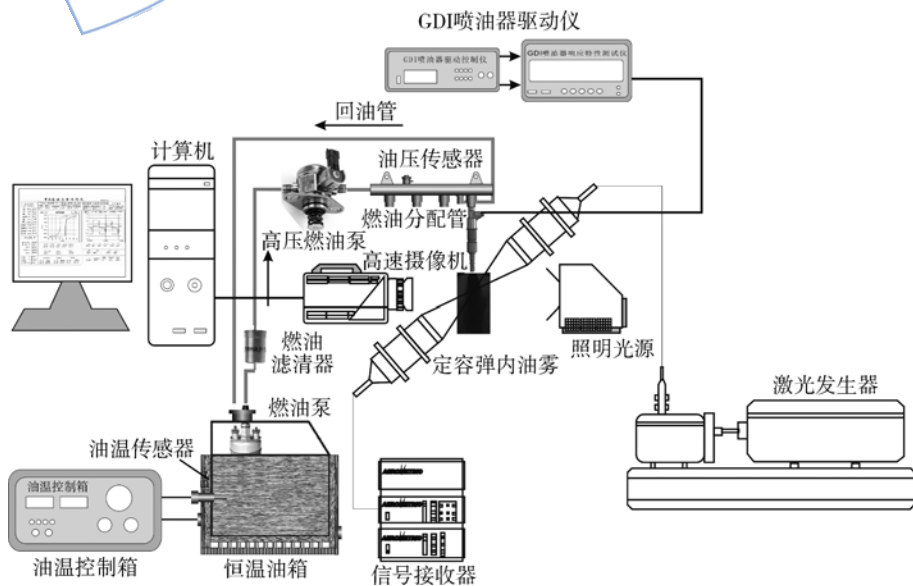


图 8 试验测试系统示意图

Fig. 8 Schematic of experimental test system

误差 $<3\%$,测试时间为 $1\sim 2\text{ min}$,独立探测单元数为 32,光源采用 He-Ne 激光器,功率为 2 mW ,波长为 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$.油温采用恒温系统控制.

4.2 试验及仿真参数设置

如表 1 所示,为气助雾化喷嘴动态喷雾特性试验及仿真参数设置.

表 1 气助雾化喷嘴动态喷雾特性试验及仿真参数
Table 1 Dynamic spray characteristics experiment and simulation parameters of air-assisted sprayed injector

参数	数值
喷油脉宽/ms	3.0
喷油周期/ms	5.0
环境压力/ 10^5 Pa	1.0
燃油、气体及定容弹温度/K	300
气体压力/ 10^5 Pa	6.5
燃油压力/ 10^5 Pa	8

4.3 气助雾化喷嘴流场仿真分析

AADI 喷油器的喷雾过程分为两个阶段:第一阶段为低压 EFI(electronic fuel injection)喷油器将燃油喷入到充满压缩空气的气助雾化喷嘴混合腔内,在混合腔内进行混合;第二阶段为第一阶段的混合气在锥阀打开后喷出一股裹挟着压缩空气的液滴群.为了研究 AADI 喷油器的雾化形态发展过程,假设第一阶段的混合气混合均匀,雾化颗粒均匀分布.

图 9、图 10 所示为锥阀完全开启时,气助式雾化喷嘴静态流场和动态流场的速度分布图.由图可知,油气混合气垂直于进口方向进入喷嘴内,在喷嘴内流动时经过不同形状的流动截面后,在喷嘴内部形成不同的速度分布,混合气进入喷嘴的速度大约为 100 m/s ,在喉管处速度达到最大,约为 520 m/s ,由于此处速度远远超出声速,为了避免激波的影响,本文模型选用可压缩模型进行处理^[15],喷嘴内部静态速度分布与动态速度分布基本一致,但是通过 $z=0$ 截面速度矢量图可以看出:采用动态模拟的混合气在喷嘴出口处形成了强烈的涡流,而静态模拟的混合气相对平稳,这主要是由于在进行动态数值模拟时,以锥阀运动与气体的相互作用作为边界条件,并且考虑了气体的黏性作用,从而造成高速气流在喷嘴出口附近形成了强烈的涡流.

在流体流动中,总压是静压与动压之和,气助

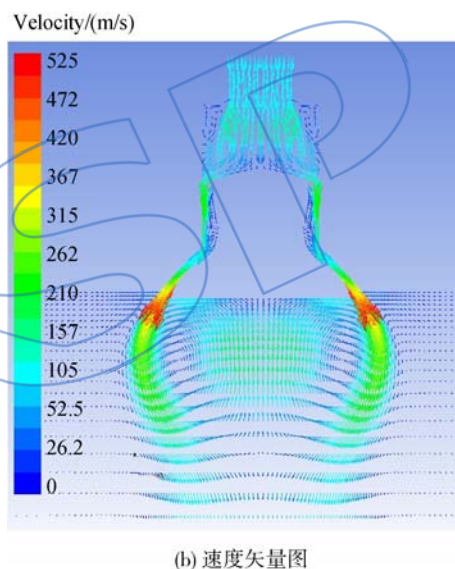
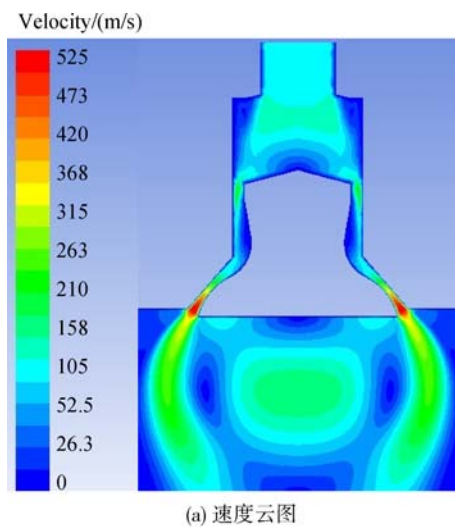
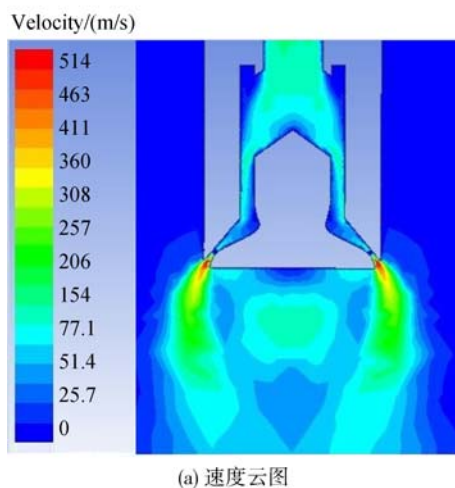
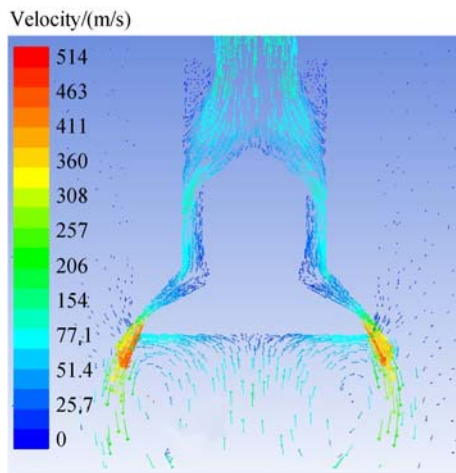


图 9 $z=0$ 截面静态速度分布

Fig. 9 Static speed distribution on section $z=0$

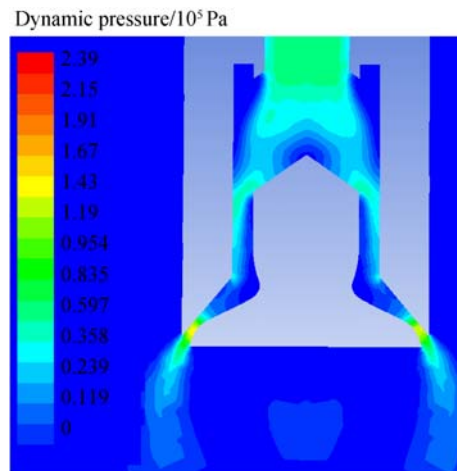




(b) 速度矢量图

图 10 $z=0$ 截面动态速度场分布

Fig. 10 Dynamic speed distribution on section $z=0$

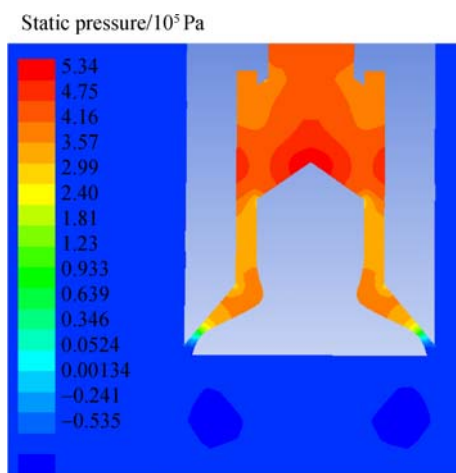


(b) 动压分布

图 11 $z=0$ 截面压力分布

Fig. 11 Pressure distribution on section $z=0$

雾化喷嘴内部的静压大小可以反映介质流动的阻力,动压则反映流动的动力.图 11(a)为喷嘴内部气相流场的静压分布图,由图可知,喷嘴内部的绝对静压保持在 4.5×10^5 Pa 左右,在喷嘴出口附近开始急剧下降,在喷嘴出口处降到大气压,即 1×10^5 Pa 左右,在喷嘴出口处有 2 个负压区,主要是流道内的混合气与外部空气在此处形成了强烈的两相耦合作用造成.该结果与图 11(b)中的动压分布刚好相反,喷嘴进口处的动压较低,小于 1×10^5 Pa,在喷嘴出口处动压值迅速增加,喷嘴出口处动压值为 2.5×10^5 Pa 左右,说明介质流动速度在喷嘴出口处达到最大值.



(a) 静压分布

4.4 不同时刻喷雾颗粒的空间位置和速度

液滴停留时间能显示出不同时刻喷嘴喷射出

来的液滴在定容弹内的相对位置.图 12 所示为锥阀开启 1.0 ms 时雾化颗粒停留时间分布,由图可知,此时锥阀并未完全打开,此时喷油量较少,贯穿距离较短,整体形状呈倒“蘑菇状”,红色粒子为锥阀开启瞬间的雾化颗粒,在气液两相流的耦合作用下,向上卷吸并向四周扩散.

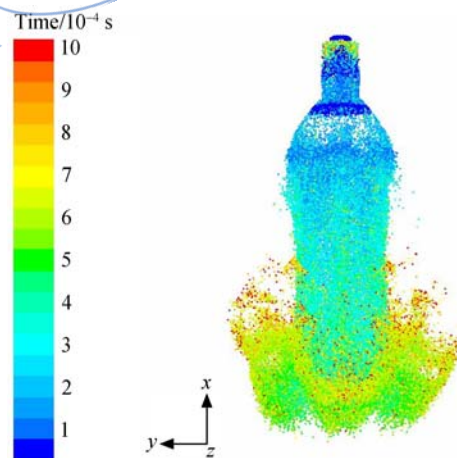


图 12 锥阀开启 1.0 ms 时雾化颗粒停留时间分布

Fig. 12 Sprayed particle residence time distribution at 1.0 ms after cone valve opening

图 13 所示为锥阀开启 3.0 ms 时雾化颗粒停留时间分布,此时锥阀完全开启,雾化颗粒经历的时间较长,喷油量较大,较早喷射出来的雾化颗粒在定容弹内向上卷吸、扩散,而较晚喷射出来的雾化颗粒在其自身动能的作用下按自身轨迹运动,此时喷雾型态呈“箭”型.

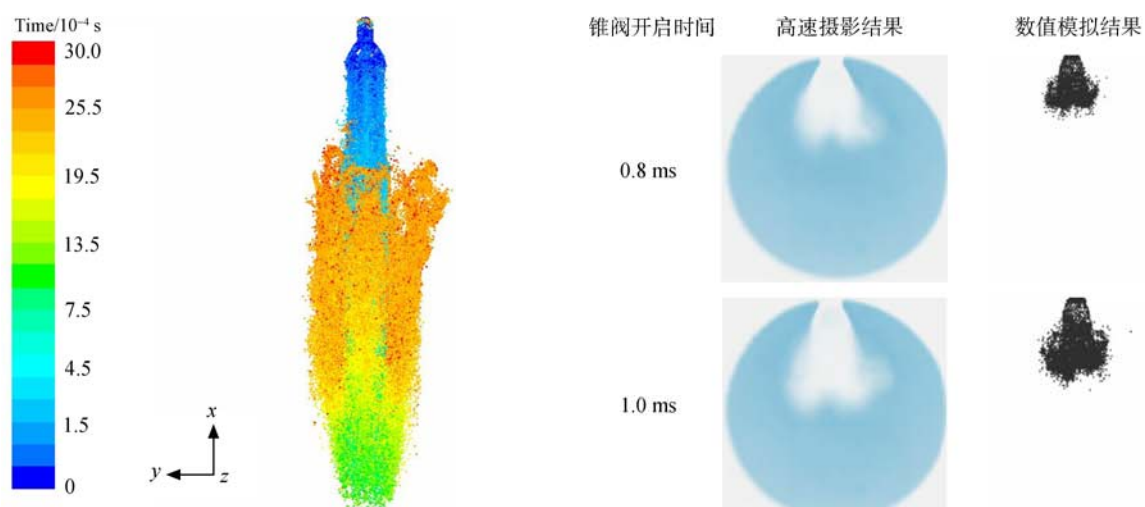
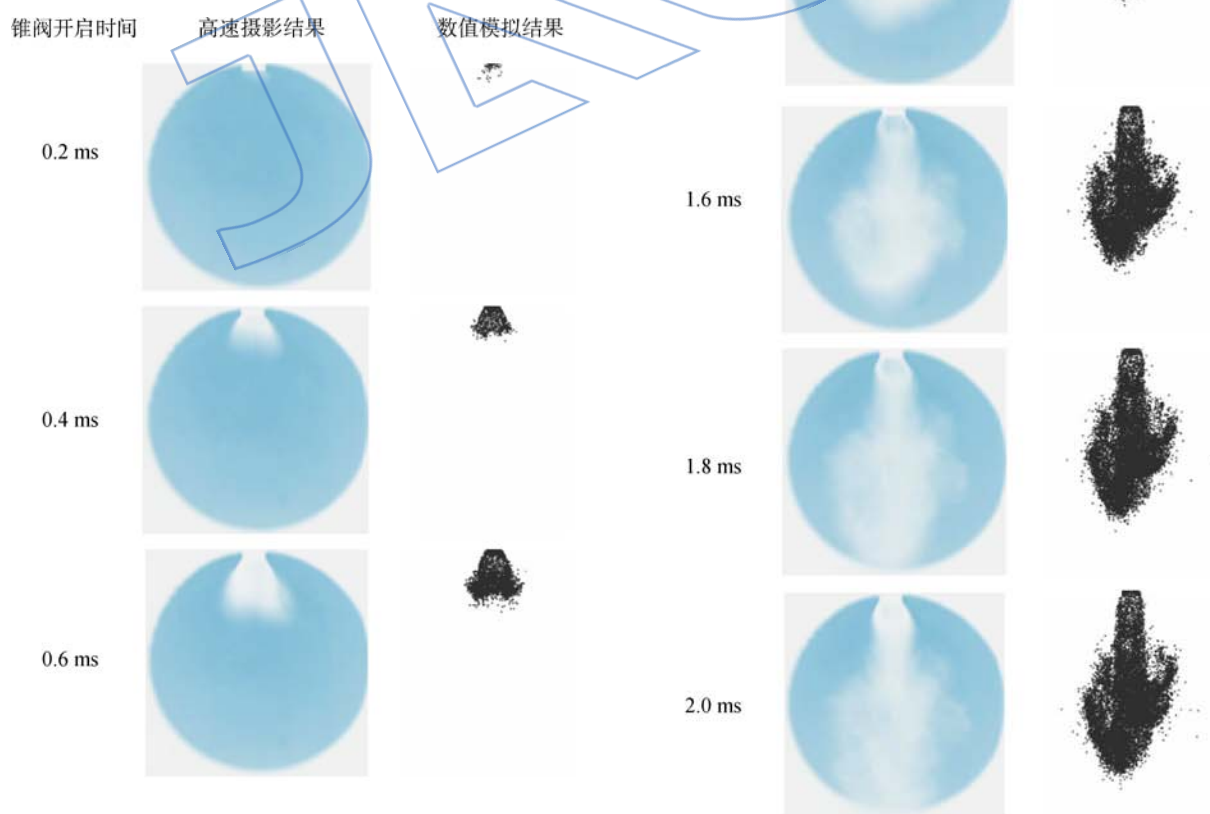


图 13 锥阀开启 3.0 ms 时雾化颗粒停留时间分布

Fig. 13 Sprayed particle residence time distribution at 3.0 ms after cone valve opening

4.5 动态喷雾形态数值模拟及试验分析

如图 14 所示,为一组动态喷雾形态数值模拟与试验分析的对比图,仿真及试验条件参照表 1. 该组图片中步长为 0.2 ms,喷油持续期为 3.0 ms,通过图像分析,可得出以下结论:



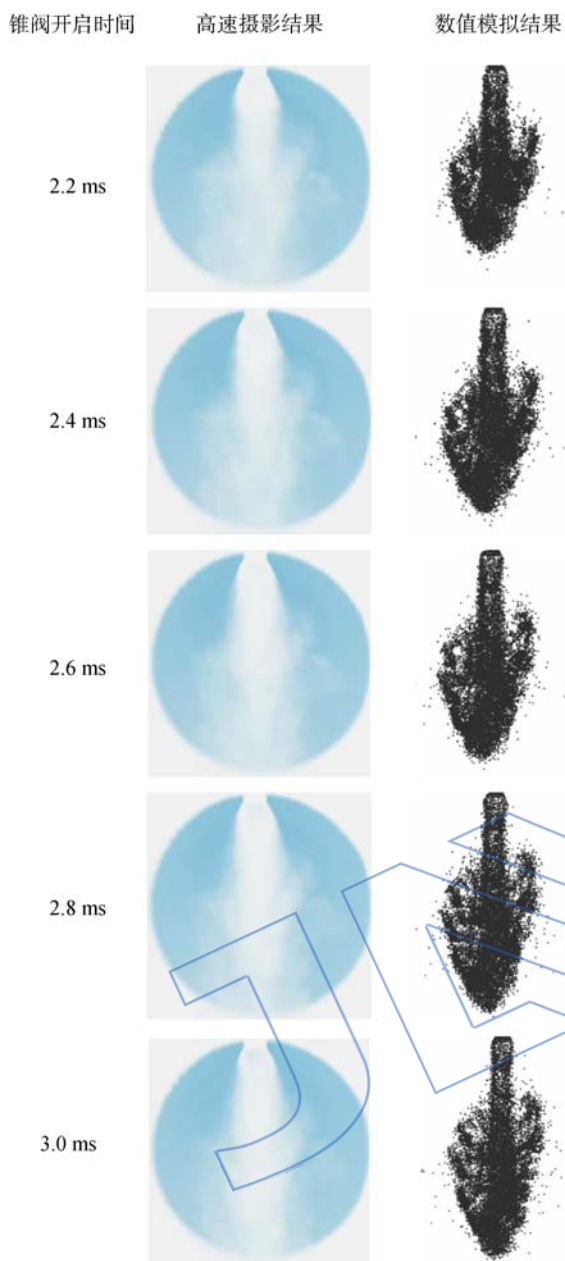


图 14 动态喷雾形态发展过程

Fig. 14 Development process of dynamic spray pattern

锥阀触动开启阶段(0.2~0.4 ms),喷嘴内部的油气混合气从锥阀喷出,此时锥阀位移较小,少量雾化燃油颗粒以一定的锥角沿着自身的运动轨迹喷入定容弹内,主要是因为此时锥阀开启位移较小,锥阀出口处还没有形成涡流。

锥阀加速开启阶段(0.4~1.6 ms),此时锥阀开启位移逐渐加大,锥阀出口处两侧对称的小旋涡逐渐变大,压缩空气与液相汽油之间发生强烈的耦合作用,大颗粒液滴的动量和惯性力较大,受气相的影响相对较小,离开喷嘴后,粒径较大的液滴仍按自身轨迹运动,沿喷嘴出口的切线方向向

喷嘴轴线收拢;与此相反,小颗粒液滴的动量和惯性力较小,容易受气相的影响,在喷雾中的雾化介质和周围空气的双重作用下,小颗粒液滴将随气相流场扩散到喷雾外围。

锥阀完全开启阶段(1.6~3.0 ms),此时锥阀喷雾形态基本稳定,喷雾外围的液滴在两相的耦合作用下开始向上卷吸并向周围扩散,喷雾中间的液滴仍沿着自身的轨迹向下运动,形成了柱形的液雾炬,形成所需的可燃混合气。

通过试验与仿真分析可知,不同时刻的雾化形态变化规律基本一致,然而在锥阀开启位移逐渐加大后,数值模拟的液滴扩散范围明显小于试验液滴扩散的范围,而且贯穿距离也相对较短,这主要是由于数值模拟计算时,忽略了燃油液滴蒸发对雾化特性的影响,导致微小雾化颗粒在气流作用下的强度减弱。

4.6 动态喷雾粒径和喷雾贯穿距离

喷雾粒径的大小直接影响燃油颗粒的蒸发速度和油气的微观混合。本文采用索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)表示喷雾粒径。激光粒度仪对于锥阀开启较短时间之内的颗粒捕捉不到,因此只对锥阀开启 1.0 ms 之后的喷雾粒径进行测试。试验与数值模拟结果如图 15 所示。由图可知,除了锥阀刚开启的 0.2 ms 内雾化颗粒较大,约为 $36\mu\text{m}$ 外,其他燃油喷射期内的平均喷雾粒径基本上在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 内。主要因为在喷射初期的 0.2 ms 内,锥阀开启位移很小,只有少量汽油喷出气助雾化喷嘴,此时由于在喷嘴出口较近处测量燃油粒径,燃油还没来得及发生二次破碎和蒸发导致燃油颗粒较大。随着锥阀逐渐开启,气液两相之间产生强烈耦合作用,燃油颗粒在耦合作

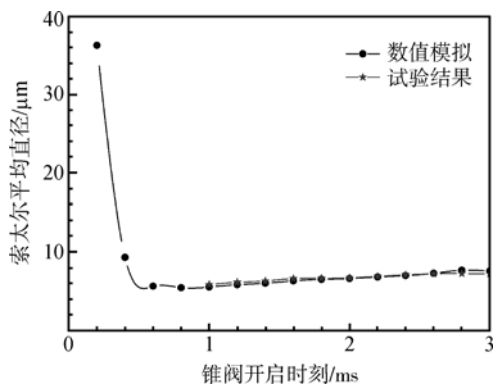


图 15 不同锥阀开启时刻 SMD 的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of SMD with different cone valve opening time

用下迅速破碎,形成较小的燃油颗粒.当锥阀完全开启后,喷雾粒径呈微微上升的趋势,这主要因为雾化颗粒之间的碰撞、黏附和聚合,使喷雾粒径稍有增大.

图16所示为不同锥阀开启时刻贯穿距离的变化曲线.由图可知,在锥阀开启后0~1.0 ms内,数值模拟与试验结果基本吻合;而在锥阀开启后1.0~2.0 ms内,试验结果明显大于数值模拟,主要是由于数值模拟时采用理论计算所得的锥阀位移为边界条件(如图4所示)而实际锥阀位移比理论计算锥阀位移偏小,当锥阀完全打开后喉管处的燃油所获得的动能要大,因此试验结果比数值模拟的贯穿距离偏大.由于定容弹的观测窗口为直径为100 mm的圆形,而AADI喷油器在1.8 ms贯穿距离达到100 mm,造成1.8 ms以后的试验无法准确测得其贯穿距离.

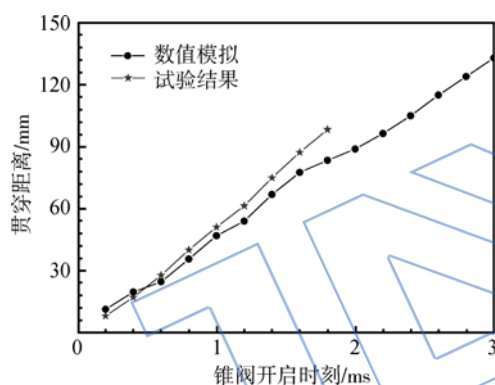


图16 不同锥阀开启时刻贯穿距离的变化曲线

Fig. 16 Variation curves of penetration distance with different cone valve opening time

5 结 论

1) 通过建立AADI喷油器锥阀的运动方程,对锥阀位移与时间的关系进行了理论计算和试验分析,以此方程做为AADI喷油器动态喷雾场数值模拟的移动边界条件.采用动网格平衡方程对AADI喷油器3-D锥阀结构进行动网格划分,为了保证计算结果的准确性,所有网格采用非结构网格.

2) 采用数值模拟的方法分析了锥阀全开时 $z=0$ 截面静态和动态速度场分布,结果表明:锥阀全开时静态速度场和动态速度场分布相似,但动态速度场更接近理论和实际.对锥阀内的静压和动压分布进行了分析,得出结论为喷雾主要是在静压和动压的作用下产生的.

3) 分析了1.0 ms和3.0 ms时燃油颗粒在空间上的分布情况,得出了燃油颗粒的运动轨迹和变化状态.采用高速摄影技术对AADI喷油器喷雾形态发展过程进行了试验研究,并与数值模拟结果进行对比分析,结果表明数值模拟与试验测试结果相吻合,采用数值模拟计算可为工程应用提供参考.

参考文献:

- [1] Costa M, Sorge U, Allocca L. Numerical study of the mixture formation process in a four-stroke GDI engine for two-wheel applications[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19(4): 1212-1226.
- [2] YANG Lijun, FU Qingfei, QU Yuanyuan, et al. Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors[J]. *Fuel*, 2012, 97: 253-261.
- [3] Aleiferis P G, van Romunde Z R. An analysis of spray development with iso-octane, *n*-pentane, gasoline, ethanol and *n*-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions[J]. *Fuel*, 2013, 105: 143-168.
- [4] Costa M, Sorge U, Allocca L. CFD optimization for GDI spray model tuning and enhancement of engine performance[J]. *Advances in Engineering Software*, 2012, 49: 43-53.
- [5] Park S H, Kim H J, Suh H K, et al. Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30(6): 1183-1192.
- [6] 白洪林,李志军,李骥琦,等.空气辅助直喷汽油机缸内喷雾特性的试验[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(1): 38-44.
BAI Honglin, LI Zhijun, LI Jiqi, et al. Experiment on spray characteristics with air-assisted injector of direct-injection gasoline engine[J]. *Transaction of CSICE*, 2013, 31(1): 38-44. (in Chinese)
- [7] 李波,李云清,王德福. GDI发动机喷雾特性的数值模拟和试验[J]. *内燃机学报*, 2012, 30(1): 9-15.
LI Bo, LI Yunqing, WANG Defu. Numerical simulation and experiment on spray characteristics of GDI engines[J]. *Transaction of CSICE*, 2012, 30(1): 9-15. (in Chinese)
- [8] 何勇灵,丁川. 喷油器瞬态两相流动的建模方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(1): 6-10.
HE Yongling, DING Chuan. Method of modeling transient two-phase flow in injector[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(1): 6-10. (in Chinese)
- [9] 郑艳. 气助雾化喷嘴结构对煤油雾化影响的CFD研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHENG Yan. CFD research on the effects of air-assisted atomizer structure on kerosene atomization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [10] 高岩飞. 点燃式煤油发动机燃油雾化技术研究[D]. 南京:

- 南京航空航天大学, 2011.
- GAO Yanfei. Spark ignition engine kerosene fuel atomization technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [11] 李之华, 何邦全, 赵华. 直喷汽油机多孔喷油器喷油过程的数值模拟[J]. 内燃机学报, 2012, 30(3): 241-247.
- LI Zhihua, HE Bangquan, ZHAO Hua. Numerical simulation of fuel injection processes of a multi-hole injector for direct injection gasoline engines[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(3): 241-247. (in Chinese)
- [12] 吴泽俊, 何小民, 朱志新, 等. 周期性供油气助雾化直喷喷嘴雾化特性试验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 307-315.
- WU Zejun, HE Xiaomin, ZHU Zhixin, et al. Experiment on spray characteristics of periodic air-assist direct injection atomize[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 307-315. (in Chinese)
- [13] Rüger M, Hohmann S, Sommerfeld M, et al. G. Euler/Lagrange calculations of turbulent sprays: the effect of droplet collisions and coalescence[J]. Atomization and Sprays, 2000, 10(1): 47-81.
- [14] Rotondi R, Bella G. Gasoline direct injection spray simulation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(2): 168-179.
- [15] Shim Y S, Choi G M, Kim D J. Numerical and experimental study on hollow-cone fuel spray of highpressure swirl injector under high ambient pressure condition[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2): 320-329.