



济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术

韩来聚 杨春旭

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

HAN Laiju, YANG Chunxu

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021073>

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>

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>

新疆玛湖油田砂砾岩致密油水平井钻井关键技术

Key Technologies for Drilling Horizontal Wells in Glutenite Tight Oil Reservoirs in the Mahu Oilfield of Xinjiang

石油钻探技术. 2019, 47(2): 9–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019029>

页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向

Key Drilling/Completion Technologies and Development Trends in the Efficient Development of Shale Oil

石油钻探技术. 2019, 47(5): 1–10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019076>

吉林油田致密油水平井优快钻井完井技术

Optimized Drilling and Completion Technology for Horizontal Wells in Tight Oil Reservoirs in the Jilin Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(2): 9–13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020123>

涪陵平桥与江东区块页岩气水平井优快钻井技术

Optimized and Fast Drilling Technology for Horizontal Shale Gas Wells in Pingqiao and Jiangdong Blocks of Fuling Area

石油钻探技术. 2018, 46(3): 13–19 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018071>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021073

引用格式: 韩来聚, 杨春旭. 济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 22-28.

HAN Laiju, YANG Chunxu. Key technologies for drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 22-28.

济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术

韩来聚, 杨春旭

(中石化胜利石油工程有限公司, 山东东营 257000)

摘 要: 济阳坳陷页岩油地质条件复杂, 水平井钻井完井过程中面临安全风险高、机械钻速低、井眼轨迹控制效率低、复杂时效高和固井质量差等技术难题。通过钻井工程优化设计、页岩油水平井提速提效、高性能合成基钻井液和页岩油水平井固井等技术攻关与集成应用, 初步形成了济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术, 并在 8 口页岩油水平井进行了成功应用, 平均完钻井深 4 402.60 m, 平均机械钻速 8.86 m/h, 实现了济阳坳陷页岩油水平井千米水平段一趟钻完钻, 复杂时效大幅降低。研究与应用结果表明, 该技术能为济阳坳陷页岩油资源的有效开发提供技术支持, 对我国其他页岩油区块的勘探开发也有一定的借鉴作用。

关键词: 页岩油; 水平井; 井身结构; 合成基钻井液; 固井质量; 济阳坳陷

中图分类号: TE249

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)04-0022-07

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

HAN Laiju, YANG Chunxu

(Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: Since the geological conditions of the shale oil reservoir in the Jiyang Depression are complex, there are many technical difficulties during the drilling and completion of horizontal wells, such as high safety risk, low rate of penetration (ROP), low efficiency of wellbore trajectory control, high complex efficiency, and poor cementing quality, etc. The key technologies for the drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression were preliminarily developed, benefiting from the exploration and integrated application of optimization design of drilling engineering, ROP and efficiency enhancement for the horizontal wells, development of high-performance synthetic base drilling fluid, and cementing quality improvement of the horizontal wells. Moreover, these technologies were successfully applied to eight horizontal shale oil wells. The average drilling depth and average ROP were 4 402.60 m and 8.86 m/h, respectively, indicating that one-trip drilling was realized in the kilometeric horizontal section of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression and thus the complex efficiency was lowered significantly. This study can provide technical support for the effective development of shale oil resources in the Jiyang Depression and a reference for best practices in the exploration and development of other shale oil blocks in China.

Key words: shale oil; horizontal well; casing program; synthetic base drilling fluid; cementing quality; Jiyang Depression

济阳坳陷位于渤海湾盆地东南部, 受多期构造作用, 发育有东营、沾化、车镇和惠民等 4 个凹陷, 预测页岩油总资源量达 40.45×10^8 t。目前, 该坳陷 320 余口探井在泥页岩中已发现油气显示, 40 余口

探井获工业油气流, 其中单井(Y187井)最高产油量 154.0 t/d, 最高累计产油量 27 896 t(H54井), 展现出良好的勘探开发潜力^[1-7]。

济阳坳陷页岩地层为新生界陆相沉积, 地层压

收稿日期: 2021-04-16。

作者简介: 韩来聚(1963—), 男, 山东昌邑人, 1983年毕业于华东石油学院钻井专业, 2004年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事石油工程技术研究和管理工作。系本刊编委。E-mail: hanlaiju.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“济阳坳陷页岩油勘探开发目标评价”(编号: 2017ZX05049004)、胜利石油工程有限公司科技攻关项目“济阳坳陷深层页岩油钻井完井技术研究”(编号: SKG2001)联合资助。

力系统复杂,平面、纵向非均质性强,储层埋藏深、温度高、夹层多,且层理裂缝较为发育^[8-14],钻井完井过程中面临着破岩效率低、井眼轨迹调整频繁、井漏井塌多发和固井质量要求高等技术难题^[15-19]。通过井身结构优化、异形齿高性能PDC钻头、旋转导向工具、高性能钻井液体系和增韧防窜水泥浆等技术与集成应用,形成了济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术,并在8口页岩油水平井进行了应用,平均机械钻速8.86 m/h,复杂时效同比大幅降低,为济阳坳陷页岩油资源的勘探开发提供了技术支撑,也为国内页岩油水平井安全高效钻进提供了借鉴。

1 济阳坳陷页岩油地层特性及钻井完井技术难点

1.1 页岩油地层特性

济阳坳陷页岩油主要有基质型、夹层型和裂缝性等3种类型,不同类型页岩油的储集空间和赋存状态不同。其中,基质型页岩油储层埋深超过3 500 m,主要储集空间为页岩有机孔、粒间孔和层间缝;夹层型页岩油分布在埋深3 000 m以深的薄砂岩和碳酸盐岩夹层,富集状态受发育程度、有机质丰度和演化程度的影响;裂缝性页岩油主要赋存于构造、成岩、成烃作用形成的裂缝和微孔缝中。根据已钻井的实钻情况得知,济阳坳陷页岩油水平井钻遇地层自上而下依次为第四系,第三系的平原组、明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组,其中,馆陶组底部含有砾石,对钻头的冲击破坏性强;东营组和沙河街组含大段灰质泥岩,可钻性较差。与北美海相、沧东凹陷页岩油相比,济阳坳陷页岩油储层具有埋藏深(2 500~4 500 m)、成岩作用弱、非均质强、储层展布横向变化快和灰质泥岩可钻性差等特点。

1.2 钻井完井技术难点分析

根据济阳坳陷页岩油地质工程特征,结合已钻井的实钻情况,页岩油水平井钻井完井主要存在以下技术难点:

1)地层压力体系复杂、钻井安全风险高。受构造环境影响,济阳坳陷页岩油地层压力体系复杂、局部发育高压,钻井过程中易发生溢流、油气侵。储层裂缝发育加剧了井漏等问题的发生,涌漏同存、塌漏同存对井身结构设计及安全钻井要求高。

2)地层岩性复杂、可钻性差,机械钻速低。馆陶组底部砾石层对PDC钻头的冲击损坏严重,导致单只钻头进尺少;东营组及以深地层的大段硬质泥

岩、灰质夹层可钻性在5级以上,钻头吃入困难,破岩效率低。

3)井眼轨迹控制难度大,影响钻井时效。滑动钻进过程中托压严重、钻压传递困难,工具面稳定性和钻头攻击性之间难以兼顾,导致井眼轨迹控制困难,机械钻速低,钻井时效较低。另外,地层温度较高,一般为150℃,对钻井工具及MWD仪器的使用寿命影响较大。

4)水平段泥页岩地层钻井周期长,钻井液浸泡时间长,易发生井壁剥落掉块等井壁失稳问题,严重时会导致卡钻等井下故障的发生。同时,井下高温环境也增大了钻井液性能的维护难度。

5)固井质量难以保证。页岩油水平井储层井段多使用油基钻井液钻进,易在套管表面与地层界面处形成油膜,导致水泥浆受到污染,并影响封固质量。同时,高密度水泥浆、长水平段固井存在套管居中困难、顶替效率差和固井质量难以保证等难题。

2 钻井完井关键技术

针对济阳坳陷页岩油水平井钻井完井技术难点,开展了钻井工程优化设计、钻井提速提效、高性能钻井液和提高固井质量等技术研究,形成了页岩油水平井钻井完井关键技术,达到了钻井提速提效的目的。

2.1 钻井工程优化设计技术

2.1.1 安全密度窗口评价

为保障页岩油水平井长水平段的安全钻进,开展了不同井斜、方位条件下的安全密度窗口评价。以渤南洼陷为例,区域断层走向以东西向为主,最大水平主应力方向为近东西向。利用测井资料及室内岩心试验数据,分析了该洼陷沙三下储层井斜、方位对坍塌压力和破裂压力的影响(结果见图1),确定了安全密度窗口。研究表明:水平段(以井斜角90°为例)沿最大水平主应力方向钻进时,安全密度窗口为1.70~1.90 kg/L;沿最小水平主应力方向钻进时,安全密度窗口为1.65~2.25 kg/L。这为钻井液密度的确定和井身结构的优化设计提供了依据。

2.1.2 井身结构优化设计

济阳坳陷页岩油储层主要分布在沙三下和沙四上,多为高温高压地层,其中牛庄洼陷页岩油地层压力系数为1.40~1.68,渤南洼陷页岩油地层压力系数为1.50~1.80,由于新生界沙三中及以浅地层承压能力有限,使用高密度钻井液钻进储层时易压漏上部地层。为此,基于地层压力特征分析,为避

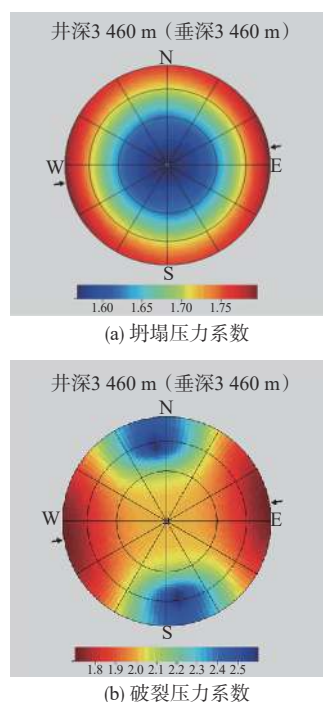


图1 渤南洼陷沙三下储层井斜、方位对坍塌压力和破裂压力的影响

Fig.1 Influence of inclination and azimuth on collapse pressure and fracturing pressure in a reservoir in the lower 3rd member of Shahejie Formation of the Bonan Subsalt

免钻进储层过程中出现涌漏同存,对于钻井液密度超过 1.60 kg/L 的页岩油水平井采用三开井身结构:一开,采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至井深 300~800 m,下入 $\phi 339.7$ mm 套管;二开,采用 $\phi 311.1$ mm 钻头钻至沙三下,下入 $\phi 244.5$ mm 技术套管,封隔上部承压能力低的地层;三开,采用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至完钻井深,下入 $\phi 139.7$ mm 套管,为满足压裂需要,水泥浆返至井口。以渤南洼陷某井为例,利用室内岩心试验结果、测井资料和地层破裂压力试验结果等数据建立区块地层三压力剖面,根据不发生井涌、井漏、压差卡钻的力学平衡关系,采用自下而上的井身结构设计方法,计算出技术套管下入深度 3 160 m(垂深),并最终确定合适的三开井身结构。

2.1.3 地质工程协同优化井眼轨道

为实现页岩油的经济有效动用,页岩油水平井对储层钻遇率、机械钻速和钻进安全都有很高的要求。为此,采取地质工程一体化协同优化设计井眼轨道,控制靶点的数量和位置,达到既能提高储层钻遇率,又能减少井眼轨迹调整的幅度和频次,从而达到提高钻速的目的。同时,油藏地质部门精细识别断层位置,指导优化井眼轨道,以避开断层,降

低井漏风险。以 NY1-1HF 井为例,将 A 靶点北移 200 m,设置控制靶点 K_1 和 K_2 ,井眼轨道与断层距离增大至 450 m,不但降低了钻井过程中井下故障的发生概率,而且井眼轨迹较为平滑,有利于快速钻进。地质工程协同井眼轨道优化技术在济阳坳陷 4 口页岩油水平井进行了应用,储层钻遇率均达到 100%,促进了页岩油水平井钻井提速提效。

2.2 页岩油钻井提速提效技术

2.2.1 异形齿 PDC 钻头研制与应用

1)穿砾石层的异形齿 PDC 钻头。济阳坳陷页岩油水平井二开井段的馆陶组底部—东营组上部有厚 200 m 的砾石层,钻进过程中钻头的冲击损坏较为严重,且单只钻头进尺少。为实现“一趟钻”钻穿砾石层的目标,在分析 PDC 切削齿冲击性能和强度特性基础上,研制了穿砾石层的异形齿 PDC 钻头。该钻头采用三棱齿+锥齿的抗冲击稳定切削结构(见图 2),与平面齿相比,三棱齿的抗冲击性能更好,能够承受更高的冲击载荷而不失效;后排锥齿可以劈碎砾石,减小砾石对钻头的冲击作用,同时起到稳定钻头切削状态的作用,进一步降低钻头冲击损坏的可能性。该钻头在 3 口井进行了现场应用,均实现了单只 PDC 钻头钻穿巨厚砾石层的目的,单只钻头进尺增加至 2 516 m,平均机械钻速提高至 20.89 m/h。

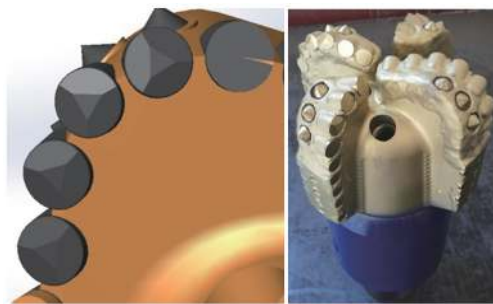


图2 穿砾石层的异形齿 PDC 钻头切削齿形状及分布
Fig.2 Shape and distribution of cutting teeth of a special-shaped-tooth PDC bit able to penetrate gravel layers

2)适用于灰质泥岩的脊形齿 PDC 钻头。沙三下—沙四段灰质泥岩地层可钻性在 5 级以上,钻头吃入困难、破岩效率低、钻井周期长。为提高灰质泥岩井段 PDC 钻头的钻进效率,通过模拟分析和室内试验,对切削齿的形状和破岩方式进行优化研究,结果表明,切削齿后倾角为 15° 时,与平面齿相比, $\phi 16$ mm 脊形齿压入岩石的垂直力降低 25%,剪切破碎岩石需要的水平力降低 24%,证明在同条

件下脊形齿比平面齿具有更高的破岩效率。在此基础上, 研制了适用于灰质泥岩的脊形齿 PDC 钻头(见图 3)。该钻头采用四刀翼中低布齿密度, 优选抗冲击性高的 $\phi 16\text{ mm}$ 脊形齿作为主切削齿, 采用犁削、剪切和挤压的混合破岩模式, 可有效提高钻头的破岩效率; 以 $\phi 13\text{ mm}$ 平面齿和锥齿作为辅助切削齿, 以增加钻头的稳定性, 延长钻头使用寿命。以 BYP5 井为例, 该型 PDC 钻头一趟钻进尺 497 m, 平均机械钻速 5.98 m/h, 与邻井相同地层相比, 单只钻头进尺提高了 47%, 机械钻速提高了 140%。



图 3 适用于灰质泥岩的脊形齿 PDC 钻头切削齿形状及分布

Fig.3 Shape and distribution of cutting teeth of a ridge-shaped-tooth PDC bit applicable to calcareous mudstone

2.2.2 基于水力振荡器的钻井提速技术

针对页岩油水平井滑动钻进过程中摩阻扭矩高、工具面稳定性差、钻进时效低等问题, 研制了水力振荡器, 并形成了基于水力振荡器的钻井提速技术。钻井液流过水力振荡器时会产生规律性压降变化, 将水力能量转换为轴向振动的机械能, 从而有效减小钻具与井壁之间的摩擦力, 减少滑动钻进中的“托压”现象, 提高钻压传递效率, 同时可以降低钻具压差卡钻风险, 提高钻进安全性和机械钻速。水力振荡器在 3 口井累计应用 5 趟钻(见表 1), 平均机械钻速达到 5.27 m/h, 滑动钻进时效提高了 66.26%, 且提高了井眼轨迹控制效率。

表 1 水力振荡器在 3 口页岩油水平井钻井中的应用效果统计

Table 1 Application effect of hydraulic oscillators in the drilling of three horizontal shale oil wells

井号	进尺/m	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	纯钻时效, %
YYP1	676	117.0	5.78	39.87
FYP1	744	169.5	4.39	38.62
BYP5	573	92.0	6.23	41.26

2.2.3 旋转导向钻井技术

济阳拗陷页岩油水平井多采用“直—增—稳—微降—稳—增—稳”的多段式井眼轨道, 为高效控制井眼轨迹, 应用了旋转导向钻井技术。4 口井的现场应用效果(其中 3 口井的应用效果见表 2)显示, 平均机械钻速达到 7.22 m/h, 是常规导向工具的 4~10 倍, 提速效果显著。其中, FYP1 井水平段钻进时应用旋转导向系统, 单趟钻进尺 1 287 m, 实现了济阳拗陷页岩油水平井千米水平段一趟钻完成的目标; BYP5 井水平段平均机械钻速 11.81 m/h, 创济阳拗陷页岩油水平井水平段机械钻速最高纪录。

表 2 济阳拗陷 3 口页岩油水平井旋转导向系统应用效果
Table 2 Application effect of a rotary steering system in three horizontal shale oil wells in Jiyang Depression

井号	钻进井段/m	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)	最大井斜角/(°)
YYP1	3 729~4 591	862	10.64	91.30
FYP1	3 327~4 614	1 287	5.70	87.08
BYP5	4 048~5 379	1 331	11.81	82.13

2.3 页岩油水平井合成基钻井液技术

济阳拗陷泥页岩地层微孔隙、微裂缝发育, 钻井过程中易出现水化剥蚀垮塌、硬脆性地层垮塌等井眼失稳问题^[20-22], 为此, 研究应用了具有良好抑制性、抗温能力和润滑性能的柴油基、白油基钻井液体系, 并在 BYP1 井、BYP2 井、LY1HF 井和 BY1-2 井成功应用, 基本满足了页岩油水平井安全钻进及建井的需求。但是, 随着人们对环保的不断重视及环保法规的日益严苛, 油基钻井液的应用受到越来越多的限制。为此, 研制了增黏提切剂 SDRM、降滤失剂 SGJ-1、有机土 SGT 和抗高温乳化剂等关键处理剂, 研发了具有良好环保性能的合成基钻井液体系, 基础配方为: 合成基液+抗高温乳化剂+润湿剂+有机土 SGT+碱度调节剂+降滤失剂 SGJ-1+增黏提切剂 SDRM+封堵剂+加重剂+水。

2.3.1 环保性能

合成基钻井液以气制油合成基液为连续相, 与柴油、白油基相比, 其闪点较高、苯胺点高、几乎不含芳香烃(见表 3), EC₅₀ 大于 3.0×10⁴ mg/L, 具有更好的环保性能和更低的毒性。此外, 合成基液的运动黏度低, 受温度变化影响较小, 有利于高温条件下钻井液性能的调控。

表3 3种基础油主要物化性能对比

Table 3 Comparison of physicochemical properties among three base oils

基础油	闪点/ ℃	密度/ (kg·L ⁻¹)	运动黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	芳烃含 量, %	苯胺点/ ℃	倾点/ ℃
柴油	57~63	0.86	3.4	30.00~60.00	54~60	-17.8
白油	113	0.83	3.8~8.2	3.90	92	-30.0
气制油	125	0.80	2.8	<0.01	>85	-40.0

2.3.2 封堵性能

研发的多尺寸微纳米、可变形封堵剂能够提高合成基钻井液封堵页岩微孔/微裂缝的能力, 阻缓压力传递及滤液侵入, 保障页岩地层井壁稳定。选取页岩岩样, 通过钻井液压力传递试验, 评价分析了不同封堵剂对合成基钻井液性能的影响, 结果见图4。从图4可以看出, 加入多尺寸致密封堵剂后, 随着封堵剂颗粒对岩石孔、缝的封堵及滤饼的形成, 压力传递时间增长, 传递速度增加相对均匀, 表明合成基钻井液具有良好的封堵性能。

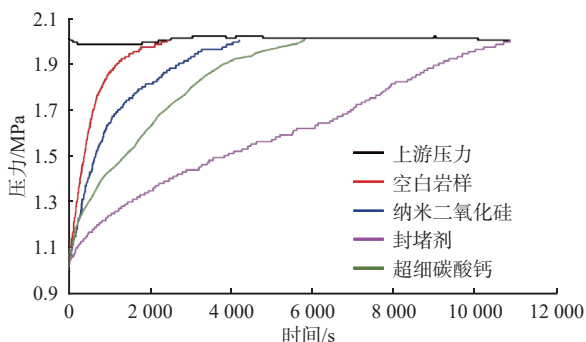


图4 合成基钻井液压力传递试验结果

Fig.4 Pressure transmission of synthetic base drilling fluid

2.3.3 抗温性能

济阳坳陷沙三下、沙四上页岩油储层温度可达150℃, 为保证高温条件下钻井液流变性和悬浮性能的稳定, 研发了抗高温乳化剂。加入该抗高温乳化剂的合成基钻井液抗温性能试验结果见表4。从表4可以看出, 合成基钻井液在200℃下老化16h后, 破乳电压为800V, 动切力、静切力、塑性黏度和API滤失量均变化不大, 表明其具有较强的抗温能力, 能够满足济阳坳陷页岩油高温储层安全快速钻进的需要。

合成基钻井液在济阳坳陷YYP1井、FYP1井、BYP5井和NY1-1HF井进行了应用, 钻井液密度1.45~2.05 kg/L, 破乳电压大于600V, 高温高压滤失量小于4 mL, 保证了泥页岩层段的井壁稳定, 确保

表4 合成基钻井液抗温性能试验结果

Table 4 Temperature resistance of synthetic base drilling fluid

试验条件	破乳电压/ V	静切力/ Pa	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	API滤失量/ mL
室温	1160	5.0/9.0	42	10.0	0.8
120℃/16h	>2000	5.0/12.0	40	11.0	0
150℃/16h	1600	6.0/14.0	37	14.0	0.2
180℃/16h	1000	6.5/15.0	45	15.5	0.4
200℃/16h	800	5.0/8.0	58	8.0	0.8
205℃/16h	750	4.0/7.0	59	7.5	1.0

了水平段钻进顺利。4口井水平段钻进期间岩屑上返及时且棱角分明, 起下钻摩擦小、无阻卡现象, 电测结果显示水平段井径规则。其中, BYP5井完钻井深5379.59m, 合成基钻井液在174℃温度下、静止120h性能保持稳定, 保证了电测、套管下入和固井等作业的顺利完成。

2.4 页岩油水平井固井技术

济阳坳陷页岩油水平井水平段泥页岩地层井壁易失稳, 且部分井采用油基钻井液钻进, 导致滤饼难以清除而影响固井质量, 为此, 研发了高效冲洗型隔离液和增韧防窜水泥浆体系, 并优化了固井工艺, 顺利完成8口页岩油水平井固井施工, 其中5口井固井质量合格率100%。

2.4.1 高效冲洗型隔离液

针对页岩油水平井采用油基钻井液钻进时形成的滤饼清除难度大、常规隔离液相容性差等问题, 研发了具有协同增效作用的冲洗型隔离液, 基本配方为水+冲洗剂BCS-010L+复配多棱刚性材料+加重剂BCW-600S+悬浮稳定剂BCS-020S+微硅+消泡剂。冲洗剂BCS-010L中含有硼酸阴离子-羟乙基纤维素双表面活性剂, 利用弱酸对地层的溶解、表面活性剂的吸附及润湿反转作用, 将吸附于井壁的油膜剥离; 复配多棱刚性材料能够在紊流状态下对井壁进行高强度冲刷, 协同实现合成基钻井液滤饼的高效清除。以密度1.80和1.85 kg/L的高效冲洗型隔离液为例, 150℃温度下上下密度差≤0.02 kg/L, 稳定性良好, 冲洗效率可达90%以上。同时, 室内试验结果表明, 高效冲洗型隔离液与水泥浆、钻井液具有良好的相容性。

2.4.2 增韧防窜水泥浆体系

济阳坳陷页岩油地层压力高, 在大型分段压裂作业时施工压力高、时间长, 对固井质量以及水泥

环耐久性提出较高要求。为此,研发了增韧防窜剂 BCE-300S,它由 AMPS、AM 等材料聚合而成,具有微交联结构,通过增大水泥颗粒间内聚力,达到增韧、防窜的目的。以增韧防窜剂 BCE-300S 为关键处理剂,研究形成了增韧防窜水泥浆体系,其配方为水泥+硅粉+增韧防窜剂 BCE-300S+微硅+降滤失剂+分散剂+膨胀剂+消泡剂。在 120 ℃ 温度下,该体系(密度 1.93 kg/L)水泥石抗压强度可达 35.7 MPa,抗折强度 8.1 MPa(较常规水泥石提高 30% 以上),弹性模量 6.1 GPa,稠度从 40 Bc 至 70 Bc 的过渡时间仅 4 min,静胶凝强度由 48 Pa 至 240 Pa 的过渡时间仅 7 min,防气窜能力较强。

2.4.3 固井技术措施

1)为了提高固井质量、避免套管外环空窜流,需要提高套管的居中度,确保良好的顶替效率,为此,选用了 65 Mn 钢冲压成型的整体式弹性扶正器。

2)固井施工前调整钻井液漏斗黏度小于 60 s,优化水泥浆排量及注替参数,确保紊流顶替及紊流接触时间超过 10 min。

3)采用清水替浆、利用管内外压差,辅助提高套管居中度,达到提高界面胶结质量的目的。

3 现场应用

济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术已在 8 口井进行了应用,平均完钻井深 4 402.60 m(见表 5),其中第 1 轮次 4 口井,第 2 轮次 4 口井。与第 1 轮次 4 口井相比,第 2 轮次 4 口井的平均完钻井深 4 932.00 m,增加了 27.3%;平均完钻垂深 3 759.00 m,增加了 27.1%;平均水平段长 1 060.00 m,增加了 35.1%;平均机械钻速 10.29 m/h,提高了 65.7%;固井质量合格率达到 100%。其中,FYP1 井水平段长 1 716.00 m,创济阳坳陷页岩油水平井水平段最长纪录。BYP5 井完钻井深 5 379.00 m,垂深 4 309.30 m,为济阳坳陷垂深最深的页岩油水平井。NY1-1HF 井和 FYP1 井初期产量分别达到 102.6 和 181.8 t/d,证明了济阳坳陷页岩油资源的勘探潜力。

4 结论与建议

1)针对济阳坳陷页岩油水平井钻井完井技术难点,开展了钻井工程优化设计、异形齿 PDC 钻头、旋转导向钻井系统、合成基钻井液和增韧防窜水泥浆等技术攻关研究,形成了页岩油水平井钻井完井

表 5 济阳坳陷 8 口页岩油水平井钻井情况统计

Table 5 Drilling results of eight horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression

井号	井深/ m	垂深/ m	钻井周期/ d	钻速/ (m·h ⁻¹)	水平段长/ m	备注
BYP1	4 336.00	2 969.75	75.50	8.13	1 147.00	第一轮次
BYP 2	3 645.00	2 568.29	85.88	10.53	716.00	
LY1HF	3 970.00	3 206.57	132.50	3.84	633.00	
BYP 1-2	3 542.00	2 989.91	50.83	6.08	373.00	第二轮次
YYP1	4 902.00	3 540.52	88.05	12.16	942.00	
FYP1	5 364.00	3 564.57	108.87	8.18	1 716.00	
NY1-1HF	4 083.00	3 619.87	80.92	9.81	158.00	
BYP5	5 379.00	4 309.30	131.00	12.17	1 059.59	

关键技术。

2)8 口井的现场应用效果表明,页岩油水平井钻井完井关键技术能够有效提高钻速、降低复杂时效和保证井筒的完整性,可为济阳坳陷页岩油的有效勘探开发提供技术支撑。

3)受济阳坳陷复杂地质条件影响,目前水平井钻井完井关键技术的针对性和适用性还存在诸多不足,需进一步开展钻井提速技术、控压钻井提效、合成基钻井液减量化、提高二界面固井质量等技术研究,以形成完善的济阳坳陷页岩油水平井钻井完井技术体系,实现页岩油水平井钻井提速提效,推动页岩油资源的有效开发。

参 考 文 献

References

[1] 孙焕泉,蔡勋育,周德华,等. 中国石化页岩油勘探实践与展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 569-575.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 569-575.

[2] 张瀚之,翟晓鹏,楼一珊. 中国陆相页岩油钻井技术发展现状与前景展望[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(3): 265-271.
ZHANG Hanzhi, ZHAI Xiaopeng, LOU Yishan. Development status and prospect of the drilling technologies used for continental shale oil reservoirs in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(3): 265-271.

[3] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.

[4] 雷浩,何建华,胡振国. 潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 94-98.

- LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 94–98.
- [5] 李世臻, 刘卫彬, 王丹丹, 等. 中美陆相页岩地质条件对比 [J]. 地质论评, 2017, 63(增刊 1): 39–40.
- LI Shizhen, LIU Weibin, WANG Dandan, et al. Continental shale oil geological conditions of China and the United States[J]. *Geological Review*, 2017, 63(supplement 1): 39–40.
- [6] 关德范. 对美国和中国页岩油气资源的对比分析与思考 [J]. 中外能源, 2015, 20(12): 19–27.
- GUAN Defan. A comparative study and reflection on shale oil and gas resources in US and China[J]. *Sino-Global Energy*, 2015, 20(12): 19–27.
- [7] 闫林, 陈福利, 王志平, 等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 63–69.
- YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 63–69.
- [8] 宁方兴. 济阳坳陷页岩油富集机理 [J]. *特种油气藏*, 2015, 22(3): 27–30.
- NING Fangxing. Mechanism of shale oil enrichment in Jiyang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(3): 27–30.
- [9] 刘丽, 闵令元, 孙志刚, 等. 济阳坳陷页岩油储层孔隙结构与渗流特征 [J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 106–114.
- LIU Li, MIN Lingyuan, SUN Zhigang, et al. Pore structure and percolation characteristics in shale oil reservoir of Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(1): 106–114.
- [10] 张顺. 济阳坳陷页岩油富集要素及地质甜点类型划分 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 504–511.
- ZHANG Shun. Shale oil enrichment elements and geological dessert types in Jiyang Depression[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(2): 504–511.
- [11] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 等. 济阳坳陷不同岩相页岩油赋存机理 [J]. 石油学报, 2017, 38(2): 185–195.
- NING Fangxing, WANG Xuejun, HAO Xuefeng, et al. Occurrence mechanism of shale oil with different lithofacies in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(2): 185–195.
- [12] 包友书. 济阳坳陷超压和应力场对页岩油富集的影响 [J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 585–588.
- BAO Youshu. Influence of overpressure and stress on shale oil enrichment in Jiyang Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2018, 25(5): 585–588.
- [13] 袁琪, 燕明慧, 杨依. 济阳坳陷沙三下与沙四上页岩油富集原理 [J]. 当代化工研究, 2016(6): 116–117.
- YUAN Qi, YAN Minghui, YANG Yi. Theory of oil enrichment on lower third sub-member and upper fourth sub-member shale of Jiyang Depression[J]. *Modern Chemical Research*, 2016(6): 116–117.
- [14] 刘鹏, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷樊页 1 井页岩油与临近页岩中含氮化合物组成特征 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 552–557.
- LIU Peng, TAO Guoliang, LI Maowen, et al. Characteristics of nitrogen-containing compounds in shale oil and adjacent shales in Well FY 1, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(4): 552–557.
- [15] 光新军, 叶海超, 蒋海军. 北美页岩油气长水平段水平井钻井实践与启示 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 1–6.
- GUANG Xinjun, YE Haichao, JIANG Haijun. Drilling practice of shale oil & gas horizontal wells with long horizontal section in the North America and its enlightenment[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(1): 1–6.
- [16] 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 drilling technology of horizontal well in shale oil reservoir in Dagang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 34–41.
- [17] 张廷山, 彭志, 杨巍, 等. 美国页岩油研究对我国的启示 [J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(3): 1–10.
- ZHANG Tingshan, PENG Zhi, YANG Wei, et al. Enlightenments of American shale oil research towards China[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(3): 1–10.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 叶海超, 光新军, 王敏生, 等. 北美页岩油气低成本钻井技术及建议 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 552–558.
- YE Haichao, GUANG Xinjun, WANG Minsheng, et al. Low-cost shale oil and gas drilling and completion technologies used in the North America and the suggestions[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(5): 552–558.
- [21] 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.
- [22] 郝运轻, 宋国奇, 周广清, 等. 济阳坳陷古近系泥页岩岩石学特征对可压性的影响 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 489–495.
- HAO Yunqing, SONG Guoqi, ZHOU Guangqing, et al. Influence of petrological characteristics on fracability of the Paleogene shale, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(4): 489–495.