



长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术

倪华峰 杨光 张延兵

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

NI Huafeng, YANG Guang, ZHANG Yanbing

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

长庆油田华H50-7井超长水平段钻井液技术

Drilling Fluid Technology for Ultra-Long Horizontal Section of Well Hua H50-7 in the Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(4): 28-36 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020050>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021076

引用格式: 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.

长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术

倪华峰, 杨光, 张延兵

(中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西西安 710018)

摘 要: 长庆油田页岩油大井丛水平井钻井过程中存在摩阻扭矩大、滑动钻进托压、机械钻速低和储层地质导向识别程度低等问题, 为解决这些问题, 进行了大井丛水平井多层系布局、大偏移距设计、三维井眼轨迹控制和提速工具配套等关键技术研究, 在平台井网/井序优化部署、密集式井组轨道防碰设计与控制、水平井一趟钻完钻、储层随钻评价与精准控制和注水区安全钻井等方面取得了技术突破, 形成了长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术。该技术在华 H40、华 H60 大井丛平台进行了现场应用, 井丛水平井井数最多达 22 口, 平均钻井周期 18.94 d, 较未采用该技术时缩短 7.5%。研究与现场应用表明, 大井丛水平井钻井提速技术实现了长庆油田页岩油的规模开发, 助推了陇东国家级页岩油示范区的建设。

关键词: 页岩油; 水平井; 大井丛; 大偏移距; 三维井眼; 长庆油田

中图分类号: TE242 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)04-0029-05

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

NI Huafeng, YANG Guang, ZHANG Yanbing

(Changqing Drilling Company, CNPC Chuangqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

Abstract: Large frictional torque, backpressure during slide drilling, low rate of penetration (ROP), poor recognition of reservoirs by geosteering, and other problems are encountered during the drilling of large-cluster horizontal shale oil wells in the Changqing Oilfield. In this regard, this paper studied the multi-layer layout of large-cluster horizontal wells, large offset design, three-dimensional well trajectory control technology, and drilling tools for ROP improvement. Technical breakthroughs were made in the optimized deployment of well patterns/sequences, the anti-collision design between dense well group trajectories, the completion of horizontal well in one trip, the evaluation and accurate control of reservoirs while drilling, and the safe drilling in water injection areas, etc. Finally, the ROP improvement technologies for large-cluster horizontal shale oil wells in the Changqing Oilfield were developed. The field tests of the technologies were carried out in large-cluster well platforms, the Platform Hua H40 and the Platform Hua H60. The maximum number of horizontal wells in the well clusters was 22, with an average drilling cycle of 18.9 d, which was shortened by 7.5% after using the technologies. The research and field application demonstrate that the ROP improvement technologies for large-cluster horizontal wells have realized the large-scale development of shale oil in the Changqing Oilfield, promoting the construction of the Longdong National Shale Oil Demonstration Base.

Key words: shale oil; horizontal well; large well cluster; large offset; three-dimensional borehole; Changqing Oilfield

2018 年, 长庆油田页岩油开发进入快速发展阶段, 为有效动用单平台控制储层、最大限度暴露油

层面积, 开展了大井丛水平井井组钻井, 以推动页岩油规模开发。开发初期, 丛式水平井井组主要以单

收稿日期: 2021-03-15; 改回日期: 2021-07-26。

作者简介: 倪华峰 (1971—), 男, 四川威远人, 1996 年毕业于西南石油学院钻井工程专业, 高级工程师, 主要从事定向井、水平井钻井完井技术研究与相关管理工作。E-mail: zjszynhf@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团科学研究与技术开发项目“深井与水平井提速提效技术集成与示范”(编号: 2018E-2108), 中国石油集团油田技术服务有限公司科学研究与技术开发项目“页岩油大井丛平台优快钻井设计与试验”(编号: 2021T-02-01) 联合资助。

层系开发为主, 偏移距 300~500 m, 水平段长 1500 m, 最大丛式水平井井组华 H6 平台完钻 12 口水平井, 但存在水平段井漏井塌、储层钻遇率低、三维井眼摩阻扭矩大、长水平段完井风险高等问题, 常规钻井工艺难以满足页岩油开发的要求^[1-2]。为此, 笔者分析了国内外非常规油气藏开发现状, 借鉴北美地区的页岩气成功经验, 利用“工厂化”大井丛作业, 开展了“多层系、立体式”大井丛水平井钻井试验, 通过大偏移距设计、井口防碰优化、三维井眼降摩减阻剖面 and 自研完井工具, 形成了与开发方式相配套的页岩油大井丛水平井钻井提速技术, 最大井丛水平井数 22 口, 最大偏移距 1 000 m 以上, 提高了钻机效率, 节约了土地资源, 实现了页岩油快钻井、高效开发。

1 钻井技术难点

2018 年, 长庆油田进行了页岩油大井丛钻完井、大通径+可溶桥塞体积压裂先导性试验; 2019 年, 采用集群化布井模式, 完成水平井的水平段长 1 500~2 000 m, 增产显著。累计完成水平井 212 口, 但大井丛平台水平井数量大多在 6~8 口, 最多达到 12 口, 最大偏移距 417 m, 水平段长 2 000 m 的水平井多采用三开井身结构, 钻井周期在 20 d 以上, 建井周期在 30 d 以上, 与长庆页岩油规模开发需求差距较大^[3-4]。分析认为, 钻井过程中主要存在以下技术难点:

1) 裸眼段长, 井下情况复杂。采用二开井身结构, 一开封固浅表层, 二开裸眼段长, 钻进时黄土层易漏失坍塌、洛河组易漏失, 严重影响钻井时效; 在长水平段钻进时, 储层分布不均质造成频繁钻遇泥岩, 现有地质导向技术识别岩性能力差, 依靠钻井循环出砂判断储层走向, 钻进施工不连续, 效率低; 井漏、井塌和溢流同存, 水平段存在裂缝性漏失, 钻井液安全密度窗口窄, 钻井安全风险高。

2) 井眼轨迹控制难度大。大井丛小井距、加密布井等易造成井序排列错乱, 三维井眼、预防防碰、长水平段造成全井段需要绕障, 大偏移距井眼轨道复杂, 定向段长、方位变化大, 需要常规导向工具频繁滑动钻进和上下调整井眼轨迹, 造成滑动钻进比例增大, 导致机械钻速低, 着陆点软着陆困难。

3) 摩阻扭矩大。大井丛带来的大偏移距、长水平段、长裸眼段, 导致位垂比大, 钻具受力复杂, 钻井过程中摩阻扭矩呈非线性增加, 水平段延伸困

难; 固井时套管下入困难, 固井质量难以保证。

2 钻井提速关键技术

结合长庆油田页岩油开发进程, 进行大井丛多层系布局、大偏移距设计、三维井眼轨迹控制等关键技术的研究与应用, 并开展配套提速工具试验, 实现了提速提效, 形成了适合长庆油田页岩油大井丛水平井的钻井提速技术^[5-7]。

2.1 大井丛多层系布局设计

针对不同层系的开发需求, 确定了井组井数最大化原则和井组施工顺序方案, 页岩油大井丛水平井平台最多布井 22 口, 双钻机反向平行施工, 优化水平井井位部署及井眼轨道设计, 最大限度增加水平段长度、提高储层钻遇率, 从追求井数多到追求平台钻遇储层长度最长。

根据开发层系不同, 大井丛水平井采用大偏移距设计、井口防碰优化, 在有限的井场内形成了 3 种大井丛布井方式(见图 1), 实现了单层到 3 层立体式开发, 垂深跨度从 40 m 增加到 120 m, 大井丛水平井平台实钻水平井多达 22 口。

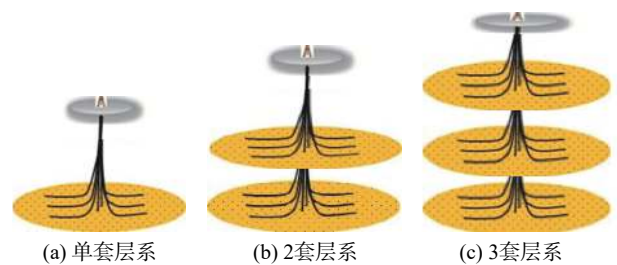


图 1 不同层系立体式开发布井方式

Fig.1 Three-dimensional well patterns in different layer series

单套层系: 垂深跨度 30~40 m, 主要开发 1 个目的层, 采用丛式水平井井组开发, 单平台布井 4~6 口, 如华 H1 平台布井 4 口。

2 套层系: 垂深跨度 60~80 m, 主要开发 2 个目的层, 采用大丛式立体水平井组开发, 单平台布井 6~12 口, 如华 H6 平台布井 12 口。

3 套层系: 垂深跨度 100~120 m, 主要开发 3 个目的层, 采用大丛式立体水平井组开发, 单平台布井 10~20 口, 如华 H40 平台布井 20 口。

2.2 大偏移距设计

采用大井丛开发时, 需要开展大偏移距三维水平井钻井技术试验。超大井组试验 150~200 m 井间距, 通过增大偏移距设计, 解决了井场面积不足

与大井丛布井之间的矛盾^[8-10]。常规水平井开发模式主要是二维水平井、单井和单层,井场建设数量多,井区建设周期长,井间距 400 m;大井丛水平井开发模式为三维水平井、多井、多层,单平台实钻水平井最多达 22 口,井区建设周期短,井间距 200 m。

采用三维防碰技术,保障了大井丛、小井距、全井段安全防碰。通过预分防碰设计,三维安全圆柱预分分离防碰设计,邻井同垂深扭方位时,增大方位差;南北向平行靶区、小靶前距走负位移;分区入窗,水平段在同一直线施工,入靶预算时,考虑防碰因素,分外靶区、内靶区控制入靶区。

华 H40 平台由 2 台钻机反向相向分区施工,直井段错开造斜点,防碰;斜井段增大偏移井斜角、方位角;入窗点入窗垂深、左右偏移,通过提高纠偏井斜,增加最大偏移距,最大平台布井数达到 22 口,最大偏移距 834 m,平均偏移距 426 m(见图 2)。

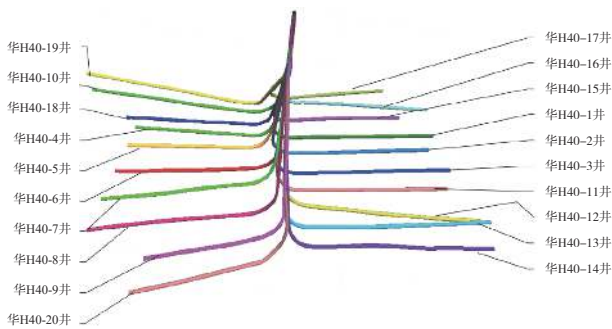


图 2 华 H40 平台 20 口水平井分布示意

Fig.2 Distribution of 20 horizontal wells on the Platform Hua H40

2.3 三维井眼轨迹控制

针对页岩油三维井眼轨迹控制偏移距大的问题,基于常规螺杆钻井工具,结合三维剖面设计的关键参数,以降低实钻摩阻扭矩、有利于现场实施为目标,开展了大偏移距三维剖面优化设计。通过对三维井眼剖面进行优化设计,实现了该设计方法首次在国内大井丛的应用,通过优选“六段式”三维井身剖面和分析钻柱受力,降低了摩阻扭矩。

“六段式”剖面在三维变向段后增加了 1 个二维低造斜率增斜段,以解决地层垂深及实际造斜率不确定的问题,最大限度提高复合钻井比例,提高斜井段的施工效率,精准入窗。

根据偏移距、靶前距选择 1.50° 或 1.25° 螺杆;控制消偏井斜角不大于 30° ;目标靶体上倾时,将井斜角控制在 $88^\circ \sim 90^\circ$ 复合钻进,着陆入窗;目标靶体下倾时,将井斜角控制在 $86^\circ \sim 88^\circ$ 滑动钻进,快速入

窗;第一趟钻钻至井斜角大于 78° 时直接下入水平段钻具;井斜角大于 60° 后控制增斜率不大于 $6.0^\circ/30\text{m}$,控制斜井段最大造斜率不大于 $10.5^\circ/30\text{m}$;水平段通过滑动钻进微调井眼轨迹。

通过大偏移距三维剖面设计,华 H40 平台实现了由二维水平井为主向全三维水平井的转变。华 H40 平台最大偏移距 834 m,最大纠偏角 32.5° ,钻进期间最大摩阻 50 kN,下套管最大摩阻 25 kN。

2.4 适合激进钻井参数的 PDC 钻头、螺杆优选

借鉴美国页岩气开发经验,全面推广激进钻井参数,根据现场钻井设备,分区块、分地层细化螺杆、钻头与钻井参数的匹配原则。螺杆突出大尺寸、多级数、大功率特性;全面强化钻压、转速和排量等钻井参数,钻压增加 $4 \sim 5$ kN,泵压增量由原来的 $2 \sim 3$ MPa 提高至 $3 \sim 5$ MPa。采用激进钻井参数后,水平段单根滑动钻时由 1.5 h 缩短至 1.0 h。但采用激进钻井参数后,现有钻头、螺杆存在钻头磨损严重、螺杆增斜率高和输出功率偏低等问题。针对以上情况,需分段优选 PDC 钻头和螺杆。

采用 PDC 钻头进行斜井段施工时侧重一趟钻,钻头选型注重使用寿命,选用六刀翼 $\phi 16.0$ mm 高耐磨复合片钻头。水平段以砂岩为主,调整段少,选用五刀翼 $\phi 16.0$ mm 复合片钻头,侧重提高机械钻速。考虑地层的稳定性和普适性及设备负荷的情况,排量越大,携砂效果越好。

将螺杆外径由 165.1 mm 调整为 172.0 mm,以增加壳体容积,增大螺杆输出功率;级数由 3.5 级变成 5.5 级,以增大螺杆压降,提高输出功率;螺杆头数保持为 7~8 头,保证转速不变,输出扭矩不降低;调整钻具组合中双稳定器的尺寸和间距,降低增斜率,减少滑动钻进比例,提高机械钻速和一趟钻的成功率^[11-13]。

2.5 钻井液性能优化

根据地层特点和各井段的控制要求,在保障井控安全和井下安全的前提下,安定组以上井段采用全絮凝无固相钻井液,仅用 PAM 絮凝处理剂,将漏斗黏度由 29 s 降至 28 s,由全井提黏改为加强清扫。直罗组至转化前井段要求钻井液具有抑制防塌性兼有絮凝性,在 PAM 絮凝基础上增大 KCl 含量,将漏斗黏度由 32 s 降至 30 s,由全井提黏改为保持入口黏度;适当推迟转化时间,降低转化密度,提高施工速度,二开井身结构井推迟至井斜角约为 45° 时进行转化,三开井推迟至井斜角约为 60° 时进行转化。

同时,优化钻井液配方,用有机盐代替重晶石,以保证井眼稳定;用白沥青和树脂代替黑色沥青类处理剂,以保护储层;优选 ZDS 等可全酸溶的封堵剂,以达到提速提效的目的。

2.6 降摩减阻工具应用

制约水平段延伸的因素除了摩阻、扭矩及钻具屈曲外,准确钻遇储层也是实现水平段延伸的关键因素,在引入旋转导向钻井系统、方位伽马和电阻率等测量工具提高钻遇率的同时,进行了自研降摩减阻工具的现场试验,取得了较为明显的效果。

2.6.1 水力振荡器

为了降低三维水平井大偏移距、长水平段带来的高摩阻大扭矩影响,减少滑动钻进中的托压,自主研制了水力振荡器,应用成本与国外的水力振荡器相比大幅度降低,但使用效果差距较大。因此,进一步优化了自研水力振荡器的安装位置,距钻头的距离由 150~180 m 调整为 80~110 m。3 口井应用后,平均滑动机械钻速提高 7.5%,滑动摩阻降低 20.0%。

2.6.2 完井工具

围绕大偏移距长水平段优快完井开展技术攻关,通过应用倒划眼稳定器、盲板式套管悬浮器和通测接头等工具,实现了大偏移距长水平段套管的安全下入。

通井时下入倒划眼稳定器,破坏岩屑床,清洁井眼;长水平段用岩屑清除钻杆修复井壁,防止形成岩屑床;下套管选用盲板式套管悬浮器替代原有滑套式悬浮器,增强套管附件的密封性、可靠性,使用后每 100 m 下放摩阻降低 0.5 kN;电测时使用通测接头,到底后循环一周,短程起下钻至入窗点,短起阶段正常到底循环一周注入润滑浆,实现通测一趟钻,作业时间可缩短 1.2 d。

对于井眼较复杂的水平井,应用下套管自动灌浆装置和旋铣引鞋,通过随时建立循环,保证套管顺利下至设计井深^[14-16]。下套管自动灌浆装置集灌浆、循环功能于一体,可实现边循环边下套管,避免套管粘卡;水平段钻遇泥岩 1/3 以上、泥岩发生垮塌的井和堵漏、溢流压井形成岩屑床的井下入旋铣引鞋,通过旋转破坏井筒岩屑床,确保套管顺利下至设计井深;同时优化钻井液动切力、动塑比和黏度等性能参数,以提高钻井液的携岩能力。

3 现场应用

通过技术攻关,形成了以大井丛井序优化与立

体式布井、大平台三维优快钻井、高性能水基钻井液防漏堵漏及重复利用和完井配套工艺为核心的大井丛水平井钻井提速技术。自 2020 年应用该技术完成水平井 195 口,水平段长度由 1 500 m 延长至 4 000 m 以上,大平台布井数量由 12 口增加至 22 口,水平段长度在 3 000 m 以下的井均采用二开井身结构,二开裸眼段近 5 000 m,单井最短钻井周期 8.50 d,平均完钻井深 4 037 m,在平均井深增加 207 m 的情况下,平均钻井周期由 20.48 d 缩短至 18.94 d,缩短了 7.5%,平均机械钻速 19.92 m/h。

长庆页岩油大井丛水平井以延长水平段长度、单平台布井最多和防碰最优化为目标,利用自研的水平井软件进行布局优化,高效分配各钻机施工井数,实现三维立体式安全高效钻井。实钻过程中直井段不直、后续已部署井难以调整与已钻井的最近距离时,实时优化施工方案,后续井直井段严格打直,同时对正钻井与已钻井进行防碰扫描,及时调整钻井顺序与井眼轨迹。通过持续优化大井丛钻井顺序,不仅满足了油藏开发要求,而且实现了防碰安全。

大平台采用三维水平井优快钻井技术,分井段优化井眼轨迹控制模式、钻具组合,强化钻井参数。直、斜井段采用 MWD 仪器带方位伽马工具,采用涡轮发电系统供电,保持到斜井段入窗;钻具组合中增加水力振荡器和无磁抗压缩钻杆,降低钻具刚性,提高滑动钻进效率^[17];钻井参数为钻压 100~140 kN,复合钻进泵压提高 3~4 MPa、滑动钻进泵压提高 2 MPa 左右,排量 32~34 L/s,环空返速 1.10~1.30 m/s,转盘转速 75 r/min。水平段选用高耐磨球形稳定器,加强水平段井眼轨迹控制,降低滑动钻进比例,提高施工效率;钻井参数为钻压 80~120 kN,复合钻进泵压提高 3 MPa 左右、滑动钻进提高 2 MPa 左右,排量 32 L/s,环空返速 1.10 m/s,转盘转速 60 r/min。2020 年,2 个平台先后完成不少 20 口的水平井,其中华 H40 平台完成水平井 20 口,水平段总长 40 280 m,平均钻井周期 16.97 d,建井周期 25.33 d;华 H60 平台设计 20 口水平井,实际完成 22 口,总进尺 88 157 m,水平段总长 33 141 m,平均钻井周期 18.06 d,建井周期 26.47 d。

4 结论与建议

1)大平台多层系布井设计满足了页岩油大井丛水平井“平台钻遇储层长度最大”的需求,在长庆

页岩油开发中得到了推广应用,通过增加平台布井数量和水平段长度,降低了完井作业带来的技术风险,满足了页岩油大井丛水平井规模开发要求。

2)大偏移距水平井三维井眼轨迹控制技术解决了大平台偏垂比大、钻具受力屈曲带来的摩阻扭矩大等难题。

3)以经济适配性和高效降摩减阻为目标,通过自研国产化降摩减阻工具,创建了页岩油水平井高效、经济导向钻井技术模式,实现了钻井完井技术配套和优快钻井。但地质导向工具的成本较高,国产工具普遍处于试验阶段,迫切需要研发“筒配版”储层高效识别工具,提高储层钻遇率,实现页岩油长效开发。

参 考 文 献

References

- [1] 崔月明, 史海民, 张清. 吉林油田致密油水平井优快钻井完井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 9-13.
CUI Yueming, SHI Haimin, ZHANG Qing. Optimized drilling and completion technology for horizontal wells in tight oil reservoirs in the Jilin Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 9-13.
- [2] 李细鸿. 致密油水平井井眼轨迹控制技术研究与应用[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(6): 101-102.
LI Xihong. Research and application of borehole trajectory control technology for horizontal wells in tight oil[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(6): 101-102.
- [3] 于欣, 张振, 郭梦扬, 等. 抗高温油基钻井液堵漏剂的研制与应用: 以龙马溪组页岩气井 W204H 为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2): 168-172.
YU Xin, ZHANG Zhen, GUO Mengyang, et al. Development and application of high temperature resistant oil-based drilling fluid plugging agent: taking shale gas well W204H of Longmaxi Formation as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(2): 168-172.
- [4] 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.
- [5] 梁荣亮, 陈世昌, 刘希宏. 陇东地区水平井钻探技术现状及展望[J]. *石化技术*, 2016, 23(9): 277-278.
LIANG Rongliang, CHEN Shichang, LIU Xihong. Longdong horizontal well drilling technology status and prospects[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2016, 23(9): 277-278.
- [6] 彭兴, 周玉仓, 龙志平, 等. 南川地区页岩气水平井优快钻井技术进展及发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 15-20.
PENG Xing, ZHOU Yucang, LONG Zhiping, et al. Progress and development recommendations for optimized fast drilling technology in shale gas horizontal wells in the Nanchuan Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 15-20.
- [7] 焦姣, 杨金华, 田洪亮. 致密油地质特征及开发特性研究[J]. *非常规油气*, 2015, 2(1): 71-75.
JIAO Jiao, YANG Jinhua, TIAN Hongliang. Geological theory and production characteristics of tight oil[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(1): 71-75.
- [8] 石建刚, 席传明, 熊超, 等. 吉木萨尔页岩油藏超长水平井水平段长度界限研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(4): 136-142.
SHI Jiangan, XI Chuanming, XIONG Chao, et al. Lateral length limit of ultra-long horizontal well in Jimsar shale oil reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(4): 136-142.
- [9] 刘衍前. 涪陵页岩气田加密井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 21-26.
LIU Yanqian. Key drilling technologies of infill wells in the Fuling Shale Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 21-26.
- [10] 胡中志, 侯怡, 李卓静, 等. 密集丛式井上部井段防碰设计关键参数临界值计算分析[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(4): 448-454.
HU Zhongzhi, HOU Yi, LI Zhuojing, et al. Calculation and analysis of key parameter critical values in anti-collision design for upper sections of dense cluster wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(4): 448-454.
- [11] 张端端, 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 Duanru, 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 Technology*, 2020, 42(6): 684-690.
- [12] 刘茂森, 付建红, 白璟. 页岩气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. Optimal design and application of two-dimensional horizontal well trajectory in shale gas[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 147-150.
- [13] 于洋, 南玉民, 李双贵, 等. 顺北油田古生界钻井提速技术[J]. *断块油气田*, 2019, 26(6): 780-783.
YU Yang, NAN Yumin, LI Shuangui, et al. Technology for increasing drilling speed of Paleozoic stratum in Shunbei Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(6): 780-783.
- [14] 何茂伟. 旋转导向钻井技术在水平井中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013, 33(11): 56.
HE Maowei. Application of rotary steering drilling technology in horizontal well[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2013, 33(11): 56.
- [15] 路宗羽, 赵飞, 雷鸣, 等. 新疆玛湖油田砂砾岩致密油水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 9-14.
LU Zongyu, ZHAO Fei, LEI Ming, et al. Key technologies for drilling horizontal wells in glutenite tight oil reservoirs in the Mahu Oilfield of Xinjiang[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 9-14.
- [16] 郭昊, 袁玲. 页岩气钻井关键技术及难点研究[J]. *石油化工应用*, 2013, 32(6): 12-14, 19.
GUO Hao, YUAN Ling. Key technologies and challenges research of shale gas drilling[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013, 32(6): 12-14, 19.
- [17] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻井完井技术现状及攻关建议[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yiniao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 527-542.