

# 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-2孔钻井液工艺研究

陶士先<sup>1</sup>, 陈礼仪<sup>2</sup>, 单文军<sup>1</sup>, 李之军<sup>2</sup>, 李晓东<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>  
(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:**汶川地震断裂带科学钻探项目二号孔(WFSD-2),地质条件极为复杂,孔壁稳定性差。施工期间由于地层中水敏性矿物吸水膨胀、地层破碎及地应力释放等原因,多次发生孔壁缩径、坍塌掉块及漏失现象。针对以上问题,施工中采用了以低粘增效粉和改性沥青为主要原料的LBM-GLA钻井液体系,通过对钻井液配方、性能参数的合理调整与维护以及固相等方面的控制与处理,较好地解决了上述问题。重点介绍了WFSD-2孔各孔段钻井液的使用及维护情况。

**关键词:**汶川地震;地震断裂带;科学钻探;复杂地层;孔壁稳定;钻井液体系

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)09-0045-04

**Research on Drilling Fluid Technology for WFSD-2 Hole of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/TAO Shi-xian<sup>1</sup>, CHEN Li-yi<sup>2</sup>, SHAN Wen-jun<sup>1</sup>, LI Zhi-jun<sup>2</sup>, LI Xiao-dong<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>** (1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** The geological conditions were extremely complicated with poor wall stability in WFSD-2 hole drilling construction of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project. Due to the water-sensitive formation of mineral water swelling, broken strata and stress release, the hole wall necking, collapsing and leakage happened many times. Through the adjustment and maintenance of the formulation, parameters, and solid control, LBM-GLA drilling fluid system with a low viscosity synergy powder and modified asphalt as the main raw materials was adopted in the construction; the above problems were successfully solved. This article mainly describes the use and maintenance of drilling fluid in each section of WFSD-2 hole.

**Key words:** Wenchuan earthquake; earthquake fault; scientific drilling; complex formation; hole wall stability; drilling fluid system

汶川地震断裂带科学钻探项目二号孔(WFSD-2)位于四川省都江堰市虹口乡。其目的是通过钻探获取信息,揭示汶川地震断裂带的深部物质组成、结构、产出、构造属性;恢复汶川地震过程中的岩石行为、流体行为、能量状态与破裂过程以及逆冲断裂发震机理;同时监测余震,提供深部无干扰条件下余震的直接信息。项目完钻后,将在孔内安放地震仪和地应力监测仪等多种监测设备,以实现地震监测和提高地震预报能力的目的。

该孔终孔深度2283.56 m,终孔口径122 mm,500 m以浅为全面钻进,500 m以深连续取心。

## 1 WFSD-2孔地质工程概况

### 1.1 WFSD-2孔地质概况

WFSD-2孔位于地震断裂带,地质条件极为复杂。600 m以浅主要是花岗岩,裂隙发育、破碎、涌水;599~1219 m,三叠系砂岩、碳质页岩和泥岩、碳质粉砂岩;1219 m以后,地层变化快,松散、破碎、风化严重。施工期间由于地层中水敏性矿物吸水膨胀、地层破碎及地应力释放等原因,引起孔壁缩径、坍塌掉块,曾造成多起孔内事故。同时由于地应力的存在,需要提高泥浆密度,而个别孔段裂隙发育、孔隙压力低,密度提高又引起钻孔漏失。从施工情况看,整个钻孔孔壁十分薄弱,稍有疏忽可能引起孔内事故。

### 1.2 WFSD-2孔井身结构

WFSD-2孔井身结构为:一开 $\varnothing 377$  mm $\times$ 47.80 m,套管下深为47.80 m;二开 $\varnothing 253$  mm $\times$

收稿日期:2012-08-08

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

作者简介:陶士先(1964-),女(汉族),辽宁人,北京探矿工程研究所教授级高级工程师,探矿工程专业,从事钻井液技术研究与应用工作,北京市海淀区学院路29号探工楼204室,bjhujl@msn.com。

638.01 m,套管下深为 637.60 m;三开  $\varnothing 200$  mm  $\times$  1349.50 m,套管下深为 1296.00 m;四开  $\varnothing 150$  mm  $\times$  1859.78 m,尾管下深为 1258.13 ~ 1859.78 m;五开  $\varnothing 122.00$  mm  $\times$  2283.56 m,筛管下深为 1836.73 ~ 1973.67 m。

## 2 钻进施工难点及钻井液要求

### 2.1 钻进施工中遇到的主要技术难点

(1)孔壁坍塌、掉块。WFSD-2孔处于地震断裂带,地层极其破碎并伴有地应力,钻进过程中(尤其是扩孔钻进)经常发生掉块和坍塌现象,轻则使得钻具上(下)行遇阻,重则发生埋(卡)钻事故。

(2)水敏性地层吸水后膨胀缩径。进入三叠系须家河四段泥页岩地层,含有蒙脱石、伊利石和高岭石等粘土矿物,易吸水膨胀,若停钻时间长,则下钻遇阻,需扫孔到底。

(3)强塑性断层泥地层塑性变形。汶川地震科学钻探所在的龙门山断裂带在历史上发生过多次地震,地下岩层中断层泥十分发育。断层泥一方面在强地应力作用下,由于塑性变形引起径向流动,造成钻孔缩径;另一方面,断层泥中富含伊利石和绿泥石等吸水较强的粘土矿物,遇水即胀,一胀即垮,易导致钻孔缩径垮塌。

(4)地层漏失。取心钻进至孔深 1270 m 以后,地层压力低,当压力超过 3 MPa 时,便发生漏失,严重时孔口失返。

(5)摩擦阻力大、循环泵压高。取心至 1700 m 后,由于进尺较慢,采用转盘+井下动力钻具(螺杆马达、液动锤)钻进,环空间隙小,扭矩、泵压较高。

### 2.2 WFSD-2孔钻井液性能要求及钻井液体系选择

钻井液被称为钻探的“血液”,因此钻探工程中,要保证优质、快速、安全钻进,正确选择和使用钻井液是十分重要的。

#### 2.2.1 钻井液性能要求

汶川地震断裂带钻探复杂的地质条件及特殊的施工工艺,对钻井液提出了较高的要求,既要满足孔壁稳定的需要,又要满足特殊的施工工艺要求。

(1)具有优良的防塌性能。滤失量较低,能形成薄而致密的泥饼,且韧性好。

(2)适当的粘度,特别是在较高的泥浆密度下保持良好的流变性能。能很好地携带和悬浮岩屑,减少循环压力损失,减轻钻井液造成的压力“激动”和对孔壁的冲刷。

(3)适当的密度。依据地层稳定性要求调整钻井液的密度,防止由于地应力造成的缩径、孔壁坍塌掉块。

(4)具有较强的抑制能力,避免泥页岩、断层泥等地层由于水化膨胀造成缩径,以及造浆致使钻井液粘度切力急剧增大。

(5)具有优良的润滑性能,降低摩擦阻力,减小钻机具的磨损。

#### 2.2.2 钻井液体系选择

依据地质方面提供的地层条件,施工过程中遇到的复杂情况主要以破碎地层及地层压力释放为主,重点做好地层的防塌、防掉块及防止孔壁缩径。因此选择的钻井液体系以细分散钻井液体系为主,即以低粘增效粉、改性沥青为主要原料的 LBM-GLA 钻井液体系,并根据地层变化及施工工艺要求,辅以其它钻井液处理剂适时对钻井液参数进行调整。

## 3 WFSD-2孔钻井液应用概况

### 3.1 WFSD-2孔各井段钻井液使用概况

#### 3.1.1 一开、二开钻进所采用的钻井液及其性能

一开全面钻进时,地层稳定(主要为花岗岩地层),采用膨润土+CMC体系。

二开钻进至孔深 79.8 m 出现钻孔涌水,当时采用钻井液密度为 1.05 g/cm<sup>3</sup> 左右,及时调整钻井液密度至 1.14 g/cm<sup>3</sup>,不再涌水。一、二开钻井液基本性能见表 1。

表 1 一开、二开全面钻进钻井液性能

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	表观粘度/(mPa·s)	塑性粘度/(mPa·s)	失水量/(mL·(30 min) <sup>-1</sup> )	泥皮厚度/mm	pH 值
1.05 ~ 1.07	19 ~ 23	8.5 ~ 14.5	6 ~ 10	13 ~ 17	0.5 ~ 1.0	10
1.14 ~ 1.20	25 ~ 40	13 ~ 22	10 ~ 20	5 ~ 10	0.5 ~ 1.0	10

#### 3.1.2 三开取心及扩孔钻进使用的钻井液及其性能

##### 3.1.2.1 三开取心钻进所使用的防塌钻井液

三开 638 ~ 900 m 提钻取心,主要地层为碳质页岩、泥岩和碳质粉砂岩,坍塌、掉块严重,该孔段重点解决防塌问题。采用的钻井液配方为:4% ~ 5% 人工钠土 + 5% CMC-HV + 2% S-1 + 3% SAS + 1% ~ 2% KHm。其性能为:密度 1.05 ~ 1.22 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 19 ~ 25 s,表观粘度 14 ~ 21 mPa·s,塑性粘度 10 ~ 15 mPa·s,失水量 4 ~ 6 mL/30 min,泥皮厚度 0.3 ~ 0.5 mm,pH 值 10。

三开自 897.66 m 起,在原钻井液基础上逐步调整为低粘增效粉-改性沥青钻井液体系,其钻井液配方为:4% 低粘增效粉(LBM-1) + 3% 改性沥青(GLA) + 0.3% ~ 0.5% PAC-141 (或 0.3% ~ 0.5% CMC) + 重晶石。其性能为:密度 1.27 ~ 1.32 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 25 ~ 30 s,初切力 2 ~ 3 Pa,终切力 6 ~ 10 Pa,失水量 3.8 ~ 5 mL/30 min,泥皮厚度 0.3 ~ 0.5 mm,pH 值 10。

### 3.1.2.2 三开扩孔钻进使用的钻井液及其性能

由于地层复杂,且扩孔阶段孔径变大,孔壁裸露面积增大,加大了护壁难度;同时岩屑量增加,泥浆上返速度降低。因此为维护孔壁稳定,提高泥浆的悬浮能力,采取适当提高钻井液的粘度和密度,在取心钻进钻井液的基础上添加了适量的 CMC-HV。采用的钻井液配方为:4% LBM + 3% GLA + 0.3% ~ 0.5% CMC-HV (或 PAC-141) + 重晶石(调整钻井液密度为 1.29 ~ 1.35 g/cm<sup>3</sup>)。其性能为:密度 1.29 ~ 1.35 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 30 ~ 35 s,初切力 2.5 ~ 4.0 Pa,终切力 8 ~ 12 Pa,失水量 3.5 ~ 4.8 mL/30 min,泥皮厚度 0.4 ~ 0.5 mm,pH 值 10。

另外,该井段当钻井液密度超过 1.28 ~ 1.29 g/cm<sup>3</sup> 时,即发生钻井液漏失,漏失钻井液总量 19.5 m<sup>3</sup>。采用在原浆基础上加入随钻堵漏剂和碳酸钙,对孔壁进行强化处理,提高了地层的承压能力,没有再次发生漏失。

### 3.1.2.3 三开侧钻钻进使用的钻井液及其性能

#### 3.1.2.3.1 打水泥塞后污染泥浆处理

打水泥塞后残留水泥对钻井液性能影响很大。侧钻前配制 25 m<sup>3</sup> 新浆,钻井液配方为:7% LBM + 5% GLA,目的是顶替孔内扫水泥塞形成的水泥浆(22 m<sup>3</sup>)。但由于孔内水泥浆和钻井液池、废浆池水泥浆量太大,排污准备工作不足,清理废浆时排污泵和泥浆泵严重磨损,无法正常工作,新配制的钻井液没有完全顶替水泥浆,造成孔内钻井液污染。钻井液组分为:15 m<sup>3</sup> 新浆 + 5 m<sup>3</sup> 水泥浆 + 2 m<sup>3</sup> 废水,污染后的钻井液性能为:密度 1.25 ~ 1.30 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 70 ~ 107 s,初切力 2.5 ~ 4.0 Pa,终切力 17 ~ 25 Pa,失水量 50 ~ 60 mL/30 min,泥皮厚度 1 ~ 5 mm,pH 值 10。

可以看出,用新浆顶替水泥浆后由于没有完全顶替,循环后钻井液的性能显著变差:粘度高,流动性差;滤失量增大,泥皮增厚。

水泥浆污染的钻井液处理:加入 0.5% 小苏打除钙,加入 0.3% CMC 降失水,加入 3% SMT 稀释降

粘。处理后的钻井液性能为:密度 1.29 ~ 1.32 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 40 ~ 60 s,初切力 2.5 ~ 3.0 Pa,终切力 13 ~ 18 Pa,失水量 8 ~ 10 mL/30 min,泥皮厚度 0.7 ~ 1 mm,pH 值 10。

#### 3.1.2.3.2 侧钻全面钻进使用的钻井液及其性能

侧钻全面钻进对钻井液的要求与上述扩孔钻进基本相同,只是由于水泥污染仍需对泥浆进行除钙、降失水及降粘处理。钻井液配方:5% ~ 7% LBM + 3% ~ 5% GLA + 0.5% 小苏打 + 0.3% SMT + 0.3% CMC。钻井液性能为:密度 1.29 ~ 1.32 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 40 ~ 50 s,初切力 2.5 ~ 3.0 Pa,终切力 13 ~ 18 Pa,失水量 3 ~ 5 mL/30 min,泥皮厚度 0.3 ~ 0.5 mm,pH 值 10。

#### 3.1.3 四开取心钻进使用的钻井液及其性能

四开钻进地层复杂,主要岩性为破碎花岗岩、凝灰岩。由于采取了新的工艺措施,即转盘+螺杆马达复合钻进,因此对钻井液润滑和固控提出了更高的要求。因此四开井段钻进过程中,循环钻井液中除加入润滑剂外,还加强钻井液的固相控制。试验与实践证明,钻井液的固相控制除了满足上述新的工艺要求外,也明显改善了泥饼的质量,泥饼厚度明显降低、韧性增强。

(1) 1369.80 ~ 1686.34 m 提钻取心,由于地层相对稳定,采用的钻井液配方为:4% ~ 5% LBM + 5% CMC + 2% GLA + 1% 铵盐 + 0.3% ~ 0.5% GLUB + NaOH(调整 pH 值)。其性能为:密度 1.13 ~ 1.15 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 25 ~ 35 s,初切力 1 ~ 3 Pa,终切力 4 ~ 6 Pa,失水量 4 ~ 6 mL/30 min,泥皮厚度 0.1 ~ 0.3 mm,pH 值 10。

(2) 1686.34 ~ 1859.78 m 井段,由于地层破碎,坍塌、掉块严重,地层压力较大,因此将钻井液密度提高至 1.25 ~ 1.32 g/cm<sup>3</sup>。采用的钻井液配方为:3% ~ 5% LBM + 5% CMC + 2% GLA + 1% 铵盐 + 0.1% ~ 0.3% KPAM + 0.3% ~ 0.5% GLUB + NaOH(调整 pH 值) + 重晶石。其性能为:密度 1.25 ~ 1.32 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 30 ~ 35 s,初切力 3 ~ 5 Pa,终切力 8 ~ 12 Pa,失水量 3 ~ 5 mL/30 min,泥皮厚度 0.3 ~ 0.5 mm,pH 值 10。

#### 3.1.4 五开钻进使用的钻井液及其性能

(1) 固井后污染钻井液处理。现场使用小苏打(碳酸氢钠)+腐殖酸钾来处理水泥浆,处理后的钻井液性能参数见表 2。

(2) 五开 1859.78 ~ 2080 m 提钻取心,主要岩性为较完整的花岗岩、凝灰岩。由于地层相对稳定,

表2 水泥浆及处理后钻井液性能

编号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	失水量/[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥饼厚度/mm	pH值
1	1.28	51	21.2	2.0	11
2	1.28	53	16.4	2.0	12
3	1.28	29	12.6	2.0	12

注:1—水泥浆;2—水泥浆+0.5%小苏打;3—水泥浆+0.5%小苏打+0.5%腐植酸钾。

采用的钻进方法为:转盘+螺杆马达,钻井液设计时充分考虑润滑和固控,提高钻具使用寿命和钻进效率。采用的钻井液配方为:3%~5%土+2%GLA+1%铵盐+0.1%~0.3%KPAM+0.5%~1%GLUB+NaOH(调整pH值)。其性能为:密度1.10~1.14 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度25~30 s,初切力1~3 Pa,终切力4~7 Pa,失水量3~5 mL/30 min,泥皮厚度0.1~0.3 mm,pH值10。

(3)五开2080~2283.56 m提钻取心,该井段岩性为断层泥、碳质页岩、碳质粉砂岩,由于遇到地质学要求的目的层——断层泥,为防止孔壁缩径,对钻井液实施加重处理。采用的钻井液配方为:3%~5%LBM+5%CMC+2%GLA+1%铵盐+0.1%~0.3%KPAM+1%GLUB+NaOH(调整pH值)+重晶石。其性能为:密度1.18~1.20 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度28~35 s,初切力3~5 Pa,终切力10~12 Pa,失水量4~6 mL/30 min,泥皮厚度0.3~0.5 mm,pH值10。

### 3.2 WFS-2孔钻井液的维护

#### 3.2.1 强化钻井液的抑制、防塌性

钻井液中改性沥青的加量保持在2%以上,KPAM的加量0.2%以上,铵盐的加量1%以上,使LBM体系始终处于高抑制状态,防塌效果好。

#### 3.2.2 合适的钻井液密度

合适的钻井液密度平衡地应力,是确保孔壁稳定和孔下安全的最基础也是最重要的手段。在实际现场钻进过程中,及时分析、观察,维持钻井液性能稳定,尤其是在遇到断层泥、破碎地层有缩径及坍塌、掉块现象时,及时提高钻井液密度。

#### 3.2.3 保持较低的滤失和良好的造壁性

较低的滤失量和良好的造壁性对于WFS-2孔复杂地质条件下的钻进施工很重要。WFS-2孔地层破碎、坍塌、掉块严重,全孔钻井液滤失控制在6 mL/30 min以下。

#### 3.2.4 固相控制

WFS-2孔施工过程中,井下动力钻具的使用,对钻井液的固控处理提出了更高的要求。现场采用三级固相控制,即振动筛、除砂器和离心机。这些固

控设备可以有效地清除钻井液中的岩屑和劣质粘土固相,现场一直维持含砂量<0.5%,保证钻井液性能稳定和钻进的顺利进行。常用的固控设备及清除固相颗粒的能力如下:振动筛>74 μm;除砂器>40 μm;除泥器>25 μm;旋流除泥器>12 μm;离心机>6 μm。WFS-2孔钻井液固控循环系统见图1。

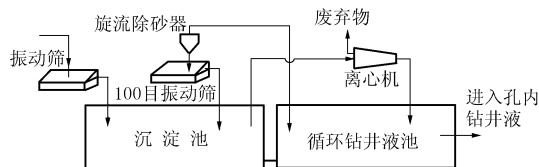


图1 WFS-2孔钻井液固控循环系统示意图

#### 3.2.5 钻井液润滑性维持

现场钻井液润滑性维护,一方面通过固相控制将泥浆中的无用固相及时清除;另一方面通过处理剂的加入提高钻井液的润滑性能,如现场使用的泥浆材料改性沥青本身有一定的润滑性能,钻进过程中,又加入1%~2%GLUB极压型润滑剂,使泥浆润滑系数维持在0.1以下,较好地满足了现场钻井施工的需要。

#### 3.2.6 漏失处理

WFS-2孔在钻进过程中多次发生漏失,尤其是在扩孔阶段多次憋漏,用随钻堵漏剂+超细碳酸钙复合堵漏,取得了较好的效果,同时适当调整钻井液的流变性,保证了钻进的顺利进行。

## 4 结论

(1)WFS-2孔地质条件复杂,要维护孔壁稳定十分困难。针对WFS-2孔所设计的LBM-GLA钻井液体系造壁性能好,符合该孔复杂地质条件对钻井液的护壁要求。

(2)现场对钻井液的维护与处理,较好的满足了该孔复杂地层孔壁稳定及其特殊施工工艺要求。

(3)LBM-GLA钻井液体系,泥浆成本低,现场使用和维护方便。

## 参考文献:

- [1] 张伟,贾军,胡时友.汶川地震科学钻探项目的概况和钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1).
- [2] 贾军.中国大陆科学钻探先导孔及扩孔钻井液工艺[J].探矿工程,2003,(3).
- [3] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].山东东营:中国石油大学出版社,2005.
- [4] 高德利,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.