



四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术

王建龙 于志强 苑卓 冯冠雄 柳鹤 郭云鹏

Key Technologies for Deep Shale Gas Horizontal Well Drilling in Luzhou Block of Sichuan Basin

WANG Jianlong, YU Zhiqiang, YUAN Zhuo, FENG Guanxiong, LIU He, GUO Yunpeng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长宁页岩气超长水平段水平井钻井完井关键技术

Key Technology for Drilling and Completion of Shale Gas Horizontal Wells with Ultra-Long Horizontal Sections in Changning Block

石油钻探技术. 2020, 48(5): 9-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020086>

南海莺歌海盆地中深层高温高压水平井钻井关键技术

Key Drilling Techniques of HTHP Horizontal Wells in Mid-Deep Strata of the Yinggehai Basin, South China Sea

石油钻探技术. 2020, 48(2): 63-69 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019112>

四川盆地外缘常压页岩气水平井低成本钻井技术探讨

Discussion on Low-Cost Drilling Technologies of Normal Pressure Shale Gas in the Outer Margin of the Sichuan Basin

石油钻探技术. 2018, 46(6): 9-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018127>

川南深层页岩气水平井体积压裂关键技术

Key Technology of Volumetric Fracturing in Deep Shale Gas Horizontal Wells in Southern Sichuan

石油钻探技术. 2020, 48(5): 77-84 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020073>

川东南地区深层页岩气钻井关键技术

Key Drilling Technology for Deep Shale Gas Reservoirs in the Southeastern Sichuan Region

石油钻探技术. 2018, 46(3): 7-12 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018073>

川南海相深层页岩气钻井关键技术

Key Technologies for Deep Marine Shale Gas Drilling in Southern Sichuan

石油钻探技术. 2019, 47(6): 9-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019118>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021062

引用格式: 王建龙, 于志强, 苑卓, 等. 四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 17-22.

WANG Jianlong, YU Zhiqiang, YUAN Zhuo, et al. Key technologies for deep shale gas horizontal well drilling in Luzhou Block of Sichuan Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 17-22.

四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术

王建龙¹, 于志强¹, 苑卓², 冯冠雄³, 柳鹤¹, 郭云鹏⁴

(1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 天津 300280; 2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司定向井服务分公司, 天津 300280; 3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司四川页岩气项目管理部, 四川成都 644000; 4. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司, 天津 300280)

摘 要: 四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井周期长、机械钻速低、钻具振动大, 特殊岩性地层可钻性差、水平段井眼易失稳、地层温度高, 且摩阻扭矩大、卡钻风险高。为保证作业安全, 降低钻井成本, 开展了水平井井身结构优化、水平段井眼轨道优化及轨迹控制等技术研究, 推荐了激进钻井方式的最优参数, 优选了特殊岩性地层减振提速和高效破岩技术; 结合地面降温设备先导试验, 优选了钻井液体系, 并优化了钻井液性能参数, 最终形成了泸州区块深层页岩气水平井安全高效钻井关键技术。该技术在泸州区块 4 口井中进行了试验, 试验井平均井深 5 601 m, 水平段长 1 884 m, 钻井周期平均缩短 14.5%, 未发生井下故障。研究结果表明, 该技术满足泸州区块安全高效钻井和推广应用要求。

关键词: 深层页岩气; 水平井; 提速技术; 钻井风险; 高温; 泸州区块

中图分类号: TE242

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)06-0017-06

Key Technologies for Deep Shale Gas Horizontal Well Drilling in Luzhou Block of Sichuan Basin

WANG Jianlong¹, YU Zhiqiang¹, YUAN Zhuo², FENG Guanxiong³, LIU He¹, GUO Yunpeng⁴

(1. Engineering Technology Research Institute, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300280, China; 2. Directional Drilling Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300280, China; 3. Sichuan Shale Gas Project Management Department, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan, 644000, China; 4. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300280, China)

Abstract: Drilling deep shale gas horizontal wells in Luzhou Block of Sichuan Basin is challenging due to long drilling cycles, low rate of penetration (ROP), high drilling tool vibration, poor drillability of special lithological formations, horizontal wellbore instability, high formation temperature, and high friction torque and sticking risk etc. To solve these problems and to ensure operation safety and save the cost, technological research was carried out on the casing program design optimization of horizontal wells, and wellbore trajectory control and optimization of horizontal sections. As a result, the optimal parameters of the radical drilling method were recommended, and shock absorption, speed-up, and high efficiency rock breaking technologies for special lithological formations were selected. In addition, drilling fluid systems and performance parameters were recommended based on pilot tests of ground cooling equipment. Thus, key drilling technologies with high operation safety and efficiency were formed for the deep shale gas horizontal wells in Luzhou Block. The key technologies were tested in four wells in Luzhou Block, the results show that the drilling cycle was reduced by 14.5% on average and no downhole failures were reported with an average well depth of 5 601 m and a horizontal section length of 1 884 m. The research result show that the technologies can meet the requirement of safe and efficient drilling as well as having a wide application scope in Luzhou Block.

Key words: deep shale gas; horizontal well; speed-up technology; drilling risk; high temperature; Luzhou Block

收稿日期: 2020-12-30; 改回日期: 2021-09-09。

作者简介: 王建龙 (1984—), 男, 天津人, 2010 年毕业于中国石油大学 (华东) 胜利学院油气储运专业, 2013 年获中国石油大学 (华东) 油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事钻井提速工具研发与应用工作。E-mail: 383462010@qq.com。

基金项目: 中石油渤海钻探工程有限公司科技重大工艺项目“川渝页岩气钻井提速技术研究” (编号: 2020ZD16Y-02)、中油油服统筹项目“新型设施、工具、工艺配套研究” (编号: 2020T-002-006-2) 联合资助。

泸州区块位于川南地区低陡构造带,目的层龙马溪组底界埋深普遍在3 500~4 500 m,由北往南逐渐变深。2019年该区块垂深3 890 m的泸203井测试产气量达 $1.38 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$,是国内首口测试日产气量超过百万立方米的深层页岩气标杆井^[1-10]。由于深层页岩气开发尚处于起步阶段,其配套钻井完井技术目前主要借鉴长宁区块、威远区块等中深层页岩气钻井完井作业经验。樊好福等人^[11]采用高造斜率螺杆钻具减少滑动进尺,应用控压钻井技术降低水平段钻井液密度。臧艳彬等人^[12]优化井身结构,研究水力加压器和射流冲击器等提速工具、复合钻头和控压钻井等技术,取得了较好的提速效果。然而,泸州区块深层页岩气钻井仍然存在特殊岩性地层可钻性差、地层温度高造成旋转导向寿命短、目的层断层发育导致轨迹控制难度高等难点,机械钻速低、钻井周期长、井下故障率高,钻井完井成本居高不下。为此,笔者开展了井身结构和井眼轨道优化研究,优选了井眼轨迹控制技术和高性能油基钻井液,形成了泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术,并在4口井开展了地面降温设备先导试验,大幅缩短了钻井周期,取得了显著效果。

1 钻井技术难点

泸州区块深层页岩气井自上而下钻遇沙溪庙组、自流井组、须家河组、嘉陵江组、飞仙关组、长兴组、龙潭组、茅口组、梁山组、韩家店组、石牛栏组和龙马溪组,与常规页岩气相比,具有埋藏深、岩石可钻性差、井底温度高和井控风险高等特点^[12-17]。钻井过程中存在以下技术难点:

1) 须家河组、龙潭组可钻性差,常规PDC钻头机械钻速低。须家河组地质年代老,石英含量高,粒度小,胶结致密,硬度高达6~7级,研磨性高达8级。龙潭组以页岩夹铝土质泥岩、凝灰质砂岩为主,铁质含量高达9.5%,研磨性强。泸203井区须家河组厚度500~600 m,一般使用3~5只钻头钻穿,平均单只钻头进尺150 m;龙潭组厚度100~200 m,一般使用3~6只钻头钻穿,平均单只钻头进尺55 m。

2) 复杂井漏频发,井控风险高。须家河组—栖霞组同一裸眼段多个压力系统并存,须家河组压力系数为1.2,茅口组—栖霞组压力系数则在1.8以上,易出现漏喷同存等复杂情况,存在“漏转溢”、“漏转喷”的可能;韩家店组、石牛栏组和龙马溪组易钻遇裂缝,存在喷漏同存现象,井控风险高。

3) 定向工具仪器抗温性能差。泸州区块某井实测

井底循环温度135℃,因地层温度过高导致6趟钻旋转导向工具均无信号。泸州区块深部地层温度超过150℃,循环温度140℃左右,常规定向工具难以满足高温下安全钻进要求,故障率高,严重影响机械钻速。

4) 断层发育,井眼轨迹控制难度大。目的层储层厚度薄,断层发育,地层倾角变化大。为保证优质储层钻遇率,频繁调整井眼轨迹导致井眼呈W形,造成地质导向难度大,摩阻扭矩增大,井下卡钻风险升高。

2 钻井关键技术

2.1 井身结构优化

综合考虑地层压力、必封点、钻井施工难度、钻机负载、井下风险、经济性等因素,开展泸州区块深层页岩气水平井井身结构优化研究。在保证实现地质目标和安全的前提下,尽可能减少套管层次、缩短裸眼段长度、降低摩阻扭矩,为安全高效钻井完井提供基础^[14]。泸州区块深层页岩气水平井采用典型的“导管+三开”井身结构,如图1所示。

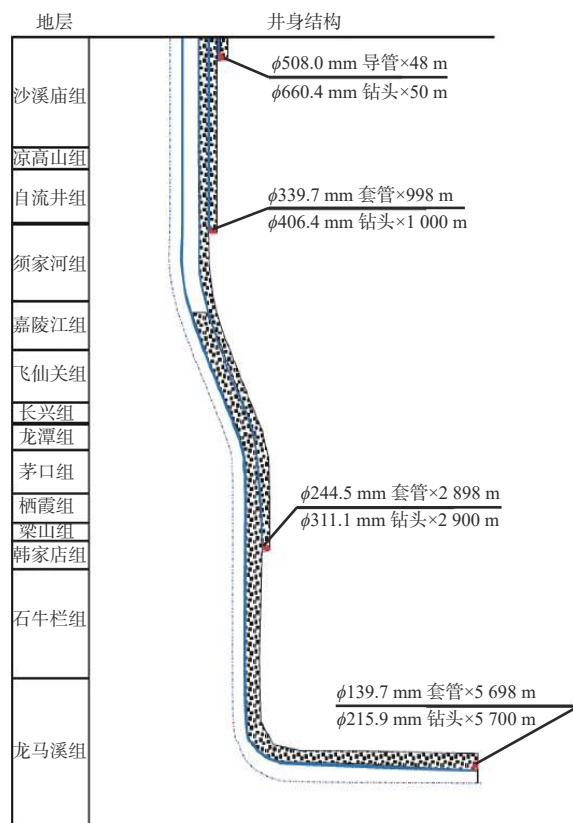


图1 泸州区块典型井身结构示意

Fig.1 Typical casing program in Luzhou Block

$\phi 508.0 \text{ mm}$ 导管一般下至井深50 m左右,封隔风化漏层及垮塌层,可适当加深; $\phi 339.7 \text{ mm}$ 表层套管一般下至须家河组顶部10~30 m,封隔上部漏层、垮塌

层和浅层气,考虑井控需要可加深至须四段中下部; $\phi 244.5\text{ mm}$ 技术套管一般下至韩家店组顶部 30~50 m,封隔上部漏、垮、喷等复杂层段及含硫气层;若长兴组、龙潭组、茅口组等层段钻遇复杂情况,同一井段钻井液密度难以兼顾,可浅下套管至栖霞组顶部,采用 $\phi 139.7\text{ mm}$ 生产套管封固龙马溪组目的层。

2.2 井眼轨道优化及轨迹控制

前期采用的三维井眼轨道施工难度大、井下风险高,严重影响钻井周期。因此,综合考虑丛式井防碰、摩阻扭矩、轨迹控制难度和钻井速度等因素,将三维轨道优化为双二维井眼轨道,多采用“直—增—稳—降—直—增—平”剖面类型,上部井段和入窗井段控制全角变化率分别为 $(1.0^{\circ}\sim 2.5^{\circ})/30\text{m}$ 和 $(4.0^{\circ}\sim 6.0^{\circ})/30\text{m}$,水平段控制全角变化率不大于 $3.0^{\circ}/30\text{m}$ 。与三维井眼轨道相比,“双二维”井眼轨道的钻进扭矩降低 7%~14%、摩阻降低 11.5%~16.5%^[1]。

兼顾钻井安全、钻井速度和钻井成本,将水平井

的水平段划分为钻井提速、钻井提速与风险兼顾、风险削减 3 个阶段(见表 1)。钻井提速阶段,一般指在水平段长度不足 1 000 m 井段钻进阶段,该阶段钻井设备能力充足,井下风险低,以钻井提速为主,选用旋转导向工具配合大扭矩长寿命直螺杆控制井眼轨迹。钻井提速与风险兼顾阶段,一般指在水平段长度 1 000~1 500 m 井段钻进阶段,该井段钻井设备能力富余量减少、井下风险逐步升高,需要兼顾钻井提速和井下风险。评估井下风险较低时,以钻井提速为主,选用旋转导向工具配合大扭矩长寿命直螺杆;评估井下风险较高时,以降低钻井风险为主,选用旋转导向工具。风险削减阶段,一般指水平段长度超过 1 500 m 井段钻进阶段,该阶段钻井设备的钻进能力基本达到极限、井下风险较高,以降低钻井井下风险为主。评估井下风险较低时,选用旋转导向工具;评估井下风险较高时,选用近钻头伽马配合 1.50° 无稳定器弯螺杆和水力振荡器^[9]。

表 1 推荐钻井参数和井眼轨迹控制方式

Table 1 Recommended drilling parameters and wellbore trajectory control methods

施工阶段	水平段长度/ m	钻压/ kN	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	风险	井眼轨迹控制方式
钻井提速	$\leq 1\ 000$	120~150	80~100	32~35	低	旋转导向工具+直螺杆
钻井提速与风险兼顾	1 000~1 500	120~150	100~120	30~32	较低	旋转导向工具+直螺杆
					较高	旋转导向工具
					较低	旋转导向工具
风险削减	$\geq 1\ 500$	100~150	80~120	30~32	较高	近钻头伽马+弯螺杆+水力振荡器

2.3 钻井参数优化

“大钻压、高转速、大排量”激进式钻井参数有利于提高钻井速度和井眼清洁效率,但当钻井参数超过极限值,将导致钻具失效或者提速效果不明显。为此,开展钻井参数优化研究,推荐最优钻井参数(见表 1)。基于钻柱弹性稳定方程,不同转速下水平井钻具的临界钻压可由式(1)确定:

$$P_d = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \frac{q_m \omega^2 l^2}{9.86g} \quad (1)$$

式中: P_d 为钻压临界值, kN; E 为钢材弹性模量, N/m^2 ; I 为钻具惯性距, m^4 ; L 为单根钻具长度, m; ω 为钻杆旋转角速度, s^{-1} ; q_m 为钻杆线重量, N; g 为重力加速度, m/s^2 。

经计算,钻进工况下的钻压临界值为 150 kN。

根据管柱动力学与变形能理论,优选安全转速计算模型。钻具整停瞬间动能转化成扭矩变形能,当动载扭矩值大于钻具理论抗扭强度时,钻杆产生

变形,此时的转速即为安全转速临界值。用式(2)计算可知,钻井工况下,安全转速临界值为 120 r/min。

$$M = \sqrt{\frac{\gamma G}{g}} \frac{\pi^2}{30} n \frac{J}{100} \quad (2)$$

式中: M 为钻柱扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; γ 为钻柱扭转角, rad; G 为剪切弹性模量, MPa; n 为转速, r/min; J 为截面极惯性矩, cm^4 。

利用 Landmark 软件模拟分析不同排量下的井眼清洁效果,模拟计算条件如下:井深 6 000 m,水平段长 2 000 m,钻井液密度 2.15 kg/L、塑性黏度 35 mPa·s、动切力 6 Pa,机械钻速 8.0 m/h。钻进工况下保证井眼清洁的最小排量为 30 L/s;结合钻井设备能力和提速效果,最大推荐排量为 35 L/s(见图 2)。实钻过程中,如因设备等原因无法达到最小排量,需提高转速或者使用井眼清洁工具等,保证井眼清洁效果,降低井下故障程度。

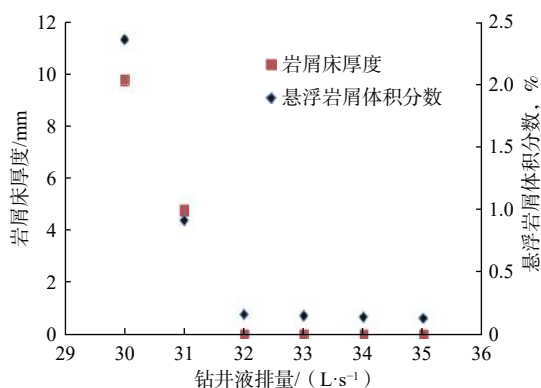


图2 钻井液排量与井眼清洁效果

Fig.2 Flow rate of drilling fluid and wellbore cleaning effect

2.4 钻井提速工具优选及钻头优化

1) 钻井提速工具优选。须家河组石英含量高、粒度小、硬度大, 平均机械钻速仅为 2.0~3.0 m/h。常规 PDC 钻头难以钻入硬地层、粘滑效应明显, 钻头及钻柱振动大、易造成钻头崩齿; 其攻击性和抗冲击性差, 无法满足提速需求。为此, 选用“三刀翼 PDC+三牙轮”复合钻头与水力加压器配合, 复合钻头的牙轮楔形齿提高了钻头的抗冲击性, 双排布齿的 PDC 刀翼提高了切削效率和耐磨性能; 水力加压器通过液压的方式吸收钻柱轴向振动^[10-11], 减少钻头冲击崩齿。

2) PDC 钻头优化设计。龙潭组地层铁质含量高, 研磨性强, 常规 PDC 钻头易磨损; 石牛栏组以深灰色石灰岩、泥质灰岩为主, 硬度高。综合考虑龙潭组铁质含量和夹煤层的特点, 设计了六刀翼双排齿 PDC 钻头, $\phi 16.0$ mm 和 $\phi 13.0$ mm 切削齿混合布齿, 后排齿采用圆锥齿, 以提高钻头的攻击性和夹层穿透能力; 针对石牛栏组岩性, 设计了五刀翼 $\phi 16.0$ mm 切削齿 PDC 钻头, 采用小后倾角设计, 增强钻头的攻击性, 提高机械钻速。

2.5 水平段钻井液选择及性能维护措施

综合考虑井壁稳定、润滑防卡和携岩能力等因素, 水平段选用 BH-OBM 油基钻井液, 其配方为: 基础油+25.0%~35.0% CaCl₂ 盐水+2.0%~3.0% BZ-OPE+1.5%~2.5% BZ-OSE+0.4% BZ-OWA+2.5%~3.0% Ca(OH)₂+0.5%~2.5% BZ-OC+1.5%~2.5% BZ-OFL+0.2%~0.4% BZ-ORM+重晶石粉。该钻井液抗温 200~220 °C, 最高密度 2.50 kg/L, 破乳电压大于 1 000 V, 高温高压滤失量小于 2 mL, 渗透性封堵滤失量 0~4 mL, 制定了以下性能维护措施:

1) 强化防塌性。控制油水比例 80:20~95:5, 水平段钻井液含水量不大于 5.0%, 进一步减少自由水

进入地层, 有利于调控钻井液的流变性, 降低 ECD。控制水相中氯化钙含量不低于 25.0%, 控制水相活度平衡。补充加入主乳化剂 BZ-OPE、辅乳化剂 BZ-OSE、润湿剂 BZ-OWA, 保持钻井液良好的稳定性, 保证破乳电压高于 800 V。

2) 强化封堵性。保持钻井液中不同粒径封堵材料 (BZ-OFL、BZ-OFL 复合纳米型、细目钙) 含量, 封堵微裂缝, 减少压力传递, 控制高温高压滤失量不高于 2 mL。

3) 强化抗高温性能。保持钻井液中抗高温材料含量, 控制降滤失剂 BZ-KLS-I 含量 1.0%~1.5%、抗高温降滤失剂 SMP-II 含量 2.0%~3.0%、BZ-FFT-I 含量 2.0%~3.0%、抗高温 SN 树脂含量 2.0%~3.0%, 保证抗温性能达到 180 °C。

4) 强化携岩能力。采用油基钻井液流动性调节剂调整钻井液动切力, 保证钻井液动切力不低于 8 Pa、动塑比不小于 0.50, 以提高其携岩能力。

2.6 钻井液地面降温系统的研制

目前, 四川盆地页岩气钻井采用的旋转导向工具耐温性能一般在 125~130 °C, 当井底循环温度超过 125 °C 时, 开始出现信号传输不稳定、寿命短等问题, 严重影响了钻井时效; 耐高温旋转导向工具服务费用高, 工具数量少, 保障能力不足。为此, 研制了钻井液地面降温系统。

钻井液地面降温系统由循环泵、换热器、温控系统、压力系统、载冷剂和散热器等组成, 如图 3 所示, 其处理能力为 2 m³/min。该系统的工作原理是, 从循环罐中抽出钻井液进入换热器, 钻井液的部分热量通过换热器被载冷剂带走, 将冷却后的钻井液重新注入到钻井泵上水罐中。载冷剂与钻井液进行换热之后, 循环经过散热器自然冷却, 再循环至换热器与钻井液进行热交换。

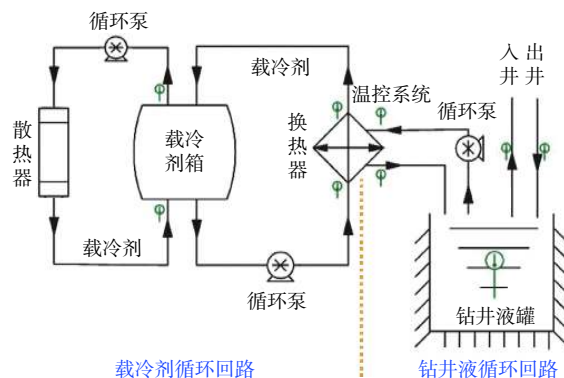


图3 钻井液地面降温系统流程示意

Fig.3 Process of drilling fluid ground cooling system

3 现场试验

泸州区块 4 口井开展了应用试验, 试验井平均井深 5 601 m、水平段长 1 884 m, 钻井过程中未发生井下故障, 机械钻速 6.28 m/h, 钻井周期 110.06 d, 整体效果良好(见表 2), 并创下国内深层页岩气水平段最长纪录(2 550 m)。与未使用该项技术的井相比, 机械钻速提高 5.5%, 钻井周期缩短 14.5%。下面以 B 井为例, 详细说明该技术的应用情况。

表 2 泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术试验结果
Table 2 Test results of the key technologies for deep shale gas horizontal well drilling in Luzhou Block

井号	完钻井深/ m	水平段长/ m	钻井周期/ d	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
A井	5 335	1 655	115.92	6.02
B井	5 437	1 700	102.92	6.36
C井	5 370	1 625	80.02	6.52
D井	6 265	2 550	141.38	5.97

B 井设计完钻井深 5 383 m, 垂深 3 610 m, 预测井底温度 150 ℃, 采用三开井身结构。一开采用水力加压器+复合钻头, 平均机械钻速达到 12.71 m/h, 较邻井提速 19.3%。水平段使用 OBM 油基钻井液, 钻井液密度控制在 2.10~2.20 kg/L, 塑性黏度控制在 75~80 mPa·s, 破乳电压控制在 950 V 以上, 油水比 88:12~95:5, 高温高压滤失量 1.5~2.0 mL, 满足水平段防塌、润滑和防卡要求, 可保障水平段安全高效钻进。水平段自井深 4 300 m 开始使用地面降温系统, 处理量 1.2 m³/min, 井底循环温度由 128 ℃ 降至 124 ℃。钻至完钻井深 5 437 m 时, 处理量 1.8 m³/min, 井底循环温度由 134 ℃ 降至 129 ℃, 保障了常温旋转导向系统的正常工作。该井 2 612~5 251 m 井段采用旋转导向钻井系统与长寿命大扭矩螺杆配合控制井眼轨迹, 5 251~5 437 m 井段采用近钻头地质导向系统、1.50°弯角螺杆钻具和水力振荡器控制井眼轨迹, 顺利完成水平段钻进, 最大全角变化率 6.13°/30m, 水平段机械钻速高达 6.95 m/h。

4 结论与建议

1) 针对四川盆地泸州区块深层页岩气水平井钻井技术难点, 通过优化井身结构, 根据井下风险优选井眼轨迹控制技术, 优化激进钻井参数, 优选减

振和高效破岩提速工具, 利用地面降温设备保障正常钻井作业, 形成了泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术。

2) “大钻压、高转速、大排量”激进式钻井参数有利于提高钻井速度和井眼清洁效率。综合考虑提速效果、钻具安全和设备能力, 推荐水平段钻进最大钻压 150 kN、转速 120 r/min、排量 35 L/s。现场试验表明, 泸州区块深层页岩气水平井钻井关键技术可有效解决该区块深层页岩气水平井钻井中存在的技术问题。

3) 钻井液地面降温系统基本能够满足井下循环温度小于 130 ℃ 的井段常温旋转导向正常工作, 但是随着井下温度升高, 常温旋转导向工具使用将受到限制。为满足泸州区块深层页岩气安全高效开发的需求, 建议继续开展高温旋转导向系统的引进和研发工作。

参 考 文 献

References

- [1] 伍贤柱. 四川盆地威远页岩气藏高效开发关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 1-9.
WU Xianzhu. Key technologies in the efficient development of the Weiyuan shale gas reservoir, Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(4): 1-9.
- [2] 杨洪志, 赵圣贤, 刘勇, 等. 泸州区块深层页岩气富集高产主控因素 [J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 55-63.
YANG Hongzhi, ZHAO Shengxian, LIU Yong, et al. Main controlling factors of enrichment and high-yield of deep shale gas in the Luzhou Block, Southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 55-63.
- [3] 王兴志, 李宜真, 杜洋, 等. 四川盆地志留统龙马溪组底部界线研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 45-50.
WANG Xingzhi, LI Yizhen, DU Yang, et al. Study on Longmaxi Formation bottom boundary in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2014, 36(1): 45-50.
- [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] 张金成, 孙连忠, 王甲昌, 等. “井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 20-25.
ZHANG Jincheng, SUN Lianzhong, WANG Jiachang, et al. Application of multi-well pad in unconventional oil and gas development in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 20-25.
- [6] 杨海平. 涪陵平桥与江东区页岩气水平井优快钻井技术 [J]. 石

- 油钻探技术, 2018, 46(3): 13-19.
- YANG Haiping. Optimized and fast drilling technology for horizontal shale gas wells in Pingqiao and Jiangdong Blocks of Fuling Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 13-19.
- [7] 匡立新, 刘卫东, 甘新星, 等. 涪陵平桥南区块页岩气水平井钻井提速潜力分析 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 16-22.
- KUANG Lixin, LIU Weidong, GAN Xinxing, et al. Acceleration potentials analysis of shale gas horizontal well drilling in the South Pingqiao Block of Fuling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(4): 16-22.
- [8] 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.
- [9] 郭元恒, 何世明, 刘忠飞, 等. 长水平段水平井钻井技术难点分析及对策 [J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 14-18.
- GUO Yuanheng, HE Shiming, LIU Zhongfei, et al. Difficulties and countermeasures for drilling long lateral-section horizontal wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(1): 14-18.
- [10] 王先洲, 邓增库, 夏景刚, 等. 苏 76-1-20H 井钻井液技术 [J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5): 50-53.
- WANG Xianzhou, DENG Zengku, XIA Jinggang, et al. Drilling fluid technology of Well Su76-1-20H[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(5): 50-53.
- [11] 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.
- [12] 臧艳彬. 川东南地区深层页岩气钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 7-12.
- ZANG Yanbin. Key drilling technology for deep shale gas reservoirs in the Southeastern Sichuan Region[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 7-12.
- [13] 刘伟, 白璟, 陈东, 等. 川渝页岩气水平井水平段 "一趟钻" 关键技术进展 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 1-4.
- LIU Wei, BAI Jing, CHEN Dong, et al. Critical techniques to ensure only one bit run when drilling horizontal interval drilling through shale at Sichuan and Chongqing Area and technical advancements[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(1): 1-4.
- [14] 臧艳彬, 白彬珍, 李新芝, 等. 四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(5): 20-24.
- ZANG Yanbin, BAI Binzhen, LI Xinzhi, et al. Challenges of shale gas horizontal well drilling in Sichuan Basin and its vicinity and the technical counter-measures[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(5): 20-24.
- [15] 冯强, 陈世春, 王建龙, 等. 振动减摩阻工具振动参数及安放位置研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 78-83.
- FENG Qiang, CHEN Shichun, WANG Jianlong, et al. Research on vibration parameters and determining the position of a vibration friction reducing tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(4): 78-83.
- [16] 韩先柱, 李刚, 秦文革, 等. 液力推力器在新疆油田准噶尔盆地石炭系地层的提速研究 [J]. 钻采工艺, 2009, 32(4): 66-68, 71.
- HAN Xianzhu, LI Gang, QIN Wenge, et al. Research on hydraulic thruster and its application of in carboniferous formation of Xinjiang Zhunger Basin[J]. *Drilling & Production Technology*, 2009, 32(4): 66-68, 71.
- [17] 王建龙, 孙曜广, 刘学松, 等. 地面可视可控减震器的设计与试验 [J]. 石油机械, 2018, 46(7): 27-30.
- WANG Jianlong, SUN Yaoguang, LIU Xuesong, et al. Design and test of a ground visible controllable shock absorber[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(7): 27-30.

[编辑 曹耐]