

# 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1) 小间隙固井工艺的研究与实践

贾军<sup>1</sup>, 樊腊生<sup>2</sup>, 胡时友<sup>2</sup>, 赵远刚<sup>2</sup>

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

**摘要:**介绍了汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 孔在破碎和严重缩径的断层泥地层采用的小间隙固井工艺, 以及利用试下套管测定的泥浆循环压力降, 结合泥浆泵最高承受压力确定固井工艺参数的方法。

**关键词:**科学钻探; 汶川地震断裂带; 小间隙; 固井

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)12-0016-04

**Small Annulus Cementing Technology in the Hole WFSD-1 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/JIA Jun<sup>1</sup>, FAN La-sheng<sup>2</sup>, HU Shi-you<sup>2</sup>, ZHAO Yuan-gang<sup>2</sup>** (1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Exploration Technology of CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** This article discussed the small annulus cementing technology, which was used for the hole of WFSD-1 of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project in broken formation and fault gouge tight hole and introduced how to determine cementing parameters by combining the mud circulation pressure drop during test casing with the maximum bearing pressure of mud pump.

**Key words:** scientific drilling; Wenchuan earthquake fault; small annulus; cementing

## 0 前言

2008年5月12日在我国四川省发生了震惊世界的汶川特大地震, 给人民的生命财产造成巨大的损失。地震发生后, 快速实施汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)是认识地震发生机理、对余震进行有效监测和研究地震断裂带的极佳机遇。

WFSD-1孔于2008年11月6日正式开钻, 是汶川地震科学钻探工程设计的4个钻孔之一, 位于都江堰市虹口乡, 设计孔深1200 m, 顶角10°, 方位角136°, 终孔直径76 mm。通过招标确定由四川省地勘局四〇三地质队承担施工任务。为满足地震科学研究的需要, 要求全孔取心, 保持岩心的原位结构。WFSD-1孔钻遇的主要地层在585 m以浅孔段为火山岩, 岩层非常破碎(如图1所示); 585 m以深为三叠系须家河组沉积岩, 其顶部有30 m左右的断层泥, 该层位也是地震研究的主要对象。断层泥的物理力学性质主要表现为遇水膨胀、极强的塑性和粘性, 在地应力作用下发生塑性流动。当地应力解除后, 形成的岩心具有极强的膨胀性, 直径线膨胀

率约10%(如图2所示), 给钻探施工带来极大的困难。



图1 地层裂隙极其发育的岩心样品



图2 断层泥孔段的岩心样品

龙门山断裂带是历史上多次地震的产物, 地下岩层中断裂带十分发育, 特别是断层泥的厚度十分罕见, 在WFSD-1孔的施工中, 钻遇了几十米厚的断层泥。这对于地震的研究, 无疑是提供了非常珍

收稿日期: 2009-11-20

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: 贾军(1956-), 男(汉族), 黑龙江依安人, 北京探矿工程研究所副所长、教授级高级工程师, 汶川地震科学钻探工程中心副总工程师、钻井工程部主任, 探矿工程专业, 博士, 从事科学钻探工程等工作, 曾担任中国大陆科学钻探工程(CCSDB)现场指挥部调度室主任, 北京市海淀区学院路29号探工楼307室。

贵的实物资料,但对于钻探施工来说,却是一个巨大的挑战。断层泥是地下岩体在震时断裂、在滑动摩擦时产生的高温下发生矿物蚀变而生成。经成都理工大学检验,断层泥中主要矿物成分为伊利石 56%、绿泥石 13% 和石英 31%,具有吸水膨胀、在应力的作用下发生塑性流动和具有极高的粘滞性。由于地震后在地下岩层中存在着较强的应力异常,钻孔形成后,孔壁表面形成自由面,在地应力作用下,断层泥产生朝着钻孔方向的塑性流动,使钻孔直径变小,造成钻孔严重缩径,钻具非常容易被“抱死”。由于缩径,WFSD-1 孔在孔深 590~625m 孔段连续发生 3 次卡钻、钻具拉脱和拉断事故,最终导致侧钻。小间隙孔身结构加之地层严重缩径,对套管的下入和固井工艺提出了严峻的挑战。分析表明,采用套管封隔上部破碎孔段和断层泥缩径孔段是保证下部施工安全的关键。在小间隙孔身结构固井中,套管串结构设计、下入工艺和固井工艺 3 个环节都是非常重要的,任何一个环节出现问题,都会导致固井失败。在 WFSD-1 孔的 4 次固井作业中,有成功的,也有失败的。

## 1 孔身结构与固井要求

根据 WFSD-1 孔设计,要完成 4 次小间隙固井,各孔段钻孔直径、套管直径和下入深度等参数详见表 1。

表 1 WFSD-1 孔套管程序表

下入次序	钻孔直径/mm	套管外径/mm	下入深度/m	环空间隙/mm
1	150	146	32.00	2
2	132	127	166.88	2.5
3	114	108	498.00	3
4	95	89	779.74	3

施工设计要求所有套管必须采用水泥封固,水泥浆返出孔口。在 4 次固井作业中,尽管  $\varnothing 140$  mm 套管环空间隙小,但下入深度浅,固井比较顺利。封固  $\varnothing 127$  mm 套管时,由于循环不通,没能按照钻孔结构设计达到固井要求, $\varnothing 108$  mm 和  $\varnothing 89$  mm 均实现了水泥浆返出孔口。

## 2 小间隙固井的难点

套管串结构设计和下入工艺是固井成败的关键。特别是小间隙井身结构的固井工艺设计尤为重要。WFSD-1 孔钻遇地层上部为破碎严重的火山岩,涌水量大,井口水头高度约 5 m,在钻进中时常

出现坍塌掉块;中部有近 30 m 厚的断层泥,钻孔形成自由面后,在震后残余地应力的作用下,发生蠕变流动,钻孔缩径严重,采用密度  $1.07 \text{ g/cm}^3$  的泥浆,10 h 后钻孔会自动封闭;下部为破碎严重的沉积砂岩,期间夹有数个薄层泥岩,也存在缩径问题。鉴于地震科学钻探的特殊性,岩心采取质量必须保持原位结构,加之受设备和成本的影响,不可能施工较大的孔径,针对复杂的地层,必然要设计较多的套管层次,导致套管的环空间隙较小。由于物探和长期观测的要求,各层套管必须采用水泥封固,给固井施工带来极大的困难。

从固井工艺参数考虑,随着粘度和切力的增大、环空间隙的减小、环空返速增大、水泥浆与替浆用泥浆密度差增大,都会造成环空流动循环阻力增大,泵压升高;从固井设备考虑,为了满足固井工艺的特殊要求,固井所用注浆泵的压力往往比泥浆泵要高得多。但由于岩心钻探施工配备的泥浆泵一般不大于 10 MPa,因此给深孔、小间隙、长套管固井作业工艺提出了更为苛刻的要求。一旦水泥浆返不出孔口,固井事故是不可挽救的。既要考虑固井质量,又要照顾到设备能力;既要考虑施工成本,又要将风险降到最低。而套管程序是不可变更的,只有从固井工艺方面采取措施,精心设计,精心施工,利用现有的条件,力求达到理想的效果。

## 3 $\varnothing 108$ mm 套管固井

$\varnothing 108$  m 套管与孔壁的环状间隙仅有 3 mm。为保证套管能够顺利下到设计深度,在正式下套管前,采用 20~30 m 长套管串,下接通孔钻头试下,每下入 100~150 m 循环一次,详细记录各项参数(深度、泥浆密度、循环排量和循环压力),根据这些参数,设计固井水泥浆密度和替浆密度,并估算替浆压力。

上述过程对岩心钻探小间隙固井非常重要。因为岩心钻探配备的泥浆泵通常为 8~10 MPa。现场配备 BW-150 型和 BW-320 型泥浆泵各 1 台,最高压力为 8~10 MPa。在小间隙条件下固井,循环阻力非常大,再加上替浆时水泥浆与泥浆的密度差,预测不准会因泥浆泵的压力不足导致固井失败。

为了安全顺利下入套管和完成固井施工,采用试下套管并估算固井的循环压力的过程是非常重要的。

试下套管和循环压力的估算:

在下入  $\varnothing 108$  mm 套管和固井作业中,首先采用的试下套管串结构为: $\varnothing 111$  mm 通井钻头 + 28.31

m Ø108 mm 套管 + 1.44 m Ø108 mm 取粉管 + Ø60 mm 钻杆。通井并清除孔底岩屑。在试下过程中,分别在孔深 350 m 和孔底(498 m)按 78 L/min 排量循环,同时测定不同深度条件下的循环压力为:孔深 350 m 为 2 MPa;孔深 498 m(孔底)为 2.8 MPa。

根据记录的数据,增加 148 m Ø60 mm 钻杆,循环压力增加 0.8 MPa。则单位长度钻杆的循环压降为:

$$\begin{aligned} P_p &= \Delta P_p / \Delta L_p \\ &= 0.8 / (498 - 350) \\ &= 0.0054 \text{ MPa/m} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P_p$ ——单位长度钻杆柱的循环压力,MPa/m; $\Delta P_p$ ——钻杆柱加长增加的循环压力,MPa; $\Delta L_p$ ——钻杆柱增加的长度,m。

地面管线压力降约为 0.1 MPa。则单位长度 Ø108 mm 套管的循环压力降为:

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{P_m - P_p L_p - 0.1}{L_c} \\ &= \frac{2.8 - 0.0054(498 - 28.31 - 1.44) - 0.1}{28.31 + 1.44} \\ &= 0.00576 \text{ MPa/m} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $P_c$ ——单位长度套管的循环压力,MPa/m; $P_m$ ——试下套管时的循环泥浆压力,MPa; $L_p$ ——试下钻杆柱长度,m; $L_c$ ——试下套管柱长度,m。

在 Ø114 mm 孔内下入 Ø108 mm 套管 498.00 m 条件下,估算套管下入后的循环压力约为:

$$\begin{aligned} P_1 &= L_c P_c \\ &= 0.00576 \times 498 \\ &= 2.87 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3)$$

再考虑到采用 0.5 水灰比(密度 1.85 g/cm<sup>3</sup>)的水泥浆固井,比钻井泥浆密度(1.07 g/cm<sup>3</sup>)高 0.78 g/cm<sup>3</sup>。在 500 m 孔深条件下,在替浆的过程中,当水泥浆返出孔口时的静压差约为:

$$P_2 = 498(\rho_c - \rho_m) / 100 = 3.88 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中: $\rho_c$ ——水泥浆密度,g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_m$ ——泥浆密度,g/cm<sup>3</sup>。

此时,估算替浆泵的最高压力为:

$$\begin{aligned} P_{\max} &= P_1 + P_2 + 0.1 \\ &= 2.87 + 3.88 + 0.1 \\ &= 6.85 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5)$$

依据上述估算结果,现场配备的泥浆泵基本可以满足固井替浆的压力要求。采用这种估算方法没有考虑到泥浆与水泥浆的流变性能差异、钻孔局部孔径的变化和水泥浆密度不均匀以及替浆排量的变

化。在固井作业中,实际循环压力降与估算结果会存在一定的差距,可根据泥浆承压情况调整排量,控制在泥浆泵的许可压力范围之内。

在正式下入 Ø108 mm 套管时,在套管柱底部接有外径与套管外径一致的套管鞋,侧面开有足够的侧水眼以保障流体通过。采用密度约 1.85 g/cm<sup>3</sup> 的水泥浆,以 78 L/min 排量注入 2.3 m<sup>3</sup> 后,用密度 1.07 g/cm<sup>3</sup> 泥浆替浆。当水泥浆返出孔口时,替浆泵压力最高达到 7.0 ~ 7.5 MPa,没有超过注浆泵的安全压力,圆满完成了这次小间隙固井作业。

#### 4 Ø89 mm 套管固井

按照工程设计,穿过断层泥地层后要下入 Ø89 mm 套管约 800 m。因为从 585.75 ~ 693.37 m 为断层泥膨胀缩径严重孔段,下套管前,采用 Ø96 mm 带导向金刚石钻头 + 5.2 m 单管钻具 + Ø60 mm 钻杆对该孔段反复扫孔,确保上下通顺为止。

Ø89 mm 套管固井存在的最大难度不仅是下入深度比 Ø108 mm 套管深,而且要通过缩径严重的断层泥孔段,在下入的过程中随时有可能将套管“抱死”,导致下套管事故。另外,现场配备的泥浆泵最大压力仅有 8 ~ 10 MPa,按照封固 Ø108 mm 套管的条件,远远满足不了替浆的要求。在不更换设备的条件下,要完成 800 m 深、环空间隙仅有 3 mm 的 Ø89 mm 套管固井,提高替浆用的泥浆密度是降低替浆压力的唯一出路。

正式下套管前,仍采用试下套管的办法,套管串结构为:Ø95 mm 套管钻头 + 1 根 Ø89 mm 花管(2.57 m) + 50 根 Ø89 mm 套管(239.17 m) + Ø60 mm 钻杆。以 78 L/min 排量循环,记录不同孔深的排量和泥浆泵压为:在孔深 500 m 时泵压为 3.2 MPa;在孔底(805 m)时泵压为 4.7 MPa。增加 305 m Ø60 mm 钻杆,循环压力增加约 1.50 MPa。按式(1)可得出,Ø60 mm 钻杆单位长度循环压力为 0.005 MPa/m。地面管线的压力损耗约为 0.1 MPa,按式(2)可得出 Ø89 mm 套管的单位长度循环压力降为 0.008125 MPa/m。

上述测定和计算数据是在密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup> 加重泥浆的条件下获得的,如果按下入 800 m Ø89 mm 套管计,采用密度为 1.75 g/cm<sup>3</sup> 水泥浆,估算的替浆压力为 8.2 MPa。估算结果已经超出了现场配备的泥浆泵的最高压力(8 MPa),无法满足固井施工的需要。为了能在现有条件下完成固井作业,减小替浆压力,只能提高替浆的泥浆密度,减小与水泥

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 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 套管下入和小间隙固井作业,达到了预期目的。

(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).

## 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一井钻探工程技术[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).

- [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. 科钻一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. 松科一井(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一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