

# 川西中层水平井轨迹优化控制技术

李玉枝, 刘纯仁

(中石化华东石油工程有限公司江苏钻井公司, 江苏 扬州 225261)

**摘要:**川西中层水平井目的层为沙溪庙组,因地表限制多为小偏移距中曲率半径三维水平井,存在地层稳定性差、造斜点深、井眼轨迹控制难度大等特点,首轮次钻井施工因增斜井段不规律交错的砂泥岩失稳垮塌,造成井下摩阻和扭矩增大、水平段钻进困难等问题。为减少复杂时效、缩短施工周期,对施工井轨迹按直井段、增斜段、水平段进行了分段优化,形成了一套适合川西中层水平井的井眼轨迹控制技术。该技术在7口井进行了应用,平均钻井周期由127.86 d降至59.63 d,平均机械钻速由5.37 m/h提高至8.95 m/h。

**关键词:** 三维水平井;分段优化;轨迹控制;沙溪庙组;川西中层

**中图分类号:** TE243 **文献标志码:** A

## Trajectory optimization control technology of middle horizontal well in Western Sichuan

LI Yuzhi, LIU Chunren

(Jiangsu Drilling Company of East China Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Yangzhou 225261, China)

**Abstract:** The target layer of middle-level horizontal wells in Western Sichuan is the Shaximiao Formation. Due to surface constraints, most of the horizontal wells are three-dimensional horizontal wells with a slight offset and medium radius of curvature, which are characterized by poor formation stability, depth deviation point, and difficulty in controlling the trajectory of the borehole. In the first round of drilling construction, the instability and collapse of irregularly intersecting sand and mudstone in deviated well sections caused downhole friction, torque increase, and difficulties in horizontal section drilling. In order to reduce the complicated time and shorten the construction period, the construction well trajectory was optimized in segments according to the straight section, increased slope section, and horizontal section, and a set of borehole trajectory control technology suitable for mid-level horizontal wells in Western Sichuan was formed. The technology was applied in 7 wells, reducing the average drilling cycle from 127.86 days to 59.63 days and increasing the average penetration rate from 5.37m/h to 8.95m/h.

**Key words:** three-dimensional horizontal well; segmental optimization; trajectory control; Shaximiao Formation; middle layer of Western Sichuan;

**引用格式:** 李玉枝, 刘纯仁. 川西中层水平井轨迹优化控制技术[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 472-478.

LI Yuzhi, LIU Chunren. Trajectory optimization control technology of middle horizontal well in Western Sichuan [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 472-478.

川西地区蕴藏着巨大的天然气资源,致密砂岩非常规气藏天然气资源量 $8\,122.97\times 10^8\text{ m}^3$ ,探明+控制储量 $2\,091.13\times 10^8\text{ m}^3$ ,是川西地区重要油气聚集带之一,同时是川气东输、川气东送工程资源接替的重要阵地,每年的产气量占西南油气田总产量的80%以上。川西中浅层水平井以蓬莱镇组和沙溪庙组气藏为主力产层,属致密气藏范畴,是中国石化天然气增储上产的重点层位。2021年8月,中江气田新增探明储量 $340\times 10^8\text{ m}^3$ ,累计探明储量 $1\,061\times 10^8\text{ m}^3$ ,成为中国天然气规模上产新阵地<sup>[1]</sup>。

川西中层水平井目的层为沙溪庙组气藏,该地层的砂-泥岩互层频繁,砂岩结构疏松,泥岩属于硬脆性泥页岩,垂深变化大,横向非均质性强,井壁稳定性差,造斜段与水平段处于同一裸眼井段中。因地面条件限制大多数井眼为小三维剖面设计,并在增斜井段存在扭方位,增斜井段设计造斜率在 $18\sim$

收稿日期: 2023-07-14; 改回日期: 2023-09-07。

第一作者简介: 李玉枝(1981—),工程师,从事钻井技术管理方面工作。E-mail: liyuzhi.oshd@sinopec.com。

22°/100m,靶前位移约290~350 m,水平段长度1 000~1 500 m<sup>[2]</sup>。在沙溪庙易垮塌井段强力增斜,易造成在沙溪庙砂泥岩互层段井下复杂,后期施工在该井段钻具侧向力大,带来轨迹控制难度大、水平井滑动钻进摩阻扭矩大、阻卡频繁、通井划眼时间长、套管下入困难等问题,造成钻进效率低,完井作业长时间扩划眼,大幅度增加施工周期,严重影响钻井经济效益。针对施工中遇到的困难,对井眼轨迹分段优化控制,降低增斜井段造斜率,控制井眼轨迹尽量圆滑,分段优化钻具组合、优化钻进参数,取得了一定的效果。

## 1 井眼轨迹控制难点

(1)直井段长控制难度大,由于靶前位移偏小,三维水平井需要控制直井段位移,提前走侧向位移,尽量降低增斜段的增斜率。

(2)增斜井段沙溪庙组地层稳定性差,裸眼井段长,滑动钻进托压严重,钻进时效低,施工周期长,更易出现井壁失稳。

(3)目的层埋藏深、垂深变化大,砂泥岩交错较多,对增斜率影响较大,入靶难度高。

(4)水平段摩阻扭矩大,井眼轨迹控制要求高,钻压难以正常传递,调整轨迹困难。

## 2 轨迹优化控制技术

井眼轨迹优化及控制是安全快速钻井的关键点之一。井眼轨迹的圆滑程度对提高钻井速度、降低钻井复杂有较大影响。川西中层水平井多为小三维井眼轨迹剖面设计,造斜段在沙溪庙组不稳定地层,斜井段的狗腿度大小直接影响到井眼稳定,为减少斜井段施工难度,考虑后续施工井下安全,根据水平井靶前位移、造斜率及扭方位情况,对井眼轨迹进行分段优化,小三维井眼轨迹剖面优化为双二维井眼轨迹剖面,适当增加靶前距,降低增斜段增斜率,减少斜井段不稳定地层复杂,达到安全提速的目的。

### 2.1 直井段井眼轨迹优化控制

#### 2.1.1 直井段优化控制

导眼主要是防斜打直,一开直井段通过小井斜控制走侧向位移,使造斜点坐标与A、B靶点坐标连线尽量在一条线上,减少斜井段扭方位幅度。靶前距比较小的井通过直井段小井斜控制走一定量的反向位移,增加造斜点处的靶前距,整体降低斜井

段狗腿度。靶前距比较大的井,优化斜井段井眼轨迹,减少大井斜稳斜井段,降低大井斜段控制难度,使整个增斜段井眼轨迹更加圆滑。

#### 2.1.2 直井段钻具组合

导眼钻具组合:Ø444.5 mm PDC 钻头+Ø244.5 mm 单弯螺杆(1.25°)+浮阀+Ø203 mm 无磁钻铤×1+无磁悬挂+Ø203 mm 螺旋钻铤×6+631×410+Ø127 mm 加重钻杆;

一开直井段钻具组合:Ø311.1 mm PDC 钻头+Ø244.5 mm 单弯螺杆(1°、螺扶 Ø308 mm)+浮阀+Ø300~308 mm 扶正器+Ø203 mm 无磁钻铤×1+MWD 悬挂短节+Ø203 mm 螺旋钻铤×6+Ø203 mm 随钻震击器+Ø127 mm 加重钻杆×30+Ø139.7 mm 钻杆。

一开钻具组合根据直井段井斜控制需要调整扶正器大小,靶前位移较大的水平井选择与螺杆扶正器同样大小的尾扶,有利于防斜保直;小三维水平井和靶前位移较小的水平井选择直径300 mm左右的欠尺寸扶正器,有利于控制走侧向位移和反向位移小井斜稳斜,根据实钻地层漂移规律,及时优化钻井参数,减少滑动钻进调整轨迹。

### 2.2 造斜段井眼轨迹优化控制

造斜井段井眼轨迹控制对水平井顺利施工十分重要。川西中层水平井在该井段为沙溪庙组不稳定地层,增斜率控制及井眼圆滑程度直接关系到后续水平段施工和完井作业是否顺利。

#### 2.2.1 造斜段优化控制

根据直井段实钻水平位移情况,造斜前重新对斜井段井眼轨迹进行优化,控制整体造斜率,在入靶前预留20~30 m稳斜井段,利于在入靶前对井眼轨迹进行调整,实钻过程中尽早摸准入井工具及钻具组合的造斜能力,根据设定的造斜率确定每个单根需要滑动的井段长度。滑动钻进和复合钻进交替进行,使整个造斜段井眼尽量平滑,杜绝长井段滑动形成局部全角变化率过大,造成摩阻扭矩增高,致使后续施工复杂。

增斜井段施工中工程与地质导向及时沟通极为重要。根据地层对比提前预判目的层变化情况,及时对井眼轨迹进行优化调整,防止入靶前急需增斜导致造斜率过高增加轨迹控制难度。目的层砂岩顶部2~3 m砂岩干层可钻性极好,造斜率比一般岩性偏低<sup>[3]</sup>,在砂岩顶部增斜需要适当增加滑动井段,避免造斜率不够影响入靶。目的层垂厚一般在7~10 m,根据上部标志层情况及时判断目的层变

化,目的层提前优化井眼轨迹增斜着陆,目的层推后保持井斜 $86^{\circ}$ 左右稳斜下探,进入目的层顶部砂岩及时增斜入靶。

### 2.2.2 斜井段钻具组合

Ø215.9 mm PDC 钻头+Ø172 mm 单弯螺杆( $1.5^{\circ}$ 、螺扶 Ø210 mm)+浮阀+Ø127 mm 无磁承压钻杆+MWD 悬挂短节+Ø127 mm 无磁承压钻杆+Ø127 mm 加重钻杆×5+Ø165 mm 随钻震击器+Ø127 mm 加重钻杆×1+Ø127 mm 钻杆× $n$ +Ø127 mm 加重钻杆×30+Ø127 mm 钻杆+Ø139.7 mm 钻杆。

斜井段钻具组合造斜第一趟钻不倒装,后续起钻根据井斜大小和预计钻进井段长度,调整入井钻具倒装长度,该套钻具组合在着陆后进入水平段复合钻进,井斜相对稳定可继续钻进,增斜较快及时更换水平段单弯双扶稳斜钻具组合,利用复合钻进,提高水平段机械钻速<sup>[4]</sup>。

## 3.3 水平段井眼轨迹优化控制

### 3.3.1 水平段优化控制

水平段井眼轨迹控制的关键是保证井眼轨迹的稳定平滑,井眼轨迹平滑程度对井眼轨迹的延伸和摩阻扭矩影响较大。采用单弯双稳钻具组合,进入水平段第一趟稳斜钻具组合螺杆采用 Ø210 mm 扶正器配合相同尺寸的尾扶,钻进时保持 60 kN 的恒定钻压钻进,及时对比复合钻进井斜变化情况,井斜微降增加钻压钻进,井斜微增则降低钻压钻进,通过调整钻压方式控制井斜小范围上下波动,整体趋于稳斜钻进,必要时通过滑动钻进调整井斜方位,滑动调整采用“少食多餐”方式进行微调<sup>[3]</sup>,避免大幅度调整造成井眼轨迹大幅度波动甚至失控。

### 3.3.2 水平段钻具组合

Ø215.9 mm PDC 钻头+Ø172 mm 单弯螺杆( $1.25^{\circ}$ 、螺扶 Ø210 mm)+浮阀+Ø208~210 mm 稳定器+Ø127 mm 无磁承压钻杆×1+MWD 悬挂短节+Ø127 mm 无磁承压钻杆×1+Ø127 mm 加重钻杆×5+Ø165 mm 随钻震击器+Ø127 mm 加重钻杆×1+Ø127 mm 钻杆× $n$ +Ø127 mm 加重钻杆×30+Ø127 mm 钻杆+Ø139.7 mm 钻杆。

水平段前期钻压能够有效传递,复合钻进可以释放钻进参数,选择与螺杆扶正器相同尺寸的尾扶,可以提高钻压,以提高复合钻进机械钻速;水平段后期钻压有效传递相对困难,受摩阻、扭矩限制,复合钻进加压受限,选择欠尺寸尾扶;随着水平段延伸,如果通过钻压无法稳斜或者井下安全风险较

大,应去掉尾扶,确保井下钻具安全。

## 4 辅助减摩降阻提速技术

滑动钻进时效及滑动钻进增斜效果直接影响机械钻速。在增斜段不稳定地层,经常出现滑动钻进托压现象,需要频繁活动钻具,工具面不稳定,造成滑动钻进时效非常低。常用的井下减摩降阻工具为水力振荡器、震荡螺杆等。川西中层水平井托压主要是由于斜井段地层砂泥岩交错互层不稳定,形成“糖葫芦”井眼<sup>[5]</sup>,滑动钻进时在中和点以下钻具弯曲,钻压不能有效传递。在江沙 220-2HF 井中使用水力振荡器压耗升高 2~3 MPa,配合震荡螺杆,在水平段滑动钻进托压依然严重,减摩降阻效果不明显。

“人工扭摆”是通过人为操作顶驱转动钻具,缩短静摩擦井段,降低滑动钻进时下放钻具摩阻,能够有效解决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。滑动钻进时,井下钻柱轴向摩擦阻力分布状态有 3 个典型区域,即上部无摩阻区、中部静摩阻区和下部动力钻具反扭矩作用区。在滑动钻井过程中地面扭摆作用区代表了井下钻柱受地面扭摆运动影响的范围,通过改变该区钻柱与井壁的相对运动形态将静摩擦变为动摩擦,大幅降低滑动钻进过程的钻柱轴向摩擦阻力。通过人工操作顶驱,调整无摩擦区钻柱的左右转动,扭矩尽可能地扩展中部静摩擦区及下部反扭矩区,根据工具面的变化及时调整钻具转动圈数和方向,最大限度实现降低摩阻的目的,减少了活动钻具次数,滑动钻进时效提高显著,钻压能够有效传递,有利于滑动钻进时反扭角控制,工具面更容易控制在要求范围内,滑动钻时明显缩短。新沙 24-16HF 井在 1 970~2 773 m 造斜段通过人工扭摆操作,定向钻进过程中工具面平稳,且调整工具面速度相对较快,井下托压问题得到了明显的改善,减少了活动钻具,提高了机械钻速,钻时由常规滑动钻进的 26~37 min/m 缩短到 13~16 min/m,钻进速度提高 80%。数据对比如表 4 所示。

通过优化井眼轨迹,增斜井段增斜率控制在  $18^{\circ}/100$  m 之内。在各方面不断总结优化,特别是钻井液体系,各种性能指标更加适合现场应用;滑动钻进托压时人工操作顶驱配合使用“人工扭摆”提高滑动钻进时效。通过共同努力,斜井段沙溪庙组复杂地层掉块垮塌现象明显降低,划眼等复杂时效

明显缩短,钻井周期、完井周期明显缩短,江沙 24-16HF、新沙 22-20HF、新沙 211HF、江沙 240-5HF 等井先后都在设计钻井周期之内完成,实现了川西中层水平井的提速提效。

表 1 新沙 24-16 井滑动钻进数据对比

井深/m	井斜/(°)	钻进状态	岩性	钻压/t	钻时/min	备注
2 587	63.68	滑动钻进	粉砂质泥岩	16	26	未使用人工扭摆
2 588		滑动钻进	粉砂质泥岩	16	31	
2 589		滑动钻进	粉砂质泥岩	18	37	
2 590	64.29	复合钻进	泥质粉砂岩	5	9	
2 591		复合钻进	泥质粉砂岩	5	4	
2 592		复合钻进	泥质粉砂岩	5	6	
2 593		复合钻进	泥岩	5	4	
2 594		复合钻进	泥岩	5	5	
2 595		复合钻进	泥岩	5	4	
2 596	65.32	滑动钻进	泥岩	8	15	使用人工扭摆
2 597		滑动钻进	泥岩	8	15	
2 598		滑动钻进	泥岩	9	16	
2 599		滑动钻进	泥质粉砂岩	8	13	
2 600		复合钻进	泥质粉砂岩	5	4	

5 现场应用

江沙 343HF 井是一口小三维水平井,设计造斜率为 20.5°/100 m,设计井眼轨迹数据如表 2 所示。采用 NDS 软件计算,设计井眼轨迹存在侧向力超标及屈曲现象,摩阻扭矩也较大(见图 1—图 4)。

施工前,将小三维轨迹优化为近似小二维井眼

轨迹,通过直井段小井斜控制走侧向位移,使造斜点的坐标与设计靶点尽量在一条线上,减少增斜井段扭方位度数,优化后造斜率为 17.86 °/100 m。优化后通过直井段控制偏移距及反向位移,减少了增斜井段扭方位幅度,增加了靶前距,降低了增斜段沙溪庙组复杂地层的增斜率,整体降低了施工难度(见表 3)。

表 2 江沙 343HF 井设计井眼轨迹数据

井深/ m	井斜角/ (°)	方位角/ (°)	垂深/ m	北南位移/ m	东西位移/ m	视位移/ m	造斜率/ ((°)·100m <sup>-1</sup> )	扭方位率/ ((°)·100m <sup>-1</sup> )	备注
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1 950	0	0	1 950	0	0	0	0	0	侧钻点
2 050	5	80	2 049.87	0.76	4.29	-4.07	5	0	造斜点
2 100	5	80	2 099.68	1.51	8.59	-8.14	0	0	
2 381.83	53.36	231.5	2 345.35	-73.17	-75.02	101.98	20.5	53.75	
2 392.01	53.36	231.5	2 351.42	-78.26	-81.42	110.08	0	0	
2 586.12	90.95	241.95	2 410	-176.14	-233.89	291.18	20	5.38	A 靶点
3 190.15	90.95	241.95	2 400	-460.14	-766.89	894.34	0	0	B 靶点



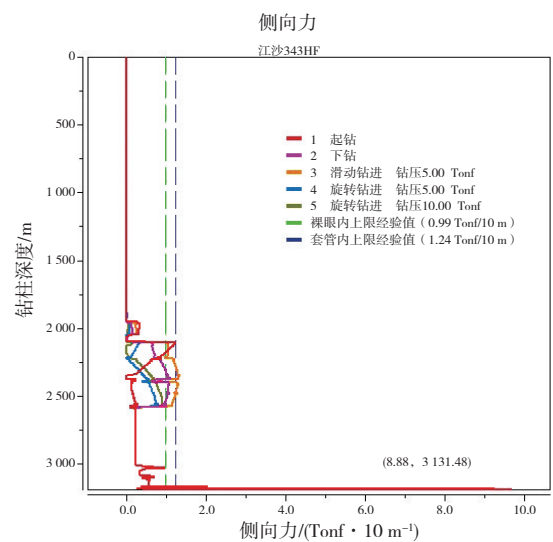


图1 设计轨迹侧向力

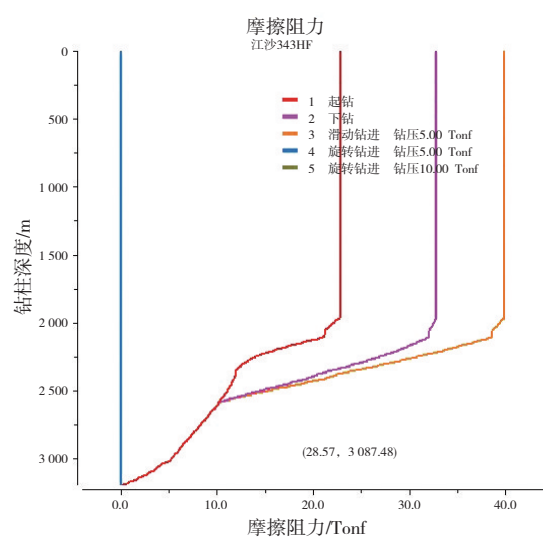


图3 设计轨迹摩阻

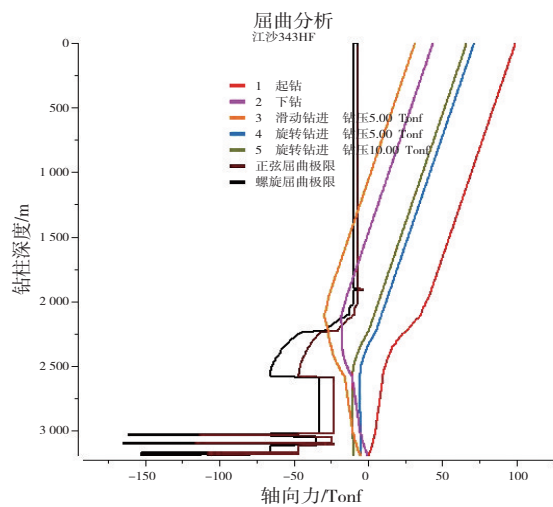


图2 设计轨迹屈曲

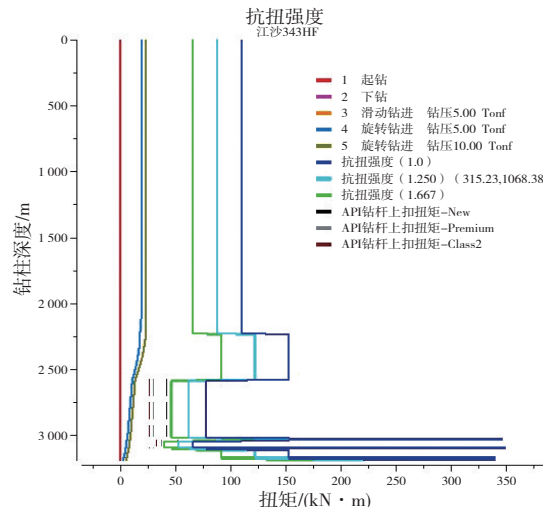


图4 设计轨迹扭矩

表3 江沙343HF井优化井眼轨迹数据

井深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	南北位移/ m	东西位移/ m	狗腿度/ ((°)·100m <sup>-1</sup> )	闭合方位/ (°)	闭合位移/ m	备注
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
500	0	0	500	0	0	0	0	0	
540	2	100	539.99	-0.12	0.69	5	100	0.7	
2 050	2	100	2 049.07	-9.27	52.59	0	100	53.4	
2 090	0	0	2 089.06	-9.39	53.27	5	100	54.09	
2 556.79	86.95	239.77	2 409.39	-162.29	-209.13	17.86	232.19	264.71	
2 579.25	86.95	239.77	2 409.52	-163.52	-211.25	0	232.26	267.14	
2 605.18	90.95	241.95	2 410	-176.14	-233.89	17.57	233.02	292.8	A靶
3 209.2	90.95	241.95	2 400	-460.14	-766.89	0	239.04	894.34	B靶

采用NDS软件计算,优化的井眼轨迹中各钻进模式均处于正常范围,优化后井眼轨迹各项参数明显优于原设计(见表4),优化后设计井眼轨迹与设

计对比水平位移如图5所示,优化后井眼轨迹侧向力、屈曲分析、摩阻、抗扭计算分析如图6—图9所示。

表 4 江沙 343HF 井轨迹优化效果

井眼轨迹参数	原设计	优化后	对比情况
造斜点/m	2 050	2 090	+40
斜井段造斜点靶前距/m	293	332	+39
斜井段最大狗腿度/((°)·100m <sup>-1</sup> )	20.5	17.86	-2.64
斜井段最大扭方位幅度/((°)·100m <sup>-1</sup> )	53.75	8.4	-45.35
斜井段扭方位范围/(°)	80 ~ 241.95	239.77 ~ 241.95	-159.14
模拟摩阻/t	17.6 ~ 30.7	9.23 ~ 13.8	-8.37 ~ -16.9
模拟扭矩/(kN·m)	16.14 ~ 20.65	9.7 ~ 13.17	-6.96

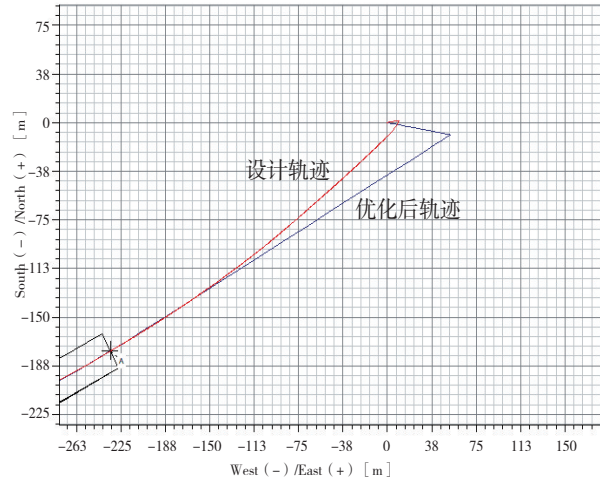


图 5 江沙 343HF 井优化与设计水平位移

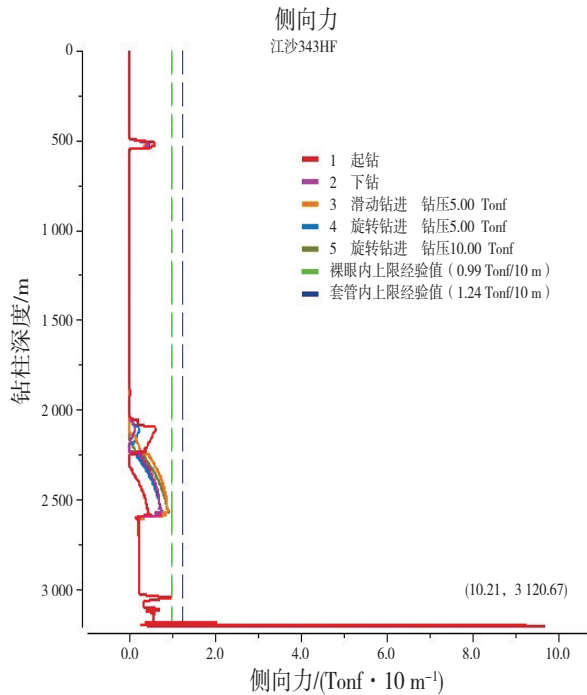


图 6 优化轨迹侧向力

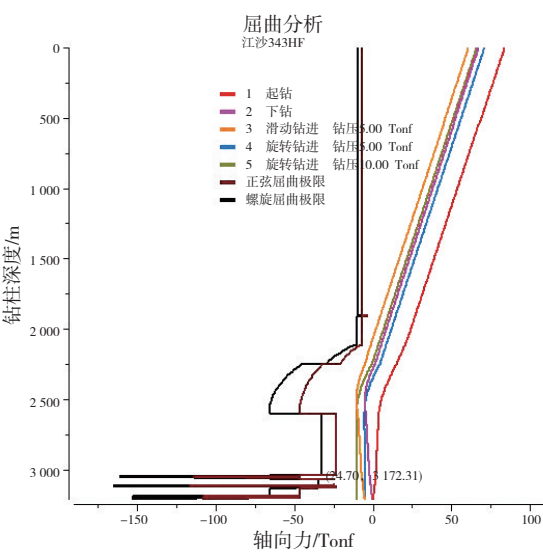


图 7 优化轨迹屈曲

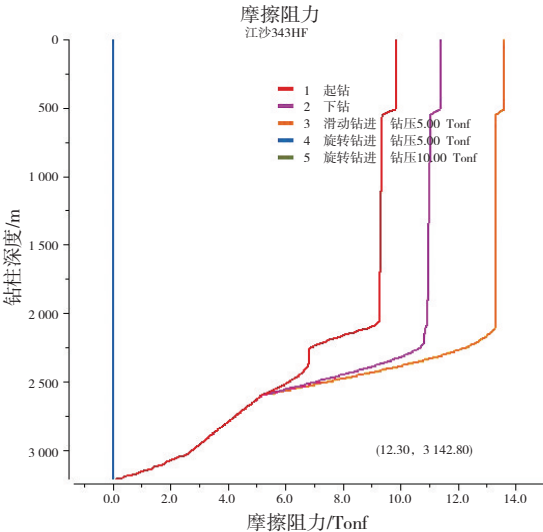


图 8 优化轨迹摩阻

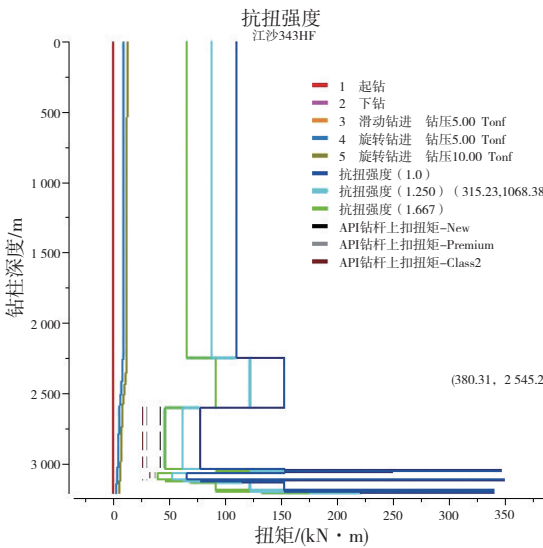


图 9 优化轨迹扭矩

川西中层水平井井眼轨迹控制技术先后在江沙343HF等7口井进行应用。平均钻井周期59.63 d,平均完井周期16.61 d,平均机械钻速8.95 m/h,与首轮次施工井相比,应用井平均完钻井深相近,平均钻井周期缩短53.36%,平均完井周期缩短43.48%,平均机械钻速提高66.72%(见表5)。

表5 川西中层水平井数据统计

井号	设计井/ m	完钻井深/ m	设计钻井 周期/d	实际钻井 周期/d	设计完井 周期/d	实际完井 周期/d	最大井斜/ (°)	机械钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	备注
江沙240HF	3 951	3 710	54.8	135.08	21	39.09	91.38	6.55	未优化轨迹
新沙24-15HF	3 310	3 310	41.19	123.38	12	13.50	88.90	5.18	
江沙220-2HF	4 067	3 766	51.97	125.13	15	35.58	92.01	4.39	
平均值		3 595.33	49.32	127.86	16	29.39	90.76	5.37	
江沙343HF	3 190	3 282	55.63	72.17	15	28.33	92.16	7.94	优化轨迹
江沙220-3HF	4 240	4 215	51.97	99.26	15	31.43	90.39	7.04	
新沙24-16HF	3 585	3 635	49.46	44.88	13	10.08	88.67	10.67	
新沙22-20HF	3 478	3 516	53.29	49.62	14	12.21	90.53	11.32	
新沙211HF	3 381	3 416	47.96	42.13	13.74	10.88	90.35	9.60	
江沙240-4HF	4 067	3 829	57.00	61.21	17	13.68	93.41	7.57	
江沙240-5HF	3 506	3 506	52.00	48.15	17	9.67	90.34	8.53	
平均值		3 628.43	52.47	59.63	14.96	16.61	90.84	8.95	
对比		+0.92%		-53.36%		-43.48%		+66.72%	

6 结论与认识

(1)小三维水平井轨迹设计优化为双二维井眼轨迹,通过直井段控制井底闭合位移和闭合方位,降低增斜井段造斜率,避免在增斜井段扭方位,能够有效地降低沙溪庙组不稳定地层复杂,减少起下钻扩划眼时间。

(2)增斜段井眼轨迹控制尤为重要,除了要保证增斜率、控制局部狗腿度不能太大之外,井眼轨迹整体圆滑程度直接影响水平段施工。

(3)水平段稳斜钻进,提高复合钻进比例是提速的关键;合适的钻具组合、合理的钻进参数对水平段稳斜钻进至关重要。调整单弯双扶钻具组合扶正器大小,通过钻压控制复合钻进井斜变化,能够有效地提高复合钻进比例,提高水平段机械

钻速。

参考文献:

[1] 魏殿举.川西地区中浅水平井钻井难点与对策[J].钻采工艺,2015,38(2):105-107.

[2] 张晓明,胥豪,崔海林,等.川西中深层致密砂岩气藏长水平段水平井轨迹控制技术[J].西部探矿工程,2013,25(10):23-26.

[3] 冯光通,易灿,周波.水平井井身轨迹控制技术——以川西地区新场构造须二段新10-1H井为例[J].油气地质与采收率,2011,18(6):107-110.

[4] 李梦刚.水平井井眼轨迹控制关键技术探讨[J].西部探矿工程,2009,21(2):42-44.

[5] 周巍巍,李建强,宗福升,等.川西中江区块水平井钻井技术[J].科技资讯,2014,12(8):84.

(编辑 韩 枫)