

壁面表面粗糙度对喷孔内空化流动特性的影响

周红秀¹, 张奥¹, 刘悦闻², 吴宇靖¹

1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024; 2. 一汽奔腾轿车有限公司, 吉林 长春 130012

摘要:为了研究柴油机喷孔表面粗糙度对小直径喷孔内空化流动的影响,采用 Fluent 流体仿真软件,对不同喷油压力、不同孔壁粗糙度下直径为 0.1 mm 喷孔的内部空化流动特性进行仿真分析。结果表明:光滑壁面条件下,喷油压力及压差越大,空化水平越强,喷孔流量因数下降越严重;粗糙壁面条件下,流场内气体体积分数随粗糙度增大而降低,粗糙度增大使壁面流体的湍动能增加,但同时使壁面流体的速度降低,导致喷孔流量因数随粗糙度的增大先增后减,喷油压力越高,流量因数出现最高点粗糙度也越大;壁面粗糙度增大会增大对近壁面流场的干扰,抑制近壁面流体空化,在全空化压力、低壁面粗糙度的条件下抑制作用更为明显。

关键词:柴油机;微喷孔;空化;壁面粗糙度;流动特性

中图分类号:TH161.1;TK421.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0007-07

引用格式:周红秀,张奥,刘悦闻,等.壁面表面粗糙度对喷孔内空化流动特性的影响[J].内燃机与动力装置,2022,39(2):7-13.

ZHOU Hongxiu, ZHANG Ao, LIU Yuewen, et al. The effect of wall surface roughness on cavitation flow characteristics in nozzle[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(2):7-13.

0 引言

柴油机高压喷射技术具有喷油速率快、雾化效果好、液滴直径小、燃烧效率高的优点^[1],柴油饱和蒸汽压比汽油低,高喷射压力下喷孔内局部压降较大,更容易发生空化。大量研究表明,空化现象使壁面附近流体湍流动能增加、喷雾锥角扩大,油气混合效果更好,改善了喷雾质量^[2-4]。但空化降低了喷孔有效流通面积和喷油效率,使喷嘴内部易发生空蚀,影响喷嘴的使用寿命^[5]。目前柴油机喷孔直径在几百微米至几毫米之间,微观尺度的喷孔表面积与体积之比为宏观尺度的上百万倍^[6],小喷孔内壁的粗糙度^[7]、润湿性等壁面条件对喷孔内空化流动的影响不可忽视^[8]。

许多专家学者针对壁面情况对喷孔内流动特性的影响进行了研究。Echouchene 等^[9]采用数值分析的方法研究了喷孔内表面的形貌特征对内部流场流动特性的影响,结果表明:喷射压力较低时,喷孔内不同的表面状况影响孔内流体流动特性影响。孙军等^[10]利用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)软件对风琴管内多相流流动状况进行了模拟,研究了多相流的空化流动和孔壁粗糙度对空化生成的影响,结果表明:随壁面粗糙度的增加,空化生成会受到抑制,局部压力略微升高,而气相体积分数和出口流动速度减小。陈亮等^[11]采用 Fluent 的 Mixture 多相流模型研究了喷射压力为 30 和 180 MPa 时孔壁粗糙度对流体流动特性的影响,结果表明:壁面粗糙度大容易使壁面附近的气泡溃灭,溃灭气泡产生的能量增加了壁面附近湍流动能。Ansari 等^[12]在以水为介质的情况下,发现蛇形微通道亲水壁面的流体流动特性优于疏水壁面。Peng 等^[13]发现壁面性质改变会引起流体与壁面相互作用力的变化,影响流体近壁面区域边界层厚度,导致微流道流动特性和宏观喷孔内的流动特性略有不同。关于壁

收稿日期:2021-09-14

基金项目:中央高校基本业务费项目(DUT16QY46)

第一作者简介:周红秀(1976—),女,河北沧州人,工学博士,副教授,主要研究方向为内燃机燃烧及排放,E-mail:hxzhou@dlut.edu.cn。

面情况对喷孔内流动特性影响的研究不少,但其中有关壁面粗糙度和接触角等壁面特征对喷孔内空化特性及流量特性影响的研究较少,本文中采用 CFD 数值计算方法,研究喷射压力为 10~200 MPa 时壁面粗糙度对喷孔内流动特性的影响,为微小喷孔的设计及优化提供参考。

1 计算模型

1.1 计算域及边界条件

为提高计算效率,对喷孔模型进行适当简化,计算区域设置为喷油器压力室和喷孔圆柱段孔内部分区域,计算域简化二维网格模型如图 1 所示,图中:喷孔直径 $d=0.1\text{ mm}$,压力室半径 $r=0.15\text{ mm}$,喷孔长度 $l=0.4\text{ mm}$ 。

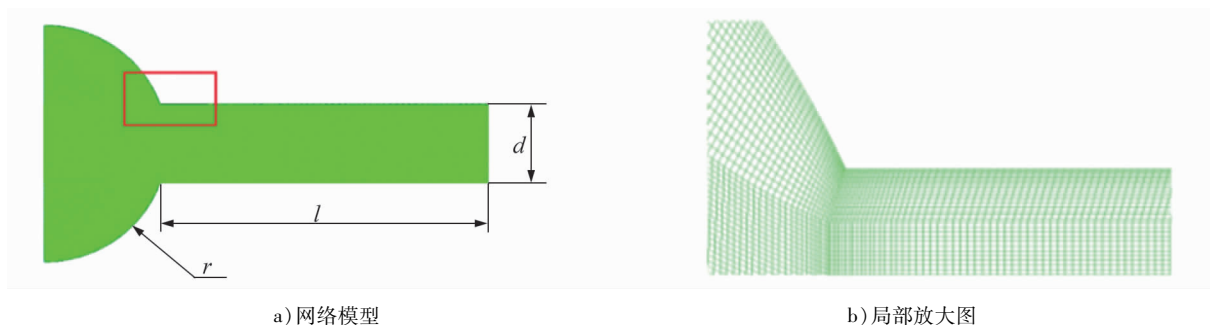


图 1 喷油器模型

采用 ICEM 划分计算区域结构性网格并导入 Fluent 进行初步计算,完成网格无关性的验证,确定合适的网格数量以节省计算时间。出、入口压差为 100 MPa 时的网格无关性验证结果如图 2 所示。

确定壁面第一层网格高度为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$,计算区域总网格数为 51 885,进、出口边界均采用压力边界条件。以活塞在压缩上止点附件开始喷油时的气缸压力作为参照,出口压力固定为 2 MPa,初始温度为 300 K。Fluent 模拟分析选择双精度分离法(double precision),求解器采用压力速度耦合求解的 SIMPLEC 算法,相比于 SIMPLE 算法拥有更快的收敛速度。收敛精度设置为 10^{-5} ,能量收敛残差值设置为 10^{-6} ,并在进、出口设置监视器来保证计算收敛时进、出口质量流量相等;计算中使用的柴油物性参数如表 1 所示。

1.2 物理模型

喷油嘴喷孔流量因数 C_q 是评价喷油嘴流通特性、衡量喷油嘴性能的重要参数,为由 CFD 计算模拟得到的实际喷油量 q 与理论喷油量 q_0 之比^[14]:

$$C_q = \frac{q}{q_0} = \frac{q}{A \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

式中: p_1 、 p_2 分别为喷孔的入口压力和背压,Pa; ρ 为燃油密度, kg/m^3 ; A 为喷孔流通面积, m^2 。

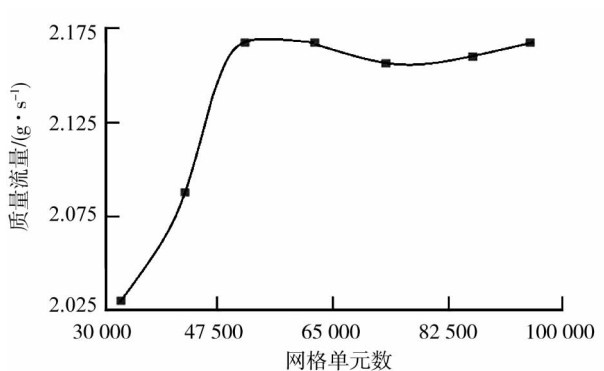


图 2 网格无关性验证

表 1 柴油的物性参数

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	表面张力/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	饱和压力/ Pa
液相柴油	818.000	2.936×10^{-3}	0.025	360
气相柴油	0.029	1.810×10^{-6}		

高压微细喷孔内部的流动属于伴随空化现象的强湍流两相流动,仿真湍流模型应用 RNG κ - ε 湍流模型^[15]。RNG κ - ε 湍流模型为传统两方程模型的变形,通过引入附加条件提高模型在模拟高应变流动时的精度,适合处理速度梯度较大的流动问题,计算精度较高。在处理近壁区域时,RNG κ - ε 湍流模型还引入了适用于复杂的分离、剪切和旋流场的低雷诺数黏性流动解析方程。

由于喷射压力较高,喷孔内流动速度随喷射压力的升高而加快,孔内低压区扩大,更易产生全空化流,仿真采用了 Singhal 推导得出的全空化模型^[16],同其他空化模型相比,Singhal 全空化模型充分考虑了湍流动能引起的压力波动和流体介质中的不凝结气体产生的影响,模型的具体公式为:

$$\frac{\partial(\varphi_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \varphi_g \rho_g \mathbf{v}_g = R_e - R_c, \quad (2)$$

式中: φ_g 为气相柴油体积分数; ρ_g 为气相柴油密度,kg/m³; ∇ 为哈密顿算子; $\mathbf{v}_g$ 为气相柴油的速度矢量,m/s; R_e 和 R_c 分别为气相柴油的生成速率和凝结速率,1/s。符号的下标 g 代表流体状态为气相。

考虑到未凝结气体和湍流动能的影响,相变速率表达式为:

$$R_e = C_g \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\sigma \rho_l \rho_g} \left[\frac{2}{3} \frac{(p_g - p)}{\rho_l} \right]^{\frac{1}{2}} (1 - \varphi_g - \varphi_{gl}), \quad (3)$$

$$R_c = C_l \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\sigma \rho_l \rho_g} \left[\frac{2}{3} \frac{(p - p_g)}{\rho_l} \right]^{\frac{1}{2}} \varphi_g, \quad (4)$$

式中: C_g 为气相柴油的相变速率因数, $C_g=0.02$; C_l 为气相柴油凝结相变速率因数, $C_l=0.01$; ρ_l 为液相柴油密度,kg/m³; φ_{gl} 为未凝结气体体积分数; p_g 为相变阈值压力,Pa; k 为流体局部湍动能,m²/s²; σ 为液体表面张力,N/m。符号的下标 l 代表流体状态为液相。

Singhal 对于气液两相转化的临界压力模型给出了新的解释,临界压力模型考虑了湍流动能引起的压力波和未凝结气体的影响,具体表达式为:

$$p_g = p_0 + \frac{p_t}{2}, \quad (5)$$

式中: p_0 为某一特定温度下液体的饱和蒸汽压力,Pa; p_t 为湍流波动压力,Pa。

喷孔内柴油流动可看作稳态不可压缩黏性流动,针对粗糙度模拟计算采用 mixture 混合均相模型,模型近壁面区域采用 Fluent 内置的标准壁面函数法进行处理。

1.3 粗糙度模型

几何粗糙度模型因简单、直观而被广泛应用于数值仿真。本文中采用的壁面粗糙度模型是通过将近壁面流速加以修正来模拟粗糙度对近壁面流动的影响,壁面粗糙元形状为均匀排布的几何圆形。

定义近壁面区域节点 P 至壁面的无量纲距离

$$y_p = \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_y^{\frac{1}{2}}}{\mu}, \quad (6)$$

式中: C_μ 为切应力速度因数, $C_\mu=0.09$; y 为壁面到壁面附近第一个网格点的距离; μ 为流体动力黏度,Pa·s。

近壁面区域 P 节点处平均速度

$$\bar{v} = \frac{1}{\beta} \ln(E y_p) - B, \quad (7)$$

式中: B 为表面粗糙度函数,该函数与粗糙度的值和壁面类型有关; E 和 β 为 2 个经验常数, $E=e^{5.5k}$; $k=0.40 \sim 0.42$ 。

定义无量纲粗糙度高度

$$R = \frac{\rho R_z v_p}{\mu}, \quad (8)$$

式中: R_z 为轮廓最大高度, μm ; v_p 为流体近壁面某一点流速, m/s 。

光滑壁面 ($R < 2.25$)、过渡壁面 ($2.25 \leq R \leq 90$)、粗糙壁面 ($R > 90$) 的 B 值分别为:

$$B = \begin{cases} 0, & R < 2.25 \\ \frac{1}{\beta} \ln(1 + C_R + R), & 2.25 \leq R \leq 90 \\ \frac{1}{\beta} \ln(1 + C_R R), & R > 90 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: C_R 为粗糙度常数, 一般取决于表面粗糙度类型。

2 模型验证

Winklhofer 试验模型如图 3 所示。

Winklhofer 等采用可视化试验方法, 验证了平面流道的空化生成特性, 试验中通过设置固定的入口压力并逐渐减小背压控制喷射速率, 利用 Coriolis 传感器测量出口质量流量, 电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 相机捕捉管内气泡得到管内空化流动情况。

本文中建立与 Winklhofer 试验一致的二维渐缩流道模型来模拟流体域内的空化流动现象, 并将试验数据与 Winklhofer 的试验结果进行分析对比^[17]。

模型验证仿真边界条件和 Winklhofer 试验条件相同, 固定入口压力为 10 MPa, 通过改变背压控制压差的变化, 研究不同压差下的内部空化流动特性。湍流模型采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型, 多相流模型中选择流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型和 Mixture 混合多相流模型, 空化模型采用 Zwart 空化模型及 Singhal 全空化模型, 为保证试验精度, 选择 2 组多相流模型与空化模型的组合进行验证, 第 1 组为 VOF 两相流模型和 Zwart 空化模型; 第 2 组为 Mixture 两相流模型和 Singhal 全空化模型。

分别将 2 组模型中的质量流量仿真结果和 Winklhofer 试验结果进行比较, 喷孔出口柴油质量流量对比曲线如图 4 所示。由图 4 可知: 2 组模型的仿真结果都略大于 Winklhofer 试验结果, 且随着进、出口压差的增大, 误差增大。其原因主要是仿真为二维, 缺少 2 个壁面, 并且模型中的壁面默认为光滑壁面, 而实际的壁面粗糙度 R_z 不为 0, 此外数值模拟时未开启能量方程, 不考虑温度带来的影响。但总体来看, 数值模拟结果和试验结果较为接近, 误差均不超过 5%, 3 组模型中采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型、Singhal 空化模型、Mixture 混合多相流模型的计算结果误差更小, 更接近试验结果, 所以在计算粗糙度影响时采用了 Mixture 和 Singhal 模型进行计算。

3 结果与分析

在喷孔的实际加工过程中无法保证喷孔内壁绝对光滑, 若在内壁表面设立一条水平基线, 可发现壁

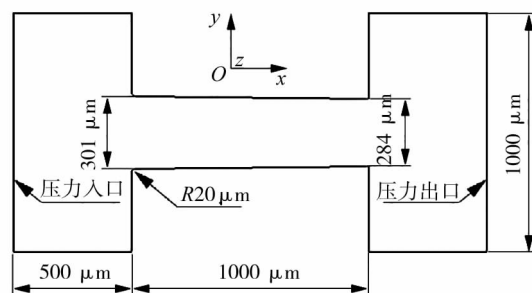


图 3 Winklhofer 试验模型示意图

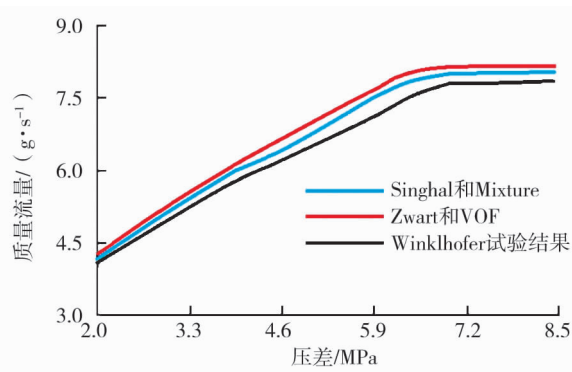


图 4 喷孔出口柴油质量流量对比曲线

面存在较小间距、较小峰值的粗糙元,流体近壁面流动时会因这些微小的粗糙元发生流动分离、回流等情况。粗糙元之间会存留部分流体涡团,这些涡团与粗糙元通常会降低近壁面流体流动速度^[18],可以近似为缩小了流道截面积,减小了当量直径,在数十至数百微米级流道中粗糙元峰高与流道直径间的数量级关系不再悬殊,所以在研究中不应被忽略。在仿真软件 Fluent 中用轮廓最大高度 R_z 表示表面粗糙度,粗糙度常数 C_R 表征粗糙元分布规律,默认均匀分布。本文中选取 9 组不同 R_z (0、1.25、2.50、3.75、5.00、6.25、7.50、8.75、10.00 μm),粗糙度常数 C_R 取默认值 0.5,表示粗糙元在整个壁面上分布均匀。

图 5 为不同喷射压力下壁面为光滑壁面时气相柴油体积分数分布云图,因压力室区域内流体流动特性几乎不变,故之后图中选取部分为压力室最小孔径处至压力出口处的流体域。由图 5 可知:喷油压力为 10 MPa 时喷孔入口处出现明显空化区域;喷油压力为 40 MPa 时气相达到出口,柴油流动已成全空化状态;喷油压力为 200 MPa 时,全空化状态加强,沿壁面气相厚度增加,出口气相分布增多。

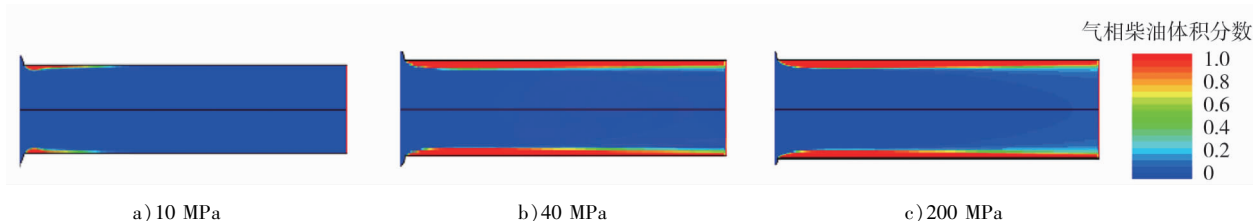


图 5 不同喷射压力下孔内气相柴油体积分数云图

不同压力下喷孔内气相柴油体积分数随 R_z 变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知:光滑壁面时 ($R_z = 0$),喷射压力越高,气相柴油的体积分数越大,空化强度随喷射压力增加而增加,但 40 MPa 全空化发生后,增强水平相对减弱,随着 R_z 的增加气相体积分分数逐渐降低。分析原因为粗糙元峰高增加,对近壁面流体的扰动更大,导致气相、液相和壁面间的摩擦作用增强从而导致部分气泡受摩擦挤压而溃灭,气相体积分分数随之减小,表明壁面粗糙度会抑制空化的发生与发展,这与文献[19]的研究结果相一致。

喷射压力分别为 10、40、200 MPa 时,壁面 R_z 对喷孔出口截面流量因数的影响如图 7 所示。由于在光滑壁面上随着喷射压力的提高而导致喷孔内空化强度增大,空化现象的加剧使喷孔的有效流通面积减少导致出口流量因数呈降低趋势。由图 7 可知:随着 R_z 增大,不同喷射压力下,流量因数变化趋势有所不同;当喷射压力为 10 MPa 时,喷孔的流量因数随 R_z 的增加而减少;喷射压力为 40 和 200 MPa 时流量因数随着 R_z 的增大,表现出先升高后降低的趋势,最大流量因数分别发生在 R_z 为 5 μm 和 7.5 μm 处。由此可见,流量因数并非单纯随空化程度增强、气相体积分数的增加而减少,壁面微观形貌对流动特性也会产生重要影响。此外喷油压力越高,流量因数拐点处 R_z 越大。

喷射压力为 200 MPa,不同 R_z 的喷孔内部湍动能分布云图如图 8 所示。由图 8 可知,壁面湍动能随 R_z 增加而逐渐增强,主要原因是随着 R_z 增加,两相流与壁面粗糙元间相互作用使得空化层不稳定,各

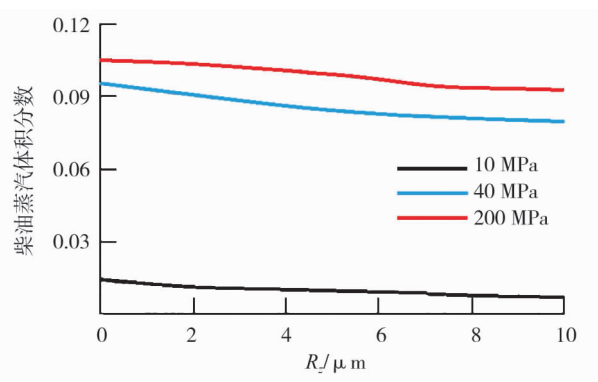


图 6 喷孔内部气相柴油体积分数变化曲线

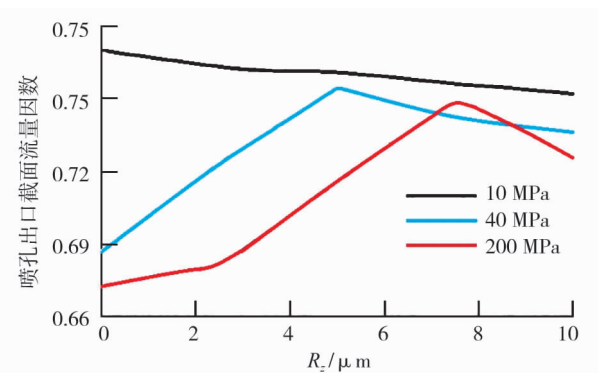


图 7 壁面 R_z 对喷孔出口截面流量系数的影响

相间与壁面的摩擦加剧,气泡生成与破裂间产生强烈的湍流扰动^[20-21]。

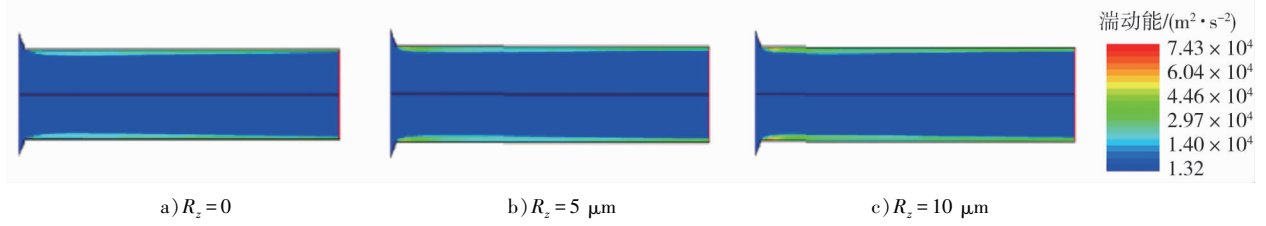


图8 喷射压力为200 MPa时不同 R_z 的喷孔内部湍动能分布云图

喷射压力为200 MPa,喷油孔出口平均湍动能和出口截面平均速度受 R_z 影响及出口截面速度分布如图9所示。由图9可知:喷油孔出口截面平均湍动能随 R_z 增大而逐渐增大,而平均速度则随 R_z 的增大而逐渐减小;出口截面速度随着 R_z 的增大而降低,尤其是近壁面速度, R_z 由0增加至7 μm 时,喷孔平均流速由670.71 m/s下降至662.10 m/s,降幅为1.3%,而当 R_z 由7增大至10 μm ,平均流速由662.10 m/s降至652.31 m/s,降幅为1.5%。主要原因为 R_z 增加使喷孔内近壁面湍动能增加,靠近壁面的流体会产生部分扰流和分离现象^[22], R_z 越大扰流和分离现象越明显,增强流场的横向动量传递。随着壁面 R_z 的增加,动量传递愈加剧烈,使壁面的切应力增大,相当于近壁面区域的流体黏性增大,等距离流动的摩擦阻力增加,能量损失加大,导致孔内柴油流速降低。

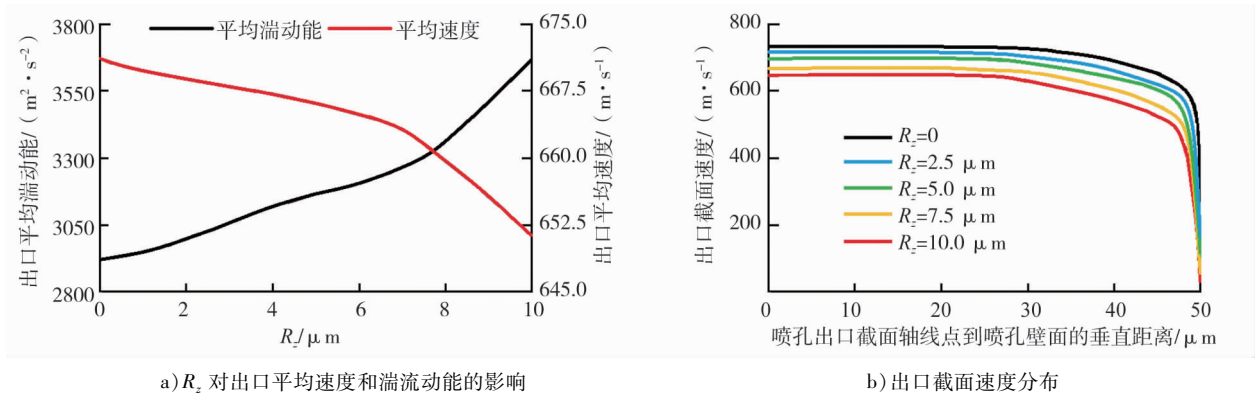


图9 喷射压力为200 MPa时 R_z 对出口平均速度、湍动能的影响及出口截面速度分布

喷孔的流量因数受气体体积分数引起的有效截面变化的影响,同时也受出口截面速度的影响。喷射压力为10 MPa时,在喷孔收缩段出现明显空化区域,导致收缩段的有效截面积显著减小,且空化区域未覆盖到出口,粗糙元高度增加降低了有效截面积,流动速度受喷孔有效截面积减小的影响而降低,喷孔流量因数随 R_z 的增大而降低。喷射压力较高时(例如喷射压力为200 MPa),流场处于全空化状态, R_z 较低时出口截面速度下降较小,而气体体积分数下降较大,流量因数主要受有效截面积的影响,随 R_z 的增大,气相体积分数下降,流量因数增大;当 R_z 为7.5 μm 时,速度下降程度占主导,导致流量因数开始下降。

Singhal空化模型考虑了湍动能对临界压力的影响,壁面湍动能增加,临界压力增加,有利于空化形成;而 R_z 的增大也会导致壁面速度降低,计算域静压力升高^[23],从而抑制空化。 R_z 较低时,随 R_z 增加气相体积分数下降较多, $R_z > 7 \mu\text{m}$,由于速度降低,气体体积分数趋于平稳。

4 结论

1)在喷孔内部流动中,壁面粗糙度 R_z 对喷孔内空化流动的影响不可忽略;对喷孔内柴油空化有一定的抑制作用,喷射压力为200 MPa时,随着 R_z 由0增大至10 μm ,喷孔气相柴油体积分数由10.7%降至9.4%。

2)随着 R_z 增大,喷孔截面流通面积会相应减小,但流动区域内平均气相体积分数减少亦会导致喷孔实际流通面积增大, R_z 较小时流速下降较低, R_z 由0增大至7 μm ,速度仅下降1.3%,但当 R_z 由7 μm 增大至10 μm ,速度下降幅度则为1.5%。

3)随着 R_z 增大,喷孔内质量流量受到气相柴油体积分数和截面平均速度两方面改变的影响,导致在高压下随 R_z 增大质量流量因数先增后减。

高喷射压力下孔内主流区流场及近壁面空化的变化规律对喷孔加工时通过控制喷孔壁 R_z 得到更高的出流量有一定指导作用,但在相同喷射压力下粗糙度对孔内空化初生的影响尚未明确,或可尝试在低喷射压力时推迟空化初生获得较高的流量因数。

参考文献:

- [1] 雷艳,高壮,桑海浪,等.柴油机喷孔出口截面空化流动特性[J].北京工业大学学报,2018,44(9):1233-1238.
- [2] 汪翔,苏万华.空化过程对柴油喷嘴内流特性的影响[J].内燃机学报,2007,25(6):481-487.
- [3] TAMAKI N, SHIMIZU M, HIROYASU H. Enhancement of the atomization of a liquid jet by cavitation in a nozzle hole[J]. Atomization and Sprays: Journal of the International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems, 2001,11(2):125-137.
- [4] SOTERIOU C, ANDREWS R, SMITH M. Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization[C]//International Congress & Exposition. Detroit, USA: SAE International, 1995:128-153.
- [5] PAYRI F, BERMUDEZ 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):419-431.
- [6] 陶然,权晓波,徐建中.微尺度流动研究中的几个问题[J].工程热物理学报,2001,22(5):575-577.
- [7] 全国产品尺寸和几何技术规范标准化技术委员会.产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值:GB/T 1031—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [8] BIANCOFIORE L, GIACOPINI M, DINI D. Interplay between wall slip and cavitation: a complementary variable approach [J]. Tribology International, 2019,137: 324-339.
- [9] ECHOUCHE F, BELMABROUK H, LE PEVEN L, et al. Numerical simulation of wall roughness effects in cavitating flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011,32(5):1068-1075.
- [10] 孙军,赵新泽,徐翔,等.壁面粗糙度对风管管嘴空化流动特性的影响[J].科技通报,2017,33(6):100-104.
- [11] 陈亮,贾和坤,文帅.柴油机燃油嘴内壁面粗糙度对空化效应的影响[J].机械设计与制造,2017(8):20-23.
- [12] ANSARI M A, KIRN K. Parametric study on mixing of two fluids in a three-dimensional serpentine microchannel [J]. Chemical Engineering Journal, 2009,146(3): 439-448.
- [13] PENG X F, PETERSON G P, WANG B X. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels [J]. Experimental Heat Transfer, 1994,7(4):249-264.
- [14] 夏兴兰,许喆,郭立新,等.影响燃油嘴喷孔流量系数关键参数的研究[J].现代车用动力,2010(4):7-10.
- [15] 孙丽芝,何邦全,张更伽,等.柴油耦合喷嘴内空化流动对近场喷雾影响的模拟[J].燃烧科学与技术,2021,27(1): 81-89.
- [16] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H Y, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002,124(3): 617-624.
- [17] WINKLHOFFER E, KULL E, KELZ E, et al. Comprehensive hydraulic and flow field documentation in model throttle experiments under cavitation conditions [C]//17th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Zurich, Switzerland: ILASS-Europe, 2001:574-579.
- [18] 张辉,韩振南.柴油机燃油嘴变截面喷孔内壁粗糙度影响研究[J].机械设计与制造,2020(10):153-156.
- [19] 高国席.共轨喷油器燃油嘴内空化流动特性数值模拟研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [20] ANSARI M Q. 表面粗糙影响微通道流动与传热特性研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [21] 赵玉龙,刘香禺,张烈辉,等.粗糙孔壁对微/纳米尺度下致密砂岩气流动的影响[J].石油学报,2021,42(5):641-653.
- [22] NIE M X. Cavitation prevention with roughened surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,127(10):878-880.
- [23] 梅涛,陈占秀,杨历,等.纳米通道粗糙内壁对流体流动行为的影响[J].物理学报,2019,68(9):178-188.

(下转第39页)