

延长陆相页岩气水平井提速技术研究

李永耀¹, 李国荣¹, 罗红芳¹, 张文哲²

(1.延安职业技术学院, 陕西 延安 716000; 2.陕西延长石油(集团)有限责任公司延安分院, 陕西 延安 716004)

摘要:“延安国家级陆相页岩气示范区”已钻水平井存在机械钻速低、钻井周期较长等问题,直接影响陆相页岩气的低成本、高效勘探开发。提高机械钻速是缩短钻井周期、降低钻井成本的重要手段,也是优快钻井的直接体现。在分析了延安陆相页岩地层岩石力学特性的基础上,开展了优选钻头、优化钻井机械参数和水力参数等 3 个方面的研究,以增强钻头对地层的适应性、提升井眼清洁能力和提高机械钻速。最终形成了适合陆相页岩气水平井的钻井关键技术,并在示范区 3 口水平井进行了成功应用,钻井周期缩短 11 d,水平段机械钻速提高 120.08%,实现了陆相页岩气水平井的优快钻井,具有较好的推广价值。

关键词:陆相页岩气;水平井;优快钻井;钻井周期;岩石力学

中图分类号:TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)03-0009-07

Study on the technology of improving the mechanical drilling speed of horizontal wells for terrestrial shale gas

LI Yongyao¹, LI Guorong¹, LUO Hongfang¹, ZHANG Wenzhe²

(1.Yan'an Vocational & Technical College, Yan'an Shaanxi 716000, China;

2.Yan'an Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum Co., Ltd., Yan'an Shaanxi 716004, China)

Abstract: In the Yan'an National Terrestrial Shale Gas Demonstration Zone, there are problems such as low mechanical drilling speed, long drilling time, which directly affects exploration and development of terrestrial shale gas at low-cost, high-efficiency. Increasing the drilling speed is important means to shorten the drilling time and reduce the drilling cost, and it is also a direct indicator of optimum and fast drilling. This paper analyzes the rock mechanical characteristics of the terrestrial shale formation, and carries out theoretical research on three aspects: optimizing the drill bit, optimizing the drilling mechanical parameters and hydraulic parameters so as to enhance the adaptability of the drill bit to the formation, and improve the wellbore cleaning ability and the drilling speed. As a result, the key drilling technology suitable for the development of terrestrial shale gas horizontal wells has been developed with 3 horizontal wells successfully completed in the demonstration area. The drilling time was shortened by 11 days, and the horizontal drilling rate increased by 120.08%. It has achieved optimum and fast drilling of horizontal wells for terrestrial shale gas and is worthy of promotion.

Key words: terrestrial shale gas; horizontal well; optimum drilling; drillingtime; rock mechanics

延长陆相页岩气钻完井突出表现为钻井周期长、机械钻速低、成本高等问题。该区钻井采用三开井身结构,地层复杂导致提速技术发展缓慢。以 2017 年已完钻 5 口页岩气井统计数据为例,完钻井深 2450~2872 m,最小钻井周期高达 67 d,单井机械钻速平均仅为 3.49 m/h。机械钻速受钻井工艺、

钻井参数等多种因素影响,如钻井液密度、钻头类型、钻压、钻井液排量等^[1-3]。

研究工区位于“延安国家级陆相页岩气示范区”甘泉——延长县境内,隶属鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部,整体表现为一平缓的向西倾斜的单斜构造,局部发育由差异压实作用形成的小型鼻状构造。根据

收稿日期:2019-04-29; 修回日期:2020-02-17 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.03.002

基金项目:国家科技重大专项“延安地区陆相页岩气勘探开发关键技术”课题三(编号:7ZX05039-03);国土资源部“十三五”全国油气资源评价省部项目“延长石油矿权区油气资源评价”(编号:2017YQZYPJ0110)

作者简介:李永耀,男,汉族,1984 年生,讲师,机械工程专业,硕士,现从事石油工程机械技术研究工作,陕西省延安市宝塔区枣园路, eagle.1983@163.com。

通信作者:张文哲,男,汉族,1987 年生,工程师,硕士,主要从事页岩气开发工艺技术研究,陕西省西安市科技二路 75 号,405350691@qq.com。

引用格式:李永耀,李国荣,罗红芳,等.延长陆相页岩气水平井提速技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):9-15.

LI Yongyao, LI Guorong, LUO Hongfang, et al. Study on the technology of improving the mechanical drilling speed of horizontal wells for terrestrial shale gas[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):9-15.

现场钻遇情况,地层自上而下依次为新生界第四系,中生界白垩系洛河组,侏罗系中统安定组、直罗组,下统延安组、富县组以及三叠系上统延长组,目的层为中生界延长组 and 上古生界山西组,均属于陆相沉积。相较于南方海相,研究工区陆相页岩沉积相变化快,储层矿物组分复杂,粘土矿物含量高,物性、岩石力学等参数均表现出强非均质性。现有页岩气钻完井技术应用到陆相页岩气地层存在一定局限性^[4-7]。

本文从岩石力学特性分析出发,在钻头优选、优化钻井机械参数和水力参数等方面进行了研究,形成了延长陆相页岩气水平井优快钻井技术。

1 地层岩石力学特性分析

1.1 岩石力学参数测试

地层岩石特性是钻头优选、钻井参数优化的基础信息^[8-10]。首先对延长油田目标地层岩石开展了岩石强度、硬度、可钻性实验测试,并以此分析了地层硬度、可钻性、塑性等岩石力学参数信息。根据现场实际,收集到 L172 井岩心 3 块、新 38 井岩心 2 块及新 53 井岩心 1 块,并进行了室内岩石力学参数实验^[11]。取心岩样以砂岩、夹砂页岩和页岩为主,取心井段 1075~1660 m,按照石油天然气行业标准《岩石可钻性测定及分级方法》(SY/T 5426-2000)完成了地层岩石力学参数测试,结果见表 1。

表 1 L172 井地层岩石力学参数测试结果
Table 1 Evaluation results of rock mechanics at Well L172

岩心 编号	抗压 强度/ MPa	硬度/ MPa	塑性 系数	PDC 钻 头可钻 性级值	牙轮钻 头可钻 性级值	声波/ (m· s ⁻¹)	内摩 擦角/ (°)
1	垂直	86.45	594.69	1.7	3.40	4.59	2746
	水平	45.78	865.01	2.0	2.89	5.10	3675
2	垂直	82.83	432.50	0.8	3.30	5.00	2463
	水平		432.50	1.8	4.25	5.83	
3	垂直	113.50	1027.20	0.8	3.73	6.06	2667
	水平	52.80	1045.64	1.8	4.79	6.74	4901
4	垂直	60.99	243.28	1.1	3.30	4.09	2594
	水平	53.60	324.37	3.0	4.25	6.57	4547
5	垂直	109.35	865.01	1.5	3.69	5.68	2855
	水平	56.97	1027.20	1.8	3.96	5.95	3903
6	垂直	121.92	405.47	2.0	4.03	5.74	2076
	水平	108.55	1162.35	1.0	4.74	6.37	3962

由表 1 可以看出,总体上,地层岩石垂直方向和水平方向上的岩石抗压强度、硬度、塑性系数、声波时差差异较大,岩石可钻性差异较小。

1.2 地层岩石可钻性评价

利用声波测井资料获取地层岩石力学参数的数学模型^[12],并根据实验测试数据拟合得到各模型的系数,建立 PDC 钻头可钻性评价计算公式^[13]:

$$K_{\text{dpdc}} = A \frac{E^{\alpha} \exp(BV_{\text{sh}})}{(1+\mu)^{\beta} (1-2\mu)^{\gamma}} \quad (1)$$

式中: K_{dpdc} ——钻头可钻性级值; A ——模拟系数; E ——杨氏弹性模量, MPa; B ——地质因素影响因子; V_{sh} ——地层泥质含量, %; μ ——泊松比; α 、 β 、 γ ——岩石抗张强度、抗剪强度和抗压强度系数。通过室内岩石力学实验模拟求得各参数具体数值: $A=0.995$, $B=0.01$, $\alpha=0.00001$, $\beta=0.0004$, $\gamma=0.923$ 。

利用测井资料对页岩气水平井的地层可钻性进行了评价^[14],评价结果如图 1 所示。分析可知,该研究区块地层岩石可钻性、硬度及岩石内摩擦角随井深增加而增大,表明随井深增加地层岩石强度增大,可钻性变差,研磨性增强。这与现场钻井实际情况吻合。

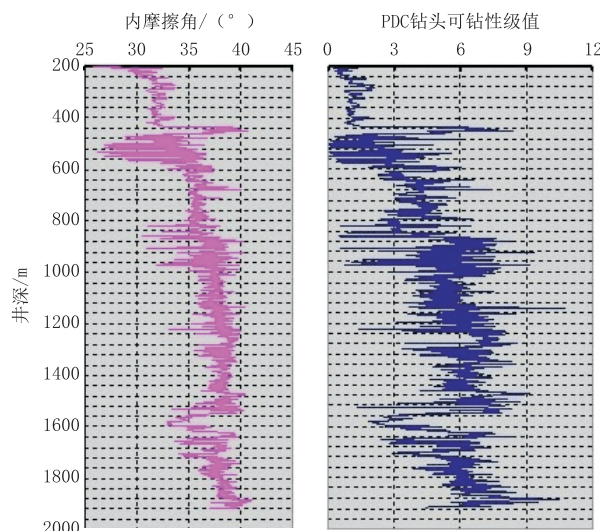


图 1 LP127 井地层抗钻特性评价结果

Fig.1 Stratum anti-drilling characteristics evaluation results

2 钻头优选研究

2.1 钻头性能评估

在钻头性能评价指标合理选取的基础上,应用了主成分投影法进行钻头性能评价的新方法^[15]。其具体步骤如下。

2.1.1 钻头性能评价指标的选取

针对现场钻井实际情况,侧重考虑钻头造价、钻头破损度、钻井周期、进尺、机械钻速等描述钻头特

性和经济效益的 5 项参数,同时参考立管压力、泵排量、转速、钻压等反映钻头适用环境的 4 项指标。

2.1.2 目标数据规范化处理

设有 m 个评估目标, n 个评定参数(n 值取 9), 建立初始评价矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。对于机械钻速、进尺、钻井周期、钻头破损度及钻头造价等目标采用下列方法进行规范化处理。

(1) 评估目标若为望大型, 参数值 x_{ij} 越大越好, 变换公式为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad i=1,2,\dots,m; \\ j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中: x_{ij} ——目标值; y_{ij} ——目标值。

(2) 评估目标若是望小型, 参数值 x_{ij} 越小越好, 变换公式为:

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}} \quad i=1,2,\dots,m; \\ j=1,2,\dots,n$$

(3) 评估目标是望目型, 参数值 x_{ij} 在区间 $[m_1, m_2]$ 内最佳, 变换公式为:

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}{m_1 - \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}, & \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} \leq x_{ij} \leq m_1 \\ 1, & m_1 \leq x_{ij} \leq m_2 \\ \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} - m_2}, & m_2 \leq x_{ij} \leq \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} \end{cases} \\ i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$$

对于泵排量、钻压和转速等指标采用下式进行规范化处理^[16]:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - b_{ij}}{a_{ij} - b_{ij}} \quad i=1,2,\dots,m; j=6,7,8,9 \quad (3)$$

式中: a_{ij} ——钻头厂家所推荐的该项指标的上限值; b_{ij} ——钻头厂家所推荐的该项指标的下限值。

经规范化处理后, 指标数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 化成了决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, $y_{ij} \in [0, 1]$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。决策向量为 $\vec{d}_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in})$, ($i=1, 2, \dots, m$)。

2.1.3 给目标赋权

决策矩阵 Y 可利用各项指标的权重进行加权优化。令 $Z = w_j y_{ij}$, 得到赋权后的决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。决策向量为 $\vec{d}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in})$, ($i=1, 2, \dots, m$)。

2.1.4 指标的正交变换

由于钻头性能评价指标众多, 各项参数之间具有一定关联性, 融合起来造成评价信息互相干扰, 有一定重叠性, 难以准确描述各决策向量的权重。采用正交变换的方式过滤重复信息^[17]。

令 $U_{m \times n} = [\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n] = [\vec{z}_1, \vec{z}_2, \dots, \vec{z}_n]$ $\cdot A = Z \cdot A$, 正交阵 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 满足:

$$U'U = (ZA)'(ZA) = A'(Z'Z)A = A' \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} A \\ = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} A'A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix}, \\ (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为矩阵 $Z'Z$ 的特征值, 所对应的单位特征向量分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ (即: $(Z'Z)A$

$$= \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} A)$$

通过正交变换得到新的决策矩阵 $U = (u_{ij})_{m \times n}$ 。 U 的每一项行向量对应一个新的决策向量为 $\vec{d}_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$, ($i=1, 2, \dots, m$)。 U 的每一个列向量代表由 n 个无量纲加权指标 $\vec{z}_j$ 的线性组合表示的一个新的综合指标。 n 个综合指标两两正交, 从而消除了信息的重叠。

2.1.5 求出理想决策投影, 目标值综合评判

构造理想决策目标值 $\vec{d}^* = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, 其中, $d_j = \max_{1 \leq i \leq m} \{u_{ij}\}$ 。将 $\vec{d}^*$ 单位化处理得 $\vec{d}_0^* = \vec{d}^* / \|\vec{d}^*\| = \vec{d}^* / \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}$ 。计算出各决策向量在理想向量方向上的投影:

$$D_i = \vec{d}_i \cdot \vec{d}_0^* = \frac{1}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}} \sum_{j=1}^n d_j u_{ij}, \\ (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: D_i ——钻头可钻性的综合评估级值, D_i 越小,钻头可钻性越差。

2.2 页岩气水平井选型方案

根据上述理论研究和陆相页岩气水平井的地层抗钻特性评价结果^[18-20],可将该区块按钻遇井深划分为4个地质类别,见表2。

根据该油田地层抗钻特性评价结果,从钻头与地层适配性角度提出的钻头选型建议和推荐方案如表3、表4所示。

表2 岩石力学参数统计结果

Table 2 Rock mechanical parameters

地 层	牙轮钻头可钻性				PDC钻头可钻性			
	最大	最小	平均	非均质系数	最大	最小	平均	非均质系数
洛河组,安定组	5.43	3.17	4.14	0.18	4.53	1.51	2.70	0.37
直罗组,延安组,富县组,长1,长2+3	7.72	2.22	5.15	0.17	9.29	0.73	4.19	0.32
长2+3~长7	8.40	2.03	6.67	0.13	11.04	1.04	7.04	0.24
长7水平段	3.79	1.82	2.57	0.18	2.33	0.95	1.37	0.22

表3 延长页岩气水平井钻头选型建议

Table 3 Recommendation for terrestrial shale gas horizontal drilling bit selection

地 层	地 层 性 质	钻 头 选 型 建 议
洛河组,安定组	属于软至中软、中低研磨性、非均质地层	建议选用牙轮钻头
直罗组,延安组,富县组,长1,长2+3	属于中软至中等强度地层,中等研磨性、非均质地层	选用大直径PDC复合片、中密度布齿、适合钻硬夹层的PDC钻头
长2+3~长7	属于中等至中硬地层、高磨性、非均质性较强	该井段地层强度高,研磨性高,建议采用高效牙轮钻头钻进。加强钻头的耐磨性
长7	属于极软至软地层、中低研磨性、非均质性较强	选PDC钻头,加强钻头的攻击性;若水平段短,也可选牙轮钻头;加强钻头的导向功能

表4 延长页岩气水平井钻头推荐方案

Table 4 Recommended terrestrial shale gas horizontal drilling bits

地 质 层 位	钻头型号	效益指数	钻头厂家	钻头类别
第四系,洛河组,安定组	HJ517	2.12	江汉	牙轮
直罗组,延安组,富县组,长1,长2+3	M312			PDC
长2+3~长7	HJ537	3.76	江汉	牙轮
	HJ547	3.22	江汉	牙轮
长7	M213			PDC
	MD517	4.35	江汉	牙轮

3 钻井机械参数优化

应用建立的钻进参数优化模型和遗传优化算法^[21],根据实钻资料,对延页平1井各层段推荐钻头的钻进参数进行了优化。优化结果如表5所示。

表5 研究区块钻进参数优化结果

Table 5 Drilling parameter optimization results in the research block

地 质 层 位	井眼尺寸/mm	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)
第四系,洛河组,安定组	444.5	120~150	85~120
直罗组,延安组,富县组,长1,长2+3	311.15	100~150	50~80
长2+3~长7	311.15	150~180	40~60
长7	215.9	30~80	复合 250~300

4 钻井水力参数优化

水力参数优化设计的主要任务是确定钻井液排量和选择喷嘴直径^[22-24]。对于水平井钻井,水力参数优化步骤如图2所示。

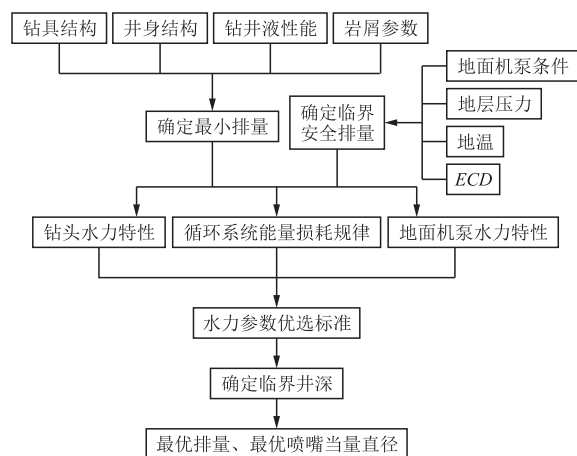


图2 水平井钻井水力参数优化步骤

Fig.2 Horizontal well drilling hydraulic parameter optimization steps

YYP-1井是一口典型的陆相页岩水平井,其井身结构数据见表6。根据水力计算模型^[25-26],可得到该井各开次的最小排量,计算结果如表7所示。

表6 YYP-1井井身结构数据

Table 6 YYP-1 well structure data

开次	井深/m	钻头尺寸/mm	套管尺寸/mm	套管下入深度/m
一开	0~430	444.5	339.7	430
二开	430~1090 1090~1744	311.1	244.5	1744
三开	1744~2344	215.9	139.7	2339

表 7 YYP-1 井最小排量计算结果

Table 7 Minimum displacement calculation result in YYP-1

开钻 次序	井深/m	钻井液 密度/ (g· cm ⁻³)	钻屑 直 径/ mm	钻杆 转速/ (r· min ⁻¹)	机械 钻速/ (m· h ⁻¹)	钻屑 密度/ (g· cm ⁻³)	最小 排量/ (L· s ⁻¹)
一开	0~430	1.07	3.175	100	10	2.65	43.10
二开	430~1090	1.03	3.175	65	10	2.65	26.25
	1090~1744	1.23	3.175	65	10	2.65	53.83
三开	1744~2344	1.17	3.175	65	10	2.65	34.40

根据上述水力参数优化原理,结合现场设备条件限制,对 YYP-1 井的水力参数进行了二次计算,结果见表 8。

5 页岩气快速钻井系统软件开发

综合钻头选型、机械参数优化和水力参数优化等技术,形成了页岩气快速钻井参数优化技术。在

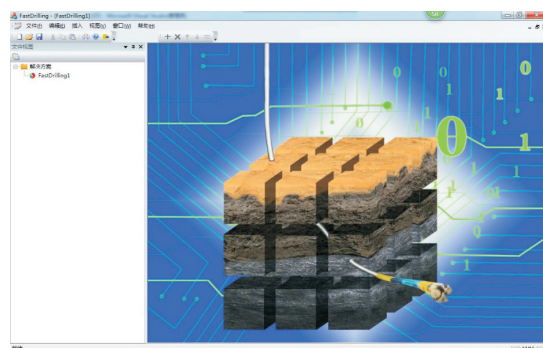
表 8 YYP-1 井水力参数优化结果

Table 8 Drilling hydraulic parameter optimization results for YYP-1

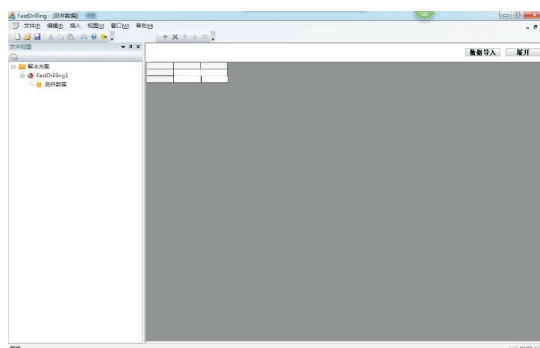
井 深/ m	钻井液 密度/ (g· cm ⁻³)	排 量/ (L· s ⁻¹)	泵 压/ MPa	钻柱 内压 耗/ MPa	环空 内压 耗/ MPa	钻头 压 耗/ MPa	喷嘴 当量 直径/ mm	ECD/ (g· cm ⁻³)
430	1.05	50	9.53	4.14	0.090	5.30	24.40	1.070
1090	1.03	35	6.45	3.74	0.107	1.92	27.50	1.050
1744	1.23	50	26.37	13.66	0.284	11.74	21.90	1.250
2344	1.17	30	10.89	5.15	1.700	3.30	23.02	1.288

此基础上,进行了页岩气快速钻井优化设计系统软件开发^[27]。

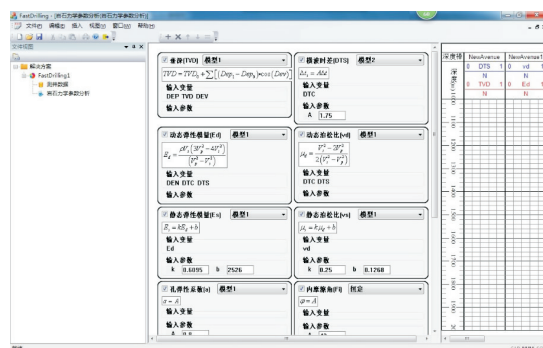
软件主要由测井数据导入模块、岩石强度参数分析模块、钻头选型模块、钻井机械参数优化模块和钻井水力参数优化模块组成,软件界面如图 3 所示。通过权威机构第三方检测,运用软件对钻井参数优化后,机械钻速提高明显。



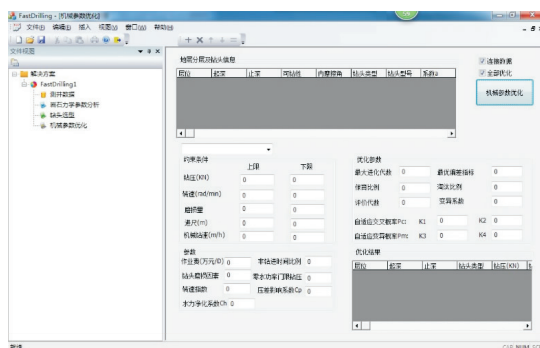
(a) 软件主界面



(b) 测井数据导入模块



(c) 岩石强度参数分析模块



(d) 水力参数优化模块

图 3 页岩气优快钻井优化设计系统软件界面(登记号:2016SR199099))

Fig.3 Shale gas excellent fast drilling optimization design system software interface

6 页岩气水平井优快钻井技术应用

该技术 2018 年在 YYP-1 井、YYP-2 井和 YYP-3 井 3 口页岩气水平井进行了应用,成功钻进至更深的上古生界山西组地层,水平段长度 800~1200 m(见表 9)。此前 2017 年,5 口井未应用该

表 9 应用井基本信息

Table 9 Basic information of the subject well

井 号	井深/m	垂深/m	水平井段长度/m	水平段层位	开次
YYP-1	2336	1517	800	山 1 ²	三开
YYP-2	2756	1514	1000	山 2 ¹	三开
YYP-3	3275	1520	1200	山 1 ²	三开

技术,目的层为中生界延长组长7,水平段最长仅800 m。

应用陆相页岩气水平井优快钻井技术后,井下复杂情况明显减少,全井段机械钻速、水平段机械钻速大幅提高,钻井周期缩短明显,效果见图4。新钻3口井水平段较2017年5口完钻井延长近1倍;YYP-1井、YYP-2井、YYP-3井钻井周期较2017年均分别缩短3、11、7 d,平均缩短32.74%;全井段机械钻速平均提高28.05%,水平段机械钻速平均提高120.08%,现场应用效果显著。

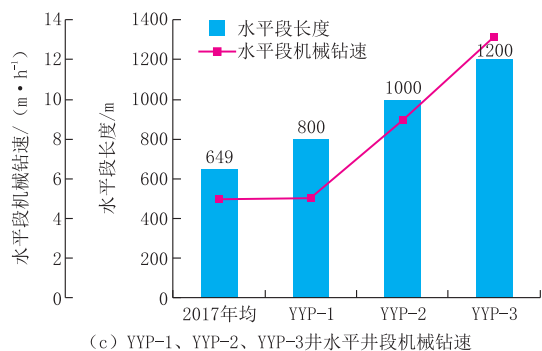
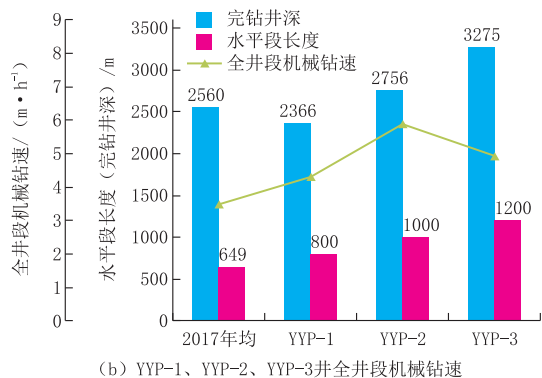
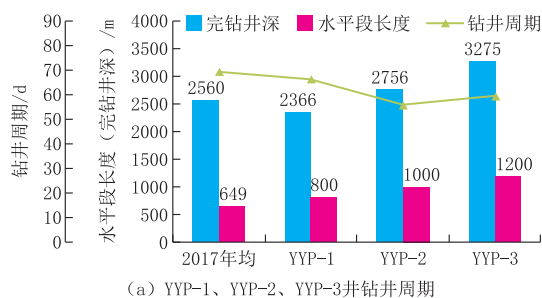


图4 技术应用效果对比

Fig.4 Comparison of field use results

7 结论

(1)基于岩石力学实验,研究了地层的岩石可钻性,建立了地层的岩石可钻性评价模型,分析认为地层岩石强度随井深增加而增大,可钻性变差,研磨性

增强。

(2)结合地层参数和不同钻头的性能,建立了钻头特定地层适应性的评价模型,根据实钻资料,对YYP-1井各层段机械参数进行了优化,给出井眼清洁最小排量分析方法,优化了钻井水力参数。

(3)研发了一套“页岩气快速钻井优化设计系统”软件,综合钻头优选、机械参数优化和水力参数等研究成果,形成了陆相页岩气优快钻井技术。新技术应用到3口陆相页岩气水平井后,井下复杂事故率显著降低,水平段延长近1倍,钻井周期和水平段机械钻速均有了明显提高。

参考文献(References):

- [1] 马振锋,于小龙,杨全枝,等.陆相页岩气水平井钻井提速技术[J].非常规油气,2017,4(4):88-92,87.
MA Zhenfeng, YU Xiaolong, YANG Quanzhi, et al. The technology of improving rate of penetration in continental shale gas horizontal well[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4 (4):88-92,87.
- [2] 樊华,龙志平.页岩气水平井JY10HF井钻井关键技术及认识[J].石油机械,2019,47(1):14-19.
FAN Hua, LONG Zhiping. Key technology and understanding of shale gas horizontal well drilling of JY10HF[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(1):14-19.
- [3] 李林,王存新,罗朝东.永川页岩气水平井优快钻井关键技术研究[J].钻采工艺,2018,41(4):105-106.
LI Lin, WANG Cunxin, LUO Zhaodong. Fast horizontal shale gas drilling techniques used at Yongchuan[J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(4):105-106.
- [4] 李华兵.陕西南部海相页岩气与陕西北部陆相页岩气储层特征对比分析[J].陕西地质,2018,36(2):34-37.
LI Huabing. Comparative analysis of shale gas reservoir between the marine shale gas in the southern Shaanxi and the terrestrial shale gas in the northern Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 2018,36(2):34-37.
- [5] 张宜.页岩气储层脆性评价方法研究现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):51-56.
ZHANG Yi. Research status of shale gas reservoir brittleness evaluation method[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):51-56.
- [6] 吴辰泓,张丽霞,高潮.下寺湾地区延长组陆相页岩孔隙特征及影响因素[J].西安科技大学学报,2018,38(6):990-998.
WU Chenhong, ZHANG Lixia, GAO Chao. Pore characteristics and influencing factors on lacustrine shale in Yanchang Formation, Xiasiwan Area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018,38(6):990-998.
- [7] 王琳,张金川,王宇,等.延长探区山西组陆相页岩储层孔隙结构及孔隙发育主要影响因素[J].中国矿业,2018,27(10):152-157.
WANG Lin, ZHANG Jinchuan, WANG Yu, et al. Pore structure and its influence factors of lacustrine facies shale res-

- ervoirs in Shanxi Formation of Yanchang exploration area[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 152—157.
- [8] 熊天文. 大港油田定向井钻头优选研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- XIONG Tianwen. Study on the optimization of directional well bits in Dagang Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [9] 陈星星. 混合钻头在涪陵页岩气田的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(10): 34—39.
- CHEN Xingxing. Application of hybrid drill bits in Fuling Shale Gas Field [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(10): 34—39.
- [10] 乐雷. 吉林油田钻头优选研究[J]. 石化技术, 2016, 17(3): 85.
- LE Lei. Optimization of bits in Jilin Oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 17(3): 85.
- [11] 秦晓艳, 王震亮, 于红岩, 等. 基于岩石物理与矿物组成的页岩脆性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1924—1932, 1941.
- QIN Xiaoyan, WANG Zhenliang, YU Hongyan, et al. A new shale brittleness evaluation method based on rock physics and mineral compositions [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1924—1932, 1941.
- [12] 夏遵义, 马海洋, 房望. 渤海湾盆地沾化凹陷陆相页岩储层岩石力学特征及可压裂性研究[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 134—141.
- XIA Zunyi, MA Haiyang, FANG Kun. Rock mechanical properties and fracability of continental shale in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(1): 134—141.
- [13] 董晓军, 胡建均, 刘刚, 等. 延长气田 PDC 钻头的优选与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 5(12): 20—22.
- DONG Xiaojun, HU Jianjun, LIU Gang, et al. Optimization and application of PDC bit in Yanchang Gasfield [J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2011, 5(12): 20—22.
- [14] 张辉, 高德利, 苗侠. 预测页岩地层不同钻进方向下的岩石可钻性级值的方法: CN103266889A [P]. 2013—08—28.
- ZHANG Hui, GAO Deli, MIAO Xia. Method for predicting rock drillability values in different drilling directions in shale formations; CN103266889A [P]. 2013—08—28.
- [15] 张辉, 高德利. 用主成分投影法评价和优选钻头[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 39—41.
- ZHANG Hui, GAO Deli. Evaluation and selection of bits based on the principal component projection method [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 39—41.
- [16] 吴凌峰. 用熵权法和主成份投影法优选 PDC 钻头[J]. 当代化工, 2014(5): 867—869.
- WU Lingfeng. Evaluation and selection of bits based on the entropy method and principal component projection method [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014(5): 867—869.
- [17] 阎铁, 毕雪亮, 刘春天, 等. 应用自适应共振神经网络法优选钻头类型[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 25(3): 63—65, 120.
- YAN Tie, BI Xueliang, LIU Chuntian, et al. Optimizing bit type by adaptive resonance theory neural network [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2001, 25(3): 63—65, 120.
- [18] 曹继飞. 川东北海相地层抗钻特性及钻井提速研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- CAO Jifei. Research on anti-drilling characteristics and increasing drilling speed for marine formation in the Northeast Area of Sichuan [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [19] 王克雄, 魏凤奇. 测井资料在地层抗钻特性参数预测中的应用研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 61—62.
- WANG Kexiong, WEI Fengqi. Application of logging information in predicting formation anti-drilling parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 61—62.
- [20] 邹德永, 孟祥雨, 袁军, 等. 基于模式识别的钻头选型新方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 40—45.
- ZOU Deyong, MENG Xiangyu, YUAN Jun, et al. A new method for bit selection based on pattern recognition [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 40—45.
- [21] 陈志学. 虚拟强度指数法优化钻井技术的研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- CHEN Zhixue. Study and application of virtual strength index optimization drilling technique [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [22] 韩宝华. 延长气田快速钻井工艺技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- HAN Baohua. Study of fast drilling technology in Yanchang Gas Field [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [23] 沙贞银, 杜俊伯, 向进, 等. 涪陵页岩气田钻井提速方案及实施效果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(7): 31—36.
- SHA Zhenyin, DU Junbo, XIANG Jin, et al. A scheme for drilling rate improving in fuling shale gas and its implementation effects analysis [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7): 31—36.
- [24] 郭宝林, 孙庆春, 于建克, 等. 鸭 K 区块钻井提速与钻头使用分析[J]. 天然气与石油, 2016, 34(6): 60—65, 145.
- GUO Baolin, SUN Qingchun, YU Jianke, et al. Analysis of drilling speed and drill bit usage in Duck K Block [J]. Natural Gas & Oil, 2016, 34(6): 60—65, 145.
- [25] 冯林, 母亚军, 杨代明, 等. 马深 1 井二开大井眼优快钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(5): 577—582.
- FENG Lin, MU Yajun, YANG Daiming, et al. Big hole of second section of Well Mashen-1 optimized drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(5): 577—582.
- [26] 张金成. 涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(7): 1—8.
- ZHANG Jincheng. Optimal and fast drilling technology for horizontal wells in Fuling Shale Gas Field [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7): 1—8.
- [27] 管申, 谭强, 黄熠, 等. 海上复杂压力体系油田钻井安全密度窗口研究[J]. 天然气与石油, 2015, 32(5): 52—55, 10.
- GUAN Shen, TAN Qiang, HUANG Yi, et al. Study on safe drilling density window in offshore oilfield with complex pressure system [J]. Natural Gas & Oil, 2015, 32(5): 52—55, 10.

(编辑 韩丽丽)