

汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-3孔泥浆技术的设计与应用

张统得¹, 陈礼仪¹, 刘徐三¹, 张文生², 张正²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 安徽省地质矿产勘查局 313 地质队, 安徽 六安 237010)

摘要:汶川科钻 WFSD-3 孔钻遇地层极其复杂, 硬脆碎地层与强水敏性等地层交替出现, 给钻进施工带来极大安全隐患。针对该孔特殊地层情况, 以孔壁稳定性理论分析为指导, 在室内实验研究的基础上, 优选出 NH₄-HPAN、K-PAM、SAS 和 KHm 等抑制剂组成的泥浆体系配方, 并结合室内 FA 无渗透实验以及 ZNP-01 页岩膨胀性实验对该泥浆配方进行封堵性和抑制性评价, 提出了新型泥浆体系, 并得以良好应用。还对现场应用遇到的泥浆粘度与切力控制、钻头防泥包技术以及钻水泥塞钙侵处理技术等进行了归纳总结, 对复杂地层钻进施工具有较好的借鉴意义。

关键词:汶川地震; 地震断裂带; 科学钻探; 复杂地层; 孔壁稳定; 泥浆体系设计; 泥浆维护

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)09-0041-04

Mud System Design and Application in the WFSD-3 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/ ZHANG Tong-de¹, CHEN Li-yi¹, LIU Xu-san¹, ZHANG Wen-sheng², ZHANG Zheng² (1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. 313 Geological Brigade of Anhui Exploration and Development Bureau of Geology and Mineral Resources, Lu'an Anhui 237010, China)

Abstract: The drilling formation of WFSD-3 hole is extremely complex with hard, brittle and broken formation and high water sensitivity formation appearing alternately, which brought huge hidden danger to the drilling construction. According to the special formation situation of the hole, based on the borehole stability theory analysis and the laboratory experiments, NH₄-HPAN, K-PAM, SAS and KHm inhibitors had been selected out as the optimized additives for the mud system. In addition, the laboratory sand-bed non-filtration experiments and the ZNP-01 shale swelling experiments had been carried out to evaluate the blocking and inhibitory capacity of the mud formulations. This mud system has satisfactory application effects. The paper also summarized some treatment technologies in the application of mud maintenance, such as mud viscosity and gels control technique, the drill bit anti-balling technique and calcium invasion treatment technique while drilling cement plug, which have a good reference to drilling in the complex formation.

Key words: Wenchuan earthquake; earthquake fault; scientific drilling; complex formation; borehole stability; mud system design; mud maintenance

1 工程概况

汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目是在汶川大地震和复发地震的源区——龙门山北川—映秀断裂及龙门山前缘安县—灌县断裂傍侧先后实施科学群钻, WFSD-3孔是其科学群钻中的第4口钻孔。该孔位于四川省绵竹市九龙镇清泉村境内, 终孔孔深1502.30 m, 终孔口径75 mm。

2 泥浆体系设计与应用

2.1 理论依据与分析

WFSD-3孔布置在汶川地震前缘断裂带上, 主要地层为侏罗系砂岩、粉砂岩、泥岩和三叠系砂岩、碳质页岩、泥灰岩等地层, 局部孔段还夹有煤层、断层泥等。由于历史上遭受多次地震作用, 使得钻遇地层严重破碎松散, 部分地层具有强烈的水化膨胀作用(图1), 极易造成孔内事故。

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: 张统得(1987-), 男(汉族), 四川达县人, 成都理工大学硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事岩土钻掘工程方面的研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, ztd8795@126.com; 陈礼仪(1957-), 男(汉族), 四川郫县人, 成都理工大学教授, 探矿工程专业, 博士, 从事岩土钻掘工程材料与钻井液方面的教学和科研工作, cly@cdut.edu.cn。

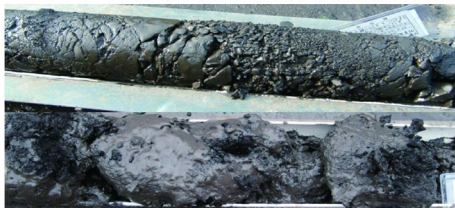


图1 破碎松散岩心与强塑性岩心

根据孔壁稳定理论分析,钻孔发生不稳定现象主要是由于地层被钻开之后,致使原始地层应力发生改变,孔壁应力的重新分布,当孔壁岩石所受到的应力超过本身强度之后即会发生孔壁失稳。孔壁失稳在钻探施工中的直接表现即是孔壁坍塌、钻孔缩径等。在WFSD-3孔所钻地层中,不稳定地层大体可分为硬脆性(如砂岩,粉砂岩等)与强水敏性(如泥质砂岩,碳质泥岩,煤层以及断层泥等)地层。由于历史上遭遇多次地震作用,使得所钻遇的地层大都松散破碎,胶结性差,裂隙发育,一旦泥浆滤液进入裂隙,必将导致孔壁周围的孔隙压力增大,泥浆液柱压力对孔壁的有效支撑作用大大减小,孔壁岩层承受过大的拉伸应力,致使裂隙越来越大,泥浆滤液也就更容易进入,形成恶性循环,最终使得孔壁发生坍塌、掉块,甚至发生埋钻等事故。因此,在泥浆体系的设计上要注意能有效的封堵地层裂隙,以达到延缓或阻止泥浆滤液的进入。对于强水敏性地层,则主要依靠强化泥浆体系抑制性和降低泥浆体系的失水量,努力减小孔壁地层的水化膨胀。同时,由于汶川地震之后局部地层残余应力较大,还必须提高泥浆液柱压力,以平衡地层压力,防止水敏性地层的塑性流动,造成钻孔缩径埋钻事故。因此,根据上述理论分析,针对WFSD-3孔复杂地层特性,在泥浆体系的设计上应当满足以下几个方面的要求:

(1)具有一定的孔隙封堵特性,以减少泥浆对地层的渗透,避免孔隙压力增大导致孔壁失稳;

(2)具有较低的失水特性,以减小强水敏性地层、泥页岩以及断层泥的水化膨胀;

(3)具有合适的密度,以平衡地层压力,减小泥浆液柱压力与地层的压差;

(4)具有较强的抑制性能,以抑制强水敏性造浆地层的水化分散,保证泥浆体系性能稳定;

(5)具有优良的流变性能及润滑性,以保证泥浆体系有良好的携岩排粉能力,及提高钻进效率,减小机具磨损。

2.2 泥浆体系的研究与应用

根据上述理论设计分析以及不同孔深地层特性

的要求,考虑到金刚石取心钻进特点,现场先后采用了改性磺化体系和钾胺聚磺2种泥浆体系。

2.2.1 二开(400 m)以浅的泥浆体系

地层主要为松散破碎砂岩、泥页岩互层,主要采用改性磺化泥浆体系。该体系具有较低的失水量,良好的流变性能。其基础配方(1号)为:水+4%~5%膨润土+5%纯碱(膨润土质量)+0.5%CMC+1%S-1+2%SMC+2%SAS+1%KHm+重晶石(根据地层情况适量加入)。主要性能控制范围为:密度 $1.05 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$,漏斗粘度 $30 \sim 50 \text{ s}$,表观粘度 $20 \sim 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,塑性粘度 $12 \sim 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,动切力 $6 \sim 8 \text{ Pa}$,静切力 $(1'/10')$ $2 \sim 3/5 \sim 10 \text{ Pa}$,失水量 $4 \sim 6 \text{ mL}/30 \text{ min}$,泥饼厚度 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$,pH值 $9 \sim 10$ 。

2.2.2 二开以深泥浆体系

随着钻孔逐渐加深,地层条件更加复杂,岩石更加破碎,局部孔段的地应力高也显现出来。地层造浆性能极强,缩径严重。因此,为了实现安全钻探施工的目的,在实现体系的低失水的基础上,提高泥浆的封堵性、抑制性,现场逐渐转换泥浆体系为钾胺聚磺泥浆体系。

经过大量泥浆处理剂的甄选以及室内正交实验,优选出如下钾胺聚磺泥浆体系配方(2号):清水+5%膨润土+5%纯碱(膨润土质量)+0.3%CMC+1%S-1+1% NH_4 -HPAN+3%SAS+0.2%K-PAM+2%KHm+重晶石(根据地层情况适量加入)。其主要性能控制范围为:密度 $1.05 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$,漏斗粘度 $35 \sim 55 \text{ s}$,表观粘度 $25 \sim 35 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,塑性粘度 $17 \sim 28 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,动切力 $8 \sim 12 \text{ Pa}$,静切力 $(1'/10')$ $2 \sim 3/8 \sim 12 \text{ Pa}$,失水量 $3 \sim 5 \text{ mL}/30 \text{ min}$,泥饼厚度 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$,pH值 $9 \sim 10$ 。

室内主要采用FA无渗透滤失仪进行测试评价体系封堵性能,该方法主要是采用一定量的 $20 \sim 40$ 目砂床,在 0.7 MPa 压力下, 30 min 测试泥浆对砂床的渗透情况,滤失量越小其封堵性能越好,其实验结果如表1所示。

表1 FA无渗透砂床实验结果

配 方	砂床滤失量
清水+0.3% PHP	30 s内全漏失
清水+5%土+0.3% CMC+75 ppm PHP	1 min内全漏失
配方1号	38 mL
配方2号	16 mL

为了评价钾胺聚磺泥浆体系的抑制性能,室内采用ZNP-01型页岩膨胀仪进行测试。实验先采

用膨润土制成人工岩心,放入清水中浸泡8 h,测出其膨胀量,以该相对膨胀量为基数100%,再制备同样岩心,在不同的泥浆中浸泡8 h后观察其膨胀量,与在清水中的膨胀值基数对比得出相对膨胀率,一般膨胀率越小,说明其抑制性能越好,其实验结果如表2所示。

表2 ZNP-01 相对膨胀率实验结果

配方	不同浸泡时间膨胀量(0.01 mm)								8 h 相对膨胀率/%
	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	
清水	54	96	132	146	158	166	174	181	100
清水+0.3% PHP	14	24	33	42	50	56	61	66	36.5
清水+5%土+0.3% CMC+75 ppm PHP	8	15	19	23	27	30	34	37	20.4
配方1号	6	10	12	14	16	17	19	20	11
配方2号	3	5	7	9	11	12	14	15	8.3

根据以上2种实验得出配方2号具有较强的封堵性能以及抑制性。在该配方2号体系中,选用 NH_4 -HPAN、K-PAM和KHm为抑制剂,通过其提供的 NH_4^+ 与 K^+ 抑制泥岩的水化膨胀,且该类抑制剂还有一定的降低滤失量的作用;采用S-1为降低失水量的主处理剂,配合既具有封堵微裂隙特性又能改善泥饼质量和润滑效果的磺化沥青(SAS),提高体系的防塌性能。

在现场采用配方2号体系同时,钻遇某些局部高地应力孔段,为了实现压力平衡钻进,还必须添加重晶石提高密度。如在孔深1150 m以后,由于地层缩径现象明显,现场则迅速通过添加重晶石提高密度至 1.59 g/cm^3 ,形成高密度、低失水、强抑制、封堵性的泥浆体系。

3 现场泥浆性能与维护

3.1 粘切控制技术

在WFSD-3孔施工过程中,泥浆粘度随地层的变化十分频繁。此外,由于现场没有十分有效的泥浆固相控制系统,泥浆切力控制也显得得心应手。因此,泥浆粘切控制成为重中之重。泥浆粘度过低易形成紊流,造成对孔壁和岩心的严重冲刷,影响孔内安全和取心质量。同时,粘切过低也会降低对岩粉的悬浮能力,特别是在加重泥浆时必须控制好泥浆的粘度和切力,防止对重晶石的悬浮不够造成沉淀埋钻。粘切过高则增大了循环压耗,导致钻进效率降低;终切过高时容易造成压力“激动”,引起孔塌或孔漏。如在550~580 m孔段出现过粘切突然下降,分析孔内可能有少量涌水现象,导致粘切下降较快。因此在调浆时,主要以增粘为主,加大CMC

和膨润土量。又如在625~680 m孔段时则由于钻遇长段含泥地层,且由于金刚石钻进岩粉较细,加之现场固控设备能力有限,导致粘度急剧增长。现场主要通过添加具有稀释作用兼具抑制作用的KHm等处理剂,或者采用部分换浆,配制粘切较低新浆与之混合,终将粘度控制在了合适的范围内。

3.2 防止钻头泥包的泥浆技术

在钻进过程中,当钻遇泥质含量较高的地层时,由于其易于水化分散,使孔眼内泥质或固相含量增大,吸附于钻头表面造成钻头泥包;或由于井眼内岩屑过多时在压差作用下形成厚泥饼造成泥包。泥包后,由于钻头不能直接接触地层,会引起钻速变慢,严重时甚至会堵塞水眼,导致泵压升高,造成极为严重的后果。WFSD-3孔在钻进中,在620~780 m时,经常发现钻头水眼堵塞较多,后分析原因后,通过加入0.3%的T型润滑剂后得到较大改观(如图2)。T型润滑剂是一种表面活性剂,具有良好的润湿、渗透、乳化、起泡性能;能显著提高钻井液润滑性,具有减摩、抗损、耐温、抗污染等功能,能有效延长钻头使用寿命;能使泥浆中的各种成分分散开来,从而大幅降低钻具与滤饼之间的摩擦扭矩及岩屑与滤饼在钻具表面的粘附。



加润滑剂前



加润滑剂后

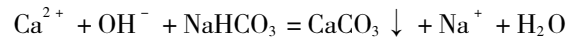
图2 加入T型润滑剂处理钻头泥包前后对比

3.3 钻水泥塞泥浆钙侵的性能维护

根据 WFS-3 孔钻孔结构设计要求,需要下入多层套管并采用水泥固井。此外,处理事故采取水泥封孔也会钻水泥塞。这些钻水泥塞的作业,在施工过程中均会对泥浆造成污染,以至于无法满足后续钻进需要,必须对其进行维护和处理。

水泥对泥浆的主要污染表现在钙侵与 pH 值的影响。主要原因在于水泥水化后产生大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 由于部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能在水中电离成 Ca^{2+} 和 OH^- , 虽然 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解度不高,但几百个 ppm 的含钙量就足以让钻井液失去胶体性质。泥浆遭受水泥侵之后滤失量、粘度、切力增大,泥饼变厚,导致泥浆性能急剧变坏,严重影响孔内安全。

根据水泥污染的主要原因,现场主要采用加入 NaHCO_3 以清除泥浆中的 Ca^{2+} 和 OH^- , 加入 NaHCO_3 的反应式:



同时,在清除 Ca^{2+} 和 OH^- 的同时必须降低体系的粘切,现场主要通过加入 SMT 和 KHm 等进行稀释,另外加入 S-1、CMC、SAS 等降低体系的失水量,保证体系的性能稳定。如 WFS-3 孔在下入 $\text{O}219 \text{ mm}$ 套管水泥固井后泥浆性能急剧变坏,经过上述方法处理,性能逐渐符合钻进地层要求,其性能变化见表 3。

表 3 泥浆受侵污染的性能控制

钻井液参数	漏斗粘度 /s	表观粘度 /($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	塑性粘度 /($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	动切力 τ_0 /Pa	静切力 τ_s ($1'/10'$)/Pa	失水量/($\text{mL}\cdot$ (30 min) $^{-1}$)	泥饼厚度 /mm	pH 值
固井前	40	25	14	9	1.5/8	6.8	0.6	9
钻水泥塞	73	38	28	10	4/20	13	0.8	12
处理后性能	44	28	20	8	2/8	5	0.5	10

4 总结与认识

(1) 根据 WFS-3 孔钻遇的地层情况,结合孔壁稳定性理论分析,得出了可满足 WFS-3 孔钻进的优质泥浆体系。通过室内研究,优选出不同孔段使用的改性磺化体系和钾胺聚磺体系,并在现场得到成功应用。这对类似地层的防塌泥浆体系设计具有较好的指导意义。

(2) 现场泥浆性能维护是复杂地层钻探工作的重中之重,必须随时保持泥浆性能稳定在合适范围内,才能满足安全、高效的钻进要求。根据 WFS-3 孔施工特点,总结出在泥浆粘切控制、防泥包泥浆技术以及水泥钙侵处理技术上的一些做法,具有一

定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 徐同台. 井壁稳定技术研究现状及发展方向[J]. 钻井液与完井液, 1997, 14(4).
- [2] 黄汉仁, 杨坤鹏, 罗平亚. 泥浆工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [3] 李之军, 陈礼仪, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)断层泥孔段泥浆体系的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12).
- [4] 周华安, 王德承, 杨兰平. 强抑制封堵性防塌钻井液研究及应用[J]. 钻采工艺, 1996, 19(2).
- [5] 徐同台, 卢淑芹, 何瑞兵, 等. 钻井液用封堵剂的评价方法及影响因素[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2).
- [6] 吴隆杰, 杨凤霞. 钻井液处理剂胶体化学原理[M]. 四川成都: 成都科技大学出版社, 1992.
- [7] 樊腊生, 贾军, 吴金生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)钻探施工概况[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12).
- [8] 李之军, 陈礼仪, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)断层泥孔段泥浆体系的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12).
- [9] 贾军, 樊腊生, 胡时友, 等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFS-1)小间隙固井工艺的研究与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(12).
- [10] 张培丰. 龙门山地震断裂带地应力分布及其对井壁稳定的影响——以 WFS-2 井为例[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2).
- [11] 姚晓, 周保中, 赵元才, 等. 国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(6).

(上接第 40 页)

加入早强剂可以显著提高水泥浆的早期强度;良好的触变性能有效防止水泥浆的漏失。

(3) 该低密度纤维防漏水泥浆体系在 WFS-2 孔 $\text{O}168.3 \text{ mm}$ 套管固井中水泥顺利返至地面。

参考文献:

- [1] 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, 2008, 82(12).
- [2] 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).
- [3] 胡时友, 宋军, 张伟, 等. 汶川地震断裂带科学钻探(WFS)项目钻探和测井课题的组织实施与管理[J]. 探矿工程(岩土钻