

变径稳定器在鄂北水平井钻井应用研究

李德红, 罗宏志, 李季, 温伟, 李明忠, 宋文宇, 王超, 王旭升

(中石化华北石油工程有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要:鄂北大牛地、东胜气田施工水平井水平段长度在1000~2000 m之间,以稳斜钻进为主,为保证稳斜效果,降低轨迹调整频次,减少滑动钻进进尺,主要采用双扶稳斜钻具组合,起到了较好的稳斜效果。但鄂北致密砂岩储层的非均质性强,水平段经常钻遇泥岩夹层而调整轨迹,造成双扶稳斜钻具组合在轨迹调整中存在造斜率低、无法快速调整达到地质目的的问题。通过分析不同钻具组合作用效果,配套应用变径稳定器,控制其井下工作状态,改变外径尺寸,使钻具组合、结构和作用效果发生变化,满足轨迹控制需求,实现整体水平段稳斜钻进,并兼顾轨迹调整快速灵活的目的。在鄂北大牛地和东胜气田水平井水平段应用变径稳定器10余口井,平均机械钻速10.18 m/h,水平段提速24.6%,应用效果良好,实现了提高水平段钻井施工效率的目的,为鄂尔多斯盆地长水平段提速提效提供了有利借鉴。

关键词:变径稳定器;活塞;钻具组合;井斜;造斜率;水平井

中图分类号:TE243;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)02-0123-06

Application of variable diameter stabilizers in drilling of long horizontal sections in north Ordos

LI Dehong, LUO Hongzhi, LI Ji, WEN Wei, LI Mingzhong, SONG Wenyu, WANG Chao, WANG Xusheng
(SINOPEC Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: The horizontal section of the horizontal well in Daniudi and Dongsheng gas fields in northern Ordos is between 1000~2000m, and inclination-hold drilling is dominated. In order to ensure the inclination-maintaining effect, reduce the frequency of trajectory adjustment and reduce the slide drilling footage, the drilling assembly with the double stabilizers for inclination maintaining was mainly used to keep the inclination, and achieved good effect. However, the tight sandstone reservoirs in northern Ordos is highly heterogeneous, and the horizontal section often cuts through mudstone interlayers to make it necessary to adjust the trajectory, which led to the low build rate of the BHA assembly with the double stabilizers for inclination in the trajectory adjustment; thus, quick adjustment cannot be made to achieve the geological purpose. With analysis of the performance of different BHAs, the variable diameter stabilizers were applied to control their downhole working conditions. Through change of the outer diameter, they can change the drilling string, and its structure and effect to meet trajectory control, and realize inclination drilling along the whole horizontal section with quick and flexible trajectory adjustment. In Daniudi and Dongsheng gas fields in northern Ordos, the variable diameter stabilizers were applied to more than 10 wells in horizontal section drilling with the average ROP of 10.18m/h, and an increase of 24.6% in drilling rate for the horizontal section. The field results were good with improved drilling efficiency at horizontal sections, and can provide beneficial reference for improving drilling speed and efficiency at long horizontal section drilling in Ordos Basin.

Key words: variable diameter stabilizer; piston; BHA; well inclination; build rate; horizontal well

收稿日期:2021-03-18; 修回日期:2021-11-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.02.017

第一作者:李德红,男,汉族,1968年生,高级工程师,石油工程专业,主要从事钻井、钻井液及定向等工程技术研究与应用工作,河南省郑州市中原区淮河西路23号新蒲大厦8层818室,jackyman911@163.com。

引用格式:李德红,罗宏志,李季,等.变径稳定器在鄂北水平井钻井应用研究[J].钻探工程,2022,49(2):123-128.

LI Dehong, LUO Hongzhi, LI Ji, et al. Application of variable diameter stabilizers in drilling of long horizontal sections in north Ordos [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):123-128.

0 引言

钻井过程中通过调整井下钻具组合控制井眼轨迹,不同的钻具组合在井下受力状态不同,其中稳定器在钻具组合中发挥着重要作用,不同稳定器位置和数量会导致不同的井下受力,井眼轨迹也会因受力不同有所区别。钻井中较为常见的几种钻具组合主要有单扶增斜^[1]、双扶稳斜^[2]、三扶满眼稳斜^[3]、钟摆降斜等钻具组合形式,还可以与动力钻具搭配,且不同的钻井参数效果也略有差异。

目前国内导向钻井^[4]主要采用弯螺杆动力钻具,配合不同的钻具组合,可有效控制轨迹,并达到快速钻井的目的^[5]。在水平井施工中,水平段设计轨道一般为矩形靶框稳斜设计,为达到较好的稳斜效果,减少轨迹调整次数,现场施工中多采用“单弯螺杆+双扶稳斜”钻具组合,既具有一定轨迹调整能力,复合钻进^[6]又具备稳斜作用,综合性能较好。但不足之处是造斜能力受到抑制,造斜率偏低,在轨迹调整中效率较低。

本文通过分析鄂尔多斯北部盆地储层特征和施工难点,研究稳定器在不同钻具组合中的作用效果,进一步开展变径稳定器^[7]的研究与应用,为提高水平段轨迹高效控制、减少滑动钻进占比、提高钻井时效起到借鉴意义。

1 地质与工程概况

1.1 储层地质情况

鄂尔多斯盆地北部(大牛地气田、东胜气田)以水平井开发为主,上古生界主力储层为变状河沉积相,致密砂岩储层中存在泥岩夹层。水平段钻遇主要目的层为二叠系上石盒子组、下石盒子组、山西组和太原组,岩性为棕褐色、灰色、深灰色泥岩,浅灰色、灰色砂岩以及灰白色含砾砂岩、砂泥岩呈等厚互层分布,储层非均质性强,主要目的层相变较大。

1.2 钻井工程情况

大牛地气田、东胜气田水平井以二级和三级井身结构为主,垂深一般在3000~3500 m之间,斜深4000~5000 m,水平段井眼尺寸分别为215.9 mm(二级结构)和152.4 mm(三级结构),水平段长约1000~2000 m,井斜一般在89°~92°之间,一般矩形靶框要求为上下偏离 ≥ 1 m,左右偏离 ≥ 5 m,整体靶框为稳斜设计,水平段从着陆点开始每100 m设计1个靶点。

2 水平段轨迹控制难点

(1)储层非均质性强,纵横向变化大,难以准确预测砂体展布和优质储层,一旦钻遇泥岩夹层油气显示下降,井壁失稳风险增大,需大幅调整井斜改变垂深,尽快钻离泥岩重返砂岩储层;

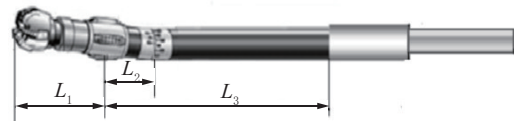
(2)储层地层倾角大,自然造斜能力强,造成轨迹调整频繁,滑动占比高,严重影响水平段钻井施工效率;

(3)随着水平段延伸,摩阻不断增大,滑动钻进中出现严重托压现象^[8],造成滑动钻时较慢,定向造斜率偏低,严重影响机械钻速。

3 钻具组合作用分析与优化

3.1 单弯单稳钻具组合

单弯单稳钻具组合为:钻头+(下稳定器)单弯螺杆+单流阀+MWD+定向接头+无磁承压钻杆+斜坡钻杆+加重钻杆+斜坡钻杆。该钻具组合属于单扶增斜组合(见图1)。水平段定向滑动钻进底部钻具受力后,近钻头稳定器起到支点作用^[9],螺杆弯点在稳定器上部2 m处左右,以稳定器为支点,可有利提高单弯螺杆造斜效果,实现轨迹高效控制的目的。在水平段复合钻进时,下部钻具平置于井眼低边,底部钻具组合受力后,在近钻头稳定器的支点作用下,有一定的复合钻进增斜作用^[10]。该钻具组合有利于轨迹调整控制,不利于水平段的稳斜钻进。



L_1 —钻头至螺杆扶正器距离; L_2 —扶正器至弯点距离; L_3 —扶正器至螺杆上端距离

图1 单弯单稳钻具组合

Fig.1 Schematic diagram of the single-bend BHA with a single stabilizer

3.2 单弯双稳钻具组合

单弯双稳钻具组合为:钻头+(下稳定器)单弯螺杆+稳定器+单流阀+MWD+定向接头+无磁承压钻杆+斜坡钻杆+加重钻杆+斜坡钻杆。该钻具组合属于双扶稳斜组合。除了螺杆下部稳定器以外,在螺杆上部增加1个稳定器,增强了下部钻具组

合的刚性,在水平段复合钻进时,即使底部钻具组合受力,但由于较强的刚性使钻具在旋转钻进过程中仍趋于轴向运动,具有较好的稳定井斜的作用。在滑动定向钻进时,底部钻具受力后,由于单弯螺杆上下两端稳定器的双支点作用,造成定向钻进中底部钻具发生偏离轴向更加困难,影响单弯螺杆的造斜效果。所以该钻具组合稳斜效果较好,但一旦出现钻遇泥岩需大幅调整轨迹时,无法实现较快地进入储层砂体,不利于轨迹调整与控制,造成水平段的严重浪费,甚至导致填井侧钻。

3.3 钻具组合优化

水平段靶框设计为长方体靶,一般储层砂体走势稳定,轨迹主要以稳斜设计为主。但鄂尔多斯盆地北部储层非均质性较强,并且储层泥岩薄层多,因钻遇泥岩夹层调整轨迹时有发生,并且钻进中也会由于地层倾角导致轨迹偏离,同样需要轨迹调整。因此需要一种钻具组合,既能在需要调整轨迹时实现高效控制,又能在复合钻进时抑制地层自然造斜,起到较好的稳斜效果。

变径稳定器具有外径大小可以控制的特点,在钻具组合中采用变径稳定器替代普通稳定器,使井下钻具组合随着变径稳定器外径的变化而改变。既可以满足水平段需要稳斜钻进时起到稳斜作用,抑制地层自然造斜,减少轨迹的调整次数,又具有灵活调整能力,实现轨迹高效控制的目的,有效解决水平段施工中单一钻具组合存在的缺陷。

4 变径稳定器结构与工作原理

4.1 基本结构

国内一些研究机构从20世纪90年代已经开始研制遥控变径稳定器^[11],先后开发了提压钻柱式、投球式、排量控制式等3种遥控变径稳定器,本文介绍的是一种通过开关泵瞬间的水力压差完成变径伸缩工作状态切换的遥控变径稳定器^[12](见图2)。

该变径稳定器关键由变径结构、变径执行机构、变径控制机构、花键套控制机构和密封系统等组

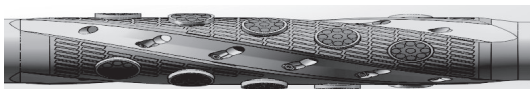


图2 变径稳定器

Fig.2 Schematic diagram of the variable diameter stabilizer

成^[13]。变径结构主要由变径壳体、心轴、复位弹簧、小活塞(扶正块)等组成。在稳定器本体内螺旋布置3组能径向伸出的小活塞,当小活塞伸出时,本体外径增大且旋转时相对井壁尺寸连续,小活塞不伸出时,稳定器本体尺寸不变。

4.2 工作原理

变径执行机构由心轴斜面和复位弹簧等组成,心轴斜面受内外侧压差作用,下行推出小活塞,内外压差消失,心轴斜面受复位弹簧作用回位,小活塞缩回,控制部件结构见图3。

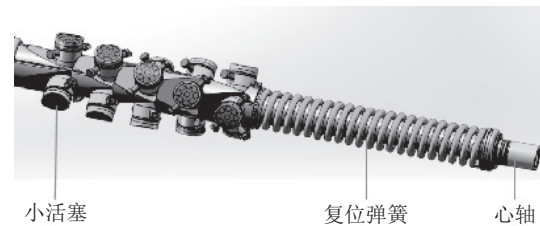


图3 变径稳定器控制部件结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the control components of the variable diameter stabilizer

变径控制机构由动花键套、静花键套及心轴活塞等组成,心轴斜面连接心轴活塞,井筒内外压差驱动心轴活塞下行,动花键套连接在心轴活塞上,静花键套与壳体固定连接,动、静花键套相对角度相差1齿,心轴斜面可以下行变径,相差0齿,心轴斜面不能下行而不变径(见图4)。

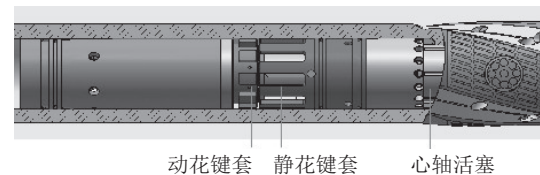


图4 变径控制机构

Fig.4 Diameter control mechanism

在钻井过程中,遥控变径稳定器工作时串接在井下钻具组合中,内外利用环空孔来连通,通过开关钻井泵来控制它的状态。开泵时,由于该工具内部钻井液压强>工具外部环空的压强,在工具的上、下心轴产生压差,产生使工具心轴向下运动的推动力,使工具心轴克服复位弹簧的弹力向下运动,从而带动斜面块也向下运动,推动径向布置的活塞伸出;当停泵时,工具内外钻井液压强差消失,工具心轴在复

位弹簧的带动下向上运动,带动斜面块也向上运动,拉动扶正活塞缩回工具本体内。

具体的变径动作过程:比如立管压力为 P ,在停泵的状态下,工具扶正活塞缩在工具本体内,工具处于内缩状态,当首次开泵后,扶正活塞将伸至同工具本体外壳齐平,工具变为齐平状态,立管压力为 P ,此时停泵扶正活塞缩回,工具重回内缩状态;再次开泵后,扶正活塞将伸出工具本体外壳外,此时工具工作外径最大,工具变为伸出状态,立管压力为 $P+P_1$ (P_1 为变径稳定器伸出状态下增加的压耗),再次停泵,扶正活塞再次缩回工具本体内,工具重回内缩状态。通过不断的开泵和停泵,工具将在不同的3种状态下循环,形成工具的状态控制循环规律。同时当工具产生相应的动作后,利用其内部的节流示位机构,通过泵压变化传递工具的状态信息。

通过调节变径稳定器的外径尺寸实现变径,改变井下钻具组合状态^[14]。当需要稳斜作用时,通过开关泵控制变径稳定器本体内螺旋布置的3组扶正块径向伸出,当扶正块伸出时,本体外径增大且旋转时相对井壁尺寸连续,起到双稳定器稳斜控制效果;当需要调整轨迹时,变径稳定器通过开关泵控制将扶正块收缩回去,变径稳定器变为本体尺寸,使钻具组合变为单稳定器,提高钻具组合轨迹调整能力。

5 现场应用

5.1 变径稳定器钻具组合

为更好地完成水平段轨迹控制,施工井三开水平段采用的钻具组合^[15-16]和钻进参数如下。

钻具组合: $\text{O}152.4\text{ mm}$ 钻头 + $\text{O}127\text{ mm} \times 1.25^\circ$ 单扶螺杆 + 单流阀 + $\text{O}120\text{ mm}$ 变径稳定器 + $\text{MWD} \times 1$ + $\text{O}116\text{ mm}$ 无磁钻铤 $\times 1$ 根 + $\text{O}88.9\text{ mm}$ 钻杆 + $\text{O}88.9\text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 30$ 根 + $\text{O}88.9\text{ mm}$ 钻杆。

钻进参数: 钻压 $40\sim 60\text{ kN}$, 排量 $16\sim 18\text{ L/s}$, 转速为螺杆转速 + 40 r/min 。变径稳定器主要工作参数见表1。

5.2 现场应用效果

5.2.1 J58PXH井应用效果

在J58PXH井水平段应用变径稳定器,应用井段 $3416\sim 4416\text{ m}$, 共进尺 1000 m , 纯钻时间 97.75 h , 循环时间 120 h , 平均机械钻速 10.23 m/h , 比该井区施工井平均机械钻速 (8.02 m/h) 提高 27.6% , 实现

表1 变径稳定器主要工作参数
Table 1 Main operating parameters of the variable diameter stabilizer

本体外径/mm	工作排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	压耗/ MPa	扶正器本体 外径/mm	扶正器伸 出/mm
120	15~18	1.5	142	6~8

水平段的“一趟钻”^[3]。水平段共滑动进尺 26 m , 占钻进进尺 2.6% 。与该区块使用常规单弯双稳钻具组合滑动进尺 (8%) 相比, 降低了 67% 。本井复合钻时平均 5 min/m , 滑动钻时 20 min/m , 节省滑动进尺 54 m , 节省纯钻进时间 13.5 h , 复合钻进所钻井眼光滑, 提高了井眼质量。

该工具在定向过程中处于缩回状态, 泵压为 25 MPa , 定向过程中 1.25° 螺杆造斜率在 $(25^\circ\sim 30^\circ)/100\text{ m}$, 具有较好的造斜效果。在复合钻井过程中工具处于伸出状态, 泵压为 27 MPa , 起到稳斜效果, 井斜以 $(1^\circ\sim 2^\circ)/100\text{ m}$ 微降, 岩性相对致密井段井斜以 $(2^\circ\sim 3^\circ)/100\text{ m}$ 微增。这些数据证明了变径稳定器既具备高效的轨迹调整能力, 也具有较好的双扶稳斜效果。变径稳定器伸缩状态与井斜控制关系见图5。

5.2.2 D12-PX井应用效果

D12-PX井水平段采用变径稳定器钻具组合, 在三开水平段刚钻进砂体不足 20 m 时, 录井全烃值下降, 无油气显示, 钻入泥岩夹层, 地质导向工程师要求立即调整钻进轨迹, 井斜增大至 93° 左右, 垂深上抬 3 m 。这时控制变径稳定器姿态, 缩回变径稳定器的小活塞, 将双扶稳斜钻具组合变成单扶钻具组合, 降低下部钻具组合刚性, 在滑动钻进过程中使得螺杆具有更好的造斜效果, 快速将井斜增至 93.43° , 随着垂深的快速上升, 很快录井仪全烃值上升, 出现油气显示, 轨道再次回到了储层, 变径稳定器高效轨迹调整能力充分体现。

本井水平段前 500 m 砂体构造每百米抬升 $1.2\sim 1.5\text{ m}$, 地层倾角变化大, 井斜控制难度大。在水平段需要稳斜钻进时, 通过控制变径稳定器让小活塞伸出, 本体外径增大至外径 150 mm , 与螺杆本体稳定器形成了双扶稳斜钻具组合, 增强了下部钻具组合刚性, 复合钻进时平均单根井斜变化率 $< 0.2^\circ$, 起到较好的稳斜效果, 降低了地层倾角的增斜作用, 减少了轨迹调整次数, 提高了钻井效率, 同时

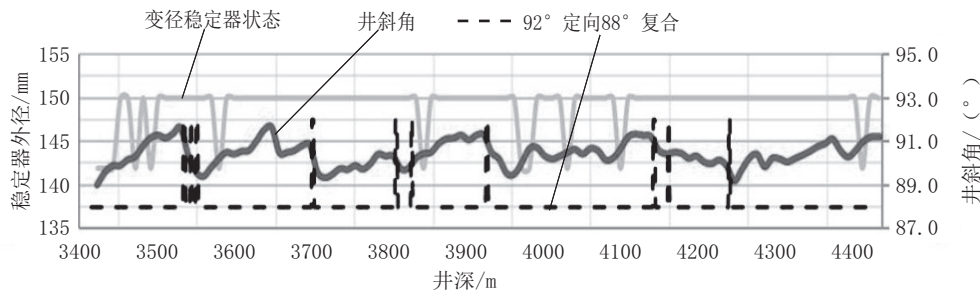


图5 仪器伸缩与井斜关系

Fig.5 Relationship between tool expansion and inclination

使井眼轨迹更加平滑。

水平段应用变径稳定器共进尺803 m,纯钻时间77.5 h,平均机械钻速10.36 m/h,较该井区水平段平均机械钻速提高23.49%。整体应用井段仅调整轨迹49.5 m,滑动进尺占比6.16%,较井区水平段平均滑动占比(10.48%)降低了41.22%,稳斜效果显著。在定向钻进时,通过收缩变径稳定器变成单扶增斜钻具组合后,较常规双扶稳斜组合平均造斜率提高30%左右,轨迹调整效率高。采用不同稳定器滑动钻进时的造斜率对比见表2。

表2 有无变径稳定器滑动造斜率数据对比

Table 2 Comparison of slide-drilling build rates with and without variable diameter stabilizers

钻具组合	滑动井段/m	进尺/m	工具面/°	井斜变化/(°)
变径稳定器组合(水平段)	2905.0~2907.0	2.0	180/降斜	1.24
	2934.0~2936.5	2.5	180/降斜	1.18
	3322.0~3325.0	3.0	0/增斜	1.10
	3332.0~3335.0	3.0	0/增斜	1.30
合计	10.5			4.82
普通双扶稳定器组合(水平段)	3828.0~3831.0	3.0	180/降斜	1.00
	3996.0~3999.5	3.5	180/降斜	1.33
	3870.0~3873.5	3.5	0/增斜	0.80
	3927.0~3930.0	3.0	0/增斜	1.50
合计	13.0			4.63

6 结论

(1)变径稳定器现场应用中,立压稳定,变径切换灵活,容易准确判断工具状态,在井下复杂受力状态下工具安全性可靠。

(2)变径稳定器活塞伸出形成稳斜钻具组合,在水平段复合钻进过程中,具有良好的稳斜作用效

果。在调整轨迹时,变径稳定器活塞缩回,降低钻具组合刚性,提高调整控制能力,实现轨迹高效控制。

(3)变径稳定器在井下的可控变径功能,提高了滑动造斜率,避免了因普通双扶稳斜造斜率不足造成起钻的问题,提高了轨迹控制能力和施工时效,为水平井安全快速钻井起到了重要作用。

参考文献(References):

- [1] 时国林,丁川,王爱芳,等.单稳定器钻具组合特性分析及应用[J].石油钻采工艺,2001,23(6):26-29.
SHI Guolin, DING Chuan, WANG Aifang, et al. Mechanics analysis of the single stabilizer bha and its fidd application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001,23(6):26-29.
- [2] 曹向峰,孙启忠,唐志军,等.水平井眼中双稳定器钻具组合的力学特性分析[J].石油机械,2013,41(4):16-19.
CAO Xiangfeng, SUN Qizhong, TANG Zhijun, et al. Mechanical property analysis of bha with double stabilizer in horizontal hole[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(4):16-19.
- [3] 尹浩,梁健,孙建华.特深钻探钻柱组合优化设计研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):56-62.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling ang Tunneling), 2019,46(4):56-62.
- [4] 杨琳,张斌,肖林.莫116井区水平井钻井设计优化与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):7-11.
YANG Lin, ZHANG Bin, XIAO Lin. Design optimization of horizontal well drilling and the application in Mo116 well area [J]. Exproation Engineering (Rock & Soil Drilling ang Tunneling), 2018,45(2):7-11.
- [5] 陈霖,王立宏,张盘龙.水平井一趟钻变径稳定器的研制与应用[J].石油矿场机械,2016,45(7):87-89.
CHEN Lin, WANG Lihong, ZHANG Panlong. Development and application of one trip drilling tapered stabilizer for horizontal well[J]. Oil Field Equipment, 2016,45(7):87-89.
- [6] 李兵,唐洪林,余中岳,等.遥控变径稳定器的研制及应用[J].

- 石油机械, 2018, 46(7):1-6.
- LI Bing, TANG Honglin, YU Zhongyue, et al. Development and application of remote control variable diameter stabilizer[J]. China Petroleum machinery, 2018, 46(7):1-6.
- [7] 闫永辉. 鄂北工区水平井提速提效技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(6):43-47.
- YAN Yonghui. Discussion on the improvement of drilling speed and efficiency for horizontal well in northern Erdos work area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(6):43-47.
- [8] 杨行, 夏成宇, 钱利勤, 等. 一种新型多级可变径稳定器工作机理研究[J]. 工程设计学报, 2017, 24(6):710-716.
- YANG Xing, XIA Chengyu, QIAN Liqin, et al. Research on a new type of multistage variable diameter stabilizer working mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(6):710-716.
- [9] 周爱照, 夏柏如. 近钻头变径稳定器导向钻具造斜特性研究[J]. 石油机械, 2014, 42(5):39-43.
- ZHOU Aizhao, XIA Boru. Deflecting characteristic of steerable assembly with near-bit adjustable diameter stabilizer[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(5):39-43.
- [10] 胡贵, 刘新云, 于文华, 等. 钻具稳定器结构对复合钻井导向力的影响[J]. 天然气工业, 2015, 35(7):73-79.
- HU Gui, LIU Xinyun, YU Wenhua, et al. The effect of configuration of drilling stabilizer on the steering force during combined drilling[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7):73-79.
- [11] 周志刚, 赵洪山, 夏文安. 新型遥控变径稳定器的研制及应用[J]. 石油机械, 2020, 48(9):20-24.
- ZHOU Zhigang, ZHAO Hongshan, XIA Wenan. Development and application of a novel remote control adjustable gauge stabilizer[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(9):20-24.
- [12] 李凯, 高德利, 宋执武. 定向井钻井技术及可变径稳定器应用研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(7):4-8.
- LI Kai, GAO Lide, SONG Zhiwu. Application research of directional well drilling technology and variable gauge stabilizer[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(7):4-8.
- [13] 刘少胡, 陈敏, 冯定, 等. 井下可控变径稳定器工作机理及力学分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(18):182-187.
- LIU Shaohu, CHEN Min, FENG Ding, et al. Working mechanism and mechanical analysis of variable diameter stabilizer for downhole controlled[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(18):182-187.
- [14] 苏义脑, 窦修荣, 王家进. 变径稳定器及其应用[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(3):4-8, 81.
- SU Yinao, DOU Xiurong, WANG Jiabin. Variable diameter stabilizer and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3):4-8, 81.
- [15] 王培峰, 谭平, 雷桐, 等. 小尺寸变径稳定器在小井眼定向井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(3):30-31, 83-84.
- WANG Peifeng, TAN Ping, LEI Tong, et al. Application of small size dimension-variable stabilizer in slim-hole directional drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(3):30-31, 83-84.
- [16] 李绪锋, 王冲, 刘彪, 等. 基于应力分析的钻具设计方法优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30):12901-12908.
- LI Xufeng, WANG Chong, LIU Biao, et al. Optimization of drilling tool design method based on stress analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30):12901-12908.

(编辑 李艺)