

4000 m 交流变频电驱岩心钻机的研制及其 在地热井的工程应用

刘凡柏¹, 高鹏举¹, 任启伟¹, 沈怀浦², 臧臣坤², 李文秀¹, 汤小仁¹, 伍晓龙¹, 高明帅²

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000; 2.中国地质装备集团有限公司,北京 100102)

摘要:为满足深部找矿、科学钻探以及新能源勘探等对深孔取心钻探装备的需求,开展了 4000 m 地质岩心成套技术装备研究。4000 m 地质岩心钻机回转系统采用顶驱系统,实现高转速下取心钻进;在井架底部设计有转盘回转系统,可进行大扭矩低转速钻进以应对不同的工况需求;钻机塔架和升降系统能进行长立根提下钻,可缩短提下钻作业时间;钻机的电传电控系统采用了目前国际先进的全数字交流变频技术及自动化、智能化控制技术、计算机控制技术、现场总线通讯和程序控制技术等,实现回转系统的无级调速和司钻的智能化控制。研制的 4000 m 交流变频电驱岩心钻机在天津东丽湖地热调查井(CGSD-01 井)中应用,初步验证了其技术性能,具有操作简便、安全性与可靠性高、使用成本低等优点。本文介绍了 4000 m 交流变频电驱岩心钻机的项目来源、国内外研究现状、总体技术方案、主要结构及特点、主要技术参数、野外生产试验应用等情况。

关键词:4000 m 岩心钻机;交流变频;垂直升降井架;电顶驱;电驱转盘;绞车;地热井

中图分类号:P634.3⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0040-07

Development and Application of 4000m AC Frequency-conversion Core Drill/LIU Fan-bai¹, GAO Peng-ju¹, REN Qi-wei¹, SHEN Huai-pu², ZANG Chen-kun², LI Wen-xiu¹, TANG Xiao-ren¹, WU Xiao-long¹, GAO Ming-shuai²(1.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2.China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In order to meet the needs for deep hole core drilling equipment in deep prospecting, scientific drilling and new energy exploration, research has been carried out to develop a complete set of 4000m geological core drilling technology and equipment. A top drive system is adopted in the rotary system of the 4000m geological core drilling rig to realize core drilling at high RPM, with the rotary table system placed at the bottom of the derrick to provide high torque and low RPM to meet different working conditions; the drilling tower and hoisting system allows tripping of long stands of drilling strings, cutting short the tripping time; and the rotary system can provides stepless variable speeds and the driller can operate the rig in a smart way through use of the international advanced all-digital AC frequency-conversion technology and automation, intelligent control technology, computer control technology, field bus communication and program control technology on the electric drive control system. The 4000m AC variable frequency drive core drilling rig has been used in Tianjin Dongli Lake Geothermal Survey Well (Well CGSD-01), and its technical performance has been preliminarily verified. It has the advantages of simple operation, high safety and reliability, low cost and so on. This paper introduces the background of the research program of 4000m AC Frequency-conversion Electric Drive Core Drill, as well as the current research situation at home and abroad, overall technical plan, main structure and characteristics, main technical parameters, field production trials.

Key words: 4000m core drill; AC frequency-conversion; vertical erection derrick; electric top drive; electric drive rotary table; winch; geothermal well

1 概况

随着我国经济规模的不断扩大以及人口的持续增长,对石油、天然气、铁、铜、铬、钾盐等矿产资源的

需求急剧增加,对深部勘探技术提出了迫切需求。新的成矿理论研究及深部定位预测验证结果,显示我国矿产资源地壳深部找矿潜力巨大,有望取得重

收稿日期:2018-06-25

基金项目:“十二五”国家高技术研究发展计划(863 计划)“4000 米地质岩心钻探成套技术装备”(编号:2014AA06A607)

作者简介:刘凡柏,男,汉族,1971 年生,研究室总工,教授级高级工程师,工程机械专业,从事钻探设备的设计与开发工作,河北省廊坊市金光道 77 号,lfanbai@mail.cgs.gov.cn。

大找矿突破。以科学研究为目的的钻探工程大多钻遇地层复杂、钻探深度大、均需全孔取心,且在目的层取心率比矿产勘探的还要高,对深孔岩心钻探装备及技术提出了更高的要求。因此,开展 4000 m 地质岩心成套技术装备研究,对提升我国的钻探技术水平,满足资源勘探的迫切需求是非常必要的,对于缓解目前资源短缺制约我国经济发展的“瓶颈”、发现新的矿产地、实现资源产业可持续发展具有重大现实意义。为此,在经过充分论证后,2014 年由科技部批准立项,在资源环境技术领域重大项目“深部矿产资源勘探技术”下设立“4000 m 地质岩心钻探成套技术装备”研究课题,课题编号为:2014AA06A607,其主要研究内容之一就是进行 4000 m 地质岩心钻机的研制。

2 国内外研究现状

国内固体矿产勘查岩心钻机主要是 20 世纪 70 年代发展起来的机械立轴式钻机,钻探深度一般在 3000 m 以内,大大落后于先进工业国家的岩心钻探水平。“十五”、“十一五”期间国内多家研究机构、生产厂家完成的 2000 m 以内新一代系列化全液压动力头钻机,也是适用于小口径中深孔(2000 m 以内)地质金刚石取心钻探,但在进行超深孔、更大口径、复杂地层勘探时,已有钻探装备在施工时存在施工效率低、周期长、能耗大、成本高、劳动强度大等共性问题,不能满足深孔岩心钻探科学、安全、高效的需求。中国地质装备集团有限公司在直驱电传动地质顶驱钻进系统方向做了一系列的探索,2012 年研制的 XD35DB 型电传动分体式顶驱创造了当年 P 口径 2818.88 m 的国内取心钻探记录。

西方发达国家无论是在新设备研制上还是在新工艺方法的应用上都有了突飞猛进的发展。国外地质矿产勘查用钻机已大量采用全液压高转速动力头式钻机,具有无塔升降钻具、长行程给进、取心效果好、钻探效率高等优点,钻进深度一般在 3000 m 以内,少数几个机型钻深超过 4000 m,但存在着采购使用成本高、深孔钻进效率低等问题。国外金刚石绳索取心技术水平很高,南非采用绳索取心钻进最大深度达到 5422 m,其采用的绳索取心钻杆材质好,钢级高,使用寿命长,应用效果好,但进口价格较高。

国内外常规的石油钻机也可用于岩心钻探,其

回转系统有转盘回转及顶驱回转两种型式,均是低速大扭矩输出,最高转速 200 r/min 左右,不适用于金刚石钻探工艺的需求。其配备的升降系统与高井架可进行长立根提下钻,在进行深孔钻进时提下钻效率高。交流变频电传动系统与机械传动系统相比具有系统能耗小,运行经济性好,稳速精度高,运行可靠,参数稳定,调试简便,维护方便等优点,在绿色勘探的今天得到越来越多的应用,交流变频电传动替代机械传动已成为必然趋势。

3 总体技术方案

顶驱作为当今深部油气钻井的先进设备,可以直接从井架上部旋转钻柱进行超长行程的复杂地层钻探,降低深孔钻探事故的发生几率;其辅助作业系统可进行自动加减单根、立根、起下钻等作业,大大减少辅助作业时间,提高钻进效率。因此 4000 m 地质岩心钻机回转系统要采用顶驱系统,主要是在高转速下进行取心钻进。同时为了应对不同的工况需求,在井架底部应设计有转盘回转系统,可进行大扭矩低转速钻进。深孔岩心钻进一大特点是施工周期长,为减少施工时间,钻机升降系统应能进行长立根提下钻,为此设计的钻机塔架应能满足长立根提下钻的要求。根据国内外岩心钻机发展趋势,钻机的电传电控系统应采用目前国际先进的全数字交流变频技术及自动化、智能化控制技术、计算机控制技术、现场总线通讯和程序控制技术等,实现回转系统的无级调速和司钻的智能化控制,实现对钻井参数和电器参数的显示、储存、传输、打印,实现钻井作业的数字化、智能化、信息化、网络化的控制和管理。

4 主要结构及特点

4000 m 交流变频电驱动地质岩心钻机(三维效果及实物外形见图 1)采用 H 规格钻具钻深能力 4000 m,主要由垂直起升式井架、底座、天车、游车大钩、电顶驱、电驱转盘、电驱主绞车与自动送钻系统、电驱绳索取心绞车、液气系统、VFD 房、司钻室、电驱泥浆泵等组成,另外配套齐全了液压吊卡、吊环、吊钳、气动卡盘、液压锚头、动力钳、水龙头、倒绳机、地面高压管汇系统、防坠器、安全带等附属设备与安全器具。该钻机以 400 V 电源为源动力,采用全转矩控制、机械化作业、数字化操作的工作模式,融机、电、液、气、电子及信息化于一体,满足金刚石

绳索取心、冲击回转、定向钻进、反循环连续取心(样)等多种深孔地质钻探工艺要求,可广泛应用于地质勘探、水文水井、煤田、油气田勘探等施工领域。



图1 4000 m地质岩心钻机三维效果及实物外形

4.1 井架平台

通过调研、收集资料,研究设计了一种新型的垂直起升的钻塔井架结构。总体上由天车、井架、底座、二层台4大部分组成。K形井架,金属桁架结构,共分七段,采用液压油缸链条倍速给进机构实现井架分段垂直升降。在钻井过程中,用于安放和悬挂提升系统,承受钻具重力,存放钻杆或钻铤等,承载能力为135 t。垂直起升钻塔具有可显著地减少钻探现场征用土地、安全性高、技术含量大等优点,另外钻机5 m高的前场平台为井口安装井控设备、泥浆回流管等提供了充裕空间。

4.2 电驱绳索取心绞车

主要由交流变频调速电机、减速机、电磁离合器、钳盘制动器、卷筒、智能排绳机构等组成。采用交流变频驱动与控制,实现转速的无级控制;具备盘刹制动与能耗制动双制动模式,可实现安全制动与零速可靠悬停;采用电磁离合器与盘刹结合,可实现绞车的无动力可控自由下落,降低能耗与生产运营成本,深孔时取心操作节能效果更加显著;智能排绳机构通过PLC及人机界面控制伺服电机回转,经行星减速机减速后驱动梯形螺杆旋转,带动排绳小车完成排绳,同时完成绳速、张力、下入孔深等数据的实时记录,大大延长了钢丝绳寿命,降低生产运营成本,可适用不同规格直径的钢丝绳。其三维图见图2。

4.3 主绞车

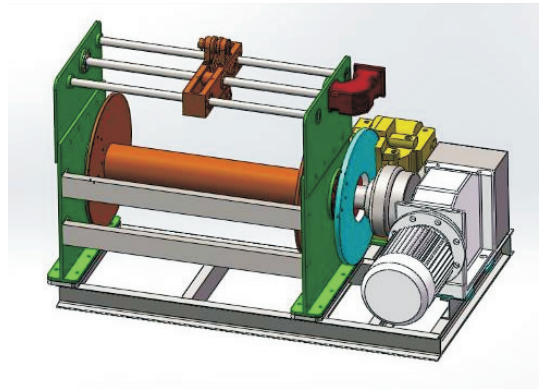


图2 绳索绞车三维图

创新一体化集成设计400 kW大功率提下钻系统与15 kW小功率送钻系统于主绞车一身,大功率升降系统在进行提下钻作业时可提高作业效率,小功率送钻系统在正常钻进时可有效降低能耗,减少成本,实现了深部矿产资源绿色勘查。该绞车由主电机、送钻电机、主减速机、送钻减速机、气胎离合器、联轴器、盘式刹车、卷筒、机架等主要部件组成,使用液压盘式刹车为应急刹车与驻车刹车,电机制动电阻能耗制动为主要刹车,实现钻具的悬停,运行安全可靠,其整体组装后的三维效果见图3。

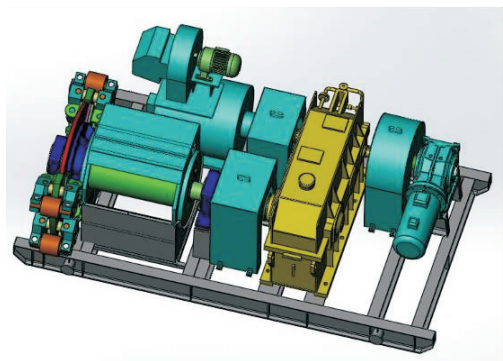


图3 主绞车三维图

4.4 电顶驱系统

电顶驱系统主要由直驱电机、水龙头、主要承载机构、摆管上卸扣装置、滑车、液压传动与控制系统及电气系统几大部分组成,具有回转、泥浆循环、加接单根、起下立根、拧卸丝扣等综合功能。电顶驱采用低速大扭矩交流变频电机直接驱动,在0~600 r/min间可无级调速,有利于以金刚石钻进为主体的各种高效钻进工艺对转速的选择;其液压系统可实现顶驱平衡、背钳提升、背钳夹紧、吊环摆臂、吊环自垂、液压吊卡开合等功能,可大幅度降低劳动强度、提高钻进时钻井操作的安全性、降低辅助工作时间、

提高钻进效率。其三维效果见图 4。

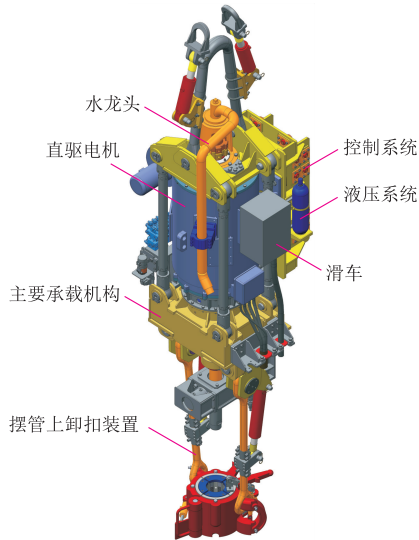


图 4 电顶驱三维效果图

4.5 电驱转盘

采用 ZP175 型转盘,通过万向轴与变频电机连接,由变频电机直接驱动,结构进一步简化;顶驱与

转盘两种回转方式共用一套变频控制器,通过旋钮来切换,从而减少电控系统的成本,有利于以后产业化、市场化。其三维效果见图 5。

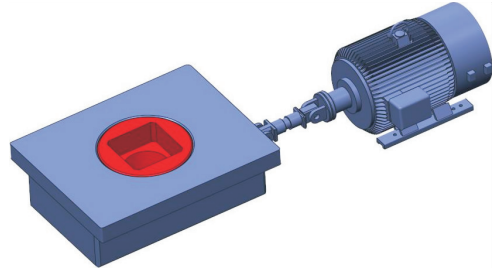


图 5 转盘系统结构

4.6 电传动及电控系统

根据地质岩心钻机的特点,确保系统的安全性、可靠性、整体性、先进性和实用性,充分发挥变频传动系统和网络技术优势,系统采用西门子公司 S7-300 可编程序控制器、ABB ACS880 系列变频器、Profibus 工业网络及智能操作单元构成钻机一体化控制系统,电控系统如图 6 所示。

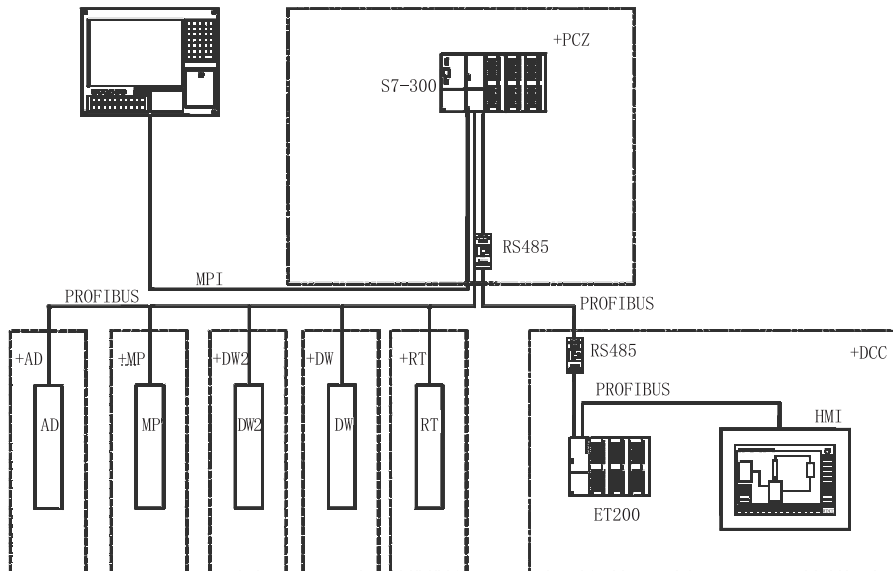


图 6 电控系统图

(1)系统电源采用交流 400 V AC 和 690 V AC 双电源母线方案,保证一体化控制系统的电源电压及频率的稳定,降低电缆数量及重量,现场使用便利。

(2)电传动系统采用 ABB ACS880 系列全数字直接转矩控制电压型交流变频调速装置“1 对 1”方式驱动,满足钻井工艺对电传动的要求。

(3)根据钻机负荷,采用制动单元和制动电阻代

替辅助刹车,满足钻进工艺要求,实现各回转系统平稳减速。

(4)通过 Profibus-DP 现场总线控制技术,可实现对系统各主要装置和钻井参数的采集、处理、远程数据传输通讯、监视和控制。数据经处理后在司钻电控台上进行显示,并可通过综合柜的工控机进行记录和打印。

(5)MCC 供电回路设计满足 4000 m 钻机各工

况要求。MCC单元采用快速连接器和电缆,满足快速安装移运要求。

(6)VFD房(图7)内放置绞车、转盘/顶驱、自动送钻、取心绞车、泥浆泵变频驱动柜各1套,以及PLC综合柜、进线开关柜、MCC供电柜、电源母线及转盘/顶驱切换柜各1套,集成度高,便于运输。



图7 VFD房实物

(7)司钻房(图8)内安装有电视监控系统、司钻操作系统、通讯对讲喊话系统、以及环境调节系统等。司钻房和外部信号及电源连接均采用快速连接器连接,司钻电控台具有钻机操作和显示报警的齐备功能。

(8)自动游车位置控制系统通过编码器、控制器可以对游车运行高度进行全过程监控,当游车超过安全区域,系统自动控制游车减速和软停,有效地防止



图8 司钻房

游车上碰下砸事故的发生,提高钻速及钻进质量。

4.7 液压系统

液压系统是钻机的辅助系统,为了避免液压系统间的相互干扰,液压系统设计为3个不同的系统:一是盘刹液压系统,由电机单独驱动,所需流量小,采用恒压变量系统,盘刹动作时反应时间短,工作更可靠。二是电顶驱液压系统,专门给电顶驱上液压动作提供动力油源,也是采用恒压变量系统,减小电顶驱液压动作的反应时间。三是钻机的辅助液压系统,主要用于起升井架、动力钳工作、液压猫头伸缩、岩心打捞架收放等辅助性动作。该系统采用负荷敏感控制系统,可根据不同工况要求提供不同的压力与所需的匹配流量,便于现场操作,安全可靠,液压系统原理见图9。

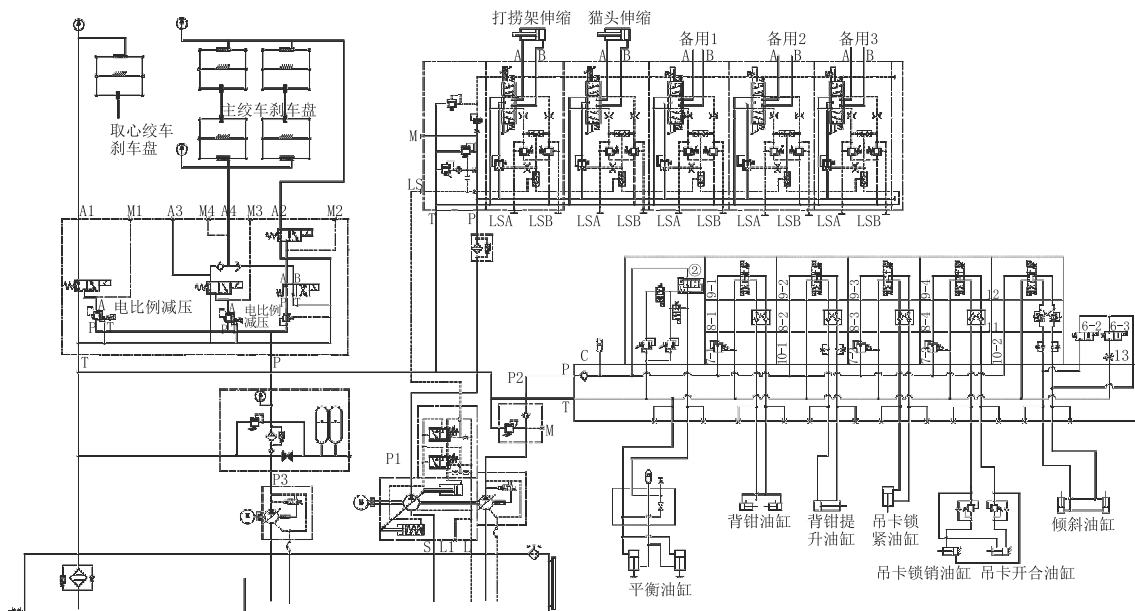


图9 钻机液压系统原理

5 主要技术参数(见表 1)

表 1 4000 m 岩心钻机主要技术参数

钻进能力/m	H 规格($\text{O}89 \text{ mm}$)	4000
	P 规格($\text{O}114 \text{ mm}$)	3000
	$\text{O}127 \text{ mm}$ 普通石油钻杆	1800
	$\text{O}89 \text{ mm}$ 普通石油钻杆	2800
井架平台	井架型式	K 型
	井架起升方式	液压驱动垂直起升
	净空高度/m	31
	承载力/t	135
	二层台高度/m	16.5
	立根容量/m	4000@ $\text{O}89 \text{ mm}$
	天车轮系	5×6
	前平台尺寸/m	8.5×9.6×5
	后平台尺寸/m	5×9.6×2.5
	导轨长度/m	25
升降系统	导轨抗扭/($\text{N} \cdot \text{m}$)	25000
	主电机功率/kW	400
	单绳最大提升力/t	15
	钢丝绳直径/mm	26
	滚筒转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~250
	钩速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0~1.1
	主刹车	液压盘式刹车
	辅助刹车	能耗制动
	送钻电机功率/kW	15
	自动送钻速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~0.4
顶驱系统	电机功率/kW	200
	最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	12000
	转速/($\text{r} \cdot \text{min}$)	0~600
	水龙头通径/mm	50
	循环压力/MPa	35
	背钳通径/mm	122
	最大卸扣扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	15000
转盘系统	吊环	150 t 单臂吊环
	吊卡	150 t 液压吊卡
	电机功率/kW	180
	最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	20000
绳索取心绞车	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~200
	通孔直径/mm	444.5
	电机功率/kW	45
	单绳最大提升力/t	4
	光毂提升速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~80
液压系统	钢丝绳直径/mm	10
	容绳量/m	4100
	排绳型式	伺服电机自动排绳
	主刹车	液压盘式常闭刹车
气源系统	额定流量/L	15+50+120
	额定压力/MPa	7+16+16
高压管汇系统	工作压力/MPa	1
	气罐容积/ m^3	3
高压管汇系统	工作压力/MPa	35
	公称通径/mm	107

6 生产应用情况

4000 m 交流变频电驱岩心钻机的生产应用结合中国地质调查局部署的地调项目“京津石地热资源调查”和“天津潘庄凸起构造区地热资源调查”,在天津东丽湖地区进行地热调查井(CGSD-01 井)的施工(图 10),施工单位为河北省煤田地质局二队,生产试验钻进时间为 2017 年 11 月 20 日—2018 年 4 月 2 日。CGSD-01 井于 2017 年 11 月 20 日开钻,通过该井施工,摸清天津东丽湖地区深部热储的地质结构与空间分布、物性特征,获取系列地热—水文地质参数,评价深层地热资源及其可利用性,在此基础上,实施深部热储实时监测,获取长周期批量监测数据,实现深部地热监测的技术突破,初步建立中深层地热资源勘查—开发—监测—科研示范基地,支撑中国地质调查局地热能源勘查开发工程技术中心的建设。



图 10 CGSD-01 井施工现场

生产应用期间,CGSD-01 井开孔孔径 660.4 mm,采用 $\text{O}127 \text{ mm}$ 普通石油钻杆、 $\text{O}660.4 \text{ mm}$ 钻头,完成钻探工作量 80 m,下入 $\text{O}508 \text{ mm}$ 的套管 80 m,然后进行固井;一开 $\text{O}444.5 \text{ mm}$ 钻深达到 1469.53 m,下入 $\text{O}339.7 \text{ mm}$ 套管 1467 m,期间进行了多次定深取心,完成了测井、固井等一开的全部工作。二开 $\text{O}311.2 \text{ mm}$ 钻深达到 2258.83 m,超过该钻机额定钻深能力 25.44%。整个试验历时 123 d,累计正常取心 20 回次,取出 $\text{O}105 \text{ mm}$ 的岩心总长超 130 余米(图 11),岩心采取率 $>90\%$,达到了地质取心要求。整个生产应用期间,钻机工作正常,现场的钻工认为该钻机技术含量高,操作简便,安全性与可靠性高,使用成本低,钻机的主要技术性能得到初步验证。



图 11 部分取出的岩心

7 结语

4000 m 地质岩心钻机可满足矿产资源勘查“攻深找盲”和“探寻第二找矿空间”战略以及深部地球科学研究的需求,其研制是一项高技术、创新性的研究工作,项目成果填补了国内相关技术产品的空白,有效提高了我国资源勘探的深度,与物探、化探等技术共同形成适合我国固体矿产资源特点的深部勘探技术体系,提高了我国地质钻探技术整体水平。成果的推广应用必将产生系列重大勘查成果,有效拓展资源勘查空间,快速发现一批新的矿产地,满足我国经济社会高速发展对资源的需求,为国家重大战略计划的实施提供了有力技术保障。

4000 m 地质岩心钻机为多功能钻探装备,既可用于深孔岩心钻进,也可用于我国浅部石油勘探,以及新兴能源如煤层气、页岩气、干热岩等的勘探,既可以打丛式井,又可以钻进定向孔,因此,该钻机将有非常大的潜在市场,技术成果应用转化的前景良好。

参考文献:

- [1] 李建华,刘凡柏.YDX-3型全液压岩心钻机的研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1).
- [2] 刘凡柏,王庆晓,李文秀,等.YDX-2型全液压岩心钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):32-35.
- [3] 张金昌,刘凡柏,冉恒谦,等.2000 m 地质岩心钻探关键技术与装备[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):3-6.
- [4] 古卫鹏,刘凡柏,张金昌.绳索取心绞车技术发展综述[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集,2015.
- [5] 任启伟,刘凡柏.3500 m 岩心钻探装备绳索取心绞车自动排绳器的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):61-64.
- [6] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014.
- [7] 张伟.关于我国地质岩心钻机发展方向的分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(8):1-5.
- [8] 朱江龙,张伟,黄洪波,等.深孔取心钻进用高速顶驱式钻机[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):114-119.
- [9] 沈怀浦,何磊,高明帅,等.4000 m 直驱电传动高速顶驱的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):243-246.
- [10] 洪晓威,曹宇,葛键,等.深井电顶驱液压顶驱钻井装置适用性研究分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):355-357.
- [11] 刘跃进,朱江龙,潘飞,等.我国深孔钻探装备的发展与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):18-23.
- [12] 何远信,刘家荣,翁炜,等.深部高效钻探技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):84-88.
- [13] 和国磊,刘晓林,朱芝同,等.基于CAN总线技术的钻机电控系统的设计与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(12):72-77.
- [14] 张西坤,靳益民.关于钻塔的几个问题的探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):37-42.
- [15] 刘宝林,桂暖银.地质钻机交流变频调速系统驱动性能的实验研究[J].探矿工程,1996,(1):49-52.