

新型科学钻探技术体系的产生及其意义

王 达

(中国大陆科学钻探工程中心,北京 100011)

摘 要:在中国大陆科学钻探工程“科钻—井”的钻井施工中,形成了独具中国特色的新型科学钻探技术体系。详细论述了该新型科学钻探技术体系的具体内容及其在“科钻—井”施工中取得的主要技术指标;简要介绍了目前国内正在或即将实施的科学钻探工程项目情况;结合即将出台的《国务院关于加强地质工作的决定》和 2005 年已启动的危机矿山接替资源的找矿勘查工作计划,展示了探矿工程广阔的前景。

关键词:中国大陆科学钻探工程;科学钻探;冲击回转钻探;扩孔;井斜控制;泥浆;套管;孔内事故;钻探数据

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2006)01-0001-05

Emergence and Signification of New Drilling Technology for Scientific Drilling/WANG Da (Chinese Continental Scientific Drilling Engineering Center, Beijing 100011, China)

Abstract: During drilling of Well CCSD-1 of China Continental Scientific Drilling Project, a new type of drilling technology system with Chinese Characteristics was developed. The main contents of the system and its results gained in Well CCSD-1 were introduced. The scientific drilling projects which are implementing or will be put in practice were introduced in short. The good prospects of exploration engineering were forecasted, based on 'the State Council's Decision on Strengthening Geological Work' which will be announced and 'Crisis Mine Replacement Resources Exploration Plan' which already started up in 2005.

Key words: CCSD; scientific drilling technology; rotary-percussion coring technology; borehole enlargement technology; borehole deviation control techniques; casing technology; prevention and treatment of downhole troubles; data collection and processing technology

国家重大科学工程项目——中国大陆科学钻探工程现场施工已经全部结束了。“科钻—井”的胜利竣工标志着我国入地工程步入了世界先进行列。在坚硬的结晶岩中施工全孔连续取心的 5000 m 深井难度巨大,在我国尚属首次,在世界上也属高难度的钻井工程。在近 4 年的时间里,我国钻探科技人员发挥了自身的聪明才智,从工程可行性论证开始,历经工程设计、钻井施工、关键技术研究与应用、现场施工问题的解决直至工程顺利完工,克服了无数困难。在汲取世界各国科学钻探先进技术的基础上,根据我国的具体情况制定了先进适用的总体技术战略和方案,发明创造和成功应用了一系列新技术、新工艺与新器具,形成了独具中国特色的新型科学钻探技术体系。这套技术体系主要由总体施工技术战略与方案、井底动力驱动的冲击回转取心钻探技术、硬岩大直径长井段扩孔钻进技术、强致斜地层井斜控制技术、性能优良的 LBM-SD 泥浆技术、小间隙固井及活动套管应用技术、孔内事故预防处理技术、钻探数据采集处理技术等组成。

“科钻—井”先导孔于 2001 年 6 月 25 日开钻,

前期主要是开孔、下表层套管和试验性钻进等准备工作,8 月 4 日现场举行隆重的开工典礼,正式宣告开工。2002 年 4 月 15 日先导孔钻达 2046.54 m,经测量后认为井斜仅 4.1°,全孔段狗腿度 $< 1^\circ/30$ m,井身质量优良,现场指挥部决定采用设计中的第二方案,即“二孔合一”的单孔方案,在先导孔基础上进行扩孔。2002 年 5 月 8 日主孔扩孔开始,这也是主孔的正式开钻日期,经过 991 天,主孔历经 2 次扩孔,1 次纠斜,1 次绕过事故障碍(绕障)造斜钻进,分 3 个阶段取心,至 2005 年 1 月 23 日钻达 5118.2 m,顺利完成全部取心施工任务。之后在 2 个多月的时间里进行了新型钻具试验、下尾管、固井、通井、测井、VSP(井中垂直地震剖面测量)及完井等工作。2005 年 4 月 18 日举行了隆重的现场施工竣工典礼,正式宣告“科钻—井”现场施工任务全部完成,施工工程全部历时 1395 天。此后,钻探子工程进入技术总结阶段,几个月来先后进行了中国大陆科学钻探工程“硬岩深井取心钻探新技术的研究与应用”和“新型钻井技术体系的研究与应用”的报告编写和鉴定工作。2006 年还将完成钻探子工

收稿日期:2006-01-09

作者简介:王达(1943-),男(汉族),天津人,中国大陆科学钻探工程中心主任、教授、博士生导师,探矿工程专业,从事钻探技术研究与管理工作,北京市西城区黄寺大街 24 号院 21 楼,(010)51632300,wangda@ccsd.cn。

万方数据

程的验收以及整个科学钻探工程总项目的国家验收工作。

“科钻一井”钻探工程进展可以划分为10个阶段:(1)开孔全面钻进(一开);(2)先导孔 CCSD - PH 取心钻进(二开);(3)主孔第一次扩孔和下套管、固

井;(4)主孔第一段 CCSD - MH 取心钻进(三开);(5)主孔纠斜施工;(6)主孔第二段 CCSD - MH - 1C 取心钻进;(7)主孔第二次扩孔和下套管、固井;(8)主孔第三段 CCSD - MH - 2C 取心钻进(四开);(9)试验钻具;(10)挂尾管、固井和完井(见图1)。

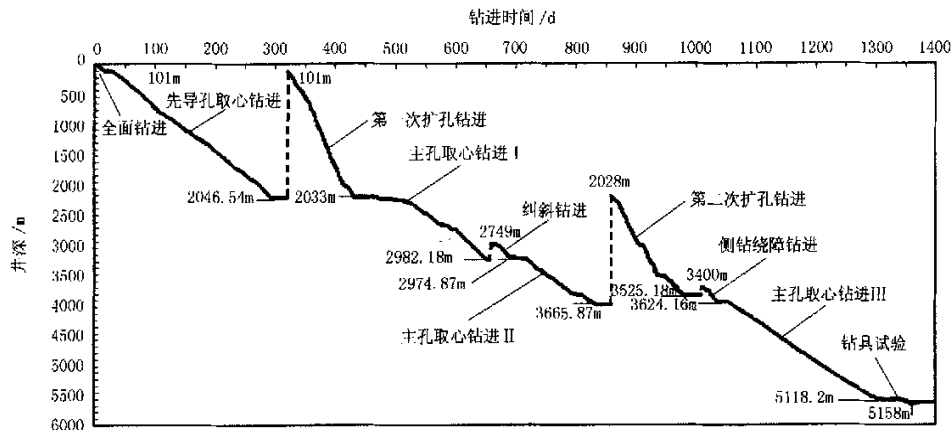


图1 “科钻一井”的施工进度曲线图

新型科学钻探技术体系在“科钻一井”施工中取得的主要技术指标是:在8~11级的坚硬岩层(榴辉岩和片麻岩)中,钻取的岩心总长度4290.9 m、平均岩心采取率为85.7%。其中取心钻进累计进尺5004.95 m、扩孔钻进累计进尺3429.07 m,加上侧钻进尺等累计钻进总长度达9086.23 m。从2001年6月25日开钻,至2005年1月23日钻进至5118.2 m,施工总时间1309天,平均日进尺6.91 m,平均机械钻速为0.93 m/h,其中取心钻进1071个回次、平均机械钻速为1.01 m/h。采用螺杆马达液动锤金刚石双管取心钻进638个回次,进尺4042.73 m,平均机械钻速为1.34 m/h,平均回次进尺长度6.34 m,平均岩心采取率为85.7%。在坚硬的岩层中扩孔钻进82个回次,总进尺3429.07 m,平均机械钻速1.09 m/h,平均扩孔钻头寿命54.43 m。

以上指标是全孔的平均数值,如果分方法、分阶段来看,主要技术指标是逐步提高的。如“科钻一井”使用了9种取心钻进方法,不同方法的效果如图2所示。显然螺杆马达液动锤取心方法有明显的优势。

螺杆马达液动锤取心方法也是不断改进逐步成熟的,这项技术分阶段的效果如图3所示。

中国大陆科学钻探工程“科钻一井”钻探施工技术取得的主要成果有:

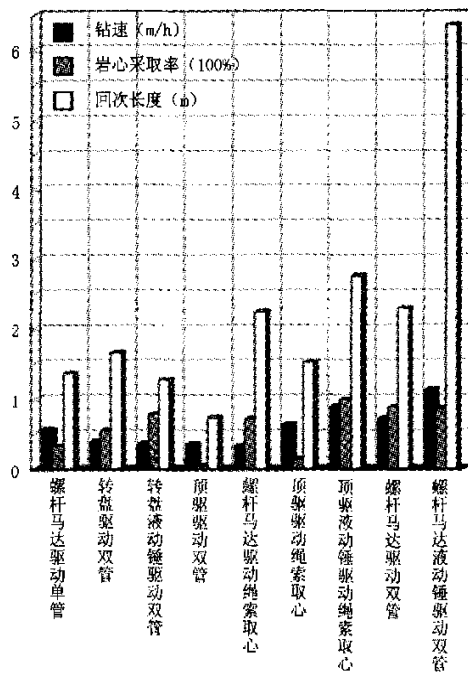


图2 “科钻一井”取心段9种取心钻进方法的效果图

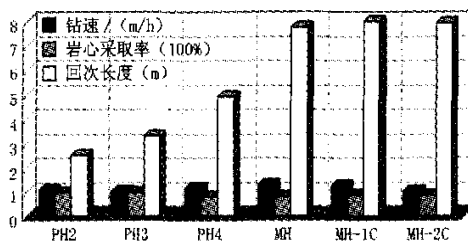


图3 按阶段螺杆马达液动锤金刚石取心钻进效果图

(1)科学钻探总体施工战略与方案的研究有新的突破。

在广泛吸取各国科学钻探经验的基础上,创造性地将“组合式钻探技术”、“灵活的双孔方案”、“超前孔裸眼小直径取心钻进程序”有机地结合起来,形成独具中国特色在坚硬结晶岩中施工科学深钻孔的一整套技术方案。这种驾驭各项技术措施的理念及技术路线,是整个工程实现高效、安全、经济的最关键的、核心的技术战略。根据这套技术方案而进行的详细的初步设计是整个钻探工程顺利实施的技术基础。

(2)研制成功的井底动力驱动冲击回转取心钻探技术系统属世界首创。

在世界上首次创造了螺杆马达液动锤金刚石取心钻探系统。实践证明,这项技术用于硬岩深井取心钻进具有机械钻速高、回次进尺长、取心效果好、钻柱磨损轻微、功耗低以及钻柱对井壁扰动小等优点,在“科钻一井”中采用该取心钻进技术,机械钻速提高 50%~100%,回次取心进尺长度提高 1~2 倍,防斜和降斜效果明显。是一项新型的复合式取心钻探技术。以这套系统为主要工具完成了 5000 m 取心钻探任务,确保了“科钻一井”优质、高效、安全、低成本的顺利完工。

螺杆马达液动锤金刚石取心钻探系统包括螺杆马达的优选和匹配技术、液动锤的研制与应用技术、新型长寿高效金刚石钻头的研制与应用技术、大直径薄壁单动双管取心钻具的研制与应用技术、整套钻具的施工工艺研究等。其中特别要指出的是液动锤和钻头的创造性工作。

液动锤钻进技术在硬岩深井应用中取得了重大突破,经不断研究改进、调整其设计参数和零部件结构,创造性地解决了阻卡、工作稳定性和井深背压影响等关键技术问题,液动锤钻进技术取得了重大突破,创造了 5118.2 m 的使用深度和 4057.39 m 的单井进尺世界纪录,确立了我国在该技术方面的世界领先地位。

针对“科钻一井”岩石坚硬、研磨性强的地层条件和冲击回转钻进的使用工况,在金刚石钻头的研制中,对钻头胎体、水路、保径、金刚石参数设计以及钻头制造工艺等方面,采取了多项新的优化措施,研制成功了适用于硬岩深井条件的耐冲击、高钻速、长寿命的金刚石取心钻头。钻头的主要制造方法有 3 种:二次成型热压镶嵌、一次热压成型、二次成型电镀。“科钻一井”全部取心井段共使用各类金刚石

取心钻头 219 只,采用孔底动力的钻头有 163 只,各井段的使用情况和使用效果如表 1 所示。

表 1 “科钻一井”各井段钻头使用情况统计表						
井段	钻头类型	数量 /个	总进尺 /m	钻时 /h	平均钻速 /(m·h ⁻¹)	平均寿命 /m
PH	二次镶嵌	48	1051.68	1001.60	1.05	21.91
	一次成型	5	85.88	101.04	0.82	17.11
	二次电镀	25	445.79	523.91	0.85	17.83
MH	二次镶嵌	10	364.32	254.77	1.43	36.43
	一次成型	2	80.24	44.33	1.81	40.12
MH-1C	二次镶嵌	12	340.63	286.24	1.19	28.39
	一次成型	7	199.39	140.42	1.42	28.48
MH-2C	二次镶嵌	28	690.71	677.17	1.02	24.67
	一次成型	26	786.90	763.98	1.03	30.26
全孔合计		163	4045.54	3793.46	1.07	24.82

通过优化设计,研制成功了大直径薄壁单动双管取心钻具,能够适应高速回转、冲击、小环状间隙等工况条件,保证了取心钻具的单动性能、强度、寿命和取心效果。

在“科钻一井”施工后期还研制了世界首创的螺杆马达液动锤绳索取心三合一钻具,经下入 5000 多米深的主孔进行生产试验,表明这套新型钻具初步成功。

(3)首次实现坚硬结晶岩长井段扩孔钻进。

研制了独特的整体式导向扩孔牙轮钻头,通过选材、改进制造工艺、加强保径、钻具组合中加入了减震器和金刚石扩孔器,解决了地层坚硬、扩孔钻进效率低、钻具憋跳、孔壁掉块、钻头和钻具磨损严重、井下落物多、回转扭矩大等一系列问题,圆满地完成了主孔 2 次扩孔钻进施工,为“科钻一井”的顺利完成奠定了良好的基础。扩孔钻进总进尺 3429.07 m,总回次数 82 个,平均机械钻速为 1.09 m/h,在国内实现了迄今为止最长井段的硬岩扩孔钻进,为今后类似施工提供了宝贵经验。

在扩孔中首次采用了大于 Ø200 mm 的大直径液动锤用于深孔钻进施工,验证了液动锤对提高坚硬地层的扩孔钻进效率有明显的作用,为大直径液动锤在石油、水文水井和地热钻进领域的应用积累了大量珍贵的第一手资料。

(4)攻克易斜地层的难关,完成了“科钻一井”并斜控制与造斜钻进。

在先导孔中采用刚、直、满、重钻具组合与合理的钻进参数等综合措施,终孔顶角 <5°,全孔段狗腿度 <1°/30 m,保证了“二孔合一”的实现,缩短了 100 多天的施工时间,从而为国家节约了上千万元的投资。

在主孔中成功进行了纠斜钻进和侧钻绕障,这是在我国尚未有类似先例的技术背景下进行的探索与实践。这一整套技术方法的成功,必为我国今后大口径深孔硬岩侧钻提供有益的示范。

在工程施工过程中,科研人员发明了螺杆马达驱动连续造斜器,初步试验获得成功,实现了钻探人员多年追求的同径造斜、边造斜边取心的设想。

(5)低粘、低切、低密度、低失水及润滑性优良的泥浆技术应用取得良好效果。

该泥浆体系既适用于取心钻进,又适用于全面钻进及扩孔钻进,满足了科学钻探的苛刻要求,泥浆性能能长期保持稳定,对测试分析无干扰,现场应用效果进一步证明了LBM-SD泥浆体系完全能满足中国大陆科学钻探工程采用的螺杆马达液动锤金刚石双管取心钻具的钻进技术要求,具有良好的性能价格比。

(6)小间隙套管及活动套管的应用技术。

在“科钻一井”中进行了小间隙套管固井并获得成功,在国内首次成功实现了2019 m长活动套管的安装和回收,为科学钻探开发了实用新型的配套技术。

(7)采用了独特的钻探数据采集与处理技术。

在石油钻井的综合录井系统的基础上,通过二次开发,完善了地表数据采集系统,研究开发了随钻孔底钻探数据采集系统,以补充地表数据采集系统的不足,提高钻进过程监测和施工决策的水平,在“科钻一井”现场施工中获得良好的应用效果。将钻探实时数据存储到数据库中,为后续的钻探数据再开发和利用提供了良好的软件平台。

总之,以“灵活的双孔方案”、“组合式钻探技术”、“超前孔裸眼钻进方法”为核心的科学钻探总体技术战略和方案,以螺杆马达液动锤驱动双管取心钻进技术为核心的井底动力驱动取心钻进技术,以带导向的牙轮钻头的硬岩长井段扩孔钻进技术,以刚、直、满、重井底钻具组合和金刚石钻头异径侧钻降斜技术为主的井斜控制与造斜钻进技术,以低粘度、低切力、低密度、低失水、低固相及润滑性优良为特征的泥浆技术,以小间隙套管、活动套管安装与回收为特征的套管固井应用技术,以及孔内事故预防与处理和钻探数据采集与处理等一系列钻探施工技术经受住了鲁鲁超高压变质带坚硬岩石和复杂地层的严峻考验,取得了辉煌的成绩。

这套技术体系中的各项技术之间是相辅相成的,互相支撑的,没有性能优良的泥浆,井底动力驱
万方数据

动冲击回转取心钻探技术就不可能实现;坚硬岩石扩孔钻探技术不过关,整个施工程序和活动套管的应用就要重新考虑。因此说这是围绕结晶岩科学钻探形成的完整的钻探技术体系,不是一个一个孤立的技术,而是一个有机组合的整体。但是各项新技术或它们的技术思想又是可以独立应用于其他钻探工程的单项技术。

“科钻一井”的钻探施工取得了令世人瞩目的重大工程技术成果,这些成果对促进科学钻探技术进步,乃至能源资源的勘探、钻探活动都有重要意义。

不仅如此,“科钻一井”施工所获得的岩心样品和测井所获取的大量原位信息为地质研究提供了丰富的、翔实可靠的实物资料,科学家通过深入研究已经取得令人振奋的科学成果和重大发现。如:证实了鲁鲁地区2亿年前发生过巨量物质超深俯冲的壮观地质事件,对超高压俯冲与折返进行了精确定年,提出了新的多重性、穿时性俯冲与折返模型;在无水矿物中发现含大量结晶水,对地幔矿物的流变状态进行了科学论证,通过高温高压实验,还提出了俯冲带中等深源地震的产生与榴辉岩脱水有关的理论创新成果;发现多种来自深部下地幔的新矿物组合;发现了大量极端条件下形成的太古菌及细菌,并在3910 m岩心中培植成功微生物活体;发现来自深部的甲烷、氮气、二氧化碳和氩气等特殊流体异常以及这些异常与地质体和重大地质事件的对应关系;首次完成结晶岩区的三维地震探测,揭示了精细的地壳结构,通过科学钻探的岩心和原位测井验证了结晶岩地区的地球物理探测结果,建立了结晶岩区的地球物理标尺等。

中国大陆科学钻探工程的第一口钻井已经接近尾声了,然而我国的科学钻探事业才刚刚起步。新的更多的科学钻探项目正在启动中,“青海湖环境科学钻探”在国家科学技术部、中国科学院、国家自然科学基金委员会和ICDP的联合资助下,已于2005年完工,正在对取上来的岩心进行室内研究,以图解开盆地演化与青藏高原隆升的关系以及植被演化与风化的历史。以研究青藏高原环境演化为目标的一系列高原湖泊钻探即将开始。罗布泊钻探将揭示西北干旱历史。鹤庆钻孔将研究构造演替与印度季风演化的关系。江汉平原的钻探将揭示长江切开三峡的时间、研究巨水系演化与高原隆升的关系。在我国大庆将实施另一项科学钻探计划——“松科一井”,这是号称全球第一口研究陆相白垩纪的科

学钻孔,其意义有二:一是研究古温室气候,以便对未来气候变化做出科学预测;二是研究大庆油田陆相油气盆地烃源岩的形成,探讨气候演变以及重大气候地质事件对烃源岩生成发育的控制和影响作用。此外我国更大规模的“地球深部探测计划”也正在制定中。科学钻探计划的实施极大地推动了我国钻探事业的发展,在钻探技术方面的创新成果将用于资源和环境调查,在人才方面的积累将为今后钻探技术的研究开发打下良好基础,同时吸引一大批年青人投身于钻探事业。

近十几年来由于国家产业结构的调整,地质勘探工作处于低谷期,中国地质调查局的成立虽然为国家公益性地质调查工作开创了新局面,然而在体制转轨阶段国家对矿产资源勘查的直接投入大幅度减少,造成钻探工作量急剧下滑。近年来虽然社会资金对矿业的投入有所增加,但规模有限,全社会用于矿产资源勘探的钻探工作量和20世纪鼎盛时期(80年代中)仍然有相当大的距离。大量从事地质岩心钻探的设备、队伍、技术人员或转产或老化退役,使钻探界有识之士心急如焚,尽管在地基基础施工中发挥了地质队伍善于和地球打交道的优势,但是与国民经济发展息息相关的资源危机却深深地令人担忧。

这个令钻探工作者最为关心的钻探工作量的问题近期有望出现巨大转机,《国务院关于加强地质工作的决定》即将出台,我国将完善矿产勘查的体制和机制,建立地质勘查基金,支持重点勘查,拉动社会资金投入。从2005年开始我国已启动危机矿山接替资源的找矿勘查工作计划,预计到2010年中央政府、地方政府和矿山企业将总计投入40亿元,主要工作经费中:地质测量8000万元、物化探测量40000万元、浅井9000万元、槽探20000万元、钻探180000万元、坑探95000万元,主要实物工作量概算约352000万元,占总预算的88%,其他工作量经费48000万元,占12%。如果平均按600元/m计算,仅此一项计划五年岩心钻探工作总量将达到300万米,每年50~60万m。加上地质大调查、资源补偿费和矿业市场的投入资金,全国每年岩心钻探工作量有望突破20世纪80年代末90年代初的水平。其中能源方面的勘查投入增长最快,除了石

油天然气以外,煤矿和铀矿勘查将成为新的亮点。

危机矿山接替资源勘查的任务主要包括3个层次:一是在矿山采掘工程附近开展“探边摸底”的探矿工作,扩大矿山近期可采矿量;二是在矿山近外围找矿,扩大保有储量;三是开展矿区外围的找矿评价,为矿山的中长期发展提供新的后备基地。同时,运用成矿系统的新思维,加强矿山外围新矿种、新类型的综合预测与评价;重视金属矿山共生、伴生组分与非金属矿产资源的综合评价和可利用性研究,提高资源利用效益,多途径解决危机矿山的接替资源问题。在《全国危机矿山接替资源找矿规划纲要》(2004~2010年)中提出要推广应用资源勘查关键技术,其中特别包括“深部找矿的钻探技术”要求“发展坑道钻探技术,加强精密定向钻进系统、金刚石绳索取心钻探技术、反循环中心取样系统、空气泡沫钻进系统、全液压岩心钻探和全液压坑道岩心钻探技术的研究与推广应用,满足矿山深部及外围寻找盲矿体的需要”。2005年已经在9个条件较好的矿山开始试点,效果很好,例如有1700多年开采历史的大冶铁矿通过深部和外围工作又找到新的资源。2006年已经进一步筛选出40多个矿山开展深部和外围的找矿勘查,今后还将逐步加大力度。

除了矿产资源勘查以外,国家对地质灾害的评估和治理也在加大力度,建设市场仍然是方兴未艾。

钻探工作者应当看到地质工作已经走出低谷,我们要做好迎接更加艰巨任务的准备工作。

“科钻一井”施工任务的完成仅仅是更大高潮的序幕,它的更深层的意义在于一种创新意识和拼搏精神,这种意识和精神将激发钻探工作者更大的激情。

“科钻一井”凝聚了老中青三代人的心血和汗水,结出了巨大的硕果,培养和造就了一大批优秀的工程技术人员,这些都是极为宝贵的财富。

中国大陆科学钻探工程的实施是中国宏伟的“入地”计划的开始,在中国地球科学研究历史上具开创性。中国大陆科学钻探工程的胜利完工,标志着中国从地学大国向地学强国迈出了新的步伐,并将会对我国的社会与自然的协调发展和现代化建设产生一定的影响。