



KE PU
BAO GAO

深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-05-06)

科学超深井钻探技术方案预研究

科普报告

张金昌 等编著



地质出版社

深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-05-06)

科学超深井钻探技术方案 预研究科普报告

张金昌 等编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是“深部探测技术与实验研究”项目中“科学超深井钻探技术方案预研究”(SinoProbe-05-06)的研究成果之一——科普报告,由科学钻探、近现代钻探技术的发展、钻探技术与可持续发展三章组成。主要介绍了科学钻探的概况、钻探技术的发展情况以及与人类可持续发展的关系等,内容浅显易懂。

本书可供地学爱好者特别是对科学钻探相关知识感兴趣的普通读者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

科学超深井钻探技术方案预研究科普报告 / 张金昌等编著. — 北京:地质出版社,2016.1
ISBN 978-7-116-09627-1

I. ①科… II. ①张… III. ①超深井—钻探—研究报告—中国 IV. ①P634

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 018761 号

Kexue Chaoshenjing Zuantan Jishu Fang'an Yuyanjiu Kepu Baogao

责任编辑:吴宁魁
责任校对:关风云
出版发行:地质出版社
社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083
电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554627(编辑室)
网 址:<http://www.gph.com.cn>
传 真:(010) 66554686
印 刷:北京地大天成印务有限公司
开 本:850mm×1168mm^{1/32}
印 张:2.875
印 数:68 千字
版 次:2016 年 1 月北京第 1 版
印 次:2016 年 1 月北京第 1 次印刷
定 价:16.00 元
书 号:ISBN 978-7-116-09627-1

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

科学超深井钻探技术方案 预研究科普报告

课题名称：科学超深井钻探技术方案预研究

课题编号：201011063

课题负责人：张金昌

工作起止年限：2008—2012年

课题承担单位：中国地质科学院勘探技术研究所

单位负责人：张金昌

报告主编：张金昌

报告编写人：张金昌 刘秀美

提交单位：中国地质科学院勘探技术研究所

提交时间：2014年7月2日

出版说明

经过五年时间近 30 位钻探技术科技工作者艰难的预研究工作，“地壳探测工程”的技术准备专项“深部探测技术与实验研究”第 5 项目中的第 6 个专题“科学超深井钻探技术方案预研究”（SinoProbe-05-06）的研究报告终于完成了。“深部探测技术与实验研究”专项（2008—2012）是“地壳探测工程”的培育性研究计划。深部探测专项的核心任务和总体目标是：为“地壳探测工程”做好关键技术准备，围绕“地壳探测工程”的全面实施，解决关键探测技术难点与核心技术集成，形成对固体地球深部层圈立体探测的技术体系；在不同自然景观、复杂矿集区、含油气盆地深层、重大地质灾害区等关键地带开展科学钻探工程，进行试验、示范，形成若干深部探测实验基地；解决急迫的重大地质科学热点难题，部署实验任务；实现深部数据融合与共享，建立深部数据管理系统；积聚、培养优秀人才，形成若干技术体系的研究团队；完善“地壳探测工程”设计方案，推动国家立项。“深部探测技术与实验研究”专项的启动标志着我国入地计划拉开序幕，具有重大、深远的科学意义。

万米以上科学超深钻探工程将是人类科技历史上前所未有的开创性重大科学工程，各个环节都会遇到用常规方法难

以解决的问题。必须提前对涉及的关键技术与装备开展先行研究，以攻克难题，找到解决的方法，研究先进适用的工艺技术，研制必要的新型装备。根据预研究成果，可将研究与开发方向归纳为以下 12 个重点：①超深井钻探总体技术方案；②钻探设备、井场和钻井安全设施；③特深井钻杆柱；④垂孔钻进和定向钻进技术；⑤碎岩与取心钻进技术；⑥井底动力；⑦泥浆、钻井水力学和固相控制；⑧套管与固井；⑨钻孔稳定性及井内事故预防与处理；⑩钻进参数检测、传输与管理；⑪钻杆和钻具的测试设施；⑫其他方面。

为了充分发挥预研究成果在我国科学钻探中的基础作用，为我国“地壳探测工程”，尤其是万米科钻工程的筹备和设计发挥指导作用，决定公开出版预研究系列成果报告。预研究系列成果报告由成果报告、15 个专题成果报告（上、中、下三册）和一份科普报告组成。

成果报告由前言、上篇 13000m 科学超深井钻孔施工方案、下篇科学超深井钻井设计软件研究成果报告三部分组成。

专题成果报告由上、中、下三册组成：

上册内容包括五个专题成果报告：专题 1 国内外科学超深井钻探技术调研和对比研究专题成果报告；专题 2 钻探技术总体方案及经济性研究专题成果报告；专题 3 钻探设备总体方案和主要技术参数研究专题成果报告；专题 4 钻杆柱使用深度极限研究及解决方法研究专题成果报告；专题 5 井底动力钻具的探索研究专题成果报告。

中册内容包括四个专题成果报告：专题 6 碎岩方法与工具的研究专题成果报告；专题 7 取心钻进技术及侧壁取

样技术研究专题成果报告；专题 8 防止井斜、控制井身轨迹技术的研究专题成果报告；专题 9 泥浆类型选择、性能维护保障的研究专题成果报告。

下册内容包括六个专题成果报告：专题 10 井壁稳定性和钻孔安全的研究专题成果报告；专题 11 套管与固井技术的研究专题成果报告；专题 12 钻进数据采集、传输与处理技术的研究专题成果报告；专题 13 事故预防与处理研究专题成果报告；专题 14 科学超深井钻井设计软件研究专题成果报告；专题 15 50m 地震探测爆破孔钻机及快速成孔技术研究专题成果报告。

科普报告由科学钻探、近现代钻探技术的发展、钻探技术与可持续发展三章组成。

预研究成果报告的出版仅作为千米科学钻探工程启动后工程设计时的参考，具体钻井工程设计、需开展的研究项目、设备、工艺技术参数选择以工程具体情况而定。

编著者

2015 年 9 月

目 录

出版说明

第 1 章 科学钻探	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 世界科学钻探概况	(7)
1.2.1 科学钻探的意义	(7)
1.2.2 海洋科学钻探	(8)
1.2.3 大陆科学钻探	(10)
第 2 章 近现代钻探技术的发展	(16)
2.1 地质岩心钻探技术及其在资源勘探中的应用	(16)
2.1.1 国内外钻探技术的发展概况	(17)
2.1.2 我国钻探技术的发展现状	(19)
2.2 水文水井钻探技术现状及钻探新技术的应用	(30)
2.2.1 水文水井钻探技术的现状	(31)
2.2.2 钻探新技术的应用概况	(33)
2.2.3 钻探新技术在地下水勘查与开发中的应用 前景与展望	(41)
2.2.4 结语	(43)

2.3	钻探技术新进展	(43)
2.3.1	石油钻井技术	(44)
2.3.2	地质岩心钻探技术	(60)
2.3.3	结语	(65)
第3章	钻探技术与可持续发展	(67)
3.1	概述	(67)
3.2	钻探技术服务领域不断扩大	(69)
3.3	钻探技术与可持续发展	(71)
3.3.1	钻探技术与固体矿产勘探	(72)
3.3.2	钻探技术与能源勘探	(73)
3.3.3	钻探技术与矿业城市可持续发展	(74)
3.3.4	钻探技术与地质灾害防治及环境保护	(76)
3.3.5	钻探技术自身的可持续发展	(77)
3.4	结论及建议	(79)

第 1 章 科学钻探

1.1 概 述

地球为人类提供了资源、能源、生活空间和生存环境，但同时又给人类带来了地质灾害（地震、火山和泥石流等）。人类为了自身生存的需要，迫切地希望了解地球。但是，地球的身体硕大，其半径将近 6400km，相当于我们从北京到海南走一个来回还要多（图 1.1）。故而，迄今为止，人类对地球内部仍然所知甚少。长期以来，科学家们试图运用各种方法来探测与研究地球内部，但所获得的认识都是有限的。科学钻探是目前能直接获取地下实物数据资料的唯一技术方法，是人类解决所面临的资源、灾害、环境等重大问题不可或缺的重要手段，被誉为“伸入地壳的望远镜”。

所谓钻探通俗地讲就是“定个点，打个眼”，即在指定地点钻一个相对很深的可以接近地球心脏的孔。科学钻探就是为科学研究目的进行的钻探，更确切地说是为了地质学科学研究进行的钻探。类似我们平时打的水井，只不过深度要放长千倍以上。通过钻探工程取出地下深部岩石、矿石样品供科学家化验、分析、测试研究，这样，通过“望闻问切”，

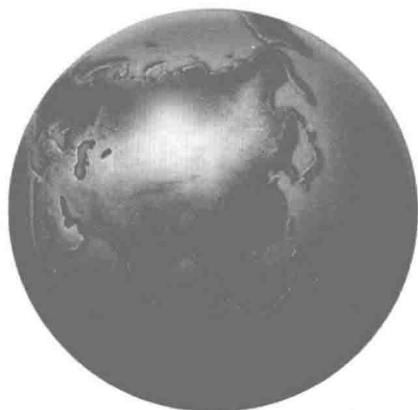


图 1.1 人类的家园——地球

就能准确了解地球的身体状况，达到科学研究了解地下深部信息的目的。

根据钻孔（井）深度不同，钻孔（井）分为浅、深、特深、超深孔（井）。因各档之间界限没有统一标准，具体到某一深度的孔（井）不同领域有不同称呼，但对于超过10000m的钻井一定是超深井。

截至目前，世界上最深的钻孔（井）是前苏联在科拉半岛钻成的科拉科学超深井，深度12262m，其次是德国实施的KTB科学钻井，井深9001m。在此之前，所钻最深井是石油钻井，最深可达7000~8000m。石油勘探对深井钻井技术的促进作用远大于任何其他矿山勘探开发活动。这是因为没有必要像煤矿、金矿开采那样把人送到井下，所以石油钻井井孔直径相对煤矿矿井等要小得多，井深也深得多。此外，根据储油层结构特点，石油钻井井身结构设计亦有不

同型式，多数情况下设计为直井（图 1.2）。对于薄油层开采井及近海大陆架石油井为了减少钻井数量或降低钻井成本，多设计成定向水平井（图 1.3）。

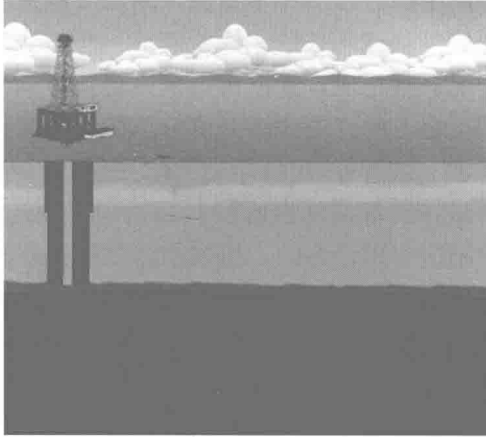


图 1.2 垂直井钻井示意图

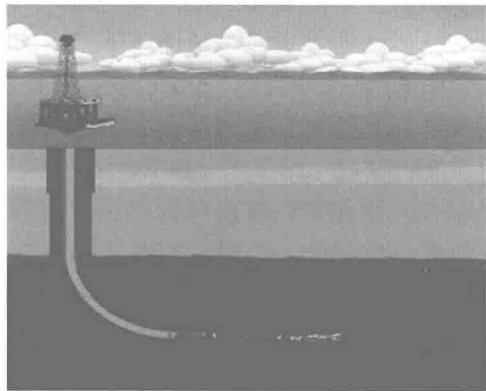


图 1.3 定向水平井钻井示意图

科学钻探首先要确定钻井井位，这一般由地质学家根据需要指定。如汶川地震后 178 天，我们就在四川省都江堰市虹口乡展开汶川地震断裂带科学钻探工程，这是我国第一次围绕大地震的主题进行的科学钻探，为未来地震的监测、预报或预警提供最基础的数据。像盖房子一样，钻井井位确定之后，我们要平整场地，进行钻探机场地基修筑，安装好钻机设备（钻孔施工所使用的地面设备总称，包括钻探机、动力机、泥浆泵、钻塔等）。科学钻井所用设备一般采用能力相当的石油钻井设备，比如德国 KTB 科学钻井。也有为科学钻井设计制造专用设备的，比如前苏联科拉超深井。钻机要有足够的动力，钻塔必须具有足够的高度，这样才能通过它将长达数千米的钻杆下放到孔内进行钻进。

钻进时钻杆柱下端安装有切削钻头，其上端由钻机动力机驱动带动整个钻杆柱和钻头回转，从而达到克取岩石达到钻进的目的。整个钻进过程就像我们的身体驱动臂膀，用力伸手去抓取东西一样，胳膊越长，力气越大，抓取的东西越快，伸得也就越远。

钻进过程中每隔一段时间，我们需要提一次钻，用来更换磨损的钻头钻具或提取卡取的岩心，像辘轳取水一样通过钻塔和滑车系统将钻杆一节一节地提出孔外。地下岩石、矿石样品的提取有两种方式，普通单管提钻取心和绳索取心。像小时候玩的贪吃蛇游戏，蛇越钻越深，越吃越多，当胃容量达到饱和也就是存取岩心的岩心管已装满的时候，我们就要将它取出来。第一种方法就是将整条蛇全部拎出来，简便易行，但身子短时尚可，要是几千米的话光提一次钻就要花上几天的时间，费时费力；第二种方法就是从蛇尾部下一个

带绳索的打捞器，下入到最底部后将已满和的胃部岩心管卡取打捞上来，取出岩心另行保存后，再将岩心管送入孔底。这样就可以大大提高钻进效率，让蛇吃得更快，长得更长，钻进得更深。

在钻进过程中，由于深入孔内的钻杆钻具只有不断地像螺丝一样回转才能克取岩心，通过摩擦会产生大量的热量，降低钻杆钻具的寿命，这就需要使用泥浆（或冲洗液）来对其降温。泥浆是泥土和水混合而成的半流体，就像给钻杆擦了一层清凉油，在降温的同时，还可以起到护肤的作用，保护孔壁并从孔底携带泥沙上返。

科学钻探说起来容易做起来难，因为在深达数千米的地下到底是何状况我们一无所知。地球由地壳、地幔和地核（外核、内核）组成，地核的物质组成以铁、镍为主，温度可达上千摄氏度（图 1.4）。地球的圈层结构决定了从地球表面开始越往深处温度越高。因此，地壳内存在一个地温梯度——越是深入到地球心脏温度会越高，平均来说大约每深入 100m 温度上升 3°C ，这样钻至 10000m 深时温度已经上升了 300°C 。同时，地壳内部还存在着地应力，它是引起采矿、水利水电、土木建筑、铁道、公路、军事和其他各种地下或露天岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力，对我们钻探而言也是很大的困难。就像塞得满满一包的棉花，它们内部之间都是相互呼应的，一旦袋子破开了口子，就会相互拥挤着往外跑，一发不可收拾。所以在钻进过程中我们必须采取各种措施预防和应对地温梯度和地应力的变化。包括研制耐高温泥浆、耐高温钻头和高强度管材等。

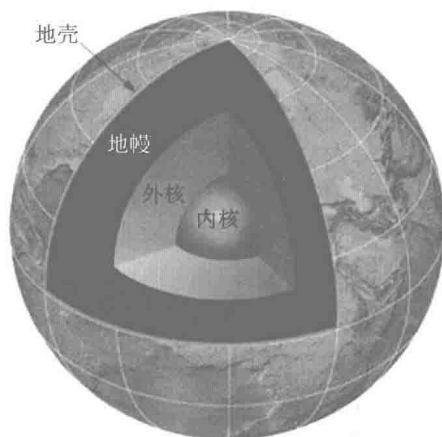


图 1.4 地球圈层结构示意图

同时我们还要注意钻井安全。一旦钻孔达到含油地层，石油在地下气体和水的压力作用下通常会自流或喷出到地表形成井喷，造成重大伤亡事故（图 1.5）。钻井时，地下气体和水的压力必须得到控制。控制地下气体和水的压力由通过钻杆循环到井底的泥浆来实现。井内压力大时，增加泥浆密度，反之则用较小密度的泥浆钻进。我们要尽量避免井喷的发生，井喷会造成石油和天然气的损失。同时，还要用一种可控的方法将地下石油天然气开采出来，为我所用。

总之，超万米科学超深井是施工难度很大、风险很高的钻井工程，实施过程中将会遇到一系列的难题。为此，我们将对其关键技术进行探讨研究，为未来科学超深井钻探提供可靠有力保障，为地壳探测工程提供技术服务。



图 1.5 石油天然气井井喷事故

1.2 世界科学钻探概况

1.2.1 科学钻探的意义

地球在为人类提供资源、能源、生活空间和生存环境的同时，有时也会给人类带来灾难。地震、火山喷发、泥石流、海底地震引起的海啸等自然灾害时常发生，常常造成大量人员伤亡。人类为了自身生存的需要，迫切希望了解地球。但迄今为止，人类对地球内部仍然所知甚少。长期以来，科学家们试图运用地质、地球物理和地球化学等方法来

探测与研究地球内部，但所获得的认识都是间接的。科学钻探是目前能直接获取地下实物数据和提供测量信道的唯一技术方法，是人类解决所面临的资源、灾害、环境等重大问题不可或缺的重要手段，被誉为“伸入地壳的望远镜”。

科学钻探可用来至少实现以下 10 个方面的地学研究目标：

- 1) 了解地壳深部的过程、状态、结构、构造和成分，研究岩石圈动力学和演变；
- 2) 查明地球物理接口和异常的本质，提高地球物理数据的解释精度——地球物理校正；
- 3) 寻找深部矿产资源；
- 4) 勘探与开发深部能源（常规碳氢化合物与非生物碳氢化合物和干热岩地热）；
- 5) 开展地震和火山灾害预报监测；
- 6) 勘探核废料和其他有害废料的储埋地点；
- 7) 了解生物圈的性质和下界限；
- 8) 研究地球的气候史以及全球气候和环境的变化；
- 9) 研究陨石冲击和生物灭绝事件；
- 10) 发展地质勘查技术，提高人类在恶劣条件下，向地球的内层空间前进，探索深层奥秘的能力。

1.2.2 海洋科学钻探

世界上最早的科学钻探活动始于海洋。第一个科学钻探计划是美国的“莫霍面钻探计划”。该计划于 20 世纪 50 年代末启动，目的是要钻透莫霍面（地壳和地幔的接口），