

涪陵页岩气田加密井轨道优化设计技术

宋明阶, 彭光宇, 胡春阳, 来传亚

(中石化江汉石油工程有限公司钻井二公司, 湖北武汉 430070)

摘要:为了进一步降低涪陵页岩气田加密调整井的施工难度,提高钻井速度,针对涪陵工区的地质特点,开展加密井轨道优化设计技术研究。页岩气三维轨道设计主要有五点六段制、斜面圆弧六段制、双二维等三种类型,本文通过定向段长、摩阻、扭矩等指标对比优选,得出斜面圆弧三维轨道设计更适合涪陵工区加密井轨道设计。为了优化斜面圆弧三维轨道设计参数,本文以一口三维水平井为例进行轨道优化,通过对比不同造斜点、造斜率情况下摩阻和扭矩的变化规律,以摩阻扭矩最小为优化目标,优选造斜点和造斜率,为涪陵页岩气田加密井轨道优化设计提供借鉴。

关键词:涪陵页岩气田;加密调整井;轨道设计;三维水平井;摩阻扭矩

中图分类号:P634;TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)05-0011-06

Infill well 3D horizontal wellbore trajectory optimization design method in Fuling Shale Gas Field

SONG Mingjie, PENG Guangyu, HU Chunyang, LAI Chuanya

(No.2 Drilling Company, Sinopec Jiangnan Petroleum Engineering Company, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to further reduce the drilling difficulty of infill adjustment wells in the Fuling Shale Gas Field, as well as improve the drilling speed, research on infill well trajectories optimization design has been carried out in regard to the geological characteristics of the shale gas field. The 3D trajectory design for shale gas drilling mainly includes three types: “five-point six-section” trajectory, “six-section with the circular arc in the inclined plane” trajectory and “dual-2D” trajectory. The optimized “circular arc in the inclined plane” 3D trajectory is determined to be more suitable for horizontal well design in the Fuling Shale Gas Field by comparison of the indicators such as the length of directional section, drag force, torque. To optimize the parameters of the 3D trajectory design with circular arc in the inclined plane, a case study has been conducted on trajectory optimization design for a 3D horizontal well with the kick off point and build-up rate optimized through comparison of drag force and torque at different kick off points and build-up rates to find out the minimum drag force and torque. It can provide reference for the infill well trajectory optimization design in the Fuling Shale Gas Field.

Key words: Fuling Shale Gas Field; infill well; trajectory design; 3D horizontal well; drag force and torque

涪陵页岩气田所在地属山地丘陵地貌,为了最大限度地减少井场数量、减少单井占地面积和降低地面工程造价,提高页岩气整体开发效益,采用“井工场”技术进行开发。为了满足集中压裂的需求,水平段并眼方位一般设计为与最大主应力方向垂直或者近似垂直,导致实际井口与入窗点的闭合方位与水平井并眼方位不在同一条直线上,因而该地区水

平井多为三维水平井^[1-4]。在涪陵页岩气田一期、二期产能建设中,主要通过地震勘探资料和少数探井的实钻资料确定目的层垂深,因地震资料解释精度相对较低,造成实钻与设计地层情况存在较大偏差,只有通过实钻过程中及时调整靶点垂深和待钻轨道设计。目的层的不确定性增加了轨迹控制的难度和脱靶风险。因此,为了提高中靶率及降低施

收稿日期:2019-08-03 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.05.002

作者简介:宋明阶,男,汉族,1986年生,工程师,勘查技术与工程专业,主要从事定向井技术服务与管理工作,重庆市涪陵区李渡镇三公里江汉钻井二公司川东南项目部,smj86326@126.com。

引用格式:宋明阶,彭光宇,胡春阳,等.涪陵页岩气田加密井轨道优化设计技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):11-16.

SONG Mingjie, PENG Guangyu, HU Chunyang, et al. Infill well 3D horizontal wellbore trajectory optimization design method in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(5):11-16.

工难度,工区内三维水平井轨道设计主要采用“五点六段制”设计方法,即“直井段—增斜段—稳斜段—扭方位段—增斜段—水平段”六段式进行轨道设计^[5-8]。该设计方法先通过稳斜段消除偏移距,再扭方位对准靶体方向,最后增斜着陆。将扭方位和增斜分开进行,即降低了施工难度,又最大限度地满足了靶点调整要求。

经过一期、二期产能建设的大规模勘探开发,井网初具规模。为了实现稳产、增产目标,对优质页岩气层进行加密调整开发。加密井邻井资料充分,目的层垂深预测相对准确,一定程度上降低了轨道设计要求。为了进一步降低整体开发成本,增加单井动用储层面积,加密井水平段长度普遍在 2000 m 以上。长水平段水平井施工的最大困难,即管柱在井内的摩阻和扭矩特别大。在相同工况下,长水平段水平井的延伸能力主要取决于管柱摩阻扭矩的大小;减小长水平段水平井摩阻扭矩的方式方法有很多,首先从井眼轨道设计入手,设计出摩阻扭矩最小的井眼轨道是长水平段水平井摩阻扭矩控制技术的关键之一,而长水平段水平井设计的基本原则在于降低摩阻和扭矩^[9-10]。为此对五点六段制三维轨道设计继续优化,以满足加密井提速降本的需求。

1 三维轨道设计模型优选

1.1 定向段长对比

目前三维水平井扭方位轨道模型主要有斜面圆弧曲线、圆柱螺旋曲线、自然参数曲线 3 种类型,因自然参数曲线计算公式复杂,并未推广应用^[11-12]。五点六段制三维设计轨道,采用稳斜扭方位设计模式,扭方位井段为圆柱螺旋曲线(图 1),CD 稳斜扭方位段,DF 为增斜段。

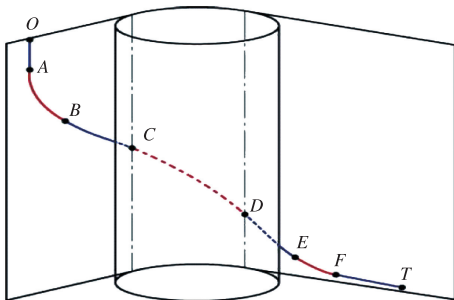


图 1 稳斜扭方位轨道示意图

Fig.1 Schematic of hold inclination and turn azimuth trajectory design

其中扭方位井段井眼曲率 K 计算公式:

$$K = \sqrt{K_{\alpha}^2 + K_{\varphi}^2 (\sin \alpha)^2} \quad (1)$$

式中: K_{α} ——井斜变化率, ($^{\circ}$)/m; K_{φ} ——方位角变化率, ($^{\circ}$)/m; α ——井斜角, ($^{\circ}$)。

稳斜扭方位井段由式(1)计算可得 $K_{\varphi} = K / \sin \alpha$ 。在井斜角为 α 条件下,先将方位角增大 60° ,再将井斜角增大 30° ,工具造斜率 $0.15^{\circ}/\text{m}$,应用圆柱螺旋曲线轨道进行计算,扭方位、增斜段曲线段长为:

$$\Delta L_1 = 400 \sin \alpha + 200 \quad (2)$$

斜面圆弧扭方位设计轨道(图 2),是在一个倾斜平面上的一段曲线,可同时进行增斜和扭方位^[13-14]。斜面圆弧“狗腿”度计算公式为:

$$\cos \gamma = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \Delta \varphi \quad (3)$$

$$\gamma = K \Delta L \quad (4)$$

式中: γ ——“狗腿”度, ($^{\circ}$); α_1 ——初始井斜角, ($^{\circ}$); α_2 ——终点井斜角, ($^{\circ}$); $\Delta \varphi$ ——方位角变化量, ($^{\circ}$); K ——工具造斜率, ($^{\circ}$)/m。

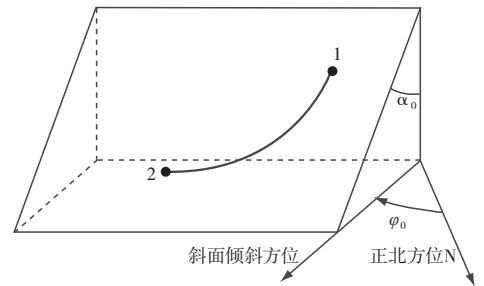


图 2 斜面圆弧示意图

Fig.2 Schematic of the inclined plane circular arc trajectory

采用斜面圆弧曲线轨道设计,在井斜角为 α 条件下,方位角增大 60° ,井斜角增大 30° ,工具造斜率 $0.15^{\circ}/\text{m}$,由式(3)、(4)计算增斜扭方位段曲线段长为:

$$\Delta L_2 = \frac{\cos^{-1} \left[\frac{\sqrt{3} (3 + \cos 2\alpha) - \sin 2\alpha}{8} \right]}{0.15} \quad (5)$$

经以上计算对比,在 $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ 内, $\Delta L_2 < \Delta L_1$,井斜越大, $\Delta L_1 - \Delta L_2$ 值越大。从计算结果可知,完成相同的增斜、扭方位工作量,斜面圆弧轨道曲线长度短于圆柱螺旋轨道曲线长度。

1.2 摩阻扭矩对比

页岩气三维水平井轨道设计主要有五点六段制、斜面圆弧六段制、双二维 3 种类型,其中斜面圆弧三维轨道设计剖面类型为:直井段—造斜段—稳斜段—斜面圆弧段—增斜调整段—水平段,在斜面

圆弧段同时进行增斜、扭方位。双二维轨道设计剖面类型为:直井段—增斜段—稳斜段—降斜段—稳斜段—增斜段—水平段,将三维水平井的轨迹设计在 2 个相交的铅垂面中,在每个铅垂面内只有井斜变化没有方位变化^[15]。

本文以焦页 44-7HF 井为例,该井 A 靶垂深 2956 m, B 靶点垂深 3010 m,水平段长 2500 m,一开 $\varnothing 406.4$ mm 钻头钻进至 802 m, $\varnothing 339.7$ mm 套管下深 800 m;二开 $\varnothing 311.2$ mm 钻头钻进至 2782 m, $\varnothing 244.5$ mm 套管下深 2780 m;三开 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻进至完钻井深。分别采用 3 种轨道设计方法以 $0.15^\circ/\text{m}$ 全角变化率设计轨道(投影图见图 3、图 4)。在相同计算条件下模拟计算完钻井深时的摩阻扭矩情况(表 1),模拟计算参数:套管内摩阻系数 0.15,裸眼段摩阻系数 0.2,三开泥浆密度 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

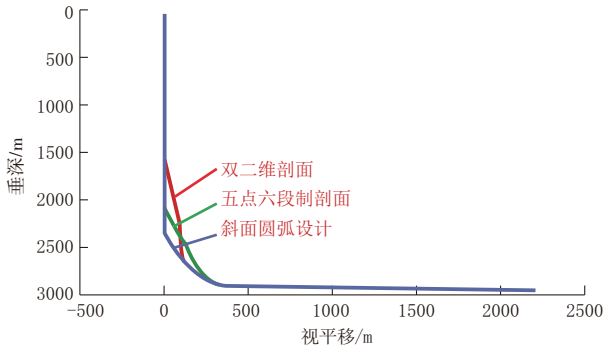


图 3 焦页 44-7 HF 轨道设计垂直投影图

Fig.3 Vertical projection of well JY44-7 HF trajectory design

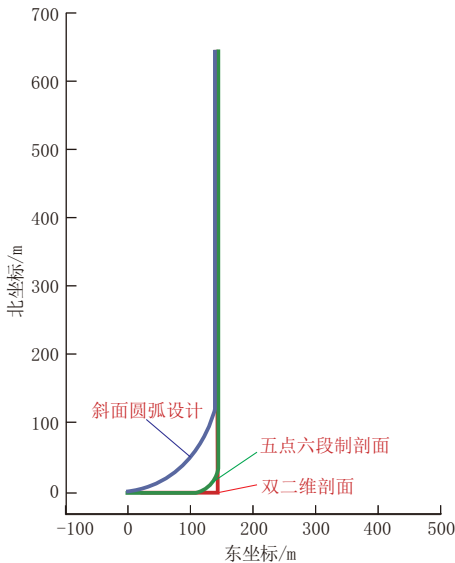


图 4 焦页 44-7 HF 轨道设计水平投影图

Fig.4 Plan projection of well JY44-7 HF trajectory design

表 1 模拟计算结果对比

Table 1 Comparison of simulation results

剖面类型	KOP/ m	稳斜段长/ m	定向段长/ m	摩阻/ kN	扭矩/ (kN·m)
斜面圆弧	2318	140	721	239.3	21.88
五点六段制	2005	240	752	245.9	22.60
双二维	1500	700	716	247.3	22.69

采用相同全角变化率,应用 3 种轨道设计方法,对比轨道设计数据。双二维设计轨道,定向段长最短,但是摩阻扭矩最大;斜面圆弧设计轨道,摩阻扭矩最小,造斜点最深,定向段明显短于五点六段制剖面;五点六段制剖面定向段最长。通过对比分析,斜面圆弧设计轨道,摩阻扭矩最小,定向段长相对较少,更符合加密井施工要求。

2 轨道设计参数优化

轨道设计中影响长水平段井摩阻和扭矩的参数主要有造斜率、造斜点、靶前位移、水平段长度等。针对具体某口井而言,因井口坐标、靶点坐标、靶点垂深、靶前位移、水平段长度等已确定,因此轨道参数优化主要从造斜点、造斜率两个参数进行优化,以此达到降低摩阻和扭矩的目的。

以涪陵工区某口加密井为例进行井眼轨道优化设计。该井 A 靶点垂深 2465 m, B 靶点垂深 2344 m,靶前位移 697.9 m,偏移距 507.1 m。一开 $\varnothing 406.4$ mm 钻头钻进至 352 m, $\varnothing 339.7$ mm 套管下深 350 m;二开 $\varnothing 311.2$ mm 钻头钻进至 2252 m, $\varnothing 244.5$ mm 套管下深 2250 m;三开 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻进至完钻井深。

2.1 造斜点优化

应用斜面圆弧轨道设计模型,以 $0.15^\circ/\text{m}$ 全角变化率,造斜点依次从 1000 m 下移至 1800 m,间隔 100 m,进行轨道设计。应用钻井设计系统软件模拟计算三开滑动钻进工况下的摩阻和旋转钻进工况下的扭矩,套管内摩阻系数 0.15,裸眼段摩阻系数 0.2,计算结果如表 2 所示。

从模拟计算结果分析(图 5),随着造斜点深度增加,摩阻呈 U 形变化趋势,最小摩阻在造斜点为 1400 m 时;随着造斜点深度增加,扭矩逐渐降低,在造斜点为 1600 m 以浅变化趋势缓慢。摩阻在造斜点 1400 m 时最小为 314.4 kN,因此造斜点优选在 1400 m。

表2 不同造斜点情况下摩擦扭矩数据

Table 2 Drag and torque data at different KOPs

造斜点/ m	稳斜角/ (°)	稳斜段长/ m	摩阻/ kN	扭矩 (kN·m)
1000	21.74	1048.97	322.5	20.79
1100	23.49	945.25	319.8	20.68
1200	25.54	840.62	317.7	20.72
1300	28.00	734.73	315.8	20.49
1400	30.98	626.98	314.4	20.35
1500	34.70	516.33	319.4	20.29
1600	39.48	400.80	331.6	20.09
1700	45.91	276.05	337.5	19.49
1800	55.34	130.14	348.2	18.74

表3 不同造斜率情况下摩擦扭矩计算数据

Table 3 Drag and torque at different build-up rates

造斜率/ [(°)·m ⁻¹]	扭方位工 作量/(°)	摩阻/ kN	扭矩/ (kN·m)
0.11	102.10	317.2	20.55
0.12	93.42	318.6	20.47
0.13	87.98	321.8	20.48
0.14	84.07	326.3	20.52
0.15	81.08	326.4	20.57
0.16	78.70	328.5	20.55
0.17	76.76	329.9	20.64
0.18	75.15	329.7	20.59
0.20	72.60	329.5	20.66
0.22	70.69	329.1	20.72
0.24	69.19	328.8	20.73

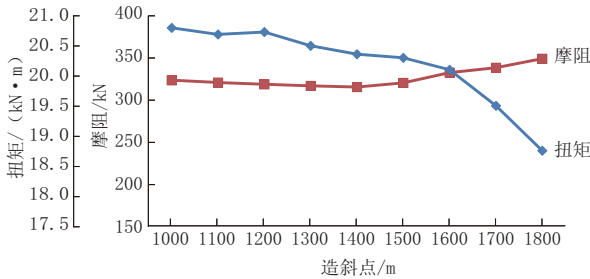


图5 不同造斜点情况下摩擦扭矩变化曲线图

Fig.5 Curves of drag and torque at different KOPs

2.2 造斜率优选

应用斜面圆弧轨道设计模型,造斜点在1400 m,全角变化率依次从 0.11°/m 提高至 0.24°/m,采用斜面圆弧设计方法,分别设计轨道(水平投影如图6所示),应用钻井设计系统软件模拟计算三开滑动钻进工况下的摩阻和旋转钻进工况下的扭矩,套管内摩擦系数 0.15,裸眼段摩擦系数 0.2,计算结果如表3所示。

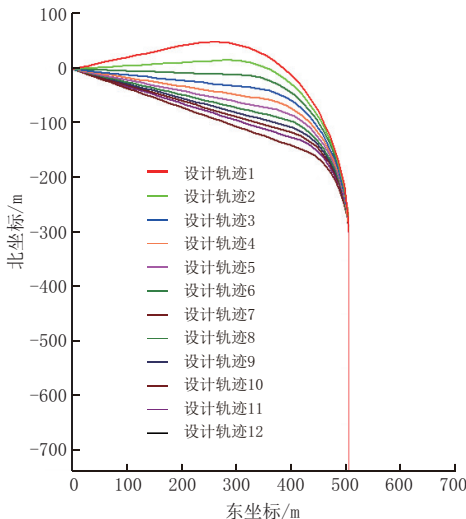


图6 不同造斜率轨道设计水平投影图

Fig.6 Plan projection of trajectory design at different build-up rates

摩阻和扭矩曲线如图7所示,从模拟计算结果分析,造斜率逐渐升高,扭矩先降后升,总体呈上升趋势,变化幅度小。摩阻先升后降,在造斜率为 0.17°/m,摩阻最大,后续缓慢降低。

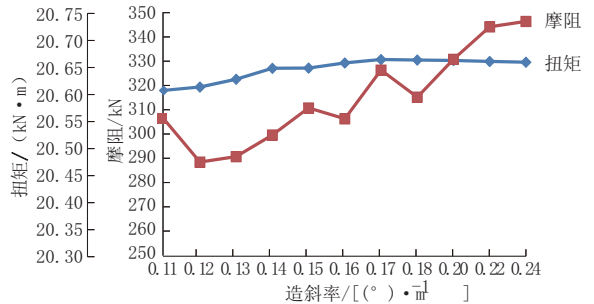


图7 不同造斜率情况下摩擦扭矩变化曲线图

Fig.7 Curves of drag and torque at different build-up rates

涪陵工区内 $\varnothing 311.2$ mm 井眼普遍使用 $\varnothing 216$ mm(12.5°)单弯螺杆定向施工,涪陵工区内 $\varnothing 215.9$ mm 井眼普遍使用 $\varnothing 172$ mm(12.5°)单弯螺杆定向施工^[16-17],结合工具实际造斜能力和计算结果综合考虑,二开优选设计造斜率 0.12°/m,三开设计造斜率 0.16°/m,达到降低摩阻扭矩的效果。为了便于卡准层位,顺利在优质气层着陆,一般在 A 靶前 100 m 左右将方位调整到对准靶区方向。优化后轨道设计如表4所示。

3 应用实例

焦页 40-6HF 井是焦页 40 平台 2019 年部署的加密井,设计水平段长 2330 m,靶前位移 403.03 m,偏移距 333.8 m,A 靶点垂深 2574 m,B 靶点垂深 2852 m。设计一开 $\varnothing 406.4$ mm 钻头钻进至 352 m, $\varnothing 339.7$ mm 套管下深 350 m;设计二开

Ø311.2 mm 钻头钻进至 2055 m, Ø244.5 mm 套管下深 2054 m; 设计三开 Ø215.9 mm 钻头钻进至完钻井深。本井应用加密井轨道优化技术, 采用斜面

圆弧六段制轨道设计, 造斜点优选在 2085 m, 施工设计剖面分段数据见表 5, 实钻情况如图 8、图 9 所示。

表 4 优化设计轨道各节点关键参数

Table 4 Key parameters of the optimal designed trajectory

测深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北坐标/m	东西坐标/m	“狗腿”度/[(°) · (30 m) ⁻¹]	备注
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
1400.00	0.00	0.00	1400.00	0.00	0.00	0.000	KOP
1657.89	30.95	103.63	1645.53	-16.01	66.06	3.600	
2277.32	30.95	103.63	2176.78	-91.05	375.63	0.000	
2731.08	77.85	180.00	2457.78	-380.09	507.10	4.800	
2831.08	93.85	180.00	2465.00	-479.50	507.10	4.800	A
4635.15	93.85	180.00	2344.00	-2279.50	507.10	0.000	B

表 5 焦页 40-6HF 井施工剖面设计分段数据

Table 5 Key parameters of the designed trajectory of Well JY40-6HF

井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	南北/m	东西/m	造斜率/[(°) · m ⁻¹]	备注
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
380.00	0.00	0.00	380.00	0.00	0.00	0	
410.00	2.00	330.00	409.99	-0.26	-0.45	0.07	防碰绕障
2085.00	2.00	330.00	2083.97	51.08	-29.49	0.00	KOP
2300.00	31.63	246.88	2288.40	29.53	-82.37	0.15	增斜段
2330.00	32.23	246.88	2313.86	23.30	-96.96	0.02	
2727.00	71.73	179.96	2556.00	-235.63	-225.90	0.16	斜面圆弧段
2817.00	87.03	179.96	2572.55	-323.83	-225.84	0.17	增斜调整
2827.00	87.03	179.96	2573.06	-333.81	-225.84	0.00	A
5156.00	79.63	179.96	2851.95	-2642.90	-224.30	0.00	B

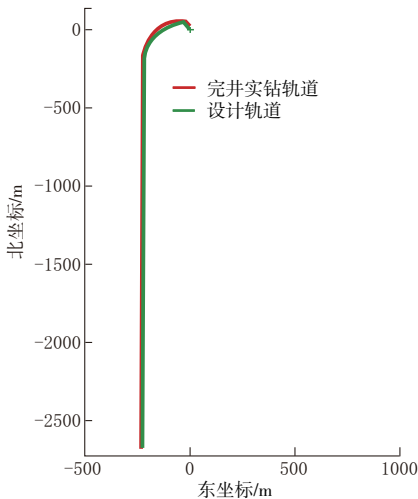


图 8 焦页 40-6HF 井设计与实钻轨迹水平投影图

Fig.8 Plan projection of designed and as-drilled trajectory of Well JY40-6HF

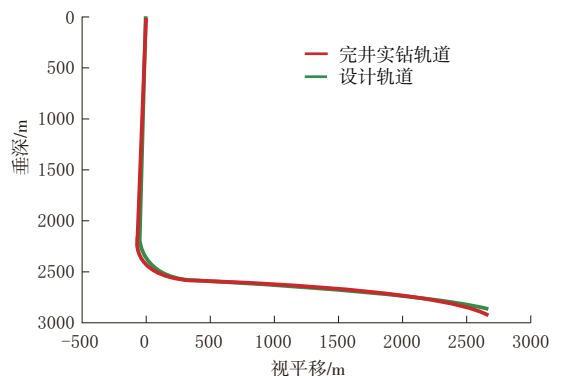


图 9 焦页 40-6HF 井设计与实钻轨迹垂直投影图

Fig.9 Vertical projection of designed and as-drilled trajectories of Well JY40-6HF

焦页 40-6HF 井是焦页 40 平台部署的第 6 口井, 对比同平台邻井水平段长最长, 二开中完最大扭矩 10 kN · m, 起钻最大摩阻 150 kN, 完钻最大扭矩 20 kN · m, 起钻最大摩阻 260 kN, 电测与下套管作

业无受阻情况, 机械钻速相比同平台邻井平均机械钻速提高 30.06% (见表 6), 提速效果显著。

4 结论

(1) 三维水平井轨道设计是控制摩阻扭矩的关键因素之一, 对于钻井施工具有重要意义。

(2) 涪陵工区加密调整三维水平井轨道设计优

表6 焦页40平台机械钻速对比

Table 6 Comparison of ROP between wells from the JY40# platform

井号	实际造斜点/m	水平段长/m	完钻井深/m	造斜段机械钻速/(m·h ⁻¹)	水平段机械钻速/(m·h ⁻¹)	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)
JY40-1HF	1090	1330	4320	3.55	7.37	6.43
JY40-2HF	1140	1463	4374	9.16	8.94	8.57
JY40-3HF	1610	1388	4316	6.20	10.62	8.57
JY40-4HF	1387	1959	4901	3.19	7.85	6.82
JY40-5HF	1810	2211	5024	10.09	8.32	9.37
JY40-6HF	2056	2378	5241	12.20	11.10	10.34

化原则在于降低摩阻扭矩,相同条件下,斜面圆弧六段制轨道设计具有更低的摩阻和扭矩。

(3)应用定向井专业软件模拟计算,优选轨道设计参数中的造斜点、造斜率,可得到最优设计剖面。

(4)现场应用表明加密井轨道优化设计技术可有效提高钻井速度,建议在涪陵工区加密调整井施工中推广应用,并在应用过程中不断完善。

参考文献(References):

- [1] 牛新明.涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J].石油钻探技术,2014,42(4):1-6.
NIU Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(4):1-6.
- [2] 曾义金.页岩气开发的地质与工程一体化技术[J].石油钻探技术,2014,42(1):1-6.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(1):1-6.
- [3] 周贤海.涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J].石油钻探技术,2013,41(5):26-30.
ZHOU Xianhai. Drilling & completion techniques used in shale gas horizontal wells in Jiaoshiba Block of Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(5):26-30.
- [4] 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.
- [5] 李伟,刘文臣,周贤海,等.涪陵页岩气田三维水平井轨道优化设计方法探讨[J].石油钻探技术,2018,46(2):17-23.
LI Wei, LIU Wenchen, ZHOU Xianhai, et al. 3D horizontal wellbore trajectory optimization design method in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(2):17-23.
- [6] 宋争.涪陵江东与平桥区块页岩气水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻探技术,2017,45(6):14-18.
SONG Zheng. Wellbore trajectory control techniques for horizontal well in the Jiangdong and Pingqiao Blocks of Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017,45(6):14-18.
- [7] 沈国兵,刘明国,晁文学,等.涪陵页岩气田三维水平井井眼轨

- 迹控制技术[J].石油钻探技术,2016,44(2):10-15.
SHEN Guobing, LIU Mingguo, CHAO Wenxue, et al. 3D trajectory control technology for horizontal wells in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(2):10-15.
- [8] 陶丽杰.添加虚拟靶区优化三维水平井井眼轨道[J].断块油气田,2015,22(2):267-269.
TAO Lijie. Optimization on 3D trajectory of horizontal well by adding theoretical target[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015,22(2):267-269.
- [9] 胥豪,董志辉.长水平段水平井井眼轨道优化设计方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(3):35-37.
XU Hao, DONG Zhihui. Wellbore trajectory optimization design methods for long horizontal-section well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(3):35-37.
- [10] 陈勇,蒋祖军,练章华,等.水平井钻井摩阻影响因素分析及减摩技术[J].石油机械,2013,41(9):29-32.
CHEN Yong, JIANG Zujun, LIAN Zhanghua, et al. Analysis of influencing factors of horizontal drilling friction and antifriction technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(9):29-32.
- [11] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].东营:中国石油大学出版社,2007:285-334.
HAN Zhiyong. Design and calculation of directional drilling [M]. Dongying:China University of Petroleum Press, 2007:285-334.
- [12] 韩志勇.斜面圆弧井眼的轨迹控制新模式[J].石油钻探技术,2004,32(2):1-3.
HAN Zhiyong. New control mode for well trajectory on circular arc with inclined planes[J]. Petroleum Drill Techniques, 2004,32(2):1-3.
- [13] 刘修善,王超.空间圆弧轨迹的解析描述技术[J].石油学报,2014,35(1):134-140.
LIU Xiushan, WANG Chao. Analytic description of spatial-arc wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014,35(1):134-140.
- [14] 何树山,刘修善.三维水平井轨道设计[J].石油钻采工艺,2001,23(4):16-20.
HE Shushan, LIU Xiushan. Trajectory planning of three-dimensional horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001,23(4):16-30.
- [15] 刘茂森,付建红,白璟.页岩气双二维水平井轨迹优化设计与应用[J].特种油气藏,2016,23(2):147-150,158.
LIU Maosen, FU Jianhong, BAI Jing. Optimization of shale gas Dual-2D horizontal-well trajectories and its application[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016,23(2):147-150,158.
- [16] 陈宇同,傅文伟,邵明仁,等.加密调整水平井轨迹控制技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):28-30.
CHEN Yutong, FU Wenwei, SHAO Mingren, et al. Trajectory control technology for encryption adjustment of horizontal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(2):28-30.
- [17] 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.