

# 锥直型喷嘴内近壁处流动特性的大涡模拟

姜天文, 黄中伟\*, 李敬彬

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, huangzw@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-04-27

国家自然科学基金项目分支井眼辅助干热岩注采井缝网沟通机理研究(项目号: 52020105001)资助

**摘要** 射流喷嘴被广泛应用于管道清洗、辅助破岩、射流成孔等石油工业中领域。锥直型喷嘴作为应用最为广泛的喷嘴类型而被研究。其整体流动状态与阻力对近壁处流动状态敏感。喷嘴近壁处流动状态对喷嘴整体流动状态和流动阻力影响较大。本文采用大涡模拟模型对喷嘴内流场进行数值模拟。对喷嘴内速度场分布、速度梯度、壁面压力、壁面剪切力、壁面摩擦阻力系数进行分析, 得出了以下结论: 收缩段处速度分布由抛物线型转变为“M”型, 并在近壁处出现峰值; 在收缩段入口处附近发生边界层转换, 出现漩涡; 在收缩段出口、直管段入口处附近出现边界层转换与分离, 在该处速度梯度、壁面剪切力、壁面摩擦阻力系数均出现峰值; 直管段近壁处周期性出现有序涡结构, 并在壁面处表现为剪切力、速度梯度、摩擦阻力系数的周期性波动, 与近壁处流动状态涡结构的周期性出现相互佐证; 整个喷嘴流动阻力大部分产生在喷嘴直管段内, 涡流的出现降低壁面摩擦阻力系数, 在喷嘴减阻时可考虑优化喷嘴收缩段到直管段过渡的轮廓, 亦可考虑在直管段内进行被动减阻设计。通过对喷嘴内近壁处流动特性阐述, 分析了喷嘴内流动摩擦阻力的产生位置及原因, 能够为进一步为优化喷嘴结构、降低喷嘴流动阻力提供理论支撑。

**关键词** 锥直型喷嘴; 边界层; 摩擦阻力; 大涡模拟; 壁面剪切力

## Large-eddy simulation of flow characteristics near the wall of cone-straight nozzle

JIANG Tianwen, HUANG Zhongwei, LI Jingbin

State key Laboratory of Petroleum Resources and Exploration, China University of Petroleum-Beijing 102249, China

**Abstract** Nozzles are widely used in the petroleum industry, including cleaning, auxiliary rock breaking, perforation, and other functions. As the most commonly used nozzle type, the cone-shaped nozzle has been widely studied, the flow properties near-wall play an essential role in flow resistance and need to be revealed. In this paper, the large eddy simulation model numerically were used to simulate the flow field in the nozzle. The velocity field distribution, velocity gradient, wall pressure, wall shear stress, skin friction coefficient in the nozzle were analyzed. The following results were concluded: the velocity distribution of the fluid changes from a parabola to an M shape during the acceleration process in the contraction section, and Peaks appear near the wall; boundary layer transitions and vortices appear near at the beginning of the converging section; boundary layer transitions and separations occur near at the end of the converging section and the beginning of straight pipe sections, where the velocity gradient, wall shear force, and skin friction coefficient all have peak values; the flow near the wall of the straight pipe section is

引用格式: 姜天文, 黄中伟, 李敬彬. 锥直型喷嘴内近壁处流动特性的大涡模拟. 石油科学通报, 2022, 03: 420-428

JIANG Tianwen, HUANG Zhongwei, LI Jingbin. Large-eddy simulation of flow characteristics near the wall of cone-straight nozzle. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 420-428. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.036

vortex-laminar alternately; the wall shear force, velocity gradient, and skin friction coefficient of the straight pipe section show periodic fluctuations, which alternate with the flow state near the wall. Most of the nozzle flow resistance is generated in the nozzle straight pipe section, and the appearance of the vortex reduces the skin friction coefficient. When the nozzle drag reduction is performed, the contour of the transition from the nozzle contraction section to the straight pipe section can be optimized, and the straight pipe section should also be considered when passive drag reduction design is carried out inside. By describing the flow characteristics near the inner wall of the nozzle, the location and reason of the frictional resistance of the internal flow characteristics of the nozzle were analyzed, which aimed to provide theoretical support for further optimizing the nozzle structure and reducing the nozzle flow resistance.

**Keywords** cone-straight nozzle; boundary layers; flow resistance; large eddy simulation; wall shear stress

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.036

## 0 引言

水射流技术是指利用高压泵产生高压水进行作业的技术,该技术通过喷嘴将压力转变为高度聚集的水射流,能够完清洗、切割、破碎等工艺,广泛应用于石油行业,具有无污染、成本低等显著优势<sup>[1-3]</sup>。随着科技的发展喷嘴亦被应用到其他方面,例如获得满足光学加工要求的等离子体射流<sup>[4]</sup>和冲击式速冻机<sup>[5]</sup>以及3D打印技术<sup>[6]</sup>等方面。喷嘴作为射流的终端执行机构,影响着射流特性和设备工作效率,需进行单独研究。在多种喷嘴中锥直型喷嘴因其具有良好的集束能力和较为稳定的工作特性而广泛被使用。

锥直型喷嘴结构由收缩段、直管段、扩孔段组成,因工作目的不同而有所差异。收缩段用于集束流体、聚能;直管段则用于稳定流动特性;扩孔段则用于控制射流出口扩散角以及控制空化等。在石油行业应用中锥直型喷嘴一般不考虑扩孔段,本文主要针对喷嘴内部近壁处流动特性研究,相关研究不考虑扩孔段。前人对喷嘴结构已做了相关研究。

沈华建<sup>[7]</sup>、Zhaolong Ge<sup>[8]</sup>等人针对高压水射流煤层割缝增产射流喷嘴进行了数值模拟研究,对喷嘴收缩段收缩角、直管段长度进行了敏感性分析,并给出了建议性的喷嘴结构,通过实验对喷嘴优化前后切割能力进行验证。刘文杰<sup>[9]</sup>通过数值模拟发现喷嘴锥角对射流参数影响较大,射流速度随锥角增大先增大后减小。H. Vahedi Tafreshi<sup>[10]</sup>、马文涛<sup>[11]</sup>则通过实验和数值模拟对锥直型喷嘴和锥型喷嘴流场特性和破岩特性进行了对比分析,以射流等速核长度为目标,模拟结果表明锥直型喷嘴优于锥型喷嘴和平直型喷嘴。陈廷兵<sup>[12]</sup>则对不同喷嘴破水合物效果进行对比分析,通过数值模拟和正交实验对优选结果进行对比,给出了锥直型喷嘴的优化结构参数。施红辉<sup>[13]</sup>则采用模型模拟了不同喷嘴结构的氮气射流,模拟结果表明锥直

型喷嘴具有更好的集束性与扩散性,而平直管喷嘴具有最大的有效作用距离。此外在采用水射流消除残余应力时,得益于其直管段部分具有稳定射流特性的功能<sup>[14]</sup>,锥直型喷嘴具有更好的应用效果。何枫<sup>[15]</sup>则对喷嘴内流道型线对射流的影响进行了模拟,结果表明内部型线主要影响喷嘴出口附近的速度和压力分布,同时指出维多辛斯基曲线可以获得更好的射流特性。程新颖<sup>[16]</sup>亦对圆弧形型线结构喷嘴进行了模拟及实验,得出圆弧形喷嘴射流密集性及压降损失均小于常规锥直型喷嘴。

学者们大多从锥直型喷嘴轮廓方面对喷嘴结构进行优化,分析喷嘴内部型线轮廓对射流特性的影响,并给出特定应用环境的最优参数,但针对喷嘴内部流动特性相关研究较少,而喷嘴内部流动状态影响着外部流场特性,因此研究喷嘴内部流动状态对喷嘴结构优化有进一步的指导作用。

本文采用大涡模拟(Large Eddy Simulation,简称LES)模型对喷嘴内部流动状态进行了模拟,对近壁处流动特性进行模拟,分析近壁处边界层转捩及分离位置,进而研究边界层转捩及分离对外部流场特性的影响,对锥直型喷嘴进一步优化具有参考意义。

## 1 计算模型及计算方法

### 1.1 计算模型

本文研究锥直型喷嘴结构如图1所示。锥直型喷嘴结构主要分为收缩段和直管段,收缩段主要用于聚集流束,使流体加速;直管段用于稳定流动状态,降低流体流出喷嘴的扩散角。

本文锥直型喷嘴的物料尺寸为:入口段直径 $D1$ 为15 mm,收缩角度为 $15^\circ$ ,直管段长度 $L1$ 为15 mm,直管段直径 $D2$ 为4 mm。 $X$ 轴为喷嘴中心轴,方向为

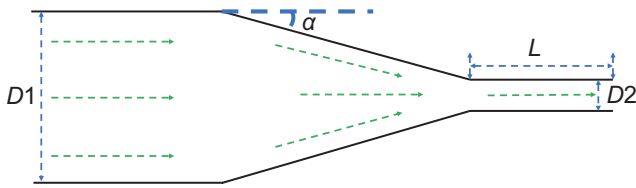


图1 喷嘴结构示意图

Fig. 1 Nozzle structure

流体流动方向, Y方向为喷嘴径向方向。

## 1.2 网格划分

对近壁处边界稳定流动状态进行模拟时, 网格要求较高, 近壁处边界稳定流动分为黏性底层、过渡层和对数率层, 常用无量次壁面距离 $y^+$ 来判断流动的状态,  $y^+ < 5$ 时为黏性底层,  $5 < y^+ < 30$ 时为过渡层, 当 $y^+ > 30$ 时为对数率层, 为探究整个边界层处流动状态, 网格划分采用第一层网格尺寸为 $y^+ = 1$ 处的真实距离记为。沿壁面 $y^+$ 分布如图2所示。

$$y_p = \frac{y^+ \nu}{\mu_\tau} \quad (1)$$

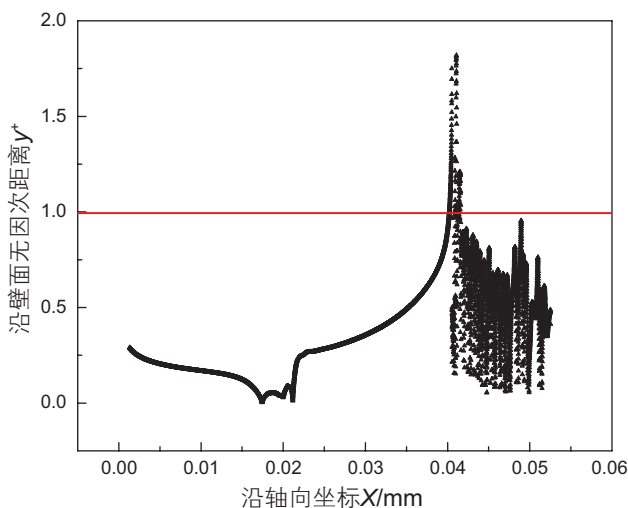
$$y^+ = \frac{y_p \mu_\tau}{\nu} \quad (2)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{C_f}{2} \approx \frac{0.039}{Re_{D_h}^{1/4}} \quad (4)$$

式中 $\overline{C_f}$ 为管道摩阻系数经验参数,  $Re_{D_h}^{1/4}$ 为管道直径 $D_h$ 的雷诺数,  $\mu_\tau$ 为剪切速度, m/s,  $\nu$ 为动力黏度, Pa·s。

采用结构化网格进行划分, 进行第一层网格尺寸

图2  $y^+$ 沿壁面分布Fig. 2  $y^+$  distribution along the muzzle wall

计算, 边界层为20层, 增长速度为1.15, 网格如图3所示。在近壁处网格确定以后, 为降低计算量进一步优化非近壁处网格, 对计算域进行对称处理, 同时将中间网格最大面尺寸定为0.001 m, 网格数量由86万降低为36万, 网格偏斜度最大为0.76, 网格质量优。

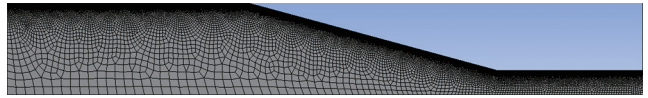


图3 网格划分

Fig. 3 Grid

## 1.3 数值方法

为充分分辨壁面附近的湍流结构, 法相采用非均匀网格加密, 并通过计算使得第一个节点 $y^+ \leq 1$ , 采用周期性边界条件, 初始平均速度设置为10 m/s, 壁面条件为无滑移固壁边界条件。

喷嘴内部流动为湍流, 存在大量的弯曲流动和涡流, 在进行计算时, 考虑到近壁处网格足够精细, 壁面函数采用增强型壁面处理(Enhanced Wall Treatment), 采用RNG k-Epsilon 湍流模型进行定常计算到收敛。LES计算的初始流场为刚得到的瞬态速度场。余建阳<sup>[17]</sup>等人比较了4种不同亚格子模型的计算原理和仿真特性, 发现WALE和KET模型仿真结果更准确, 故选择WALE亚格子模型进行非稳态求解。空间离散格式采用有限差分格式, 压力-速度耦合基于SIMPLE算法, 入口条件为速度入口边界, 平均速度设置为10 m/s, 出口条件为压力出口边界。时间步长为 $10^{-7}$  s。

## 2 数值验证

为验证数值模型的准确性, 在与J.G.M.EG-GELS<sup>[18]</sup>相同的计算参数下进行数值模拟, 采用相同的几何模型(管径为95.4 mm)和入口条件(雷诺数为5300), 将本文模拟结果与其实验数据和直接模拟结果进行对比。如图4所示, 三者显示出较好的一致性, 最大误差为0.03, 证明本文模型的准确性。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 喷嘴内速度分布

对喷嘴内整个流场进行分析, 发现大涡模拟在网格足够精细的情况下能够准确地模拟喷嘴内部的流动情况及涡的产生情况。如图5所示, 喷嘴内主流场速

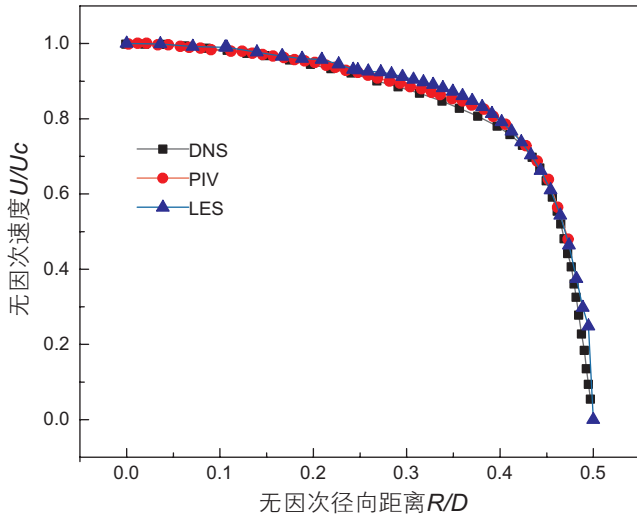


图4 大涡模拟、直接数值模拟、实验数据对比  
Fig. 4 Comparison among LES, DNS and experimental data

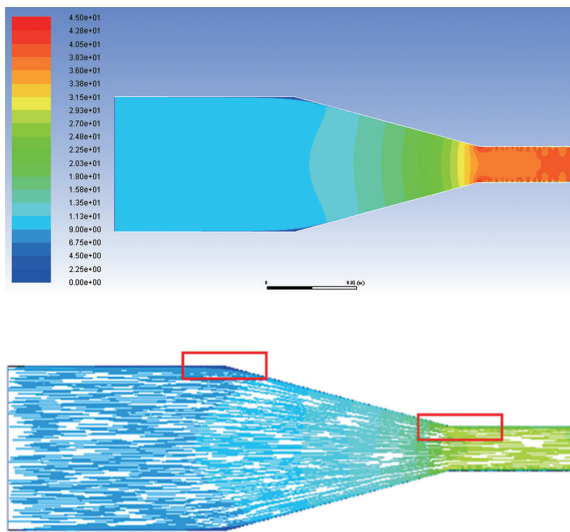
度等值线由入口段均匀分布逐步发展为抛物线形状，进入收缩段后抛物线逐渐变成一条近直线(不考虑贴壁流)，在喷嘴直管段发展成M型。

在流体开始进入收缩段时，由于来流受到收缩段

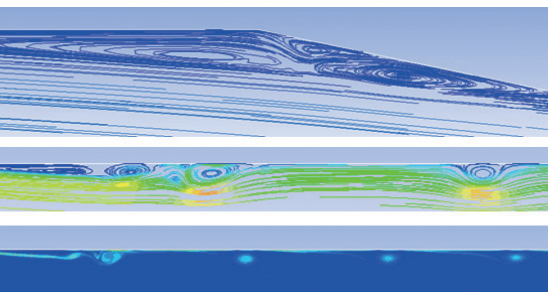
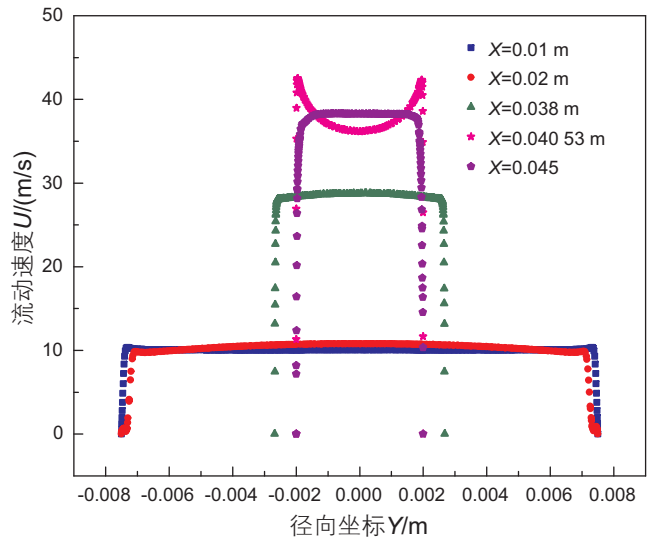
斜面的激荡，在转折处形成低速区，以涡的形式存在。由于受到斜面影响，边界层在到达转折处前发生了转换，由原来的层流转变为湍流。此后边界层再次附着壁面稳定形成稳定流，直至直管段入口，在入口处来流与壁面形成  $15^\circ$  夹角，来流速度方向保持不变，在直管段入口处形成逆压梯度，发生边界层分离，并开始沿直管段壁面周期性产生有序涡结构。在云图上表现为涡流—稳定流—涡流的周期性出现。如图 6、7 所示。

为更好的分析喷嘴内速度分布情况，分别对喷嘴入口发展段、收缩段、直管段以及转折点进行速度分析，各处位置如图 8 所示。主要喷嘴入口处( $X=0.01\text{ m}$ )、收缩起始处( $X=0.02\text{ m}$ )、收缩处( $X=0.038\text{ m}$ )、转折点( $X=0.04053\text{ m}$ )、直管处( $X=0.045\text{ m}$ ) 5 个位置

对速度和到壁面距离采用无量纲化处理，考虑近壁面处速度分布时仅考虑喷嘴直径的一半，以  $y^+$  作为无量纲距离， $U^+ = U/u_\tau$ ，( $u_\tau = \sqrt{\tau_0/\rho}$ )。直管处、收缩处、转折点和入口处 4 个位置的速度分布如图 9 所示，速度从壁面处迅速增长到主流场速度，如图所示，



(a) 喷嘴内速度场云图及流线



(b) 收缩段入口处、出口处流线局部放大

图5 喷嘴内流线形态及近壁处涡分布

Fig. 5 Streamline shape in the nozzle and vortex distribution near the wall

在转折点近壁面处出现明显的速度峰值，而在直管处则为平滑过渡。

对收缩段入口处进行单独分析如图 10 所示，在近壁处出现较大的速度波动，判断在该处附近形成涡流，边界层表现为湍流状态，证明边界层在该处附近发生

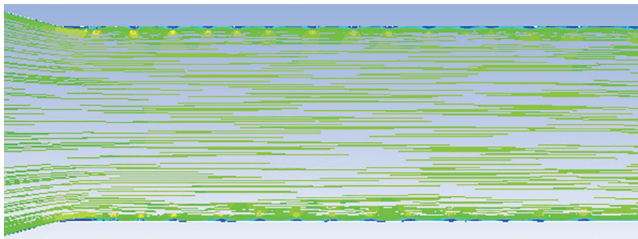


图 6 直管段内近壁处涡流—稳定流交替出现

Fig. 6 The vortex-laminar flow alternately appears near the wall in the straight pipe



图 7 直管段近壁处 Q 等值面

Fig. 7 Equivalent surface of Q near the throat section wall

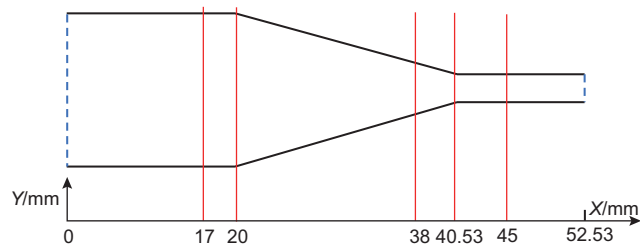


图 8 监测点位置示意图

Fig. 8 Location of monitoring points

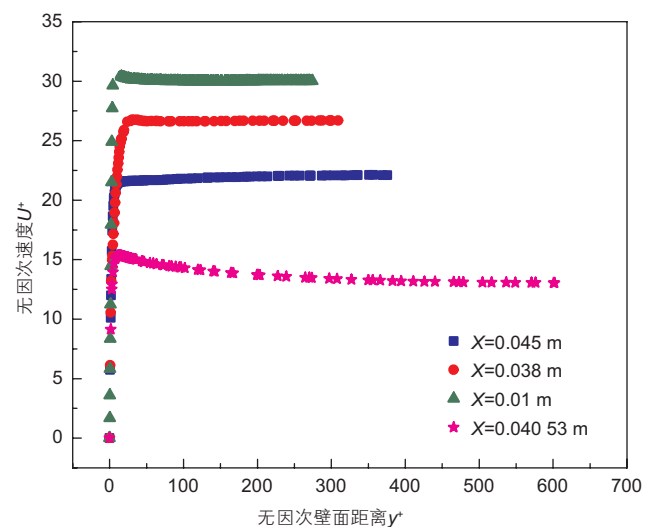


图 9 不同监测位置速度分布

Fig. 9 Velocity distribution

了转换，与速度云图处发生的涡旋运动状态相互佐证。

### 3.2 脉动速度

湍流度表征流动的稳定性，通常用脉动速度均方根与时均速度之比表示，喷嘴入口处( $X=0.01$  m)、收缩起始处( $X=0.02$  m)、收缩处( $X=0.038$  m)、转折点( $X=0.04053$  m)、直管处( $X=0.045$  m) 5 个位置的脉动速度情况如图 11 所示，从图中可以看出，在直管处和收缩段入口处湍流度最大，分别达到了 24% 和 22%，而转折点、入口处和收缩处的湍流度均在 10% 以内。转折点属于临界点，在该点附近为边界层分离、转换的临界位置，此时保持转换前的流动状态。

整个过程为带有 10% 湍流度的流体在入口段处流动逐渐稳定；伴随着湍流度的降低，流体到达收缩段

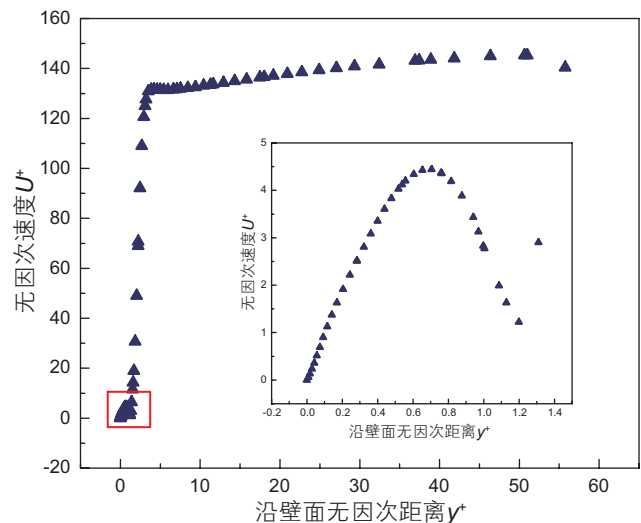


图 10 收缩段入口处速度分布

Fig.10 Velocity distribution at Converge inlet point

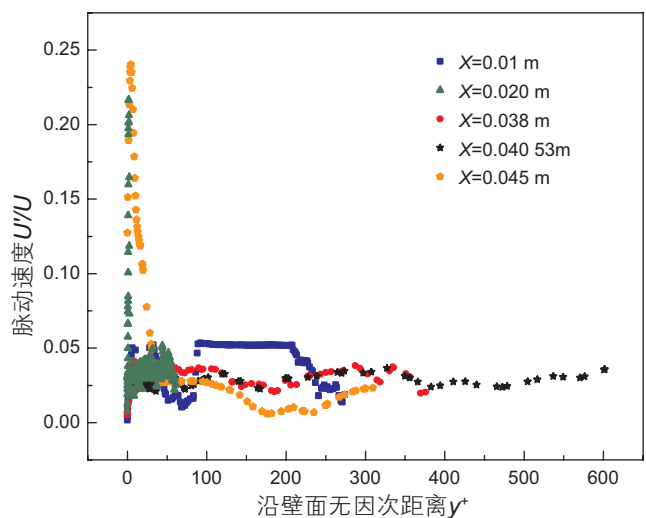


图 11 不同位置脉动速度分布

Fig. 11 Pulsating velocity distribution

时受到收缩斜面的激荡而发生边界层转捩，边界层由稳定流转变为湍流，湍流度急剧升高，在收缩段中均匀缩径，流动逐步趋于稳定，湍流度逐步稳定；当流体经过收缩段进入直管段后由于边界层发生分离与转捩，并周期性的出现有序涡结构，整体流动不稳定，湍流程度高，湍流度增大。

### 3.3 壁面压力

流体压力分为动态压力和静态压力，流体动压力为流体动能 $\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right)$ ，本文对壁面处动压力进行监测，其大小可用于表征近壁处流动速度大小，其变化剧烈程度可用于表征近壁处流动稳定性，如图 12 所示。

从图中可以看出在入口段处壁面动压较低，此后

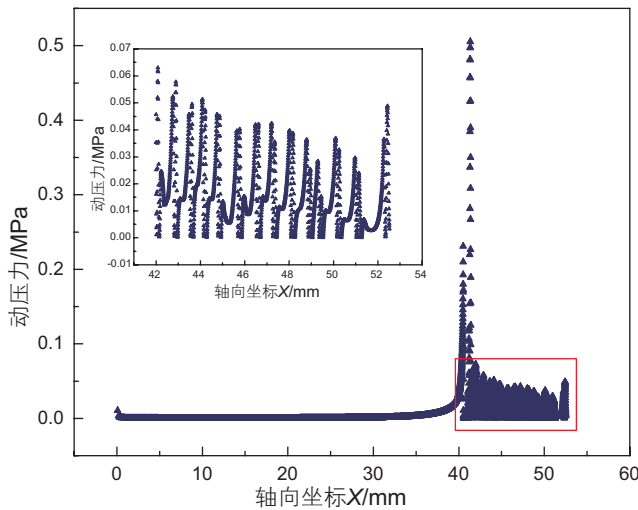


图 12 喷嘴上壁面瞬时动压分布  
Fig. 12 Instantaneous dynamic pressure distribution

经过收缩段时动压逐渐增大，在收缩段出口处和直管段入口处显示最大动压值，并在该处附近急剧增加而后降低，随后在直管段处于一种周期性增长与降低。

壁面动压较低时表明近壁处流体运动更为稳定，动压值越大，流动速度越大，雷诺数越大，近壁处流动越不稳定。据此可进行如下分析，收缩段起始处近壁处流动受到激励后形成涡结构，但该涡结构能量较弱而消弭，不能够继续发展，且该处流动速度整体较低，因此动压值较低；进入收缩段后受到收缩斜面的激荡，流体逐渐被加速，动压逐渐增加。在刚进入收缩段时未观察到动压值明显增加，这是由于来流速度较低承受激荡能力较强，且总体压力较低；在收缩段出口和直管段入口位置，此时速度已达到峰值，且由于刚运动至喷嘴直管段入口处位置，上下流体具有不同方向的速度相互冲撞，达到了完全湍流状态，流体完全处于无规则大范围运动，边界层厚度被压缩至最薄，近壁处流动速度达到最大值，在该处附近表现为动压急剧升高至峰值后急剧降低。到达直管段后受限于直管段直径，湍流程度受到限制并逐渐趋于稳定，由于边界层在此处附近发生了分离，且在直管段内会出现涡结构的有序出现，这与动压呈现循环增加-降低-再增加的现象一致。

### 3.4 速度梯度

为深入了解喷嘴内部流动特性，对入口处、收缩段起始处、直管处、收缩处、和转折点五个位置进行速度梯度分析。图 13(a)显示了  $dU_x/dy$  沿 Y 轴的分布，转折点近壁处速度梯度最大，直管处和收缩处次之，收缩段起始处位置速度梯度最小。速度梯度在主流场

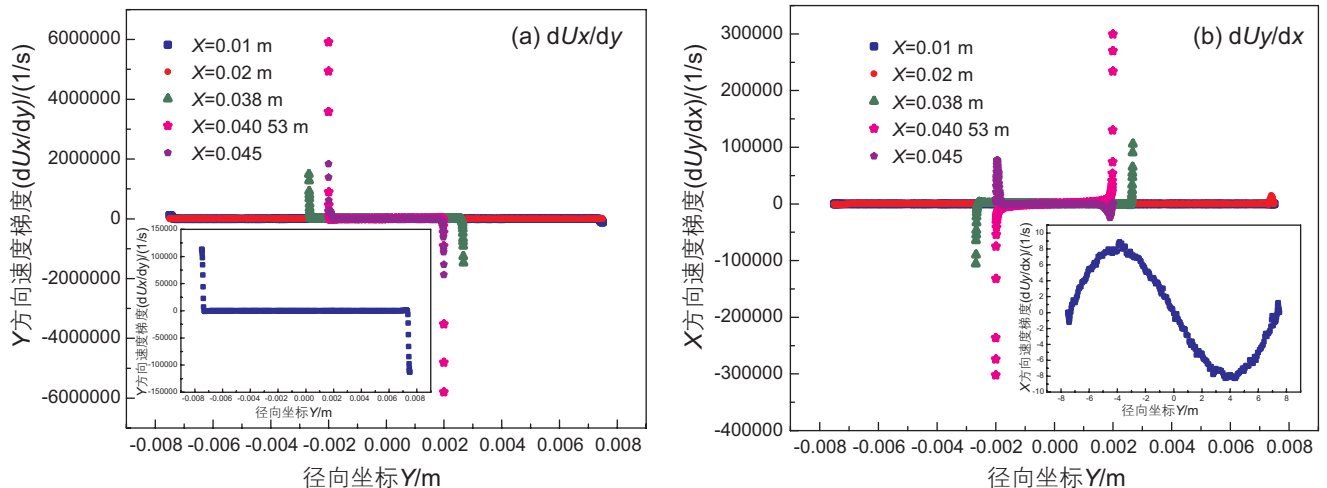


图 13 不同位置沿 X 方向剪切速度分布  
Fig. 13 Velocity gradient distribution at different positions

区域基本为零,较大的速度梯度仅出现在喷嘴近壁处,鉴于本文模拟的速度较高,边界层厚度较小,呈现出速度梯度急剧升高的现象。图 13(b)显示了  $dU_y/dx$  沿  $Y$  轴的分布,大致趋势与图 13(a)相似,转折点速度梯度最大,入口处速度梯度(图中局部图)最小,但在形式上略有差别。入口处速度梯度成正弦曲线形式,分析原因可能为  $Y$  方向速度分量受湍流度影响较大,在入口处  $Y$  方向速度分量较低,直管处速度梯度未呈现对称分布,分析与初始条件有关。

通过沿喷嘴截面速度梯度分布可以看出,速度剪切主要发生在喷嘴内近壁处,如图 14(a)所示。 $Y$  速度分量速度梯度主要分布于  $0 < y^+ < 50$  位置,而  $X$  速度分

量速度梯度主要分布在  $0 < y^+ < 20$  处。

### 3.5 壁面剪切力

壁面剪切力与沿壁面垂直方向速度梯度相关,一定程度上表征摩擦阻力的大小。对喷嘴上壁面剪切速度进行监测,平均壁面剪切力结果如图 15(a)所示。忽略入口速度条件的影响,壁面剪切力在收缩段入口处出现低谷,之后逐渐增加,在收缩段末端达到峰值,然后在直管段内逐渐趋于一个稳定值。瞬时的壁面剪切力分布如图 15(b)所示,与平均值分布图不同的是在进入直管段后壁面剪切力呈现周期性波动。

流体在刚进入收缩段时边界层受到斜面激荡而产生

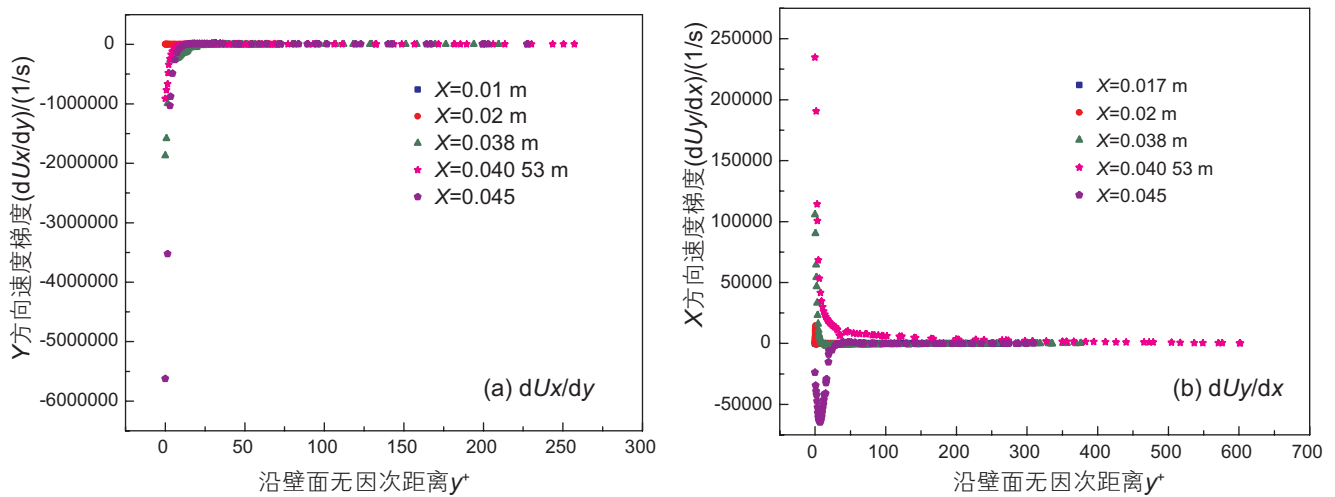


图 14 不同位置沿  $y^+$  剪切速度分布

Fig. 14 Distribution of velocity gradient at different positions

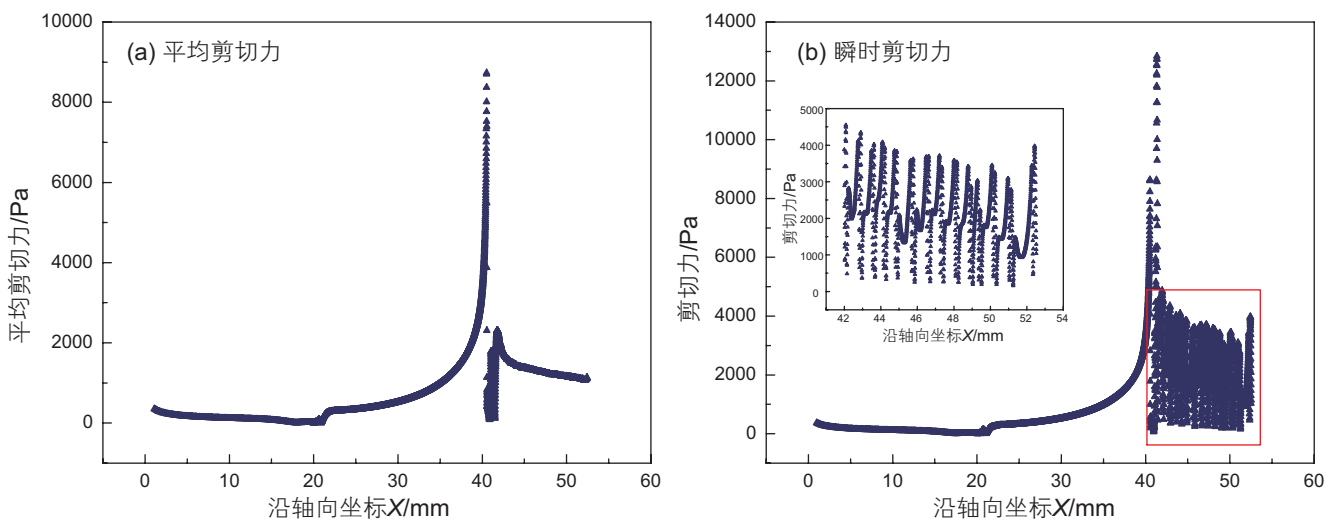


图 15 喷嘴上壁面剪切力分布

Fig. 15 The shear stress distribution on the upper wall of the nozzle

生漩涡,导致近壁处的速度剪切变弱,进而导致壁面剪切力降低;进入收缩段后,主流场流动速度逐渐增大,边界层被压缩使得壁面速度剪切强度逐渐增大,剪切力逐渐增大;在进入直管段后速度逐步趋于稳定,且在直管段近壁处以小涡的形式出现,导致在出现小涡的位置速度剪切弱而未发生小涡的位置剪切强度较强,因此出现波动的情况。

表面摩擦系数与壁面剪切力趋势及原因亦相同,在此处不再进行赘述。

综上,喷嘴摩擦阻力系数峰值主要发生在收缩段出口处和直管段入口处,降低喷嘴流动阻力可考虑优化此处轮廓,使该处过渡更为平滑,尽可能抑制壁面边界层在该处的转捩。直管段近壁处涡结构的出现降低了摩擦阻力系数,若考虑在直管段进行减阻,可考虑被动减阻方式,使得近壁面的剪切流动变为涡流的组合,能够有效降低该段的摩擦阻力。

## 4 结论

本文通过采用大涡模拟模型对喷嘴内部流动情况进行描述,分析表明大涡模拟能够有效的模拟出近壁处边界层的流动状况。发现直管段近壁处出现周期性

的有序涡结构,与他人数据对比证明数值模拟的有效性。同时揭示了喷嘴内近壁处的流动特性。具体结论如下:

(1)由喷嘴速度分布可知,流体在收缩段中逐渐加速,由初始的抛物线分布逐渐转变成M型分布,到直管段入口处在近壁处呈现速度峰值;

(2)喷嘴收缩段入口处由于近壁处流动受到收缩斜面激荡而导致边界层在该处附近发生转捩,使得边界层变为湍流;在收缩段出口处附近发生边界层转捩与分离,导致产生分离涡,且该处由于不同方向来流交汇使得湍流程度最大;之后在直管段受到约束逐渐稳定并在直管段壁面出现周期性涡结构;

(3)通过对速度剪切分布、壁面切应力分布以及表面摩擦阻力系数分布分析可以看出,摩擦阻力主要出现在收缩段出口处和直管段,且从表面摩擦阻力系数角度来看,峰值出现在直管段入口处。喷嘴减阻可以考虑优化收缩段到直管段的过渡轮廓以及在直管段壁面采用被动减阻方式;

(4)为获得流动状态更为稳定的射流结构,喷嘴内部收缩段与直管段交接处应采用良好的过渡,建议采用流线型轮廓进行过渡。

## 参考文献

- [1] 李海燕. 石油工程中水射流技术的应用与发展前景[J]. 化工管理 2015; (6): 69-69. [LI H Y. Application and development prospects of water jet technology in petroleum engineering. Chemical Management 2015; (6): 69-69.]
- [2] 李根生, 沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J]. 石油勘探与开发 2005; 32: 2-0. [LI G S, SHEN Z H. High-pressure water jet theory and its application in petroleum engineering research progress[J]. Petroleum Exploration and Development 2005; 32: 2-0.]
- [3] 刘萍, 黄扬焯. 水射流技术的现状及发展前景[J]. 煤矿机械 2009; 30: 10-12. [LIU P, HUANG Y Z. Current status and development prospects of water jet technology[J]. Coal Mine Machinery 2009; 30: 10-12.]
- [4] XIN Q, SU X, ALAVI S. Effects of conical nozzle and its geometry on properties of an inductively coupled plasma jet used for optical fabrication. Applied Thermal Engineering 2018; 128: 785-94.
- [5] YU ZC, XIE J, WANG JF. Structure optimization of nozzle in quick-freezer based on CFD. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2018; 188.
- [6] LIU H, ZHENG G, CHENG X. Simulation Analysis of the Influence of Nozzle Structure Parameters on Material Controllability. Micromachines (Basel) 2020; 11.
- [7] 沈华建. 煤层割缝喷嘴结构优化与试验[J]. 煤矿安全 2020; 51: 10-13. [SHEN H J. Optimization and Test of Nozzle Structure for Coal Seam Slotting[J]. Coal Mine Safety 2020; 51: 10-13.]
- [8] GE Z, ZHONG J, ZHANG J. Structural Optimization of Slotting Nozzle Used to Improve Coal-Seam Permeability. Applied Sciences 2020; 10.
- [9] 刘文杰, 程晓阳. 基于 Fluent 的高压水射流喷嘴优化模拟研究[J]. 能源与环境 2020; 3. [LIU W J, CHENG X Y. Study on optimization simulation of high pressure water jet nozzle based on Fluent. Energy and Environmental Protection 2020; 3.]
- [10] VAHEDI TAFRESHI H, POURDEYHIMI B. The effects of nozzle geometry on waterjet breakup at high Reynolds numbers. Experiments in Fluids 2003; 35: 364-71.
- [11] 马文涛, 潘俊锋. 不同喷嘴结构下水射流流场及破岩特征数值模拟[J]. 煤矿机械 2019; 6. [MA W T, PAN J F. Numerical simulation



- of water jet flow field and rock breaking characteristics under different nozzle structures. *Coal mining machinery* 2019: 6.]
- [12] 陈廷兵, 廖文玲, 李晓晓. 基于 Fluent 的射流喷嘴结构设计与优化[J]. *成都大学学报 (自然科学版)* 2019: 17. [CHEN T B, LIAO W L, LI X X. Design and optimization of jet nozzle structure based on Fluent. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)* 2019: 17.]
- [13] 施红辉, 王天雨, 董若凌等. 不同喷嘴结构下高压脉冲水射流的数值模拟[J/OL]. *浙江理工大学学报 (自然科学版)* 2020; 10-14: 1-8. [SHI H H, WANG T Y, DONG R L, et al. Numerical simulation of high-pressure pulsed water jet under different nozzle structures[J/OL]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science Edition)* 2020; 10-14: 1-8.]
- [14] 郑红祥, 蒋文春, 张玉福. 高压水射流消除残余应力的喷嘴流场分析[J]. *化工机械* 2019: 12. [ZHENG H X, JIANG W C, ZHANG Y F. Analysis of nozzle flow field for high pressure water jet to eliminate residual stress[J]. *Chemical Machinery* 2019: 12.]
- [15] 谢峻石, 何枫. 收缩喷嘴内部流道型线对射流流场的影响[J]. *机械开发* 2000: 42-48. [XIE J S, HE F. The influence of the inner flow channel profile of the shrinking nozzle on the jet flow field[J]. *Mechanical Development* 2000: 42-48.]
- [16] 程新颖. 水力喷射环空加砂压裂喷嘴结构分析与优化[J]. *石油矿场机械* 2019; 48: 41-45. [CHENG X Y. hydraulic fracturing sand annulus jet nozzle structure analysis and optimization [J] *Oil Field Equipment* 2019; 48: 41-45.]
- [17] 俞建阳, 王若玉, 陈浮, 宋彦萍. 不同亚格子模型的对比分析及其运用[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(11): 2311-2318. [YU J Y, WANG R Y, CHEN F, SONG Y P. Comparative analysis and application of different sub-grid models[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(11): 2311-2318.]
- [18] EGGELS J G M, UNGER F, WEISS M H, et al. Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 268: 175-210.

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)