

引用格式:陈侃,黄乘升,曹建山,等.苏北盆地溱潼凹陷陆相页岩油水平井钻井关键技术及应用[J].油气藏评价与开发,2026,16(4):874-881.

CHEN Kan, HUANG Chengsheng, CAO Jianshan, et al. Key drilling technologies and applications for horizontal wells of continental shale oil in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(4): 874-881.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.20250056

苏北盆地溱潼凹陷陆相页岩油水平井钻井关键技术及应用

陈侃¹, 黄乘升¹, 曹建山², 陆长青¹, 胡志强³, 高书阳³, 王苗⁴, 董利飞⁴

(1. 中国石化华东石油工程有限公司, 江苏 南京 210026; 2. 中国石化华东油气分公司, 江苏 南京 210019; 3. 中国石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 4. 重庆三峡科技大学, 重庆 404120)

摘要:为解决苏北盆地溱潼凹陷 QY1 页岩油示范平台钻井面临的储层岩性复杂、井壁易失稳、安全钻进密度窗口窄及机械钻速低等技术难题,通过井身结构优化、高性能水基钻井液研发、精细控压钻井、提速工具优选和钻井参数优化等技术研究,形成适配溱潼凹陷页岩油水平井的配套钻井关键技术。开展井身结构优化:①形成“三开制、技套封隔至阜宁组二段 V 亚段”模式,有效封固不稳定地层;②基于“内控膨胀、外防水侵”原则,研发高性能水基钻井液体系 SM-ShaleMud- II,显著提升抑制防塌性能与封堵能力;③引入第二代模块化精细控压技术,构建“微流量监测+压力导数分析”双预警机制,实现井筒压力精准闭环控制;④通过优化钻头及井下工具选型,配套水力振荡器、随钻偏心扩眼器等提速工具,并基于“四高一低”思路结合石油工程决策支持系统(RTOC)优化钻井参数。现场应用结果表明:配套技术在 QY1 平台 4 口井应用中取得显著成效,钻井过程未发生井壁失稳事故,井下复杂故障大幅减少,平均水平段长度达 1 716.5 m,较前期增加 233.55 m,平均机械钻速提升至 15.83 m/h,较前期提高 22.7%,平均钻井周期缩短至 48.6 d,较前期 120 d 左右大幅缩短,其中, QY1-1S03HF 井钻井周期仅 40.25 d,机械钻速达 18.44 m/h。研究技术体系成功实现了溱潼凹陷陆相页岩油安全高效钻井,为中国同类陆相页岩油藏的规模效益开发提供了重要技术支撑与实践参考。

关键词:溱潼凹陷;页岩油水平井;井壁稳定;水基钻井液;精细控压

中图分类号:TE242

文献标识码:A

Key drilling technologies and applications for horizontal wells of continental shale oil in Qintong Sag, Subei Basin

CHEN Kan¹, HUANG Chengsheng¹, CAO Jianshan², LU Changqing¹, HU Zhiqiang³, GAO Shuyang³, WANG Miao⁴, DONG Lifei⁴

(1. Sinopec East China Petroleum Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210026, China; 2. Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210026, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China; 4. Chongqing Sanxia University of Science and Technology, Chongqing 404120, China)

Abstract: To address the technical challenges encountered in drilling operations at the QY1 shale oil demonstration platform in the Qintong Sag of the Subei Basin, including complex reservoir lithology, prone borehole instability, narrow safe drilling density window, and low rate of penetration (ROP), this study developed a set of key supporting drilling technologies adapted to horizontal shale oil wells in the Qintong Sag through research on wellbore structure optimization, high-performance water-based drilling fluid development, precision managed pressure drilling (MPD), optimization of drilling speed-up tools, and drilling parameter optimization. Wellbore structure optimization was conducted. (1) A drilling mode of “three-spud system with technical casing set to the V sub-member of the second member of Funing Formation” was established to effectively seal the unstable formations. (2) Based on the principle of “internal swelling control and external water invasion prevention”, a high-performance water-based drilling fluid system SM-ShaleMud- II was developed, which significantly enhanced the inhibition, anti-collapse and plugging capabilities. (3) The second-generation modular precision managed pressure drilling technology was introduced, and a dual early-warning mechanism of “micro-flow monitoring + pressure derivative analysis” was constructed to achieve

收稿日期:2026-01-28。

第一作者简介:陈侃(1986—),男,硕士研究生,高级工程师,现从事深井、超深井钻完井技术研究工作。地址:江苏省南京市建邺区金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:chenkan.oshd@sinopec.com

通信作者简介:董利飞(1988—),男,博士研究生,教授,现从事非常规油气开采、油气钻完井工艺、CCUS等方向的研究工作。地址:重庆市万州区天星路666号,邮政编码:404120。E-mail:lfldong2016@163.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“苏北页岩油藏高效钻井与压裂关键技术研究”(P22096);重庆市教委科学技术研究项目(重点项目)“页岩气藏次级裂缝自支撑作用及其影响因素研究”(KJZD-K202201204)。

precise closed-loop control of wellbore pressure. (4) By optimizing the selection of drill bits and downhole tools, matching with drilling speed-up tools such as hydraulic oscillators and eccentric reamers for drilling, and combining the “four-high and one-low” design concept with the Real-Time Operation Center (RTOC) decision support system for petroleum engineering, the drilling parameters were further optimized. Field application results indicated that this supporting technology achieved remarkable outcomes in four wells of the QY1 platform. No borehole instability incidents occurred during the drilling process, and downhole complex faults were significantly reduced. The average horizontal section length reached 1 716.5 m, representing an increase of 233.55 m compared with the previous period. The average rate of penetration (ROP) increased to 15.83 m/h, an increase of 22.7% compared with the prior level. The average drilling cycle was shortened to 48.6 days, a substantial reduction from the approximately 120 days recorded previously. Specifically, for well QY1-1S03HF, the drilling cycle was only 40.25 days, and the ROP reached 18.44 m/h. This technology system has successfully realized the safe and efficient drilling of continental shale oil in the Qintong Sag, providing crucial technical support and practical reference for the large-scale and economical development of similar continental shale oil reservoirs in China.

Keywords: Qintong Sag; shale oil horizontal wells; wellbore stability; water-based drilling fluid; precision managed pressure

在全球能源格局深度调整、对清洁能源需求与日俱增的时代背景下,页岩油作为一种极具潜力的非常规油气资源,其高效开发对保障国家能源安全、推动能源结构转型具有重要意义^[1-2]。中国石化苏北地区页岩油是中国重要的探明页岩油区,包括溱潼、金湖、海安3个凹陷,工区总面积约1 691 km²,初步落实页岩油总资源量3.5×10⁸ t,其中,溱潼凹陷页岩油总资源量2.95×10⁸ t^[3]。为探索深凹带构造稳定区页岩油开发技术政策,试验提产增效工艺技术,推进苏北陆相页岩油规模效益开发进度,在溱潼凹陷部署QY1平台作为中国石化页岩油示范井平台,采取大平台丛式井方案,纵向立体、平面交错部署,兼具钻井、压裂、采油等3个作业区域,试验300 m井距开发效果。平台已完钻水平井井深介于5 313~6 068 m、垂深介于4 000~4 300 m、水平段长度介于1 200~1 850 m。其中,有4口井(QY1-1X03HF井、QY1-2X05HF井、QY1-1S01HF井、QY1-2S05HF井)出现了井壁坍塌,导致扭矩异常、钻具脱落、卡钻、埋钻及套管未下至设计位置等事故,复杂处理时间长,时效损失大。制约着示范区块页岩油后期有效开发。

针对上述问题,从井身结构优化、高性能水基钻井液、精细控压等方面入手,形成了苏北盆地溱潼凹陷页岩油“井身结构优化-高性能水基钻井液-精细控压-钻井提速工具优选-井壁稳定性评价”等钻完井关键技术,该系列技术在QY1平台进行了现场应用,大大减少了井下复杂故障,平均钻完井周期由前期的120 d缩短到50 d左右,为加快苏北盆地页岩油勘探开发进程提供了重要技术支撑。

1 地层岩性特点及钻井难题

1.1 区域地质特征

溱潼凹陷位于东台拗陷中东部,为东台拗陷中的一个亚一级构造单元。自西向东划分为斜坡带、深凹带、断

阶带3个构造带,整体呈现了南东断—北西超的构造格局。地层自下而上沉积了古近系泰州组、阜宁组、戴南组、三垛组,新近系盐城组及第四系东台组地层。目的层阜宁组二段(以下简称阜二段)为一套厚层的暗色泥页岩,厚度介于200~400 m^[4]。依据沉积旋回,纵向上阜二段可分为5个亚段:Ⅴ亚段(俗称“泥脖子”)为黑色块状泥岩;Ⅳ亚段为灰黑色块状含灰、灰质泥岩,纹层不发育;Ⅲ亚段下部为纹层状、层状灰黑色灰质/白云质页岩,中上部为黑灰色泥岩;Ⅱ亚段为灰色纹层状、层状混合质页岩、块状黏土质泥岩;Ⅰ亚段主要为深灰色—灰黑色纹层状、层状混合质页岩、长英质页岩,纹层及页理发育。

阜二段泥页岩主要为长英质-黏土质-碳酸盐质三元混合质页岩,矿物组分纵向上呈规律变化,长英质矿物纵向上变化不大、黏土矿物向上变高,碳酸盐矿物含量变低。其中,阜二段Ⅴ亚段井段岩石矿物中黏土矿物大于45%,较Ⅰ—Ⅳ亚段黏土矿物含量明显较大^[5]。在黏土矿物中,以伊蒙混层和伊利石为主,常发生剥落掉块现象。

1.2 钻井主要难题

实践研究表明,事故主要原因是水平井钻井过程中存在如下问题^[6]:

1)地层压力复杂,井身结构优化难度高。QY1平台井身结构经过了多口井的探索,初期为二开制井身结构,施工中出现了掉块、垮塌、气侵、长裸眼承压能力低、地层出水、卡钻等复杂状况,后期逐步向三开制井身结构优化,技术套管下深逐步加深,安全钻井施工模式趋于成熟。

2)地层岩性复杂,陆相页岩井壁失稳风险高。阜宁组泥岩黏土矿物以伊蒙有序混层为主,混层比介于10%~40%,岩石强度高,受构造运动与成岩作用(处于第一/第二脱水带),阜宁组泥岩微裂隙发育,属于裂隙发育的硬脆性泥岩,钻井液浸泡一段时间后,地层坍塌压力会增加,井壁失稳掉块严重。

3)目的层油气侵严重,安全钻进密度窗口窄。目的

层阜二段地层孔隙度高,层理缝和高角度缝发育,渗透率高,钻井液安全钻井密度窗口约为1.56~1.68 g/cm³,录井裂隙见油气且气测异常明显,QY1井岩心和成像测井资料表明,宏观储集空间主要为层理缝,其次为构造缝和成岩缝,同时井组布井数量多,人造缝网密集,井筒由漏转喷的井控风险高。阜二段裂缝发育,多次出现节流点火后漏失,QY1-1X03HF井目的层持续油气侵,节流循环排气13次,节流循环火焰高8~9 m,进出口钻井液密度差最高0.25 g/cm³,含油量最高达41%。

4)盐城组砂砾岩地层发育,平均机械钻速偏低。盐城组一段地层夹层多、软硬交错,发育灰白色砂砾岩、含砾砂岩,钻头易崩齿,寿命短,破岩效率低,钻头选型和破岩工具选择难度大。

2 钻井关键技术

2.1 井身结构优化

QY1平台井遵循低成本高效安全开发模式,在井身结构优化方面经过多个阶段的探索:第一阶段QY1-1X03HF井实施“二开制井身结构+水基钻井液”,裸眼段长,井下掉块导致卡钻、卡套管,处理周期长;第二阶段QY1-2X05HF井实施“二开制井身结构+油基钻井液”,裸眼段长,发生水侵导致钻井液性能恶化,卡钻;第三阶段QY1-1S01HF井和QY1-2S05HF井实施“三开制井身结构+油基钻井液”,缩短裸眼段长,仍然发生水侵卡钻故障;第四阶段形成了“三开制、技套封隔至阜二段V亚段”的安全钻井施工模式(图1)。该类型井身结构相继在QY1-1X02HF井、QY1-1X01HF井、QY1-1S02HF井、QY1-1S03HF井成功实施,三开前全部封固不稳定地层,为目的层安全钻进和全井提速提效创造了条件。

2.2 高性能水基钻井液技术

通过了QY1井阜二段泥页岩矿物分析,结果显示(表1):黏土矿物含量占比达30.7%~49.6%,石英含量介于21.9%~35.4%,同时还包含方解石、白云石、长石、黄铁矿等脆性矿物^[7]。由于页岩段中黏土矿物含量影响井壁稳定性,尤其是进入水平段油页岩后,钻井液抑制性能低,容易造成井壁掉块^[8-13]。因此,高密度钻井液条件下,井底岩石受到的压强高,导致岩石破碎强度增加,可钻性变差^[14-15]。

表1 QY1井阜二段各亚段岩石矿物组分含量
Table 1 Rock mineral composition of each submember of second member of Funing Formation in well QY1

亚段	黏土矿物/%	石英/%	长石/%	方解石/%	白云石+铁白云石/%	其他/%
V	30.7	26.4	14.5	9.3	11.2	7.9
IV	49.6	35.3	4.8	5.3	4.2	0.8
III	35.6	35.0	5.5	18.8	3.3	1.8
II	32.2	21.8	11.3	9.2	13.6	11.9
I	32.3	23.4	16.4	9.4	12.3	6.2

页岩油气钻井通常选择油基钻井液,以提高钻井液抑制性,确保井壁稳定。由于QY1平台的QY1-2X05HF井、QY1-2S05HF井使用油基钻井液过程发生严重水侵,造成油基钻井液破乳引起井壁失稳,因此从泥页岩井壁稳定的角度,提出了“内控膨胀、外防水侵”的研究思路,优选处理剂种类和优化其加量,研发了适用于苏北地区陆相页岩油储层的高性能水基钻井液体系SM-ShaleMud-II。

采用滚动回收率测试、线性膨胀率测试方法,评价了苏北溱潼凹陷页岩油储层阜二段II亚段岩心及V亚段“泥脖子”易失稳地层掉块的水化分散性和水化膨胀性,

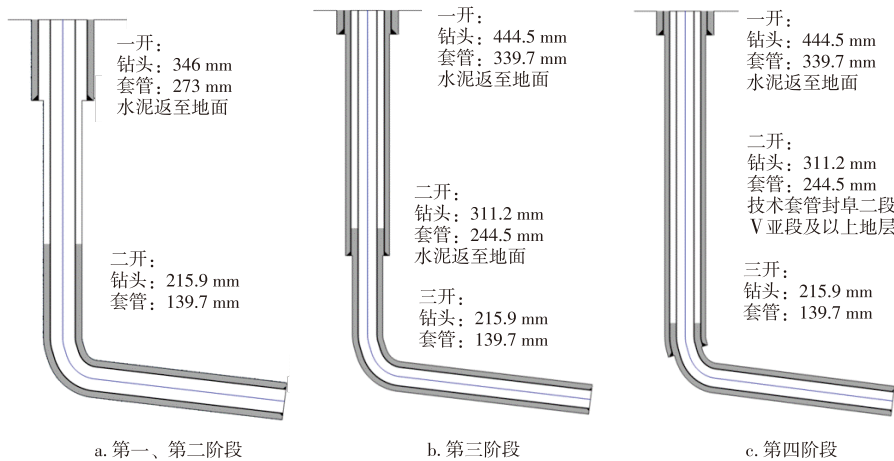


图1 井身结构优化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wellbore structure optimization

其线性膨胀率约为12.0%,滚动回收率约为76.0%,在7.0% KCl溶液中,易塌地层掉块滚动回收率由76.24%提高至94.64%,线性膨胀率由12.0%降低至3.0%。这表明其具有较强的水化分散特性。随着水化作用的持续进行,大量微裂缝沿着层理面方向不断地萌生、延伸并扩展,严重破坏了岩石的整体性结构。岩石内部结构受损导致地层岩石力学性能急剧降低,最终不可避免地造成井壁失稳坍塌^[16-18],阜二段Ⅱ亚段岩石在多种不同流体中常温浸泡48 h后力学性能如图2所示。

在流体中常温浸泡后储层岩石单轴抗压强度和杨氏模量均呈现出降低趋势。其中油基钻井液和页岩水基钻井液中降低幅度相对较小;清水中降低幅度最大。所以,通过抑制和封堵强化后的页岩水基钻井液可有效稳定阜二段地层岩石。

通过室内评价,优选无机盐抑制剂KCl与聚胺抑制剂配合,提高阜二段页岩岩屑的滚动回收率;研发可变形微纳米聚合物封堵剂SMNP-2和纳米乳液SMNR-1,提高裂缝封堵率,减少钻井液滤液的侵入量;确定极压润滑剂SMJH-1、环保润滑剂SMLUB-E和固体润滑剂SMSL-1作为润滑的关键助剂;优选出具有优异降黏度效果的、适用于水基钻井液的原油乳化分散降黏剂EMU-1,抑制沥青质、石蜡等组分聚集,减弱堆积作用,以达到控制钻井

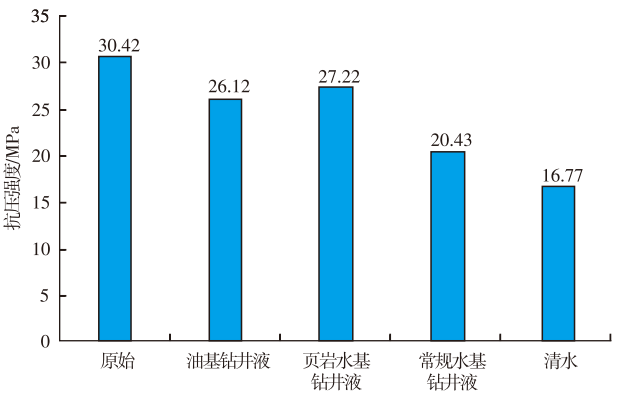


图2 不同流体浸泡48 h后储层岩石单轴抗压强度情况

Fig. 2 Uniaxial compressive strength of reservoir cores after soaking in different fluids for 48 hours

液流变性的目的^[19-20]。

钻井液体系SM-ShaleMud-Ⅱ基本配方为:3.0%膨润土+0.5%聚阴离子纤维素+0.5%羧甲基纤维素+0.1%聚丙烯酰胺钾盐+2%~4%磺甲基酚醛树脂+2%~4%褐煤树脂+2%~4%温敏型封堵防塌剂+2%柔性封堵剂+1.5%~3%微纳米聚合物封堵剂(SMNP-2)+2%纳米乳液(SMNR-1)+0.3%~0.5%聚胺抑制剂+2%~4%环保润滑剂(SMLUB-E)+2%~4%高效润滑剂(SMJH-1)+7%~8%氯化钾+0.5%烧碱+2%~4%多级配超细碳酸钙(500目:1 500目:2 500目≈1:1:1),基础性能评价见表2。

表2 水基钻井液SM-ShaleMud-Ⅱ的基础性能评价结果

Table 2 Basic performance evaluation results of water-based drilling fluid SM-ShaleMud-Ⅱ

样品编号	密度/(g/cm ³)	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比	静切力/Pa	高温高压滤失量/mL	API滤失量/mL
1号	1.20	29	22	7	0.32	2.0~13.0	6.0	1.8
2号	1.50	31	23	7	0.30	2.5~12.5	5.8	1.6
3号	1.80	35	26	9	0.35	3.5~14.0	5.4	1.2

可见,该高性能水基钻井液具有良好的抑制防塌性能、强封堵能力、高效润滑性、抗水侵和抗油气污染能力等综合性能。

2.3 精细控压钻井技术

针对溱潼凹陷阜二段目的层裂缝发育、多井压裂后人造缝网密集,且安全钻井密度窗口窄(1.56~1.68 g/cm³)的区域地质特征,为解决钻井液密度受限引发的溢、漏、垮共存难题,引入精细控压钻井技术并优化形成适配该区域的成套工艺方案^[21-22]。

精细控压技术体系核心围绕“精准监测-智能调控-工况适配”展开。采用第二代模块化精细控压系统,集成自动节流与微流量监测功能,通过电动伺服节流阀、电动节流系统与自动化钻机联动,实现压力调控精度±0.25 MPa、

响应时间缩短至7 s的实时闭环控制,全程支持远程自动化操作。

在溢漏监测方面,建立“微流量监测+压力导数分析”双预警机制。通过系统捕捉出口流量0.1 m³/h级小波动,结合井口压力一阶导数曲线异常拐点,实现100 L内精准溢漏预警;同时对高频实时压力数据进行平滑处理,构建压力随时间变化的导数曲线,精准识别溢漏发生初始时刻(图3)。

压力控制采用工况自适应模式。正常钻进阶段以套压自动调控为主,通过“密度微调+动态回压”将当量循环密度(ECD)稳定控制在1.60~1.68 g/cm³的安全窗口内;遇页岩油置换侵入时切换立压恒定模式,避免常规套压模式下环空液柱压力差值导致的井底压力降低风险;针对压裂后井眼沟通人工缝的特殊工况,采用“低密度钻

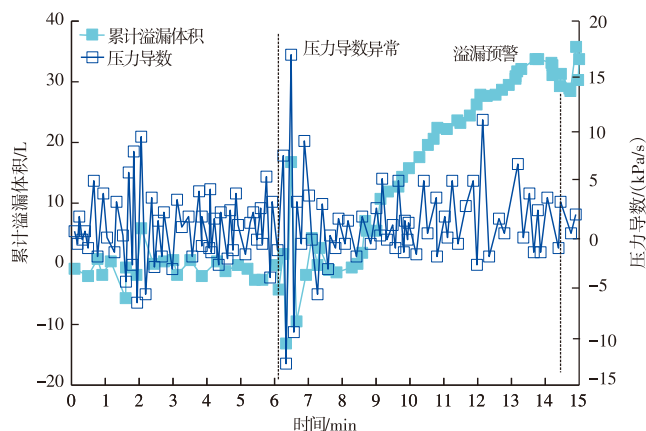


图3 QY1-1X01HF井精细控压溢流情况

Fig. 3 Overflow conditions under precision managed pressure in well QY1-1X01HF

井液+动态回压补偿”组合方案,平衡漏失风险与井壁稳定。

通过快速施加井口回压有效抑制溢流及坍塌,实时监测出口流量保障钻进安全,其中QY1-1S03HF井钻进至5 888.00 m遭遇高压水层时,凭借精细控压装置的及时预警与精准控压,顺利完成压井作业。该技术在QY1-1X02HF井、QY1-1X01HF井、QY1-1S02HF井和QY1-1S03HF井成功应用,验证了技术在复杂工况下的可靠性。

2.4 钻头及井下工具优选

引入滑动摩擦系数和破岩效率系数建立钻头参数与机械比能的定量关系。钻头滑动摩擦系数主要由切削齿材质决定,是影响扭矩的关键参数,而破岩效率系数反映钻头结构对碎岩效果的提升程度,其值受PDC钻头的剖面结构和切削齿选型影响,是钻速的关键参数。因此,通过优化PDC钻头剖面结构,优选切削齿,以降低机械比能为核心,同时,考虑经济效益与高钻速、大进尺等指标紧密相关,开展钻头优选和优化。具体机械比能计算公式为:

$$M_{SE} = \frac{W}{A_b} + \frac{120\pi NT\mu}{A_b R\eta} \quad (1)$$

式中: M_{SE} 为机械比能,单位 MPa; W 为钻压,单位 kN; A_b 为钻头横截面积,单位 cm^2 ; N 为转速,单位 r/min ; T 为扭矩,单位 $\text{kN}\cdot\text{m}$; μ 为引入滑动摩擦系数; R 为钻速,单位 m/h ; η 为破岩效率系数。

综合分析后优选平台钻头组合:东台组地层松软,优选 19 mm 齿,四刀翼 PDC 钻头,增强 PDC 钻头攻击性;盐城组砂砾岩地层发育,砾岩研磨性高且破碎,对复合片产生冲击力,切削齿发生破损,影响钻速,使用锥形抗冲击 PDC 钻头,钻头前排齿设计为异形齿,后排齿设计为圆锥抗冲击齿,钻头整体使用“剪切+犁削”的双重破岩方式,

提高了钻头的攻击效率(图 4a);定向井段优选江钻 KPM1933DFRT 型“迅猛龙”混合钻头(图 4b),兼具破岩高效率 and 定向稳定性,提高定向效率;大井斜定向段优选超短一体结构设计的 PDC 钻头,具备一定的定向能力,可实现精准中靶;阜二段泥页岩地层可钻性强,水平段调整少,以提速为主,优化水力和肩部布齿,提升钻头侧向力,提升钻头攻击性,优选 16 mm 齿,五刀翼强攻击性 PDC 钻头,适应泥岩段快速钻进,并具备良好的导向效果。钻具组合加入水力振荡器,以降低钻柱与井壁之间的摩阻,提高钻头吃入地层的效率,并能有效保证工具面的稳定,提高大尺寸井眼的定向钻进效率。



a. 锥形抗冲击PDC钻头



b. “迅猛龙”混合钻头

图4 QY1平台钻头优选

Fig. 4 Bit optimization for QY1 platform

在上部井段钻进钻具组合中加入随钻微偏心扩眼器(图5),具有上下两组螺旋扩眼刀翼,下刀翼组负责钻进期间的随钻扩眼或下钻过程中的正划眼,上刀翼组负责起钻过程中的倒划眼,工具可在膨胀性的页岩地层和具有蠕变性的盐膏层、软泥岩层等井段扩出直径略微大于钻头理论直径的井眼,减少常规钻井过程中的划眼作业时间,并确保起下钻、电测、下套管等作业安全顺利^[23]。此外,针对等壁厚螺杆马达定子衬套的结构缺陷进行了优化设计,将定子衬套啮合面波峰与波谷之间部分的壁厚增大,从而改善等壁厚螺杆马达定子表面的受力不均匀状态^[24]。实践表明,QY1-1X02HF井在二开阶段使用随钻微偏心扩眼器后,起下钻效率提高了50%。

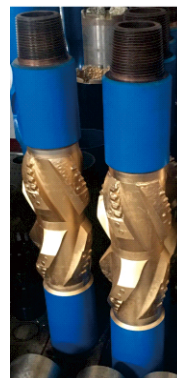


图5 随钻微偏心扩眼器

Fig. 5 Eccentric reamers for drilling

2.5 钻井参数优化

钻头破岩能量不足的影响因素主要有:①能量传递:钻具的黏滑、振动消耗能量,影响扭矩和钻压传递;②工作状态:钻头破岩过程中积蓄能量,引发振动,造成切削齿损坏;③能量分配:钻头各部位载荷分布不合理,单齿超载或单齿载荷不足。因此,针对相关问题开展了钻井参数优化(表3)。

QY1井组页岩油钻井提出“高钻压、高转速、高排量、高泵压、低黏切”的“四高一低”强化参数思路,在此基础上开展钻机整体配套优化:钻机应满足丛式井作业平移要求,钻机钻台高度应满足安装防喷器组要求;为满足高扭矩、高转速要求,配备顶驱;为满足高排量、高泵压要求,配备至少1 600 HL、52 MPa高压泵;采用网电动力,配备柴油发电机组作为备用能源。

在实际实施过程中,针对溱潼凹陷QY1平台页岩油储层地质特点,应用石油工程决策支持系统(RTOC)在水平段钻进过程中对钻柱受力、摩阻扭矩、岩屑运移等进行了实时跟踪分析,对钻压、转速、排量参数优化进行分析决策^[25-26]。QY1-1S03HF井三开钻进至5 580.99 m,模拟机械钻速15.38 m/h,排量30.74 L/s,岩屑直径2 mm时的井眼清洁情况,岩屑质量分数0.51%(小于5%),岩屑输送比0.99(大于0.5),均满足井眼清洁情况良好的范围。预测复合钻进过程中钻压为180 kN时,3 717.5 m左右有屈曲风险,建议施工中钻压不超过180 kN;结合钻进参数监测曲线,对4 789~5 033 m井段钻进工况开展分析。

由监测数据可知:研究井段扭矩波动系数介于

0.03~0.12,同步获取的钻头磨损系数介于0.75~2.77,研究中钻头磨损系数达5.0时定义为显著磨损,达8.0为严重磨损,当前磨损系数虽未触及显著磨损阈值,但对比曲线中前期井段历史数据,磨损系数呈现阶段性增长态势。因此,针对最近100 m(4 937.45~5 037.45 m)钻进过程,开展参数敏感性分析。研究井段钻压控制在60~140 kN范围,转速维持于75~81 r/min区间,从机械钻速随钻压变化的曲线特征可见,随钻压增大,机械钻速提升幅度有限,钻速增长与钻压增量未呈现典型正相关的匹配关系。

3 现场应用效果

QY1平台已完钻9口水平井(表4),经过不断技术迭代,共有4口井应用(QY1-1X02HF井、QY1-1X01HF井、QY1-1S02HF井、QY1-1S03HF井)了上述页岩油水平井钻井技术,平均完钻井深5 969.75 m,平均水平段长度1 716.5 m,平均机械钻速15.83 m/h,平均钻井周期48.6 d。与前期所钻水平井相比,在平均水平段长度增加233.55 m的前提下,平均机械钻速提高了22.7%,平均钻井周期缩短了10.3 d。应用高性能水基钻井液后,水平井段钻井密度窗口维持在1.56~1.68 g/cm³,井壁稳定无剥落掉块现象。QY1-1S03HF井完钻井深5 888 m,平均机械钻速18.44 m/h,钻井周期40.25 d。水平段应用高性能水基钻井液后,钻井液支撑、悬浮、携岩综合性能明显提升,未发生剥落掉块现象。QY1-1S03HF井采用精细控压钻井技术,钻进至5 888 m时遭遇高压水层,精细控压装置在溢漏100 L及时预警,控压1.5~2.5 MPa,出口流量持续增

表3 钻井参数优化
Table 3 Optimization of drilling parameters

开次	钻压/kN		转速/(r/min)		排量/(L/s)		泵压/MPa	
	原水平	优化后	原水平	优化后	原水平	优化后	原水平	优化后
一开	1~2	1~4	30~50	40~60	60	50~60	1	1~2
二开	2~8	2~14	50~70	90~100	55	75~80	21	<31
三开	8~10	12~18	40~60	70~90	30	38~40	25~28	33~37

表4 QY1平台钻井数据统计
Table 4 Drilling data statistics of QY1 platform

	井号	水平段长/m	钻井周期/d	平均钻井周期/d	机械钻速/(m/h)	平均机械钻速/(m/h)	钻井液体系	开次	备注
应用前	QY1HF	1 158	68.03		8.64		油基	三开	卡钻
	QY1-1X03HF	1 732	45.34		16.60		水基	二开	卡钻、卡套管
	QY1-2X05HF	1 472	53.34	58.9	13.50	12.90	油基	二开	卡钻
	QY1-1S01HF	1 704	50.96		15.04		油基	三开	无卡钻
	QY1-2S05HF	1 350	76.86		10.70		油基转水基	三开	卡钻
应用后	QY1-1X02HF	1 535	54.01		18.12		水基	三开	无卡钻
	QY1-1X01HF	1 713	52.63	48.6	11.87	15.83	水基	三开	无卡钻
	QY1-1S02HF	1 875	47.69		14.87		水基	三开	无卡钻
	QY1-1S03HF	1 743	40.25		18.44		水基	三开	无卡钻

加,关井后套压由5 MPa上涨至14 MPa,考虑水平段长,为避免卡钻故障,采用控压倒划眼方式起钻,井口回压5 MPa维持井筒压力,控压起钻至套管内,后成功进行了压井作业,保证了该井的后续顺利完井。

4 结论与建议

1)阜二段泥页岩具有较强的水化分散特性,水化作用下大量微裂缝沿着层理面方向扩展,破坏岩石整体性结构,导致井壁失稳坍塌。基于“内控膨胀、外防水侵”的原则,优选无机盐抑制剂KCl(+聚胺抑制剂)+微纳米聚合物封堵剂SMNP-2(+纳米乳液SMNR-1)+极压润滑剂SMJH-1(+环保润滑剂SMLUB-E+固体润滑剂SMSL-1)+原油乳剂分散降黏剂EMU-1,研发了适用于苏北地区陆相页岩油储层的高性能水基钻井液体系SM-ShaleMud-II。

2)QY1平台采用“钻采压”一体化模式,采用电动精细控压钻井系统,实现了对井筒环空压力的闭环实时监测与精确控制,构建了基于压力特征的溢漏早期预警方法,准确识别页岩油钻井过程井下工况,全流程工况自适应压力控制模式,实现安全控制。

3)QY1平台井遵循低成本高效安全开发模式,形成了“三开制(技套封隔至阜二段V亚段)”井身结构设计和安全钻井施工模式;优选锥形抗冲击PDC钻头和“迅猛龙”混合钻头,同时加入水力振荡器,实现破岩高效率 and 定向稳定性,提高大尺寸井眼的定向钻进效率;并利用石油工程决策支持系统(RTOC)对钻压、转速、排量参数优化进行分析决策,实现了溱潼凹陷页岩油钻井提质提速。

参考文献

- [1] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 8-13.
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 8-13.
- [2] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] 姚红生, 笱灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 776-783.
YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 776-783.
- [4] 笱灵, 白鸾羲, 印燕铃, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油基本特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 356-365.
ZAN Ling, BAI Luanxi, YIN Yanling, et al. Basic characteristics and genesis analysis of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 356-365.
- [5] 荆晓明. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜二段页岩油甜点评价[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 31-38.
JING Xiaoming. Evaluation of shale oil sweet spots in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 31-38.
- [6] 云露, 何希鹏, 花彩霞, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 176-187.
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong sag of Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 176-187.
- [7] 高玉巧, 蔡潇, 夏威, 等. 苏北盆地古近系阜宁组二段页岩油储集空间特征及甜点段评价: 以溱潼凹陷QY1井为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 916-926.
GAO Yuqiao, CAI Xiao, XIA Wei, et al. Characteristics of reservoir space and sweet spot evaluation of shale oil in the second member of Paleogene Funing Formation in Subei Basin: A case study of well QY1 in Qintong Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 916-926.
- [8] 高书阳. 苏北陆相页岩油高性能水基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(4): 51-56.
GAO Shuyang. Technique of high-performance water-based drilling fluid for continental shale oil in Subei Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 51-56.
- [9] 秦春, 刘纯仁, 李玉枝, 等. 苏北断块页岩油水平井钻井提速关键技术[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 30-36.
QIN Chun, LIU Chunren, LI Yuzhi, et al. Key technologies for enhancing the drilling speed of fault block shale oil horizontal wells in Subei Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(6): 30-36.
- [10] 冉启华, 赵晗. 威远页岩气水平井钻井关键技术及发展方向[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 12-15.
RAN Qihua, ZHAO Han. Key technology and development direction of horizontal well drilling in Weiyuan shale gas reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 12-15.
- [11] 杨睿, 张拓铭. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油水平井钻井技术[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(3): 36-40.
YANG Rui, ZHANG Tuoming. Horizontal well drilling technology of shale oil in Jimusar's concave Lucaogou formation[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(3): 36-40.
- [12] 高攀明, 陈峰, 谢颖, 等. 吴起油田长7页岩油层钻井液优化研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(4): 144-151.
GAO Panming, CHEN Feng, XIE Ying, et al. Optimization of drilling fluid for Chang7 shale reservoir in Wuqi Oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(4): 144-151.
- [13] 王维, 韩金良, 亓宗凯, 等. 临汾区块煤系地层泥页岩防塌钻井液技术研究[J]. 非常规油气, 2023, 10(2): 107-114.
WANG Wei, HAN Jinliang, QI Zongkai, et al. Study on anti sloughing drilling fluid technology of shale in coal measure strata in Linfen Block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2): 107-114.

- [14] 李成,李伟,张文哲,等.延长油田陆相页岩气复杂地层水基钻井液优化及应用[J].非常规油气,2023,10(1):130-138.
LI Cheng, LI Wei, ZHANG Wenzhe, et al. Optimization and application of water-based drilling fluid for complex formation of continental shale gas in Yanchang Oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 130-138.
- [15] 李涛,杨哲,刘宇航,等.高压低渗气层油基钻井液安全控压钻井技术[J].非常规油气,2025,12(5):117-124.
LI Tao, YANG Zhe, LIU Yuhang, et al. Safe pressure control drilling technology for oil-based drilling fluid in high-pressure low-permeability gas reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2025, 12(5): 117-124.
- [16] 罗鸣,高德利,黄洪林,等.钻井液对页岩力学特性及井壁稳定性的影响[J].石油钻采工艺,2022,44(6):693-700.
LUO Ming, GAO Deli, HUANG Honglin, et al. Effects of drilling fluids on shale mechanical properties and wellbore stability[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 693-700.
- [17] 钟成旭,李道雄,李郑涛,等.渝西区块龙马溪组强封堵油基钻井液技术研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2024,46(2):103-113.
ZHONG Chengxu, LI Daoxiong, LI Zhengtao, et al. Research on oil-based drilling fluid technology for strong plugging of Longmaxi Formation in West Chongqing Block[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2024, 46(2): 103-113.
- [18] 王志远,黄维安,范宇,等.长宁区块强封堵油基钻井液技术研究及应用[J].石油钻探技术,2021,49(5):31-38.
WANG Zhiyuan, HUANG Weian, FAN Yu, et al. Technical research and application of oil base drilling fluid with strong plugging property in Changning Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 31-38.
- [19] 钱晓琳,宣扬,林永学,等.钻井液环保润滑剂SMLUB-E的研制及应用[J].石油钻探技术,2020,48(1):34-39.
QIAN Xiaolin, XUAN Yang, LIN Yongxue, et al. Development and application of an environmental-friendly drilling fluid lubricant SMLUB-E[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 34-39.
- [20] 王琳,董晓强,杨小华,等.高密度钻井液用润滑剂SMJH-1的研制及性能评价[J].钻井液与完井液,2016,33(1):28-32.
WANG Lin, DONG Xiaoqiang, YANG Xiaohua, et al. Development and evaluation of a high density drilling fluid lubricant[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 28-32.
- [21] 周英操.精细控压钻井技术及其应用[M].北京:石油工业出版社,2018.
ZHOU Yingcao. Fine controlled pressure drilling technology and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [22] 周英操,杨雄文,方世良,等.窄窗口钻井难点分析与技术对策[J].石油机械,2010,38(4):1-7.
ZHOU Yingcao, YANG Xiongwen, FANG Shiliang, et al. An analysis of the difficulties in narrow window drilling and technical solutions [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(4): 1-7.
- [23] 和鹏飞.井眼质量改善工艺及偏心扩眼器的应用[J].石油工业技术监督,2017,33(4):10-13.
HE Pengfei. Improvement technology of borehole quality and application of eccentric reamer[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2017, 33(4): 10-13.
- [24] 王青,张颢,韩基胜,等.吉木萨尔页岩油水平井钻井优化技术[J].西部探矿工程,2023,35(11):64-68.
WANG Qing, ZHANG Hao, HAN Jisheng, et al. Drilling optimization technology of Jimsar shale oil horizontal well[J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(11): 64-68.
- [25] 李振川,兰祖权,姚昌顺,等.基于机械比能的快速钻井理论研究与应用[J].西部探矿工程,2022,34(12):77-81.
LI Zhenchuan, LAN Zuquan, YAO Changshun, et al. Theoretical research and application of rapid drilling based on mechanical specific energy[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(12): 77-81.
- [26] 李振川,姚昌顺,胡开利,等.水平井井眼清洁技术研究与实践[J].新疆石油天然气,2022,18(1):48-53.
LI Zhenchuan, YAO Changshun, HU Kaili, et al. Research and practice of horizontal wellbore cleaning technology[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(1): 48-53.

(编辑 余聪)