



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 基于压差法的水平井岩屑床轴向运移规律研究

荆思霖 宋先知 孙一 许争鸣 周蒙蒙

### Study on Axial Transport Laws of Cuttings Bed in Horizontal Wells Based on a Differential Pressure Method

JING Silin, SONG Xianzhi, SUN Yi, XU Zhengming, ZHOU Mengmeng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024007>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 气顶边水窄油环水平井生产压差调控实验研究

Experimental Study on the Draw-Down Pressure Control of Horizontal Wells with Gas-Cap/Edge Water Narrow Oil Rims

石油钻探技术. 2019, 47(1): 90–95 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018152>

#### 大斜度井段岩屑床休止角预测模型的建立及修正

The Establishment and Correction of a Prediction Model for the Repose Angle of a Cuttings Bed in Highly Deviated Well Interval

石油钻探技术. 2019, 47(4): 22–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019039>

#### 基于井眼清洁程度与水力学耦合的环空压耗最小化计算方法

A Method for Minimizing Annulus Pressure Loss by means of Hole Cleaning and Hydraulics Coupling

石油钻探技术. 2020, 48(2): 56–62 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020009>

#### 偏心环空中幂率流体层流动特性数值模拟研究

Effects of the Inner Pipe Rotation and Rheological Parameters on the Axial and Tangential Velocity Profiles and Pressure Drop of Yield Power-Law Fluid in Eccentric Annulus

石油钻探技术. 2020, 48(4): 37–42 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020066>

#### 力化耦合作用下的层理性页岩气水平井井壁失稳研究

Study on Wellbore Instability of Bedded Shale Gas Horizontal Wells under Chemo-Mechanical Coupling

石油钻探技术. 2020, 48(1): 26–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020010>

#### 榆林气田标志层法和沉积旋回法水平井导向技术

A Geo-Steering Technique Using Marker and Sedimentary Cycles in Horizontal Well Drilling in the Yulin Gas Field

石油钻探技术. 2018, 46(6): 39–46 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018113>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2024007

引用格式: 荆思霖, 宋先知, 孙一, 等. 基于压差法的水平井岩屑床轴向运移规律研究 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 54-61.

JING Silin, SONG Xianzhi, SUN Yi, et al. Study on axial transport laws of cuttings bed in horizontal wells based on a differential pressure method [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(1): 54-61.

## 基于压差法的水平井岩屑床轴向运移规律研究

荆思霖<sup>1</sup>, 宋先知<sup>1</sup>, 孙一<sup>1</sup>, 许争鸣<sup>2</sup>, 周蒙蒙<sup>1</sup>

(1. 油气资源与工程全国重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了明确长水平段水平井旋转钻进工况下水平段岩屑床的轴向运移规律, 开展了基于压差法的水平井岩屑运移试验。利用设置在井筒轴向不同位置的多个压差传感器, 测量井筒的瞬时压降, 用来表征岩屑床在井筒中的轴向分布, 并据此计算了岩屑床运移速度, 分析了流体密度、排量、转速对岩屑床运移速度和压降的影响规律。结果表明: 该方法能够表征岩屑床运移特征, 精细刻画了岩屑床在井筒轴向位置的分布; 岩屑床运移速度与流体密度、排量和转速呈正相关关系; 排量增大, 可显著提高岩屑床运移速度, 但压降迅速增大限制了加快清岩的最大排量; 转速增大, 能够提高岩屑床运移速度, 且对井筒压降基本没有影响。研究结果明确了水平井岩屑床的轴向运移规律, 为井下岩屑床轴向分布测量提供了理论基础, 并有助于规避井筒压力复杂和卡钻等风险。

**关键词:** 水平井; 压差法; 轴向分布; 排量; 转速; 岩屑床运移速度

中图分类号: TE21 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)01-0054-08

## Study on Axial Transport Laws of Cuttings Bed in Horizontal Wells Based on a Differential Pressure Method

JING Silin<sup>1</sup>, SONG Xianzhi<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>1</sup>, XU Zhengming<sup>2</sup>, ZHOU Mengmeng<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China)

**Abstract:** To investigate the axial transport law of cuttings bed in the horizontal section of long horizontal wells during rotary drilling, cuttings transport experiments of horizontal wells were conducted based on the differential pressure method. This method utilized differential pressure sensors located at different axial positions in the wellbore to measure the instantaneous pressure drop in the wellbore. These data were used to characterize the axial distribution of cuttings bed in the wellbore and calculate the cuttings bed transport velocity. The impact of fluid density, flow rate, and drill pipe rotation speed on the cuttings bed transport velocity and pressure drop was analyzed. The results indicate that this method effectively describes the characteristics of cuttings bed transport and accurately depicts the axial distribution of cuttings bed within a wellbore. Cuttings bed transport velocity is positively correlated with fluid density, flow rate, rotary speed. Increasing the flow rate significantly improves the cuttings bed transport velocity, although a rapid rise in pressure drop limited the maximum flow rate. Increasing the rotary speed can significantly improve the cuttings bed transport velocity and has almost no effect on the wellbore pressure drop. The results provide clarification of the axial transport law of cuttings bed in horizontal wells, providing a theoretical foundation for measuring the axial distribution of downhole cuttings bed and assisting in avoiding the risks of complex wellbore pressure and pipe sticking.

收稿日期: 2023-04-01; 改回日期: 2024-01-17。

作者简介: 荆思霖(1996—), 男, 安徽阜阳人, 2019年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 油气井工程专业在读博士研究生, 从事井筒颗粒沉降及岩屑运移方面的研究工作。E-mail: jingslcupb@163.com。

通信作者: 宋先知, songxz@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 52125401)、国家自然科学基金重大项目“干热岩地热资源开采机理与方法”课题二“高温岩石动态损伤机理与高效破碎方法”(编号: 52192624)、国家自然科学基金面上项目“钻柱旋转对大位移水平井全井段岩屑流型影响机制研究”(编号: 52274019)、中国石油大学(北京)优秀青年项目“大位移井岩屑临界流速影响因素相互作用机制研究”(编号: 2462022QNXZ004)联合资助。

**Key words:** horizontal well; differential pressure method; axial distribution; flow rate; rotary speed; cuttings bed transport velocity

长水平段水平井钻井过程中, 钻进、循环、划眼和倒划眼等工况交替进行, 井下岩屑床在轴向上呈不均匀分布。研究水平井岩屑床轴向运移规律, 有利于分析岩屑床在井下的轴向分布, 进一步分析易卡钻点、井筒压力分布和机械延伸极限等问题<sup>[1-5]</sup>。前人基于室内试验和数值模拟方法, 考虑转速、岩屑粒径、钻井液性能等因素, 研究了水平井岩屑运移规律, 分析了井筒截面上岩屑床高度的变化<sup>[6-9]</sup>。另外, 国内外学者利用机理建模的方法, 研究了岩屑床在井筒轴向的分布, 这些模型通常采用试验中岩屑床高度或井筒压降来验证模型, 却没有试验结果支撑模型计算的岩屑床在井筒轴向上的运移规律<sup>[10-11]</sup>。现场实践中, 采用立管压力和机理模型相结合的方式, 用ECD来反演井眼清洁程度<sup>[12]</sup>, 但只有立管压力一个实测数据, 无法准确反映岩屑床在井筒中的轴向分布。Zhang Feifei等人<sup>[13]</sup>提出了利用沿管柱环空压力(ASAP)评价大位移井岩屑床轴向分布的方法, 该方法通过多个压力传感器实时测量沿管柱环空压力, 利用井筒轴向各段井筒压降与岩屑浓度的映射关系, 实现了井下岩屑床轴向分布的预测。M. M. Huque等人<sup>[14-15]</sup>利用电阻层析成像(electrical resistance tomography, ERT)技术, 进行了岩屑床在井筒中轴向位置随时间变化的试验研究, 分析了不同流速、井斜角等条件下岩屑床的运移速度, 但进行井下作业时无法应用ERT技术。此外, 虽然利用ASAP评价井眼清洁的技术具有潜在应用价值, 但缺乏试验和理论支撑。

为了探索旋转钻进况下水平井岩屑床的轴向运移规律, 笔者设计了沿井筒轴向布置多个压差传感器的井筒多相流动室内试验系统, 提出了基于多点实时测量压降的方式研究岩屑床轴向运移规律的方法, 在清水、盐水中开展了水平井岩屑运移试验, 分析了排量和转速对水平井岩屑床轴向运移的影响规律, 为优选安全高效钻进的激进工程参数(大钻压、高转速、大排量)提供了试验和理论依据。

## 1 井筒多相流动室内试验系统

为研究高速钻进时水平段井筒中的岩屑运移规律, 研制了模拟高钻速、大排量和高转速的井筒多相流动室内试验系统(见图1)。该系统以长12 m的透明井筒为试验管路, 配备可电控调节参数的偏心旋转钻杆、供液和供岩屑系统等, 其中透明井筒外径180 mm、内径138 mm, 钻杆外径78 mm, 偏心度0.85。井筒上每隔2 m安装有压差传感器, 可实时采集6个压差传感器的压降, 并实时导出不同排量、转速下的井筒压降, 为分析岩屑床的轴向分布和计算岩屑床运移速度提供基础。根据井筒多相流动理论, 一般认为井筒的长径比(长度/水力直径)在50以上, 可满足管流充分发展的要求<sup>[8]</sup>, 该井筒长径比为200, 满足流动充分发展的要求。通过出砂罐下方的控制器, 使井筒保持一定的进砂速率, 根据标定的进砂速率及试验井筒尺寸, 计算模拟的机械钻速。

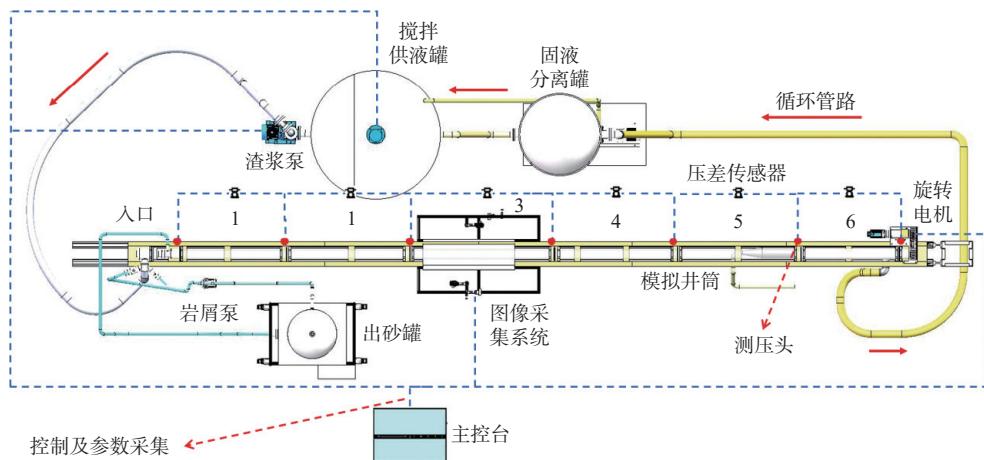


图1 井筒多相流动试验系统示意

Fig.1 Experimental system for multiphase flow in the wellbore

## 2 基于压差法的水平井岩屑运移试验

为明确水平井岩屑床轴向运移规律,设计了高钻速、大排量和高转速的试验参数,提出了岩屑床轴向运移测量方法,给出了试验步骤。

### 2.1 试验参数

试验设置机械钻速为 18.6 m/h, 排量分别为 18, 24, 32, 40, 48 和 56 m<sup>3</sup>/h, 转速分别为 0, 50, 100, 150 和 200 r/min。试验岩屑为密度 2 596 kg/m<sup>3</sup> 的不规则石英砂, 粒径 1, 2, 3 和 4 mm 岩屑的质量分数分别为 13.11%, 42.74%, 41.90% 和 2.25%, 分别在清水和密度为 1.16 g/cm<sup>3</sup> 的盐水中进行试验。

### 2.2 岩屑床轴向运移测量方法

为了很好地研究岩屑床轴向运移规律, 提出了通过在井筒上依次排布压差传感器来计算岩屑床运移速度的方法。在 12 m 长的井筒上, 每隔 2 m 布置 1 个压差传感器(见图 1), 每个压差传感器两端连接管线, 管线终端的测压头分别连接井筒, 测压头间距为 2 m, 依次标定为压差传感器 1, 2, …, 6, 并每隔 2 s 采集 1 次井筒压降, 通过软件将数据传输至计算机。该方法可以针对井筒不同轴向区域采集压降数据。现场应用时可在二开、三开完井段布置传

感器, 或者采用沿管柱布置传感器的方法<sup>[13]</sup>, 测量井下压降并分析岩屑床的堆积情况, 预估钻进段的井筒压力, 从而规避敏感地层可能发生的井涌、井漏和卡钻等风险。

试验时, 随着岩屑持续注入, 岩屑床逐渐堆积形成。由于岩屑在入口处是抛物线运动, 井筒入口端会出现一段无岩屑床的空间, 该段的长度在不同试验条件下会发生改变(见图 2), 在本文试验参数下均位于压差传感器 1 测量的 2 m 内, 称为岩屑床尾部。在相同试验条件下岩屑床保持稳定运移时, 由于持续注入岩屑, 岩屑床尾部保持不动, 处于动态平衡状态。随着岩屑堆积, 岩屑床体高度先小幅度升高, 然后保持稳定, 该段称为岩屑床体, 本文研究提出的岩屑床运移速度即为岩屑床体的形成速度。在岩屑堆积前端即岩屑床头部, 岩屑床高度逐渐降低。需要说明的是, 本文研究的岩屑床运移速度并不是岩屑床头部最前端的运移速度, 而是岩屑床头部达到稳定高度时(即岩屑床体前端)的运移速度。在试验中, 考虑井筒的端部效应, 岩屑床体铺置满传感器 3 测量的位置, 距离入口端 4~6 m, 岩屑床头部已运移至传感器 4 测量的 6~8 m 内。根据计算, 距入口端 4~6 m 满足流动充分发展的要求, 长径比为 66.7~100.0。

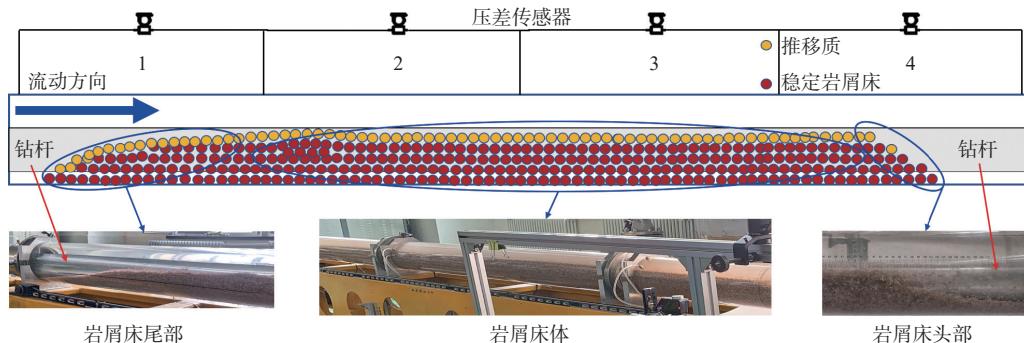


图 2 钻进工况岩屑床轮廓

Fig.2 Cuttings bed profile under drilling conditions

传感器 3 测量段(距离井筒入口端 4~6 m)岩屑床头部的铺置情况如图 3 所示。该图为拍摄视频的示意图, 视频中井筒长度为 0.75 m。在岩屑床头部进入录制区( $t=0\sim13$  s)时, 岩屑床体表层岩屑滚动至该区域, 沉降堆高岩屑床至稳定高度。岩屑床头部最前端岩屑未堆积到稳定高度, 该处岩屑不动; 随着时间推进, 流体冲蚀岩屑床体表层岩屑, 逐渐将岩屑床头部堆高。表层滚动岩屑之下岩屑床的高度保持稳定, 岩屑床体逐渐变长。

压差传感器的测量结果如图 4 所示。测量值 1—5 分别为压差传感器 1—5 每间隔 2 s 的测量数据。由测量值 1 可知, 随着时间发展, 传感器 1 所测位置压降逐渐升高并达到一个稳定值, 传感器 1 压降达到稳定值说明该处已形成高度稳定的岩屑床, 该结果与可视化试验观察结果一致。随着时间推进, 测量值 2 也将达到稳定状态, 此刻( $t=144$  s)说明传感器 1 和 2 所测 0~4 m 段的岩屑床达到稳定状态, 同理传感器 3 压降数据保持稳定时( $t=190$  s), 距

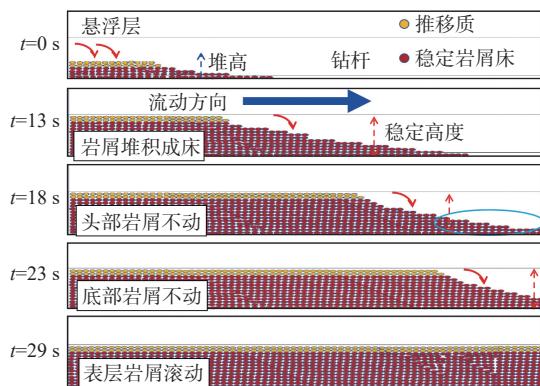


图 3 岩屑床头部铺置流型随时间变化情况

Fig.3 Time-dependent deposition patterns at the head of the cuttings bed

岩屑入口端井筒 0~6 m 处的岩屑床也达到稳定状态。在 2~4 m 和 4~6 m 形成稳定岩屑床所需时间较为相近, 说明岩屑床运移速度已达到稳定, 运移速度基本不变, 但为了测量流动充分发展情况下岩屑床的运移速度, 以距离入口端 4~6 m 岩屑床的运移为研究对象。

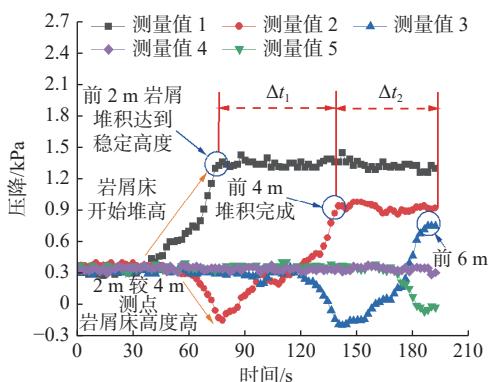


图 4 岩屑床轴向动态运移不同位置传感器测得压降

Fig.4 Pressure drop data from sensors at different positions during axial dynamic transport of the cuttings bed

$$v_{\text{bed}} = \frac{\Delta x_{\text{bed}}}{\Delta t_2} \quad (1)$$

式中:  $v_{\text{bed}}$  为岩屑床移动速度, m/s;  $\Delta x_{\text{bed}}$  为高度稳定岩屑床的运移距离, m;  $\Delta t_2$  为岩屑床运移某段距离所需的时间, s。

另外, 岩屑床运移至传感器测量段初期会导致井筒压降先降低再升高。研究表明, 随着岩屑床堆积悬浮层截面积减小, 悬浮层流速升高和岩屑床表面粗糙导致摩擦压降增大, 但在传感器一端刚形成岩屑床而另一端仍为单相流动时, 流动速度相差较大。根据伯努利原理, 等高流动时, 流速越大压力越小, 因此会出现压降降低的情况。

$$p_p + \frac{1}{2}\rho v_p^2 + \rho g h_p = C \quad (2)$$

式中:  $p_p$  为流体中某点压强, Pa;  $v_p$  为流体某点流速, m/s;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $h_p$  为该点所在高度, m。

由于存在端部效应, 传感器 1 距离入口近的测量点处并未形成岩屑床, 因此测量值 1 并未出现前期压降降低的情况, 传感器 2—5 均出现该现象。

### 2.3 试验步骤

1) 循环试验流体直至井筒内无气泡, 保持稳定排量循环单相流体, 开启压差传感器采集压降数据; 2) 保持一定速率持续注入岩屑, 开启电机钻杆保持旋转, 压差传感器持续采集两相岩屑运移条件下的井筒压降数据; 3) 当稳定岩屑床运移至传感器 3 处(距离入口端 4~6 m), 拍摄视频; 4) 当稳定岩屑床运移至压差传感器 4 处(距离入口端 6~8 m)时停止试验, 保存井筒压降数据; 5) 回收岩屑, 改变试验条件, 重复以上试验步骤。

## 3 岩屑床轴向运移规律分析

### 3.1 压降结果验证

采集清水在井筒环空内循环时的压降数据, 利用文献 [16] 中的环空压降计算模型计算不同排量 (8.08~72.89 m<sup>3</sup>/h) 下井筒环空的压降。文献 [16] 的环空压降计算模型为:

$$F_f = \frac{2f v^2 \rho}{0.816(D_o - D_i)} \quad (3)$$

式中:  $F_f$  为环空内流体单位长度上的摩擦压降, Pa/m;  $f$  为范宁摩擦因子;  $v$  为环空流体流速, m/s;  $D_o$  为井眼直径, m;  $D_i$  为钻杆外径, m。

根据雷诺数范围计算范宁摩擦因子, 当雷诺数  $Re \leq 2100$ (层流)时, 范宁摩擦因子的计算公式为:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (4)$$

当雷诺数  $Re > 2100$ (湍流)时, 范宁摩擦因子的计算公式为:

$$f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

$$Re = \frac{0.816\rho v(D_o - D_i)}{\mu} \quad (6)$$

式中:  $Re$  为雷诺数;  $\mu$  为环空内流体黏度, Pa·s。

环空压降计算结果与测量数据结果如图 5 所示, 并计算了不同排量下压差传感器测量值与计算

结果的相对误差,传感器测量结果的平均相对误差在20%以内,其中传感器2和3的相对误差分别为9.72%和8.74%。从图5可以看出,测量结果与压降模型计算结果的规律一致,后文采集的两相运移压降为传感器3达到稳定岩屑床状态的数值,传感器的测量精度满足试验要求。

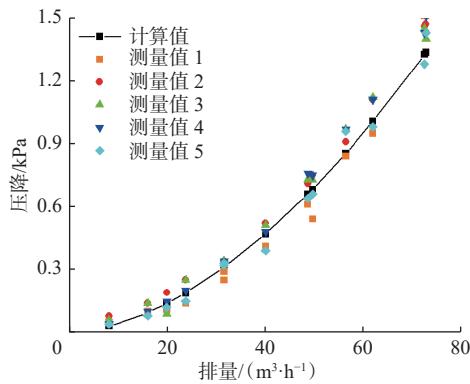


图 5 计算与实测的井筒压降

Fig.5 Calculated and measured wellbore pressure drop

### 3.2 流体密度对岩屑床运移速度的影响

传感器数据可以反映液体单相流动时的压降、固液两相运移时的压降和岩屑床的运移速度。岩屑未进入相应测量井段时,采集的数据为单相流动压降,为保证结果客观,该值为各传感器单相流动时测量时序数据的平均值;形成稳定岩屑床后,井筒压降保持稳定,为两相运移压降,考虑端部效应,采用传感器3的测量数据(见图6)。2组流体的排量均为 $40\text{ m}^3/\text{h}$ ,环空流速为 $1.09\text{ m/s}$ ,与实际钻井的环空返速较为接近。由图6可知,经过控制器的微调节,排量平均相对波动幅度小于0.90%;排量降低,达到稳定状态时的测量值1小幅降低,说明传感器具有较高的灵敏度,测量结果真实可靠。

根据图6(a)和6(b)中标记的单相流动压降和两相运移压降得到图7,利用式(6)计算得到2组试验的雷诺数分别为52 942和61 413,单相流动时为湍流,由式(3)和式(5)可知,湍流条件下高密度流体流动压降较高。由图7可知,流体密度增大,两相运移的环空压降和单相流动的环空压降均升高,但两相运移的环空压降升高幅度更大。根据图6(a)和6(b)中岩屑床体长度增加2 m所需的时间,计算出岩屑床运移速度分别为 $0.045\text{ m/s}$ 和 $0.048\text{ m/s}$ 。分析认为,岩屑在高密度流体中所受的浮力增大,导致沉降速度降低,进而引起岩屑床运移速度增大。

### 3.3 排量对岩屑床运移速度的影响

为分析排量对岩屑床运移速度的影响,开展了

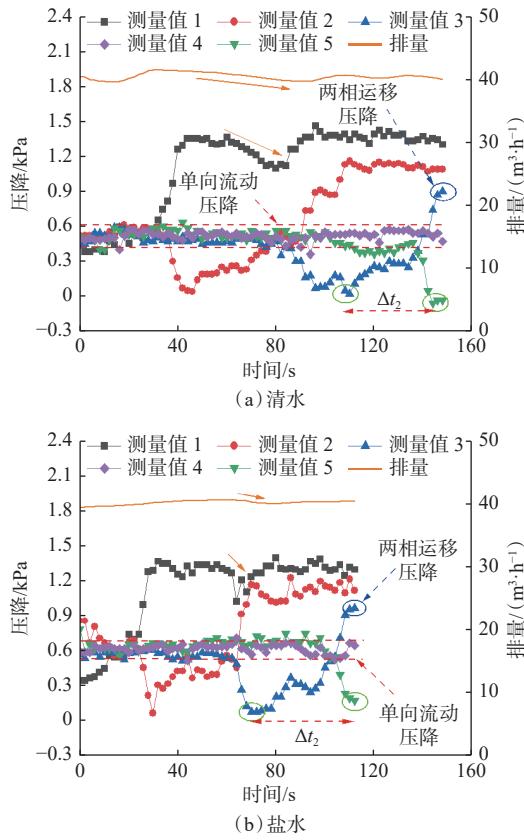


图 6 不同流体中各压差传感器的测量值

Fig.6 Measurement values of differential pressure sensors in different fluids

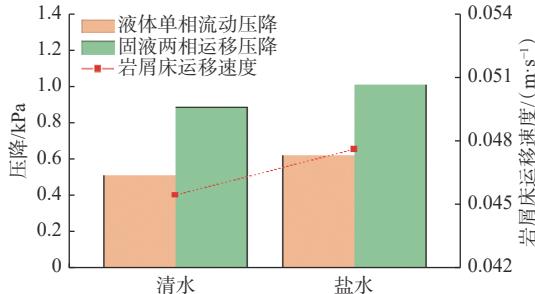


图 7 不同流体中压差传感器井筒压降测量值及岩屑床的运移速度

Fig.7 Measured values of wellbore pressure drop by differential pressure sensors and cuttings bed transport velocity in different fluids

清水中水平井岩屑运移试验,得到了不同排量下的井筒压降测量值(见图8),雷诺数在 $23\ 824.0\sim74\ 119.2$ ,均为湍流流动。从图8可以看出,随着排量增大,时间为0点右侧单相流动的压降逐渐增大,与堆积岩屑后井筒压降的差值变小。

根据前文所述计算方法,计算了不同排量下的单相流动压降、固液两相运移压降及岩屑床运移速度(见图9)。从图9可知,排量从 $18\text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $32\text{ m}^3/\text{h}$

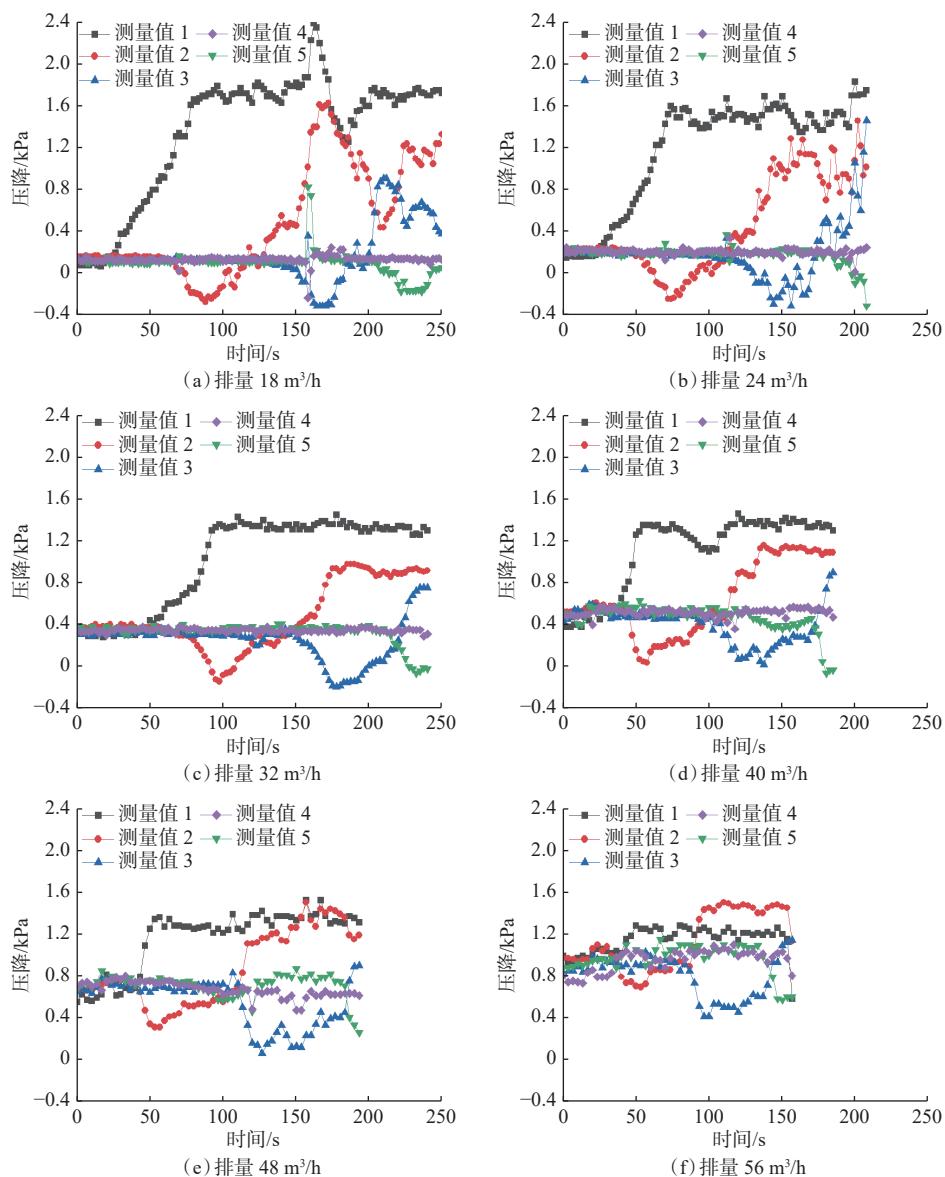


图 8 不同排量下各压差传感器的测量值

Fig.8 Values of differential pressure sensors under different flow rates

时, 固液两相运移压降降低; 排量从 32 m<sup>3</sup>/h 增至 56 m<sup>3</sup>/h 时, 固液两相运移压降升高, 岩屑床运移速度从 0.030 m/s 增至 0.056 m/s。以 2 000 m 长水平井筒为例, 排量从 40 m<sup>3</sup>/h 增至 56 m<sup>3</sup>/h 时, 根据岩屑床运移速度计算出每小时堆积岩屑床的长度从 163 m 增至 200 m, 假设井筒内岩屑床均达到稳定状态, 两相运移压降将升高 255 kPa。

### 3.4 钻杆转速对岩屑床运移速度的影响

为分析钻杆转速对岩屑床运移速度的影响, 采用盐水进行了排量为 40 m<sup>3</sup>/h 的水平井岩屑运移试验, 钻杆转速分别为 50, 100, 150 和 200 r/min 时的井筒压降测量结果如图 10 所示。其中, 转速 50 r/min 试验组在测量时钻杆即开始旋转, 转速 100, 150 和

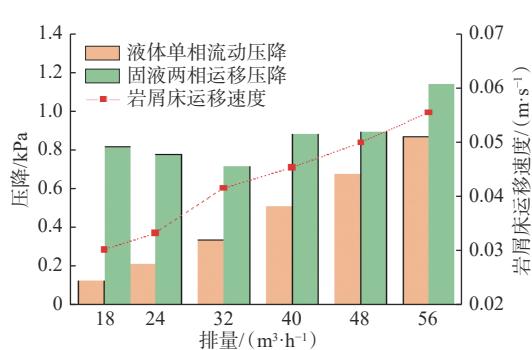


图 9 不同排量下压差传感器测得井筒压降及岩屑床运移速度

Fig.9 Measured wellbore pressure drop by pressure differential sensors and cuttings bed transport velocity under different flow rates

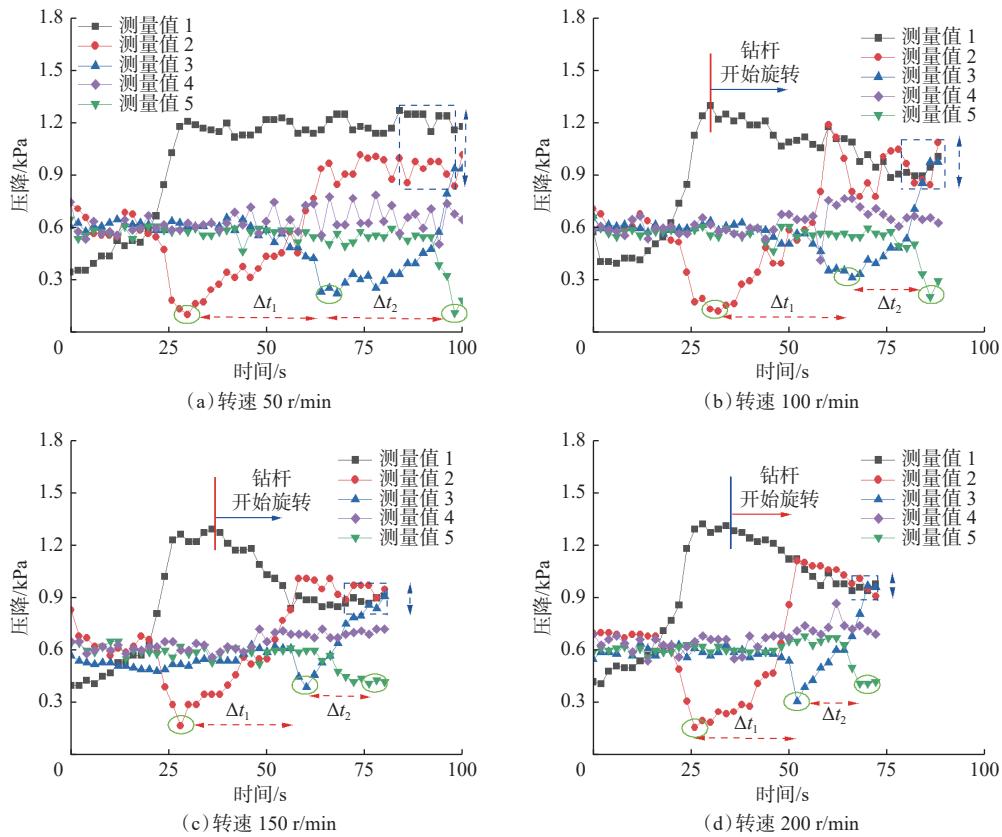


图 10 不同钻杆转速下各压差传感器测量值

Fig.10 Measured values of differential pressure sensors under different drill pipe rotation speeds

200 r/min 试验组从图 10 中标定时间开始旋转。由图 10(b)(c)(d)可知,当钻杆开始旋转后,测量值 1 明显开始降低,并且随转速增加下降趋势加快。对比图 10(b)(c)(d)中的  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  可知,钻杆旋转后  $\Delta t_2$  迅速缩短,即岩屑床运移速度加快。岩屑床在 0~6 m 达到稳定状态时,随着转速增加,测量值 1、2、3 的差值减小,说明钻杆旋转有利于井筒压降的均匀分布。

根据上述计算方法,计算得到了不同钻杆转速下的单相流动压降、固液两相运移压降及岩屑床运移速度(见图 11)。从图 11 可以看出,钻杆转速对单相流动压降和固液两相运移压降影响较小(平均值分别为 0.609 和 0.927 kPa, 方差分别为  $3.075 \times 10^{-5}$  和  $1.111 \times 10^{-4}$ ),但对岩屑床运移速度的影响极大;钻杆转速从 50 r/min 提高至 200 r/min, 岩屑床运移速度提高了 88.9%;根据岩屑床运移速度计算出每小时堆积岩屑床的长度将从 212 m 增加至 400 m,极大地提高了岩屑清除效率。

以上研究表明,流体密度、排量和钻杆转速增大,使岩屑床运移速度加快,流体密度和排量增大均对井筒压降的影响较大,但钻杆转速增大对井筒

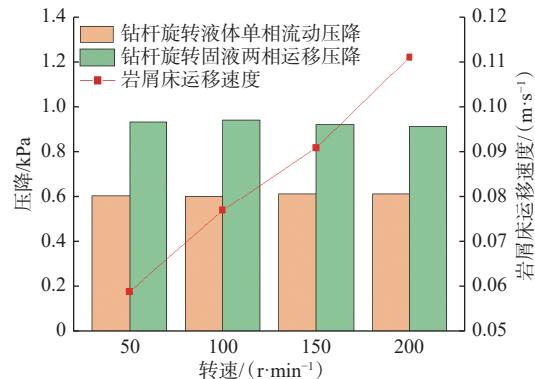


图 11 不同钻杆转速下压差传感器井筒压降测量值及岩屑床的运移速度

Fig.11 Measured values of wellbore pressure drop by pressure differential sensors and cuttings bed transport velocity under different drill pipe rotation speeds

压降的影响较小。

#### 4 结论及建议

- 1) 在水平井旋转钻进工况下,岩屑运移呈岩屑床推进,悬浮层几乎无岩屑。在一定的排量和转速

下, 岩屑床头部铺置至稳态高度后, 才继续轴向铺置岩屑床, 且铺置速度一定。利用压差法计算了岩屑床运移速度, 揭示了岩屑床在井筒轴向的运移规律, 为现场测定井下岩屑床的轴向分布提供了试验和理论依据。

2) 岩屑床运移速度随流体密度、排量和钻杆转速增大而加快, 提高排量和钻杆转速可以使井筒中岩屑床长度成倍增加。随流体密度升高固液两相运移压降增大, 随排量增大两相运移压降存在拐点, 钻杆转速对两相运移压降的影响较小。

3) 在不同排量和转速下进行试验时, 未考虑高黏度非牛顿流体、钻杆晃动和井筒不规则等情况, 且未考虑不同偏心度的影响, 存在一定局限性。建议针对上述问题, 进一步探索岩屑床轴向运移规律。

4) 排量和钻杆转速对岩屑床运移速度的影响较大, 但排量增大会导致井筒压降增大, 然而钻杆转速却对井筒压降几乎无影响。在高钻速的激进钻进参数下, 针对压力敏感地层, 提高钻杆转速更有利提高岩屑清除效率。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 汪海阁, 周波. 致密砂岩气钻完井技术进展及展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 159–169.  
WANG Haige, ZHOU Bo. Progress and prospect of tight sandstone gas well drilling and completion technologies[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 159–169.
- [2] 王庆, 张佳伟, 孙铭浩, 等. 大庆油田古龙页岩岩屑在幂律流体中的沉降阻力系数研究 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 54–60.  
WANG Qing, ZHANG Jiawei, SUN Minghao, et al. The settlement drag coefficient of Gulong shale cuttings in power-law fluids in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 54–60.
- [3] ZHU Na, HUANG Wenjun, GAO Deli. Numerical analysis of the stuck pipe mechanism related to the cutting bed under various drilling operations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(Part E): 109783.
- [4] 景帅, 肖莉, 张好林, 等. 基于井眼清洁程度与水力学耦合的环空压耗最小化计算方法 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 56–62.  
JING Shuai, XIAO Li, ZHANG Haolin, et al. A method for minimizing annulus pressure loss by means of hole cleaning and hydraulics coupling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 56–62.
- [5] 郭骁, 李思洋, 周蒙恩, 等. 考虑岩屑影响的大位移井机械延伸极限研究 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 289–294.  
GUO Xiao, LI Siyang, ZHOU Meng'en, et al. Influence of cuttings on the mechanical extension limit of extended reach well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(3): 289–294.
- [6] 相恒富, 孙宝江, 李昊, 等. 大位移水平井段岩屑运移实验研究 [J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 1–6.  
XIANG Hengfu, SUN Baojiang, LI Hao, et al. Experimental research on cuttings transport in extended-reach horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 1–6.
- [7] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28–32.  
SONG Xianzhi, LI Gensheng, WANG Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28–32.
- [8] SONG Xianzhi, XU Zhengming, WANG Mengshu, et al. Experimental study on the wellbore-cleaning efficiency of microhole-horizontal-well drilling[J]. SPE Journal, 2017, 22(4): 1189–1200.
- [9] 胡金帅, 张光伟, 李峻岭, 等. 基于CFD-DEM耦合模型的岩屑运移数值模拟分析 [J]. 断块油气田, 2022, 29(4): 561–566.  
HU Jinshuai, ZHANG Guangwei, LI Junling, et al. Numerical simulation of cuttings migration based on CFD-DEM coupling model[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(4): 561–566.
- [10] 孙晓峰, 姚笛, 孙士慧, 等. 基于漂移流动模型的水平井岩屑床高度瞬态计算新方法 [J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 85–92.  
SUN Xiaofeng, YAO Di, SUN Shihui, et al. A new transient calculation method of cuttings bed thickness based on drift flow model[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 85–92.
- [11] TONG T A, OZBAYOGLU E, LIU Yixin. A transient solids transport model for solids removal evaluation in coiled-tubing drilling[J]. SPE Journal, 2021, 26(5): 2498–2515.
- [12] 汪志明, 翟羽佳, 高清春. 大位移井井眼清洁监测技术在大港油田的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 17–19.  
WANG Zhiming, ZHAI Yujia, GAO Qingchun. Establishment of bore hole cleaning and monitoring technology and its application in Dagang Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(2): 17–19.
- [13] ZHANG Feifei, ISLAM A. A pressure-driven hole cleaning model and its application in real-time monitoring with along-string pressure measurements[J]. SPE Journal, 2023, 28(1): 1–18.
- [14] HUQUE M M, IMTIAZ S, ZENDEHBOUDI S, et al. Experimental study of cuttings transport with non-Newtonian fluid in an inclined well using visualization and electrical resistance tomography techniques[J]. SPE Drilling & Completion, 2021, 36(4): 745–762.
- [15] HUQUE M M, RAHMAN M A, ZENDEHBOUDI S, et al. Experimental and numerical study of cuttings transport in inclined drilling operations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(part B): 109394.
- [16] BOURGOYNE A T, Jr, MILLHEIM K K, CHENEVERT M E, et al. Applied drilling engineering[M]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1986: 145–153.

[ 编辑 滕春鸣 ]