

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020083

苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术

史配铭, 薛让平, 王学枫, 王万庆, 石崇东, 杨 勇

(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: 苏里格气田致密气藏水平井钻井时存在机械钻速低、地层井漏坍塌漏并吞、钻井周期长等问题。为此, 在分析钻遇地层情况和钻井技术难点的基础上, 开展了“工厂化”水平井钻井模式优化、“高效 PDC 钻头+大功率螺杆”激进参数钻井技术、不同偏移距井眼轨迹控制模式优化和强抑制低密度 CQSP-4 防塌钻井液分段优化等研究, 形成了苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术。2019 年苏里格气田应用致密气藏水平井优快钻井技术完钻 56 口井, 平均机械钻速 12.76 m/h, 钻井周期 39.12 d, 建井周期 52.20 d, 较 2018 年平均机械钻速提高了 23.16%, 钻井周期缩短了 23.71%, 建井周期缩短了 16.02%。研究与应用表明, 苏里格气田致密气藏水平井钻井关键技术提速效果显著, 为苏里格气田致密气藏高效开发提供了技术支撑。

关键词: 致密气藏; 水平井; 工厂化; 激进参数钻井; 井眼轨迹; 苏里格气田

中图分类号: TE242 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2020)05-0027-07

Optimized Fast Drilling Technology for Horizontal Wells in the Tight Gas Reservoirs in Sulige Gas Field

SHI Peiming, XUE Rangping, WANG Xuefeng, WANG Wanqing, SHI Chongdong, YANG Yong

(Changqing Drilling Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

Abstract: Problems occur when drilling horizontal wells in the tight gas reservoirs in Sulige Gas Field. They include low ROP, contradiction between formation collapse and lost circulation, long drilling cycles, etc. By analyzing the formation drilling challenges, technical research of factory drilling of horizontal wells was conducted to determine the best path forward. The areas studied included drilling mode optimization, “high efficiency PDC bit + high-power PDM” aggressive drilling technology, mode optimization of wellbore trajectory control technology with different offsets and sectional optimization of strongly inhibitive low-density CQSP-4 anti-collapse drilling fluid system. After the study was completed, recommendations were made regarding forming a new optimized fast drilling technology for horizontal wells in the tight gas reservoirs in Sulige Gas Field. In 2019, this technology was applied in 56 wells in Sulige Gas Field, with an average ROP of 12.76 m/h, an average drilling cycle of 39.12 days, and a well construction period of 52.20 days. Compared with those in 2018, in 2019 the ROP increased by 23.16%, the drilling cycle was shortened by 23.71% and the well construction period was reduced by 16.02%. The research and application showed that the key technology for horizontal wells drilling in the tight gas reservoirs in Sulige Gas Field had a remarkable effect on drilling acceleration, which provided technical support and the basis for best practices for the efficient development of the tight gas reservoirs in Sulige Gas Field.

Key words: tight gas reservoir; horizontal well; factorization; aggressive drilling; hole trajectory; Sulige Gas Field

苏里格致密气藏属于典型的低渗、低压、低丰度、大面积分布的多层系致密砂岩气藏, 气藏埋深 3 000~3 500 m, 探明天然气地质储量 $2.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 由于采用常规井开发单井产量太低, 无法满足经济开发要求, 水平井开发成为苏里格气田提高单井产量及采收率的重要手段。随着水平井井身结构、井眼轨迹优化和钻井工具优选应用, 水平井钻井周逐步缩短至 51 d, 但受井位部署、技术方案与措施不统一和提速工具选型差异性大等问题影响, 钻井提速效果不明显。为此, 笔者等人在前人研究的基

上, 借鉴国内页岩气田和致密气藏“工厂化”开发的经验^[1-8], 通过优化井位部署及作业方式, 应用激进钻井参数, 优选高效钻头和大功率螺杆, 优化不

收稿日期: 2019-12-25; 改回日期: 2020-06-17。

作者简介: 史配铭(1984—), 男, 甘肃景泰人, 2008年毕业于重庆科技学院石油工程专业, 工程师, 主要从事水平井、小井眼定向井钻井技术管理工作。E-mail: zjs3spm@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司重点科技计划项目“苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术研究”(编号: F-L20719KF)部分内容。

同偏移距井眼轨迹控制模式、各开次钻具组合和高效强抑制防塌钻井液,形成了苏里格气田致密气藏水平井优快钻井关键技术,并在56口井进行了应用,机械钻速明显提高,钻井周期大幅缩短。

1 地层特点及钻井技术难点

苏里格气田水平井自上而下钻遇地层有:新生界第四系,白垩系志丹统洛河组,侏罗系安定组、直罗组和延安组,中生界三叠系延长组、纸坊组、和尚沟组和刘家沟组,二叠系石千峰组、石盒子组和山西组,上古生界石炭系本溪组和太原组,下古生界奥陶系马家沟组。其中,目的层为盒8段—山1段,岩性为不等厚互层的灰色、灰白色含砾粗砂岩与不等粒砂岩和灰黑色、灰绿色、紫红色泥岩,灰黑色泥岩分布在盒8段的中下部,部分井灰绿色泥岩分布在盒8段的中上部,紫红色泥岩分布在盒8段顶部;山1组砂岩含量较低,泥岩中碳质含量较高^[9]。该气田水平井钻井存在的主要技术难点如下:

1) 延长组底部砾石含量较多,纸坊组上部有部分砂砾岩,刘家沟组地层研磨性强,纵向上分布多套砂、砾、泥岩互层,非均质性强,机械钻速低,PDC钻头容易发生先期磨损。

2) 储层致密砂体物性差,泥质含量高,钻遇储层灰白色含砾粗砂岩时机械钻速可达2.80 m/h,钻遇灰黑色泥岩时机械钻速仅为1.95 m/h,严重制约了水平段钻井速度。

3) 三维水平井偏移距400~800 m不等,导致钻具组合优选困难,延长组地层复合降斜率高达(5°~7°)/100m,纠偏稳斜段长,大井斜、深井段扭方位困难,滑动钻进比例高,效率低,井眼轨迹控制难度大。

4) 刘家沟组裂缝发育,地层承压能力低,钻井液密度大于1.26 kg/L时易发生井漏等井下故障,漏速2.0~8.0 m³/h。

5) 泥岩段井壁稳定性差,易垮塌。目的层石盒子组泥岩发育,水敏性强,井壁稳定性差,斜井段井斜角大于45°时泥岩坍塌严重,划眼处理复杂周期长,水平段钻遇灰黑色泥岩易垮塌,从而导致发生卡钻。

2 致密气藏水平井钻井关键技术

为缩短井场准备、钻机搬迁和设备调试等的时间,提高钻井完井各环节作业效率,缩短建井周期,通过优化大井丛“工厂化”平台布井^[10-12],优选高效PDC钻头和大功率螺杆钻具,采用激进钻井参数,优化不同偏移距井眼轨迹控制模式及分段优化强抑制低密度CQSP-4防塌钻井液性能,形成了苏里格致密气藏“工厂化”水平井优快钻井技术。

2.1 水平井“工厂化”钻井模式优化

全面推广大井丛“工厂化”作业模式,根据气藏规模,结合地形地貌特征,整体优化井场组合,推广“丛式布井、大井组建设”集约用地模式,优化形成了“4+2+2+1”(4口三维水平井、2口二维水平井、2口定向井和1口直井)的9口井设计方案。井口间距为10 m,采用50型钻机逐井作业的“单排一字最优布井逐井施工模式”;优化井口间距,1#—4#井、6#—9#井井口间距为10 m,4#—5#井井口间距为45 m,采用2台50型钻机同时作业或采用40型钻机施工3口常规井与2口二维水平井、50型钻机施工4口三维水平井的“单排一字最优布井双机同步逐井施工模式”。

针对井丛“工厂化”作业周期长、资源共享的特点,通过地方区域电力资源合理扩容,引入“网电钻井”技术,钻机平移过程中只需移动钻机,电动钻机机房、钻机、钻井泵采用电网专用电缆转接端口延长电缆,单井搬迁时间缩短3.0 d以上;采用延伸泵上水低压管线、井口出口管线的方式,实现钻机平移,每4~5口井搬迁一次循环设备,50LDB钻机搬迁时间由3.0 d缩至1.5 d,“工厂化”井间作业时间约缩短50%,大幅缩短了井间施工周期。

2.2 井身结构优化

为防止岩性松散、胶结程度低的第四系漏塌,解决上部刘家沟组井漏、下部石千峰组与石盒子组泥岩地层垮塌的矛盾,将井身结构优化设计为导管+三开井身结构^[13-15],例如,靖72-68H2井井身结构见表1。

表1 苏里格气田靖72-68H2井井身结构优化设计结果

Table 1 Results of optimized casing program design of Well Jing 72-68H2 in Sulige Gas Field

开钻次序	钻头直径/mm	井深/m	套管直径/mm	套管下入地层层位	套管下入深度/m	水泥浆返高
导管	444.5	50	426.4	第四系	50	地面
一开	346.3	500	273.1	安定组	500	地面
二开	228.0	3 290	177.8	石盒子组	3 286	地面
三开	152.4	5 209	114.3	石盒子组	5 204	气层以上500 m

2.3 激进参数钻井技术

激进参数钻井技术是通过优选高效 PDC 钻头, 匹配大功率螺杆, 充分利用钻机和钻井泵性能, 在不同地层采用“大钻压、高转速、大排量”参数钻进^[16], 开展不同地层机械钻速与钻井参数敏感性现场试验, 优化配套与之相适应的螺杆及 PDC 钻头, 形成了一套钻头螺杆序列和钻井参数模板, 提高了全井机械钻速。

2.3.1 高效钻头优选

根据地层特征, 结合“大钻压、高转速、大排量”钻井参数与机械钻速现场试验, 优选确定致密气水平井高效钻头。一开使用五刀翼 $\phi 19.0$ mm 单排切削齿 $\phi 346.3$ mm PDC 钻头 (SD9551); 二开直井段和纠偏井段选用六刀翼 $\phi 19.0$ mm 单排切削齿 $\phi 228.6$ mm PDC 钻头 (SD9631), 提高二开直井段和纠偏井段机械钻速, 实现“一趟钻”完成二开直井段和纠偏井

段; 斜井段选用六刀翼 $\phi 16.0$ mm 双排切削齿、长保径、深内锥的 $\phi 215.9$ mm PDC 钻头 (SD6562ZC), 提高工具面稳定性和斜井段机械钻速, “一趟钻”完成二开斜井段; 三开水平段选用五刀翼 $\phi 16.0$ mm 单排切削齿 $\phi 152.4$ mm PDC 钻头 (SD65621), 提高水平段机械钻速。

2.3.2 大功率螺杆优选

分析地层可钻性, 分井段优选大功率螺杆。刘家沟组以上地层可钻性好, 保持螺杆功率、增大排量、提高转速, 以螺杆最高负荷效率为依据, 充分发挥螺杆功率大、转速高的特性, 加大钻压, 以提高上部软地层机械钻速; 石千峰组以下地层可钻性差、研磨性较强, 可适当降低转速、加大钻压, 选用低转速大扭矩螺杆, 防止高转速螺杆在钻遇石盒子组砾石层时造成钻头先期损坏(见表 2)。

表 2 螺杆型号分段优选结果

Table 2 Results of sectional optimization of PDM type

井段	螺杆型号	级数	工作扭矩/(kN·m)	压降/MPa	最大压降/MPa	排量/(m ³ ·min ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW
直井段和纠偏段	7LZ185X7.0-5	5	10.65	5.6	7.49	1.82	140	145
斜井段	7LZ165X7.0L-4	4	8.30	3.2	4.28	1.64	108	93
水平段	7LZ127X7.0L-3	3	3.47	2.4	3.14	1.04	130	45

2.3.3 激进钻井参数优选

由修正杨格钻速方程可知, 钻压与机械钻速成正比, 即钻压增大, 机械钻速提高; 机械钻速与钻头转速呈近似线性关系, 比水功率与排量成正比, 排量越大, 比水功率越大, 机械钻速越高, 井底净化效果也越好。因此分区块、分井段优选高效 PDC 钻头, 并匹配大功率螺杆, 全井段采用“PDC

钻头+螺杆+MWD”复合钻井技术, 根据现场机械钻速对钻压和转速的敏感性试验结果, 优化钻井参数, 以螺杆实际压差(3.5~4.5 MPa)定钻压、返速定排量、机型定转速, 分井段确定形成了“大钻压、适当转速、大排量”的激进钻井参数(见表 3), 充分发挥钻机和钻井泵的优势, 提高各井段机械钻速。

表 3 激进钻井参数优选结果

Table 3 Optimization results of aggressive drilling parameters

井眼直径/mm	井段	地层	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/kN	钻井液排量/(L·s ⁻¹)	钻井液返速/(m·s ⁻¹)
228.6	直井段和纠偏井段	二开—刘家沟组	70~80	140~220	38~46	1.35~1.63
215.9	斜井段	刘家沟组—石盒子组	60~70	120~200	35~38	1.46~1.58
152.4	水平段	石盒子组	50~60	100~140	15~19	1.48~1.88

2.4 水平井井眼轨迹控制技术

根据水平井靶前距、偏移距优化设计水平井井眼轨道, 利用“PDC 钻头+螺杆+短钻铤+稳定器”(简称“四合一”)钻具组合的特性、地层可钻性、PDC 钻头的性能, 结合地层增降斜规律, 下入 MWD 无线测斜仪控制井眼轨迹。

2.4.1 水平井井眼轨道优化

运用 Navigator Drilling Studio 软件, 根据设计的靶前距、偏移距优化设计水平井井眼轨道, 其中偏移距小于 200 m 为二维水平井, 采用“直—增—稳—增—水平段”五段制井眼轨道; 偏移距大于 200 m 为三维水平井, 采用“直—增—稳—扭方位增斜—

增—水平段”六段制井眼轨道,施工过程根据偏移距,优化增斜井段、扭方位段和进窗入靶井段的全角变化率,有效控制各井段的最大井斜角,降低钻进中的扭矩和摩阻。

2.4.2 水平井钻具组合优化

1)直井段和纠偏井段采用“四合一”钻具组合,即单弯双稳导向钻具组合: $\phi 228.6$ mm PDC 钻头+7LZ185 \times 1.25 $^\circ$ (1.50 $^\circ$)螺杆+ $\phi 177.8$ mm 短钻铤+ $\phi 224.0$ mm 稳定器 + $\phi 177.8$ mm MWD + $\phi 177.8$ mm 无磁钻铤+ $\phi 177.8$ mm 钻铤 $\times 6$ 根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆 $\times 9$ 根+ $\phi 127.0$ mm 普通钻杆 $\times 60$ 根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆 $\times 32$ 根+ $\phi 127.0$ mm 普通钻杆。偏移距大于300 m 时,选用1.50 $^\circ$ 螺杆;偏移距小于300 m 时,选用1.25 $^\circ$ 螺杆,三维水平井将该井段分解为直井段、

定向增斜井段和稳斜纠偏井段,利用地层增降斜规律,结合钻具特性,复合钻进过程中基本处于稳斜或微增状态,有效提高纠偏井段的钻进效率。

2)斜井段采用1.75 $^\circ$ 单弯单稳导向钻具组合: $\phi 215.9$ mm PDC 钻头+7LZ165 \times 1.75 $^\circ$ + $\phi 165.1$ mm 回压阀+ $\phi 165.1$ mm MWD + $\phi 165.1$ mm 无磁钻铤+460 \times 410 转换接头+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆 $\times 9$ 根+ $\phi 127.0$ mm 普通钻杆 $\times 60$ 根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆 $\times 32$ 根+ $\phi 127.0$ mm 普通钻杆。通过统计1.50 $^\circ$ 、1.75 $^\circ$ 螺杆实钻增斜规律发现:1.75 $^\circ$ 螺杆较1.50 $^\circ$ 螺杆的平均复合增斜率高6.19 $^\circ$ /100m,平均滑动增斜率高7.39 $^\circ$ /100m(见表4),滑动比降低1.13%,施工过程中交替进行复合钻进与滑动钻进,将全角变化率控制在(4 $^\circ$ ~6 $^\circ$)/30m,以确保斜井段井眼平滑。

表4 不同弯角螺杆在不同井斜区间的增斜规律

Table 4 Deviation increasing rule of screw with different bending angle in different well deviation interval

井斜角/($^\circ$)	复合增斜率/($^\circ$) \cdot (100m) $^{-1}$)		滑动增斜率/($^\circ$) \cdot (100m) $^{-1}$)	
	7LZ165X1.50 $^\circ$ 螺杆	7LZ165X1.75 $^\circ$ 螺杆	7LZ165X1.50 $^\circ$ 螺杆	7LZ165X1.75 $^\circ$ 螺杆
0~20	9.99	13.32	21.65	23.64
20~30	11.66	14.99	18.32	21.65
30~50	13.99	21.65	17.32	26.64
50~70	14.99	24.98	22.64	36.63
70~89	24.98	31.64	31.64	39.96
平均	15.12	21.31	22.31	29.70

3)水平段采用单弯双稳导向钻具组合: $\phi 152.4$ mm PDC 钻头+7LZ127 \times 1.25 $^\circ$ 螺杆+ $\phi 148.0$ mm 稳定器+ $\phi 127.0$ mm 水力振荡器+ $\phi 120.7$ mm 回压阀+ $\phi 120.7$ mm MWD+ $\phi 127.0$ mm 无磁钻铤+ $\phi 101.6$ mm 加重钻杆 $\times 9$ 根+ $\phi 101.6$ mm 普通钻杆 $\times 200$ 根+ $\phi 101.6$ mm 加重钻杆 $\times 36$ 根+ $\phi 101.6$ mm 普通钻杆。钻具组合中

加入 $\phi 127.0$ mm 水力振荡器,与螺杆组成了既能产生轴向振动,又能产生纵向振动的钻具组合,将钻具与井壁的静摩擦变为动摩擦,使钻压能有效传递到钻头,解决了长水平段滑动钻进过程的托压问题。靖100-21H2井应用该钻具组合,泥岩段滑动机械钻速提高了20.48%(见表5)。

表5 靖100-21H2井水平段水力振荡器使用效果对比

Table 5 Comparison on the effects of hydro-oscillators used in horizontal section of Well Jing 100-21H2

井段/m	岩性	滑动进尺/ m	滑动纯钻时间/ h	滑动机械钻速/ (m \cdot h $^{-1}$)	复合进尺/ m	复合纯钻时间/ h	复合机械钻速/ (m \cdot h $^{-1}$)	备注
4 150~4 226	灰色泥岩	5.00	6	0.83	71.00	28	2.54	未用振荡器
4 226~4 394	灰色泥岩	8.00	8	1.00	160.00	38	4.20	使用振荡器
4 394~5 012	泥质砂岩	50.00	27	1.85	568.00	78	7.28	使用振荡器

2.4.3 水平井井眼轨迹控制技术

根据偏移距、视平移,优选合适的钻具组合,优化纠偏井斜、利用地层自然增降斜规律和按照预期设计的井眼轨道,形成了不同偏移距水平井井眼轨

迹控制技术。

1)直井段和纠偏井段井眼轨迹控制。因延长组中下部地层降斜率高达(5 $^\circ$ ~7 $^\circ$)/100m,所以应根据偏移距优选纠偏地层和井斜角。若偏移距小于300 m,

在纸坊组增斜纠偏,井斜角控制在 15° 以内;偏移距为 $300\sim 600\text{ m}$,在延长组上部纠偏,井斜角控制在 $18^{\circ}\sim 22^{\circ}$,在延长组中部井斜角预留 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$,利用延长组的降斜规律,微调控制,钻穿延长组,进入纸坊组;若偏移距大于 600 m ,二开造斜点上提至井深 $650\sim 800\text{ m}$,直接进行定向纠偏,井斜角控制在 25° 以内,在延长组中上部井斜角预留 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$,利用延长组的降斜规律,微调控制,钻穿延长组,进入纸坊组。

2) 扭方位井段井眼轨迹控制。为防止低效施工,选择增斜扭方位或稳斜扭方位,尽可能在小井斜角下扭方位,重点控制井斜角处于稳斜或微增斜状态,利用钻具组合的特性,将滑动钻进方位角变化率控制在 $(4^{\circ}\sim 10^{\circ})/30\text{ m}$,井斜角变化率控制在 $2^{\circ}/30\text{ m}$ 以内,以确保扭方位井段井眼平滑。

3) 斜井段井眼轨迹控制。按照优快施工和最大程度降摩减阻的原则,合理控制全角变化率,保证实钻造斜率不低于设计造斜率,上部井斜角小于 45° 时,实钻造斜率略高于设计造斜率,斜井段多采用滑动钻进,以保证中靶垂深上偏 0.50 m ;井斜角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 井段属于岩屑床堆积区间,滑动钻进困难,采用复合钻进,以提高施工效率;井斜角大于 60° 以后,复合钻进增斜率能达到 $(4^{\circ}\sim 5^{\circ})/30\text{ m}$,滑动钻进困难的井段或不增斜井段应用复合钻进,以确保井眼圆滑;入窗前 50 m 将井斜角控制在 $83^{\circ}\sim 85^{\circ}$,稳斜探气顶,发现气层后及时将井斜角调整至 $89^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 后快速入窗。

2.5 钻井液分段优化

苏里格北部气田水平井钻遇的延长组下部、盒7段和盒8段泥岩稳定性差,易垮塌;刘家沟组存在压差性漏失,入窗密度窗口窄;斜井段井斜角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、水平段长度超过 $1\ 000\text{ m}$ 后托压严重、滑动钻进困难^[17-18],综合考虑泥岩抑制防塌、低密度防漏和润滑防卡等因素,优选了强抑制低密度CQSP-4防塌钻井液,其配方为 0.7% 天然高分子降滤失剂+ 1.5% 白沥青+ 12.0% KCl+ 0.5% 固体聚合醇+ 0.2% NaOH+ 0.15% 黄原胶+ 1.5% 膨润土+ $0.5\%\sim 1.0\%$ 超低渗透剂+ $2.0\%\sim 3.0\%$ 润滑剂。钻井液性能需根据地层特征分段优化:

1) 二开直井段采用聚合物/KCl钻井液,配方为 0.4% K-PAM+ 0.3% PAM+ $5.0\%\sim 7.0\%$ KCl,将其漏斗黏度控制在 $31\sim 32\text{ s}$;配制膨润土浆,钻至井深 $1\ 000\text{ m}$ 后将其缓慢混入井浆中,对井筒进行定期清扫;钻至井深 $1\ 600\text{ m}$ 后一次性加入 1.0 t NAT20,将

钻井液滤失量控制在 $15\sim 20\text{ mL}$,利用KCl、NAT20和膨润土,强化聚合物钻井液的抑制性、封堵性和携岩性。

2) 钻至刘家沟组中部(垂深 $2\ 500\text{ m}$),将钻井液转化为强抑制低密度CQSP-4防塌钻井液,加入黄原胶、NAT20、NFA25和KCl,将钻井液性能调整为密度 $1.08\sim 1.11\text{ kg/L}$,漏斗黏度 $38\sim 40\text{ s}$,滤失量 $5\sim 4\text{ mL}$ 、动切力 $3\sim 4\text{ Pa}$ 、 $\phi 6$ 读数 $2\sim 3$ 、 $\phi 3$ 读数 $1\sim 2$,井斜角超过 30° 后提高钻井液抑制性(KCl含量达 12% 以上)、封堵性(封堵剂加量 $6\%\sim 8\%$)和携岩性(动切力 12 MPa 以上, $\phi 6$ 读数在 8 以上),以预防大斜度井段泥岩垮塌;随着井深增加,逐步提高钻井液密度,入窗时将钻井液密度控制在 $1.25\sim 1.26\text{ kg/L}$,漏斗黏度控制在 $60\sim 65\text{ s}$ 。

3) 提高钻井液的润滑防卡性能。以固体聚合醇、石墨和液体聚合醇为润滑剂,其加量控制在 $2\%\sim 3\%$,保证摩阻系数不大于 0.06 ;提高固相控制系统利用率,保证振动筛过筛率 100% ,最大限度地清除钻井液中的有害固相,降低摩阻。

4) 水平段钻进兼顾岩性、伽马值及泥岩段长度,采取物理防塌与化学防塌相结合的方法,防止泥岩防塌,钻遇泥岩后在原井浆中加入 $1.0\%\sim 1.5\%$ 水化膨润土和 $1.0\%\sim 2.0\%$ 超细碳酸钙,增强其封堵性能,保证低密度钻井液条件下泥岩的稳定。

2.6 $\phi 152.4\text{ mm}$ 水平段固井技术

为提高水平井固井后环空的封隔性和水平井桥塞分段压裂增产量,三开 $\phi 152.4\text{ mm}$ 井眼下入 $\phi 114.3\text{ mm}$ 套管,采用一次上返固井工艺。由于环空间隙仅有 19.05 mm ,存在下套管摩阻大、环空易堵塞和水泥环薄等问题,因此,采用膨胀降滤失水泥浆,基本配方为G级水泥+增强剂+降滤失剂+增韧材料+缓凝剂+水,密度为 $1.88\sim 1.92\text{ kg/L}$,初始稠度 12 Bc ,API滤失量 36 mL , $85\text{ }^{\circ}\text{C}/40\text{ MPa}$ 条件下稠度达到 70 Bc 的时间为 250 min ,水泥石在 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下养护 24 和 48 h 的抗压强度分别为 27 和 43 MPa ,水泥石的膨胀率为 0.1% 。

三开井段环空间隙小且水平段长,套管紧贴下井壁,导致下套管摩阻大,套管下到井底非常困难。采用“牙轮钻头+双稳定器”钻具组合,模拟套管串的刚度通井至井底后采用高转速(80 r/min)、大排量(20 L/s)循环 2 周后进行短程起下钻,破坏岩屑床、修整井壁,使井眼畅通无阻,短程起下钻到井底后高转速、大排量循环 2 周,彻底清除井底沉砂;起钻前钻井液中加入固体聚合醇、石墨和液体聚合

醇及玻璃微珠,形成高效润滑封闭浆,封闭整个水平段,以降低下套管摩阻,为安全顺利下入套管奠定基础。

现场施工时采用 $\phi 114.3$ mm 弓簧套管扶正器,该扶正器通过性强、居中度高,过流面积较大,能大幅度降低下套管摩阻,直井段和斜井段每3根套管安放1只,造斜段和水平段每2根套管安放1只,以保证套管居中度,避免套管紧贴下井壁,提高水泥浆顶替效率和固井质量。

表6 2018—2019年完钻水平井技术参数对比

Table 6 Comparison on technical parameters of horizontal wells completed in 2018–2019

年份	完钻井数	进尺/m	平均井深/m	平均钻井周期/d	平均完井周期/d	平均建井周期/d	平均机械钻速/($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
2019	56	257 618	4 700	39.12	6.79	52.62	12.76
2018	37	188 302	4 962	51.28	7.86	62.65	10.36

1)全井段采用“MWD+螺杆+PDC钻头”复合钻进技术,分井段、分地层优化激进钻井参数,机械钻速显著提高。2019年完钻井平均机械钻速12.76 m/h,较2018年提高了23.15%,其中直井段和纠偏井段、斜井段和水平段平均机械钻速分别为21.62, 7.87和8.09 m/h,较2018年分别提高了21.19%, 4.71%和26.01%。

2)分段优化钻具组合,结合地层增降斜规律,优化水平井并眼轨迹控制技术,两趟钻比例大幅度提高。2019年完钻的56口水平井中,直井段和斜井段两趟钻完钻的占53.57%,较2018年提高了29.25个百分点;水平段两趟钻完钻的占41.07%,较2018年提高了19.45个百分点,其中3口井的直井段、斜井段和水平段均实现了一趟钻完钻。

3)针对钻遇地层特性,分井段优化强抑制低密度CQSP-4防塌钻井液性能,采取物理与化学防塌相结合、兼顾提高封堵性的方式,预防大斜度井段、水平段泥岩垮塌,利用四级固控设备将有害固相含量控制在较低水平,已完钻水平井电测一次成功率达93.75%,未出现井壁失稳垮塌现象。

4 结论与建议

1)通过优化大井丛“工厂化”平台布井方式,优选高效PDC钻头和大功率螺杆,优化激进钻井参数、不同偏移距并眼轨迹控制模式及分段优化强抑制低密度CQSP-4防塌钻井液性能,形成了苏里格气田致密气藏优快钻井技术,56口井的现场应用效

3 现场应用效果

2019年,苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术在56口井进行了应用,平均钻井周期39.12 d,平均建井周期52.62 d,平均机械钻速12.76 m/h,与2018年已完钻井相比,钻井周期缩短了23.71%,建井周期缩短了16.02%,平均机械钻速提高了23.16%,提速效果显著(见表6)。

果表明,该技术大幅度缩短了钻井周期,降低了开发综合成本,提高了致密气藏开发效率。

2)苏里格致密气藏水平段储层薄,泥岩钻遇率高,而泥岩层机械钻速偏低,建议继续开展水平段钻遇泥岩个性化高效PDC钻头设计与试验,形成水平段泥岩地层快速钻井技术。

3)与国内外页岩气水平井“井工厂”作业模式相比,苏里格气田在井平台“工厂化”布井和钻井提速方面仍有优化空间。

4)水平段长度超过2 000 m的水平井采用“PDC钻头+单弯螺杆+MWD仪器”常规钻具组合钻进时,仍需进行降摩减阻和提高并眼轨迹调整效率的研究。

参 考 文 献

References

- [1] 李传武,兰凯,杜小松,等.川南页岩气水平井钻井技术难点与对策[J].石油钻探技术,2020,48(3):16–21.
LI Chuanwu, LAN Kai, DU Xiaosong, et al. Difficulties and countermeasures in horizontal well drilling for shale gas in Southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 16–21.
- [2] 黄兴龙,徐阳,曾彦强,等.玛131井区低渗透砂砾岩油藏水平井优化设计研究[J].特种油气藏,2018,25(3):97–101.
HUANG Xinglong, XU Yang, ZENG Yanqiang, et al. Horizontal well optimization and design of low-permeability glutenite reservoir in Wellblock Ma131[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 97–101.
- [3] 杨海平.涪陵平桥与江东区块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.

- [4] 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.
- [5] 秦文政, 党军, 臧传贞, 等. 玛湖油田玛 18 井区“工厂化”水平井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2012, 34(4): 7-11.
QIN Wenzheng, DANG Jun, ZANG Chuanzhen, et al. Factorization drilling technology of the horizontal well in the Ma18 Well Block of the Mahu Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(4): 7-11.
- [6] 李洪, 邹灵战, 汪海阁, 等. 玛湖致密砂砾 2000m 水平段水平井优快钻完井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(1): 47-52.
LI Hong, ZOU Lingzhan, WANG Haige, et al. High-quality fast drilling and completion technologies for horizontal wells with horizontal section of 2 000 m long in Mahu tight glutenites[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(1): 47-52.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 史配铭, 肖春学, 王建军. 苏里格南部气田大斜度井钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(1): 18-22.
SHI Peiming, XIAO Chunxue, WANG Jianjun. Drilling technologies used for the highly deviated wells in Southern Sulige Gasfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(1): 18-22.
- [10] 王建龙, 徐旺, 郭耀, 等. 苏里格气田苏 25 区块水平井钻井关键技术[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(7): 26-30.
WANG Jianlong, XU Wang, GUO Yao, et al. Key technology of horizontal well drilling in Block Su25 of Sulige Gas Field[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2019, 16(7): 26-30.
- [11] 叶成林. 苏 53 区块工厂化钻井完井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(5): 129-134.
YE Chenglin. Key technologies of factory drilling and completion in Su 53 Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 129-134.
- [12] 张富成, 王卫忠, 扈东勇, 等. 苏里格气田丛式井钻井技术及应用[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(4): 36-39, 52.
ZHANG Fucheng, WANG Weizhong, HU Dongyong, et al. Cluster wells drilling technology and its application in Sulige Gas Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(4): 36-39, 52.
- [13] 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.
- [14] 解经宇, 高学生, 李伟. 长庆气田水平井优快钻井配套技术[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(5): 30-33.
XIE Jingyu, GAO Xuesheng, LI Wei. Matching technology for optimized fast drilling of horizontal wells in Changqing Gasfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(5): 30-33.
- [15] 胡大梁, 欧彪, 何龙, 等. 川西海相超深大斜度井井身结构优化及钻井配套技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 22-28.
HU Daliang, OU Biao, HE Long, et al. Casing program optimization and drilling matching technologies for marine ultra-deep highly deviated wells in Western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 22-28.
- [16] 邢星, 吴玉杰, 张闯, 等. 超深水井钻井水力参数优选[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 381-385.
XING Xing, WU Yujie, ZHANG Chuang, et al. Optimization of drilling hydraulic parameters for ultra-deep horizontal well[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3): 381-385.
- [17] 杨鹏. 井工厂化作业钻井液关键技术[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(2): 10-15.
YANG Peng. Key technology of drilling fluid for well factory-like operation[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(2): 10-15.
- [18] 陈华. 苏里格气田水平井斜井段防漏防塌钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(1): 66-70.
CHEN Hua. Drilling fluid technology for mud loss control and borehole wall stabilization in the slant section of horizontal wells in Sulige Gas Field[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(1): 66-70.

[编辑 滕春鸣]