

水平井V形岩屑床清除工具研制与应用

毕晨光

(大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163000)

摘要:井筒岩屑床堆积是制约水平井安全高效钻井的主要因素之一,研究表明环空钻井液螺旋流动能够有效提升岩屑清除效率。为此,应用CFD数值模拟与实验的方法设计了一种能够产生环空螺旋流的岩屑床清除工具并进行了现场应用,结果表明:V形叶片对岩屑运移的促进效果及对岩屑床的扰动能力均要强于螺旋形和直棱形叶片,是产生环空螺旋流的首选结构形式;V形叶片的叶片长度存在最优区间,叶片高度越大效果越好,叶片数量影响较弱;现场应用表明岩屑床清除工具在强度、硬度及叶片耐磨性均满足页岩气水平井现场作业要求,工具可随钻破坏并清除岩屑床,结合起钻过程中对岩屑床堆积重点井段进划眼作业,可将顽固性大颗粒岩屑床破坏清除,有效改善井眼清洁效果。

关键词:岩屑运移;水平井;井眼清洁;岩屑床清除工具;V形叶片

中图分类号:TE243;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0130-08

Development and application of V-shaped cuttings removal tool for horizontal wells

BI Chenguang

(Daqing Oilfield Company Limited, Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract: The accumulation of cuttings bed in the wellbore is one of the main factors restricting the safe and efficient drilling of horizontal wells. Research has shown that the spiral flow of drilling fluid in the annulus can effectively improve the efficiency of cutting removal. For this purpose, a rock debris removal tool capable of generating annular spiral flow was designed using CFD numerical simulation and experimental methods, and on-site application was also carried out. The results showed that the promoting effect of the V-shaped blade on cutting transport and disturbance ability on the cutting bed is stronger than that of the spiral and straight edged blades, making it the preferred structural form for generating annular spiral flow. There is an optimal range for the length of V-shaped blades, and the higher the blade height, the better the effect, while the number of blades has a weaker impact. The on-site application shows that the cutting removal tool meets the requirements of shale gas horizontal well operation in terms of strength, hardness, and blade wear resistance. The tool can destroy and remove the cutting bed while drilling. Combined with reaming operations on key sections where the cutting bed accumulates during the tripping process, it can effectively remove the stubborn large particle cuttings and improve the borehole cleaning effect.

Key words: cuttings migration; horizontal well; borehole cleaning; cutting bed removal tools; V-shaped blade

0 引言

近年来,石油与天然气需求大幅增加,对外依

存度逐年攀升。常规油气进入自然递减阶段,稳产难度大,加大非常规油气开发力度能有效实现能源

收稿日期:2023-12-28; **修回日期:**2024-03-22 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2024.05.016

基金项目:中国博士后科学基金资助项目“钻柱中应力分布差异对声传播特性的影响规律研究”(编号:2021M693508);中国石油直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目“地层压力-井筒环境交互响应机制与随钻自适应测量方法研究”(编号:2021DQ03-17);中国石油科学研究与技术开发项目“大庆古龙页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(编号:2021ZXJ01A11)

作者简介:毕晨光,男,汉族,1990年生,工程师,油气井专业,主要从事水平井钻井工艺研究及井控管理相关工作,黑龙江省大庆市让胡路区西柳街4号,bichenguang@cnpc.com.cn。

引用格式:毕晨光.水平井V形岩屑床清除工具研制与应用[J].钻探工程,2024,51(5):130-137.

BI Chenguang. Development and application of V-shaped cuttings removal tool for horizontal wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):130-137.

接替^[1-5]。水平井开发技术能有效增加井筒与油气储层的接触面积,提高采收率和油气产量,是规模开发非常规油气的主要井型。但水平井的携屑效率极低,岩屑堆积成岩屑床后容易引发钻杆高摩阻、高扭矩、托压等问题,严重时造成井眼垮塌等安全事故,对水平井安全高效开采造成严重影响^[6-8]。

为解决水平井段岩屑运移困难问题,国内外学者对井眼清洁工具在水平井中的携屑机理进行了大量研究。研究表明管道螺旋流能够有效增加流体与管壁之间的剪切力,与普通轴向流动相比颗粒不容易在输送过程中出现沉降的问题,可以提高管道中颗粒的输送效率^[9-12]。Huang等^[13]通过改变不同的叶片切向角度与流体的轴向速度分析旋流叶片的作用机理,得到不同条件下的旋流强度变化。Pashtrapanska等^[14]通过实验分析了管道内的流体湍流的变化,根据螺旋流的实验结果表明螺旋流能引起螺旋流的湍流动能指数型增加。Rocha等^[15]等通过数值模拟和实验方法使用螺旋流对油水混合物进行分离研究,结果表明管内螺旋流能有效促进油水两相的分离,但相较于普通轴向流动,螺旋流会导致摩擦系数显著增加。陈锋等^[16]、房亮等^[17]等通过数值模拟研究证明了接头处加工有螺旋形叶片的工具拥有优秀的造涡能力,可以有效清洁沉积于井眼低边的岩屑。孙浩玉^[18]、薛曼等^[19]、孙凯等^[20-21]、李奎^[22]通过数值模拟研究发现V形叶片旋转会使环空产生大量旋流,有利于水平井岩屑的携带与清除。

为了将岩屑运移的基础理论研究转化成为提升水平井井眼清洁能力的有效手段,本文基于国内外对于螺旋流能够有效促进岩屑运移、提升井眼清洁的研究成果,设计了一种能够产生环空螺旋流的岩屑床清除工具,并采用CFD数值模拟与实验的方

法进行工具的优化设计,通过现场试验对工具的适用性和应用效果进行了评价。本论文的研究内容为提升页岩油气水平井井眼清洁效果提供了技术手段。

1 岩屑清除工具设计与室内实验研究

1.1 水平井岩屑床清除工具叶片结构设计

基于国内外岩屑床清除工具调研结果,初步优选了3种结构适用于 $6\frac{1}{2}$ in(1 in=25.4 mm,下同)井眼的岩屑床清除器(图1)。3种叶片外径均为180 mm,钻杆外径144 mm;叶片长度300 mm,数量6个,轴向分布。直棱形叶片平行于钻杆轴线;螺旋形及V形前后叶片螺距1500 mm。V形叶片开口方向与钻杆旋转方向相反,以叶片轴线中点为折转折点。为避免叶片过流面积变化对周围流场形成干扰,准确地对3种工具的作用效果进行比较,叶片部分径向切面的形状完全相同。模型中叶片前端环空流场长度2 m,后端环空流场长度为30 m,网格总数为 2.4×10^6 。

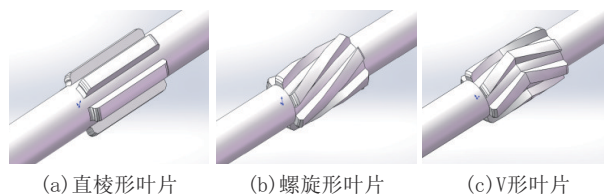


图1 三种岩屑床清除工具结构示意图

Fig.1 Structural diagram for three types of cutting removal tool

1.2 水平井岩屑床清除工具流场数值模拟

1.2.1 速度场分析

3种叶片结构在距离入口70 mm的横截面和轴线上的速度分布情况如图2所示。

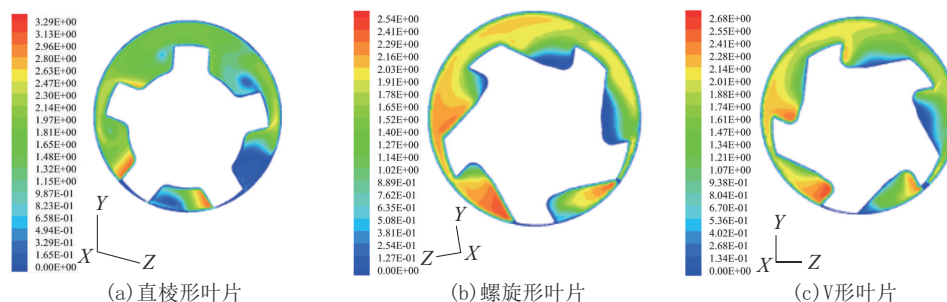


图2 不同叶片横截面速度分布

Fig.2 Section speed distribution for different blades

图中可以看出,叶片的存在对钻井液具有一定的切向加速作用,尤其在工具的低边,加速效果更明显。入口切向速度为0,直棱形叶片将速度提高到3.29 m/s,V形叶片将速度提高到2.68 m/s,螺旋形叶片将速度提高到2.54 m/s,直棱形叶片的切向加速效果最好。

3种叶片结构在轴线上的速度分布如图3所示,图中可以看出,叶片的存在对钻井液具有一定的轴向加速作用,入口轴向初速度为2 m/s,直棱形叶片

最高速度2.25 m/s左右,V形叶片最高速度2.5 m/s左右,螺旋形叶片最高速度略高于2 m/s,V形叶片加速效果最好,且速度在轴线上的分布极不规则,造成钻井液湍流效果最好,直棱形叶片轴线上的速度最为规则,造成的钻井液湍流效果最差。从切向加速效果看,直棱形叶片对钻井液的扰动能力最强,从轴向加速和流体湍流效果看,V形叶片对钻井液的扰动能力最强。

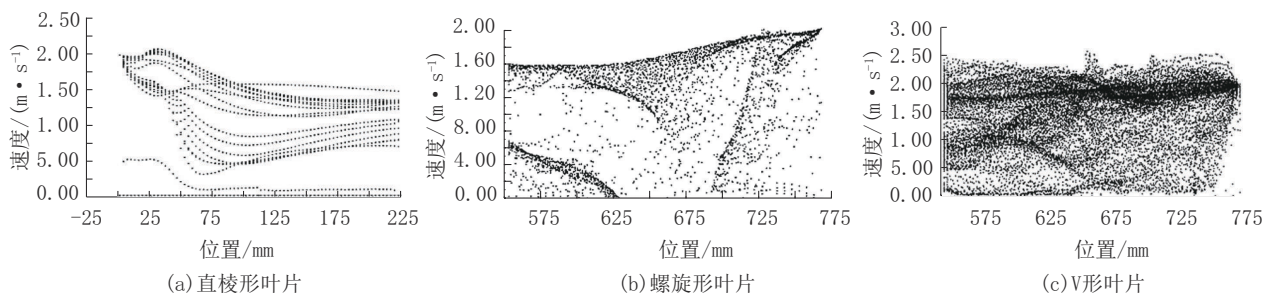


图3 不同叶片轴线上的速度分布

Fig.3 Axis speed distribution for different blades

1.2.2 叶片结构对岩屑体积分数的影响规律

通过数值模拟得出了3种叶片结构对岩屑体积分数的影响规律。图4为3种工具模型中岩屑沿轴向方向岩屑体积分数分布图,图中可以看出:(1)岩屑进入流场后迅速开始沉降,岩屑体积分数从均匀分布到迅速向0~0.2、0.8~1.0的区间聚集;(2)岩屑在经过叶片流道时,受到叶片的作用,岩屑体积分数为0.8~1.0的点迅速减小至消失,通过叶片作用区域环空流场后,岩屑体积分数重新向0~0.2、0.8~1.0的区间聚集;(3)从岩屑体积分数方面,3种形状工具作用范围大小顺序为:螺旋形>直棱形>V形。

为更加细致比较岩屑沿轴向方向分布情况,将径向截面上控制单元(网格)内岩屑浓度做平均值定义为平均岩屑浓度,编程计算了3个模型中平均岩屑浓度轴线方向分布规律图,如图5所示。从图中,可以看出叶片平均岩屑体积分数最小值:直棱形>螺旋形>V形,这说明V形岩屑床清除工具在其作用范围内,对岩屑运移的促进效果强于另外两种叶片。

图6为3种岩屑床清除工具在Z=0.4 m处截面岩屑浓度分布云图,图中可见:(1)螺旋形岩屑床清

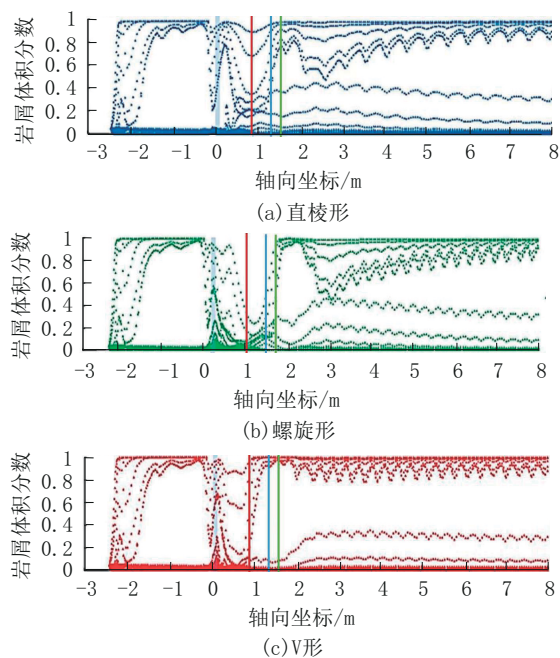


图4 岩屑体积分数轴向分布(局部)

Fig.4 Axial distribution of cutting volume fraction (in part)

除工具环空岩屑床面积低于直棱形,环空中有部分岩屑被卷携至环空高边;(2)V形岩屑床清除工具环空岩屑床面积最小,部分岩屑被卷携脱离岩屑床,

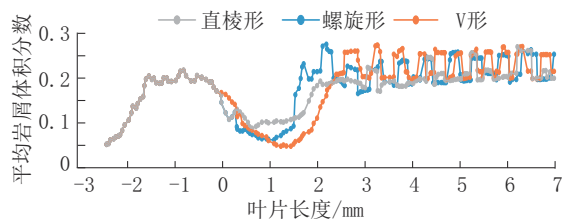


图5 平均岩屑体积分数轴向分布(局部)

Fig.5 Axial distribution of average cutting volume fraction (in part)

但仍在低边运移;(3)直棱型岩屑床清除工具岩屑浓度分布也体现了工具对岩屑的卷携作用,但效果不如另外两者明显。这说明了螺旋形岩屑床清除工具对环空岩屑具有更高的卷携作用,促使岩屑脱离环空低边;而V形岩屑床清除工具对岩屑床具有更强的扰动能力,对岩屑床具有更强的破坏作用。进一步优选岩屑床清除工具结构为V形。

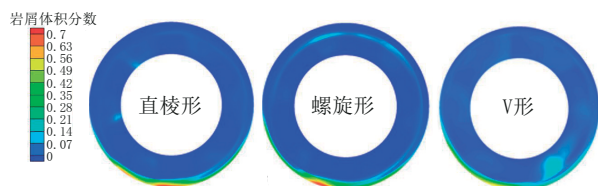


图6 岩屑沿环空局部浓度分布

Fig.6 Partial concentration distribution of cuttings along the annulus

2 室内实验

水平井携岩试验架如图7所示,具备以下功能:(1)模拟常温低压条件下不可压缩牛顿流体在圆管环空内流动特征,可直观岩屑观察流动形态及砂床形态;(2)模拟实际破岩过程,实现连续定量恒速加沙,同时在钻杆转动及不同倾斜角条件下实施环空岩屑模拟实验,观测岩屑床运移与破坏规律,计量稳态流动条件下的环空岩屑浓度返出情况;(3)能够实现实验过程中相关参数实时控制、显示、存盘与后处理,流动过程可视化,真实模拟岩屑床清除工具作用下岩屑分布特点,岩屑床清除特征;(4)实验设备易组装拆卸,便于更换岩屑床清除工具叶片。实验用岩屑床清除工具叶片通过3D打印技术进行制备,如图8所示。

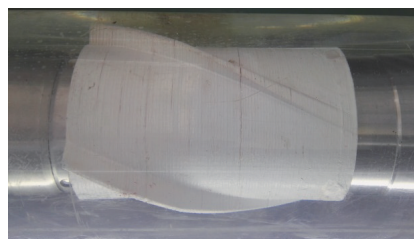
2.1 不同叶片携岩效率对比实验

由图9综合对比无叶片、直棱形、螺旋形、V形时段岩屑排出量曲线可知:岩屑床清除工具会促进

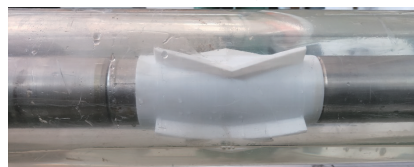


图7 水平井携岩试验架

Fig.7 Cutting carrying test shelf for horizontal well



(a) 螺旋形叶片



(b) V形叶片

图8 不同结构叶片

Fig.8 Blade with different structures

岩屑运移,在短时间内时段岩屑排出量会随时间迅速增加;使用岩屑床清除工具时,岩屑排出量大小比较稳定,不会有较大波动。由图10可知,关停后,无叶片、直棱形叶片、螺旋形叶片、V型叶片实验组并筒岩屑剩余量分别为:9998、3739、3552、3393 g,说明岩屑床清除工具能够有效促进岩屑排出并筒;V形与螺旋形叶片作用效果好于直棱形。22 min内,V形工具携带岩屑30083 g,清洁效率89.86%,为3种叶片中最高,说明其作用效果最好。

2.2 V形叶片结构参数敏感性实验

取V形叶片从叶片长度、高度、数量3个角度,分析叶片结构参数对其作用效果的敏感性。并选取两种实验环境条件进行实验,以减小实验误差。

实验条件一:岩屑注入速度1.0 L/min、岩屑直径

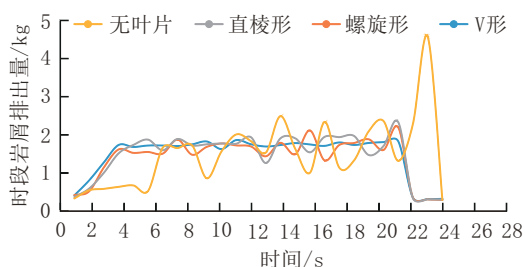


图9 不同叶片岩屑排出量随时间的变化关系

Fig.9 Cutting removal volume for different blade along the time

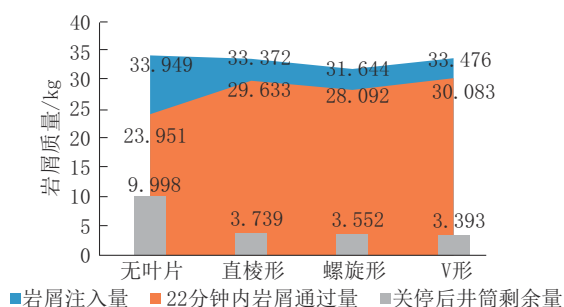


图10 不同叶片岩屑计量统计

Fig.10 Statistics for cutting calculation of different blades

2 mm、钻杆转速 180 r/min、井斜角 80°,排量 20 L/s。

实验条件二:岩屑注入速度 1.5 L/min、岩屑直径 2 mm、钻杆转速 180 r/min、井斜角 70°,排量 20 L/s。

2.2.1 叶片长度优化

结合实验条件与岩屑床清除工具物理模型设计加工了6种不同叶片长度V形岩屑床清除工具。叶片长度分别为40、70、100、150、200、250 mm。

在不同实验条件进行岩屑床清除工具叶片长度作用效果敏感性分析实验各一组,在10 min时关闭加砂系统,记录数据,绘制井筒岩屑剩余量随叶片长度变化规律图,如图11所示。从图中可以看出,在两种实验环境下,井筒岩屑剩余量随叶片长度的增加呈现先降低后保持稳定的规律,说明岩屑床清除工具叶片长度有适宜的长度区间,在此实验条件环境下叶片的最优长度区间为100~150 mm。

2.2.2 叶片高度优化

结合实验条件与岩屑床清除工具物理模型设计加工了5种不同叶片高度岩屑床清除工具。叶片外径分别为71(无叶片)、80、85、90、95、98 mm。

在不同实验条件进行岩屑床清除工具叶片高度作用效果敏感性分析实验各一组,在10 min时关

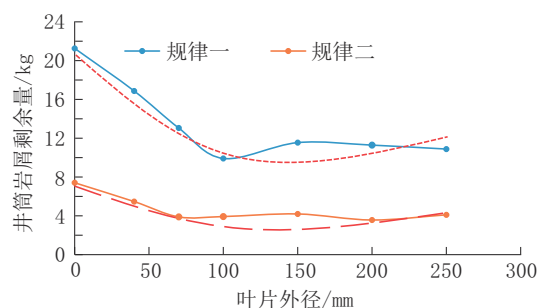


图11 井筒岩屑剩余量随叶片长度变化规律

Fig.11 Cutting residual in borehole varies with the blade length

闭加砂系统,记录数据,绘制井筒岩屑剩余量随叶片外径变化规律图,如图12所示。从图中可以看出,在两种实验环境下,井筒岩屑剩余量随叶片外径的增加呈现逐渐递减的规律,说明岩屑床清除工具作用效果随叶片高度增加而增加。实际设计过程中,要综合考虑叶片外径增加对井壁、遇阻和卡钻的影响。

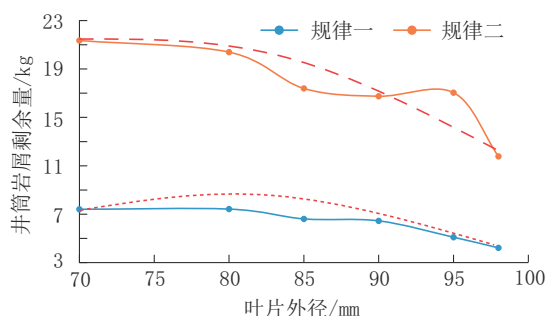


图12 井筒岩屑剩余量随叶片外径变化规律

Fig.12 Cutting residual in borehole varies with the external diameter of the blade

2.2.3 叶片数量优化

结合实验条件与岩屑床清除工具物理模型设计加工了4种含有不同数量叶片的岩屑床清除工具。叶片数量分别为3、4、5、6个。

在不同实验条件进行岩屑床清除工具叶片数量作用效果敏感性分析实验各一组,在10 min时关闭加砂系统,记录数据,绘制井筒岩屑剩余量随叶片数量变化规律图,如图13所示。从图中可以看出,在两种实验环境下,井筒岩屑剩余量随叶片数量的增加先减小,后基本保持不变,但变化规律并不十分显著,适宜叶片数量4~5个为适。

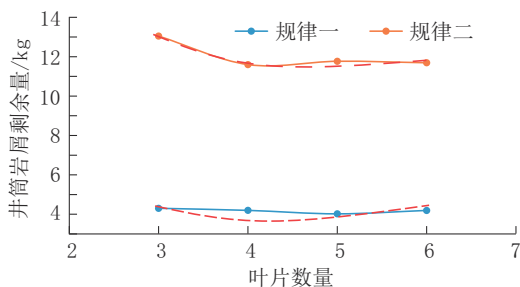


图13 井筒岩屑剩余量随叶片数量变化规律

Fig.13 Cutting residual in borehole varies with the blade number

2.2.4 优化结果分析

对V形岩屑床清除工具长度、高度、叶片数量3种结构参数进行了敏感性分析和优化研究,结合数值模拟及室内实验结果,综合分析得到了工具叶片结构参数对携岩效果影响规律:叶片长度、高度对岩屑床清除工具作用效果的影响较显著,叶片数量所带来的影响较弱;叶片长度存在一个临界值,当叶片长度低于此值时,岩屑床清除工具的作用效果随叶片长度增加而增强,当叶片长度超过此临界值时,工具作用效果不再增强;同时叶片过长会导致工具产生的压降增加;叶片高度对工具作用效果影响明显,叶片高度越大工具作用效果越强;叶片数量对工具作用效果影响较小,适宜叶片数量为4~5个,数量太少会降低工具作用效果,数量继续增加不会明显提升工具作用效果,同时还会增加工具制造难度。

3 水平井岩屑床清除工具设计

基于理论研究和室内实验,针对试验地区地层情况,设计了适用于6½ in井眼的V形结构岩屑床清除工具,该工具由于上下接头、本体、上下螺旋叶片(V形叶片)、流体变速截面等部分组成(如图14)。在水平井钻井中,工具随钻柱旋转过程中依靠本体截面变化及V形叶片搅动产生紊流将岩屑颗粒重新悬浮,依靠钻井液循环出井,实现岩屑床的有效清除,同时,V形叶片对岩屑床有一定的刮削作用,可以进一步促进岩屑清除。工具可以实现正划眼、倒划眼作业,有效降低摩阻,保证起下钻、电测、下套管等作业安全顺利。

技术特点:(1)无活动部件,强度高于钻杆强度;(2)水力旋流、机械刮削双作用破坏、清除岩屑



图14 岩屑床清除工具实物

Fig.14 Picture of the cutting removal tool

床;(3)叶片可修复井眼,减轻或消除微狗腿,畅通井眼;(4)配套开发了水平井岩屑床监测与分析软件,包括岩屑悬浮速度、岩屑床高度、浓度、分布位置计算及岩屑床清除工具安装数量与安装位置优化等功能;(5)可在通井过程中修整不规则井壁、畅通井眼,为后期电测、下套管创造良好井眼条件。

技术参数如表1所示。

表1 技术参数

Table 1 Table for technical parameters

适用井眼尺寸/in	扣型	长度/mm	最大外径/mm	本体直径/mm	叶片数量/个
6½	NC38	1000	130	105	8

4 现场试验

M202是一口长水平段致密油水平井,设计井深5822.84 m,水平段长1800 m,三开井身结构,井身结构与井眼轨迹见图15。三开采用6½ in钻头钻至5579 m,井斜90.8°,岩屑床堆积严重,振动筛基本无岩屑返出,钻柱摩阻扭矩大(摩阻>200 kN),托压严重,叠加地层有砾石发育,地层可钻性差、机械钻速低,仅为0.5 m/h。

为及时清除岩屑床、降低摩阻扭矩,采用V形反螺旋岩屑床清除工具继续通井作业,修整不规则井眼,破坏并清除岩屑床。通井钻具组合为:牙轮钻头×0.7 m+双母接头×0.56 m+扶正器×1.34 m+转换接头×0.57 m+4 in加重钻杆×18.83 m+转换接头×0.43 m+岩屑清除工具×0.82 m+转换接头×0.51 m+4 in加重钻杆×9.45 m+4 in钻杆×2293.61 m+4 in加重钻杆×425.01 m+4 in钻杆,下钻划眼井段4137~5579 m,倒划眼井段5579~4175 m,划眼井段1442 m。工具下井工作时间82 h,外观尺寸完好,划眼过程中振动筛返出岩屑明显。如图16所示,通井后钻柱摩阻由之前的200 kN以上下降到40~50 kN,起下钻通畅,为后期下套管作业的安全顺利提供了良好的井眼条件。

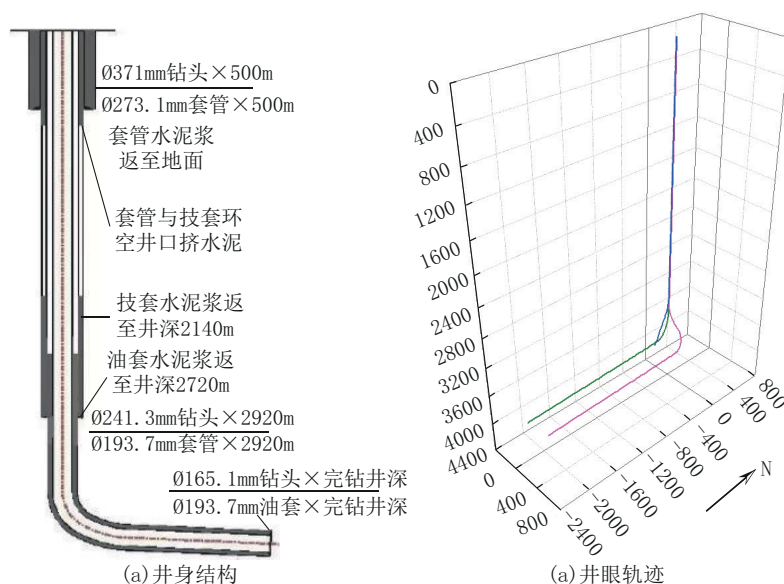


图 15 M202 井井身结构与井眼轨迹

Fig.15 Well structure and trajectory of M202 well

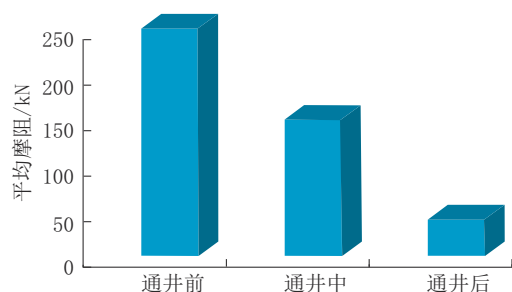


图 16 岩屑床清除工具通井前后摩阻变化

Fig.16 Friction resistance change before and after cutting removal tools gets through the wells

5 结论

(1)V形叶片对岩屑运移的促进效果及对岩屑床的扰动能力均要强于螺旋形和直棱形叶片,是产生环空螺旋流的首选结构形式。

(2)V形叶片的长度和高度对岩屑床清除工具作用效果影响较为显著,叶片数量所带来的影响较弱;叶片长度存在最优区间,在最优区间内,岩屑清除效果随叶片长度增加而增强,叶片高度越大岩屑清除效果越强。

(3)现场试验结果表明,V形岩屑床清除工具在强度、硬度及叶片耐磨性均满足页岩气水平井现场作业要求,工具可随钻破坏并清除岩屑床,结合起钻过程中对岩屑床堆积重点井段进划眼作业,可将顽固性大颗粒岩屑床破坏清除,有效改善井眼清洁效果。

(4)下一步继续针对不同区块岩石力学特性、水平井设计的井眼轨迹、水平段长度及钻具组合情况,开展V形岩屑床清除工具的数量与位置优选探索研究,充分发挥工具清岩效果

参考文献(References):

- [1] Mahmoud H, Hamza A, Nasser M S, et al. Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,186:106748.
- [2] Busahmin B, Saeid N H, Alusta G, et al. Review on hole cleaning for horizontal wells[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2017,12(16):4697-4708.
- [3] 王楠男. 大庆油田古龙页岩油钻井液技术研究与应[J]. 西部探矿工程, 2021,33(11):91-92,97.
WANG Nannan. Research and application of drilling fluid technology for Gulong shale oil in Daqing Oilfield[J]. West-China Exploration Engineering, 2021,33(11):91-92,97.
- [4] 吴继伟,袁丹丹,席传明,等. 吉木萨尔页岩油水平井钻井技术实践[J]. 钻采工艺, 2021,44(3):24-27.
WU Jiwei, YUAN Dandan, XI Chuanming, et al. Drilling technologies for shale horizontal wells in Jimsar[J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(3):24-27.
- [5] 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.
- [6] Joshi S D. Cost/benefits of horizontal wells[C]//SPE western regional/AAPG Pacific section joint meeting. OnePetro, 2003.

- [7] Abbas A K, Alsaba M T, Al Dushaishi M F. Comprehensive experimental investigation of hole cleaning performance in horizontal wells including the effects of drill string eccentricity, pipe rotation, and cuttings size [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(6):063006.
- [8] Dewangan S K, Sinha S L. Exploring the hole cleaning parameters of horizontal wellbore using two-phase eulerian CFD approach [J]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2016, 8(1):15-39.
- [9] Li H, Tomita Y. Characteristics of swirling flow in a circular pipe [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(2):370-373.
- [10] Hu L, Yu J. A numerical simulation of swirling flow pneumatic conveying in a horizontal pipeline [J]. *Particulate Science & Technology*, 2000, 18(4):275-291.
- [11] Li H, Tomita Y. An experimental study of swirling flow pneumatic conveying system in a vertical pipeline [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1996, 120(1):200-203.
- [12] Hui L, Tomita Y. Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying [J]. *Powder Technology*, 2000, 107(1):144-152.
- [13] Huang X J, Dong J Z. An investigation of swirl flow field in pneumatic conveying duct [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1993.
- [14] Pashtapanska M, Jovanović J, Lienhart H, et al. Turbulence measurements in a swirling pipe flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(5):813-827.
- [15] Rocha A D, Bannwart A C, Ganzarolli M M. Numerical and experimental study of an axially induced swirling pipe flow [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2015, 53:81-90.
- [16] 陈锋,狄勤丰,袁鹏斌,等.高效岩屑床清除钻杆作用机理[J]. *石油学报*, 2012, 33(3):298-302.
CHEN Feng, DI Qinfeng, YUAN Pengbin, et al. Mechanism of an effective hydroclean drill pipe for hole cleaning [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3):298-302.
- [17] 房亮,李孝伟,狄勤丰,等.岩屑床清除钻杆流场的数值模拟与分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2014, 29(3):332-337.
FANG Liang, LI Xiaowei, DI Qinfeng, et al. Numerical simulation and analysis on flow field created by hydroclean drill pipe for hole cleaning [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(3):332-337.
- [18] 孙浩玉.岩屑床清除器设计及其流场仿真研究[J]. *石油机械*, 2009, 37(12):38-40.
SUN Haoyu. Design and flow field simulation study of cutting bed cleaner [J]. *China Petroleum Machinery*, 2009, 37(12):38-40.
- [19] 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.
- [20] 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 cleanliness monitoring and evaluation technology while drilling [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1):102-106.
- [21] 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.
- [22] 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.

(编辑 王文)