DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202501004

# 混合燃油在喷嘴内线空化流动特性及喷雾研究

胡碧荷[1]，黄云龙[2]，王健权[1]，郭根苗[1]，何志霞[1]
（1. 江苏大学能源研究院，镇江 212013；2. 融通航空发动机科技有限公司，南京 210000）

**摘要**：基于高压共轨燃油喷射系统原尺寸量级透明喷嘴内部流动及喷雾可视化试验平台，针对纯柴油（D100）与汽/柴油混合燃油（D20G80），开展了不同燃油属性下喷孔锥度（锥度分别取值为 1、2 和 3）及喷孔数（单孔、2 孔和 3 孔）对喷嘴内空化瞬态流动及喷雾影响的试验. 结果表明：喷孔锥度对 D100 和 D20G80 在喷嘴内的空化及喷雾的影响明显不同，D20G80 在不同喷孔锥度的喷嘴内均有较强的线空化出现，对应较大的喷雾锥角及喷雾边缘的波动，D100 仅在锥度为 2 的喷嘴内出现线空化；对于锥度为 2 的喷嘴，2 孔喷嘴内纯柴油与混合燃油均发生了线空化且与单孔喷嘴类似，但强度更低，3 孔喷嘴内则主要出现几何诱导的壁面空化，喷雾边缘波动性强于单孔和 2 孔喷嘴.

**关键词**：汽/柴油混合燃油；喷孔锥度；喷孔孔数；空化；喷雾
**中图分类号**：TK428.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）01-0029-09

# Study on the cavitation flow and spray characteristics of gasoline-diesel blends in nozzle

**Hu Bihe[1]，Huang Yunlong[2]，Wang Jianquan[1]，Guo Genmiao[1]，He Zhixia[1]**
（1. Institute for Energy Research，Jiangsu University，Zhenjiang 212013，China；
2. Rongtong Aero-Engine Technology Company Limited，Nanjing 210000，China）

**Abstract**：Based on a full-scale transparent nozzle internal flow and spray visualization experiment platform，an experimental study on the effect of taper of hole（taper factor of 1，2 and 3）and number of hole（single，two and three holes）on the cavitation transient flow and spray in the nozzles was carried out for pure diesel（D100）and gasoline-diesel blended fuel of D20G80（20% diesel and 80% gasoline）. The results show that the effect of the nozzle taper on cavitation and spraying in the nozzles is obviously different for the pure diesel and the gasoline-diesel blended fuel. The blended fuel has strong string cavitation with larger spray cone angle and fluctuations in the spray edge in the nozzles with all tested nozzle tapers，while the pure diesel only has string cavitation in the nozzle with a taper factor of 2. For the nozzles with a taper factor of 2，string cavitation occurs for both the pure diesel and the blended fuel in two-hole nozzles. It also occurs in the single-hole nozzle，but with less intense. Geometry-induced wall cavitation mainly occurs in the three-hole nozzle and spray edge fluctuations are stronger than that in the single-hole and two-hole nozzles.

**Keywords**：gasoline-diesel blends；hole taper；hole number；cavitation；spray

柴油机高压喷射喷嘴内部存在空化流动现象，喷嘴内的空化现象根据诱因的不同可分为几何诱导空化和涡线空化[1-2]，几何诱导空化主要是由于喷孔入口处孔口收缩及入口拐弯上壁面处的回流区低压所引致，因是几何因素导致的流场压力的降低，空化发生在壁面处，所以称为几何诱导壁面空化. 线空化主要是由涡旋流动中漩涡中心的低压所引发，燃油蒸气和不凝性气体在涡流低压核心聚集，进而发生空化相变. 喷嘴内的空化瞬态流动特性及近喷嘴区的喷雾特性与燃油物性[3-6]、喷射压力[7-9]和喷嘴几何结构[10-15]等都存在密切的关联性.

在燃油物性对喷嘴内部流动及喷雾影响的研究

**收稿日期**：2024-01-29；**修回日期**：2024-05-13.
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目（52376113）.
**作者简介**：胡碧荷，硕士，516074006@qq.com.
**通信作者**：何志霞，博士，教授，zxhe@ujs.edu.cn.

中，发动机各种替代燃料的应用以及各类新型燃烧模式对燃料设计的需求是研究的主要应用背景[16-19]，特别是对后者而言，大比例汽油对应的汽/柴油混合燃油在压燃式发动机中因具备实现高效超低排放的低温均质压燃燃烧的潜力而引发关注，如汽油直喷压燃燃烧技术相比较于传统汽油点燃技术有获得 50% 热效率的潜力，但汽油压燃存在小负荷着火困难、大负荷爆燃的问题，汽/柴油混合燃油综合了汽油和柴油的理化属性，有潜力解决上述问题，针对汽/柴油混合燃油喷雾特性的研究[20-21]表明，其与纯柴油喷雾锥角、贯穿距等特性差异较大，随着掺混比例的增加不具备一定的规律性，所以有必要从其喷嘴内部流动的角度进一步开展分析. 目前针对汽/柴油混合燃油在喷嘴内的流动特性以及对喷雾的影响研究还很缺乏. 揭示这种不同物性燃油在喷油器喷嘴内部瞬态流动特性乃至喷雾特性则十分关键.

喷嘴几何结构参数中，喷孔锥度对燃油在喷嘴内的空化流动及喷雾的影响尤为显著，近些年被广为关注[22]. 喷孔形状及尺寸会极大地影响到喷嘴流量及随后喷雾特性，为了尽可能提高喷嘴流量系数，发动机所用的喷油器喷嘴喷孔往往具有一定的锥度，即采用渐缩锥度孔形式，可抑制孔内空化，增加流量系数. 文献[23]对比了不同喷孔锥度对孔内几何诱导壁面空化及喷雾的影响得出，较大锥度的渐缩喷孔内为纯单相流动时，喷孔出口喷雾表面也相对平滑；而渐扩锥度孔内壁面空化延伸并超出喷孔后引致喷雾表面较大的波动.

柴油机实际喷油器喷嘴往往是多喷孔，而原尺寸量级喷嘴内部空化瞬态流动可视化试验大多在单喷孔喷嘴内开展，单孔试验在揭示针阀抬起关闭过程中从喷嘴压力室流入喷孔内，孔口收缩引致的降压及空化流动现象机理方面有很大优势. 但从可视化试验开展的角度来看，试验中需要同时捕获到喷嘴内部流动及孔外喷雾，超过 2 孔后的试验相对比较难做，从而孔数的影响尚不是很明晰. 笔者尝试开展了 3 孔的研究，与单孔和 2 孔试验做了对比，基于高压共轨燃油喷射系统原尺寸量级透明喷嘴内部流动及喷雾可视化试验平台，针对纯柴油与汽/柴油混合燃油，开展不同燃油属性下喷孔锥度及喷孔数对喷嘴内空化瞬态流动及喷雾特性影响的试验.

## 1　试验装置及方案

### 1.1　试验装置和方案

图 1 为高压共轨式喷射系统原尺寸量级透明喷嘴内流及喷雾可视化试验系统示意. 试验系统主要包括高压共轨燃油喷射系统、高速显微成像系统和控制与存储系统. 其中，高速相机为日本 Photron 公司的 SA-Z，能提供最高 210 000 帧/s 的拍摄速度，最大像素为 1 024 × 1 024. 试验中长焦显微镜头来自 Questar，光圈为固定值，通过设置曝光时长和灯光亮度来控制画面亮度. 喷油器采用了博世 110 系列，试验中将金属喷嘴保留密封面及以上结构，而将包括压力室及喷孔部位的喷嘴头部采用线切割法切割后替换为亚克力材料加工的透明喷嘴，其折射率与汽/柴油折射率非常接近，可减少透明喷嘴与燃油界面上光的折射进而带来的光损失.

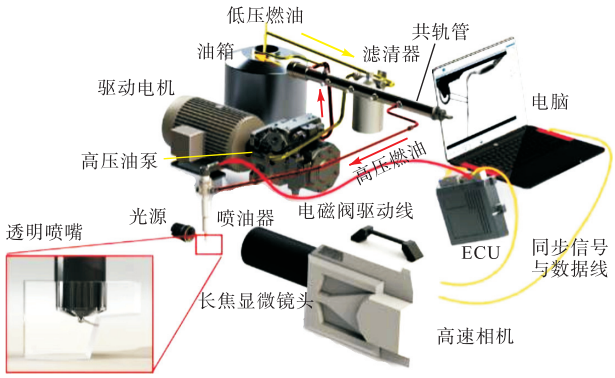


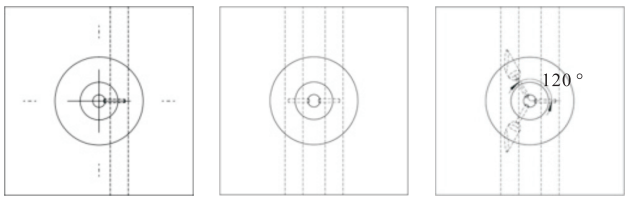

**图 1　高压共轨喷油可视化平台**

**Fig.1　Schematic diagram of the full-scale transparent nozzle internal flow and spray visualization test platform**

图 2 为单孔、2 孔及 3 孔喷嘴的俯视. 试验中喷嘴压力室为 Min-SAC 的小压力室结构，压力室直径为 1 mm. 喷嘴喷孔长度 $L$ 为 1.67 mm，喷孔出口直径 $D_{out}$ 为 0.22 mm，喷孔和针阀轴线夹角为 70°，喷孔锥度 $K$ 为 2. 其中，$K$ 定义为

$$K=\left[\left(D_{in}-D_{out}\right)/L\right]\times 100 \tag{1}$$

式中：$D_{in}$ 为喷孔入口直径.




（a）单孔　　（b）2 孔　　（c）3 孔

**图 2　不同孔数喷孔俯视**

**Fig.2　Top view of the nozzles with different number of holes**

试验针对纯柴油（D100）和汽/柴油混合燃油（D20G80，其中汽油质量分数为 80%）开展. 两类燃油的理化特性如表 1 所示.

表 2 为喷嘴结构参数，试验用的喷嘴结构方案有

5 种：喷孔数为 1 的单喷孔锥度 $K$ 分别取 1、2 和 3，即为 $K_1=1$、$K_1=2$ 和 $K_1=3$，下标代表孔数；锥度 $K$ 取 2 时喷孔数分别为 1、2 和 3，喷孔沿圆周均布，相应的标识为 $K_1=2$、$K_2=2$ 和 $K_3=2$. 试验中保持喷孔出口直径为 0.22 mm 不变，入口孔径为 0.25 mm，由于加工过程中的误差，不同孔数的入口孔径在 0.25 mm 左右略有偏差，但在研究的偏差范围内. 喷嘴压力室的直径均为 1 mm，试验喷油压力为 60 MPa，背压为 0.1 MPa，喷油脉宽为 800 μs.

**表 1　燃料理化特性**

**Tab.1　Physical and chemical properties of fuel**

| 参数 | D100 | D20G80 |
|---|---|---|
| 密度/(g·cm$^{-3}$) | 0.830 4 | 0.762 1 |
| 运动黏度/(mPa·s) | 4.2 | 0.7 |
| 表面张力/(N·m$^{-1}$) | 0.028 2 | 0.024 8 |
| 饱和蒸气压/kPa | 1.28 | 45.10 |

**表 2　喷嘴结构参数**

**Tab.2　Nozzle structure parameters**

| 编号 | 喷孔数 | 喷孔锥度 $K$ | 喷孔入口孔径 $D_{in}$/mm |
|---|---|---|---|
| $K_1=1$ | 1 | 1 | 0.235 9 |
| $K_1=2$ | 1 | 2 | 0.253 4 |
| $K_1=3$ | 1 | 3 | 0.253 0 |
| $K_2=2$ | 2 | 2 | 0.250 6 |
| $K_3=2$ | 3 | 2 | 0.247 2 |

注：喷嘴喷孔出口孔径 $D_{out}$ 均为 0.22 mm.

### 1.2　数据处理

根据正背景打光的高速摄像成像技术可以获得不同时刻线空化、喷雾锥角以及针阀升程图像，试验所获得的图像在 MATLAB 中进行处理. 试验中单个工况均会重复 10 次. 试验可视化拍摄得到的喷孔内部流动图像中，燃油空化蒸气相为黑色，燃油液相为白色，灰度值则在一定程度上反映了空化程度，将图片中线空化面积统计出来，将线空化面积 $A_{cav}$ 与喷孔面积 $A_{hole}$ 之比定义为空化强度 $I_{cav}$，即

$$I_{cav}=\left(A_{cav}/A_{hole}\right)\times 100\% \tag{2}$$

与喷嘴内空化图像的处理过程类似，图 3 为喷雾锥嘴的处理过程，喷雾图像通过喷雾边缘检测仅在二值图像的列上寻找喷雾的第一个及最后一个亮点，然后将所得两条不规则曲线拟合为两条直线，这两条直线的夹角为喷雾锥角 $\theta$. 由于喷雾在近喷孔区域为锥形，因而喷雾投影所呈现的角度即可反映其喷雾锥角. 针阀升程则是通过检测针阀阴影最下端的相对位置获得.

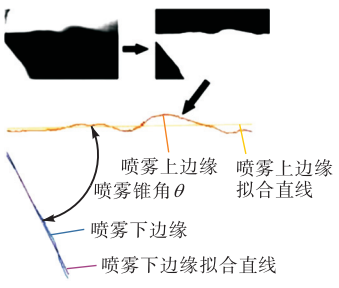


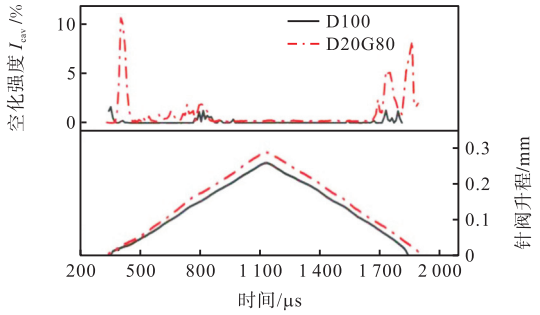

**图 3　喷雾锥角的处理过程**

**Fig.3　Process of spray cone angle**

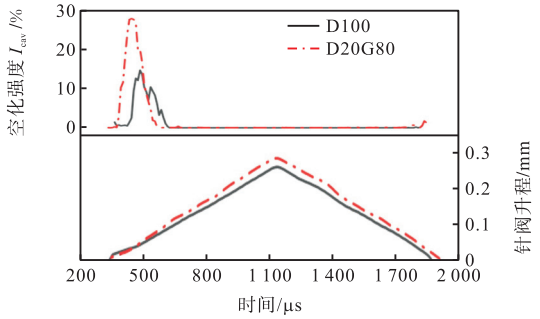
## 2　结果及分析

### 2.1　喷孔锥度对混合燃油喷嘴内空化瞬态流动特性的影响

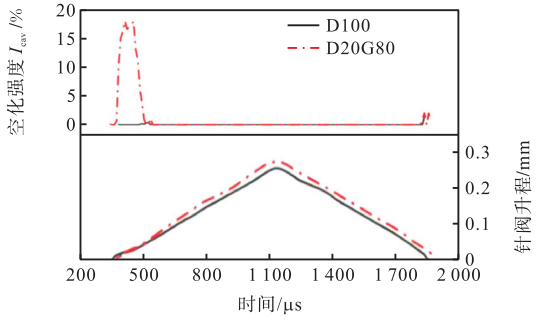
图 4 示出锥度分别为 1、2 和 3 的 3 个单孔喷嘴内 D100 与 D20G80 在一次燃油喷射过程中随针阀抬起和关闭时喷嘴内瞬态空化强度 $I_{cav}$ 曲线. 不同燃油针阀升程曲线略有区别，是由燃油物性（包括黏性、弹性模量等）的差异引致的. 如果是柴油，高压共




（a）锥度 $K_1=1$




（b）锥度 $K_1=2$




（c）锥度 $K_1=3$

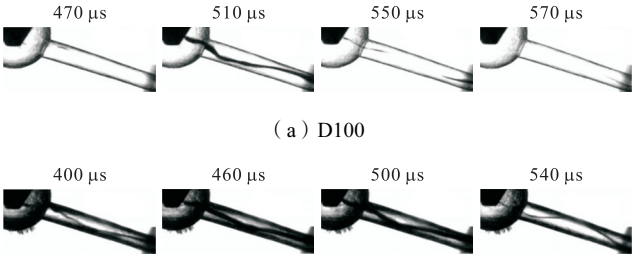
**图 4　D100 与 D20G80 在不同锥度喷嘴内瞬态空化强度曲线**

**Fig.4　Transient cavitation intensity curves for D100 and D20G80 in nozzles with different taper coefficients**

轨喷油器上端球阀部分泄压会慢，从而压差作用下针阀的抬起也慢，但电磁阀抬起关闭时间是一样的，从而针阀抬起的最大位置也低. 因喷孔为渐缩锥度孔，喷嘴内如有空化的出现，主要出现在针阀抬起初始阶段和落座的接近关闭阶段，均对应了较低的针阀升程，而针阀抬至较高位置后的整个喷油过程中则几乎无空化现象. D20G80 的空化强度峰值在 3 个不同锥度的喷嘴内均强于相应的 D100. 两种燃油均是在喷孔锥度为 2 的方案喷孔内空化相对更强. 特别是 D100 仅在锥度为 2 的喷嘴内发生了微弱空化，在锥度为 1 和 3 的喷嘴内几乎无空化发生.

图 5 给出了针阀抬起的初始过程中可视化拍摄得到的两种燃油在锥度为 2 的单孔喷嘴内空化初生和发展过程. 喷孔锥度的不同会影响到压力室和喷孔内漩涡大小和强度，从而对应了线状空化的出现与否以及出现后的发展，存在某个喷孔锥度，其与压力室的匹配会引致最强的旋涡流动，如研究的 3 种喷孔锥度中，锥度为 2 的方案喷嘴内空化连续出现的时间长、强度大，其中 D20G80 比 D100 更易发生空化，且空化持续时间更长. 对于 D100 只有某个合适的喷孔锥度引致非常强烈的旋涡流动才会使其诱发线状空化，而柴油中一旦添加了汽油则不同喷孔锥度下的喷嘴内，即使最为微弱的旋涡流动也会很易引致线状空化的初生和进一步发展. 即相较于柴油，D20G80 中因汽油的加入在喷油的起始和将近结束终了时更易因这种线空化的出现而引致流动的不稳定性.

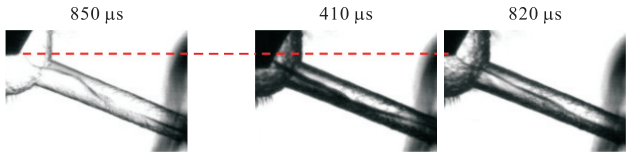
图 6 给出了 D20G80 在 410 μs 和 820 μs 时以及 D100 在 850 μs 时喷孔内的线空化分布. 不同时刻对应了不同的针阀高度，两种不同燃油在两个不同针阀升程下的线状空化一旦出现，其在压力室中的起源位置及高度是基本固定的，即线空化一旦出现，其空间的分布位置与燃油种类无关，而主要与喷孔的高、低位置有关. 燃油种类主要影响空化是否出现、空化初生时刻及空化出现后的强度.




（a）D100　（b）D20G80

**图 5　针阀抬起阶段 D100 与 D20G80 在锥度为 2 的喷嘴内空化初生及发展过程**

**Fig.5　Cavitation priming and development of D100 and D20G80 in a nozzle with taper 2 at needle valve lifting stage**



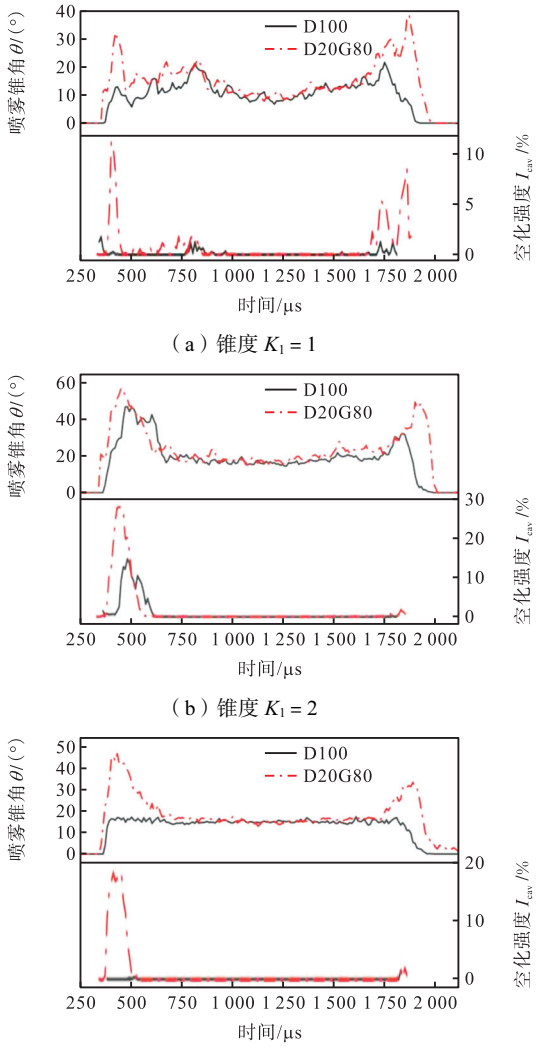

（a）D100　（b）D20G80

**图 6　两种燃油在不同针阀高度下的线空化形态及空间分布**

**Fig.6　String cavitation patterns and spatial distribution of two fuel types at different needle valve heights**

## 2.2　喷孔锥度对混合燃油喷雾特性的影响

图 7 为 D100 与 D20G80 经不同喷孔锥度的喷嘴喷射后的喷雾锥角变化. 喷雾锥角的波动与喷嘴内线空化的出现及强度有强烈的依赖关系，两种燃油喷雾锥角的差异也主要体现在针阀抬起初始阶段和即将落座阶段，即主要与喷嘴内空化分布及瞬态空化




（a）锥度 $K_1 = 1$　（b）锥度 $K_1 = 2$　（c）锥度 $K_1 = 3$

**图 7　D100 与 D20G80 经 3 种不同喷孔锥度喷嘴后喷雾锥角瞬态变化**

**Fig.7　Transient changes of spray cone angle after D100 and D20G80 injected through three spray nozzle with different taper**

流动特性的差异有关. 整体来说，汽/柴油有更为强烈的线空化分布，进而也对应了更大的喷雾锥角.

在图 7(a)中 D100 在孔内的线空化尽管非常微弱，但只要有就会引致喷雾锥角的增加和波动，而图 7(c)中 D100 在孔内完全不存在线空化的初生，为单相流，从而喷雾锥角非常平稳，不存在小针阀升程时的喷雾锥角峰值现象，揭示了在一次燃油喷射过程中针阀抬起初始阶段和即将落座的终了阶段，两个喷雾锥角的显著峰值是由喷嘴内线状空化的出现引致，而非针阀突然抬起或落座的机械原因引致. D20G80 在 3 种不同喷孔锥度的喷嘴内均存在线空化现象，也从而使喷雾锥角在喷油初期与末期均存在较大的峰值.

图 8 为 D100 与 D20G80 经不同喷孔锥度的喷嘴喷出后的喷雾边缘波动的对比. 以一次燃油喷射过程中瞬态喷雾在空间出现时间的标准差给出，图中数值越大即颜色越偏向红色的区域表明喷雾的波动越剧烈. 喷雾锥角反映了燃油喷出喷孔后空间的分布情况，而喷雾边缘的波动情况可以更好地反映燃油与空气的混合，边缘波动越剧烈，则燃油与空气混合会更充分. D100 相较于 D20G80 经同一喷孔锥度的喷嘴喷出时其喷雾边缘的波动都明显更弱，即柴油中添加汽油后的混合燃油喷雾波动及不稳定性增加. 而 3 种锥度喷嘴中，锥度为 2 的喷嘴喷雾边缘波动明显强于另外两者，且上边缘波动范围更大，即喷孔锥度为 2 的喷嘴内线空化更强，进而喷雾边缘波动更为强烈，可预测其油、气混合会更好.

图 9 为两种燃油在 3 个不同锥度喷嘴内的空化强度和喷雾锥角的数据散点，呈现了线空化一旦出现后的喷雾锥角与空化强度间所存在斜率一定的线性递

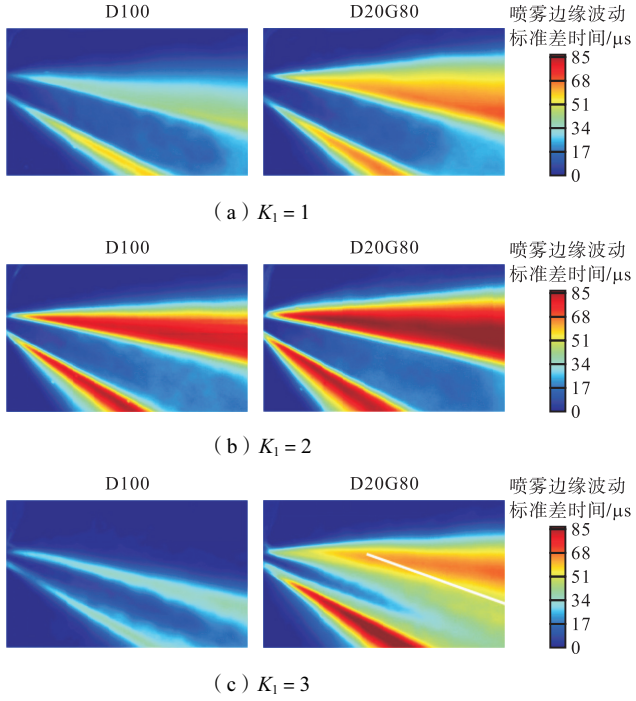



**图 8　D100 与 D20G80 经不同锥度喷嘴喷出后的喷雾边缘波动标准差**

**Fig.8　Standard deviation of spray edge fluctuations between D100 and D20G80 injected through different tapered nozzles**

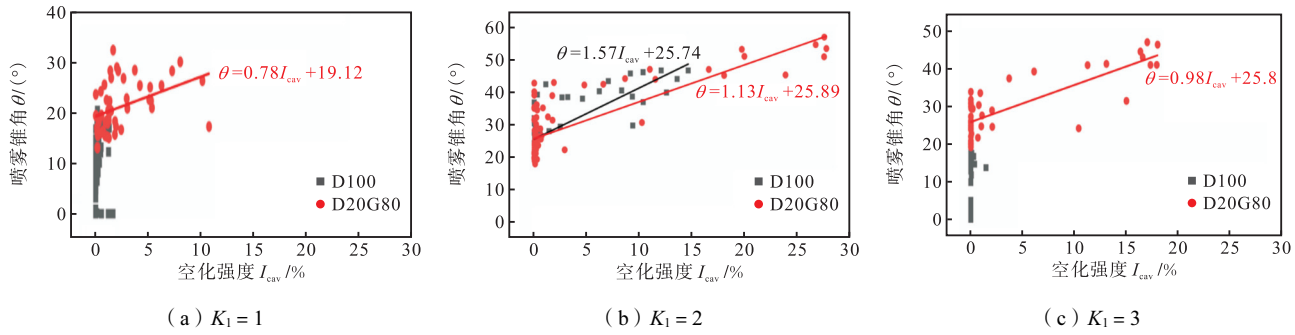



**图 9　喷嘴内空化强度和喷雾锥角对应关系数据散点**

**Fig.9　Scatter plot of the correspondence between cavitation intensity and spray taper angle in the nozzle**

增关系，该斜率与燃油种类及喷嘴喷孔锥度均无关.

## 2.3　喷孔数对混合燃油在喷嘴内瞬态空化流动特性的影响

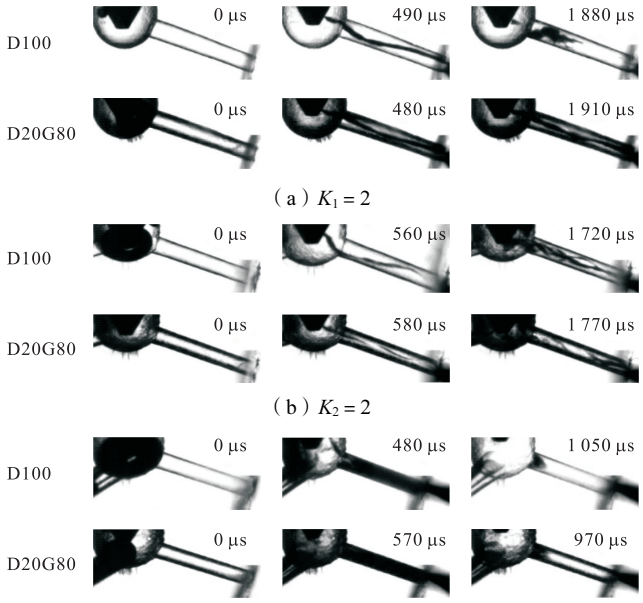
针对单孔、2 孔和 3 孔喷嘴开展了 D100 和 D20G80 在其内部瞬态空化流动特性的对比研究. 其中，2 孔和 3 孔喷嘴是在各孔一致性可以接受的范围内选择了其中单孔开展其内部流动的可视化试验. 此处，3 个喷嘴的喷孔锥度均取值为 2.

图 10 给出了两种燃油在 3 个喷嘴内典型时刻的空化分布. 每个试验方案选择 3 个时刻，0 μs 时刻是针阀开始抬起之前；第 2 个时刻是针阀抬起过程中涡线空化最为强烈的时刻；第 3 个时刻是针阀落座过程中空化再次出现的时刻. 单孔喷嘴内，D100 在 490 s 时发生强烈线空化，并在 1 880 μs 针阀即将落座时喷嘴内多个空间点同时发生空化，其在喷孔入口附近出现了大面积空化区，接近云状空化. D20G80 涡线空化最强烈时刻与 D100 接近，空化分布区域和形态也类似，但在即将落座的时间段，D20G80 喷嘴内出现

的线空化与 D100 出现云状空化有所不同，说明 D20G80 燃油在 $K_1 = 2$ 喷嘴内的漩涡流动转动惯量更大，针阀关闭落座时更倾向于再次出现线空化.

2 孔喷嘴内 D100 在 560 μs 时出现较强的线空化，比单孔喷嘴出现线空化及达到最强时刻要略晚，但形态与其在单孔喷嘴内类似. 1 720 μs 时针阀即将落座，其喷孔内产生了数条线空化，相互缠绕在一起，同时压力室内出现了大量的空化，这与单孔喷嘴在即将落座时间段的空化形态有所不同. 2 孔喷嘴内的涡流场更加复杂，存在多个漩涡，同时漩涡场的低压区分布也更复杂. 2 孔喷嘴内 D20G80 发生线空化，对应时刻与 D100 大致一致，1 770 μs 针阀即将落座，压力室内几乎被空化气相区域充满，喷孔内出现了多种空化，较难界定其种类.

3 孔喷嘴内的空化现象与单孔及 2 孔喷嘴有很大差异，其原因在于喷孔内的流场结构发生了较大改变. 3 孔喷嘴中出现的空化现象则主要是几何诱导壁面空化，如在 480 μs 时，该喷孔内出现了十分剧烈的几何诱导空化，从喷孔入口一直沿伸到喷孔出口，几乎占据了整个喷孔，因空化区域是贴着喷孔壁面的一圈环状区域内，从而采用背景光成像拍摄时整个喷孔内即为全黑. D100 在压力室右侧到喷孔入口处出现一长条形线状空化. 在 1 050 μs 针阀抬升到接近最大位置时，喷孔内仍有一定的几何诱导空化，空化区域缩短至在喷孔入口一小段，整个孔入口的边缘都诱发了空化. 3 孔喷嘴内孔与孔之间也观察到了涡线空化，但存在时间极短.



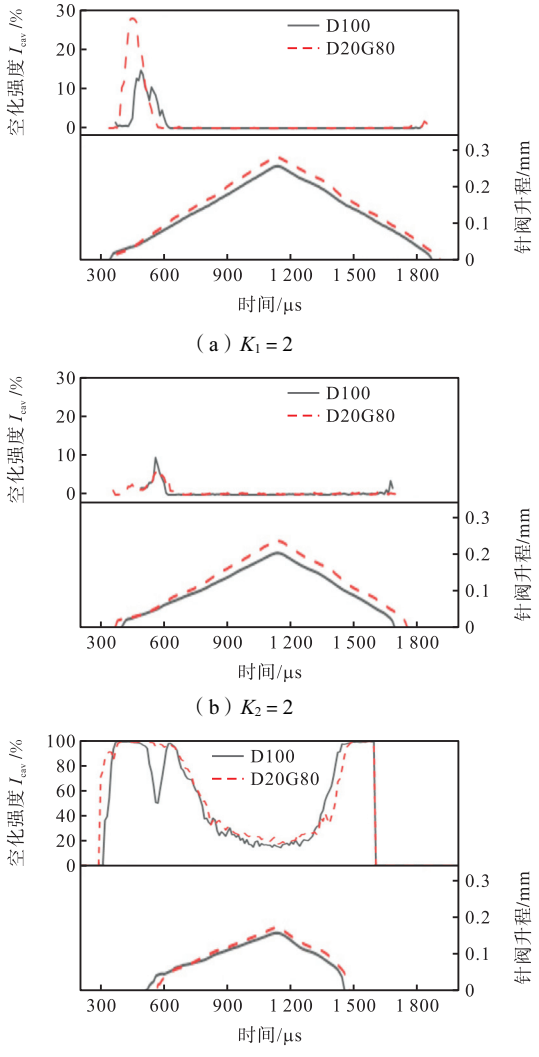

（a）$K_1 = 2$　（b）$K_2 = 2$　（c）$K_3 = 2$

**图 10　D100 与 D20G80 在不同孔数的喷嘴喷孔内的典型空化流态**

**Fig.10　Typical cavitation flow patterns of D100 and D20G80 in nozzle with different numbers of holes**

图 11 为两种燃油在 3 个不同孔数的喷嘴内空化强度的瞬态变化. 当孔数从单孔增加至 2 孔后，燃油流入压力室被 2 个孔分流，其在喷孔前压力室内的流场旋涡要小. 若为单孔，燃油进入压力室旋转后均从一个孔喷出，孔前压力室空间会形成更大的一个旋涡，引发更强的涡线空化. 2 孔喷嘴内虽然线空化现象与单孔喷嘴类似，但总的线空化强度更弱，且两种燃油的强度甚至差异已经很小.

3 孔喷嘴内的空化因是几何诱导壁面空化，背景光成像的空化强度图片处理方法得出的空化强度数值即很大，表现为空化现象十分剧烈，D100 与 D20G80 的空化强度最小值分别为 14.1%、17.0%. D100 的初始空化强度接近 100%，D20G80 空化强度曲线与 D100 类似，喷油初始与结尾均接近 100%，两种燃油空化强度曲线的下降几乎同步.



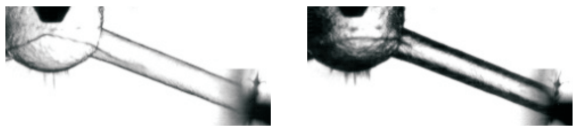

（a）$K_1 = 2$　（b）$K_2 = 2$　（c）$K_3 = 2$

**图 11　1 ~ 3 孔喷嘴 D100 与 D20G80 燃油空化强度曲线**

**Fig.11　Cavitation intensity curves of the D100 and D20G80 in one to three-hole nozzles**

2 孔喷嘴内会出现两种形式的线空化，一种起源于针阀锥面，另一种是连接孔与孔之间而不与针阀接触. 图 12 所示 $K_2 = 2$ 喷嘴内在针阀升至一定高度后压力室内出现较弱的孔与孔之间的线空化. 据统计，10 次喷油中，D20G80 燃油出现孔与孔之间线空化的总时长约为 D100 线空化总时长的 5 倍，即柴油中加入汽油后，线空化的波动性和不稳定性更大. 两种燃油孔与孔之间的线空化沿伸到喷孔内后均会迅速消失，并不会像起源于针阀锥面的线空化一样在孔内继续发展，并延伸出喷孔.

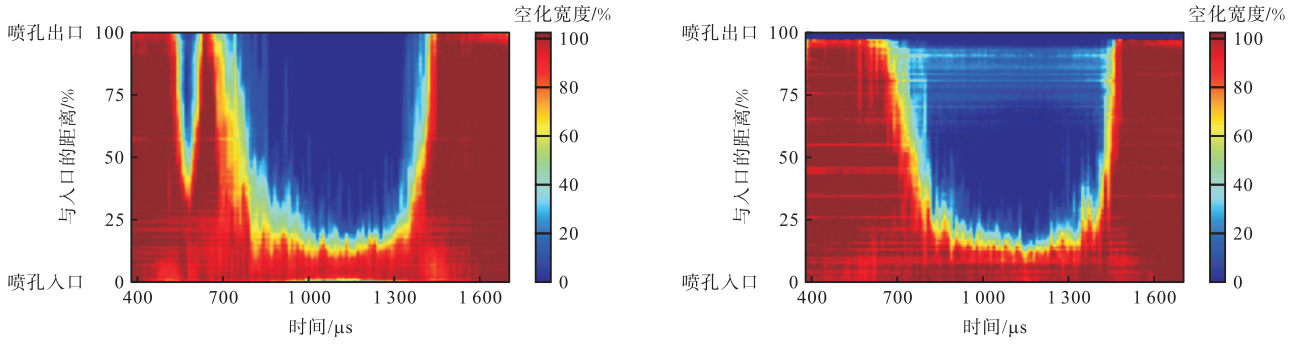
图 13 为 3 孔喷嘴中空化的时空分布. 颜色标尺反映空化在喷孔内的宽度，定义为空化区域在喷孔内横截面上的占比. 两种燃油的长度分布变化趋势与



（a）D100　　（b）D20G80

**图 12　2 孔喷嘴内 D100 与 D20G80 的孔与孔之间的线空化**

**Fig.12　String cavitation between the holes of D100 and D20G80 in the two-hole nozzle**




（a）D100　　（b）D20G80

**图 13　3 孔喷嘴 D100 与 D20G80 燃油空化长度宽度分布**

**Fig.13　Distribution of fuel cavitation length and width of D100 and D20G80 in three-hole nozzle**

空化强度的总体分布几乎一致，图中绿色区域即空化的终点. 喷孔内的空化区域总是从入口处向出口沿伸，差别在于长短. 从由颜色代表的宽度分布可知，空化总是在入口处占满整个喷孔，到下游空化末尾的位置突然变窄，最终消失.

## 2.4　喷嘴喷孔数对混合燃油喷雾特性的影响

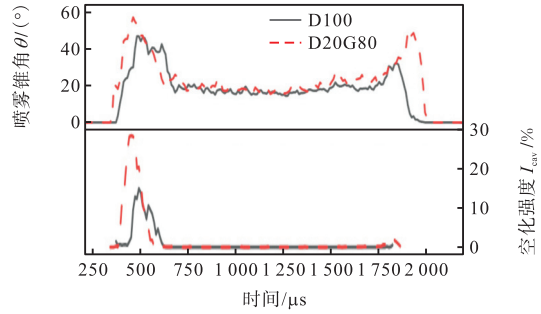
喷嘴孔数改变后，因喷孔内空化流动瞬态特性的差异，带来了喷雾的差异. 图 14 为 D100 与 D20G80 燃油经 1 ~ 3 孔喷嘴喷出后的喷雾锥角随时间的变化. 两种燃油经 2 孔喷嘴喷出后的喷雾锥角曲线与单孔喷嘴高度相似，均在喷油初期出现较大的喷雾锥角，持续时间与空化发生时间接近. D20G80 的喷射结束时间更晚，总持续时间大于 D100，从总体上看 D20G80 喷雾锥角大于 D100，但喷雾锥角的最大值小于后者. 而 3 孔喷嘴喷雾锥角的变化过程则与单孔、2 孔具有明显的差异. 由于其内发生几何诱导空化，喷雾锥角并没有增大，反而在发生超空化时喷雾锥角减小.

D20G80 燃油经 2 孔喷嘴和 3 孔喷嘴喷出后的喷雾锥角在大多数时间内都大于 D100，尤其是在喷油初期和末期，针阀升程较低时，压力室内流道狭小，对下游流动具有明显的影响，由燃油物性导致的差异被放大. D100 的喷雾锥角在约 600 μs 时并没有因为发生超空化而更大，其变化趋势与 D20G80 相同，说明在喷油初期，超空化并不是影响喷雾锥角的决定性因素. 两种燃油经 2 孔喷嘴喷出时，喷油结束时的喷雾锥角迅速减小，结束时间相差明显，而 3 孔喷嘴喷油结束时喷雾锥角缓慢减小，喷油结束时间点的差异没有 2 孔的大. 图 14(c) 所示当孔数增加到 3 之后，喷油结束阶段，喷嘴内没有线空化的发生，只有沿着壁面延伸出喷孔的超空化，此时的喷雾锥角比起单孔和 2 孔时要小，表明旋涡空化效应引致的喷雾锥角的增加要远远大于壁面超空化.

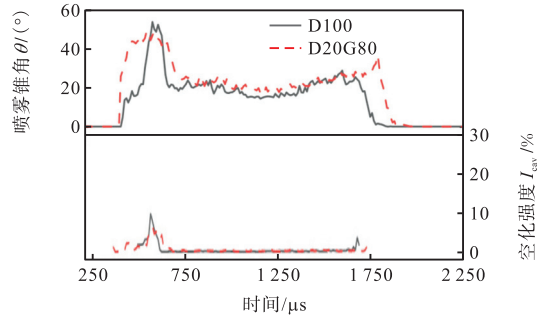
图 15 为两种燃油经这 3 种不同孔数的喷嘴喷出后喷油中期平均喷雾锥角，D20G80 燃油的平均喷雾锥角均大于 D100. 在喷油中期阶段，2 孔喷嘴压力室内 D20G80 燃油出现线空化的频率明显高于 D100，但 2 孔喷嘴增幅相较单孔喷嘴增幅变化不大. 由此可知，压力室内的线空化未对喷雾造成明显的影响，其原因在于涡流强度较弱，具有转动惯量的燃油进入喷孔后旋转受到阻碍，转动惯量被耗散，当燃油到达喷孔出口时已不再具有转动惯量.

图 16 为 D100 与 D20G80 两种燃油在 2 孔喷嘴内出现的两种线空化及其对应的近喷孔区域的喷雾投影. 两种燃油在喷嘴内出现孔与孔之间的线空化时，通常都比较弱，线空化无法发展至喷孔出口，对

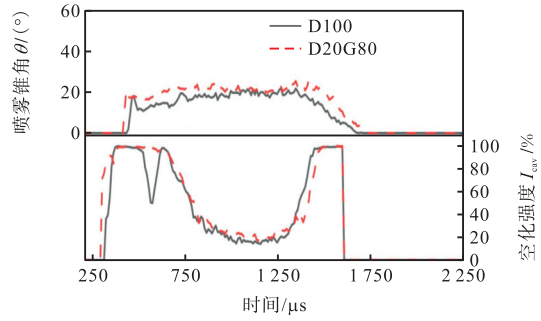
应的喷雾锥角较小. 而当发生起源于针阀锥面处的线空化时，空化强度较大，同时很容易在喷孔内发展延伸到喷孔出口，喷雾锥角显著增加. 无论发生哪种线空化，D20G80 燃油的喷雾锥角都大于 D100，即除




（a）$K_1=2$




（b）$K_2=2$




（c）$K_3=2$

**图 14　D100 与 D20G80 经不同喷孔数喷嘴喷出后喷雾锥角瞬态变化**

**Fig.14　Transient changes of spray cone angle after D100 and D20G80 injected through spray nozzle with different number of holes**

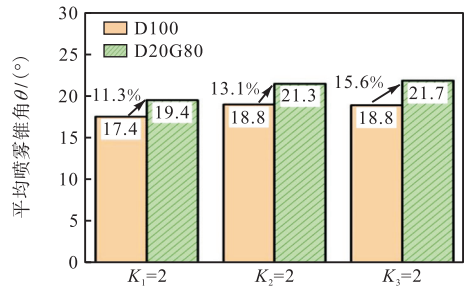
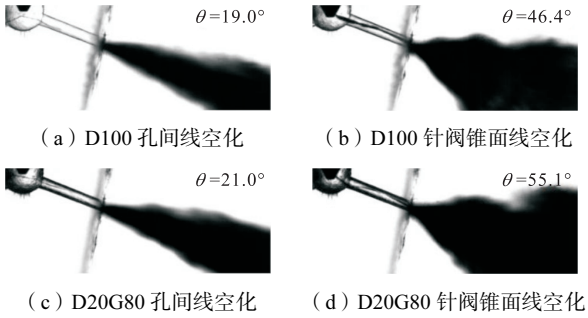



**图 15　两类燃油在 1 ~ 3 孔喷嘴上喷油中期平均喷雾锥角**

**Fig.15　Mean spray cone angle of two types of fuel on one to three-hole nozzles**

空化因素外，D20G80 的物性导致的流动状态改变，使其喷雾锥角略大于 D100.




（a）D100 孔间线空化　（b）D100 针阀锥面线空化

（c）D20G80 孔间线空化　（d）D20G80 针阀锥面线空化

**图 16　D100 与 D20G80 在 2 孔喷嘴内孔与孔间线空化及喷雾**

**Fig.16　Cavitation and spraying of D100 and D20G80 through inter-hole of the two-hole nozzle**

## 3　结　论

对不同燃油属性下喷孔锥度及喷孔数对喷嘴内空化瞬态流动及喷雾特性影响开展了试验. 对于实际发动机如果从纯柴油换成汽/柴油混合燃油后，因更容易出现空化，流量会有所下降，故对应的喷射策略中喷射脉宽需要略微调大；喷射的不稳定性会增加，这也是汽/柴油喷射系统需要重点关注的问题. 具体结论如下：

（1）喷孔锥度会影响到孔内线空化的初生及发展，对于纯柴油，只有某个喷孔锥度使喷嘴内存在非常强烈的旋涡流动才会诱发线空化，而柴油中一旦添加了汽油则不同喷孔锥度喷嘴内，即使最为微弱的旋涡流动也很易引致线空化的初生.

（2）燃油种类影响线空化的初生及强度，而其一旦出现后的空间分布与燃油种类无关，主要与喷孔的高低位置相关.

（3）喷孔内涡线空化一旦出现，喷雾锥角和孔内空化强度呈线性关系，与燃油种类及喷嘴结构均无关；对于锥度孔喷嘴，单孔和 2 孔喷嘴内均主要为线空化，2 孔喷嘴内的线空化强度更弱，3 孔喷嘴内则主要是几何诱导空化.

（4）喷孔内的几何诱导空化及多孔喷嘴孔与孔间未延伸至喷孔出口的线空化对喷雾影响均很弱，而起源于针阀锥面延伸至喷孔出口的线空化则会引致较大的喷雾锥角，高压共轨喷油器在针阀抬起初始阶段和即将落座的终了阶段所出现的两个显著喷雾锥角峰值即是由该类线空化所引致.

**参考文献：**

［1］ Chen Y，Heister S D. A numerical treatment for attached cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering，1994，

116：613-618.

［2］ Schmidt D P，Corradini M L. The internal flow of diesel fuel injector nozzles：A review[J]. International Journal of Engine Research，2001，2(1)：1-22.

［3］ Su H P，Hyung J K，Hyun K S，et al. Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristic of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow，2009，30(5)：960-970.

［4］ Aleiferis P G，Serras-Pereira J，Augoye A，et al. Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector for direct-injection spark-ignition engines[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2010，53：4588-4606.

［5］ Kawano D，Goto Y，Odaka M，et al. Modeling atomization and vaporization processes of flash-boiling spray[C]// SAE Paper. Detroit，MI，USA，2004，2004-01-0534.

［6］ Serras-Pereira J，Romunde Z V，Aleiferis P G，et al. Cavitation，primary break-up and flash boiling of gasoline，iso-octane and *n*-pentane with a real-size optical direct-injection nozzle[J]. Fuel，2010，89(9)：2592-2607.

［7］ Prasetya R，Sou A，Wada Y，et al. Effects of ambient pressure on cavitation in the nozzle and the discharged liquid jet[J]. Journal of Fluid Science and Technology，2019，14(1)：JFST0005.

［8］ 刘琦，欧阳光耀，杨昆，等. 高压喷射条件下非常态燃油喷嘴内部空化流动特性[J]. 农业机械学报，2016，47(6)：333-339.

［9］ 麻斌，高莹，刘宇，等. 不凝性气体及湍流扰动对喷嘴孔内空化现象的影响[J]. 农业机械学报，2017，48(4)：342-348.

［10］ He Z，Guo G，Tao X，et al. Study of the effect of nozzle hole shape on internal flow and spray characteristics[J]. Internal Communications in Heat and Mass Transfer，2016，71：1-8.

［11］ Jiang G，Zhang Y，Hua W，et al. Study of the generated density of cavitation inside diesel nozzle using different fuels and nozzles[J]. Energy Conversion & Management，2015，103(20)：8-17.

［12］ Moro A，Zhou Q，Xue F，et al. Comparative study of flow characteristics within asymmetric multi hole VCO and SAC nozzles[J]. Energy Conversion & Management，2017，132：482-493.

［13］ He Z，Zhong W，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.

［14］ Chen Z，He Z，Shang W，et al. Experimental study on the effect of nozzle geometry on string cavitation in real-size optical diesel nozzles and spray characteristics[J]. Fuel，2018，232(15)：562-571.

［15］ Ishak M，Ismail F，Mat S C，et al. Numerical analysis of nozzle flow and spray characteristics from different nozzles using diesel and biofuel blends[J]. Energies，2019，12：281-289.

［16］ Khandal S V，Banapurmath N R，Gaitonde V N，et al. Paradigm shift from mechanical direct injection diesel engines to advanced injection strategies of diesel homogeneous charge compression ignition(HCCI) engines：A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2017，2016(70)：369-384.

［17］ Wang Q，Sun W，Guo L，et al. Particle number size distribution from direct-injection premixed combustion engine fueled with gasoline/diesel blends[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part D：Journal of Automobile Engineering，2020，234(1)：258-269.

［18］ 张旭. 混合燃料喷雾燃烧特性的实验及数值模拟研究[D]. 武汉：华中科技大学能源与动力工程学院，2015.

［19］ 王燕娟. 柴油-汽油混合燃料的喷雾特性试验及数值模拟[D]. 西安：长安大学能源与电气工程学院，2020.

［20］ Zhong S，Wyszynski M L，Megaritis A，et al. Experimental investigation into HCCI combustion using gasoline and diesel blended fuels[C]// SAE Paper. San Antonio，Texas，USA，2005，2005-01-3733.

［21］ Pastor J V，García A，Micó C，et al. Experimental study of the influence of gasoline-diesel blends on the combustion process and soot formation under diesel engine-like conditions[J]. Energy and Fuels，2020，34(5)：5589-5598.

［22］ 孙申鑫. 柴油机喷嘴内线空化特性及其对燃油喷射与喷雾影响的研究[D]. 镇江：江苏大学能源研究院，2018.

［23］ Blessing M，Konig G，Kruger C，et al. Analysis of flow and cavitation phenomena in diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation[C]// SAE Paper. Detroit，MI，USA，2003，2003-01-1358.