

# 内/外交叉孔喷嘴内部和近场流动特性的试验

金煜<sup>1</sup>, 冷先银<sup>2</sup>, 陈广平<sup>3</sup>, 王谦<sup>1</sup>, 何志霞<sup>2</sup>

(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;

3. 中船动力有限公司, 镇江 212002)

## An Experimental Study on the Internal and Near-Field Flow Characteristics of Internal/External Intersecting-Hole Nozzles

JIN Yu<sup>1</sup>, LENG Xianyin<sup>2</sup>, CHEN Guangping<sup>3</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, HE Zhixia<sup>2</sup>

(1. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

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

3. CSSC Marine Power Co., Ltd., Zhenjiang 212002, China)

**Abstract:** In order to understand the internal cavitation flow and near-field spray characteristics of injector nozzles with internal/external intersecting-holes, three types of nozzles, including two different intersecting hole nozzles and one conventional cylindrical hole nozzle were visualized by using high speed photography at different injections pressures, sub-hole impact angle and sub-hole center-to-center distance. Results show that, unlike the paraxial symmetric spray from the conventional cylindrical hole nozzle, the internal/external intersecting-hole nozzle can create a fan-shaped spray due to internal/external spray impingements. As observed, the spray from the external intersecting-hole nozzle shows a very intensive radial diffusibility followed by that of the internal intersecting-hole nozzles and both of which are more diffusible than that of conventional cylindrical hole nozzle. In addition, as the injection pressure increases, the conventional nozzle produces cavitation at 0.3 MPa, which rapidly develops into a hydraulic plunger flow, and the external intersecting hole nozzle also generates cavitation at 0.3 MPa, but no hydraulic plunger flow occurs at 0.1 MPa. While the internal intersecting hole nozzle has no cavitation at all.

**摘要:** 为认识内/外交叉孔喷嘴的内部空穴流动和近场喷雾特性,采用常规圆孔、外交叉孔和内交叉孔三种孔型的喷嘴在不同喷射压力、子喷孔交叉角度及出口中心距下进行了比例放大的喷嘴内部流动与喷雾近场可视化试验。试验结果表明:不同于圆形喷孔的近轴对称射流,内/外交叉孔喷嘴由于燃油的内/外部碰撞冲击作用,射流主要在与两个子喷孔中心线所处平面正交的平面(扩散面)上径向扩散,形成扇形射流。外交叉孔喷嘴喷雾扩散最为显著,其在扩散面上的液滴分散到喷嘴以下180°范围内,内交叉孔喷嘴扩散次之,两者扩散效果均远强于常规圆孔。此外,随喷射压力的提高,常规圆孔喷嘴在0.30 MPa左右产生空穴,并迅速发展为水力柱塞流状态;外交叉孔喷嘴也在0.30 MPa左右产生空穴,并逐渐发展至喷孔出口附近,但至1.0 MPa也未出现水力柱塞流状态;内交叉孔喷嘴内始终无空穴产生。

**关键词:** 喷嘴;交叉孔;碰撞;交叉角度;内部流动;近场喷雾

收稿日期: 2017-04-26

修回日期: 2017-06-05

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130514, BK20161349);江苏省研究生培养创新工程项目(SJLX15\_0492)

Fund Project: Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20130514, BK20161349);Innovative Cultivation Project for Graduate Students of Jiangsu Province(SJLX15\_0492)

作者简介: 金煜(1991—),男,硕士生,主要研究方向为燃油喷嘴内部流动及喷雾,E-mail: jin\_yu\_1991@163.com;

冷先银(通信作者),E-mail: lxy@ujs.edu.cn.

**Key words:** nozzle; intersecting-hole; impingement; impact angle; internal flow; near-field spray

**DOI:** 10.13949/j.cnki.nrijgc.2018.02.006

中图分类号: TK413.8<sup>+</sup>4

文献标识码: A

## 0 概述

良好的燃油雾化燃烧对柴油机动力性、排放性十分重要<sup>[1-2]</sup>。为获得良好的燃烧效果,众多学者对喷射压力<sup>[3-4]</sup>、缸内气流运动<sup>[5-6]</sup>、喷嘴结构等影响因素展开了大量探索。其中关于喷嘴的研究表明,压力室形状<sup>[7-9]</sup>、喷孔形状<sup>[10-14]</sup>等几何结构深刻影响喷嘴内部空穴多相流<sup>[9]</sup>的演变,进而影响喷雾和燃烧过程,因此改进喷嘴几何结构也成为改善喷雾和燃烧特性的一个重要途径。基于这一思想,文献[15]设计了内交叉孔喷嘴,其结构特征是由两个子喷孔在喷嘴内部交叉汇聚而形成一个交叉孔,以利用子喷孔内燃油的碰撞冲击作用加强内流扰动,从而促进燃油雾化。试验表明,交叉孔喷嘴可产生扇形喷雾,其喷射锥角相对常规圆孔有明显增加<sup>[16-17]</sup>,喷雾粒径更小<sup>[18]</sup>,在柴油机试用中发现油耗和 NO<sub>x</sub> 排放均有所降低<sup>[19]</sup>。此外,文献[20]设计了另一种交叉孔喷嘴,其特征是喷孔成组分布,一组两个喷孔的油束在喷嘴外部交叉碰撞,利用外部的碰撞冲击作用促进燃油雾化。对外部交叉孔喷嘴的试验发现,随交叉角度增大,喷雾贯穿距减小,喷雾锥角增大,且贯穿距小于常规圆孔,喷雾锥角大于常规圆孔。

内/外交叉孔喷嘴在喷射雾化试验中表现出很好的雾化效果,有利于改善柴油机缸内燃烧和实现污染物的机内净化,具有进一步探索的价值。内/外交叉孔与常规圆孔喷嘴的内部流动和近场雾化特性必然具有明显差异,这也是影响其喷雾特性的重要原因,但目前这方面的试验研究尚不多见。因此,本文采用不同交叉角度和出口中心距的内/外交叉孔透明喷嘴,利用高速摄影技术对其内部流场和近场雾化进行了可视化试验,以分析内部空穴流动和近场喷雾特性。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验模型

试验采用3种不同孔型喷嘴结构:1个常规竖直圆孔 A0,3个内交叉孔 A30、A40 和 A50,4个外部交叉孔 B30、B40、B50 和 C40。如图1所示:内交叉孔喷嘴每个喷孔由2个一定角度的子喷孔组成,包

含2个入口和1个出口;为保持描述的一致性,认为外部交叉孔喷嘴两个成一定角度且出口相距很近的子喷孔形成1个外部交叉孔,包含2个入口和2个出口。图1中  $H$  表示喷嘴壁厚,  $d_s$  表示孔径,  $\gamma$  表示子喷孔交叉角度,  $L$  表示外部交叉孔的子喷孔出口中心距。因交叉孔射流呈扇形扩散,在  $yoz$  平面扩散较强,定义其为扩散面;子喷孔中心线所在的  $xoz$  平面定义为交叉面。试验用的喷嘴模型几何尺寸见表1。

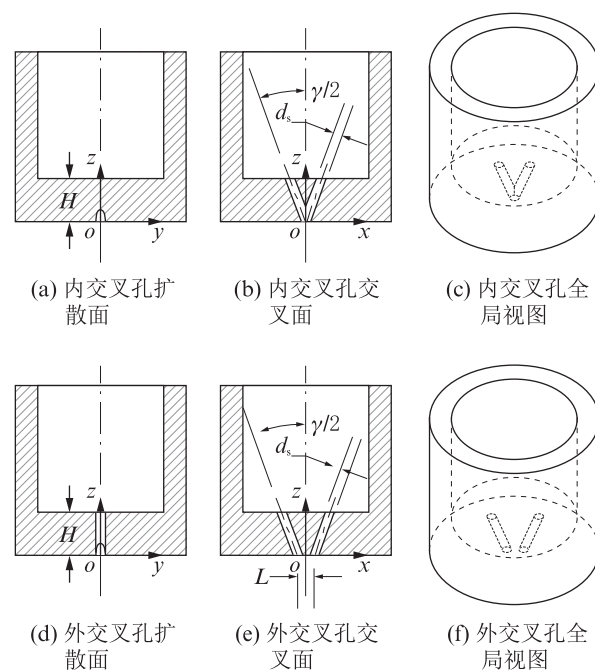


图1 内/外交叉孔结构示意图

表1 模型具体结构参数

| 项目                | 参数  |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 喷嘴                | A0  | A30 | A40 | A50 | B30 | B40 | B50 | C40 |
| $\gamma/(^\circ)$ | —   | 30  | 40  | 50  | 30  | 40  | 50  | 40  |
| $L/\text{mm}$     | —   | 0   | 0   | 0   | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 4.0 |
| $H/\text{mm}$     | 5.0 |     |     |     |     |     |     |     |
| $d_s/\text{mm}$   | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |

### 1.2 可视化试验台

试验装置如图2所示。燃油经燃油泵加压至稳压箱存储,再由调压阀设定喷射压力,经转子流量计和压力表,通过喷油器喷到大气环境中,喷出的柴油由燃油收集装置收集返回油箱中。采用阴影法对喷

孔内部空穴流动和近场射流同时进行可视化,图像由高速摄像机(Photron FASTCAM SA-Z)分别从  $x$  轴和  $y$  轴(参考图 1)方向拍摄。具体试验条件见表 2。

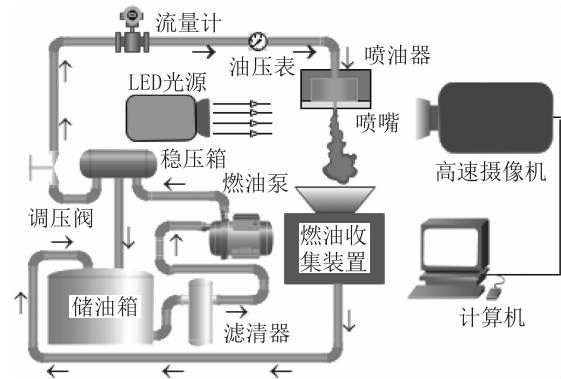


图 2 试验装置原理示意图

表 2 试验条件

| 项目   |                                          | 参数值                    |
|------|------------------------------------------|------------------------|
| 柴油特性 | 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )   | 830                    |
|      | 黏度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )       | 3.4                    |
|      | 表面张力/( $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 27                     |
| 外界环境 | 温度/K                                     | 288                    |
|      | 压力/MPa                                   | 0.10                   |
| 相机参数 | 分辨率                                      | $1\,024 \times 1\,024$ |
|      | 拍摄频率/Hz                                  | 20\,000                |
|      | 曝光时间/ $\mu\text{s}$                      | 2.5                    |

2 试验结果与讨论

2.1 子喷孔交叉位置的影响

图 3 和图 4 分别为喷嘴 A0、A50 和 B50 3 个喷嘴内部流动和近场射流在扩散面和交叉面上的图像,其中喷嘴 A50 的子喷孔中心线交叉汇聚于喷孔出口,而喷嘴 B50 的子喷孔中心线交叉于喷孔出口之外。对比两个方向的射流图像可以发现,喷嘴 A0 两个成像平面的射流角度非常接近,而喷嘴 A50 和喷嘴 B50 的近场射流在交叉面的扩展角显著低于扩散面的扩展角,射流结构呈扇形。

从图 3 中可以看出:常规圆孔喷嘴 A0 在入口压力为 0.02 MPa 时射流表面相当光滑。当压力增加到 0.08 MPa 时,出口 5 mm 以下射流表面已有明显的波动。继续增大压力至 0.20 MPa,表面波动已经向上延伸至出口附近,随压差和表面波动的增加,喷射锥角出现一定程度的增大但并不显著。当压力增加到 0.28 MPa 时,喷孔入口附近产生了部分空穴,同时喷射角度也有较明显增大,这是因为喷嘴内的空穴扰动促进了射流变形与表面波动<sup>[11]</sup>。当压力

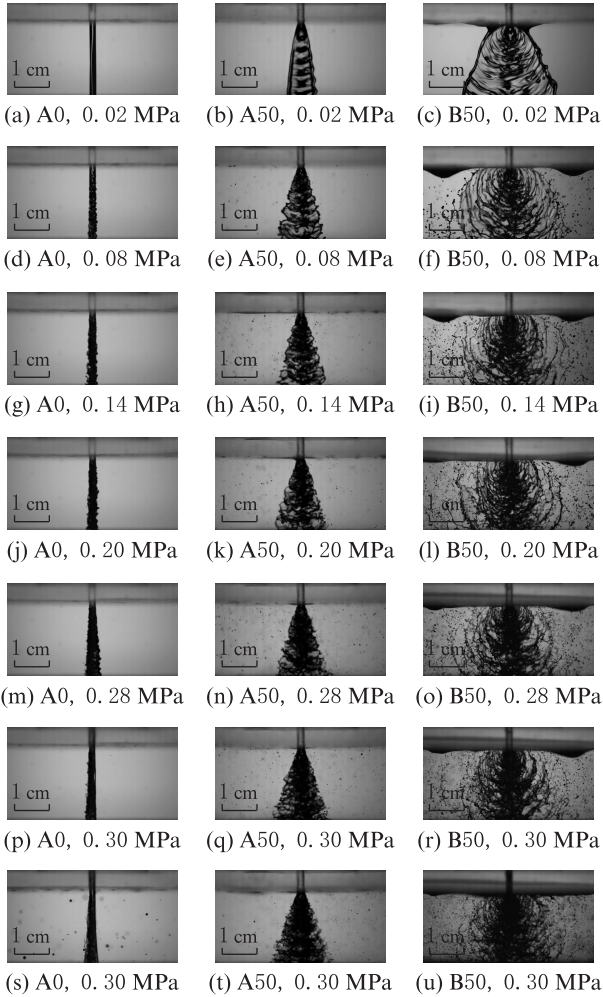


图 3 不同孔型喷嘴内部流动和近场喷射图像(扩散面)

提高至 0.30 MPa 时,空穴发展至出口外,形成水力柱塞流<sup>[21]</sup>,同时喷射锥角急剧减小,射流出现部分光滑表面。继续增大喷射压力直至 0.48 MPa,射流扩展角稍有增加,表面波动有所增强,边缘可见少量液滴形成。

内交叉孔喷嘴 A50 在喷射压力 0.02 MPa 时,扩散面两侧即有明显波动,振幅超过 1 mm。来自两子喷孔的燃油相互冲击,在扩散面上展开形成扇状射流。增加压力至 0.08 MPa 时,射流扩散角明显增大,边缘已出现一定程度的分裂。随压力不断提高,射流分裂加强,扩散角稍有增加,在喷射压力大于 0.20 MPa 后逐渐趋向于稳定值。当压力增加到 0.30 MPa 左右时,射流基本破碎为云状液滴群。

外交叉孔喷嘴 B50 在 0.02 MPa 喷射压力下在扩散面的射流形态与内交叉孔喷嘴 A50 形态类似,而径向扩散效果更强,但在喷孔出口附近的底面出现了油膜。喷射压力为 0.08 MPa 时,由于油束碰撞冲击作用加强,射流边缘已明显分裂,中心液核区域呈层状剥离态。到压力增加至 0.14 MPa,中心液核

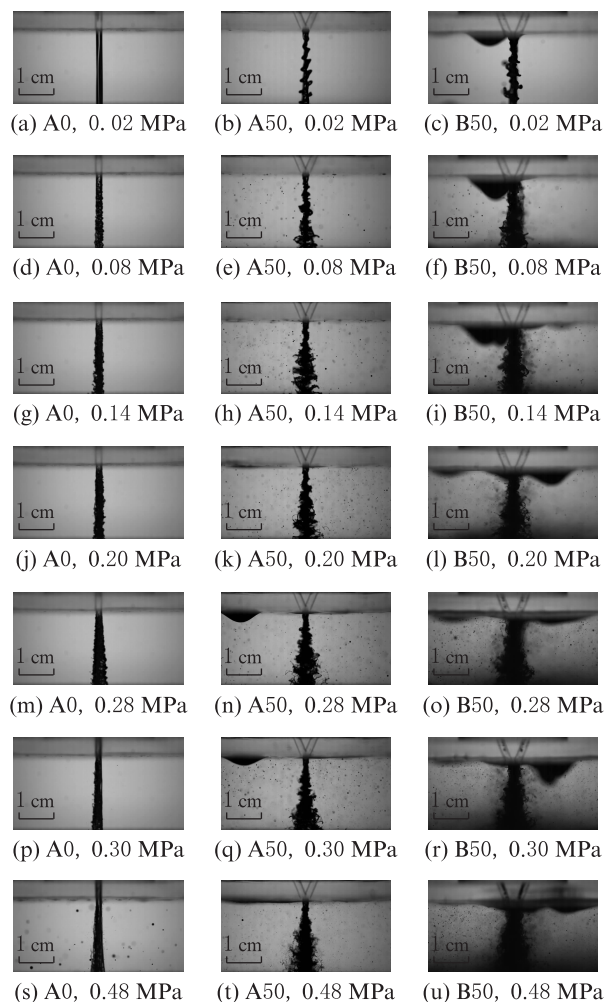


图 4 不同孔型喷嘴内部流动和近场喷射图像(交叉面)

两侧破碎为液丝状,从主流液核中脱落。在更高的喷射压力下,油束的碰撞冲击效应更加显著,在扩散面上产生了更高的径向速度,使射流上分裂出的液丝及液滴扩散到几乎充满喷嘴下方  $180^\circ$  空间,在喷射压力 0.48 MPa 时甚至撞击到两侧挡板而流下。

在试验中还观察到,从喷射压力达到 0.08 MPa 开始,外交叉孔喷嘴 B50 在交叉面上喷孔出口两侧出现凸起的油膜,并形成大液滴不断下落。该油膜宽度约 13 mm,高度约 4 mm。分析认为,这是由于射流以小倾角碰撞之后,少量液体会反向运动,两股反向运动的液体在出口处碰撞壁面,向两侧扩散开,从而在扩散面上形成两处油膜。这种射流碰撞后少量液体的反向运动,可类比射流撞壁的状况,在很多相关的试验研究中<sup>[22]</sup>都发现射流与壁面碰撞后,大部分射流继续前行而少量射流会沿壁面回流。

图 4 显示,喷嘴 A0 在喷射压力从 0.02 MPa 增加到 0.48 MPa,喷孔内流态经过了液相单相流、空穴两相流和水力柱塞流 3 种不同流态。喷嘴 A50 在整个测试压力范围内喷孔内无空穴产生。喷嘴 B50 空穴

产生的压力与 A0 相差不大,但形态与 A0 不同。喷嘴 A0 的空穴沿孔壁四周分布,而喷嘴 B50 内的空穴产生在喷孔与来流方向成锐角的一侧,即靠近中心的一侧,在喷射压力为 0.28~0.30 MPa 可观察到空穴脱落现象。喷嘴 B50 内的空穴发展程度明显低于 A0,在本文测试范围内,空穴延伸至出口附近,但一直未出现水力柱塞流状态。分析认为,虽然来流方向与喷孔成一定角度有利于空穴产生,但子喷孔倾斜布置导致的孔长增加抑制了空穴的发展。

喷嘴 A0 的近场射流在喷射随压力变化过程中 (0.02~0.48 MPa),表面波动有所加强,但未造成射流破碎,在本文研究的近场范围内仍然为连续的液核状。喷嘴 A50 在 0.02 MPa 喷射压力下产生了比较稳定的表面波,其振幅和波长约 3.0 mm,到 0.08 MPa 以后波动已经导致射流液核分裂为很多条液丝,不再呈连续状,并且随喷射压力的增加射流锥角不断增大,雾化效果明显增强。喷嘴 B50 在 0.02 MPa 喷射压力下,射流即已产生很强的变形,从两束近似圆柱形的射流碰撞融合成为具有较大展开角的扇形连续射流;压力提高到 0.08 MPa 后,射流已经分裂为离散的液丝,射流外侧产生许多雾状液滴,雾化强度远远高于 A50 和 A0;随喷射压力不断增大,液核周围都逐渐变为细小的雾滴颗粒。B50 喷射锥角也随喷射压力增加不断增大,且略高于 A50 的喷射锥角。

## 2.2 子喷孔交叉角的影响

图 5 为不同交叉角度的 3 个外部交叉孔喷嘴 B30、B40、B50 在扩散面的内部流动和近场射流图像。在喷射压力为 0.02 MPa 时,3 个喷嘴扩散面近场区域射流都呈现为扇形连续射流。随着子喷孔交叉角的增加,射流在扩散面上的展开角明显增加。压力增至 0.08 MPa,3 个喷嘴射流边缘都开始出现液丝并破碎为小液滴,随子喷孔交叉角度的增大,产生的液丝更细更多,也生成了更多的液滴。在喷嘴 B40 和 B50 的近场射流图像中,燃油扩散分布于整个喷嘴壁面以下,已不能用射流锥角来衡量。在扩散过程中,部分反向运动液滴撞击喷孔出口壁面,形成油膜并在射流两侧产生大液滴不断落下。因液滴的径向速度随交叉角度增加而增加,使得在壁面形成的大液滴随之向两侧移动。随压力不断提高,碰撞速度增大,B30 喷孔出口两侧在 0.14 MPa 时也出现同 B40 和 B50 类似的大液滴,但由于碰撞径向速度相对较小,分布在喷孔两侧较近位置,且流量较小。

当喷射压力增加到 0.20 MPa 后,喷孔正下方的中心区仍然比较稠密,两侧边缘区的液丝破碎则更加

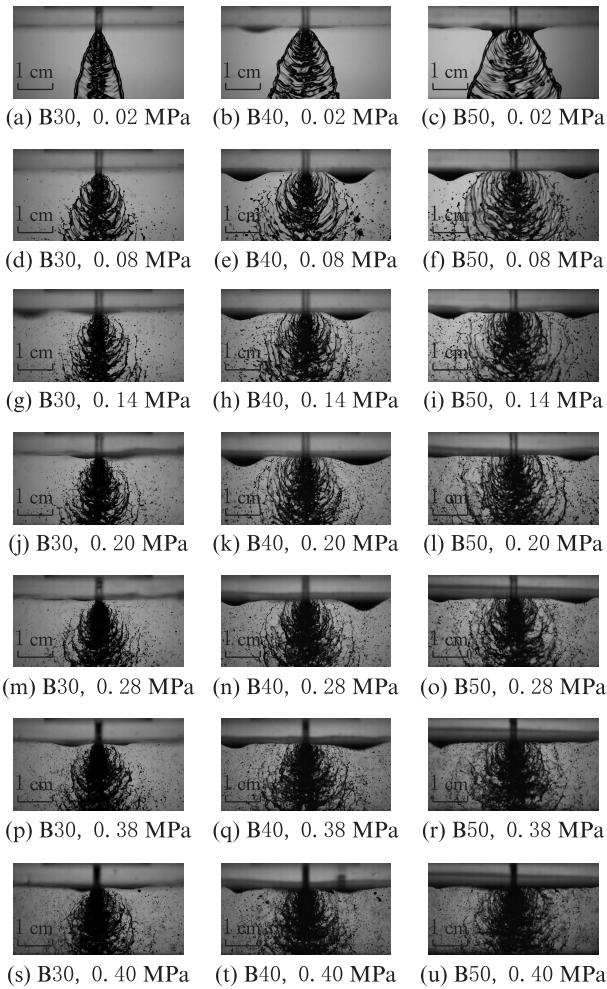


图5 外部交叉孔喷嘴不同交叉角度的内部流动和近场喷射图像(扩散面)

强烈,而距离中心稠密区越远,液丝越细,到外围区域,整条液丝分裂为细小液滴而散开。此后,随着压力的继续增加,射流核心稠密区域大小变化不大,且始终是喷嘴 B30 的最小,喷嘴 B50 的最大。可见,随着交叉角的增大,射流在扩散面上的径向扩散性更强。

图6为喷嘴 B30、B40、B50 在交叉面上的内部流动和近场喷射图像。在 0.02 MPa 喷射压力下,3 个喷嘴的射流在未碰撞之前接近圆柱形,表面无明显波动,碰撞位置之下的射流表面两侧出现不规则波动。在 0.08 MPa 喷射压力下,3 个喷嘴射流的两侧边缘都发生了较强的破碎,大量细小的液丝从液核剥离,部分液滴已经形成。随喷射压力继续提高,3 个喷嘴的射流破碎进一步加强,在核心区两侧可观察到更多的小液滴。交叉面上射流核心区的扩展角随子喷嘴交叉角的变化不大,随压力增加而稍有增大。

在喷射压力 0.20 MPa 以下,这 3 个不同交叉角的外交叉喷嘴内都为液态单相流状态;当喷射压力

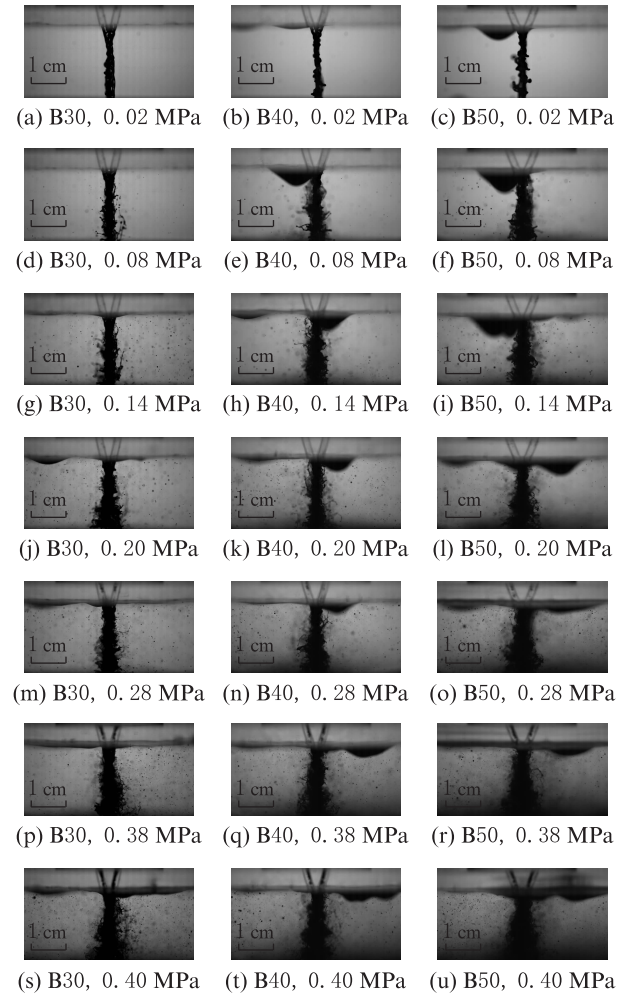


图6 外部交叉孔喷嘴不同交叉角度的内部流动和近场喷射图像(交叉面)

达到 0.28 MPa 时,3 个喷孔都产生了部分空穴,为空穴两相流状态;继续增加压力至 0.48 MPa,空穴区有所扩大,但仍然处于空穴两相流状态。在空穴两相流的发展过程中,相同喷射压力下,3 个喷嘴中 B30 的空化区域略大,而 B50 较小。

### 2.3 子喷嘴出口中心距的影响

本研究采用的内交叉孔两子喷嘴中心在出口重合,可认为中心距为 0 mm。图7和图8显示了交叉角相同而出口中心距分别为 0 mm、2 mm 和 4 mm 的内/外交叉孔喷嘴在扩散面和交叉面上内流和近场射流图像。

在扩散面上,喷射压力为 0.02 MPa 时,随子喷嘴出口中心距增加,射流扩散角增加,从喷嘴 A40 的约 16°到喷嘴 C40 的约 53°。随喷射压力提高,喷嘴 A40 的射流锥角先迅速增加,后逐渐稳定在 35°左右;喷嘴 B40 射流扩散到喷孔下部 180°区域,且边缘破碎为小液滴,小液滴数量随喷射压力增大而增多,分布于整个视窗中;喷嘴 C40 的射流扩展角在喷孔

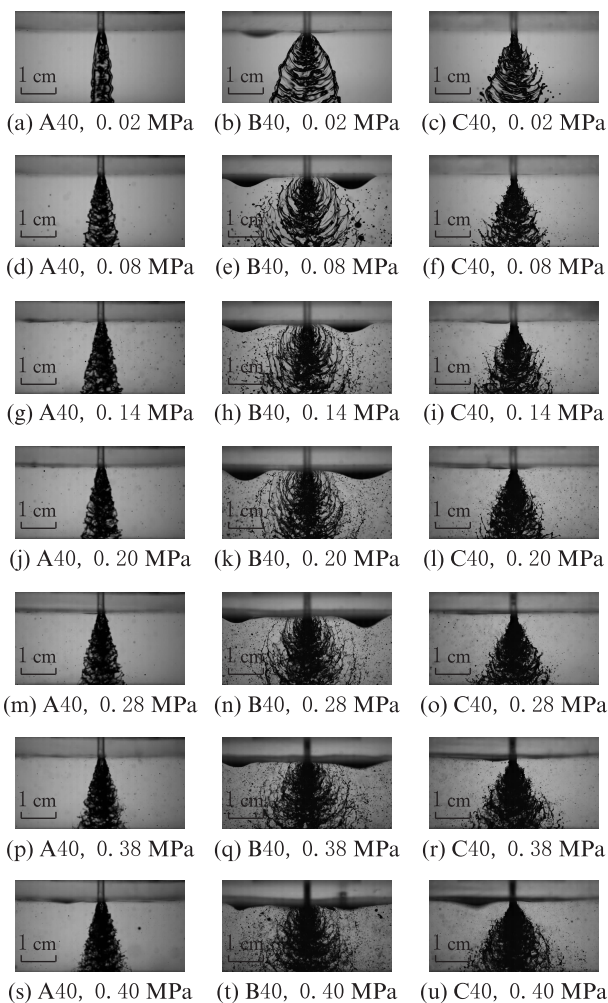


图 7 不同出口中心距的内部流动和近场喷射图像(扩散面)

内无空穴之前基本保持在  $55^\circ$  左右,当喷孔内空穴发展至一半孔长以后,喷射不稳定性增加,喷射锥角有小幅增大,距离喷孔出口较远处有部分扰动导致的不规则扩散。注意到喷嘴 C40 的扩散性明显弱于喷嘴 B40,其原因应该是碰撞冲击效应随着子喷孔出口中心距的增加而减弱。

在交叉面上,喷射压力为  $0.02\text{ MPa}$  时,喷嘴 A40 燃油自出口碰撞后竖直下落,射流表面可见微波动。对于喷嘴 B40 和 C40,子喷孔射流在碰撞前即可观察到小幅表面波动,在两股射流的碰撞区附近产生了几乎左右对称的表面波,在更下游的位置左右侧的表面波不再对称,而振幅有所增加。提高喷射压力,喷嘴 A40 的射流在交叉面上的扩展角先急剧增加,后增速减缓。喷嘴 B40 和 C40 的射流在交叉面上呈现出比喷嘴 A40 更强的破碎,射流边缘出现大量液丝和液滴,而射流中心的主流区域发展趋势则与 A40 类似,扩展角略大于 A40。在喷射压力达到  $0.48\text{ MPa}$  时,喷嘴 A40 喷射边界仍然较为清晰,液相与空气有比较明显的界限;而喷嘴 B40

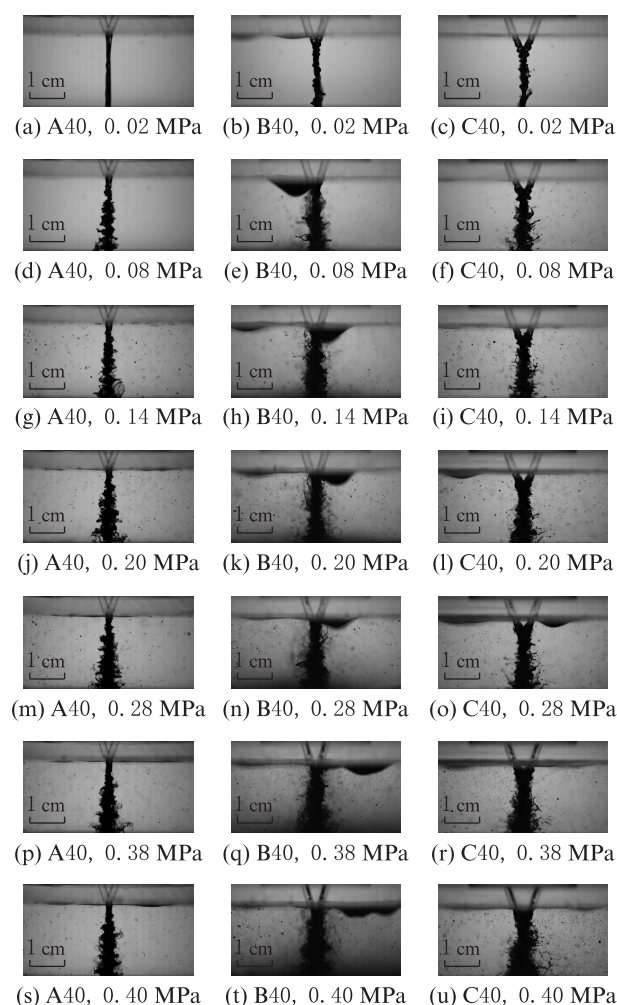


图 8 不同出口中心距的内部流动和近场喷射图像(交叉面)

和 C40 主流区域周围已经生成大量液滴,主流区的界限比较模糊。

由于喷嘴 A40 在整个压力测试范围无空穴产生,不受空泡溃灭的作用,射流破碎主要来自内部液流碰撞冲击和外部空气动力的影响。喷嘴 B40 和 C40 由于空穴的产生,增加了射流的不稳定性,有利于其射流破碎。但对比这 3 个喷嘴在  $0.20\text{ MPa}$ (无空穴)和  $0.38\text{ MPa}$ (有空穴)下的雾化效果可以发现,空穴出现与否未对各自的射流形态产生显著影响。由此可以认为,交叉孔喷嘴的几何结构(交叉角、中心距等)导致的碰撞冲击效应对射流雾化的影响远大于空穴的影响。

综上,由于碰撞冲击作用,相同喷射压力下,内/外交叉孔喷嘴的射流分裂与雾化远强于圆孔喷嘴,产生扇形射流或喷雾。尤其是外交叉孔喷嘴,其射流在扩散面上的展开角甚至达到  $180^\circ$ 。但是,在柴油机上使用时,过强的径向扩散会使喷雾贯穿距减小,不利于燃烧室外围空气的利用,反倒使燃烧恶化。因而外交叉孔喷嘴一般都采用很小的交叉角

(如 $5^\circ$ 左右)以减弱这种碰撞冲击效应并获得合适的贯穿距。

## 2.4 水力特性

图9给出了各喷嘴的质量流量随喷射压力与背压之差的平方根 $\sqrt{\Delta p}$ 的变化。常规圆孔喷嘴A0在 $\sqrt{\Delta p}$ 小于0.54时,质量流量基本保持线性增长;在 $\sqrt{\Delta p}$ 为0.54时,流量突然降低,是因为喷孔内部的空穴流发展为水力柱塞流状态。而所有交叉孔喷嘴均未出现流量突降的情况。内交叉孔喷嘴A30、A40和A50由于没有产生空穴,流量始终与 $\sqrt{\Delta p}$ 保持线性关系。外交叉孔喷嘴B30、B40、B50及C40的质量流量几乎相同,且是同喷射压力下最高的,这是因为其出口面积最大。在 $\sqrt{\Delta p}$ 小于0.54时,外交叉孔喷嘴的质量流量基本与 $\sqrt{\Delta p}$ 保持线性;当 $\sqrt{\Delta p}$ 大于0.54之后,喷孔内产生部分空穴,图中流量曲线的斜率有所减小,这是因为空穴的产生使喷孔的有效流通面积变小。

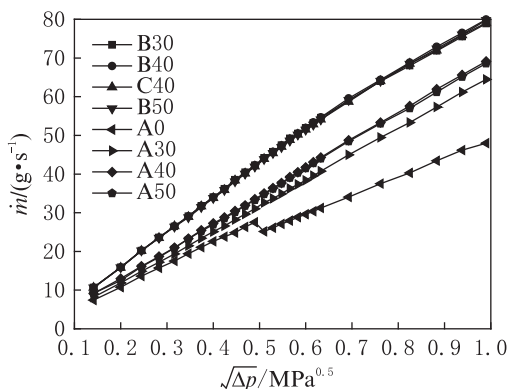


图9 质量流量随 $\sqrt{\Delta p}$ 的变化

流量系数通常用于描述喷油器内部流动的水力特性。该无量纲参数的定义为实际的质量流量与通过伯努利方程计算所得的理论质量流量之比,见式(1)。

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_o \sqrt{2 \rho_l \Delta p}} \quad (1)$$

式中, $\dot{m}$ 为实际测量的质量流量; $A_o$ 为喷嘴出口的横截面积; $\rho_l$ 为液相燃油的密度; $\Delta p$ 为喷射压力和背压之差。

图10给出了各个喷嘴的流量系数随压差平方根的变化。在整个压力测试范围内:内交叉孔喷嘴流量系数都是最高的,这是因为其内部没有产生空穴;其次是常规圆孔喷嘴A0;而外部交叉孔喷嘴的流量系数最低。喷嘴A0流量系数在喷射压力达到0.30 MPa前随压力的增加而上升,由于该喷孔内空

穴从出现到形成水力柱塞流发展较快,没有捕捉到具体发展过程;当喷射压力达到0.30 MPa时,突变为水力柱塞流状态,流量系数陡然从0.61下降为0.53左右,后保持基本不变。在各喷射压力下3个内交叉孔喷嘴的流量系数都是喷嘴A30最高,喷嘴A50最低,可见内交叉孔喷嘴的流量系数随子喷孔交叉角的增加而降低。分析认为,对于内交叉孔喷嘴子喷孔内的燃油相互碰撞后改变方向,沿两个子喷孔所形成的V形角的中线方向运动而形成射流,在此过程中伴随部分轴线运动速度损失,这部分速度损失随子喷孔交叉角的增加而增加,这正是流量系数随交叉角度变化的主要原因。

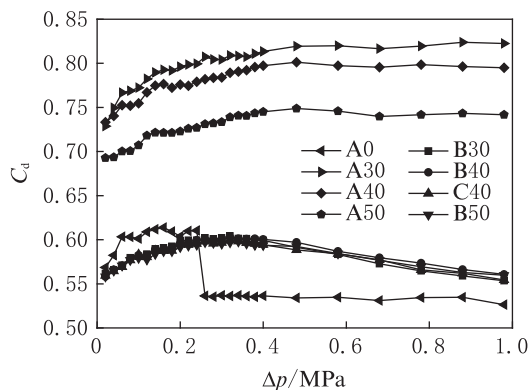


图10 流量系数随 $\Delta p$ 的变化

喷嘴B30、B40、B50和C40由于液相碰撞发生在喷孔外部,碰撞角度对其流量系数无明显影响,各喷嘴流量系数非常接近。在喷射压力达到0.30 MPa前,流量系数总是随喷射压力的增加而上升;喷射压力在0.30 MPa左右时,孔内产生空穴现象,流量系数开始缓慢下降,且在较高压力下仍保持下降趋势;由于空穴发展较为缓慢,未出现水力柱塞流状态,因而没有发生流量系数骤降的现象。

## 3 结论

(1) 不同于圆孔喷嘴的近似轴对称射流,内/外交叉孔喷嘴都产生了扇状射流或喷雾。

(2) 外部交叉孔喷嘴在扩散面和交叉面的喷射扩散都最为强烈,内部交叉孔喷嘴扩散次之,两者喷雾近场扩散效果都远强于常规圆孔喷嘴。

(3) 外部交叉孔喷嘴在扩散面扩散范围可达喷孔壁面下部 $180^\circ$ 区域;内部交叉孔喷嘴在较高喷射压力下喷雾锥角基本稳定,随交叉角从 $30^\circ$ 增加到 $50^\circ$ ,喷雾锥角从 $24^\circ$ 增加到 $41^\circ$ ;常规圆孔最大喷射角度稳定在 $10^\circ$ 内。

(4) 外部交叉孔与常规圆孔喷嘴都在0.30 MPa

左右喷射压力下产生空穴。随喷射压力继续增加,常规圆孔内空穴迅速发展为水力柱塞流状态,而外部交叉孔喷嘴直至 1.0 MPa 喷射压力仍无水力柱塞流产生,内交叉孔内始终无空穴产生。

(5) 内交叉孔喷嘴流量系数始终保持最大,其次为圆孔喷嘴,外部交叉孔喷嘴流量系数最小。内交叉孔喷嘴的流量系数随子喷孔交叉角的增加而降低,外交叉孔喷嘴的流量系数对喷孔交叉角不敏感。

#### 参考文献:

- [1] NEEFT J, MAKKEE M, MOULIJN J A. Diesel particulate emission control[J]. *Fuel Processing Technology*, 1996, 47: 1-69.
- [2] REITZ R D. Directions in internal combustion engine research [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 1-8.
- [3] JIA T, LI G, YU Y, et al. Effects of ultra-high injection pressure on penetration characteristics of diesel spray and a two-mode leading edge shock wave[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 79: 126-133.
- [4] 何志霞,赵朋,王谦,等. 基于背压的柴油机喷嘴内部空穴流动试验研究[J]. *内燃机工程*, 2014, 35(6): 20-24.  
HE Z X, ZHAO P, WANG Q, et al. Experimental research of cavitation flow in diesel fuel injector nozzle under different back pressures [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2014, 35(6): 20-24.
- [5] THOMBARE D G, VERMA S K. Technological development in the Stirling cycle engines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1): 1-38.
- [6] RABAULT J, VERNET J A, LINDGREN B, et al. A study using PIV of the intake flow in a diesel engine cylinder[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 62: 56-67.
- [7] MORO A, ZHOU Q, XUE F, et al. Comparative study of flow characteristics within asymmetric multi hole VCO and SAC nozzles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 132: 482-493.
- [8] SALVADOR F J, CARRERES M, JARAMILLO D, et al. Comparison of microsac and VCO diesel injector nozzles in terms of internal nozzle flow characteristics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103: 284-299.
- [9] HE Z X, ZHONG W J, WANG Q, et al. Effect of nozzle geometrical and dynamic factors on cavitating and turbulent flow in a diesel multi-hole injector nozzle [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 70: 132-143.
- [10] 史绍熙,鄱大光,张江波,等. 椭圆喷雾规律初探[J]. *天津大学学报*, 1994, 27(5): 529-536.  
SHI S X, XI D G, ZHANG J B, et al. A preliminary study of elliptic sprays[J]. *Journal of Tianjin University*, 1994, 27(5): 529-536.
- [11] 邵壮,何志霞,钟汶君,等. 柴油机喷嘴内部空穴临界初生现象的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(4): 161-165.
- SHAO Z, HE Z X, ZHONG W J, et al. Experimental research of critical cavitation inception in diesel fuel injector nozzles[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(4): 161-165.
- [12] PAYRI R, GARCÍA J M, SALVADOR F J, et al. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics[J]. *Fuel*, 2005, 84: 551-561.
- [13] MOON S, GAO Y, WANG J, et al. Near-field dynamics of high-speed diesel sprays: effects of orifice inlet geometry and injection pressure[J]. *Fuel*, 2014, 133: 299-309.
- [14] 吴玉强,王谦,高志胜,等. 柴油机喷嘴喷孔非对称结构对近场喷雾特性的影响[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(6): 170-175.  
WU Y Q, WANG Q, GAO Z S, et al. The effect of asymmetric nozzle hole geometry of a diesel nozzle on the near-field spray characteristics [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(6): 170-175.
- [15] 隆武强,冷先银,田江平,等. 带扰动区的内燃机交叉喷孔式喷嘴: CN200810012342. X[P]. 2011-02-02.
- [16] 冷先银. 船用中速柴油机供油系统及低 NO<sub>x</sub> 排放研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [17] 冷先银,金煜,何志霞,等. 交叉孔喷嘴内部流动特性的模拟[J]. *内燃机学报*, 2015, 33(6): 522-529.  
LENG X Y, JIN Y, HE Z X, et al. Numerical simulation on internal flow characteristics of intersecting hole nozzles [J]. *Transactions of CSICE*, 2015, 33(6): 522-529.
- [18] 董全,范立云,刘友,等. 基于时间分割法的柴油机交叉孔喷嘴喷雾场粒子性[J]. *内燃机学报*, 2014, 32(1): 38-44.  
DONG Q, FAN L Y, LIU Y, et al. Droplet characteristics in spray field of the intersecting-hole nozzles for diesel engines based on time dividing method [J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(1): 38-44.
- [19] 隆武强,冷先银,董全,等. 基于一种新型喷油系统的船用柴油机 NO<sub>x</sub> 排放试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2011, 5(6): 781-787.  
LONG W Q, LENG X Y, DONG Q, et al. Experimental study of NO<sub>x</sub> emission of marine diesel engines based on a novel fuel injection system [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2011, 5(6): 781-787.
- [20] 缪雪龙,郑金保,洪建海,等. 交叉喷孔喷嘴喷雾特性的试验[J]. *内燃机学报*, 2012, 30(5): 345-349.  
MIAO X L, ZHENG J B, HONG J H, et al. Spray characteristics of crossing hole in diesel nozzle [J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30(5): 345-349.
- [21] HE Z X, SHAO Z, WANG Q, et al. Experimental study of cavitating flow inside vertical multi-hole nozzles with different length-diameter ratios using diesel and bio-diesel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 60: 252-262.
- [22] LEE C H, LEE K H. Experimental study on macroscopic spray characteristics after impingement in a slit-type GDI injector[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2008, 9(3): 373-380.