

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

张 伟, 樊腊生, 吴金生

(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项目中深孔取心钻进方法应用的演变过程。从最初设计的螺杆马达-液动锤取心钻进方法变化到顶驱-绳索取心钻进方法,再变化到螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法。用于该项目的深孔取心钻进方法经历了一系列变化,促使这些变化发生的原因是地层条件以及取心技术的改进和发展。

关键词:地震;科学钻探;取心钻进;方法;汶川地震断裂带科学钻探

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)07-0061-04

The Evolution Process of the Core Drilling Methods Used in Wenchuan Earthquake Faults Scientific Drilling Project/ZHANG Wei, FAN La-sheng, WU Jin-sheng (Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: This article introduces the evolution process of the core drilling methods used in Wenchuan Earthquake Scientific Drilling Project. From PDM/hydro-hammer coring method to top-drive/wire-line coring method and finally to PDM/hydro-hammer/long split barrel coring method, the coring methods used in this project underwent a series of changes. The main reasons for these changes are formation conditions, coring technology improvement and the development.

Key words: earthquake; scientific drilling; core drilling; method; Wenchuan earthquake faults scientific drilling

0 引言

汶川地震断裂带科学钻探项目的目的:在汶川特大地震和复发微地震的源区——龙门山“北川-映秀”断裂及龙门山前缘“安县-灌县”断裂旁侧施工 5 口科学钻孔(1200 和 3000 m 深钻孔各 2 口),通过钻探获取地下深处的信息,研究地震断裂发震机理。完钻后,将在钻孔内安放地震探测仪器,建立长期地震观测站,为未来地震的监测、预报或预警提供基本数据。

汶川地震断裂带科学钻探项目的最大钻孔深度为 3350 m,主要的取心钻进口径为 150 mm。根据钻孔位置的不同,钻进的岩层也在变化,既有沉积岩,如泥岩、页岩、砂岩等;又有火成岩,如花岗岩、花岗闪长岩、凝灰岩等;还有变质岩,如板岩、变质砂岩等。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。龙门山地震断裂带是由于印度洋板块向亚欧板块俯冲以及青藏高原快速隆升造成的,这种

地质过程还在不断的进行之中,龙门山断裂带的应力积累、释放(地震)的循环也一直在进行之中。在历史上许多次地震的作用下,龙门山断裂带地下岩层变得“体无完肤”,其破碎的严重程度罕见。

在该项目的钻进施工中,采用何种取心钻进方法,对于整个项目的实施来说,是一项重大的决策,因为取心钻进方法的选用,对钻探施工时间、成本、质量和钻孔安全,都起着重要的影响作用。地层条件是取心钻进方法选用的一个十分重要的限制因素。

1 最初的考虑

在进行项目设计时,我们评估了多种可能用于汶川地震断裂带科学钻探项目深孔取心钻进的方法,主要有顶驱-绳索取心钻进方法、螺杆马达-提钻取心方法和螺杆马达-液动锤-提钻取心方法等。

德国施工 KTB 先导孔时采用液压顶驱和金刚石绳索取心钻进方法,取心钻孔直径 152 mm,取心钻进孔深 3893 m。美国施工夏威夷科学钻孔时也

收稿日期:2013-06-15

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:张伟(1954-),男(汉族),湖北恩施人,中国地质科学院探矿工艺研究所所长助理、教授级高级工程师,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,负责组织实施汶川地震科学钻探项目的钻井工程,四川省成都市郫县现代工业港(北区)港华路 139 号,zhangwei@wfsd.org。

采用液压顶驱和金刚石绳索取心钻进方法,取心钻孔直径 98 mm,取心钻进孔深 3519.5 m。

中国大陆科学钻探工程科钻一井取心钻进至 5158 m 深度,钻孔直径 157 mm,岩心直径 95 mm。在科钻一井施工中,共试验了 7 种取心钻进方法,累计取心钻进 4995 m,其中采用螺杆马达-液动锤提钻取心钻进方法进尺 4039 m。与其它 6 种取心钻进方法(包括)相比,螺杆马达-液动锤提钻取心钻进方法的机械钻速提高 57%,回次长度提高 186%。该方法的采用,对中国大陆科学钻探工程项目的成功实施,起到了决定性的作用。该方法被认为是一种高效、优质、低成本和安全的硬岩深井取心钻进方法。

在对 2 种方法进行了深入的技术经济可行性对比分析后,我们决定在进行大直径深孔取心钻进时采用螺杆马达-液动锤-提钻取心方法。

2 第一次方案改变

WFSD-1 孔是该项目中第一个开始施工的钻孔。该孔的终孔深度为 1201.15 m,终孔直径为 76 mm,不属于大直径深孔取心钻进的范畴,施工时主要采用金刚石绳索取心钻进方法。该孔相当于 WFSD-2 孔的先导孔。WFSD-2 孔距离 WFSD-1 孔不到 200 m,其设计孔深为 3000 m,终孔直径为 150 mm。施工 WFSD-1 孔的主要目的,了解汶川地震产生的破裂面在地下深处的分布情况,为 WFSD-2 孔的最终孔深的确定提供依据。同时,还希望通过 WFSD-1 孔,了解地下岩层的情况以及取心钻进方法对地层的适应性。

施工 WFSD-1 孔时发现,岩层非常破碎,破碎程度远远超过预计。如果采用常规的出心方式(敲击震动内岩心管,使岩心从管内脱落),回收的岩心将是一堆碎石头,会损失大量地下岩层的构造信息。为了解决这个问题,我们引入了半合管取心技术。半合管取心钻具的内管由 2 个半圆管合成,通过卡箍将 2 个半圆管结合在一起。回收岩心时,只要解除卡箍,揭开其中的一个半圆管,就可容易地将岩心从管中取出。整个过程没有敲击震动,对岩心无机械扰动,使地下岩层中的构造信息得以在岩心中保存。这种取心方法的缺点是,取心钻具结构较复杂,操作程序较繁琐,施工效率相对较低。此外,加工较长的半合管取心钻具的难度较大。当时只有长度 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。由于岩层破碎导致岩心堵塞以及

半合管长度有限 2 个因素的影响,WFSD-1 孔的平均回次进尺仅为 1.31 m。

参考 WFSD-1 孔钻进施工的数据,我们对 3000 m 取心钻孔的钻进施工时间进行了估算,其结果显示于图 1。根据图 1 所示的分析结果,当取心回次进尺较短时,采用绳索取心方法比提钻取心方法钻进施工效率要高得多。考虑到 WFSD-1 孔的回次进尺仅为 1.31 m,即使是进行技术改进,将此指标提高到 2~3 m,采用提钻取心方法的施工效率也还是明显低于绳索取心方法。根据技术经济分析的结果,再加上参考德国 KTB 先导孔和美国夏威夷科学钻孔的经验,我们决定将本项目的深孔取心钻进方法改为顶驱-绳索取心钻进方法。我们为此专门研制了全液压顶驱钻机和 $\varnothing 127$ mm 绳索取心钻杆。

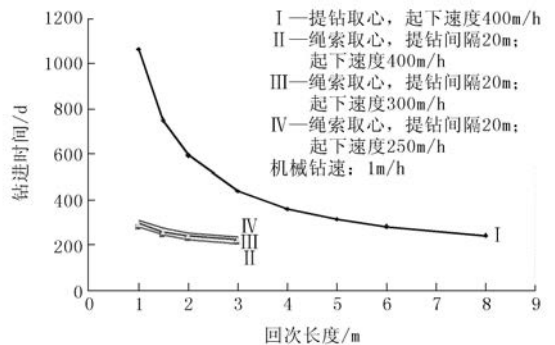


图1 回次长度和起下钻速度对 3000 m 孔取心钻进施工时间的影响

3 顶驱-绳索取心钻进方法在 WFSD-2 孔中应用的情况

在 WFSD-2 孔施工中,我们对顶驱-绳索取心钻进方法进行了试验,其结果为:进尺 55.51 m,回次数 1.914,平均回次长度 29 m,提钻次数 11 次,提钻间隔 5 m,打捞成功次数 22 次,打捞成功率 75.86%,岩心采取率 90.8%,时效 0.56m。

在应用顶驱-绳索取心钻进方法时,遇到了 2 方面的问题:(1)新研制的绳索取心钻具还不完善,还存在一些问题,导致内管的打捞成功率不太理想;(2)钻进效率低,原因是在破碎地层顶驱的转速上不去。采用的顶驱设计最高转速是 380 r/min,在 WFSD-2 孔钻进施工中只能达到略高于 100 r/min 的转速。因为地层破碎,钻孔坍塌、扩径严重,钻杆柱回转时与孔壁的摩擦阻力扭矩很高,顶驱的功率限制了转速的提高。第一个问题可以通过改进和完善钻具予以解决。第二个问题是顶驱钻进方法在破碎地层中应用所固有的特点,是无法解决的。并且,

进一步分析还会发现更多与此有关的问题:(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,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,在 1400 m 左右的近百米孔段取心极度困难,尽管采取了各种措施,岩心采取率也只能达到 40% 左右,回收的岩心呈碎石状。后来在此段进行侧钻补取岩心施工时,采用了螺杆马达驱动方式,取心进尺 105.51 m,岩心采取率 90.8%,岩心的完整程度也要好得多。

由于以上提到的几方面原因,在 WFSD-2 孔施工后期,我们停止采用顶驱-绳索取心钻进方法,代之以螺杆马达孔底驱动的取心钻进方法。

4 孔底动力取心钻进方法在 WFSD-2 孔中的应用情况

由于在破碎地层采用顶驱钻进的一系列缺点,我们开始考虑采用孔底动力取心钻进方法来解决存在的问题。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。我们对 2 种方法在破碎地层应用的特点进行了对比,得出以下结论:在破

碎地层进行取心钻进时,孔底动力钻进在机械钻速、钻进施工安全、取心质量、钻杆柱和钻头寿命等方面都要优于顶驱-绳索取心钻进。其唯一的不足是,需要通过提钻回收岩心,起下钻次数多,辅助时间长。但权衡之下,其优点大于缺点。并且,可以通过技术改进提高回次长度,进一步弥补其不足。由图 1 可知,提钻取心方法的回次进尺长度增加后,可明显减少施工时间。因此,我们在确定采用孔底动力驱动取心钻进方法后,在提高半合管取心的回次进尺长度方面开始进行技术攻关。采取了 2 方面措施:(1)研制长半合管,最初的半合管长度只有 2~3 m,我们研制成功了 4.5 和 6 m 长的半合管取心钻具;(2)采用液动锤,减轻岩心堵塞,提高回次进尺长度和机械钻速。

采用孔底动力钻进时,主要依靠螺杆马达的动力,Ø120 mm 螺杆马达的回转速度为 180 r/min,此时顶驱的动力只起辅助作用。顶驱以 15 r/min 慢速回转,主要作用是消除摩阻,使钻压有效地作用于钻头上。这种钻进方式被称为“复合钻进”,是一种对提高机械钻速、防斜和防止键槽卡钻等都有好处的钻进方式。表 1 给出了在 WFSD-2 孔中复合钻进与顶部驱动钻进应用效果对比。可看出,复合钻进在机械钻速和回次长度方面都明显优于顶驱钻进。复合钻进的另一个优点是对孔壁干扰小,比顶驱钻进更加安全。

表 1 WFSD-2 孔四开钻进阶段复合钻进与顶部驱动钻进效果对比

回转方式	回次编号	井深/m	进尺/m	心长/m	采取率/%	纯钻时/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
螺杆+顶驱复合回转	421	1558.07~1561.96	3.89	3.92	99.5	4.17	0.93
螺杆+顶驱复合回转	422	1561.96~1565.38	3.42	3.40	98.5	1.83	1.87
顶驱	423	1565.38~1568.27	2.89	3.00	101.7	7.17	0.40
顶驱	424	1568.27~1570.46	2.19	2.30	100.0	4.5	0.49
螺杆+顶驱复合回转	425	1570.46~1574.39	3.93	3.93	98.0	2.17	1.81
螺杆+顶驱复合回转	426	1574.39~1577.94	3.55	3.50	97.2	2.33	1.52

在 WFSD-2 孔五开钻进施工阶段,还对液动锤钻进的效果进行了试验,试验结果见表 2。

表 2 WFSD-2 孔五开钻进阶段 3 种驱动方式钻进效果对比

驱动方式	回次 数	进尺 /m	心长 /m	采取 率 /%	纯钻 时 /h	机械钻 速/(m·h ⁻¹)	回次 长度 /m
转盘单回转	1	1.29	0.67	51.94	5.33	0.24	1.29
转盘+螺杆	92	302.99	274.32	90.54	526.42	0.58	3.29
转盘+螺杆 +液动锤	28	119.50	116.09	97.15	154.92	0.77	4.27
合计(平均)	121	423.78	391.08	92.28	686.67	0.62	3.50

根据在 WFSD-2 孔中对 2 种孔底动力取心钻

进方法进行初步试验的结果得出结论:转盘+螺杆马达+液动锤+长半合管取心钻进方法以其机械钻速高、回次进尺长、取心质量好、对孔壁干扰小和钻杆柱磨损低等一系列优点,被认为是最适合于在破碎地层进行大直径、深孔取心钻进的方法。

5 螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法在 WFSD-4 孔中的应用

WFSD-4 孔是汶川地震断裂带科学钻探项目的钻孔中最深的钻孔,其设计孔深为 3350 m,终孔直径为 150 mm。该孔的地层以板岩为主,地层破碎

程度严重,片理发育,产状陡,钻进施工难度极大。该孔的上部为全面钻进,1450~1550和2000~3350 m孔段为取心钻进。根据WFSD-2孔的施工经验,决定在WFSD-4孔采用孔底动力取心钻进方法,包括螺杆马达-半合管取心钻进方法和螺杆马达-液动锤-半合管取心钻进方法。大量事实和经验告诉我们,液动锤钻进(冲击回转钻进)比纯回转钻进在机械钻速和回次进尺长度方法可有明显的提高。我们对2000~3350 m孔段的取心钻进施工进行了技术经济学分析,结果显示于图2和图3。我们在进行分析时,以较高的机械钻速和较长的回次进尺代表螺杆马达-液动锤取心钻进(PDM+HH)。反之,以较低的机械钻速和较短的回次进尺代表螺杆马达取心钻进(PDM)。

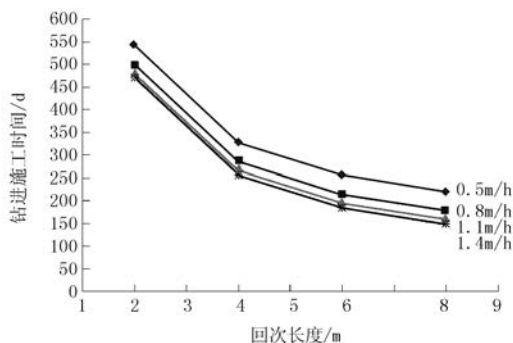


图2 回次长度和机械钻速对WFSD-4孔下部钻进施工时间的影响

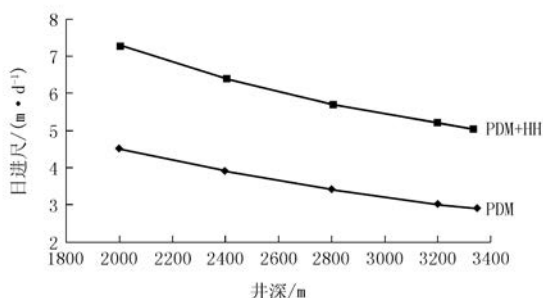


图3 螺杆马达取心钻进和螺杆马达-液动锤取心钻进方法用于WFSD-4孔下部施工钻进效率的对比

由图2可看出,对于WFSD-4孔2000~3350 m孔段的取心钻进施工来说,回次长度和机械钻速都对钻进施工时间起影响作用。不过,回次长度的影响作用远大于机械钻速。图3显示了采用螺杆马达-液动锤取心钻进(PDM+HH)和螺杆马达取心钻进(PDM)时平均日进尺随着井深变化的情况。进行此项分析时,螺杆马达-液动锤取心钻进(PDM+HH)施工的机械钻速取值为1.0 m/h、回次长度取值为5.0 m;而螺杆马达取心钻进(PDM)施工的机械钻速取值为0.6 m/h、回次长度取值为2.5

m。这些取值是参考WFSD-4孔钻进施工的数据确定的。

根据技术经济分析结果以及WFSD-4孔施工的实际经验,我们确定在进行该孔的取心钻进施工时采用螺杆马达-液动锤取心钻进方法。为获得较好的施工效果,应尽量提高回次进尺长度。为此,我们组织研发了9 m长的半合管。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,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。最重要的是,取出了长9 m的无扰动连续岩心柱(图4),这是举世罕见的。



图4 采用9 m长半合管取心钻具获取的连续无扰动的长岩心

需要指出的是,再好的钻进方法和取心工具也不可能解决所有的技术问题。尽管我们采用了螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法,并且研制出了9 m长的半合管取心钻具。但是,在一些严重破碎或含软泥的岩层,还是经常发生岩心堵塞,导致较短的回次进尺。因为这两类岩层的强度很低,进入岩心管的岩心受到轴向压力作用后容易产生径向变形,把钻头附近的岩心管堵得非常死,使得岩心在岩心管内径向轴向移动非常困难。在这种情况下,下入9 m长的取心钻具也打不满,因此,我们在更多的时候是采用6 m长的取心钻具,而不是9 m长的。只有在岩层较完整时才考虑使用9 m长的取心钻具。

6 结语

通过对汶川地震断裂带科学钻探项目大直径深孔破碎地层取心钻进方法应用演变过程的回顾,可得出以下结论。

(1)汶川地震断裂带科学钻探项目中采用的大直径深孔取心钻进方法经历了一系列演变,从螺杆马达-液动锤取心钻进变到顶驱-绳索取心钻进,

(下转第68页)

4.2 钻具方面

(1) 岩心管与岩心柱的摩擦阻力是岩心进入岩心管最主要因素,克服摩擦阻力即降低轴向力 F_x 也是行之有效的方法。有资料显示采用内平式无台阶低摩阻取心筒,在岩心管内壁做环氧树脂涂层以改善岩心柱进入取心筒的摩擦特性,从根本上解决岩心柱进入岩心管的高摩阻问题。现场 WFSD-4 现场采用涂刷润滑脂的方式,以降低岩心与岩心管的摩擦阻力,此种办法对碎岩块进入环状间隙导致堵心和岩心沿斜劈理面滑动导致堵心 2 种情况具有良好的效果。对有一组以上互成角度的劈理面的岩心柱,降低轴向的摩擦阻力,只会减轻岩心堵塞情况,这种情况的堵心主要与岩心柱的长度即岩心自重有关。

(2) 对由于岩心膨胀导致堵心(情况三),根据岩心膨胀变形程度,合理选择钻头和岩心管内径,增大岩心柱与岩心管之间的间隙配合以适应岩心的膨胀变形。增大岩心管内径会影响到取心钻具内外管级配以及内管刚度等问题,而且取心钻具对地层的适应性也随之降低。最直接的办法就是减小取心钻头内径。WFSD-4 孔现场取心钻头内径从 94 mm 减小至 92 mm,甚至 90 mm,对水敏性膨胀地层获得了良好的取心效果。

(3) 对地层松散、破碎或软弱引起的堵心,目前还没有比较简单、有效的方法解堵。国外 JamBuster 防卡取心钻具采用销钉连接多层衬筒结构,当岩心在衬筒里遇卡堵或者衬筒满管时,增加钻压会剪断销钉,释放衬筒,使第一层衬筒随岩心一起上行。新岩心可以进入第二层衬筒,第二次衬筒再次遇到卡心又会剪断销钉,使第二层衬筒叠式继续上行。第

3 次卡心或满管时,立管压力会变化,司钻人员依据进尺情况决定停止取心作业。JamBuster 防卡取心钻具巧妙的避开岩心堵塞内管实质,采用联动的取心内管结构可解决三次堵(卡)心而不用起钻。JamBuster 防卡取心钻具消除了岩心的磨损,与常规的取心工具相比,岩心采取率提高约 2 倍,对松散、破碎或软弱地层取心无疑是十分有效的。在国内目前对松散、破碎或软弱取心还没有切实可行办法。

(4) 选择合适的钻头类型,钻头的隔水效果取决于地层因素,钻头与卡簧座合适的间隙配合可以分流部分泥浆润滑岩心表面,使岩心顺利通过卡簧座进入岩心管。

5 结语

对复杂地层取心钻进岩心堵塞问题,首先要根据实际地层做出相应的判断,从岩心堵塞机理着手分析,采取对应的措施手段,在保证岩心采取率的基础上,提高机械钻速,增加回次长度确保取心效果。

参考文献:

- [1] 张祖培. 硬岩深孔的取心与方法[A]. 中国大陆科学钻探工程技术论文选集[C]. 北京:地质出版社,2007. 156-159.
- [2] 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.
- [3] 尤建武,曹其友,杨明奇,等. 汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)不同取心方法的应用效果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):9-12.
- [4] 王稳石. 勘探所 9 m 超长半合管钻具首次应用成功. <http://www.cgs.gov.cn/cgjz/kxjs/ywdongtai/19816.htm> [EB/OL].
- [5] 戴金岭,李开荣,薄万顺,等. 低摩阻取心筒的研究与应用[J]. 石油钻采工艺,1995,17(2):39-42.
- [6] 许俊良,宋淑玲,成伟. 国外钻井取心新技术(二)[J]. 石油机械,2000,28(10):53-57.

参考文献:

- [1] B. Engeser and L. Wohlgemuth. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland——KTB Bohrtechnische Dokumentation KTB REPORT 95-4 [R]. Niedersaechsischen Landeamt fuer Bodenforschung, 1996.
- [2] 张伟. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况[J]. 探矿工程,1999,(4):52-53.
- [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):5-7.
- [4] 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.
- [5] 张伟,贾军. 汶川地震科学钻探项目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.
- [6] 贾军,樊腊生,李旭东,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目二号孔(WFSD-2)完井报告[R]. 2011.

(上接第 64 页)

直到最后的螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进。其间,每个阶段采用的技术都与当时的地层条件和可采用的技术条件密切相关的,每一个阶段都是大直径深孔破碎地层取心钻进技术发展不可或缺的一环。

(2) 汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术发展和演变的最终结果表明:螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进方法是适合于大直径、深孔、破碎地层取心钻进施工的最佳方法,该方法在钻进施工的效率、成本和安全以及取心质量、钻杆柱和钻头寿命等方面表现出优于其它方法的综合效益。