

汶川地震断裂带科学钻探项目钻井液技术与应用

张统得¹, 陈礼仪², 贾 军³, 李前贵¹

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目地层极端复杂,主要表现在强破碎、强水敏和高地应力,施工难度极大。在理论分析的基础上,提出了对这些问题解决对策。在 WFSD 项目几个钻孔的钻探施工中,选用并演化了改性磺化、LBM - GLA、钾铵基聚磺以及钾石灰聚磺 4 种不同的钻井液主体系,并取得了良好的应用效果。对各钻井液体系的特点与适用范围进行了总结。此外,提出了在深孔复杂地层钻探施工钻井液应用的一些体会与建议。

关键词:汶川地震断裂带;科学钻探;复杂地层;钻井液技术

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672 - 7428(2014)09 - 0139 - 04

The Drilling Fluid Technology and Application of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/ZHANG Tong-de¹, CHEN Li-yi², JIA Jun³, LI Qian-gui¹ (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: The formations of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project (WFSD) are extremely complicated. They are strong broken, high water sensitive and high stressed, which resulted in high difficulty of drilling operation. On the basis of theoretical analysis, some countermeasures were put forward to solve the problems. During the drilling operation of several boreholes of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project, we selected and evolved four different drilling fluid systems, included modified sulfonated, LBM - GLA and potassium lime polysulfonated drilling fluid systems, which have been good effective in applications. Also, this paper summarized the characteristics and application scope of all the drilling fluid systems. In addition, some experiences and suggestions on drilling fluid application for the deep hole with complex formation are put forward.

Key words: Wenchuan earthquake fault; scientific drilling; complex formation; drilling fluid technology

1 概况

“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目”是在汶川大地震发生后实施的一个研究项目,其目的是通过在龙门山断裂施工 5 口科学群钻来获取地下信息,研究地震发生机理。该项目是科技部支撑计划的专项,由国土资源部负责,国土资源部和中国地震局共同组织实施。目前该项目的钻探施工任务已经结束,各钻孔孔深与施工地区见表 1。

表 1 WFSD 项目各钻孔孔深与施工地点情况

孔号	孔深/m	施工地点
WFSD - 1	1201. 15	都江堰市虹口乡
WFSD - 2	2283. 56	都江堰市虹口乡
WFSD - 3P	551. 54	绵竹市九龙镇
WFSD - 3	1502. 30	绵竹市九龙镇
WFSD - 4	2338. 77	平武县南坝镇

由于汶川地震断裂带科学钻探项目施工区域位于龙门山断裂带上,而该断裂带位于中国大陆南北地震带中段,是青藏高原东部边缘与扬子地块的分界线,在历史上曾发生过多次地震,导致该地区地层条件极其复杂,钻探施工难度极大,因此,作为钻探工程中不可或缺的钻井液工艺技术在该项目中显得尤为重要。

2 WFSD 项目地层特点

汶川地震断裂带科学钻探施工的 5 个钻孔在地理位置上分布范围较广,各钻孔之间的地层岩性及构造等差异较大,但由于同属于龙门山地震断裂带,又具有较多的相同点。其主要可归结为强破碎、强水敏性和高地应力 3 类。

2.1 强破碎

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“破碎和强缩径地层大直径深孔取心钻进技术研究”(1212011120258)

作者简介:张统得(1987 -),男(汉族),四川达州人,中国地质科学院探矿工艺研究所,地质工程专业,从事岩土钻掘工程方面的研究工作,四川省成都市郫县成都现代工业港(北区)港华路 139 号,ztd8795@126.com。

龙门山地震断裂带由于历史上经历过多次地质构造运动,地层受到强烈挤压及碰撞之后表现为极度破碎(图1),对于非水敏性地层主要表现为裂隙发育,胶结性差,如在WFSD-1、WFSD-2孔上部孔段中的凝灰岩、花岗岩以及WFSD-3孔的砂岩、WFSD-4孔中的变质板岩等,该类地层蒙脱石含量较低,水化分散性不显著;失稳机理主要在于钻具的机械扰动、钻井液冲刷、起下钻抽吸压力、钻井液液柱压力过低等,造成其极易发生坍塌、掉块。

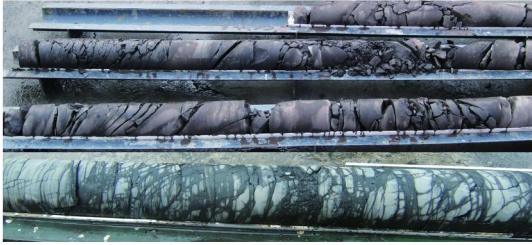


图1 强破碎地层岩心

这将更容易导致孔壁岩石发生剪切破坏而引发孔壁失稳。

3 WFSD项目钻井液体系的设计理论与对策

针对WFSD项目钻探施工区域地层特点,进行钻井液体系设计理论与对策研究主要从以下几个方面进行考虑。

(1)针对非水敏性强破碎地层,由于其自身裂隙发育、胶结性较差,钻井液滤液一旦进入裂隙之后增大了孔隙压力,矿物之间的有效结合力随之降低,导致孔壁岩石强度降低而失稳。为此,可在体系中加入沥青、超细碳酸钙等颗粒材料以对微小裂缝进行封堵填塞,减小或延缓钻井液滤液进入地层裂隙。同时沥青类材料还能有效吸附于泥页岩表面,具有一定的抑制性。而超细碳酸钙能有效改善泥饼固相颗粒级配,提高泥饼质量,降低滤失量,进而保证孔壁稳定。

(2)对于断层泥及泥页岩等强水敏性地层失稳现象的主要方法是增大钻井液体系的抑制性,可采用以下2种手段进行:①向体系中加入大分子聚合物,可及时对钻头切削下来的岩粉进行包被、絮凝,避免在钻井液中水化分散,当聚合物加量足够大时,还能在孔壁形成一层较为致密的吸附膜,能在一定程度上阻止或减缓水进入水敏性地层进而起到抑制作用;②向钻井液体系中加入 K^+ 、 NH_4^+ 等无机离子。由于上述2种离子半径与蒙脱石中的硅氧四面体氧原子六角环网格直径相当,能镶嵌其中,并且其水化半径较小,水化能较低,水分子不易进入,因此能很好地抑制蒙脱石含量较高地层的水化膨胀。

(3)针对高地应力的地层特点,最直接的手段就是提高钻井液密度,而往往在提高密度的同时必须保证体系具有优良的封堵性,较强的抑制性及较低的失水量,在达到压力平衡钻进时要能在孔壁形成良好的泥饼质量,这样才能有效保证在高地应力状态下钻进的孔壁稳定。

(4)此外,在钻井液体系设计上不仅要遵循上述3种主要防塌理论与对策,还应结合各钻孔自身情况,如孔深、钻孔结构、钻孔轨迹、施工工艺、设备能力、成本等因素进行综合考虑,以实现在钻井液设计满足安全钻进的前提下达到高效率、低成本、环保的综合社会效益。

4 WFSD项目钻井液体系的应用与演化

WFSD项目由于施工难度大,施工周期长,对钻

2.2 强水敏

该地区地层的另一个特点即是在每个钻孔都存在断层泥孔段(图2)。断层泥是断层在运动时由其附近的岩石在摩擦滑动引起的高温下蚀变形成的,主要特性表现在塑性较强,极易水化膨胀造成钻孔缩径;同时由于其特殊的形成过程使得其部分组成颗粒粒径极细,比表面积较大,极易与钻具之间发生强烈的粘滞作用。此外,在大部分钻孔中还含有长孔段泥岩、泥质粉砂岩等,而该类地层中由于含有大量的蒙脱石,也使得其容易遇水水化膨胀,引发孔内事故。

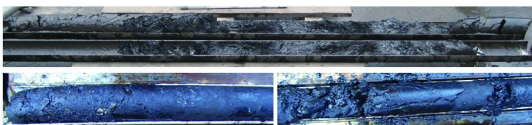


图2 强水敏性地层岩心

2.3 高地应力

虽然“5·12”汶川大地震的发生是龙门山断裂带地区一次大的地应力突然释放的过程,但经过研究表明在该地区地应力仍然较其他地区偏高,且水平应力占主导作用,其最大水平地应力梯度约为中国大陆地区平均值的3~4倍,而高地应力的存在会直接导致要保证孔壁稳定的钻井液当量密度增大,而密度过大也会导致粘卡、渗漏、流变性变差等不利影响;同时,高地应力还会加剧孔壁破碎地层发生坍塌掉块以及塑性地层发生缩径的程度。此外,该地区的最大水平地应力与最小水平地应力差值较大,

井液的要求远高于普通地质钻探。因此,在钻井液体系应用中也主要根据上述设计理论与对策进行选择与调整。在实际应用中主要经历了从改性磺化体系到 LBM - GLA 体系或钾铵基聚磺体系再到钾石灰聚磺钻井液体系 3 个阶段。各钻孔钻井液主体体系分别为:WFSD - 1 改性磺化钻井液体系,WFSD - 2 LBM - GLA 钻井液体系,WFSD - 3P 改性磺化钻井液体系,WFSD - 3 钾铵基聚磺钻井液体系,WFSD - 4 钾石灰聚磺钻井液体系。

4.1 改性磺化钻井液体系

WFSD - 1 及 WFSD - 3P 孔由于孔深相对较小,在钻井液主体体系上主要选用改性磺化体系,其主处理剂为 CMC、S - 1、SMC、X - 1、SAS,辅处理剂为 KHm、T 型润滑剂等,主要性能如为: ρ 1.1 ~ 1.6 g/cm³, FV 30 ~ 50 s, AV 20 ~ 30 mPa·s, PV 12 ~ 20 mPa·s, YP 6 ~ 8 Pa, Gel(1'/10') 2 ~ 3/5 ~ 10 Pa, FL 4 ~ 6 mL, 泥饼厚度 0.4 ~ 0.6 mm, pH 值 9 ~ 10, K_f 0.12 ~ 0.15。该体系具有较低的失水量,可达到 5 mL 以下,同时体系中靠加入 SAS 提高体系的封堵性,而 X - 1 具有成膜稀释特点聚合物,能起到良好的抑制性,因此,该体系再配合重晶石粉提高密度,能有效解决钻孔吸水膨胀缩径等问题。在 WFSD - 1 孔施工中采用该体系配制成高密度(> 1.6 g/cm³)、低失水、强润滑的综合性能,顺利通过了连续长达 30 多米的断层泥孔段,取得了良好的应用效果。

但该体系在应用中也出现了防塌抑制能力有限、固相含量较高、后期维护难度较大等缺点,因此,该体系在深孔使用中还应进行适当优化与处理。

4.2 LBM - GLA/钾铵基聚磺钻井液体系

在 WFSD - 2 和 WFSD - 3 孔钻井液主体体系设计应用中,主要根据 WFSD - 1 孔钻井液的使用情况,结合本钻孔的实际地层、孔深、钻进工艺等情况进行了进一步的优选及优化,分别采用了 LBM - GLA 钻井液体系和钾铵基聚磺钻井液体系。

(1) LBM - GLA 钻井液体系:其主要处理剂即为 LBM(低粘增效粉)、GLA(改性沥青)、CMC 和 GLUB 润滑剂,该体系具有低粘低切,低失水的特征,同时体系简单,容易维护和管理。在现场使用中根据实际情况选用辅处理剂,主要有 PAC - 141、K - PAM、NH₄ - HPAN 等。通过各种主辅处理剂的配合使用,可使得体系具有较低失水,封堵、抑制性均较强,同时还能保持较低的粘切,流变性能优越。主要性能控制范围如下: ρ 1.1 ~ 1.35 g/cm³, FV 25

~ 35 s, AV 10 ~ 25 mPa·s, PV 12 ~ 20 mPa·s, YP 8 ~ 10 Pa, Gel(1'/10') 2 ~ 4/5 ~ 12 Pa, FL 3 ~ 5 mL, 泥饼厚度 0.3 ~ 0.5 mm, pH 值 9 ~ 10, K_f 0.10 ~ 0.13。在 WFSD - 2 孔施工中,采用该体系顺利通过了各种破碎复杂地层,并完全满足深孔中采用孔底动力驱动取心钻具施工的特殊要求,钻进孔深达 2200 余米。

(2) 钾铵基聚磺钻井液体系:该体系是在改性磺化钻井液体系的基础上进行优化其抑制封堵性能后得来的,其主处理剂为 CMC、S - 1、SMC、SAS,辅处理剂为 KHm、K - PAM、NH₄ - HPAN、T 型润滑剂、重晶石粉等。其主要性能控制范围如下: ρ 1.05 ~ 1.55 g/cm³, FV 35 ~ 55 s, AV 25 ~ 35 mPa·s, PV 17 ~ 28 mPa·s, YP 8 ~ 1 Pa, Gel(1'/10') 2 ~ 3/8 ~ 12 Pa, FL 3 ~ 5 mL, 泥饼厚度 0.4 ~ 0.6 mm, pH 值 9 ~ 10, K_f 0.10 ~ 0.13。通过优化后,该体系防塌抑制性能进一步提高,主要在 WFSD - 3 孔的深部孔段使用,取得了良好的效果,曾在大直径取心钻进中裸眼长度达 780 m。

上述 2 种钻井液体系均是在复杂地层钻进最基础的低失水性能要求上进一步强化包被抑制性和封堵防塌性能,主要手段即是通过向钻井液中引入高分子聚合物,提高 K⁺、NH₄⁺ 含量,增加体系的包被抑制性能;同时加大沥青类处理剂含量,主要采用 GLA 与 SAS 加强对破碎地层的封堵,提高防塌能力。

但上述 2 种体系在使用中同样也出现一些问题,主要表现在抗污染能力较弱,如钙侵、二氧化碳侵、粘土侵等。在 WFSD - 2 及 WFSD - 3 孔均出现钻水泥塞钙侵后性能变化较大,处理困难等;同时在钻遇长段断层角砾岩、泥岩等破碎地层时,整体抑制防塌性能还应进一步提高。

4.3 钾石灰聚磺钻井液体系

该体系主要应用于 WFSD - 4 孔,它是本项目的最后一个钻孔,同时也是设计最深、口径最大、轨迹最复杂的一个钻孔。因此,整体施工难度相比其它钻孔还要大得多。

在钻井液体系选择上也主要是在前两个阶段的体系使用中进行不断分析与总结后进行再次优化,本体系的主处理剂为 KCl、CaO、CMC、SMP - 2、SMC、K - PAM、NH₄ - HPAN、FT - 342、FKRH、QS - 1、KOH,辅处理剂为 SXP - 2、SPNH、JN - A、XC、SAK - 1、白油、SP - 80、重晶石粉等,其主要特点有:(1)通过引入 Ca²⁺ 使得体系中的粘土颗粒处于适度

絮凝的粗分散状态,具有较强的抑制、抗污染能力;(2)加入足量的KCl(3%以上)以保证体系的强抑制性;(3)通过QS-1(超细碳酸钙)与FT-342(改性沥青)的“刚柔并施”配合封堵地层微裂隙,提高破碎弱胶结地层的防塌能力,同时还有助于形成更为薄而致密的泥饼;(4)在润滑剂上主要选择FKRH、白油、废机油等严格控制泥饼粘滞系数低于0.1,并随着该类润滑剂加量增大,还可以转换为钾石灰—混油钻井液体系,使其抑制防塌能力大大提高。其主要性能如下: ρ 1.20~1.70 g/cm³, FV 30~65 s, PV 20~30 mPa·s, YP 8~12 Pa, $Gel(1'/10')$ 2~4/7~12 Pa, FL 3.0~4.0 mL, 泥饼厚度 0.4~0.5 mm, pH 值 9~10, K_r 0.07~0.09。

在WFSD-4孔的应用中,曾使用该体系钻遇长达200 m的水泥塞,但钻井液性能除pH值略有升高外其他基本上无任何变化;同时在面对二氧化碳侵蚀时该体系性能也能始终保持稳定;此外,在二开阶段1444.55 m处下入1435 m的活动套管串,再向套管外环空内注入环空充填液(井浆+0.6%废机油+0.17%SP-80+4.67%FKRH),经过近14天的取心钻进后顺利起拔出套管,在如此复杂的地层以及长裸眼(933 m)、定向斜孔(最大顶角32.9°)的条件下能成功拔出,充分表明了该钻井液体系优良的防塌性及润滑性。

因此,根据WFSD项目4种主要钻井液体系的演化过程及现场使用看来,各体系都取得了良好的应用效果,但也看出每种体系都有其优缺点及适用范围,如改性磺化体系配方与配制方法相对最简单,成本也最低,但其使用效果有限;而钾石灰聚磺钻井液体系配方与配制方法都相对复杂得多,成本也最高,但在复杂地层以及复杂孔身结构条件下使用效果却最优越。因此,每种体系的选择都应与本钻孔的实际情况相结合。

5 几点体会及建议

5.1 钻井液应用关键在维护

钻井液体系不只是一个配方,在钻进过程中,其性能会因地层污染物的侵入、钻井液材料的消耗、失效等因素发生变化,这就需要及时对其进行维护,以满足设计要求;同时对于在复杂地层钻探施工中,更重要的是及时根据地层情况、钻探工艺变化等而对钻井液性能采取有效的处理措施。因此,只有钻井液体系在使用中良好维护,灵活应用才能真正达到其功效。

5.2 合理采用固相控制技术

固相控制技术对钻井工程的影响不言而喻。WFSD项目在施工中钻进方法与工艺较多,钻遇地层变化较大,产生的岩粉及粒径大小不同,因此,在施工中采用何种的固控设备及技术显得尤为重要。如WFSD-3孔中曾对电镀金刚石钻头砂岩地层取心钻进中进行岩粉粒度分析,其主要分布范围为2~200 μm ,其中小于100 μm 的约占总固相颗粒的90%,因此,针对该固相分布特点应主要采用高速离心机进行分离。同样,针对复合片钻头、牙轮钻头等由于特殊的碎岩方式产生的岩粉粒径较大,则应以振动筛和除泥器为主进行固相分离,因此,在现场应尽量选择与之适合的固控设备及根据钻井液性能变化等采取科学合理的固控措施。

5.3 科学控制钻井液密度

密度是钻井液各性能中最重要的参数之一,它的主要意义在于平衡地层压力,保证孔壁稳定,过高或过低都易造成孔壁失稳。然后在地质钻探中往往没有有效的方法确定合适的钻井液密度,都是凭感觉进行密度调整,这就造成了钻井液处理的“滞后性”,一旦发生事故或孔壁失稳后再逐渐进行密度调整,这样将会加大钻井液的处理难度,同时也会降低其处理效果。如在WFSD-4孔2200 m以深孔段地应力较高,地层蠕变强烈,钻探事故频发,但钻井液密度在1.3~1.71 g/cm³之间多次调整以及配合其他处理措施,仍未解决问题,到底多大的密度合适以及密度对该孔段孔壁稳定的影响因素有多大到现在仍然未知。因此,在复杂地层也应该借鉴石油钻井经验进行地层压力测试等其他方法以确定合理的钻井液密度,实现真正的平衡压力钻进。

5.4 强化钻井液技术管理工作

每一个钻探人员都深知钻井液对钻探施工的重要性,因此,在钻井液应用中也更应该重视钻井液的技术管理,以充分发挥它对钻探的作用。在WFSD项目中的钻井液技术管理由专业技术人员24 h负责,主要工作包括根据地质及钻井设计做出钻井液方案设计,并在现场负责配制与维护、负责材料的申报、材料质量的监督与管理、固控设备的使用与维护、以及各开次钻井液技术总结、完井总结等。此外,钻井液性能做到间隔8 h监测(特殊情况加密测试),随时了解性能变化情况,并及时做出调整方案;同时与钻井工程方随时沟通,以便对孔底情况进行正确的判断。因此,严格钻井液技术管理是