

# 水平井井眼清洁随钻监测与评价方法研究

孙 凯

(中石化中原石油工程有限公司钻井一公司,河南 濮阳 457001)

**摘要:**现有的岩屑流量测量系统在实际工作过程中存在岩屑倾倒不彻底,以及井眼清洁和井壁稳定方面的风险。本文在分析影响水平井井眼清洁因素的基础上,针对现有岩屑流量测量存在的问题,提出了基于岩屑推扫的岩屑流量测量技术方案,解决了以往岩屑流量测量过程设备倾倒岩屑不彻底问题,减少人工清洁频率;基于岩屑返出率建立了井眼清洁和井壁稳定定量监测方法,形成了井眼清洁和井壁稳定风险监测与评价方法。通过现场应用测试,成功预警了井眼不清洁和井壁失稳风险,证明了本文建立的方法可以应用于现场施工中。

**关键词:**井眼清洁;井壁稳定;岩屑流量测量;岩屑推扫;随钻监测;水平井

**中图分类号:**P634;TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)01-0102-05

## Application of horizontal wellbore cleanness monitoring and evaluation technology while drilling

SUN Kai

(Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co. Ltd, SINOPEC, Puyang Henan 457001, China)

**Abstract:** In view of the problems with the existing cuttings flow measurement system, such as incomplete cuttings dumping in the actual working process, the risk of borehole cleanness, wellbore stability, for which the specific evaluation method has not been formed, this paper analyzes the factors affecting horizontal well borehole cleanness, and puts forward the technical scheme for cuttings flow measurement based on cuttings sweeping, solving the problem of incomplete dumping of rock cuttings in the previous process of rock cuttings flow measurement with reduction of the manual cleaning frequency. Based on the return rate of rock cuttings, the quantitative monitoring method of wellbore cleanness and wellbore stability has been established, and the risk monitoring and evaluation method of wellbore cleanness and wellbore stability formed. Through the field application test, the risk of wellbore uncleanness and wellbore instability has been successfully warned, which proves that the method established in this paper can be applied to the field construction.

**Key words:** borehole cleaning; wellbore instability; cuttings measurement; cuttings sweeping; monitoring while drilling; horizontal well

水平井钻井作业期间良好的井眼清洁对保障钻井安全起着重要作用,随着井斜角的增加,岩屑发生沉降在井眼底边形成岩屑床。多年来,人们提出了不同的预防和控制岩屑床形成方法,例如添加特殊的钻井液添加剂以增强钻井液的岩屑输送能力、岩屑床破除器等。但是,这些方法不能有效地防止岩屑床的形成,甚至会导致其它问题,如当量循环密度过大。

井眼清洁不良会导致卡钻、机械钻速降低、摩阻和扭矩过大,通常会延长钻井周期,从而增加钻井总成本。许多因素直接或间接影响着井眼清洁效率,如钻井液性能、转速、排量等。许多学者针对影响井眼清洁的因素开展室内实验和机理模型研究工作,形成了井眼清洁计算与分析方法,但是由于考虑模型求解和实时分析的问题,已有井眼清洁理论模型均进行简化处理,造成模型计算结果与实

收稿日期:2022-05-20; 修回日期:2022-11-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.01.015

作者简介:孙凯,男,汉族,1984年生,副经理,高级工程师,油气井工程专业,硕士,从事钻井工程技术研究及管理工作,河南省濮阳市华龙区, sinopecsun@163.com。

引用格式:孙凯.水平井井眼清洁随钻监测与评价方法研究[J].钻探工程,2023,50(1):102-106.

SUN Kai. Application of horizontal wellbore cleanness monitoring and evaluation technology while drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):102-106.

际情况存在误差。国外油服公司研究了基于岩屑流量测量的井眼清洁监测技术并实现了规模化应用,如斯伦贝谢公司的 Clear 系统、Geolog 公司的 Drill-Clean 系统<sup>[1]</sup>等,国内技术人员也进行了相关研究并进行了现场应用测试<sup>[2]</sup>。笔者通过调研国内外技术发现,岩屑流量测量硬件在实际工作过程中存在岩屑倾倒不彻底问题,影响了测量精度;针对井眼清洁和井壁稳定风险问题还未形成具体的评价方法。

本文针对水平井井眼清洁问题,分析了影响井眼清洁的因素,针对现有岩屑流量测量存在的问题,提出了基于岩屑推扫的岩屑流量测量技术方案,解决了以往岩屑流量测量过程设备倾倒岩屑不彻底问题,减少人工清洁频率;基于岩屑返出率、摩阻扭矩、元素、掉块等参数建立了井眼清洁和井壁稳定定量监测方法,形成了井眼清洁和井壁稳定风险监测与评价方法。通过现场应用测试,成功预警了井眼不清洁和井壁失稳风险,证明了本文建立的方法可以应用于现场施工中。

## 1 水平井井眼清洁影响因素分析

### 1.1 钻井液密度影响

在水平井施工过程中,受重力影响导致钻杆偏心,钻柱通常朝向井眼底边下沉。当窄间隙位于钻杆下方时,通常认为钻杆偏心为正,当窄间隙位于钻杆上方时,通常认为钻杆偏心为负。岩屑的大小、形状和密度是影响其在钻井液中动态行为的因素。唯一导致岩屑沉降的力是重力,随着井斜角的增加,需要更多的拖拽力抵消重力。

当钻井液密度增加时,增强了浮力效应,钻井液悬浮岩屑的能力增加,因此可以以较小的钻井液流速携带岩屑。但是,提高钻井液密度会降低机械钻速,增加钻井成本。通常情况下,不建议采用调节钻井液密度参数提高井眼清洁效果<sup>[2-7]</sup>。

### 1.2 井斜角影响

井斜角对岩屑运移有很大影响。随着井斜角增加,环空中的岩屑堆积增加,因此需要更高的钻井液流速清除岩屑。按照岩屑清除效率可把水平井分为快速清洁(井斜角 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ )、中速清洁(井斜角 $30^{\circ}\sim 65^{\circ}$ )和慢速清洁(井斜角 $65^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )3个区域,如图1所示。在与垂直方向成 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,环形岩屑浓度最高。随着井斜角变大,并保持其他参数不变,会显著降低钻井液的携岩能力。井斜角 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 最易形

成岩屑床,同时容易在停泵期间发生岩屑床崩塌。

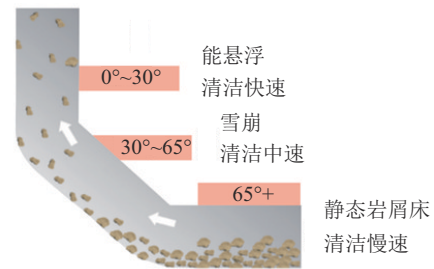


图1 水平井岩屑清除效率分区示意

Fig.1 Cuttings removal efficiency zoning diagram of horizontal wells

### 1.3 转速影响

在偏心环空中,旋转钻柱可以清除窄间隙处的岩屑。在非旋转钻具的偏心环空中,钻井液优先流经宽间隙环空。低转速时,粘性耦合较薄,系统能量较低,岩屑运移困难;中等转速时,钻具位置有所改变,粘性耦合变厚,但可能仍比钻具接箍薄,井眼低边仍为层流状态,岩屑运移程度偏低;高转速时,钻具位置发生大幅变化,粘性耦合厚度更厚,井眼低边达到紊流状态,可以很轻易地搅动井眼低边的岩屑,将其带动到传送带上向前运移。如图2所示。

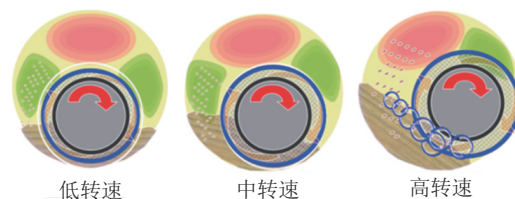


图2 不同转速对偏心环空井眼清洁影响

Fig.2 Effect of different rotation speed on wellbore cleanness in eccentric annulus

### 1.4 钻井液流变性能影响

影响井眼清洁的钻井液流变性能包括塑性粘度  $PV$ 、动切力  $YP$ 、流动指数  $n$ 、稠度系数  $k$ 。就井眼清洁而言,直井钻井相对简单。唯一的要求是粘度应足以防止岩屑在停止泵送期间沉降任何显著距离。研究表明,对于给定的流速,随着  $n/k$  的增加或  $YP/PV$  的降低,岩屑床可以降低到较低的水平。一般来说,屈服点  $YP$  值的增加会减少偏心钻杆下的流量。增加流动指数  $n$  值会提高偏心钻杆下的流体速度。低  $n$  流体在偏心钻杆下的清洗速度比  $n$  值较高

且角度 $>45^\circ$ 的流体要快。 $n$ 值较低的流体会从偏心钻杆(窄间隙)下方分流,从而降低井眼清洁效率。在这种情况下,从井眼底边清除岩屑的唯一方法是依靠钻具旋转、倒划眼或较长的循环时间<sup>[8-11]</sup>。

### 1.5 钻井液排量影响

钻井液排量对井眼清洁的影响等同于井筒内钻井液流速,是井眼清洁中最有效的参数<sup>[12]</sup>,并且可以从地面快速控制。流速的增加极大地阻止了岩屑床的形成和发展,并提高了岩屑携带能力,因为流速越高,岩屑床上施加的剪应力越大,从而阻止了岩屑床的形成。只要井内的流态是湍流的,井眼清洁就非常有效。在考虑该参数时,应仔细考虑一些限制,如地面立管压力、地面和井下流量限制。

最后提到的2个因素,钻井液流速和流变特性,可以从地面控制,成本很低或没有成本。但其它参数的控制通常是不可控或很难控制。

## 2 水平井井眼清洁随钻监测方法

### 2.1 岩屑流量测量系统设计

钻井过程中由于岩屑流量相对于钻井液流量较小,在钻井液中测量岩屑流量存在精度不足问题。因此,岩屑流量测量系统必须在振动筛出口位置,由于振动筛环境污浊、高频振动以及有限的空间限制了机械装置安装,因此需要根据现场安装环境设计合理的岩屑计重系统以及运行环境,实现岩屑收集、在线计重及清理<sup>[13-16]</sup>。

由于岩屑称重器容量限制,当称得岩屑量达到规定值时必定存在倾倒旧岩屑重新接受新岩屑的过程。图3展示了现有国内外系统普遍采用的翻转式岩屑流量测量装置,通过翻转岩屑测量板(或斗)倾倒旧岩屑,但由于钻井液粘度影响导致岩屑清除不彻底,影响了测量精度。推扫式岩屑流量测量装置(见图4)通过增加推扫板,“扫除”测量板表面的岩屑,相比翻转式,解决了岩屑清除不彻底的问题。

岩屑流量测量装置由工控机控制传感器的称重实现定时质量值采集、存储、数值清零,并输出控制信号,执行定值岩屑推扫。当岩屑掉落在测量盘上面时,称重传感器弹性体发生变形,输出与质量成正比的电信号,传感器输出信号经过放大器放大后,输入到A/D转换模块,将模拟信号转换为数字信号并进行滤波处理,然后传递给工控机得出定时记录质量值。



图3 翻转式岩屑流量测量装置(DrillClean系统)

Fig.3 Cuttings flow measuring device (DrillClean system)

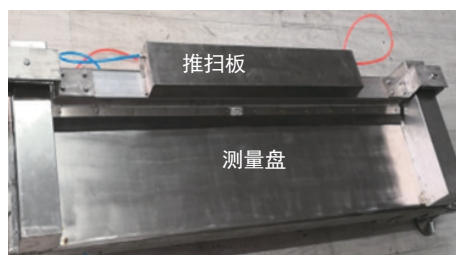


图4 推扫式岩屑流量测量装置

Fig.4 Sweeping type cuttings flow measuring device

工控机一方面进行瞬时质量记录入库存储,另一方面工控机根据规定的时间间隔或规定的质量,将预先设置的控制指令信号传递给继电器,继电器将开关质量传递给电磁阀,电磁阀利用线圈是否通电控制气缸工作,实现岩屑自动推扫。

岩屑推扫控制命令包括前推、抬起、后退、落下等气缸控制4个动作以及等待4个动作完成的4个等待时间和称重清零(见表1),具体等待时间需要根据气缸调压阀的开度进行调节,当气量小时,气缸动慢,等待时间就相应长,当气量大时,气缸动快,等待时间就相应短,气缸调压阀的开度确定需要根据钻井液粘度影响确定。

### 2.2 基于岩屑体积平衡的井眼清洁评价方法

岩屑体积平衡是指实际和理论返出岩屑体积比值(岩屑返出率,%)。最佳的岩屑体积平衡关系是地面返出和井下产生岩屑(包括掉块)体积相等<sup>[3-5]</sup>,即岩屑返出率100%。如图5所示,当返出率 $>100\%$ 时,表明存在井壁稳定问题,井壁存在掉块剥落;当返出率 $<100\%$ 时,表明存在井眼清洁问题,井筒内岩屑堆积存在岩屑床。在地面测量的掉块数量能准确测量不稳定井段的位置、大小和严重程度。

井眼清洁辅助分析方法:利用岩屑运移水力学模型随钻分析滞留岩屑在环空成床高度,当岩屑床

表 1 岩屑测量自动控制命令序列

Table 1 Cuttings survey automatic control command sequence

1	前推时间	$T_{head}$
2	等待时间	$T_{w1}$
3	抬起时刻	$T_{up}$
4	等待时间	$T_{w2}$
5	后退时刻	$T_{back}$
6	等待时间	$T_{w3}$
7	落下时刻	$T_{down}$
8	等待时间	$T_{w4}$
称重清零		

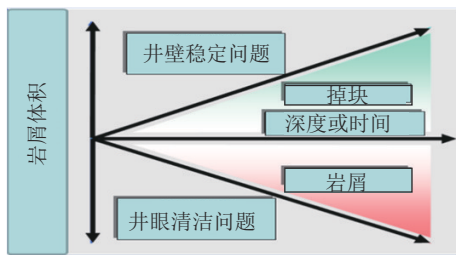


图 5 返出岩屑体积平衡与井眼清洁、井壁稳定问题关系

Fig.5 Relationship between cuttings volume balance, and wellbore cleanliness and wellbore stability

高度大于环空内径 10% 时判断为环空堵塞;利用实时摩阻扭矩模型随钻分析摩阻扭矩变化趋势,当实际值偏离理论较大时判断为阻卡风险高。

井眼失稳辅助分析方法:通过观察岩屑掉块尺

寸、大小和类型分析掉块力学特征,评价井壁失稳原因;利用元素录井技术随钻分析掉块元素含量,评价掉块所在的地层位置。

### 3 现场应用

XXX 井是四川荣县区域一口页岩气水平井,设计井深 5524 m,水平段长 2000 m。该井区储层段埋深在 3300~4000 m 之间,埋深相对较深。水平段构造变异大,裂缝发育,储层段地层稳定性差,水平井穿行过程中井壁极易出现掉块垮塌,出现卡钻、填井侧钻事故,严重影响水平井延伸能力,前期钻井过程中发生卡钻被迫填井 2 次,最大井深钻达 3600 m。第三次侧钻决定从 3020 m 应用本文方法开展井眼清洁随钻监测技术服务。利用本文设计的推扫式岩屑流量测量装置成功地实现了岩屑返出流量随钻测量,现场安装过程中由钻井施工方提供气源,要求气源压力介于 0.7~0.8 MPa 之间,通过网线连接综合录井仪实时采集钻井实时数据。图 6 是根据本文建立的模型计算的岩屑体积平衡跟踪图,绿色是理论岩屑体积,蓝色是实际岩屑体积,红色是实际和理论体积差值。随钻跟踪过程中累计提供井眼清洁日报 62 份,异常提示 5 次(其中井眼清洁预报 2 次、掉块异常预报 2 次、卡钻异常预报 1 次),通过随钻跟踪返出岩屑体积,通过优化高密度泥浆施工方案,及时返出井下堆积岩屑,降低掉块卡钻风险,成功钻过邻井卡钻地层位置,实现近 1200 m 的水平段延伸。

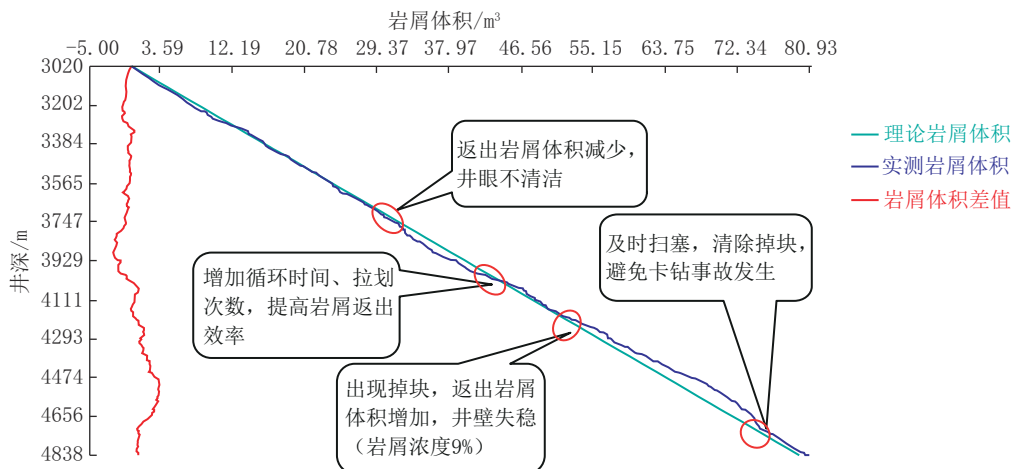


图 6 XXX 井井眼清洁随钻监测与评价

Fig.6 XXX wellbore cleanliness monitoring and evaluation diagram



#### 4 结论

(1) 本文通过分析水平井井眼清洁影响因素,在造斜段施工过程中最易形成岩屑床,在水平段施工过程中提高转速,增加  $n/k$  或降低  $YP/PV$  值可以降低岩屑床水平;

(2) 针对传统翻转式倾倒岩屑存在的问题,基于推扫式岩屑称重方案可以提高清洁岩屑效率,提高测量精度,减少了岩屑称重过程中人工清洁岩屑频率。

(3) 基于岩屑体积平衡的井眼清洁评价方法可以实现井眼清洁定量监测和井壁失稳早期检测,配合摩阻扭矩、水力学等工程分析手段可以提升现场对于井眼清洁和井壁稳定问题预警能力。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李振川,姚昌顺,胡开利,等.水平井井眼清洁技术研究与实践[J].新疆石油天然气,2022,18(1):48-53.  
LI Zhenchuan, YAO Changchun, HU Kaili, et al. Research and practice of horizontal wellbore cleaning technology [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(1): 48-53.
- [3] 曾家新,吴申尧,罗艺,等.井眼清洁监测系统在西南油气田的工程应用[J].录井工程,2021,32(2):96-101.  
ZENG Jiabin, WU Shenyao, LUO Yi, et al. Engineering application of borehole cleaning monitoring system in Southwest Oil and Gas Field [J]. Mud Logging Engineering, 2021, 32(2): 96-101.
- [4] 曾永文,王东生,张继军,等.水平井岩屑体积平衡计算方法研究与应用[J].录井工程,2019,30(1):13-16.  
ZENG Yongwen, WANG Dongsheng, ZHANG Jijun, et al. Research and application of volume balance calculation method of rock cuttings in horizontal wells [J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(1): 13-16.
- [5] 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):125-129.  
WANG Haige, LIU Xisheng, LI Hongqian, et al. Experimental study on rock cuttings carried by drilling fluid in horizontal well section [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(4): 125-129.
- [6] Ozbayoglu E.M., Miska S.Z., Reed T., et al. Analysis of bed height in horizontal and highly-inclined wellbores by using artificial neural networks [J]. Society of Petroleum Engineers, 2002. doi:10.2118/78939-MS.
- [7] Rooki R., Rakhshkhorshid M. Cuttings transport modeling in underbalanced oil drilling operation using radial basis neural network [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.08.001.
- [8] 郭勇,熊超,李渊,等.玛131示范区水平井井眼清洁技术研究[J].新疆石油天然气,2019,15(4):43-47.  
GUO Yong, XIONG Chao, LI Yuan, et al. Study on horizontal well hole cleaning technology in Ma 131 demonstration area [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(4): 43-47.
- [9] 郭晓乐,汪志明,龙芝辉.大位移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.
- [10] 王建龙,张长清,郭云鹏,等.大斜度井井眼清洁影响因素及对策研究[J].钻采工艺,2020,43(6):28-30.  
WANG Jianlong, ZHANG Changqing, GUO Yunpeng, et al. Influencing factors and countermeasures of well cleaning in high-angle wells [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(6): 28-30.
- [11] 泮伟,乌效鸣.水平孔携岩能力影响因素数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):1-7.  
PAN Wei, WU Xiaoming. Numerical simulation study on factors affecting cuttings-carrying capacity in horizontal holes [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 1-7.
- [12] 秦如雷,王林清,陈浩文,等.钻井液连续循环钻井技术及自动化装备设计[J].钻探工程,2021,48(6):63-67.  
QIN Rulei, WANG Linqing, CHEN Haowen, et al. Drilling fluid continuous circulation drilling technology and automatic equipment design [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 63-67.
- [13] 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 transmission law of two-layer stability model in highly deviated wells [J]. OIL Drilling & Production Technology, 2003, 25(4): 8-11.
- [14] 刘希圣,郑新权,丁岗.大斜度井中岩屑床厚度模式的研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),1991,15(2):28-35.  
LIU Xisheng, ZHENG Xinquan, DING Gang. Study on thickness model of cuttings bed in highly deviated wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1991, 15(2): 28-35.
- [15] 赵宝祥,陈江华,李炎军,等.涠洲油田大位移井井眼清洁技术及应用[J].石油钻采工艺,2020,42(2):156-161.  
ZHAO Baoxiang, CHEN Jianghua, LI Yanjun, et al. Hole cleaning technology suitable for extended reach wells and its application in the Weizhou Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(2): 156-161.
- [16] 王建龙,徐旺,郭耀,等.苏里格气田苏25区块水平井钻井关键技术[J].长江大学学报(自科版),2019,16(7):26-30.  
WANG Jianlong, XU Wang, GUO Yao, et al. Key technology of horizontal well drilling in Block Su25 of Sulige Gas Field [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(7): 26-30.

(编辑 李艺)