

天津地区地热定向井钻井工艺优化及应用

苏小飞, 杨忠彦, 董路飞, 孙玉东, 蔡金盟

(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 地热资源作为清洁能源, 对推动能源结构转换、实现碳达峰碳中和目标具有重要作用。随着地热资源开发加快, 地热定向井钻井数量逐年增多, 定向井钻井技术在地热资源可持续开发利用中的作用愈加重要。为提高地热定向井施工速度和效率, 对地热定向井钻井工艺技术和天津地区地热定向井井身结构进行了分析, 进行了地热定向井钻井工艺优化, 优化了直井段防斜工艺、优选了造斜点、优化了定向钻具组合和工程参数、改进了钻井液体系。采用优化的地热定向井钻井在天津地区施工6井次, 能保障井眼轨迹的合理施工, 有效地提高了定向钻井的效率, 取得了良好的效果。

关键词: 地热定向井; 钻具组合; 造斜点优选; 轨迹控制; 工艺优化

中图分类号: TE249;P634.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0392-06

Drilling technology optimization and application for geothermal directional wells in Tianjin

SU Xiaofei, YANG Zhongyan, DONG Lufei, SUN Yudong, CAI Jinmeng

(Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute, Tianjin 300250, China)

Abstract: Geothermal resource is a kind of clean energy. It plays an important role in promoting energy structure transformation and achieving carbon peak and carbon neutrality. With accelerating development of geothermal resources, geothermal directional wells have been increasing year by year. Directional drilling technology has become more and more important in developing and utilizing geothermal resources. In order to improve geothermal directional drilling speed and efficiency, paper analyzed the technical issues of geothermal directional drilling technology and the wellbore structures of geothermal directional wells in Tianjin. Geothermal directional drilling technology optimization includes anti-deflection technology optimization of vertical well section, choice of KOP, optimization of BHA and parameters, improved drilling fluid system. Application of geothermal directional drilling technology optimization can ensure better well trajectory and improve directional efficiency in 6 wells in Tianjin.

Key words: geothermal directional wells; BHA; optimal selection of KOP; well trajectory; technology optimization

0 引言

地热资源作为一种清洁环保能源, 受到越来越广泛的关注和应用。大力开发利用地热资源, 对于优化我国能源结构具有重要的现实意义^[1]。定向井钻井工艺技术已成为地热开发的重要技术^[2-3], 但在定向井钻井施工过程中还存在一些问题: 定向过程中易发生粘钻等井下复杂情况^[4-5], 定向钻进时存在严重

的托压风险^[6]; 井眼轨迹控制不规则, 机械钻速低。笔者针对天津地区地热定向井存在的定向钻井技术问题, 分析了天津地区地热井井身结构设计, 从定向井钻井工艺、钻具组合和工程参数、钻井液体系等方面进行了地热定向井钻井工艺优化研究, 在6口井试验应用, 取得了良好的效果。结果表明, 地热定向井钻井工艺优化对提高钻井工程效率、缩短

收稿日期: 2024-07-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.063

第一作者: 苏小飞, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 从事地热钻探工程施工和技术研究工作, 天津市河东区卫国道189号, q364046343@163.com。

引用格式: 苏小飞, 杨忠彦, 董路飞, 等. 天津地区地热定向井钻井工艺优化及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 392-397.

SU Xiaofei, YANG Zhongyan, DONG Lufei, et al. Drilling technology optimization and application for geothermal directional wells in Tianjin[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 392-397.

钻井周期、节约施工成本有着重要的意义。

1 地热定向井钻井工艺存在的问题

1.1 定向井井眼轨迹控制效果差,定向井段钻速低

定向井最重要的是造斜和增斜井段,常采用螺杆钻具配合牙轮钻头进行造斜和扭方位作业。在定向井井眼轨迹控制中,机械钻速低,井眼轨迹控制效果差,实钻井眼轨迹易偏离设计轨道,形成的井眼轨迹不规则,加大了钻井施工难度。表现为下套管阻力大,后续施工摩阻扭矩大,工程风险增加。如我们施工的XQ-07B地热井测斜显示二开造斜段井眼轨迹不规则,导致三开套管下入困难,被迫逐根转动套管加压下管。

1.2 砂泥岩地层定向托压严重,定向钻井效率低

定向井施工受地质因素和工程因素影响大。地热定向井增斜井段为新近系地层,岩性为砂岩、泥岩、砂泥岩互层。造斜阶段在该地层滑动钻进并扭方位时常出现托压现象:加压不进尺,钻压传不到井底,需要反复提放钻具摆工具面,定向效率低。螺杆钻具配合牙轮钻头定向时,由于牙轮钻头在高转速下寿命降低,起下钻更换钻头次数多,影响钻井效率。

1.3 地质结构复杂地层各向异性,钻井工程事故风险高

天津地区地热地质构造发育,地层岩性十分复

杂,给定向施工带来很大困难^[7]。定向井井段新近系地层结构松散,易发生垮塌;造斜阶段滑动钻进时摩擦下侧井壁,井眼形成偏磨,“狗腿”度大的位置易形成键槽发生卡钻事故。奥陶系、寒武系地层有漏失风险,漏失地层定向钻进,事故风险增加。

2 地热定向井钻井工艺优化

2.1 井身结构设计

为加强地热资源保护式开发,天津市最早推行采灌对井开发模式开发利用地热资源,布置开采井和回灌井地面井眼间距5 m,采用定向井工艺,使对井井底距离达600 m以上,实现层间连通,方便井口管理的同时,有效避免了开采井和回灌井井底热突破和流体短路。针对天津地区地热地质条件、热储层特性及地热开发要求,常规地热井井身结构有两种:二开井身结构和四开井身结构^[8]。

馆陶组热储层地热资源开发常采用二开结构:一开直井段为泵室段,长度450 m;二开定向钻穿馆陶底砾岩;射孔成井。雾迷山组热储层地热资源开发常采用四开结构:一开直井段为泵室段,长度450 m;二开定向钻穿馆陶底砾岩;三开稳斜钻至雾迷山顶板;四开钻至完井井深,根据开发需要,确定成井方式。井身结构设计方案见表1,井身结构示意图1、图2。

表1 地热定向井井身结构设计方案

热储层	井身结构	开次	钻头尺寸/mm	井深/m	套管尺寸/mm	下入深度/m	下入层位
馆陶组	二开	一开	444.5	450	339.7	450	Q、Nm
		二开	311.2	1830	244.5	1830	Nm、Ng
雾迷山组	四开	一开	444.5	450	339.7	450	Q、Nm
		二开	311.2	1425	244.5	1425	Nm、Ng
		三开	215.9	2230	177.8	2230	Mz、O、Є、Qb
		四开	152.4	2740		裸眼成井	Jrw

注:馆陶组地热井以WQ-39B井为例,雾迷山组地热井以DL-93井为例。

2.2 定向井钻井工艺优化

科学合理的井眼轨迹可以有效地提高定向井施工效率^[9]。地热定向井井眼轨迹通常设计为三段式:直井段、增斜段(含造斜段)和稳斜段。在考虑实际地质情况的基础上,应用定向井钻井工艺优化技术,选择难度系数最小、安全指数最高、扭矩和摩阻最小、方便对井眼轨迹进行控制的定向井眼轨迹

设计方案^[9],实现对各井段井眼轨迹进行控制,降低施工难度,提高定向井效率。

2.2.1 直井段防斜

直井段防斜打直是定向井井眼轨迹控制的基础,根据直井段实际情况优选合适的塔式钻具组合和钟摆钻具组合。塔式钻具组合能够有效避免钻井施工中的倾斜现象发生,保证井壁和钻具之间的

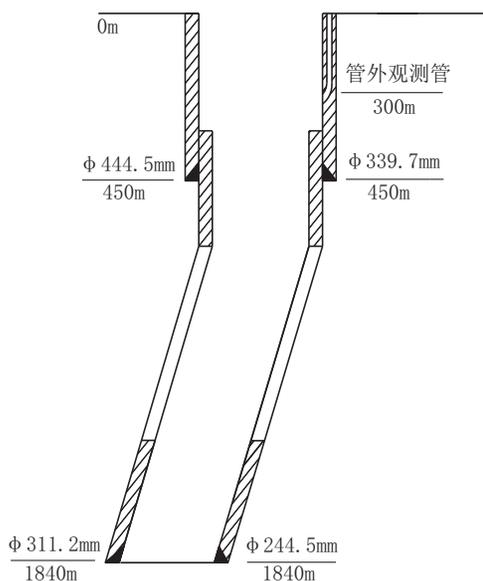


图1 馆陶组地热井井身结构示意图

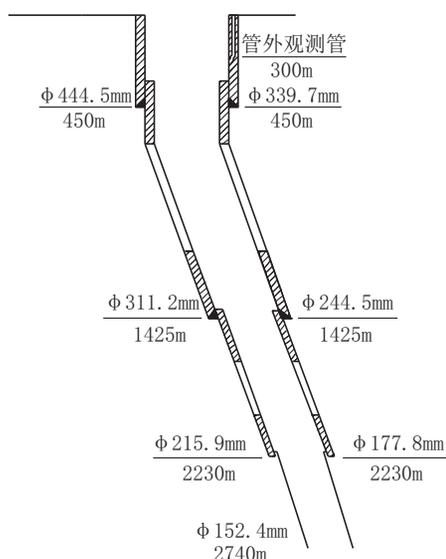


图2 雾迷山组地热井井身结构示意图

间隙在合理的范围之内,防止井斜现象出现;钟摆钻具应用轻压吊打技术,能有效控制井斜。施加小钻压能够在井斜超过范围值后产生一定的恢复力,能够及时纠正已经产生的井斜,如果钻压过大就会影响钟摆的恢复力,出现井斜的现象^[10-11]。

2.2.2 优选造斜点

造斜点的选择是定向井成功的关键因素之一。一方面定向施工要求造斜点岩石硬度应能起到对造斜点钻具的支撑作用,另一方面又要把造斜点选在深度较浅的位置,用较小的井斜角和造斜率实现较大井底位移^[12]。根据区域地层特征,造斜点选在

新近系上部胶结中等地层进行定向造斜可行。在保证井底位移的前提下,优选地热对井造斜点,先施工的定向井造斜点定在500 m,后施工的定向井造斜点定在550 m。

造斜段钻井施工是定向井钻井施工中的关键点,造斜点确定后,根据实际的方位偏差、井斜角等数据对井眼轨迹的造斜率进行设计和计算,保障造斜钻井施工的顺利进行,通过调整滑动钻进、复合钻进的比例以及增加钻铤等措施保障钻头按照设计的井眼轨迹钻进,保障造斜段施工的顺利进行^[12-13]。造斜初期采用滑动钻进,扭工具面,找准方位,按设计方位控制井眼轨迹;造出角度后,可适当增加复合钻进,提高钻井速度,监测井斜方位变化,控制井眼轨迹走向。

2.2.3 稳斜段的井眼轨迹控制技术

稳斜段的钻井施工过程中,首先要根据实际情况选择合适的随钻测斜仪器设备,能够及时对钻进过程进行动态跟踪,实时监测井眼的方位角、井斜角等数据,避免钻进轨迹偏差过大。采用大钻压复合钻进提高稳斜效率,选用MWD无线随钻测斜仪跟踪测斜。当井斜下降时,采用滑动钻进进行增斜,稳定井斜角在合理范围内。

2.3 钻具组合和参数优化

地热定向井在二开 $\text{O}311.2\text{ mm}$ 井眼进行定向造斜。 $\text{O}197\text{ mm}$ 单弯螺杆(1.5° 弯角, $\text{O}238\text{ mm}$ 稳定器)具有扭矩大、动力强的特点,采用 $\text{O}197\text{ mm}$ 单弯螺杆钻具组合定向增斜进行井眼轨迹控制和钻井提速,大直径稳定器的使用可优化井眼质量,选用MWD无线随钻测斜仪实时监测井斜方位变化。

三开 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 井眼主要以稳斜钻进为主,考虑到经济和实用性^[13],选用中低转速大扭矩 $\text{O}159\text{ mm}$ 螺杆钻具(1.25° 弯角, $\text{O}203\text{ mm}$ 稳定器)。稳斜段采用复合钻进方式,提高定向钻井速度和井眼轨迹控制能力。应用单点测斜仪定点测斜监测井斜变化。

钻头选型和地层配伍性直接影响钻进速度。定向钻进井段在新近系、寒武系及青白口系地层,根据地层可钻性,选用稳定性强的PDC钻头进行钻进和提速。 $\text{O}311.2\text{ mm}$ 井眼造斜段优选5刀翼、13 mm小尺寸复合片定向PDC钻头,该钻头受扭矩波动小,工具面较容易控制。 $\text{O}215.9\text{ mm}$ 井眼采用优质抗研磨强、小尺寸复合片、6刀翼胎体PDC钻头,

工具面更加稳定,更利于稳斜井段复合钻进提速^[13]。定向井段钻具组合和钻井参数优化设计 见表2

表2 钻具组合与钻井参数优化设计

序号	井段	钻具组合	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	泵压/ MPa	泵量/ (L·s ⁻¹)
1	直井段	Ø444.5 mm 钻头+Ø203 mm 钻铤×6根+Ø159 mm 钻铤×9根+ Ø127 mm 钻杆	50~120	72	2~5	28~32
		Ø311.2 mm 钻头+Ø203 mm 钻铤×6根+Ø159 mm 钻铤×9根+ Ø127 mm 钻杆				
2	造斜段	Ø311.2 mm 定向PDC 钻头+Ø197 mm 螺杆+Ø238 mm 球扶+定 向接头+Ø203 mm 无磁钻铤(MWD)+Ø203 mm 钻铤×3根+ Ø159 mm 钻铤×3根+Ø127 mm 钻杆	20~50	螺杆 螺杆+40	4~8	28~32
3	稳斜段	Ø215.9 mm PDC 钻头+Ø159 mm 螺杆+座键+Ø159 mm 钻铤× 18根+Ø127 mm 钻杆	40~60	螺杆+40	5~8	28~32

2.4 钻井液体系优化

天津地区地热定向井定向井段钻遇新近系明化镇组、新近系馆陶组、奥陶系、寒武系及青白口系地层。二开Ø311.2 mm 井眼钻进新近系明化镇组砂泥岩地层结构松散且造浆严重,选用强抑制低固相钾氨基聚合物钻井液,防止粘土侵入,配合润滑剂使用,增强钻井液润滑性能,降低摩阻扭矩^[14],减轻托压,提高钻井速度,降低施工风险。三开Ø215.9 mm 井眼稳斜钻进奥陶系、寒武系和青白口系地层,地层较硬,部分地层裂隙发育,有不同程度的漏失。选用聚合物防塌钻井液体系,保证钻井液中降滤失剂和防塌剂含量,确保钻井液处于低固相、低滤失的稳定状态,在钻井液中加入一定量的磺化沥青进行处理,增强絮凝能力,能够有效防漏和防塌。

3 地热定向井钻井工艺优化应用

目前地热定向井优化工艺已经在天津地区地热对井应用6井次,结果显示,地热定向井应用该优化工艺,井眼轨迹控制符合设计要求,缩短了定向井工期,提高了定向井施工效率。以DL-93地热井为例,目的层为蓟县系雾迷山组,设计垂深2600 m,设计斜深2740 m,设计为四开定向井,裸眼成井。设计对井井口距离5 m,井底水平投影距离550 m。根据地层情况,造斜点选在新近系明化镇组上部地层,造斜点500 m,设计最大井斜角25°,方位角345°。

3.1 直井段防斜打直

直井段要保证打直。DL-93地热井一开、二开直井段钻遇第四系和明化镇组上部地层主要以胶结疏松的砂岩及松软的泥岩为主。采用塔式钻具组合防斜打直,小钻压50~80 kN,均匀送钻,控制井眼轨迹,直井段最大井斜角0.44°。

3.2 增斜段精准定向

二开增斜段采用Ø311.2 mm 定向PDC 钻头配合Ø197 mm 螺杆钻具组合,下入钻具前调整好方位。到井底后摆工具面,从520 m 开始定向,滑动钻进30 m,复合钻进10 m,再滑动钻进10 m,测量井斜角增长情况,保证复合钻进10 m 增长不小于1°。采用滑动钻进为主、复合钻进为辅的方式造斜,适当增加复合钻进比例,提高定向速度的同时可以保证井眼轨迹。增斜至设计井斜角,开始全比例复合钻进,采用MWD 随钻测斜仪实时监测井斜方位变化情况,当井斜角下降,再适当滑动钻进增斜,控制井斜角在最大井斜角2°范围内。钻至馆陶组底砾岩地层,更换常规钻具配合镶齿牙轮钻头穿透底砾岩,二开完成。

二开砂泥岩地层采用聚合物钻井液体系,抑制泥岩造浆,控制失水,稳定井壁,提高携岩效率,加入润滑剂,增强泥浆润滑性能,减小摩阻扭矩,保证井下施工安全^[15]。应用定向井钻井工艺优化技术实现一趟钻具完成定向、造斜、增斜,节约了起下钻更换钻具时间,提高了定向效率。

3.3 稳斜段安全提速

稳斜段采用复合钻进工艺控制井眼轨迹。三开采用 $\text{O}215.9\text{ mm}$ PDC钻头配合 $\text{O}159\text{ mm}$ 螺杆(1.25°)钻具组合,以有效控制井眼轨迹并提高钻速,选用聚合物防塌钻井液体系,抑制寒武系地层泥岩造浆,控制钻井液失水,稳定井壁。利用单点测斜仪定点测量井斜方位变化情况。优化工艺应用较常规钻井工艺钻井速度有明显提高。

四开钻进雾迷山组地层,地层裂缝发育,易发生漏失、大漏不返浆。根据地层情况可选择反循环钻进或顶漏钻进。DL-93地热井雾迷山组钻进发生大漏不返浆,钻进过程中岩屑进入地层,井底沉屑少,顶漏钻进裸眼488 m,完井。

DL-93地热井钻具组合与钻井参数见表3,完钻井眼轨迹见图3。

表3 DL-93地热井钻具组合与钻井参数优化设计

序号	井段	钻具组合	钻压/ kN	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	泵压/ MPa	排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	钻井液体系
1	直井段	$\text{O}444.5\text{ mm}$ 钻头 + $\text{O}203\text{ mm}$ 钻铤 $\times 6$ 根 + $\text{O}159\text{ mm}$ 钻铤 $\times 9$ 根 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆 $\text{O}311.2\text{ mm}$ 钻头 + $\text{O}203\text{ mm}$ 钻铤 $\times 6$ 根 + $\text{O}159\text{ mm}$ 钻铤 $\times 9$ 根 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆	50~120	72	2~5	28~32	膨润土钻井液体系
2	造斜段 稳斜段	$\text{O}311.2\text{ mm}$ 定向 PDC 钻头 + $\text{O}197\text{ mm}$ 螺杆 + $\text{O}238\text{ mm}$ 球扶 + 定向接头 + $\text{O}203\text{ mm}$ 无磁钻铤 (MWD) + $\text{O}203\text{ mm}$ 钻铤 $\times 3$ 根 + $\text{O}159\text{ mm}$ 钻铤 $\times 3$ 根 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆	20~50	螺杆 螺杆 + 40	4~8	28~32	聚合物钻井液体系
3	稳斜段	$\text{O}215.9\text{ mm}$ PDC 钻头 + $\text{O}159\text{ mm}$ 螺杆 + 座键 + $\text{O}159\text{ mm}$ 钻铤 $\times 18$ 根 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆	40~60	螺杆 + 40	5~8	28~32	聚合物防塌钻井液体系
4	自然降斜段	$\text{O}215.9\text{ mm}$ PDC 钻头 + $\text{O}159\text{ mm}$ 螺杆 + 座键 + $\text{O}159\text{ mm}$ 钻铤 $\times 18$ 根 + $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆	50~80	72	4~6	12~15	清水

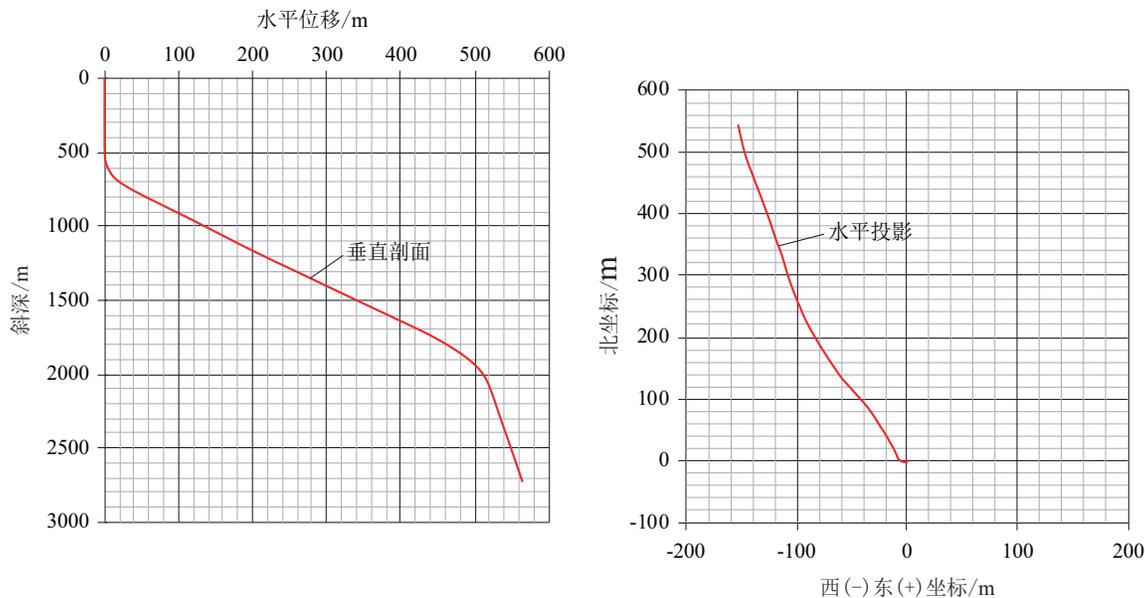


图3 DL-93地热井实钻垂直剖面图和水平投影图

4 结论与建议

定向井井眼轨道控制是一项比较复杂的技术,科学合理的井眼轨迹可以有效地提高定向井施工

效率。地热定向井钻井工艺优化能有效指导施工中打好直井段、控制好定向造斜、稳住井眼轨迹,保障井底位移。

地热定向井工艺优化在天津地区成功应用6井次,从应用效果来看,地热定向井钻井工艺优化技术通过钻具组合优化、钻头优选、以及合适的钻井液体系及控制好钻井液性能,提高了定向井钻井速度和井眼轨迹控制精度。

应用地热定向井钻井优化工艺,缩短了钻井周期,降低了钻井施工成本,值得推广应用。

参考文献:

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
- [2] 张强.定向井钻井工艺技术的优化[J].化学工程与装备,2021(4):137-138.
- [3] 陈俊松,尚亚军,杨建军,等.重庆市秀山县ZK2地热井定向井段钻进工艺[J].钻探工程,2022,49(3):37-43.
- [4] 赵家明,胡家森,刘秋霞,等.定向井泥页岩地层复杂事故处理[J].石油钻采工艺,2016,38(1):23-29.
- [5] 孙建华,刘秀美,王志刚,等.地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):4-9.
- [6] 刘江,石逊,王雷浩,等.煤矿采矿区区域治理水平井施工中托压问题的研究与实践[J].钻探工程,2023,50(3):145-151.
- [7] 李会娟,鲍卫和,马忠平.聚合物防塌钻井液在天津地热定向井的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(6):53-55.
- [8] 杨忠彦,任鸿飞,林圣明,等.基于同井双目的层地热勘探井身结构设计与实践[J].钻探工程,2022,49(6):162-168.
- [9] 吴桐.定向井钻井轨迹设计与控制技术研究[J].西部探矿工程,2020,32(5):64,68.
- [10] 冯彬,赵金成,许清海,等.小尺寸中心管水力内切割工具现场应用研究[J].西部探矿工程,2020,32(5):65-68.
- [11] 蒋凯,仇常凯.定向钻井技术在中浅储层轨迹控制——以王官屯油田为例[J].石化技术,2021,28(1):109-110.
- [12] 陈建兵,张斌.定向钻井技术在咸阳地区地热井施工中的应用[J].地下水,2017,39(3):37-38,89.
- [13] 丁红,宋朝晖,袁鑫伟,等.哈拉哈塘超深定向井钻井技术[J].石油钻探技术,2018,46(4):30-35.
- [14] 赵泽宗,卓然,李荷香,等.高效水基钻井液用润滑剂的研制与现场试验[J].钻采工艺,2019,42(4):93-96,12.
- [15] 叶永盛,高艳芳,谢波,等.容东潜山大漏失深层复杂地热井设计及实践[J].西部探矿工程,2021,33(2):89-92.

(编辑 荐华)