

# 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS D - 4 孔 强缩径地层钻进工艺研究

罗光强<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 李正前<sup>1</sup>, 李旭东<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 江苏省地矿局第六地质大队, 江苏 连云港 222023)

**摘要:**介绍了汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS D - 4 孔强缩径地层钻进的技术问题。在分析地层缩径机理和影响因素的基础上, 提出了强缩径地层的钻进工艺措施。措施在 WFS D - 4 孔中实施取得了显著的效果。

**关键词:**汶川地震; 科学钻探; 钻探工艺; 缩径; 有限元分析

**中图分类号:** P634.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0130-03

**The Research on Drilling Technology Used for Strong Hole Shrinkage Borehole Condition in Borehole WFS D - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/LUO Guang-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, LI Zheng-qian<sup>1</sup>, LI Xu-dong<sup>3</sup>** (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. No. 6 Geological Brigade Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Lianyungang Jiangsu 222023, China)

**Abstract:** This article introduced technical problems encountered in drilling operation in strong hole shrinkage formation of WFS D - 4 of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project. On the basis of analyzing mechanisms of hole shrinkage and influence factors, drilling technical measures for resolving problems of strong hole shrinkage formation drilling were put forward. Good results were achieved in application of drilling technical measures for strong hole shrinkage formation in WFS D - 4.

**Key words:** Wenchuan earthquake; scientific drilling; drilling technology; hole shrinkage; Ansys

## 1 问题的提出

强缩径地层钻进, 一直是钻探领域的技术难题。发生过汶川地震的龙门山断裂带历史上多次发生地震, 地震断裂带地层破损严重, 导致钻进施工困难, 施工效率和质量都受到很大影响, 并且由于地应力作用下软岩的塑性流动和粘土矿物膨胀, 钻进中常发生井眼缩径、卡钻、下套管施工困难或大段井眼报废等情况, 施工效率低下, 造成的经济损失大。汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS D - 4 孔, 钻进至井深 2200 m 以深, 井眼缩径严重, 起下钻频繁遇阻, 导致 8 次大的卡钻事故(其中一次由断钻杆引起, 但由于地层缩径, 使钻具打捞失败)。处理事故耗费了大量的时间, 并报废了大量进尺, 导致施工进度缓慢, 施工成本增加。缩径卡钻是 WFS D - 4 孔最关键的技术难题。深入研究井眼缩径规律, 对于强缩径地层钻进技术措施的采取, 具有十分重要的理论和现实意义。

## 2 井眼缩径机理分析

WFS D - 4 孔地层岩性为碳质板岩, 灰黑 ~ 黑色, 变余泥质结构, 板状构造, 组成物质主要为泥质, 局部夹钙质变粉砂岩薄层, 并且有揉皱现象, 泥质含量高, 易膨胀缩径, 造成缩径卡钻。缩径地层的典型岩心如图 1 所示。

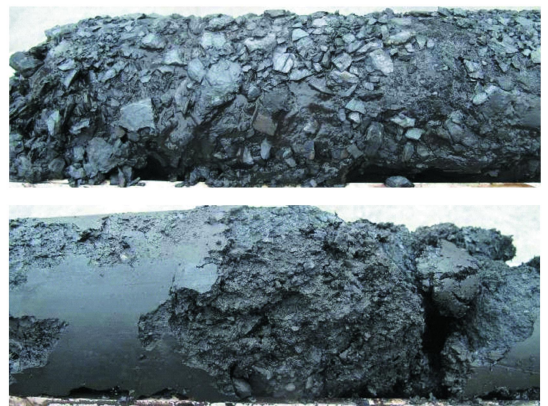


图 1 WFS D - 4 孔缩径地层的典型岩心

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(WFS D)”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)、“地震断裂带复杂地层钻探施工技术应用示范”(12120114075701)

**作者简介:** 罗光强(1988 - ), 男(汉族), 四川广安人, 中国地质科学院探矿工艺研究所, 地质工程专业, 从事科学钻探、仪器仪表测试和控制工作, 四川省成都市郫县现代工业港(北区)港华路 139 号, luodida@gmail.com。

缩径的最主要原因是:在上覆岩层重力的作用下,塑性岩石向钻井内的流动(蠕变)。其次,粘土矿物的水化膨胀,特别是泥岩,砂岩的水化分散,也会造成井径缩小。地层缩径规律如图 2 所示。

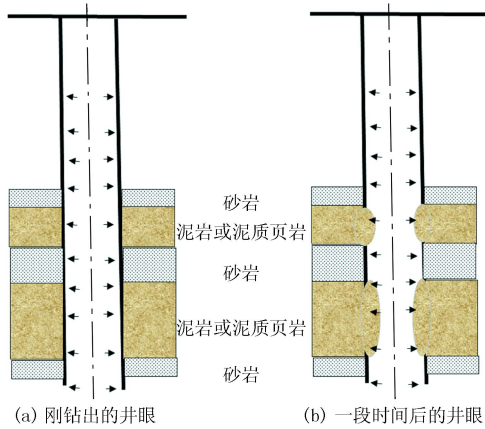


图 2 钻井缩径原理图

为了解决强缩径地层钻进技术难题,有必要分析研究井眼缩径规律。

根据开尔文-沃伊特模型模拟地层围岩受力变形的粘弹性分析,利用三维本构方程,推导出岩石的三维蠕变方程,得到井眼的径向相对位移公式:

$$\mu_a = \frac{a}{2} (p_b - \rho gh) \left( \frac{G_H + G_K}{G_H G_K} - \frac{1}{G_H} \right) (1 - e^{-G_K t / \eta_K})$$

式中:  $\mu_a$ ——井眼缩径量, mm;  $a$ ——井眼直径, mm;  $p_b$ ——上覆岩层压力, MPa;  $\rho$ ——泥浆密度,  $g/cm^3$ ;  $h$ ——井深, m;  $G_H$ ——弹性模量, MPa;  $G_K$ ——剪切模量, MPa;  $\eta_K$ ——粘性系数,  $MPa \cdot s$ ;  $t$ ——钻开井眼的时间, h。

### 3 有限元模拟计算

假设 WFSD-4 孔强缩径地层在井深 2200 ~ 3400 m, 利用有限元模拟分析软件, 建立地层三维模型, 选用摩尔-库伦准则, 地层岩石的弹性模量取 33000 MPa, 泊松比取 0.3, 岩石的粘聚力取 20 MPa, 内摩擦角取  $40^\circ$ , 剪切模量取 120 MPa, 抗压强度取 151 MPa, 抗拉强度取 5.2 MPa。对地层模型, 做以下简化和假设: (1) 沿井眼轴线方向上不产生应变; (2) 井斜角为零, 即井眼垂直钻穿岩层; (3) 地层岩石为均匀、各向同性的粘弹性介质; (4) 选取强缩径地层厚度为 40 m, 模型尺寸为  $\varnothing 20 \text{ mm} \times 40 \text{ m}$ , 模拟时, 每隔 200 m 取一个深度点进行模拟计算, 模型简化如图 3 所示, 岩石受力情况, 上覆岩层的垂直主应力  $\sigma_v$ , 最大水平主应力  $\sigma_H$ , 最小水平主应力  $\sigma_h$ , 井壁受到泥浆液柱压力  $pgh$ 。初始井径 152.4 mm, 上

覆岩层密度  $2.50 \text{ g/cm}^3$ 。当井深为 2400 m, 泥浆密度为  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 时间为 1 h 时, 地层岩石位移(缩径量)云图如图 4 所示。

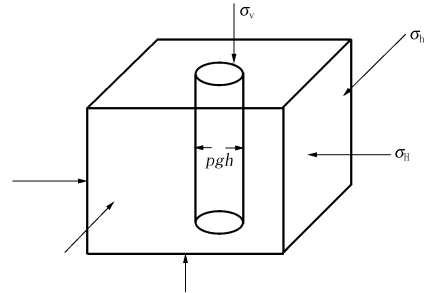


图 3 地层岩石简化受力模型图

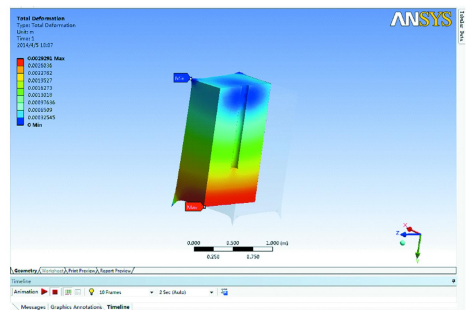


图 4 地层岩石位移(缩径量)云图

图 4 是 ANSYS 模拟分析, 地层岩石的位移云图, 其中井眼的位移量即表示井眼缩径量, 红色表示位移为 2.93 mm, 蓝色表示位移为 0 mm, 不同颜色表示不同的位移量。

当  $t = 1 \text{ h}$  时, 分析不同井深, 不同泥浆密度下的缩径规律, 结果如图 5 所示。

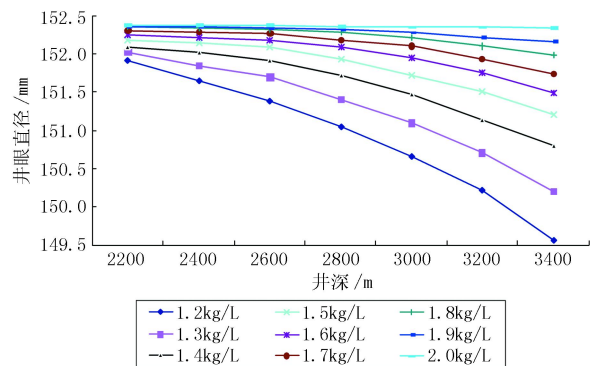


图 5 井深和泥浆密度与井眼缩径量的关系

当  $h = 2400 \text{ m}$ , 分析缩径量与泥浆密度、井眼形成后裸露时间的关系, 结果如图 6 所示。

由图 5 和图 6, 可总结出对缩径地层和缩径规律的认识:

(1) 井眼缩径, 实质上是在上覆岩层重力的作用下, 塑性岩石向钻井内的流动(蠕变)。

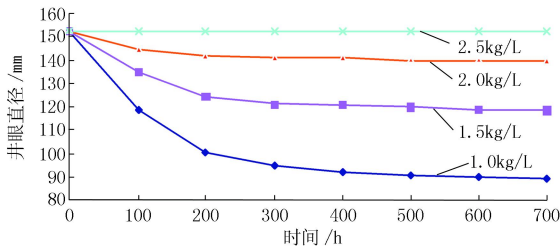


图6 泥浆密度和井眼裸露时间与井眼缩径量的关系

(2)对于强缩径地层,平衡蠕变作用所需的泥浆密度与岩层密度相等,即 $2.5\text{ g/cm}^3$ 左右。在钻探实践中,这么高的泥浆密度是很难实现的。

(3)新井眼产生后,初始的缩径率最高,随着时间的推移,缩径率逐渐降低。在较长的时间之后,缩径停止。新井眼刚产生时,最容易卡钻,须格外注意。

(4)井深不变时,泥浆密度越高,地层的缩径量越小,缩径速率越低。

(5)泥浆密度不变时,井越深,地层的缩径量越大,缩径速率越高。

(6)泥浆密度提高到一定值后,尽管仍然低于地层岩石密度,但可将缩径量和缩径速率控制在较低水平,结合采取划眼和短起钻措施,可基本保证正常钻进。

#### 4 强缩径地层钻进工艺研究

根据强缩径地层井眼缩径规律,制定了一套解决井眼缩径的钻进工艺技术方案。

(1)在现场的设备和施工条件许可的情况下,尽可能提高泥浆密度,采用高密度泥浆体系和工艺,以加大泥浆液柱压力与塑性岩层向钻孔方向的流动压力的抗衡作用。对于强缩径地层,平衡蠕变作用所需的泥浆密度与岩层密度相等,即 $2.5\text{ g/cm}^3$ 左右,这么高的泥浆密度基本上是无法实现的,泥浆密度加大后,循环系统压降会升高,而泥浆泵的能力是有限的,WFSD-4孔的最高泥浆密度估计可达到 $1.8\text{ g/cm}^3$ 左右。高密度泥浆体系的主要特点:高密度,密度在 $1.80\text{ g/cm}^3$ ;低失水,失水量 $3.8\text{ mL}/30\text{ min}$ ;泥浆流变性和润滑性好;对膨胀地层有抑制性效果。此外,还要加强固控措施,以便泥浆能在较长时间内保持理想的性能。

(2)采用偏心扩孔钻进,扩大缩径段的井眼,抵消蠕变造成的缩径效果,预防卡钻事故,减少事故发生率。偏心钻头的导向轴心与扩孔部分的轴心不重合,因此这种钻头也称为双心钻头。双心钻头可以

在较小直径的井眼中下钻,一边钻进一边扩孔,钻出直径较大的井眼。在WFSD-4孔的施工中,我们采用了 $\text{O}127\text{ mm} \times \text{O}149.2\text{ mm} \times \text{O}168\text{ mm}$  CK306B型双心钻头。该钻头如图7所示,其超前导向部分直径为 $127\text{ mm}$ ,可在 $\text{O}149.2\text{ mm}$ 的钻孔中起下钻,钻出直径 $168\text{ mm}$ 的钻孔。



(a) 入井前的双心钻头 (b) 磨损后的双心钻头

图7  $\text{O}149.2/\text{O}168\text{ mm}$  PDC 双心钻头

根据图5和图6的井眼缩径规律,当井深为 $2400\text{ m}$ ,井眼直径 $152.4\text{ mm}$ ,泥浆密度为 $1.4\text{ g/cm}^3$ ,时间为 $50\text{ h}$ 后,井眼缩径量为 $8.3\text{ mm}$ ,远远小于双心钻头扩孔多出的直径 $15.6\text{ mm}$ (注: $168.0\text{ mm} - 152.4\text{ mm} = 15.6\text{ mm}$ ),即井眼缩径量远远小于偏心钻进扩孔出的井眼直径,从根本上解决了卡钻事故。我们用这种钻进方法顺利地钻穿了WFSD-4孔的 $2000\sim 2300\text{ m}$ 井段,并完成下套管和固井作业。在采用该方法之前,在此井段钻进时多次发生缩径卡钻事故,未能钻穿该井段。

(3)勤划眼,短起钻,及时将缩径产生的物质刮削掉。新井眼产生后,初始的缩径率最高,随着时间的推移,缩径率逐渐降低。在较长的时间之后,缩径停止。新井眼刚产生时,最容易卡钻,需及时划眼。

(4)起钻回灌泥浆,以泥浆的液柱压力来部分平衡缩径,减缓缩径速率,降低缩径量。

(5)优化钻具结构,钻具组合中不带扩孔器和稳定器,复杂地层钻进不带螺杆马达。

(6)钻具组合中加震击器,有利于在井壁缩径和钻具遇阻时震击解卡,WFSD-4孔采用震击器后成功解决一次卡钻事故。

采取以上主要技术措施后,不仅使WFSD-4孔施工中遇阻和卡钻大大得到缓解,还使划眼时间大大缩短、钻进效率明显提高。表1是普通牙轮钻头钻进和双心钻头钻进的时效对比分析表。

WFSD-4孔第二次套管开窗侧钻就是为了处理在第一次套管开窗侧钻中发生的断钻具事故。断钻具事故原因主要有:(1)斜向器斜面角度 $3^\circ$ ,安装位置处“狗腿”度大,对钻具产生的侧向力大,同时钻铤刚性大,易折断;(2)钻具转速过高(70 r/min),产生的交变弯曲应力大,导致钻具疲劳破坏加剧。

#### 4 结语

(1)套管开窗侧钻技术是处理井下事故的有效手段,该技术在汶川地震断裂带科学钻探的成功应用,为后续工程实施节约了时间和成本,对今后类似作业具有很好的指导和借鉴作用。

(2)斜向器的固定是套管开窗的关键,直接影响到一口井侧钻的成败。

(3)套管开窗是套管内侧钻施工中的主要环节,复合铤锥开窗、修窗过程,要严格按照要求进行,争取成功开出一个规则的窗口,为下步施工提供强有力的保证。

(4)侧钻裸眼钻进时井斜较大,钻具在窗口附近有一个侧向力,使钻具紧靠井壁与窗口,并与窗口、斜向器、套管总是处于摩擦中;泥浆循环通道在窗口处小,钻具与井眼间隙很小,钻具易断裂,且断后不容易打捞等不利因素,因此在施工中应特别注意。

(5)开窗成功以后在后续施工中要优化钻具组合,加强泥浆润滑性并保持适当密度,采用井下动力钻具、水力加压器等措施,预防井下复杂和事故发生。

#### 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):1613-1622.
- [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):5-8,16.
- [3] 胡时友,宋军,张伟,等.汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目钻探和测井课题的组织实施与管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):1-4.
- [4] 樊腊生,贾军,吴金生,等.汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)钻探施工概况[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):5-8.
- [5] 李之军,陈礼仪,贾军,等.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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):13-15,19.
- [6] 贾军,樊腊生,胡时友,等.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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):16-19.
- [7] 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WFSD-2井为例[J].地质与勘探,2012,48(2).
- [8] 吴金生,贾军,段玉刚,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻探事故预防与处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):49-52,65.

(上接第132页)

表1 牙轮钻头和双心钻头时效对比

钻进 回次	井段 /m	进尺 /m	机械钻速 /( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	回次钻速 /( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )
1	2057.53~2073.71	16.18	0.58	0.39
2	2073.71~2074.73	1.02	0.37	0.22
3	2074.73~2075.82	1.09	0.35	0.27
4	2075.82~2097.65	21.82	0.69	0.49
5	2097.65~2132.92	35.28	0.73	0.47
6	2133.86~2151.86	17.50	0.69	0.41
7	2153.29~2178.25	24.96	0.71	0.48
8	2178.25~2186.61	8.36	0.74	0.32
9	2186.61~2191.75	5.14	0.61	0.24
10	2194.85~2205.28	10.43	0.43	0.21
11	2225.88~2262.41	36.52	1.20	0.86
12	2195.66~2220.57	24.91	1.70	0.97
13	2220.57~2300.00	74.43	0.94	0.83

注:1~10回次采用的是 $\varnothing 152.4$  mm牙轮钻头,11~13回次采用的是 $\varnothing 149/168$  mm双心钻头。

#### 5 结论和建议

(1)缩径卡钻是WFSD-4孔钻进施工中最主

要的事故类型。

(2)井眼缩径量与岩石的蠕变特性、泥浆密度、井深和井眼形成后经历的时间密切相关。

(3)避免缩径导致的卡钻事故须依靠采取综合性的技术措施,其中最主要的措施是偏心扩孔钻进和采用高密度泥浆体系。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张伟,贾军,胡时友.汶川地震科学钻探项目的概况与钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,5-9.
- [3] 樊腊生,贾军,吴金生,等.汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)钻探施工概况[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):5-8.
- [4] 王耀峰,李军强,杨美全,等.钻井液密度对井眼缩径影响的黏弹性分析[J].石油钻探技术,2009,37(2):18-22.
- [5] 赵金洲.深井蠕变地层钻井液密度优化技术[J].岩土力学,2007,28(5):915-920.
- [6] 王三牛,王聪,刘玮,等.科学深钻扩孔钻头及钻进技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(3):8-13.