

# 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1) 断层泥孔段泥浆体系的研究与应用

李之军<sup>1</sup>, 陈礼仪<sup>1</sup>, 贾 军<sup>2</sup>, 尤建武<sup>3</sup>, 曹其友<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 3. 四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队, 四川 峨眉山 614200)

**摘 要:**汶川地震断裂带科学钻探项目一号孔(WFSD-1)钻遇了 30 多米的断层泥。针对断层泥钻探的主要问题, 对断层泥钻探泥浆体系进行了研究与应用, 形成了具有高密度、低失水、低渗透、润滑减阻特点的泥浆体系, 再加上重泥浆体系对地应力的平衡作用, 成功地解决了断层泥的钻进取心问题, 为顺利完成钻孔施工任务奠定了坚实的基础。

**关键词:**科学钻探; 汶川地震断裂带; 断层泥; 泥浆体系

**中图分类号:** P634.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2009)12-0013-03

**Research and Application of Drilling Fluid System for Fault Gouge Section of the Hole WFSD-1 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project** / LI Zhi-jun<sup>1</sup>, CHEN Li-yi<sup>1</sup>, JIA Jun<sup>2</sup>, YOU Jian-wu<sup>3</sup>, CAO Qi-you<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 3. 403 Geological Brigade of Sichuan Exploration and Development Bureau of Geology and Mineral Resources, Emeishan Sichuan 614200, China)

**Abstract:** The first drilling hole of the Wenchuan earthquake fault science drilling project (WFSD-1) experienced up to more than 30 meters of the fault gouge drilling process. According to the research and application, the drilling mud system with high density, low water loss, low permeability, lubrication and resistance reducing was formed, and together with the equilibration by ground stress, coring in fault gouge was successfully made, which was the basis of the successful completion of the first hole construction in the Wenchuan earthquake fault scientific drilling.

**Key words:** scientific drilling; Wenchuan earthquake fault; fault gouge; drilling fluid system

四川汶川“5·12”特大地震发生后,为研究地震断裂和地震机理并捕捉余震信息,我国迅速组织实施了汶川地震断裂带科学钻探项目。该项目一号孔(WFSD-1)在孔深 585 m 时钻遇主断裂带,钻遇了 30 多米的断层泥,解决断裂带中断层泥孔段的钻进取心问题成为该项目成功与否的关键。

## 1 断层泥的形成

断层泥的形成与断裂带有着密切的关系,很多学者从不同的角度对断层泥成因的研究表明<sup>[1]</sup>,它是由断层运动时断层附近破碎的岩石在摩擦滑动引起的高温下蚀变而形成的。也就是说,断层泥的形成过程是断层岩石角砾化碎屑物由粗变细的过程。在环境条件不变的情况下,碎屑物的粒度将随着断层的滑移逐渐变小,一般不会随着断层位移的增大

而无限变小,而是趋于某一极值后逐渐稳定。新鲜断层泥的粒度范围较宽,最细小的颗粒直径约为 0.01 μm。这也告诉我们,在强烈地震条件下,断层泥的特点是不能用粘土矿物学的理论简单地加以解释的。从汶川地震断裂带科学钻探一号孔内取出的断层泥如图 1 所示。

## 2 断层泥的主要矿物成分

对取出的断层泥带的岩心进行了 X 射线粉晶衍射测试,表明其主要矿物成分为伊利石、石英和绿泥石,各矿物成分比例如表 1 所示。

断层泥中的主要粘土矿物是层状硅酸盐(如:高岭石、伊利石、绿泥石、蒙脱石等)和层链状硅酸盐类(如:海泡石等)。从粘土矿物学的角度来看,伊利石的原生矿物为白云母和黑云母,晶体非常细

收稿日期:2009-11-20

项目基金: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:李之军(1984-),男(汉族),四川阆中人,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, lizhijun0613@126.com;陈礼仪(1957-),男(汉族),四川郫县人,成都理工大学教授,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。

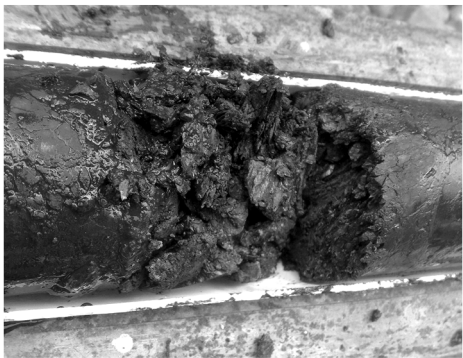


图 1 从 WFSD - 1 孔取出的断层泥

表 1 WFSD - 1 孔断层泥的主要矿物成分 /%

蒙脱石	伊利石	绿泥石	石英	长石	方解石	角闪石
0	56	13	31	0	0	0

注:(1)实验条件:理学 DMAX - 3C 衍射仪,CuKα、Ni 滤光;(2)样品中含有较多的未知未结晶物,结果中每种矿物的百分含量只是结晶矿物之间的相对含量。

小,是一种 2: 1 型的矿物,由于晶格中镶嵌钾离子,不易水化膨胀。绿泥石通常富含镁铁矿物,晶层是由三层型晶片和一层水镁石晶片交替组成的,与云母极其相似,一般不易水化膨胀。石英为原生矿物,抗风化能力强,不水化。

3 断层泥孔段钻探的主要问题

3.1 高地应力条件下钻孔缩径

地震断裂带的岩层往往处于一种高应力状态。当钻孔形成后,破坏了岩层内部应力平衡状态,在地应力的作用下,断层泥发生塑性流动,导致钻孔严重缩径是必然的现象。

3.2 粘土矿物水化膨胀缩径

从取出的断层泥粘土矿物成分的分析可知,伊利石和绿泥石是其主要矿物组成,约占 70%。伊利石的晶格构造与蒙脱石类似,但是其晶格不易水化膨胀,原因在于晶层间的钾离子与晶层间的负电荷之间的静电引力较强,水分子不易进入晶层间;绿泥石晶层是由三层型晶片和一层水镁石晶片交替组成的。

研究表明,在深部地层条件下,伊利石和绿泥石一般以降解的形式出现。特别在高地应力条件下,伊利石矿物中的钾离子从晶层间突出,为水分子进入晶层提供了有利的条件,使得伊利石发生晶层间水化和晶格膨胀;绿泥石则是由于其中的一部分水镁石被除去而会发生一定程度的晶层间水化和晶格膨胀,这就是绿泥石的降解。由此看来,这种由伊利石和绿泥石占主要成分的断层泥在钻进过程中极易

水化膨胀,造成钻孔缩径。

事实也证明,从孔内取出的直径为 66 mm 的岩心,1 h 后就膨胀到 73 mm。此外,半合管绳索取心钻进时,由于岩心的膨胀,将半合管胀开,大于钻杆内径,造成内管无法打捞。

3.3 断层泥的强粘滞性

在钻进过程中,由于钻具的高速旋转与断层泥孔壁表面发生强烈的剪切作用,使得这部分断层泥颗粒越来越细,比表面积增大,结果进一步导致断层泥粘滞力增强和摩擦阻力增大。特别是在高地应力条件下,断层泥更容易粘附在钻具上,对钻具形成强烈的粘滞作用,使得钻具活动受阻,造成严重的粘滞卡钻。

4 断层泥钻探泥浆技术的思路与对策

4.1 压力平衡钻进

在高地应力条件下维护孔壁的稳定,抑制断层泥不发生塑性流动,关键就要维持孔内原有的压力平衡状态。提高泥浆的密度,增大液柱压力无疑是解决断层泥钻孔缩径的最主要思路。但如何适应金刚石钻进特点,在低固相泥浆体系的基础上维持加重泥浆体系的稳定,既使泥浆的液柱压力与地层压力相平衡,又能保证泥浆体系的低粘度和稳定性,从而实现高地应力条件下的压力平衡钻进和安全钻进,这是面临的首要问题。

4.2 低失水低渗透泥浆体系

泥浆的失水量并实现低渗透是解决断层泥遇水膨胀的关键。

对聚合物降失水机理的研究表明,高分子链与粘土颗粒的桥联作用,在泥浆体系内部形成比较稳定的空间网架结构,粘土颗粒更加细化均匀分散,泥饼结构更加致密,从而有效地降低了泥浆的失水量。此外,由于常用高分子聚合物降失水剂分子链上具有强水化基团,会使粘土颗粒的水化膜增厚,形成粘度较高的极化水,在阻止泥浆中自由水滤失实现降失水的同时,也会使泥浆体系的粘度不同程度的升高。实践表明,具有增粘作用的高分子聚合物降失水剂不太适合小口径金刚石绳索取心钻进工艺要求。因此,对于有加重特点的高密度低失水泥浆体系要特别注意降失水剂的选择,整个泥浆体系处理剂的选用应以不增粘为宗旨。

为此,专门开发了适应于小口径金刚石钻进的具有稀释成膜特点的降失水处理剂。这种处理剂以其特有的分子结构,可以进入断层泥的孔隙,并能产

生强烈的吸附作用,在孔壁快速形成超低渗透薄膜。低失水与低渗透的有机结合,有效地抑制了断层泥地层因水化膨胀而导致的钻孔缩径。

4.3 润滑防卡

为了降低钻杆和钻具与断层泥地层孔壁的摩擦阻力,必须使泥浆体系具有较强的润滑减阻特性。同时为了进一步避免发生孔内卡钻事故,或发生卡钻事故能较好地实现钻具的解卡,泥浆体系还应该有防卡解卡的功能。

T 型润滑防卡剂是一种具有润滑和防卡双重功效的阴离子型表面活性剂,它的分子链上带有 2 个憎水基支链。在水中溶解后,基团能在钻杆、钻具和孔壁表面定向致密排列,并产生强烈的表面吸附,形成一层牢固的润滑膜,大大地降低界面的摩擦系数。

T 型润滑防卡剂的另一个特点是具有极强的渗透能力,能快速沿着孔壁和钻具之间的界面向内渗透,在形成润滑膜的同时也形成了表面活性剂摩擦层,这就使得孔壁和钻具之间不太容易被卡死,再配合其它工艺措施,可较好地实现防卡功能。

5 断层泥孔段钻进泥浆体系的优化配方

从上面的分析可以知道,要求断层泥孔段钻进泥浆体系既要实现加重稳定、低粘度,又要具有低失水低渗透性并具有润滑防卡功能,同时还要求泥浆体系的密度在一定范围内可调。

经过泥浆体系处理剂的甄选和大量的室内试验,优选出了不增粘聚合物降失水剂 S-1 和具有稀释成膜特点的处理剂 X-1,配合其它泥浆处理剂,得到了断层泥孔段钻探泥浆体系基浆的优化配方:4%粘土+0.5% CMC+2% S-1+3% 磺化沥青+1% SMC+0.5% X-1+0.5% T 型润滑防卡剂。

上述基浆的密度一般控制在 1.03 g/cm<sup>3</sup> 以下为宜,其它性能见表 2 所示。

表 2 断层泥孔段泥浆基浆基本性能要求

失水量 /[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮 厚度 /mm	漏斗 粘度 /s	表观粘度 /(mPa·s)	塑性粘度 /(mPa·s)	动切力 /Pa	初切力 /Pa	终切力 /Pa
6	0.3	21	11.5	9	2.6	1	1.5

在异常高压地层实现压力平衡钻进,必须得在泥浆中加入加重剂,提高泥浆体系的密度。WFSD-1 孔断层泥孔段加重泥浆体系是加入重晶石实现的。表 3 是以 1 L 基浆为例,加入不同质量的重晶石,配制成的不同密度的加重泥浆体系,其性能控制见表 3 所示。

表 3 加重后的泥浆性能

重晶石 加量 /g	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	失水量 /[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮 厚度 /mm	漏斗 粘度 /s	表观粘度 /(mPa·s)	塑性粘度 /(mPa·s)	润滑 系数
500	1.45	4.6	0.8	28	24.5	18	0.20
630	1.58	4.4	1.0	30	28.5	22	0.24

将上述 2 种不同密度的泥浆分别静止 24 h 后观察,均没有发生沉降现象,证明该加重泥浆体系具有良好的沉降稳定性。

对该泥浆体系进行渗透性对比实验,取 3 支 200 mL 的量筒,分别装 100 mL 的普通河砂,河砂为一般建筑中砂,细度模数为 3.0~2.3,平均粒径为 0.5~0.35 mm,分别编号为 1、2、3。再分别取 100 mL 的高密度低失水低渗透泥浆、100 mL 的优化基浆、100 mL 的普通聚丙烯酰胺不分散低固相泥浆装入 1、2、3 号量筒中,静止 24 h 后观察泥浆渗入河砂中的情况进行渗透性对比试验。试验结果表明,加重的低失水低渗透泥浆在河砂中的 24 h 的渗透量仅为 10 mL,优化基浆的渗透量为 32 mL,一般的普通聚丙烯酰胺不分散低固相泥浆则完全渗透到量筒底部,这一结果证实了该泥浆体系具有的良好低渗透特性。

6 现场应用与效果

WFSD-1 孔钻进至 585 m 进入断层泥地层后最突出的问题就是钻孔缩径,曾先后发生 3 次恶性卡钻事故,事故钻具均被埋在孔内,不得已只得进行侧钻施工,绕过事故孔段。采用普通的抑制性泥浆体系效果不佳。经过反复论证、专家会商,建议采用以高密度、低失水为特点的泥浆体系。经反复实验研究,形成了具有高密度低失水低渗透润滑减阻特点的泥浆体系。将上述泥浆体系应用于汶川地震断裂带科学钻探一号孔断层泥孔段取心钻进,取得了立竿见影的效果,钻孔缩径得到了有效的控制,卡钻事故未再发生,钻进施工得以正常进行。

在实际使用过程中,泥浆的密度是根据孔内反馈情况逐渐调高的,泥浆密度从 1.3 g/cm<sup>3</sup> 开始,最后调到了 1.6 g/cm<sup>3</sup>,一直维持了正常钻进。值得一提的是,在高密度低失水泥浆体系使用过程中,发生过一次卡钻现象,在回次钻进结束时提钻受阻,钻具离开孔底 0.4 m 时被“抱死”,开水不通,开车回转不动。由于泥浆体系具有润滑防卡性能,采用诸如立轴向上顶、下压、反复活动、开车强力提拔等其它

(下转第 19 页)

浆的密度差。

替浆用泥浆密度的确定:

按照泥浆泵能够达到的最高压力(8 MPa)测算,高出的 0.2 MPa,需要靠提高泥浆当量密度来平衡。即: $0.2/800 \times 100 = 0.025 \text{ g/cm}^3$ 。所以,泥浆的密度应该在原有的基础上提高  $0.025 \text{ g/cm}^3$ ,达到  $1.575 \text{ g/cm}^3$ 。

为了安全起见,留有一定的泵压余量,在正式下入套管前,将泥浆密度提高到  $1.65 \text{ g/cm}^3$ ,按式(3)、(4)和(5)估算的替浆泵压力为 7.4 MPa,在泥浆泵的最高承压条件内,能够满足固井作业要求。

在套管下入过程中,在断层泥缩径孔段反复扫孔,同时采用 BW320 型泵大排量循环,从下入到孔深 498 m 起每扫孔 50 m 停钻循环 10~20 min。泥浆中加入高效润滑剂,以减小套管下入的摩擦阻力。

在水泥注入过程中,控制水泥浆密度在  $1.70 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$ ,注入总量  $2.8 \text{ m}^3$ ,替浆  $3.575 \text{ m}^3$ 。由于泵的能力所限,替浆后期采用低挡。当水泥浆返出井口时,最高替浆泵压力达到 8.0 MPa,从而完成了 Ø89 mm 套管下入和小间隙固井作业,达到了预期目的。

## 5 结论

WFSD-1 孔是汶川地震科学钻探 4 口井的第一口,在该地区没有可以借鉴的地质和钻探技术资料,施工过程中只能在探索中发现问题,及时解决问题。从该孔的工程实践中,探索了小间隙固井工艺,并获得成功。

小间隙固井是固井作业的一大难题,特别是岩心钻探施工,钻孔直径小,下入套管后环状间隙更小,通常配备的泥浆泵压力一般不超过 10 MPa。对小间隙固井作业,在试下套管同时测定不同孔深条件下的循环泵压,利用岩心钻探常用的泥浆泵,结合调整泥浆密度,可以达到预期的固井目的。

## 参考文献:

- [1] 刘硕琼,谭平,等. 小井眼钻进技术[M]. 北京:石油工业出版社,2005.
- [2] 王达,张伟,张晓西,等. 中国大陆科学钻探工程科钻—井钻探工程技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [3] 林强,郑力会,等. 高温高压小井眼尾管固井技术应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(11).

(上接第 15 页)

工艺措施,最后成功将钻具提离缩径地段,所幸没有造成事故。此后直到完全钻穿断层泥地层,孔内没有发生任何缩径卡钻事故和其他孔内事故。

WFSD-1 孔的钻探实践充分证明,在高膨胀强缩径的断层泥孔段采用高密度低失水抑制性泥浆体系的技术思路是完全正确的,通过反复试验研究形成的低失水低渗透体系强化了泥浆的抑制性能,再加上重泥浆体系对地应力的平衡作用,完全可以满足汶川地震断裂带断层泥孔段钻进泥浆性能的要求,是一次成功的科学尝试。

## 参考文献:

- [1] 邵顺妹. 断层泥研究现状和进展[J]. 高原地震,1994,(3).

- [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] 樊腊生,王达. 科钻—井钻探施工技术路线和钻探施工概述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7).
- [4] 朱永宜,王稳石. 松科—井(主井)取心钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7).
- [5] 朱文鉴,王达. 大陆科学钻探工程科钻—井钻探现场施工决策特点分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1).
- [6] 贾军. 中国大陆科学钻探先导孔及扩孔钻井泥浆工艺[J]. 探矿工程,2003,(3).
- [7] 贾军,史冬梅. 中国大陆科学钻探 CCSD-1 井钻井液流变模式的选择与循环压力降[J]. 探矿工程,2003,(1).
- [8] 曾祥熹,陈志超. 钻孔护壁堵漏原理[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [9] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 北京:中国石油大学出版社,2005.
- [10] 鲁凡. 润滑钻井液[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1988.

展示科研成果 宣传高新技术 交流施工经验

欢迎赐稿本刊

请直接登录 [www.tkgc.net](http://www.tkgc.net) 在线投稿