

自动化智能化地质岩芯钻探技术 装备研发与应用



张金昌¹⁾, 尹浩¹⁾, 刘凡柏¹⁾, 黄洪波²⁾, 梁健¹⁾, 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), 北京, 100083;

4) 中国地质大学(武汉), 武汉, 430074; 5) 北京探矿工程研究所, 北京, 100083

内容提要:为解决 5000 m 地质岩芯钻探基础准则与依据缺失问题,提高钻探装备的自动化、智能化水平,启动了 5000 m 智能地质钻探技术装备研发工作,通过钻机装备、钻探器具研制,钻探工艺技术研究并经试验示范验证,取得多项创新成果,形成了 5000 m 地质岩芯钻探技术体系。通过特深孔钻孔口径与管柱规格优化研究、钻杆规格设计、装备性能参数选配,形成了 5000 m 地质岩芯钻探技术规范体系;基于 5000 m 特深孔地质岩芯钻机、孔口自动化作业装置等关键设备研制,实现了绳索取芯钻进的孔口作业全流程自动化,形成了轻量化钻机孔口管柱柔顺控制技术;基于复杂地层孔内工况判别、钻进参数优化与轨迹优化控制等技术问题研究,形成了多源信息融合的地面与孔底一体化钻进过程智能控制技术;基于高性能薄壁绳索取芯钻杆和系列小口径高效钻具研制,形成了大深度绳索取芯系列钻杆钻具技术;研发了耐高温环保型冲洗液、生物破胶废浆处理技术、“广谱型”双浆堵漏技术,形成了绿色环保型冲洗液体系与护壁堵漏技术。

关键词:特深孔;地质岩芯钻探;绳索取芯;智能化自动化钻探技术装备

深部固体矿产地质岩芯钻探对象一般为变质岩和结晶岩,要求全孔连续取芯,多使用低固相泥浆,小口径($\Phi 76$ mm)、窄唇面金刚石取芯钻头配合高转速(≥ 300 r/min)回转钻进,钻杆采用薄壁结构(壁厚 ≤ 6.5 mm)为岩芯绳索式打捞提供通道,其钻深能力在 4000 m 左右。石油钻井钻深能力可超 10000 m,但以大口径低速回转钻进和分段提钻取芯为主的石油钻井方法难以满足岩芯钻探要求。国外经验和国内探索证明绳索取芯技术是大深度地质岩芯钻探的发展方向,采用先进的技术装备与工艺,优质、高效地实施钻探工程,更是当前必须解决的重大技术问题,为此,我国尚需加强装备自动化智能化及钻具管材和取芯工艺研究,以缩短技术水平差异,满足深部矿体的精细探测需求(张金昌等,2020)。

我国矿产资源探采深度已从 2000 m 以浅延伸至 4000 m 以深。但是,我国目前地质钻探技术基本处在以小口径浅孔、中深孔钻探为主的水平,大多施工队伍的钻探技术水平难以满足深孔和复杂地层钻

探的技术要求。欧美发达国家一直引领地质岩芯钻机技术的发展,因回次进尺短、倒杆频繁,送钻精度低,使得立轴式钻机多工艺适应性弱、安全性差,效率低,无法满足高质量的取芯工作,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力头式钻机的转变。进入 21 世纪,美国 Boart Longyear 公司、瑞典 Atlas Copco 公司又陆续完成岩芯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,大大改善了取芯效率、取芯质量和工作强度,是地质岩芯钻机的发展方向。同时,为适应深孔地质岩芯钻探钻进技术要求,国际上开发出 Q 系列、O 系列取芯钻具及 V-Wall 绳索取芯钻杆,目前我国开发的高钢级地质精密管材及高强度绳索取芯钻杆与之相比仍有一定差距。深部钻探实践表明,当前我国市场上的绳索取芯钻杆仅能满足 4000 m 以浅钻深需求,小口径孔底动力钻具和金刚石取芯钻头在高温、硬岩等复杂工况下的应用技术还需要进一步拓展与提高。

注:本文为国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0603400)的成果。

收稿日期:2022-01-19;改回日期:2022-03-18;网络首发:2022-04-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.04.021

作者简介:张金昌,男,1959 年生,教授级高工,主要从事钻探技术装备研发工作;Email: zjinchang@mail.cgs.gov.cn。通讯作者:梁健,男,1980 年生,教授级高工,主要从事深部钻探工程科学研究与管理工;Email: raul9942718@163.com。

因此,通过系统分析深部钻探的特点以及对装备的要求,梳理总结目前深部钻探装备的发展现状和存在的问题,研究解决途径,理清发展思路,并在实践中不断验证,从而逐步建立适应深部钻探特点和要求的全方位的深部钻探装备综合体系,是我国钻探装备行业亟待解决的课题,且具有重大的经济社会意义(张金昌等,2020)。

1 总体思路

针对 5000 m 地质岩芯钻孔结构、钻具级配、装备配置等基础准则与依据缺失,油气钻井与岩芯钻探工艺及装备差异大,无法满足连续取芯作业需求等问题,在国家十三五重点研发计划资助下,开展 5000 m 智能地质钻探关键技术与装备研究工作,既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、环保钻探工艺技术,经示范验证,形成 5000 m 地质特深孔岩芯钻探技术体系,满足深部探测和资源勘探需求。研究内容包括:工程设计准则与技术体系构建;轻量化、自动化、全流程一体化设备研制;管柱口径系列构建,管柱优化设计;大深度绳索取芯钻具,高效孔底动力取芯钻具,高效长寿命金刚石钻头研制;孔内数据测量传输技术,智能钻进控制技术,垂直钻进系统研制。各项研究内容之间的关系如图 1 所示。

针对特深孔地质钻探现存技术问题,构建的 5000 m 地质特深孔岩芯钻探技术体系将以绳索取芯工艺为主体。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。通过孔内钻杆、钻具及地表装备的攻关研究,示范验证,总结地质特深孔岩芯钻探经验,制定出 5000 m 地质特深孔岩芯钻探规程或标准,最终形成 5000 m 地质特深孔岩芯钻探技术体系(薛倩冰等,2020)。

2 地质特深孔钻探技术规范体系建立

2.1 特深孔钻孔口径与管柱规格优化研究

深部地层地质条件复杂,随钻探向纵深发展,钻遇弱面地层导致钻孔围岩失稳将严重影响工程进度,因此优化钻孔口径,合理控制泥浆循环压耗分布,具有重要的工程意义(Ding Liqin et al., 2019, 2020; 丁立钦等, 2020;)。对于钻孔口径对泥浆循环压耗的影响问题相对复杂,由于循环系统管路不规则,加之泥浆的流变特性变化较大,为此在工程上进行简化计算,即将“泥浆看作宾汉流体、钻头外径与裸眼直径相等”。根据水力学伯努利方程,对地表管汇压力损耗、钻柱内压力损耗、钻头水口压力损耗、环空压力损耗进行了理论计算,开发了“泥浆循环压力损耗及泵功率计算软件”(图 2),可根据给定的过流通道几何形状与泥浆性能参数,确定循环系统各部分压力损耗大小及总压降值,揭示循环系统压力损耗分布规律,指导钻杆柱组合选配及后续评价工作。

综合计算分析各开次裸眼钻进时的理论压耗、泵功率及碎岩面积与口径关系等,确定合理钻头直径,以选用最优套管规格,实现优化现有钻孔口径系列和套管程序等。基于裸眼钻进,设定泥浆密度 1.05 g/cm^3 ,塑性黏度 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,裸眼环空流速 1.5 m/s ;一开设计孔深 4500 m,二开孔深 5000 m,三开孔深 5500 m;从钻杆柱刚度、抗腐蚀能力、标准管体规格等方面考虑,钻杆体分别选为:一开 139.7/125.36/7.17、二开 114.3/100.54/6.88、三开 88.9/77.9/5.50(外径/内径/壁厚, mm),最后给出了优化后的口径系列和套管程序(表 1)。

2.2 钻杆结构级配设计研究

开展了 5000 m 地质钻探

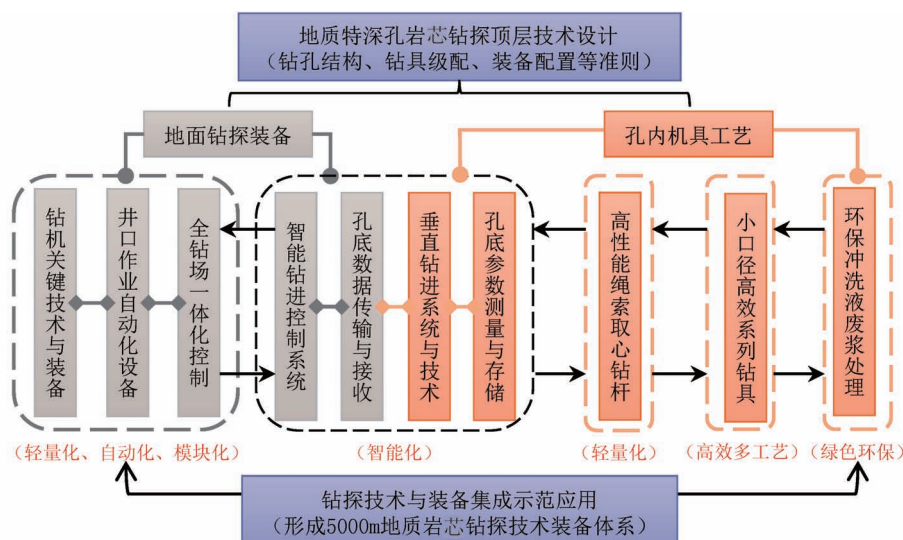


图 1 5000 m 智能地质钻探关键技术与装备研发结构图

Fig. 1 The Research Scheme of the Project

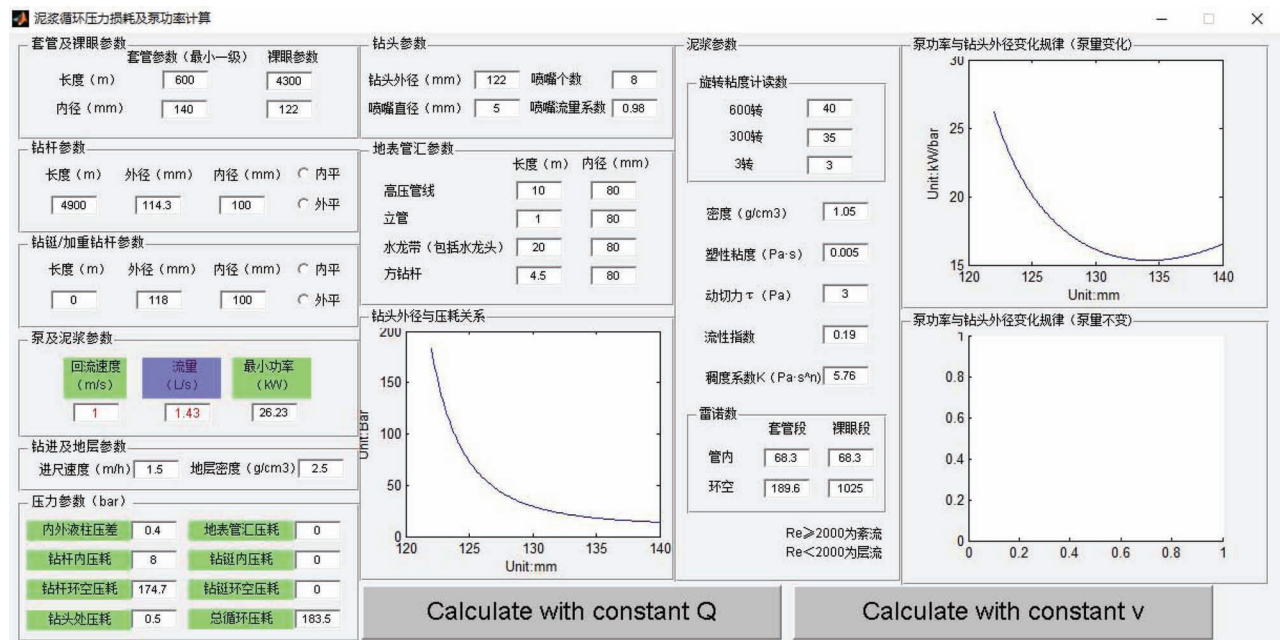


图 2 泥浆循环压力损耗及泵功率计算软件

Fig. 2 Mud circulating pressure loss and pump power calculation software

表 1 优化的钻孔口径和套管程序			
Table 1 Optimized drilling diameter and casing program			
参数	一开钻柱	二开钻柱	三开钻柱
钻孔直径 (mm)	156	127	101
套管外径/内径 (mm)	177. 8/164	146/133	114. 3/104. 3
套管接头外径/内径 (mm)	177. 8/163	146/132	114. 3/103. 3
钻杆外径/内径 (mm)	139. 7/125. 36	114. 3/100. 54	88. 9/77. 9
钻深 (m)	4500	5000	5500
泵量 (L/min)	340. 8	216. 6	162. 6
泵压 (MPa)	9. 3	13. 1	15. 3

表 2 优化的钻杆结构			
Table 2 Optimized drill pipe structure			
参数	一开钻柱	二开钻柱	三开钻柱
钻孔直径 (mm)	156	127	101
杆体 OD×ID×S (mm)	139. 7/125. 36/7. 17	114. 3/100. 54/6. 88	88. 9/77. 9/5. 50
接头 OD×ID (mm)	145. 86/123. 36	120. 0/94. 54	95. 47/69. 9
钻深(m)	4500	5000	5500
设计安全系数	2. 0	2. 0	2. 0
API 管材钢级	S135	S135	S135
锥度	1: 12	1: 12	1: 12
螺纹长度 (mm)	80	75	70
螺纹最小长度 (mm)	60. 46	59. 59	58. 39
螺距 (mm)	10	8	8
最大螺距 (mm)	15. 69	12. 49	11. 93
牙型高度 (mm)	1. 5	1. 3	1. 3
最小牙型高度 (mm)	1. 09	1. 02	1. 07
牙顶宽 (mm)	4. 598/4. 583	3. 652/3. 637	3. 652/3. 637
大端大径 (mm)	139. 06	111. 74	87. 18
小端大径 (mm)	134. 06	106. 82	82. 68

用薄壁绳索取芯钻杆结构设计与计算,方案兼顾推广应用与工程需求,在详实的理论研究基础上,依据钻杆等强度设计(即接头螺纹根部截面屈服强度不小于杆体、内外螺纹强度基本一致)且综合考虑应用孔深、钻进工艺、内管投放、事故处理、起下钻坐卡及其自动化操作等,并考虑钻杆端部加厚形式及连接形式(螺纹连接、加厚直联、摩擦焊直联)、加厚端尺寸、螺纹等与生产制造中设备生产参数的关系进行钻杆结构改进设计,确定了H/P/S各规格钻杆尺寸和螺纹参数,为岩芯钻机、孔口设备、取芯钻具、钻头研发确立了边界要求、奠定了基础,相关参数见表2(梁健等,2019;尹浩等,2019)。

级配优化后的钻杆结构的先进性如下:

(1)与现行标准相比,各开次钻孔直径加大,虽然增加了钻头的碎岩面积,潜在的降低了机械钻速,但降低了环空压耗,为孔底动力钻具使用留有更大压降空间。

(2)适当加大的钻杆柱外环空间隙不仅降低了管柱与孔壁的碰撞概率和摩擦阻力,而且抑制了由于高泵压带来的钻孔漏失和孔壁不稳定等问题。

(3)适量增加的钻杆壁厚,提高了钻杆

表 3 5000 m 智能地质钻探技术装备主要配置

Table 3 Main configuration of 5000 m intelligent geological drilling technology and equipment

序号	名称		规格型号	主要参数	
1	5000 m 交流变频电驱地质岩芯钻机	井架	ZK41	1800 kN	
		底座	DZ180	1800 kN	
		天车	TC180	1800 kN	
		游车大钩	YG180	1800 kN	
		绞车	/	500 kW	
		转盘	ZP-205	250 kW	
		电顶驱	CDD50DB	2×132 kW	
		绳索取芯绞车	/	55 kW	
		VFD 房	/	/	
		司钻室	/	/	
		自动井架工	/	移摆质量 715 kg	
		铁钻工	/	25000 N·m/100 r/min	
		动力猫道	/	≤37 kW	
		吊环	DH-180	1800 kN	
		气动卡瓦	QW-205	/	
		液压猫头	YM-10	160 kN	
		气动绞车	JQHSB-50×12	50 kN	
		组合液压站	/	15+50+120 L 7+16+16 MPa	
		倒绳机	DSJ8-D	80 kN/5.5 kW	
电动压风机	LGFK3/8	18.5 kW			
高压管汇系统	/	35 MPa/φ107 mm			
2	固控系统	1号罐	沉砂罐	9000×2300×1800	容积 27.5 m ³ ,分锥形仓
			振动筛	JKZDS160	160 m ³ /h;1.86 kW*2
			砂泵	SB4*3-11	60 m ³ /h;11 kW
		2号罐	循环罐	9000×2300×1800 mm	容积 28.9 m ³ ,分两仓
			除砂器	JKCSQ-250*2	200 m ³ /h;44~74 μm
			除泥器	JKCNQ125*8	200 m ³ /h;15~20 μm
			砂泵	SB8*6-13	200 m ³ /h;55 kW
		3号罐	循环罐	9000×2300×1800	容积 37.3 m ³ ,分两仓
			离心机注入泵	5.5 kW-4 级 50 Hz	防爆型,杆泵
			离心机	JKLW450*1000 N	50 m ³ /h;5~7 μm
		4号罐	制浆罐	9000×2300×1800	容积 28.9 m ³ ,不分仓
			配浆漏斗	JKSLH150*50	200 m ³ /h
			砂泵	SB8*6-12	200 m ³ /h;45 kW
		5号罐	配药罐	φ1500×1500 mm	容积 2.6 m ³
			立式搅拌器	JKJBQ-5.5 L	5.5 kW
		泥浆枪		JKNJQ80A-3X	旋转式,喷头数量:3
		卧式搅拌器		JKJBQ-11 kW	11 kW
		管线及附件		泥浆伞、走道、护栏、 管线,梯子、阀门等	
		照明系统			
电控系统		280 kW,380 V/50Hz	防爆型		
3	泥浆泵		5BW-250	250 kW	
4	事故处理工具		H、P、S 规格	/	
5	绳索取芯钻杆		H、P、S 规格	/	
6	金刚石钻头		φ128 mm	/	
7	绳索取芯钻具总成		H、P、S 规格		
8	液动锤+绳索取芯钻具		H、P、S 规格		
9	高温环保冲洗液		/	耐温 150 ℃	
10	套管		φ177.8 mm、φ146 mm、φ114.3 mm	/	

柱的刚度和抗腐蚀能力。

(4) 加大的螺纹锥度,可有效提高加接单根时螺纹的对中性。

(5) 依据等强度设计原则,综合考虑环空间隙、螺纹参数、内管打捞投放以及孔口操作等事宜,实现了接头内外加厚量最优化设计,在有效满足绳索取芯钻进工艺、起下钻坐卡及其自动化操作的同时,实现了管柱结构对有限空间合理利用的最大化。

2.3 钻探装备性能指标选配

依据特深孔钻探工程设计准则,结合绳索取芯钻进工艺为主体的 5000 m 特深孔钻探口径系列与钻杆柱、套管柱规格的工艺尺寸需求(表 1、表 2),给出了装备配置的性能指标(表 3)。

3 轻量化、自动化、全流程一体化控制装备体系建立

3.1 5000 m 特深孔地质岩芯钻机及配套装置

开展了模块化、轻量化、快装性、易运输、占地小的钻机及配套结构设计。研制成功的钻机及配套装置的先进性、高效性表现如下:

(1) 钻架平台自带动力、原位起升,顶驱导轨的行程长、整体结构轻质简洁。

(2) 基于系统建模与动力学分析,融合不同钻进工艺、管柱组合、配套设备的要求,实现电传动直驱高速顶驱系统结构强化设计、动态参数辨识及控制技术。

(3) 顶驱系统采用双电机驱动,两台交流变频电机驱动变速箱输入轴,分别通过 2 级齿轮减变速输出扭矩给主轴,变速箱只传递扭矩,不承受轴向钻柱载荷。

(4) 钻进过程中的钻柱载荷由水龙头的加长主轴承承担,起下钻时的管柱载荷由水龙头壳体与提吊装置承担;水龙头主轴从变速箱输出轴中心穿过,两者之间通过花键传递扭矩且有轴向定位机构(沈怀浦等,2020)。

(5) 配套泥浆泵,采用变频电机驱动加两挡变速,实现泵压、流量的精确控制(欧阳志强等,2020)。

(6) 主绞车采用交流变频调速与齿轮



图3 孔口自动化系统:(a)自动猫道机;(b)铁钻工;(c)井架工

Fig. 3 Automation system of wellhead: (a) automatic catwalk machine; (b) iron roughneck; (c) derrickman

箱换挡相结合的技术,更好地满足钻探工艺的要求,提高钻探施工的效率与安全性;取芯绞车采用双折线绳槽设计,解决了垒绳、压绳、咬绳等提升过程中的问题(任启伟等,2019,2020;高鹏举等,2020)。

3.2 孔口自动化作业装置

结合绳索取芯钻进工艺特点,完成了自动猫道机、井口铁钻工和井架工的研发,实现了孔口自动化作业系统的整体作业流程系统化控制,形成了轻量化钻机孔口管柱柔顺控制技术孔口自动化。该系统可实现无人自动加杆、钻柱提吊、钻柱卡夹、钻(套)管拧卸、立根排放和套管下放等六项功能,孔口作业基本全部实现自动化,相关实物如图3所示。

4 钻进过程智能化控制系统

基于孔底在线数据、地表即时数据和岩芯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,开展了钻进过程智能化控制系统研发,完成了孔内数据测量传输、钻进智能控制、轨迹优化控制等研究,实现了全钻场一体化的集成控制。

4.1 智能钻进控制系统研发

开展了深孔数据监测方法研究,研制了随钻采集储存式测量仪、打捞式测量仪及小泵量MWD(包括内管式孔内参数与储存系统、自适应脉冲发生器和地面接收机构)。研制的配套绳索取芯小泵量MWD能适应小口径地质岩芯钻探条件,具备随钻测量采集、传输、显示以及数据存储回放功能。

开展了钻进过程智能控制技术研究,实现了钻进数据的监测与融合、钻进参数优化与控制、钻进过程智能判别与安全预警。构建了基于混合支持向量回归的钻速预测模型,通过司钻房内的触摸屏和钻进控制系统工控机实现七种钻进参数(立管压力、泵量、转矩、转速、钻压、钻进深度、钻速)监控显示。

设计了一种基于混合蝙蝠算法的钻速优化方案,该方案运用智能优化方法决策最优钻探操作参数,为保障钻探过程高效运行提供操作参数推荐。现场应用结果表明,该智能操作参数优化技术可有效提升钻探效率。

提出了一种钻进过程事故预警方法。在钻进过程事故预防与处理特性分析的基础上,考虑事故发生时钻进参数变化的不确定性,基于贝叶斯网络建立钻进过程事故预警模型。通过归一化、滑动平均和最小二乘线性拟合方法,进行钻进参数趋势判断;通过贝叶斯网络推断计算井漏、井涌事故发生概率,超过设定阈值触发相应事故报警;结合实际钻进数据,对钻进过程事故预警模型进行验证,并就不同趋势判断界限对预警性能的影响进行讨论。实验结果表明提出的钻进过程事故预警方法可对井漏、井涌事故进行有效预警,合适的趋势判断界限可降低报警延迟,减少误报和漏报现象。

开展了小直径垂钻技术研究,建立了钻进轨迹参数智能计算模型,提出了钻进轨迹参数智能计算方法及钻进轨迹多目标优化方法,进行了平台测斜响应及控制精度优化等测控技术研究,完成了垂直钻进系统样机试制,为特深孔钻探控制孔斜提供了技术保障(张龙等,2019;柴麟等,2020)。

4.2 全钻场一体化集成控制

基于上述孔内数据测量传输、钻进智能控制、轨迹优化控制研究,结合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,实现了全钻场一体化的集成控制系统研发,钻机智能化控制司钻室如图4所示。

通过全钻场一体化的集成控制系统,实现了钻压、钻速、扭矩、泵压等钻进主参数及机具反馈参数监控与分析,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,达到最优化钻进和实

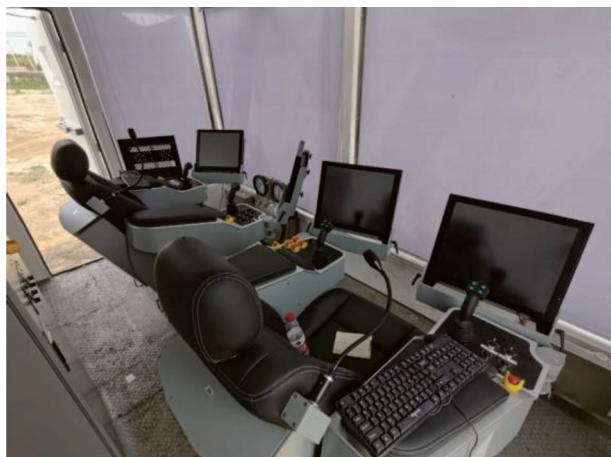


图4 司钻室

Fig. 4 Control drilling room

时动态平衡,多快好省地实施快速取芯钻进;多源信息融合地面与孔底信息,实现工艺工序、安全互锁及逻辑指令的有机结合,提升了一键作业系统的安全性、功能性(Wu Xiao et al., 2019; Yang Aoxue et al., 2019)。

5 绳索取芯钻杆钻具设计、制造技术

5.1 绳索取芯钻杆

建立了“满眼”钻进过程管柱载荷模型,开展了新型钻杆的“等强度”结构设计、抗腐蚀技术、管柱精密制造技术研究,国内首次研制出 5000 m 地质岩芯钻探用大“长径比”绳索取芯钻杆。

选定国标或行标管材尺寸,通过静力学和给定的安全系数圈定接头及加厚端尺寸后,并采用水力学计算出循环压降、泵功率和最优碎岩面积等确定合理的钻头尺寸,优化了钻杆结构和套管程序。基于 H、P、S 3 种规格钻杆受力性能的有限元分析,对 3 种规格钻杆的机械性能及上扣扭矩进行了计算分析(尹浩等,2020)。

通过多因素协同作用下绳索取芯钻杆的破坏规律与失效机理研究,优化防护工艺参数,提高符合强化层的致密性和力学性能,使其组织结构特性优于传统防护工艺(周永宽等,2019)。

通过优化合金钢材料的纯净度与化学组分,调控管材残余力,探究多次镦粗—整体直联加工工艺及后矫直工艺技术等,使绳索取芯钻杆制造加工技术和使用性能得到全面提升。

5.2 系列小口径高效钻具

结合绳索取芯工艺需求,研发出大深度绳索取

芯钻具、高效孔底动力钻具和高效长寿命金刚石钻头等系列小口径高效机具。

通过取芯钻具结构优化设计理论研究、到位报信结构等关键部件设计、液动锤结构优化、钻具试制与取芯工艺示范研究,研制成功大深度绳索取芯钻具、绳索取芯液动锤二合一钻具。经试验示范验证,满足 5000 m 绳索打捞岩芯要求,取芯效率提升明显,节省了深孔取芯辅助时间(李鑫森等,2020)。

通过全金属动力钻具设计理论研究、高温高压密封及可靠性研究、水力部件设计与流固耦合仿真研究、孔内减速器、支撑系统研究,研制出全金属孔底螺杆马达(冯颖亮等,2018;李颖杰等,2019;路家兴等,2019;梁晨帆等,2020;刘璐等,2020;张翔等,2020;Wang Yu et al., 2020)。

通过金刚石胎体配方、关键参数设计、切削结构设计、制造工艺研究,以及钻进示范研究,研制成功高效长寿命金刚石钻头。经试验示范验证,Ⅶ~Ⅸ级岩石可钻性条件下,机械钻速提高 72%~167%,平均寿命 ≥ 150 m(叶继超等,2019;吴海霞等,2019;陈西等,2020;孙祺斌等,2020)。

通过上述工作开展,形成了大深度绳索取芯系列钻杆钻具设计、制造工艺技术。

6 环保型冲洗液体系和基于生物破胶的废浆处理技术

研发了高性能环保型冲洗液体系,并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。

6.1 高性能耐高温环保型冲洗液

研发了一套无毒且生物降解性好的耐温 150℃ 环保冲洗液体系。研究及应用结果表明,该环保冲洗液在高温下性能优异、成本低,可满足 5000 m 地质岩芯钻探需要,在深地资源绿色勘查中具有广泛的应用前景(付帆等,2020;张统得等,2020b;Wang Sheng et al., 2020)。

6.2 生物破胶的废浆处理技术

研发了一套适合地质钻探的废弃冲洗液无害化处理技术与工艺。该技术在四川省达川区煤矿勘探孔现场试验中取得了良好的应用效果,在地质钻探绿色勘查方面具有广阔的应用前景(张统得等,2020a)。

6.3 “广谱型”双浆堵漏技术

研发了交联时间可控(10~122 min)的交联凝胶堵漏技术,研制了初终凝时间间隔短(12 min)的

表 4 5000 m 钻进试验应用情况
Table 4 Application of 5000m drilling test

回次类别	取芯钻进	磨鞋钻进	全面钻进	取芯钻进	取芯钻进
钻具组合	φ128mm 取芯钻头 + φ128.5mm 扩孔器 + 绳索取芯钻具 + φ121mm 加重钻杆+ φ114mm 绳索钻杆+顶驱	φ126mm 磨鞋钻头 + φ121mm 加重钻杆+ φ114mm 绳索钻杆 +顶驱	φ128mm 全面钻头 + φ121mm 加重钻杆+ φ114mm 绳索钻杆 +顶驱	φ128mm 取芯钻头 + φ128.5mm 扩孔器 + 绳索取芯钻具 + φ121mm 加重钻杆+ φ114mm 绳索钻杆+顶驱	φ128mm 取芯钻头+ P 规格绳冲取芯钻具+ φ121mm 加重钻杆+ φ114mm 绳索取芯钻杆 +顶驱
钻进孔段 (m)	4007.01~4007.73	4007.73~4008.9	4008.9~4009.62	4009.62~4014.67	4014.67~4017.5
钻头类型	Φ128 金刚石取芯钻头	Φ126 磨鞋钻头	Φ128 全面钻头	Φ128 金刚石取芯钻头	Φ128 金刚石取芯钻头
钻压 (kN)	20~40	20~40	20~40	20~40	20~40
转速 (r/min)	30~40	30~40	30~40	30~40	100~150
泵压 (MPa)	3~5	3~5	3~5	3~5	3~5
排量 (L/min)	140~240	140~240	140~240	140~240	140~240

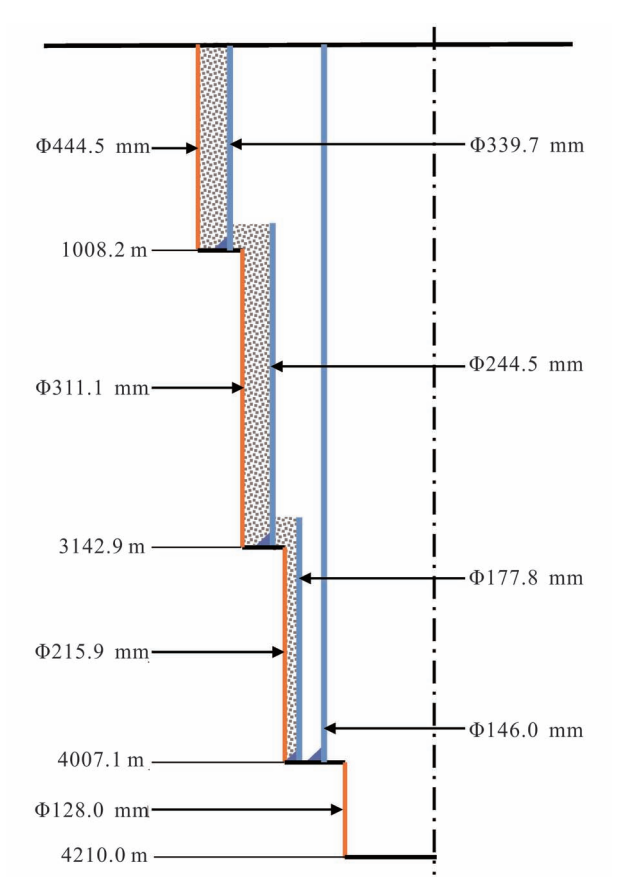


图 5 钻孔结构
Fig. 5 Drill hole structure

耐 150℃ 高温纳米复合水泥堵漏浆液,构建了一套满足 150℃ 高温环境的“广谱型”双浆堵漏技术。研发的堵漏技术成果在广西铀矿勘查孔、川藏铁路康定隧道勘察孔等 4 个钻孔中应用并取得了良好的堵漏效果(熊正强等,2019,2020)。

7 示范应用

依据本项目研发的大深度智能地质钻探技术与

装备,进行了 10 个矿区、20 余个钻孔应用试验,集成开展了 5000 m 地质岩芯钻探试验示范工程,完成试验示范钻探工作量 5000 余米,最大应用孔深 4017.50 m,创造了 P 规格绳索取芯钻进应用深度、下入 φ146 mm 地质套管深度两项亚洲纪录,取得了良好的技术效果和社会经济效益。5000 m 地质岩芯钻探技术装备在示范工程中的集成试验及应用情况如下。

(1)小口径绳索取芯钻进工况构建。为检验 5000 m 地质岩芯钻探技术装备满足地质岩芯钻探绳索取芯工艺要求的能力,在原 215.9 mm 口径的基础上,下入了 φ146×6.35 mm 规格套管 4007.01 m,为小口径绳索取芯钻进构建一个新的钻孔结构(图 5),为后续试验奠定了工况基础,并间接检验了 5000 m 钻机及孔口自动化装备完成起下钻、上卸扣等工序的能力。

(2)钻进试验。应用上述钻探技术与装备开展了取芯钻进 3 回次、全面钻进 1 回次及磨鞋钻进 1 回次,相关应用情况见表 4。

首先,取芯钻进 0.72 m 后,孔深 4007.73 m,钻速降低,提出钻具后发现钻头已磨至钻头刚体,推测原孔孔底有掉块或者其他异物,导致钻头胎体剥落,于是采用磨鞋带捞杯进行磨削打捞。然后,磨鞋钻进 1.17 m 后,提钻,捞出部分钻头掉落 的金刚石胎体、套管附件等。

为保证孔底干净和为后续取芯钻进创造正常孔底工况,又采用全面钻头进行了修孔底,进尺 0.72 m。

最后,进行了绳索取芯钻具取芯钻进与绳索取芯液动锤二合一钻具取芯钻进,前者进尺 5.05 m、取芯长度 4.87 m,后者进尺 2.83 m、取芯长度 2.78 m,获取岩芯如图 6 所示。



图 6 获取的岩芯

Fig. 6 Obtained core



图 7 5000 m 钻探技术装备集成应用示范现场

Fig. 7 Demonstration site of integrated application of
5000 m drilling technology and equipment

累计取芯钻进 7.88 m, 获取岩芯 7.65 m, 岩芯采取率 97.08%。

(3)应用成效。通过集成 5000 m 钻探技术装备,开展一体化集成联调联试(图 7),岩芯采取率达到 97.08%,并创造了 P 口径绳索取芯/“绳索取芯+液动锤”钻进应用深度、下入 $\phi 146$ mm 地质套管深度两项亚洲纪录,初步检验了以绳索取芯工艺为主体的地质特深孔钻探技术体系的可行性,为满足 5000 m 资源勘查需求和深部探测工程战略实施等提供了有效技术支撑。

8 结论

(1)针对我国现行地质岩芯钻探规程(DZ/T

0227-2010)只适用 3000 m 以浅钻孔施工,本项目研发了适应 5000 m 钻深需求的地质岩芯钻探装备、机具和钻探工艺技术,解决了行业关键共性问题,形成了 5000 m 地质岩芯钻探技术体系。

(2)研发的适用于小直径管柱操作的大长径比柔性管柱传送、外平薄壁钻杆柔顺控制拧卸等全流程精细控制技术,实现了绳索取芯钻进的孔口作业全流程自动化,形成了轻量化钻机孔口管柱柔顺控制技术。

(3)研发了多源信息导入、多方法融合、决策与安全控制为一体的智能控制系统,解决了复杂地层孔内工况判别、钻进参数优化与轨迹优化控制等问题,形成了多源信息融合的地面与孔底一体化智能钻探控制技术。

(4)通过开展钻具—泥浆流固耦合分析、结构优化设计、关键部件表面强化等技术研究,揭示了管柱—孔壁—冲洗液循环之间的耦合约束作用机理,厘清特深孔绳索取芯钻具内管到位及岩芯进入内管的关键问题,突破小口径、大水眼、薄壁、柔性钻杆设计和小口径动力输出弱等难题,形成了大深度绳索取芯系列钻杆钻具及工艺技术。

(5)研制出高性能地质岩芯钻探环保型冲洗液体系、可控凝胶技术和生物破胶的废浆处理技术,形成满足深部地质绿色勘查及无害化处理工艺技术,解决了大深度小环空地质钻探复杂地层孔壁失稳、取芯率低、钻孔漏失及废浆处理成本高等难题,形成了绿色环保型冲洗液体系与护壁堵漏技术。

(6)通过示范验证工程,创造了 P 口径绳索取芯钻进应用深度 4017.50 m、下入 $\phi 146$ mm 地质套

管深度 4007.01 m 两项亚洲纪录,岩芯采取率达到 97.08%,初步检验了以绳索取芯工艺为主体的地质特深孔钻探技术体系的可行性,为满足 5000 m 资源勘查需求和深部探测工程战略实施等提供了有效技术支持。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柴麟, 张凯, 刘宝林, 薛启龙, 王璐, 王晋. 2020. 自动垂直钻井工具分类及发展现状. 石油机械, 48(1):1~11.

陈西, 沈立娜, 杨甘生, 阮海龙, 陈容清, 孙祺斌. 2020. 陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 101~105.

丁立钦, 王志乔, 凌雪, 刘宝林. 2020. 深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 122~128.

冯颖亮, 周琴, 秦坤, 汪伟. 2018. 高温磨粒条件下氟橡胶圈摩擦磨损机理研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 45(10): 190~194.

付帆, 陶士先, 李晓东. 2020. 绿色勘查高温环保冲洗液研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 129~133.

高鹏举, 董耀, 刘凡柏, 李文秀, 任启伟, 伍晓龙, 汤小仁, 赵远, 王晓豪, 陈剑铭. 2020. 5000 米地质岩心钻机主绞车设计. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 40~45.

李鑫森, 李宽, 孙建华, 梁健, 尹浩. 2020. 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. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 15~23+39.

李颖杰, 王瑜, 周琴, 王志乔, 张凯, 宫晋武. 2019. 4145H 钻具钢的激光淬火工艺. 金属热处理, 44(8): 169~175.

梁晨帆, 王瑜, 彭志坚, 王志乔, 张凯, 李云勇. 2020. 全金属动力钻具马达部件制造材料调研分析. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 94~100.

梁健, 尹浩, 孙建华, 王志乔, 蔡纪雄, 李鑫森. 2019. 特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(8): 36~46.

刘璐, 王瑜, 王镇全, 路家兴, 张凯, 刘宝林. 2020. 全金属螺杆钻具研究现状与关键技术. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 24~30.

路家兴, 王瑜, 李学飞, 刘彬, 王志乔, 张凯. 2019. 井下动力钻具微钻试验装置设计研究. 地质与勘探, 55(3): 833~839.

欧阳志强, 贺建波, 石卫民, 李明星. 2020. 5000 米智能地质钻探配套泥浆泵的方案设计. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 53~57.

任启伟, 刘凡柏, 高鹏举, 赵远, 高明帅. 2019. 基于 PLC 的绳索取心绞车智能控制系统研究. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 367~377.

任启伟, 刘凡柏, 高鹏举, 李文秀, 伍晓龙, 赵远. 2020. 5000 米绳索取心绞车设计. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 46~52+57.

沈怀浦, 何磊, 黄洪波, 宋江龙, 周政, 臧臣坤, 孙军盈. 2020. 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. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 31~39.

孙祺斌, 沈立娜, 杨甘生, 田国亮, 阮海龙, 陈西. 2020. 特高多层胎体孕镶金刚石钻头设计与数值模拟. 煤田地质与勘探, 48

(3): 225~230.

刘海霞, 陈磊, 李春, 刘海龙, 沈立娜, 陈云龙. 2019. 新疆乌苏煤矿区泥岩地层用金刚石钻头的应用. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 466~471.

熊正强, 陶士先, 李艳宁. 2019. 堵漏用交联型聚合物凝胶研究进展. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集: 253~258.

熊正强, 陶士先, 刘俊辉, 李晓东, 薛倩冰. 2020. 延迟交联凝胶研制及其在广西某铀矿堵漏应用. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 140~144.

薛倩冰, 张金昌. 2020. 智能化自动化钻探技术与装备发展概述. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 9~14.

叶继超, 沈立娜, 阮海龙, 吴海霞, 李春. 2019. 金刚石钻头胎体添加稀土氧化钇的方法及影响研究. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 472~477.

尹浩, 梁健, 孙建华. 2019. 特深钻探钻柱组合优化设计研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(4): 56~62.

尹浩, 梁健, 孙建华, 彭莉, 郭宝科, 李鑫森, 蔡纪雄, 刘秀美. 2020. 地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 58~64.

张金昌, 刘凡柏, 黄洪波, 梁健, 王瑜, 吴敏, 陶士先. 2020. 5000 米智能地质钻探技术与装备研发. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 1~8.

张龙, 张凯, 周琴, 李国民, 刘宝林. 2019. 机械式自动垂钻工具粘滑振动抑制方法研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(11): 43~49.

张统得, 蒋炳, 严君凤. 2020a. 地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 134~139.

张统得, 蒋炳, 樊腊生, 房勇. 2020b. 探采结合水井无固相环保冲洗液的研究与应用. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(6): 1~7.

张翔, 周琴, 张蔚, 张凯. 2020. 小口径涡轮钻具减速器非对称齿轮弯曲强度分析. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 80~86.

周永宽, 康嘉杰, 岳文, 付志强, 朱丽娜, 余丁顺, 王成彪. 2019. HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀磨损行为研究现状. 金属热处理, 44(7): 211~217.

Chai Lin, Zhang Kai, Liu Baolin, Xue Qilong, Wang Lu, Wang Jin. 2020&. Classification and development status of automatic vertical drilling tools. China Petroleum Machinery, 48(1): 1~11.

Chen Xi, Shen Lina, Yang Gansheng, Ruan Hailong, Chen Rongqing, Sun Qibin. 2020&. Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits. Drilling Engineering, 47(4): 101~105.

Ding Liqin, Wang Zhiqiao, Ling Xue, Liu Baolin. 2020&. Deep geodrilling borehole stability analysis in anisotropic formations. Drilling Engineering, 47(4): 122~128.

Ding Liqin, Wang Zhiqiao, Liu Baolin, Lv Jianguo, Wang Yu. 2019. Borehole stability analysis: A new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 69(C): 102932.

Ding Liqin, Wang Zhiqiao, Wang Yu, Liu Baolin. 2020. Thermo—poro—elastic analysis: The effects of anisotropic thermal and hydraulic conductivity on borehole stability in bedding formations. Journal of Petroleum Science and Engineering, 190(C): 107051.

Feng Yingliang, Zhou Qin, Qin Kun, Wang wei. 2018&. Study on friction and wear mechanism of fluoro rubber ring under high temperature abrasive condition. Drilling Engineering, 45(10): 190~194.

- Fu Fan, Tao Shixian, Li Xiaodong. 2020&. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration. *Drilling Engineering*, 47(4): 129~133.
- Gao Pengju, Dong Yao, Liu Fanbai, Li Wenxiu, Ren Qiwei, Wu Xiaolong, Tang Xiaoren, Zhao Yuan, Wang Xiaosai, Chen Jianming. 2020&. Design of the drawwork of 5000m geological core drilling rig. *Drilling Engineering*, 47(4): 40~45.
- Li Xinmiao, Li Kuan, Sun Jianhua, Liang Jian, Yin Hao. 2020&. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems. *Drilling Engineering*, 47(4): 15~23, 39.
- Li Yingjie, Wang Yu, Zhou Qin, Wang Zhiqiao, Zhang Kai, Gong Jinwu. 2019&. Laser quenching process of 4145H drilling tool steel. *Heat Treatment of Metals*, 44(8): 169~175.
- Liang Chenfan, Wang Yu, Peng Zhijian, Wang Zhiqiao, Zhang Kai, Li Yunyong. 2020&. Investigation and analysis of the manufacturing process for metal-to-metal downhole drilling motor parts. *Drilling Engineering*, 47(4): 94~100.
- Liang Jian, Yin Hao, Sun Jianhua, Wang Zhiqiao, Cai Jixiong, Li Xinmiao. 2019&. Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling. *Drilling Engineering*, 46(8): 36~46.
- Liu Lu, Wang Yu, Wang Zhenquan, Lu Jiaying, Zhang Kai, Liu Baolin. 2020&. Research status and key technology of metal-to-metal screw PDM drills. *Drilling Engineering*, 47(4): 24~30.
- Lu Jiaying, Wang Yu, Li Xuefei, Liu Bin, Wang Zhiqiao, Zhang Kai. 2019&. Design and implementation of micro-drilling test device for downhole power drilling tool. *Geology and Exploration*, 55(3): 833~839.
- Ouyang Zhiqiang, He Jianbo, Shi Weimin, Li Mingxing. 2020&. Conceptual design of the mud pump for 5000m intelligent geological drilling. *Drilling Engineering*, 47(4): 53~57.
- Ren Qiwei, Liu Fanbai, Gao Pengju, Li Wenxiu, Wu Xiaolong, Zhao Yuan. 2020&. Design of 5000m wireline coring winch. *Drilling Engineering*, 47(4): 46~52, 57.
- Ren Qiwei, Liu Fanbai, Gao Pengju, Zhao Yuan, Gao Mingshuai. 2019&. PLC based intelligent wire line core drilling winch control system. *Proceedings of the 20th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Exchange Annual Meeting*: 367~377.
- Shen Huaipu, He Lei, Huang Hongbo, Zhu Jianglong, Zhou Zhen, Zang Chenkun, Sun Junying. 2020&. Dual-power electric top drive drilling system design for large-depth geological drilling and hydrocarbon & geothermal drilling. *Drilling Engineering*, 47(4): 31~39.
- Sun Qibin, Shen Lina, Yang Gansheng, Tian Guoliang, Ruan Hailong, Chenxi. 2020&. Design and numerical simulation of multi-layer bit with extra-high matrix. *Coal Geology*, 48(3): 225~230.
- Wang Sheng, Wu Liyu, Jiang Gui, Jian Liming, Zhang Tongde, Chen Shaohua, Chen Liyi. 2020&. A high temperature composite cement for geothermal application. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107909.
- Wang Yu, Qian Chengyuan, Kong Lingrong, Zhou Qin, Gong Jinwu. 2020. Design optimization for the thin-walled joint thread of a coring tool used for deep boreholes. *Applied Sciences*, 10: 2669.
- Wu Haixia, Chen Lei, Li Chun, Liu Hailong, Shen Lina, Chen Yunlong. 2019. Research and application of diamond bits for mudstone in Wusu coal mine, Xinjiang. *Proceedings of the 20th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Exchange Annual Meeting*: 466~471.
- Wu Xiao, Lai Xuzhi, Zhu Jianglong, Huang Hongbo, Chen Luefeng, Du Sheng, Wu Min. 2019&. Intelligent Control System Design for Electric-drive Rig in Complex Geological Drilling Process. *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, (5): 756~759.
- Xiong Zhengqiang, Tao Shixian, Li Yanning. 2019&. Progress in Crosslinked polymeric gel research for lost circulation treatment. *Proceedings of the 20th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Exchange Annual Meeting*: 253~258.
- Xiong Zhengqiang, Tao Shixian, Liu Junhui, Li Xiaodong, Xue Qianbing. 2020&. Development and application of delayed crosslinked gel for lost circulation treatment. *Drilling Engineering*, 47(4): 140~144.
- Xue Qianbing, Zhang Jinchang. 2020&. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment. *Drilling Engineering*, 47(4): 9~14.
- Yang Aoxue, Zhang Zheng, Fan Haipeng, Chen Luefeng, Wu Min. 2019. Design of networked condition monitoring system for drilling process. *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, (5): 760~763.
- Ye Jichao, Shen Lina, Ruan Hailong, Wu Haixia, Li Chun. 2019&. Method and effect of adding Yttrium Oxide to diamond bit matrix. *Proceedings of the 20th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Exchange Annual Meeting*: 472~477.
- Yin Hao, Liang Jian, Sun Jianhua, Peng Li, Guo Baoke, Li Xinmiao, Cai Jixiong, Liu Xiumei. 2020&. Research on mechanical properties of wireline drill pipes for geological ultra-deep holes. *Drilling Engineering*, 47(4): 58~64.
- Yin Hao, Liang Jian, Sun Jianhua. 2019&. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling. *Drilling Engineering*, 46(4): 56~62.
- Zhang Jinchang, Liu Fanbai, Huang Hongbo, Liang Jian, Wang Yu, Wu Min, Tao Shixian. 2020&. Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment. *Drilling Engineering*, 47(4): 1~8.
- Zhang Long, Zhang Kai, Zhou Qin, Li Guomin, Liu Baolin. 2019&. Stick-slip vibration suppression method for mechanical automatic vertical drilling tools. *Drilling Engineering*, 46(11): 43~49.
- Zhang Tongde, Jiang Bing, Yan Junfeng. 2020a&. Research on pollution characteristics and destabilization technology of waste drilling fluid in geological drilling. *Drilling Engineering*, 47(4): 134~139.
- Zhang Tongde, Jiang Bing, Fan Lasheng, Fang Yong. 2020b&. Research and application of solid free environment friendly drilling fluid for exploration and production well drilling. *Drilling Engineering*, 47(6): 1~7.
- Zhang Xiang, Zhou Qin, Zhang Wei, Zhang Kai. 2020&. Bending strength analysis for the asymmetrical gear of the small diameter turbodrill reducer. *Drilling Engineering*, 47(4): 80~86.
- Zhou Yongkuan, Kang Jiajie, Yue Wen, Fu Zhiqiang, Zhu Lina, She Dingshun, Wang Chengbiao. 2019&. Research status of corrosion and wear behavior of HVOF sprayed WC based cermet coatings. *Heat Treatment of Metals*, 44(7): 211~217.

Development and application of intelligent and automatic drilling technology and equipment

ZHANG Jinchang¹⁾, YIN Hao¹⁾, LIU Fanbai¹⁾, HUANG Hongbo²⁾, LIANG Jian¹⁾,
WANG Yu³⁾, WU Min⁴⁾, TAO Shixian⁵⁾

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

Abstract: In order to solve the problem of criteria and basis lack for 5000 m geological core drilling and improve the automation and intelligence level of drilling equipment, the research of 5000 m intelligent geological drilling technology and equipment has been started. A number of innovative achievements have been achieved through the development and test of drilling equipment, drilling tools and drilling technology. Through the optimization research of ultra-deep hole drilling diameter and pipe string specification, drill pipe specification design and equipment performance parameter selection, 5000 m geological core drilling technical specification system has been formed. Based on the development of key equipment such as 5000 m deep hole geological core drilling rig and wellhead automatic operation device, the whole process automation of wellhead operation of wire-line core drilling is realized, and the compliance control technology of pipe string with lightweight drilling rig is formed. Based on the study of technical problems such as discrimination of working conditions in the hole, optimization of drilling parameters and trajectory optimization control in complex formation, an intelligent control technology for the integrated drilling process from surface to hole bottom based on multi-source information fusion is formed. Based on the development of high-performance thin-walled wire-line core drill pipe and a series of high-efficiency drill tools with small-diameter, a series of drill pipe and drill tools technology for deep wire-line coring has been formed. The research and development of environment-friendly flushing fluid with high temperature resistance, biological gel breaking waste slurry treatment technology and "broad-spectrum" double slurry plugging technology have been carried out, with which a green and environment-friendly flushing fluid system and wall protection plugging technology are formed.

Keywords: ultra-deep hole; geological core drilling; wire-line coring; intelligent and automatic drilling technology and drilling equipment

Acknowledgements: This work was supported by the National Key R & D Program of China (No. 2018YFC0603400)

First author: ZHANG Jinchang, male, born in 1959, professor of engineering, major in research and development of drilling technology and equipment; Email: zjinchang@mail. cgs. gov. cn

Corresponding author: LIANG Jian, male, born in 1980, professor level senior engineer, major in scientific research and management of deep drilling engineering; Email: raul9942718@163. com

Manuscript received on: 2022-01-19; **Accepted on:** 2022-03-18; **Network published on:** 2022-04-20
Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 04. 021 **Edited by:** LIU Zhiqiang

