

# 胜利油田首口小井眼长水平段水平井钻井技术

崔海林<sup>1,2</sup>, 陈建隆<sup>1</sup>, 牛洪波<sup>1</sup>, 张佃宾<sup>1</sup>, 刘晓兰<sup>1</sup>

(1. 中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 2. 长江大学石油工程学院, 湖北荆州 434023)

**摘要:**为提高低渗透油气藏的开采效率,胜利油田部署了一口小井眼长水平段多级分段压裂水平井——樊154-平1井。在介绍樊154-平1井储层特征、井身结构和井眼轨道剖面特点的基础上,认为该井存在水平段长、摩阻扭矩大、井眼尺寸小、循环压耗高和水平段井身质量要求严格等钻井难点,从实钻井眼轨迹优化、实时摩阻扭矩计算、底部钻具组合优选、钻井液技术、地质导向技术和井眼修复等方面,对该井采用的技术措施进行了详细介绍。该井实钻水平段长1 230.00 m,创造了胜利油田小井眼水平井水平段最长纪录,平均井径扩大率4.62%,储层钻遇率100%,井眼轨迹光滑,有效地保证了该井12段分段压裂的成功实施,投产后稳产20~30 t/d,为胜利油田低渗区块的高效开发提供了宝贵经验。

**关键词:**小眼井 水平井 低渗透储集层 压裂 胜利油田

**中图分类号:**TE246 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)05-0014-05

## The First Slim Hole Long Horizontal-Section Horizontal Well Drilling Technique in Shengli Oilfield

Cui Hailin<sup>1,2</sup>, Chen Jianlong<sup>1</sup>, Niu Hongbo<sup>1</sup>, Zhang Dianbin<sup>1</sup>, Liu Xiaolan<sup>1</sup>

(1. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China; 2. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China)

**Abstract:** Aimed at improving the development efficiency of low-permeability reservoir, Well Fan 154-Ping 1, a multi-stage fracturing slim hole long horizontal section horizontal was drilled. On the basis of introducing reservoir characteristics, casing program and well trajectory profile, the drilling difficulties were analyzed, such as long horizontal section, large friction & torque, slim hole, high circulation pressure loss and strict quality requirements in horizontal section. The key technologies were introduced, including real-time hole trajectory optimization, real-time friction & torque calculation, BHA optimization, mud, geosteering technology and borehole reaming technology. The success of this well proved the feasibility of multi-stage fracturing and the long horizontal-section well drilling in low permeability reservoir. It also provided valuable experience and technical support for efficient development of low permeability reservoirs.

**Key words:** slim hole; horizontal well; low permeability reservoir; fracturing; Shengli Oilfield

胜利油田樊154区块属于典型的低孔特低渗透油气层,为进一步落实该区块油层的发育情况、探索低品位储量的开发技术,评价水平井单井产能,决定在该区块北部钻樊154-平1井作为油藏评价井。并规划在该区块采用长井段裸眼水平井分段压裂、弹性开发的模式,通过优化水平井完井、压裂和投产方式等设计,以提高产能,并探索采用多级分段压裂长水平段水平井技术开发低渗透油气藏的可行性。

**收稿日期:**2011-05-10; **改回日期:**2011-09-13。

**作者简介:**崔海林(1981—),男,2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,长江大学油气井工程专业在读工程硕士研究生,工程师,主要从事钻井新技术研究和定向井、水平井方面的现场技术服务工作。

**联系方式:**(0546)8797402, zjslzp@sina.com。

**基金项目:**国家科技重大专项“低渗油气田高效开发钻井技术”(编号:2008ZX05022)部分研究成果。

## 1 储层特征

樊 154 区块位于胜利纯梁采油厂大芦湖油田的东部,区域构造处于东营凹陷博兴洼陷中部<sup>[1]</sup>,主力含油层系为沙 3 中 2 砂组,该区块沙 3 中油藏埋深 2 550~2 800 m。目前,共完钻 9 口探井,8 口开发井,其中试油 8 口井,试采 8 口井。该区块油藏为构造-岩性油藏,地质储量为  $576 \times 10^4$  t。据邻井取心资料显示,该地区平均孔隙度 14.9%,平均渗透率  $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为低孔特低渗透储层,常规钻完井手段开发效果不甚理想。

## 2 井身结构与井眼轨道设计

### 2.1 井身结构设计

依据樊 154 区块的地层和压力特点,考虑完井

压裂管柱结构特点及工艺要求,降低钻具摩阻和扭矩,有利于水平段的有效延伸。樊 154-平 1 井设计采用三开井身结构:一开  $\phi 444.5$  mm 井眼钻至井深 301.00 m, $\phi 339.7$  mm 表层套管下至井深 300.00 m,水泥返至地面;二开  $\phi 241.3$  mm 井眼钻至井深 2 834.50 m, $\phi 177.8$  mm 技术套管下至井深 2 832.00 m(A 靶点),水泥返至地面;三开  $\phi 152.4$  mm 井眼钻至设计完钻井深 4 059.93 m,裸眼完钻后下入  $\phi 114.3$  mm 完井压裂管柱实施 12 段分段压裂。

### 2.2 井眼轨道设计

通过对比不同造斜点、不同造斜率的几种轨道设计,结合地层特点和钻探要求,确定井身剖面采用“直—增—平”单增井眼轨道剖面。设计水平段长 1 230 m 左右,其他井眼轨道设计参数见表 1。

表 1 樊 154-平 1 井井眼轨道设计

Table 1 The trajectory design of Well Fan154-Ping 1

井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	水平位移/m	南北/m	东西/m	造斜率/ (°)·(100m) <sup>-1</sup>	工具面角/ (°)	靶点
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2 372.91	0	340.00	2 372.91	0	0	0	0	0	造斜点
2 633.12	50.14	340.00	2 601.15	106.78	100.34	-36.52	19.27	0	
2 830.98	88.30	336.82	2 670.00	288.38	269.22	-103.35	19.35	354.81	A
3 641.76	88.30	336.82	2 694.00	1 098.65	1 014.22	-422.35	0	0	K
3 646.76	88.30	336.82	2 694.15	1 103.64	1 018.81	-424.32	0	0	
3 664.64	90.06	337.13	2 694.40	1 121.51	1 035.26	-431.31	10.00	9.88	
4 024.93	90.06	337.13	2 694.00	1 481.80	1 367.22	-571.35	0	0	B
4 059.93	90.06	337.13	2 693.96	1 516.80	1 399.47	-584.95	0	0	

## 3 技术难点

1) 樊 154-平 1 井为设计水平段长度达到 1 230.00 m 的小井眼水平井,施工特性、钻具尺寸和钻进参数的选择等需要逐步摸索,增加了施工的难度。

2) 馆陶组及以上地层成岩性较差,定向施工周期较长,2 500 m 长的裸眼段长时间浸泡后容易坍塌掉块,钻井液必须具有良好的防塌性能。

3) 随着水平位移的增大,钻井液携岩难度加大,岩屑床不能及时破坏,致使摩阻系数增大,常规导向钻具滑动钻进时钻压传递困难,井眼轨迹控制难度增大,特别是后期滑动钻进时间长、效率低、效果差,严重影响了钻井效率。

4)  $\phi 152.4$  mm 水平段井眼尺寸相对较小,钻具

组合水眼小、循环压耗大,循环系统(钻井泵、高压管汇、水龙带、立管管汇和顶驱)长期在极限工况下工作,安全隐患加大。

5) 采用“长水平段多级分段压裂技术”进行完井作业,下入完井压裂管柱的同时,需要下入 12 个  $\phi 147.8$  mm 的裸眼封隔器,环空间隙仅 2.3 mm,水平段较大的全角变化率(大于  $10^\circ/100\text{m}$ )和井径扩大率(大于 5%)不利于裸眼封隔器的下入和封隔,对钻井液性能和水平段井眼轨迹控制精度要求高。

## 4 钻井技术措施

### 4.1 实钻井眼轨迹优化

直井段采取“防斜打直”措施,井斜角、水平位移

控制在设计范围内。不断优化修正待钻井眼轨道,始终选择全角变化率小、摩阻和扭矩低、施工效率高的井眼轨道施工。具体优化措施是,根据轨迹控制需要的造斜率,对每根钻杆进行钻进方式优化,采取复合钻进与滑动钻进相结合的方式完成每根钻杆的钻进,使增斜段的造斜率较为平均,不会出现较大的狗腿度,确保井眼轨迹平滑、摩阻和扭矩小,达到优化整个实钻井眼轨迹的目的。

实钻数据显示,斜井段全角变化率大都在(15°~25°)/100m,最大全角变化率 26.53°/100m,与设计 的 19°/100m 比较接近,狗腿度没有出现较大的波动,获得了较高的井眼轨迹圆滑度,二开完钻后电测、下技术套管作业无遇阻显示,均一次性顺利完成。

#### 4.2 实时摩阻扭矩计算

施工过程中,利用 Landmark 软件计算分析待钻井眼轨道的摩阻和扭矩,通过实测的摩阻扭矩反算裸眼段摩阻系数,优选摩阻、扭矩较小的井眼轨道,并从工程和钻井液两方面及时调整,降低裸眼段摩阻系数,改善井下环境,确保施工顺利。

例如樊 154-平 1 井钻至井深 3 969.82 m 时,根据现场实测摩阻和扭矩反算裸眼段的摩阻系数。

1) 模拟计算条件。井身结构: $\phi 339.7$  mm 套管  $\times 298.33$  m +  $\phi 177.8$  mm 技术套管  $\times 2 842.86$  m +  $\phi 152.4$  mm 裸眼  $\times 3 969.82$  m;水平段钻具组合: $\phi 152.4$  mm 钻头  $\times 0.19$  m +  $\phi 120.6$  mm 单弯动力钻具  $\times 5.09$  m +  $\phi 146.0$  mm 欠尺寸稳定器  $\times 0.85$  m +  $\phi 120.6$  mm 无磁承压钻杆  $\times 9.35$  m + MWD 短节  $\times 1.57$  m +  $\phi 88.9$  mm 斜坡钻杆  $\times 1 770.00$  m +  $\phi 88.9$  mm 加重钻杆  $\times 229.20$  m +  $\phi 88.9$  mm 斜坡钻杆  $\times 1 953.57$  m。钻进参数:钻压 50 kN,钻头扭矩 2 kN·m,排量 13 L/s。套管内摩阻系数 0.25,裸眼段摩阻系数分别取 0.35,0.40,0.45 和 0.50,水基钻井液密度 1.25 kg/L,井眼完全净化,裸眼段井径扩大率 3%。

2) 模拟计算结果。裸眼段不同摩阻系数下的摩阻扭矩数据见表 2。

3) 确定摩阻系数,预测摩阻扭矩。钻至井深 3 969.82 m 时,现场实测复合钻进扭矩约 10 560.0 N·m,上提摩阻约 150 kN,下放摩阻约 170 kN,由表 2 中数据反算出的裸眼段摩阻系数约 0.45,由此可计算出钻至不同井深时的摩阻扭矩和钻具疲劳屈曲情况(见表 3),有针对性地调整钻井液性能,确保裸眼段摩阻系数在可接受的范围内,以降低施工风险。

表 2 裸眼段不同摩阻系数下的摩阻扭矩数据

Table 2 Friction & torque data of open hole with different friction coefficients

裸眼摩阻系数	复合钻进扭矩/N·m	上提摩阻/kN	下放摩阻/kN
0.35	9 192.7	114.3	128.2
0.40	9 993.0	131.1	146.5
0.45	10 793.3	147.9	165.2
0.50	11 593.6	164.8	184.6

表 3 预测摩阻与实际摩阻对比

Table 3 The comparison between calculated and actual friction

裸眼摩阻系数	井深/m	预测下放摩阻/kN	实际下放摩阻/kN	对比
0.45	4 000.00	169.3	173	相符
0.45	4 030.00	173.2	177	相符
0.45	4 060.00	178.6	180	相符

#### 4.3 底部钻具组合优选

目前,国内大位移或长水平段水平井的施工大多采用常规螺杆钻具组合<sup>[2-3]</sup>。因此,底部钻具组合的优选是优质、安全、高效控制井眼轨迹的重要措施之一。大位移或长水平段水平井底部钻具组合的优选原则是:1)增斜段单弯度数适中,在满足井眼轨迹控制的同时,避免出现较大狗腿度,确保井眼轨迹圆滑,降低摩阻和扭矩,为后期施工奠定基础;2)稳斜段或水平段通过调整钻进参数控制井斜,“少滑动,多复合”,提高复合钻进比例,实现水平位移的有效延伸<sup>[4]</sup>。

根据优选原则,对螺杆钻具结构参数和欠尺寸稳定器外径进行了优化,优选出增斜段和水平段的钻具组合。

增斜段钻具组合: $\phi 241.3$  mm 钻头 +  $\phi 197.0$  mm  $\times 1.5^\circ$  单弯螺杆(带  $\phi 238.0$  mm 螺旋稳定器) + 411  $\times 410$  回压阀 +  $\phi 127.0$  mm 无磁承压钻杆 + MWD 无磁悬挂短节 +  $\phi 127.0$  mm 钻杆(随着井斜角的增大逐步倒装) +  $\phi 127.0$  mm 加重钻杆  $\times 15$  根 +  $\phi 127.0$  mm 钻杆。该钻具组合的优点:1)采用柔性钻具组合并逐步倒装,有利于钻压的有效传递;2)采用  $1.5^\circ$  单弯螺杆,弯角到钻头距离比常规远 0.3 m,实钻造斜率介于常规  $1.25^\circ$  和  $1.5^\circ$  单弯螺杆之间,既可满足该井的设计造斜率,又能避免出现较大的狗腿度;3)螺杆钻具的长度缩短,测斜盲区减少,有利于精确控制井眼轨迹。

水平段钻具组合: $\phi 152.4$  mm 钻头 +  $\phi 120.6$

mm×1.0°单弯螺杆(带 $\phi 146.0\sim\phi 147.0$  mm 稳定器)+ $\phi 145.0\sim\phi 147.0$  mm 欠尺寸稳定器+311×310 回压阀+ $\phi 88.9$  mm 无磁承压钻杆+LWD 无磁短节+ $\phi 88.9$  mm 斜坡钻杆(随着水平段的延伸逐步增加)+ $\phi 88.9$  mm 加重钻杆 30 根+ $\phi 88.9$  mm 钻杆。该钻具组合的优点:1)1.0°单弯螺杆可避免滑动钻进调整井斜时出现较大的狗腿度;2)螺杆本体上的稳定器减小 1~2 mm,并搭配合适尺寸的欠尺寸稳定器,稳斜效果增强,复合钻进的比例大大提高。

#### 4.4 应用地质导向技术

探油层着陆和水平段钻进过程中,为了准确进入目的层、确保水平段具有最大的油层穿透率,下入地质导向仪器,并与气测、岩屑录井等配合,分析井眼轨迹走向和位置(水平段尽量避开泥岩),达到准确着陆、井眼在油层中穿行的目的。具体思路:探油顶时准确记录、打印随钻电阻率和伽马曲线,加强与邻井测井图的对比分析,结合气测和岩屑观察,综合分析是否进入目的层;进入目的层后,随时观察分析随钻伽马和电阻率的变化情况,特别注意曲线的微小异常变化,及时分析判断;根据樊 154 断块储层的沉积规律,认真分析实钻钻时、砂岩粗细和组分,结合录井数据综合判断井眼轨迹在储层中的位置,以便及时调整轨迹走向。

樊 154-平 1 井应用地质导向技术,实现了不打导眼、一次性准确着陆进入储层的目的,水平段储层钻遇率 100%。

#### 4.5 钻井液技术

针对樊 154-平 1 井上部地层易坍塌、造斜段裸眼段长、水平段井眼尺寸小、水平段长、携岩困难、摩阻扭矩大、钻井液润滑性能要求高的特点,钻井液体系必须具有很好的抑制性,控制地层造浆,性能稳定,润滑防塌和携砂性能良好,满足井眼清洁、钻压有效传递、位移有效延伸的目的。根据樊 154 区块的地层压力特点,优选出不同井段的钻井液体系。

1) 直井段采用聚合物防塌钻井液体系。钻至井深 800 m 时改小排量循环,同时运转固控设备,降低钻井液固相含量;每 12 h 补充 1.0%~1.5% 的 PAM 降黏溶液,黏度控制在 30~40 s;同时加入适量的改性铵盐,调整钻井液流程。

2) 斜井段选用聚合物(润滑)防塌钻井液体系。严格控制膨润土含量,按配方加足各种降滤失剂、防

塌剂和降黏剂,以 8%~10% 的加量均匀混入原油并充分乳化,配合加入固体润滑剂,保证钻井液具有良好的润滑防卡、携砂和防塌性能。钻井液密度控制在 1.17~1.19 kg/L,黏度 40~70 s,起钻前滤失量控制在 5 mL 左右。

3) 水平段选用聚合物润滑防塌钻井液体系。在二开钻井液的基础上,加大原油和固体润滑剂的加量,进一步提高钻井液的润滑性;振动筛、除砂器和除泥器等固控设备与钻井泵同步运转,严格控制钻井液中的劣质固相和低密度固相含量,根据需要使用离心机;随着水平段的延伸,加入质量浓度 0.02~0.03 kg/L 的无水聚合醇、0.03~0.05 kg/L 的纳米乳液和 0.005~0.010 kg/L 的胺基聚醇,提高钻井液的抑制防塌能力,滤失量严格控制在 3 mL 以下,保证滤饼质量良好。

实践表明,所用的聚合物润滑防塌钻井液体系具有很好的抑制性、润滑性和携砂能力,钻进过程中没有出现坍塌掉块及遇阻遇卡现象;斜井段摩阻一直控制在 40~60 kN,水平段前 800 m 摩阻控制在 100 kN 左右,后面井段摩阻 160~180 kN;水平段钻井液的 API 滤失量一直控制在 3 mL 以下,加强了护壁性,很好地控制了井径扩大率,满足了完井压裂管柱的下入要求。

#### 4.6 井眼修复技术

完钻后依次采用“钻头+ $\phi 145.0$  mm 稳定器”、“钻头+ $\phi 145.0$  mm 西瓜磨鞋”、“钻头+ $\phi 152.4$  mm 西瓜磨鞋”和“钻头+ $\phi 152.4$  mm 西瓜磨鞋+钻杆×1 根+ $\phi 145.0$  mm 西瓜磨鞋”4 种通井钻具组合通井修复井壁。下钻时精细划眼、优化循环参数、控制循环时间等,提高井眼轨迹的圆滑度,确保长水平段完井压裂管柱和裸眼封隔器的顺利下入。

## 5 实钻数据及效果

1) 樊 154-平 1 井完钻井深 4 066.00 m,垂深 2 705.31 m,实钻水平段长 1 230.00 m,水平位移 1 517.30 m,创造了胜利油田小井眼水平井水平段最长纪录。

2) 水平段井径扩大率 8 914 个有效测点中,小于 5% 的占 70.74%,平均井径扩大率 4.62%;全角变化率 127 个测量点中小于 10% 的占 81.00%,储层钻遇率 100%。在提高钻进效率的同时,确保了井眼轨迹的光滑度和储层钻遇率,成功实现了 12 段

分段压裂施工。

3) 樊 154-平 1 井投产试油后,初期日产油 50~70 t,稳产后日产油 20~30 t,为周围邻井的 4~5 倍,增产效果显著。

## 6 认识与体会

1) 樊 154-平 1 井是胜利油田第一口小井眼长水平段水平井,也是胜利油田第一口在低孔低渗区块实施长水平段水平井分段压裂工艺的试验井,它的成功实施为低渗油气田的高效开发积累了宝贵经验。

2) 形成了实钻井眼轨迹优化、实时摩阻扭矩计算、底部钻具组合优选、高效润滑防塌钻井液技术和井眼修复技术等一系列小井眼长水平段水平井钻井配套技术,为利用多级压裂长水平段水平井技术开发低渗透油气藏提供了技术保障。

3) 应用了地质导向钻井技术,提高了井身质量和井眼轨迹的控制精度,实现了更长水平段水平井的安全高效钻探,为低渗透油藏的高效开发提供了强有力的技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 刘传鹏,林承焰,赵玉华. 樊 107 块特低渗透油藏有效开发技术探讨[J]. 断块油气田, 2008, 15(6): 76-79.  
Liu Chuanpeng, Lin Chengyan, Zhao Yuhua. Effective development techniques of ultra-low permeability reservoir at Block Fan 107, Daluhu Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(6): 76-79.
- [2] 曹阳,狄勤丰,朱卫平,等. 高效导向螺杆钻具的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2011, 34(3): 67-70.  
Cao Yang, Di Qinfeng, Zhu Weiping, et al. Research and application of effective steering PDM[J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(3): 67-70.
- [3] 刘匡晓,魏士军,郭金爱,等. 川东北超深水平井轨迹控制方法优选[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 254-256.  
Liu Kuangxiao, Wei Shijun, Guo Jinai, et al. Optimization of trajectory control technique of ultra-deep horizontal well in Northeast Sichuan Area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 254-256.
- [4] 唐洪林,唐志军,闫振来,等. 金平 1 井浅层长水平段水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 11-15.  
Tang Honglin, Tang Zhijun, Yan Zhenlai, et al. Drilling techniques of shallow long horizontal-section well of Jinping 1 Well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6): 11-15.

## 欢迎订阅 2012 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,是由中国石油化工集团公司主管、中国石化集团石油工程技术研究院主办的科技期刊,是全国中文核心期刊和历年中国科技论文统计源刊,被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录。国内连续出版物号:CN11-1763/TE,国际连续出版物号:ISSN1001-0890。

《石油钻探技术》主要报道国内石油工程(包括钻井、钻井液、固井、完井、开采等专业)以及钻采机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油工程技术发展的水平和动向本刊栏目为:专家视点、钻井完井、油气开采、钻采机械、现场交流、科技信息。适合于广大石油工程技术人员、石油类高等院校师生和油田企业经营者阅读。

《石油钻探技术》为双月刊,大 16 开版本,逢单月末出版。2012 年每期定价 15 元(含邮寄费),全年 6 期共 90 元。自办发行,邮汇与电汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅,可破季订阅。订阅办法:

1. 登录本刊网站(<http://www.syzt.com.cn>)下载期刊订阅单,认真填写订阅单及汇款单,切勿潦草,以免因地址不详而无法邮寄。

2. 银行汇款:工行北京市海淀支行,帐号 0200049629200702219,户名“中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院”,开户行代码 102100004960,并注明“期刊”字样。

3. 邮局汇款:北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 710 室,邮编 100101,收款人:刘文臣。

联系电话:010-84988356,84988317;传真:010-84988316;E-mail:syzt@vip.163.com。