

5000 米智能地质钻探技术与装备研发

张金昌¹, 刘凡柏¹, 黄洪波², 梁 健^{1,3}, 王 瑜³, 吴 敏⁴, 陶士先⁵

(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;
3.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 4.中国地质大学(武汉)自动化学院,湖北 武汉 430074;
5.北京探矿工程研究所,北京 100083)

摘要:深部钻探技术是解决深地探测科技问题的必要手段之一。本文主要介绍了“十三五”国家重点研发计划“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”项目方案,项目从构建大深度绳索取心钻孔口径系列、钻具级配、装备配置等入手,开展了钻进智能控制、钻机关键技术与装备、高性能绳索取心钻杆、小口径高效系列钻具、环保冲洗液体系与废浆处理技术、钻探技术装备集成与示范等研究,拟突破智能控制、自动化、轻量化与模块化等关键技术,形成以绳索取心工艺为主体的特深孔地质岩心钻探装备与技术体系,为我国深部探测计划提供技术与装备支撑。

关键词:深部探测;地质钻探装备;钻探技术;特深孔;智能控制

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0001-08

Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment

ZHANG Jinchang¹, LIU Fanbai¹, HUANG Hongbo², LIANG Jian^{1,3},
WANG Yu³, WU Min⁴, TAO Shixian⁵

(1.*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*;
2.*China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China*;
3.*School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*;
4.*School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China*;
5.*Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China*)

Abstract: Deep drilling technology is one of the necessary means to solve the scientific and technological problems in deep exploration. This paper mainly introduces the research and development program of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment. It starts from the conceptual design of great-deep wire-line coring drilling diameter series, drilling tool classification, and equipment configuration, and is followed by R & D of drilling intelligent control, key drilling technology and equipment, high-performance wire-line coring drill pipes, small diameter and high-efficiency series drilling tools, environmental protection drilling fluid system and waste slurry treatment technology, integration and demonstration of drilling technology and equipment, etc. The program is aimed to achieve key technological breakthrough in intelligent control, portability and modularization; and build the ultra-deep hole drilling equipment and technology system mainly with the wireline core drilling process. It will provide technical and equipment support for China's deep exploration plan.

Key words: deep exploration; geological drilling equipment; drilling technology; ultra-deep hole; intelligent control

0 引言

深地探测是地球科学的最前沿,被看成是解决

人类面临能源资源和生存空间基本问题的必由之路,深地开拓科技问题已提升到战略高度^[1]。国家

收稿日期:2020-02-19 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.001

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号:2018YFC0603400)

作者简介:张金昌,男,汉族,1959 年生,教授级高级工程师,从事钻探技术装备研发工作,河北省廊坊市金光道 77 号,zjinchang@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:张金昌,刘凡柏,黄洪波,等.5000 米智能地质钻探技术与装备研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):1-8.

ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):1-8.

重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项 2018 年发布指南,将储备一批 5000 m 以深资源勘查前沿技术,油气勘查技术能力扩展到 6500~10000 m,加快“透明地球”技术体系建设,提交一批深地资源战略储备基地,支撑扩展“深地”资源空间。深部钻探作为必要的技术手段之一^[2-7],目前我国尚缺失 5000 m 以深地质岩心钻探技术与装备,而油气钻井与岩心钻探差异大无法直接应用。为响应党中央“向地球深部进军”的号召,全面实施深地探测、深海探测、深空对地观测和土地工程科技“四位一体”的科技创新战略,亟需开展大深度智能地质钻探关键技术与装备的研发,为探索地球深部奥秘、勘探深部资源等提供有力的技术装备支撑。

1 国内外研究现状

深部固体矿产地质岩心钻探对象一般为变质岩和结晶岩,要求全孔连续取心,多使用低固相泥浆,小口径($\varnothing 76$ mm)、窄唇面金刚石取心钻头配合高转速(≥ 300 r/min),钻杆采用薄壁结构(壁厚 ≤ 6.5 mm)为岩心绳索式打捞提供通道。目前,地质岩心钻探钻深能力在 4000 m 左右^[8-10]。大口径低转速石油天然气钻井工程中取心主要应用于沉积岩中,通常在部分井段取心作业,其连续取心长度在几米至几十米之间,石油钻井钻深能力可超 10000 m。

1962 年南非采用绳索取心技术创下 4300 m 岩心钻探纪录,终孔口径 53 mm;1988 年加拿大 Heath and Sherwood 公司使用绳索取心技术钻成 5424 m 金矿勘探孔^[11],终孔口径 76 mm;2013 年我国采用绳索取心技术完成 4006 m 深的莱州“岩金第一深钻”^[12-13],终孔口径 76 mm,至今仍保持着我国最深岩心钻孔记录。地质岩心钻探在钻孔口径、钻具型式、回转速度及钻杆结构等方面的独特性,使得以大口径低速回转钻进和分段提钻取心为主的石油钻井方法难以满足岩心钻探要求。国外经验和国内探索证明绳索取心技术是大深度地质岩心钻探的发展方向,我国尚需加强装备自动化智能化及钻具管材和取心工艺研究,以缩短与国外钻探技术水平差异。

欧美发达国家一直引领地质岩心钻探技术与装备的发展。因立轴式钻机回次进尺短、倒杆频繁,送钻精度低,多工艺适应性弱、安全性差、效率低,无法满足高质量的取心工作,20 世纪 90 年代初西方国

家即完成了从立轴式钻机到全液压动力头式钻机的转变^[14-17]。进入 21 世纪,美国 Boart Longyear 公司、瑞典 Atlas Copco 公司又陆续完成岩心钻机的自动化和智能化升级,送钻精度大幅提升,钻杆操作一键完成,大大改善了取心效率和质量,降低了工作强度。自动化和智能化是地质岩心钻机的发展方向。目前,我国 3000 m 以浅的中深孔钻机的主要技术性能已达到国际先进水平。近年来又研制了 XD-30DB 和 XD-40DB 型交流变频电动顶驱岩心钻机可适应 4000 m 以深钻探需求(见图 1)。装备的钻深能力已不是我国岩心钻机研究的难点,自动化和智能化水平低才是我国地质钻探装备与国外产品的主要差距所在。

为适应深孔地质岩心钻探技术要求,国外开发出有 Q 系列取心钻具及 V-Wall 绳索取心钻杆,目前我国开发的高钢级地质精密管材及高强度绳索取心钻杆与之相比仍有一定差距^[18-21]。深部钻探实践表明,当前我国市场上的绳索取心钻杆仅能满足 3000 m 以浅的钻深需求,小口径孔底动力钻具和金刚石取心钻头在高温、硬岩等复杂工况下的应用技术还需要进一步拓展与提高。

2 5000 m 地质岩心钻探技术体系构建

2.1 特深孔地质钻探现存技术问题

根据《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227-2010),特深孔指深度 >3000 m 的钻孔,本文特指 5000 m 地质岩心钻探钻孔。特深孔地质岩心钻探“满眼”钻进的服役工况更加复杂,其将遇到的困难与挑战可概括为:地层多变性、连续取心难、环空间隙小、孔壁摩阻大、地表驱动难、送钻精度低、钻孔口径小、钻具输出弱。随着钻孔深度的不断增加、工作难度的持续增大,深孔施工过程中钻孔事故率大幅度增大,其中不同程度地存在着钻柱极限承载力低、韧性不足致使钻杆断裂、螺纹拉脱,以及口径系列不匹配致使冲洗液环空压力降偏大,易发生钻孔漏失和孔壁不稳定等技术问题^[7,13,21-23],采用常规工艺技术难以满足钻探施工要求。

特深孔地质钻探现存技术问题主要包括:特深孔地质岩心钻探基础准则与依据缺失,油气钻井与岩心钻探工艺及装备差异大;大深度小环空高转速地质钻探的载荷特性复杂、参数辨识困难及施工场地受限;地质特深孔内工况复杂,长管柱导致钻压

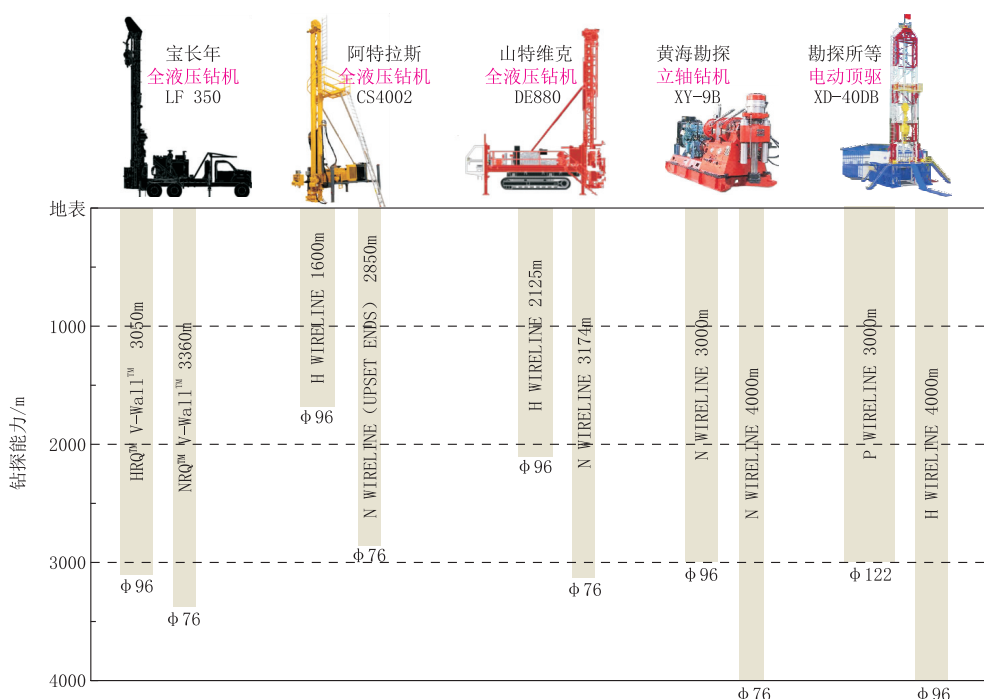


图 1 各国地质钻探装备钻深对比

Fig.1 Comparison of drilling capacity of geological drilling equipment by different countries

和扭矩的非线性传递、控制响应慢、控斜难度大、孔内事故隐患多;地质岩心钻探薄壁外平管柱起下钻和岩心打捞作业工序复杂、控制精度要求高;大深度薄壁钻杆螺纹副机械性能受几何尺寸约束,管体精度要求高、制造困难;复杂地层岩心易卡堵脱落、钻进效率低,孔壁摩阻大,地表动力传递衰减大;地质特深孔复杂地层小环空条件下护壁堵漏难、岩心易被冲蚀及冲洗液排放污染等。

2.2 5000 m 地质岩心钻探技术体系

针对特深孔地质钻探现存技术问题,拟构建的 5000 m 地质特深孔岩心钻探技术体系,将以绳索取心工艺为主体。在充分考虑大深度小环空高转速地质钻探工况特点的基础上,确定特深孔钻探口径系列与钻杆柱、套管柱规格,钻头钻具规格以及装备配置的性能指标。通过对孔内钻杆、钻具及地表装备的攻关研究,再经示范验证,并总结地质特深孔岩心钻探经验制定出 5000 m 地质特深孔岩心钻探规程或标准。最终形成 5000 m 地质特深孔岩心钻探技术体系。

构建合理实用的 5000 m 地质特深孔岩心钻探技术体系,最关键的是要针对地质特深孔岩心钻探特点,搞好项目的顶层设计。为此,首先要确定特深孔钻探口径系列,其次合理选择和设计好钻杆柱、套

管柱、钻头钻具规格。

2.3 项目总体目标及任务分解

项目总体目标是通过创新研发智能化、模块化、轻量化钻探装备及配套的高效、低成本环保钻探工艺技术,形成以绳索取心工艺为主体的 5000 m 地质特深孔岩心钻探技术体系,经示范验证满足深部探测和资源勘探需求。

根据项目总体研究目标 5000 m 智能地质钻探技术装备研发分解成钻探装备、智能控制、孔内机具、管柱管材、泥浆体系等 6 项课题。任务分解及技术路线见图 2。

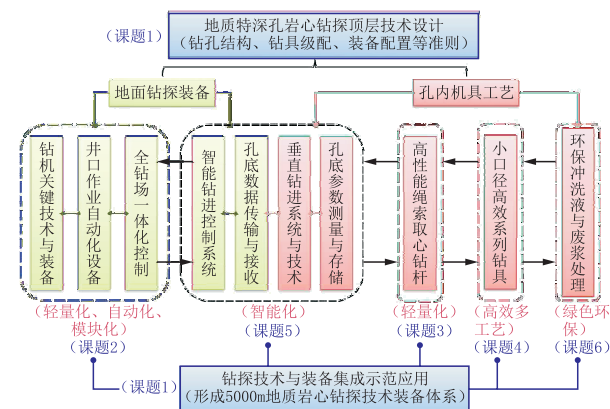


图 2 课题分工逻辑关系图

Fig.2 Logical diagram of the task division

3 顶层技术设计

针对 5000 m 地质岩心钻探存在的技术问题, 基于经济性、安全性和工艺性为优化目标的钻探工程设计方法, 制定钻孔结构、钻具级配、装备配置等准则, 构建以绳索取心为主的特深孔多工艺地质钻探技术体系。通过梳理分析了国内外深部地质岩心

钻探口径系列及管柱规格, 厘定了基本外界条件及相互关联要求, 开展了特深孔岩心钻探环空水力学计算与绳索取心钻杆的等强度设计^[24-25], 初步构建了以绳索取心钻进工艺为主体的 5000 m 特深孔钻探口径系列与钻杆柱、套管柱规格(见表 1), 给出了装备配置的性能指标(见表 2)。

表 1 外径/内径计算优化的钻杆结构和套管程序
Table 1 Optimization results of drill pipe structural parameters and casing program

开次	钻孔直径/ mm	钻杆外径/内径/ 壁厚/mm	钻杆接头外径/ 内径/mm	套管外径/内径/ mm	套管接头外径/ 内径/mm	钻深能力/ m	设计安 全系数	API 管材 钢级
一开钻柱	156	139.7/125.36/7.17	145.86/123.36	177.8/164.0	177.8/163.0	4500	2.0	S135
二开钻柱	127	114.3/100.54/6.88	120.00/94.54	146.0/133.0	146.0/132.0	5000	2.0	S135
三开钻柱	101	88.9/77.90/5.50	95.47/69.90	114.3/104.3	114.3/103.3	5000	2.0	S135

表 2 钻探装备论证的配置参数
Table 2 Drilling equipment configuration parameters

系 统	指 标	参 数
钻进能力	H 规格(Ø89 mm)/m	5000
	P 规格(Ø114 mm)/m	3500
钻架平台	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	41
	承载力/t	180
	二层台高度/m	25.5/26.5
	导轨抗扭/(N·m)	25000
升降系统	单绳最大提升力/t	17
	钩速/(m·s ⁻¹)	0~1.2
	自动送钻速度/(m·min ⁻¹)	0~0.4
顶驱系统	额定/最大扭矩/(kN·m)	12/22
	转速/(r·min ⁻¹)	0~200~600
	最大卸扣扭矩/(kN·m)	15
转盘系统	最大扭矩/(kN·m)	30
	转速/(r·min ⁻¹)	0~200
绳索取心绞车	单绳最大提升力/t	5
	光毂提升速度/(m·min ⁻¹)	0~60
	容绳量/m	5100
自动猫道	最大管具直径/mm	178
	最大管具长度/m	≤10
	管具单根质量/kg	≤500
	平台高度/m	≤7.5 m
铁钻工	最大扭矩/(kN·m)	25
	旋扣速度/(r·min ⁻¹)	100
	适用管径/mm	140、114、89
自动井架工	适用管径/mm	140、114、89
	适用管长/m	≥27
泥浆泵	行程/mm	150
	泵速/(次·min ⁻¹)	0~143
	缸径/mm	140、120、100、80

4 地表钻探装备

针对特深孔地质岩心钻探的“薄壁管柱、满眼钻

具、金刚石绳索取心”等钻进工艺技术及机具配套特征, 立足于安全、节能、经济和高效的行业需求, 基于特深孔地质装备容量适用、运维节能、控制先进的动力和拖动技术, 开展装备轻量化、模块化、自动化、系统化等的研究。制定 5000 m 地质钻探装备的总体技术方案和部件性能参数, 完成原位自升井架、变频升降及送钻绞车、变频高速顶驱、变频取心绞车、自动井架工、自动猫道、铁钻工和泥浆泵组的技术攻关及图纸设计, 推进重要设备单元和子系统的研制。同时, 开展 5000 m 井架的动力学响应分析, 进行司钻房人体工程学优化设计。

4.1 装备轻量化设计与设备研制

开展模块化、轻量化、快装性、易运输、占地小的钻机结构设计, 研发自带动力、原位起升的钻架平台和长行程轻质顶驱导轨。同时, 通过系统建模与动力学分析, 在融合不同钻进工艺、管柱组合、配套设备的条件下, 强化顶驱系统结构设计、动态参数辨识及控制技术, 研制适用于特深孔地质岩心钻探的电传动直驱高速顶驱钻进系统。

4.2 井口作业自动化设备研制

研制的井口自动化作业系统主要包括自动加杆、钻柱提吊、钻柱卡夹、钻(套)管拧卸、立根排放和套管下放机构等 6 个部分, 实现单根加接、孔口拧卸及立根排放等工序的无人值守状态, 同时针对绳索取心工艺特征进行具体执行机构设计, 并在整体作业流程的系统化控制方面进行攻关。

4.3 高效钻进自动控制模式

通过监控与分析钻压、钻速、扭矩、泵压等钻进主参数及机具反馈参数, 在主机自动控制模式下, 最

优化地调整钻压、转速、泵量等可控参数,达到钻进工艺与机具参数监测、钻进参数控制与钻进速度效果之间的最优化匹配和实时动态平衡,即“自动钻进控制模式”。在作业过程中,当在孔内岩层完整、钻进参数稳定的状态下,控制系统显示进入此控制模式,即开始自动控制钻进状态。

4.4 全钻场全流程的一体化集成控制系统

通过 PLC 技术、总线通讯技术及电气系统控制技术,以人性化操作为设计目标,研究一体化集成控制系统(即地质钻探电子司钻),加强工艺工序、安全互锁及逻辑指令的系统研究,攻克一键作业的自动化智能化系统的安全性、功能性等难题。

地表装备总体结构见图 3;自动化集成控制系统见图 4。

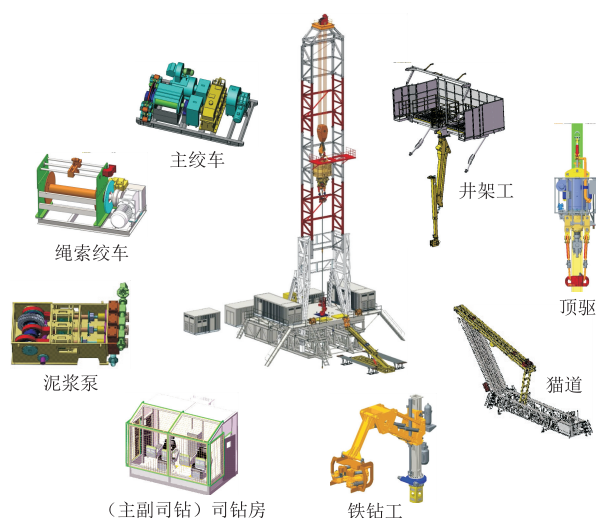


图 3 地表装备总体结构

Fig.3 General structure of surface equipment

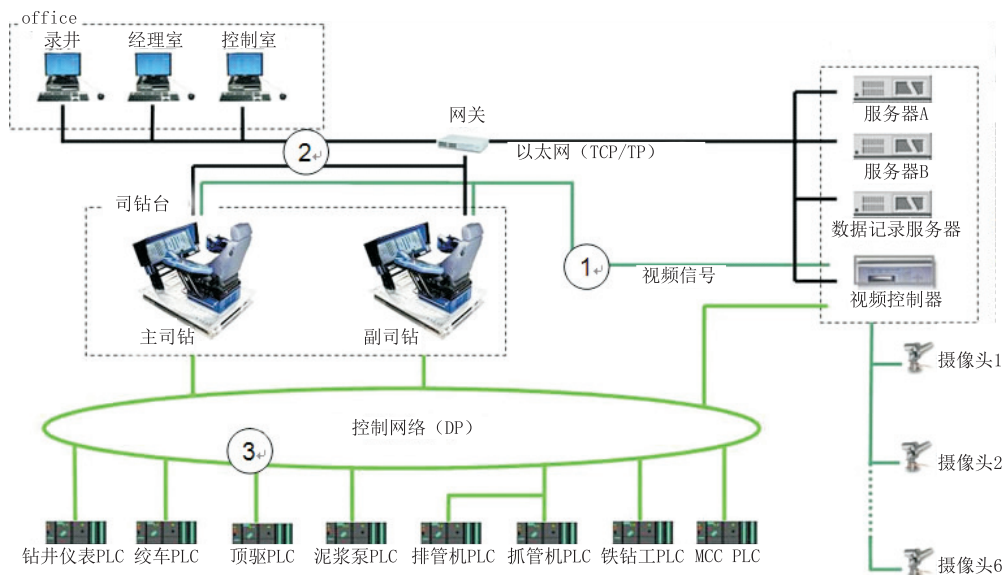


图 4 全程作业的自动化集成控制系统

Fig.4 Automatic integrated control system for the whole operation

5 孔内机具工艺

5.1 高性能薄壁绳索取心钻杆研制

大深度薄壁钻杆螺纹副机械性能受几何尺寸约束,管体精度要求高、制造困难等问题,从构建管柱口径系列入手,进行的特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究,构建了管柱口径系列(见表 1),满足了大深度级配需求。基于“满眼”钻进的管柱载荷模型和管柱防护技术,完成大深度(≥ 5000 m)薄壁绳索取心钻杆设计,开展的管材材料优选与测试研究,厘定了合金钢材料组分优化与钢级选用方向,初步确定选用 S135 钢级材料的第一种热处理制

度。合金钢性能参数见表 3。揭示了多因素协同作用下绳索取心钻杆的破坏规律与失效机理,研究的超音速火焰喷涂防护技术提升了钻杆耐蚀性能,为解决特深孔地质钻探钻杆在平衡其自重后剩余强度值低、应付孔内复杂情况能力弱等关键问题提供技术支撑。

5.2 小口径高效系列钻具研究

针对复杂地层岩心易卡堵脱落、钻进效率低,孔壁摩阻大、地表动力传递衰减大等问题,开展绳索取心钻具、孔底动力钻具和钻头工作理论研究,实现孔底机具与绳索取心钻进工艺结合。

(1)大深度绳索取心钻具方面,开展工作包括:

表 3 优选的管材材料机械性能

Table 3 Mechanical properties of optimized pipe materials

钢 级	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	冲击功/ J	硬度/ HRC
S135①	1039	1085	24.0	105	34.0
S135②	1095	1145	17.5	83	36.0
S135③	1130	1200	15.0	76	39.0
BG160TT	1230	1330	16.0	115	40.5
TP140V	1027	1087	20.5	145	33.0
V150①	1081	1222	19.5	77	39.5
V150②	1102	1152	16.0	130	36.5

①取心钻具结构优化设计理论研究;②到位报信机构等关键部件设计;③大深度绳索取心钻具、组合型绳索取心钻具研制与取心工艺研究;④不提钻换钻头钻具研制等。

(2)高效孔底动力取心钻具方面,开展工作包括:①全金属动力钻具设计理论研究;②高温高压密封及可靠性研究;③水力部件设计与流固耦合仿真研究;④孔内减速器、支承系统等关键部件研制;⑤配套单动双管取心、强制取心系统研制等。

(3)高效长寿命金刚石钻头方面,开展工作包括:金刚石钻头胎体配方、关键参数设计、切削结构设计、制造工艺研究等。

通过孔内系列钻具的研制,以期满足 5000 m 绳索取心和提钻取心等钻进工艺需求。

5.3 绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术

针对地质特深孔小环空客观条件下,面临的复杂地层低固相护壁、压力平衡、护心困难等问题,研制出耐温 150 ℃环保冲洗液体系。该冲洗液体系具有成本低、较易降解($BOD_5/CODCr$ 值为 21.5%)的特点,且 150 ℃高温下仍具有良好的流变性、降滤失性及抑制性能。开发出凝胶堵漏浆液体系,凝胶交联时间可控(30~75 min)、承压可达 6 MPa,见图 5,在山西、广西及北京 3 个地质勘查孔现场堵漏试验取得了较好的堵漏效果。形成的纳米复合水泥浆体系,具有适宜的流动度、可泵期和凝结时间,初终凝时间 <25 min,而且固结体具有较好的抗压强度、压折比及动静弹模比,其综合性能满足高温堵漏技术要求。

通过对 4 个地质勘查孔冲洗液污染性分析与评价,开展废弃冲洗液无害化处理技术研究,初步完成适合于地质钻探废弃冲洗液的处理工艺及相应处理配方,即“破胶—絮凝—氧化脱色”工艺,见图 6。



图 5 交联后的凝胶状态

Fig.5 Gel state after crosslinking

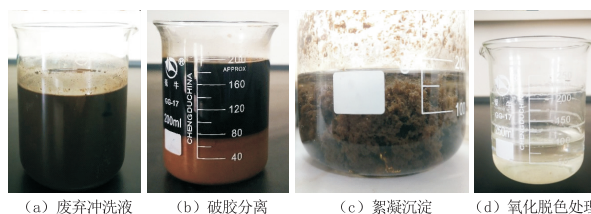


图 6 废弃冲洗液处理工艺

Fig.6 Treatment process of waste drilling fluid

6 智能化钻探仪器装备

研究基于孔底在线数据、地表即时数据和岩心快速测试信息等多源信息融合、决策与安全控制为一体的智能钻进技术,开展大深度智能钻探技术与装备研制,实现复杂地层孔内工况判别、钻进参数优化,与钻孔轨迹优化控制,提高作业安全性、效率和取心质量。

6.1 孔内数据测量传输技术

(1)针对钻进过程孔底数据难以获取的问题,研究深孔数据检测方法,分别针对 3500 m(温度 120 ℃以内)与 5000 m 内(温度 180 ℃以内)研制随钻采集储存式测量仪与打捞式测量仪,测量温度、压力、伽马及孔斜等参数并研究参数修正方法。研制的随内管孔内信息参数测量与存储系统,检测参数包括顶角、振动频率、角速度、温度、泥浆动压力以及判断岩心堵塞情况等,为智能化钻进提供重要信息指标。

(2)研制的基于绳索取心钻进工艺的孔内信息传输系统,区别于石油行业脉冲发生器对泵量要求,针对地质岩心钻探泵量小、口径小的特点,研究自适应泵量的脉冲发生器和地面接收装置,实现孔内—地面通讯连通(如图 7 所示)。

6.2 智能钻进控制技术

(1)钻进参数智能融合技术。综合孔底在线数



图 7 小口径绳索取心多参数无线随钻测量系统

Fig.7 Multi-parameter wireless MWD system for small diameter wire-line coring

据、地表即时数据和岩心快速测试信息建立“地面—孔底”钻进过程检测数据,研究钻进过程数据智能融合技术,提炼多源、异构、冗余以及不同时间尺度与粒度数据的价值信息,提高数据的价值密度,实现多源信息的数据级融合,对钻进过程操作提供指导与参考依据。

(2)钻进参数智能优化与控制技术。分析钻进操作参数与地层关系,建立基于数据驱动的孔底状态的动态模型,描述各种状态的动态特征,并建立在各种工况下操作参数调整的专家知识库;综合考虑地层特征参数信息,结合孔底状态特征的动态模型,研究钻进参数智能优化与控制技术,实现钻压、转速、泵量等钻进参数的智能优化设计,达到最大安全性与最大效率的控制效果。

(3)钻进过程智能判别与安全预警。对钻进装备工况、孔底状态、地层特性、钻进轨迹等数据进行特征级与决策级融合,提取钻进过程安全性状态特征,实现对钻进过程状态进行判断,为钻进过程决策与预警提供参考,并基于专家知识库信息,调整操作参数规避异常状态,达到安全控制的效果。

7 结语

项目深化了“产学研用”合作模式,充分发挥科研院所、高等院校、龙头企业、典型用户的互补优势,优化了协同创新环境,从构建大深度绳索取心钻杆口径系列入手,开展了复杂地层钻进智能控制、地质岩心钻杆关键技术研究与装备研制、大深度高性能薄壁绳索取心钻杆研制、小口径高效系列钻具研究、环保冲洗液体系与废浆处理技术、钻探技术装备集成与示范等 6 个课题研究。拟突破智能控制、高效钻进、轻量化与模块化等关键技术。预期形成的 5000 m 地质岩心钻探技术体系,为建设“透明地球”提供技术与装备支持,支撑扩展“深地”资源空间。

参考文献(References):

[1] 董树文,李廷栋,高锐,等.地球深部探测国际发展与我国现状综述[J].地质学报,2010,84(6):743—770.

DONG Shuwen, LI Tingdong, GAO Rui, et al. International progress in probing the earth's lithosphere and deep interior: A review[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):743—770.

[2] 刘广志.刘广志论科学钻探[M].北京:地质出版社,2005:5—7.

LIU Guangzhi. LIU Guangzhi on scientific drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005:5—7.

[3] 刘振铎,张洪叶,孙昭伟.刘广志文集[M].北京:地质出版社,2003:228—234.

LIU Zhenduo, Zhang Hongye, SUN Zhaowei. Liu Guangzhi's anthology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 228—234.

[4] 王达.科学钻探钻孔结构的研究[C]//王达.中国大陆科学钻探工程钻探技术论文集选集.北京:地质出版社,2007:125—129.

WANG Da. Research on drilling structure of scientific drilling [C]//WANG Da. Selected papers on drilling technology of China Continental Scientific Drilling Engineering. Beijing: Geological Publishing House, 2007:125—129.

[5] 张伟.特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(11):1—5.

ZHANG Wei. Discussion on casing program and drilling tools match relation of ultra-deep geological core hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(11):1—5.

[6] 张金昌,谢文卫.科学超深井钻探技术国内外现状[J].地质学报,2010,84(6):887—894.

ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well [J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):887—894.

[7] 朱恒银,蔡正水,王强,等.深部钻探技术方法的研究与应用[J].地质装备,2013,14(6):26—31.

ZHU Hengyin, CAI Zhengshui, WANG Qiang, et al. Research and application of deep drilling technology[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013,14(6):26—31.

[8] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望—回顾探矿工程事业 70 年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1—31.

WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1—31.

[9] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40—46.

LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development and application of 4000m AC frequency-conversion core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):40—46.

- [10] 高鹏举,刘凡柏,王跃伟,等.4000 m地质岩心钻机在天津东丽区地热资源调查中的示范应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):13-21.
GAO Pengju, LIU Fanbai, WANG Yuewei, et al. Demonstration application of 4000m geological core drilling rig in geothermal resources investigation in Dongli district of Tianjin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):13-21.
- [11] 张佳文,张林霞.我国深部矿产勘查现状与钻探技术进步[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):7-11.
ZHANG Jiawen, ZHANG Linxia. Current situation of deep mineral exploration and progress of drilling technology in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(S1):7-11.
- [12] 陈师逊.中国岩金第一深钻施工情况介绍[J].地质装备,2013,14(6):21-25.
CHEN Shixun. Introduction of the deepest borehole in rock gold exploration in China[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013,14(6):21-25.
- [13] 陈师逊,杨芳.深部钻探复合钻杆的研究与应用[J].地质与勘探,2014,50(4):772-776.
CHEN Shixun, YANG Fang. Research and application of composite drill pipes in deep drilling[J]. Geology and Exploration, 2014,50(4):772-776.
- [14] 张林霞,李艺,周红军.我国地质找矿钻探技术装备现状及发展趋势分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):1-8.
ZHANG Linxia, LI Yi, ZHOU Hongjun. Analysis on the present situation of drilling technical equipment and the development trend of geological prospecting in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(2):1-8.
- [15] 张金昌,孙建华,谢文卫,等.2000 m全液压岩心钻探技术装备示范工程[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(3):1-7.
ZHANG Jinchang, SUN Jianhua, XIE Wenwei, et al. A demonstration project of 2000m hydraulic core drilling equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(3):1-7.
- [16] 黄洪波,朱江龙,刘跃进.我国钻探技术装备“十一五”回顾与“十二五”展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(1):8-13.
HUANG Hongbo, ZHU Jianglong, LIU Yuejin. Review of drilling technology and equipment for the Eleventh Five-year Plan Period and envisioning of same for the Twelfth Five-year Plan Period in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(1):8-13.
- [17] 高富丽,刘跃进,张伟.我国地质钻探技术装备现状分析及发展建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):3-8.
GAO Fuli, LIU Yuejin, ZHANG Wei. Analysis and development proposal on present situation of geological drilling equipment in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(1):3-8.
- [18] 孙建华,陈师逊,刘秀美,等.小直径特深孔绳索取心口径系列及钻柱方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):1-5,17.
SUN Jianhua, CHEN Shixun, LIU Xiumei, et al. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(8):1-5,17.
- [19] 孙建华,张永勤,赵海涛,等.复杂地层中深孔绳索取心钻探技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(5):46-50.
SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, ZHAO Haitao, et al. Research on deep hole wire line core drilling tech. in complicated stratum[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(5):46-50.
- [20] 梁健,孙建华,张永勤,等.绳索取心钻杆管材的模糊综合评价[J].地质与勘探,2014,50(3):572-576.
LIANG Jian, SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of steel pipe materials used to wire-line drill rod[J]. Geology and Exploration, 2014,50(3):572-576.
- [21] 梁健,郭宝科,孙建华,等.深孔绳索取心钻杆抗拉脱能力有限元分析[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):90-93.
LIANG Jian, GUO Baoke, SUN Jianhua, et al. Finite element method of resistance to pull-off for deep hole wire-line drill rod[J]. Coal Geology & Exploration, 2013,41(2):90-93.
- [22] 孙建华,张永勤,梁健,等.深孔绳索取心钻探技术现状及研发工作思路[J].地质装备,2011,12(4):11-14.
SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, LIANG Jian, et al. Status and R & D approach of deep hole wire line core drilling technology[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2011,12(4):11-14.
- [23] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):1-9.
CHEN Shixun, ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, et al. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in Luobusha of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(11):1-9.
- [24] 尹浩,梁健,孙建华.特深钻探钻柱组合优化设计研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):56-62.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):56-62.
- [25] 梁健,尹浩,孙建华,等.特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):36-46.
LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):36-46.

致谢:在项目的立项论证和实施过程中,得到了中国地质调查局王达教授级高工及张伟教授级高工、中国地质调查局勘探技术研究所冉恒谦教授级高工、中国地质调查局北京探矿工程研究所窦云涛教授级高工、中国地质调查局探矿工艺研究所宋军教授级高工、中国地质大学(北京)刘宝林教授、中国地质大学(武汉)蒋国盛教授、中国地质装备集团有限公司刘跃进教授级高工、中煤科工集团西安研究院有限公司石智军研究员、金石钻探(唐山)股份有限公司田波董事长等专家、学者的帮助,在此表示衷心的感谢。同时,感谢项目组成员的辛劳付出!

(编辑 韩丽丽)