

水力喷射多簇压裂簇间流量分配特征

张壮壮, 盛茂, 武晓光, 黄中伟*

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: 2021-01-04

北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201911414038)资助

摘要 水力喷射压裂是非常规油气资源的有力增产手段。压裂液簇间流量分配直接影响多簇裂缝起裂与扩展。本文建立了水力喷射多簇压裂环空流动模型, 研究了喷嘴周围的流场特征, 分析了环空流速、射流速度、簇间压差和环空出口压力等关键因素对压裂簇间流量分配的影响规律。结果表明, 环空中速度和压力变化集中于射流周围: 射流中心静压高于环空压力, 射流周围存在低压区和类似点汇流动的特征, 且流场非均匀分布。本文条件下簇间无干扰: 相同孔眼出口条件下最大簇间流量差异仅 0.08 kg/s; 最大簇间裂缝延伸压力差达到 4 MPa, 参考簇流量仅变化 0.05 kg/s; 延伸压力差改变, 各簇孔眼流量仍以同一规律变化。孔眼流量与射流速度、环空出口压力等正线性相关, 环空流速对孔眼流量无影响, 上述因素均不引起簇间流量分配差异。簇间裂缝延伸压力差异是流量非均匀分配的主控因素: 各簇孔眼流量随裂缝延伸压力减小而线性增加; 簇间流量差异和簇间裂缝延伸压力差异呈正线性关系。实验条件下, 环空流速低于 3 m/s 或环空出口压力高于 40 MPa, 压裂液利用效率可达 100%。研究结果可为水力喷射多簇压裂设计提供理论依据。

关键词 多簇压裂; 水力射流; 环空流场; 压裂液运移; 簇间干扰

Fluid flow characteristics in multi-cluster hydra jet fracturing

ZHANG Zhuangzhuang, SHENG Mao, WU Xiaoguang, HUANG Zhongwei

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Hydra jet fracturing is an effective stimulation method for unconventional reservoir exploitations. Fracturing fluid migration in annular influences behaviors of multi-cluster fractures initiation and extension. To investigate the fluid transportation in annular, a model was adopted to figure out the flow field feature around water-jet and the relationship between fluid migration and some key parameters, i.e. annular velocity, jet velocity, fracture extend pressure difference (FEPD) and annular outlet pressure. It demonstrated that flow field variation in annular primarily located around jets. Static pressure in jet-core was higher and pressure-drop zone exists around jets. A point-sink-like flow existed around jets. Simultaneously, the flow field distributed heterogeneously. There was no interference among clusters. In the same situation, maximum flow rate difference between clusters was merely 0.08 kg/s, the variation of referenced cluster flow rate was just 0.05 kg/s, the FEPD among clusters was 4 MPa, and clusters' flow rate changed according to a uniform law as fracture extend pressure changes. A positive relationship existed between clusters' flow rate and nozzle velocity or annular outlet pressure, while annular velocity had no impact. All parameters mentioned above had no influence on flow rate difference. FEPD among clusters was a domain parameter of difference of clusters' flow rate. Flow rate in each cluster increased linearly with FEPD deducing. In addition, the flow rate difference possessed a

引用格式: 张壮壮, 盛茂, 武晓光, 黄中伟. 水力喷射多簇压裂簇间流量分配特征. 石油科学通报, 2023, 03: 318-329

ZHANG Zhuangzhuang, SHENG Mao, WU Xiaoguang, HUANG Zhongwei. Fluid flow characteristics in multi-cluster hydra jet fracturing. Petroleum Science Bulletin, 2023, 03: 318-329. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.023

positive linear trend with FEPD. Utilization of fluid would reach to 100%, when annular velocity was less than 3 m/s or annular outlet pressure surpass 40 MPa in this study. This research may function as a reference in hydra-jet fracturing design.

Keywords multi-cluster fracturing; water jet; annular flow field; fracturing fluid migration; interference between clusters

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.023

0 引言

我国非常规油气资源储量是常规油气的数倍^[1], 高效开发非常规油气对缓解能源压力, 保障能源安全具有重要意义^[2]。多簇体积压裂是开发非常规油气的常用工艺, 水力喷射压裂是实现多簇体积压裂的有力手段。水力喷射压裂是一项射孔、压裂一体化技术, 具有精确定位、水力封隔等优点^[3]。该技术下入深度连续可调且定位准确, 能够提高薄互层油藏开发经济性、提升采收率和增加经济效益^[4]。用水力封隔代替复杂的机械坐封可以提升密簇压裂的可操作性, 促进体积压裂形成复杂缝网。多簇裂缝间的干扰导致地层破裂压力升高并引起水力裂缝非均匀延伸^[5]。而水力射流在孔眼内形成增压、缓解多簇裂缝干扰导致的破裂压力升高并促进裂缝均匀延伸、最终提高采收效果。该技术可为非常规油气藏多簇体积压裂提供重要保障。

1998年, Surjaatmadja^[6]提出水力喷射压裂技术, 实现水力射孔和压裂连作。随后, 诸多学者^[7-9]提出: 连续油管 and 常规油管配合使用增加了水力喷射压裂适用深度; 环空和压裂工具同时注液扩大了作业规模。在水力喷射压裂机理方面, 黄中伟^[10]系统研究了水力喷射辅助压裂过程, 分析了裂缝起裂位置和条件、裂缝延伸特征与机理、裂缝形态等; 并提出“水力密封环”的概念, 认为该密封环是孔道内保持增压原因之一。Sheng M^[12]和范鑫^[13]等研究了水力喷射压裂的封隔机理和影响因素, 分析了延伸压力、油管压力和射流周围压力等之间的耦合作用。曲海^[11]等通过数值方法研究了孔道增压机理和增压规律。磨料射流对压裂工具、套管和地层均有较强的切割和磨蚀能力, 制约了压裂工具使用寿命和工作效率。陈鹏^[14]分析了水力喷射压裂工具内部流场特征和喷嘴周围的受力状态, 提出存在使压裂工具受最小等效应力的最优喷距; 汤积仁^[15]等优化了喷嘴结构, 显著降低喷嘴处的能量损失, 提高了压裂液射流速度和射孔压裂效果; 李臻^[16]等设计了可调角度式水力喷射压裂喷枪并加装护板保护喷嘴免受磨料的磨蚀。张启龙^[17]等人结合渤海地区储层的条件和海上平台作业特点, 分析了水力喷射压裂在海上平台的应用效果, 认为在BZ 19-6油田应用

水力喷射压裂能够显著降本增效, 是该油田重要的增产开发技术后备。

水力喷射压裂的增压、密封和射孔等机理研究相对透彻, 且该技术在多种工况下均有应用。水力喷射压裂射流和环空补液流动之间存在干扰作用, 但干扰作用下环空补液在多簇裂缝间的运移规律尚不明晰。因此本文针对环空流场和压裂液运移规律进行了研究。利用数值模拟分析了水力喷射多簇压裂环空中流场特征、研究了环空流速、射流速度、环空压力和裂缝延伸压力等因素对补液流体运移的影响, 以期水力喷射压裂设计和优化提供参考。

1 模型建立

1.1 几何模型与离散

在5 1/2 in套管中建立直井水力喷射多簇压裂三维物理模型, 如图1所示: 环空长3 m, 井筒内径124 mm, 压裂工具外径108 mm; 三簇孔眼平行布置、每簇一层射孔, 簇间距1 m; 孔眼长0.5 m、相位角120°, 采用实验^[17]测得的纺锤形孔眼; 喷嘴长8 mm、直径6 mm。射流的扩散角引起射流直径随喷距变化, 进而影响套管开口直径。取射流扩散角为28°^[18], 套管开口直径和喷嘴直径满足以下关系:

$$D_i = D_j + 2d \tan(14^\circ) \quad (1)$$

式中, D_i 、 D_j 和 d 分别为套管开口直径、喷嘴直径和喷距。根据计算本文套管开口直径约为9.99 mm。套管开口直径较理论计算略大, 取开口直径为10.2 mm。

采用结构化六面体网格进行空间离散。结构化网格质量高、计算量小、容易收敛。由于计算机限制, 本文模型最大网格尺寸为2.5 mm, 网格数约333万。

1.2 湍流模型

本文研究水力喷射多簇压裂的流场和簇间流体分配特征, 不需要精确刻画流场结构。因此本文选择了计算开销较小的标准k-ε模型。标准k-ε模型是RANS方法中的一种, 该模型适用于高雷诺数湍流场模拟。

结合工况实际和计算流程, 对模型作以下假设:

- (1) 各层喷嘴间距小，忽略重力对流体的影响。
- (2) 采用液态水进行模拟，水的相关参数如表 1 所示。
- (3) 模拟尺度小，温度梯度小，因此不考虑流动过程中的传热。
- (4) 假设地层均质且为逆断层应力状态，易压裂形成水平缝。

标准k-ε模型在雷诺湍流方程的基础上，增加了湍动能k和湍流耗散率ε的计算，二者通过湍动能和湍流耗散率的差分输运方程获得^[19]。湍动能方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}$$

湍流耗散率方程：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}$$

其中 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 和 σ_ε 为常量， $C_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ ； $P_{\varepsilon b}$ 和 P_{kb} 代表了浮力的影响。 μ_t 为湍流粘度：

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

C_μ 为常数， $C_\mu=0.09$ 。 P_k 是由粘性力产生的湍流项：

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

1.3 边界条件和参数设置

边界条件和参数设置如表 2 所示。环空入口和喷嘴均为速度入口。环空和油管的压裂液排量分配比例在 1:4~1:3 之间。结合文献^[13]建议，环空和喷嘴平均速度分别设置为 6.8 m/s 和 260 m/s。设置的簇间距短，因此忽略管柱和环空内摩擦而认为三簇射流速度相同。孔眼出口和环空出口为压力边界，孔眼出口压力相当于裂缝延伸压力。

以上述边界条件为基础，研究了各参数对压裂液运移的影响，参数如表 3 所示。其中，延伸压差为相邻簇水力裂缝的延伸压力差值。由假设 4 可知裂缝延伸受垂向地应力控制，且垂向地应力随埋深线性增加。因此裂缝延伸压力随埋深线性增加，相邻等距簇的裂

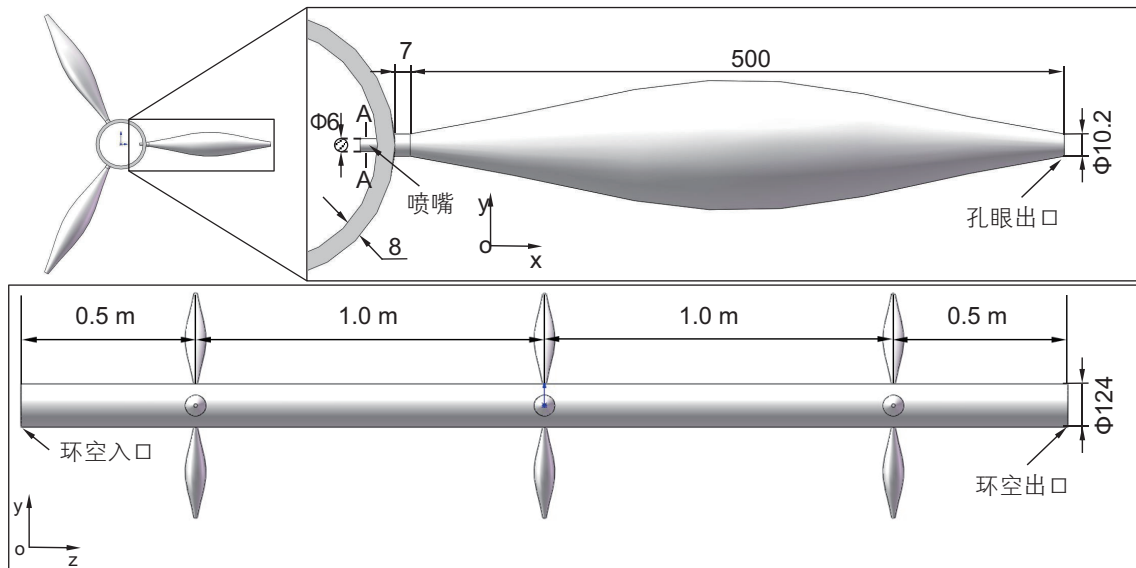


图 1 3D物理模型

Fig. 1 3D geometric model

表 1 液态水的物理参数

Table 1 Properties of water

密度/(kg/m ³)	塑性粘度/(Pa·s)	流变模式
1000.0	0.0010	牛顿模式

缝延伸压力等差减小；环空流速为环空入口的流体注入速度。

2 模型验证

2.1 标准 k-ε 模型适用性分析

自由淹没射流基本段速度沿径向分布具有自相似性，分布规律可由以下经验公式表示^[18]：

$$\frac{u}{u_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{R} \right)^{1.5} \right]^2$$

其中， u 为径向某一点的速度； u_m 为基本段轴心处速度； y 为径向距离； R 为基本段射流半径。

建立如图 2 的物理模型验证了标准 k-ε 湍流模型对于射流流场的适用性。边界条件为：速度入口，260 m/s；压力出口，0 MPa。本文条件下，射流在距射流出口 4.5d 距离处进入基本段。提取距射流出口 10d，15d，20d 距离处的速度沿射流径向分布。结果

如图 3a 所示，射流分布的自相似性规律和经验公式整体吻合，局部无量纲速度略低于经验公式结果。首先，经验公式由测量结果拟合得到，存在测量和拟合上的偏差；其次，结果显示射流和周围流域无明显的界限，本文以径向最小速度(速度不为 0)所对应的半径作为射流半径进行数据处理。整体而言，可认为标准 k-ε 模型适用于本文射流场模拟。

2.2 物理模型合理性验证

有学者^[12]利用单个人工孔眼进行了水力喷射压裂室内实验，提取环空内射流附近压力、油管压力和裂缝延伸压力，定义并计算了面积比(A)、阻尼系数(DF_{num})、低压比(LP_{ratio})等无因次量，研究了静压沿孔眼的分布规律和各压力参数间的作用关系。参数设置和数据处理等可参考文献^[12]。文献结果如图 3b 所示，低压比和阻尼系数在双对数坐标系中呈负线性相关，且纵轴的截距随着面积比增大而增加。

为实现文献^[12]中的条件，本文模型中的上下簇喷

表 2 边界条件设置

Table 2 Boundary condition

环空流速/(m/s)	射流速度/(10 m/s)	延伸压力/MPa	环空出口压力/MPa
6.8	26	40	35

表 3 敏感性参数设置

Table 3 Parameters of sensitivity analysis

序号	环空流速/(m/s)	射流速度/(10 m/s)	延伸压差/MPa	环空出口静压/MPa
1	2~70	26	0	35
2	6.8	20/22/24/28/30/32	0	35
3	6.8	26	0/0.5/1/1.5/2	35
4	6.8	26	0	40/38/36/34/32/30

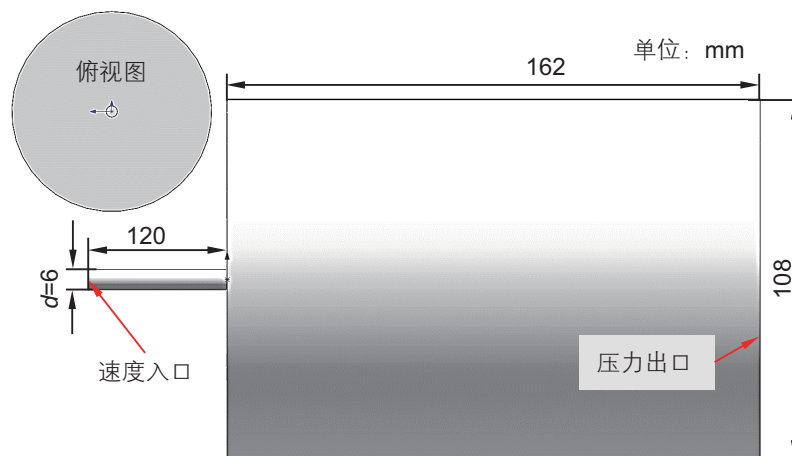


图 2 自由淹没射流模型

Fig. 2 Geometric model of free submerged jet

嘴入口和孔眼出口、环空出口和环空入口等均设置为固壁边界，并采用和文献中相同的数据提取位置和处理方法进行模型验证。通过和文献^[12]对比，裂缝延伸压力采用孔道中的稳定压力而非孔道出口压力；射流附近压力采用环空内和射流位置对应的最小压力；油管压力采用喷嘴入口处压力。边界条件和模拟结果分别如表4和图3b验证数据所示。本文模型面积比为0.34，验证数据点集位于该学者的数据之上，符合面积比与数据点集的关系。且验证数据呈负线性相关，

模拟结果和该学者的实验结果吻合较好。

3 模拟结果与分析

利用表2的边界条件进行模拟，获得了环空流场特征。由于管柱结构和流场具有对称性，因此仅分析与x轴同向的环空流场数据，如图4所示。区域A为环空中面上与射流方向垂直的曲面；垂线L为贯穿环空并穿过区域A的线段，该线段与补液方向平行；曲

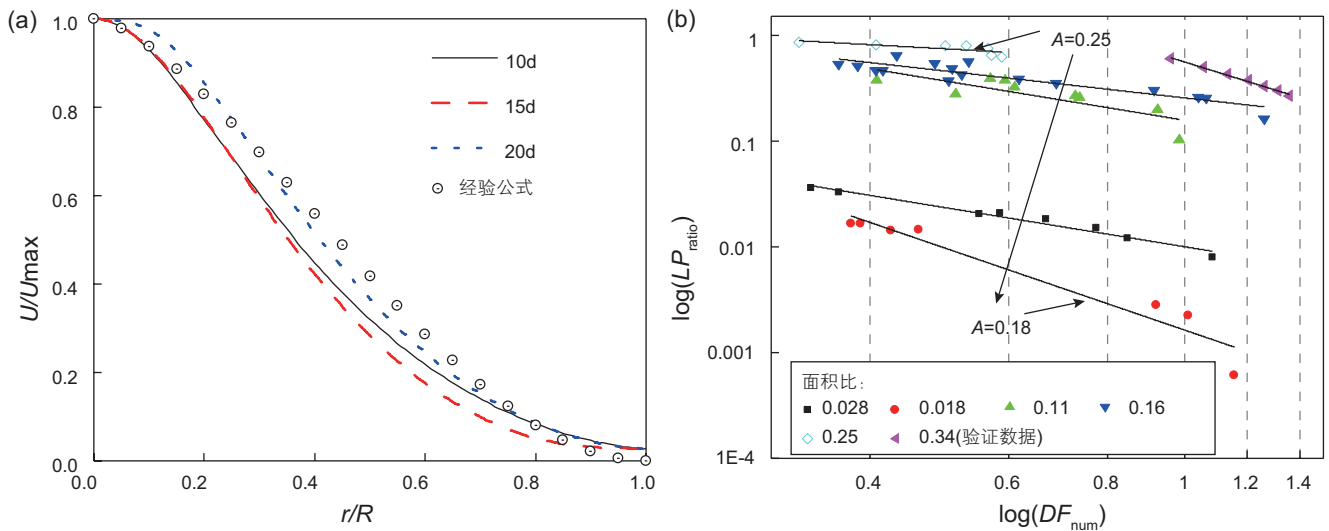


图3 模型验证

Fig. 3 Validation of geometric and mathematic model

表4 模型验证的边界条件

Table 4 Boundary for verification

环空入口	射流速度/(10 m/s)	延伸压力/MPa	其他边界
固壁	26	20~50	固壁

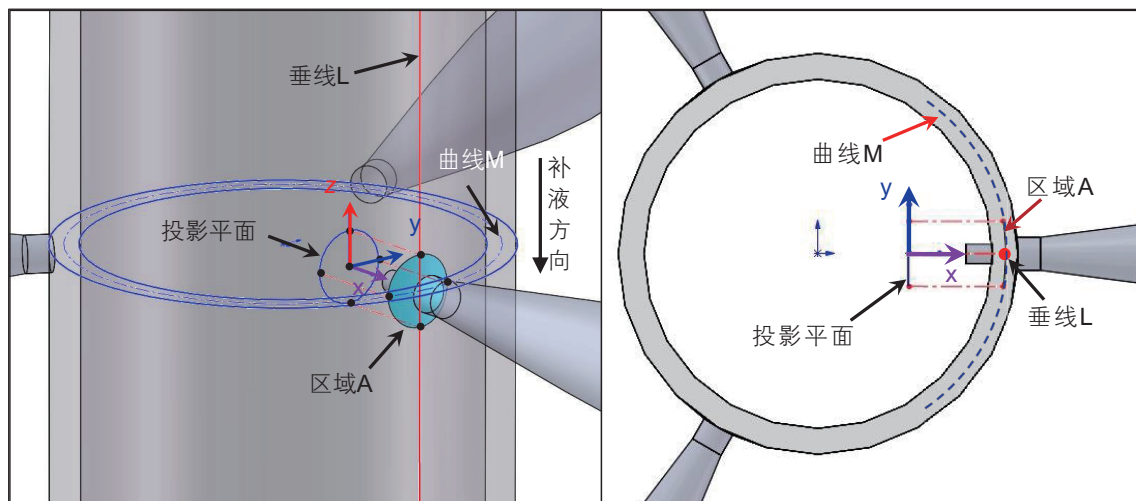


图4 研究区域A及投影面y-z

Fig. 4 Flow area A and y-z plane

线M为环空中面与过孔眼轴线横截面的交线；投影平面为区域A在y-z平面的投影面。

3.1 全局流场特征

图 5a 为计算域内的静压分布。簇间环空静压分布均匀，且低于孔眼内部静压。整个计算域内部静压差异为 11.5 MPa。射流在孔眼内部产生增压，导致孔眼内部静压高于环空静压^[1]。孔眼入口连接环空和孔眼内部，存在显著的静压梯度。各簇孔眼内部静压变化趋势相近。图 5b 为计算域内的速度分布：环空中的流速接近环空注入速度，流速变化集中在射流周围。进入孔眼后能量迅速耗散，射流速度迅速下降；一段距离后，射流结构基本消失、孔眼内流速均匀。

上、中、下簇的喷嘴轴线所对应的纵坐标分别为

1000 mm、0 mm 和 -1000 mm。图 6 为静压和流体速度沿垂线L的分布。静压和速度沿井筒轴向分布整体平稳、局部变化：簇间环空中的静压和速度变化平稳且缓慢；各簇射流周围流场变化剧烈、且速度和静压沿射流轴线均呈不对称分布。簇间环空中的静压沿-z方向逐渐降低；射流对应的范围内静压高于平均值、射流周围的静压低于平均值，差异在 0.2 MPa 左右。

图 7 为曲线M上静压和速度的变化曲线。各簇之间的静压和速度沿曲线M变化趋势相近：均在射流及其周围发生显著变化，远离射流则分布均匀；流场在周向的变化沿y=0 呈对称关系。同图 6a 类似，射流左右两侧存在静压降低区域，同一簇的最大和最小静压差在 0.2 MPa 左右。该处静压降低由高速射流的卷吸作用引起。且射流核心静压沿直径向外递减，最

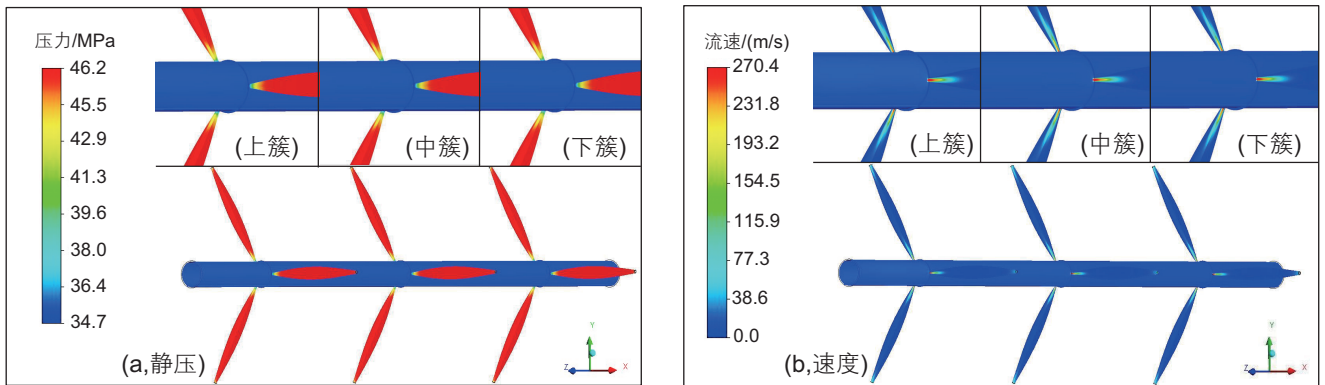


图 5 流域内压力(a)和速度(b)场特征
Fig. 5 Pressure and velocity distribution in flow domain

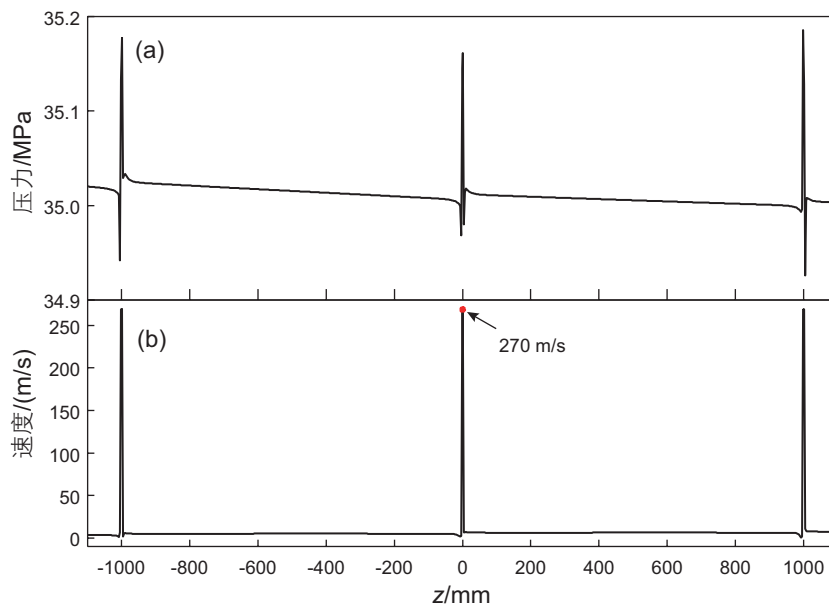


图 6 压力(a)和速度(b)沿直线L的分布
Fig. 6 Pressure(a) and velocity(b) distribution along line L

小静压位于射流外侧一定距离。射流核心处流速为 270.0 m/s, 较喷嘴入口速度高近 10.0 m/s。

由上述分析可知, 计算域内流场可分为 2 个部分: 簇间井筒环空和各簇孔眼内部。井筒环空中流场分布均匀且静压和流体速度小, 压力和速度参数仅在射流周围发生显著变化; 各簇孔眼内部压力和速度参数显著高于簇间环空, 且静压和流体速度变化复杂。各簇孔眼内部压力和速度参数分布几乎相同。

3.2 区域 A 的流场特征

由前述可知, 环空中的流场仅在各簇射流周围剧烈变化。因此, 本节着重分析了各簇射流及其周围的流场特征, 范围如图 4 中区域 A 所示。x 向流速为射流速度, 其显著高于 y 和 z 向流速, 三者难以在同一坐

标系内精确刻画; 且初始环空流速仅具有 $-z$ 向速度。因此, 仅提取射流及其周围的 y 和 z 速度, 分析补液对射流周围流场的影响。

喷嘴附近的压力如图 8 所示。射流附近形成低压区, 且低压区范围向下扩大, 压力降低范围在 0.04~0.15 MPa。低压区围绕射流非均匀分布, 且射流内部的等压线沿补液方向拉伸变形。补液的方向性影响射流各向同性发展, 导致射流中心的等速核拉伸变形和低静压区非均匀分布。图 9 为静压沿垂线 L 的分布特征。射流对应范围静压较高、射流周围静压低, 最大静压为 35.21 MPa、最小为 34.87 MPa。各簇压力变化趋势略有差别且关于 $z=0$ 对称。

射流周围流体的 y 和 z 向速度特征如图 10 所示, 其中红色实线为射流影响范围, 红色虚线为喷

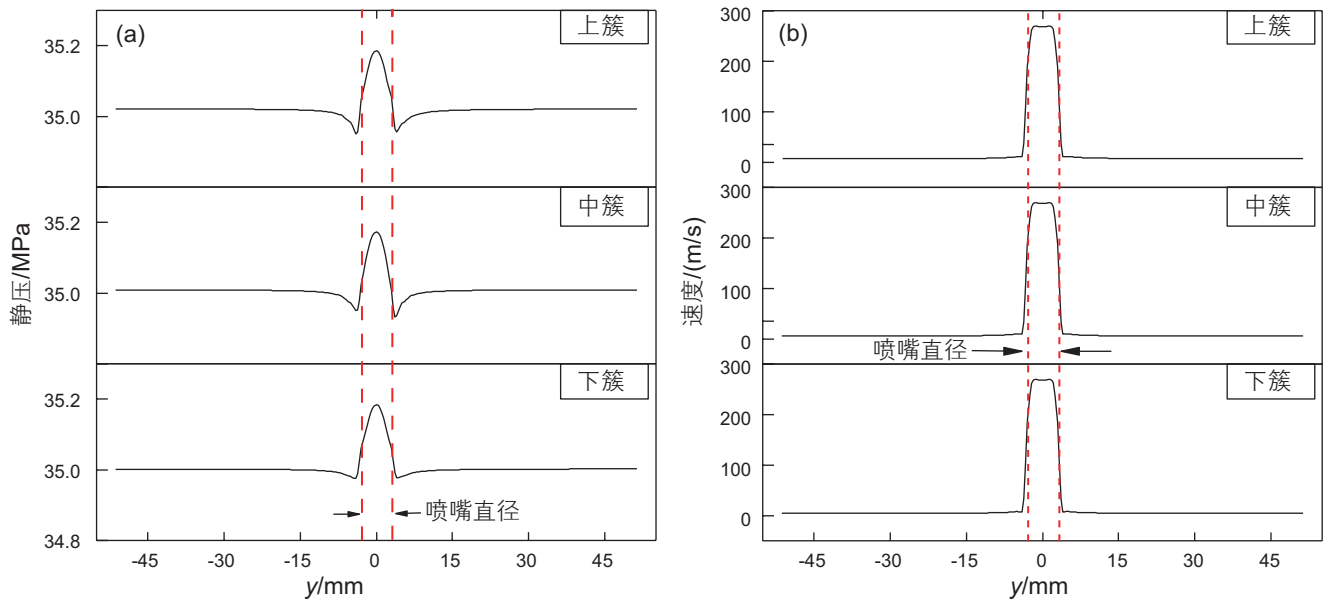


图 7 压力(a)和速度(b)沿曲线M的分布规律

Fig. 7 Pressure(a) and velocity(b) distribution in curve M

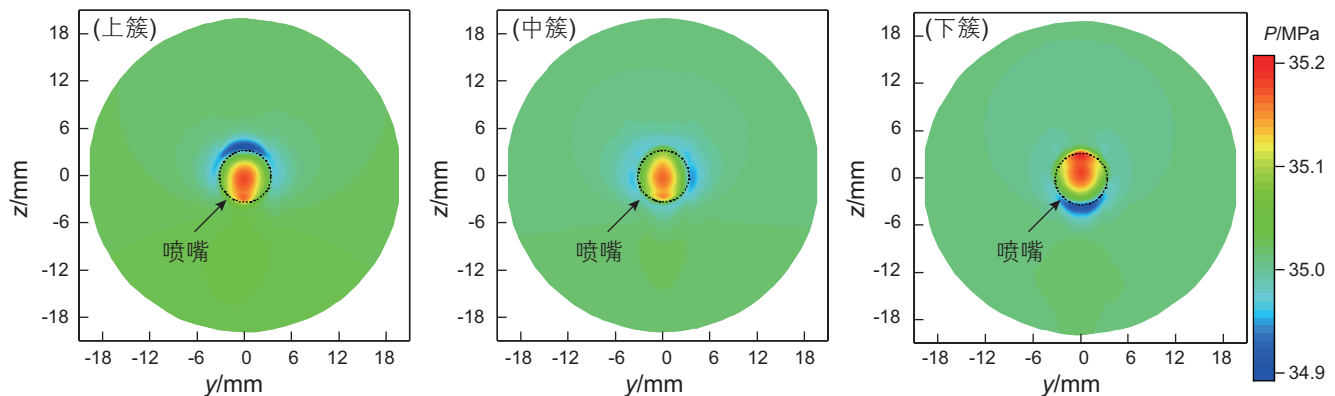


图 8 区域 A 静压场特征

Fig. 8 Pressure field in area A

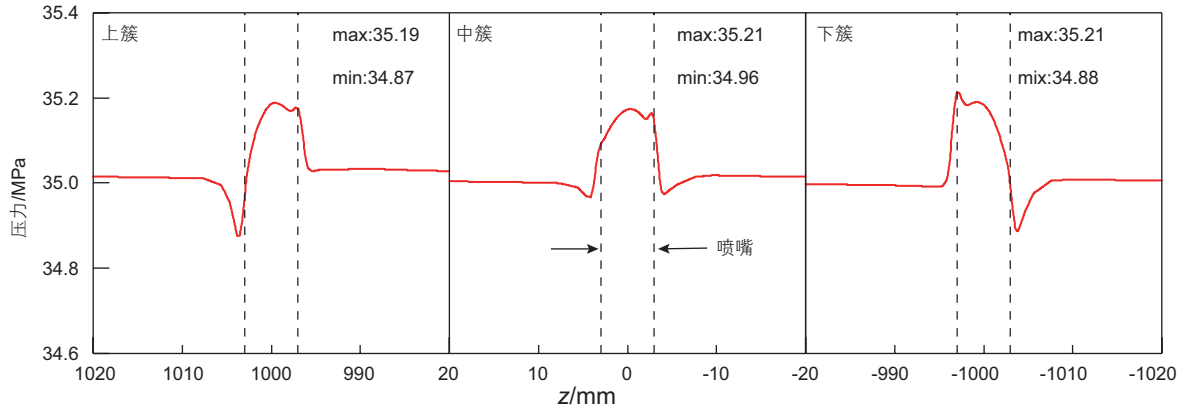


图 9 静压沿垂线L的分布

Fig. 9 Pressure variation along line L

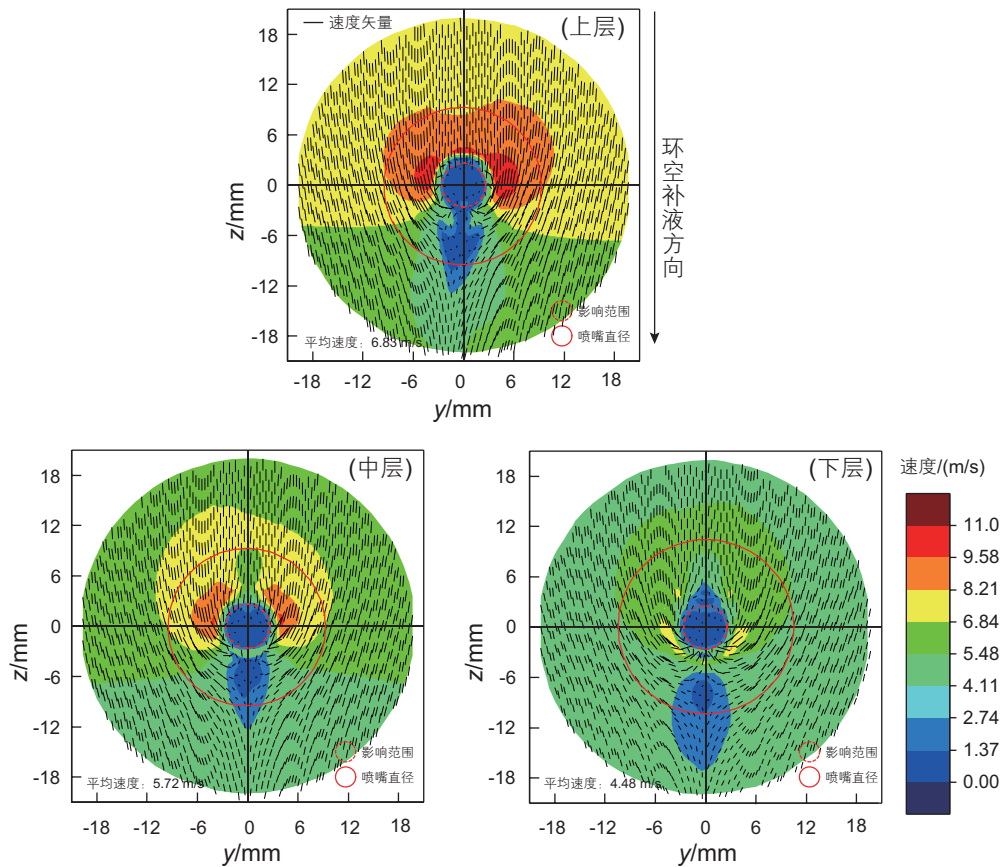


图 10 区域A中y-z向速度分布

Fig. 10 y-z velocity in area A

嘴直径。速度沿 $y=0$ 对称分布，高速区位于喷嘴斜上方，低速区位于射流内部和射流正下方。最大速度为 10.91 m/s ，最小速度为 0.03 m/s ，平均速度由上到下依次为 6.83 m/s 、 5.72 m/s 、 4.48 m/s 。射流内部扩散现象弱、 y 和 z 向速度小；经过各簇射流时，环空补液均有一部分被射流卷吸，导致射流下侧补液流量减小，引起流速放缓。射流周围速度矢量显示了环空补液被

射流卷吸的过程：射流正上方的流体直接被射流拦截而带入射流孔眼中；射流两侧一定范围内的补液被卷吸转向而进入孔眼；流体转向在下方汇合形成低速区，产生类似点汇流动的特征。

速度沿各层喷嘴的水平直径($z=0$)和垂向直径($y=0$)分布如图 11a和图 11b所示。水平方向上速度对称分布，最大速度为 10.62 m/s ；最小速度接近 0 m/s 。

垂直方向速度剧烈变化：喷嘴对应范围内速度不规则波动，范围在 0~2 m/s；喷嘴下、上侧速度剧烈增加。

3.3 敏感性分析

本节研究了工程和地质参数对流体运移影响，详细参数设置如表 3。定义了流体出入比表示压裂液的利用效率。定义式如下：

$$R = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

其中， R 为出入比； Q_{out} 为三簇孔眼流出的流量之和； Q_{in} 为注入环空的流量之和。

(1) 环空流速

图 12a 为孔眼流量随环空流速的变化。环空流

速由 2 m/s 增至 20 m/s，各簇孔眼流量变化最大仅为 0.04 kg/s；超过 20 m/s 后，三簇孔眼流量产生差异且呈下降趋势；超过 55 m/s 后，三簇孔眼流量仍呈下降趋势，但是趋势和大小关系更加复杂。压裂液的利用效率在补液速度达到 70 m/s 后仅为 21%。增加补液排量无法提高各簇孔眼流量；相反，过高的环空流速和射流速度叠加导致射流方向发生显著偏转引起孔眼流量减少。在环空流速为 20 m/s 时，环空和油管的压裂液排量分配比例已达 1:1.14，远超正常范围。环空流速为 2 m/s 时，流体出入比超过 100%。射流卷吸量超过环空补液量后在环空内形成负压，导致环空出口变为入口。有学者^[11]研究发现射流速度提高使环空出口转化为入口、流体流入环空。然而，环空流速过低不

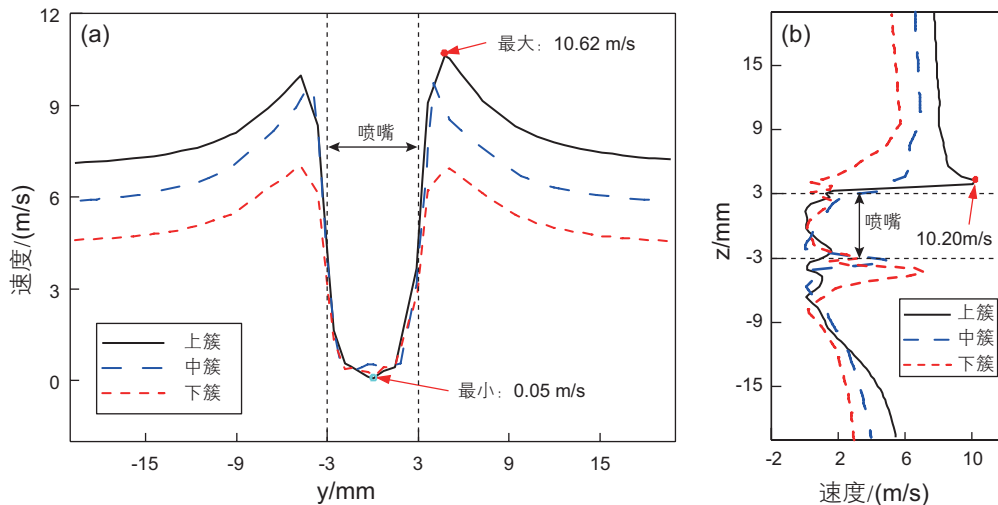


图 11 y-z 速度沿喷嘴径向变化 (a 水平方向, $z=0$; b 垂直方向, $y=0$)

Fig. 11 y-z velocity variation along radius (a horizontal diameter; b vertical diameter)

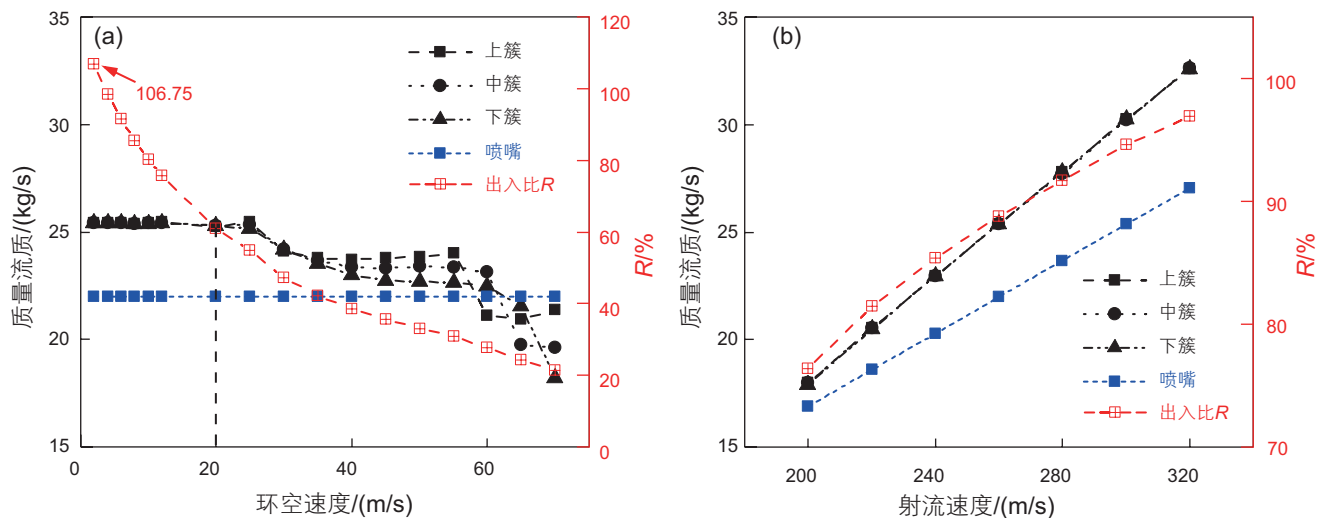


图 12 孔眼流量随环空流速 (a) 和射流速度 (b) 的变化

Fig. 12 Relationship between tunnel flow and velocity (a annular inlet velocity; b jet velocity)

利于压裂施工。为保证压裂液排量，环空流速需控制在合理范围。

(2)射流速度

各簇孔眼流量随射流速度变化如图 12b 所示。各簇孔眼流量随射流速度增加而线性增加。孔眼流量最大增加 81%，高于射流速度增加量 60%；流体出入比由 76.4% 增至 96.9%。首先，射流速度增加直接增加流向孔眼的流量；其次，射流速度增加提升了射流的封隔效果和卷吸能力，各簇孔眼流量和流体出入比增加。同时，不同簇的质量流量无明显差异。

(3)环空出口压力

环空出口压力影响下的各簇孔眼流量变化如图 13a 所示。各簇孔眼流量和环空出口静压呈线性相关。环空出口静压达到 40 MPa 时，流体出入比超过 100%，此时环空出口转化为静压入口。射流在周围形

成的低压低于环空出口静压时，具有指向环空出口的静压梯度，产生指向射流的加速度，环空出口转化为流体入口。

(4)延伸压差

层位深度、岩石性质、地层构造和地应力等导致不同层位地层裂缝延伸压力存在差异，且延伸压力变化复杂。为简化分析过程，设置各簇裂缝延伸压力等差变化。延伸压力差引起孔眼流量变化的结果如图 13b 所示。延伸压力差由 0 MPa 增至 2 MPa，上簇孔眼流量提高 2.73 kg/s、中簇提高 1.33 kg/s。根据流体力学原理可知，裂缝延伸压力降低导致流动压差增大、进而引起孔眼流量越大。上、中簇条件改变未引起下簇流量变化，这进一步说明了多簇水力喷射压裂簇间无干扰。

由图 14 可知，簇间流量差异和簇间裂缝延伸压力

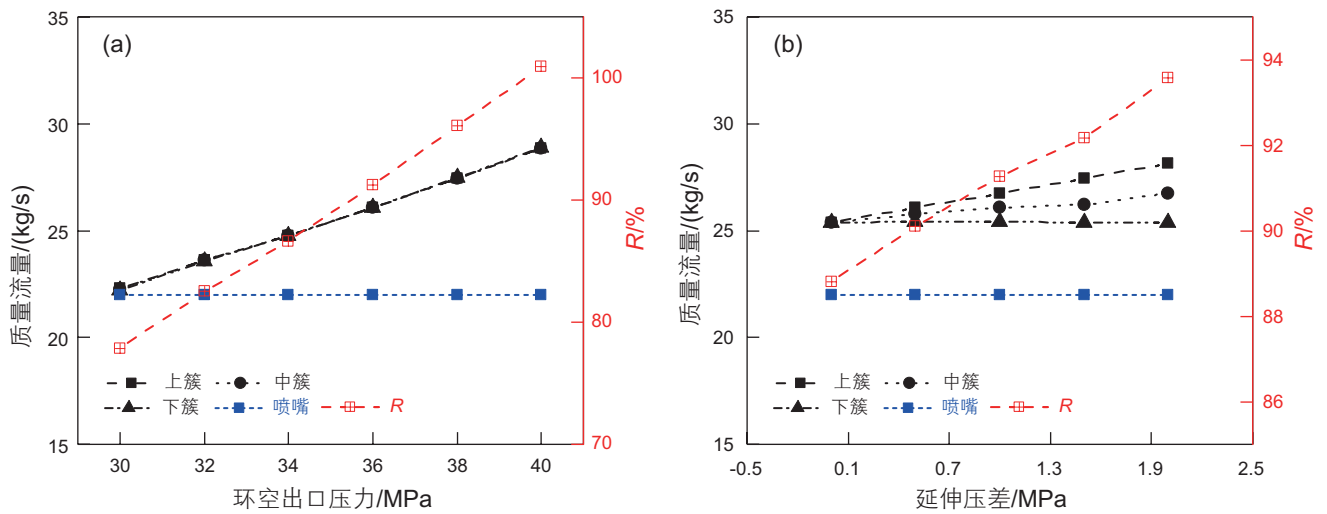


图 13 孔眼流量随环空出口压力 (a) 和延伸压差 (b) 的变化

Fig. 13 Relationship between tunnel flow and pressure(a, annular outlet pressure; b, extend pressure difference)

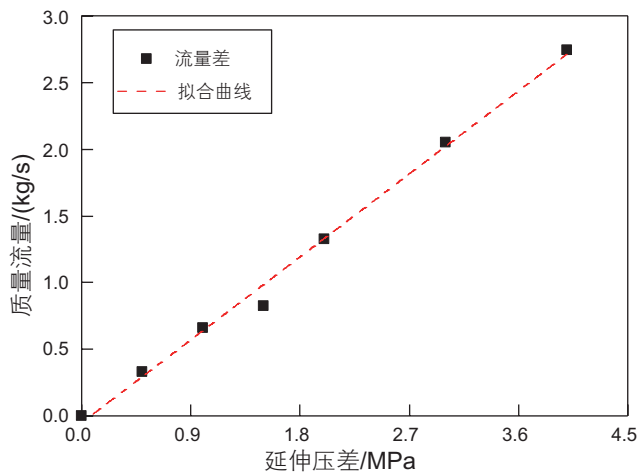


图 14 流量差异随延伸压力差的变化

Fig. 14 Relationship between flow rate discrepancy and extend pressure difference

差异呈线性关系。延伸压差在 0~2 MPa 范围的数据由三簇孔眼平均值或者中簇和下簇得到, 2~4 MPa 范围的数据通过上簇和下簇得到。尽管获得数据的位置有差异, 该组数据仍能满足同一线性关系, 这再次说明簇间干扰小, 各簇流量仅受本簇条件影响。

4 结论

通过数值模拟分析了水力喷射多簇压裂的射流周围流场特征, 研究了射流速度、环空流速、环空出口压力和延伸压力差等因素对各簇孔眼排量的影响, 得以下结论:

(1) 环空补液对射流周围的低压区造成干扰, 导致低压区分布不均匀、不连续; 环空补液的方向性使射

流周围流场取向发生变化, 导致射流等速核沿补液方向拉伸成椭圆状。

(2) 各簇孔眼流量随着射流速度和环空出口静压增加、裂缝延伸压力减小而线性增加。裂缝延伸压力差对簇间流量差异影响较大, 裂缝延伸压力差和孔眼流量呈正线性相关。

(3) 正常工况的簇间流量差异在相同条件下小于 1%, 簇间无明显干扰。一方面由于射流产生的流量占主要部分; 另一方面, 射流水力封隔作用也抑制了层间的差异化。

(4) 研究为水力喷射多簇压裂的工程设计提供了新的思路。研究表明簇间无明显干扰, 因此可根据设计的各簇压裂液排量和地层延伸压力单独设计各簇孔眼和喷嘴尺寸、排量等。

参考文献

- [1] LI Y, ZHOU D H, WANG W H, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. *Energy Geosci.* 2020, 1: 55–68.
- [2] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. *石油学报*, 2020, 41(01): 1–12. [ZOU C N, PAN S Q, JING Z H, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 1–12.]
- [3] 刘永亮, 王振铎, 胥云, 等. 水平井储层改造新方法—水力喷射压裂技术[J]. *钻采工艺*, 2008(01): 71–73+154. [LIU Y L, WANG Z D, XU Y, et al. A new hydraulic jet fracturing technique used for horizontal wells stimulation[J]. *Drilling & Production Technology*, 2008(01): 71–73+154.]
- [4] 朱爱梅. 水力喷射环空加砂压裂在薄互层水平井的应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2014, 33(03): 101–104. [ZHU A M. Application of hydraulic jetting annular sand fracturing for thin interbedded horizontal well[J]. *Petroleum Geology and oilfield Development in Daqing*, 2014, 33(3): 101–104.]
- [5] 李勇明, 陈曦宇, 赵金洲, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(01): 76–83. [LI Y M, CHEN X Y, ZHAO J Z, et al. The effects of crack interaction in multi-stage horizontal fracturing[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2016, 38(01): 76–83.]
- [6] SURAJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B, et al. Hydra jet fracturing: An effective method for placing many fractures in open hole horizontal wells[C]. 1998 SPE International Conference and Exhibition, Beijing, 1998: 263–268.
- [7] SURAJAATMADJA J B, MCDANIEL B W, SRATHERLAND R L. Unconventional multiple fracture treatments using dynamic diversion and downhole mixing[C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Melbourne, 2002: 679–690.
- [8] MCDANIEL B W, WILLETT R, EAST L E, et al. Coiled-tubing deployment of hydra jet fracturing technique enhances safety and flexibility, reduces job time[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 2004: 3083–3093.
- [9] SURAJAATMADJA J B, EAST L E, LUNA J B, et al. An effective hydrjet-fracturing implementation using coiled tubing and annular stimulation fluid delivery[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Woodlands, 2015: SPE 94098.
- [10] 黄中伟. 高压水射流辅助压裂机理与实验研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2007. [HUANG Z W. Fracturing mechanisms and experiments assisted with high pressure water jets [D]. Dongying: China University of Petroleum, East China, 2007.]
- [11] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂孔眼内部增压机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(05): 73–76. [QU H, LI G S, HUANG Z W, et al. Boosting mechanism in hydrjet-fracturing cavity[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2010, 34(05): 73–76.]
- [12] SHENG M, LI G S, HUANG Z W, et al. Experimental study on hydraulic isolation mechanism during hydra-jet fracturing[J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013, 44: 722–726.
- [13] 范鑫, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射多级压裂中水力封隔效果的数值模拟[J]. *石油机械*, 2015, 43 (04): 82–88. [FAN X, LI G S, HUANG Z W, et al. Numerical simulation of effect of hydraulic isolation in hydraulic jet multi-stage fracturing [J]. *CHINA PETROLEUM MACHINERY*, 2015, 43(04): 82–88.]

- [14] 陈鹏. 水力喷射压裂工具内流场与受力研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [CHEN P. The Study of Flow Field and Stress inside the Hydrjet Perforating and Fracturing Tool[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2016.]
- [15] 汤积仁, 卢义玉, 欧阳梦迪, 等. 水力喷射压裂新型喷嘴设计优化及性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(01): 72-78. [TANG J R, LU Y Y, OUYANG M D, et al. Optimal design and performance evaluation of a new hydrjet-fracturing nozzle[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 72-78.]
- [16] 李臻, 刘银磊, 程嘉瑞, 等. 可调角度式水力喷射压裂喷枪设计与优化[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(05): 23-28. [LI Z, LIU Y L, CHENG J R, et al. Design and Optimization of Adjustable Directional Hydraulic Jet Fracturing Spray Gun[J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(05): 23-28.]
- [17] 张启龙, 徐刚, 霍宏博, 等. 渤海中深层探井水力喷射压裂可行性研究[J]. 天然气与石油, 2020, 38(05): 64-70. [ZHANG Q L, XU G, HUO H B, et al. Feasibility Study on Hydraulic Jet Fracturing Technology for Exploration Wells Targeting Middle and deep layer in bohai oilfield[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(05): 64-70.]
- [18] 王瑞和. 高压水射流破岩机理研究[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010: 78-79. [WANG R H. Study on rock breaking mechanism of high pressure Water Jet[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2010: 78-79.]
- [19] ZHANG S K, HUANG Z W, LI G S, et al. et al. Numerical analysis of transient conjugate heat transfer and thermal stress distribution in geothermal drilling with high-pressure liquid nitrogen jet[J]. Appl. Therm. Eng. 129, 2018: 1348-1357.

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)