

特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨

张 伟

(中国地质调查局汶川地震科学钻探工程中心,四川 成都 611734)

摘 要:讨论了特深岩心钻孔钻探施工的套管程序、钻具及其级配和固井等问题,深入分析了这些技术问题对特深孔钻探施工的风险性和经济性的影响作用。在分析研究的基础上,提出了对我国施工特深岩心钻孔时的套管程序、钻具级配、特深孔钻杆柱、套管柱以及固井等技术方案的建议。

关键词:特深岩心钻孔;套管程序;钻具级配;固井;钻柱方案

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)11-0001-05

Discussion on Casing Program and Drilling Tools Match Relation of Ultra-deep Geological Core Hole/ZHANG Wei
(Wenchuan Earthquake Scientific Drilling Engineering Center of China Geological Survey, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: In this article some technical questions, such as casing program, drilling tools and their match relation and cementing for the drilling operation of ultra-deep geological core hole have been discussed. The influence of these technical factors on the risk and economics of drilling operation of ultra-deep geological core holes are analyzed. On the basis of analytical study, proposals on the casing program, drilling tool match relation, ultra-deep drill string and casing string schemes and cementing program for the drilling of ultra-deep geological core holes are put forward.

Key words: ultra-deep geological core hole; casing program; drilling tool match relation; cementing; drill string scheme

1 前言

根据最新版《地质岩心钻探规程》的规定,特深岩心钻孔(以下简称特深孔)是指钻孔深度 ≥ 3000 m的地质取心钻孔。

近些年,我国地质岩心钻探工作量快速增长,矿产勘探深度不断加大,岩心钻探深度纪录频繁刷新。2008年以来全国完成的2000 m以上的岩心钻孔有20多口。此外,我国蓬勃发展的科学钻探,也对特深孔钻探施工提出了较大的需求:“深部探测技术与实验研究”专项、汶川地震科学钻探项目、白垩纪环境科学钻探项目,都有施工特深孔的计划。

由于地质找矿勘探和各类科学钻探项目对深钻施工的需求,特深孔的钻探技术问题已经提上议事日程。特深孔钻探施工中存在着一系列的技术问题需要解决,诸如钻探设备、套管程序、孔内钻具及其级配、钻进方法和钻进工具等,常规的钻探技术难以满足特深孔钻探施工的要求。本文探讨特深孔钻探施工的套管程序、钻具及其级配和固井等问题,主要包括:

- (1) 特深孔套管程序问题;
- (2) 特深孔施工钻具级配问题;
- (3) 特深孔固井问题;

- (4) 特深孔套管问题;
- (5) 特深孔钻杆柱问题;
- (6) 尾管设计和储备口径问题。

以上这些问题关系到特深孔如何打钻,能否钻达预定的目标以及钻进成本的高低,是特深孔钻探施工最基础和最重要的问题。而且上述因素彼此关联,必须同时考虑,统筹安排。在充分讨论上述问题的基础上,将提出对我国施工3000~5000 m地质岩心钻孔的套管程序、钻具级配和固井等技术方案的建议。

2 特深孔套管程序

2.1 特深孔套管层次

特深孔施工套管层次设置的主要依据是钻孔深度和地层条件,在设计时可参考已经完成的地质深孔或特深孔的施工经验。我国地质岩心钻探的孔深纪录是2706.68 m(安徽313地质队2010年创造^[1])。世界上施工地质勘探取心深孔最多的国家是南非,该国施工了一大批3000~4000 m深的金矿勘探钻孔,并以5422.76 m的深度创造了小口径深孔取心钻探的世界纪录^[2]。国内外部分深度2000 m以上岩心钻孔采用套管层次的情况见表1。

收稿日期:2010-10-21

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、教授级高级工程师,探矿工程专业,博士,从事科学钻探技术与管理工作,四川省成都市郫县现代工业港(北区)港华路139号,zhangwei@wfsd.org。

表1 国内外部分深度2000 m以上岩心钻孔的套管应用情况

项目名称	钻孔深度/m	终孔直径/mm	下部裸眼长度/m	套管尺寸/mm
辽宁铁矿勘探深孔 ^[3]	2010	77	1929	89
山东钾盐勘探深孔 ^[4]	2503.86	62	1115.79	146、108、81
安徽铁矿勘探深孔 ^[1]	2706.68	77	1476.31	146、127、108、89
巴拉圭油气勘探深孔 ^[5]	2987	77	337	245、178、127、94
南非金矿勘探深孔 ^[6] (一般设计)	4000左 右	76	2000左 右	203、130、89
南非金矿勘探最深孔 ^[2]	5422.76	80	4430.76	127、89

注:孔口管未计入套管层次。

2.2 特深孔套管程序的基本思路

参考国内外岩心深钻施工的经验以及国内专家有关深孔施工问题的建议^[7],对我国特深孔施工套管程序的总体思路作出如下建议:

(1)考虑钻孔深度范围为3000~5000 m,套管层次为3~5层(孔口管不计在内),具体根据钻孔深度和地层条件确定;

(2)Ø77 mm作为标准的终孔口径,Ø60 mm作为储备口径;

(3)所有都采用标准套管(无接箍石油套管或地质套管);

(4)所有的套管都用水泥固结;

(5)引入尾管设计。

3 特深孔施工钻具级配

确定钻具级配时,应考虑以下3个间隙:

(1)钻头与套管间隙:钻头与上一级套管之间的间隙;

(2)套管环空间隙:套管与钻孔之间的间隙;

(3)钻杆环空间隙:钻杆与钻孔之间的间隙。

考虑钻具间隙时应遵循以下基本原则:钻头与套管间隙应保证钻具能在套管内顺利通行;套管环空间隙应考虑在较复杂的地层条件下的下套管和固井的可能性;钻杆环空间隙应利于降低深钻施工时钻孔/钻杆环空的压降。

3个间隙的建议取值范围是:

(1)钻头与套管间隙 ≥ 1.5 mm;

(2)套管环空间隙 ≥ 3 mm;

(3)钻杆环空间隙 ≥ 3 mm。

4 混合管柱设计

在深钻施工中,应借鉴石油钻井和国外地质岩心深钻施工的经验,尽量采用混合管柱设计。

所谓混合管柱,是指套管柱或钻杆柱是由不同材质、不同壁厚,甚至不同直径的钻杆或套管组成。混合管柱的上部强度较高,下部强度较低,基本思路是:在保证管柱强度和施工要求的基础上,降低管柱成本。

5 特深孔套管和固井

5.1 特深孔的套管问题

目前地质钻探采用的套管一般材质性能较差(钢号DZ40),并且不进行热处理,因此套管柱的强度较低,不适宜深孔、尤其是特深孔的钻探施工。解决问题的措施包括:

(1)采用性能较高的钢级作为套管材料;

(2)对套管进行热处理;

(3)设计套管柱时可采用混合管柱的思路,即管柱上部采用强度较高的套管,下部采用强度较低的套管。这样做,可在保证套管柱强度的基础上降低成本。

5.2 特深孔固井的必要性

目前地质钻探常规的做法是,下套管不固井,完钻后尽可能将钻孔内的套管拔出。

特深孔施工应该固井,理由如下:

(1)下套管后不固井,容易发生套管脱扣和断裂事故,钻孔越深,钻杆敲击套管的时间越长,发生套管事故的可能性就越大;

(2)拔出套管后,钻孔因得不到保护基本上就报废了,无法再被利用,而特深孔钻探费用高、代价大,弃之不用,实在太可惜了。

特深孔可能在以下几方面得到利用:一是作为科学钻探的“机会井”,可在钻孔中进行各种地学测试和实验;二是可以被用作地震监测孔;三是可为今后出于找矿或地学研究的目的是进一步加深钻孔提供机会。

5.3 尾管固井问题

5.3.1 采用尾管固井的优点

应将石油钻井领域常用的“尾管固井”引入地质钻探。深孔或特深孔施工采用尾管固井具有以下优点^[6]:

(1)可节省大量套管,因此减少套管费用;

(2)使塔式钻杆柱的采用成为可能(图1),有利于加大钻孔深度和降低施工成本;

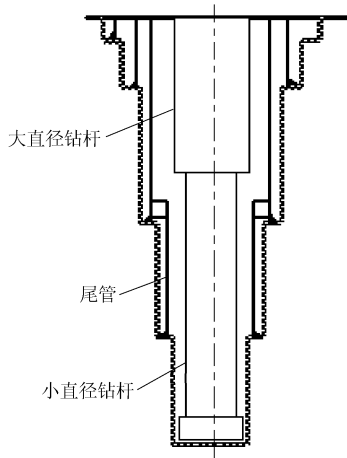


图 1 尾管固井后塔式钻杆柱的应用原理

常规的尾管悬挂方式(卡瓦式尾管悬挂器)空间不足,必须采用特殊的尾管悬挂方式——膨胀套管悬挂尾管方法^[8,9]。这种悬挂方法是以实体膨胀管技术为基础发展起来的,它利用金属挤压变形的原理,通过涨锥使悬挂器的可膨胀本体发生径向形变紧贴于上层套管内壁上,从而实现悬挂尾管的目的(图 2)。这种悬挂方法需要的空间小,施工简便,成本低,适合于地质勘探的钻进施工。

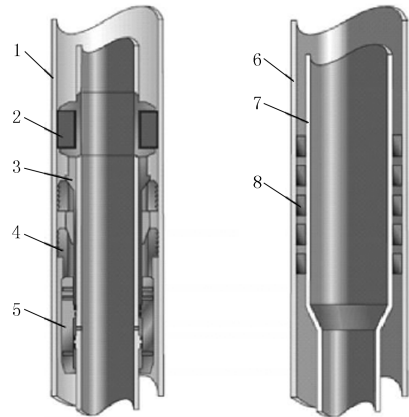


图 2 不同形式的悬挂器对比

1,6—套管;2—封隔器;3—锥套;4—卡瓦;5—液缸;7—膨胀本体;8—橡胶组

(3)可降低环空循环压降(包括钻进和固井),一方面可降低对泵的要求,另一方面有利于施工安全。

5.3.2 尾管固井设计应注意事项

- (1)尾管上部孔段的环空上返流速不宜过低;
- (2)下尾管后,应该固井。

5.3.3 尾管固井方案

一般来说,可考虑两种尾管固井的情况:

- (1)Ø89 mm 套管作为尾管:如果能以 Ø77 mm 口径终孔,则可将 Ø89 mm 套管设计成尾管;
- (2)Ø73 mm 套管作为尾管:如果要用到 Ø60 mm 储备口径,则可将 Ø73 mm 套管设计成尾管。

5.4 小间隙尾管悬挂问题

在 Ø114 mm 套管内悬挂 Ø89 mm 尾管以及在 Ø89 mm 套管内悬挂 Ø73 mm 套管,间隙太小,采用

6 储备口径(Ø60 mm 口径)应用问题

Ø60 mm 可作为应急的储备口径。如果 Ø77 mm 口径钻进未能钻达预定深度,可下 Ø73 mm 套管,采用 Ø60 mm 钻进。此时应将 Ø73 mm 套管设计成尾管。不采用尾管设计,将会带来诸多不利,以下进行具体分析(参见图 3)。

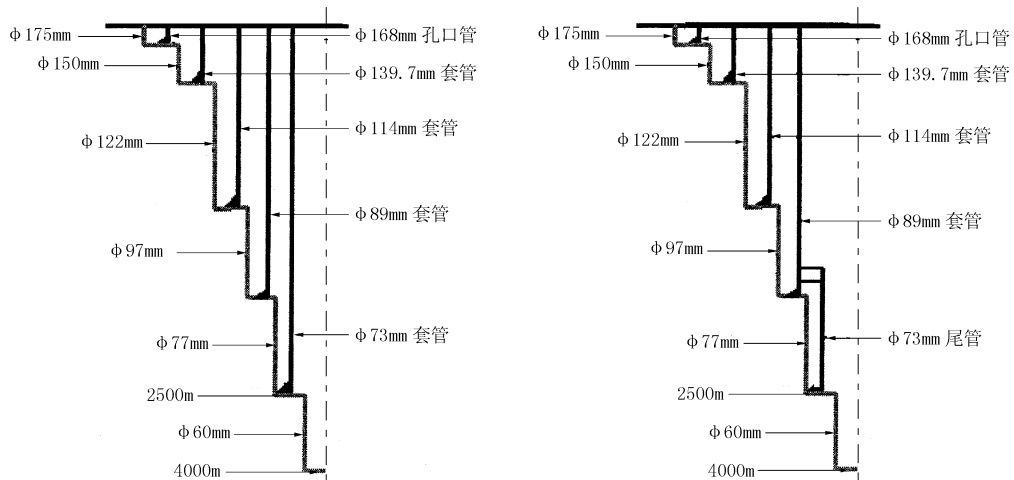


图 3 尾管设计对特深孔施工的影响

假设施工 4000 m 钻孔时,需要在 2500 m 处下 Ø73 mm 套管,然后采用 Ø60 mm 直径钻进。如果不

采用尾管设计,须将 Ø73 mm 套管延伸至地表,将会遇到以下问题:

(1)多用1000 m以上的套管;

(2)长度2500 m的 $\varnothing 73$ mm套管柱强度成问题,技术难度很大;

(3)长度4000 m的 $\varnothing 55$ mm钻杆柱强度成问题,技术难度很大;

(4)长度4000 m的狭小环空间隙(孔壁和 $\varnothing 73$ mm套管与 $\varnothing 55$ mm钻杆的间隙)中,环空循环压降会很高,这一方面不利于钻孔安全,另一方面对泥浆泵提出高的要求。

为了解决以上问题,可采用塔式钻柱(图1),钻杆柱由上部 $\varnothing 71$ mm钻杆和下部 $\varnothing 55$ mm钻杆组成。钻进时, $\varnothing 71$ mm钻杆在 $\varnothing 89$ mm套管内运动, $\varnothing 55$ mm钻杆在 $\varnothing 73$ mm套管内运动。由于 $\varnothing 55$ mm钻杆位于钻柱下方,受力较小,不要求具有特深孔钻进能力,采用普通设计便可。 $\varnothing 73$ mm套管柱强度和高循环压降的问题可同时得到解决。

7 特深孔钻杆柱问题

特深孔施工钻杆柱的主要问题是:钻孔深度大后,钻杆柱重力加大,钻杆会超过其强度极限而受到破坏,疲劳破坏作用会使钻杆柱破坏的时间提前。

可以采取3方面的措施来解决以上问题。这些措施是:(1)采用隔径取心钻具;(2)采用混合钻杆柱;(3)采用铝合金钻杆柱。

7.1 隔径取心钻具

隔径取心钻具的基本思路是:与常规取心钻具相比,同级的钻头外径,获得小一级的岩心。如HNQ钻具采用H尺寸的钻具,产生的岩心直径与常规N尺寸钻具的相当(参见表2)。采用这种设计的目的是加大钻杆,尤其是钻杆接头的壁厚,从而使钻杆柱具有更强的钻深能力。在实施中,可以根据具体情况来确定加大钻杆接头壁厚的程度,不一定必须是隔一级,隔半级或更少都是可能的。

7.2 混合钻杆柱

采用混合钻杆柱是因为钻杆柱上部受力比下部大,因此下部可采用较薄、材质较差或直径较小的钻杆,以降低钻杆柱的总重力和成本。至少有两种情况的混合钻杆柱,一种是上部和下部钻杆直径相同但材质和壁厚有差别的钻杆柱(参见表2);另一种是上部钻杆直径较大、下部钻杆直径较小的钻杆柱,如上部采用 $\varnothing 89$ mm绳索取心钻杆柱、下部采用 $\varnothing 71$ mm钻杆柱。

7.3 铝合金钻杆柱

采用轻质的铝合金作为钻杆柱材料,是解决超

深孔钻柱问题的有效途径。尽管铝合金的屈服强度比钢的低,但铝合金的密度比钢的低得多,其钻柱重力也比钢钻柱小得多,铝合金钻柱中由钻柱自重引起的应力比钢钻柱的小得多。因此,铝合金钻柱显示出更大的钻深能力,世界上最深的科拉超深钻^[10](深度12262 m,采用提钻取心方法施工)和最深的绳索取心钻孔(南非5423 m的金矿勘探孔)就是用铝合金钻柱施工的。在南非施工特深岩心钻孔的钻杆柱中,铝合金钻杆柱的钻深能力是最强的^[11](参见表2)。此外,采用铝合金钻柱可明显减轻对钻机负荷的要求,可加速起下钻过程,节省起下钻时间20%~25%^[12]。

表2 南非深孔绳索取心钻杆主要参数

钻杆型号	钻孔直径/mm	岩心直径/mm	钻杆外径/mm	钻杆内径/mm	接头内径/mm	钻深能力/m	每米质量/kg
CUD96	96.0	47.6	89.0	75.0	50.3	4100	16.0
CUD76	76.0	36.5	69.9	57.2	46.2	4200	11.2
CHD76	76.0	43.5	69.9	60.3	55.0	3200	8.4
ALU76	76.0	36.5	69.9	50.8	46.2	6000	6.4

注:钢钻杆接头内加厚,摩擦焊连接,接头硬化处理1.5 mm,钻杆安全系数2:1。

参考借鉴国外的经验,最好采用外平式钻杆,以便降低钻杆柱被卡的风险。这意味着,钻杆接头采用内加厚设计。

8 上部孔段全面钻进问题

特深孔钻探的目标层一般在地下岩层的较深部位。为了节省特深孔施工的时间和成本,在远离目标层的上部,可以采用全面钻进。国外进行特深孔钻探时就采取了这种做法:南非在进行4000 m左右的金矿勘探时,上部全面钻进孔段的长度约为1000 m,采用空气潜孔锤钻进方法施工,效率非常之高,曾经取得过21天进尺1448 m的纪录^[11];美国进行5000 m左右的金矿勘探时,上部全面钻进孔段的长度约为3000 m,采用牙轮钻进方法施工,其钻进效率也远远高于取心钻进^[13]。

9 对我国特深岩心钻孔施工套管程序的建议

参考国内外已经完成的深钻项目套管程序的经验和根据以上关于特深孔套管程序和钻具级配影响因素分析的结果,现提出我国施工3000~5000 m地质岩心钻孔的套管程序和钻具级配(见表3)。表3的程序和钻具级配可适用于最多5层套管(孔口管除外),根据世界上同类钻孔施工的经验,表中给出的套管可以满足5000 m以内地质岩心深孔钻进

的需要。在深钻施工实施中,可视具体的地层条件和钻孔深度,采取其中的 3 层、4 层或 5 层套管。

表 3 建议的特深岩心钻孔套管程序和钻具级配

取心钻进方法	套管	套管	套管	钻头	套管与	钻头与	钻杆	钻杆与
	外径 /mm	壁厚 /mm	内径 /mm	尺寸 /mm	孔壁间 隙/mm	套管间 隙/mm	外径 /mm	孔壁间 隙/mm
全面钻进或提钻取心	193.7	7.6	178.5	205	5.65			73
全面钻进或提钻取心	168	7.3	153.4	175	3.5	1.75		73
提钻取心或绳索取心	139.7	6.2	127.3	150	5.15	1.7	127	11.5
绳索取心	114	5.7	102.6	122	4	2.65	114	4
绳索取心	89	4.5	80	97	4	2.8	89	4
绳索取心	73	4.5	64	77	2	1.5	71	3
绳索取心				60		2	55	2.5

注:Ø73 mm 套管作为储备套管,Ø60 mm 口径作为储备的终孔直径。

参考文献:

[1] 朱恒银. 深部矿体勘探钻探技术方法研究[A]. 深部地质钻探技术培训交流会[C]. 安徽黄山:2010.
 [2] J. R. Savage. 用绳索取心钻探的世界最深孔[A]. 刘广志, 等. 第三届大陆科学深钻国际会议论文集[C]. 1990.

[3] 卢飞, 李华, 赵振峰, 等. 2010 m 斜孔钻探设备选择及技术措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(3): 1-3.
 [4] 陈志连. 深孔钻探新纪录——绳索取心孔深 2503.86 米[A]. 刘广志, 等. 超深孔地质钻探信息资料专辑. 1988. 300-304.
 [5] K. B. Grun. 绳索取心钻探在巴拉圭钻进深达 2987m[J]. 探矿工程译丛, 1992, (2).
 [6] 胡浦元. 深孔超深孔岩心钻探的若干问题[J]. 探矿工程, 1984, (3).
 [7] 王达. 深孔岩心钻探的技术关键[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1).
 [8] 郭朝辉, 马兰荣, 姚辉前, 等. 膨胀式尾管悬挂器在国外油田的应用[J]. 石油机械, 2009, 37(9): 162-165.
 [9] 张益, 李相方, 李军刚, 等. 膨胀式尾管悬挂器在高压气井固井中的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 57-59.
 [10] E. A. 科兹洛夫斯基. 科拉超深井(下)[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
 [11] Trevor Fletcher. Drilling Exploration Boreholes beyond 4000 m in South Africa[J]. Mineral Water and The Environment. 1992, 11(4): 43-52.
 [12] 鄢泰宁, 薛维, 卢春华. 铝合金钻杆的优越性及在地探深孔中的应用前景[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(2): 27-29.
 [13] B. Wagner. 可靠的连续取心系统钻探技术的成功混合[A]. 刘广志, 等. 第五届大陆科学深钻国际会议论文集. 1991. 52-56.

地质钻探技术为资源探测提供强力支撑

中国国土资源报消息 国土资源大调查项目实施以来,我国钻探技术和装备已经形成系列产出,并直接服务于矿产资源勘查、地质调查和地球动力学研究。

通过中国大陆科学钻探工程的实施,建立包括螺杆马达液动锤金刚石取心钻探技术系统,液动锤钻进技术、螺杆钻+液动锤+绳索取心三合一钻具、KZ 型 CCSD 专用扩孔钻头、新型金刚石钻头在内的具有国际先进水平的科学钻探技术体系,对地球科学研究起到了重要的支撑作用,推动了我国科学钻探技术的进步和发展。

完成了 300、600、1000、1500 和 2000 m 系列全液压地质岩心钻机的研制,实现了对进口产品的替代,为我国地质钻探装备的更新换代提供了现代化产品。目前在国内市场占有率已经超过 70%,并出口澳大利亚、俄罗斯、吉尔吉斯斯坦、蒙古等国。

在地质大调查项目、科技部“863”项目和危机矿山专项项目的支持下,完成了 2000 m 全液压岩心钻机及配套设备的研究,包括 2000 m 全液压力头岩心钻机、配套泥浆泵、高精度钻探参数检测系统、钻井液固控系统、深孔用绳索取心钻杆、绳索取心液动潜孔锤钻具、不提钻换钻头钻具以及长寿命金刚石钻头,完成了 2000 m 岩心钻探设备、器具配套

集成研究和应用示范,标志着我国 2000 米地质岩心钻探技术体系已基本形成,提高了我国地质钻探技术整体水平。

开发出陆地、浅海和滩涂地质调查取样钻探技术和装备,为特殊景观地区实施地质填图、化探采样和土地环境评估等领域提供了有效的技术手段。

开展了天然气水合物勘探开发钻探技术研究,在高原冻土区成功钻获天然气水合物样品,使我国天然气水合物勘探取得重大突破;在海拔 4200 m 的青海省祁连山脉木里高原冻土区进行了我国第一口“祁连山冻土区天然气水合物 DK-1 科学钻探实验孔”钻探施工,并成功钻获了天然气水合物样品。

完成了高精度定向对接中靶系统研究,实现了地下导航高精度定向对接连通,这是对接井施工技术的重大突破,标志着我国定向对接井钻井技术在国际上处于主导地位。通过土耳其天然碱工程的实施,实现从两井对接连通到多井对接连通的技术跨越;在此基础上,促进了对接井钻进实现从单点服务到多点服务—技术服务到工程总承包—国内工程到国外工程的转变。

此外,还逐步建立了一支业务过硬的钻探技术研发队伍。