

喷嘴内流影响下的喷油器性能参数敏感性分析

徐硕涵¹, 赵凯², 白天阳¹, 高章², 郭根苗¹, 何志霞¹, Raul PAYRI³, 邵壮^{1,4}

(1. 江苏大学能源研究院, 212013, 江苏镇江; 2. 中汽研汽车检验中心(常州)有限公司, 213100, 江苏常州; 3. 瓦伦西亚理工大学清洁动力与热流体研究所, 46022, 西班牙瓦伦西亚; 4. 山东中科先进技术研究院有限公司, 250101, 济南)

摘要: 为探究喷嘴结构设计对喷油器乃至电控高压共轨燃油喷射系统流通特性、喷雾特性等影响, 基于高压共轨喷嘴内部流动及喷雾可视化试验平台, 探究真实尺寸喷嘴内部空化流动瞬态特性, 利用修正的空化模型结合湍流模型与多相流模型开展喷嘴几何结构对内部空化流态及其对喷嘴综合性能影响的数值模拟研究, 并结合规则两水平分数因子设计开展几何参数敏感性分析。结果表明: 在燃油喷射过程中, 喷嘴内可能同时存在几何空化与线空化两种空化流态, 且针阀运动直接影响喷嘴内线空化现象; 喷孔出口直径、喷孔锥度系数、针阀升程及喷孔长度等因素对喷嘴的综合性能影响最为显著; 不同结构喷嘴内部空化流态的差异是喷油器流通与喷雾性能差异的主要原因; 喷嘴内部的线空化对喷雾宏观特性影响显著, 且空蚀风险较小。研究可为喷嘴结构设计提供参考, 为实现高压共轨燃油喷射系统喷油规律、喷油量及喷雾的精准控制提供理论支撑。

关键词: 喷嘴; 敏感性分析; 空化; 喷雾; 空蚀风险

中图分类号: TK422 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202505018 **文章编号:** 0253-987X(2025)05-0189-09

Parameters Sensitivity Analysis of Injector Performance with the Effect of Nozzle Internal Flows

XU Shuohan¹, ZHAO Kai², BAI Tianyang¹, GAO Zhang², GUO Genmiao¹,
HE Zhixia¹, Raul PAYRI³, SHAO Zhuang^{1,4}

(1. Institute of Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. China Automotive Technology and Research Center (Changzhou) Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213100, China; 3. CMT-Clean Mobility & Thermofluids, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, Spain; 4. Shandong Zhongke Advanced Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: To investigate the impact of nozzle structure design on the flow characteristics and spray characteristics of injectors and the electronically controlled high-pressure common rail fuel injection system, a high-pressure common rail nozzle internal flow and spray visualization test platform is utilized to explore the transient characteristics of cavitation flow within a full-scale nozzle. A modified cavitation model, combined with a turbulence model and multiphase flow model, is used to conduct numerical simulations on the effects of nozzle geometry on internal cavitation flow patterns and overall nozzle performance. Additionally, a two-level fractional factorial design is employed for geometric parameter sensitivity analysis. The results indicate that

收稿日期: 2024-10-12。 作者简介: 徐硕涵(2000—), 男, 硕士生; 郭根苗(通信作者), 女, 副教授, 硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52106153, 52376113); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20210760)。

网络出版时间: 2024-12-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241203.1138.003>

both geometric cavitation and string cavitation can coexist within the nozzle during fuel injection, and needle valve movement directly affects the occurrence of string cavitation in the nozzle. Factors such as nozzle outlet diameter, nozzle conicity coefficient, needle valve lift, and nozzle hole length have the most significant impact on the nozzle's overall performance. Differences in internal cavitation flow patterns across different nozzle structures are the primary reason for differences in flow and spray performance. String cavitation within the nozzle has a notable effect on the spray's macroscopic characteristics, with minimal risk of erosion. This study provides a reference for nozzle structure design and theoretical support for precise control of regular injection, fuel quantity, and spray in high-pressure common rail fuel injection systems.

Keywords: nozzle; sensitivity analysis; cavitation; spray; erosion risk

开发高效、清洁以及可持续的柴油机技术是实现“双碳”目标的迫切需求。在喷油嘴内部存在着复杂的微尺度多相流体流动现象——空化,空化的关键效应之一是它与湍流的关联。在内燃机喷射液体燃料的情况下,喷油器喷嘴内外的空化流动主导着液体燃料的破碎和雾化,对燃烧效率和排放有显著影响^[1-5]。现代柴油机喷射系统通常采用高喷射压力及小喷嘴直径提高喷雾质量,以促进燃料混合燃烧^[6-10]。与喷嘴内湍流对喷雾雾化的影响相比,空化现象更为重要。根据流动形态,喷嘴内部空化分为几何诱导空化和涡旋诱导空化两种。前者由喷嘴几何结构引起的流动收缩所致,能够促进射流破碎^[11-13],但也会引致空蚀,从而影响喷嘴寿命^[14]。后者呈线状(故又称线空化),主要与喷嘴内涡旋流动有关,其可诱导中空喷雾,进而改善雾化质量^[15],但喷嘴内的涡流场具有强瞬态特性,诱导条件较为苛刻^[16]。已有研究表明,柴油机喷嘴内部几何结构的微小改变就可以产生完全不同的空化形态^[17-21]。

目前,关于喷嘴几何结构对内部空化流动及喷雾特性影响的探究多集中于喷孔结构与针阀运动。陶希成等^[22]基于比例放大透明喷嘴试验台,探究了不同锥度喷孔内空化流动差异,结果表明,在渐扩孔中最易发生空化现象,直孔次之,渐缩孔最难。何志霞等^[23]通过 X 射线同轴相衬成像技术准确获得喷嘴内部几何结构尺寸,结果表明较小的喷孔长径比有助于提高初次雾化效果,喷雾贯穿距最小;喷孔入口处倒圆角设计会大大减弱喷嘴内空化强度,使喷雾破碎效果变差。Moon 等^[24]通过 X 射线示踪成像方法在真实金属喷嘴内部观察到了涡流、涡线空化及流动分离的瞬态行为,结果表明涡流强度随针阀升程的增加先增大后减少。Salvador 等^[25]基于雷诺时均湍流模型(RANS)探究了 10 种固定针阀

升程的多孔喷嘴,模拟结果表明喷嘴内部湍流的发展和压力演变依赖于针阀升程,在低针阀升程下更明显。

上述研究表明,喷嘴几何结构对其内部空化流动及喷嘴流通特性、喷雾发展特性具有显著影响。因此,在喷油器设计中,针对其几何结构进行优化成为提高喷油器性能的重要途径。本文基于高压共轨喷嘴内部流动可视化实验平台,探究针阀运动对喷嘴内部空化两相流动的影响,并在此基础上利用数值模拟方法与常规两水平因子设计探究显著影响喷嘴性能的几何结构参数。

1 可视化试验装置及喷嘴结构

1.1 高压共轨喷嘴内部流动与喷雾可视化试验台

自行搭建的高压共轨喷嘴内部流动与喷雾可视化试验台如图 1 所示。试验系统主要包括电控高压共轨燃油喷射系统和高速数码显微成像系统。油箱内的燃油经由过滤器、低压油泵和高压油泵至高压

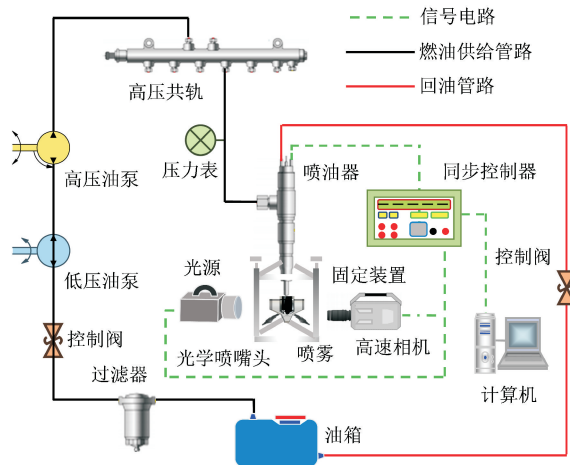


图 1 高压共轨喷嘴内部流动和喷雾可视化试验台

Fig. 1 High-pressure common rail nozzle internal flow and spray visualization test bench

共轨管稳压,然后经油管至喷雾器喷出。试验时,从电脑端控制电子控制单元发出喷雾信号,同时采用同步信号触发相机拍摄,实现喷嘴内部流动及喷雾同步高精度捕捉。

1.2 喷嘴结构及参数定义

可视化试验喷嘴为基于某型 9 孔船用喷雾器喷嘴研制出的具有相同尺寸的 2 孔光学透明喷嘴,喷嘴材质为机玻璃。如图 2 所示,首先将金属喷雾器喷嘴头部自喷雾嘴偶件密封线以下切除,然后替代装配光学透明喷嘴。

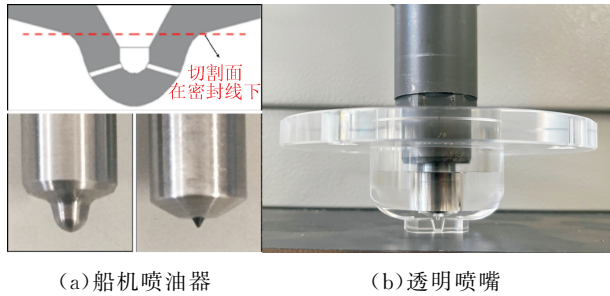


图 2 船机喷雾器与透明喷嘴

Fig. 2 Marine engine injector and transparent nozzle

基准喷嘴具体几何尺寸详见表 1。图 3 给出了喷嘴主要结构参数定义示意图。其中,喷孔锥度系数 K 强烈影响喷孔内部空化流动特性,定义如下

$$K = \frac{100(D_{in} - D_{out})}{L_h} \tag{1}$$

式中: D_{in} 为喷孔入口直径; D_{out} 为喷孔出口直径; L_h 为喷孔长度。经计算,圆柱形喷孔的锥度系数 K 为 0,渐缩喷孔的锥度系数 K 大于 0。

表 1 透明喷嘴结构参数

参数	数值
针阀锥角 $\theta_z/(\circ)$	45
针阀头部宽度 L_z/mm	0.26
喷嘴压力腔半径 R/mm	0.75
喷嘴压力腔高度 H_s/mm	0.68
喷孔高度 H_h/mm	0.66
喷孔倾角 $\theta_h/(\circ)$	77.5
锥度系数 K/mm	0
喷孔长度 L_h/mm	1.37
喷孔入口直径 D_{in}/mm	0.4
喷孔出口直径 D_{out}/mm	0.4
喷孔入口圆角半径 r/mm	0

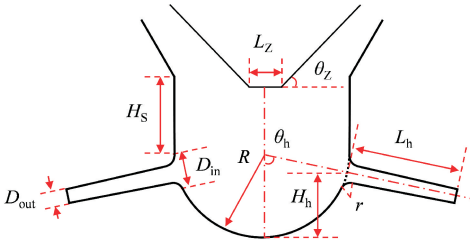


图 3 结构参数定义示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the main nozzle structure parameters

试验中,燃油介质为柴油,喷射压力分别取 50、60、70、80 MPa,背压为当地环境压力,喷油脉宽为 1 800 μs ;柴油温度与环境温度相同,均为 293 K;柴油密度为 832 kg/m^3 ,柴油黏度为 0.003 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。每个试验工况均进行 3 次重复试验。

2 数值模拟模型及方法

基于 ANSYS Fluent 计算流体力学软件,采用基于欧拉框架的气液界面追踪方法 (VOF) 对两相界面进行跟踪,气液两相流中考虑了液相燃油、燃油蒸汽和空气 3 种组分。同时,忽略流动过程中的燃油微小温度变化,将多相流假定为等温可压缩湍流。该模型通过求解一组动量方程,在整个计算域中跟踪每一相的体积分数,连续性方程和动量方程如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \cdot \sigma \tag{3}$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; U 为速度; P 为压力; σ 为混合流体的剪应力张量。

雷诺应力湍流 (RSM) 模型忽略了 Boussinesq 假设,直接求解雷诺应力输运方程与耗散方程,克服了常用两方程湍流模型涡粘假设的局限性,可较好地预测旋流和二次流等湍流动态特性。同时,RSM 模型考虑了流线曲率、涡旋以及快速应变率的影响,对喷嘴内线空化流动的预测具有更大潜力。

基于简化 Rayleigh-Plesset 方程发展出的空化模型 (如 Zwart-Gerber-Belamri、Schnerr-Sauer 等) 对局部压力非常敏感,结合 RANS 模型解析喷嘴内部旋流将会高估涡核附近的湍流黏度,从而低估了涡核的速度梯度和压降,导致数值模拟预测的线空化强度总是明显比试验结果弱^[26-27]。本文考虑了旋涡流场中涡量张量的影响,修正了 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,提高了有限传质速率类空化模

型对线空化现象的预测精度。

修正后的空化模型源项如下:

当 $P_v \geq P_\infty$ 时, 气泡开始生长(即蒸发阶段), 有

$$\dot{R}_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P_\infty)}{3\rho_l}} \quad (4)$$

当 $P_v < P_\infty$ 时, 气泡开始溃灭(即冷凝阶段), 有

$$\dot{R}_c = CF_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_\infty - P_v)}{3\rho_l}} \quad (5)$$

$$C = (1 + t_\infty\Omega)^{-1} \quad (6)$$

式中: $\dot{R}_e$ 和 $\dot{R}_c$ 分别为气泡生长和溃灭过程的质量输运源项; α_v 为蒸汽相体积分; ρ_v 为蒸汽相密度; ρ_l 为液相密度; P_v 为柴油的饱和蒸汽压; P_∞ 为局部远场压力; α_{nuc} 为成核部位体积分; R_B 为气核半径; F_{vap} 和 F_{cond} 为模型系数, 分别取 50 和 0.01; C 为冷凝系数修正系数; Ω 为涡度张量; t_∞ 为时间尺度, 用于归一化涡度张量。

求解中, 采用隐式有限体积法、基于压力的求解器, 以及 SIMPLEC 压力-速度耦合算法。采用二阶迎风格式对密度进行插值, 采用压缩格式对蒸汽体积分输运方程进行离散化, 并且时间积分采用二阶格式。作者前期工作中对求解设置作了详细描述^[28]。

3 喷嘴内瞬态空化流动特性

为了捕获燃油在喷嘴内部流动时发生的瞬态空化现象, 采用背光成像法进行试验, 采用与柴油折射率相近的有机玻璃加工透明喷嘴。光线在穿过有机玻璃和燃油液相的交界处时发生的偏折较小, 而当喷嘴内部发生空化现象时, 会同时存在液相柴油与柴油蒸汽, 两者折射率差异较大, 光线在经过燃油液-汽界面时会发生折射, 导致从空化区域进入显微镜的光线减少, 因此从试验图像上看, 喷嘴内部空化区域呈现黑色, 液相柴油呈透明色。当燃油经喷嘴喷射后, 在近场喷雾区域, 由于表面张力及液体内部流动的不稳定性, 燃油由最开始的完整液柱开始破碎, 逐渐形成液膜与液丝, 此时油束仍比较稠密, 光线穿过油束时会发生多次反射与折射, 导致进入显微镜头中的光线极少, 因此在喷嘴外部的液相喷雾区呈现为黑色, 柴油蒸汽及空气呈透明色。

图 4 给出了不同喷射压力下, 一次喷油循环中喷嘴内部燃油的流动特性。可以看出, 不同喷射压力下该喷嘴内均产生了强烈的几何空化和线空化。在喷射初期, 随着针阀开启, 喷嘴内的残余气泡与上

游燃油经喷嘴压力腔(SAC)进入喷孔, 流道方向与截面的突变导致喷孔入口附近形成局部低压区, 诱导产生几何空化。几何空化迅速延伸至喷孔出口, 发展为超空化流态。同时, 喷嘴内产生了线空化, 喷孔内强烈的超空化导致孔内线空化难以区分, 但在针阀抬起和落座阶段可清楚观察到 SAC 内部的线空化现象。这主要是因为针阀运动改变了上游流道横截面, 影响了喷嘴内部流体的压力演变和速度场, 而在针阀升程处于比较低的位置时, 由于流道截面减小流体速度大幅提升, 并沿着针阀锥面及底部进入 SAC, 形成较强的涡旋结构, 从而诱发涡线空化的产生。

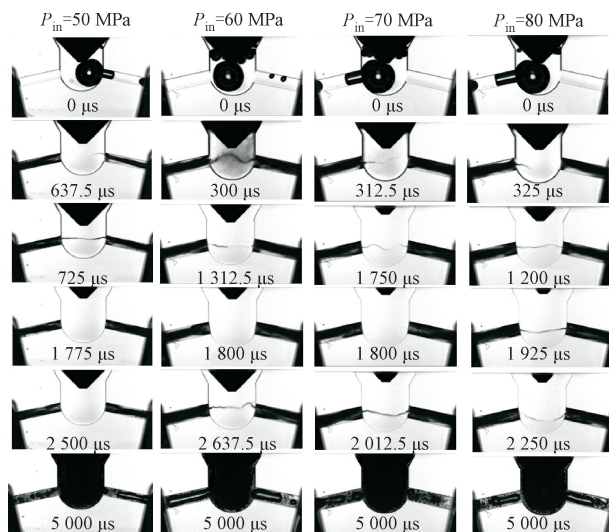


图 4 不同喷射压力下喷嘴内空化流动瞬态特性

Fig. 4 Transient characteristics of cavitation flow in nozzle under different injection pressures

考虑到透明喷嘴的材质强度以及试验重复性, 喷油压力设置为 50、60、70、80 MPa, 喷油持续期为 1 800 μs , 进行 3 次重复试验, 得到不同喷射压力下针阀升程运动及线空化强度曲线, 如图 5 所示。喷射压力直接显著影响针阀升程运动, 随着喷射压力增加, 针阀抬升速率与最大针阀升程单调增加, 且喷油脉宽也单调增大, 其中, 50 MPa 喷射压力下喷嘴的针阀最大升程为 0.3 mm。然而, 自信号触发不同喷射压力下针阀抬起至最大升程的时刻相近, 均约为 1 800 μs 。同时, 随着喷射压力增大, 针阀落座速率减小, 50 MPa 喷射压力下针阀落座最迅速。从喷射压力对线空化强度的影响可以看出, 涡线空化的产生与针阀升程密切相关, 且线空化强度呈现出一定的规律性: 不同喷射压力喷射末期喷嘴内都会出

现强烈的线空化现象。此处,线空化二维强度被定义为图像中的线空化区面积与喷孔面积的比,详见文献[16]。

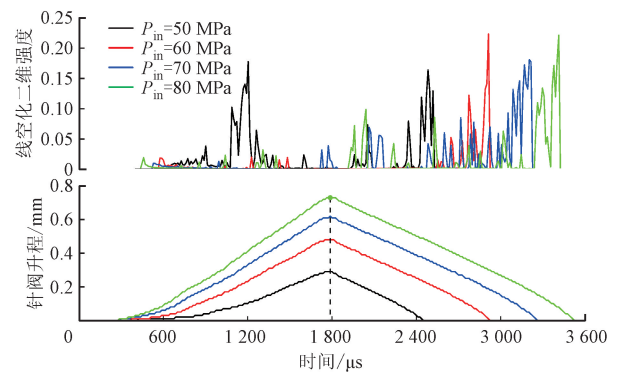


图 5 喷射压力对针阀升程和线空化二维强度的影响
Fig. 5 Effects of the injection pressure on the needle valve lift and the string cavitation 2D strength

4 数值模拟模型验证

基于 50 MPa 喷射压力、0.13 mm 针阀升程工况下的可视化试验结果进行数值模拟模型验证,此时在针阀抬起和落座阶段喷嘴内均产生了稳定且强烈线空化与超空化,见图 6。考虑到喷嘴结构的高对称性,为减少计算成本,计算域选取喷嘴一半结构。由于本研究重点关注喷嘴内部空化流动特性,因此对 SAC 与喷孔区域进行了局部加密。

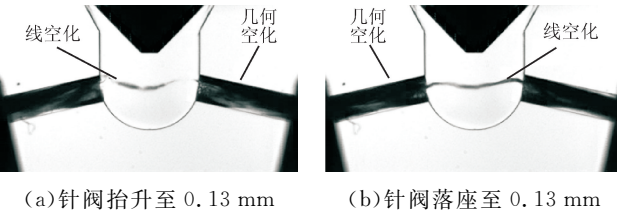


图 6 喷射压力 50 MPa、针阀升程 0.13 mm 下喷嘴内线空化及超空化现象

Fig. 6 String cavitation and super-cavitation phenomena inside the nozzle at an injection pressure of 50 MPa and a needle valve lift of 0.13 mm

为了验证数值计算结果网格无关性,针对表 2 所示 6 种尺寸网格开展数值模拟计算。考虑到透明喷嘴内部空化流动的特点,定义 SAC 腔线空化三维强度 I_{sac} 和喷孔空化三维强度 I_{hole} 的计算公式为

$$I_{sac} = \frac{V_{cav,sac}}{V_{sac}} \tag{7}$$

$$I_{hole} = \frac{V_{cav,hole}}{V_{hole}} \tag{8}$$

式中: $V_{cav,sac}$ 和 $V_{cav,hole}$ 分别表示喷嘴压力腔和喷孔内的线空化区体积; V_{sac} 和 V_{hole} 分别表示喷嘴压力腔和喷孔体积。

表 2 网格信息
Table 2 Cell information

方案	总网格数	最小网格尺寸/ μm	最大网格尺寸/ μm	SAC 最大网格尺寸/ μm	喷孔最大网格尺寸/ μm
I	650 481	0.01	0.06	20	14
II	929 953	0.01	0.06	16	13
III	1 212 750	0.01	0.06	14	12
IV	1 690 020	0.01	0.06	12	11
V	2 020 532	0.01	0.06	11	11
VI	2 551 301	0.01	0.06	10	10

图 7 给出了不同网格尺寸下喷嘴内部空化流态。由图可知,方案 I 粗糙网格下喷嘴内部几何空化与线空化形态均不能被很好刻画。随着网格细化,喷嘴内部线空化初生并发展为贯穿 SAC 且并连接喷孔中的几何空化的连续结构,喷孔中迅速发展为超空化流态,并且在线空化作用下超空化呈现出明显的向喷孔轴线处汇聚趋势。结合图 6 给出的可视化试验结果,仅从几何空化和线空化宏观形态看,方案 III 网格已达到求解精度。图 8 给出了不同网格尺寸下,喷嘴内部线空化、几何空化强度及喷孔出口流量特性。由图 8 可知,随着网格细化,喷嘴内部线空化和几何空化强度逐渐增大,导致喷嘴质量流量逐渐减小。当网格细化至方案 IV 时,喷嘴内部空化现象强度及喷孔质量流量趋于稳定,呈现出了稳定的网格无关性。同时,方案 IV 网格数值模拟结果与

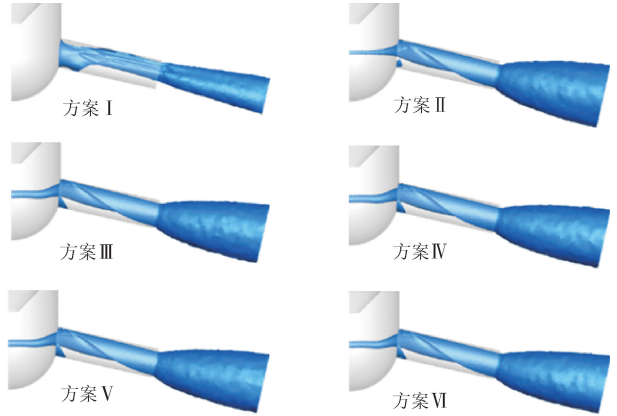


图 7 不同网格尺寸下喷嘴内部空化流态
Fig. 7 Cavitation patterns in the nozzle under different mesh sizes

图 6 展示的喷嘴内空化形态可视化试验结果具有更好的一致性,验证了数值模型的可靠性。因此,本文在方案Ⅳ网格尺寸下开展喷嘴结构参数敏感性分析。

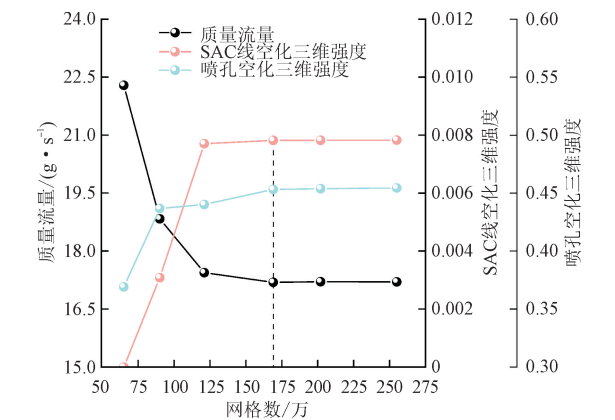


图 8 不同网格数下喷嘴质量流量及喷嘴内部空化强度
Fig. 8 Mass flow rate of the nozzle and the internal cavitation intensity under different mesh sizes

5 喷嘴结构参数敏感性分析

为了探究各结构参数及两因素交互作用对喷嘴性能的影响,在 Design Expert 软件中,选取常规两水平因子设计中的部分因子设计方法开展喷嘴结构参数的敏感性分析。敏感性分析共包含 11 个结构参数,均取高(+)、低(−)两组水平,各因素两水平取值如表 3 所示。

表 3 常规两水平因子设计因素及其水平		
Table 3 Design factors and their levels of conventional two-level factors		
参数	低水平(−)	高水平(+)
针阀升程 N_L /mm	0.1	0.8
针阀锥角 θ_z /°	30	60
针阀头部宽度 L_z /mm	0.2R	1.4R
喷嘴压力腔半径 R /mm	0.6	0.8
喷嘴压力腔高度 H_s /mm	0.34	1.02
喷孔高度 H_h	$H_{\min}$	$H_{\max}$
喷孔倾角 θ_h /°	60	80
锥度系数 K	−4	4
喷孔长度 L_h /mm	1	3
喷孔出口直径 D_{out} /mm	0.2	0.5
喷孔入口圆角半径 r /mm	0	$1/3D_{\text{in}}$

鉴于喷嘴各结构参数之间存在一定的匹配关系,为保证试验设计所得到的结构在几何空间可行,在进行试验设计时需要针对具有关联的结构参数给

出其相对范围。定义针阀头部宽度 L_z 低水平(−)为 SAC 半径的 0.2 倍,高水平(+)为 SAC 宽度的 1.4 倍;喷孔入口圆角半径 r 低水平(−)为 0,即无倒圆角设计,高水平(+)为 $1/3D_{\text{in}}$;值得说明的是,喷孔高度 H_h 是在喷嘴其他结构参数确定后,根据喷孔几何上能达到的最大喷孔高度 $H_{\max}$ 和最小喷孔高度 $H_{\min}$,定义低水平(−)为 $H_{\min}$,高水平(+)为 $H_{\max}$,如下所示

$$H_{\max} = 0.8R + \frac{D_{\text{in}}}{2} \sin \theta_h = 0.8R + \frac{K + 100D_{\text{out}}}{200} \sin \theta_h \tag{9}$$

$$H_{\min} = \frac{D_{\text{in}}}{2} \sin \theta_h = \frac{K + 100D_{\text{out}}}{200} \sin \theta_h \tag{10}$$

以流量系数 C_d 、空蚀风险指数 E_{ero} 、液相近场扩散角 θ 和类喷雾贯穿距 P_e 作为喷嘴的性能指标。其中, C_d 与 E_{ero} 反映了喷嘴的流动特性, θ 与 P_e 则可以反映近场喷雾的特征。具体地,流量系数 C_d 是反映喷嘴流通特性的无量纲参数,可以衡量喷嘴在给定压差下对液体的流通能力; E_{ero} 为喷孔区域内传质率大于 0(代表空化泡溃灭)网格单元的面积分; P_e 为喷孔出口截面上轴向动能与非轴向动能之比,其大小与喷雾贯穿距成正相关^[29]。 θ 的定义如图 9 所示:基于射流喷雾图像,首先选取射流近喷孔 1/2 区域轮廓(即近喷孔出口下游 0.75 mm),随后以喷孔轴线为基准,寻找所截取区域内距离该轴线最大距离的坐标点 e ,获得经坐标点 e 的横截线与射流喷雾区轮廓线的交点 f 。分别连接喷孔出口边界点(点 g 和 h)与坐标点 e 和 f 形成两条直线,它们的夹角即为喷孔射流的液相扩散角。

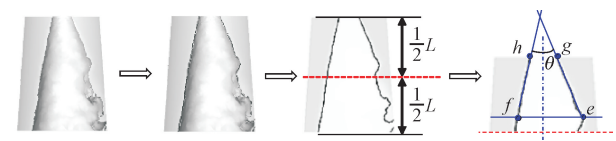


图 9 液相近场扩散角示意图
Fig. 9 Schematic diagram of near-field diffusion angle of the liquid phase

结合喷嘴结构的数值模拟结果,采用数值分析方法量化不同结构参数对喷嘴各性能指标的影响显著性,结果如图 10 所示。可以看出,喷孔出口直径、喷孔锥度系数、针阀升程及喷孔长度 4 个单因素对喷嘴综合性能影响最为显著。喷孔出口直径强烈影响喷嘴喷雾宏观特性(液相近场扩散角 θ 和类喷雾贯穿距 P_e),同时也强烈影响喷嘴内部流动,进而影

响着空蚀风险指数 E_{ero} ,但对喷嘴流量系数 C_d 影响不明显。喷孔锥度系数 K 对流量系数 C_d 及空蚀风险指数 E_{ero} 的影响最为显著,针阀升程 L_n 次之。这是由于锥度系数 K 强烈影响了喷嘴内部几何空化流动,而几何空化的形态及强度与喷孔流量及空蚀密切相关;随着针阀运动,喷嘴内燃油流道结构不断改变,导致喷嘴内出现完全不同的流动状态。在针阀升程较低时,燃油流道截面小,燃油流动湍动性增强,诱发空化现象,导致流量系数减小,空蚀风险增加,喷嘴锥角增大。对于两因素交互作用影响的敏感性参数主要包含针阀升程与喷孔高度 $(L_n、H)$ 、针阀升

程与 SAC 高度 $(L_n、L_2)$ 。针阀升程、喷孔高度与 SAC 高度共同决定了燃油进入喷孔前的流动特性,进而显著影响了喷嘴的各项性能。一方面,针阀升程与喷孔高度的相对位置对线空化特性具有强烈影响。另一方面,当针阀升程与 SAC 高度较低时,燃油经上游流道流入 SAC 后没有径直流向喷嘴孔,而在喷嘴 SAC 内形成了平行于孔轴线的强涡结构,随着该涡结构发展到孔内,形成起源于针阀锥面的线空化现象;当针阀升程与 SAC 高度较高时,燃油进入 SAC 的入口远离喷孔,燃油在 SAC 腔中向喷孔的转向更加平稳,不易诱导空化现象。

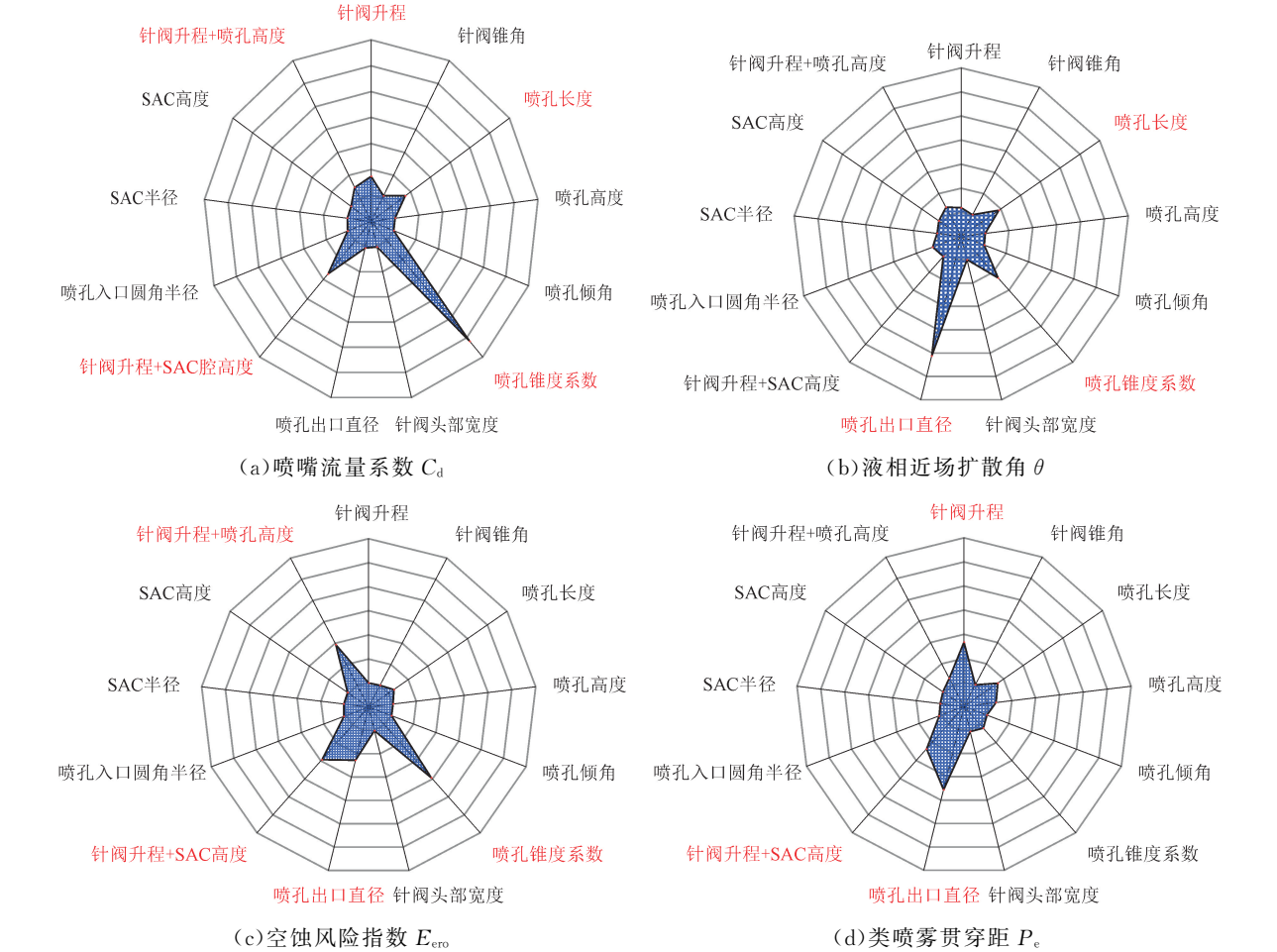


图 10 喷嘴各性能指标的结构参数影响显著性分析

Fig. 10 Significant influencing of the structure parameters on the each performance index of the nozzle

6 结 论

本文结合喷嘴内部流动及喷雾的可视化试验与数值模拟,探究高压喷嘴内部空化流动的瞬态特性,并采用常规两水平分数因子开展喷嘴几何结构参数的敏感性分析,主要结论如下。

- (1)圆柱形喷孔内易诱发强烈的几何空化,且几何空化与线空化可同时存在于喷嘴内部。针阀抬起与落座阶段,燃油流入喷孔前在喷嘴压力腔内形成强烈的旋涡,诱发线空化。
- (2)喷孔出口直径、喷孔锥度系数、针阀升程及喷孔长度等因素对喷嘴的综合性能影响最为显著。

喷孔锥度系数对喷嘴流量系数和空蚀风险指数影响最显著,喷孔出口直径对液相近场扩散角和类喷雾贯穿距的影响最显著。针阀升程与喷孔高度的交互作用以及针阀升程与喷嘴压力腔高度的交互作用对喷嘴性能的影响亦不容忽视。

(3)喷嘴综合性能差异受喷嘴内部流动特性强烈影响,尤其是几何空化与线空化现象。几何空化与线空化现象均具有优化燃油雾化特性的潜力,但也会降低喷嘴流通特性并加剧空蚀风险。与几何空化相比,线空化对喷雾宏观特性的影响更为显著,且对流通特性及空蚀风险的影响较小,具有更好的应用前景。

参考文献:

- [1] SOTERIOU C, ANDREWS R, SMITH M. Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization [C]//International Congress & Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1995: 950080.
- [2] BLESSING M, KÖNIG G, KRÜGER C, et al. Analysis of flow and cavitation phenomena in diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation [C]//SAE 2003 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2003: 2003-01-1358.
- [3] PAYRI F, BERMÚDEZ V, PAYRI R, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [J]. Fuel, 2004, 83(4/5): 419-431.
- [4] REITZ R D. Atomization and other breakup regimes of a liquid jet [D]. Princeton, NJ, USA: Princeton University, 1978.
- [5] SOU A, HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(17/18): 3575-3582.
- [6] BERGSTRAND P, FÖRSTH M, DENBRATT I. The influence of orifice diameter on flame lift-off length [EB/OL]. (2002-11-09) [2024-11-01]. <https://ilas-seurope.org/ICLASS/ilass2002/papers/066.pdf>.
- [7] NABER J D, SIEBERS D L. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays [C]//International Congress & Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1996: 960034.
- [8] NISHIDA K, ZHANG W, MANABE T. Effects of micro-hole and ultra-high injection pressure on mixture properties of D. I. diesel spray [C]//JSAE/SAE International Fuels & Lubricants Meeting. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2007: 2007-01-1890.
- [9] SIEBERS D L, HIGGINS B. Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions [C]//SAE 2001 World Congress. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2001: 2001-01-0530.
- [10] SU T F, CHANG C T, REITZ R D, et al. Effects of injection pressure and nozzle geometry on spray SMD and D. I. emissions [C]//1995 SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1995: 952360.
- [11] HE Zhixia, ZHANG Zhengyang, GUO Genmiao, et al. Visual experiment of transient cavitating flow characteristics in the real-size diesel injector nozzle [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 78: 13-20.
- [12] HE Zhixia, ZHONG Wenjun, WANG Qian, 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.
- [13] ZHANG Liang, HE Zhixia, GUAN Wei, et al. Simulations on the cavitating flow and corresponding risk of erosion in diesel injector nozzles with double array holes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 900-911.
- [14] 张文权, 王谦, 何志霞, 等. 柴油机模型喷孔内空化与空蚀特性试验研究 [J]. 内燃机工程, 2018, 39(5): 14-20.
- ZHANG Wenquan, WANG Qian, HE Zhixia, et al. Experiment on characteristics of cavitation and erosion in diesel engine nozzle orifice [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(5): 14-20.
- [15] CHEN Zhou, HE Zhixia, SHANG Weiwei, 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: 562-571.
- [16] MITROGLOU N, GAVAISES M. Mapping of cavitating flow regimes in injectors for medium-/heavy-duty diesel engines [J]. International Journal of Engine Research, 2013, 14(6): 590-605.
- [17] CHAVES H, LUDWIG C. Characterization of cavitation in transparent nozzles depending on the nozzle geometry [EB/OL]. (2005-09-01) [2024-11-01]. <https://www.researchgate.net/publication/259592708>.
- [18] IM K S, CHEONG S K, POWELL C F, et al. Unraveling the geometry dependence of in-nozzle cavitation

- on in high-pressure injectors [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2067.
- [19] PAYRI R, MARGOT X, SALVADOR F J. A numerical study of the influence of diesel nozzle geometry on the inner cavitating flow [C]//SAE 2002 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2002: 2002-01-0215.
- [20] CUI Jiwen, LAI Houhu, FENG Kunpeng, et al. Quantitative analysis of the minor deviations in nozzle internal geometry effect on the cavitating flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 94: 89-98.
- [21] 郭根苗, 白天阳, 邵壮, 等. 喷孔锥度和燃油温度对柴油喷嘴内空化流动特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(8): 131-140.
- GUO Genmiao, BAI Tianyang, SHAO Zhuang, et al. Effects of hole taper coefficients and diesel temperatures on in-nozzle cavitation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(8): 131-140.
- [22] 陶希成, 何志霞, 钟汶君, 等. 喷孔锥度对内流及喷雾影响的试验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(7): 1572-1576.
- TAO Xicheng, HE Zhixia, ZHONG Wenjun, et al. Experimental study of the effect of nozzle hole conicity on internal flow and spray characteristics [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(7): 1572-1576.
- [23] 何志霞, 王芬, 刘菊燕, 等. 柴油机喷嘴结构对喷雾特性影响的耦合模拟研究 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(24): 145-151.
- HE Zhixia, WANG Fen, LIU Juyan, et al. Coupled simulation of the effect of diesel nozzle structure on spray characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(24): 145-151.
- [24] MOON S, HUANG Weidi, WANG Jin. First observation and characterization of vortex flow in steel micronozzles for high-pressure diesel injection [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 105: 342-348.
- [25] SALVADOR F J, MARTÍNEZ-LÓPEZ J, CABALLER M, et al. Study of the influence of the needle lift on the internal flow and cavitation phenomenon in diesel injector nozzles by CFD using RANS methods [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 66: 246-256.
- [26] WANG Benlong, LIU Zhihui, LI Haoyu, et al. On the numerical simulations of vortical cavitating flows around various hydrofoils [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(6): 926-938.
- [27] GUO Qiang, ZHOU Lingjiu, WANG Zhengwei, et al. Numerical simulation for the tip leakage vortex cavitation [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 151: 71-81.
- [28] GUO Genmiao, BAI Tianyang, HE Zhixia, et al. Assessment of influences of needle lift and hole height on string cavitation in liquid injection [J]. *Fuel*, 2023, 347: 128386.
- [29] SHI Junmei, VENKATASUBRAMANIAN R, SANTOS E G, et al. Vortex and cavitation driven liquid fragmentation in high pressure gasoline direct injections [EB/OL]. (2002-11-09)[2024-11-01]. https://www.researchgate.net/publication/363382603_Vortex_And_Cavitation_Driven_Liquid_Fragmentation_In_High_Pressure_Gasoline_Direct_Injections.

(编辑 亢列梅)