

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

李鑫淼, 李 宽, 孙建华, 梁 健, 尹 浩

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:随着钻孔深度的不断增加,对绳索取心钻具的使用性能提出了更高要求。在分析了国内外绳索取心钻具研究发现状、结构设计特点及特深孔应用情况的基础上,整理了特深孔钻进绳索取心钻具使用存在的技术问题,定位机构打捞可靠性、到位报信提示可靠性、堵心报信机构工作稳定性、单动机构使用寿命均有待提高,并相应地分析了原因,为 5000 m 特深孔绳索取心钻具优化设计打好基础。

关键词:深部钻探;特深孔;绳索取心钻具;绳索取心钻进

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0015-09

Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems

LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, LIANG Jian, YIN Hao

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Increase in drilling depth poses higher requirements on the performance of wireline coring tool. With analysis of the research and development status, structural design feature and ultra-deep hole application of the wireline coring tool at home and abroad, this paper summarizes technical problems with the wireline coring tool for ultra-deep hole drilling, such as fishing reliability of the latching mechanism, signal reliability of the landing mechanism, working stability of the core jamming indicating mechanism, service life of the swivel mechanism. The causes of the above problems are also examined. All these lay a good foundation for the optimum design of the wireline coring tool used for 5000m ultra-deep holes.

Key words: deep drilling; ultra-deep hole; wireline coring tool; wireline core drilling

0 引言

随着我国经济的快速发展,资源、环境等问题变得越来越突出,科学钻探及矿产勘查等工作,都在不断地向深部进军,以解决上述矛盾^[1-2]。绳索取心钻进技术最初应用于石油钻井,而后由美国 LONGYEAR 公司将其引入地质岩心钻探^[3]。我国从 1973 年开始进行绳索取心钻进技术的研究与推广应用^[4]。绳索取心钻进技术因具有钻速高、纯钻进时间利用率高、岩心采取质量好、劳动强度低、钻探成本低等诸多优势^[5-6],在深孔钻探中得到了

广泛地应用^[7-8],国内地质岩心钻探钻孔深度目前已经超过 4000 m^[9],国外岩心钻孔深度已经超过 5000 m^[10]。伴随我国深部找矿政策的实施,2018 年,我所完成了国家重点研发计划“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”项目的立项工作,进一步开展特深孔绳索取心钻进技术研究,其中一个重要环节就是开展特深孔绳索取心钻具的研制。钻具设计应在深入分析国内外绳索取心钻具研发及应用现状的基础上展开,从钻具使用的安全性、可靠性、高效性等方面入手,同时结合绳索取心钻进工艺

收稿日期:2020-02-17; 修回日期:2020-03-24 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.003

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”课题四“小口径高效系列钻具研究”(编号:2018YFC0603404);国土资源部深部地质钻探技术重点实验室开放基金资助(编号:KF201906)

作者简介:李鑫淼,男,汉族,1985 年生,机械工程专业,硕士,从事钻探工程科研工作,河北省廊坊市金光道 77 号,lixinmiaosmile@163.com。

引用格式:李鑫淼,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.

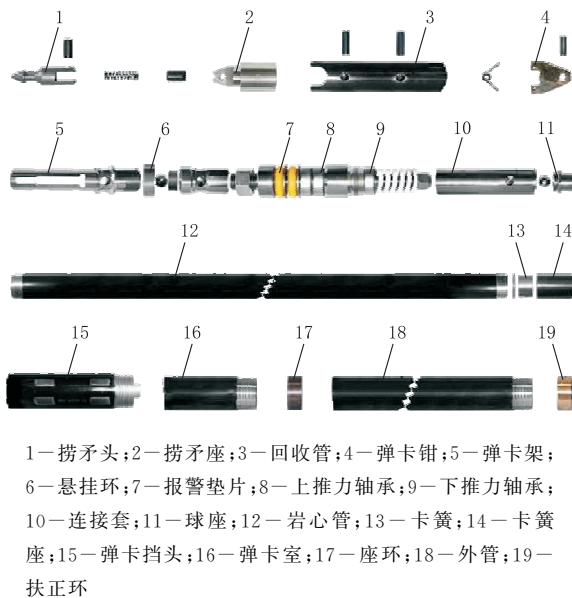
LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):15-23,39.

的特点及复杂地层取心难点,完成钻具结构的优化设计。

1 国内外绳索取心钻具研究现状

1.1 钻具组成及技术性能

国内外研制了多种类型的绳索取心钻具,尽管设计原理有所不同,但实现的功能基本一致,钻具基本组成如图1所示,包括外管总成及内管总成。外管总成包括弹卡挡头、弹卡室、座环、外管、扶正环,弹卡挡头与钻杆连接,钻压经外管传递至钻头;内管总成包括打捞机构、定位机构、悬挂机构、到位报信机构、堵心报信机构、调节机构、单动机构、断心机构等^[11]。设计钻具时,首先要保证内管总成能够通过钻杆内部下行至预定位置,钻进过程中,定位机构及悬挂机构限定内管总成轴向位置。内管总成投送到位后,到位报信机构能够及时向地表发送信号,以准确提示操作人员,开始扫孔钻进;利用调节机构控制内管总成长度,使卡簧座与钻头内台阶之间保持最佳轴向距离;钻进过程中发生岩心堵塞时,堵心报信机构应及时向地表发送信号,提示操作人员停止钻进,并打捞内管,防止岩心过度磨蚀;单动机构应具有良好的岩心管单动性能,钻进时有效减轻岩心管与岩心之间的相对转动,减轻岩心磨损;断心机构卡取岩心时,岩心管应能下移一定距离,直至卡簧座与钻头内台阶接触,使断心拉力经卡簧、卡簧座及取心



1—捞矛头;2—捞矛座;3—回收管;4—弹卡钳;5—弹卡架;6—悬挂环;7—报警垫片;8—上推力轴承;9—下推力轴承;10—连接套;11—球座;12—岩心管;13—卡簧;14—卡簧座;15—弹卡挡头;16—弹卡室;17—座环;18—外管;19—扶正环

图1 绳索取心钻具基本组成

Fig.1 Basic composition of the wireline coring tool

钻头传递至外管,防止薄壁岩心管受损;为保证岩心顺利进入内管,外管总成对内管总成应具有良好的扶正作用,保证良好的同轴度;内管总成与钻杆及外管之间应具有合理的冲洗液过流空间,以提高内管总成投送速度,减少冲洗液循环时的压力损失,减轻打捞内管时的抽吸作用^[12]。

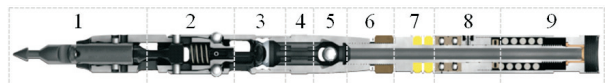
1.2 国外绳索取心钻具研究现状

国外开展绳索取心钻具研发的公司主要包括美国 BOART LONGYEAR 公司^[13]、瑞典 SANDVIK 公司^[14]、美国 ADT 公司^[15]、法国 DATC 公司^[16]、土耳其 BARKOM 公司^[17]、英国 JKSBOYLES 公司^[18]、加拿大 FORDIA 公司^[19]等,产品在结构设计和原理上基本一致,其中 BOART LONGYEAR 公司研发的相关产品最具代表性。BOART LONGYEAR 公司产品执行 DCDMA (Diamond Core Drilling Manufacturers Association) 标准,包括 A、B、N、H 及 P 五种规格,适用于垂直钻孔的绳索取心钻具包括弹卡式 (LINK LATCH™) 及球卡式 (ROLLER LATCH™) 两种,结构设计如图2及图3所示。下面以 BOART LONGYEAR 公司绳索取心钻具为例,对钻具结构设计特点进行分析。



图2 弹卡式绳索取心钻具

Fig.2 Wireline coring tool with the link latch



1—打捞机构;2—球卡定位机构;3—到位报信机构;4—悬挂机构;5—单向阀;6—长度调节机构;7—堵心报信机构;8—单动机构;9—断心调节机构

图3 球卡式绳索取心钻具

Fig.3 Wireline coring tool with the ball latch

1.2.1 定位机构设计

弹卡定位机构 (LINK LATCH™) 设计采用了曲柄连杆滑块原理,回收管通过弹性销及限位块,带动弹卡钳回收,另外一种弹卡定位机构设计如图1所示,回收管通过接触弹卡钳完成回收,这两种定位机构的设计原理被国外各大公司广泛采用。球卡式定位机构 (ROLLER LATCH™) 设计充分利用了钢球的滚动特性,图3中左侧钢球起定位作用,其所处位置即为定位状态,打捞内管时,钢球内部限位解

除,释放钢球回退空间,在外力及自重的作用下,向内滚动回收。

1.2.2 到位报信机构设计

到位报信机构设计主要有 3 种方式。

第一种是阀芯配合阻尼衬套(如图 4 所示),阻尼衬套一般为尼龙材质,两者之间采用过盈配合产生提示压力,上提钻具时能够实现阀芯的自动复位,内管总成投放时,冲洗液流向如图 4 中左侧视图所示,到位提示完毕后,冲洗液流向如图 4 中右侧视图所示,适用于浅孔。

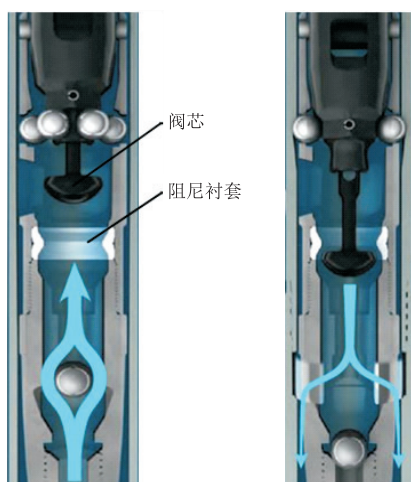


图 4 阀芯及阻尼衬套式到位报信机构

Fig.4 Landing indicator with the valve piston and nylon bushing

第二种是钢球配合阻尼衬套(如图 5 所示),两者之间采用过盈配合,投送内管总成时,钢球处于阻尼衬套上部,钻具内部冲洗液通道打开,减小内管总成投送阻力;内管总成到位后,钢球受压通过衬套,产生提示压力,每次投送内管总成之前,需人工拆卸钻具,将钢球复位,适用于浅孔及中深孔。

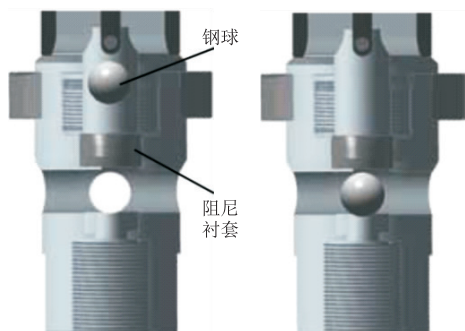


图 5 钢球及阻尼衬套式到位报信机构

Fig.5 Landing indicator with the valve ball and nylon bushing

第三种是钢球、弹簧及钢衬套的组合方式(如图 6 所示),钢球与钢衬套之间采用间隙配合,通过压缩

弹簧产生提示压力,弹簧设计有轻型、中型及重型,对提示压力的大小进行调整,以满足深孔使用需求。

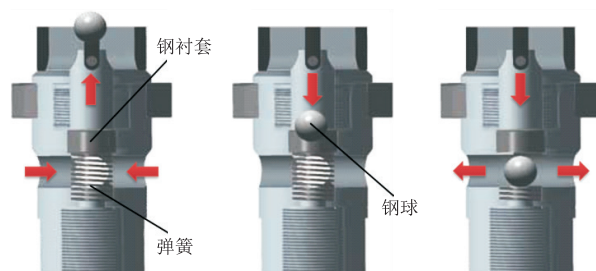


图 6 钢球、弹簧及钢衬套式到位报信机构

Fig.6 Landing indicator with the valve ball, spring and steel bushing

1.2.3 堵心报信机构设计

堵心报信机构设计如图 1 及图 3 中所示,采用了切断冲洗液过流通道的设计原理,主要包括报警垫片、挤压垫片及心轴,零件交错地嵌套在心轴上,位于单动机构上端,堵心时岩心管受力挤压报警垫片,使其外径胀大,封堵内管总成与外管总成之间的冲洗液过流通道(环状间隙),通过憋压完成提示,上述几家国外公司目前均采用了此种设计原理。

1.2.4 单动机构设计

单动衬套上部布置了两套推力球轴承(部分国外公司采用了单套推力轴承),承担岩心堵塞时的轴向压力,下部布置了一套推力球轴承,按顺序嵌套在心轴上,心轴采用了中空式设计,以减小内管总成投送阻力,下端轴承由弹簧压紧,单动机构设计如图 3 所示。单动衬套下部连接岩心管,上、下推力轴承共同作用,减轻单动衬套与心轴之间的回转阻力,衬套与心轴径向采用间隙配合,配合表面精度较高,使用时加注润滑脂,以有效降低回转阻力,进而减轻岩心管对进入其内部岩心的磨损及扰动,保证岩心采取质量,同时预防岩心碎裂而出现堵塞,有助于提高回次进尺长度。

1.2.5 断心机构设计

断心机构主要包括卡簧座、卡簧、挡圈,挡圈对卡簧进行轴向限位,BOART LONGYEAR 公司针对不同地层特点,分别设计了开槽式、凹槽式及螺旋式卡簧(如图 7 所示)。开槽式卡簧适用于完整地层,改善卡簧与岩心之间的贴合度,增加有效抓取面积;凹槽式卡簧具有良好的柔韧性,适用于破碎地层易出现的不规则形状岩心;螺旋式卡簧增加了内表面摩擦花纹深度,可提供更大的断心力,适用于极硬地层;同时针对松散地层设计了拦簧,以有效防止岩心脱落。

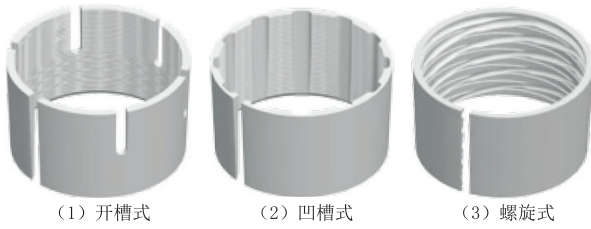


图7 卡簧结构设计

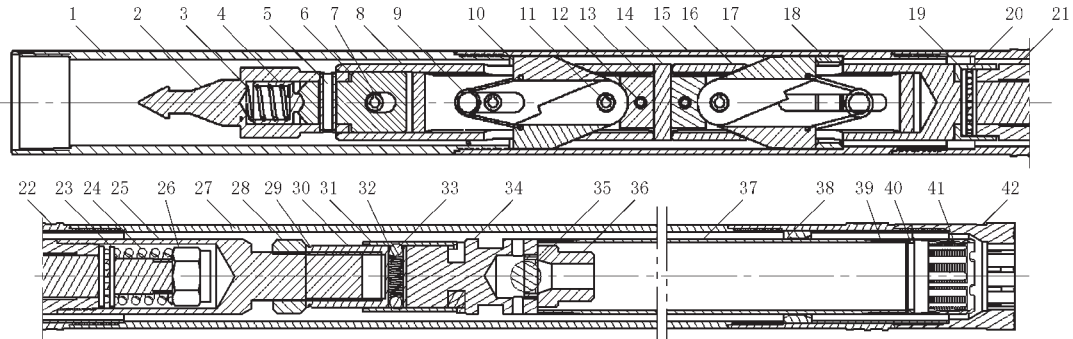
Fig.7 Structural design of core lifters

1.3 国内绳索取心钻具研究现状

目前,国内几家主要的绳索取心钻具生产厂商包括中地装(无锡)钻探工具有限公司^[20]、金石钻探(唐山)股份有限公司^[21]、苏州市新地探矿工具有限公司^[22]等,一些科研院所和地勘单位也在开展绳索取心钻具的相关研究,大部分钻具在总体结构上采

用了与 BOART LONGYEAR 公司弹卡式绳索取心钻具类似的设计原理,同时也积极地进行钻具结构的优化与创新。

中地装(无锡)钻探工具有限公司研制了 S75-SF 双弹卡式绳索取心钻具^[23],如图 8 所示,采用了双弹卡设计,取消了下部悬挂环,内管总成上下均由弹卡机构进行轴向限位,增大了冲洗液过流环状间隙面积,投放速度更快。岩心管采用了插接式设计,操作便捷,易损件少,成本相对较低。由于取消了到位报信机构及堵心报信机构,只能通过孔口听撞击声音的方式来原因判断内管总成是否到位,因此,该钻具仅适用于浅孔,岩心堵塞只能通过进尺速度的变化做出判断,复杂地层钻进时,影响岩心采取质量。



1—弹卡挡头;2—捞矛头;3—捞矛头弹簧;4—捞矛头定位销;5、7、11、12—弹性圆柱销;6—捞矛座;8—回收管;9—张簧;10—上弹卡钳;13—弹卡座;14—弹卡架;15—弹卡室;16—下弹卡管;17—下弹卡钳;18—座环;19—轴承罩;20、23—轴承;21—轴承座;22—扩孔器;24、32—弹簧;25—弹簧套;26—锁紧螺母;27—外管;28—调节螺母;29—锁圈;30—调节接头;31—限位套筒;33、35—钢球;34—内管上接头;36—压盖;37—内管;38—扶正环;39—卡簧座;40—挡圈;41—卡簧;42—钻头

图8 S75-SF 双弹卡式绳索取心钻具

Fig.8 S75-SF double latch wireline coring tool

一种新型球卡式绳索取心钻具^[24]如图 9 所示,定位机构采用了球卡结构,与传统弹卡定位机构相

比,球卡定位机构更灵活,内管稳定性好,投放阻力更小,由于取消了到位报信机构,仅适用于浅孔。

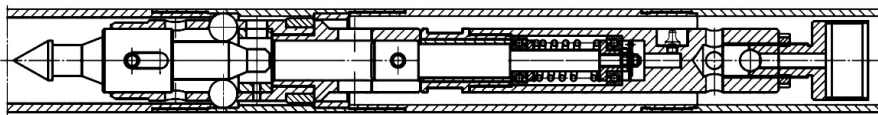


图9 新型球卡式绳索取心钻具

Fig.9 New type ball latch wireline coring tool

中国地质科学院勘探技术研究所对绳索取心钻具定位机构进行了优化设计^[25],研制了齿轮齿条定位机构(如图 10 所示)及双铰链定位机构(如图 11 所示)。齿轮齿条定位机构将打捞时的轴向运动转换为弹卡钳的径向收缩,回收可靠性高,弹卡加厚设计,受力性能好。双铰链定位机构实现了弹卡钳回收时,铰接点向内移动空间的有效释放,在回收管作

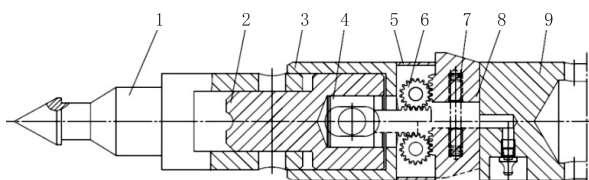
用下,两侧支撑板向内回转,带动弹卡钳向内回收,提高了内管总成定位及打捞的可靠性。

2 绳索取心钻具特深孔应用概况

2.1 国外应用情况

2.1.1 南非金矿深部钻探

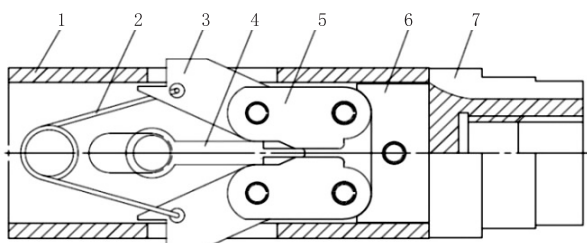
1988年,在南非金矿勘探中,加拿大 Heath &



1—捞矛头;2—捞矛座;3—齿轮座;4—主动齿条;5—保护罩;6—齿轮;7—弹簧;8—弹卡钳;9—弹卡架

图 10 齿轮齿条定位机构

Fig.10 Latching mechanism with the rack and pinion



1—回收管;2—张簧;3—弹卡钳;4—顶针;5—支撑板;6—支撑座;7—弹卡架

图 11 双铰链定位机构

Fig.11 Latching mechanism with the double articulation chain

Sherwood 钻探公司与 Universal Drillers 公司合作,采用绳索取心钻进工艺,施工钻机型号为 HSS-150,利用 10 个月的时间,完成了一个金矿勘探特深孔,终孔深度 5422.70 m(17791 ft)^[10],岩心采取率接近 100%。采用复合式钻杆柱设计,上部为带钢接头的铝钻杆,钻杆外径 70 mm,杆体与接头之间用环氧树脂粘结,由于铝质杆体不适合在受压状态下工作,下部采用了钢质绳索钻杆,便于施加钻压,同时保证铝钻杆处于良好的受力状态,5182 m 的组合钻杆柱重约 40 t。在采用绳索取心钻进技术施工大于 4000 m 特深孔方面,从南非地区获得的实战经验更为丰富^[26]。首先,钻具内管总成应增加可靠的到位指示器,BES 公司及 Boart 公司联合研发了一种到位指示器,压力增加 2 MPa 后,冲洗液通道打开,同时安装惰性压力表,放慢泵压的突然变化,避免操作人员发生误判或漏判;其次,注重铝钻杆的研究,BES 公司研制了外径 76 mm 带钢接头的铝钻杆,安全系数为 2 时,使用深度能够达到 6000 m,类似的钻杆已经在南非深度 5520 m 的特深钻孔中成功应用;容绳量达到 5000 m 的绳索取心绞车,通常采用 $\varnothing 10$ mm 非旋转钢丝绳,实践证明,如果钢丝绳直径过小,更容易发生故障,影响经济性;应对钻孔“狗腿”度进行严格监测及控制,“狗腿”度过大会

迅速导致钻杆失效,使套管过早磨损。

2.1.2 联邦德国大陆深钻

联邦德国大陆深钻项目(KTB)总体目标是了解大陆间地壳结构、动力学及其演化,先后完成了先导孔及主孔的钻探施工。先导孔 1987 年 9 月 22 日开钻,1989 年 4 月 4 日终孔,孔深 4000.1 m,采用了石油转盘钻机及高速回转顶驱的组合钻探系统^[27]。480~3893 m 孔段采用了绳索取心钻进工艺进行连续取心,以及复合式钻杆柱设计,上部为 $\varnothing 139.7$ mm 绳索取心钻杆,下部为 $\varnothing 139.7$ mm 绳索取心钻铤,绳索取心钻具外管外径 140.5 mm,内径 110 mm,材料为 34CrMo4,调质处理,岩心管外径 106 mm,内径 97.5 mm,长度 6 m,钻头外径 152.4 mm。外管设置有 2 个黄铜材质的扶正器,单动机构采用了双向推力轴承,单动效果较好,同时具有良好的堵心报信功能,除钻具的基本功能外,还增加了温度及孔斜数据记录功能^[28]。绳索取心钻具在应用过程中做出了改进,提升了悬挂环与座环的密封性能,增加了扩孔器长度,以提高孔底钻具工作稳定性。在捞矛头处增加了阻流器,在高压作用下阻流器打开,完成内管总成的到位提示。绳索取心钻进平均回次进尺长度仅为 3.6 m,其在经济性方面的优势没有得到充分发挥。

2.1.3 夏威夷科学钻探

为开展 Mauna Kea 火山形成机制等相关科学问题研究,获取熔岩的岩石学、地球化学、地球年代学等相关信息,美国开展了夏威夷科学钻探项目(Hawaii Scientific Drilling Project),完成了主孔 HSDP2 及先导孔 HSDP1 钻探施工。主孔 HSDP2 采用了组合式取心钻进系统及绳索取心钻进工艺,全孔连续取心,绳索取心绞车可容纳 $\varnothing 12$ mm 钢丝绳 6096 m。采用了复合式钻杆柱,上部为高强度 $\varnothing 89$ mm 油管管柱,下部为 BOART LONGYEAR 公司常规绳索取心钻杆柱,终孔深度 3520 m^[29]。1999 年开展了第一阶段钻进,孔深钻至 3110 m,因地层破碎严重,钻进停止,采用重浆填充;2004—2007 年间,钻孔断断续续加深至 3520 m^[30]。钻进中遇到的主要问题是地层破碎严重,易堵心,回次进尺短,打捞内管时,岩心碎片落入钻杆柱中,易造成内管投送不到位,需开泵循环一段时间再投送内管总成^[31]。

2.2 国内应用情况

2.2.1 中国岩金第一深钻

岩金勘探科学钻孔 ZK96-5^[9] 设计孔深 4000 m, 终孔孔深 4006.17 m, 孔径 75 mm, 以绳索取心钻进工艺为主体, 使用的主要设备包括 HXY-9B 型钻机、BW300/16 及 BW250/6 型泥浆泵、A27-90 型钻塔、S3000 型取心绞车。该钻孔于 2010 年 9 月 18 日开钻, 2013 年 5 月 29 日终止钻进, 施工时间使用情况如表 1 所示。钻孔采用了联合钻杆施工方案, 2230~2672 m 孔段采用了复合式钻杆柱, 即上部 $\varnothing 89$ mm 绳索取心钻杆, 下部 $\varnothing 71$ mm 绳索取心钻杆, 两端墩粗内加厚^[32]; 3300~4006 m 孔段, 上部为 $\varnothing 60$ mm 高强度石油钻杆, 下部为 $\varnothing 71$ mm 绳索取心钻杆(使用长度 2800 m 左右), 采用了半绳索取心钻进工艺, 即提出上部 $\varnothing 60$ mm 钻杆后, 进行内管总成的打捞及投放, 孔底泵压 6~8 MPa, 最大 10 MPa。由于地层破碎, 岩心易堵塞, 从 3340 m 至终孔, 使用了 SYZX75 型液动锤, 有效保障了回次进尺^[33], 钻孔平均岩心采取率达到 99.8%, 月平均进尺 121.40 m, 钻孔最大顶角 4°。该钻孔的施工经验表明, 绳索取心钻进工艺在 4000 m 特深孔钻进中取得了良好的应用效果; 要高度重视钻孔结构设计, 以保证合理的环状间隙, 降低循环压力; 应从新型材料、螺纹形式、加工工艺等方面开展绳索取心钻杆的深入研究, 提升其综合力学性能^[34]; 着力研发可靠的绳索取心钻具到位报信机构, 同时提升内管总成下放速度, 以减少辅助时间的使用, 提高钻进效率。

表 1 施工时间分配

Table 1 Break-down of the drilling time

科目	使用时间/h	所占比例/%
纯钻进	4583	20
辅助钻进	7489	32
孔内事故停待	6439	28
设备维修	2796	12
其他	2100	8

2.2.2 华东庐枞盆地科学钻探

华东庐枞盆地科学钻探 LZSD-1 孔^[35] 是大陆科学钻探选址预研究项目中 6 个钻孔之一, 施工的目的是通过钻探揭示和验证与成矿有关的岩体、基底、盖层的空间分布, 为大陆万米钻探提供选址依据。LZSD-1 孔 2012 年 7 月 12 日开钻, 2013 年 5 月 20 日终孔, 孔深 3008.29 m, 终孔直径 77 mm, 平均岩心采取率达到 97% 以上, 终孔顶角 14.7°, 平均台月效率 300.63 m。三开(203.08~1500.27 m)采

用 $\varnothing 97$ mm 金刚石绳索取心钻头钻进, 四开(1500.27~3008.29 m)采用 $\varnothing 77$ mm 金刚石绳索取心钻头钻进。主要钻探设备包括: XY-8 型钻机、BW-320/12 型泥浆泵及 3000 m 绳索取心绞车。进入四开后, 采用了复合式钻杆柱, 上部为 $\varnothing 89$ mm 绳索取心钻杆, 下部为 $\varnothing 71$ mm 绳索取心钻杆。钻进参数为: 钻压 8~12 kN、泵量 80 L/min、转速 200 r/min 左右, 采用无固相冲洗液, 3000 m 孔深时, 泵压维持在 7~8 MPa。该钻孔的施工经验表明, 特深孔钻探为防止钻杆断裂, 钻压和转速不易过高, 可适当增加钻头外径, 进而增加钻具与孔壁之间的环状间隙, 以合理控制循环压力, 降低泥浆泵负荷。

3 绳索取心特深孔钻进问题与分析

特深孔钻进孔内温度逐渐升高, 孔底实际工况极其复杂, 加之复杂地层带来的影响, 对钻具的使用性能提出了更高的要求。首先, 要保证钻具在各个操作环节的使用可靠性, 保证孔内安全钻进; 其次, 合理控制内管总成投放、打捞、取心等操作环节辅助时间的使用, 保证取心钻进效率; 再次, 钻具对复杂地层的变化应具有良好的适应性, 保证岩心采取质量。基于上述原因, 需对绳索取心钻具使用存在的问题进行深入分析, 为特深孔绳索取心钻具的优化设计奠定基础。

3.1 内管总成方面

3.1.1 定位机构受力性能及打捞可靠性有待提高

3.1.1.1 弹卡定位机构

弹卡定位机构受力性能优于球卡定位机构, 但由于弹卡钳采用单点铰接方式, 且弹卡钳与弹卡挡头轴向接触面为平面, 堵心时导致内管总成打捞失败^[36], 解决的唯一办法就是将孔内钻杆、钻具提至地表处理, 大大降低了钻进效率^[37], 对于特深孔钻进, 消耗时间更长, 效率降低将更为突出, 钻探成本也随之增加。

3.1.1.2 球卡定位机构

球卡定位机构有限元分析结果如图 12 所示^[24], 易堵心地层钻进时, 定位钢球与外管之间的受力大, 弹卡挡头与弹卡室连接螺纹处受力严重, 易变形、胀裂, 增加了孔内事故发生概率; 定位钢球受挤压后易变形, 多次使用后影响钢球滚动及回退性能, 打捞可靠性降低。出现上述问题的主要原因在于, 钻具结构设计不满足复杂工况提出的使用要求,

复杂地层因素是不可改变的,只能对钻具结构进行合理设计,进一步提高钻具定位机构受力性能及打捞可靠性。

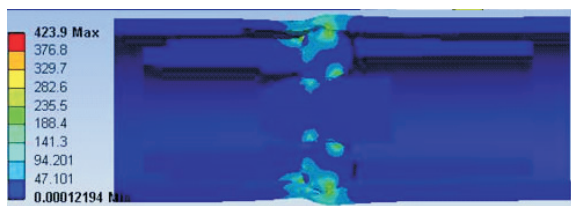


图 12 球卡定位机构有限元分析

Fig.12 Finite element analysis of the ball latch mechanism

3.1.2 到位报信提示可靠性有待提高

目前应用最为广泛的到位报信机构设计是钢球与阻尼衬套的组合形式,零件间过盈配合精度要求较高,不同的工作温度下,阻尼衬套弹性变形性能会发生波动。特深孔钻进面临的一个主要问题是孔底温度较高,高温对阻尼衬套的工作性能产生影响较大,难以精准控制,使用寿命及可靠性严重降低。钻进过程中,冲洗液会对阻尼衬套进行冲刷,钢球通过阻尼套时,也会对其产生磨损,在多种因素的共同作用下,改变了阻尼衬套的原有尺寸精度,零件易失效。另外,压力升高作用时间短,可以说是转瞬即逝,操作人员难以及时、准确地捕捉到压力变化,到位提示可靠性低。每次钻进结束后,需要拆卸钻具完成钢球复位,操作步骤多,辅助时间长。钢球、钢衬套及弹簧到位报信机构,可通过选用重型弹簧实现较大的报信压力值,适用于深孔条件,但此种方式到位报信压力一直存在,即使用过程中始终存在背压,对泥浆泵的耐压性能要求高,增加了泥浆泵负荷,特深孔钻进时,此种问题展现的将更为突出;另外,停泵后弹簧带动钢球恢复原位,封堵了钻具内部冲洗液通道,打捞内管总成时,所需拉力较大。从目前钻具的实际使用情况来看,现场操作人员一般拆除了此类报信机构,通常采用听悬挂环与座环撞击声音,同时记录投放时间的方式,来判断内管总成是否到位。但是由于撞击能量有限,这种方法对于特深孔钻进会失效,极易出现单管钻进,因此,提高到位报信机构的可靠性,是特深孔绳索取心钻具研制需解决的重点问题。

3.1.3 堵心报信机构工作可靠性有待提高

堵心报信机构普遍采用了岩心管受力挤压报警垫片的方式。实际使用过程中,由于钻速难以合理

控制,造成报警垫片的受力情况难以准确控制,钻进时极易出现报警垫片过度挤压,外径严重增大,打捞内管总成时,外径变大的报警垫片无法通过座环,造成内管总成打捞失败,使用可靠性低。此时,弹卡钳受力较大,并发生顶死,影响了弹卡钳的正常回收,同样会影响内管总成打捞可靠性,需投入脱卡管进行解卡,通过全面提钻解决问题,增加了大量的辅助时间,降低了取心钻进效率,特深孔钻进带来的影响更为显著。堵心报信机构应与定位机构进行联动设计,从根本上进行创新,以解决上述问题。

3.1.4 单动机构使用寿命有待提高

特深孔钻进时,由于需要提升钻杆柱受力性能,钻杆在设计上采用了内外加厚形式^[38],钻头唇面相应加大,所需钻压也随之增大,堵心时反馈至上推力轴承的作用力同样增大。钻进时孔底工况复杂,轴承在大载荷、交变应力的作用下极易发生损坏,导致单动失效,造成岩心管对钻取岩心的磨损及扰动。实际生产试验中发现,采用大唇面取心钻头在易堵心地层钻进时,一两个回次就要对上部推力球轴承进行更换。除推力球轴承外,还尝试了圆柱滚子、圆锥滚子推力轴承,但均由于钻具可用径向空间有限,导致所选轴承所能承受的额定动载荷较低,不能满足使用要求,造成钢球(或滚子)、轴圈、座圈发生碎裂,轴承更换频繁。特深孔绳索取心钻具设计方面,应着力研发满足使用空间要求的、能够承受较大动载荷的新型推力轴承,例如 PDC 轴承。另外,衬套与心轴之间的相对转速较高,尽管心轴上涂有润滑脂,但在较高的转速和钻具剧烈振动的共同作用下,加速了单动衬套与心轴之间的磨损,单动性能受到了严重影响,应在衬套与心轴之间增加转动性能良好的径向限位,提高单动机构的使用寿命。

3.1.5 岩心管单向阀可靠性有待提高

目前绳索取心钻具在岩心管单向阀设计方面,基本采用了钢球配合球座的方式(如图 13 所示)。取心钻进时,单向阀用于排除岩心管内部的冲洗液,打捞内管时,钢球在冲洗液及自重的作用下,单向阀保持关闭,防止冲洗液对管内岩心造成冲蚀,预防岩心脱落。球座与钢球配合的内锥度通常较小,操作人员在地表出心时,保持钻具与垂直方向上倾斜一定角度,但一般为出心便捷,倾斜角度较小,以减小小岩心与岩心管之间的阻力,此时钢球仍处于球座中,单向阀处于关闭状态,复杂层段出心时,岩心管内部

出现负压,给出心带来极大不便,增加了辅助时间,降低了钻进效率。

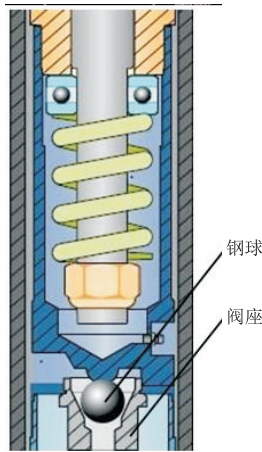


图 13 岩心管单向阀结构

Fig.13 Structure of the inner tube one-way valve

3.1.6 断心机构操作便捷性有待提高

为保证岩心卡断可靠,每回次投送内管总成前,需对卡簧的磨损情况进行检验,将卡簧取出,利用上一回次钻取的柱状岩心检验卡簧性能,但是挡圈每次拆装不便,尤其是不好拆,耗费较多的辅助时间,影响钻进效率。现场操作人员一般不使用挡圈,利用岩心管端部对挡圈进行轴向限位,钻进时卡簧箍紧岩心后上移,易造成岩心管端部磨薄、变形,直至严重磨损而失效,打捞内管总成时,岩心脱落风险升高,断心机构仍需进行合理改进。

3.2 外管总成受力和扶正性能有待提高

外管总成负责钻压及扭矩的传递,因此,外管总成在设计上应注重提升受力性能,各零件设计应在合理利用空间的基础上,适当增加零件壁厚,同时在材料类型及热处理机制上进行优选,设计的关键点在于连接螺纹的优化设计,进一步提升螺纹抗拉、压、扭的综合力学性能,以提升外管总成使用可靠性,同时具备良好的事故处理能力。特深孔钻进需严格控制孔斜,外管重量的增加,起到了加重钻杆的作用,有助于钻孔防斜。外管中两个关键零件是座环及悬挂环,二者在外管总成中应具有良好的同轴度,扶正环与岩心管之间为滑动摩擦,应从结构上进行优化,减轻外管总成与岩心管之间的回转阻力,进而保证岩心管单动性能,提高岩心采取质量。

4 结语

基于对以往特深孔绳索取心钻进施工经验的分

析,以及对绳索取心钻具研究现状的深入了解,5000 m 特深孔绳索取心钻具设计,应结合钻孔结构设计及钻杆结构设计共同开展,以保证岩心采取质量为前提,从结构及原理上进行创新,解决目前钻具使用存在的技术难题,提升钻具受力性能及使用可靠性,缩短辅助时间的使用,综合达到特深孔高质量、高效率、安全钻进的目的。

参考文献(References):

- [1] 王达.深孔岩心钻探的技术关键[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):1-4.
WANG Da. Key techniques of deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(S1):1-4.
- [2] 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.
- [3] 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 wireline core drilling technology[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2011, 12(4): 11-14.
- [4] 张春波,等.绳索取心金刚石钻进技术[M].北京:地质出版社,1985.
ZHANG Chunbo, et al. Wireline diamond core drilling technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [5] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1806-1822.
RAN Hengqian, ZHANG Jinchang, XIE Wenwei, et al. Applications study of geo-drilling technology[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11):1806-1822.
- [6] 吴景华,王文臣,谢俊革,等.绳索取心钻进工艺在非金属矿产资源勘探中遇到的问题与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):43-48.
WU Jinghua, WANG Wenchen, XIE Junge, et al. Problems of wire-line core drilling technique in non metallic mineral resources exploration and the countermeasures[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44 (2):43-48.
- [7] 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):1-3,9.
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):1-3,9.

- [8] 王有东. 绳索取心钻进技术在煤田勘探超深孔施工中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(4): 67-69, 72.
WANG Youdong. Application of wireline core drilling in coalfield ultra deep boreholes [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(4): 67-69, 72.
- [9] 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.
- [10] A. Boden, K. G. Eriksson. Deep drilling in crystalline bed-rock volume 2: review of deep drilling projects, technology, sciences and prospects for the future [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 295-300.
- [11] 李国民, 肖剑, 王贵和. 绳索取心钻探技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
LI Guomin, XIAO Jian, WANG Guihe. Wireline core drilling technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [12] 汤凤林, A. F. 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
TANG Fenglin, A. F. Kalinin, DUAN Longchen. Core drilling technology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009.
- [13] Surface Coring Drilling Services Overview [DB/OL]. 2016. <https://www.boartlongyear.com/drillingservice/surface-coring.html>.
- [14] DIAMOND CORE BARRELS [DB/OL]. <https://www.rock-technology.sandvik/en/products/exploration-drill-rigs-and-tools/exploration-tools/core-drilling-equipment/diamond-core-barrels.html>.
- [15] CORE BARRELS [DB/OL]. 2015. [http://www.americandiamondtool.net/assets/ADTCat-alogNovember2015\(E-Version\).pdf.html](http://www.americandiamondtool.net/assets/ADTCat-alogNovember2015(E-Version).pdf.html).
- [16] WIRELINE CORE BARRELS [DB/OL]. <https://www.date-group.com/diamond-coring-drilling-core-bits/?lang=en.html>.
- [17] Wireline Core Barrel [DB/OL]. <https://www.barkomas.com/en/drilling-equipment/diamond-drilling-equipment/core-barrels-and-spares.html>.
- [18] Core Barrels [DB/OL]. <https://www.jksboyles.co.uk/solutions/core-barrels.html>.
- [19] Wireline Core Barrels [DB/OL]. <https://www.fordia.com/product-types/wireline-core-barrels.html>.
- [20] 绳索取心钻具 [DB/OL]. <http://www.cwdf.com/show.asp?id=58.html>.
Wireline core barrels [DB/OL]. <http://www.cwdf.com/show.asp?id=58.html>.
- [21] 绳索双管钻具 [DB/OL]. <http://www.tsjinshi.cn/product/16.html>.
Wireline double tube core barrels [DB/OL]. <http://www.tsjinshi.cn/product/16.html>.
- [22] 钻具 [DB/OL]. http://xdtkgj.com/pd.jsp?id=52#_pp=0_309_13.html.
Drilling tool [DB/OL]. http://xdtkgj.com/pd.jsp?id=52#_pp=0_309_13.html.
- [23] 高申友, 杨金东, 王金, 等. S75-SF 中深孔绳索取心钻具结构及应用 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2012, 39(5): 45-48.
GAO Shenyou, YANG Jindong, WANG Jin, et al. Structure of wire-line coring drilling tool for medium depth hole and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(5): 45-48.
- [24] 于建丛. 深孔绳索取心钻具的结构优化研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2015: 30-43.
YU Jiancong. Optimized configuration of deep hole wire-line drilling equipment [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015: 30-43.
- [25] 李鑫森, 刘秀美, 尹浩, 等. 深孔复杂地层绳索取心钻具优化设计思路 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2017, 44(11): 56-59.
LI Xinmin, LIU Xiumei, YIN Hao, et al. Optimum design thoughts of wire-line coring tool used for deep hole drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(11): 56-59.
- [26] Trevor Fletcher. Drilling Exploration Boreholes beyond 4000m in South Africa [J]. Mine Water and The Environment, 1992, 11(4): 43-52.
- [27] 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.
- [28] R. Emmermann, A. Duba, J. Lauterjung. Super-deep, continental drilling in Germany [J]. Transactions American Geophysical Union, 1991, 72(17): 193, 196-197.
- [29] 张伟. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况 [J]. 探矿工程, 1999(4): 52-53.
ZHANG Wei. Borehole structure and drill string scheme for small diameter wire-line coring in the Hawaii ultra-deep borehole [J]. Exploration Engineering, 1999(4): 52-53.
- [30] Edward M. Stolper, Donald J. DePaolo, Donald M. Thomas. Deep drilling into a Mantle Plume volcano: The Hawaii scientific drilling project [J]. Scientific Drilling, 2009(7): 4-14.
- [31] Donald J. DePaolo, Edward Stolper, Donald M. Thomas. Deep drilling into a Hawaiian volcano [J]. Earth in Space, 2001, 13(9): 11-14.
- [32] 董海燕, 王鲁朝, 杨芳, 等. 国产 CNH(T) 绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 49-53.
DONG Haiyan, WANG Luzhao, YANG Fang, et al. Analysis on the application of China-made CNH(T) wire-line drill pipe in the first deep drilling engineering construction by China rock gold exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1): 49-53.
- [33] 董海燕. 绳索取心动液锤在中国岩金勘查第一深钻的应用和最新进展 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2013, 40(10): 9-12.
DONG Haiyan. Application of wire-line coring hydraulic hammer in the first deep drilling of rock gold exploration and the breakthrough [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(10): 9-12.

- and application of 1500m full hydraulic core drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(S2):101-105.
- [18] 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.
- [19] 王繁荣.XD 系列全液压力头岩心钻机的研制和应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(12):43-46. WANG Fanrong. Development of XD series fully hydraulic driving core drill and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38 (12):43-46.
- [20] 陆惠明.基于 MATLAB 的液压钻机减速器多目标优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(3):23-26. LU Huiming. Multi-objective optimization design based on MATLAB of hydraulic drill gear reducer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39 (3):23-26.
- [21] 杨虎伟,赵大军,于萍,等.全液压顶驱钻机背钳的设计及运动仿真分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):56-60. YANG Huwei, ZHAO Dajun, YU Ping, et al. Design of back-up wrench for full hydraulic top drive drilling rig and the motion simulation analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(2):56-60.
- [22] 胡向阳,左立朝.DB30 型多功能电驱动钻机的研发与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):48-52. HU Xiangyang, ZUO Lichao. Development and application of multifunctional electric drive drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44 (5):48-52.
- [23] 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. HE Guolei, LIU Xiaolin, ZHU Zhitong, et al. Design and application of electronic control system of rig based on CAN bus technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(12):72-77.
- [24] 刘旭光,盛海星,王敏.XDQ-1200 型全液压轻型岩心钻机电液控制系统设计及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):49-52. LIU Xuguang, SHENG Haixing, WANG Min. Design of electro-hydraulic proportional control system for XDQ-1200 light and full hydraulic core drill[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(9):49-52.
- [25] 刘桂芹,江进国,曹明,等.钻机液压系统中电控比例变量泵的特性测试分析[J].矿业研究与开发,2005,25(4):47-48,80. LIU Guiqin, JIANG Jinguo, CAO Ming, et al. Test and analysis on property of the electric proportional variable-volume pump used in hydraulic system of drilling rig[J]. Mining Research and Development, 2005,25(4):47-48,80.
- [26] 和国磊,冯起赠,许本冲,等.SDC-2500 型全液压车载钻机的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):44-48. HE Guolei, FENG Qizeng, XU Benchong, et al. Design and application of SDC-2500 full hydraulic truck mounted rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(6):44-48.

(编辑 周红军)

(上接第 23 页)

- [34] 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.
- [35] 朱恒银,张正,余善平,等.3008.29m 特深孔科学钻探施工技术[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)技术学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2015:214-222. ZHU Hengyin, ZHANG Zheng, YU Shanping, et al. Construction technology of 3008.29m ultra-deep hole scientific drilling[C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conferences. Beijing: Geological Publishing House, 2015:214-222.
- [36] 李鑫淼,李宽,吴纪修,等.国外绳索取心钻具弹卡机构设计与分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):276-279. LI Xinmiao, LI Kuan, WU Jixiu, et al. Design and analysis on link latch mechanism of overseas wireline coring tool[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(S1):276-279.
- [37] 李鑫淼,李宽,梁健,等.复杂地层取心钻进堵心原因分析及其预防措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(12):12-15. LI Xinmiao, LI Kuan, LIANG Jian, et al. Core jamming causes and prevention in drilling difficult formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(12):12-15.
- [38] 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.

(编辑 韩丽丽)