

科学深孔复杂地层钻进技术难题与对策

张 伟

(中国地质调查局,北京 100037)

摘 要:介绍了在复杂地层科学深钻施工时遇到的困难和问题,主要包括破碎地层钻进问题和强缩径地层钻进问题,讨论了解决这些技术难题时采取的应对技术方案和措施,涉及取心钻进工艺方法和器具、钻机、泥浆体系以及极破碎、强缩径地层的特殊钻进、固井工艺和器具。

关键词:科学钻探;复杂地层;技术难题;对策

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)09-0007-06

Technical Problems and Countermeasures for the Drilling Operation in Complex Formations of Scientific Deep Drilling Projects/ZHANG Wei (China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This article introduces the difficulties and technical problems encountered in the drilling operation in complex formation of scientific deep drilling projects. The main technical problems are broken formation drilling and strong shrinkage formation drilling. Technical measures for resolving the problems, referring to core drilling technologies, drill rig, drilling mud system and special drilling and cementing technologies used for strong shrinkage formation, are discussed.

Key words: scientific drilling; complex formation; technical problems; countermeasures

0 引言

科学深孔取心钻探施工是一种特殊的钻探施工,它既不同于地质岩心钻探,又不同于石油钻探:地质岩心钻探钻进的对象以硬岩为主,但钻孔深度浅、直径小;石油钻探中施工大直径深井十分普遍,但钻进的地层软,取心很少。科学深钻施工对象多为硬岩并且取心多,钻孔深度和直径大,需要采用特殊的方法技术,施工时间长、费用高,属于高难度钻探工程。复杂地层的类型主要包括破碎地层、水敏性地层、漏失地层和缩径地层等,复杂地层钻进是钻探施工的老大难问题。科学深钻施工遇到复杂地层问题,可以说是难上加难。本文结合我国近些年实施科学深钻项目遇到的复杂地层钻进技术问题,主要讨论在破碎地层和强缩径地层钻进时采取的技术措施和对策及其应用效果。

1 科学深孔复杂地层钻进的主要技术问题

1.1 破碎地层钻进技术问题

在钻进施工过程中,孔壁岩石要受到各种机械扰动作用,包括:回转钻进过程中的钻杆敲击作用;起钻过程中的抽吸作用;下钻过程中的压力激动作用;处理事故过程中孔内震击器的震击作用等。若

是在破碎地层钻进,在各种机械扰动作用的综合影响下,本身就破碎的孔壁岩石要发生剥落,剥落物掉在孔内,易形成卡钻或埋钻。孔壁岩石的剥落使钻孔产生扩径(俗称“大肚子”),并因此产生如下的负面后果:(1)钻杆柱变形严重,寿命降低,并且易折断;(2)钻头工作不稳定,导致机械钻速、岩心采取率和钻头寿命同时下降;(3)在钻孔扩径部位,泥浆返速低,造成岩粉堆积,而堆积的岩粉随时可能垮塌,造成埋钻;(4)钻进时钻杆柱不断地敲击孔壁,使以上的负面影响不断加剧,造成恶性循环。由于上述原因,在破碎地层钻进,孔内事故率高,钻进效率低,取心效果差,施工成本高。

汶川地震断裂带科学钻探项目钻进的地层是典型的破碎地层。龙门山断裂带历史经历了多次地震,导致该断裂带的地下岩层强烈破碎,如 WFSD-1 孔在 1200 m 深度范围内就钻遇了 20 多条断层。汶川地震断裂带科学钻探项目的五口钻孔所处的位置不同,钻进的岩层也不一样,既有沉积岩,又有火成岩,还有变质岩。但无论岩性怎样变化,所有钻孔的岩层都有一个共同的特点,就是由于位于地震断裂带,岩层破碎情况严重,所有的钻孔从开钻到完钻基本上全部在破碎地层中钻进。

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:张伟(1954-),男(汉族),湖北恩施人,中国地质调查局汶川地震科学钻探工程中心总工程师,中国地质大学(武汉)客座教授,探矿工程专业,博士,负责组织汶川地震科学钻探项目的钻探和测井施工,北京市西城区阜外大街 45 号院,zhangwei@wfsd.org。

有些钻探项目钻遇的地层总体比较完整,但有时也会遇到断层,同样会面临破碎地层钻进问题。如中国大陆科学钻探工程科钻一井大多数时间是在完整地层中钻进,但分别在孔深 2000 和 3500 m 附近遇到两个较大的断层,给钻进施工带来了较大的困难。

1.2 强缩径地层钻进技术问题

钻孔缩径,实质上是在上覆岩层重量的作用下,塑性岩石向钻孔内的流动(蠕变)。地下的岩石原本是处于一种平衡状态。钻孔形成后,平衡被打破了,位于深部的较软岩石在上覆岩层重量的作用下产生变形,朝着钻孔方向流动过来,使钻孔直径变小,情况严重时甚至可能导致钻孔封闭。这种岩层蠕变和缩径作用会导致钻孔内的钻具被卡死,形成孔内事故。在汶川地震断裂带科学钻探项目的钻探施工过程中,缩径卡钻是一种常见的孔内事故。在 WFSD-1 孔中,曾连续 3 次发生缩径卡钻。发生此种事故最多的是 WFSD-4 孔,施工中共发生了 9 次较严重的孔内事故,其中大多数是由缩径导致的卡钻事故。缩径卡钻事故一般采用爆炸松扣、水泥回填部分钻孔后侧钻的方法予以解决。这些程序的实施,往往会耗费大量的时间和经费,还要报废大量进尺。

2 科学深孔复杂地层钻进技术对策

2.1 破碎地层取心钻进技术

可能用于科学深孔取心钻进的方法可分为 2 大类:(1)顶驱-绳索取心钻进方法;(2)孔底马达-提钻取心方法或孔底马达-液动锤-提钻取心方法。对比分析这两大类取心钻进方法的结果见表 1。

表 1 孔底马达/提钻取心钻进与顶驱/绳索取心钻进方法
用于破碎地层钻进效果比较

项目	孔底马达/提钻取心钻进	顶驱/绳索取心钻进
适用钻孔深度	任何深度	≤4000 m
施工效率	回次长度短时较低,但若 能实现长回次钻进则较高	较高
设备配套要求	主要靠井底驱动,不需要 高转速顶驱	钻头由钻机驱动, 须配高转速顶驱
钻杆要求	普通的石油钻杆,成本较 低	特制的绳索取心钻 杆,成本较高
钻柱强度	较高	较低
钻杆寿命	较长	较短(钻柱稳定性 较差)
钻头寿命	较长	较短
取心效果	较好	较差
孔壁稳定性	较好	较差
卡钻的可能性	较小	较大
压漏地层的可能性	较小	较大

绳索取心钻进方法可减少提钻次数和辅助时间,但该方法必须与顶驱相配。破碎地层取心钻进的经验表明,顶驱钻进方法在破碎地层中应用存在着较多的问题:(1)顶驱高速回转时对孔壁有强烈的敲击和扰动作用,使破碎地层的孔壁坍塌、掉块加剧,一则会导致钻孔扩径加剧,二则可能造成卡钻。(2)在严重扩径的钻孔中高速回转钻杆柱容易受到疲劳损坏,钻头寿命也降低。CCSD 科钻一井在 2046 m 以深采用顶驱金刚石绳索取心钻进方法。由于遇到了扩径带(大肚子),钻头使用效果奇差,连续 8 个回次出现钻头钻进不到 2 m 便被剃“光头”的现象,4 个新钻头的平均寿命仅为 0.52 m,基本上取不上来岩心,还接连发生 2 次钻具折断事故。改换螺杆马达孔底驱动后,情况马上得到了改善。此外,在 WFSD-2 孔的破碎孔段采用顶驱施工时,钻铤丝扣的寿命比正常情况时低得多。(3)钻杆柱运转不平稳,导致取心效果变差,岩心采取率降低。

在 WFSD-2 孔采用顶驱钻进时,1368.92 ~ 1468.47 m 孔段,进尺 99.55 m,岩心长度为 39.81 m,平均岩心采取率为 39.99%,回收的岩心呈碎石状(图 1)。后来在相同孔段通过在套管内开窗补取岩心施工时,采用了螺杆马达驱动方式,1362.87 ~ 1468.38 m 孔段,进尺 105.51 m,岩心长度为 95.82 m,平均岩心采取率 90.8%,岩心的完整程度也要好得多(图 2)。

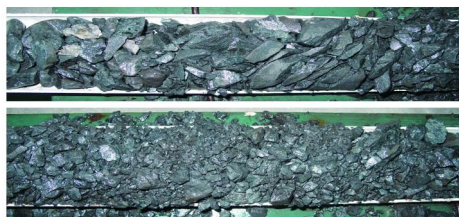


图 1 WFSD-2 孔采用顶驱钻进获取的岩心

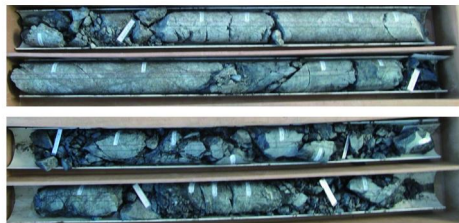


图 2 WFSD-2 孔采用螺杆马达驱动钻进获取的岩心

由于在破碎地层采用顶驱钻进的一系列缺点,我们开始考虑,在这种地层钻进时采用孔底动力取心钻进方法来。采用孔底动力钻进就不能进行绳索取心,只能通过提钻回收岩心。我们通过进行技术经济分析(图 3),得出以下结论:当提钻取心方法的

回次进尺长度达到一定值后,其施工效率与绳索取心钻进相当。加上孔底动力驱动比地表驱动方法的许多优越之处,此时孔底动力驱动的取心钻进方法无疑是一种明显优于顶驱/绳索取心钻进的方法。

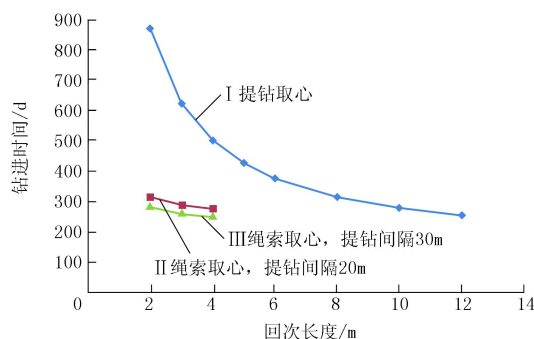


图3 不同钻进方法 4000 m 取心钻进施工时间对比

提高回次进尺长度的最有效方法是在取心钻进系统中引入液动锤。液动锤钻进可使取心钻进的回次长度成倍增加。同时,还能显著提高机械钻速和减轻孔斜。螺杆马达-液动锤-提钻取心方法在中国大陆科学钻探工程科钻一井中应用非常成功,该井 3000~5000 m 井段的平均回次长度为 7.99 m。

该方法最初在汶川地震科学钻探项目中应用时遇到了问题。汶川地震科学钻探项目钻进的地层是地震断裂带,岩层强烈破碎。为了保证岩心的原状性,取心钻进时采取了一种特殊的取心技术,即半合管取心技术。半合管取心钻具结构较复杂,加工较长的半合管取心钻具的难度较大。最初只有长度 1.5~2 m 的半合管取心钻具,取心钻进的回次长度也因此受到影响。在项目实施过程中,我们通过不断地研究与改进,相继研制成功了长度 4.5、6 和 9 m 的半合管取心钻具。

螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法在 WFSD-4 孔中进行了试验并获得了成功。在该孔的 2014.30~2065.40 m 孔段,连续钻进了 5 个长度超 9 m 的回次,总进尺 45.15 m,平均回次进尺 9.03 m,平均岩心采取率 97.5%,平均机械钻速 1.49 m/h,取出了长 9 m 的无扰动连续岩心柱。

根据螺杆马达-液动锤-提钻取心方法在中国大陆科学钻探工程科钻一井和汶川地震科学钻探项目中应用的结果,对该方法的特点和优点总结如下。

(1) 螺杆马达驱动,钻杆柱不回转,可减轻功耗和钻具磨损,有利于改善钻杆柱工作状态和孔壁稳定,减少孔内事故,提高钻具寿命;

(2) 液动锤冲击载荷碎岩,可提高机械钻速 50%~100%,提高回次进尺长度 1~2 倍;

(3) 低钻压钻进,有利于减轻孔斜;

(4) 取心效果好,岩心的原状性和岩心采取率都得到改善。

可以说,该方法是大直径深孔取心钻进的最佳方法。对于破碎地层钻进,尤其如此。

2.2 破碎和缩径地层钻进安全施工措施

汶川地震科学钻探项目钻进施工遇到的地层极其复杂,具有两大特点:一是强烈破碎;二是强烈缩径。所钻进的 5 个钻孔都遇到了这两类问题,其中这两种特点同时显现并且都十分突出的是 WFSD-4 孔。在 WFSD-4 孔中由于这两类地层问题导致了多次卡钻事故,进行了 8 次爆炸松扣和侧钻。现场的钻探施工人员通过不断地总结经验、分析事故原因并采取相应的技术对策,摸索出了一套极破碎和强蠕变地层钻进安全施工技术措施,为今后解决此类复杂的钻探技术问题,积累了宝贵的经验。

2.2.1 钻孔缩径及其规律分析

我们采用有限元模拟分析软件,对 WFSD-4 孔 2200~3400 m 孔段强缩径地层的缩径规律进行了分析。图 4 表示了新孔段产生时间 $t=1$ 时,钻孔深度和泥浆密度对钻孔缩径量的影响。

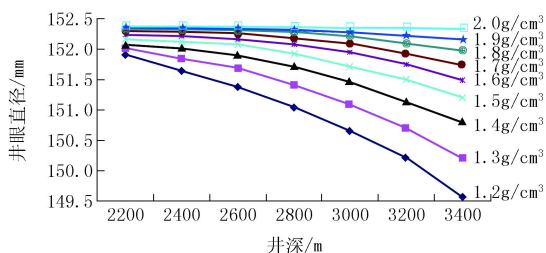


图4 孔深和泥浆密度与钻孔缩径量的关系

图 5 表示了岩性为软泥岩、孔深 2300 m 和泥浆密度 1.5 g/cm³ 条件下,裸眼时间对钻孔缩径量的影响。

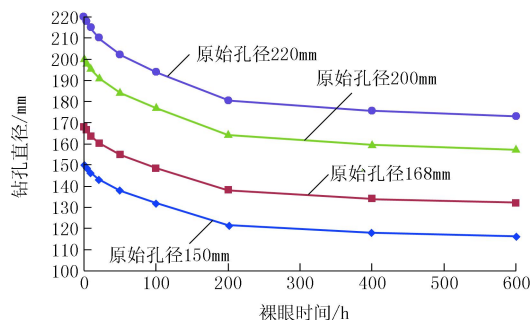


图5 裸眼时间对钻孔缩径的影响

由图 4 和图 5,可总结出如下的蠕变地层缩径规律。

(1) 钻孔缩径实质上是在上覆岩层重量的作用下,塑性岩石向钻孔内的流动(蠕变)。

(2) 一段新孔产生后,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,缩径基本上停止。新孔刚产生时,最容易卡钻,须格外注意。

(3) 孔深不变时,泥浆密度越高,地层的缩径量越小,缩径速率越低。

(4) 泥浆密度不变时,孔越深,地层的缩径量越大,缩径速率越高。

(5) 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 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。

(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。

2.2.2 破碎和缩径地层钻进技术措施

2.2.2.1 优化钻井泥浆体系

根据钻孔缩径及其规律分析的结果,我们认为,解决破碎地层孔壁垮塌和强缩径问题的首要泥浆技术措施是提高泥浆密度,此措施对抑制钻孔缩径和破碎地层的孔壁垮塌皆有正面的效果。在 WFSD-4 孔施工中,缩径带钻进的泥浆密度为 $1.6 \sim 1.73 \text{ g/cm}^3$ 。其次,我们强调泥浆的抑制性和防塌效果。我们在 WFSD-4 孔的施工中采用了钾石灰聚磺钻井液体系。该钻井液是在石灰钻井液、聚磺钻井液基础上发展起来的一种防塌钻井液体系,具有抑制性强、泥饼质量好、防塌和封堵能力强、滤失和流变性能好以及抗污染能力强的特点。由于泥浆的密度提高,泥浆的粘度和切力也随之升高。因此,我们的破碎和缩径地层钻进泥浆体系具有高密度、高粘度和高切力的特点。

孔深 2274 m 时的泥浆参数为:密度 1.66 g/cm^3 ,漏斗粘度 56 s,失水量 2.8 mL/30 min,泥饼厚度 0.4 mm,初切 3.5 Pa,终切 17 Pa,动切力 17 mPa·s,塑性粘度 43 mPa·s,润滑系数 0.05,含砂量 0.2%,pH 值 9.5。

2.2.2.2 采用“双心钻进”方法

根据蠕变地层的缩径规律,我们提出采用“双心钻进”来解决缩径卡钻问题。“双心”是指钻头的领眼、扩眼中心与通径中心不重合。双心钻具可在直径较小的钻孔或套管内下钻,以直径较小的钻具,钻出一个直径较大的钻孔。“双心钻具”是一种偏

心扩孔钻具,由于其扩眼量大于钻孔缩径量,从而可解决缩径带的卡钻技术难题。例如:在孔深 2300 m、钻头直径 150 mm、泥浆密度为 1.5 g/cm^3 条件下,新孔段产生时间为 50 h 后,钻孔直径 138.2 mm,缩径量为 11.8 mm。此时如果采用 $\varnothing 150 \text{ mm}$ 钻具钻进,肯定会发生缩径卡钻。如果采用 $\varnothing 127 \text{ mm} \times \varnothing 149.2 \text{ mm} \times \varnothing 168 \text{ mm}$ CK306B 型“双心钻头”。该钻头(图 6)的超前导向部分直径为 127 mm,最大直径 $\leq 147 \text{ mm}$,可在 $\varnothing 149.2 \text{ mm}$ 的钻孔中下钻,钻出直径 168 mm 的钻孔。双心钻进钻孔缩径(50 h)后的直径为 154.8 mm,比双心钻具的最大直径(147 mm)大得较多,因此不会发生缩径卡钻。“双心钻进”既可是全面钻进,又可是取心钻进,二者的原理是相同的。



图 6 “双心”全面钻进钻头

2.2.2.3 优化其它钻进工艺措施

除了以双心钻进为主要措施之外,我们还采取了一系列配套钻进工艺措施,以维持钻孔的稳定性,减轻缩径和卡钻的风险。

(1) 优化钻具结构。钻具组合中不带扩孔器和扶正器,复杂地层钻进不使用螺杆马达,以减少卡钻和加强钻具应付复杂情况的能力。

(2) 在孔内钻具组合中加震击器,以便在卡钻发生后增加解除卡钻的可能性。

(3) 勤划眼,短起钻。在操作规程中规定,每钻进一段时间(一般 1~5 h)后,要活动一次钻具;每钻进 1~2 天后,要进行一次短起钻。通过采取这样的措施,及时消除钻孔的缩径量,以减少在钻进或者起下钻期间钻具被卡死的可能性。

(4) 起钻回灌泥浆。以泥浆柱的压力来平衡地层的缩径力,以减轻钻孔缩径的程度。

2.2.2.4 采用有利于复杂地层钻进的钻机

我们采用交流变频驱动的顶驱钻机,作为复杂地层钻进技术措施之一。顶驱钻机最显著的特点是:(1) 接立根钻进,给进行程长,有利于快速通过复杂地层;(2) 可以倒划眼,遇到复杂情况时,有利于快速解除;(3) 顶驱带着水龙头起下钻,遇到复杂情况时,能以最快的速度建立循环,为解除复杂提供有利条件。

交流变频驱动比较现有的其它钻机驱动方式,具有传动效率高、能耗低、输出特性好、操控性好和可靠性强的特点。交流变频顶驱钻机是现代石油钻机的先进机型和发展方向。

KZ-30-DB 是一台专为汶川地震科学钻探项目研制的交流变频顶驱钻机(见图 7、图 8)。与石油钻机不同的是,它配备有高转速顶驱和绳索取心绞车,适合于深孔取心钻进。该钻机的大钩负荷为 1300 kN,立根长度接近 20 m。该钻机是一种多功能钻机,可用于 3000 m 左右的大直径($\varnothing 150$ mm 终孔)科学钻探、地热钻探和煤层气钻探,还可用于 5000 m 以深的小直径(76 mm 终孔)地质岩心钻探。



图 7 KZ-30-DB 型钻机在 WFSD-4 孔现场应用



图 8 KZ-30-DB 型钻机司钻室

该钻机在 WFSD-4 孔连续使用 555 天,完成了大口径取心钻进、扩孔钻进、侧钻和全面钻进以及约 10 次处理孔内事故施工,钻达的最大孔深为 2338.77 m(钻孔直径 150 mm、顶角 35° 的大斜度钻孔)。试验结果表明,钻机使用情况正常,能满足深孔取心钻进施工的需求。

2.3 强缩径地层的下套管固井工艺

强蠕变地层,钻孔缩径严重,使套管难以下到位。WFSD-3-P 孔采用 $\varnothing 94$ mm 钻头钻进至孔深 500.64 m 后,计划下入 $\varnothing 89$ mm 套管并固井。由于 440.67 ~ 500.64 m 孔段膨胀缩径严重,套管下至孔深 434.56 m 处被抱死,上提和下压皆不能解卡,最

终导致需要长期观测的孔段未被套管封隔住,对后续钻进和长期观测造成一定的负面影响。

WFSD-4 孔 2200 ~ 2300 m 孔段全是缩径地层,并且缩径的强烈程度远超 WFSD-3-P 孔,经常在钻进过程中就发生了缩径卡钻事故。在这种条件下采用常规的钻进和下套管工艺,肯定行不通。

通过进行钻孔缩径规律的理论分析,我们采取了以下技术措施来解决此问题。

2.3.1 先钻再扩两步成孔法

分析钻孔缩径规律曲线可知,新孔段产生后,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,缩径基本上停止。

通过整理分析数据得出如表 2、表 3 和图 9 所示的结果。

表 2 钻孔直径变化与裸眼时间和原始孔径的关系

原始钻孔 直径/mm	钻孔裸露时间/h			
	0	200	400	600
150	150	121.7	118	116.3
168	168	138	134.1	132.5
200	200	164.4	159.6	157.4
220	220	180.8	175.6	173.2

注:(1)岩性为软泥岩;(2)孔深 2300 m;(3)泥浆密度 1.5 g/cm^3 。

表 3 钻孔缩径量与裸眼时间和原始孔径的关系

原始钻孔 直径/mm	钻孔直径缩量/mm		
	第一个 200 h	第二个 200 h	第三个 200 h
150	28.3	3.7	1.7
168	30	3.9	1.6
200	35.6	4.8	2.2
220	39.2	5.2	2.4

注:(1)岩性为软泥岩;(2)孔深 2300 m;(3)泥浆密度 1.5 g/cm^3 。

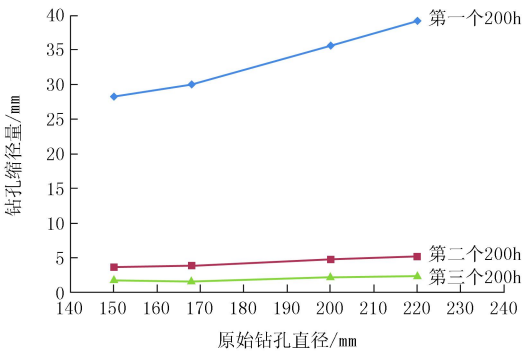


图 9 钻孔缩径量与裸眼时间和原始孔径的关系

根据钻孔缩径规律和以上的分析数据,我们提出了采用先钻再扩两步成孔法来解决强缩径地层下套管固井难题的方案。假如我们计划在 $\varnothing 200$ mm 钻孔中下 $\varnothing 168$ mm 套管(套管接箍直径 194 mm),可先施工 $\varnothing 150$ mm 钻孔。等到数天之后,该段钻孔

的主要缩径过程已经完成,才开始采用 $\phi 200$ mm 钻头扩孔。扩完孔后,尽管缩径还在进行,但其速率已经非常缓慢,这时下套管的风险要降低很多。不过,施工 $\phi 150$ mm 钻孔过程中仍然可能发生缩径卡钻事故,可通过采用双心钻进方法予以解决。

2.3.2 双心钻进/双心扩孔两步成孔法

采用先钻再扩两步成孔法,已可大大降低强缩径地层下套管固井的风险,但还是存在着下套管遇卡的可能性。为保证强缩径地层下套管固井施工获得成功,我们又提出了双心钻进/双心扩孔两步成孔的方案(图10)。该工艺的实施过程如下:先采用 $\phi 127$ mm \times $\phi 149.2$ mm \times $\phi 168$ mm CK306B 型双心钻头穿过缩径带,钻出直径 168 mm 的钻孔。再采用 $\phi 166$ mm \times $\phi 200$ mm \times $\phi 220$ mm CK406B 型双心钻头进行扩孔钻进。双心扩孔钻头的超前导向部分直径为 $\phi 166$ mm,正好插入上一次双心钻进产生的钻孔中,以保证扩孔效果。在 WFSD-4 孔中,我们采用该工艺钻穿了 2200~2300 m 强缩径地层,并顺利完成下 $\phi 168$ mm 套管和固井施工。施工过程平稳,没有明显的遇阻和遇卡现象。



图10 双心钻进/双心扩孔两步成孔示意图

对该方法有效性的分析如下:第一步双心钻进之后,产生直径 168 mm 的钻孔,待其充分缩径之后,采用双心扩孔将钻孔扩大至 220 mm。根据表2和表3的数据,扩孔之后的缩径量不会超过 10 mm,因此最终下套管时的钻孔直径 > 210 mm(图11),可保证 $\phi 168$ mm 套管的顺利下入。

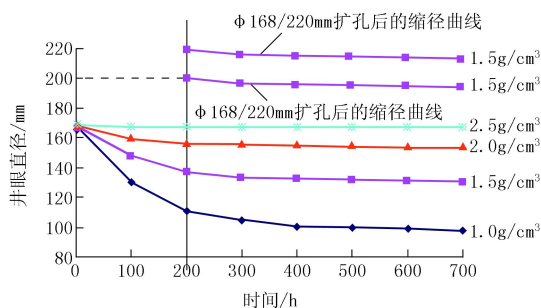


图11 采用双心钻进/双心扩孔两步成孔法解决强缩径带下套管卡钻问题的原理

3 结语

总结科学深孔复杂地层钻进技术研发及应用的实践得出如下结论。

(1) 螺杆马达-液动锤-提钻取心钻进方法是科学深孔复杂地层钻进的最佳取心钻进方法,该方法在施工效率、取心质量、孔壁稳定性、钻具寿命和减少孔内事故发生等方面,具有很好的综合效果。

(2) 在同时具有破碎和缩径特征的复杂地层钻进时,须采取综合性的技术措施来解决问题,包括优化泥浆体系,采用双心钻进,优化钻井工艺措施,采用有利于复杂地层钻进的钻机等。

(3) 在理论分析的基础上,提出了利用钻孔缩径规律,采用双心钻进和双心扩孔的技术方案,解决强缩径地层的下套管和固井技术难题,收到了很好的应用效果。

参考文献:

- [1] 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, 36(S1): 5-9.
- [2] 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.
- [3] 贾军,李旭东,樊腊生,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-2孔钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 6-11.
- [4] 赵远刚,樊腊生,杨明奇. 汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-3-P孔钻探施工概况[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 18-21.
- [5] 朱恒银,朱永宜,张文生,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-3孔施工技术与体会[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 12-17.
- [6] 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.
- [7] 张伟,贾军. 汶川地震科学钻探二号孔取心钻进方法的选择[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(7): 5-7.
- [8] 张伟. 取心钻进的技术经济学研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学(武汉), 2006.
- [9] 张伟,樊腊生,吴金生. 汶川地震断裂带科学钻探项目中取心钻进方法应用的演变[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7): 61-64, 68.
- [10] 谢文卫,苏长寿,孟义泉. YZX127型液动潜孔锤的研究及应用[J]. 探矿工程, 2003, (S1): 276-281.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 朱江龙,胡时友,黄洪波,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目深孔取心钻探设备的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 22-27.
- [16] 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.