

# 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD - 4 孔 定向钻进技术应用

樊腊生<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 吴金生<sup>1</sup>, 赵远刚<sup>1</sup>, 庄生明<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局, 北京 100037)

**摘要:**介绍了汶川地震断裂带科学钻探项目四号孔定向钻进的施工情况,包括定向钻孔的设计、造斜工具的选择、定向方法、钻孔轨迹控制以及无线随钻定向钻进施工、利用钻具组合进行定向钻进施工、侧钻绕障和定向钻进效果。

**关键词:**科学钻探;汶川地震断裂带;定向钻进;单弯螺杆马达

中图分类号:P634.7 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2014)09-0101-08

**Application of Directional Drilling Technology In WFSD - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/FAN La-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, WU Jin-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Yuan-gang<sup>1</sup>, ZHUANG Sheng-ming<sup>1</sup>** (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** This article introduces directional drilling technology used in the borehole WFSD - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling, including directional hole design, whip stocking tool selection, tool orientation method, hole path control operation, and the use of wireless MWD and bottom hole assembly for directional drilling and sidetracking to bypass obstacles. The effect of directional drilling in WFSD - 4 is analyzed.

**Key words:** scientific drilling; Wenchuan earthquake fault; directional drilling; single-bending screw rod

定向钻进是指采用一定的技术手段,使钻孔沿预先设计的钻孔轴线(钻孔轨迹)钻达预定目标的钻进过程,主要涉及到定向钻孔的设计、造斜工具、定向方法、钻孔轨迹控制等技术。

## 1 概况

汶川地震断裂带科学钻探四号孔(WFSD-4)位于映秀-北川断裂带北段具有强烈走滑作用的平武县南坝镇地区(不同于南段运动性质),根据多方面地质资料和人工地震反射剖面解译结果,从科学目标、场地、钻探设备能力、施工时间、施工成本等方面综合分析,采用定向钻孔设计(图1):自地表0~550 m深为垂直孔;550 m深开始钻孔向N133°E方向倾斜、顶角以每100 m孔深逐渐增大3.89°左右(3.89°/100 m),至孔深1450 m顶角达35°(倾向N133°E);然后保持钻孔倾向N133°E、顶角35°方向不变稳斜钻进至孔深3350 m。2000 m孔深以上不取心(1450~1550 m取心钻进,确定F3断层、

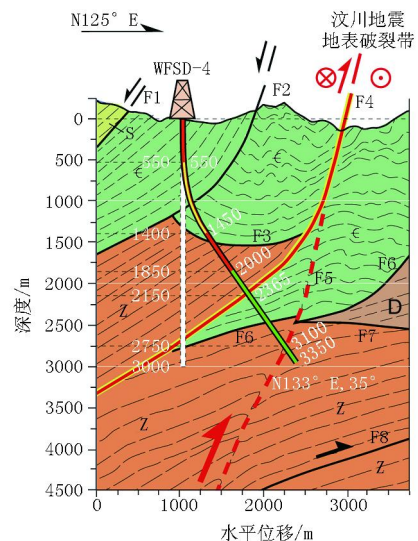


图1 汶川科钻 WFSD - 4 孔地质设计方案

标定地球物理剖面深度),2000 m孔深以下至3350 m孔深段全取心。终孔直径150.0 mm(预留 $\varnothing$ 122.0 mm口径)。

收稿日期:2014-06-30

**基金项目:**科技部科技支撑计划专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)”项目之“科学钻探与科学测井”课题;中国地质调查局地调项目“定向钻进技术在西部地区大直径深孔钻探中的应用”(12120113097600)、“地震断裂带复杂地层钻探施工技术应用示范”(12120114075701)

**作者简介:**樊腊生(1964-),男(汉族),江苏金坛人,中国地质科学院探矿工艺研究所探矿技术研究室副主任、汶川地震科学钻探工程中心钻井工程部副主任、教授级高级工程师,探矿工程专业,从事科学钻探工作,四川省成都市郫县成都现代工业港(北区)港华路139号, fanlasheng@cgiect.com。

## 2 钻孔轨迹设计

WFSD-4孔设计的钻孔结构及套管程序为:  $\varnothing 444.5\text{ mm} \times 20\text{ m}$  (导管  $\varnothing 339.7\text{ mm}$ ) +  $\varnothing 316.5\text{ mm} \times 550\text{ m}$  (表层套管  $\varnothing 273.0\text{ mm}$ ) +  $\varnothing 250.8\text{ mm} \times 1450\text{ m}$  (技术套管  $\varnothing 219.1\text{ mm}$ ) +  $\varnothing 200.0\text{ mm} \times 2500\text{ m}$  (技术套管  $\varnothing 168.3\text{ mm}$ ) +  $\varnothing 150.0\text{ mm} \times 3350\text{ m}$  (尾管  $\varnothing 127.0\text{ mm}$ ), 预留  $\varnothing 122.0\text{ mm}$  口径, 相应的上层直连尾管为  $\varnothing 139.7\text{ mm}$ 、完井尾管为  $\varnothing 108.0\text{ mm}$ 。

在二维平面内钻孔轨迹采用直线—曲线—直线型设计。

### 2.1 一开 0~550 m 转盘全面钻进

一开  $\varnothing 316.5\text{ mm}$  全面钻进, 钻孔轨迹按垂直孔设计, 加强钻孔测斜监控, 控制“狗腿”度, 满足后续的定向钻进要求。

### 2.2 二开 550~1450 m 定向钻进

二开  $\varnothing 250.8\text{ mm}$  定向钻进, 钻孔轨迹总体按曲线设计, 为控制“狗腿”度, 采用曲线—直线—曲线—直线的循环轨迹。

地质设计要求从孔深 550 m 定向钻进至 1450 m, 方位角  $133^\circ$ 、造斜强度(造斜率)  $3.89^\circ/100\text{ m}$ , 造斜终了点顶角  $35^\circ$ 。

在定向钻孔中套管管体允许的弯曲半径为:

$$R = \frac{ED}{200Y_p} K_1 K_2$$

式中:  $R$ ——允许的套管弯曲半径, m;  $E$ ——钢材弹性模量,  $206 \times 10^6\text{ kPa}$ ;  $D$ —— $\varnothing 219.1\text{ mm}$  套管的外径, cm;  $Y_p$ ——钢材的屈服极限, N80 钢级的  $Y_p = 552 \times 10^3\text{ kPa}$ ;  $K_1$ ——抗弯安全系数,  $K_1 = 1.8$ ;  $K_2$ ——螺纹连接处的安全系数,  $K_2 = 3$ 。

代入上式,  $\varnothing 219.1\text{ mm}$  套管允许的弯曲半径  $R = 220.77\text{ m}$  (应小于定向钻孔的实际弯曲半径)。

地质设计的定向钻孔(造斜率  $3.89^\circ/100\text{ m}$ )的曲率半径  $R = 5730/3.89 = 1473.01\text{ m}$ , 能满足  $\varnothing 219.1\text{ mm}$  套管的下入。

设计采用  $2.334^\circ/30\text{ m}$  的造斜强度从孔深 550 m 开始定向钻进 60 m—稳斜钻进 60 m—再定向钻进 60 m—然后稳斜钻进 60 m 的工艺循环。经过 7 个造斜—稳斜工艺循环钻孔顶角达到  $32.68^\circ$ 、孔深达到 1390 m; 再造斜钻进 30 m、稳斜钻进 30 m, 钻孔顶角达到  $35.01^\circ$ , 方位角控制在  $133^\circ$  左右。

设计的定向钻孔(造斜率为  $2.334^\circ/30\text{ m}$ )的曲率半径  $R = 5730/7.78 = 736.50\text{ m}$ , 能满足  $\varnothing 219.1\text{ mm}$  套管的下入。

## 2.3 三开、四开钻进

三开、四开  $\varnothing 150.0\text{ mm}$  (或  $\varnothing 122.0\text{ mm}$ ) 取心钻进、 $\varnothing 200.0\text{ mm}$  全面钻进的钻孔轨迹采用直线型设计, 加强钻孔测斜监控, 孔斜超差时采取纠斜技术措施。

## 3 定向钻进的技术方案

根据设计  $\varnothing 250.8\text{ mm}$  口径定向钻进段长约 900 m, 造斜钻进约 450 m、造斜工作量约  $35^\circ$  (顶角), 以及后期可能需要的纠斜钻进、侧钻绕障等, 采取自行组织施工、配套物资的方案。采用无线随钻测斜仪 (MWD) 配合单弯螺杆马达进行定向钻进的技术方案, 在造斜段使用滑动钻进方式, 在稳斜段使用旋转钻进 (复合钻进) 方式, 具有在一次下钻后可以完成增斜、降斜、扭方位、稳斜等各种轨迹控制任务的优点。

### 3.1 造斜工具的选择

根据钻孔直径、钻孔深度及泥浆泵 (QZ3NB-350 型) 的能力选择 5LZ178  $\times$  7.0L-5 单弯螺杆马达 (表 1、图 2)。弯角为  $0.75^\circ$ 、 $1^\circ$ , 既能满足滑动造斜钻进、又能满足旋转复合钻进; 近钻头稳定器采用欠尺寸 ( $\varnothing 247\text{ mm}$ ) 的螺旋稳定器, 有利于修正孔壁; 螺杆马达传动轴的输出端加大到  $\varnothing 187.3\text{ mm}$ , 配 6-5/8REG 螺纹以满足和  $\varnothing 250.8\text{ mm}$  牙轮钻头的连接。

表 1 5LZ178  $\times$  7.0L-5 型螺杆马达主要技术参数

两端连接螺纹	排量/(L·s <sup>-1</sup> )	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	工作压力降/MPa	输出扭矩/(N·m)	工作钻压/kN
410 $\times$ 630	15.8 ~ 31.6	78 ~ 154	4	5200	100



图 2 5LZ178  $\times$  7-5 型单弯螺杆马达

根据岩遇地层主要有板岩、变质砂岩、碳质板岩、凝灰质砂岩等, 选择 537、617 型号的金属密封加强保径的三牙轮钻头 (图 3), 满足螺杆马达的钻进要求。

### 3.2 定向方法的选择

由于定向钻进孔段较长, 滑动造斜钻进、旋转复合钻进交替进行, 选择无线随钻测斜仪 (泥浆压力正脉冲) 进行定向作业, 具有结构较简单、辅助配套的设备少、使用操作方便等优点。

无线随钻测斜仪 (MWD) 由井下系统和地面系统

图3  $\varnothing 250.8$  mm LST617G 型牙轮钻头

以及相应的地面测试设备和工具等组成。井下系统检测井斜、方位、工具面等数据,并将这些数据通过确定的编码方式转换为脉冲发生器内电磁体的动作;当泥浆泵打开时,电磁体的直线运动转换为主阀头的运动,从而产生泥浆脉冲压力变化,将泥浆压力信号发送到地面。地面系统采集由脉冲器产生的泥浆压力信号,并通过这些信号解算出探管所测得的数据;数据解算后传至笔记本电脑呈现给定向工程师,并传输至井台上的司钻显示器中供司钻参考。

MWD 井下仪器主要由打捞头、电池、定向探管、扶正器、脉冲发生器(图4)、以及循环短节(定向短节)、循环套总成等组成。



图4 MWD 井下仪器

MWD 地面主要由数据采集处理器(图5)、司钻显示器、泵压传感器、司显圆盘电缆、泵压圆盘电缆、专用数据处理仪(笔记本电脑)等组成。

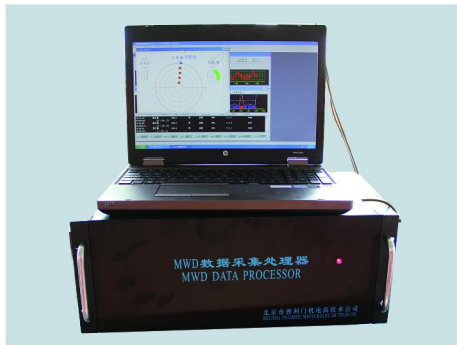


图5 MWD 地面数据采集处理器及专用数据处理仪

MWD 主要技术参数:井斜测量精度  $\pm 0.1^\circ$ ;方位角测量精度  $\pm 1^\circ$ (井斜  $> 5^\circ$ );工具面(磁性、重

力)测量精度  $\pm 1.5^\circ$ ;工具面更新时间 18 ~ 27 s;工作温度 0 ~ 125  $^\circ\text{C}$ ;井下仪器长度 7.20 m;抗压管外径 47.6 mm;抗压管承压  $\leq 120$  MPa;电池连续工作时间 260 h。

配套 N1310B 材质的  $\varnothing 177.8$  mm  $\times$   $\varnothing 71.4$   $\times$  9300 mm (NC50) 无磁钻铤及  $\varnothing 165.0$  mm 定向短节 (NC50)。

### 3.3 无线随钻定向钻进施工程序

采用无线随钻测斜仪 (MWD) 配合单弯螺杆马达进行定向钻进,无须配套其他专用设备,仅在立管上安装检测压力信号的传感器,但要求泥浆含砂量  $< 0.5\%$ 、控制随钻堵漏材料的使用。施工程序如下:

- (1) 在立管上安装压力传感器;
- (2) 架设传感器的电缆(钻台司钻显示器、压力传感器);
- (3) 组装井下仪器(通过 3 个扶正器将打捞头、电池、定向探管、脉冲发生器连接起来)后,进行地面测试;
- (4) 根据泥浆排量,选择合适规格的循环套总成,安装在循环短节(定向短节)内;
- (5) 平躺井下仪器,定位键槽竖直朝上,读取仪器角差;
- (6) 依次下入钻头(可先不下、待系统测试完再下入)、单弯螺杆马达、稳定器(根据设计)、定向短节(最好在螺杆马达与定向短节之间安装单向阀)、无磁钻铤,上提钻具、量取钻具装合角差(定向短节的定位螺栓与螺杆马达的刻线之间顺时针角差)、下放钻具;
- (7) 井下仪器下入无磁钻铤内,坐键 3 次,确认坐键成功后脱开释放矛;
- (8) 依次下入转换接头、钻杆单根、钻杆滤清器,连接方钻杆;
- (9) 慢慢开泵、进行整个 MWD 系统测试,信号正常后停泵、取出钻杆滤清器、钻杆单根、转换接头;
- (10) 依次下入钻铤、钻杆,每下 15 ~ 20 柱回灌泥浆一次(需安上钻杆滤清器);
- (11) 下钻到位后,装入钻杆滤清器,连接方钻杆,开泵,距孔底 1 m 左右进行定向作业;
- (12) 进行滑动造斜钻进和旋转复合钻进工艺循环(根据地层情况、螺杆马达的弯角及造斜强度要求等情况,一根钻杆单根可半根滑动钻进、半根旋转复合钻进),控制钻孔的轨迹,必要时停泵测斜或调整工具面向角;



(13)方余(机上余尺)钻进完,正常加接单根(注意钻杆滤清器的取出与加入);

(14)根据钻头、螺杆马达或电池的寿命以及工艺要求、钻进情况等,确定提钻;

(15)正常提钻至无磁钻铤时,取出井下仪器,清洗、拆卸、检查、保养;

(16)完成一个回次的定向钻进(导向钻进)作业,重复(3)至(15)进行下一个回次的定向钻进作业。

#### 4 上部孔段钻孔轨迹监控

一开采用 $\Phi 316.5$  mm牙轮钻头自孔深23.20 m全面钻进至502.00 m,钻具组合中安装3个欠尺寸稳定器(原计划采用 $\Phi 311.1$  mm钻头,为便于 $\Phi 273.0$  mm套管的下入,临时增大钻头的直径)。钻具组合为: $\Phi 316.5$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 203.2$  mm钻铤 $\times 1$ 根+ $\Phi 305$  mm稳定器+ $\Phi 203.2$  mm钻铤 $\times 1$ 根+ $\Phi 305$  mm稳定器+ $\Phi 203.2$  mm钻铤 $\times 2$ 根+ $\Phi 305$  mm稳定器+ $\Phi 177.8$  mm钻铤 $\times 6$ 根+ $\Phi 127$  mm钻杆。

钻进施工中在孔深229.05、402.53 m处进行了测斜,监控钻孔的轨迹(钻孔顶角逐步增加到 $13.5^\circ$ 、方位角由 $180^\circ$ 逐步降到 $126^\circ$ )。钻测井、固井口袋至513.02 m后综合测井,修孔后下 $\Phi 273.0$  mm $\times 8.89$  mm套管至501.73 m并固井,孔底顶角 $17^\circ$ 、方位角 $116^\circ$ 。理论计算(图6)和实际施工表明该钻具组合的增斜能力较强。

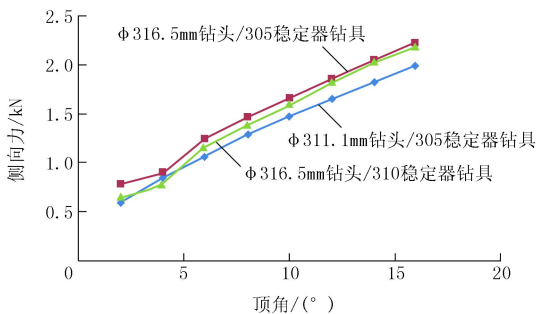


图6 不同钻头及稳定器尺寸下的钻头侧向力随顶角的变化情况

表2 712.78~1435.00 m孔段 $\Phi 250.8$  mm口径定向钻进的钻具组合

钻具组合	牙轮钻头	单弯螺杆马达	稳定器	定向短节	无磁钻铤	稳定器	钻铤	稳定器	钻铤	钻杆
导向 I	√	$0.75^\circ$	-	√	√(MWD)	-	4根	√	6根	√
稳斜 II	√	$0.75^\circ$ 或 $1^\circ$	√	-	-	-	2根	√	8根	√
导向 III	√	$0.75^\circ$ 或 $1^\circ$	√	√	√(MWD)	-	2根	√	8根	√
导向 IV	√	$1^\circ$	-	√	√(MWD)	√	2根	√	8根	√

(3)采用 $0.75^\circ$ 单弯螺杆马达的导向钻具组合 III 滑动增斜钻进至896.49 m,由于进尺缓慢而旋转

在一开全面钻进中,所钻地层为板岩、变质砂岩等,换层频繁,自然造斜能力强,再加上钻具组合中稳定器的尺寸偏小,钻孔的顶角达到 $17^\circ$ 、方位角 $116^\circ$ ,但钻孔的姿态基本满足地学要求,为此,推迟二开的定向钻进而进行 $\Phi 250.8$  mm全面钻进至712.78 m,钻具组合中安装3个稳定器,钻进施工中在孔深559.57 m(550 m处顶角 $18.7^\circ$ 、方位角 $118.9^\circ$ )、637.42 m(635 m处顶角 $19.4^\circ$ 、方位角 $135.1^\circ$ )、712.78 m(705 m处顶角 $15.3^\circ$ 、方位角 $133.2^\circ$ )处进行了测斜、监控钻孔的轨迹(钻孔顶角逐步增加到 $20^\circ$ 左右然后逐步下降至 $15.3^\circ$ 、方位角逐步增加到 $135^\circ$ 左右)。全面钻进钻具组合为: $\Phi 250.8$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 177.8$  mm钻铤 $\times 1$ 根+ $\Phi 245$  mm稳定器+ $\Phi 177.8$  mm钻铤 $\times 1$ 根+ $\Phi 245$  mm稳定器+ $\Phi 177.8$  mm钻铤 $\times 2$ 根+ $\Phi 245$  mm稳定器+ $\Phi 177.8$  mm钻铤 $\times 6$ 根+ $\Phi 127$  mm钻杆。

#### 5 $\Phi 250.8$ mm口径定向钻进

$\Phi 250.8$  mm口径712.78~1435.00 m定向钻进段主要使用无线随钻定向钻进(导向钻进),1555.67~1970.30 m定向钻进段主要使用单弯螺杆马达的不同钻具组合下的力学特性进行定向钻进(在不改变方位的情况下稳斜、降斜、增斜)。

##### 5.1 无线随钻定向钻进施工情况

从孔深712.78~1435.00 m进行无线随钻 $\Phi 250.8$  mm口径定向钻进施工,该孔段使用了4种钻具组合(表2),稳定器、钻铤、钻杆等为二开全面钻进用的钻具。

(1)首先采用 $0.75^\circ$ 单弯螺杆马达的导向钻具组合 I,进行定向增斜至730.36 m(顶角逐步增加至 $16.8^\circ$ 、方位角保持稳定在 $131^\circ$ —随钻仪读数、下同),然后旋转复合钻进至770.72 m(顶角继续增加至 $21.4^\circ$ 、方位角基本稳定)。

(2)采用 $0.75^\circ$ 和 $1^\circ$ 单弯螺杆马达的稳斜钻具组合 II 旋转复合钻进2个回次,分别至819.82、893.87 m,顶角微增、方位角基本稳定。

复合钻进至903.61 m,再次滑动增斜钻进至906.79 m,由于不进尺而旋转复合钻进至961.03 m。顶角

微增、方位角基本稳定,滑动钻进较为困难。

(4)采用 1°单弯螺杆马达的稳斜钻具组合 II 旋转复合钻进至 1041.86 m,顶角微降(降低 1°)、方位角基本稳定。

(5)采用 1°单弯螺杆马达的导向钻具组合 III 拟进行增斜钻进,由于滑动钻进困难,主要进行旋转复合钻进至 1085.01 m,顶角、方位角基本不变。

(6)采用 1°单弯螺杆马达的导向钻具组合 IV 旋转复合钻进至 1085.50 m,定向滑动钻进至 1091.34 m(顶角增加 0.6°),再旋转复合钻进至 1105.88 m,定向滑动钻进至 1106.63 m,不进尺后旋转复合钻进至 1113.62 m,再定向滑动钻进至 1114.96 m,不进尺后旋转复合钻进至 1158.50 m(顶角增加 5°到 31.0°、方位角稳定)。

(7)采用 1°、0.75°、0.75°单弯螺杆马达的稳斜钻具组合 II 旋转复合钻进 3 个回次,分别至 1196.23、1273.53、1300.84 m,顶角微降、方位角基本稳定。

(8)采用 0.75°单弯螺杆马达的导向钻具组合 III 导向钻进 2 个回次(用随钻测斜仪监控钻孔的姿

态),分别至 1367.51、1435.00 m,钻进中主要采用旋转复合钻进,顶角下降 3°、方位角基本稳定。

### 5.2 利用钻具组合进行定向钻进施工情况

定向钻进结束后钻 Ø200.0 mm 测井、固井口袋至 1444.55 m,进行第三次综合测井。

根据综合测井及钻探施工情况,井径没有明显扩径,钻孔的状况较好,综合各方面的情况,采取裸眼下入 Ø219.1 mm × 7.72 mm 活动套管至孔深 1439.22 m。从孔深 1444.55 m 以 Ø150 mm 口径半合管取心钻进至 1555.00 m。起拔 Ø219.1 mm 活动套管后以 Ø250.8 mm 口径扩孔钻进至 1555.00 m 并全面钻进至 1555.67 m。

根据无线随钻定向钻进施工的经验,从孔深 1555.67 ~ 1970.30 m 利用钻具组合(不同的力学特性)进行定向钻进施工,该孔段除使用了上述的稳斜钻具组合 II 外,还使用了另外 4 种钻具组合(表 3),稳定器、钻铤、钻杆等为二开全面钻进用的钻具,在无单弯螺杆马达现货的情况下使用了转盘钻具、直螺杆钻具(5LZ178 × 7.0L - 5)。

表 3 1555.67 ~ 1970.30 m 孔段 Ø250.8 mm 口径定向钻进的钻具组合

钻具组合	牙轮钻头	稳定器	螺杆马达	钻铤	稳定器	钻铤	稳定器	钻铤	钻杆
稳斜 II	√	-	单弯 0.75°或 1°	-	√	2 根	√	8 根	√
转盘钻具	√	√	-	1 根	√	1 根	√	8 根	√
增斜 V	√	-	单弯 0.75°	2 根	√	-	-	8 根	√
直螺杆稳斜 VI	√	-	直螺杆	-	√	-	-	10 根	√
直螺杆稳斜 VII	√	√	直螺杆	2 根	√	-	-	8 根	√

(1)根据测斜情况,该段首先采用 0.75°单弯螺杆马达的增斜钻具组合 V 旋转复合增斜钻进 2 个回次,分别至 1593.24、1642.47 m,顶角增加 7.8°、方位角基本稳定。

(2)钻孔姿态满足设计要求,进行稳斜钻进。采用 0.75°单弯螺杆马达的稳斜钻具组合 II 旋转复合钻进 3 个回次、转盘钻具回转钻进 1 个回次、直螺杆稳斜钻具组合 VI 复合钻进 1 个回次,至孔深 1813.27 m,顶角下降 8°、方位角基本稳定。

(3)采用 0.75°单弯螺杆马达的增斜钻具组合 V 旋转复合增斜钻进 2 个回次,分别至 1892.66、1912.09 m,顶角增加 4.7°、方位角基本稳定。

(4)采用直螺杆稳斜钻具组合 VII 复合钻进 2 个回次,分别至 1953.81、1970.30 m,顶角微增后下降、方位角稳定。

钻测井、固井口袋至 1980.00 m 后第四次综合测井,下 Ø219.1 mm × 7.72 mm 套管至 1972.30 m 并固井,顺利完成 WFSD - 4 孔定向钻进段的施工。

### 5.3 定向钻进施工效果分析

孔深 712.78 ~ 1435.00 m 和 1555.67 ~ 1970.30 m 的定向钻进施工中用随钻测斜仪或提钻后用测斜仪测斜,来监控钻孔的轨迹,为分析定向钻进施工效果采用综合测井的连续测斜数据(图 7、表 4)。

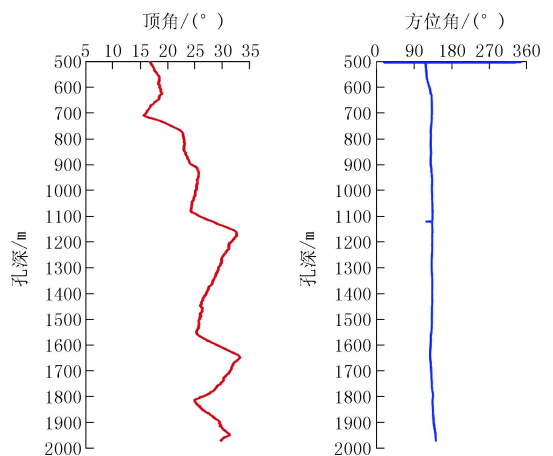


图 7 定向钻进段的顶角、方位角

表4 712.78~1435.00 m和1555.67~1970.30 m孔段 $\varnothing 250.8$  mm口径定向钻进施工效果

序号	目的	钻具组合	钻进深度/m	实际施工情况	机械钻速 /( $m \cdot h^{-1}$ )	起始点/( $^{\circ}$ )		终了点/( $^{\circ}$ )		顶角变化/[ $(^{\circ}) \cdot (10 m)^{-1}$ ]
						顶角	方位角	顶角	方位角	
1	增斜	0.75°钻具 I	712.78 ~ 730.36	滑动钻进 - 增斜	1.73	15.94	131.9	18.71	131.8	1.58
			730.36 ~ 770.72	旋转钻进 - 增斜	1.43	18.71	131.8	22.53	130.2	0.95
2	稳斜	0.75°钻具 II	770.72 ~ 819.82	旋转钻进 - 微增	1.35	22.53	130.2	23.12	130.0	0.12
3	稳斜	1°钻具 II	819.82 ~ 893.87	旋转钻进 - 微增	1.87	23.12	130.0	24.05	129.7	0.12
			893.87 ~ 896.49	滑动钻进 - 增斜	0.81	24.05	129.7	24.16	129.7	0.41
4	增斜	0.75°钻具 III	896.49 ~ 903.61	旋转钻进 - 增斜	1.38	24.16	129.7	24.77	130.3	0.87
			903.61 ~ 906.79	滑动钻进 - 增斜	1.27	24.77	130.3	25.11	130.7	1.05
			906.79 ~ 961.03	旋转钻进 - 微增	1.21	25.11	130.7	25.47	133.1	0.07
5	稳斜	1°钻具 II	961.03 ~ 1041.86	旋转钻进 - 微降	1.68	25.47	133.1	24.49	133.4	-0.12
			1041.86 ~ 1042.72	旋转钻进	0.86	24.49	133.4	24.50	133.5	0.08
			1042.72 ~ 1042.97	滑动钻进	0.25	24.50	133.5	24.48	133.4	-0.56
6	增斜	1°钻具 III	1042.97 ~ 1056.59	旋转钻进 - 微降	1.36	24.48	133.4	24.38	133.8	-0.08
			1056.59 ~ 1056.95	滑动钻进	0.54	24.38	133.8	24.39	133.8	0.33
			1056.95 ~ 1085.01	旋转钻进 - 微增	1.43	24.39	133.8	24.55	134.4	0.06
7	增斜	1°钻具 IV	1085.01 ~ 1085.50	旋转钻进	0.37	24.55	134.4	24.58	134.6	0.45
			1085.50 ~ 1091.34	滑动钻进 - 增斜	1.35	24.58	134.6	25.24	133.9	1.14
			1091.34 ~ 1105.88	旋转钻进 - 增斜	1.78	25.24	133.9	26.50	134.2	0.87
			1105.88 ~ 1106.63	滑动钻进 - 增斜	0.50	26.50	134.2	26.58	134.1	1.08
			1106.63 ~ 1113.62	旋转钻进 - 增斜	1.55	26.58	134.1	27.38	133.7	1.14
			1113.62 ~ 1114.96	滑动钻进 - 增斜	0.89	27.38	133.7	27.55	133.8	1.30
			1114.96 ~ 1158.50	旋转钻进 - 增斜	1.27	27.55	133.8	32.41	134.0	1.12
8	稳斜	1°钻具 II	1158.50 ~ 1196.23	旋转钻进 - 微降	0.94	32.41	134.0	31.91	133.2	-0.13
9	稳斜	0.75°钻具 II	1196.23 ~ 1273.53	旋转钻进 - 微降	1.05	31.91	133.2	29.97	132.0	-0.25
10	稳斜	0.75°钻具 II	1273.53 ~ 1300.84	旋转钻进 - 微降	0.82	29.97	132.0	29.30	131.9	-0.24
			1300.84 ~ 1308.98	旋转钻进 - 微降	0.66	29.30	131.9	29.29	132.1	-0.02
			1308.98 ~ 1309.77	滑动钻进	0.47	29.29	132.1	29.28	132.1	-0.08
			1309.77 ~ 1311.57	旋转钻进	0.98	29.28	132.1	29.19	132.1	-0.51
			1311.57 ~ 1311.77	滑动钻进	0.40	29.19	132.1	29.18	132.2	-0.30
			1311.77 ~ 1330.18	旋转钻进 - 微降	1.42	29.18	132.2	28.85	133.0	-0.18
			1330.18 ~ 1330.56	滑动钻进	0.57	28.85	133.0	28.84	133.0	-0.34
			1330.56 ~ 1341.98	旋转钻进 - 微降	1.05	28.84	133.0	28.53	133.4	-0.27
			1341.98 ~ 1342.09	滑动钻进	0.22	28.53	133.4	28.58	133.2	4.82
			1342.09 ~ 1352.35	旋转钻进 - 微降	0.83	28.58	133.2	28.31	133.4	-0.26
11	导向	0.75°钻具 III	1352.35 ~ 1352.84	滑动钻进	0.49	28.31	133.4	28.24	133.5	-1.49
			1352.84 ~ 1360.88	旋转钻进 - 微降	0.96	28.24	133.5	28.18	133.4	-0.08
			1360.88 ~ 1361.33	滑动钻进	0.54	28.18	133.4	28.11	133.4	-1.56
			1361.33 ~ 1367.51	旋转钻进 - 微降	0.79	28.11	133.4	27.95	133.6	-0.26
			1367.51 ~ 1379.45	旋转钻进 - 微降	0.78	27.95	133.6	27.52	133.4	-0.36
			1379.45 ~ 1380.03	滑动钻进	0.35	27.52	133.4	27.55	133.3	0.43
			1380.03 ~ 1390.55	旋转钻进 - 微降	0.75	27.55	133.3	27.27	133.4	-0.27
			1390.55 ~ 1391.13	滑动钻进	0.50	27.27	133.4	27.28	133.4	0.10
			1391.13 ~ 1395.39	旋转钻进 - 微降	0.75	27.28	133.4	27.20	133.4	-0.17
			1395.39 ~ 1396.01	滑动钻进	0.74	27.20	133.4	27.09	133.5	-1.84
12	导向	0.75°钻具 III	1396.01 ~ 1398.12	旋转钻进 - 微降	0.84	27.09	133.5	27.07	133.2	-0.11
			1398.12 ~ 1399.10	滑动钻进	0.74	27.07	133.2	27.08	133.4	0.19
			1399.10 ~ 1435.00	旋转钻进 - 微降	0.93	27.08	133.4	26.18	133.6	-0.25
			1435.00 ~ 1555.67	旋转钻进 - 微降	0.93	27.08	133.4	26.18	133.6	-0.25
13	增斜	0.75°钻具 V	1555.67 ~ 1593.24	旋转钻进 - 增斜	1.12	25.36	130.7	28.45	129.8	0.82
14	增斜	0.75°钻具 V	1593.24 ~ 1642.47	旋转钻进 - 增斜	0.98	28.45	129.8	33.14	128.1	0.95
15	稳斜	0.75°钻具 II	1642.47 ~ 1672.72	旋转钻进 - 微降	0.89	33.14	128.1	31.99	129.9	-0.38
16	稳斜	转盘钻具	1672.72 ~ 1677.72	转盘钻进	0.39	31.99	129.9	31.97	130.0	-0.04
17	稳斜	0.75°钻具 II	1677.72 ~ 1746.45	旋转钻进 - 微降	0.81	31.97	130.0	29.79	132.3	-0.32
18	稳斜	0.75°钻具 II	1746.45 ~ 1777.62	旋转钻进 - 微降	0.67	29.79	132.3	28.37	134.1	-0.45
19	稳斜	直螺杆 VI	1777.62 ~ 1813.27	旋转钻进 - 降斜	0.87	28.37	134.1	25.01	134.1	-0.94
20	增斜	0.75°钻具 V	1813.27 ~ 1892.66	旋转钻进 - 增斜	0.86	25.01	134.1	29.31	136.7	0.54
21	增斜	0.75°钻具 V	1892.66 ~ 1912.09	旋转钻进 - 微增	0.84	29.31	136.7	29.74	137.7	0.22
22	稳斜	直螺杆 VII	1912.09 ~ 1953.81	旋转钻进 - 微增	0.97	29.74	137.7	30.92	141.5	0.28
23	稳斜	直螺杆 VII	1953.81 ~ 1970.30	旋转钻进 - 降斜	0.51	30.92	141.5	29.80	142.2	-0.68

注:(1) 钻孔孔斜数据是在孔深1980.00 m时第四次综合测井的数据;(2) 滑动钻进和旋转钻进进尺过短时反映的顶角变化过大,应予剔除。

从表 4 可以得出如下结论:

(1) 导向钻具组合 I、IV(外加稳定器远移单弯螺杆马达——“单弯单稳”——单弯螺杆马达自带一个近钻头稳定器)在滑动造斜钻进、旋转复合钻进时均有较强的增斜能力;

(2) 导向钻具组合 III(外加稳定器安装在单弯螺杆马达上端——“单弯双稳”——单弯螺杆马达自带一个近钻头稳定器、并在其上端安装一个稳定器)在滑动造斜钻进时具有增斜能力,但由于存在托压、送钻困难,钻进进尺较短,在旋转复合钻进时微增斜或微降斜,以微降斜为主;

(3) 稳斜钻具组合 II(外加稳定器安装在单弯螺杆马达上端——“单弯双稳”)在旋转复合钻进时微增斜或微降斜,以微降斜为主;

(4) 增斜钻具组合 V(外加稳定器远移单弯螺杆马达——“单弯单稳”)在旋转复合钻进时有较强的增斜能力;

(5) 稳斜钻具组合 VI(单稳定器直螺杆钻具)复合钻进时有较强的降斜能力;

(6) 稳斜钻具组合 VII(双稳定器直螺杆钻具)复合钻进时微增斜或微降斜。

## 6 侧钻绕障技术的应用情况

三开从 1980.00 m 进行取心钻进,由于地层破碎、坍塌掉块、岩屑床及缩径膨胀等,分别在孔深

2191.64 m(WFSD-4 孔段)、2313.70 m(WFSD-4 孔段)、2319.07 m(WFSD-4-S1 孔段)、2271.03 m(WFSD-4-S2 孔段)、2281.90 m(WFSD-4-S3 孔段)、2291.90 m(WFSD-4-S4 孔段)、2262.55 m(WFSD-4-S5 孔段)、2261.81 m(WFSD-4-S6 孔段)、2262.41 m(WFSD-4-S7 孔段)和 2338.77 m(WFSD-4-S8 孔段)处发生较大孔内事故 10 次,8 次侧钻绕障作业(1 次自然侧钻、5 次定向侧钻、2 次套管开窗侧钻),形成 9 个孔段。

### 6.1 自然侧钻

WFSD-4 孔段取心钻进至 2313.70 m 时发生液动锤的下接头脱落在孔内的事故(含  $\varnothing 150$  mm 取心钻具)，“鱼顶”2308.53 m,采取扩孔、套铣的处理方案,从孔深 2191.64 m 以  $\varnothing 200$  mm 牙轮钻头扩孔钻进至 2290.73 m 出新孔(取心验证)。钻具组合： $\varnothing 200$  mm 三牙轮钻头 +  $\varnothing 199$  mm 稳定器 +  $\varnothing 159$  mm 钻铤  $\times 2$  根 +  $\varnothing 199$  mm 稳定器 +  $\varnothing 159$  mm 钻铤  $\times 4$  根 +  $\varnothing 127$  mm 钻杆  $\times 2$  根 +  $\varnothing 89$  mm 钻杆。

### 6.2 无线随钻定向侧钻

采用无线随钻测斜仪(MWD)配合单弯( $0.75^\circ$ 、 $1^\circ$ )5LZ120(或 127)  $\times 7.0L-4$  型螺杆马达(带近钻头欠尺寸稳定器)进行了  $\varnothing 152.4$  mm 口径 5 次定向侧钻绕障,钻具组合见表 5。配套 W1830N 材质的  $\varnothing 120.7$  mm  $\times \varnothing 63$  mm  $\times 9300$  mm(NC38)无磁钻铤及  $\varnothing 120.7$  mm 定向短节(NC38)。

表 5  $\varnothing 152.4$  mm 口径无线随钻定向钻进钻具组合

钻具组合	牙轮钻头	单弯螺杆马达	$\varnothing 120.7$ mm 单向阀	定向短节	无磁钻铤	$\varnothing 127$ mm 钻铤/根	$\varnothing 120.7$ mm 钻铤/根	$\varnothing 89$ mm 加重钻杆/根	$\varnothing 89$ mm 钻杆
VIII	√	$0.75^\circ/127$ 螺杆	-	√	√(MWD)	-	10	-	√
IX	√	$1^\circ/120$ 螺杆	√	√	√(MWD)	-	8	-	√
X	√	$1^\circ/120$ 螺杆	√	√	√(MWD)	6	4	-	√
XI	√	$0.75^\circ/120$ 螺杆	√	√	√(MWD)	-	5	-	√
XII	√	$0.75^\circ/127$ 螺杆	√	√	√(MWD)	4	2	4	√

(1) WFSD-4-S1 孔段从孔深 2290.73 m 取心钻进至 2319.07 m,提钻时发生埋钻事故,反复处理无效后从孔深 2273.27 m 处爆炸松扣,孔内残留“落鱼”45.34 m。综合测井后灌注水泥,从孔深 2000.20 m 处采用无线随钻钻具 VIII(表 5)定向侧钻绕障至 2012.47 m,钻孔顶角增加  $2^\circ$  至  $31.1^\circ$ 、方位角增加  $2^\circ$  至  $144.1^\circ$ 。

(2) WFSD-4-S2 孔段  $\varnothing 152.4$  mm 三牙轮钻头全面钻进至 2271.03 m,提钻加单根时发生卡钻事故,反复处理无效后从孔深 2239.46 m 处爆炸松扣,孔内残留“落鱼”28.63 m。灌注水泥后,从孔深 2178.00 m 处采用无线随钻钻具 IX(表 5)定向侧钻

绕障至 2198.16 m,钻孔顶角增加  $2^\circ$  至  $36.5^\circ$ 、方位角基本稳定在  $149^\circ$ 。

(3) WFSD-4-S3 孔段(孔深 2281.90 m)  $\varnothing 150$  mm PDC 单管钻具划眼至 2281.66 m 时发生卡钻事故,反复处理无效后从孔深 2230.70 m 处爆炸松扣,孔内残留“落鱼”50.98 m。灌注水泥后,从孔深 2157.20 m 采用无线随钻钻具 X(表 5)旋转复合钻进扫水泥塞至 2190.00 m 出新孔(MWD 无信号、取心验证)。从 2190.00 m 出新眼后,采用有线随钻定向钻进对下部钻孔的轨迹进行控制,从 2218.43 m 定向钻进至 2246.19 m(降顶角至  $32.4^\circ$ 、降方位至  $136.2^\circ$ )。

(4) WFSD-4-S6 孔段  $\varnothing 149.2$  mm 牙轮钻头钻进至 2261.81 m 发生卡钻事故,采用钻机提拉、拔管机起拔、柴油浸泡等无效,在孔深 2168.47 m 处爆炸松扣,孔深 2010 m 处切割  $\varnothing 168.3$  mm 套管,起拔出上部  $\varnothing 168.3$  mm 套管 2010 m。灌注水泥后,从孔深 1988.27 m 处采用无线随钻钻具 XI(表 5)定向侧钻绕障至 2057.52 m,钻孔顶角增加  $7^\circ$  至  $36.1^\circ$ 、方位角降低  $5^\circ$  至  $138.2^\circ$ 。

(5) WFSD-4-S7 孔段双心 PDC 钻头( $\varnothing 127 \sim 168$  mm)全面钻进至 2262.41 m 再次发生卡钻事故,从孔深 2194.95 m 处爆炸松扣,孔内残留“落鱼”35.15 m。灌注水泥后,从孔深 2171.50 m 处无线随钻钻具 XII(表 5)定向侧钻绕障至 2195.66 m,钻孔顶角增加  $0.8^\circ$  至  $28.0^\circ$ 、方位角降低  $5^\circ$  至  $138.1^\circ$ 。

### 6.3 套管开窗定向侧钻

(1) WFSD-4-S4 孔段  $\varnothing 150$  mm 半合管钻具取心钻进至 2291.90 m 提钻时遇阻,反复处理无效后从孔深 2259.00 m 处爆炸松扣,孔内残留“落鱼”32.43 m。灌注水泥后,用  $\varnothing 152.4$  mm 牙轮钻头扫水泥塞至 2247.00 m(满足无线随钻定向要求),因 MWD 无信号,在  $\varnothing 168.3$  mm 套管内(套管下深 2260.00 m)改用电子陀螺定向安装斜向器(楔顶角  $3^\circ$ ),使用开窗钻具从孔深 2242.22 m 磨铣套管开窗侧钻钻进至 2247.54 m,再使用修窗钻具修整窗口钻进至 2250.01 m。

(2) WFSD-4-S5 孔段  $\varnothing 150.0$  mm PDC 钻头全面钻进至 2262.55 m,起钻后发现  $\varnothing 120.7$  mm 钻铤公扣断裂,用公锥打捞提拔不动,反转倒扣从安全接头处倒开,孔内残留“落鱼”39.30 m。在  $\varnothing 168.3$  mm 套管内用有线随钻测斜仪重力定向安装斜向器(楔顶角  $3^\circ$ ),使用开窗钻具从孔深 2218.95 m 磨铣套管开窗侧钻钻进至 2223.32 m,再使用修窗钻具修整窗口钻进至 2225.43 m。

(3) 套管开窗所使用的钻具组合:

电子陀螺定向安装斜向器钻具组合:SZ-146 型斜向器+定向接头+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 2$  根+ $\varnothing 120.7$  mm 钻铤  $\times 4$  根+ $\varnothing 89$  mm 钻杆;

有线随钻定向安装斜向器钻具组合:SZ-146 型斜向器+定向接头+ $\varnothing 120.7$  mm 无磁钻铤+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 2$  根+ $\varnothing 120.7$  mm 钻铤  $\times 4$  根+ $\varnothing 89$  mm 钻杆;

开窗钻具组合: $\varnothing 150$  mm 复合铣锥+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 1$  根+ $\varnothing 149$  mm 稳定器+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 3$

根+ $\varnothing 120.7$  mm 钻铤  $\times 2$  根+ $\varnothing 89$  mm 钻杆;

修窗钻具组合: $\varnothing 150$  mm 复合铣锥+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 1$  根+ $\varnothing 149$  mm 稳定器+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 2$  根+ $\varnothing 149$  mm 稳定器+ $\varnothing 127$  mm 钻铤  $\times 1$  根+ $\varnothing 120.7$  mm 钻铤  $\times 4$  根+ $\varnothing 89$  mm 钻杆。

## 7 结论与体会

WFSD-4 孔是一口大斜度钻孔,按设计应以顶角  $35^\circ$ 、方位角  $133^\circ$  姿态进入断层 F4(汶川地震主断裂带)和 F5,相应的井深为 2365 和 3100 m。钻孔轨迹的控制主要采用 2 种方法,即以无线随钻测斜为基础的导向钻进和以稳定器组合为基础的定向钻进。

导向钻进系统由钻头、导向动力钻具(单弯螺杆马达)、无线随钻测量系统(MWD)和计算机软件等组成。钻进施工时,可根据需要变更滑动定向钻进和旋转复合钻进 2 种工况(地表回转与螺杆马达回转同时进行,进行保直钻进),可在一个钻进回次完成定向造斜、增斜、稳斜、降斜及扭方位多项操作。与传统的定向钻进施工相比,大大减少了起下钻次数,显著提高了施工效率。

在方位不变的情况下,采用不带随钻测斜仪、由稳定器组成的定向钻进系统。该系统通过调整稳定器的位置利用力学原理来实现增斜、稳斜或降斜。该系统的不足是无法控制方位角,只能进行顶角的控制。其优点是,钻具组成和操作程序简单,施工效率高、成本低。

在 WFSD-4 孔定向钻进施工中,根据钻孔轨迹控制的情况,交替地采用了以上 2 种定向钻进技术,获得了较好的钻孔轨迹控制效果。从孔深 712.78 m 开始定向钻进,至 1970.30 m 结束,孔深 1970 m 处顶角  $29.8^\circ$ 、方位角  $142^\circ$ ,因实际钻孔轨迹在设计轨迹上部,按顶角  $29^\circ$  状态钻进至 F4 断层,完全满足地质要求。

通过配套器材、自行组织实施,顺利完成了 WFSD-4 孔定向钻进段的施工任务。无线随钻定向钻进技术、有线随钻定向钻进技术、钻具组合轨迹控制技术、侧钻绕障钻进技术(自然侧钻、定向侧钻)、套管定向开窗侧钻技术(电子陀螺定向、有线随钻定向、无线随钻定向)等定向钻进技术在 WFSD-4 孔中的进行了全面应用,体会如下:

(1) 无线随钻测斜仪(泥浆压力正脉冲 MWD)配合单弯螺杆马达进行定向钻进具有结构简单、

(下转第 113 页)



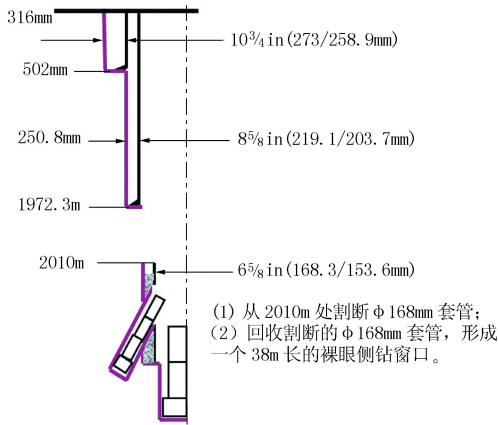


图7 WFS-4孔割套管侧钻施工原理



图8 TDX-178型锻铣器实物图

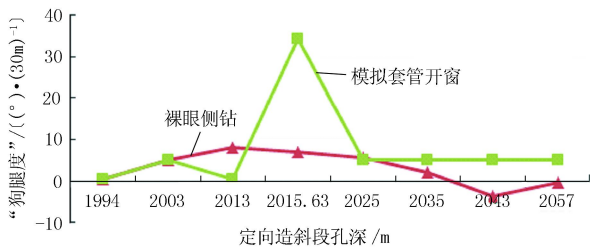


图9 裸眼侧钻和模拟套管开窗的“狗腿度”变化情况

由图9可以看出,切割套管后在裸眼段侧钻,钻孔的“狗腿度”变化较为平滑,而模拟套管开窗的“狗腿度”突变较大。套管切割锻铣技术的采用改善了钻孔轨迹,为后续的安全施工打下了基础。

## 6 总结

(1)采用修孔方法解决了 $\varnothing 273.0$  mm套管下入遇阻的技术难题,提高了施工效率。

(2) $\varnothing 219.1$  mm活动套管护壁取心技术打破了常规的钻进施工思路,解决了施工的难题,取得了较好的效果,可为以后类似的工程提供借鉴。

(3)两阶段下套管固井工艺,可在最短的时间内使套管通过缩径带,实现了安全和快速穿越强缩径地层下套管固井。

(4)采用切割和锻铣套管技术,将套管内的开窗侧钻转移到地层中进行,大大降低了造斜强度,改善了钻孔轨迹,减轻了事故风险。

## 参考文献:

- [1] 邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [2] 吕坚看,王晓山,苗春兰,等.汶川余震序列北川以北段的震源分布特性与破裂复杂性研究[J].大地测量与地球动力学,2012,35(5):17-21,26.
- [3] 张伟.特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(11):1-5.
- [4] 于玲玲,孙连环,鲍洪志.川东北地区高陡构造井壁失稳原因及对策[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(1):281-283.
- [5] 卫尊义,杨力能,高蓉,等.API偏梯形螺纹套管三角形上螺纹标记疑点分析[J].石油矿场机械,2005,34(1):68-71.
- [6] 张克勤,译.井壁稳定技术译文集(上册)[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [7] 樊腊生,张伟,赵远刚,等.一种坐孔底并可回接的尾管装置:中国,CN201320801252[P].2014-05-07.
- [8] 高德利,许树谦,罗平亚,等.复杂地质条件下深井超深井钻井技术[M].北京:石油工业出版社,2004.

(上接第108页)

辅助配套的设备少、使用操作方便等优点。在一趟钻中既可以滑动造斜钻进,又可以旋转复合钻进。

(2)通过无线随钻定向钻进的实时监控及提钻后的测斜,基本掌握了“单弯单稳”、“单弯双稳”钻具在本地区的造斜、稳斜、降斜的规律,为1555.67~1970.30 m孔段的轨迹控制提供了依据。

(3)随着顶角的增大,机械钻速降低,滑动造斜钻进的托压现象明显,加压困难,有待优化钻具组合(如采用加重钻杆、液力加压器等)。

(4)在石油钻井、定向井、水平井、大直径全面钻进中,无线随钻测斜仪配合弯外管螺杆马达进行定向钻进是主流方向,有线随钻逐步被淘汰。

(5)在地质勘探钻进中,造斜工作量大时建议采用有线随钻测斜仪配合单弯螺杆马达进行定向钻

进;在侧钻绕障等造斜工作量小时可采用机械式连续造斜器。

(6)在特殊情况下,自然偏斜、偏心楔(斜向器)仍可采用。

## 参考文献:

- [1] 江天寿,周铁芳,等.受控定向钻探技术[M].北京:地质出版社,1994.
- [2] 马元普,杨明合,陶谦.导向钻井有关力学特性的分析[J].青海大学学报(自然科学版),2007,25(5):14-17.
- [3] 赵金海,韩来聚,等.复合钻进中导向钻具稳斜能力的研究[J].矿山压力与顶板管理(采矿与安全工程学报),2002,19(3):96-97.
- [4] 尹虎,李黔,等.单弯螺杆控制井斜力学特性分析及应用[J].天然气工业,2004,24(6):80-82.
- [5] 游云武.“单弯双稳”钻具组合的受力分析与现场应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(6):498-501.