

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024111

引用格式: 徐涛, 施连海, 效世杰, 等. 电控半程旋转导向钻井工具研制与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 69–74.

XU Tao, SHI Lianhai, XIAO Shijie, et al. Development and field test of electronically controlled half-way rotary steerable drilling tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(6): 69–74.

电控半程旋转导向钻井工具研制与现场试验

徐 涛, 施连海, 效世杰, 韩 龙, 石 林, 刘浩鸿

(中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院, 辽宁盘锦 124010)

摘 要: 半程旋转导向钻井技术, 是将下部钻具与上部钻具的扭矩进行分离, 上部钻柱低转速旋转送钻, 下部钻具进行常规滑动定向钻进, 可低成本、大幅度提高导向钻井的井眼轨迹控制能力和水平段延伸能力。基于此技术, 研制了电控半程旋转导向钻井工具。该工具在常规滑动定向钻井钻柱的近钻头端安放电控半程旋转导向钻井工具, 由地面信号下传装置发送钻井液负脉冲序列指令, 工具接收指令后执行钻柱扭矩分离和结合动作。需要指出的是, 扭矩分离后对反扭矩进行控制是该工具的关键技术, 通常用钻柱与井壁的摩擦扭矩对抗反扭矩, 但当扭矩激增时无法平衡反扭矩。电控半程旋转导向钻井工具通过增设抗反扭矩扶正器和吸扭储能总成, 有效抵抗反扭矩、稳定工具面。电控半程旋转导向钻井工具已开展 4 井次现场试验。试验结果表明, 该工具可大幅缓解托压, 降摩减阻, 提高钻压传递效率, 具备反扭矩控制能力, 扭矩分离后工具面保持平稳, 机械钻速有所提高, 具有推广应用价值。

关键词: 旋转导向钻井; 钻井工具; 电控扭矩离合; 半程旋转; 反扭矩控制

中图分类号: TE921⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)06-0069-06

Development and Field Test of Electronically Controlled Half-Way Rotary Steerable Drilling Tool

XU Tao, SHI Lianhai, XIAO Shijie, HAN Long, SHI Lin, LIU Haohong

(Engineering Technology Research Institute, CNPC Greatwall Drilling Company, Panjin, Liaoning, 124010, China)

Abstract: The half-way rotary steerable drilling technology separates the torque of the lower drilling tool from the upper drilling tool so that the upper drill string can be rotated and achieve bit feed at low speed, while the lower drilling tool performs conventional sliding directional drilling. In this way, the trajectory control ability of steerable drilling and the extension ability of horizontal sections can be greatly improved at a low cost. Based on this technology, an electronically controlled half-way rotary steerable drilling tool was developed. The tool was installed near the drill bit end of the drill string of conventional sliding directional drilling. The ground signal transmission device sent a negative pulse sequence command of the drilling fluid. After receiving the command, the tool performed the drill string torque separation and combination actions. It should be pointed out that the control of the anti-torque after torque separation is the key technology of the tool. Usually, the friction torque between the drill string and the well wall is used to counteract the anti-torque, but when the torque surges, the anti-torque cannot be balanced. The electronically controlled half-way rotary steerable drilling tool can effectively resist the anti-torque and stabilize the tool face by adding an anti-torque-resistant stabilizer and a torque absorption and energy storage assembly. The field tests results of four wells with the electronically controlled half-way rotary steerable drilling tool applied show that the tool can greatly alleviate the support pressure, reduce friction and drag, and improve the transmission efficiency of weight on bit (WOB). The tool has the ability to control the anti-torque. After the torque is separated, the tool face remains stable, and the rate of penetration (ROP) is improved. Therefore, the tool can be widely promoted and applied.

Key words: rotary steerable drilling; drilling tool; electronically controlled torque clutch; half-way rotation; anti-torque control

收稿日期: 2023-03-13; 改回日期: 2024-11-02。

作者简介: 徐涛 (1985—), 男, 山东临沂人, 2007 年毕业于济南大学机械工程及自动化专业, 2011 年获西南石油大学机械设计及理论专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事钻完井新工具、新工艺的研究工作。E-mail: 284623673@qq.com。

基金项目: 中国石油长城钻探工程有限公司“十四五”重点科研项目“钻完井新工具、新工艺攻关与试验”(编号: GWDC202101-06(01)) 资助。

随着中浅层油气勘探开发进入中后期及非常规油气的大规模开发,大位移井、长水平段水平井的应用越来越广泛。但在长水平段进行常规滑动定向钻井过程中,钻柱与井壁间摩阻较大,导致送钻困难,钻压不能有效传递至钻头,托压问题突出,机械钻速低^[1],严重影响钻井周期。为解决钻井中托压严重问题,目前一般采用旋转导向工具,但旋转导向钻井成本高,工具对钻井工况要求严格,存在较大卡钻风险^[2-5]。为此,笔者结合滑动导向钻井和旋转导向钻井的特点,研制了电控半程旋转导向工具。基本技术思路是,在常规动力钻具导向钻井的近钻头端管柱间安放电控半程旋转导向工具,由地面信号下传装置向工具发送指令,工具内置的离合器分离,使上部管柱与下部管柱的运动状态分离,转盘带动上部钻柱连续旋转送钻,下部钻柱保持常规滑动定向钻进。经过3年4井次现场试验,表明使用该工具可大幅度降低工具以上钻柱的摩阻,定向段机械钻速同步提升,可增强常规导向钻井的井眼轨迹控制能力和水平段延伸能力。



图1 RotoSteer 钻井工具结构示意图

Fig.1 Structure of RotoSteer drilling tool

RotoSteer 钻井工具总长度为10~12 m,安装在传统滑动导向钻具之上,应用于定向钻井井眼轨迹控制,可实现低成本替代旋转导向工具。钻具组合如图2所示。



图2 RotoSteer 钻具组合示意

Fig.2 RotoSteer drilling tool assembly

1.2 国内现状

国内半程旋转导向钻井工具的研发仍处于初级阶段。西南石油大学进行了初步理论分析研究、样机研制和室内试验^[7]。2020年以来,各油田公司及钻探公司争相开展该方面的研究,如中国石油西部钻探、川庆钻探和中国石化石油工程技术研究院等正在开发类似于 RotoSteer 钻井工具的机械式半程

1 半程旋转导向钻井工具现状

1.1 国外现状

半程旋转导向钻井工具是近几年才出现的先进钻井工具。加拿大 CT Energy 公司开发了 RotoSteer 钻井工具^[6]。该工具是基于传统容积式螺杆钻具设计理念的机械式半程旋转钻井工具,其离合状态通过转盘高低转速调控。RotoSteer 钻井工具内设置有斜盘泵,当转盘以高转速(约60 r/min)转动时,斜盘泵从液压仓吸取液压油,推动内置环形活塞下行。活塞下端有花键组合,活塞下行,花键啮合。工具上端与下端运动状态一致,当转盘以低转速(约30 r/min)转动时,斜盘泵泄压,活塞上行,花键分离,使工具上端与下端运动状态分离,即上部钻柱以30 r/min 转速转动,下部钻柱转速为0。RotoSteer 钻井工具下端设置有液压马达,可产生一正转扭矩,此扭矩用以平衡钻头端向上部钻柱传递的反扭矩,产生5~7 MPa 的压耗。该钻井工具的结构见图1。

旋转导向钻井工具,但大都停留在理论研究和室内试验阶段,少见现场试验及推广应用报道^[8-9]。中国石油长城钻探公司研发的电控半程旋转导向钻井工具,截至2024年已完成4井次现场试验,目前处于小规模推广应用阶段。

2 电控半程旋转导向钻井工具

2.1 工作原理

电控半程旋转导向钻井工具在井下采用电控方式实现钻柱的扭离合。该工具整体由3个系统构成,分别是地面负脉冲信号下传系统、井下接收及电控系统和机械离合及反扭矩控制系统。其中,地面负脉冲信号下传系统,与旋转导向信号下传方式类似,在立管处安装地面信号下传装置,上位机传输指令至地面信号下传装置,下传装置调节分流阀的开度,生成一串钻井液负脉冲信号。井下接收及电控系统接收地面指令解码驱动执行机构实现离合

机构的分开与接合。机械离合及反扭矩控制系统通过某种机械结构实现钻柱扭矩的传递与断开,同时

抵抗钻头端反扭矩,保持工具面稳定。电控半程旋转导向钻井工具的工作原理如图 3 所示。

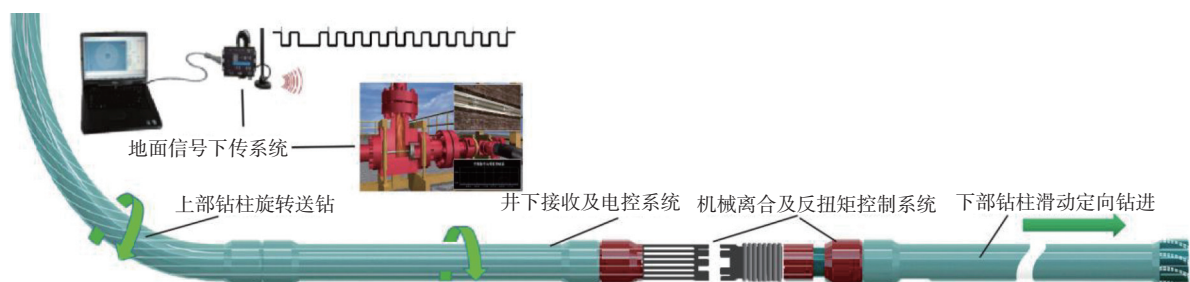


图 3 电控半程旋转导向钻井工具工作原理示意

Fig.3 Principle of electronically controlled half-way rotary steerable drilling tool

2.2 工具操作流程

电控半程旋转导向钻井工具的具体操作流程,分扭矩离开和扭矩啮合 2 部分。

1) 扭矩离开。在常规滑动定向钻进时,将电控半程旋转导向钻井工具安装在井下动力钻具后端一定距离处的钻柱中。地面发出一组一定时间间隔的钻井液负脉冲信号,下传至钻柱扭矩离合工具,井下电控扭矩离合单元的电子模块接收地面指令后驱动执行机构实现离合器的分离,实现钻柱上转下不转。此时,转盘以一定转速正常旋转,同时反扭矩控制总成平衡螺杆钻具产生的反扭矩,司钻小钻压送钻,观察工具面是否稳定。若工具面较为稳定,则证明钻柱扭矩离合工具处于离开状态,可提高钻压进行常规滑动导向钻进。

2) 扭矩啮合。钻完定方位井段后,地面发送另一组钻井液负脉冲信号,井下电子模块启动执行机构实现离合器的啮合,实现钻柱上下一起转,可进行复合钻进。滑动定向钻进和复合钻进可通过地面发送指令实时切换离合状态,电控半程旋转导向钻井工具的工作状态可通过转盘扭矩的变化和转盘旋转时工具面稳定与否进行判断。

2.3 工具的技术特点

1) 电控半程旋转导向钻井工具采用电控离合,信号下传装置为气动控制,工具整体自动化程度较高,离合动作执行仅需从上位机发送相应指令,对操作人员友好,操作简便。工具信号为钻井液负脉冲信号,现场测试表明,与 MWD/LWD/近钻头仪器的信号上传互不干扰,信号兼容性较好。

2) 电控半程旋转导向钻井工具整体压耗为 0.5 MPa,为钻井液通过工具内置涡轮转子产生的压耗,除此之外不增加钻井液循环系统压耗,对现场

施工友好。目前检索到国内外机械式半程旋转导向钻井工具的压耗为 5~7 MPa,会在一定程度上影响循环系统的降压。

3) 电控半程旋转导向钻井工具具有完整的抗反扭矩设置,同时配套开发了工具安放位置计算软件,通过三维模拟计算底部钻具组合的反扭矩,用于科学指导工具的安放位置,最大限度地发挥工具的效能。

3 反扭矩控制方法研究

电控半程旋转导向钻井工具的关键技术之一,是反扭矩的平衡技术。当工具处于扭矩离开状态进行定向钻进时,需平衡螺杆的反扭矩,如无法平衡螺杆的反扭矩或钻进中反扭矩突增将导致工具面失稳,井眼轨迹出现偏差。目前,该技术平衡螺杆反扭矩的方法是钻柱摩擦扭矩平衡法^[10],即通过水平段一定长度钻具(如 300~400 m 钻柱)与井壁之间的摩擦力产生的周向扭矩来抵抗螺杆钻具的反扭矩。然而,通过摩擦扭矩平衡法只可粗略计算工具的安放位置,而且计算结果往往距离钻头端较远,在一定程度上会影响工具的使用效果。CT Energy 公司 RotoSteer 钻井工具通过工具下端设置的液压马达产生正向扭矩平衡反扭矩,但该方法导致工具本身产生 5~7 MPa 的巨大压耗,增大了钻井系统的整体压力。本文在主流反扭矩控制方法的基础上,提出通过抗反扭矩扶正器、反扭矩吸收机构组成的复合式反扭矩控制总成,配合钻具摩阻扭矩平衡法达到平衡螺杆反扭矩的目的。该方法增加了反扭矩控制的稳定性,缩短了所需摩擦钻柱的长度,工具可安放在离钻头更近的位置,能更好地缓解托压,提

高钻压的传递效率,提升工具的使用效果。

抗反扭扶正器如图4所示。其本体设有3条支撑臂,支撑臂可通过内部换向机构实现撑起与收

回,撑起时3条支撑臂抵在井壁上,支撑臂与井壁的摩擦增加了旋转阻力,起到平衡螺杆反扭矩的作用。支撑臂上的滚轮可沿钻柱轴向滑动,降低送钻阻力。

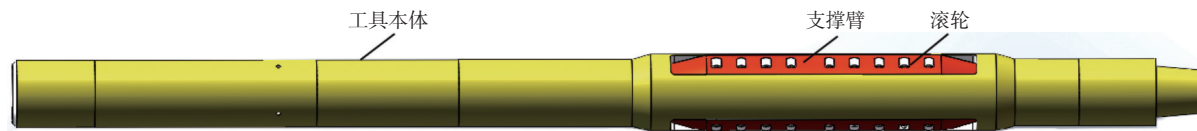


图4 抗反扭扶正器结构示意图

Fig.4 Structure of anti-torque-resistant stabilizer

定向钻进时,由于托压突然释放等原因,导致螺杆钻具反扭矩激增,此时可通过反扭矩吸收机构吸收螺杆钻具突增的反扭矩,保证不因反扭矩过大而出现工具面失稳的情况。具体而言,是反扭矩吸收机构将螺杆传上来的部分反扭矩转换成直线动量,并将能量进行吸收,储存于碟簧内。反扭矩吸收机构主要由吸扭外筒、密封组、中心筒、碟簧组、下接头组成,具体结构如图5所示。其中,下接头本体设置六头斜向外螺纹,螺纹牙型进行了特殊加宽;为保证下接头和吸扭外筒进行螺纹配合且存在一定轴向和径向活动量,起到减振作用,可持续吸收波动反扭矩,达到稳定工具面的目的。

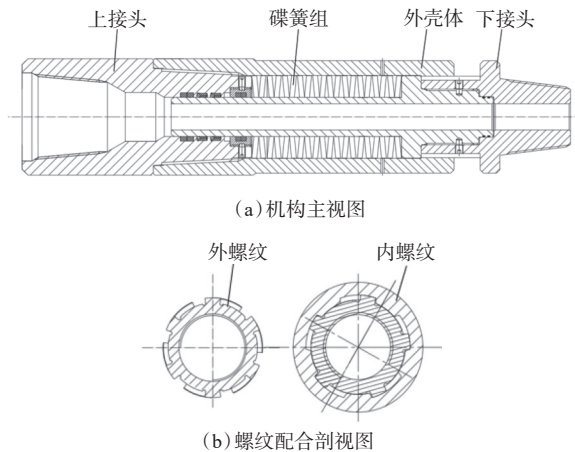


图5 反扭矩吸收机构的结构示意图

Fig.5 Structure of anti-torque absorption mechanism

4 现场试验

4.1 总体试验情况

截至目前, $\phi 172.0$ mm 电控半程旋转导向钻井工具在辽河油田陈古区块进行了4井次现场试验,工具入井时间450 h,进尺3 045 m。总体而言,工具机械性能满足井下工况需求,信号下传与接收稳定可靠,降摩阻效果提升30%以上,在长水平段可有

效缓解托压,定向井段机械钻速平均提升10%。

4.2 典型井例

2024年8月,电控半程旋转导向钻井工具在辽河油田陈古8-X井一水平段(井深4 007.87~4 125.00 m)进行了离合试验。陈古8-X井为一口生产水平井,垂深3 800.00 m,完钻井深5 258.00 m,水平段长度1 471.00 m,井身结构如图6所示。其中,三开井眼直径215.9 mm,水平段位于井深3 782.00~5 258.00 m,井斜角 90.86° 。

试验中,离合动作均成功执行,升级后的电控仪器性能得到验证,井深4 000.00 m处信号下传与接收稳定可靠,井深和高温对仪器影响较小,离合时间10 min以内,电控仪器待机和工作时间大幅增长。

陈古8-X井用常规定向钻井工具钻进时螺杆上端的扭矩(用近钻头工程参数测量短节实测)如图7所示。根据实钻扭矩取反扭矩均值 $6 \text{ kN}\cdot\text{m}$,用摩擦扭矩平衡法^[11-15]计算,工具需安放在距钻头161.90 m处,考虑到实钻过程中螺杆反扭矩是随工况变化的,引入抗反扭扶正器、机械式吸扭储能机构组成的复合式反扭矩控制系统,可另外提供4~5 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 的抗反扭能力,即相当于增加1.5倍抗反扭安全系数。

电控半程旋转导向钻井工具的实际下入位置在距钻头162.00 m处,钻具组合为: $\phi 215.9$ mm PDC钻头+ $\phi 172.0$ mm 螺杆+ $\phi 165.1$ mm 浮阀+411×4A10变扣+ $\phi 172.0$ mm 无磁钻铤+ $\phi 172.0$ mm 无磁悬挂器+ $\phi 170.5$ mm 滤网接头+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×3根+ $\phi 165.1$ mm 震击器+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×3根+ $\phi 127.0$ mm 钻杆×8+ $\phi 177.8$ mm 水力振荡器+ $\phi 165.1$ mm 旁通阀+ $\phi 127.0$ mm 钻杆+ $\phi 172.0$ mm 抗扭扶正器+ $\phi 172.0$ mm 电控半程旋转导向工具+ $\phi 127.0$ mm 钻杆。工具入井60 h,进尺330 m,在试验井段钻进期间进行4次扭矩离开、4次扭矩接合试验。扭矩离开时,转盘以10 r/min转速转动,以40 kN的小钻压送钻,泵压20~22 MPa,排量29.5~

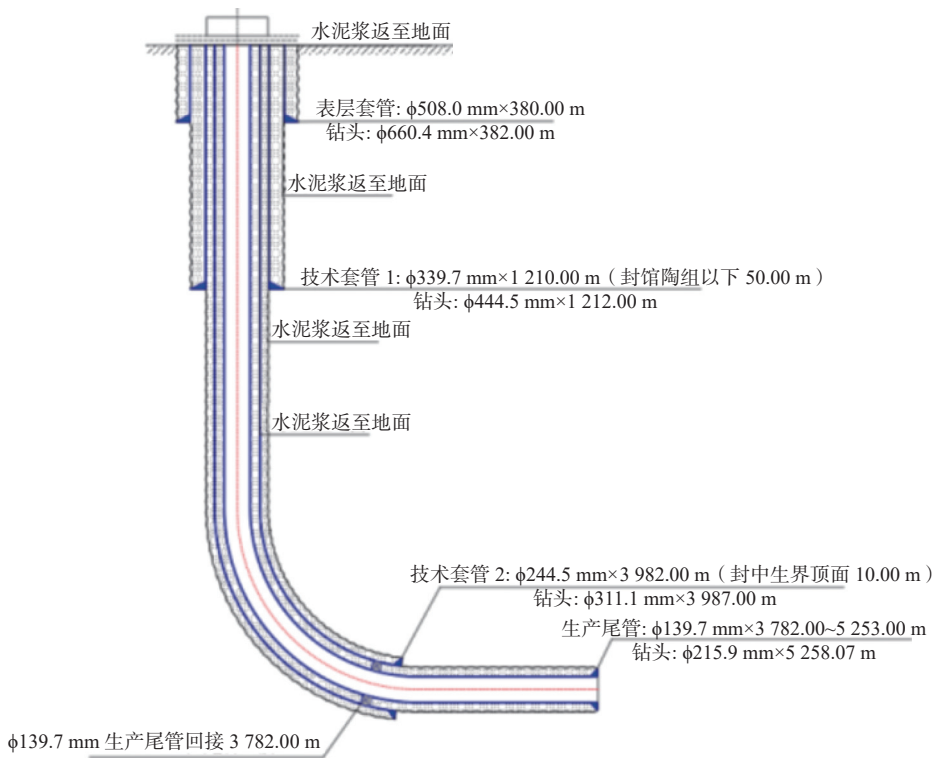


图 6 陈古 8-X 井的井身结构
Fig.6 Casing program of Well CG8-X

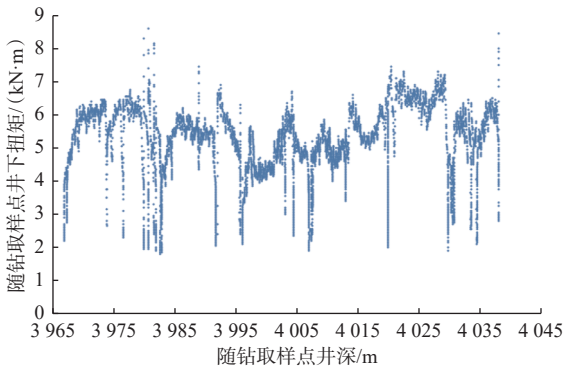


图 7 陈古 8-X 井的井下扭矩-井深散点数据
Fig.7 Downhole torque-well depth scattered point data of Well CG8-X

33.0 L/s, 转盘扭矩从之前的 6.8 kN·m 降为 4.5 kN·m, 离合离开, 30~50 kN 钻压半程旋转定向钻进时观察工具面, 显示工具面稳定, 钻时 4.68 min/m, 机械钻速较快。当扭矩合上时, 进行正常复合钻进 2.5 m, 钻时 13.3 min/m。

由陈古 8-X 井现场试验可知, 离合动作执行后转盘扭矩均有明显降低, 动作执行成功率 100%, 降摩减阻效果明显, 半程旋转定向钻进与常规滑动定向钻进期间相比, 机械钻速提高明显, 同时钻井液携岩能力有所提升。

5 结论与认识

1) 研制的电控半程旋转导向钻井工具采用电控方式在井下实现钻柱的扭矩传递与断开, 满足钻井降摩减阻、缓解托压的迫切需求, 可部分替代旋转导向功能, 提高常规导向钻井在长/超长水平段水平井、大位移井的延伸能力, 广泛适用于国内常规定向钻井作业领域。

2) 螺杆钻具反扭矩的控制是该工具应用中的关键点。通过实例计算和现场试验, 明确了电控半程旋转导向钻井工具在单井的安放位置, 验证了反扭矩控制方案的可行性, 工具的反扭矩控制能力达到现场应用标准。

3) 电控半程旋转导向钻井工具现场试验表明, 工具整体性能满足井下施工要求, 降摩减阻效果明显, 机械钻速相比常规滑动定向钻进有大幅提高, 具备推广应用价值。

参 考 文 献 References

[1] 骆新颖. 长宁威远区块页岩气水平井提速技术研究 [D]. 成都: 西

- 南石油大学, 2017: 80-90.
- LUO Xinying. Research on speed raising technology of shale gas in Changning and Weiyuan Block[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017: 80-90.
- [2] 李乾. 滑动钻进中顶驱扭摆减阻控制技术[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 39-42.
- LI Qian. Top drive system technology of torsional pendulum and drag reduction in slide drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016: 39-42.
- [3] 李传武, 兰凯, 杜小松, 等. 川南页岩气水平井钻井技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 16-21.
- LI Chuanwu, LAN Kai, DU Xiaosong, et al. Difficulties and countermeasures in horizontal well drilling for shale gas in southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 16-21.
- [4] 徐涛, 效世杰, 白冬青, 等. 定向钻井电控式扭矩离合控制工具研制与应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(3): 43-48.
- XU Tao, XIAO Shijie, BAI Dongqing, et al. Research and application of electrically controlled torque clutch control tool[J]. Drilling and Production Technology, 2023, 46(3): 43-48.
- [5] 郭亮, 肖杰, 尹虎, 等. 旋转导向工具环空掉块运移规律数值模拟[J]. 石油机械, 2022, 50(12): 1-9.
- GUO Liang, XIAO Jie, YIN Hu, et al. Numerical simulation for the migration law of falling blocks in the annulus of rotary steerable tool[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(12): 1-9.
- [6] CT Energy. Innovative drilling tools[EB/OL]. [2024-10-15]. <https://www.ctenergyservices.com>.
- [7] 汪兴明. 水平井扭矩离合钻井工具研制及减阻性能评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2017: 45-47.
- WANG Xingming. Development of torque clutch drilling tool and evaluation of drag reduction performance[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017: 45-47.
- [8] 郑德帅, 陈丽萍. 钻柱旋转滑动控制工具的研制与应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 94-98.
- ZHENG Deshuai, CHEN Liping. Development and application of rotary sliding control Tool for drill string[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(3): 94-98.
- [9] 秦永和, 范永涛, 陈文辉, 等. 静态推靠式旋转导向控制模型与造斜率预测方法[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 74-80.
- QIN Yonghe, FAN Yongtao, CHEN Wenhui, et al. Static push-the-bit rotary steering control model and build-up rate prediction method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 74-80.
- [10] 吴远灯, 刘少胡, 阳婷. 动力钻具反扭矩对连续管疲劳寿命的影响[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 171-176.
- WU Yuandeng, LIU Shaohu, YANG Ting. Research on influence of power drill reverse torque on fatigue life of coiled tubing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 171-176.
- [11] 祝效华, 童华, 刘清友, 等. 基于钻柱系统动力学的摩阻扭矩计算新方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 4853-4856.
- ZHU Xiaohua, TONG Hua, LIU Qingyou, et al. New method on calculation of torque and drag based on drilling string system dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(21): 4853-4856.
- [12] LIU Shaohu, ZHU Zhichao. Application of composite deflecting model in horizontal well drilling[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 4672738.
- [13] 高德利. 油气井管柱力学与工程[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 80-87.
- GAO Deli. Down-hole tubular mechanics and its applications[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 80-87.
- [14] 王植锐. 摩阻与扭矩分析在水平井设计中的运用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(6): 7-13.
- WANG Zhirui. Application of drag and torque analysis in the design of horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(6): 7-13.
- [15] 李文哲, 代锋, 曾光, 等. 长宁超长水平井钻井摩阻数值模拟分析[J]. 钻采工艺, 2021, 44(5): 39-44.
- LI Wenzhe, DAI Feng, ZENG Guang, et al. Numerical simulation analysis of drilling friction in Changning ultra-long horizontal well[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(5): 39-44.

[编辑 令文学]

《石油钻探技术》第一届优秀青年编委评选结果揭晓

基于公平、公正、公开的原则,《石油钻探技术》编辑部于2024年10月从46位第一届青年编委中评选出10位工作勤勉、贡献显著者,授予“《石油钻探技术》第一届优秀青年编委”称号,具体名单如下(以姓氏笔画为序):

马天寿(西南石油大学)

李勇(中国石油集团工程技术研究院有限公司)

王琛(西安石油大学)

陈志明(中国石油大学(北京))

王文昌(上海大学)

郭胜来(中国石油大学(华东))

刘善勇(长江大学)

韩玉娇(中石化石油工程技术研究院有限公司)

杜书恒(中国科学院力学研究所)

雷刚(中国地质大学(武汉))

第一届青年编委表现出高度的热情与责任感,积极参与期刊的组稿、撰稿、审稿及宣传工作,为《石油钻探技术》持续快速发展注入了强劲动力。此次评选出的10位优秀青年编委是其中的佼佼者。期待第二届青年编委能够继续发挥专业特长,热心投身期刊事业,为《石油钻探技术》的高质量发展积极贡献力量,进一步推动我国油气工程技术进步与能源战略实施。