

连续管可控偏心垫块 BHA 滑动钻进导向性能分析

房 军¹, 韩晓菲¹, 王宴滨¹, 熊 超²

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:针对小井眼连续管水平钻井过程中导向控制的要求,提出采用可控偏心垫块控制井眼轨迹的方法。在下部钻具组合(BHA)中按照一定的分布规律安装可独立控制的偏心垫块,通过控制偏心垫块的伸出与缩回,使BHA产生相对于井眼轴线的偏心位移,从而改变钻具组合的力学特性;对该钻具组合形式采用纵横弯曲连续梁法,建立了连续管可控偏心垫块BHA滑动钻进导向性能的力学模型与控制方程,并针对具体算例采用控制方程进行了求解。计算结果表明,在不同钻压条件下,钻头井斜力、钻头方位力、井斜平面内钻头转角和方位平面内钻头转角均随偏心稳定器在井斜平面与方位平面内的偏心位移呈线性变化;钻铤内径增大,钻头井斜力、方位力均表现为先缓慢减小后快速降低,钻头转角的变化很小。研究表明,控制钻具组合偏心垫块的伸出与缩回可以改变BHA的力学性能,使BHA产生相对于井眼轴线的偏心位移,达到控制井眼轨迹的目的。

关键词:连续管钻井;偏心垫块;井眼轨迹;下部钻具组合;纵横弯曲理论

中图分类号:TE249 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)01-0044-05

Steering Performance Analysis on BHA with Controllable Eccentric Telescopic Blocks in Coiled Tubing Drilling

FANG Jun¹, HAN Xiaofei¹, WANG Yanbin¹, XIONG Chao²

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: In order to meet the requirement of steering control during drilling horizontal slim hole by coiled-tubing, a new method was proposed to control the wellbore trajectory by using controllable eccentric telescopic blocks. The bottom hole assembly (BHA) was equipped with independently controllable eccentric telescopic blocks that can be controlled for extension and retraction to generate displacement of BHA against the borehole axis, so as to change the mechanical properties of BHA. Based on the proposed BHA, a mechanical model and control equation were established to analyze steering performance of the coiled-tubing BHA with eccentric telescopic blocks by means of beam-column theory, and the solution for the specific cases was given by using the control equation. The calculation results showed that the bit drift force, azimuth force and its rotation angle within the inclination plane and azimuth plane are linearly related to the eccentric displacement of eccentric stabilizers at different WOBs. With the increase of the inner diameter of drill collars, the drift force and the azimuth force of bits decreased in cubic polynomial form, but the angle of bit rotation changed very slightly. It is shown that the mechanical properties of BHA can be changed by controlling the extension or retraction of the eccentric blocks by which the eccentric displacement of BHA produced against the borehole axis, so as to control the well trajectory.

Key words: coiled-tubing drilling; eccentric telescopic block; wellbore trajectory; bottom hole assembly; beam-column theory

连续管小井眼钻井在稠油油藏、薄油藏、低渗透油藏、枯竭油藏开发中具有较强的技术优势^[1-3],但连续管不能旋转,需采用滑动钻进方式钻进。与传统钻具的滑动钻进相比,连续管滑动钻进存在钻压施加困难、无法承受钻头反扭矩和扭工具面困难等难题^[4-7]。苏义脑等人^[8-10]研究了常规滑动钻进中使用的变径稳定器的工作原理和现场应用情况,变

收稿日期:2015-03-23;改回日期:2015-10-20。

作者简介:房军(1959—),男,山东德州人,1985年毕业于山东广播电视大学机械设计专业,2004年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业博士学位,副教授,硕士生导师,主要从事油气井力学与控制工程研究。

联系方式:(010)89733702, fang0135@163.com。

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目“复杂油气井优化设计与钻完井控制基础研究”(编号:51221003)和国家科技重大专项“复杂结构井优化设计与控制关键技术”(编号:2011ZX05009-005)资助。

径稳定器是通过一定的控制方式调整下部钻具组合(BHA)的力学性能,从而实现滑动钻进过程中井斜角和方位角的调整;周爱照等人^[11]研究了近钻头变径稳定器对 BHA 造斜性能的影响;李猛等人^[12]研究了连续管钻井过程中定向器的工艺原理及应用情况。但鲜有关于连续管钻井 BHA 导向结构及性能分析的相关报道。

针对连续管水平钻井过程中导向控制的特点,笔者提出了一种在连续管钻井的 BHA 中加装爬行器总成和偏心垫块短节的钻具组合形式,以满足连续管滑动钻进的要求,并对提出的钻具组合建立了相应的力学模型,分析了 BHA 的力学特性,以达到钻头沿着设计轨道钻进的目的。

1 可控偏心垫块 BHA 组成及工作原理

连续管偏心垫块 BHA 主要包括钻头、动力钻具、可控偏心垫块短节、MWD/LWD 短节、转向器短节和爬行器^[13-15]等部分(见图 1)。

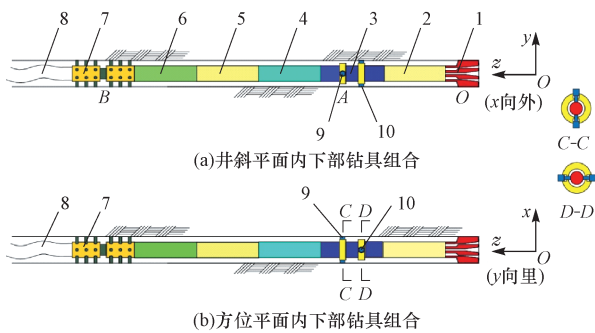


图 1 小井眼连续管钻井下部钻具组合

Fig. 1 Bottom hole assembly with coiled-tubing for drilling slim hole

- 1. 钻头; 2. 动力钻具; 3. 可控偏心垫块短节; 4. MWD/LWD 短节;
- 5. 转向器短节; 6. 钻铤; 7. 爬行器; 8. 连续管;
- 9. 方位平面偏心垫块; 10. 井斜平面偏心垫块

连续管钻进过程中,井下动力钻具提供钻进所需的扭矩,MWD/LWD 短节用于测量井斜角、方位角和 BHA 的工具面角。井斜平面偏心垫块和方位平面偏心垫块分别位于井斜平面和方位平面内,可以根据钻进过程中 MWD/LWD 短节测得的井斜角和方位角控制偏心垫块短节上相互独立的偏心垫块伸出或缩回,使 BHA 与井壁接触形成支点。偏心垫块的不对称伸缩导致钻具中心与井筒中心不重合,产生偏心位移,进而改变 BHA 的力学特性,使钻头获得所需的侧向力,以控制井斜和方位,引导钻

头按照预先设计的井眼轨道钻进。转向器短节主要作用是根据 MWD/LWD 短节测得的工具面角扭转工具面,调节可控偏心垫块短节至所需位置。改变钻铤的数量和规格,可以改变整个 BHA 的长度和刚度,从而改变 BHA 的力学特性;爬行器总成能将 BHA 的上端牢固支撑在井壁上,承受钻头切削岩石的反扭矩。

2 力学模型

在伸缩垫块调整过程中,假设 BHA 的工具面角不发生变化,力学模型假设条件见文献^[16]。井底坐标系以钻头为原点 O , z 轴沿钻头处井筒切线指向钻进的反方向, y 轴与 z 轴构成井斜平面, x 轴与 z 轴构成方位平面,且 x 轴、 y 轴和 z 轴构成右手坐标系,据此建立的 BHA 纵横弯曲力学模型如图 2 所示。建立力学模型时,将爬行器视为固定端约束,钻头视为固定铰支约束,偏心稳定器处产生的偏心位移视为支座位移。其中, A 处为偏心垫块机构中点, B 处为连续管爬行器总成。

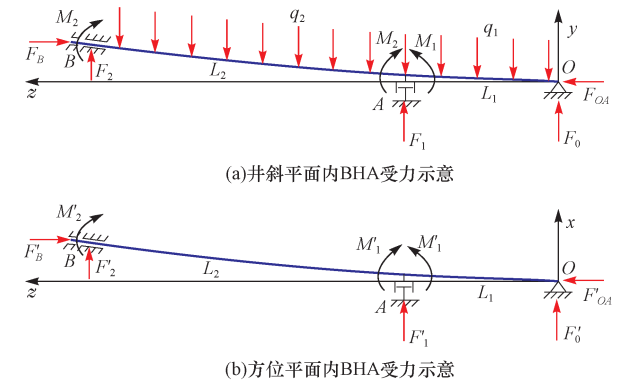


图 2 井斜平面与方位平面内 BHA 力学分析模型

Fig. 2 Mechanical analysis model for BHA within the inclination plane and azimuth plane

2.1 井斜平面(Oyz 平面)力学分析

可控偏心垫块 BHA 井斜平面内的力学模型如图 2(a)所示。根据二维井眼坐标关系^[17],偏心垫块短节中点处纵坐标计算式为:

$$y_A = \frac{(\alpha_O - \alpha_B)(L_1 + L_2)}{2} - e_y \quad (1)$$

式中: y_A 为偏心垫块短节中点处的纵坐标,m; α_O 为钻头处井斜角, $^\circ$; α_B 为爬行器总成中点处的井斜角, $^\circ$; L_1 为 OA 段长度,m; L_2 为 AB 段长度,m; e_y 为 A 处偏心垫块机构的偏心位移,m(沿 y 轴负

方向为正,反之则为负)。

利用纵横弯曲法分析二维井眼中的转角计算及偏心垫块处的连续条件详见文献[17]。根据可控偏心垫块 BHA 力学模型的边界条件:爬行器处偏心位移为零,转角为爬行器处井斜角,弯矩不为零,可得连续管爬行器右端点(即 B 点)处的边界条件为:

$$\theta_{2L} = \alpha_B \tag{2}$$

式中: θ_{2L} 为爬行器右端转角, ($^\circ$)。

根据连续条件和爬行器处边界条件整理得到的可控偏心垫块 BHA 井斜平面内三弯矩方程组与文献[17]中二维井眼条件下的三弯矩方程组形式上相同,但是未知量发生了变化,二维井眼纵横弯曲三弯矩方程中,上切点距离 L_T 未知,上切点处弯矩 M_T 已知。此工具组合中, L_2 变为已知量,爬行器处的内弯矩 M_2 变为未知量,所以方程组仍然可解。

根据梁柱弹性稳定理论,可得井斜平面内钻头侧向力和转角的表达式为:

$$F_0 = \frac{q_1 \sin \alpha_1 L_1}{2} + \frac{M_1}{L_1} - \frac{F_{OA} y_A}{L_1} \tag{3}$$

$$\theta_{1R} = \frac{q_1 \sin \alpha_1 L_1^3}{24EI_1} X(u_1) + \frac{M_1 L_1}{6EI_1} Z(u_1) + \frac{y_A}{L_1} \tag{4}$$

式中: F_0 为井斜平面内钻头的侧向力, N; q_1 为 OA 段钻铤浮重, N/m; M_1 为井斜平面内偏心垫块处的内弯矩, N · m; F_{OA} 为钻头处钻压, N; θ_{1R} 为井斜平面内的钻头转角, ($^\circ$); α_1 为钻头与偏心垫块中点处的井斜角, ($^\circ$); E 为钻具弹性模量, Pa; I_1 为钻具极惯性矩, m^4 ; $X(u_1), Z(u_1)$ 分别为纵、横弯曲三弯矩方程的超越函数。

2.2 方位平面(Oxz 平面)力学分析

可控偏心垫块 BHA 方位平面内的力学模型如图 2(b)所示。方位平面内 BHA 静力分析与井斜平面内的不同之处在于,方位平面内无横向均布载荷,可控偏心垫块 BHA 井斜平面内的三弯矩方程组可参照文献[17]。

根据梁柱弹性稳定理论,可得方位平面内钻头侧向力和转角的表达式为:

$$F'_0 = \frac{M'_1}{L_1} - \frac{F'_{OA} x_A}{L_1} \tag{5}$$

$$\theta'_{1R} = \frac{M'_1 L_1}{6EI_1} Z(u_1) + \frac{x_A}{L_1} \tag{6}$$

式中: F'_0 为方位平面内钻头的侧向力, N; M'_1 为方位平面内偏心垫块处的内弯矩, N · m; F'_{OA} 为钻头处钻压, N; θ'_{1R} 为方位平面内的钻头转角, ($^\circ$); x_A 为偏

心垫块短节中点处的横坐标, m。

3 算例分析与讨论

以某小井眼连续管水平钻井为例计算和分析。井眼直径为 88.9 mm, BHA 工具串外径为 73.0 mm, L_1 为 2 m, L_2 为 5 m。无磁钻铤的外径为 73.0 mm、内径为 38.1 mm, 线重 q_2 为 233.35 N/m, 惯性矩 I_2 为 $1.2899 \times 10^{-6} m^4$ 。一般情况下, 相同尺寸的动力钻具线重和抗弯截面模量较相同尺寸的钻铤小, 因此第一段线重 q_1 为 186.68 N/m, 惯性矩 I_1 为 $1.032 \times 10^{-6} m^4$, 弹性模量 E 为 210 GPa, 据此可得井斜和方位平面最大偏心位移分量为 8 mm, 即偏心垫块的最大伸缩量为 8 mm。

3.1 井斜平面内导向性能分析

根据式(1)一式(4), 计算得到不同钻压下井斜平面内的钻头井斜力和钻头转角随偏心位移的关系(见图 3 与图 4), 其中井斜力为“+”时具有增斜效果, 井斜力为“-”时具有降斜效果。

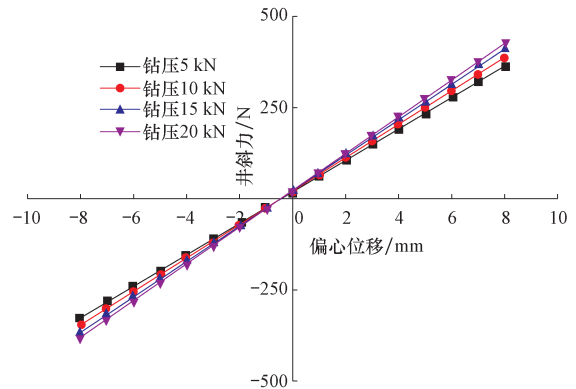


图 3 不同钻压下井斜平面内钻头井斜力与偏心位移的关系

Fig. 3 The relationship between bit drift force and eccentric displacement within inclination plane at different WOB

从图 3 与图 4 可以看出:不同钻压条件下钻头井斜力与钻头转角随井斜平面内偏心位移的增大而线性增大。钻压增大,井斜力增大趋势明显,钻头转角基本不变,钻压对井斜力影响大。偏心位移由 -8 mm 变化到 8 mm 过程中,钻头降斜力逐渐减小、直至变为增斜力并增大到最大值,最大降斜力和增斜力均小于 500 N,钻头的转角变化很小,最大值约为 0.3 $^\circ$ 。由于 BHA 自重作用偏心位移为 0 时,增斜力约为 20 N 左右,说明 BHA 有微弱的自然增

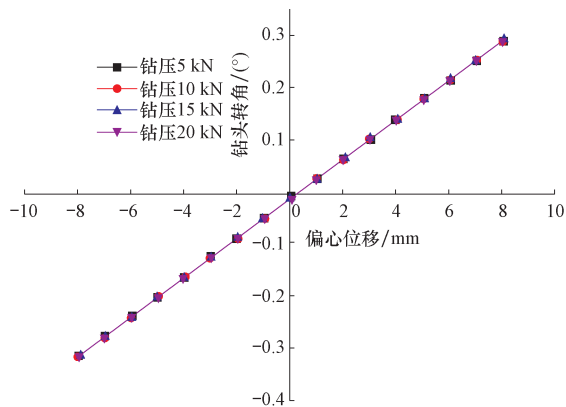


图 4 不同钻压下井斜平面内钻头转角与偏心位移的关系
Fig. 4 The relationship between angle of bit rotation and eccentric displacement on inclination plane at different WOB

斜效果。偏心位移为 -0.5 mm 时,井斜力为 0;在相同的偏心位移下,钻压由 5 kN 增大到 20 kN 的过程中,井斜力随着钻压的增大逐渐增大,但变化不大,钻头转角基本无变化。

3.2 方位平面内导向性能分析

根据式(1)、式(2)、式(5)和式(6),计算得到不同钻压下方位平面内的钻头方位力、钻头转角随偏心位移的关系(见图 5、图 6,其中,向井底坐标系 $+x$ 方向产生偏心位移时为“ $-$ ”,向 $-x$ 方向产生偏心位移时为“ $+$ ”)。

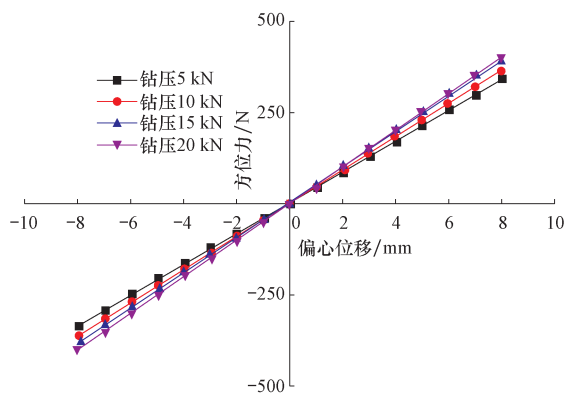


图 5 不同钻压下方位平面内钻头方位力与偏心位移的关系
Fig. 5 The relationship between eccentric displacement and bit azimuth force within azimuth plane at different WOB

从图 5、图 6 可以看出:不同钻压条件下钻头方位力与钻头转角随方位平面偏心位移的增大而线性增大。钻压增大,方位平面上的方位力增大趋势越明显,钻头转角基本不变,钻压对钻头方位力影响较大。偏心位移由 -8 mm 变化到 8 mm 过程中,钻头

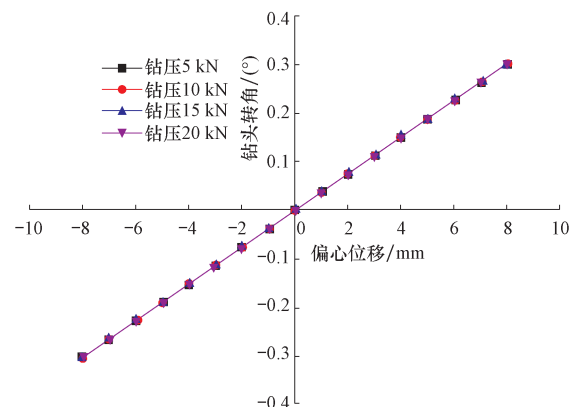


图 6 不同钻压下方位平面内钻头转角与偏心位移关系
Fig. 6 The relationship between eccentric displacement and angle of bit rotation within azimuth plane at different WOB

方位力逐渐由 x 轴正方向变为 x 轴负方向并增至最大值,最大方位力小于 500 N,钻头的转角变化很小,最大值约为 0.3° ;由于 BHA 方位平面内无自重影响,偏心位移为 0 时,方位力约为 0,说明 BHA 有自然稳方位效果。在相同的偏心位移下,钻压由 5 kN 增大到 20 kN 过程中,方位力随着钻压的增大逐渐增大,但增幅较小,钻头转角基本无变化。

3.3 钻铤内径对导向性能的影响

当偏心位移为 2 mm、钻压为 5 kN 时,井斜平面内钻头井斜力和转角与钻铤内径的关系及方位平面内钻头方位力和转角与钻铤内径的关系如图 7 和图 8 所示。

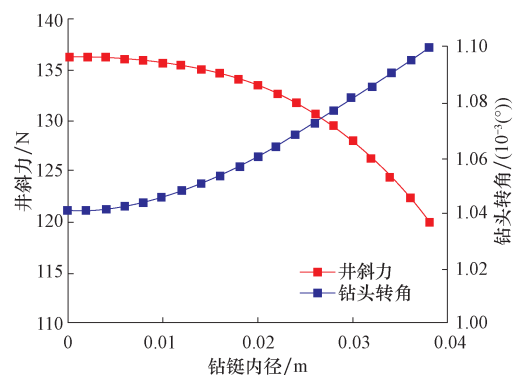


图 7 井斜平面内钻头井斜力和转角与钻铤内径的关系
Fig. 7 The relationship among inner diameter of drill collars, bit drift force and angle of bit rotation within inclination plane

从图 7、图 8 可以看出:井斜平面内,钻铤内径为 $0 \sim 0.036$ m 时,随着钻铤内径增大,钻头井斜力先平缓后快速减小,钻头转角由 0.00104° 平缓增至

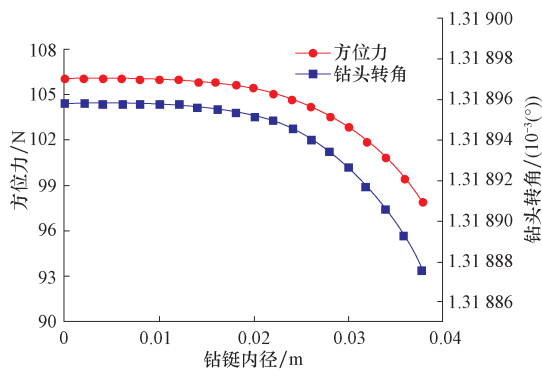


图 8 方位平面内钻头方位力和转角与钻铤内径的关系
Fig. 8 The relationship among inner diameter of drill collars, bit azimuth force and angle of bit rotation within azimuth plane

0.001 10°,变化值很小;方位平面内,钻头方位力随钻铤内径增大先平缓后快速增大,钻头转角随钻铤内径增大先缓慢再快速减小,转角的变化值仅 0.000 1°;由于圆截面梁的惯性矩随截面内径的增大而减小,即刚度 EI 随截面内径的增大而减小^[18],所以井斜平面和方位平面内钻头的侧向力随 BHA 刚度减小而减小,钻头转角基本保持不变。BHA 的刚度应小于实心圆截面梁的刚度且大于空心钻铤的刚度,所以本算例得出的井斜平面和方位平面的侧向力均偏小,钻头转角较为接近实际情况,井斜力、方位力及钻头转角随偏心位移的增大而线性增加;钻压对梁柱侧向力影响较大,当钻压增大时,井斜力、方位力曲线的斜率增大,钻头转角基本无变化。

4 结 论

1) 可控偏心垫块按照一定的规律安装在连续管钻井的 BHA 上,可以独立伸出与缩回,使 BHA 产生相对于井眼轴线的偏心位移,达到控制井眼轨迹的目的。

2) 理论分析表明,该钻具组合滑动钻进时,钻头井斜力、方位力及钻头转角均随偏心位移的增大而增大,随钻铤内径的增大而减小,井斜平面内的钻头转角随钻铤内径增大而增大,方位平面内的钻头转角随钻铤内径增大而减小。

参 考 文 献 References

[1] 陈朝伟,周英操,申瑞臣,等.微小井眼钻井技术概况、应用前景和关键技术[J].石油钻采工艺,2010,32(1):5-9.
CHEN Zhaowei, ZHOU Yingcao, SHEN Ruichen, et al. Overview, application prospects and critical technologies of micro hole drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 5-9.

[2] 赵卫红.连续软管钻井技术[J].钻采工艺,2001,24(1):56-59.
ZHAO Weihong. Coiled tubing drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24(1): 56-59.

[3] 陈立人,张永泽,龚惠娟.连续油管钻井技术与装备的应用及其新进展[J].石油机械,2006,34(2):59-63.
CHEN Liren, ZHANG Yongze, GONG Huijuan. Application and new progression of coiled tubing drilling technology and equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(2): 59-63.

[4] 刘清友,瞿丹,黎伟.连续管钻井技术在国内非常规气开发中的应用[J].石油机械,2011,39(增刊1):94-101.
LIU Qingyou, QU Dan, LI Wei. Application of coiled tubing drilling technology in the domestic unconventional gas development[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39 (supplement 1): 94-101.

[5] 苏新亮,李根生,沈忠厚,等.连续油管钻井技术研究与与应用进展[J].天然气工业,2008,28(8):55-57.
SU Xinliang, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Research of coiled tubing drilling technology and its application[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 55-57.

[6] LEISING L J, NEWMAN K R. Coiled-tubing drilling[J]. SPE 24594, 1993.

[7] US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National of Energy Technology Laboratory. Microhole technology[R]. 2006.

[8] 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.
SU Yinao, DOU Xiurong, WANG Jiajin. Variable diameter stabilizer and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3): 4-8.

[9] 刘英辉,苏义脑,刘旭辉.井眼轨道控制系统中可变径稳定器的发展概况[J].石油机械,2000,28(5):52-58.
LIU Yinghui, SU Yinao, LIU Xuhui. Overview of variable diameter stabilizer development in well trajectory control system [J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28(5): 52-58.

[10] 苏义脑,窦修荣,王家进.旋转导向钻井系统的功能、特性和典型结构[J].石油钻采工艺,2003,25(4):5-7.
SU Yinao, DOU Xiurong, WANG Jiajin. Functions, characteristics and typical configurations of rotary steerable drilling system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(4): 5-7.

[11] 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.

[12] 李猛,贺会群,张云飞,等.连续管钻井定向器技术现状与发展建议[J].石油机械,2015,43(1):32-37.
LI Meng, HE Huiqun, ZHANG Yunfei, et al. The status quo and development suggestion on the coiled tubing drilling orienter[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(1): 32-37.

[13] 李汉兴,姜伟,蒋世全,等.可控偏心器旋转导向钻井工具偏心位移控制分析[J].中国海上油气,2008,20(3):184-188.
LI Hanxing, JIANG Wei, JIANG Shiquan, et al. Analysis on control of eccentric displacement vector of the controllable eccentricizer rotary steerable drilling tool[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(3): 184-188.

[14] MACPHERSON J, MOELLER M, GREGG T, et al. Microhole smart steering and logging while drilling system[R]. Baker Hughes Oilfield Operations, Inc., 2006:10-13.

[15] Microbohe drilling tractor technology development final report[R]. Western Well Tool, Inc., 2007:11-15.

[16] 苏义脑.钻井力学与轨道控制文集[M].北京:石油工业出版社,2008:11-18.
SU Yinao. Drilling mechanics and trajectory control anthology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 11-18.

[17] 白家祉,苏义脑.井斜控制理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1990:46-51.
BAI Jiazhi, SU Yinao. Deviation control theory and practice [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 46-51.

[18] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2004:376.
LIU Hongwen. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 376.

[编辑 滕春鸣]