

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021133

引用格式: 李燕, 胡志强, 薛玉志, 等. 基于日费制管理模式的彬 4 井钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 34-38.

LI Yan, HU Zhiqiang, XUE Yuzhi, et al. Key drilling technologies of Well Bin 4 under the daily rate system management mode [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 34-38.

基于日费制管理模式的彬 4 井钻井关键技术

李 燕¹, 胡志强¹, 薛玉志¹, 梁文龙², 唐文泉¹, 牛成成¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206; 2. 中国石化华北油气分公司, 河南郑州 450006)

摘 要: 日费制管理模式突出甲方主导作用, 实现管理程序的优化和生产运行的紧凑高效。彬 4 井是中国石化为钻井完井日费制管理市场化运行而在国内试点的第一口日费制探井, 该井钻遇地层具有缝洞发育、漏失风险高、研磨性强和可钻性差等特点, 钻井面临易漏失、易坍塌掉块、蹩跳钻严重和机械钻速低等技术难点。针对上述钻井技术难点, 在严格执行中国石化钻井完井工程日费制管理体系的前提下, 制定了各井段提速破岩方案, 优选各井段的破岩钻具组合, 研制封堵防塌钻井液, 形成了综合高效钻井关键技术。实钻结果表明, 该井在生产时效、钻井完井周期、复杂处理及平均机械钻速等方面均实现了突破, 钻井期间零故障、零停待, 实钻井深 4 056 m, 钻井周期 35.06 d, 完井周期 39.79 d, 全井平均机械钻速 16.04 m/h, 钻井周期、完井周期和平均机械钻速等指标均创彬长工区探井施工纪录。研究表明, 日费制管理模式在新技术集成应用和管理效率方面具有优势, 彬 4 井钻井关键技术和管理模式具有可复制性、可借鉴性, 为日费制管理市场化运行与推广提供了示范。

关键词: 日费制; 管理模式; 探井; 钻井; 完井; 彬 4 井; 中国石化

中图分类号: TE28

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)03-0034-05

Key Drilling Technologies of Well Bin 4 under the Daily Rate System Management Mode

LI Yan¹, HU Zhiqiang¹, XUE Yuzhi¹, LIANG Wenlong², TANG Wenquan¹, NIU Chengcheng¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Huabei Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: The daily rate system management mode highlights the leading role of Party A, thereby optimizing management procedures and increasing the efficiency of completion operations. To promote the market-oriented operation of daily rate system management for drilling and completion, Sinopec selected Well Bin 4 as the first pilot exploratory well to use the system in China. The drilled strata of the well feature fracture-cavity development, high leakage risk, strong abrasiveness, and poor drillability, which lead to many drilling difficulties, such as being very leak-prone, highly likely to collapse and break, subject to serious bit bouncing, and low rate of penetration(ROP). In response to these drilling problems, key technologies for comprehensive and efficient drilling were developed. They are based on the formulation of ROP increase and rock breakage plans for different well sections, the optimal selection of drilling BHA(Bottom Hole Assembly) for rock breakage at different well sections, and the development of a plugging and anti-sloughing drilling fluids while strictly implementing the the daily rate system management mode which was customized for Sinopec's drilling and completion projects. The field application revealed that breakthroughs were made in terms of operation efficiency, drilling and completion periods, complex processing, and average ROP, and there were no failures or shutdowns during drilling. With a drilling depth of 4 056 m, the drilling period, well completion period, and the average ROP of the whole well were 35.06 days, 39.79 days, and 16.04 m/h, respectively, all of which set records for exploratory well constructions in the Binchang Work Area. The

收稿日期: 2021-04-02; 改回日期: 2022-01-20。

作者简介: 李燕(1973—), 男, 四川南充人, 1998年毕业于大庆石油学院石油工程专业, 高级工程师, 主要从事石油工程技术现场服务及相关研究工作。E-mail: liyan.sripe@sinopec.com。

通信作者: 胡志强, huzhiq.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化油田项目部“中国石化重点工区井筒工程日费制体系文件建设与支持”(编号: YTBXD-05-202006)、“中国石化‘日费制’管理体系完善与试点支持”(编号: YTBXD-05-202102)和中国博士后科学基金项目“高温高压气井油套环空带压泄露点关键参数地面诊断技术研究”(编号: 2020M670584)资助。

research shows that the daily rate system management mode has advantages in the integrated application of new technologies and management efficiency. Moreover, the key drilling technologies and management mode of Well Bin 4 are reproducible and can be used as reference, which provide a demonstration for the market-oriented operation and promotion of the daily rate system.

Key words: daily rate system; management mode; exploratory well; drilling; well completion; Well Bin 4; Sinopec

相比国内石油工程管理常用的大包制管理模式,国外常用的日费制管理模式突出甲方主导作用,有利于提高工程质量、获得油气发现、推动技术进步。为此,中国石化开始采用日费制管理模式。

彬 4 井是中国石化部署在鄂尔多斯盆地彬长区块的一口重点探井,是为钻井完井日费制管理市场化运行而在国内试点的第一口日费制探井。作为中国石化的重点井,彬 4 井旨在推广新技术的集成应用,探索日费制钻井承包市场化运行模式,完善日费制管理体系。但该井存在一系列钻井难点:一开井眼垮塌、井漏、蹩跳问题较为突出;二开钻遇地层研磨性强,可钻性差;三开井眼扩径、坍塌掉块和井漏风险高。

针对彬 4 井的钻井问题,从管理和技术两方面进行研究,采取了相应措施:管理方面,严格按照日费制管理体系文件中规定的管理流程进行管理,采用自下而上扁平化的管理模式,充分发挥了日费制在管理效率和新技术集成应用方面的优势,强化甲方对目标井的管理责任,实现管理程序的优化和生产运行的紧凑高效;技术方面,针对性制定了各井段提速破岩方案,优选了各井段的破岩钻具组合,引入了隔振器、减振扭工具及大扭矩等壁厚螺杆等提速工具^[1-4],特制了高效 PDC 破岩钻头,采用预弯曲钻具组合,研制了封堵防塌钻井液,形成了综合高效钻井关键技术。该技术成功解决了浅层失返性漏失及地层研磨性强、可钻性差、井眼易失稳等钻井问题^[5-9],同时日费制管理在缩短钻井完井周期、提高机械钻速等方面发挥了重要作用。彬 4 井的顺利施工,对于鄂尔多斯盆地彬长区块整体勘探开发具有重大意义,同时为推广日费制管理市场化运行模式奠定了良好的基础。

1 日费制管理模式

科学规范的项目管理是提高钻井作业时效和工程质量的重要保障。国内外油公司考虑作业风险、钻井技术水平、钻井市场供需关系、社区关系、油价高低等因素,采用不同的钻井工程管理模式,主要有大包制和日费制 2 种。此前,中国石化普遍采用

大包制管理模式。该模式存在作业风险较高、油气并非生产时效高、钻井周期长、新技术应用程度低、甲方技术管理弱化等问题。为避免出现这些问题,开展日费制研究,形成了“1 纲领+1 核心+2 配套+1 平台”的中国石化钻井工程日费制管理体系。

“1 纲领”指钻井工程日费制管理试行方案。管理内容为制定日费制管理试行方案,确定日费制管理的工作目标、组织机构及职责划分。具体而言,是明确领导层、工作办公室、实施组、运行组等 4 个层级的责任主体,按建井工序梳理了各层级、各单位的职责分工。

“1 核心”指监督管理。管理内容为编制监督管理制度,科学管理日费制监督、规范日费制监督工作程序。具体而言,是针对监督工作范围及原则、基本制度、职责及权力、人员配置与资质要求、日常行为准则、监督工作管理及考核等方面,制定监督工作基本制度、资质要求、考核办法,分专业梳理监督管理工作范围,编制专业监督手册,指导日费制监督科学管理现场服务商。

“2 配套”指制度文件和合同模板。管理内容为完成制度文件和合同模板,保障日费制管理运行、提供日费制管理依据。其中,制度文件主要包括日常工作制度、工程设计与审批、新技术论证与审批、技术跟踪与支持、文档管理、工作汇报、财务管理、日费制管理激励办法等;合同模板是项目管理模式的直接体现,主要包括钻机服务(日费制)、钻井液服务(日费制)、录井服务(日费制)及系列大包制合同(工程设计及技术支持、钻井提速服务、定向与井身质量监测服务、固井服务、测井服务、钻井废弃物不落地服务)等方面。

“1 平台”指钻井工程日费制项目信息管理平台。管理内容为搭建信息管理平台,提供信息化手段,实现文档管理与多方共享,提高管理时效。该平台为实现日费制项目信息管理及时性和可追溯性提供手段。

2 彬 4 井概况及钻井技术难点

彬 4 井位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡南部,主要目的层为上古生界二叠系上石盒子组盒 7 段、下石

盒子组盒1段,兼顾上石盒子组盒4段、盒5段。该井设计为三开井身结构:一开,采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深401 m;二开,采用 $\phi 222.3$ mm钻头钻至井深3 720 m;三开,采用 $\phi 152.4$ mm钻头钻至井深4 060 m。

邻井彬2井、长探1井在非目的层延长组、刘家沟组均有不同程度的漏失,上古生界泥岩地层井筒稳定性差,易坍塌掉块;石千峰组泥岩地层易失稳,砂泥岩互层含煤层,易斜;和尚沟组、刘家沟组泥质

粉砂岩研磨性强,可钻性差,导致机械钻速偏低;石千峰组、石盒子组泥岩发育微裂缝、伊/蒙混层含量较高,易出现水力劈裂及水化分散性剥落掉块;彬2井上古生界平均井径扩大率37.6%,多次发生阻卡,掉块严重,地层砂泥岩互层且含页岩,扩径、坍塌掉块、井漏风险高,对钻井液抗高温、封堵抑制性提出较高要求。对照邻井信息,可分析归纳出彬4井钻遇地层情况及主要钻井技术难点,见表1。

表1 彬4井钻遇地层及主要钻井技术难点

Table 1 Drilled strata and main technical difficulties of Well Bin 4

系	组	底深/m	岩性	主要钻井技术难点
第四系		210	灰黄色黄土层,底部棕色砂砾层	地层松软、欠压实,易漏失,易垮塌
白垩系	志丹群	995	含砾砂岩、泥岩、粉砂岩	
侏罗系	安定组	1 075	细砂岩与泥岩等厚互层	存在浅层气风险,泥岩易剥落掉块,易卡钻
	直罗组	1 155		
	延安组	1 280		
	延长组	2 290	细砂岩、泥岩、煤夹层	
三叠系	纸坊组	2 955	细砂岩、泥质粉砂岩	地层研磨性强、可钻性差,易剥落垮塌,易漏失
	和尚沟组	3 165	紫红色泥岩、细砂岩、粉砂岩	
	刘家沟组	3 385	红色泥岩、含泥粉砂岩	
	石千峰组	3 695	泥岩、细砂岩、粉砂岩	
二叠系	上石盒子组	3 815	紫红色泥岩,泥质粉砂岩,细砂岩、粗砂岩	
	下石盒子组	3 895		
	山西组	3 955	碳质泥岩、泥质粉砂岩	
石炭系	太原组	3 960	碳质泥岩夹煤层岩、细砂岩	泥岩发育微裂缝、易扩径、井涌,煤层易缩径、垮塌
寒武系	张夏组	4 020		
	徐庄组	4 060	灰岩、泥岩、页岩白云岩	H ₂ S侵入风险高、易钙侵,钻具易放空,易井漏

对照设计的井身结构、邻井信息及表1中所列钻遇地层的基本情况,可知彬4井主要需解决如下钻井问题:一开钻遇地层松软,需要解决井壁垮塌、井漏、蹩跳钻问题;二开砂泥岩互层含煤层,和尚沟组、刘家沟组泥质粉砂岩研磨性强,可钻性差,且井段长,需要加强破岩能力、提速提效并采取防塌措施;三开砂泥岩互层且含页岩,扩径、坍塌掉块和井漏风险高,应以防缩径、防垮塌、防井漏为主。

3 钻井关键技术

针对彬4井的钻井技术难点及技术需求,提出了如下技术措施:针对性制定各井段提速破岩方

案,特制高效PDC破岩钻头,优选各井段的破岩钻具组合,引入隔振器、减振稳扭工具及大扭矩等壁厚螺杆等提速工具,采用预弯曲钻具组合,形成了综合高效钻井提速技术;针对地层渗漏、井眼失稳和钻头泥包等技术难点,在易塌井段选择强封堵强抑制成膜钻井液,在易漏失井段强化随钻封堵,在储层段强化油气层保护,形成了综合高效钻井液提速保障技术。

3.1 特殊地层钻头优化设计

彬4井二开砂泥岩互层含煤层,和尚沟组、刘家沟组泥质粉砂岩研磨性强,含砾石,地层可钻性级值5~7,对钻头的耐磨性、抗冲击性及使用寿命提出了较高要求。该井段设计使用3只 $\phi 222.3$ mm

S1655FGA2型PDC钻头、1只S1646FGA型PDC钻头。具体优化方案为:1)综合考虑PDC钻头切削齿尺寸、钻压、地应力等因素对钻齿吃入深度的影响,对PDC钻头进行精细化设计和优化,主切削齿采用进口天然金刚石,并对齿形、布齿密度及布齿角度进行了优化;2)优化钻头冠部弧线,冠顶局部加密布齿,钻头外锥局部降低布齿密度,提高钻头的机械钻速;3)在钻头主切削位置,斧形齿和柱形齿配合使用对井底预破坏,再用斧形齿进行切削,这种新型的切削结构同时具有较高的抗冲击性和攻击性。另外,提高水功率作用,采用小直径喷嘴高压喷射,进一步提速、提效。

3.2 钻具组合优化技术

一开井段,采用高效PDC钻头配合高转速螺杆(平均转速90~140 r/min)、隔振器、MWD钻具组合,采取小钻压、低排量钻至一开完钻井深402 m;二开井段,优选高性能斧形齿和柱形齿,提高钻头的抗冲击性和攻击性^[10],上部地层偏重于钻头攻击性,下部地层偏重于钻头磨耗比,并采用小直径喷嘴高压喷射,配合等壁厚大扭矩螺杆(最高超过14 kN·m)、减振稳扭提速工具,运用预弯曲钻具组合设计理念和强化的钻井、水力参数实现提速提效^[11-12];三开井段,地层为砂泥岩互层且含页岩,扩径、坍塌掉块风险高,以防缩径、防垮塌和防井漏为主,拟用3只 $\phi 152.4$ mm S1653FG型PDC钻头,配合等壁厚大扭矩螺杆,强化钻井和水力参数,实现三开井段高效破岩、防斜打直和有效携岩的目的。彬4井设计的钻具组合及钻井参数:

一开钻具组合为 $\phi 311.1$ mm PDC钻头+ $\phi 228.6$ mm 1.25°单弯螺杆+ $\phi 203.2$ mm 无磁钻铤+ $\phi 309.0$ mm 稳定器+ $\phi 203.2$ mm 钻铤+ $\phi 172.0$ mm 隔振器+ $\phi 165.1$ mm 钻铤+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆+ $\phi 127.0$ mm 钻杆,钻压10~100 kN,转速40~60 r/min;

二开 $\phi 222.3$ mm PDC钻头+ $\phi 172.0$ mm 1.25°等壁厚螺杆+ $\phi 172.0$ mm 恒压恒扭液力冲击器+ $\phi 218.0$ mm 稳定器+ $\phi 165.1$ mm 无磁承压钻杆+MWD短节+ $\phi 165.1$ mm 无磁承压钻杆+ $\phi 165.1$ mm 钻铤+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆+ $\phi 127.0$ mm 钻杆,钻压60~140 kN,转速40~60 r/min,排量28~48 L/s;

三开 $\phi 152.4$ mm PDC钻头+ $\phi 127.0$ mm 1.25°单弯螺杆+ $\phi 126.0$ mm 无磁钻铤+MWD短节+单流阀+ $\phi 150.0$ mm 稳定器+ $\phi 126.0$ mm 无磁钻铤+ $\phi 88.9$ mm 加重钻杆+ $\phi 88.9$ mm 钻杆,钻压50~100 kN,转速40~50 r/min,排量12~22 L/s。

3.3 钻井液封堵防塌技术

针对性制定了各风险井段的钻井液保障措施:提速井段,选择无固相钻井液;易塌井段,选择强封堵强抑制成膜钻井液;易漏失井段,强化随钻封堵,储层段强化油气层保护。由此,形成了综合高效钻井液提速保障技术:一开钻进第四系黄土层或流砂层时,由于胶结松散、欠压实,分散度高,地层承压能力差,容易漏失或流砂层发生垮塌,采用无固相钻井液钻进,配合随钻封堵材料做好防漏堵漏;二开井段,裸眼段长达3 300 m,刘家沟组易漏失、石千峰组泥岩地层易失稳,漏塌同存矛盾突出,因此,优化了强封堵抑制成膜防塌钻井液配方,钻井液中膨润土的含量控制在25~30 kg/m³,钻进中将KPAM配成0.3%~0.5%胶液并以细水长流方式交替补充,以提高钻井液的抑制能力和包被能力;三开井段,太原组与张夏组之间不整合面接触处易发生裂缝性漏失,严格控制钻井液密度,降低滤失量,做好储层保护,确保实现地质目的。

4 效果分析

基于日费制管理模式与新技术的融合优势,彬4井钻井顺利。该井完钻井深4 056 m,钻井周期35.06 d,完井周期39.79 d,平均机械钻速16.04 m/h,均创彬长区块探井纪录。其钻井周期、完井周期,与同期大包制管理模式的探井彬3井(钻井周期55.84 d、完井周期63.38 d)相比,大幅缩短。

彬4井钻进中,一开井段仅发生2次失返性漏失,平均机械钻速达40.20 m/h,有效降低了钻井风险,提高了钻井效率。二开井段有效控制了井斜角,防漏防塌效果显著,井眼质量良好,井径扩大率仅5.7%,起下钻摩阻10~20 kN,平均机械钻速16.77 m/h(较同井型邻井提高93.58%)。三开井段,采用了预防为主、固液双效、兼顾油层保护、多元协同提高承压效果的措施,并针对垂直缝、平行缝、高角度缝漏失采用多元协同原理增强力链强度,采取措施后堵漏成功率100%,承压6 MPa,压降0.1 MPa,固井憋压11 MPa候凝,地层承压效果明显,钻井液封堵防塌性能良好,而且固井全程返浆正常,三开平均机械钻速7.18 m/h,较同井型邻井提高201.35%。

综合而言,彬4井单井成本较预算降低169万元,降幅达12.39%,实现了降本、增效、提速的目标,具有良好的工程示范和借鉴意义。

5 结论与建议

1) 针对彬4井钻遇地层异常复杂等情况, 优化各井段的破岩钻具组合, 特制高效PDC破岩钻头强化破岩能力; 采用等壁厚螺杆钻具提高钻头扭矩和转速; 引入隔振器和减振稳扭工具, 降低井下振动、为钻头提供稳定钻压; 采用预弯曲钻具组合, 实现防斜打直。通过优化集成各项技术, 形成了综合高效钻井提速技术。

2) 在彬4井易塌井段选用强封堵强抑制成膜钻井液, 在易漏井段强化随钻封堵, 在储层段强化油气层保护, 形成了综合高效钻井液提速保障技术。

3) 相对于同区块采用大包制管理模式的邻井, 彬4井在生产时效、钻井完井周期、复杂情况处理及机械钻速等方面均有突破, 证明日费制管理模式配合综合高效钻井提速技术、综合高效钻井液提速保障技术后具有非常好的现场效果。而且, 彬4井的现场实践具有可复制性和可借鉴性。

4) 建议在鄂尔多斯盆地彬长区块继续开展日费制管理模式探索, 持续优化日费制提速提效模板。同时, 严格落实市场化招标体制、执行“日清月结”制度, 加快“日费制”人才队伍培养; 以清单计价为参考, 增强市场调节, 探索合理费率。

参 考 文 献

References

- [1] 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 1-10.
LU Baoping. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 1-10.
- [2] 尹慧博, 索忠伟, 李博东, 等. 沙特 HWY 区块 HWY-116 井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 34-38.
YIN Huibo, SUO Zhongwei, LI Bodong, et al. Drilling rate improvement technology adopted in Well HWY-116 of the HWY Block, Saudi Arabia[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 34-38.
- [3] 刘书斌, 倪红坚, 张恒. 轴扭复合冲击工具的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 69-76.
LIU Shubin, NI Hongjian, ZHANG Heng. Development and applications of a compound axial and torsional impact drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 69-76.
- [4] 杨进. 深水油气井表层导管下入深度计算方法[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1396-1406.
YANG Jin. Calculation method of surface conductor setting depth in deepwater oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1396-1406.
- [5] 胡志强, 杨进, 路保平, 等. 深水泡沫套管静水压载特性与压力控制机理[J]. 石油学报, 2019, 40(6): 726-733.
HU Zhiqiang, YANG Jin, LU Baoping, et al. Hydrostatic pressure characteristics and pressure control mechanism of foam casing in deepwater wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(6): 726-733.
- [6] 唐文泉, 高书阳, 王成彪, 等. 龙马溪页岩井壁失稳机理及高性能水基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(3): 21-26.
TANG Wenquan, GAO Shuyang, WANG Chengbiao, et al. Research on mechanisms of wellbore instability of Longmaxi shale formation and high performance water base drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(3): 21-26.
- [7] 唐文泉, 王成彪, 林永学, 等. 页岩气地层纳微米孔隙结构特征及封堵实验评价[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 32-38.
TANG Wenquan, WANG Chengbiao, LIN Yongxue, et al. The characteristic analysis of micro-nano pore structure in shale gas formation and its sealing evaluation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 32-38.
- [8] 牛成成, 肖超, 韩艳浓, 等. 阿根廷圣豪尔赫湾油田复杂地层坍塌钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(1): 23-28.
NIU Chengcheng, XIAO Chao, HAN Yannong, et al. Drilling fluid technology for enhancing borehole stability for complex reservoirs in the San Jorge Oilfield, Argentina[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(1): 23-28.
- [9] 胡志强, 路保平, 侯绪田, 等. 深层气井油套环空泄漏点关键参数地面诊断技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 632-636.
HU Zhiqiang, LU Baoping, HOU Xutian, et al. Surface diagnosis technology for the key parameters of leakage point in the tubing-casing annulus of deep gas wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 632-636.
- [10] 谢晗, 况雨春, 秦超. 非平面 PDC 切削齿破岩有限元仿真及试验[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 69-73.
XIE Han, KUANG Yuchun, QIN Chao. The finite element simulation and test of rock breaking by non-planar PDC cutting cutter[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 69-73.
- [11] 胡志强, 杨进, 刘书杰, 等. 基于套管-水泥环-地层热固耦合作用的多层套管环空附加压力预测模型[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(8): 1824-1832.
HU Zhiqiang, YANG Jin, LIU Shujie, et al. Prediction model of multilayer casing annular pressure buildup based on casing-cement sheath-formation with thermo-structural coupling effects[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(8): 1824-1832.
- [12] 罗恒荣, 崔晓杰, 谭勇, 等. 液力扭转冲击器配合液力加压器的钻井提速技术与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 58-62.
LUO Hengrong, CUI Xiaojie, TAN Yong, et al. Research and field test on drilling acceleration technology with hydraulic torsional impactor combined with hydraulic boosters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 58-62.

[编辑 令文学]