

# 海上多分支超短半径水平井技术研究及应用

叶林志 薛 洋 贺静川 (中海油田服务股份有限公司, 广东 湛江 524057)

**摘要:** 在海上油田等非常规油气勘探、开发中, 由于环境条件的限制, 常规侧钻技术进行多分支水平井作业时, 由于钻具本身特点及能力限制, 分支井的井眼曲率半径多为 10-100m 区间。这种现状决定了在进行前述作业时, 井眼轨迹必须具备较大的靶前位移。因此, 针对海上特殊作业环境, 使用高强度柔性钻杆, 配合大斜度斜向器和特制造斜钻头, 形成一套海上多分支超短半径水平井钻井技术。

**关键词:** 海上油田; 柔性钻杆; 超短半径

南海 WZ-N 油田区域构造位置在涠西南凹陷南部, 主要目的层为流砂港组二段和三段, 岩性主要为泥质粉砂岩, 开发方式划分为注水开发区块和衰竭开发区块。而流砂港组水体能量有限, 储层物性差, 生产井产能低。为加单井产能, 使用适合海上作业的专有柔性钻具, 通过窗口即可将曲率半径控制在 3m 左右并沿水平方向钻进孔径为  $\varnothing 146\text{mm}$  的井眼。在南海涠洲区块的应用效果表明, 该技术能够有效增加油层最大接触位移和泄流面积, 达到提质和降本增效的目的。

## 1 柔性钻杆结构及造斜原理

### 1.1 $\varnothing 114.5\text{mm}$ 柔性钻杆结构

目前海上使用的柔性钻具是由若干采用万向轴结构的柔性短节组成, 可以实现三维转动, 并承受抗拉、抗压、抗扭能力。内部为高强度密封件, 可承受泵压和密封排量。另外为满足海上高强度条件下完成最短半径造斜, 设计的  $\varnothing 114.3\text{mm}$  柔性钻杆内部主要由保护壳、传动销、球窝、侧盖、花键球头及相关密封组成。

高造斜率钻杆的弯曲通过球窝实现。球窝有容纳花键球头的球状腔体, 花键球头设置有 4 个 U 型槽, 可作为传递扭矩的传动销的轨道, 并且传动销位于同一轴向平面。腰型槽沿花键球头延展方向弧形延展, 腰型槽的底面与轨道同向弧形延展, 防止传动销轴向位移, 保护盖焊接在保护壳上, 以防传动销从销钉孔内脱落。花键球头的球面与球窝形成密封面配合, 扭矩通过中组段组成花键传动副进行传递。其次, 钻杆两端使用 API 标准螺纹扣相连, 因此可以相互连成一条高造斜率的钻杆, 最长可达到 10m。

### 1.2 单节柔性钻杆设计原理

单根柔性钻杆相互连接, 在不弯曲的情况下, 能通过一定曲率半径的井眼。假设曲率半径  $R$ , 井眼内径  $d_1$ , 柔性钻杆单节长度  $L$ , 柔性钻杆和井眼的间隙  $d_2$ 。通过几何圆法, 可求出最大曲率半径:

$$R = \frac{L}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

式中:  $L$  为单个柔性接头的长度;  $\alpha$  为柔性钻杆的挠曲角度。

由前面公示可得知, 当曲率半径一定时, 柔性钻杆

单节长度和挠曲角度成正比关系。通过理论计算可得出, 当造斜率为  $16^\circ/\text{m}$ , 柔性钻杆最大弯曲角度为  $4.5^\circ$  时, 单个柔性钻杆的设计长度应为 19.6cm。

## 2 柔性钻杆管柱力学分析

柔性钻杆载荷数值模拟:

针对海上常用的  $\varnothing 177.8\text{mm}$  套管, 内径  $\varnothing 157.1\text{mm}$ , 使用 WellPlan 软件对井下钻具进行受力分析。模拟条件如下: 曲率半径 3m, 窗口井眼直径  $\varnothing 146\text{mm}$ , 弯曲角度  $4.5^\circ$ , 柔性钻杆外径  $\varnothing 114.3\text{mm}$ , 单节长度 196mm。可得出, 在超短半径水平井作业过程中, 造斜段主要承受扭矩。在水平段钻进时, 扭矩和轴向力起主要作用, 横向力最小, 钻杆此时的载荷最大。通过软件将水平段钻进受力分布加载到单节柔性钻杆上, 得出柔性钻杆局部受力分析。当柔性钻杆承受  $2.2\text{kN}\cdot\text{m}$  扭矩时, 球头最大等效应力为  $429.80\text{MPa}$ , 球窝最大等效应力为  $655\text{MPa}$ , 安全系数分别为 1.59, 满足安全要求。

## 3 现场技术应用

### 3.1 定向井轨迹设计优化

以涠洲 N-30 井为例, 老井采用三开次井身结构, 为增加开采效率, 老井设计为定向井, 完钻后采用超短半径水平井技术增加单井产量。该井在  $\varnothing 177.8\text{mm}$  套管内开窗, 设计 S1、S2 两个分支井, 单个分支井长度为 60m, 岩性主要为细砂岩、灰色泥岩。分支井轨迹设计如表 1。

表 1 S1/S2 侧钻超短半径水平井轨迹设计数据

| 设计位置 |    | 测深 /<br>(m) | 井斜角<br>/ ( $^\circ$ ) | 方位角<br>/ ( $^\circ$ ) | 垂深 /<br>(m) | 狗腿度<br>( $^\circ/\text{m}$ ) |
|------|----|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------|------------------------------|
| 造斜点  | S1 | 3185.45     | 44.43                 | 106.61                | 1929.84     |                              |
|      | S2 | 3204.85     | 44.18                 | 107.29                | 1943.72     |                              |
| 造斜终点 | S1 | 3188.17     | 88.00                 | 106.61                | 1930.91     | 16                           |
|      | S2 | 3207.59     | 88.00                 | 107.29                | 1944.80     | 16                           |
| 完钻深度 | S1 | 3204.85     | 88.00                 | 107.29                | 1943.72     |                              |
|      | S2 | 3267.59     | 88.00                 | 106.61                | 1946.90     |                              |

### 3.2 分支井作业程序

#### 3.2.1 初始定向

在定向过程中, 当井斜大于  $5^\circ$  时, 虽然套管内测斜数据由于磁干扰影响不准确, 但是可以利用 MWD 重

力工具面进行初始定向。钻具组合如下:  $\varnothing 146\text{mm}$  液压坐挂器总成(坐挂器+斜向器)+斜向器丢手+变扣短节+旁通阀+MWD+浮阀(测斜座)+钻杆。到达设计开窗深度后,上下活动钻具,释放扭矩,开泵至 MWD 信号的最低排量循环出工具面,将工具面调整至设计工具面  $\pm 3^\circ$  以内,再上下活动钻具至少 2 次,停泵,再次开泵确认工具面无误后,憋压坐挂斜向器,脱手。

### 3.2.2 开窗及修窗

钻具组合:  $\varnothing 152\text{mm}$  开窗铣锥+ $\varnothing 114.3\text{mm}$  柔性钻杆+变扣短节+浮阀接头+高抗扭加重钻杆+震击器+钻杆。开窗铣锥到达斜向器顶部时,用醒目颜色油漆每 0.20m 间隔标记钻具深度位置。开窗的过程中先用低钻压、小转速,在确认铣锥出窗后,可逐渐加大钻压。修窗时使用高转速修窗,直至上提下放无阻挂为止。参数:钻压 10~20kN,排量 20L/s,转速 40~90r/min;开窗及后续过程使用优质的 PRD 自动破胶钻完井液以保护储层。

### 3.2.3 造斜钻进。

钻具组合:  $\varnothing 146\text{mm}$  造斜钻头+ $\varnothing 114.5\text{mm}$  柔性钻杆(4.5m)+变扣短节+浮阀接头+高抗扭加重钻杆+震击器+钻杆。超短半径水平井造斜率除柔性钻杆本身外,还由初始定向的斜向器斜面角度共同决定,本次使用的斜向器斜面为  $26^\circ / \text{m}$ ,斜面长 0.6m,可知钻具出窗口时已增斜  $13^\circ$  左右。利用 Compass 软件按  $16^\circ / \text{m}$  造斜率计算可知, S1/S2 分支井眼出窗口后需钻进 1.94m 左右即可增斜至设计  $88^\circ$  井斜。钻参:钻压: 15~30 kN,排量: 18L/s,转速: 40r/min。

### 3.2.4 稳斜钻进

钻具组合:  $\varnothing 146\text{mm}$  水平钻进钻头+ $\varnothing 114.5\text{mm}$  柔性钻具(80m)+变扣短节+浮阀接头+高抗扭加重钻杆+震击器+钻杆。钻参:钻压: 10~30 kN,排量: 18L/s,转速: 40r/min。稳斜钻进由于没有随钻测井及地质导向,主要根据录井返砂及气测值并结合钻时及扭矩大小判断是否在油层中钻进,如果钻遇泥岩段超过 5m,考虑到井下风险,应提前完钻。

表 2 S1/S2 实钻轨迹数据

| 井眼 | 完钻深度 / (m) | 测深 / (m) | 井斜 / ( $^\circ$ ) | 方位 / ( $^\circ$ ) | 狗腿度 / ( $^\circ / \text{m}$ ) |
|----|------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| S1 | 3251.34    | 3188.00  | 89.72             | 103.40            | 33.37                         |
|    |            | 3200.00  | 89.50             | 104.61            | 0.19                          |
|    |            | 3220.00  | 88.71             | 106.38            | 0.18                          |
|    |            | 3240.00  | 88.20             | 107.39            | 0.11                          |
|    |            | 3248.17  | 87.89             | 108.23            | 0.21                          |
| S2 | 3272.66    | 3208.00  | 89.72             | 108.22            | 27.11                         |
|    |            | 3220.00  | 89.30             | 108.44            | 0.07                          |
|    |            | 3240.00  | 89.21             | 108.29            | 0.02                          |
|    |            | 3260.00  | 88.87             | 109.21            | 0.09                          |
|    |            | 3267.00  | 88.53             | 109.73            | 0.17                          |

完钻后,下入  $\varnothing 127\text{mm}$  柔性筛管,之后回收斜向器,

转入 S2 分支井作业。下筛管前,可下入测斜仪,验证分支井眼轨迹。钻具组合为:  $\varnothing 146\text{mm}$  水平钻进钻头+测斜仪+ $\varnothing 114.5\text{mm}$  柔性钻具(80m)+变扣短节+高抗扭加重钻杆+震击器+钻杆。补测 S1/S2 分支井实钻轨迹数据如表 2。

### 3.3 实施效果

实钻轨迹和设计基本吻合,井斜变化都在  $1.5^\circ$  以内,满足工程要求。最终 S1、S2 分支井水平段共钻进 134.28m,油层钻遇率高达 98.73%。前期涠洲 N-29 井同样井身结构,采用射孔完井,投产  $25\text{m}^3/\text{d}$ ,而 N-30 井后期投产为  $76\text{m}^3/\text{d}$ ,为邻井的 3.04 倍,不仅有效地提高了单井产量,还极大地降低了海上单井开发成本。

### 4 结论与建议

①超短半径水平井已在南海作业 3 口,成功作业 9 个分支井眼。目前已逐渐形成一套适用于海上在  $\varnothing 177.8\text{mm}$  套管内开窗,窗口井眼直径  $\varnothing 146\text{mm}$ ,造斜率  $16^\circ / \text{m}$ ,曲率半径为 3m 的钻井技术。该技术是以柔性钻具为核心,配合大斜度斜向器、特制钻头共同实现;

②在轨迹设计上,超短半径水平井由于曲率半径短,局部狗腿度大,为降低井下风险,大多采用二维井身结构,以增斜为主要目标,造斜率由柔性钻具本身和斜向器斜面角度共同决定;

③目前海上油气勘探、开发,由于地理条件的限制,难度不断加大,导致井眼轨迹更加复杂,所以在后续作业过程中,要想获得更高的造斜率,柔性钻杆在材质及强度上还需进一步提升,以适应未来海上高强度作业。

### 参考文献:

- [1] 朱峰,刘东方.径向水平井转向器技术的新发展[J].石油机械,2005,33(2):48-49.
- [2] 屠由义,陈传搏,易松林.超短半径水平井钻井系统的现状与发展[R]//石油工业机械科技情报协作组.石油机械技术水平调研报告集:1990.北京:机械工业出版社,1992:47-55.
- [3] 赵俊平,王晓华,郭庆海,等.短半径水平井铰接式钻柱串整体力学分析[J].东北石油大学学报,1998,22(3):26-27.
- [4] 苏义脑,赵俊平.短半径水平井铰链式井下动力钻具组合力学模型的建立与分析[J].石油钻采工艺,1995,17(4):25~33,39.
- [5] 李欢欢.超短半径水平井的优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(4):27-30.
- [6] 赵峰.超短半径侧钻分支水平井曙 1-23-0370CH 井设计与施工[J].石油钻采工艺,2009,31(6):37-39.
- [7] 宫华,郑瑞强,范存,等.大庆油田超短半径水平井钻井技术[J].石油钻探技术,2011,39(5):19-22.
- [8] 倪益民,袁永嵩,赵金海,等.胜利油田两口超短半径侧钻水平井的设计与施工[J].石油钻探技术,2007,35(6):57-59.