

特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范

薛倩冰¹, 刘凡柏^{*1}, 张金昌¹, 李文秀¹, 任启伟¹, 伍晓龙¹, 臧臣坤², 尹浩¹,
李宽¹, 王跃伟¹, 沈立娜³, 吴敏⁴, 李春³, 王久全⁵, 景龙⁶

(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. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074;
5. 金石钻探(唐山)股份有限公司, 河北唐山 063000; 6. 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北衡水 053000)

摘要:特深孔地质岩心钻探技术装备是由中国地质科学院勘探技术研究所牵头、国内多家单位合作参与研发成功的我国深部矿产资源勘探技术装备,是“十三五”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”的研究成果,形成的主要研究成果总体实现了特深孔地质岩心钻探工程设计标准化、钻探装备轻量化、钻进控制智能化、孔口操作自动化、孔内钻具系列化、泥浆体系绿色化的目标。以JZ04地热地质钻探井为示范平台,完成了特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范应用,重新构建了新的地质钻探小口径钻孔结构,创造了 $\Phi 114$ mm绳索取心钻进应用深度、下入 $\Phi 146$ mm地质套管深度两项亚洲纪录,初步形成了以绳索取心工艺为主体的特深孔地质岩心钻探技术装备体系。

关键词:特深孔;智能化;地质岩心钻探;钻探装备;绳索取心;集成及示范

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0008-09

Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole

XUE Qianbing¹, LIU Fanbai^{*1}, ZHANG Jinchang¹, LI Wenxiu¹, REN Qiwei¹, WU Xiaolong¹, ZANG Chenkun²,
YIN Hao¹, LI Kuan¹, WANG Yuewei¹, SHEN Lina³, WU Min⁴, LI Chun³, WANG Jiuquan⁵, JING Long⁶

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China;

3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

4. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

5. Jinshi Drill Tech Co., Ltd., Tangshan Hebei 063000, China;

6. No.3 Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Hengshui Hebei 053000, China

Abstract: The ultra-deep hole geological core drilling technology and equipment is successfully developed by the Institute of Exploration Techniques, CAGS in cooperation with several domestic units. It is the research achievement of the national key R & D program “Research and Development and Demonstration of 5000m Intelligent Geological Drilling Technology and Equipment” of the “13th Five Year Plan”. The ultra-deep hole geological core drilling is standardized designed, the drilling equipment is lightweight, the drilling control is intelligentized, the wellhead

收稿日期:2022-10-11; 修回日期:2023-02-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化岩心钻探装备升级与应用示范”(编号:DD20211421);国家重点研发计划项目“大深度地质钻探技术装备集成及示范”(编号:2018YFC0603401)、“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号:2018YFC0603400)

第一作者:薛倩冰,女,汉族,1987年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事钻探工艺技术与地质调查项目管理,河北省廊坊市广阳区金光道77号,913311690@qq.com。

通信作者:刘凡柏,男,汉族,1971年生,正高级工程师,地质机械专业,主要从事钻探装备的研发工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,994055047@qq.com。

引用格式:薛倩冰,刘凡柏,张金昌,等.特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J].钻探工程,2023,50(2):8-16.

XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):8-16.

operation is automatic, the in-hole drilling tools is seriation, and the mud system is greenization. The integration and demonstration application is completed taking the JZ04 geothermal geological exploration well as the demonstration platform. As a result, a new minor-caliber structure for geological drilling is rebuilt, two Asian records is created namely the deepest drilling depth using $\text{O}114\text{mm}$ wire-line coring technology and the deepest depth using $\text{O}146\text{mm}$ geological casing. The ultra-deep hole geological core drilling technology and equipment system with the wire-line coring as the main technology is preliminary formed.

Key words: ultra-deep hole; intelligentization; geological core drilling; drilling equipment; wire-line coring technology; integration and demonstration

0 引言

持续开展大深度地质钻探关键技术装备的研发是实现深地开拓,探索地球深部奥秘、解决人类能源、资源安全的必要技术手段之一^[1-3]。特深孔地质岩心钻探存在的主要技术难题包括:(1)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。(2)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;地质特深孔孔内工况复杂,长管柱导致钻压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。(3)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。(4)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。针对以上技术难题,“十三五”期间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”从构建特深孔绳索取心钻杆口径系列、钻具级配、装备配置入手,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、环保钻探工艺,初步形成了以绳索取心工艺为主体的特深孔地质岩心钻探技术装备体系,经示范验证总体满足P口径5000m深部矿产资源勘探需求。

1 5000 m 特深孔地质岩心钻探技术装备研发

“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”项目主要包括6项研究成果:(1)针对地质钻探共性问题建立了10项特深孔钻探工程设计准则。(2)研制成功“重深比”较小的XD50DB型地质岩心钻机,比同深度石油钻机质量减轻30%。(3)研制成功自动猫道机、铁钻工、井架工等井口自动化设备,

钻机自动化程度90%以上;智能控制系统,实现了钻机司钻控制、自动控制及智能控制,钻压智能控制偏差 $\leq 3\text{ kN}$,垂钻井斜控制 $\leq 3^\circ$,事故预报率 $\geq 95\%$ 。(4)研制成功大“长径比”绳索取心钻杆,比同外径石油钻杆质量降低33.25%。(5)研制成功大深度绳索取心钻具和高效长寿命金刚石钻头等系列小口径钻具。(6)研制成功高性能环保型冲洗液和基于生物破胶的废浆处理技术,实现深地资源勘查绿色环保、废弃浆液无害化处理。项目研究成果总体实现了5000m特深孔地质岩心钻探工程设计标准化、钻探装备轻量化、钻进控制智能化、井口操作自动化、孔内钻具系列化、泥浆体系绿色化的目标^[4-6]。

2 5000 m 特深孔地质岩心钻探技术装备集成

为检验项目研究成果,更好地满足深部矿产资源勘探对地质岩心钻探技术与装备的需求,在5000m特深孔钻孔结构和套管程序,5000m智能交流变频电驱岩心钻机集成、高效钻进及自动控制,孔口作业自动化,孔底动力提速增效钻具等深部钻探关键技术装备方面,通过“集成—配套技术升级—示范”继续开展优化与提高,逐步形成以绳索取心工艺为主体的特深孔地质岩心钻探技术装备体系。

2.1 5000 m 特深孔地质岩心钻探钻孔结构和套管程序

基于地质钻探共性技术与工程应用典型问题,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^[7-11],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,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,并基于经济性、安全性和工艺性为优化目标的钻探工程设计方法,初步构建了以绳索取心钻进工艺为主体的5000m特深孔地质岩心钻探口径系列与钻(套)管柱程序(见表1)。

表1 5000 m特深孔钻孔结构和钻(套)管柱程序

开次	钻头直径/ 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/ m	设计安全系数	API钢级
一开	156	139.7/125.36/7.17	145.84/123.36	177.8/164.0	177.8/164.0	4500	2.0	S135
二开	127	114.3/100.54/6.88	120.00/94.54	146.0/133.0	146.0/133.0	5000	2.0	S135
三开	101	88.9/77.90/5.50	95.47/69.00	114.3/103.3	114.3/103.3	5500	2.0	S135

2.2 5000 m智能交流变频岩心钻机及主要配置

基于薄壁轻量管柱、精确动载设计系数和部件结构优化等方法,研制成功轻量化、模块化XD50DB型5000 m智能交流变频岩心钻机(图1),主要由自主研发的梁柱式平台、新型直升井架、天车、双速顶驱、铁钻工、自动井架工、自动猫道机、主绞车、绳索取心绞车、电控系统、液压系统、气控系统等组成。顶驱、转盘、主绞车等大功率驱动部件采用600 V电驱动,其余部件采用400 V电驱动;自动猫道机、铁钻工、自动井架工等自动化井口作业装置采用液压驱动^[12-13]。钻机主要配置技术参数见表2。

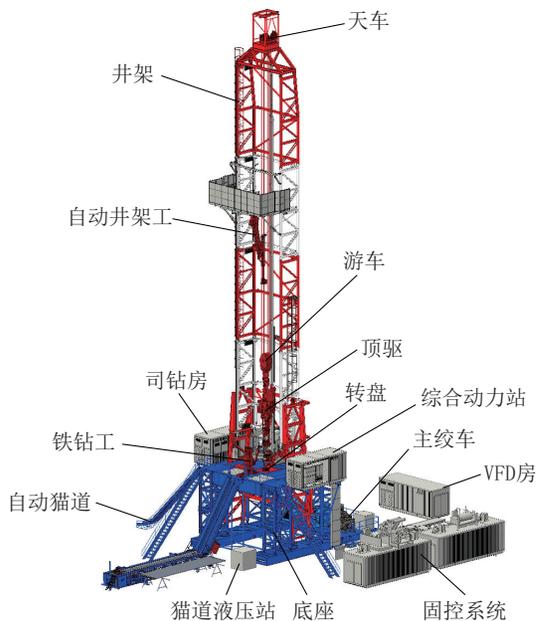


图1 XD50DB型地质岩心钻机及主要装备配置示意

Fig.1 XD50DB geological core drilling machine and main equipment configuration diagram

XD50DB型钻机主要优点:(1)采用先进的AC-VFD-AC电传动动力系统,绞车、顶驱、绳索取心绞车、转盘和泥浆泵实现无级调速,具有启动平稳、传动效率高、负荷自动均衡分配等优点。(2)交

表2 XD50DB型地质岩心钻机主要配置及技术参数

Table 2 Main configuration and technical parameters of XD50DB geological core drilling

系统	指标	参数
钻进能力	P规格(Ø122 mm)/m	5000
	井架平台井架起升方式	直升式
井架系统	井架平台净空高度/m	41
	井架平台承载能力/kN	1800
	井架二层台高度/m	26.5/25.5
升降系统	主电机功率/kW	500
	单绳最大提升力/kN	180
	自动送钻速度/(m·s ⁻¹)	0~20
顶驱系统	电动机功率/kW	132×2
	最大扭矩/(kN·m)	28
	额定转速/(r·min ⁻¹)	0~200~600
转盘系统	最大卸扣扭矩(kN·m)	42
	电机功率//kW	250
	最大扭矩/(kN·m)	30
绳索取心绞车	转速/(r·min ⁻¹)	0~200
	电动机功率/kW	55
	单绳最大提升力/kN	50
自动猫道	光毂提升速度/(m·s ⁻¹)	0~1
	容绳量/m	5100
	适用管径/mm	89~168
铁钻工	最大输送管具长度/m	9.5
	适用管径/mm	89~150
铁钻工	最大扭矩/(kN·m)	25
	最大悬扣速度/(r·min ⁻¹)	100

流变频VFD系统采用一对一控制,通过电传动系统PLC和触摸屏及气、电、液、钻并仪表参数的一体化设计,实现了钻机智能化司钻控制。(3)采用了标准化及模块化设计、多种组合方式,增强了钻机通用性、互换性,适应不同用户的需求。(4)采用了新型直升井架,对地面组装空间要求低,下部空间大,增大平台作业面积。(5)配备有双速顶驱,可满足金刚石

取心钻进工艺需求和牙轮等钻进工艺需求,一机多用。(6)钻机布置整齐、协调,设备模块少,搬迁拆装方便,满足钻机快速移运的要求。(7)钻机绞车为单轴齿轮传动,两挡手动换挡,挡内无级调速,传动简单、可靠。绞车配有独立电机自动送钻装置,对起下钻工况和钻井工况进行实时监控^[14-16]。(8)钻机井口配备有动力猫道、铁钻工、二层井架工,可实现加接杆自动化作业,减轻司钻及钻工的劳动强度,自动化程度高。(9)司钻房内设有工业监控系统、喊话系统、通讯系统、空调系统等辅助设备,提高了司钻操作安全舒适性。

2.3 BW-1500/40型泥浆泵

基于 5000 m 地质钻探钻孔结构复杂、钻进工艺多样、泵量和钻压变化范围大的要求,同时又能满足节能、数字化、流量压力无级调节、远程操控的要求,采用机械变速+变频控制,辅以变换缸径的技术路线^[17],自主研发了 BW-1500/40 型五缸往复式泥浆泵,主要技术参数见表 3。

2.4 P-5000 绳索取心钻杆

基于材料优选、高几何精度管材制造技术及钻杆结构设计,开展了钻杆成型工艺与性能控制技术研究^[18-20],完成了大长径比绳索取心钻杆研制,定尺长度 9.525 m, 螺纹副抗拉能力 1906 kN、抗扭能力 27.3 kN·m, 经示范应用具有起下钻时上扣效率高、对扣快,起下钻作业顺畅的优点,使用液气大钳上扣扭矩达到 20 kN·m 时,钻杆接头表面咬痕深度 < 1 mm, P-5000 绳索取心钻杆对扣、上扣情况见图 2, P-5000 与 H-5000 钻杆杆体及接头性能主要技术参数见表 4。

2.5 P 规格的绳索取心液动锤二合一取心钻具

绳索取心液动锤是将液动潜孔锤与普通绳索取心钻具相结合的高效取心钻进工具,通过优化材质、热处理、螺纹等提高液动锤整体强度、运动密封零件寿命,保证液动锤达到无故障工作时间 > 100 h。在绳索取心液动锤钻具中,由于液动锤的加入,对绳索

表 3 BW-1500/40 型泥浆泵主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of BW-1500/40

slurry pump					
缸径/ mm	变速箱 传动比	电机转速/ (r·min ⁻¹)	泵速/(r· min ⁻¹)	流量/(L· min ⁻¹)	压力/ MPa
140	10.2	0~980	0~96 96~147	0~1020 1020~1560	11 11~7
	16.8	980~1500	0~58 58~89	0~620 620~940	18 18~12
120	10.2	0~980	0~96 96~147	0~750 750~1140	15 15~10
	16.8	980~1500	0~58 58~89	0~460 460~690	24 24~16
100	10.2	0~980	0~96 96~147	0~520 520~800	21 21~14
	16.8	980~1500	0~58 58~89	0~320 320~480	35 35~23
80	10.2	0~980	0~96 96~147	0~330 330~510	34 34~22
	16.8	980~1500	0~58 58~89	0~200 200~300	40 40
驱动功率/kW			250		
外形尺寸(长×宽×高)/ mm			4650×2650×1600(包括动 力)		
质量/kg			13000(包括动力)		

取心单动机构的防震和使用寿命提出新的考验,通过将轴承和缓冲弹簧分开放置等细节优化提高了单动性能和寿命^[21-24],液动锤主要性能参数见表 5。

2.6 高效长寿命金刚石钻头

基于高胎体超强耐磨高效长寿命金刚石钻头技术,通过对金刚石钻头胎体配方研究及胎体结构优化^[25-28],研制了 Ø128 mm 高效长寿命金刚石钻头(图 3),满足复杂多变地层所需的长寿命、广谱性和高效性要求,经第三方检测及示范应用验证,机械钻速较普通钻头提高 72%~167%, 7~9 级坚硬地层钻头寿命为 150~398 m。

表 4 P-5000 与 H-5000 钻杆杆体及接头性能主要技术参数

Table 4 Main technical parameters of P-5000 and H-5000 drill pipe and connector

型号	杆体外径/ mm	壁厚/ mm	内径/ mm	连接质量/ (kg·m ⁻¹)	抗拉屈服强度/ kN	抗扭屈服强度/ (N·m)	接头外径/ mm	接头内径/ mm	钢级
P-5000	114.3	6.88	100.54	41.35	2161.6	45500	120.5	94.54	SS/S135
H-5000	88.9	5.5	77.9	32.65	1341.6	25600	96.0	69.9	SS/S135

图2 $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心钻杆对扣、上扣情况Fig.2 Twining and screw on condition of $\text{O}114\text{ mm}$ wire-line coring drill pipe

表5 深孔绳索取心动液锤钻具性能参数

Table 5 Main technical parameters of wire-line coring hydro-hammer

配套绳索取心钻具	S122
液动锤型号	YZX89
钻具外径/mm	114
冲锤行程/mm	20~30
自由行程/mm	9~15
工作排量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	120~190
工作泵压/MPa	1.0~3.0
冲击频率/Hz	15~30
冲击功/J	20~90
长度/mm	5230



图3 高效长寿命金刚石钻头

Fig.3 High efficiency long-life diamond bit

2.7 高温环保冲洗液

针对5000 m地质岩心钻探冲洗液关键技术需求,开展攻关研究,研发了耐温150℃高温环保冲洗液技术、凝胶堵漏技术、高温纳米复合水泥堵漏技术与废弃冲洗液无害化处理技术^[29-32]。其中耐温150℃高温环保冲洗液技术以JZ04地热井为平台进

行了示范应用,其性能见表6。

表6 高温环保冲洗液主要技术参数

Table 6 Main technical parameters of high temperature and environment-friendly flushing fluid

漏斗粘度/ s	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	API滤失量/ mL	泥皮厚度/ mm	pH值
35~45	1.02~1.03	6~10	0.2~0.3	9~12

3 5000 m特深孔地质岩心钻探技术装备示范

为将研究成果更好地在深部矿产资源勘探中应用,全面检验其性能及技术指标,以中国地质科学院勘探技术所组织实施的地质调查项目“冀中拗陷深部碳酸盐岩热储调查评价”在保定博野实施的JZ04地热井为试验平台进行了应用示范。

3.1 钻孔结构

JZ04地热井原完钻井深4007.1 m,完钻口径215.9 mm,下入 $\text{O}177.8\text{ mm}$ 尾管(筛管)。为实现小口径绳索取心钻进,在原孔内从地表至孔底下入 $\text{O}146\text{ mm}$ 套管,从而构建新的小口径钻孔结构,采用小口径绳索取心钻进及全面钻进进行应用示范。

3.2 钻进方法及钻具组合

以P规格金刚石绳索取心钻探为主,采用新研制的P规格高强度绳索取心钻杆、大深度P规格绳索取心钻具、P规格绳索取心动液锤二合一钻具、P规格高效长寿命金刚石钻头。同时,应用孔内信息采集传输系统、岩心信息快速提取系统、智能钻进控制系统、垂直钻进系统等。

(1)绳索取心钻进:变频高速电顶驱+转换接头+P规格高强度绳索取心钻杆(定尺9.5 m)+P规格高强度绳索取心加重钻杆(定尺9.5 m)+大深度P规格绳索取心钻具/P规格绳索取心动液锤二合一钻具(取心筒定尺10 m)+ $\text{O}128\text{ mm}$ 金刚石取心钻头。

(2)全面钻进:变频高速电顶驱+转换接头+P规格高强度绳索取心钻杆(定尺9.5 m)+P规格高强度绳索取心加重钻杆(定尺9.5 m)+ $\text{O}128\text{ mm}$ 金刚石全面钻头。

3.3 示范应用情况

2021年8月6日开始在原JZ04地热井下入 $\text{O}146\text{ mm}$ 套管,8月23日正式开始钻进,9月4日钻至4014.67 m,孔径128 mm,包括下套管、第一次取心

钻进、磨鞋钻进、全面钻进、第二次取心钻进等几个阶段。现场示范应用如图4所示。



图4 5000 m特深孔地质岩心钻探技术装备集成示范现场

Fig.4 Site for integration and demonstration of 5000m ultra-deep hole geological core drilling technology and equipment

3.3.1 下套管

2021年8月6日正式下套管,至2021年8月11日套管下至4007.01 m,套管规格为 $\text{O}146\text{ mm} \times 6.35\text{ mm}$,材质为R780。

3.3.2 第一次取心钻进

2021年8月23日下钻至4007.01 m开始第一次取心钻进(见图5),钻头尺寸 $\text{O}128\text{ mm}$,硬度为HRC23~28,进尺0.72 m,钻压20~40 kN,转速30~40 r/min,泵压3~5 MPa。



图5 第一次取心钻进

Fig.5 First core drilling

钻具组合为: $\text{O}128\text{ mm}$ 取心钻头+ $\text{O}128.5\text{ mm}$ 扩孔器+P规格绳索取心钻具+ $\text{O}114\text{ mm}$ 地质加重钻杆+ $\text{O}114\text{ mm}$ 地质绳索钻杆+顶驱。

取心钻进0.72 m后,孔深4007.73 m,孔口 $\text{O}146\text{ mm}$ 套管外溢出钻井液,提出钻具重新固定孔口,提出钻具后发现钻头已磨至钻头刚体,分析认为

原JZ04地热井井底有掉块或者其他异物,钻头回转后胎体剥落,采用磨鞋带捞杯进行磨削打捞。

3.3.3 磨鞋钻进

2021年8月29日下钻至4007.73 m,开始磨鞋钻进至4008.90 m,进尺1.17 m,磨鞋钻头尺寸 $\text{O}126\text{ mm}$,钻压20~40 kN,转速30~40 r/min,泵压3~5 MPa。8月30日提出孔内钻具,磨鞋捞杯内捞出部分钻头掉落的金刚石胎体、套管附件等(见图6)。



图6 磨鞋钻进

Fig.6 Milling shoe drilling

3.3.4 全面钻进

磨鞋钻进捞出孔底掉块后利用全面钻头修孔底,以保证孔底干净清洁,2021年8月30日下钻至4008.90 m开始全面钻进,钻进至4009.62 m,进尺0.72 m,钻头尺寸 $\text{O}128\text{ mm}$,硬度为HRC23~28,钻压20~40 kN,转速30~40 r/min,泵压3~5 MPa。

钻具组合为: $\text{O}128\text{ mm}$ 全面钻进钻头+ $\text{O}121\text{ mm}$ 加重钻杆+ $\text{O}114\text{ mm}$ 钻杆+顶驱。

3.3.5 第二次取心钻进

2021年9月2日下钻至4009.42 m开始第二次取心钻进,至4日累计进尺5.05 m,孔深4014.67 m,取心长度4.87 m,钻头尺寸 $\text{O}128\text{ mm}$,硬度为HRC23~28。

取心钻具组合: $\text{O}128\text{ mm}$ 取心钻头 + $\text{O}128.5\text{ mm}$ 扩孔器 + P-5000 取心钻具 + $\text{O}121\text{ mm}$ 加重钻杆 + $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心钻杆。钻进参数: 钻压 30 kN, 转速 100~120 r/min, 泵量 230~240 L/min, 泵压 3~5 MPa。

9月5日下入绳索取心液动锤二合一钻具至孔深 4014.67 m 继续第二次取心钻进, 至8日累计钻进进尺 2.83 m, 取心长度 2.78 m, 岩心采取率 98.23%, 孕表镶金刚石钻头尺寸 $\text{O}128\text{ mm}$, 硬度为 HRC30~35, 孔深 4017.50 m。

取心钻具组合: $\text{O}128\text{ mm}$ 取心钻头 + $\text{O}128.5\text{ mm}$ 扩孔器 + P 规格绳索取心钻具 + $\text{O}121\text{ mm}$ 加重钻杆 + $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心钻杆。钻进参数: 钻压 20~40 kN, 转速 100~150 r/min, 泵量 140~240 L/min, 泵压 3~5 MPa。

两次取心钻进 7.88 m, 获取岩心 7.65 m, 岩心采取率 97.08%, 钻进获取的岩心见图 7。



图7 钻获的岩心
Fig.7 Drilled core

3.4 示范应用效果

经示范应用 5000 m 特深孔地质岩心钻探技术装备体系, 取得的主要应用效果有以下 6 个方面: (1) XD50DB 型钻机在 JZ-04 地热井中取心钻进、下套管、孔内事故处理等方面的示范应用, 基本实现井口作业自动化, 极大降低了工人劳动强度。主副独立一体化司钻, 极大改善了作业人员的工作环境, 整个钻进过程中钻进平稳, 运行正常。(2) BW-1500/

40 型泥浆泵进行了调试及性能检验, 排出压力从最低值开始, 依次升至额定排出压力值的 50%、75%、100%, 同时测量和记录泵速 n 、泵量 Q 、吸入压力 P_s 和排出压力 P_d 等数值, 结果表明, 无论压力还是流量, 总体满足钻探需求。(3) $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心钻杆可满足特深孔绳索取心钻进、全面钻进、事故处理等多工艺钻进需求, 具有强度高、韧性好、拆卸方便等显著优点, 提高了管柱安全性能和钻探施工效率。(4) $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心液动锤二合一取心钻具工作正常, 性能稳定, 符合设计要求, 在提高机械钻速方面应用效果明显。(5) 耐温 150 °C 环保冲洗液体系具有良好的流变性及润滑性。(6) 采用 $\text{O}114\text{ mm}$ (P 级) 地质绳索取心钻杆, 整套装备示范应用深度达到 4017.50 m, 总体满足 $\text{O}89\text{ mm}$ (H 级) 口径、5000 m 钻深能力。创造了 $\text{O}114\text{ mm}$ (P 级) 绳索取心/绳索取心液动锤钻进应用深度、下入 $\text{O}146\text{ mm}$ 地质套管深度两项亚洲纪录。

4 结论

(1) 通过 5000 m 特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范, 检验了 XD50DB 型钻机在钻进工作能力、钻机自动化控制系统、智能化控制系统、各执行机构之间的协调性及可靠性。

(2) 对 P 规格绳索取心钻具、钻杆、钻头、孔底动力钻具进行了实钻验证, 验证了其工作性能及可靠性。

(3) 对高温环保冲洗液进行示范应用, 检验了相关性能指标, 达到了使用的要求。

(4) 初步构建了以绳索取心工艺为主体的特深孔地质岩心钻探技术装备体系, 总体满足 5000 m 深部矿产资源勘探需求。

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] 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.
- [4] 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 5000 meters intelligent geological drilling technology and equipment[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):1-8.
- [5] 薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):9-14.
XUE Qianbing, ZHANG Jinchang. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):9-14.
- [6] 张金昌,尹浩,刘凡柏,等.自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J].*地质论评*,2022,68(4):1382-1392.
ZHANG Jinchang, YIN Hao, LIU Fanbai, et al. Development and application of intelligent and automatic drilling technology and equipment[J]. *Geological Review*, 2022,68(4):1382-1392.
- [7] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(11):21-26.
- [8] Ding Liqin, Wang Zhiqiao, Liu Baolin, et al. Borehole stability analysis: A new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 69: 102932.
- [9] Ding Liqin, Wang Zhiqiao, Wang Yu, et al. Thermo-poro-elastic analysis: The effects of anisotropic thermal and hydraulic conductivity on borehole stability in bedding formations[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020,190(C):107051.
- [10] 丁立钦,王志乔,凌雪,等.深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):122-128.
DING Liqin, WANG Zhiqiao, LING Xue, et al. Deep geo-drilling borehole stability analysis in anisotropic formations[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):122-128.
- [11] 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.
- [12] 臧臣坤,黄洪波,周政,等.5000m自动化地质岩心钻机的研制[J].*地质装备*,2021,22(5):3-8.
ZANG Chenkun, HUANG Hongbo, ZHOU Zheng, et al. Development of 5000m automatic geological core drill[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2021,22(5):3-8.
- [13] 沈杯浦,何磊,黄洪波,等.适用于大深度地质钻探和油气地热钻井的双动力电顶驱系统设计[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):31-39.
SHEN Huaipu, HE Lei, HUANG Hongbo, et al. Dual-power electric top drive drilling system design for large-depth geological drilling and hydrocarbon & geothermal drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4):31-39.
- [14] 高鹏举,董耀,刘凡柏,等.5000米地质岩心钻机主绞车设计[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):40-45.
GAO Pengju, DONG Yao, LIU Fanbai, et al. Design of the draw work of 5000m geological core drilling rig[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4):40-45.
- [15] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.5000米绳索取心绞车设计[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):46-52,57.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Design of 5000m wireline coring winch [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):46-52,57.
- [16] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.5000m地质钻探绳索取心绞车的研制及应用[J].*钻探工程*,2022,49(2):40-50.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Development and application of 5000m wire-line coring winch for geological drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2022,49(2):40-50.
- [17] 欧阳志强,贺建波,石卫民,等.5000米智能地质钻探配套泥浆泵的方案设计[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):53-57.
OUYANG Zhiqiang, HE Jianbo, SHI Weimin, et al. Conceptual design of the mud pump for 5000m intelligent geological drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):53-57.
- [18] 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.
- [19] 尹浩,梁健,孙建华,等.深部科学钻探钻杆接头优化措施[J].*钻探工程*,2021,48(3):134-139.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Optimization measures of drill pipe joints for deep scientific drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(3):134-139.
- [20] 尹浩,梁健,孙建华,等.地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):58-64.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Research on mechanical properties of wireline drill pipes for geological ultra-deep holes[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):58-64.
- [21] 李鑫森,李宽,孙建华,等.国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):15-23,39.
LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):15-23,39.
- [22] 杨泽英,齐力强,崔淑英,等.深孔绳索取心液动锤钻具的研制

- 与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):66-70.
- YANG Zeying, QI Liqiang, CUI Shuying, et al. Development and application of wire-line coring hydro-hammer for deep hole [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(12):66-70.
- [23] 蒋太平,李果民,肖华,等.大口径绳索取心钻进工艺在页岩气地质调查川蔺参1井中的应用[J].钻探工程,2021,48(S1):269-274.
- JIANG Taiping, LI Guomin, XIAO Hua, et al. Application of large diameter wire-line core-drilling technology in Chuanlincan-1 well for shale gas geological survey[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):269-274.
- [24] 李鑫森,胡建超,马莎莎,等.FDS-P型绳索取心钻具研制及试验研究[J].钻探工程,2021,48(S1):370-374.
- LI Xinmiao, HU Jianchao, MA Shasha, et al. Development and test of the FDS-P wire-line coring tool[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):370-374.
- [25] 吴海霞,陈磊,李春,等.新疆乌苏煤矿区泥岩地层用金刚石钻头的应用研究[M].第二届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:466-471.
- WU Haixia, CHEN Lei, LI Chun, et al. Research and application of diamond bits for mudstone in Wusu coal mine, Xinjiang [M]. Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:466-471.
- [26] 叶继超,沈立娜,阮海龙,等.金刚石钻头胎体添加稀土氧化钇的方法及影响研究[M].第二届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:472-477.
- YE Jichao, SHEN Lina, RUAN Hailong, et al. Method and effect of adding Yttrium Oxide to diamond bit matrix[J]. Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:466-471.
- [27] 陈西,沈立娜,杨甘生,等.陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):101-105.
- CHEN Xi, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):101-105.
- [28] 孙祺斌,沈立娜,杨甘生,等.特高多层胎体孕镶金刚石钻头设计与数值模拟[J].煤田地质与勘探,2020,48(3):225-230.
- SUN Qibin, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Design and numerical simulation of multi-layer bit with extra-high matrix [J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(3):225-230.
- [29] 熊正强,陶士先,李艳宁.堵漏用交联聚合物凝胶研究进展[M].第二届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:253-258.
- XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, LI Yanning. Progress in crosslinked polymeric gel research for lost circulation treatment [J]. Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:253-258.
- [30] 熊正强,陶士先,刘俊辉,等.延迟交联凝胶研制及其在广西某铀矿堵漏应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):140-144.
- XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, LIU Junhui, et al. Development and application of delayed crosslinked gel for lost circulation treatment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):140-144.
- [31] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
- FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment friendly high-temperature drilling fluid for green exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):129-133.
- [32] 李旭方,熊正强.抗高温环保水基钻井液研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):32-39.
- LI Xufang, XIONG Zhengqiang. Research progress on high temperature resistant and environment friendly water-based drilling fluids [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):32-39.

(编辑 荐华)