

天然气柴油双燃料发动机内部燃料混合模拟研究

谭小强¹,王 谦¹,何志霞²,张州榕¹,戴礼明¹,韩 丹¹

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院,镇江 212013;2. 江苏大学 能源研究院,镇江 212013)

Study on the Mixing Process of Diesel and Natural Gas in a Natural Gas/Diesel Dual-Fuel Engine

TAN Xiaoqiang¹, WANG Qian¹, HE Zhixia², ZHANG Zhouong¹, DAI Liming¹, HAN Dan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on the AVL FIRE code, the simulation of injection and mixture of natural gas and diesel fuel in a natural gas engine with pilot injection was carried out to study its combustion and emission performance. The related turbulent model was verified by the bed test and then the characteristic parameters, such as orifice position, inclined angle and gas-diesel over-lapping angle were analyzed. Results show that the $k-\epsilon$ turbulent model is more suitable for simulating the dual fuel injection, and the larger the injection height, inclination angle and over-lapping angle, the smaller SMD. In particular, using a large over-lapping angle can obtain the best atomization effect. The relative nozzle position will decide the energy transfer between the fuel and gas jets, thus influencing the penetration distance of fuel and gas and the atomization effect.

摘要: 基于 AVL FIRE 软件,模拟了缸内直喷引燃天然气和柴油喷射混合过程,对湍流模型进行了校核和验证,分析了不同喷孔高度、喷孔倾斜角及喷孔交角下柴油和天然气射流的混合情况。研究表明: $k-\epsilon$ 湍流模型更适用于天然气/柴油双燃料的模拟;喷孔高度、倾斜角及交角越大,索特平均值径(SMD)越小,其中喷孔交角大的获得的雾化效果最好;喷孔之间的相对位置决定了油气射流之间能量传递,从而影响了油气贯穿距及雾化效果。

关键词: 内燃机;天然气;双燃料喷射;数值模拟;缸内直喷

Key words: IC engine; natural gas; dual fuel injection; numerical simulation;
in-cylinder direct injection

DOI:10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.02.008

中图分类号:TK431

文献标识码:A

0 概述

随着石油资源的短缺及节能环保的要求,天然气作为一种发动机清洁代用燃料日益受到重视。但传统天然气发动机采用进气道喷射,充气效率低,降

低了发动机的输出功率^[1]。而缸内高压直喷柴油/天然气技术,通过柴油引燃高压喷射入气缸内的天然气,能有效缓解传统天然气发动机充气效率低、动力不足、HC 排放高等缺点;同时,在保证发动机动力性与经济性的基础上,NO_x 和 CO₂ 排放降低,PM

收稿日期:2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51176066,51276084);江苏省产学研联合创新项目(BY2013065-02);江苏高校优势学科建设工程项目(苏教材[2011]8号)

作者简介:谭小强(1991—),硕士生,主要研究方向为发动机喷雾与燃烧,E-mail:txqiang199@163.com;

王 谦(联系人),教授,博士,E-mail:qwang@ujs.edu.cn。

排放也显著降低^[2-3]。目前对缸内高压直喷天然气虽有相关研究,但是研究深度不够,特别是柴油引燃型缸内高压直喷天然气发动机研究更是仅仅集中于加拿大西港创新公司及英属哥伦比亚大学^[3]。开展相关研究对于促进我国天然气发动机技术发展非常必要。

随着柴油机缸内直喷技术成熟,对液体燃料高压喷射研究增多。气体燃料射流由于密度小且动量低,其与空气的混合比液体燃料更加困难。文献[4-5]对气体射流和柴油喷雾进行了仿真研究,分析了缸内气体射流的混合特性,指出柴油喷雾更容易与周围的空气混合。文献[6]简化了柴油引燃喷射的模型,研究了天然气和柴油两种燃料的量对双燃料发动机燃烧的影响。文献[7]研究了柴油引燃缸内高压直喷天然气和柴油射流的交角对放热率的影响。文献[8]采用组合喷嘴研究了缸内高压直喷柴油和天然气喷射及混合过程。国内在这方面开展的研究相对较少,且主要集中于天然气单独射流的喷射过程^[9]及针对西港创新公司发动机模型开展的数值模拟研究^[2]。随着缸内直喷技术的应用及天然气发动机的推广,缸内高压直喷天然气和柴油双燃料发动机将是未来研究重点。本文采用三维数值模拟方法对缸内直喷柴油/天然气喷射及混合过程进行更深入的探索及研究。

1 模型建立

1.1 喷雾及天然气射流模型

柴油喷雾的模拟采用拉格朗日方法,但是现代多孔的喷油器内部基本都存在空化现象^[10-11]。为了更加准确地模拟柴油喷雾,本文的喷雾模型考虑了内部空化对喷雾的影响,将内流的计算结果耦合到喷雾计算中,如图1(a)所示。图1(b)为喷嘴内空穴流动的模型,喷嘴入口和喷孔出口都设为压力边界,背压设为大气压,其喷嘴出口流动特性参数作为喷雾模拟的边界条件。缸内直喷天然气发动机网格模型及柴油喷孔位置如图1(c)所示。初次雾化模型使用 Core Injection 模型,二次雾化模型使用 WAVE 模型。

对于天然气射流,当喷孔出口处的压力高于背压的时候(理想气体在压比高于 1.86 时),气体射流会发生不完全膨胀,在喷孔出口处发生阻塞现象,其喷射过程非常复杂^[8]。图2为气体射流在喷孔出口处的膨胀过程。考虑到天然气射流在喷射过程中不会发生相变,本文直接采用真实的喷孔作为天然气射流的入口边界。

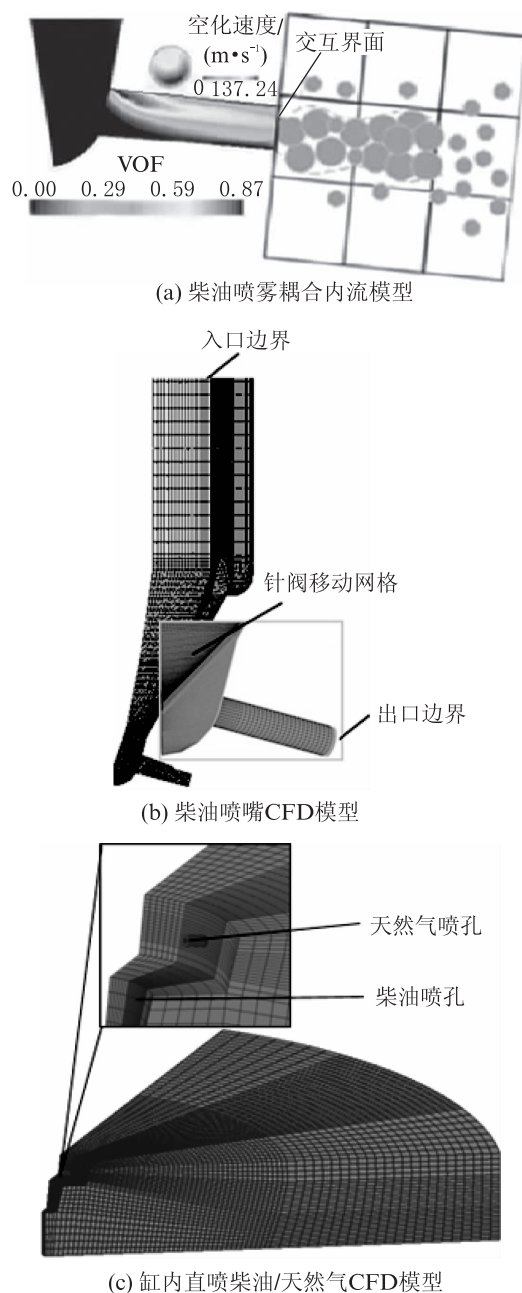


图1 喷雾耦合模型与缸内直喷天然气/柴油 CFD 模型

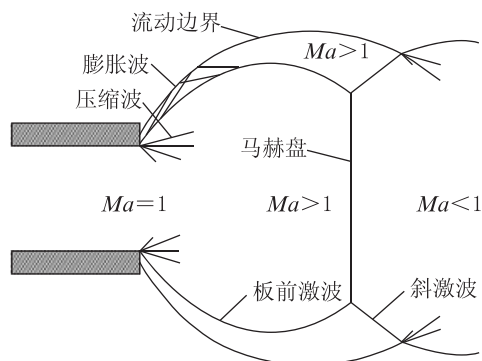


图2 气体射流膨胀过程

1.2 物理模型参数

本文采用的缸内高压直喷天然气发动机结构如图 3 所示。该模型为轴对称模型,本文研究其体积的 1/6,柴油和天然气射流的基本参数见表 1。试验过程中天然气射流流量变化如图 4 所示。

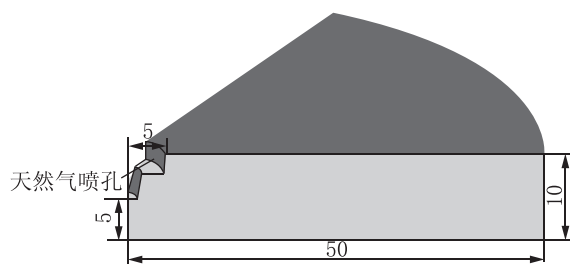


图 3 快速压缩机在上止点位置时的几何参数

表 1 柴油和天然气射流的基本参数

项目	参数
柴油喷孔孔径/mm	0.2
天然气喷孔孔径/mm	0.4
背压温度/K	293
喷油持续期/ms	0.5
柴油质量流量/(g·s ⁻¹)	5

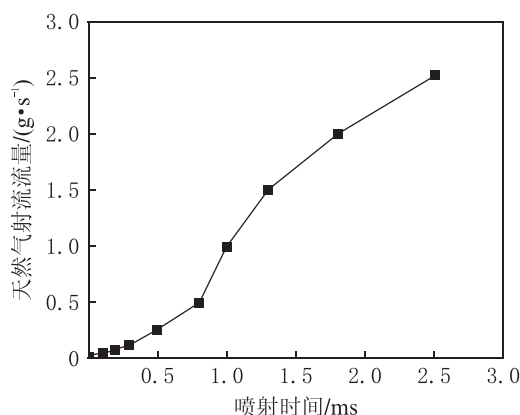


图 4 天然气射流流量变化图

2 相关定义与湍流模型

2.1 柴油和天然气射流贯穿距的定义

柴油喷雾贯穿距采用液相喷雾贯穿距。天然气射流贯穿距的定义如图 5 所示。将喷孔出口处定义为射流贯穿距始点,以沿着射流喷射轴线 3% 天然气质量分数的位置定义为其射流贯穿距前端,由于射流轴线与背压腔顶面呈 12.5°,因此气体射流贯穿距 $L_{\text{Gas}} = 1.024L_X$ 。

2.2 湍流模型

文献[12]基于有限差分方法采用湍流模型研究了瞬态不可压缩气体射流,获得的结果与试验中射流前期

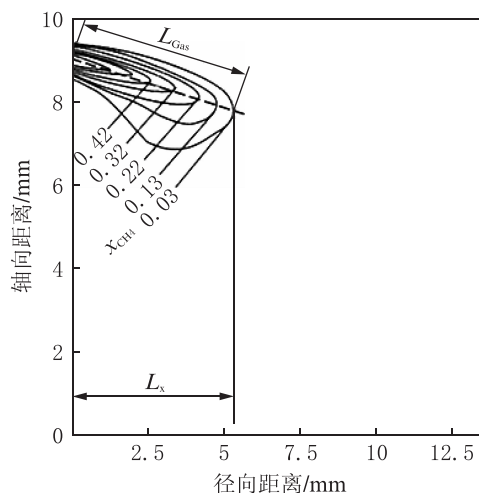


图 5 气体射流沿轴向质量分数及贯穿距定义

发展的数据比较吻合。文献[13-14]发现,模型预测的气流贯穿速度偏大。本文针对 FIRE 软件中提供的 $k-\epsilon$ 、 $k-\xi-f$ 两种湍流模型进行分析。 $k-\epsilon$ 模型是一种双方程模型,基于 Boussinesq 假设,隐含湍流是各项同性的,其优点是计算稳定性好,对计算资源的要求和花费低。 $k-\xi-f$ 模型是四方程模型,精度和稳定性都较好,计算时间仅比 $k-\epsilon$ 多 15%。然而,天然气射流与柴油的贯穿距与试验结果的比较可以看出, $k-\epsilon$ 模型更适合本文的缸内高压直喷天然气/柴油,如图 6 和图 7 所示。

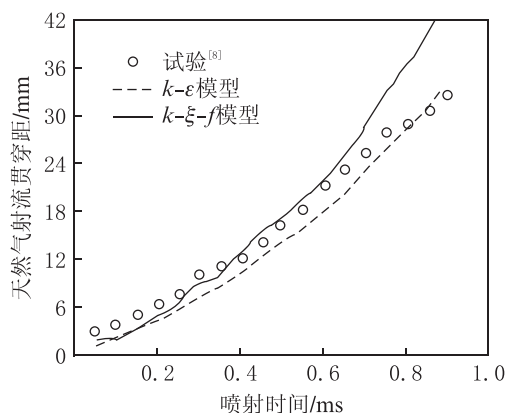


图 6 湍流模型对天然气射流的贯穿距的影响

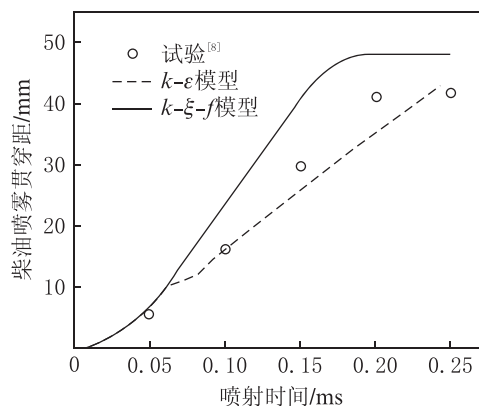


图 7 湍流模型对柴油射流的贯穿距的影响

3 模拟结果分析

3.1 数值模拟结果验证

图8为缸内高压直喷天然气和柴油的数值模拟结果与文献[8]纹影试验图的对比。从图8可以看出,模拟出来的天然气射流和柴油射流的轮廓基本上与试验结果一致。

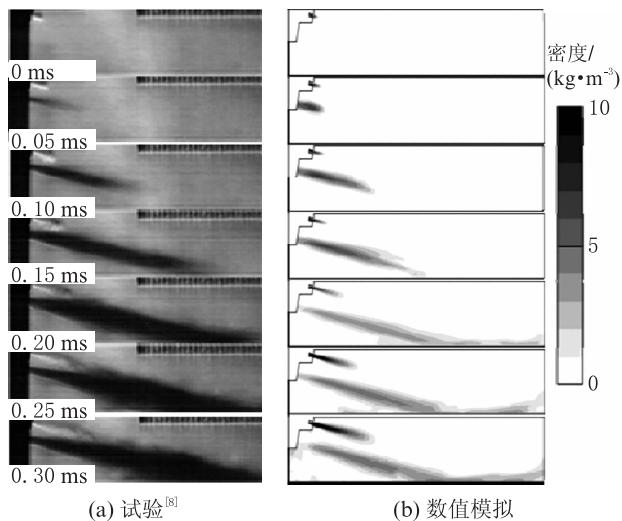


图8 数值模拟结果与试验对比

3.2 天然气与柴油喷孔相对位置方案设计

缸内高压直喷天然气和柴油对于喷射器的要求很高,文献[7]基于三维模型研究了引燃柴油和天然气射流之间的不同的交角,发现油气射流之间的交

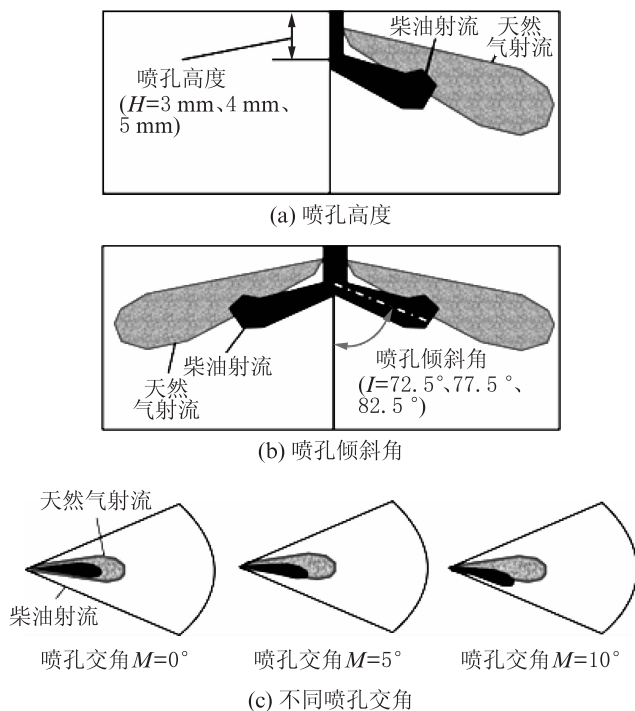


图9 数值模拟方案设计

角对缸内最高压力及发动机输出功率影响很大。本文提出几种喷孔相对位置的方案:不同的喷孔高度($H=3、4、5$ mm)、喷孔倾斜角($I=72.5^\circ、77.5^\circ、82.5^\circ$)及喷孔交角($M=0^\circ、5^\circ、10^\circ$)。

3.3 不同喷孔位置对射流的影响

图10为柴油喷雾的索特平均直径(SMD)随喷射时间的变化。从图10可以看出:随着喷孔高度的增加,SMD减小;喷孔倾斜角越大,SMD值下降的越慢,但是最终获得的SMD越小;喷孔交角能够大幅降低SMD,但更大的交角不能引起更多的SMD下降。

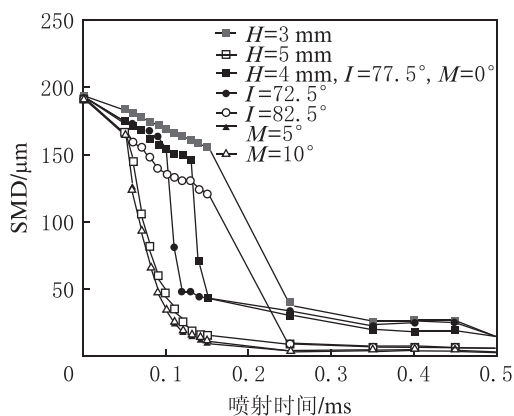


图10 柴油喷雾 SMD

图11为柴油喷雾贯穿距随时间的变化。由于定容室容积限制,喷射后期柴油射流均到达壁面,故最终射流都稳定在50 mm附近。从图11可以看出,在射流到达壁面之前,随着喷孔高度的增加,同一喷射时刻下,柴油射流贯穿距增大;随着喷孔倾斜角的增加,贯穿距也增大;增加喷孔交角能够增大喷雾贯穿距,但是继续增大喷孔交角,贯穿距长度并无明显变化。整体而言,两束射流相距越远,相互影响越小,到达最大贯穿距前,同一时刻下柴油射流贯穿距越长。柴油喷雾贯穿距变化与SMD变化呈一定关系,即贯穿距越大,表现出来的SMD越小。

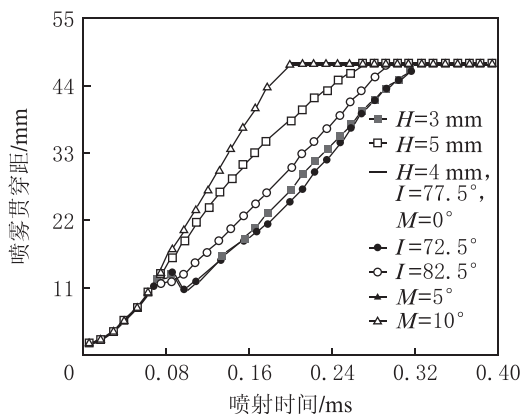


图11 柴油喷雾贯穿距

图 12 为气体射流贯穿距随时间的变化。从图 12 可以看出,喷孔高度、喷孔倾斜角对气体射流贯穿距的影响比喷孔交角的影响小。气体射流的贯穿距随喷孔倾斜角的增大而减小,随着交角的增大而减小。

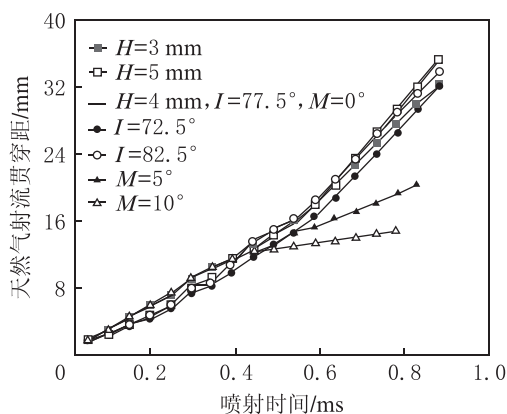


图 12 气体射流贯穿距

图 13 和图 14 为 0.25 ms 时刻下不同喷孔位置的射流轴向截面和径向截面速度分布云图。轴向截面为沿气体射流中心的截面;径向截面取距离定容室中心 6 mm 处与气体射流垂直的截面。

从射流轴向截面速度分布图上可以看出,喷孔相对位置更靠近的两束射流射流径向速度断面变形更大。从喷孔倾斜角为 72.5° 的射流径向速度分布图上可以推测:当射流间的相互作用较弱时,柴油射流径向速度断面呈圆弧状;当射流相互作用加强时,圆弧处速度断面的柴油补充到速度断面沿气体射流方向,使得圆弧处速度断面向中心凹陷,速度截面表现为沿气体射流方向拉伸的类菱形速度断面。

总体而言,采用小的喷孔高度、大的喷孔倾斜角、小的喷孔交角时,油气射流的相互作用强烈,而柴油射流的动能高于天然气射流,因此柴油射流将动能传递给天然气射流,使气体射流贯穿距增加。当喷孔高度增加、喷孔倾斜角减小、喷孔交角增大时,两束射流相互作用减弱,此时气体射流的动量高于柴油射流外围,此时气体射流传递动量给柴油射流,促进液滴的雾化。

4 结论

(1) $k-\epsilon$ 湍流模型比 $k-\xi-f$ 湍流模型更适用了天然气/柴油双燃料的模拟。

(2) 喷孔高度越大,倾斜角越大,交角越大,获得的喷雾贯穿距越长, SMD 越小;引燃柴油喷雾贯穿距是影响雾化质量的重要因素,天然气射流对柴

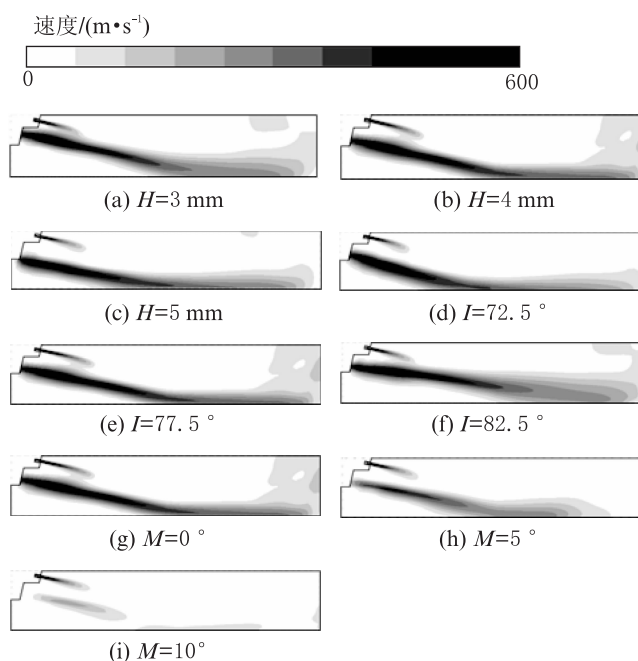


图 13 0.25 ms 时刻射流轴向速度分布

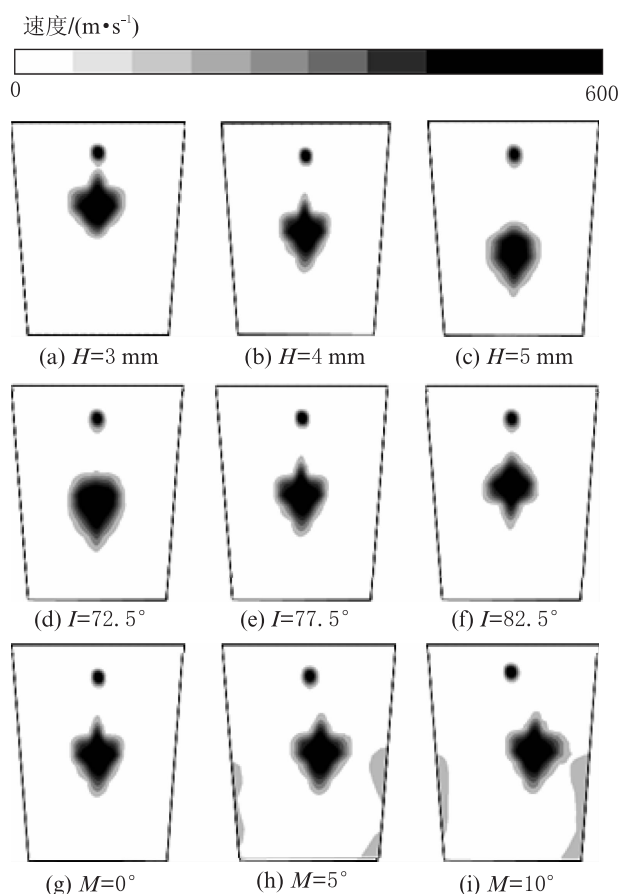


图 14 0.25 ms 时刻射流径向速度分布

油射流的影响不大。长的贯穿距能促进引燃柴油与空气的相互作用,从而促进雾化。

(3) 喷孔之间的相对位置决定了油气射流之间能量传递,从而影响了油气贯穿距及雾化效果。喷

孔相对位置中喷孔交角因素对油气射流的影响最大,对引燃柴油喷雾的雾化效果改善明显。

参考文献:

- [1] ROUSSEAU S, LEMOULT B, TAZEROUT M. Combustion characterization of natural gas in a lean burn spark-ignition engine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1999, 213(5):481-489.
- [2] 陈长军. 柴油微引燃缸内直喷天然气发动机燃烧过程仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [3] BROWN B, ROGAK S, MUNSHI S. Multiple injection strategy in a direct-injection natural gas engine with entrained diesel [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2009, 2009-01-1954.
- [4] ABRAHAM J. Entrainment characteristics of transient gas jets [J]. Numerical Heat Transfer: Part A, 1996, 30(4):347-364.
- [5] ABRAHAM J, MAGI V, MACINNES J, et al. Gas versus spray injection; which mixes faster [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1994, 940895.
- [6] MIAO H, MILTON B. Numerical simulation of the gas/diesel dual-fuel engine in-cylinder combustion process [J]. Numerical Heat Transfer, 2005, 47(6):523-547.
- [7] LI G W, OUELLETTE P, DUMITRESCU S, et al. Optimization study of pilot-ignited natural gas direct-injection in diesel engines [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1999, 1999-01-3556.
- [8] WHITE T. Simultaneous diesel and natural gas injection for injection for dual-fueling compression-ignition engines [D]. Randwick: Randwick University of New South Wales, 2006.
- [9] 王金华, 方宇, 黄佐华, 等. 利用高速摄影纹影法研究天然气高压喷射射流特性 [J]. 内燃机学报, 2007, 25(6):500-504.
- WANG J H, FANG Y, HUANG Z H, et al. Experimental study of the jet characteristics of high-pressure injected natural gas using high speed photograph method [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(6):500-504.
- [10] SOTERIOU C, ANDREWS R, SMITH M. Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1995, 950080.
- [11] 钟汶君, 何志霞, 王谦, 等. 不同比例放大倍数喷嘴内空穴流动的实验研究 [J]. 内燃机工程, 2014, 35(6):65-69.
- ZHONG W J, HE Z X, WANG Q, et al. Visualization experiment of cavitation flow in nozzle with different amplification [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6):65-69.
- [12] KUO T W, BRACCO F V. On the scaling of transient laminar, turbulent, and spray Jets [C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1982, 820038.
- [13] MALIN M R. Modelling the effects of lateral divergence on radially spreading jets [J]. Computers & Fluids, 1989, 17(3):453-465.
- [14] HANJALIC K, LAUNDNER B E. Sensitizing the dissipation equation to irrotational strains [J]. Asme J: fluids Eng, 1980, 102(1):34-40.