

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022083

引用格式: 舒惠龙, 田中兰, 付利, 等. 水平井井眼清洁定量化监测评价技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 68-73.

SHU Huilong, TIAN Zhonglan, FU Li, et al. A quantitative monitoring and evaluation technology for hole cleaning of horizontal well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 68-73.

水平井井眼清洁定量化监测评价技术

舒惠龙^{1,2}, 田中兰², 付利², 杨恒林², 杨磊³, 范玉光⁴

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 上荣(天津)科技有限公司, 天津 300308; 4. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000)

摘 要: 为了监测和评价水平井井眼清洁程度, 研制了岩屑返出量监测装置, 以准确监测岩屑返出情况。基于岩屑返出量数据和工程录井实时采集的数据, 建立了岩屑返出量监测装置在 2 种工作模式下, 倾倒时段漏接岩屑补偿方法与实际返出岩屑体积计算方法; 基于岩屑返出率与掉块监测结果, 研究形成了水平井井眼清洁定量化监测评价技术。该技术在川南泸州区块多口页岩气水平井进行了应用, 实现了监测井段岩屑返出体积与返出率实时准确监测, 并多次预警井眼清洁异常情况, 保证了水平段的顺利钻进。水平井井眼清洁定量化监测评价技术为水平井井眼清洁程度监测及卡钻复杂风险预防提供了一种新的技术手段。

关键词: 水平井; 井眼清洁; 岩屑返出率; 监测; 卡钻

中图分类号: TE928

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)02-0068-06

A Quantitative Monitoring and Evaluation Technology for Hole Cleaning of Horizontal Well

SHU Huilong^{1,2}, TIAN Zhonglan², FU Li², YANG Henglin², YANG Lei³, FAN Yuguang⁴

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China; 2. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing, 102206, China; 3. Shangrong (Tianjin) Technology Company Limited, Tianjin, 300308, China; 4. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: A high-accuracy cuttings return monitoring device was developed to monitor and evaluate the hole cleanliness of horizontal wells, and to monitor the cutting return accurately. The compensation method for missing cuttings during a dumping period and the calculation method of the actual cuttings return volume were established for the monitoring device in two operation modes with the cuttings return data and the real-time data of engineering logging. A quantitative monitoring and evaluation technology for the hole cleaning of horizontal wells was developed depending on the results of the cuttings return rate and sloughing monitoring. This technology was applied in multiple horizontal shale gas wells in the Luzhou Block, Southern Sichuan, which enabled the real-time accurate monitoring of cuttings return volume and return rate in monitored well sections. It gave many early warnings regarding abnormal hole cleanliness, ensuring smooth drilling in horizontal sections. The proposed quantitative monitoring and evaluation technology for hole cleaning of horizontal wells provided a new technical means for monitoring the hole cleanliness of horizontal wells and preventing sticking and other complex risks.

Key words: horizontal well; hole cleaning; cuttings return rate; monitoring; pipe sticking

页岩油气已成为非常规油气资源的重要组成部分, 但页岩储层致密、渗透性低, 规模开发主要依靠

水平井钻井技术与多级压裂完井技术。“十三五”期间, 中国石油川南页岩气区水平井完钻井数量由

收稿日期: 2021-12-05; 改回日期: 2022-12-09。

作者简介: 舒惠龙 (1997—), 男, 宁夏中卫人, 2019 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2022 年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业工学硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事水平井井眼清洁技术研究。E-mail: shuhl29@163.com。

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“水平井优质高效钻完井技术研究” (编号: 2021DJ42) 课题 2 “水平井降阻、清岩、智能建模与协同控制方法”及课题 4 “水平段长 2500 米以上的致密/页岩气水平井‘一趟钻’技术研究”部分研究内容。

2016 年的 60 口井增加至 2020 年的 327 口井。川南页岩气水平井钻井过程中累计 52 套旋转导向工具发生卡钻埋井, 其中打完立柱在井底倒划上提钻具卡钻占比达 60.5%, 起钻过程中因遇阻卡钻占比 27.9%, 前者主要与硬脆页岩结构性大掉块有关, 后者主要与井底岩屑床沉积有关^[1-2]。

国内外学者针对井壁掉块、岩屑床沉积等问题, 开展了井眼清洁监测与评价的研究与应用。1970 年, L. W. Cooper 等人^[3]应用声波监测返砂管线中岩屑的质量, 但该技术只适用于气体钻井, 不适于水基/油基钻井液环境。20 世纪 90 年代起, 随着大斜度井、水平井的广泛应用, 国内外学者们相继建立了一系列适用于大斜度井与水平井井眼清洁的经验模型^[4-5]与理论模型^[6-8]; 并且, 随着计算机技术的发展, 国外油服公司开始利用已建立的井眼清洁模型开发井眼清洁监测软件, 以实现井眼清洁程度的定性预判, 包括哈里伯顿公司 Landmark 软件的 WellPlan 模块、斯伦贝谢公司 Drilling Office 软件的 Hydraulics 模块和 SPT Group 的 Drillbench 软件等^[9]。同时, 钻井液当量循环密度(ECD)监测^[10-12]、摩阻与扭矩监测^[13-15]结果也用来间接计算分析井眼清洁程度, 但 ECD 监测与摩阻扭矩监测结果只能定性判断井眼清洁程度, 计算分析结果与实际工况存在一定误差。2000 年以来, 斯伦贝谢和 Geolog 公司开展了井底返出岩屑定量监测的研究, 研制出岩屑称重装置与配套软件系统, 首次实现了井眼清洁程度的量化计算评价^[9]。

笔者结合国内外井眼清洁监测与评价技术现状, 研制了岩屑返出量监测装置, 研究了岩屑采集数据处理方法, 形成了水平井井眼清洁量化监测评价技术, 现场应用后能够预防卡钻复杂风险。

1 岩屑返出量监测装置

为了测量岩屑返出量, 设计了一种岩屑返出量监测装置, 主要由称量系统、数据发送系统、控制系统、动力系统和支撑防护系统组成(见图 1)。

称量系统是整个装置的核心, 由秤盘、称重机构和翻转机构组成, 可以实时称量秤盘上岩屑的质量。数据发送系统将实时测量得到的岩屑数据通过无线发射端口以一定频率发送到数据采集软件。控制系统主要由控制箱和远程控制软件组成, 控制箱内有启动、制动和复位按钮, 并通过无线发射端与远程控制软件相连接, 远程控制软件可以实现装置

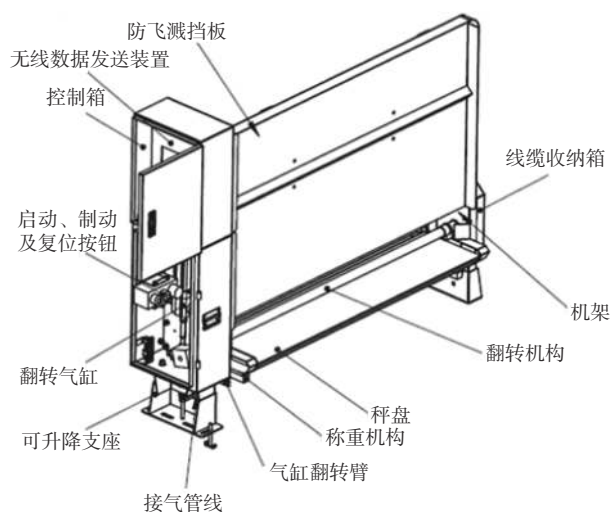


图 1 岩屑返出量监测装置结构示意图

Fig.1 Structure of the cuttings return monitoring device

的远程操控及装置工作状态的校验。动力系统包括翻转气缸、气缸翻转臂与接气管线, 整个装置采用气压驱动, 工作气体来自于井场空气压缩机。动力系统为翻转机构提供动力, 控制秤盘的工作状态。支撑防护系统为整个装置提供支撑与保护, 确保整个装置平稳地固定在振动筛的出砂口, 同时满足现场 HSE 管理要求。

岩屑返出量监测装置安装在振动筛出砂口处, 当岩屑流经振动筛并逐渐堆落在监测装置上时, 质量传感器对岩屑质量进行监测, 待达到一定监测时间或岩屑质量达到传感器预设的质量阈值时, 监测装置自动将岩屑倾倒地掉, 并在恢复工作状态时将称量值自动清零; 称量得到的岩屑质量数据通过无线传输方式发送到数据处理系统。

2 岩屑采集数据处理方法

岩屑返出量监测装置采集的岩屑数据, 经过干湿岩屑质量转换、倾倒时段漏接岩屑补偿、细碎岩屑补偿及质量体积转换后, 可以得到准确的实际返出岩屑体积; 根据监测井段的井眼直径、进尺和井径扩大率, 可以计算得到监测井段的理论岩屑体积; 将实际返出岩屑体积与理论岩屑体积进行对比, 得到监测井段的岩屑返出率。

2.1 干湿岩屑质量转换方法

岩屑由钻井液循环带出井筒, 钻井液会吸附在岩屑表面形成一层液膜。这层液膜会降低岩屑在钻井液中运移的阻力, 有利于岩屑的返出(尤其是使用油基钻井液时), 但是吸附在岩屑表面的钻井液

会使监测装置称得的岩屑质量偏大,这个质量称为湿岩屑质量,湿岩屑质量需要转换为实际地层的干岩屑质量才能参与实际返出岩屑体积的计算。因此,定义了干湿质量转换系数的计算方法:

$$\alpha = \frac{m_d}{m_w} \quad (1)$$

式中: α 为干湿质量转换系数; m_d 和 m_w 分别为干岩屑质量和湿岩屑质量, kg。

测量岩屑干湿质量转换系数时,首先对采集的湿岩屑样品进行称重,用柴油清洗岩屑表面吸附的钻井液与泥质,然后用酒精清洗掉岩屑表面的柴油,最后将岩屑烘干进行称量。需要注意的是,钻井液在岩屑表面的吸附受多种因素的影响,如钻井液黏度与固相含量、岩屑颗粒的尺寸(比面积)、地层岩石的孔渗性质等,当这些参数值发生变化时,需要对干湿质量转换系数进行及时测量更新。

2.2 倾倒时段漏接岩屑补偿方法

由于岩屑返出量监测装置的称盘容积有限,称量一定时间或者称盘上岩屑达到一定质量后需要倾倒岩屑。称盘倾倒岩屑时振动筛返出的岩屑会被漏接,因此需要对这段时间内的岩屑数据进行补偿。倾倒时段漏接岩屑的质量可通过振动筛上返出岩屑的质量流量求出。倾倒前与倾倒后岩屑质量流量的平均值可近似认为倾倒时段的岩屑质量流量,其乘以倾倒所用时间即为一次倾倒漏接岩屑的质量。某单位长度倾倒时段漏接岩屑质量可通过累计该单位进尺内每次倾倒漏接的岩屑质量得到。

2.2.1 定时倾倒模式

第 i 单位进尺第 j 次倾倒前、倾倒后岩屑质量流量分别为:

$$Q_{m1,ij} = \frac{m_{1ij}}{t} \quad (2)$$

$$Q_{m2,ij} = \frac{m_{2ij}}{t} \quad (3)$$

该次倾倒漏接岩屑的质量为:

$$m'_{ij} = \frac{Q_{m1,ij} + Q_{m2,ij}}{2} t' = \frac{m_{1ij} + m_{2ij}}{2t} t' \quad (4)$$

第 i 单位进尺倾倒时段漏接岩屑的质量为:

$$m'_i = \sum_{j=1}^{t_i} m'_{ij} = \sum_{j=1}^{t_i} \left(\frac{m_{1ij} + m_{2ij}}{2t} t' \right) \quad (5)$$

式中: $Q_{m1,ij}$ 和 $Q_{m2,ij}$ 分别为第 i 单位进尺第 j 次倾倒前和倾倒后的岩屑质量流量, kg/s; m_{1ij} 和 m_{2ij} 分别为第 i 单位进尺第 j 次倾倒前一次和倾倒后一次称得

的岩屑质量, kg; m'_{ij} 为第 i 单位进尺第 j 次倾倒漏接的岩屑质量, kg; m'_i 为第 i 单位进尺倾倒时段漏接岩屑的质量, kg; t 和 t' 分别为称盘称量时间和倾倒时间, s; t_i 为第 i 单位进尺钻时, s。

2.2.2 定量倾倒模式

第 i 单位进尺第 j 次倾倒前、倾倒后的岩屑质量流量分别为:

$$Q_{m1,ij} = \frac{m}{t_{1ij}} \quad (6)$$

$$Q_{m2,ij} = \frac{m}{t_{2ij}} \quad (7)$$

该次倾倒漏接岩屑的质量为:

$$m'_{ij} = \frac{Q_{m1,ij} + Q_{m2,ij}}{2} t' = \frac{m(t_{1ij} + t_{2ij})}{2t_{1ij}t_{2ij}} t' \quad (8)$$

第 i 单位进尺倾倒时段漏接岩屑的质量为:

$$m'_i = \sum_{j=1}^{m_i} m'_{ij} = \sum_{j=1}^{m_i} \left[\frac{m(t_{1ij} + t_{2ij})}{2t_{1ij}t_{2ij}} t' \right] \quad (9)$$

式中: m 为设定的每次称量的岩屑质量阈值, kg; m_i 为称盘称量得的第 i 单位进尺的岩屑质量, kg; t_{1ij} 和 t_{2ij} 分别为第 i 单位进尺第 j 次倾倒前一次和倾倒后一次的称量时间, s。

如果是该单位进尺内最后一次倾倒岩屑,则默认前一次称量的岩屑流量为本次倾倒的岩屑流量。值得注意的是,利用平均流量法计算累计实际返出岩屑质量时,需要等待称盘下一次倾倒岩屑时,才能计算出上一次倾倒时段漏接的岩屑质量。

2.3 细碎岩屑补偿方法

岩屑尺寸随着井深增加而逐渐变小,尤其是对于页岩地层大位移水平井, PDC 钻头的研磨破岩作用、偏心钻柱对岩屑床的挤压作用、岩屑运移过程中颗粒间的碰撞与摩擦作用,以及岩屑与钻柱和井壁的碰撞作用,都会使返出岩屑中存在许多粒径小于振动筛筛孔的细碎岩屑。这部分岩屑随钻井液通过振动筛筛孔进入钻井液罐中,未被岩屑返出量监测装置称量,因此需要进行数据补偿。

细碎岩屑的质量可以通过现场试验测量得到。首先通过沉积法或离心法取样测量通过振动筛的钻井液中的细碎岩屑质量分数,再利用录井数据中获得的当前钻井液排量、密度和钻时等数据,即可计算出细碎岩屑的质量:

$$m_s = \omega \rho_m Q t \quad (10)$$

式中: m_s 为某单位进尺内返出细碎岩屑的质量, kg; ω 为返出钻井液中的细碎岩屑质量分数; ρ_m 为钻井液密度, kg/m³; Q 为钻井液排量, m³/s; t 为该单位进

尺的钻时, s。

随着井深增加, 以及钻井液排量、密度和机械钻速等钻进参数的变化, 钻井液中的细碎岩屑含量会发生变化。因此, 当井深增加一定长度或钻进参数发生变化时, 要重新测量返出钻井液中的细碎岩屑质量分数, 更新单位进尺细碎岩屑质量。若井眼经过易造浆地层, 井壁的黏土矿物也会进入钻井液中, 会使测量的细碎岩屑质量偏大, 这时候需要结合地质信息进行修正。

2.4 实际返出岩屑体积计算方法

岩屑返出量监测装置测量得到的是岩屑的质量, 但现场习惯上使用岩屑的体积来分析岩屑的返出情况, 因此需要将岩屑的质量转换为体积。地层的密度可从邻井的测井资料中获得, 结合前面的分析, 可以得到实际返出岩屑体积的计算公式。

定时倾倒入模式下, 第*i*单位进尺返出岩屑的体积为:

$$V_i = \frac{\left[m_i + \sum_{j=1}^{\frac{t_i}{(t+t')}} \left(\frac{m_{1ij} + m_{2ij}}{2t} t' \right) \right] \alpha_i + \omega_i \rho_{mi} Q_i t_i}{\rho_{ci}} \quad (11)$$

定量倾倒入模式下, 第*i*单位进尺返出岩屑的体积为:

$$V_i = \frac{\left\{ m_i + \sum_{j=1}^{\frac{m_i}{m}} \left[\frac{m(t_{1ij} + t_{2ij})}{2t_{1ij}t_{2ij}} t' \right] \right\} \alpha_i + \omega_i \rho_{mi} Q_i t_i}{\rho_{ci}} \quad (12)$$

因此, 定时倾倒入模式下, 整个监测井段累计实际返出岩屑的体积为:

$$V_a = \sum_{i=H_1}^{H_2} \left\{ \frac{\left[m_i + \sum_{j=1}^{\frac{t_i}{(t+t')}} \left(\frac{m_{1ij} + m_{2ij}}{2t} t' \right) \right] \alpha_i + \omega_i \rho_{mi} Q_i t_i}{\rho_{ci}} \right\} \quad (13)$$

定量倾倒入模式下, 整个监测井段累计实际返出岩屑的体积为:

$$V_a = \sum_{i=H_1}^{H_2} \left\{ \frac{\left\{ m_i + \sum_{j=1}^{\frac{m_i}{m}} \left[\frac{m(t_{1ij} + t_{2ij})}{2t_{1ij}t_{2ij}} t' \right] \right\} \alpha_i + \omega_i \rho_{mi} Q_i t_i}{\rho_{ci}} \right\} \quad (14)$$

式中: V_i 为第*i*单位进尺返出岩屑的体积, m^3 ; V_a 为监

测井段累计实际返出岩屑的体积, m^3 ; ρ_{ci} 为第*i*单位进尺地层视密度, kg/m^3 ; H_1 和 H_2 分别为监测井段开始井深和结束井深, m。

2.5 理论岩屑体积

理论岩屑体积是指理论上钻头破碎岩石所产生的岩屑的体积。一般来说, 除了钻遇裂缝、溶洞型地层以外, 钻头钻进单位进尺产生的岩屑体积是确定的, 因此可以通过钻头移动的距离及钻头直径来计算理论岩屑体积。由于地层自身性质、钻头侧向切削及钻井液冲刷的缘故, 实际井眼直径通常稍大于钻头直径, 因此计算理论岩屑体积时还需要考虑井径扩大率。井径扩大率在钻进时无法知道, 但可以参考邻井的井径测井数据获得。综合以上分析, 可以得到监测井段理论岩屑体积的计算公式:

$$V_t = \frac{\pi D_b^2 (1 + \theta)^2}{4} (H_2 - H_1) \quad (15)$$

式中: V_t 为监测井段理论岩屑体积, m^3 ; D_b 为钻头直径, m; θ 为井径扩大率。

2.6 岩屑返出率

岩屑返出率定义为某段井眼的实际返出岩屑体积与理论岩屑体积之比:

$$R = \frac{V_a}{V_t} \times 100\% \quad (16)$$

式中: R 为岩屑返出率。

岩屑返出率可以直观表征某一井段的井眼清洁程度, 现场应用时, 一般用单位进尺返出率、立柱返出率或累计返出率来表示。单位进尺返出率和立柱返出率分别表示某一单位进尺和某一立柱井段的岩屑返出率, 累计返出率表示某一井段累计实际返出岩屑的体积与该井段理论岩屑体积的比。单位进尺返出率和立柱返出率可以看作是岩屑的瞬时返出率和阶段平均返出率, 而累计返出率可以反映某个井段岩屑的整体返出情况。由于单位进尺返出率变化幅度比较大, 现场一般根据立柱返出率来判断当前正钻井段岩屑返出情况及岩屑返出率变化趋势, 从而及时调整施工措施, 优化钻进参数。

3 井眼清洁状态分析与评价方法

对岩屑数据与工程录井数据进行处理与计算, 可以得到实际返出岩屑的体积与返出率。通过判断实际返出岩屑的体积与理论上钻头产生的岩屑体积是否达到平衡, 可以定量地判断井下岩屑返出与井壁稳定状况, 为钻井液排量、转速、机械钻速等钻进

参数的确定与优化提供指导,具体分析评价及技术措施决策流程如图2所示。

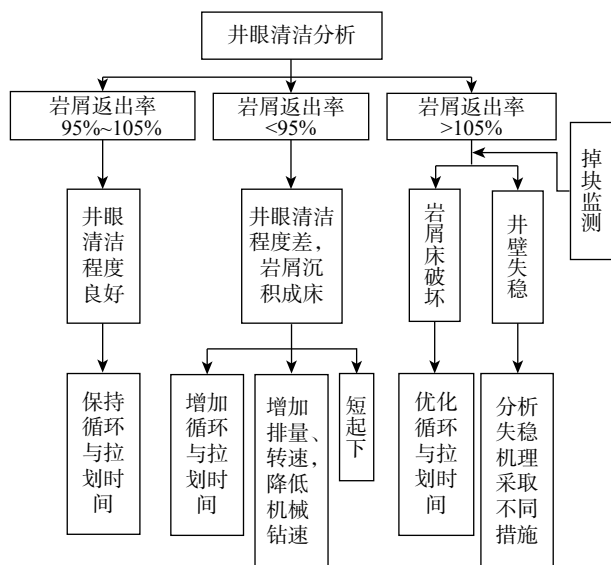


图2 井眼清洁状态分析评价及技术措施决策流程

Fig.2 Flow of analysis and evaluation of hole cleanliness and technical measure decision

根据现场经验,定义井眼清洁标准为岩屑返出率95%~105%。岩屑返出率为95%~105%,认为井眼清洁程度良好,只需要每柱钻完后及时循环即可。岩屑返出率小于95%,说明部分岩屑在井筒中发生滞留,有可能沉积形成了岩屑床,需要结合摩阻扭矩进行判断。如果岩屑在井筒中沉积成床,应按照现场实际情况采取增加排量、提高转速、降低钻速或增加循环时间等措施;如果岩屑床依然存在,则需要进行短起下等机械操作辅助破除岩屑床。岩屑返出率大于105%,存在以下2种可能:一是之前沉积的岩屑床发生破坏,岩屑开始运移返出;二是井壁失稳产生掉块,此时需要结合现场观察,确定是否存在掉块。

存在掉块的情况下,需要监测和记录掉块的形态、大小及对应的迟到井深,进而确定井壁失稳机理及应对措施。掉块按形态大致分为裂片状、角状和板状等3种类型^[16],不同掉块形态对应不同的井壁失稳机理。裂片状掉块通常是由于在坚硬地层采用欠平衡钻井或者机械钻速过快导致,这时需要适当提高井底压力,降低机械钻速。角状掉块通常是井壁岩石发生剪切破坏产生的,这时需要在安全钻井液密度窗口范围内提高钻井液密度,以保证钻井液对井壁提供足够的支撑。板状掉块通常来自于水平井段,井眼轴线与地层近似平行,如果地层本身

存在弱面,钻柱转速过大和钻柱振动都可能使井壁发生顺层垮塌,产生板状掉块,采取控制钻柱转速、减少倒划眼和略微提高钻井液密度等措施,可以起到一定的减缓作用。

4 现场应用

水平井井眼清洁定量化监测评价技术在川南地区现场应用4井次,累计预警井眼清洁异常状态20余次,有效预防了井眼清洁事故的发生。L203HX-X井是部署在泸州区块一口页岩气水平井,设计井深5 736 m,造斜点井深2 000 m,水平段长1 550 m,入靶点(A点)测深4 129 m。该井钻进至A点后,摩阻扭矩明显增加,钻时增长,推测井底存在岩屑床。根据现场要求,从井深4 272 m处开始进行岩屑返出量监测,实时分析岩屑返出情况,优化施工措施与钻进参数。

监测井段4 272~5 250 m井眼直径为215.9 mm,根据邻井测井资料,井径扩大率取5%,所钻地层龙马溪组岩石平均密度为2 560 kg/m³,每柱一更新岩屑干湿质量转换系数,定时测量细碎岩屑质量,从工程录井数据中实时调取排量、钻井液密度及钻时等数据。基于上述数据,实时跟踪计算监测井段实际返出岩屑的体积、理论岩屑体积和岩屑返出率。

该井4 272~5 250 m井段岩屑累计理论体积、累计实际返出体积与累计体积差值随深度的变化情况如图3所示,可以看出从井深4 530 m开始岩屑累计实际返出体积小于累计理论体积,累计返出率降至100%以下。分析认为,随着水平段增长,井底岩屑运移难度增加,岩屑存在沉积。监测井段的岩屑返出率达到96.44%,说明井眼清洁状态总体较好。

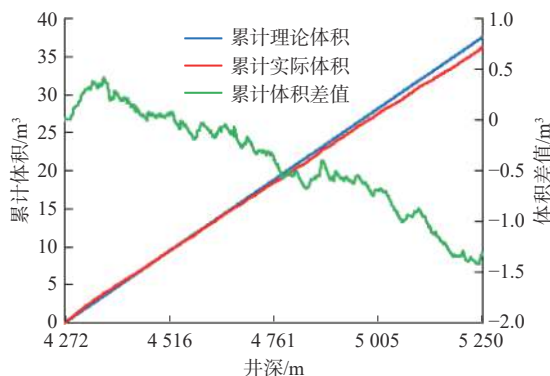


图3 岩屑体积随钻跟踪图

Fig.3 Tracing curves of cuttings volume while drilling

监测井段立柱返出率变化情况统计结果表明, 立柱返出率总体保持在85%~105%。其中, 4 272~4 588 m井段立柱返出率波动剧烈, 平均立柱返出率为98%; 4 588~4 814 m井段立柱返出率较为稳定, 保持在96%左右; 4 814~5 250 m井段立柱返出率存在较小幅度波动, 平均立柱返出率为93%。立柱结束井深为4 409, 4 588, 5 046和5 133 m的立柱返出率较低, 接立柱时摩阻较大, 判断井底岩屑沉积成床, 及时提醒井队采取增加拉划与循环时间、降低钻速等措施后, 返出率增大, 避免了井眼清洁事故。

5 结论与建议

1)建立了岩屑干湿质量转换系数方法、倾倒时段漏接岩屑补偿方法和细碎岩屑补偿方法, 推导了实际返出岩屑体积计算方法。

2)建立了基于实际返出岩屑体积与理论岩屑体积对比的井眼清洁分析评价流程, 给出了不同井眼清洁状态下的针对性施工措施。

3)水平井井眼清洁定量化监测评价技术主要根据井底岩屑返出率对井眼清洁状态进行监测评价, 对于井深较大的水平井井段, 岩屑返出率监测评价存在一定的滞后性。建议后续结合ECD、摩阻、扭矩、大钩载荷等参数进行研究, 实现井眼清洁多参数多角度实时监测与分析, 提高井眼清洁状态评价及异常情况预警的准确性。

参 考 文 献

References

- [1] 范玉光, 杨恒林, 付利, 等. 川渝地区水平井卡钻类型与防治措施研究[J]. *西部探矿工程*, 2020, 32(3): 87-90.
FAN Yuguang, YANG Henglin, FU Li, et al. Study on sticking types and prevention measures of horizontal wells in Sichuan and Chongqing areas[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2020, 32(3): 87-90.
- [2] 孙永兴, 范生林, 乔李华. 页岩气水平井卡钻主要原因及预防对策[J]. *天然气工业*, 2018, 38(12): 107-113.
SUN Yongxing, FAN Shenglin, QIAO Lihua. Main reasons and preventive countermeasures for pipe sticking in shale-gas horizontal wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(12): 107-113.
- [3] COOPER L W, HOOK R A, PAYNE B R. Air drilling techniques[R]. SPE 6435, 1977.
- [4] 汪海阁, 刘希圣, 丁岗. 水平井段岩屑床厚度模式的建立[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1993, 17(3): 25-32.
WANG Haige, LIU Xisheng, DING Gang. The model of cuttings bed thickness in horizontal well section[J]. *Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science)*, 1993, 17(3): 25-32.
- [5] LARSEN T I, PILEHVARI A A, AZAR J J. Development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1997, 12(2): 129-135.
- [6] MARTINS A L, SANTANA C C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells: a dimensionless approach[R]. SPE 23643, 1992.
- [7] NGUYEN D, RAHMAN S S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells[R]. SPE 36383, 1998.
- [8] 汪志明, 张政. 大斜度井两层稳定模型岩屑传输规律研究[J]. *石油钻采工艺*, 2003, 25(4): 8-11.
WANG Zhiming, ZHANG Zheng. Study on cuttings transportation tendency of the dual layer stabilizing model in highly inclined well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2003, 25(4): 8-11.
- [9] 范玉光, 田中兰, 明瑞卿, 等. 国内外水平井井眼清洁监测技术现状及发展建议[J]. *石油机械*, 2020, 48(3): 1-9.
FAN Yuguang, TIAN Zhonglan, MING Ruiqing, et al. Research on horizontal wellbore cleaning monitoring technologies[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(3): 1-9.
- [10] GUILD G J, WALLACE I M, WASENBORG M J. Hole cleaning program for extended reach wells[R]. SPE 29381, 1995.
- [11] 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.
- [12] ZHANG Feifei, FILIPPOV A, MISHKA S, et al. Hole cleaning and ECD management for drilling ultra-long-reach laterals[R]. SPE 183786, 2017.
- [13] BRETT J F, BECKETT A D, HOLT C A, et al. Uses and limitations of drillstring tension and torque models for monitoring hole conditions[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1989, 4(3): 223-229.
- [14] JOHANCSEK C A, FRIESEN D B, DAWSON R. Torque and drag in directional wells-prediction and measurement[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, 36(6): 987-992.
- [15] VOS B E, REIBER F. The benefits of monitoring torque & drag in real time[R]. SPE 62784, 2000.
- [16] MURGAS J F C, TOVAR L V. Wellbore stability improvement using caving analysis[R]. ISRM-ISC-2019-09, 2019.

[编辑 滕春鸣]