

DDCL-PODE 混合燃料在喷嘴内的空化流动

林鑫晨^{1,2}, 吕 钊¹, 刘 臻³, 刘 莹³, 张国栋³, 乔信起^{1*}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031; 3. 康跃科技(山东)有限公司, 山东潍坊 262711)

摘 要: [目的]为研究煤直接液化柴油(DDCL)-聚甲氧基二甲醚(PODE)混合燃料在船用柴油机中的应用潜力, [方法]采用液相体积法(VOF), 模拟研究不同燃料、喷嘴喷孔锥度和喷孔与针阀轴线角度对喷嘴喷孔内空化流动的影响。[结果]结果表明:与针阀轴线夹角较大的喷孔内流空化程度大, 夹角 $<60^\circ$ 喷孔内无明显空化;渐缩喷孔可有效抑制空化, 且流通性好, 湍流强度小;随 PODE 含量增加, 混合燃料密度增大, 喷孔内空化、湍流强度和流动损失减小, 有效流通面积增大; DDCL 质量流率低于石化柴油, 前者掺混相同体积的 PODE 后质量流率提高 6.2%, 且高于石化柴油。[结论]PODE 掺混煤直接液化柴油混合燃料可降低喷嘴喷孔的孔内流动损失, 改善喷孔流通性, 增大质量流率。

关键词: 煤直接液化柴油(DDCL); 聚甲氧基二甲醚(PODE); 喷孔; 空化

中图分类号: U664.1 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.03.09

Cavitation Flow of DDCL-PODE Mixed Fuel in a Nozzle

LIN Xinchen^{1,2}, LYU Zhao¹, LIU Zhen³, LIU Ying³, ZHANG Guodong³, QIAO Xinqi^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China; 3. Kangyue Technology (Shandong) Co., Ltd., Weifang 262711, Shandong, China)

Abstract: [Purpose] In order to study the potential application of the diesel fuel direct coal liquefaction diesel (DDCL) and polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE) mixed fuel in marine diesel engines, [Method] the volume of fluid (VOF) method is adopted to simulate and study the influence of different fuels, nozzle hole conical and the angle between the nozzle hole and the needle valve axis on the cavitation flow in the nozzle. [Result] The results show that the cavitation intensity in the nozzle hole with a larger angle between the needle valve axis is greater, while there is no obvious cavitation in the nozzle hole with an angle less than 60° . The gradually converging nozzle hole can effectively suppress cavitation and has good flowability and low turbulence intensity. With the increase of PODE content, the density of the mixed fuel increases, the cavitation, turbulence intensity and flow loss in the nozzle hole decrease, and the effective flow area increases. The mass flow rate of DDCL is lower than that of petrochemical diesel. After blending the same volume of PODE, the mass flow rate of the former increases by 6.2% and is higher than that of petrochemical diesel. [Conclusion] The blended fuel of PODE-coal direct liquefaction diesel can reduce the internal flow loss of nozzle orifices, improve the flow performance of the orifices, and increase the mass flow rate.

Key words: diesel from direct coal liquefaction (DDCL); polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE); nozzle; cavitation

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-08-05

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010405)

作者简介: 林鑫晨(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 发动机燃料喷射与喷雾。

通信作者: 乔信起(1963—), 男, 教授、博士生导师。研究方向: 新能源动力。E-mail: qiaoxinqi@sjtu.edu.cn

0 引言

随着国际海事组织出台的排放法规日益严格, 社会对船用柴油机动力和经济性的要求日益提升, 国内外加大了对柴油机燃烧技术、替代燃料等的研究力度^[1]。原油价格波动增加了船舶企业的运营成本与合规难度^[2]。作为清洁煤技术, 煤制柴油被认为是最具应用前景的替代能源之一, 也符合我国煤炭相对丰富的资源特点^[3]。煤直接液化柴油(Diesel from Direct Coal Liquefaction, DDCL)直接从煤炭加工中获得, 其凝点和黏度低于石化柴油, 且兼具高热值、低硫、低芳烃的优点, 但十六烷值较低。为应对能源转型需求, 国内外研究者已着手探索煤制柴油替代传统石化柴油在柴油机上的应用的可能性。

近年来, 含氧燃料聚甲氧基二甲醚(Polyoxymethylene Dimethyl Ethers, PODE)出现在大众视野, 化学式为 $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$, 其中, n 为聚合度, 其与极性和非极性燃料有良好的互溶性, 具有极高的十六烷值和近50%的氧含量, 可改善缸内燃料燃烧情况^[4]。综合这些优势, PODE被认为是一种极具发展潜力的优秀新型替代燃料, 已有学者研究PODE混合柴油、汽油和乙醇等燃料在发动机上应用时的喷雾、燃烧及排放特性。LI等^[5]基于柴油共轨喷射系统, 研究了柴油-PODE混合燃料的喷雾, 发现PODE掺入会减小贯穿距和喷雾液滴直径, 而增加喷雾锥角和喷雾投影面积。杨晨^[6]研究了F-T柴油-PODE混合燃料的燃烧和排放, 发现随PODE掺混比的增加, 柴油机燃用时的有效热效率和燃烧放热率都有提升。

柴油机中高压燃油快速流过喷油器喷嘴时常伴有空化现象^[7]。喷油时, 针阀抬起, 出现可供燃油流动的流道, 燃油由针阀腔流入喷孔。针阀开启时燃油可流通面积较小, 且喷孔尺度较小, 燃油进入喷孔时可流通面积骤降, 因此高压燃油的流速急剧升高。根据伯努利原理, 流体的局部压力会急剧下降, 局部低于流体此时温度下的饱和蒸汽压时就会产生空化现象。同时, 当燃油由针阀腔流入喷孔时, 由于高压、高速, 流体的流动方向也发生巨大变化, 易产生壁面分离现象, 形成局部气相区域, 影响喷嘴内流动特性; 而壁面空化泡破裂冲蚀喷嘴也会影响喷雾特性^[8]。张胜等^[9]用CONVERGE软件开展喷嘴内部流动特性数值模拟分析, 发现入口圆角半径及背压的增大会减弱空化。张亮^[10]发现空化在喷孔入口处产生, 并沿壁面向出口延伸。流体物性是影响微小流道流动特性的重要因素, 孔内空化两相流对流体密度和黏度十分敏感。BATTISTONI等^[11]比较了喷孔内生物柴油和柴油的流动速度分布, 生物柴油流速比柴油流速低5%左右。SOM等^[12]认为更低的饱和蒸汽压导致生物柴油中的空化现象弱于

柴油, 孔内湍流强度降低。

DDCL和PODE掺混可以发挥2种燃料在理化特性方面的优势互补, 可作为船用柴油机替代燃料。了解燃料在喷嘴内的流动状态是深入研究DDCL及其掺混燃料在发动机上应用的重要问题, 其与喷雾特性密切相关, 会影响混合气形成, 进而直接影响发动机燃烧与排放。目前还没有以PODE掺混DDCL混合燃油的喷射研究, 因此, 本文联合采用数值模拟、试验与理论分析方法, 研究煤直接液化柴油DDCL-PODE混合燃料在喷嘴内的空化流动。

1 计算模型与工况设置

1.1 孔内流动模型

当喷嘴针阀开启后, 燃油流入喷孔, 压力突降而流速激增, 喷孔内发生剧烈扰动, 喷嘴内部非稳态湍流流动气液界面明显。液相体积法(Volume of Fluid, VOF)是基于欧拉方法的两相流模型, 能准确捕捉每个网格中的气液交界面^[13], 本文采用VOF方法获取网格内气相体积分数及喷孔出口截面的气液两相流动参数。湍流的数值模拟方法采用雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方程中的重整化群(Renormalization Group, RNG) $k-\epsilon$ 模型^[14-15]。

空化模拟采用施奈尔-绍尔(Schnerr-Sauer)空化模型^[6], 其能模拟包括稳定与非稳定流动、层流和湍流等各种流动状态, 较为精确地推导了液态到气态的转变, 气相体积分数 α 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_g) = \nabla(\alpha\rho_g V_g) = \rho_g \frac{\rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (1)$$

$$\rho = \alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: ρ_g 和 ρ_l 分别为气、液相密度; V_g 为气相速度; ρ 为混合相密度。

空化模型中气/液相间质量传输速率 R 为

$$R = \rho_g \frac{\rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

假设单位液体内部气泡数量为 n_b , 每个气泡半径均为 R_B , 则气相体积分数 α 为

$$\alpha = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3} \quad (4)$$

联合式(3)和式(4), 空化模型中燃油的气/液相间质量传输速率 R 和气泡半径 R_B 的关系式为

$$R = \frac{d\alpha}{dt} = \rho_g \frac{\rho_l}{\rho} \alpha(1-\alpha) \frac{3}{R_B} \frac{dR_B}{dt} \quad (5)$$

1.2 几何模型及数值模拟工况

研究用喷油器因斜置装于发动机, 喷孔沿周向不均布, 喷油器及各喷孔轴线见图1, 图1中: γ 为与 x 轴正方向夹角; β 为喷孔轴线与针阀角度。从 x 轴正

方向起沿 x - y 平面逆时针方向依次编号6个喷孔, 各孔轴线与针阀轴线角度及各孔长度见表1。

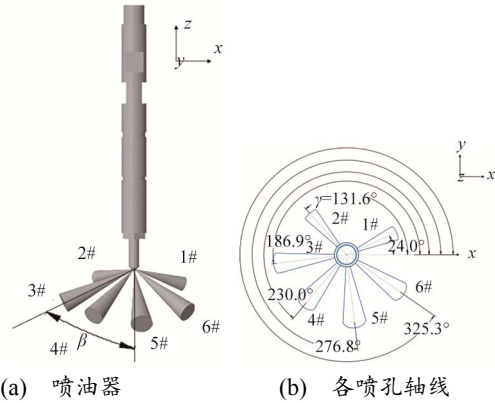


图1 喷油器及各喷孔轴线

Fig. 1 Injector Installation and Axes of Each Hole

表1 各喷孔参数

Tab. 1 Parameters of Each Spray Hole

喷孔参数	1#	2#	3#	4#	5#	6#
$\gamma/(\circ)$	24.0	131.6	186.9	230.0	276.8	325.3
$\beta/(\circ)$	74.5	81.1	64.6	53.6	50.1	56.7
长度/mm	1.103	1.097	1.112	1.135	1.144	1.128

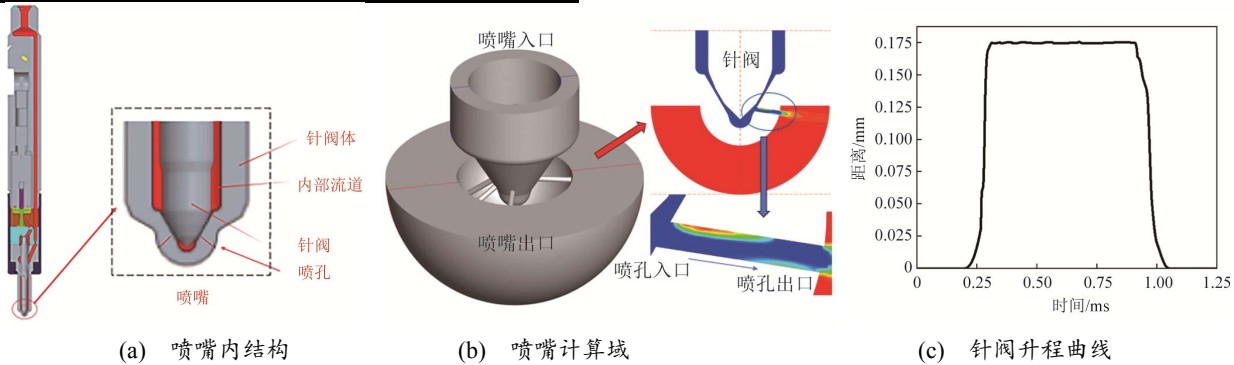


图2 针阀升程曲线及喷嘴内部流动计算域

Fig. 2 Needle Valve Lift Curve and Internal Flow Computation Domain of Nozzle

表2 燃料物性

Tab. 2 Fuel Properties

参数	DIESEL	DDCL	PODE	DP20	DP50
密度 (20 °C) / (g/cm^3)	0.848 0	0.845 8	1.040 0	0.884 6	0.942 9
黏度 (20 °C) / (mm^2/s)	4.068 4	2.605 2	1.300 0	2.343 6	1.952 1
表面张力 (20 °C) / (mN/m)	29.35	29.10	29.50	29.18	29.30
饱和蒸汽压 (20 °C) / (kPa)	12.000 0	<7.000 0	0.193 1	5.638 6	3.596 6
十六烷值	55.00	40.50	76.00	47.60	58.25

本文研究燃料的喷嘴内流动, 因此关注的物性参数为密度、黏度、表面张力和饱和蒸汽压。当PODE含量为50%时, DP50煤基含氧混合燃料的十六烷值提升, 接近且略高于石化柴油, 黏度较低, 这有利于提高混合燃料的喷雾质量和燃烧特性。此

根据研究用喷油器喷嘴结构见图2(a)。用INVENTOR软件建立喷嘴部分三维模型, 使数值模拟中的模型与实际喷嘴完全一致; 在喷孔出口处建立喷雾场区域, 作为喷孔出口外计算域, 即喷孔内流的出口边界, 这既可减少喷孔出口边界条件对孔内流动的影响, 也可得到各喷孔出口流动参数。图2(b)为计算域。本文试验验证所用喷油器喷孔孔径为0.130 mm和0.148 mm, 建立不同喷孔孔径喷嘴模型后, 模拟后得到孔径小于0.148 mm时孔内空化观测不明显, 因此选择喷孔孔径0.180 mm模型分析。针阀抬升曲线见图2(c)。喷嘴入口组分为99.98%的燃料和0.02%的 N_2 , 喷射持续期为0.8 ms。最小时间步长为 10^{-8} s, 喷嘴入口及出口处设置压力边界, 喷嘴入口压力设置为 P_{in} , 计算域出口设置背压 P_{amb} 。其余边界均设置为无渗透无滑移wall, 近壁面流场采用标准壁面函数处理, 针阀最大升程为0.175 mm。

数值模拟燃料包括石化柴油DIESEL、煤直接液化油DDCL和2种DDCL-PODE混合燃料, 混合燃料以PODE所占体积分数命名为DP20 (体积分数20%) 和DP50 (体积分数50%), 表2为燃料物性^[17]。

外, DP50混合燃料的含氧量远高于石化柴油, 其他理化性质接近, 是合适的石化柴油替代燃料。因此选择50%的PODE掺混比例作为高比例掺混的代表, 该比例燃油可用于船用柴油发动机。喷嘴内流研究工况见表3, 燃油温度为20 °C。

表 3 喷嘴内部流动数值模拟工况

Tab. 3 Numerical Simulation Conditions for Internal Flow in Nozzle

研究内容	模拟工况
喷孔锥度的影响	$K=-1, 0, 1, 2$; $P_{in}=150$ MPa; $P_{amb}=4$ MPa
PODE 含量的影响	DIESEL, DDCL, DP20, DP50; $P_{in}=120$ MPa; $P_{amb}=4$ MPa

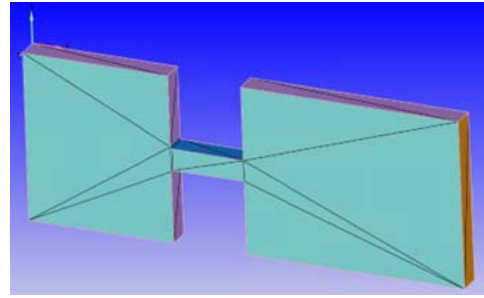
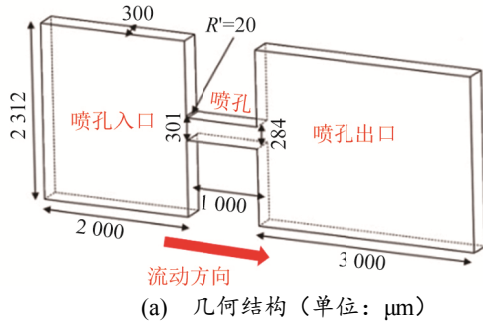
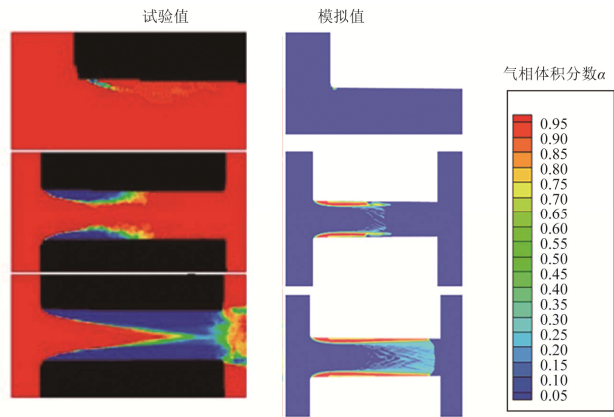
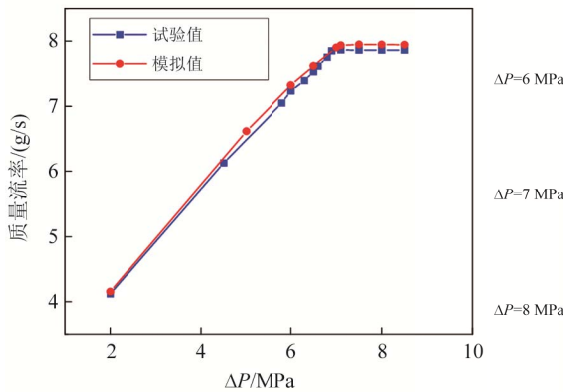


图 3 平板试验喷嘴几何结构和模型

Fig. 3 Geometrical Structure and Model of the Flat Plate Nozzle

使用CONVERGE自动划分网格及局部加密，基础网格尺寸为0.02 mm，模型计算域划分后网格数量为14万。喷孔进出口不同压差下的试验和模拟质量流率见图4(a)。质量流量变化趋势模拟结果与试验数据非常接近，最大相对误差不超过3%。图4(b)为

气相体积分数分布的模拟结果，与试验结果符合较好。空化开始、发展和超空化时，随着进出口压差增大，气相分布情况均与试验结果基本符合，证明本文空化模型有效。



(a) 平板喷嘴出口质量流率试验和模拟值

(b) 孔内空化试验与模拟结果

图 4 平板喷嘴出口质量流率与空化分布试验与模拟比较

Fig. 4 Comparison of Quality Flow Rate Results and Cavitation Comparison Between Experiments and Simulations

2.2 喷嘴内流网格无关性验证及循环喷油量试验验证

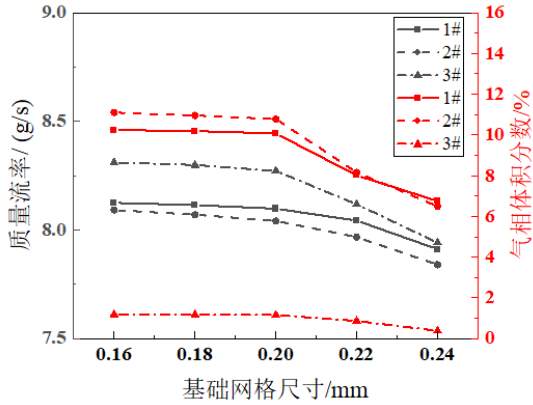
在CONVERGE软件中导入几何模型，设置参数并划分网格。比较不同网格尺寸下喷嘴各喷孔出口处燃油平均流速和喷孔平均气相体积分数，验证喷嘴计算模型网格无关性。保持局部加密和自适应网

格策略不变，改变基础网格尺寸。喷嘴模型各喷孔角度均不同，选取1#、2#和3#喷孔，燃料为DIESEL，喷嘴入口压力为150 MPa，背压为4 MPa工况下，网格无关性验证结果见图5(a)，综合模拟结果稳定性及计算资源考虑，选定基础网格尺寸为0.2 mm。

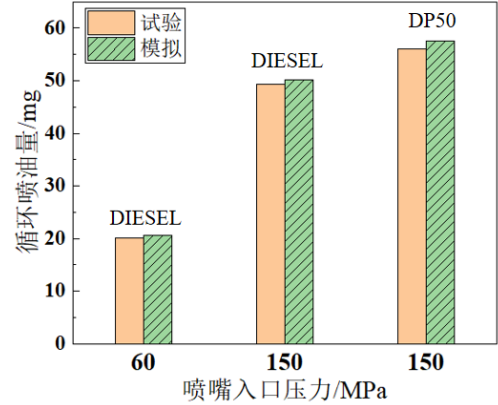
通过Bosch长管法喷油速率测试系统，在孔径

0.13 mm的喷油器上测得不同工况下循环喷油量以验证计算模型。相同工况下的试验与模拟结果见图

5(b)。经比较, 试验值与模拟值一致, 最大相对误差 $<5\%$, 证明本文计算模型模拟燃油流动的准确性。



(a) 喷孔内流网格无关性验证



(b) 喷嘴循环喷油量试验值与模拟比较

图 5 喷孔内流网格无关性验证及循环喷油量验证

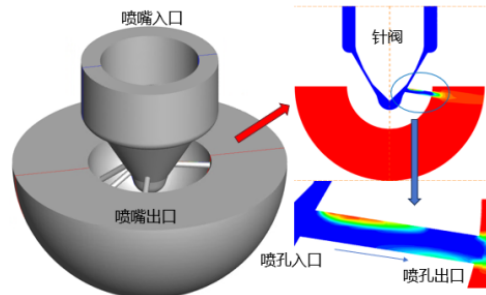
Fig. 5 Verification of Flow-Induced Noise Irrelevance in Nozzle Orifices and Validation of Cyclic Fuel Injection Volume

3 计算结果与分析

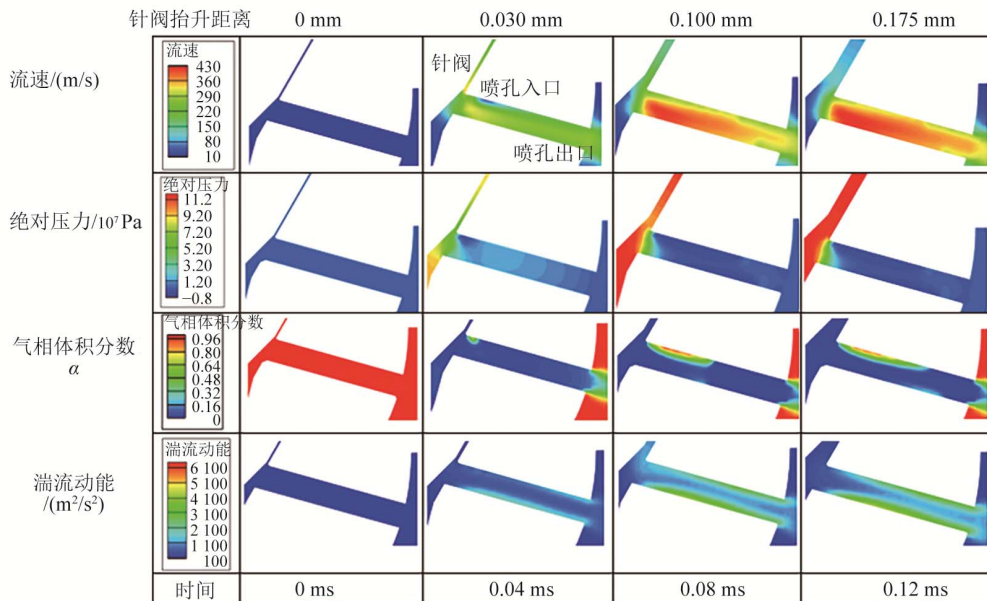
3.1 喷油开始后喷嘴喷孔内流动

喷嘴内流时, 沿喷孔中心截面局部分析见图6(a)。喷油开始后, 喷嘴内某一喷孔中心截面各流动参数随时间分布见图6(b)。针阀抬升后, 高压燃油流入喷孔, 压力突降而流速激增。由于惯性燃油沿下壁面流速较快, 喷孔上壁面处燃油转向幅度较大, 出现低压和边界层分离现象。该区域压力低于燃油饱和蒸汽压时会产生空化, 随着针阀抬升空化区域不断发展, 空化层厚度由喷孔入口向出口方向先增加后减小, 喷孔孔内流动受扰动增强, 湍流动能也增大。针阀升程达到最大时, 喷嘴内流动各参数基本

不变。本文在针阀升程达到最大时进行分析, VEL_MAG为流速, TKE为湍流动能 (Turbulent Kinetic Energy)。



(a) 喷孔内流计算域局部分析



(b) 喷油开始后喷嘴孔内流动参数分布

图 6 计算域分析及喷油开始后喷嘴孔内流动参数分布

Fig. 6 Flow Simulation Domain Analysis and Flow Parameter Distribution in Nozzle Hole After the Start of Injection

3.2 喷孔锥度系数对喷嘴喷孔内流动影响

喷孔内空化流动对锥度系数极为敏感。喷嘴模型喷孔出口直径 d_{out} 为0.18 mm, 喷孔锥度系数 K 定义见式(6)。

$$K = \frac{d_{in} - d_{out}}{10 \mu\text{m}} \quad (6)$$

改变喷孔入口直径 d_{in} 得到不同锥度喷孔, 各喷嘴模型的喷孔参数见表4。

表4 不同锥度喷孔结构参数

Tab. 4 Structural Parameters of Different Tapering Nozzle Holes

喷孔锥度/ K	-1	0	1	2
喷孔入口直径/mm	0.17	0.18	0.19	0.20
喷孔出口直径/mm	0.18	0.18	0.18	0.18

图7为喷嘴入口压力为150 MPa, P_{amb} 为4 MPa

时, DP50混合燃料在不同喷孔锥度喷孔内, 与针阀轴线不同夹角的1#、2#和3#喷孔内流动压力分布。由于孔内空化和各流动参数在1#、2#和3#喷孔中差异较明显, 因此本文展示喷嘴内流动时选择3个喷孔作为代表。从图7可知, 不同锥度喷孔的孔内压力分布差异较明显。喷孔锥度系数 <1 时, 孔内低压区域较大, 这是因为压力室壁面与喷孔壁面角度变化较大, 沿壁面流动的流体转向幅度大, 喷孔与压力室交界处出现边界层分离并形成低压区, 1#和2#喷孔与针阀轴线夹角较大, 低压区更明显。

喷孔锥度增加, 孔内低压区面积缩小, 仅出现在喷孔内入口上壁。当锥度系数 >1 时, 各喷孔内压力分布由入口向出口逐渐降低。根据连续流体运动理论, 渐缩喷孔内沿喷射方向有流速增加而压力降低的趋势, 而渐扩喷孔内压力分布与之相反。图8为不同锥度下1#、2#和3#喷孔内流的气相分布。

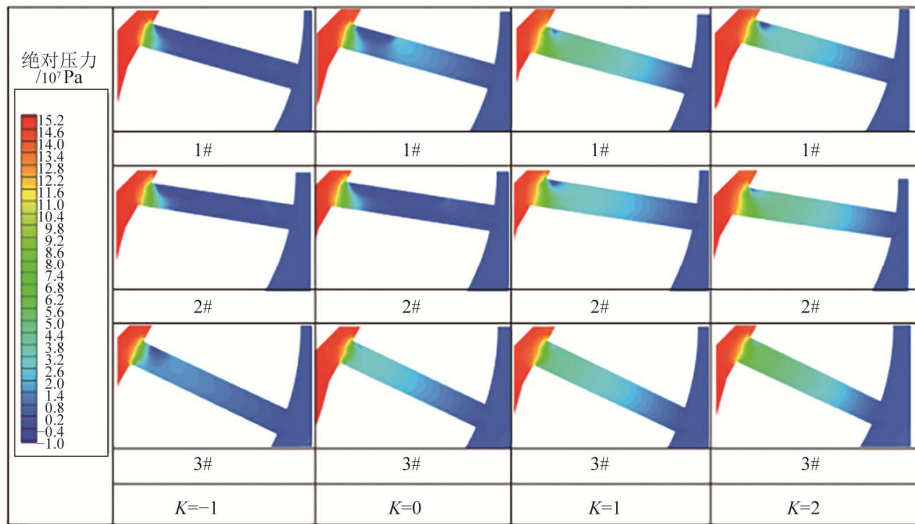


图7 DP50在不同锥度喷孔的孔内压力分布

Fig. 7 Pressure Distribution Map of DP50 in Different Conical Nozzles

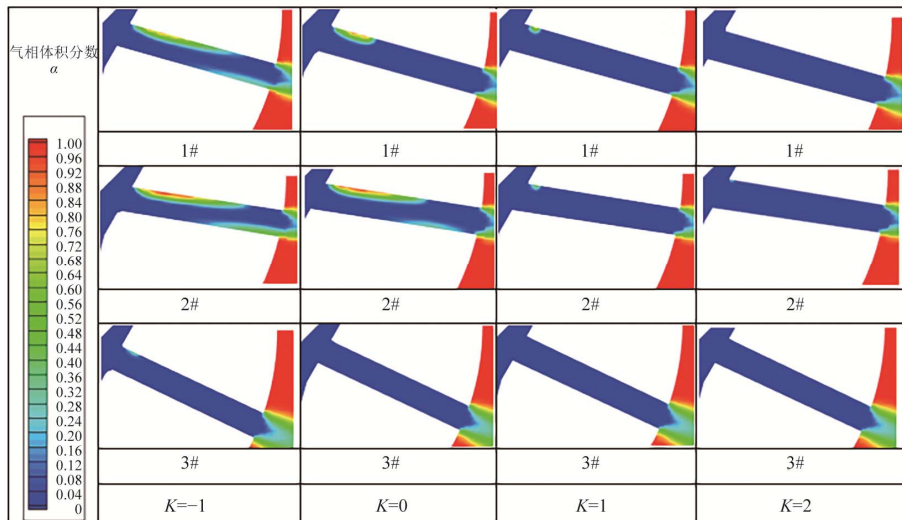


图8 DP50在不同锥度喷孔的孔内气相分布

Fig. 8 Vapor Phase Distribution Map of DP50 with Different Conical Nozzles

从图8可知, 喷嘴锥度极大程度影响内流空化强度。空化在喷嘴入口处产生, 并沿壁面向出口延伸, 随着锥度系数 K 增加, 空化逐渐减弱, 多数空化泡在到达喷嘴前1/3区域就已溃灭。当喷嘴锥度系数 < 1 时, 1#和2#喷嘴均出现了体积较大的云空化^[18], 在靠近出口处有空化泡产生, 并延伸至喷嘴出口。这意味着仍有燃油蒸汽未凝结, 未凝结的气泡随燃油喷入发动机燃烧室内, 随后会在内部溃灭, 有利于提高燃油的雾化效果和缸内燃油-空气混合气形成。

锥度系数增大, 1#和2#喷嘴内仅有局部空化泡产生, 其他孔内基本无空化现象。喷嘴锥度影响喷嘴内空化泡的形成和发展。当锥度系数 < 1 时, 渐扩喷嘴沿喷射方向流通面积增大, 易形成更大的低压回流区。

图9为喷嘴各喷嘴气相分布。从图9可知, 渐扩喷嘴内空化强度大, 意味着更多的空化泡产生和溃灭, 空化泡溃灭会产生微射流和脉冲压力, 已有研究表明这会导致该区域压力波动剧烈。当峰值压力超过材料屈服应力时, 流体冲刷和撞击可能会导致金属颗粒脱落, 称为空蚀损毁^[10], 这会影响喷嘴器的使用寿命和燃油供给系统可靠性。

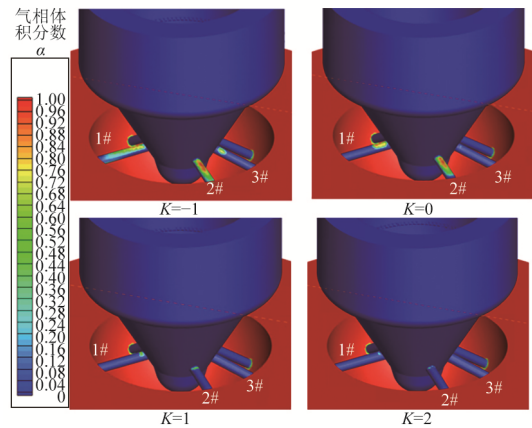


图9 喷嘴不同锥度喷嘴的孔内气相分布

Fig. 9 Distribution Maps of the Vapor Phase Within the Nozzles with Different Conical

图10为不同锥度喷嘴内速度分布。从图10可知, 随着喷嘴锥度增加, 孔内流通性变好, 流动速度沿喷射方向增加, 与连续流体运动理论符合。孔内燃油流速分布呈现上壁面处速度低、下壁面处速度高, 这是因为下壁面处燃油动量受流道改变更大。

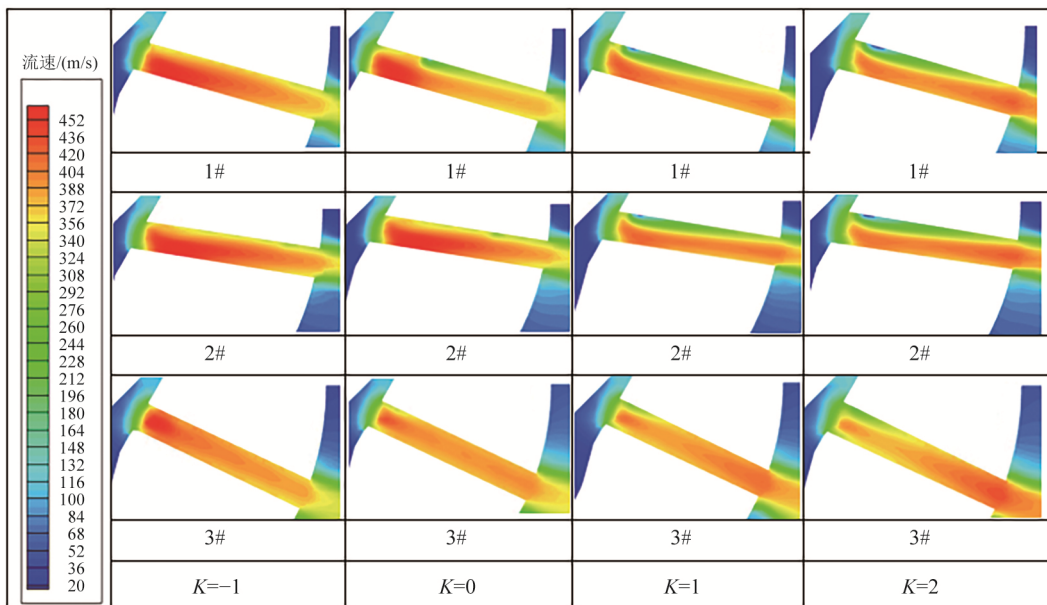


图10 DP50 在不同锥度喷嘴的孔内速度分布

Fig. 10 Velocity Distribution Map of DP50 in Different Conical Nozzle Holes

喷嘴锥度影响空化, 并进一步影响喷嘴质量流量。图11(a)为各喷嘴锥度系数 K 与质量流量关系, 图11(b)为不同锥度时各喷嘴孔内气相体积分数, 其可用来评价空化强度。喷嘴锥度系数增大, 孔内流动形状由渐扩形向渐缩形转变时, 各喷嘴出口质量流量显著提升。喷油时, 质量流量很大程度上取决于流道中的最小截面积。当喷嘴锥度增大时, 最小流通面积增加; 同时, 喷嘴锥度增加明显抑制空化现

象。由图11(b)可以看出, 随着喷嘴锥度增大, 孔内气相体积分数迅速下降; 锥度越大抑制空化效果越强, 空化的减少使喷嘴有效流通面积增大, 质量流量提升。此外, 1#与2#喷嘴与针阀轴线夹角大, 当孔内空化明显时, 质量流量明显小于其他喷嘴, 这是因为气相体积降低了有效流通区域。随着 K 增大, 燃油由压力室流入喷嘴流向变化平稳, 空化区难以延伸和发展, 各喷嘴气相体积分数基本一致。

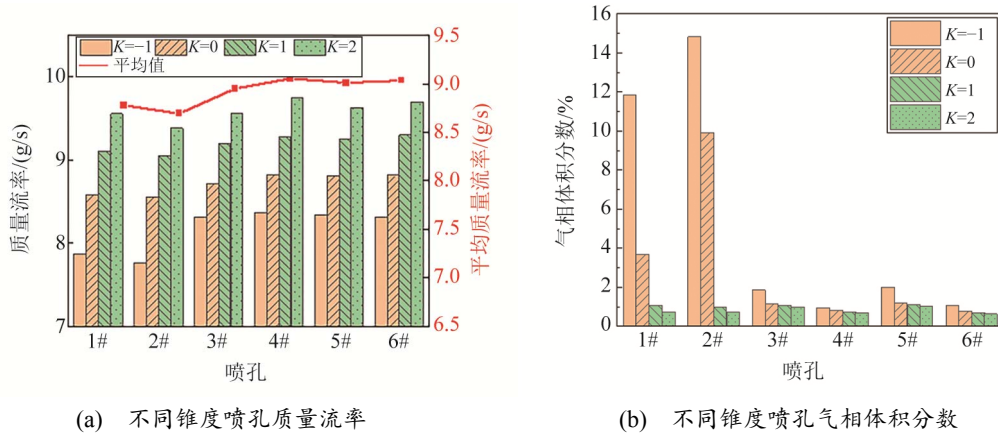


图 11 不同锥度喷孔质量流率与孔内气相体积分数

Fig. 11 Mass Flow Rates of Different Conical Nozzles and the Volume Fraction of the Vapor Within the Nozzles

图12为不同锥度时1#、2#和3#喷孔内部湍流动能分布。从图12可知，1#和2#喷孔与针阀轴线夹角较大，燃油流动动量改变大，湍动能相较其他喷孔较大；2#喷孔在所有喷孔中与针阀轴线夹角最大，为81.1°，其高湍动能区域在所有喷孔中最明显，湍

动能最大区域分布于喷孔内下壁面处，此处燃油流速也达到峰值，进而喷孔下壁面流体靠近喷孔出口处出现边界层分离，即2#喷孔出口处出现空化。当喷孔由渐扩变为渐缩时，各孔内湍动能均减小。

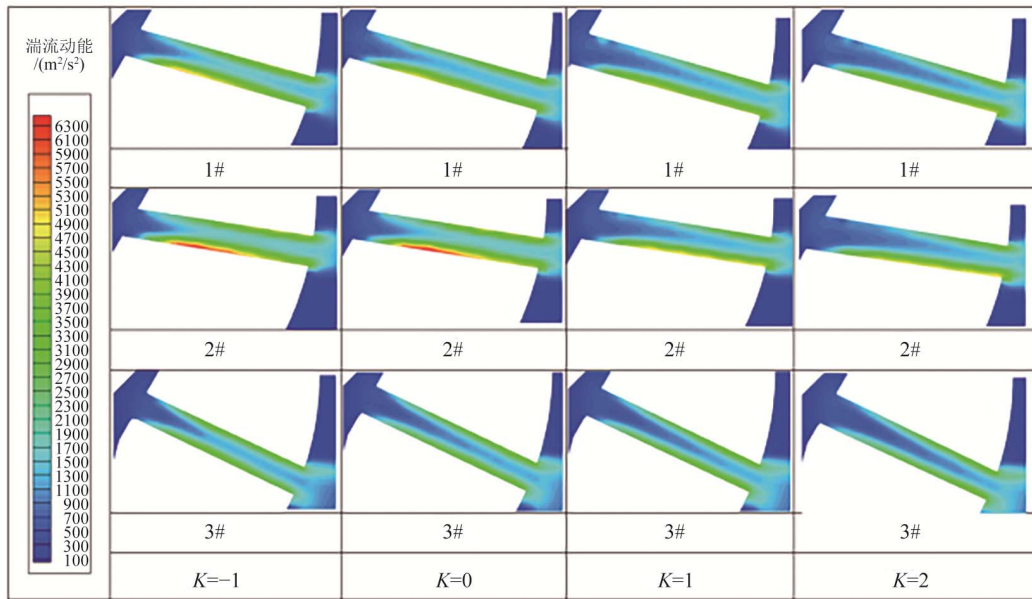


图 12 不同锥度喷孔湍流动能分布

Fig. 12 Distribution of Turbulent Kinetic Energy of Different Conical Nozzles

3.3 PODE 含量对喷嘴喷孔内流动影响

为研究随PODE掺混煤直接液化柴油DDCL引起的燃油物性参数改变对喷孔内空化流动的影响，在喷嘴入口压力为120 MPa、背压为4 MPa等工况参数相同时，研究石化柴油DIESEL、煤直接液化柴油DDCL、PODE体积分数20%和50%的PODE-DDCL

混合燃料DP20和DP50共4种燃油的喷嘴内流流动。图13为相同工况下，喷嘴1#、2#和3#喷孔内不同燃油孔内流动沿喷孔中心截面处速度分布。从图13可知，随着PODE掺混比增大，燃油孔内流动速度峰值减小。

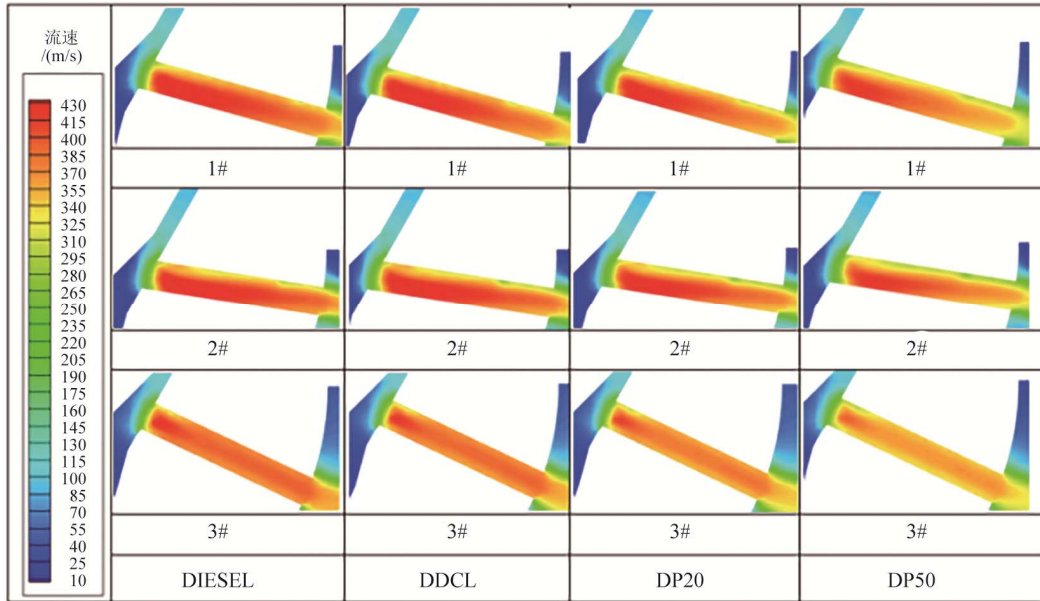
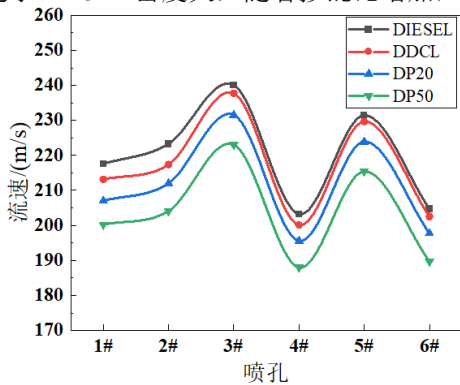


图 13 不同燃油喷孔内速度分布

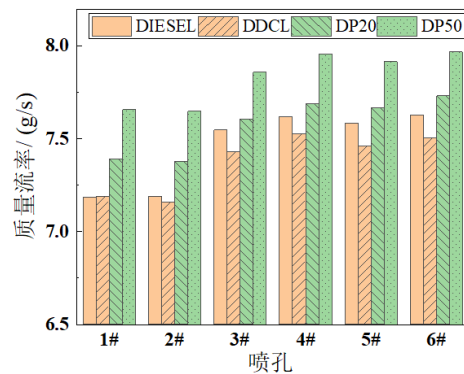
Fig. 13 Velocity Distribution of Different Fuel in Injection Nozzles

图14(a)为不同喷孔出口处不同燃油流速。随着PODE掺混比增加，DDCL至DP50在不同喷孔出口处燃油流速均降低。根据伯努利原理可知，喷孔出口处流速正比于 $\sqrt{\Delta P/\rho_L}$ ，燃油密度越大，喷孔出口速度越小。PODE密度大，随着掺混比增加，混

合燃料密度增大，使喷孔出口处各燃油流速 $DDCL > DP20 > DP50$ 。图14(b)为不同燃油在不同喷孔出口的质量流率。随着PODE掺混比增加，燃油质量流率提升，因为燃油密度增大黏度减小，流动损失减小。相较于掺混前，DP50质量流率平均提升6.2%。



(a) 不同燃油在各喷孔出口流速



(b) 不同燃油在各喷孔出口质量流率

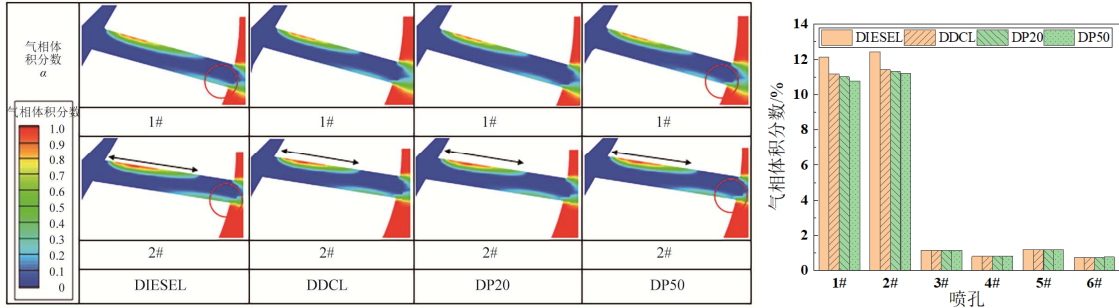
图 14 不同燃油在各喷孔出口流速和质量流率

Fig. 14 Flow Velocities and Mass Flow Rates at the Outlets of Each Hole for Different Fuel

经观察，3#~6#喷孔孔内空化不明显。图15(a)为不同燃油在1#和2#喷孔内气相体积分布，图15(b)为各喷孔内的气相体积分数。从图15可知，石化柴油的空化现象最明显，1#与2#喷孔尾部空化区域延伸至喷孔出口体积最大。随着PODE掺混，煤基混合燃料的孔内气相体积分数小幅降低，孔内空化强度减弱。根据表2，20℃时，4种燃油的饱和蒸汽压由大到小为 $P_{DIESEL} > P_{DDCL} > P_{DP20} > P_{DP50}$ ，孔内气相体积分数由大到小为 $F_{DIESEL} > F_{DDCL} > F_{DP20} > F_{DP50}$ 。

燃油流入喷孔后，压力先降至饱和蒸汽压，然后压力因流空进一步降低，直至产生空化。混合燃料具有更低的饱和蒸汽压，空化应减弱，但PODE掺混减小燃料黏度，又利于空化，这二反因素共同影响流动特性。

图16为不同燃料在1#和2#喷孔端流动能云图。由图16可知，随着PODE掺混比例增加，喷孔孔内湍流强度小幅减弱。因为燃料混合后黏度小，饱和蒸汽压降低，使孔内流通性改善，流动损失降低。



(a) 不同燃油在1#和2#喷孔内气相体积分布 (b) 各喷孔内的气相体积分数

图 15 不同燃油在各喷孔气相分布与气相体积分数

Fig. 15 Gas-Phase Distribution and Gas-Phase Volume Fraction of Different Fuels at Each Nozzle Hole

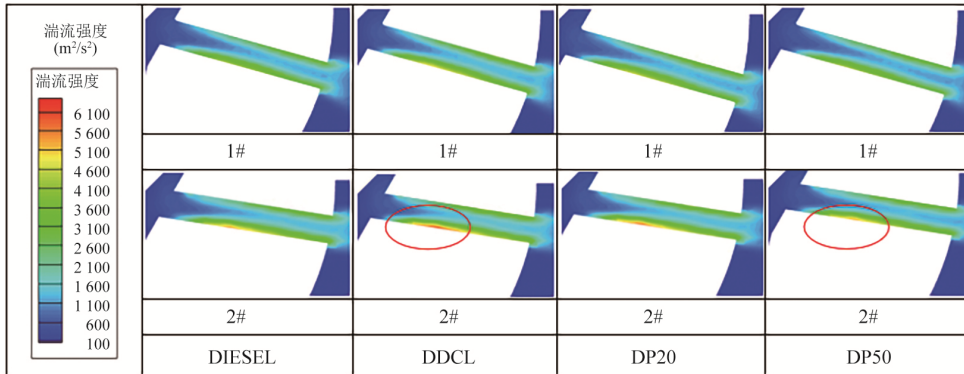


图 16 不同燃油孔内湍流动能

Fig. 16 Distribution of Turbulent Kinetic Energy of Different Fuels

4 结论

本文采用VOF方法数值模拟，基于研究用喷油器建立不同喷孔参数的喷嘴模型，研究煤直接液化柴油-PODE混合燃料的在喷嘴内的空化流动。具体3个结论。

1) 喷油开始时，针阀抬升，由于喷嘴内燃油流通面积变化，燃油流入喷孔压力骤降而流速激增，出现低压区压力低于燃油饱和蒸汽压，进而产生空化；随着针阀抬升空化区域发展，孔内流动受扰动，针阀升程达到最大时喷嘴内各流动参数基本不变。

2) 随着喷嘴喷孔锥度系数 K 增加，喷孔由渐扩转变为渐缩，各喷孔燃油质量流率明显增加，最大流通面积增大，孔内气相体积分数急剧下降；锥度 $K > 1$ 时，各喷孔内气相体积分数均 $< 2\%$ ，喷孔锥度增大明显抑制内流空化。

3) 发动机上使用的喷油器喷嘴各喷孔与针阀轴线所呈角度不同，孔内流动特性有差异。喷孔轴线与针阀轴线角度较大的喷孔内流空化强度大，导致孔内流通面积小，喷孔流通性较差，湍流动能较大，质量流率小于其他喷孔，更易发生空蚀损毁。

4) PODE相较煤直接液化柴油和石化柴油的燃油有密度大、黏度小、饱和蒸汽压低的物性特点，

表面张力相差不大。随着PODE掺混比增加，煤基混合燃料密度增大，黏度降低，喷孔出口燃油流速降低，但质量流率提高；喷嘴的喷孔内空化和湍流强度小幅减弱，流动损失减小，有效流通面积增大；DDCL质量流率小于石化柴油，PODE50%体积比掺混后各喷孔平均质量流率提高6.2%，且明显高于石化柴油。

PODE掺混煤直接液化柴油混合燃料可降低喷嘴的喷孔孔内流动损失，改善喷孔流通性，增大质量流率，有利于缸内混合气形成。该混合燃料可在船机上作为石化柴油替代燃料，节能减排、环境友好，有巨大的发展前景。

参考文献：

[1] 袁均福, 周海锋, 赵春生. 生物质脱硝剂对船用低速柴油机排放特性的影响[J]. 船舶工程, 2025, 47(2): 82-88.
YUAN J F, ZHOU H F, ZHAO C S. Impact of BSNCR on the Emission Characteristics of Low Speed Marine Diesel Engines[J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): 82-88.

- [2] 常佩佩, 陈岱莲, 任美霞. 绿色环保技术助力海运船舶物流运输可持续发展[J]. 船舶工程, 2025, 47(2): T4.
CHANG P P, CHEN D L, REN M X. Green and Environmentally Friendly Technologies Contribute to the Sustainable Development of Maritime Shipping Logistics[J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): T4.
- [3] 文杰. 煤制柴油/化石柴油的性能、燃烧和排放试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
WEN J. Experimental Study on Performance, Combustion and Emission of Coal-Based Diesel Oil/ Fossil Diesel Oil[D]. Xi'an: Changan University, 2023.
- [4] LIU H Y, WANG Z, WANG J X, et al. Improvement of Emission Characteristics and Thermal Efficiency in Diesel Engines by Fueling Gasoline/Diesel/PODEn Blends[J]. Energy, 2016, 97: 105-112.
- [5] LI D H, GAO Y X, LIU S H, et al. Effect of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers Addition on Spray and Atomization Characteristics Using a Common Rail Diesel Injection System[J]. Fuel, 2016, 186: 235-247.
- [6] 杨晨. 柴油机燃用 PODE/F-T 煤基含氧混合燃料的燃烧过程及性能研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2019.
YANG C. Study on Combustion Process and Performance of Diesel Engine Fueled with PODE/F-T Coal-Based Oxygenated Mixed Fuel[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2019.
- [7] SUN Y B, GUAN Z Q, HOOMAN K. Cavitation in Diesel Fuel Injector Nozzles and Its Influence on Atomization and Spray[J]. Chemical Engineering & Technology, 2019, 42(1): 6-29.
- [8] MINSIER V, DE WILDE J, PROOST J. Simulation of the Effect of Viscosity on Jet Penetration into a Single Cavitating Bubble[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(8): 084906.
- [9] 张胜, 李治龙, 赵文伯, 等. 喷嘴内部结构特征对内流特性影响的模拟研究[J]. 2018(10): 46-51.
ZHANG S, LI Z L, ZHAO W B, et al. Simulation Research on the Influence of Nozzle Internal Structural Features on Inflow[J]. Automobile Technology, 2018(10): 46-51.
- [10] 张亮. 高压共轨燃油喷嘴空蚀及空化射流雾化特性研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2020.
ZHANG L. Research on Cavitation and Cavitating Jet Atomization Characteristics of High-Pressure Common Rail Fuel Nozzles[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2020.
- [11] BATTISTONI M, GRIMALDI C N. Numerical Analysis of Injector Flow and Spray Characteristics from Diesel Injectors Using Fossil and Biodiesel Fuels [J]. Applied Energy, 2012, 97: 656-666.
- [12] SOM S, LONGMAN D E, RAMÍREZ A I, et al. A Comparison of Injector Flow and Spray Characteristics of Biodiesel with Petrodiesel[J]. Fuel, 2010, 89(12): 4014-4024.
- [13] 李想, 董金爽, 陈浩森. 斜流中船舶水动力及伴流场数值预报分析[J]. 船舶工程, 2021, 43(8): 42-48.
LI X, DONG J S, CHEN H S. Numerical Prediction Analysis of Ship Hydrodynamic Force and Wake Flow Field in Oblique Flow[J]. Ship Engineering, 2021, 43(8): 42-48.
- [14] 具德浩, 邓佳晖, 李华, 等. 针阀偏心程度对双孔喷嘴喷孔内流动及柴油喷雾的影响[J]. 柴油机, 2024, 46(1): 45-52.
JU D H, DENG J H, LI H, et al. The Effect of Needle Eccentricity Degrees on Flow and Diesel Spray Characteristics of a Dual-Hole Nozzle[J]. Diesel Engine, 2024, 46(1): 45-52.
- [15] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.
- [16] 谢文彬, 曹秀清. 中心体空化喷嘴数值模拟和参数优化[J]. 船舶工程, 2024, 46(8): 68-77.
XIE W B, CAO X Q. Numerical Simulation and Parameter Optimization of Center Body Cavitation Nozzle[J]. Ship Engineering, 2024, 46(8): 68-77.
- [17] WINKLHOFFER E, KULL E, KELZ E, et al. Comprehensive Hydraulic and Flow Field Documentation in Model Throttle Experiments Under Cavitation Conditions[C]// ILASS-Europe. 2001.
- [18] GUAN W, HE Z X, ZHANG L, et al. Effect of Asymmetric Structural Characteristics of Multi-Hole Marine Diesel Injectors on Internal Cavitation Patterns and Flow Characteristics: a Numerical Study[J]. Fuel, 2021, 283: 119324.
- [19] 杜晓晓. 聚甲氧基二甲醚的物性预测及缩合反应机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
DU X X. Study on Physical Properties Prediction and Condensation Reaction Mechanism of Polymethoxydimethyl Ether[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.