

# 多分支水平井岩屑运移模型与实验研究

薛曼<sup>1</sup>, 侯继武<sup>1</sup>, 李智<sup>1</sup>, 李子硕<sup>1</sup>, 石耀军<sup>2</sup>,  
李华<sup>3</sup>, 蒋国盛<sup>1</sup>, 杨现禹<sup>\*1</sup>, 蔡记华<sup>\*1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉430074; 2. 安徽省煤田地质局, 安徽合肥230088;  
3. 安徽省煤田地质局第一勘探队, 安徽淮南232052)

**摘要:**随着多分支水平井及复杂结构井钻井技术的不断发展, 井眼清洁技术面临着新的困难和挑战。如何解决复杂地质条件与复杂井型条件下的岩屑床问题, 对于判断与处理井下复杂情况是当前钻井工程面临的重要科学问题之一。通过岩屑颗粒受力分析建立了岩屑运移环空临界流速模型; 基于室内可视化岩屑运移实验, 探究了岩屑运移影响规律。结果表明: 井斜角为36°时岩屑临界启动速度最大, 携岩最为困难; 模型预测结果与实验结果吻合度较好, 且基于实例井的预测结果与现场作业情况一致, 验证了所建模型的可靠性。该研究可为大位移大井斜井及水平井井眼清洁提供理论依据和技术支持。

**关键词:**多分支水平井; 岩屑运移; 临界流速; 井斜角; 井眼清洁

**中图分类号:** P634; TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0031-09

## Model and experimental research of cuttings transport in multi-branch horizontal wells

XUE Man<sup>1</sup>, HOU Jiwu<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, LI Zishuo<sup>1</sup>, SHI Yaojun<sup>2</sup>,  
LI Hua<sup>3</sup>, JIANG Guosheng<sup>1</sup>, YANG Xianyu<sup>\*1</sup>, CAI Jihua<sup>\*1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei Anhui 230088, China;

3. No.1 Exploration Team of Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Huainan Anhui 232052, China)

**Abstract:** With the technological development of multi-branch horizontal wells and complex structural wells, hole cleaning technology is facing new difficulties and challenges. The problems urgent to be resolved are how to solve the problem of cuttings-bed under complex geological conditions and complex well type conditions, to help judge and solve the complex situation downhole. The cuttings transport model is adopted based on the mechanism of cuttings transport. The indoor visualization of cuttings transport experiments was conducted to analyzed the cuttings transport patterns. The results show that the critical velocity of drill cutting is the highest at the well slope angle of 36°, and the drill cutting is most difficult to be carried. The trend of model predicted was validated by comparison with experimental results, and a good accordance was obtained. Its field application also indicates a good agreement between prediction and actual situations, which validated the reliability of this model. The model and experiments are of reference

收稿日期: 2023-07-09; 修回日期: 2023-10-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.005

基金项目: 两淮煤田地面定向多分支水平井高效钻进技术体系研究

第一作者: 薛曼, 女, 汉族, 1997年生, 博士研究生在读, 地质工程专业, 从事钻井液与工程浆液的研究, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, xm@cug.edu.cn。

通信作者: 蔡记华, 男, 汉族, 1978年生, 教授, 博士, 从事钻井液、工程浆液和完井液等方面的教学与研究, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, caijh@cug.edu.cn; 杨现禹, 男, 汉族, 1992年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 从事钻井液与井壁稳定、离散元流体动力学研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, yxy@cug.edu.cn。

引用格式: 薛曼, 侯继武, 李智, 等. 多分支水平井岩屑运移模型与实验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 31-39.

XUE Man, HOU Jiwu, LI Zhi, et al. Model and experimental research of cuttings transport in multi-branch horizontal wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 31-39.

significance for borehole cleaning of large displacement horizontal wells.

**Key words:** multi-branch horizontal wells; cuttings transport; critical velocity; well slope angle; well bore cleaning

## 0 引言

随着化石能源钻采条件日益苛刻与钻采工艺不断开发,为实现资源的高效开采,多分支水平井、大位移大井斜井钻井技术成为海洋油气田开发、老油田增产稳产、低渗煤层气开发、煤矿水害治理等的重要技术手段<sup>[1-14]</sup>。与常规直井相比,其具有单井产量高、采出程度高、经济效益高及安全程度高的优势。而在此类井中,受重力影响,钻柱在水平井段及斜井段井筒内下沉形成偏心环空,导致大量岩屑堆积形成岩屑床,增加扭矩和阻力,埋钻、卡钻等井下复杂情况频繁发生,处理成本较高<sup>[15-16]</sup>,同时严重影响工期进度及工程安全。

近些年,国内外学者们对大斜度、大位移井及水平井的井眼清洁问题做了大量的研究。由于环空岩屑运移机理复杂,影响因素众多,研究方法各异,评价标准不一,总结下来,实验法、分层模型法、临界流速法是3种较为常见的研究方法。实验法多以岩屑床厚度或岩屑浓度为评价指标<sup>[17-20]</sup>,通过搭建岩屑运移模拟装置,直接测得影响因子对岩屑运移的影响规律,并对实验数据进行线性回归整合,得到经验公式。国内比较常用的公式有汪海阁等<sup>[21]</sup>、周凤山等<sup>[22]</sup>的经验半经验公式。相恒富等<sup>[23]</sup>在此基础上,通过实验获取了环空返速、钻杆转速及偏心度等10个参数与岩屑床厚度的变化关系,建立的无因次岩屑床厚度模型应用范围更为广泛。该方法不足之处在于实验条件有限,不易模拟影响因子的多样性及广域性。分层模型以岩屑床厚度为评价指标,将井筒内固液混合物分为两层或三层(即两层模型<sup>[24-25]</sup>与三层模型<sup>[26-31]</sup>),基于液-固耦合理论求解出稳态与非稳态情况下的岩屑床厚度或面积变化规律。三层模型较于双层模型更接近实际工况下岩屑运移动态<sup>[32-33]</sup>。但该模型求解复杂,不适合工程应用。临界流速法即以岩屑运移速度作为评价指标,对环空岩屑颗粒进行受力分析,基于力矩平衡关系等得到岩屑颗粒开始启动时的最小环空流速<sup>[34-38]</sup>,在机理上阐明各个影响因素的作用机理。当前研究多集中于水平井筒,对于不同井斜角的岩屑运移研究较少,且在构建模型时,提出大量理论假设,故仍需做进一步研究。

基于岩屑受力分析,本文建立了岩屑运移临界流速计算模型;通过斜井段及水平井段岩屑运移实验,重点探究偏心环空钻柱旋转下岩屑粒径、钻井液流变性能、井斜角及排量等钻井参数对岩屑运移的影响规律,并验证模型的可靠性。成果可为合理设计大位移大井斜井及水平井钻井参数提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 岩屑受力分析

沉积岩屑床表面颗粒在环空井眼中的受力如图1所示,岩屑颗粒受到重力、举升力、拖曳力、压力梯度力、粘结力及塑性力等。假设:岩屑颗粒为圆球形体;环空流体为稳态流体;环空固液两相介质均不可压缩,且二者之间无滑脱效应和质量交换。

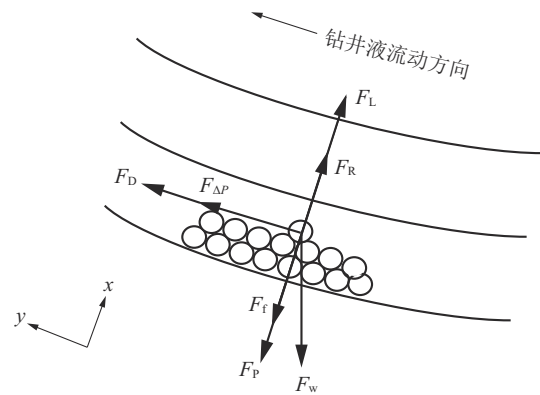


图1 岩屑颗粒受力

Fig.1 Lithic particle force

(1)净重力  $F_w$

$$F_w = \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad (1)$$

式中:  $d_p$ ——岩屑颗粒的直径, m;  $\rho_p$ ——岩屑颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_f$ ——钻井液密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2)举升力  $F_L$

钻井液在  $x$  方向上不均匀分布引起的压力梯度力对附近岩屑产生举升力,方向垂直于  $y$  向指向井眼轴线,表达式为:

$$F_L = C_L \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f v_p^2 \quad (2)$$

$C_L$  的计算公式如下:

$$C_L = \max \left\{ 0.09, 5.82 \sqrt{\frac{\alpha_p}{Re_p}} \right\} \quad (3)$$

$$\alpha_p = \frac{d}{2v_p} \left| \frac{dv}{dx} \right| \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d v_p}{\mu_a} \quad (5)$$

式中: $C_L$ ——举升力系数,采用Ei-Samni和Einstein(1949年)给出的计算公式; $v_p$ ——岩屑移动速度,m/s; $\mu_a$ ——钻井液表观粘度,mPa·s。

### (3) 举升力 $F_R$

钻柱旋转引起钻井液在垂直于井眼轴线平面内做圆周运动,从轴心至井壁处,由于流速不均匀分布的压力梯度力,对岩屑产生上举力,其方向指向轴线方向。

$$F_R = C_R \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f v_R^2 \quad (6)$$

式中: $C_R$ ——钻井液在垂直于井眼平面内流速沿  $x$  方向不均匀分布引起的举升力系数; $v_R$ ——钻柱旋转引起的岩屑中心处钻井液圆周方向流速,m/s。

### (4) 拖曳力 $F_D$

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f v_p^2 \quad (7)$$

$C_D$  的计算采用 Ford J<sup>[39]</sup> 给出的公式:

$$Re < 0.5 \text{ 时}, C_D = \frac{24}{Re} \quad (8)$$

$$Re > 10000 \text{ 时}, C_D = 0.4 \quad (9)$$

$$0.5 < Re < 10000 \text{ 时}, C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (10)$$

式中: $C_D$ ——拖曳力系数; $v_f$ ——钻井液速度,m/s。

### (5) 压力梯度力 $F_{\Delta P}$

$$F_{\Delta P} = \frac{\pi d_p^2}{6} G_p \quad (11)$$

式中: $G_p$ ——环空钻井液流动压力梯度,Pa/m。

### (6) 粘结力 $F_p$

岩屑颗粒长时间在钻井液中浸泡,表面存在一层微薄的附着层,导致床面颗粒与接触颗粒之间存在粘结力作用,表达式为:

$$F_p = \zeta d_p \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_{ss}} \right)^{10} \quad (12)$$

式中: $\gamma_s$ ——岩屑床面的颗粒的干密度,kg/m<sup>3</sup>; $\gamma_{ss}$ ——岩屑床面的颗粒的稳定干密度,kg/m<sup>3</sup>; $\zeta$ ——常数, $\zeta = 2.4 \times 10^{-5}$ 。

### (7) 塑性力 $F_f$

由岩屑下方静止钻井液的屈服应力产生,垂直指向井眼低边,表达式为:

$$F_f = \frac{\pi d_p^2 \tau_y}{2} \left| \alpha + \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \sin^2 \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right| \quad (13)$$

式中: $\tau_y$ ——钻井液屈服应力,Pa。

## 1.2 岩屑运移临界环空流速模型

临界环空流速是特定条件下不形成岩屑床的最小环空流速,岩屑在环空井眼运移方式主要包括滚动运移与举升运移。基于两种岩屑运移作用得到岩屑滚动临界流速与岩屑举升临界流速,取二者最小值确定目标井段岩屑的临界流速。

### 1.2.1 岩屑滚动速度 $V_R$

在斜井段或者水平井段存在岩屑床时,床面颗粒受力如图2所示。当岩屑开始滚动,床面颗粒将

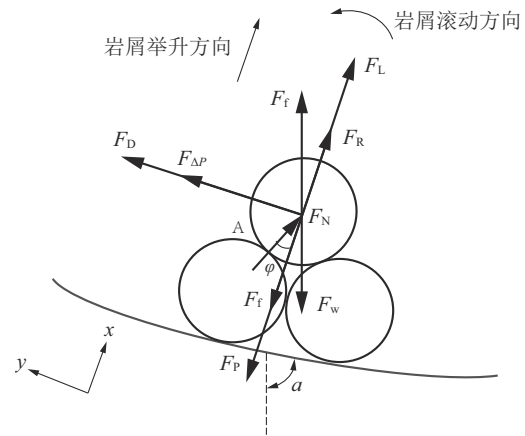


图2 岩屑床表面颗粒受力

Fig.2 Force of the surface particles in the cuttings bed

会受到下方岩屑的支撑作用  $F_N$ , 对支撑点 A 取矩得:

$$\left( F_{\Delta P} + F_D \right) \frac{d}{2} \cos \phi + \left( F_L + F_R - F_p - F_f \right) \frac{d}{2} \sin \phi - F_w \frac{d}{2} \sin \left( \phi + \frac{\pi}{2} - \alpha \right) = 0 \quad (14)$$

将式(1)~(13)带入式(14),得到岩屑滚动临界流速  $V_R$ :

$$V_R = \left\{ \frac{8}{C_R \pi d_p^2 \rho_f} \left( \left( F_p + F_f - F_L \right) \sin \phi + F_w \sin \left( \phi + \frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \left( F_{\Delta P} + F_D \right) \cos \phi \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

### 1.2.2 岩屑举升速度 $V_L$

当岩屑颗粒往上移动脱离床面瞬间,将不再受支撑作用。此时,沿  $x$  方向合力为0,得:

$$F_L + F_R - F_P - F_f - F_w \sin \alpha = 0 \quad (16)$$

将式(1)、(2)、(3)、(12)、(13)带入式(16),得到岩屑举升临界流速  $V_L$ :

$$V_L = \left\{ \frac{8}{C_L \pi d_p^2 \rho_f} (F_w \sin \alpha + F_P + F_f - F_R) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

因此,岩屑运移的环空临界流速  $V_P$  为:

$$V_P = \{V_R, V_L\}_{\min} \quad (18)$$

## 2 斜井段及水平井段岩屑运移实验

为进一步探究岩屑在井眼倾斜段及水平段的运移规律,基于岩屑运移机理设计并建立可视化岩屑运移模拟装置(如图3所示),并进行岩屑运移室内实验。整个装置由钻井液系统、模拟井筒系统、动力回转系统、岩屑注入与收集系统、井斜角控制系统及数据监测系统组成。管道内、外管均由透明的有机玻璃材料组成,便于观察内部流场的变化规律。试验装置长3.5 m,外管内外径分别为60、70 mm;实心的内管长2.0 m、直径50 mm,与井筒中心轴偏心度为0.5°;井斜角调节范围为0°~90°。另外,该装置包含一台高清摄像仪器,为研究不同钻进参数下的岩屑颗粒运动状态提供依据。

### 2.1 实验方案

实验选用黄原胶(XC)与羧甲基纤维素(CMC)加水混合,配制聚合物钻井液体系;选取1~5 mm 系

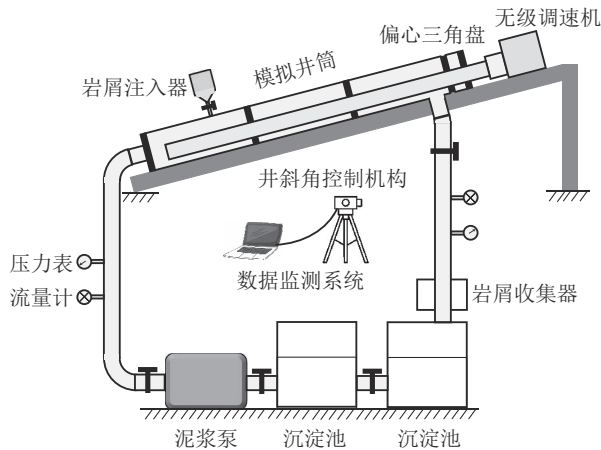


图3 岩屑运移模拟装置

Fig.3 Experimental apparatus for cuttings migration

列的模拟岩屑,密度为2.6 g/cm<sup>3</sup>。组合不同参数的取值,对不同工况下岩屑运移情况进行实验研究。相关参数如表1所示。

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数项	参数值
环空尺寸/mm	60(°)
模拟井筒长度/mm	3500
偏心度/(°)	0.5
钻井液表观粘度/(mPa·s)	0~20
钻杆转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~200
岩屑粒径/mm	1~5
岩屑注入密度/%	1
井斜角/(°)	0~90

### 2.2 岩屑颗粒运移特征

环空井眼中,当钻井液环空流速低于岩屑临界启动速度时,岩屑保持静止形成固定岩屑床。增加环空流速可使岩屑颗粒拖曳力不断增大,当其大于岩屑流动阻力时,岩屑开始运移。在滑移(图4a)、滚动(图4b)、跳跃(图4c)与层移(图4d)这4种运动形式中相互转变(图4),并形成移动岩屑床。另外,实验发现大颗粒岩屑在运移过程中多以滚动形式运移,而小粒径岩屑多以跳跃形式移动。当环空流速增大至使岩屑颗粒举升力大于流动阻力时,岩屑颗粒悬浮于环空井眼中,此时岩屑床厚度快速减小至不存在岩屑床。整个过程中,岩屑床演变过程分为几个阶段:静止岩屑床(图5a),移动岩屑床(图5b),悬浮岩屑床(图5c),不存在岩屑床。

### 2.3 环空返速对岩屑运移的影响

图6为钻井液环空返速与岩屑床厚度的关系曲线,实验表明环空返速对岩屑床的影响最为显著。随环空返速增加,岩屑床厚度大幅降低,岩屑运移速度明显加快。主要原因在于环空返速的增加,使井筒中钻井液紊流速度增大,紊流及漩涡对井壁堆积的岩屑床起到破坏作用。

### 2.4 钻井液流变性对岩屑运移的影响

钻井液流变性能是影响定向井井眼清洁效果极为重要的因素,也是一种可控因素,其中钻井液表观粘度对岩屑运移临界环空流速的影响见图7。结果表明,适量提高钻井液粘度有利于提高携岩效果。在大位移大斜度及水平井中,增大动切力与塑性粘

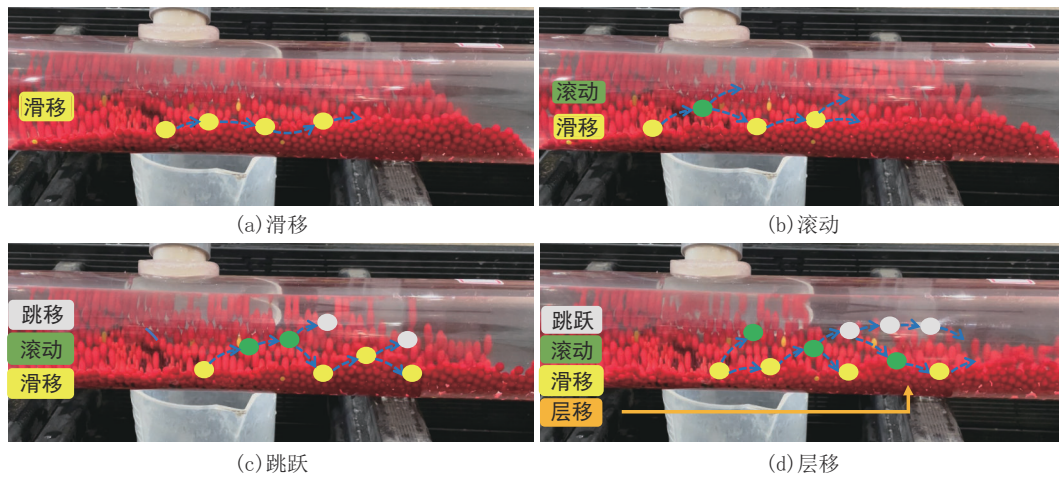


图4 环空岩屑颗粒运移轨迹

Fig.4 Orbital cuttings particle transport trajectory

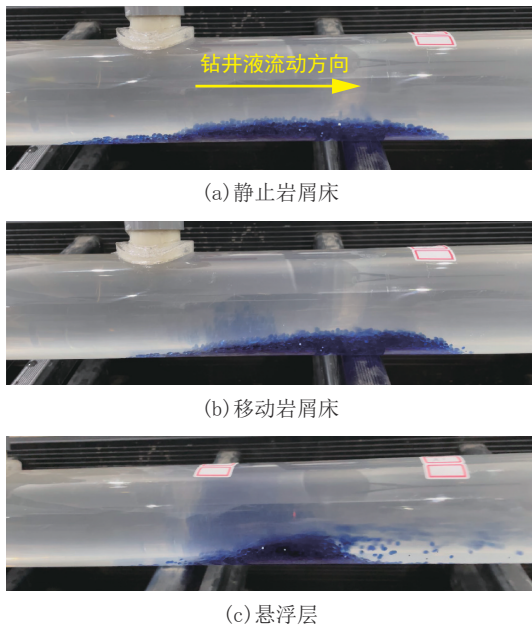


图5 环空岩屑床演变过程

Fig.5 The evolution of annular cuttings bed

度的比值(即动塑比,  $\tau/\eta$ ),可使环空流体形成平板型层流。相较于紊流与尖峰型层流而言,平板型层流携岩效果更佳,同时可避免钻井液对井壁的冲刷,有利于保持井壁稳定。但过高的粘度也会降低钻井液流动性,增大环空压耗,造成泵压显著升高。

2.5 井斜角对岩屑运移的影响

图8为井斜角与岩屑运移临界环空流速的关系曲线,其中岩屑粒径分别径为2、4 mm,钻井液表观粘度为 15 mPa·s。结果表明,当井斜角较小时( $< 25^\circ$ ),岩屑很难在井壁堆积形成岩屑床,岩屑运移临

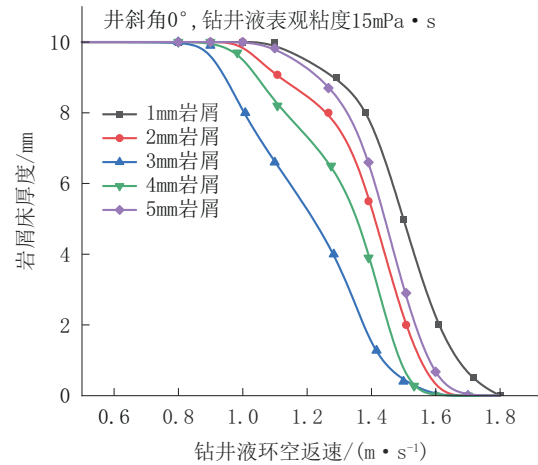


图6 不同钻井液环空返速对岩屑床厚度的影响

Fig.6 Cutting-bed thickness for different drilling mud velocity

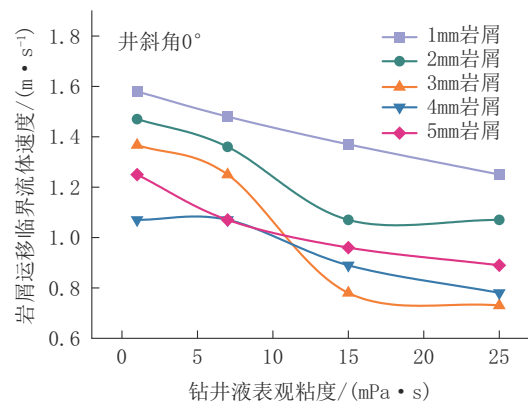


图7 不同钻井液粘度下岩屑临界启动速度

Fig.7 Critical transport velocity of drill cuttings at different drilling mud viscosities

界速度较小;而当井斜角在 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时岩屑运移困难,且 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 间存在明显拐点,约在 $36^{\circ}$ 左右,此时,岩屑临界启动流速最大,携岩最困难。这是由于在该井斜角范围内存在 Boycott 效应,岩屑加速向井壁沉降并有沿井壁下滑趋势。随着井斜角的继续增加,岩屑启动运移速度明显减小。

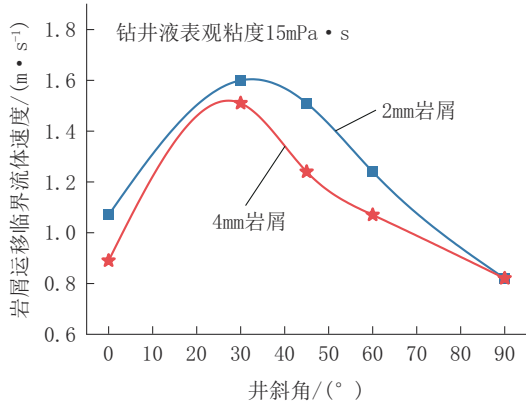


图8 不同井斜角下岩屑临界运移速度  
Fig.8 Critical transport velocity of drill cuttings at different well slope angles

### 2.6 岩屑粒径对岩屑运移的影响

当井斜角为 $0^{\circ}$ ,钻井液表观粘度为 $15\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,岩屑粒径与岩屑运移临界环空流速的关系曲线如图9所示。当岩屑粒径 $<3\text{ mm}$ 时,由于岩屑颗粒间的体积较小,岩屑床在井壁静止时,颗粒之间的间隙远小于大粒径颗粒,导致岩屑需要较大的启动速度;而当钻井液流速增大至使其能够以悬移方式运移时,大部分岩屑颗粒能够被带走,少数颗粒堆积在下井壁,此时,微微转动钻柱,则岩屑粒径立即被冲走。在实验选取粒径范围内,小尺寸岩屑的启动速度远大于大尺寸岩屑,其更难运移,因为小尺寸岩屑更易聚集,颗粒间作用力更大。

### 3 模型验证

为验证环空岩屑临界速度模型的可靠性,将模型计算结果与实验结果进行对比。如图10所示,模型预测结果与实验结果变化趋势一致:当井斜角 $<30^{\circ}$ 时,岩屑运移临界环空流速随着井斜角增加而增加;井斜角为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,临界环空流速存在拐点;井斜角继续增大,临界环空流速降低。岩屑粒径约为 $2\sim 4\text{ mm}$ 时,岩屑运移临界流速最小。在数值方面,岩屑速度模型预测结果与实验结果具有较好的吻合

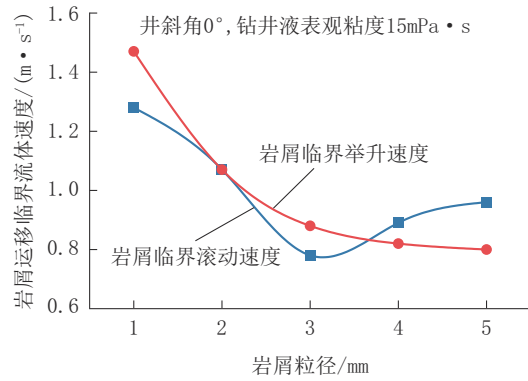


图9 不同岩屑粒径的临界运移速度  
Fig.9 Initiation transport velocity of different drill cuttings particle sizes

度,平均相对误差 $<15\%$ ,证明了模型计算结果的可靠性。

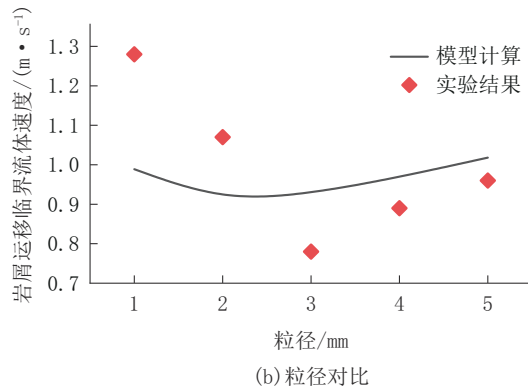
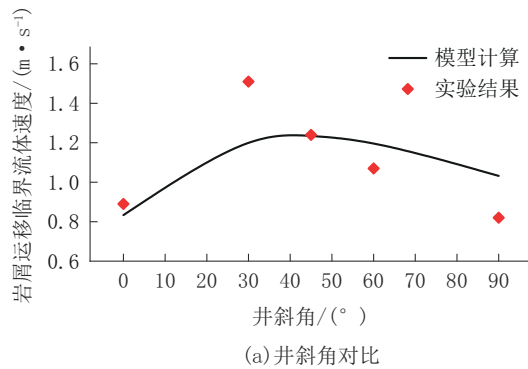


图10 临界环空流速模型与实验结果对比  
Fig.10 Comparison of computing results and experimental results of critical annular velocity

### 4 现场实例验证

选取淮南煤层顶板分段压裂新谢-1L井进行现场实例计算,该井钻至 $1061\text{ m}$ 时的现场实钻数据如表2所示。其中,钻井排量 $>40\text{ L}/\text{min}$ ,岩屑粒径 $4.1$

mm, 钻井液漏斗粘度为65~70 s。实际钻进过程中该井段(二开井段)钻遇斜井段, 高钻速对钻具的磨损较大, 另井壁出现掉块等现象, 现场主要通过增大排量或增大钻井液密度、降低失水量保证井眼清洁。

表2 新谢-1L井现场实钻数据  
Table 2 Field actual drilling data of Xinxie-1L well

工 况	参 数	
井深设计	钻头直径/mm	311.1
	钻杆直径/mm	127
	套管直径/mm	244.5
	水平井段长/mm	2607
钻屑	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2~3
	粒径/mm	4.1
钻井液性能	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.3~1.45
	粘度/s	65~70
	失水量/mL	<4
	动切力/Pa	9
钻进参数	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	22
	排量/(L·s <sup>-1</sup> )	40~48
	井斜角/(°)	65~88

利用岩屑运移的临界环空流速对上述条件的井眼工况进行分析, 不同井深处岩屑运移所需临界排量计算如图11所示。预测结果表明, 不同井深处模型计算的临界排量均小于实际作业排量, 因此, 40 L/s不会产生岩屑堆积问题, 此时工况处于安全状态。同时, 上述结果与该井作业过程中未出现井眼清洁异常一致, 表明该岩屑运移计算模型可用于分析和指导现场作业。

## 5 结论

通过岩屑颗粒受力分析建立了岩屑运移环空临界流速模型, 结合室内模拟实验, 探究了环空返速、钻井液流变性能、岩屑粒径及井斜角对环空岩屑运移的影响规律, 得到如下结论:

(1) 环空岩屑颗粒在运移过程中以滑移、滚动、跳跃与层移这4种运动形式相互转变。

(2) 增大环空钻井液流速, 岩屑床厚度减小, 适量提高钻井液粘度有利于提高携岩效果, 利于井眼清洁。而相较于大粒径岩屑, 小颗粒岩屑更易形成岩屑床, 其岩屑运移临界速度更高。

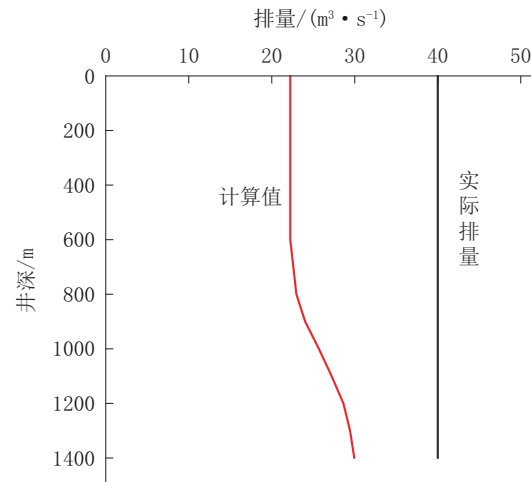


图11 新谢-1L井计算排量与实际排量对比

Fig.11 Calculated versus actual mud displacement of Xinxie-1L wells

(3) 实验发现, 当井斜角为30°~40°, 岩屑运移临界速度曲线存在拐点, 约为36°时, 岩屑临界启动速度最大, 携岩最为困难。

(4) 所建立的多分支水平井段岩屑动态运移模型计算结果与实验结果吻合度较好, 并与现场作业情况一致, 验证了该模型的可靠性。

## 参考文献 (References):

- [1] 李瑞刚, 张洪宁, 刘湘华, 等. 顺北56X特深水平井定向钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 58-64.  
LI Ruigang, ZHANG Hongning, LIU Xianghua, et al. Key technology for extra-deep horizontal directional drilling of Well Shunbei 56X[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 58-64.
- [2] 侯岳, 刘春生, 刘聃, 等. 海域天然气水合物浅软地层水平井钻井液技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 16-21.  
HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan, et al. Drilling fluid technology for natural gas hydrate horizontal wells in marine shallow soft formation[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 16-21.
- [3] 吴华, 刘连恺, 王磊, 等. GY5-1-4H页岩油水平井提高固井质量关键技术研究与实践[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 135-141.  
WU Hua, LIU Liankai, WANG Lei, et al. Study and application of key technology enhancement of shale oil horizontal well cementing quality for Well GY5-1-4H[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 135-141.
- [4] 李奎. 泸州深层页岩气水平段钻井提速关键技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 100-105.  
LI Kui. Key technologies for improving deep shale gas horizontal drilling ROP in Luzhou[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 100-105.
- [5] 孙凯, 刘化伟, 明鑫, 等. 自201井区页岩气井水平段安全高效

- 钻井技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 104-109.
- SUN Kai, LIU Huawei, MING Xin, et al. Safe and high-efficiency drilling technology for horizontal sections of shale gas wells in Well Block Zi-201[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2): 104-109.
- [6] 蒋太平, 李果民, 姚战利, 等. 苏14-19-34井组水平井轨迹控制技术研究与应[用]. 钻探工程, 2021, 48(8): 19-25.
- JIANG Taiping, LI Guomin, YAO Zhanli, et al. Research and application of horizontal well trajectory control technology in the Su 14-19-34 well group[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8): 19-25.
- [7] 刘江, 石逊, 王雷浩, 等. 煤矿采区区域治理水平井施工中托压问题的研究与实践[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 145-151.
- LIU Jiang, SHI Xun, WANG Leihao, et al. Research and practice on backing pressure in horizontal well construction for regional treatment in coal mining areas[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(3): 145-151.
- [8] 周守为, 孙福街, 曾祥林, 等. 稠油油藏分支水平井适度出砂开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2008, 206(5): 630-635.
- ZHOU Shouwei, SUN Fuyie, ZENG Xianglin, et al. Application of multilateral wells with limited sand production to heavy oil reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 206(5): 630-635.
- [9] 高德利. 大型丛式水平井工程与山区页岩气高效开发模式[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 1-7.
- GAO Deli. A high-efficiency development mode of shale gas reservoirs in mountainous areas based on large cluster horizontal well engineering[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(8): 1-7.
- [10] 张遂安, 刘欣佳, 温庆志, 等. 煤层气增产改造技术发展现状与趋势[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 105-118.
- ZHANG Suian, LIU Xinjia, WEN Qingzhi, et al. Development situation and trend of stimulation and reforming technology of coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 105-118.
- [11] 张永平, 杨延辉, 邵国良, 等. 沁水盆地樊庄-郑庄区块高煤阶煤层气水平井开采中的问题及对策[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 46-54.
- ZHANG Yongping, YANG Yanhui, SHAO Guoliang, et al. Problems in the development of high-rank CBM horizontal wells in the Fanzhuang-Zhengzhuang Block in the Qinshui Basin and countermeasures [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(6): 46-54.
- [12] Shi Yanping, Chen Shuya, Yang Xianyu, et al. Enhancing wellbore stability of coal measure strata by electrical inhibition and wettability control[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2019, 174: 544-552.
- [13] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142-146.
- ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(4): 142-146.
- [14] 郝登峰, 徐影, 郭增付. 煤矿水害治理多分支水平井精准定向技术研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 125-132.
- HAO Dengfeng, XU Ying, GUO Zengfu. Research on precise directional drilling technology for multi-branch horizontal wells in coal mine water hazard control [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1): 125-132.
- [15] 张菲菲, 王茜, 余义兵, 等. 长水平井中动态井眼清洁对钻柱受力影响研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 1006-1012.
- ZHANG Feifei, WANG Xi, YU Yibing, et al. Research progress on influence of dynamic hole cleaning on drill string stress in long horizontal wells [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(6): 1006-1012.
- [16] Xue Man, Dai Zhaokai, Li Zhi, et al. Environmentally friendly comprehensive recycling utilization technology of foundation engineering slurry[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130400.
- [17] 闫雪峰. 大直径非开挖水平定向钻岩屑运移规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- YAN Xuefeng. Study on cuttings transportation of large diameter horizontal directional drilling [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [18] 汤捷. 水平井岩屑颗粒启动及运移规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- TANG Jie. Study on initiation and migration of particles on cuttings bed in horizontal wells [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [19] 易静. 斜井段及水平井段岩屑运移规律实验及数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- YI Jing. Experiment and numerical simulation study on rock chip migration law in inclined well section and horizontal well section [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [20] Wei Na, Meng Yingfeng, Li Gao, et al. Cuttings Transport Models and Experimental Visualization of Underbalanced Horizontal Drilling [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013: 764782.
- [21] 汪海阁, 刘希圣, 李洪乾, 等. 水平井段钻井液携带岩屑的实验研究[J]. 石油学报, 1995, 16(4): 125-132.
- WANG Haige, LIU Xisheng, LI Hongqian, et al. Experimental study on cuttings transportation by drilling fluid in horizontal well section [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(4): 125-132.
- [22] 周风山, 蒲春生. 水平井偏心环空中岩屑床厚度预测研究[J]. 石油钻探技术, 1998, 26(4): 19-21.
- ZHOU Fengshan, PU Chunsheng. Prediction study on the thickness of aerial debris beds in eccentric rings of horizontal wells [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1998, 26(4): 19-21.
- [23] 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.
- [24] 郭晓乐,汪志明,龙芝辉.大位移钻井全井段岩屑动态运移规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):72-76.
- GUO Xiaole, WANG Zhiming, LONG Zhihui. Transient cuttings transport laws through all sections of extended reach well [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(1):72-76.
- [25] 祝效华,刘少胡,童华.气体钻井井杆冲蚀规律研究[J].石油学报,2010,31(6):1013-1017.
- ZHU Xiaohua, LIU Shaohu, TONG Hua. A study on the drill pipe erosion law in gas drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6):1013-1017.
- [26] 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.
- [27] 邵兵,同怡飞,毕朝峰,等.基于CFD-DEM耦合模型的大粒径非常规岩屑颗粒运移规律研究[J].科学技术与工程,2017,17(27):190-195.
- SHAO Bing, YAN Yifei, BI Chaofeng, et al. Migration of irregular cuttings particles in big size by CFD-DEM coupled simulation model [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27):190-195.
- [28] Cheng Rongchao, Wang Ruihe. A three-segment hydraulic model for annular cuttings transport with foam in horizontal drilling [J]. Journal of hydrodynamics, 2008,20(1):67-73
- [29] 王金堂,孙宝江,李昊,等.大位移水平井钻井岩屑速度分布模拟分析[J].水动力学研究与进展A辑,2014,29(6):739-748.
- WANG Jintang, SUN Baojiang, LI Hao, et al. Simulation analysis of cuttings velocity distribution in extended horizontal well drilling [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6):739-748.
- [30] 孙晓峰,闫铁,王克林,等.复杂结构井井眼清洁技术研究进展[J].断块油气田,2013,20(1):1-5.
- SUN Xiaofeng, YAN Tie, WANG Kelin, et al. Research progress of hole cleaning in complex structure well [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013,20(1):1-5.
- [31] 孙晓峰,纪国栋,王克林,等.大斜度井偏心环空钻柱旋转对岩屑运移的影响[J].特种油气藏,2015,22(6):133-136.
- SUN Xiaofeng, JI Guodong, WANG Kelin, et al. Effect of drill string rotation in eccentric annulus of high angle deviated well on cuttings movement [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015,22(6):133-136.
- [32] 朱娜,黄文君,高德利.复杂工况下大位移井岩屑运移与参数优化研究[J].石油机械,2022,50(8):24-32.
- ZHU Na, HUANG Wenjun, GAO Deli. Cuttings migration and parameter optimization of extended reach wells under complex working conditions [J]. China Petroleum Machinery, 2022,50(8):24-32.
- [33] 王震,崔景川,彭文波,等.水平定向钻隧道地质勘察孔岩屑运移与地层相关性研究[J].地质科技通报,2022,41(6):331-338.
- WANG Zhen, CUI Jingchuan, PENG Wenbo, et al. Correlation study of cuttings and formation during tunnel geological investigation using HDD technology [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022,41(6):331-338.
- [34] 宋洵成,管志川,陈绍维.斜井岩屑运移临界环空流速力学模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(1):53-56.
- SONG Xuncheng, GUAN Zhichuan, CHEN Shaowei. Mechanics model of critical annular velocity for cuttings transportation in deviated well [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(1):53-56.
- [35] 张好林,李根生,王伟,等.水平井筒清洁临界流速简化模型[J].钻采工艺,2014,37(4):5-8.
- ZHANG Haolin, LI Gensheng, WANG wei, et al. Simplified model of critical fluid velocity for hole cleaning of horizontal well [J]. Drilling & Production Technology, 2014,37(4):5-8.
- [36] 陈修平,王明波,仲冠宇.大斜度井段小尺寸岩屑临界再悬浮速度力学模型[J].断块油气田,2013,20(4):498-501.
- CHEN Xiuping, WANG Mingbo, ZHONG Guanyu. Mechanics model of critical re-suspension velocity for small-sized cuttings transportation in hole section with high inclination [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013,20(4):498-501.
- [37] 董长银,邓珊,李爱萍,等.大斜度井筒条件下沉积砂床表面颗粒起动临界条件研究[J].石油钻探技术,2010,38(3):22-26.
- DONG Changyin, DENG Shan, LI Aiping, et al. Research of critical condition for grains at bed surface in highly deviated wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(3):22-26.
- [38] Lin Penghao, Zheng Yunlong, Wu Xiaoming. Influencing Factors of the Wellbore Cleaning Efficiency in Extended Reach Wells Based on Seawater Drilling Fluid [J]. Arabian journal for science and engineering, 2021,46(7):6979-6988.
- [39] Ford J, Gao E, Oyeneyin M B, et al. The development of mathematical models with describe cuttings transport in inclined boreholes [J]. CADE/CAODC, 1993:93-1102.

(编辑 荐华)