

# 卫68-FP1井泥页岩油藏水平井钻井技术

孔 华, 刘 强, 张 强, 晁文学, 万舒广

(中石化中原石油工程有限公司钻井工程技术研究院, 河南濮阳 457001)

**摘 要:**为了解决卫68-FP1井水平段井眼尺寸小、井下摩阻大、井眼轨迹不易控制等问题,在计算不同井眼曲率下摩阻、扭矩的基础上,结合邻井实钻资料,优化了井眼轨道设计,以降低摩阻和扭矩;根据非常规水平井的实钻经验,选用“小角度螺杆+欠尺寸双稳定器”钻具组合,并对螺杆钻具的弯角和稳定器外径进行了优化,以提高井眼轨迹控制精度;选用合理密度的油基钻井液,以保证水平段的井壁稳定性;采用 $C_1$ +伽马地质导向技术,以提高油层钻遇率;制定了安全钻进技术措施,以确保钻井安全。实钻结果表明:合理的井眼轨道设计能够有效降低钻进摩阻;“小角度螺杆+欠尺寸双稳定器”钻具组合能精确控制井眼轨迹,并能提高旋转钻进比例; $C_1$ +伽马地质导向技术能确保水平段始终在油层穿行。卫68-FP1井的顺利完成,可为泥页岩油藏水平井的钻井施工提供借鉴。

**关键词:**泥岩油气藏 水平井 井身结构 井眼轨迹 卫68-FP1 井

**中图分类号:**TE243<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)03-0130-05

## Drilling Technologies for Horizontal Well Wei 68-FP1 in Shale Reservoir

Kong Hua, Liu Qiang, Zhang Qiang, Chao Wenxue, Wan Shuguang

(Drilling Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China)

**Abstract:** In order to overcome technical difficulties in Well Wei 68-FP1, such as slim-hole drilling in horizontal section, high friction and drag, difficult to control well trajectory, etc., drilling technology for horizontal wells has been studied. The well path was optimized to reduce torque and drag by analyzing the data of torque and drag with different curvatures collected from adjacent wells. Combined with the early practice of horizontal wells for unconventional oil and gas reservoir, small angle PDM and undergauge bi-stabilizer assembly had been used, and optimized PDM angle and the size of stabilizers to improve precision of well trajectory control. Oil-based drilling fluids were applied and reasonable density was determined to maintain hole stabilization at horizontal section. “ $C_1$ +GAMMA” geo-steering technique was employed to ensure the horizontal section inside reservoir. The measures of safe drilling were adopted to ensure down-hole safety. The technical application showed that reasonable well path could reduce drag in drilling, small angle PDM and undergauge bi-stabilizer” assembly were the key factors in controlling trajectory, and it could also improve the ratio of rotary drilling. “ $C_1$ +GAMMA” geo-steering technique could keep the well trajectory inside the reservoir. The success of Well Wei68-FP1 will provide the reference for horizontal drilling in shale reservoirs.

**Key words:** shale reservoir; horizontal well; casing program; hole trajectory; Well Wei 68-FP1

## 1 概 况

国内外实践表明,长水平段水平井和大型分段压裂技术是开发非常规油气资源行之有效的手段<sup>[1-3]</sup>。中原油田为实现东濮老区深层致密砂岩油藏、泥页岩油藏等非常规储层有效动用,先后部署了卫68-FP1井等一批非常规长水平段水平井。

**收稿日期:**2012-11-13;**改回日期:**2013-04-21。

**作者简介:**孔华(1984—),男,山东济宁人,2010年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业,获硕士学位,助理工程师,主要从事定向井、水平井技术服务与研究工作。

**联系方式:**konghua0537@163.com。

**基金项目:**中国石化集团科技攻关项目“中原油田深层水平井关键技术研究”(编号:JP12005)和中原油田勘探局项目“非常规油气藏水平井井眼轨迹控制技术研究”(编号:2012317)资助。

卫 68-FP1 井主要钻探目的是评价该区域沙 3 段中部泥页岩油藏产能,以及了解储层裂缝发育情况。该井所钻遇地层复杂,盐膏层发育。该井储层岩性为泥质页岩,灰质含量高、性脆、微裂缝发育。

该井在进行井身结构设计时,以安全、高效钻井

和保护油气层为原则,同时充分考虑地层的不确定性,为下一开次安全顺利钻进留有余地<sup>[4]</sup>。由于该井上部地层存在盐膏层以及易漏、易坍塌地层,同时为了保证长水平段顺利施工以及套管顺利下入,根据地层岩性和地层压力情况,该井设计为四开井身结构,具体设计结果见表 1。

表 1 卫 68-FP1 井设计井身结构

Table 1 Casing program of Well Wei 68-FP1

开次	井段/m	钻头尺寸/mm	套管尺寸/mm	套管下深/m	备注
一开	0~200.00	508.0	406.4	200.00	水泥返至地面
二开	200.00~2 420.00	333.4	273.1	2 420.00	水泥返至地面
三开	2 420.00~3 270.00	241.3	193.7	3 270.00	水泥返至地面
四开	3 270.00~4 570.00	152.4	114.3	4 570.00	悬挂分段压裂管柱

注:三开  $\phi 193.7$  mm 悬挂器位于井深 1 933.00 m 处。

对于长水平段水平井,由于需要下入裸眼封隔器,管柱刚性强,对水平段的全角变化率要求严格。因此,控制水平段井眼轨迹成为保证长水平段水平井质量的关键<sup>[4-9]</sup>。胜利油田开展了长水平段水平井钻井技术探索,但对于油藏埋深大于 3 000 m 的长水平段水平井钻井尚未形成成熟的钻井技术<sup>[4-8]</sup>。为此,结合卫 68-FP1 井特点,针对深层长水平段水平井钻井技术难点,从轨道设计、轨迹控制和井壁稳定等方面进行分析,制定了相应的技术措施,并取得了良好效果。

2 技术难点

- 1) 井眼尺寸小、钻具刚度小,在施加钻压过程中钻柱易弯曲,摩阻、扭矩大,钻压传递困难,井眼轨迹控制难度大。
- 2) 采用裸眼分段压裂完井,水平段需要下入多个  $\phi 147.6$  mm 封隔器,封隔器与井眼环空间隙仅为 2.4 mm,同时要求水平段井眼曲率不能超过  $1.8^{\circ}/30\text{m}$ ,井径扩大率不大于 5%。因此,对水平段的井眼轨迹质量要求高。
- 3) 水平段长,井眼环空间隙小,钻井液携岩困难,易形成岩屑床<sup>[4]</sup>。同时,摩阻、扭矩增加,导致钻具易产生疲劳损坏,井下安全风险大。
- 4) 目的层存在垂深、储层厚度等不确定性,钻进过程中易脱靶或者钻穿油层。
- 5) 地温梯度较高,油层埋藏深,预测储层温度  $118\sim 128\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对测量仪器的耐温性能要求高。

3 钻井技术措施

3.1 井眼轨道优化设计

卫 68-FP1 井水平段长、井眼尺寸小,摩阻、扭矩大,钻压传递困难。因此,井眼轨道设计应以降低摩阻、扭矩及保证有效传递钻压为原则。

水平井常用轨道类型有“直—增—平”、“直—增—稳—增—平”以及悬链线等类型<sup>[8-10]</sup>。受靶前位移较小(仅有 284.5 m)的限制,在大位移井中广泛使用的悬链线轨道的优势得不到充分发挥<sup>[8]</sup>,而“直—增—稳—增—平”五段制轨道由于设置了稳斜段,便于调整由于造斜率与设计存在误差而造成的轨道偏离,与单增轨道相比,更有利于水平井的井眼轨迹控制<sup>[10]</sup>。

采用力学软件计算了相同工况不同造斜率下双增轨道摩阻、扭矩的变化情况,结果见表 2。计算时,钻具组合采用“ $\phi 127.0$  mm+ $\phi 88.9$  mm”复合钻

表 2 卫 68-FP1 井不同井眼曲率下的摩阻、扭矩

Table 2 Torque and drag analysis of Well Wei 68-FP1 at different curvatures

造斜率/ ( $^{\circ}$ ) $\cdot$ (30m) $^{-1}$	井口扭矩/ (kN $\cdot$ m)	下钻摩阻/ kN	起钻摩阻/ kN	滑动摩阻/ kN
6.0/7.5	12.74	180.8	143.3	181.9
6.3/6.5	11.52	173.4	132.8	174.5
6.4/6.4	11.86	173.4	133.1	174.5
7.5/6.3	12.46	178.5	138.4	178.5
7.5/6.0	12.74	180.9	143.3	182.5

具,套管内摩擦系数为 0.20,裸眼段摩擦系数为 0.35。

由表 2 可知:当上下轨道造斜率差异较大时,摩阻和井口扭矩相对较大;如果造斜率变化相对较小时,摩阻和扭矩相对较小,其中以造斜率“上低下高”(6.3°/6.5°)/30m 和“上下相同”(6.4°/6.4°)/30m

两种轨道更有利于水平井眼的钻进。

考虑到上部地层较为疏松,以及盐膏层段造斜能力差的特点,结合邻井实钻造斜率统计分析,该井造斜率设计为“上低下高”的形式,这样可以更好地适应地层自然造斜能力。该井最终井眼轨道设计参数见表 3。

表 3 卫 68-FP1 井轨道剖面设计  
Table 3 Trajectory profile design of Well Wei 68-FP1

井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	南北坐标/m	东西坐标/m	全角变化率/ ((°)·(30m) <sup>-1</sup> )	投影位移/m	备注
2 820.00	0	0	2 820.00	0	0	0	0	
3 013.29	40.59	195.20	2 997.52	-63.36	-17.21	6.3	65.35	
3 041.55	40.59	195.20	3 018.98	-81.10	-22.03	0	83.65	
3 270.02	89.87	200.69	3 111.84	-271.70	-85.90	6.5	284.51	A
4 569.97	89.87	200.69	3 114.84	-1 487.80	-545.20	0	1 584.47	B

### 3.2 井眼轨迹控制技术

#### 3.2.1 直井段

为提高底部钻具刚度、降低侧向力,直井段采用塔式钻具组合,控制钻压,采用单点测斜仪每 100 m 测量一次井斜角,以保证井壁稳定和防斜打直。

#### 3.2.2 增斜段

考虑到设计造斜率较高,盐膏层段造斜能力不足,已钻井上部直井段出现侧向位移等实际情况,为满足造斜率要求,施工时选用中等弯角的螺杆钻具,整个增斜段采用“牙轮钻头+ $\phi 185.0$  mm $\times$ 1.5°单弯螺杆”钻具组合纠斜,同时上提造斜点,在满足井眼轨迹控制要求的同时,避免全角变化率太大,确保井眼轨迹圆滑,降低摩阻和扭矩,为后期施工奠定基础。

增斜段钻具组合: $\phi 241.3$  mm 牙轮钻头+ $\phi 185.0$  mm $\times$ 1.5°单弯螺杆+411 $\times$ 410 定向接头+ $\phi 177.8$  mm 无磁钻铤 $\times$ 1 根+ $\phi 127.0$  mm 钻杆+ $\phi 127.0$  mm 加重钻杆+ $\phi 127.0$  mm 钻杆。

采用 MWD 跟踪监测,及时测斜,全井造斜井段每 10 m 测斜一次,必要时每 5 m 测斜一次,及时掌握井眼的井斜角、方位角及造斜率,确保实钻井眼轨迹与设计井眼轨道吻合。

实钻数据显示,该增斜钻具组合的造斜率普遍较高,每个单根定向钻进 4~5 m,造斜率控制在(5.9°~7.0°)/30m,能满足设计要求及技术套管下

入需要。

#### 3.2.3 水平段

卫 68-FP1 井水平段长,井眼轨迹控制精度要求高,为了保证长水平段的井斜角稳定,在总结卫 383-FP1 井、濮 1-FP1 井等非常规水平井钻井经验的基础上,选用了欠尺寸双稳定器钻具组合进行复合导向。欠尺寸双稳定器钻具组合是在螺杆钻具的上部增加一个螺旋稳定器,提高钻具组合的刚性,减少钻具在钻压作用下的弯曲变形,达到复合钻进时稳定井斜角的作用。

考虑地层的可钻性,设计了长水平段稳斜钻具组合,并对螺杆钻具弯角和稳定器外径进行了优化,结果为:稳斜钻具组合为  $\phi 152.4$  mm PDC 钻头+ $\phi 120.0$  mm 带稳定器单弯螺杆+螺旋稳定器+ $\phi 88.9$  mm 钻杆+ $\phi 88.9$  mm 加重钻杆+ $\phi 127.0$  mm 钻杆,其中螺杆弯角 0.75°或 1.00°,下稳定器外径为 140.0~148.0 mm,上稳定器外径为 146.0~149.0 mm。

实钻表明,通过调整上、下稳定器的尺寸以及钻井参数(钻压、转速等),能够提高复合钻进比例,达到稳斜效果。该井水平段的全角变化率基本控制在 1.65°/30m 以内,水平段复合钻进比例达到了 89.6%。

### 3.3 井壁稳定技术

#### 3.3.1 选用油基钻井液

四开井段以泥页岩为主,稳定性差,遇水易膨

胀、坍塌。一方面,会增加井眼不规则性,造成定向钻进和完井管柱下入困难;另一方面,难以保证裸眼封隔器的有效密封。油基钻井液抑制能力强,对裂缝性泥岩、泥页岩等易水化坍塌地层具有良好的稳定井壁的能力<sup>[11]</sup>,因此,四开水平段选用油基钻井液钻进。

在油基钻井液中添加润湿分散剂、结构剂、增黏剂、降滤失剂,将滤失量控制在 4 mL 以内,控制油基钻井液的流变性和高温悬浮性,开启四级固控设备清除有害固相,以保证四开定向以及后期作业的顺利进行。

油基钻井液的润滑性能优良,能够有效降低定向滑动钻进摩阻。该井水平段施工中,摩阻基本控制在 60~100 kN,定向钻进过程中无托压、黏附现象出现。

### 3.3.2 确定合理的钻井液密度

研究表明,地层孔隙压力越高,坍塌压力也越大<sup>[12]</sup>。对于泥页岩地层,按地层压力设计的钻井液密度不能平衡坍塌压力,因此需要以地层坍塌压力当量钻井液密度为基础,结合井眼轨迹以及岩屑返出情况,确定合理的钻井液密度<sup>[13]</sup>。

卫 68-FP1 井水平段施工初期钻井液密度为 1.45 kg/L,钻进过程中出现掉块、井塌等情况,于是将钻井液密度提高至 1.68~1.70 kg/L,黏度提高至 150~170 s,掉块、坍塌得到控制,保证了长水平段的安全钻进。

该井电测井径曲线显示,水平段前 300 m 由于垮塌井径扩大率较大,后 1 000 m 井径比较规则,平均井径为 158.3 mm,平均井径扩大率为 3.87%(见图 1)。

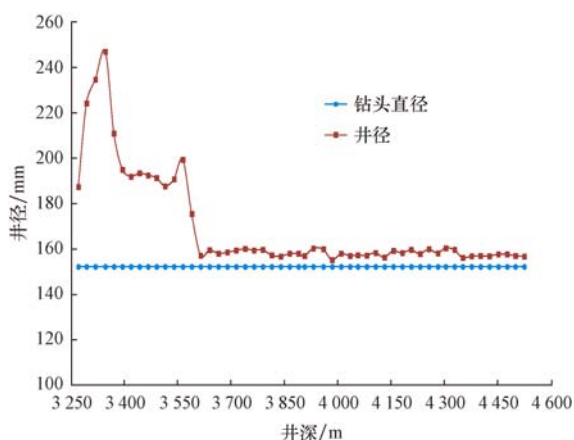


图 1 卫 68-FP1 井水平段井径曲线

Fig. 1 Caliper curve of the horizontal section of Well Wei 68-FP1

### 3.4 C<sub>1</sub>伽马地质导向技术

由于随钻测量仪器距离钻头有 8~12 m 的距离,在钻井过程中存在一个测量盲区。因此,依靠随钻测量数据(伽马、电阻率等)不能快速、有效地判断井底岩性。卫 68-FP1 井水平段钻进过程中,由于钻井液中混入原油,导致全烃值增加,全烃录井曲线不能反映油气显示,但经过充分循环后,其中的轻质组分逐渐减少直至消失。当水平段钻进中录井 C<sub>1</sub>(甲烷)值增加时,可以初步判断钻遇油气层。因此,将气测录井甲烷监测值和随钻测量中的伽马数据相结合,能够快速、准确地判断是否钻遇油层<sup>[14]</sup>。

该井定向钻至井深 3 185.00 m 时,气测 C<sub>1</sub> 值由 0.028% 升至 0.332%,伽马值下降,确定进入油气层。自进入油气层后,实钻伽马始终为 60~70 API,无明显变化,气测 C<sub>1</sub> 值 0.10%~0.50%,部分井段气测 C<sub>1</sub> 值持续稳定在 0.30%~0.50% 之间,油气显示较好,判断井眼轨迹一直在油气层中穿行。完井电测数据表明,该井油气层钻遇率达到了 100%。

### 3.5 安全钻进技术措施

1) 为提高钻进效率和处理井下复杂情况的能力,使用顶驱系统,减少接单根时间,起下钻时可以适当循环钻井液、转动钻具<sup>[4,15]</sup>。

2) 为保证大井斜角下钻压的有效传递,当井斜角大于 60° 时,将下部钻具中的钻铤替换为加重钻杆,并采用倒装钻具。为提高水平段钻进中钻具强度和防止钻具疲劳损坏,定期倒换下部钻具<sup>[15]</sup>。

3) 随着水平位移的增大,岩屑床的堆积越来越严重。因此,在水平段施工中,每钻进一个单根及时进行划眼,以保持井壁光滑;每钻进 50~100 m 进行一次短起下钻,并将钻柱起至井斜角小于 40° 的井段,破坏水平段和套管内岩屑床。

4) 该井水平段实测循环温度在 110 °C 左右,在高温和油基钻井液的作用下,螺杆和仪器中的橡胶元件易变形或被腐蚀。实钻中,为减少因仪器或螺杆损坏而引起的起下钻,选用耐高温的随钻测量仪器,采用抗高温耐腐蚀螺杆。

## 4 结 论

1) 采用欠尺寸双稳定器钻具组合,并选择合理的钻井参数,能够有效降低水平段复合钻进过程中



全角变化率的变化幅度,减少定向滑动钻进比例,是长水平段水平井安全钻进的有效手段。

2) 合理的井身结构、井眼轨道是保证水平井快速、安全钻进的前提。

3) 油基钻井液在防止泥页岩膨胀水化的同时,能够降低水平段的钻进摩阻。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.  
Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chunmei, et al. Shale gas: enormous potential of unconventional natural gas resources[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 1-6.
- [2] Grieser Bill, Bray Jim. Identification of production potential in unconventional reservoirs[R]. SPE 106623, 2007.
- [3] 刘洪林,王红岩,刘人和,等.非常规油气资源发展现状及关键问题[J].天然气工业,2009,29(9):113-116.  
Liu Honglin, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. The present status and essential points of developing the unconventional hydrocarbon resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9): 113-116.
- [4] 韩来聚,牛洪波,窦玉玲.胜利低渗油田长水平段水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2012,40(3):7-12.  
Han Laiju, Niu Hongbo, Dou Yuling. Key drilling technologies for long displacement horizontal wells of low permeability reservoirs in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 7-12.
- [5] 赵金洲,韩来聚,唐志军.高平1井大位移水平井钻井设计与施工[J].石油钻探技术,2010,38(6):29-32.  
Zhao Jinzhou, Han Laiju, Tang Zhijun. Design and drilling of Gaopin 1 ERD horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 31-34.
- [6] 崔海林,陈建隆,牛洪波,等.胜利油田首口小井眼长水平段水平井钻井技术[J].石油钻探技术,2011,39(5):14-18.  
Cui Hailin, Chen Jianlong, Niu Hongbo, et al. The first slim hole long horizontal-section horizontal well drilling technique in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 14-18.
- [7] 裴建忠,刘天科,周飞,等.金平1浅层大位移水平井钻井技术[J].石油钻探技术,2009,37(1):87-90.  
Pei Jianzhong, Liu Tianke, Zhou Fei, et al. Horizontal drilling techniques to penetrate shallow formations in Well Jinping-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1): 87-90.
- [8] 窦玉玲.长水平段大位移井井眼轨道优化设计[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2011,38(7):50-52.  
Dou Yuling. Optimizing design of well trajectory for extended reach well with long horizontal section[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2011, 38(7): 50-52.
- [9] Al-Balushi H M, Al-Rashdi M H, Al-Shandoodi M H, et al. World longest expandable open hole clad & open hole liner with swelling elastomer deployed in Yibal horizontal Well[R]. IADC/SPE 88026, 2004.
- [10] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006:170-176.  
Liu Xiushan. Geometry of wellbore trajectory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 170-176.
- [11] 张伟,刘振东,刘宝峰,等.油基钻井液的推广及循环利用[J].石油钻探技术,2008,36(6):34-38.  
Zhang Wei, Liu Zhendong, Liu Baofeng, et al. Popularization and recycling of oil-based drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(6): 34-38.
- [12] 陈天成.坍塌压力与井身结构设计和井壁稳定技术关系初探[J].钻采工艺,2006,29(1):21-23.  
Chen Tiancheng. Relation of caving pressure with casing program and hole stability technique[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(1): 21-23.
- [13] 姚永辉,李庆铎,张永成.腰英台地区井壁稳定技术研究与应用[J].石油钻采工艺,2010,32(6):128-131.  
Yao Yonghui, Li Qingduo, Zhang Yongcheng. Study and application of wellbore stability techniques in Yaoyingtai Region[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(6): 128-131.
- [14] 曹泽甫,张敏,刘明国,等.卫360-平1井C<sub>1</sub>+GAMMA地质导向钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(3):18-20.  
Cao Zefu, Zhang Min, Liu Mingguo, et al. C<sub>1</sub>+GAMMA geosteering drilling technology for Wei 361-H1 Well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3): 18-20.
- [15] 祁宏军,闫振来,唐志军,等.金平1井长水平段水平井的设计与施工[J].中外能源,2010,15(1):56-59.  
Qi Hongjun, Yan Zhenlai, Tang Zhijun, et al. Design and drilling of long horizontal-section well of Jinping 1 Well[J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(1): 56-59.

[编辑 刘文臣]