



大庆古龙页岩油水平井钻井技术

迟建功

Drilling Technologies for Horizontal Wells of Gulong Shale Oil in Daqing

CHI Jiagong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大港油田页岩油水平井钻井关键技术

Key Technologies for Drilling Horizontal Shale Oil Wells in the Dagang Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 34–41 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020036>

济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completion of Horizontal Shale Oil Wells in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 22–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021073>

长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术

Shale Oil Horizontal Drilling Technology with Super-Long Horizontal Laterals in the Longdong Region of the Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(1): 9–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020029>

沧东凹陷页岩油水平井优快钻井技术

Optimized and Fast Drilling Technologies for Horizontal Shale Oil Wells in the Cangdong Sag

石油钻探技术. 2021, 49(4): 46–52 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020127>

沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术

Technologies for Snubbing Services in Horizontal Shale Oil Wells in the Cangdong Sag

石油钻探技术. 2021, 49(4): 150–154 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021077>

长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术

ROP Improvement Technologies for Large-Cluster Horizontal Shale Oil Wells in the Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(4): 29–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021076>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023002

引用格式: 迟建功. 大庆古龙页岩油水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(6): 12-17.

CHI Jiangong. Drilling technologies for horizontal wells of Gulong shale oil in Daqing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(6): 12-17.

大庆古龙页岩油水平井钻井技术

迟建功

(中国石油集团大庆钻探工程公司, 黑龙江大庆 163000)

摘要: 大庆油田古龙页岩油区块水平井存在井壁易失稳、井眼轨迹控制难度大、井眼清洁困难和固井质量得不到保证等钻井技术难点。为克服上述技术难点,进行了井台井组和井身结构优化、钻井参数优选、井眼轨迹控制、钻井液优选和固井施工优化等技术研究,形成了适用于大庆古龙页岩油水平井的钻井技术。古龙页岩油区块的10口井应用了该技术,钻井过程中未出现井壁失稳的情况,固井质量得到提高,与该区块未应用该技术的水平井相比,平均机械钻速提高了79.91%,在平均水平段长度增加265.13 m的前提下,平均钻井周期缩短了40 d。现场应用结果表明,该技术可以解决古龙页岩油水平井存在的钻井技术难点,为古龙页岩油的高效勘探开发提供技术支持。

关键词: 页岩油; 水平井; 井眼轨迹; 井身结构; 古龙区块; 大庆油田

中图分类号: TE243⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2023)06-0012-06

Drilling Technologies for Horizontal Wells of Gulong Shale Oil in Daqing

CHI Jiangong

(CNPC Daqing Drilling Engineering Corporation, Daqing, Heilongjiang, 163000, China)

Abstract: Some technical challenges were encountered while drilling horizontal wells in the Gulong shale oil block of Daqing Oilfield, such as wellbore instability, difficulties of wellbore trajectory control and wellbore cleaning, and uncertain cementing quality, etc. Therefore, the research on technologies such as the optimization of well platform, well group, and casing program, selection of drilling parameters, wellbore trajectory control, drilling fluid optimization, and cementing optimization were carried out. The drilling technologies suitable for horizontal wells of Gulong shale oil were formed. The technologies have been applied to 10 wells in Gulong shale oil block. No wellbore instability was observed during drilling, and the cementing quality was improved. Compared with horizontal wells in the block without these technologies applied, the average rate of penetration was increased by 79.91%, and the average drilling duration was shortened by 40 days while the average length of the horizontal section was increased by 265.13 m. The field application results show that the technologies can solve the technical difficulties of drilling in horizontal wells of the Gulong shale oil, and provide technical support for its efficient exploration and development.

Key words: shale oil; horizontal well; wellbore trajectory; casing program; Gulong Block; Daqing Oilfield

我国页岩油储量约为 43.7×10^8 t,已成为我国能源的重要接替之一^[1-2]。大庆油田古龙页岩油区块古页岩油平1井、古页岩油2HC井等重点探井获日产油量 30 m^3 以上高产且试采稳定,并且已有43口直井出油,5口水平井获高产,2021年落实含油面积 1413 km^2 ,新增石油预测地质储量 12.68×10^8 t,实现了大庆油田松辽盆地陆相页岩油的重大战略性突破。古龙页岩油区块主要目的层青山口组分布广、厚度大,岩性主要为层状、纹层状页岩,黏土矿物含

量高,存在井壁易失稳、井眼轨迹控制难度大、井眼净化困难和固井质量难以保证等钻井技术难点。国内主要通过调整井身结构,优化井眼清洁参数、钻井液及水泥浆配方等技术措施解决以上技术难点。通过学习借鉴国内外页岩油水平井钻井技术^[3-9],笔者从井台井组和井身结构优化、井眼轨迹控制、钻井液优选等方面入手,形成了大庆古龙页岩油水平井钻井技术。现场应用结果表明,该技术可以解决古龙页岩油水平井钻井技术难点,为古龙页岩油高

收稿日期: 2022-10-16; 改回日期: 2023-06-12。

作者简介: 迟建功(1984—),男,黑龙江大庆人,2007年毕业于大庆石油学院资源勘查工程专业,高级工程师,主要从事钻井技术研究工作。E-mail:chijiangong@163.com。

效开发提供技术支持。

1 地质特性和钻井技术难点

1.1 地质特性

古龙页岩油区块地处黑龙江省大庆市, 位于松辽盆地北部, 为典型的陆相页岩油, 自上而下钻遇第四系、新近系-古近系、明水组、四方台组、嫩江组、姚家组、青山口组、泉头组地层。

新近系-古近系主要为杂色砂砾岩夹灰色泥岩。明水组和四方台组为灰黑色泥岩、粉砂岩。嫩江组和姚家组为泥岩、粉砂岩、页岩。主要目的层青山口组主要为富含有机质、页理非常发育的长英质层状、纹层状页岩, 黏土黏度高, 碳酸盐含量低。泉头组为泥岩、粉砂岩、黑色油斑砂岩。目的层具有烃源岩品质好、储层物性好、油品好, 游离烃含量高、气油比高、压力系数高, 地下地面条件有利等特性。

由于该区块嫩江组黏土矿物以蒙皂石和伊利石为主, 姚家组黏土矿物以伊利石为主, 含量达到 50% 以上, 钻井过程中易出现缩径、钻头泥包和卡钻等情况。青山口组以泥页岩为主, 黏土矿物含量达 60%~80%, 易水化, 造成井壁坍塌、掉块。

1.2 钻井技术难点

1) 地层岩性复杂, 井壁易失稳坍塌。青山口组以泥页岩为主, 岩性硬脆, 微裂缝、孔隙发育, 钻井液滤液易进入地层孔缝中, 使岩石的内聚力和强度降低, 表面易水化, 造成井壁剥落、坍塌。

2) 井眼轨迹控制难度大, 影响钻井质量和时效。由于地层具有各向异性, 地层造斜力差异大, 导致井斜控制困难, 特别是滑动钻进时方位漂移快, 水平段长且存在岩屑床, 造成钻井过程中摩阻大, 井眼轨迹调整困难, 井眼轨迹控制和钻头攻击性无法兼顾, 影响井眼平滑度和施工效率。

3) 水平段施工周期长, 井眼净化困难。页岩油水平井钻井所用油基钻井液的黏度和切力很难达到理想状态。井径不规则, 环空返速低, 降低了钻井液的携岩能力。由于水平段长, 高密度钻井液的循环压耗大, 最优排量受限。

4) 水平段较长, 难以保证固井质量。页岩油水平井为椭圆形井眼, 水平段岩屑下沉底边, 循环洗井难度大; 由于存在大井径井段, 导致套管在重力作用下出现偏心, 窄边冲洗顶替效果差; 存在润湿反转, 界面难清洗, 一二界面胶结强度不易保证; 大

规模压裂, 对水泥石性能要求高; 一次性封固长度超过 4500 m 的井段, 对固井工艺要求高。

2 钻井关键技术

2.1 井台井组优化

为实现古龙页岩油快速建产, 缩短钻井周期, 减少建设投资和降低后期运行成本, 坚持平台部署、整体压裂、立体动用的思路, 部署大井丛平台井组, 实现多层立体动用。根据井场规格、井口位置、平台井组数量, 设计井口间距为 6~10 m, 水平段间距 300~350 m, 便于多部钻机同时施工, 实现工厂化、流程化、集约化作业。

2.2 井身结构优化

由于地质认识及钻井技术的限制, 优化前的井身结构为二开井身结构。依据安全窗口需满足井身结构进一步优化的要求, 针对上部存在流砂层, 大段泥岩易水化膨胀坍塌、易漏失和满足固井一次性封固的要求, 结合古龙页岩油水平井水平段长度超过 2000 m 的情况, 将二开井身结构优化为三开井身结构(见图 1): 一开井段, 采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至井深 211 m, $\phi 339.7$ mm 套管下至井深 210 m, 封固第四系、新近系-古近系; 二开井段, 采用 $\phi 311.1$ mm 钻头钻至井深 2344 m, $\phi 244.5$ mm 套管下至井深 2343 m, 封固明水组、四方台组、嫩江组、姚家组等地层; 三开井段, 采用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至井深 4 688 m, $\phi 139.7$ mm 套管下至井深 4685 m, 封固青山口组。

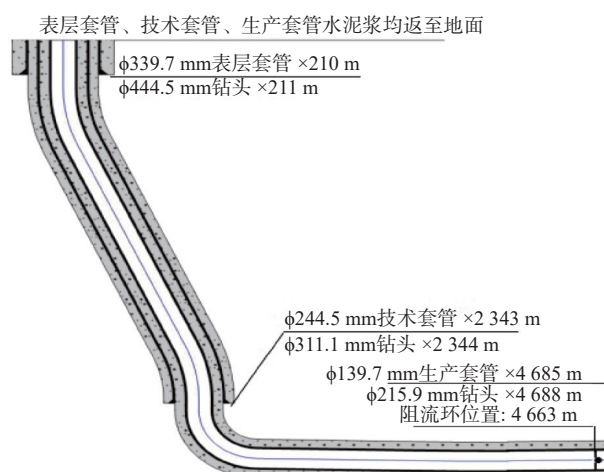


图 1 井身结构示意图

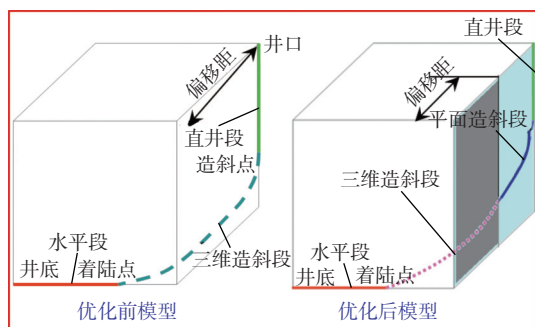
Fig.1 Casing program

2.3 钻井参数优选

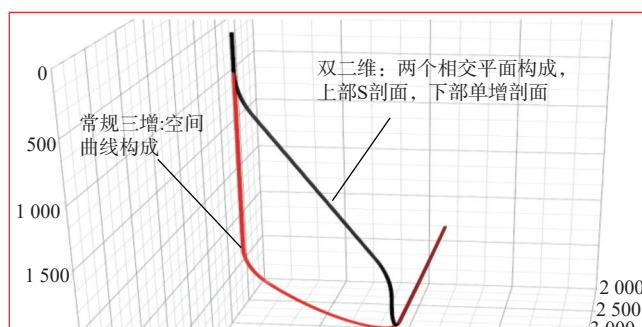
针对古龙页岩油储层地质特点, 应用 Landmark 钻井设计软件, 计算分析排量和转速对水平段岩屑

床厚度的影响。分析结果表明,在机械钻速 15 m/h、转速 100 r/min、排量 34 L/s 条件下,岩屑床厚度为 1.8 mm;排量为 33 L/s 时,岩屑床厚度增加至 3.2 mm;排量达到 38 L/s 以上时,井壁冲刷力增加 22%,对页岩井壁损伤较大。通过计算分析,水平段推荐排量 34~38 L/s,转速 100~120 r/min。

利用 Landmark 钻井设计软件,计算 $\phi 139.7$ mm 钻杆在机械钻速 15 m/h、转速 100 r/min、排量 33/34/38 L/s 条件下施加不同钻压时的受力情况,发现 $\phi 139.7$ mm 钻杆在施加钻压不超过 100 kN 时,不会弯曲;施加 100~140 kN 钻压时,发生正弦屈曲;施加钻压达到 160 kN 时,发生螺旋屈曲。还发现 $\phi 139.7$ mm 钻杆发生屈曲后,钻具涡动速度可达 500 r/min 以上,井壁受到侧向压力瞬时最高可达到 800 MPa。通过计算分析,水平段钻压推荐 60~100 kN。



(a) 双二维井眼轨道优化设计模型



(b) 双二维和三增轨道设计对比

图2 井眼轨道优化设计

Fig.2 Optimization of wellbore trajectory design

为精准控制三开井眼轨迹,首先利用三维地震资料,预测三维地层压力展布规律和裂缝分布形态,对待钻水平井钻井风险进行预测;其次钻前结合邻井资料对地震资料进行二次处理解释,进行地质建模,根据地层自然造斜能力,调整钻井参数,减少井眼轨迹调整次数,提升稳斜效果。针对平台井施工出现的方位漂移现象,进行井眼轨迹控制与地质参数分析,解决方位漂移问题。进行电阻率、地层倾角与井眼轨迹对比分析,提前预判井眼轨迹变化,及时采取调整措施。

利用 StarSteer 地质导向软件建立导向模型,校正井震结合模型,提高模型预测精度。根据录井分析结果,实时动态修正储层地质模型,优化预测待钻井眼轨迹,控制钻头顺利着陆,同时确保在靶层中穿行。水平段施工时应用横纵向联动拟合功能,实时分析当前井眼轨迹处于参考井地层的相对位

2.4 井眼轨迹控制技术

针对页岩油三维水平井井眼轨迹偏移距大的问题,以降低摩阻扭矩、坚持地质工程一体化为原则,在实现地质目的前提下,兼顾降低施工难度。通过合理上移造斜点、将井身剖面由三维变为二维,对井眼轨道进行优化。

采用图2中的方法结合古龙页岩油区块地质特性,将三维井井眼轨道优化为双二维井眼轨道。按照造斜率小于 $6.5^{\circ}/30$ m 的原则,合理上移造斜点,降低造斜率。井眼轨道优化后,降低了防碰预防难度,提高了井眼平滑度,使井眼曲率最高降低 15%,复合钻进比例提升 15%。通过改变偏移距大于 200 m 井的井身剖面形状,实现上部二维井段走完偏移距,下部井段按照常规二维水平井施工。在不缩短水平段长度的情况下,减小了设计完钻井深,降低了摩阻和扭矩。

置,提取地层倾角,提高储层钻遇率。通过钻井前期实践,制定井眼轨迹控制钻具组合,推荐钻井参数(见表1)^[10-13]。

表1 钻井参数推荐

Table 1 Recommended drilling parameters

仪器类型	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	排量/(L·s ⁻¹)
LWD	60~100	50~80	>35
旋转导向	60~100	100~120	>35

LWD 钻具组合: $\phi 215.9$ mm 钻头+ $\phi 172.0$ mm 单弯双稳定器螺杆+ $\phi 172.0$ mm 浮阀+ $\phi 165.1$ mm LWD+ $\phi 127.0$ mm 无磁加重钻杆×1 根+ $\phi 127.0$ mm 斜坡加重钻杆×3 根+ $\phi 165.1$ mm 震击器+ $\phi 127.0$ mm 斜坡加重钻杆×6 根+ $\phi 139.7$ mm 斜坡钻杆。

旋转导向钻具组合: $\phi 215.9$ mm 钻头+ $\phi 172.0$ mm 旋转导向工具+ $\phi 172.0$ mm 浮阀+ $\phi 127.0$ mm 无磁加

重钻杆×1 根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×3 根+ $\phi 165.1$ mm 震击器+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×6 根+ $\phi 139.7$ mm 斜坡钻杆。

2.5 钻井液优选

依据前期钻井实践,综合考虑地层黏土矿物含量高,钻井施工过程中要求钻井液具有较好的封堵性、流变性和携岩能力,据此水平段优先采用油包水油基钻井液。

图 3 所示为地层三压力剖面。由图 3 可知,井斜角为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 水平段的坍塌压力当量密度最高达到 1.58 kg/L 。结合测井资料,利用有限元法模拟井底压力,综合考虑井底压力安全上限和坍塌压力附加,推荐目的层钻井液密度为 $1.71 \sim 1.73 \text{ kg/L}$,从而实现井壁力学平衡。针对页岩孔缝特征,优选了粒径为 $10 \text{ nm} \sim 54 \mu\text{m}$ 的纳米聚合物封堵材料,同时复配刚性粒子及可变形粒子封堵材料,封堵效果提高 141%,滤失量降低 25%,有效降低了钻井液在页岩中的滤失量和压力传递速度,延缓了页岩劣化程度,提高了井壁稳定能力。钻井液密度调整至 $1.71 \sim 1.73 \text{ kg/L}$ 后,钻井液流变性控制难度增加,在保证钻井液凝胶结构稳定的前提下,调整主辅乳化剂配比,改善低转速黏度;优选小分子强极性润湿剂,优化辅乳化剂加量,改善钻井液对固相表面的润湿能力,钻井液抗岩屑侵能力提高 30% 以上,钻井液性能满足了井壁稳定、井眼清洁的施工要求^[14-19]。

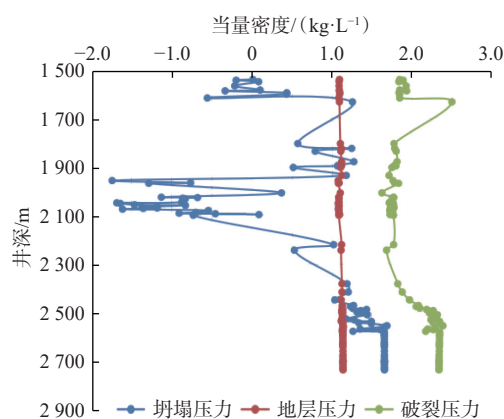


图 3 地层三压力剖面

Fig.3 Three-pressure formation profile

油包水油基钻井液配方:柴油+0~3.0% 有机土+3.0%~4.0% 主乳化剂+1.0%~2.0% 辅乳化剂+3.0% 油包水降滤失剂+2.0% CaO+ CaCl₂ (20%~40%) 水溶液+2.0% 超细碳酸钙+1.0% 封堵剂 I 型+0.7% 封堵剂 II 型+0.2%~0.5% 润湿剂+重晶石粉。

在现场施工中,主辅乳化剂的加量随老浆的性能和新浆老浆的配比进行调整;润湿剂的加量随老浆的性能和钻井液密度调整,有机土的加量随老浆的性能进行调整。钻井液性能:密度 $1.71 \sim 1.73 \text{ kg/L}$,漏斗黏度 $50 \sim 60 \text{ s}$,含砂量 $\leq 0.5\%$,pH 值 $9 \sim 11$,初切力 $3 \sim 8 \text{ Pa}$,终切力 $3 \sim 16 \text{ Pa}$,动切力 $8 \sim 16 \text{ Pa}$,破乳电压 $\geq 400 \text{ V}$ 。

2.6 固井施工工艺优化

古龙页岩油水平井固井施工过程中,要求注水泥排量在 $2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上;水泥浆具有防窜性好和滤失量低性能,具有良好的压稳、冲洗、顶替、防漏和封固能力,其固化所形成水泥石具有抗压强度和耐久性高及渗透率和弹性模量低的性能^[20-27]。因此,选用三凝韧性防窜水泥浆。该水泥浆具有较高的冲洗顶替效率和防漏能力,满足古龙页岩油水平井固井施工的要求。

古龙页岩油长水平段水平井套管安全下入居困难,同时受页岩段井径不规则、高密度油基钻井液等影响,固井顶替效率低;水平段长、安全密度窗口窄,一次封固优化设计难度大,大规模体积压裂易损伤水泥石。针对以上技术难点,进行页岩油固井技术研究及优化,确立了古龙页岩油水平井水泥环保持完整性的技术指标,水泥石的弹性模量小于 4.5 GPa 、泊松比大于 0.16 、抗压强度大于 30.0 MPa 、抗拉强度大于 2.5 MPa 。应用新型多糖复合体悬浮剂,促使前置液具有良好的相容性、较低的紊流返速;合成了具有不同亲油亲水平衡值的表面活性剂,提高了对油污的乳化、水润湿反转能力;采用数值模拟方法优化多级冲洗顶替方案,水平段冲洗顶替效率达到 95% 以上。依据完整性机理研究,研发了树脂增韧剂、成膜防窜剂等关键处理剂,形成了抗窜性能好、滤失量低的防窜韧性水泥浆,其固化形成的水泥石具有强度和耐久性高、渗透率和弹性模量低的特点。设计采用双密度三凝水泥浆,配合井口压力控制技术,进一步提高水泥封固质量。依据井眼轨迹、井径、钻井液性能和承压情况等实际井况,模拟计算当量循环密度、窄边顶替效率、环空水泥浆填充度等关键参数,分析居中度、钻井液性能、固井前置液、水泥浆、施工排量等对固井质量的影响程度,以制定提高固井质量的技术措施。

为了保证下入套管居中,直井段每 2~4 根套管安放 1 个一体式弹性扶正器,水平段每 1 根套管安放 1 个一体式弹性扶正器。钻井液漏斗黏度 $\leq 60 \text{ s}$,动切力 $\leq 10 \text{ Pa}$,终切力 $\leq 12 \text{ Pa}$;冲洗隔离液漏斗黏

度 ≤ 45 s, 动切力 ≤ 7 Pa, 终切力 ≤ 7 Pa。水泥浆体系为前导+低密度+双凝韧性防窜水泥浆, 现场使用立式罐供灰, 三注两替, 注灰排量为 $1.65\sim 2.20$ m³/min, 顶替排量为 $1.0\sim 2.2$ m³/min。

3 现场应用效果

古龙页岩油区块的10口水平井应用了上述页岩油水平井钻井技术, 平均完钻井深4 790.63 m, 平均垂深2 318.70 m, 平均水平段长度2 339.13 m, 平均机械钻速32.15 m/h, 平均钻井周期27.15 d。与前期所钻水平井相比, 在平均水平段长度增加265.13 m的前提下, 平均机械钻速提高了79.91%, 平均钻井周期缩短了40 d。应用油包水钻井液后, 水平井段钻井密度维持在 $1.71\sim 1.73$ kg/L, 井壁稳定无剥落掉块。通过优化固井施工技术, 水泥外加剂费用节省40%, 水平段固井质量优质井段占比85.17%, 全井固井质量优质井段占比83.54%。

SY1-Q2-H4井完钻井深4 460.00 m, 平均机械钻速33.0 m/h, 钻井周期16 d, 建井周期24 d, 水平段应用油包水钻井液后, 钻井液支撑、悬浮、携岩综合性能明显提升, 未发生剥落掉块。该井采用双二维井眼轨道设计和LWD导向控制井眼轨迹技术, 保证一次中靶, 储层钻遇率达到95%。采用前导+三凝韧性防窜水泥浆, 提高了水泥浆冲洗顶替效率, 固井质量优质。

4 结论与建议

1) 针对大庆古龙页岩油水平井钻遇地层地质特性和钻井技术难点, 通过优化井身结构、优选钻井参数、优化井眼轨道和采取井眼轨迹控制措施、优选钻井液、优化固井施工工艺, 形成了适用于古龙页岩油水平井的钻井技术。

2) 现场应用效果表明, 页岩油水平井钻井技术可以提高钻井时效, 减少井下复杂情况和故障, 提高固井质量, 满足页岩油水平井钻井要求, 为大庆古龙页岩油高效勘探开发提供技术支撑。

3) 大庆古龙页岩油区块地质条件复杂, 目前的页岩油水平井钻井技术还存在一定的局限性, 需进一步开展钻井提速技术、钻井液重复利用与无害化处理、完井工艺优化等技术研究, 从而形成完善的水平井钻井配套技术, 实现古龙页岩油钻井提质提速, 推动陆相页岩油规模动用。

参考文献

References

- [1] U. S. Energy Information Administration. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy, 2013.
- [2] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451–458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 451–458.
- [3] 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.
- [4] 柳伟荣, 倪华峰, 王学枫, 等. 长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 9–14.
LIU Weirong, NI Huafeng, WANG Xuefeng, et al. Shale oil horizontal drilling technology with super-long horizontal laterals in the Longdong region of the Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 9–14.
- [5] 孙永兴, 贾利春. 国内3 000 m长水平段水平井钻井实例与认识[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 393–401.
SUN Yongxing, JIA Lichun. Cases and understandings on the drilling of horizontal well with horizontal section of 3 000 m long in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(4): 393–401.
- [6] 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.
- [7] 袁建强. 济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 1–8.
YUAN Jianqiang. Key engineering technologies for three-dimensional development of multiple formations of shale oil in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 1–8.
- [8] 孙欢, 朱明明, 王伟良, 等. 长庆页岩油水平井H90-3井超长水平段防漏堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 16–21.
SUN Huan, ZHU Mingming, WANG Weiliang, et al. Lost circulation prevention and plugging technologies for the ultra-long horizontal section of the horizontal shale oil well Hua H90-3 in Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 16–21.
- [9] 席传明, 史玉才, 张楠, 等. 吉木萨尔页岩油水平井JHW00421井钻完井关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(6): 673–678.
XI Chuanming, SHI Yucan, ZHANG Nan, et al. Key technologies for the drilling and completion of shale oil horizontal well JHW00421 in Jimusar[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(6): 673–678.
- [10] 倪华峰, 杨光, 张延兵. 长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 29–33.
NI Huafeng, YANG Guang, ZHANG Yanbing. ROP improvement

- technologies for large-cluster horizontal shale oil wells in the Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 29–33.
- [11] 全继昌, 秦雪峰, 张娜, 等. 河南油田陆相页岩油水平井钻井配套技术[J]. *内蒙古石油化工*, 2012, 38(24): 109–111.
TONG Jichang, QIN Xuefeng, ZHANG Na, et al. Matching technology of horizontal well drilling in continental shale of Henan Oilfield[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2012, 38(24): 109–111.
- [12] 李玉海, 李博, 柳长鹏, 等. 大庆油田页岩油水平井钻井提速技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(5): 9–13.
LI Yuhai, LI Bo, LIU Changpeng, et al. ROP improvement technology for horizontal shale oil wells in Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 9–13.
- [13] 田逢军, 王运功, 唐斌, 等. 长庆油田陇东地区页岩油大偏移距三维水平井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 34–38.
TIAN Fengjun, WANG Yungong, TANG Bin, et al. Drilling technology for long-offset 3D horizontal shale oil wells in the Longdong Area of the Changqing Oilfield [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 34–38.
- [14] 田平, 薛建国, 蒋建宁, 等. 河南油田泌页 HF1 水平井钻井技术[J]. *石油地质与工程*, 2012, 26(3): 88–90.
TIAN Ping, XUE Jianguo, JIANG Jianning, et al. Drilling technology of BY-HF1 horizontal well in Henan Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2012, 26(3): 88–90.
- [15] 田增艳, 杨贺卫, 李晓涵, 等. 大港油田页岩油水平井钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 59–65.
TIAN Zengyan, YANG Hewei, LI Xiaohan, et al. Drilling fluid technology for horizontal shale oil wells in the Dagang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 59–65.
- [16] 常海军, 李祥群, 张娜, 等. 河南油田页岩油长水平段水平井钻井实践[J]. *复杂油气藏*, 2013, 6(2): 66–70.
CHANG Haijun, LI Xiangqun, ZHANG Na, et al. Drilling practice of long horizontal section well in shale oil reservoir in Henan Oilfield[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2013, 6(2): 66–70.
- [17] 王显光, 李雄, 林永学. 页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(2): 17–22.
WANG Xianguang, LI Xiong, LIN Yongxue. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(2): 17–22.
- [18] 金军斌, 高书阳, 陈晓飞. 帅页 3-7HF 页岩油小井眼水平井水基钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(3): 349–355.
JIN Junbin, GAO Shuyang, CHEN Xiaofei. Drilling fluid technology for drilling the slim hole horizontal shale oil well Shuye3-7HF[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(3): 349–355.
- [19] 万绪新. 渤南区块页岩油地层油基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(6): 44–50.
- WAN Xuxin. Oil-based drilling fluid applied in drilling shale oil reservoirs in Bonan Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(6): 44–50.
- [20] 沈丽, 王宝田, 宫新军, 等. 气制油合成基钻井液流变性能影响评价[J]. *石油与天然气化工*, 2013, 42(1): 53–57.
SHEN Li, WANG Baotian, GONG Xinjun, et al. Evaluation on rheological properties of GTL based drilling fluids[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2013, 42(1): 53–57.
- [21] 樊好福, 臧艳彬, 张金成, 等. 深层页岩气钻井技术难点与对策[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(3): 20–23.
FAN Haofu, ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, et al. Technical difficulties and countermeasures of deep shale gas drilling[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(3): 20–23.
- [22] 王建龙, 冯冠雄, 刘学松, 等. 长宁页岩气超长水平段水平井钻井完井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 9–14.
WANG Jianlong, FENG Guanxiong, LIU Xuesong, et al. Key technology for drilling and completion of shale gas horizontal wells with ultra-long horizontal sections in Changning Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 9–14.
- [23] 刘茂森, 付建红, 白璟. 页岩气双二维水平井轨迹优化设计与应用[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(2): 147–150.
LIU Maosen, FU Jianhong, BAI Jing. Optimization of shale gas dual-2D horizontal-well trajectories and its application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 147–150.
- [24] 杨灿, 王鹏, 饶开波, 等. 大港油田页岩油水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 34–41.
YANG Can, WANG Peng, RAO Kaibo, et al. Key technologies for drilling horizontal shale oil wells in the Dagang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 34–41.
- [25] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 1–10.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 1–10.
- [26] 刘毅. 渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组页岩油储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 1–10.
LIU Yi. Study on shale oil reservoir characteristics of Shahejie Formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018: 1–10.
- [27] 何立成. 胜利油田沙河街组页岩油水平井固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 45–50.
HE Licheng. A cementing technology for horizontal shale oil wells in Shahejie Formation of Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 45–50.

[编辑 刘文臣]