

大位移井振荡射流压力脉冲减阻工具结构设计 与性能分析

谢小荣^{1,2}, 陈晓斌³, 董晓斌^{1,2}, 唐禄博³, 林凡通^{4*}, 罗嘉瑞³, 苏定立^{1,2}

(1. 广州建研工程科技有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广州建筑股份有限公司, 广东 广州 510030;

3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410000; 4. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100850)

摘要: 大位移井钻进技术为大幅提高页岩气等非常规能源的开采效率提供了可能。然而, 大位移井钻进过程中钻杆与井壁间的摩阻高, 降低了钻进效率。解决当前大位移井或水平井钻井施工过程中摩阻大、托压严重技术难题的有效办法之一是在井下钻具组合中增加可产生振荡功能的减阻工具。但目前此类工具种类少, 且普遍存在工作机理复杂、结构设计困难、工具压力过高的问题。因此, 本文提出了一种压力低、无运动零部件的逆反馈式振荡射流压力脉冲减阻工具。对该工具开展了可视化实验与数值模拟研究, 通过监测工具内部流场的演化阐明了射流振荡器的工作机理, 结果显示压力脉冲的产生是由射流的附壁切换、工具内部涡流的生长与消散等共同组成; 开展了工具脉冲性能研究, 揭示了本工具在不同流量、钻井液密度、粘度等条件下的工作性能。并针对小钻进流量的工况进行了结构优化, 拓展了该工具的工作范围。本文可对大位移井钻进工具的设计提供新的参考。

关键词: 大位移井; 振荡射流技术; 降摩减阻; 页岩气; 钻井工具

中图分类号: TE921; P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0091-08

Structural design and performance analysis of oscillating jet drag reduction tool used in extended reach wells

XIE Xiaorong^{1,2}, CHEN Xiaobin³, DONG Xiaobin^{1,2}, TANG Lubo³, LIN Fantong^{4*}, LUO Jiarui³, SU Dingli^{1,2}

(1. Guangzhou Jianyan Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510420, China;

2. Guangzhou Municipal Construction Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510030, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410000, China;

4. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Beijing 100850, China)

Abstract: The advancement in the drilling technology of large displacement wells has provided a great potential for significantly improving the efficiency of extracting unconventional energy sources such as shale gas. However, the high friction between the drilling rods and the wellbore during the process of large displacement well drilling reduces the drilling efficiency. One effective solution to address the technical challenges of high friction and severe drag in the current construction process of extended reach wells or horizontal wells is to incorporate drag reduction tools capable of generating oscillations into the downhole drilling tool assembly. However, currently, there are few types of such tools, and they generally suffer from complex working mechanisms, difficulties in structural design, and excessively high tool pressures. Therefore, this paper proposes a reverse feedback oscillating jet pressure pulse drag reduction tool with low

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-03-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.011

基金项目: 广东省住房和城乡建设厅研究开发项目(编号: 2022-K29-384697、2021-K1-140626); 广州市建筑集团有限公司科技计划项目(编号: 2023-KJ045、2022-KJ005)

第一作者: 谢小荣, 男, 汉族, 1979年生, 高级工程师, 岩土工程勘察专业, 硕士, 从事岩土工程、地质工程研究工作, 广东省广州市白云区鹤龙街鹤慧北街9号718室, 635937816@qq.com。

通信作者: 林凡通, 男, 汉族, 1996年生, 博士研究生在读, 土木工程专业, 主要从事岩土力学及水下结构工程防护相关研究工作, 北京市海淀区万寿路街道太平路24号院, linfantong@126.com。

引用格式: 谢小荣, 陈晓斌, 董晓斌, 等. 大位移井振荡射流压力脉冲减阻工具结构与性能分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 91-98.

XIE Xiaorong, CHEN Xiaobin, DONG Xiaobin, et al. Structural design and performance analysis of oscillating jet drag reduction tool used in extended reach wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 91-98.

pressure and no moving parts. Visual experiments and numerical simulations were conducted on this tool, and the working mechanism of the jet oscillator was elucidated by monitoring the evolution of the internal flow field of the tool. The results showed that the generation of pressure pulses is composed of phenomena such as the wall attachment and detachment of the jet, as well as the growth and dissipation of internal vortices in the tool. Furthermore, the pulsation performance of the tool was studied, revealing its operational performance under different conditions such as flow rate, drilling fluid density, viscosity, etc. Structural optimization was carried out for conditions of low drilling flow rates, expanding the operational range of the tool. This paper can provide new insights for the design of large displacement well drilling tools.

Key words: extended-reach wells; fluidic oscillating technology; friction reduction; shale gas; drilling tool

0 引言

页岩气是一种高效的清洁能源,据国际能源信息署(EIA)与第四次全国油气资源评价统计,中国页岩气资源储量为80.4万亿 m^3 ,位居世界前列^[1]。自20世纪90年代末,美国、加拿大等发达国家先后开展了页岩气的研究工作,并提高了能源独立性,带来了明显的经济效益^[2-3]。我国从“十二五”时期开始加大页岩气的开发投入,成为了第三个页岩气商业开发的国家^[4]。2016年国家能源局发布《页岩气发展规划(2016—2020年)》,页岩气的发展加速迈进到大规模开发阶段^[5]。

然而页岩气藏的岩石储层一般呈低孔隙度、低渗透率且裂缝发育不足的物性特征,采用常规垂直井钻进方法,开采效率低、成本高^[6-7]。大位移井可以减少钻井工作所需的钻井数量,特别在储层为水平状时,可大大增加钻杆与储层的接触面积从而增加产量^[8]。大位移井自20世纪90年代中期开始在石油工业广泛运用,目前已成为提高页岩气以及构造复杂油气田等低渗透气藏采收率的有效办法^[9]。据预测,对水平长度大于1万ft(3048 m)长水平井的开发,将变得更加普遍,甚至一些现有的垂直井也会被开发成大位移井^[10-11]。

大位移井相较于垂直井技术难度更大,在水平井段,由于重力的影响,钻杆紧贴下井壁,接触面积远大于常规井。且在起定向作用的滑动钻进时,钻柱不旋转,进一步地增加了摩擦力与扭矩,使钻压难以传递到钻头,限制了大位移井的大范围作业能力^[12-13]。在钻具组合中增加轴向振动减阻工具可以将静摩擦变为摩擦系数更小的动摩擦,减小摩阻、提高钻速^[14]。与润滑剂、牵引器等其他常用减阻方式相比,振动工具运行成本低、尺寸更灵活并与其他减阻措施兼容^[15]。目前市场上主要有三大类具有代表性的轴向振动工具,分别是旋转阀脉冲

(RVP)工具、提升阀(PSM)工具以及射流振荡式(FFM)工具^[16]。其中RVP工具技术成熟、性价比高,但此工具长度长、对高温和某些化学物质敏感、维修费用昂贵,其简单的结构也限制了钻井性能的优化^[17-18]。PSM减阻效果好,但耐用性较低、易磨损,不适合大规模推广^[19]。

基于射流元件的FFM工具通过周期性切换的射流来控制活塞的往复运动或改变射流在涡流腔内的运动方式以产生压力脉冲^[20-21]。FFM工具少运动件的设计,缩短了工具长度,并使其结构紧凑、坚固耐用、造斜率高、减阻效果好,增强了在极端恶劣情况下的工作能力,其工程应用效果优于RVP及PSM工具^[16-22]。但其部分产品压降过高,冲蚀现象普遍,内部流体间的相互作用具有多样性,工作机理复杂^[23-24]。且大多由国外油田服务公司研发,租赁、服务费用高昂,国内的相关理论基础薄弱,具有自主知识产权的工具较少。

因此,研制一种新型的无运动件、低压降的FFM类轴向振动减阻工具,可以为射流式振动减阻工具的结构设计和优化提供理论基础,同时为大位移井和水平井降摩减阻技术的提升和进步提供一种新的理论基础和技术手段。

1 结构设计

图1(a)为逆反馈式振荡射流压力脉冲减阻工具(RFOT)的示意图。该工具由基板和盖板组成。将RFOT插入外管后,通过上下接头与钻具相连,即为轴向振动工具。图1(b)是基板与盖板的示意图。工具的内部流道主要设置在基板,由入口、喷嘴、控制通道、反馈通道、涡流腔、出口组成。盖板设置有反馈通道与出口。基板与盖板可以通过螺栓连接,也可以通过3D打印等其他方式加工成一个整体。在控制通道的外侧设置有密封圈,可防止

钻井液的泄露。根据科恩达效应,当流体从入口流入工具后随机附着在一侧的壁面,该部分流体通过涡流腔与反馈通道流至控制通道,对主射流施加横向的推动力,使得射流切换至另一侧,完成一次振荡周期。随后射流会以同样的方式在两侧输出到内周期性的切换,流体的切换会产生压力脉冲,作用于钻杆后进而产生轴向振动。

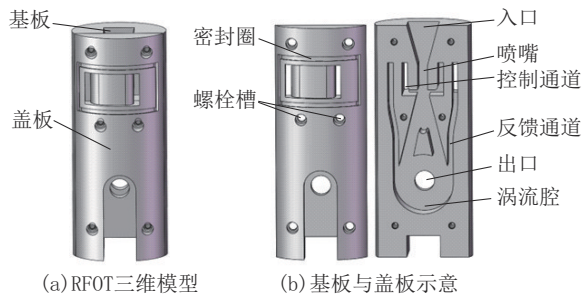


图1 RFOT示意

Fig.1 Schematic of RFOT

2 射流振荡器可视化实验

为清晰地捕捉结构内部的流场信息,观测振荡器内部流体的运动方式,设计了亚克力材料的可视化实验工具(如图2所示)。将该工具的入口改为从垂直于盖板的方向,并将一侧的弧形反馈通道从入口上方绕过。为便于收集出口处的流体,在出口处设置了朝下的长方体通道。



图2 RFOT可视化实验实物

Fig.2 RFOT visualization experimental setup

如图3所示,与离心泵相连的管路通过螺纹与入口连接。图3(a)为流体进入射流振荡器的初始状态,流体均匀的进入两个输出道。由于Coanda效

应,射流附壁随机到左侧输出道(图3b)。随着射流在左侧输出道内的发展,流速加快,部分流体通过右侧的反馈通道对主射流施加向右的横向推动力(图3c)。图3(d)时,射流开始向右侧偏转,随后切换至右侧(图3e、f)。此时流体完成了半个周期的切换,随后流体将以同样的方式切换回左侧。通过可视化实验观察到的流体运动方式证明了逆反馈式振荡射流压力脉冲减阻工具原理的可行性。

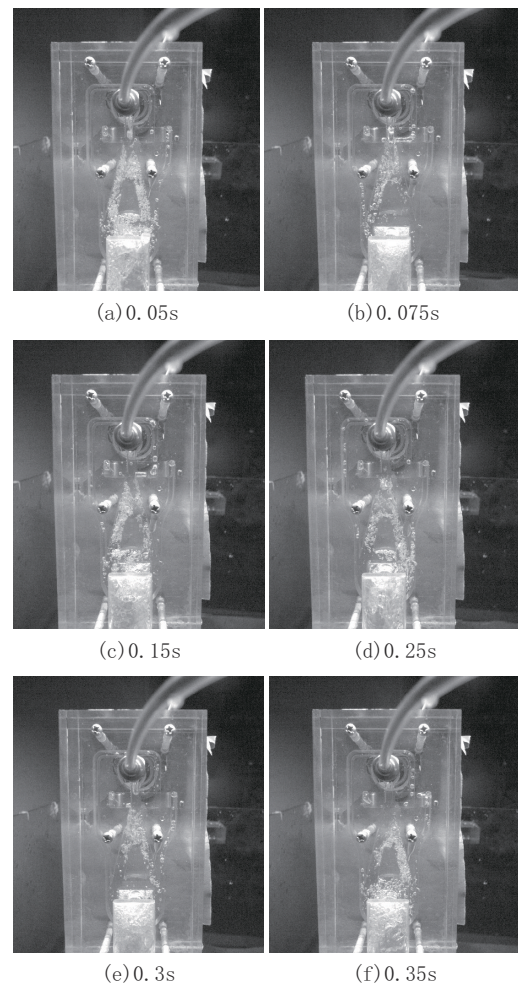


图3 RFOT一个切换周期的流体切换示意

Fig.3 Schematic of the fluid switch with one switching cycle

3 压力脉冲产生机制及射流切换机理

3.1 数值模拟方法

控制方程求解之前,首先需要对其进行离散。CFD技术中,采用基于结构网格中心的有限体积法(FVM)将流体场离散为多个控制体,并对离散化的控制方程进行求解。在本文中,控制方程、散度项和插值项均采用QUICK格式离散。该格式在结构

网格条件下计算旋转流场与涡流能够提供更好的准确性,适用于射流振荡器的模拟。其次,流体的流动首先遵循以下3个基本原则:质量守恒、动量守恒和能量守恒。

由于射流振荡器内部存在明显的湍流流动,因此,耦合湍流方程非常必要。根据学者研究,Realizable $k-\epsilon$ 湍流方程可提供旋流修正,对旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离有很好的表现,适用于射流振荡器模拟,因此,本文采用该湍流模型。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \\ & \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

最后,对离散化的控制方程进行求解。目前常用的解法为基于压力的分离式解法,该方法按照压力、速度的求解顺序对各变量的代数方程组逐个求解。在CFD技术中,PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)算法为一种压力与速度耦合的方法,其计算速度和精度均较为优异,可较好地解决瞬态问题,因此,本文选择PISO算法来求解离散后的控制方程。在PISO算法中,动量方程的半离散化方程及Poisson压力方程为:

$$A_P U_P^* + \sum A_N U_N^* - S_P' = -\nabla p \quad (3)$$

$$\sum H b_j A_f^{t+\Delta t} \cdot S_f = \sum \frac{1}{A_{P,f}} \left(\frac{1}{V_P} \sum p_f^{t+\Delta t} S_f \right) \cdot S_f \quad (4)$$

式中: A_P 、 A_N ——分别为与当前单元 P 和相邻元素 N 相关的系数; U_P^* ——单元 P 中心点处的质量平均预测速度(predicted mass-average velocity),其中 $*$ 代表预测; S_P' ——单元 P 中心处的当前加速度,上标 t 表示当前时间步; ∇p ——压力梯度项。

3.2 RFOT工作机理分析

图4为工具入口与右侧控制端口(控制通道靠近喷嘴的部位)的压降与流量变化图。由于此处仅进行对应分析,将流速进行了归一化。当入口压力

最大时(a时刻),射流在涡流腔内的发展最充分、流速最快,导致憋压严重。此时主射流正在向右侧偏转,流体的流动路径大,沿程损失高,也造成了压降的增加。与此同时,流体从右侧反馈通道流向左侧控制端口,对主射流施加向右的推动力,当施加的力达到临界值后,使得主射流切换到右侧(如b、c时刻所示)。c时刻入口压降最小,此时流体刚切换至右侧,流体直接流向出口,在涡流腔内没有形成高速涡流。随着射流在涡流腔内不断发展,流速最高时,压降又达到了最大值。随后流体以相同的方式切换回左侧(如d、e、f时刻所示),完成一次切换周期。

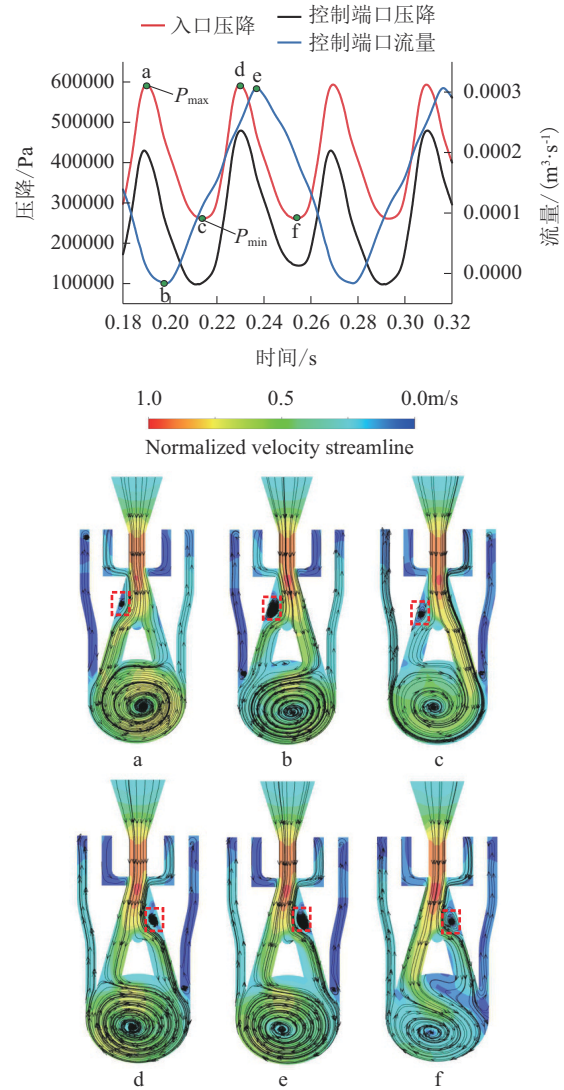


图4 RFOT内部不同位置的流量与压降示意图及关键时刻的内部流场云图

Fig.4 Pressure pulsation at different positions inside RFOT, and internal flow field contour at key moments

从图4中看出,右侧控制端口每个周期的压降峰值不一致。a时刻压降是小波峰,因为此时射流振荡器内整体压降大,带动该处压降也处于峰值。d时刻,右侧控制端口压降为大波峰,这是由于不仅此时射流振荡器内整体压降大,且流体从左侧反馈通道流向右侧控制端口,导致了压降进一步增大。

右侧控制端口的流量到达峰值的时间慢于压降变化(如b、e时刻所示),这是由于射流振荡器内部的相位延迟作用。当涡流腔内流速最大时(d时刻),涡流腔内的高速流体未进入反馈通道,射流发展一段时间后,该部分高速流体流回右侧端口(e时刻),此时右侧端口的流量最多。而涡流腔内的高速流体通过右侧反馈通道流向左侧的时候(a、b时刻),右侧端口流量最小。

图4也显示了一个振荡周期内的射流元件内部流场流线图,在a时刻,振荡腔左部出现一个小分离

涡,该涡流可促进射流向右切换。如b时刻所示,随着切换的进行,该涡流逐渐发育并占据主导作用。当射流接近切换到右侧时,该涡流开始逐渐消散(如c时刻所示)。随着流体从左侧的反馈通道返回至喷嘴给主射流施加向左的推动力,主射流开始向左运动。在振荡腔的右侧开始出现新的分离涡,并随着射流的切换而发育与消散。由此可以看出,射流振荡器的工作机理由射流的附壁、涡流的发展与消散等复杂流体行为共同作用组成。

4 射流振荡器性能实验与模拟

图5为射流振荡器性能实验示意图。射流振荡器的基板与盖板通过螺栓连接,并装入外管中,与上下接头通过螺纹连接。装配完成后,上接头通过管路与高压离心泵相连,将传感器接入上接头中预留的孔道,并与数据采集系统连接,完成现场实验的准备工作。



图5 RFOT性能实验示意

Fig.5 Schematic of RFOT performance experiment

4.1 性能实验与数值模拟验证

如图6所示为射流振荡器的实验数据与CFD模拟数据得到的结果对比。由图6可知,通过实验与数值模拟计算得到的频率十分接近,频率与流速呈线性关系。随着流量从0.25 L/s增加至1 L/s,频率从3.2 Hz增加至12.5 Hz。如图7所示,压力随流量的增加指数增长。实验得到的压降大于数值模拟得到的压降,且流量较小时,实验得到的压降与CFD模拟得到的压降比较接近,当流量加大时,实验得到的压降与CFD模拟得到的压降误差开始增大。这是因为数值模拟计算的压降为入口面的平

均压降,而实验测得的压降为上接头处的压降,该位置管径较小,使压降增大。

4.2 钻井液密度与粘度对工具性能的影响

常用钻井液密度为1000~1600 kg/m³,因此,选用流量为2 L/s,钻井液密度为1000、1200、1400、1600 kg/m³的变量来探究该因素对射流振荡器工作性能的影响。如图8所示,随着钻井液密度的增加,平均压降与压力脉冲幅度都线性增加。这是由于同体积的液体质量线性增加,导致工具内部憋压能力增强,压力升高。当钻井液密度从1000 kg/m³增加至1600 kg/m³时,平均压降增加了61.9%,压力脉

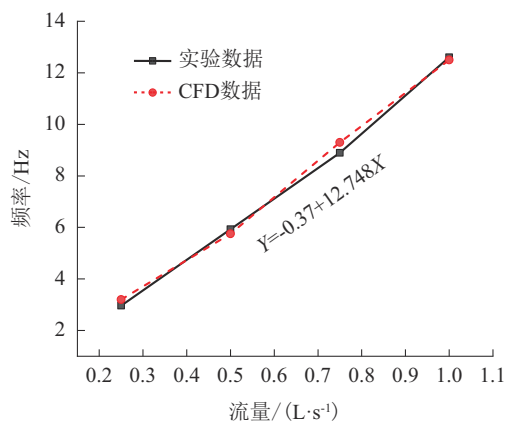


图6 不同流量下实验与CFD模拟的频率对比

Fig.6 Frequency comparison between experimental and CFD simulated results at different flow rates in RFOT

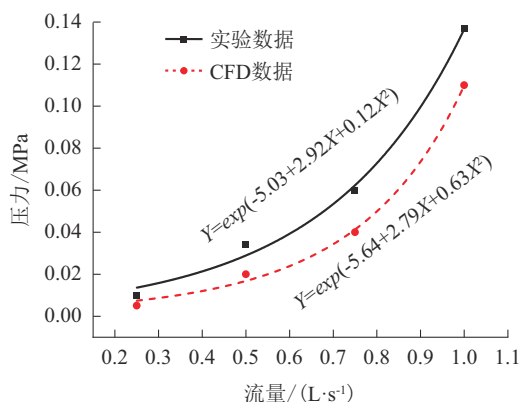


图7 不同流量下实验与CFD模拟的平均压力对比

Fig.7 Average pressure drop comparison between experimental and CFD simulated results at different flow rates in RFOT

冲幅度增加了84.8%,由此可见,钻井液密度对压力脉冲的影响较大。图8显示钻井液密度对振荡频率的影响不大,说明在一定范围内,钻井液密度增加不会影响工具内部流体的流速,且振荡频率保持稳定。

图9所示为钻井液粘度对工具性能的影响。随着钻井液粘度的增加,平均压降、压力脉冲幅度与频率都线性降低。这是由于浆液粘度增加,降低了流体的流动能力,而该射流振荡器的工作性能是依靠流体在工具内部的流动来提供的。因此,粘度与压力、频率都呈负相关。当在实际工程中使用本文提出的射流振荡器时,建议使用低粘度的钻井液。

如图10所示,将本文提出的RFOT工具与市场

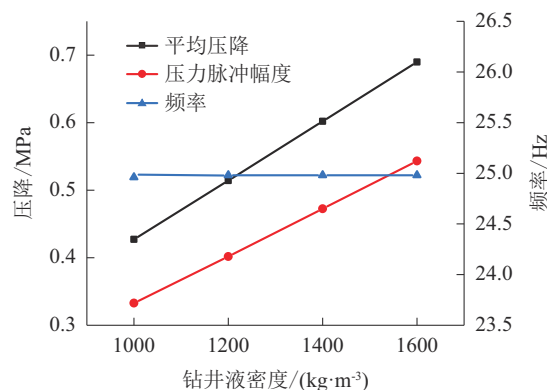


图8 钻井液密度对工具性能的影响

Fig.8 The impact of drilling fluid density on tool performance

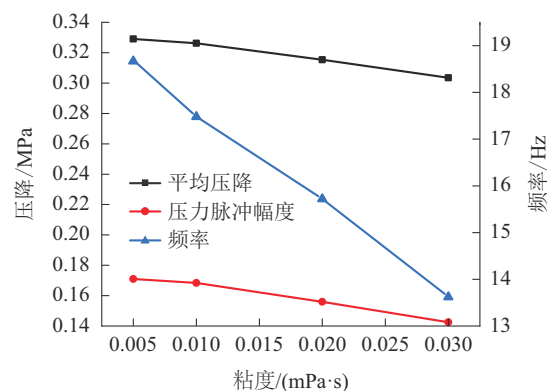


图9 钻井液粘度对工具性能的影响

Fig.9 The impact of drilling fluid viscosity on tool performance

上常见的FFM类工具——XRV,在8 L/s的流量下进行对比,结果显示,压力脉冲的平均值、最小值、最大值分别降低了42.4%,32.9%,40.8%,有效缓解了射流振荡式工具压降较大的问题。

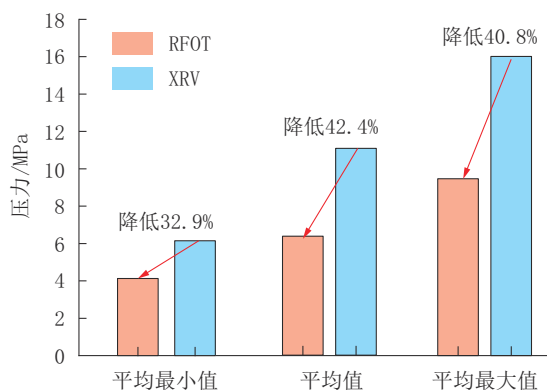


图10 RFOT与XRV的压力对比

Fig.10 Performance comparison of RFOT and XRV

4.3 射流振荡器结构优化

上述射流振荡器适用于较大流量的工作环境使用,为扩展射流振荡器的使用范围,设计了一种适用于小流量工况的射流振荡器(如图11所示),该射流振荡器减小了劈尖距、出口尺寸、喷嘴宽度、流道厚度等关节结构参数,并对反馈通道长度、控制通道厚度等参数进行了优化。

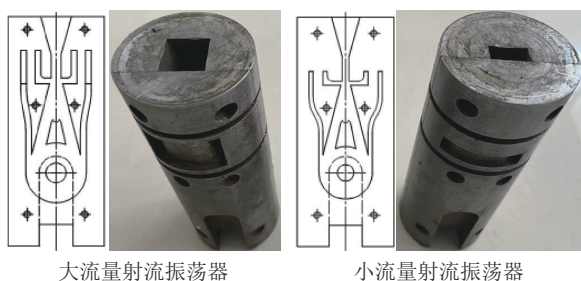


图11 大流量与小流量射流振荡器设计对比

Fig.11 Comparison of high-flow and low-flow fluidic oscillators design

选取0.25、0.5、0.75、1 L/s的流量对该射流振荡器进行实验。图12为实验测得的小流量射流振荡器在不同流量下的频率曲线。图13所示为通过实验与数值模拟得到的小流量射流振荡器的压力。结果显示通过实验与模拟得到的实验频率都随着流量的增加线性增加,但实验数据大于数值模拟得到的频率。这可能是由于加工造成的误差使射流振荡器不对称。射流在切换过程中,在一侧的壁面还未充分附壁就开始切换,增大了频率。结果显示,实验得到的平均压降仍大于CFD模拟得到的压降,其中实验得到的平均压降范围为0.12~1.48 MPa,而大流量射流振荡器在0.5~2 L/s流量范围内压降为0.03~0.56 MPa。因此,新设计射流振荡器在小流量的条件下增加了压降,为射流振荡减阻工具在不同工作环境中的使用提供了参考。

5 结论

针对大位移井钻进过程中的高摩阻问题,提出了逆反馈式振荡射流压力脉冲减阻工具。进行了一系列工具可视化实验、性能实验及数值模拟研究,并为城市地下空间开发利用所面临的钻进高摩擦阻力等问题提供技术支持。研究工作得到的主要结论如下。

(1)研发了长度短、无运动零部件、全金属逆反

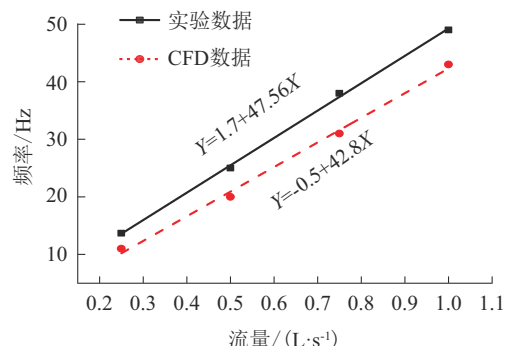


图12 不同流量下小流量工具实验与CFD模拟的频率对比

Fig.12 Frequency comparison between experimental and CFD simulated results of low-flow tools at different flow rates

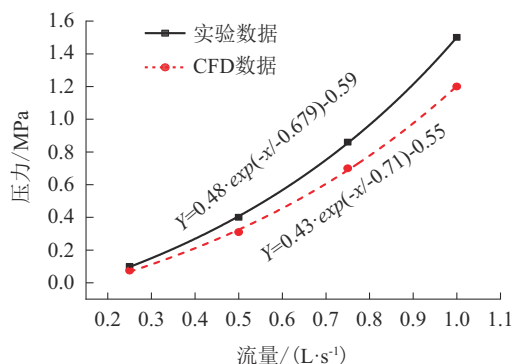


图13 不同流量下小流量工具实验与CFD模拟的压降对比

Fig.13 Pressure comparison between experimental and CFD simulated results of low-flow tools at different flow rates

馈式振荡射流压力脉冲减阻工具,为新型射流振荡式工具的结构设计提供了借鉴。

(2)通过可视化实验与工具内部流场数值模拟,揭示了射流振荡器的工作机理由射流的附壁切换、涡流的生长与消散等共同作用,通过监测工具不同流道的流量与压力脉冲分析了工具流场演化规律。

(3)对该工具进行了实验研究,得到了不同流量、钻井液密度、粘度的平均压降与振荡频率。结果显示,该工具解决了射流振荡式振动减阻工具普遍存在的高压降问题。并提出了一种适用于小流量范围下的射流振荡器,在流量较小的情况下展示了良好的工作性能。

(4)未来可采用人工智能、拓扑优化等方式进一步优化工具结构,使其适用于各种复杂工况;另

外浆液的流变性对射流振荡器工作性能的影响也应被考虑,针对钻井液为牛顿流体、宾汉姆流体、赫巴流体时的工况,设计不同结构的射流振荡器。

参考文献(References):

- [1] 王宗礼,姜钰,潘继平.中国油气资源勘探开发现状与发展前景[J].国际石油经济,2017,25(3):1-6.
WANG Zongli, LOU Yu, PAN Jiping. China's oil & gas resources exploration and development and its prospect[J]. International Petroleum Economics, 2017,25(3):1-6.
- [2] 张金成.第一性原理思维法在页岩气革命中的实践与启示[J].钻探工程,2022,49(2):1-8.
ZHANG Jincheng. First principle thinking promotes innovation of shale gas revolution[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):1-8.
- [3] 徐祖新,姜文亚,刘海涛.常规与非常规油气关系研究现状与发展趋势[J].油气地质与采收率,2016,23(3):14-19.
XU Zuxin, JIANG Wenya, LIU Haitao. Research status and development tendency of the relationship between conventional and unconventional oil and gas[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016,23(3):14-19.
- [4] 贾凌霄,田黔宁,张炜,等.全球非常规天然气发展趋势:国际市场融合与探采技术进步[J].中国矿业,2018(5):1-8,27.
JIA Lingxiao, TIAN Qianing, ZHANG Wei, et al. The trend of global unconventional natural gas development: International market integration and exploration technology progress[J]. China Mining Magazine, 2018(5):1-8,27.
- [5] 国家能源局.页岩气发展规划(2016—2020年)[Z].北京:2016. National Energy Administration. Shale Gas Development Plan (2016—2020)[Z]. Beijing: 2016.
- [6] 吴尤.页岩气录井技术进展及展望[J].钻探工程,2022,49(5):171-176.
WU You. Progress and prospect of shale gas mud-logging technologies[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):171-176.
- [7] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic characteristics and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):7-12.
- [8] 陈立强,王晓鹏,吴智文,等.渤海油田大位移井下套管设计难点及对策研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):23-30.
CHEN Liqiang, WANG Xiaopeng, WU Zhiwen, et al. Casing running design difficulties and solutions for extended reach wells in Bohai Oilfield[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):23-30.
- [9] 苏义脑,窦修荣.大位移井钻井概况、工艺难点和对工具仪器的要求[J].石油钻采工艺,2003,25(1):6-10.
SU Yinao, DOU Xiurong. Overview of drilling for high-displacement wells, process challenges, and requirements for tools and instruments[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(1):6-10.
- [10] Al-Buali M H, Dashash A A, Al-Shawly A S, et al. Maximizing coiled tubing reach during logging extended horizontal wells using E-line agitator[C]//Kuwait City: Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [11] Livescu S, Craig S. A critical review of the coiled tubing friction-reducing technologies in extended-reach wells. Part 2: vibratory tools and tractors[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018,166:44-54.
- [12] Abdo J, Al-Sharji H. Investigation of inducing vibration to reduce friction of coiled tubing in deep drilling operations[R]. Montreal: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.
- [13] Hu Y Q, Zhao J, Zhao J Z, et al. Coiled tubing friction reduction of plug milling in long horizontal well with vibratory tool[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,177:452-465.
- [14] 付加胜,李根生,史怀忠,等.井下振动减摩技术研究进展[J].石油机械,2012,40(10):6-10.
FU Jiaosheng, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Research progress of the downhole vibration antifriction technology[J]. China Petroleum Machinery, 2012,40(10):6-10.
- [15] Tang L B, Zhang S H, Zhang X X, et al. A review of axial vibration tool development and application for friction-reduction in extended reach wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021,199:108348.
- [16] McIntosh T, Baros K J, Gervais J G, et al. A vibratory tool study on extended reach horizontals during coiled tubing drillout in the Eagle Ford Shale[C]//Houston: Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [17] Alali A, Barton S P. Unique axial oscillation tool enhances performance of directional tools in extended reach applications[M]. Brasil Offshore Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [18] Benson A, Elfar T, Sew B, et al. Coiled tubing excitation technology leads to greater reach in the wellbore[C]//Kuala Lumpur: Offshore Technology Conference, 2016.
- [19] Hilling S, Ayling G, Yeung J. Optimizing coil tubing extended-reach capabilities through the application of downhole friction reduction tools[C]//Woodlands: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [20] Standen R, Brunskill D J. Fluidic impulse generator: 2012/0312156 A1[P]. 2012.
- [21] Schultz R L, Connell M L, Ferguson A M. Vortex controlled variable flow resistance device and related tools and methods: 2012/0292018 A1[P]. 2012.
- [22] Zhang X X, Peng J M, Liu H, et al. Performance analysis of a fluidic axial oscillation tool for friction reduction with the absence of a throttling plate[J]. Applied Sciences, 2017,7(4):360.
- [23] Tang L B, Chen X B, Zhang X X, et al. Numerical analysis and experimental study on slurry diffusion characteristics of vortical oscillatory grouting technology considering soil interface[J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 013313 (<https://doi.org/10.1063/5.0188294>).
- [24] 张闯,隆威,李建中,等.沙漠地区大直径顶管施工护壁减阻浆液研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):177-184.
ZHANG Chuang, LONG Wei, LI Jianzhong, et al. Research and application of wall-reducing slurry for large diameter pipe jacking in desert area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):177-184.

(编辑 荐华)