

◀科钻一井专栏▶

# 科钻一井套管和钻进施工程序设计技术

张 伟<sup>1</sup> 王 达<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国大陆科学钻探工程中心, 北京 100011)

**摘要:** 套管程序和钻进施工程序设计遇到的主要问题是: 1) 1 000 m 以深地层未知, 地球物理方法用于结晶岩的效果差, 推断的结果可信度低, 进行套管程序设计缺乏依据; 2) 要求 5 000 m 全部取心钻进, 选择合理的取心钻进施工程序成为难题。为此, 在借鉴世界上主要硬岩深井取心钻进项目设计的先进思想和宝贵经验的基础上, 制定了一种“灵活的双孔钻进”方案, 其要点是: 1) 全井采用一种直径(小直径)取心钻进; 2) 预先不确定套管程序, 钻进中视地层稳定情况扩孔下套管; 3) 按照双孔(先导孔+主孔)设计, 钻完先导孔后再根据情况决定是扩孔钻主孔, 还是移井位钻主孔。在分析该井套管和钻进施工程序难点的基础上, 介绍了采取的“超前孔裸眼钻进方法”, 给出了 8 种套管和钻进施工程序。

**关键词:** 套管程序; 钻井程序; 科钻一井

**中图分类号:** TE22    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1001-0890 (2006) 03-0004-04

“中国大陆科学钻探工程”是国家重大科学工程项目之一, 也是国际大陆科学钻探计划的重点项目。其总体目标是: 通过利用现代深部钻探高新技术, 在具有全球地学意义的大别—苏鲁超高压变质带东部(江苏省东海县)实施中国第一口 5 000 m 科学深钻(科钻一井), 利用从钻孔中获取的岩心及液、气态样品与井下原位观测数据, 进行多学科综合研究, 查明大陆造山带的物质组成与结构构造, 揭示超高压变质带的形成与折返机制, 探索现代地下深部流体与极端条件下的微生物, 建立长期的地下观测与实验基地。

科钻一井先导孔于 2001 年 6 月 25 日开钻, 2002 年 4 月 15 日顺利钻至井深 2 046.54 m 完钻; 主孔于 2002 年 5 月 7 日开始, 2005 年 1 月 23 日钻至井深 5 118.2 m 完钻。

在科钻一井的钻进施工过程中, 我国技术人员克服了重重困难, 解决了各种各样的钻探技术难题, 完全采用我国自己开发的钻探技术, 实现了高难度的钻进目标, 除获得了丰硕的地学研究成果之外, 在钻探技术方面也取得了一批重大成果, 笔者主要介绍科钻一井的套管和钻进施工程序设计方法。

## 1 套管和钻进施工程序设计难点

### 1.1 套管程序设计问题

科研一井总共计划下几层套管? 每一层套管的下深是多少? 由于 1 000 m 以深地层未知, 地球物理方法用于结晶岩的效果差, 推断的结果可信度低, 因此

进行套管程序设计缺乏依据。如果设计的套管层次太少, 可能在遇到复杂情况时因为套管层次不够而导致整个钻进施工失败; 如果考虑较多层次的套管, 会导致施工成本大幅度上升。

### 1.2 钻进施工程序问题

科钻一井要求 5 000 m 井段全部取心钻进。由于深 5 000 m 的井眼按直径可分成几段(取决于套管程序), 那么每个井段采取何种取心钻进技术? 是采用与井径相同的钻头取心钻进, 还是对不同井段都采用一种较小直径的钻头取心钻进, 根据需要再扩孔? 采用不同的取心钻进方案, 对取心钻进系统、钻进方法以及钻进施工程序的要求是不一样的, 钻进施工的难度和成本也是不一样的。对于科钻一井的钻井设计来说, 面临着两种策略的抉择。

1) 策略 1。根据套管程序, 每个井段采用一种取心钻进系统, 全井有几个井段, 就有几种取心钻进系统。其优点是, 不考虑扩孔钻进, 施工程序比较简单。其缺点是: a. 要研制不同尺寸的取心钻进系统,

---

收稿日期: 2006-03-28

基金项目: 国家重大科学工程项目——中国大陆科学钻探工程(CCSG)部分研究成果

作者简介: 张伟(1954—), 男, 1978 年毕业于武汉地质学院探矿工程专业, 在读博士, 现任中国地质调查局科技外事部新技术处处长, 教授级高级工程师, 任科钻一井施工现场指挥部总工程师。

联系电话: (010) 51632908

难度很大; b. 大直径取心钻进的成本高。

2) 策略 2。只采用一种直径(小直径)进行取心钻进, 需要下套管时扩孔。其优点是: a. 只研制一种取心钻进系统, 并且直径较小, 研究与开发的难度要小得多, 取心钻进系统的可靠性也会高得多; b. 小直径取心钻进成本低。其缺点是: a. 要考虑几种直径的扩孔钻进, 施工程序要复杂一些; b. 这种施工方式国内尚无实践可供借鉴, 实施起来有很多技术难题。

## 2 设计方法

在对国外科学深钻施工情况进行了详细调研, 并对调研结果总结分析后, 决定采用一种特殊的套管和钻进施工程序设计方法——“超前孔裸眼钻进方法”(advanced open borehole method), 这是前苏联在结晶岩中施工科学深孔和超深孔时采用的套管程序和钻进施工程序设计方法<sup>[1]</sup>。其基本思路为: 设计时先不确定整个井眼的井身结构和套管程序, 而仅考虑井眼的上部, 一般来说仅确定第一层(有时到第二层)套管的深度, 因为上部的地质和地球物理资料还是比较可信的。开孔、钻穿松散地层并进入稳固的基岩后, 下入导管并用水泥固结。在固定套管内下一层可回收的活动套管, 然后以较小的直径, 即能获得最佳技术经济指标的直径(前苏联采用 215.9 mm)进行取心钻进。如果遇到复杂地层必须下套管时, 将活动套管拔出, 扩孔钻进穿过不稳定层, 下套管固井, 然后继续往下钻。根据套管直径和井深情况, 可能在新下的技术套管内继续悬挂活动套管。

安放活动套管的主要目的是减小环空间隙, 以便实现: 1) 改善环空水力学效果, 保证岩屑的有效清除; 2) 改善钻柱工作状态, 延长其使用寿命, 同时减少钻具折断事故。

这种施工方法的特点是: 1) 采用一种直径的小尺寸钻头取心钻进, 一是可保证较高的钻进效率, 二是可降低取心钻进系统研制的难度, 并提高其可靠性。2) 具有很好的灵活性。如果地层稳定, 尽量采用长裸眼钻进方式, 以减少下套管的层次, 简化井身结构, 最终降低施工成本。对于可能遇到的复杂地层, 采取了预留套管层次的措施。

## 3 设计方案

采用超前孔裸眼钻进方法, 设计了科钻一井的套管程序<sup>[2]</sup>(见图 1)。出于施工经济性的考虑, 设计取心钻进的直径是 157 mm, 没有仿照前苏联采用

216 mm。计划采用金刚石钻头取心钻进方法, 钻头内径为 94~96 mm, 即使采用直径较小的钻头, 也会获得较大直径岩心。按照图 1 所示的套管程序设计施工并不一定保证 5 000 m 取心钻进的成功, 只能说对可能遇到的复杂情况进行了较多的考虑, 而采取的储备措施到底能否满足施工的要求, 主要取决于岩层的完整程度和井斜情况。为了确保完成 5 000 m 取心钻进施工任务, 减少施工的风险, 设计采用了“双孔钻进”的方案。

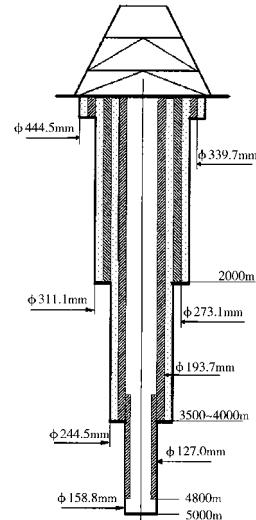


图 1 科钻一井设计套管程序

“双孔钻进方案”是科学深钻施工的一种新方法, 即在钻深孔或超深孔之前, 先在深孔或超深孔孔位附近钻一口直径相对较小、深度相对较浅的先导孔, 后钻的深孔或超深孔称之为“主孔”。德国在实施其科学深钻计划(KTB)时就采用了这种方案<sup>[3]</sup>。按该方案施工超深孔, 至少分为三个阶段:

第一阶段。在主孔附近, 采用连续取心的方法, 钻进深度为 3 000~5 000 m 的先导孔。在该孔中进行大量的测井。

第二阶段。钻进主孔的第一部分, 即与先导孔深度相同的井段, 深度为 3 000~5 000 m。该井段基本不取心, 仅进行少量的测井, 其重点是垂直钻进, 尽量保持井眼垂直, 为超深井段的顺利施工奠定良好的基础。

第三阶段。钻到主孔的设计井深后完钻。

施工先导孔主要有以下一些优点:

1) 由于钻先导孔时是连续取心并进行了大量测井, 故可大大减少主孔相同井段的取心钻进和测井的工作量和成本。

2) 与先导孔等深的主孔井段在钻进时可以不取心, 这样有利于采取各种防斜措施确保井眼垂直, 有

利于下部施工的顺利进行。

3) 验证预测的温度剖面, 为主孔深部设计提供重要依据。

4) 提供有关复杂岩层,如漏失层、涌水层和破碎带以及地层压力梯度的信息,为主孔的钻探技术设计提供依据。

5) 检验和标定将用于主孔钻进和测井的工具、仪器和方法。

科研一井采用双孔钻进方案见图2。先导孔设计深度为2 000 m, 先导孔与设计深度5 000 m的主孔相距100 m。该方案将根据先导孔施工的结果最终确定, 是采用双孔钻进方案, 还是单孔钻进方案。如果先导孔施工质量优良, 井斜被控制在允许的范围内, 套管程序比较简单, 则不必移井位后钻主孔, 而直接将先导孔扩大并下套管, 后续施工按原主孔设计的进行, 这样就实现了“二孔合一”, 由双孔钻进变为单孔钻进<sup>[4]</sup>。反之, 如果先导孔套管程序比较复杂或井斜情况比较严重, 那么必须实施双孔钻进, 即在距先导孔100 m的地方施工主孔。

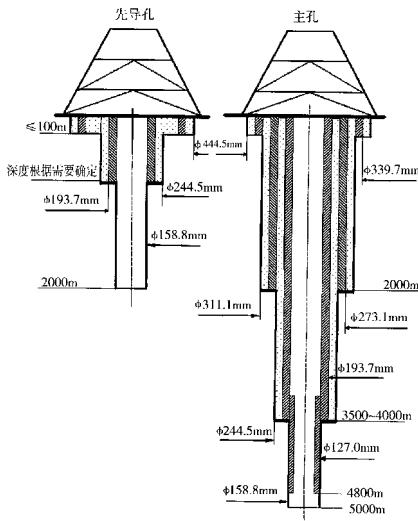


图 2 科钻一井双孔钻进方案

根据施工的具体情况,科钻一井的套管和钻进施工程序至少有以下8种可能性,分别是:

### 施工程序 I (双孔钻进)

- 1) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
  - 2) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管, 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进, 钻孔深度  $\leq 1000$  m 时遇复杂层情况, 需要下套管, 考虑到计划的套管层次可能不够, 进行双孔钻进是必要的, 穿过复杂层后停钻;
  - 3) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
  - 4) 采用  $\phi 244.5$  mm 钻头扩孔钻进至井底;

- 5) 下入  $\phi 193.7$  mm 套管固井；
  - 6) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至进深 2 000 m 后停钻，先导孔施工结束；
  - 7) 移动钻机 100 m (钻主孔)；
  - 8) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m，下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井；
  - 9) 采用  $\phi 311.1$  mm 牙轮钻头和钟摆钻具组合全面钻进至井深 2 000 m，下入  $\phi 273.1$  mm 套管固井；
  - 10) 下入 2 000 m  $\phi 193.7$  mm 活动套管；
  - 11) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至完钻井深 5 000 m。

## 施工程序 II (双孔钻进)

以程序 I 为基础, 进行到第 11 步时, 在 3 000~4 000 m 井段遇到复杂地层, 需要下套管, 则以下的程序是:

- 12) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管；
  - 13) 采用  $\phi 244.5$  mm 钻头扩孔钻进至井底；
  - 14) 下入  $\phi 193.7$  mm 套管固井；
  - 15) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至井深 5 000 m 后停钻，主孔取心钻进施工结束。

### 施工程序Ⅲ（双孔钻进

- 1) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻进 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
  - 2) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
  - 3) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻至井深 2 000 m 时井斜严重, 并且还有继续增加的趋势, 据分析进行双孔钻进是必要的, 停钻;
  - 4) 移动钻机 100 m (钻主孔);
  - 5) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
  - 6) 采用  $\phi 311.1$  mm 牙轮钻头和自动垂钻系统全面钻进至井深 2 000 m, 下入  $\phi 273.1$  mm 套管固井;
  - 7) 下入 2 000 m  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
  - 8) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至完钻深度 5 000 m, 主孔取心钻进施工结束。

### 施工程序 N (双孔钻进)

以程序Ⅲ为基础,进行到第8步时,在3 000~4 000 m井段遇到复杂地层,需要下套管,则以下的程序是:

- 9) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
  - 10) 采用  $\phi 944.5$  mm 钻头扩孔钻进至井底;
  - 11) 下入  $\phi 193.7$  mm 套管固井;
  - 12) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻至井深 5 000 m  
后停钻, 主孔取心钻进施工结束。

### 施工程序V (单孔钻进)

- 1) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
- 2) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管, 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至井深约 2 000 m 时遇复杂地层, 此时井斜角不大, 可以实现“二孔合一”, 穿过复杂地层后停钻;
- 3) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
- 4) 采用  $\phi 311.1$  mm 牙轮钻头和钟摆钻具组合全面钻进至原井深, 下入  $\phi 273.1$  mm 套管固井;
- 5) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管至原井深;
- 6) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至完钻井深 5 000 m, 取心钻进施工结束。

### 施工程序VI (单孔钻进)

以程序V为基础, 进行到第6步时, 在3 000~4 000 m井段遇到复杂地层, 需要下套管, 则以下的程序是:

- 7) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
- 8) 采用  $\phi 244.5$  mm 钻头扩孔钻进至井底;
- 9) 下入  $\phi 193.7$  mm 套管固井;
- 10) 采用  $\phi 157$  mm 钻头取心钻进至井深 5 000 m 后停钻, 取心钻进施工结束。

### 施工程序VII (单孔钻进)

- 1) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
- 2) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
- 3) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进, 在3 000~4 000 m井段钻遇复杂地层, 据分析可以实现“二孔合一”, 穿过复杂地层后停钻;
- 4) 起出  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
- 5) 采用  $\phi 244.5$  mm 钻头扩孔钻进至井底;
- 6) 下入  $\phi 193.7$  mm 套管并固井;

## Casing Program Design and Drilling Operational Procedure in Well CCSD-1

Zhang Wei<sup>1</sup> Wang Da<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei, 430074, China;  
2. CCSD Engineering Center of China Geological Survey, Beijing, 100011, China)

**Abstract:** The main problems encountered while drawing up the casing program and drilling procedure are: 1) Because the rock formation below 1 000 m is unknown, and the poor results from geophysical method used in crystalline rock formation make it hard to draw up casing program for the project. 2) There are challenges in making a continuous coring drilling program for a 5 000 m deep well. Based on advanced design concept and experiences of the main scientific deep drilling projects in the world, a special plan named flexible double-hole drilling program has been drawn up. The main points of the program are as follows: 1) Only one diameter for coring the whole well is considered. 2) The casing program for the well is subject to borehole stability and hole reaming. 3) A double-hole (Pilot Hole + Main Hole) drilling plan will be drawn up. Considering the drilling results of the completed pilot hole, the main hole will be drilled by reaming the pilot hole or by drilling a second hole. On the basis of analyzing challenges of running the casing and drilling operations, the super-pilot open-hole drilling method is presented, and eight sets of casing and drilling program are introduced.

**Key words:** casing program; drilling procedure; Well CCSD-1

- 7) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至井深 5 000 m 后停钻, 取心钻进施工结束。

### 施工程序VIII (单孔钻进)

- 1) 采用  $\phi 444.5$  mm 钻头钻至井深 100 m, 下入  $\phi 339.7$  mm 套管固井;
- 2) 下入  $\phi 193.7$  mm 活动套管;
- 3) 采用  $\phi 157.0$  mm 钻头取心钻进至井深 5 000 m 后停钻, 取心钻进施工结束。

## 4 结 论

针对科钻一井特殊和恶劣的钻进施工条件(在坚硬的结晶岩地层中连续取心钻进 5 000 m, 地层情况基本未知), 制定了一种特殊的套管和钻进施工程序, 即“灵活的双孔钻进方案”。其要点为: 1) 全井采用一种直径(157.0 mm)取心钻进; 2) 预先不确定套管程序, 钻进中视地层稳定情况扩孔下套管; 3) 按照双孔(先导孔+主孔)设计, 钻完先导孔后再根据情况决定, 是扩孔钻主孔, 还是移井位钻主孔。这种套管和钻进施工程序方案具有很大的灵活性, 既能保证在岩层条件比较简单、施工比较顺利时, 以比较低的成本完成钻进施工; 又能在岩层条件复杂、施工不顺利时, 确保完成 5 000 m 取心钻进的任务。

## 参 考 文 献

- [1] E. A. 科兹洛夫斯基. 科拉超深井(下) [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [2] 张伟. 中国大陆科学钻探钻探施工可行性研究报告 [R]. 北京: 地矿部深部地质项目研究报告, 1994.
- [3] E Engeser B, Wohlgemuth L. Das kontinentale tiefbohrprogramm der bundesrepublik deutschland—KTB bohrtechnische dokumentation [R]. Hanover, Germany: Niedersaechsischen Landesamt fuer Bodenforschung, 1996.
- [4] 王达, 张伟. “科钻一井”主要技术方案实践与认识 [J]. 探矿工程, 2001, (5), 52-54.