

顺北56X特深水平井定向钻井关键技术

李瑞刚¹, 张洪宁^{2,3}, 刘湘华⁴, 张建龙^{2,3}, 白彬珍^{2,3}

(1. 中石化华北石油工程公司, 河南 郑州 450007; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206;
3. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 4. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 顺北56X井是顺北V号条带的一口重点预探井, 该井完钻井深9300 m(垂深8087.94 m), 井底静止温度最高达178°C。储层钻遇断裂带, 地层破碎。特深、高温等复杂地质条件给该井定向钻井带来了一系列挑战: 摩阻扭矩大、工具面调控难、轨迹控制难、井底温度高、仪器故障率高、破碎带地层定向钻井风险高等。针对上述问题, 通过开展井身剖面优化、高温随钻测量仪器优选及工艺配套、定向钻头优选、工具面快速调控工艺研究、降摩减阻工艺配套、地震数据随钻修正指导钻井技术应用和极限延伸能力安全评价, 初步形成了特深水平井定向钻井技术体系, 实现了亚洲陆上首口井深超9000 m特深水平井安全成井, 为顺北油气田特深油气藏勘探开发提供了技术支撑。

关键词: 特深水平井; 定向钻井; 轨迹控制; 极限延伸; 顺北油气田; 顺北56X井

中图分类号: TE243 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)02-0057-07

Key technology for extra-deep horizontal directional drilling of Well Shunbei 56X

LI Ruigang¹, ZHANG Hongning^{2,3}, LIU Xianghua⁴, ZHANG Jianlong^{2,3}, BAI Binzhen^{2,3}

(1. Sinopec North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450007, China;
2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China;
3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China;
4. Northwest Field Subsidiary Company of SinoPec Corporation, Urumqi Xinjiang 830001, China)

Abstract: The Well Shunbei 56X is a key pre-exploration well in the Shunbei V belt area. This well is completed in total depth of 9300m and vertical depth of 8087.94m. The static temperature at the bottom of the well is up to 178°C. Because there is fault zone in the reservoir stratum with complex geological condition such as broken strata, ultra-high depth and high temperature, challenges exists when drilled such as high friction and torque, difficult trajectory control, high failure rate of MWD, high bottom temperature, high rate of instrument broken and so on. In view of such technical problems, directional drilling technology system in ultra-deep well is built through optimizing the borehole trajectory, high temperature measuring instrument while drilling, drilling craft process, directional bit, fast control of tool face, drilling with the guidance of seismic data, and safety evaluation of ultimate extension capacity. The Well Shunbei 56X is the first horizontal well with the total depth exceeding 9000m in onshore Asia. The technology applied in Shunbei 56X well can provide technical support for exploration and development in Shunbei Oil & Gas Field.

Key words: extra-deep horizontal well; directional drilling; trajectory control; ultimate extension; Shunbei Oil & Gas Field; Well Shunbei 56X

0 引言

顺北56X井部署的顺北V号条带是中国石化西

北油田分公司主要油气上产区域之一^[1-3]。顺北V号条带属于断溶体油气藏, 以定向井、水平井的方

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-10-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.008

第一作者: 李瑞刚, 男, 汉族, 1976年生, 高级工程师, 从事钻井工程相关科研及技术管理工作, 河南省郑州市华北西部钻井公司, Lirg.sripe@sinopec.com

引用格式: 李瑞刚, 张洪宁, 刘湘华, 等. 顺北56X特深水平井定向钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 57-63.

LI Ruigang, ZHANG Hongning, LIU Xianghua, et al. Key technology for extra-deep horizontal directional drilling of Well Shunbei 56X[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 57-63.

式开发为主^[1-4]。储层埋深约8000 m、井底温度最高达178℃、储层地质情况复杂,易钻遇断裂带,地层破碎。超深、高温、复杂地质条件等给该井定向钻井带来了一系列技术挑战^[5-8];工具面调控难度大、轨迹控制难度高;井底温度高、仪器可靠性差;特深水平井极限延伸能力不明确;定向加深钻进风险高等。该区块前期施工过程中,剖面设计以单增剖面为主,调整空间小;仪器固有抗温性能不足的情况下,高温随钻测量配套工艺措施针对性不强,仪器故障率高;工具面摆放多依靠技术经验,单次摆放时间平均在2 h以上等。针对顺北56X井的工程地质特征,结合邻井施工经验,通过优化井身剖面、优选仪器,钻头和螺杆、配套高温随钻测量工艺、应用于地震数据

随钻校正的轨迹控制技术、预测评价特深水平井极限延伸能力等,形成了顺北56X特深水平井的定向钻井技术方案,有效保障了顺北56X井安全钻至9300 m,是亚洲陆上首口井深超9000 m的超深水平井。该井的顺利完钻,表明了我国具备了垂深大于8000 m,井深大于9000 m水平井定向钻井技术能力,为超深油气资源的高效勘探开发提供了技术支撑。

1 钻井设计概况

顺北56X井储层定向段钻遇地层为一间房组和鹰山组,地层岩性为浅灰色、黄灰色泥晶灰岩。该井采用五开制井身结构,如表1所示。

表1 顺北56X井设计井身结构

Table 1 Designed well structure of Well Shunbei 56X

开次	钻头尺寸/mm	钻深/m	套管外径/mm	套管下深/m	水泥返高/m	目的
导管	914.4	30	720	30	地面	建立一开井口
1	660.4	600	508	599	地面	封隔第四系疏松地层
2	444.5	4582	365.13	4580	地面	封隔二叠系以上地层
3	333.38	6562	273.1	6560	地面	封隔志留系及以上地层
4	241.3	7707	193.7	7705	地面	封隔目的层之上地层
5	149.2	8861.23				

该井设计剖面为“直—增—稳”三段制单增剖面,设计造斜点为7790 m,设计造斜段造斜率为7.92°/30 m,设计造斜段长300.45 m,设计稳斜段长

738.86 m,设计稳斜角78°,设计稳斜方位角90°,具体参数如表2所示。

表2 顺北56X井设计井身剖面

Table 2 Designed well profile of Well Shunbei 56X

斜深/m	井斜角/°	方位角/°	垂深/m	南北/m	东西/m	水平位移/m	井眼曲率/[°·30m ⁻¹]	备注
7756.00	1.51	234.91	7754.07	-17.54	-43.11	-43.13	0.00	
7790.00	1.51	234.91	7788.06	-18.05	-43.84	-43.86	0.00	造斜点
8090.45	78.00	85.78	8005.30	-7.83	127.77	127.76	7.92	
8336.21	78.00	90.00	8045.00	1.02	369.99	369.99	0	A靶点
8829.31	78.00	90.00	8090.00	1.02	860.99	860.99	0	B靶点

2 技术难点

顺北56X井实钻完钻井深9300 m,垂深8087.94 m,水平位移1348.1 m,水平位移较同条带邻井长约500~800 m,面临的技术挑战较邻井更严峻,主要体现在以下4个方面。

(1)井眼轨道多设计为单增剖面,不利于定向提

速以及螺杆选型。当前井眼轨道设计多为单一圆弧,造斜段长,无调整段,滑动进尺长,定向效率低;再者部分井设计造斜率在15°/30 m以上,需要使用大弯角螺杆钻具(>1.75°)进行定向造斜,大弯角螺杆钻具(>1.75°)无法进行复合钻进,若实钻造斜率与设计相差较大,则需起钻更换螺杆钻具。顺北超

深井起下钻平均耗时在50 h以上,影响钻井效率。

(2)井底温度高,仪器可靠性差。顺北56X井井底测井静温达178℃,循环温度达167℃,已接近前期常用的耐温175℃高温MWD仪器的使用极限。顺北V号条带的SHB5XE、SHB5XG等井由于达到175℃高温仪器耐温极限,最后盲打完钻;而且小尺寸井眼水力参数受限,排量<12 L/s,由于井超深、排量低,信号脉冲幅值低,造成解码误码率高。

(3)摩阻扭矩大、滑动钻进时工具面快速稳定调控难,轨迹控制难。邻井SHB5XXH钻进至8500 m后扭矩骤增至24 kN·m,转盘憋停,上提钻具摩阻达300 kN,下放摩阻达280 kN,无法进行工具面调控;顺北V号条带平均工具面调控时间超2 h,不仅严重影响钻井时效,对造斜效果影响也较大。

(4)特深储层需要加深钻进,但极限延伸能力预测难,加剧了定向钻井风险。

3 关键技术

3.1 井身剖面优化

针对常规单增剖面设计存在的问题,应用“基于钻井提速的井眼轨道设计方法”对剖面进行了优化设计^[9]。该方法以最短钻井时间为目标函数,利于定向钻井提速。优化后剖面类型为双增剖面(表3),设置有两段增斜段,一段稳斜段,其中第一增斜段的设计造斜率为9.5°/30 m(与1.75°螺杆滑动造斜能力相匹配),第二增斜段造斜率为2.35°/30 m(与1.75°螺杆钻具复合增斜趋势相匹配)。优化后的剖面不仅充分发挥螺杆造斜效果,还大幅减少了增斜段长度,提高了复合比例。并且该剖面可满足完井管柱的下入要求。对该剖面的提速效果进行了评价分析^[9],结果表明:优化后剖面理论上复合钻进比例较优化前可提高15.7%,可节省钻进时间约56 h。

表3 顺北56X井优化后井眼轨道

Table 3 Optimized hole trajectory of Well Shunbei 56X

井深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北位移/m	东西位移/m	水平位移/m	狗腿度/[(°)·(30m) ⁻¹]
7756	1.51	234.91	7754.07	-17.54	-43.11	-43.16	0
7777	1.51	234.91	7775.06	-17.85	-43.56	-43.61	0
7787	1.8	85.38	7785.06	-17.92	-43.51	-43.56	9.5
7962.86	57.49	85.38	7931.96	-11.19	39.82	39.79	9.5
8315.47	84.76	90	8045	1.02	369.99	370	2.35
8808.53	84.76	90	90	8090	1.02	860.99	0

3.2 仪器优选及配套工艺

针对高温随钻测量配套工艺措施针对性不强,仪器故障率高的问题^[10-12],从仪器类型分段优选、应用技术措施优化和循环降温工艺配套等方面入手,优化完善了高温随钻测量配套工艺,提高了仪器测量可靠性、降低了仪器故障率。

3.2.1 高温随钻测量仪器优选

顺北56X井针对不同井段的井筒温度情况,优选匹配了不同的仪器类型,如表4所示。在造斜段优选了APS175改进型MWD仪器,在微增井段优选了3D-I185型MWD仪器,在水平段优选了TEL185型MWD仪器。

3.2.2 提高随钻测量仪器可靠性配套工艺

针对顺北56X井超深、排量低导致的误码率高的问题,从优化间隙配比、改善解码工艺等方面提出了配套技术措施:

表4 不同井段优选仪器型号统计

Table 4 Statistical table of optimized instrument model in different hole section

井段/m	井底静温/℃	循环温度/℃	仪器类型
7756~7958	166	152	APS175改进型
7958~8986	172	160	3D-I185
8986~9300	178	167	TEL185

(1)对APS175改进型旋转阀式脉冲器,推荐间隙尺寸0.033~0.036 mm;对3D-I185型和TEL185型下座键类脉冲器,蘑菇头和限流环推荐采用1.167配1.25;

(2)取消中间测量序列同步头,采用开停泵、开顶区的方式获取初始同步头,减少等待时间,提高时效。应用上述技术措施,顺北56X井解码误码率<3%。

3.2.3 地面及井下辅助循环降温配套工艺

为改善仪器应用的井筒温度环境,提出了地面和井下辅助循环降温两类技术措施^[13-14]:

(1)地面循环降温辅助配套措施:引入利用热管换热及蒸发散热的地面循环降温装置,如图1所示。钻井液循环量为10.8 L/s,入井温度降温前43℃,降温后为21~23℃;出口温度(高架槽)降温前50℃,降温后为38~40℃。对比使用该系统后的MWD仪器实测数据,井下循环温度大约降低2~4℃。

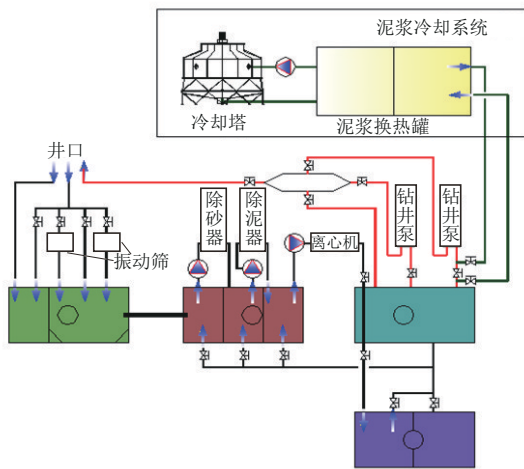


图1 地面循环降温装置示意

Fig.3 Ground circulation cooling device

(2)井下循环降温配套工艺:出套管循环降温时排量较钻进排量提1~2 L/s, $\Phi 149.2$ mm 井眼循环排量不低于12 L/s, $\Phi 120.65$ mm 井眼循环降温排量不低于8 L/s。循环时间在60 min以上;分段循环降温时,下钻150~200 m或静止时间超60 min,分段循环降温30~60 min。

3.3 井眼轨迹控制技术

针对顺北56X井摩阻扭矩大、工具面调控难、定向效率低等问题,通过优选钻头、螺杆,优配钻具组合,配套降摩减阻工艺措施和工具面调控工艺,借助地震数据随钻修正指导钻井技术,实现了该井的轨迹高效控制。

3.3.1 定向钻头优选

对顺北56X井储层地层岩石特性进行了分析^[15],一间房组和和鹰山组的碳酸盐岩可钻性在7~9之间,内聚力为18~32 MPa,内摩擦角为40~50°,抗压强度为70~110 MPa,平均值85.6 MPa。

针对顺北56X井岩石力学参数^[7],推荐5或6刀翼、13 mm切削齿、中高密级布齿、长锥形/短抛物线形PDC钻头。基于此,结合顺北V号条带定向段钻头应用情况,采用多因子综合评价方法^[16],给出了顺北56X井的钻头推荐方案:造斜段推荐KM1342ADR(混合钻头)和MD1365D(PDC钻头);微增井段、水平段推荐KM1352ADR和KM1362ADR(PDC钻头)。

3.3.2 降摩减阻技术措施

3.3.2.1 钻井液性能优化

应用油基钻井液体系,提高润滑性,防止井壁失稳。钻进期间,保持循环钻井液合理的油水比,以提高循环钻井液的乳化稳定性,保持体系破乳电压 ≥ 500 V;通过基油乳液实时补充降滤失剂、封堵剂等处理剂来维护循环钻井液体系的滤失量和乳液稳定性。同时地面及时开启离心机,降低劣质固相含量。

3.3.2.2 工艺措施优化

应用无稳定器的简化钻具组合,减少钻具与井壁的接触面积。钻进过程中根据上提、下放、滑动、复合钻进时的大钩载荷反推摩阻系数,实时监测摩阻扭矩的变化特征。利用实钻数据,计算分析造斜段、水平段钻具组合的受力及屈曲状态^[17],随钻调整钻进参数,避免发生螺旋屈曲。增斜段钻进1根要划眼2~3次,钻进过程中若钻压、泵压、工具面均稳定不变,需及时活动钻具;水平段钻进时,钻进200 m后需进行短起下,保证井眼通畅。

3.3.3 地震数据随钻修正指导钻井技术

该技术是指利用已钻井段的钻、测、录等多源井筒数据协同重构与三维扩散方程修正已钻井段三维地震速度,通过建立待钻地层的参数最优随钻层析快速修正方法,结合地震反演与偏移等技术,实现了地震速度与成像体快速修正^[18],实现地层产状、断裂破碎带、特殊复杂岩性及流体以及地层压力体系和岩石力学参数随钻前探预测。该技术在顺北56X井开展现场应用,预测裂缝带4次,分别为8180~8240 m(曲率断裂属性剖面反应明显)、8290~8350、8720~8760、8790~8822 m(多种断裂属性呈现异常)。通过提前优化井身剖面,避免了复杂地层地层滑动定向;提前采取防卡技术措施,如采取“划一退二”的方式修正井壁,降低了卡钻风险;提前调整钻井液性能,提高封堵性,适当提高钻井液密度,在一定程度上降低了破碎带钻进风险。

3.3.4 工具面快速稳定调控工艺

基于钻柱扭矩传递规律^[19],给出了工具面调控流程:首先利用钻头反扭角计算方法,初步给出钻头反扭角,通过旋转钻柱调整到预设工具面位置,此后上下活动钻具,将钻柱集聚的扭矩释放,保证钻柱处于自由状态;此时进行缓慢施加钻压,同时在井口正向旋转钻柱90~180°,为钻柱提供扭转能量,以便后续调整钻压值;继续观察工具面变化趋势,结合钻柱扭矩传递规律,微调井口钻柱扭转角度,同时调整钻压值,实现最佳钻压下的工具面稳定控制。该方法在顺北56X井应用,单次工具面调控时间<40 min,较邻井缩短30%。

3.3.5 钻具组合与轨迹控制技术方案

针对优化后剖面设计参数,结合顺北V号条带前期螺杆钻具应用情况,造斜段优选5LZ120×5.0~1.5°~1.75°单弯螺杆,稳斜段及水平段优选5LZ120×5.0~1.25°~1.5°单弯螺杆。各井段推荐的轨迹控制技术方案为:

3.3.5.1 增斜段(井斜<30°井段)

钻具组合:混合钻头(KM1342ADR)+1.75°螺杆+Ø120 mm无磁钻铤+Ø88.9 mm加重钻杆3根+Ø88.9 mm钻杆6~12根+Ø88.9 mm加重钻杆42根+Ø88.9 mm钻杆+Ø114.3 mm钻杆(底部配置一柱加重钻杆,提高工具面稳定性);

钻进参数:钻压20~40 kN;转速20~30 r/min;排量11~13 L/s;

技术措施:小井斜井眼内工具面稳定性差,初始造斜注意采用小钻压钻进,待钻进3~5 m后(螺杆弯角进入到新地层)再逐渐调整提高钻压,保证工具面稳定性,提高定向效率。

3.3.5.2 增斜段(井斜>30°井段)

钻具组合:PDC钻头(KM1362ADR)+1.5°螺杆+Ø120 mm无磁钻铤+Ø88.9 mm钻杆12~24根+Ø88.9 mm加重钻杆42根+Ø88.9 mm钻杆+Ø114.3 mm钻杆;

钻进参数:钻压20~40 kN;转速20~30 r/min;排量11~13 L/s;

技术措施:设定顶驱最大扭矩为正常钻进时扭矩多附加3 kN·m,防止扭矩过大出现钻具事故,根据实际情况替换钻具,保证钻具使用安全。

3.3.5.3 微增井段及水平段

钻具组合:PDC钻头(KM1352ADR/ KM1362

ADR)+1.25°/1.5°螺杆+Ø120 mm无磁钻铤+Ø88.9 mm钻杆24~60根+Ø88.9 mm加重钻杆42根+Ø88.9 mm钻杆+Ø114.3 mm钻杆;

钻进参数:钻压20~40 kN;转速20~30 r/min;排量11~13 L/s;

技术措施:根据复合增斜趋势随钻调整钻进参数,主要是钻压,尽量提高稳斜段复合比例,减少滑动定向次数。

3.4 极限延伸能力预测评价

针对顺北56X井的工程地质特征,综合考虑仪器抗温、机泵条件、钻柱强度、摩阻扭矩等多因素约束条件,建立了顺北超深井极限延伸预测模型^[20]。从水力和机械极限延伸能力两方面考虑,预测了顺北56X井极限加深长度,如表5所示。顺北56X井预测稳斜段极限延伸能力为1158 m,实钻过程中两次加深钻进,稳斜段长度达982.4 m,有效指导该井的钻井施工。

表5 极限延伸能力预测与实钻对比

Table 5 Comparison of predicted ultimate extension capacity with the actual value

计算 摩阻/ kN	实测 摩阻/ kN	机械极 限延 伸/m	计算压 耗/MPa (12 L/s)	实测压 耗/MPa (12 L/s)	水力极 限延 伸/m	稳斜段 实钻长 度/m
172	160	1485	34.5	33	1158	982.4

4 应用效果

(1)通过应用“双增剖面”优化设计,顺北56X井的全井复合比例84.11%,其中稳斜段复合比例96.91%(982.4 m段,滑动3次,滑动定向进尺30.3 m),其中稳斜段单趟钻进尺最高353.6 m,创区域定向段单趟进尺最长纪录。

(2)通过仪器优选和工艺配套,在最高井底静止温度178°C的条件下,顺北56X井全井仅发生仪器故障(共12趟钻带仪器钻进),仪器故障率8.33%,远低于工区25%的平均值。

(3)通过应用轨迹控制技术,顺北56X井不仅实现了定向提速,而且在井深9300 m处实现准确中靶(横距9.55 m,纵距3.48 m,靶心距10.16 m),实现了轨迹高效准确控制。

(4)极限延伸能力预测方法给出了井眼极限延伸能力,指导了加深钻进,保障了钻井安全。

5 结论及建议

(1) 顺北 56X 井的安全成井, 表明了我国具备了井深 >9000 m 水平井的超深水平井定向钻井技术能力;

(2) 针对顺北 56X 井存在的剖面设计待优化、仪器故障率高、轨迹控制难、极限延伸预测不准等技术问题, 研究应用了井身剖面优化设计技术、高温随钻测量配套工艺、轨迹高效控制技术和极限延伸能力预测方法等, 确保了该井安全高效成井, 初步形成了特深水平井定向钻井技术系列;

(3) 目前超深、特深水平井定向钻井仍需开展技术攻关, 首先是现有井身结构及地面设备限制条件下, 井底水力能量不足, 对仪器循环降温能力、螺杆效能发挥、清岩携砂均有显著影响, 有必要开展井身结构优化, 对设备、工具、仪器进行配套升级, 以进一步提升棘手水平。再者超深破碎地层的地质环境因素描述需进一步细化, 以进一步降低复杂地层的定向钻井风险。

参考文献 (References):

- [1] 张建龙, 温伟, 刘卫东, 等. 顺北 1-4H 井超深小井眼中短半径水平井 钻井难点及技术对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 17-22.
ZHANG Jianlong, WEN Wei, LIU Weidong, et al. Drilling difficulties and technical countermeasures for medium-short radius horizontal well in super-deep slim hole Shunbei 1-4H[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4): 17-22.
- [2] 陈宗琦, 刘湘华, 白彬珍, 等. 顺北油气田特深井钻井完井技术进展与发展思考[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 1-10.
CHEN Zongqi, LIU Xianghua, BAI Binzhen, et al. Technical progress and development consideration of drilling and completion engineering for ultra-deep wells in the Shunbei Oil & Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 1-10.
- [3] 董小虎, 李银婷. 塔里木盆地顺北区块二叠系井漏复杂的分析及对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2): 59-62.
DONG Xiaohu, LI Yinting. Analysis and countermeasures for complex Permian well leakage in the Shunbei block of Tarim Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2): 59-62.
- [4] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 11-17.
LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei Oil & Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 11-17.
- [5] 张金成, 牛新明, 张进双. 超深井钻井技术研究及工业化应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(1): 3-11.
ZHANG Jincheng, NIU Xinming, ZHANG Jinshuang. Research and industrial application of drilling technology of ultra-deep wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(1): 3-11.
- [6] 孙方龙, 李子钰. 复合欠饱和盐水钻井液体系在顺北志留系复杂地层的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 65-71.
SUN Fanglong, LI Ziyu. Application of the composite under-saturated brine drilling fluid system in drilling of Silurian complex formation in Shunbei[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 65-71.
- [7] 肖绪玉, 史东军, 李国楠, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠系随钻堵漏技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(10): 37-41.
XIAO Xuyu, SHI Dongjun, LI Guonan, et al. Plugging while drilling technology for Permian in Shunbei Area of Tarim Basin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(10): 37-41.
- [8] 刘彪, 张俊, 王居贺, 等. 顺北油田含侵入岩区域超深井安全高效钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(2): 138-142.
LIU Biao, ZHANG Jun, WANG Juhe, et al. Technologies for the safe and efficient drilling of ultradeep wells in the areas with intrusive rocks in the Shunbei Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(2): 138-142.
- [9] 张洪宁, 张建龙, 覃德彪, 等. 基于提高钻速的待钻井眼轨道设计方法[J]. 钻采工艺, 2021, 44(1): 13-17.
ZHANG Hongning, ZHANG Jianlong, QIN Debiao, et al. Wellbore trajectory design method of the hole to be drilled based on rop increasin[J]. Drilling & production technology, 2021, 44(1): 13-17.
- [10] 孙明光. 顺北油田超深小井眼水平井定向钻井技术[J]. 钻采工艺, 2019, 43(4): 19-22.
SUN Mingguang. Directional drilling technique for ultra-deep horizontal slimhole wells in Shunbei Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 43(4): 19-22.
- [11] 于洋, 李双贵, 高德利, 等. 顺北 5-5H 超深 $\Phi 120.65$ mm 小井眼水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 276-281.
YU Yang, LI Shuangui, GAO Deli, et al. Drilling techniques used in Well Shunbei 5-5H, an ultradeep slimhole $\Phi 120.65$ mm horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(3): 276-281.
- [12] 李文霞, 王居贺, 王治国, 等. 顺北油气田超深高温水平井井眼轨迹控制技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 18-24.
LI Wenxia, WANG Juhe, WANG Zhiguo, et al. Wellbore trajectory control technologies for ultra-deep and high-temperature horizontal wells in the Shunbei Oil & Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 18-24.
- [13] 李忠, 赵燕来, 罗光强. 存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 35-41.
LI Zhong, ZHAO Yanlai, LUO Guangqiang. Development

- and application of storage high temperature and high pressure borehole thermometer[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(2): 35-41.
- [14] 汤凤林, ЕсауленкоВ.Н., 宁伏龙, 等. 深井钻进井底参数测量系统用传感器的分析研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5): 38-46.
TANG Fenglin, ESAULENKO V. N., NING Fulong, et al. Analytical research on downhole measurement sensors used in deep drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5): 38-46.
- [15] 李银婷, 董小虎. 顺北油田钻井参数强化的提速效果评价[J]. *钻探工程*, 2021, 48(7): 72-78.
LI Yinting, DONG Xiaohu. Evaluation on the effect of enhanced drilling parameters on ROP improvement in Shunbei Oilfield[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(7): 72-78.
- [16] 张端瑞, 文涛, 蒲磊, 等. “垂直钻井工具+等壁厚螺杆”提速钻具组合先导性试验——以库车山前高陡构造克深A井为例[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(6): 684-690.
ZHANG Duanrui, WEN Tao, PU Lei, et al. Pilot test on the ROP-improvement BHA of vertical drilling tool & screw rod with equal wall thickness: A case study on Well Keshen A in the high-steep structure of Kuqa piedmont area [J]. *Oil Drilling & Production Tecnology*, 2020, 42(6): 684-690
- [17] 金军斌. 塔里木盆地顺北地区长裸眼钻井液技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(4): 5-9, 22.
JIN Junbin. Drilling fluid technology of long open hole section in shunbei area of tarim basin [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(4): 5-9, 22.
- [18] 路保平, 袁多, 吴超, 等. 井震信息融合指导钻井技术[J]. *石油勘探与开发*. 2020, 47(6): 1227-1234.
LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1227-1234.
- [19] 孙明光, 张洪宁, 刘卫东, 等. 特深定向井滑动导向过程中扭矩传递规律研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(2): 8.
SUN Mingguang, ZHANG Hongning, LIU Weidong, et al. Torque transmission law in slide steering for extra-deep directional wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(2): 8.
- [20] 朱宽亮, 吕艳, 胡中志, 等. 南堡滩海大位移井钻井关键因素优化设计[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(1): 33-36.
ZHU Kuanliang, LÜ Yan, HU Zhongzhi, et al. Key drilling factors optimization design for the extended reach well in Nanpu Oilfield [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(1): 33-36.

(编辑 王文)