

伊朗 Y 油田水平井钻井技术

张华卫¹, 李梦刚¹, 吴为², 江朝²

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100029)

摘要:伊朗 Y 油田水平井面临着地质岩性多变、地质靶区不确定、裸眼井段长、井眼摩阻大、长水平段井眼轨迹控制困难等一系列钻井技术难点。结合 Y 油田一期水平井钻井实践, 详细总结, 形成了包括井身结构优化、螺杆钻具类型及其稳定器外径优选、钻头选型、侧钻钻具组合优选、水平井段优快钻井、KCl 聚磺钻井液在内的 6 项水平井钻井技术。该技术在 YS9 井得到成功应用, 定向段和水平段施工比设计提前 12.4 d。Y 油田水平井优快钻井技术的应用, 能够提高钻井成功率, 缩短水平井的建井周期, 降低钻井成本, 对 Y 油田后续的水平井施工起到一定的指导和借鉴作用。

关键词: 水平井; 钻井技术; 轨迹控制; 钻具组合; 钻井液; 伊朗 Y 油田

中图分类号: TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)07-0028-05

Horizontal Well Drilling Technology in Y Oilfield of IRAN/ZHANG Hua-wei¹, LI Meng-gang¹, WU Wei², JIANG Zhao² (1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 2. SINOPEC International Petroleum E & P Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: There are a series of drilling technical challenges in Y oilfield horizontal wells of Iran, complex geological lithology, uncertain geological target area, long uncased hole section, big borehole friction and difficult trajectory control of long horizontal well section. Based on the practice in the first phase horizontal well drilling in this oilfield, 6 drilling technologies for horizontal well are summarized and formed: optimization of casing program, screw drill tool types and the optimization of stabilizer outer diameter, bit selection, bottom hole assembly (BHA) for sidetracking, optimized and quick drilling in horizontal well section and KCl polysulfonate drilling fluid. These technologies are fruitfully applied in well YS9, the construction of directional and horizontal sections were completed 12.4 days ahead of schedule with shorter well construction cycle and reduced cost.

Key words: horizontal well; drilling technology; trajectory control; DHA; drilling fluid; Y oilfield of IRAN

1 油田简介

Y 油田位于伊朗西南部、两伊边境地区, 油田面积 675 km², 南北长约 45 km, 东西长约 15 km。油藏构造为一西北—东南向的背斜构造, 开发储层主要是 S 层和 F 层。S 储层属于块状油层, 埋深在 2700~3000 m, 岩性为白垩质灰岩, 储层储集空间以孔、洞为主, 地层压力系数为 1.2 左右, 富含 H₂S 和 CO₂。S 储层全部采用水平井开发, Y 油田一期开发共部署 46 口生产井, 其中 S 储层水平井 26 口, 占整个油田一期开发井数的 56%, 水平井技术的优化和提高对于整个油田的开发起着重要的作用。

2 施工难点分析

2.1 地层岩性多变, 邻井资料少, 定向钻井工具和参数选择存在一定的难度

从造斜点至水平井段依次钻穿白垩系上统

Gurpi、Ilam、Lafan 和 Sarvak 4 套地层, 主要岩层组成为泥岩、灰岩和泥灰岩。地层的自然造斜规律、地层倾角、方位漂移率等无邻井资料可以借鉴, 水平井钻具组合、螺杆钻具、钻井参数和钻头的选择存在一定的挑战, 定向施工难度较大。

2.2 回填导眼后, 侧钻钻具组合选择存在一定难度

牙轮钻头 + 直螺杆 + 弯接头钻具组合有较大的钻头偏移距, 有利于快速地钻出新井眼, 但该钻具组合造斜率不稳定, 不适于长井段钻进, 侧钻成功后需要更换钻具组合, 钻进效率较低; 弯螺杆钻具组合钻头偏移距较小, 但其造斜率比较稳定, 可以延长侧钻井段的长度, 减少斜井段钻进的回次, 提高钻进效率, 同时必须制订详细的施工措施才能确保侧钻成功率。

2.3 地质靶区不确定并且地质要求高, 施工精度要求高

收稿日期: 2014-01-20

作者简介: 张华卫(1979-), 男(汉族), 山东禹城人, 中国石化石油工程技术研究院高级工程师, 油气井工程专业, 硕士, 从事钻井工程设计工作, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 502 室, zhanghw.sripe@sinopec.com。

由于碳酸盐的非均质性,油层的不确定性增加了轨迹控制的难度,特别是现场施工中,油藏要求提高矢量中靶精度、水平段井眼轨迹控制精度,严格控制靶半高 0.5 m、甚至 0.25 m,大大增加了定向施工难度。

2.4 定向段和水平段裸眼较长,井眼内摩阻较大,钻压传递困难

Y 油田水平井三开 $\varnothing 215.9$ mm 井眼包括 600 ~ 900 m 的直井段、700 m 的斜井段和 900 m 的水平井段,累计 2200 ~ 2500 m 的裸眼井段,裸眼井段长造成井眼摩阻、扭矩大,定向滑动钻进托压严重,井眼轨迹控制难度大。在本油田第一口水平井 YS1 井的施工过程中摩阻达到 300 kN、扭矩达到 15000 N·m,水平井段延伸 700 m 后定向滑动钻进工具面调整困难,托压现象严重。

2.5 大井斜段长,携岩困难易形成岩屑床,并造成卡钻等钻井事故

随着定向井井斜角逐渐增大,岩屑在环空内所受到的下滑速度的径向分速度逐渐增大,当达到某

一临界值时,岩屑就会逐渐在环空的底边沉淀并堆积起来而形成岩屑床。Y 油田斜井段及水平井段长达 1600 m,易形成岩屑床,造成井下复杂。

3 Y 油田水平井优快钻井技术

针对水平井定向钻进过程中的技术难点,从井身结构、定向工具、工艺等方面展开研究,提出了相关解决措施,通过近 20 口水平井的实践,逐步形成 Y 油田成熟的水平井优快钻井技术。

3.1 井身结构的优化

井身结构的设计首先应满足油藏开发的需要,同时兼顾所钻遇地层的压力及钻井施工的安全、优质、高效,在此基础上优选斜井段和水平段井眼尺寸为 $\varnothing 215.9$ mm,其具有以下几方面的优点:(1)可以使用大尺寸钻具,利于机械钻速的提高、水力参数的优化;(2)定向工具及测量仪器选择范围广;(3)发生井下复杂易于处理。以自下而上的设计方法、考虑上部地层必封点,确定了 S 储层水平井的 3 级井身结构方案,如表 1 所示。

表 1 Y 油田 S 储层水平井井身结构

| 开钻次序 | 套管类型 | 套管尺寸 × 下深 / (mm × m) | 钻头尺寸 × 钻深 / (mm × m) | 设计说明 |
|------|------|---|---|---|
| 一开 | 表层套管 | $\varnothing 339.7 \times 298$ | $\varnothing 444.5 \times 300$ | 表层套管下至 300 m 左右,提高地层承压能力,为钻进 G 地层做准备;同导管连接,安装井口和防喷器 |
| 二开 | 技术套管 | $\varnothing 244.5 \times (1498 \sim 1798)$ | $\varnothing 311.2 \times (1500 \sim 1800)$ | 下至 A 地层顶部,钻开压力较低的 S 层之前封隔 G 层 |
| 三开 | 尾管 | $\varnothing 177.8 \times 3100 + \varnothing 114.3 \times (2950 \sim 3998)$ | $\varnothing 215.9 \times 4000$ | 目标储层,满足完井和采油需求 |

3.2 螺杆钻具的优选

3.2.1 螺杆钻具的选型原则

Y 油田水平井主要遵循作业安全、输出扭矩最大、排量合理、确保使用寿命、造斜率略高勿低等 5 项原则,同时考虑定向施工工艺的要求,并结合表 2 进行螺杆钻具的选型。

表 2 螺杆钻具选型

| 井眼尺寸 /mm | 选用螺杆钻具型号 | 所处状态下最佳选择的型号 | | |
|---------------------|----------|--------------|---------|--------|
| | | 追求强度 | 追求最大造斜率 | 综合指标最佳 |
| $\varnothing 215.9$ | LZ165 | | ★ | |
| | LZ172 | | | ★ |
| | LZ185 | ★ | | |

注:“★”表示最佳选择。

(1)作业安全原则:在满足井眼环空要求的前提下,尽量选用大规格螺杆钻具,以增加其强度,确保安全性。如 $\varnothing 311.2$ mm 井眼可供选择的螺杆钻具有 LZ197、LZ203、LZ210、LZ244 等,其中最优选为 LZ244 螺杆。

(2)输出扭矩最大原则:在同一井眼其他条件

不变的情况下,优选输出扭矩较大的钻具,以确保提供足够的钻进扭矩。

(3)排量合理原则:每种螺杆钻具都有一个额定的工作排量范围,应根据实际需要的钻井液排量来优选螺杆钻具,使其发挥最佳状态;如果排量超过推荐范围,应采用中空马达分流。

(4)确保使用寿命的原则:即钻具在使用过程中,优选钻井参数、水力参数,确保工具始终处于最佳工作状态中,而不能超负荷运转,避免过早失效。

(5)造斜率略高勿低的原则:为了保证实钻造斜率不低于设计造斜率、防止因各种因素造成工具实钻造斜率低于其理论值,同时考虑实钻造斜率若高于设计造斜率可以通过复合钻进的方式降低造斜率、若低于设计造斜率则只有通过更换钻具组合进行调整等因素,因此应选择理论造斜率比设计造斜率高 10% ~ 20% 的螺杆钻具。

根据 Y 油田 S 储层水平井设计条件:(1) $\varnothing 215.9$ mm 井眼;(2)密度为 1.2 ~ 1.3 g/cm³ KCl 聚

磺钻井液体系;(3)最大全角变化率控制在 $4.5^\circ/30$ m以内;(4)井底垂深3000 m左右;(5)井底温度 $< 100^\circ\text{C}$;(6)排量 $25 \sim 32 \text{ L/s}$ 。优选了5LZ172、7LZ172(1.25° 、 1.5°)单弯螺杆钻具。

3.2.2 螺杆钻具稳定器外径选择

在S储层水平井施工过程中普遍存在井眼摩阻大的问题,特别是滑动钻进过程中突出表现为工具面调整困难、钻具不能一次性放到井底、机械钻速低等,除加强划眼措施外,对螺杆钻具的稳定器外径对井眼摩阻的影响进行了分析、研究(如图1所示)。

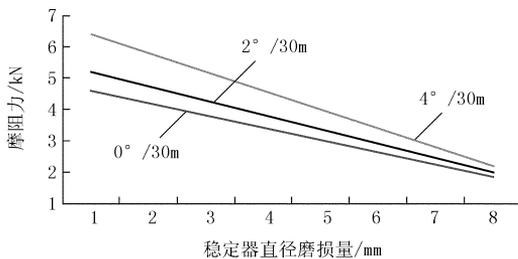


图1 稳定器直径磨损对摩阻力的影响

由图1可得,当单弯钻具组合的稳定器直径减小之后,摩阻力会降低。根据此理论研究成果,结合S储层水平井钻井情况,对螺杆钻具扶正器尺寸进行了优化,并取得了显著的减阻效果,基本解决了大斜度井段及水平井段严重托压问题。

(1)侧钻井段,选择带 $\varnothing 208$ mm扶正器的单弯螺杆钻具。

(2)增斜井段,选择带 $\varnothing 208$ 或 210 mm扶正器的单弯螺杆钻具。

(3)水平井段,选择带 $\varnothing 208$ 或 206 mm扶正器的单弯螺杆钻具。

3.2.3 钻进参数

根据螺杆钻具推荐使用的钻进参数,结合钻井需要,5LZ172、7LZ172螺杆钻具推荐使用的钻进参数如下。

(1)排量: $27 \sim 31 \text{ L/s}$,是推荐排量的80%左右。

(2)钻压:复合钻进 $20 \sim 80 \text{ kN}$;定向钻进 $60 \sim 160 \text{ kN}$,由于井眼摩阻的存在,使用钻压略大于推荐钻压。

(3)顶驱转速: 40 r/min 。

3.3 钻头选型

Y油田水平井首选寿命长、机械钻速快、与螺杆钻具适配性好的PDC钻头^[2],并根据钻遇地层的岩石学及岩石力学特性,与钻头生产厂家进行技术合作和交流,对PDC钻头冠部形状、刀翼数量、保径齿

分布及直径、水力流场等进行了优化设计,现场使用中实现了快速钻井的目的。

3.3.1 斜井段PDC钻头设计要考虑其导向性和稳定性

(1)冠部浅内锥,保证钻头的导向性;(2)加强保径以适应长时间、长井段定向钻进;(3)鼻部外侧到肩部装配13 mm后排齿,加强侧向切削能力;(4)内锥部位装配减震节,以获得均匀的扭矩,保障稳定的工具面;(5)优选6刀翼16 mm切削齿;(6)6个可调式喷嘴。

3.3.2 水平段钻头设计要考虑其导向性的同时考虑钻进稳定性,降低钻头侧向漂移

(1)冠部标准内锥,保证钻头的稳定性;(2)加长保径,以加强水平钻进条件下的钻头稳定性;(3)其它与斜井段PDC钻头相同。

3.4 侧钻钻具组合的优选

3.4.1 理论分析

求解底部钻具组合的权余法是通过使用加权余量法求解控制微分方程来确定钻柱的变形,通用控制方程及求解综合几何方程、受力平衡方程以及本构方程可得钻柱的变形控制方程:

$$EIu^{(4)} - M_T(z') - (Tu')' - h_x = G_1 \quad (1)$$

式中: EI ——钻铤的抗弯刚度, $\text{N}\cdot\text{m}$; u ——钻铤的变形量, m ; M_T ——钻铤的扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; T ——轴向力, N ; h_x ——钻铤线重力分量, N/m ; G_1 ——非线性项。

设井斜平面方向的位移为:

$$u_j(s) = \sum_{i=1}^5 Cx_{ij}s^{-j} \quad (j=1,2,\dots,n+1) \quad (2)$$

式中: Cx_{ij} ——待定系数; n ——稳定器的个数(包括上切点); i ——待定系数的个数; j ——待求系数所在的跨数。

分别对式(2)求1~4次导数,可得:

$$\begin{aligned} u_j'(s) &= 4Cx_{1j}s^3 + 3Cx_{2j}s^2 + 2Cx_{3j}s + Cx_{4j} \\ u_j''(s) &= 12Cx_{1j}s^2 + 6Cx_{2j}s + 2Cx_{3j} \\ u_j'''(s) &= 24Cx_{1j}s + 6Cx_{2j} \\ u_j^{(4)}(s) &= 24Cx_{1j} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),可得一残值方程,联合以下4个边界条件可求得钻柱变形:

$$\begin{cases} u_{1j} = x_j + e_j \\ u_{0j} = x_{j-1} + e_{j-1} \\ u_{1j}' = u_{0(j+1)}' \\ u_{1j}'' = u_{0(j+1)}'' \end{cases} \quad (4)$$

根据上述模型即可计算出底部钻具组合与井壁之间的接触力,假定摩擦系数为0.3,利用摩擦定律可以计算出单弯螺杆钻具组合和弯接头+直螺杆钻具组合在井底产生的摩擦力(如图2所示);同时,对单弯螺杆钻具组合和弯接头+直螺杆钻具组合2类侧钻钻具组合造斜力进行分析(如图3所示)。

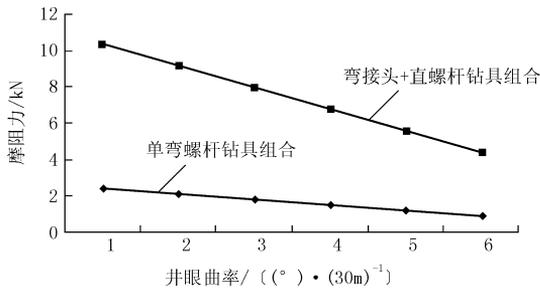


图2 2种钻具组合摩擦力的对比

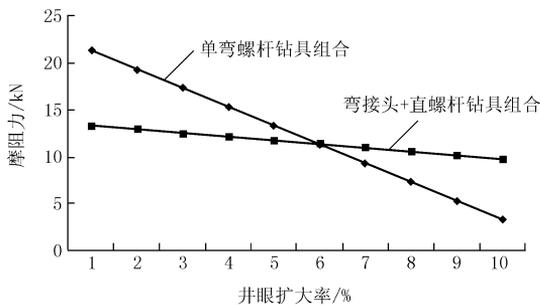


图3 2种钻具组合造斜力的对比

图2的计算结果显示随着井眼曲率的增加,2类侧钻钻具组合的钻具与井眼的摩擦力在减小,但是单弯螺杆的钻具组合摩擦力更小。

图3的计算结果显示在井眼扩大率较小的情况下,单弯螺杆钻具组合的造斜力要比弯接头+直螺杆钻具的造斜力更大一些;在井眼扩大率较大的情况下,弯接头+直螺杆钻具组合将发挥出较好的导向效果,S储层水平井侧钻点选择在GU地层,泥灰岩稳定,不易扩径,S05井侧钻井段平均井径扩大率为0.47%、S06井侧钻井段平均井径扩大率为3.11%。

3.4.2 侧钻钻具组合的优选

理论分析认为单弯螺杆钻具组合更有利于侧钻,且井眼摩阻较小。但Y油田S储层水平井侧钻钻具组合的选择仍经历了几口井的探索、试验,最终优选出PDC钻头+弯螺杆钻具的侧钻钻具组合。

(1)YS1井采用的是牙轮钻头+1.5°弯螺杆钻具组合,侧钻一次成功。

(2)YS2井、YS3井采用的也是牙轮钻头+弯螺杆钻具组合,但侧钻未成功;下入牙轮钻头+直螺杆

+2.5°弯接头钻具组合侧钻成功。

(3)YS4井采用PDC钻头+1.5°弯螺杆钻具组合,侧钻一次成功。该钻具组合取得成功后期在井中得到广泛应用,成功率达到100%,目前已成为一项成熟的技术。

同时,尝试在设计造斜点以上50m左右选择地层可钻性较好的井段,进行预侧钻,采取控时钻进和控压钻进相结合的方式确保侧钻成功率,侧钻成功后直接进行定向增斜施工,大大提高了施工效率,节省了时间。

3.5 水平井段优快钻进技术

水平井段使用 $\varnothing 215.9$ mm PDC钻头+ $\varnothing 172$ mm螺杆钻具(1.25° $\varnothing 206/208$ mm稳定器)+ $\varnothing 172$ mm浮阀+ $\varnothing 172$ mmLWD+ $\varnothing 172$ mm无磁悬挂短节(MWD)+ $\varnothing 127$ mm无磁承压钻杆+ $\varnothing 127$ mm加重钻杆+ $\varnothing 127$ mm钻杆钻具组合,通过加强对钻压和钻时的控制,以复合钻进方式达到精确控制井眼轨迹的目的。

(1)钻压控制在20kN左右,钻进时速5~6m,基本可以实现稳斜钻进,钻压越大,钻时越快,钻具组合越易达到增斜效果;

(2)钻压控制在10kN,钻进时速控制在3m以下,钻具组合可以实现降斜的效果。

该技术在S储层水平井水平段钻井中得到广泛应用,已成为Y油田水平井段井眼轨迹控制的特色技术。

3.6 钻井液技术

3.6.1 钻井液配方及性能

S储层三开井段钻遇地层主要为灰岩地层,地层相对较为稳定,钻井液主要的问题在于解决长水平段的携岩问题,防止形成岩屑床造成卡钻,该井段优选KCl聚磺钻井液体系。

KCl聚磺钻井液配方:2%粘土粉+0.2%纯碱+0.5%烧碱+0.3%PAC-HV+0.5%PAC-LV+2%磺化酚醛树脂+1%磺化褐煤树脂+5%KCl+2%聚合醇+4%RH-220+3%超细碳酸钙+2%沥青粉+2%非渗透处理剂+0.2%碱式碳酸锌+碳酸钙(加重剂)。

KCl聚磺钻井液性能:漏斗粘度50s,密度1.26g/cm³,失水量3.2mL/30min,pH值10,塑性粘度18mPa·s,动切力8Pa,静切力(10s/10min)4Pa/8Pa,润滑系数0.0437,含砂量0.2%。

3.6.2 KCl聚磺钻井液维护措施

(1)利用 PAC-HV 调整钻井液流变性能,控制粘度 40~50 s,动塑比(0.4~0.5) Pa/mPa·s,提高钻井液的悬浮和携带岩屑能力。

(2)水平段保证钻井液中润滑剂含量 $\leq 4\%$,聚合醇 $\leq 2\%$,提高泥饼的润滑性能,润滑系数 ≥ 0.05 。

(3)补充 KCl 加量,提高钻井液的抑制性能,抑制水平段钻遇的泥质灰岩的吸水膨胀造成储层伤害。

(4)根据进尺情况,补充不同粒径的封堵材料,不同粒径的碳酸钙、石墨粉和沥青粉,提高钻井液的封堵能力,减少钻井液滤液向地层深部的侵害。

(5)每钻进 100~200 m 泵入 5 m³左右稀浆,然后再跟入 8~10 m³清扫液清洁井筒,通过前面稀浆扰动,破坏岩屑床,随后通过稠浆提升托举作用携带岩屑,从而提高井眼的清洁度,坚持短起下钻破坏岩

屑床。

(6)根据井口返出岩屑情况,确定短起下钻的井段长度,随着井深增加缩短短起下钻的长度;每次短起下钻必须采用倒划眼,以有效破坏岩屑床,确保岩屑全部返至地面。

4 应用实例

通过上述 6 项钻井技术的推广应用,Y 油田 S 储层水平井创造了多项油田纪录:(1)钻井周期最短 47.72 d;(2)建井周期最短 64 d;(3)斜井段+水平段平均机械钻速最高 5.50 m/h;(4)井眼轨迹控制良好,中靶率 100%;(5)水平井段复合钻井比例最高 100%。表 3 给出了几口水平井钻井数据统计。

表 3 S 储层水平井钻井数据统计

| 井号 | 钻井周期 /d | 建井周期 /d | 井深 /m | 段长/m | | 复合钻进比例/% | | 斜井段+水平段 | |
|-----|------------|------------|----------|--------|--------|----------|--------|-------------------------|--------|
| | | | | 斜井段 | 水平段 | 斜井段 | 水平段 | 钻速/(m·h ⁻¹) | 钻进周期/d |
| YS5 | 57.19 | 73.17 | 4015.00 | 703.00 | 900.00 | 61.37 | 99.19 | 3.62 | 28.42 |
| YS6 | 53.43 | 72.33 | 4085.00 | 692.00 | 900.00 | 68.04 | 95.38 | 4.31 | 26.60 |
| YS7 | 54.76 | 70.50 | 4099.00 | 741.45 | 900.55 | 57.66 | 100.00 | 4.15 | 26.54 |
| YS8 | 56.36 | 73.00 | 4032.00 | 732.22 | 899.78 | 47.98 | 100.00 | 4.47 | 26.36 |
| YS9 | 47.72 | 64.00 | 4113.00 | 761.64 | 899.60 | 60.13 | 99.40 | 5.50 | 20.39 |

5 结论

(1)三级井身结构、 $\varnothing 215.9$ mm 井眼为定向钻井提高机械钻速提供了保障。

(2)螺杆钻具类型及稳定器外径的优选、PDC 钻头的优选,降低了井眼摩阻、提高了钻压传递效率及机械钻速。

(3)“PDC 钻头+弯螺杆钻具”侧钻钻具组合、结合详细的施工措施确保了侧钻成功率、提高了钻井效率。

(4)水平井段通过控制钻压、钻时,以复合钻进方式达到了精确控制井眼轨迹的目的。

(5)KCl 聚磺钻井液体系很好地解决了长水平段的携岩问题,确保了井眼清洁。

参考文献:

- [1] 李克向. 钻井手册[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [2] 张辉,张振华. 海拉尔油田水平井钻井技术及应用效果[J]. 石油地质与工程,2011,25(6):107-111.
- [3] 陈启文,董瑜,王飞,等. 苏里格气田水平井开发技术优化[J]. 天然气工业,2012,32(6):99-42.
- [4] 杨晓峰. 伊朗 Azadegan 油田 AZNN_004 水平井钻井技术难点及对策[J]. 特种油气藏,2012,19(1):127-130.
- [5] 黄兵,吴宗国,杨伟,等. 天东 012-H1 井长水平段安全快速钻井技术[J]. 钻采工艺,2010,33(6):132-133.
- [6] 李志亮,贺文媛,李会兰,等. 桩西地区东营组以下水平井钻井液技术[J]. 钻井液与完井液,2011,28(3):79-81.
- [7] 石李保,耿东士,于文华,等. 柴达木盆地台南气田优快钻井技术[J]. 石油钻采工艺,2010,32(3):103-106.
- [8] 张晓文,任富鹏. 大牛地气田水平井优快钻井技术探索[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9):23-25.
- [9] 徐云龙. 胜利油田第一口绕锥水平井钻井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):22-24.
- [10] 官华,李国华,邓胜聪,等. 大庆油田火山岩砾岩水平井钻井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(8):19-22.