

深孔取心钻进用高速顶驱式钻机

朱江龙^{1,2}, 张 伟³, 黄洪波¹, 胡时友⁴, 刘跃进¹

(1. 中国地质装备集团有限公司, 北京 100102; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 回顾总结了汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目钻探装备的研制和改造过程, 详细描述了2种高速顶驱式岩心钻机的总体方案、应用效果和存在问题, 简要分析了高速顶驱钻进、顶驱/转盘双回转钻进以及交流变频电驱动技术在深部复杂地层钻探领域的应用前景, 对建立我国深部钻探装备体系具有一定的参考价值。

关键词: 科学钻探; 汶川地震断裂带; 深孔钻探; 高速顶驱; 交流变频电驱动; 钻机

中图分类号: P634.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0114-06

High-speed Top-drive Rig for Deep Core Drilling/ZHU Jiang-long^{1,2}, ZHANG Wei³, HUANG Hong-bo¹, HU Shi-you⁴, LIU Yue-jin¹ (1. China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 10083, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: This article gives us a review of research and development of a deep hole drill rig developed for Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project, introduces the scheme of high-speed top-drive rig for deep core drilling (including hydraulic drive and AC VFD), analyses the application perspectives of high speed top-drive, dual rotary system and AC VFD in deep hole coring and in complicated formation condition.

Key words: scientific drilling; Wenchuan earthquake fault; deep hole drilling; high speed top-drive; AC variable frequency drive; drill rig

1 概述

汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目在四川龙门山“北川-映秀”断裂及龙门山前缘“安县-灌县”断裂附近实施5口科学群钻, 其中二号孔(WFSD-2)设计孔深2000 m, 终孔取心直径150 mm, 实际完钻深度2383.56 m, 终孔取心直径为122 mm; 四号孔(WFSD-4)设计深度3350 m, 终孔直径150 mm, 实际完钻深度2338.77 m, 终孔取心直径150 mm。以上两孔的钻进施工均采用中国地质科学院探矿工艺研究所与中国地质装备集团有限公司(以下简称“中装集团”)研制的深孔取心钻进用高速顶驱式钻机。

以上两孔在施工工艺设计和地层方面具有共同特点: 开孔孔径大(Ø444.5 mm), 终孔直径150 mm, 大直径取心深度超过2000 m; 采用先取心后扩孔的方法进行施工; 主断裂带附近的地层复杂, 表现为松软破碎、坍塌掉块、膨胀缩径等, 每个取心回次前后需要频繁进行长行程扫孔、倒划眼作业。要求钻探

设备具有较强的解卡、倒扣、套铣等处理事故能力以及对多种钻进工艺的适应性, 涵盖全面钻进、常规取心钻进、螺杆马达钻进、扩孔钻进、定向钻进, 钻具匹配多样化等。另外井场地处断裂带峡谷地带, 设备占地面积不能过大。

WFSD-2孔采用的KZ3000型钻机, 是针对WFSD-2孔深部取心钻探要求研制的顶驱取心和转盘扩孔复合钻进模式的全液压大直径岩心钻机, 高速顶驱满足Ø150 mm口径的金刚石取心钻进需求, 大扭矩转盘满足Ø444.5~150 mm多级井身结构的全面钻进和扩孔需求。WFSD-4孔采用的KZ30DB型电驱动钻机, 是在WFSD-2孔施工经验总结基础上, 结合WFSD-4孔的设计要求, 对KZ3000型液压钻机进行全面升级改造形成的交流变频电驱动顶驱式钻机, 可满足高速顶驱取心与大扭矩转盘全面钻进的功能与工艺需求, 并具有更好的工艺适用性、效率优势及能耗优势。

本文对WFSD项目全液压和电驱动高速顶驱

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 科技部科技支撑计划专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)”项目之“科学钻探与科学测井”课题; 中国地质调查局地调项目“地震断裂带复杂地层钻探施工技术应用示范”(12120114075701)

作者简介: 朱江龙(1974-), 男(汉族), 山西人, 中国地质装备集团有限公司副总工程师、中国地质大学(北京)博士研究生在读, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 长期从事钻探设备开发工作, 北京市朝阳区望京西园221号博泰大厦5层, 13701073721@163.com。

式岩心钻机的研制过程和应用情况进行简要阐述,作为汶川地震科学钻探项目在钻探设备方面所开展工作的总结。

2 全液压高速顶驱钻机的研制

2.1 研制背景

WFSD 项目启动前,汶川地震科学钻探工程中心钻井工程部根据施工工艺要求进行了详尽的设备选型调研,调研结果表明,当时市场可用的钻探成套设备均无法满足项目需求:

(1)能力最大的机械立轴式岩心钻机 HXY - 8B 型,标称钻深能力 3000 m(B 口径),无法满足项目 $\varnothing 150$ mm 直径取心 3000 m 的钻深要求;

(2)具备大口径钻深 3000 m 能力的地热水井钻机,无法满足取心钻进工艺要求;

(3)具备大口径钻深 3000 m 能力的石油钻机,无法满足金刚石钻探的高转速与给进精度的要求,且占地面积较大,一次投入比较昂贵。

因此,决定专门研制一套满足该项目深孔取心钻进要求的钻机。该钻机除了服务于汶川地震科学钻探项目,还将填补我国在大直径深孔取心钻机方面的空白,为将来的科学钻探项目和深孔取心钻探项目提供有效的钻机方案。

2.2 技术路线与总体方案

钻机研制过程中,主要参考和借鉴南非 3000 m 以深小口径绳索取心钻探及美国夏威夷科学钻探、德国科学深钻项目的经验,多级扩孔钻进参考 RPS3000 型水井钻机及石油顶驱钻机的效率及工艺优势:

(1)南非超深孔取心钻探采用的 HS150 型岩心钻机,实际取心钻深 4573 m,技术特点为全液压驱动,整机可分解为 6 大部件,转速 600 ~ 1800 r/min,最大扭矩 2620 ~ 1660 N·m;

(2)夏威夷科学钻探项目的顶驱特点:转速 0 ~ 900 r/min,大钩负荷 1125 kN;

(3)德国 KTB 科学钻探项目采用的 RB130 型顶驱特点:扭矩 10 kN·m,转速 0 ~ 290 r/min;

(4)2010 年创国内深孔取心纪录的 HCDF - 6 型钻机:分体塔式全液压动力头结构,可钻深 2706 m,转速 0 ~ 1200 r/min,动力头扭矩 1166 ~ 5960 N·m,给进行程 4800 mm;

(5)RPS3000 型水文水井钻机:转盘直径 445 mm,转速 33 ~ 132 r/min,转盘扭矩 40 kN·m,大钩提升能力 950 kN。

在充分研究上述机型的结构功能优势基础上,结合对渤海物装公司的液压顶驱调研,确定技术路线为:模块化组合设计,全液压驱动,电液比例控制,在成熟的 K31 钻塔和高架钻台的基础上进行系统集成,研制一整套顶驱/转盘组合式全液压散装钻机;高转速顶驱满足 $\varnothing 150$ mm 口径金刚石取心钻进 3000 m,大扭矩转盘,满足多级井身结构的扩孔/全面钻进需要,总体方案(图 1)简介如下。

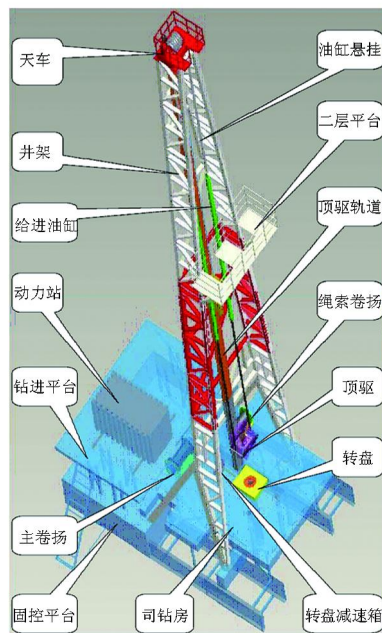


图 1 液压驱动钻机外形

(1)总体驱动。采用电动机为源动力的液压力机组,驱动顶驱、转盘、主卷扬、给进油缸等主要作业单元以及绳索绞车、慢速给进与提升、折叠油缸等辅助作业单元。

(2)模块组合。以 K31 - 135/4.0 钻塔平台为平台,有机集成如下独立模块:顶驱回转系统、油缸给进系统、岩心打捞系统、转盘回转系统、升降送钻系统、卡夹拧卸系统和操作与监控系统。

(3)操控模式。采取电液比例操控,给进、升降、回转、打捞实现逻辑编程控制;人机界面包含取心钻进界面、转盘扩孔界面、打捞界面等等;通过多个井场定点摄像头与多画面控制器实现远程视频监控。

(4)适用工艺。高速顶驱 + 油缸给进系统执行金刚石取心钻进工艺;低速转盘 + 自动送钻系统执行扩孔/全面钻进工艺。

2.3 核心部件与技术性能

2.3.1 顶驱(图 2)

(1)0 ~ 480 r/min 转速范围内无级调速,最大扭矩 15 kN·m,工艺适用性强;

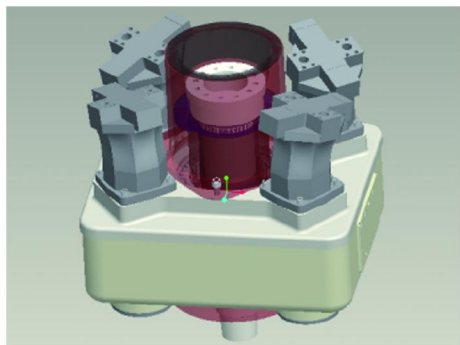


图2 液压顶驱

(2) 主轴通孔内六方设计, 抽放式可浮动六方芯轴, 以实现加接单根作业;

(3) 顶驱通过给进油缸和托架滑车沿轨道运动, 实现金刚石钻进钻压的精确控制。

2.3.2 转盘(图3)

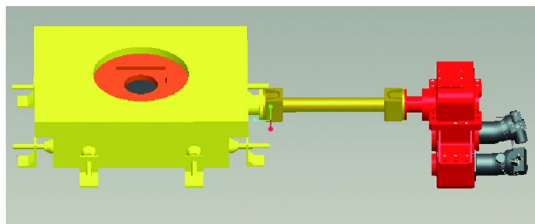


图3 液压转盘

(1) 0 ~ 134 r/min 转速范围内实现无级调速, 工艺适用性强;

(2) 采用标准石油小转盘, 最大扭矩 40 kN·m, 开孔直径大;

(3) 液压马达 + 减速箱万向轴传动, 便于安装与驱动。

2.3.3 给进系统

(1) 双油缸减压给进, 提升力 1000 kN;

(2) 给进油缸、钻杆在一个工作面内, 有利于垂直钻进;

(3) 油缸给进行程 10 m, 可加接、钻进一根 9.7 m 钻杆;

(4) 油缸确保减压钻进的钻压调整精度 ≤ 3 kN;

(5) 起下钻过程中, 桅杆底段与顶驱可折叠, 让开井口。

2.3.4 主绞车

(1) 单绳绳速 0 ~ 1.5 ~ 5 m/s, 单绳拉力 125 kN;

(2) 0 ~ 5 m/s 速度范围内无级调速, 电子手柄, 便捷省力;

(3) 后轴制动器可以进行自动送钻操作;

(4) 具备油缸驱动卷筒抱闸的安全制动驻车功能。

2.3.5 智能操控

(1) 运行参数均采用 PLC 及显示屏显示与设定;

(2) 人机界面有取心、扩孔、设定和报警显示(图4);



图4 人机界面

(3) 设定内容主要是给进速度设定、送钻频率、扭矩设定等。

2.3.6 钻塔平台

(1) 井架负荷 1350 kN, 净高 31 m, 5 × 6 轮系, 钩载 1000 kN;

(2) 平台高 4.0 m, 方便安装套管头与防喷器, 平台总平面大;

(3) 固控设备、液压动力站、水箱合理布置, 节省井场空间。

2.4 工程反馈及问题分析

按照上述技术方案, 研制出了全液压驱动的 KZ3000 型钻机。该钻机在汶川地震断裂带科学钻探工程二号孔(WFSD-2)中使用天数 659 天, 完成绳索取心钻进、提钻取心钻进(顶驱、螺杆马达、螺杆马达 + 液动锤)、扩孔钻进、定向钻进及全面钻进、下套管、下尾管并固井, 处理孔内事故等作业, 完成 838.66 ~ 2283.56 m 孔段的钻探施工任务, 钻机主要性能参数达到了设计指标。

2.4.1 设备的设计创新

(1) 全液压绞车: 大吨位(135 t)提升, 实现快绳(300 m/min)起落钩; 可实现无动力可控精确送钻(3 ~ 5 kN 的调整精度), 且通过电控实现平稳送钻, 已获得专利(深孔岩心钻机送钻绞车, 专利号 CN 202625682)。

(2) 全液压顶驱: 10 m 长行程给进, 可实现机上拧卸扣; 可以和无动力送钻绞车相结合实现长行程取心、扩孔、扫孔、倒划眼等执行动作, 已获得专利(深孔液压岩心钻机动力头, 专利号 CN 202510028)。

(3)稳定的打捞系统:带有张力测试装置和自动排绳的3900 m液压驱动绳索取心绞车,增减速柔和、张力监测准确、自动排绳可靠,大大提高了绳索取心打捞内管的成功率。已获得专利(深孔用液压绳索绞车,专利号CN 202542761)。

(4)BG250型连续拔管机,具有较强的处理事故能力,成功地处理了严重的卡钻事故,该拔管机属国内首创,并已获得专利(大吨位连续拔管机,专利号CN 202628003)。

(5)电液比例的操控:设备操作和监控精确、可靠,大大避免了手动调节的不稳定性;而且操作环境清洁、安全、舒适。

(6)油缸给进系统:自主研发了衔接于K型井架的,可折叠的,便于左右、前后、上下调整的顶驱反扭矩长行程(16 m)桅杆。

(7)精确自动送钻系统:自动送钻可以通过电控旋钮进行速度与频率的设定。在膨胀缩径、坍塌掉块、地应力较大的孔段,手动送钻速度不稳,出现憋泵、扭矩过大、打反车现象,采用自动送钻方式,平稳通过该地段。

2.4.2 工程反馈的问题

(1)起下钻效率:主卷扬起下钻的效率较低,在以提钻取心为主的后期施工阶段,大幅度降低了取心钻探的效率。

(2)检修难度:液压故障难于检修,WFS-2孔的检修时间占到4.8%,主要集中于主绞车、顶驱和给进油缸,保养、维护成本较高。

(3)加減单根:加減单根的工序较为繁琐,加接钻杆难度较大,在一定程度上降低了施工效率,增加了劳动强度;两根给进油缸容易损坏,高位悬挂很难维修。

2.4.3 反馈问题的分析

(1)液压传动效率低:绞车、顶驱等主要作业单元均采用全液压驱动,液压传动效率较低,大流量、远距离传输系统的传动效率更低,尤其体现在卷扬机能力与起下钻速度;设备分布面积较大,液压管路较长,给进油缸管路高达20 m,沿程损失较大;液压驱动不具备过载特性,回转与提升能力有限。

(2)液压维护难度大:在长时间高速、重载运行以及带载频繁启停的工况下,虽然液压系统采用了最优质的德国卓伦(ZOLLERN)的核心部件,德国力士乐(Rexroth)大流量的M7多路换向阀,设计了将近4000 L容量的液压油箱,仍无法回避系统发热及液压元件的损坏,增加了检修频次;高温、寒冷、高

污染环境中,维护难度较大。

(3)油缸维修难度大:两根高位悬挂的给进油缸,在频繁加減钻杆过程中,与大钩、高压胶管、机上钻杆容易产生相互碰撞,不便拆装及维修。

最终原因与结论:液压传动的传动效率低、过载性能差及维护难度大,不适应于连续高速重载运行的提升、回转等主要作业工况,有必要进行设备的改造。

3 交流变频电驱动高速顶驱钻机的研制

3.1 方案确定

针对以上问题,初步改造思路为:

(1)基本结构不变,全液压转变为电液共用;

(2)主绞车更换为大功率交流变频电机驱动(AC-VFD-AC);

(3)舍弃油缸给进方式,采用绞车自动送钻系统,实现长行程立根钻进;

(4)保留液压顶驱基本形式,增加钻杆摆移、拧卸装置;

(5)确保提升、回转作为独立动力驱动单元,并可同时满负荷运转。

但是,在推进局部改造方案过程中,遇到了以下问题:一是主绞车采用变频电驱动,顶驱、转盘仍保留液压马达驱动,回转能力没有提升;二是电驱动和液压驱动需要两套控制系统,融合难度在增大;三是电液共用,造成设备的检修、保养、维护难度不降反增。针对上述问题,项目组提出,绞车、顶驱和转盘均采用变频电驱动,经与汶川科钻中心协商,形成最终改造总体方案如下:

(1)总体结构:保持K31-135/4.0的井架与平台;

(2)动力供应:网电与柴油发电机组供电的双动力配置;

(3)驱动方式:主要执行部件(绞车、顶驱、绳索卷扬、转盘)均采用交流变频驱动;转盘与顶驱共用一套变频装置,可自由切换;

(4)钻进方式:转盘扩孔/高速顶驱取心钻进,均采用自动送钻模式;顶驱可满足金刚石钻进、立根钻进、扫孔、倒划眼等工艺要求;

(5)控制方式:采用全数字化交流变频控制技术,通过气、电、液及仪表参数一体化设计,实现钻机智能化司钻操控和远程钻进参数监控。

3.2 技术参数(参见表1)

3.3 核心部件

表 1 KZ30DB 型钻机技术参数		
项目	参数名称	参数值
钻塔平台	井架型式	K 型
	钻塔高度/m	31
	最大钩载/kN	1350(4×5)
转盘	转速/(r·min ⁻¹)	0~120
	额定扭矩/(kN·m)	35
	通孔直径/mm	444.5
顶驱	转速范围/(r·min ⁻¹)	0~480
	额定扭矩/(kN·m)	10
	最大扭矩/(kN·m)	15
	导向行程/m	20
绞车	最大快绳拉力/kN	200
	自动送钻速度/(m·min ⁻¹)	0~0.6
	最大输入功率/kW	450
导轨	行程/m	22
	承受扭矩/(kN·m)	25
变频	绞车变频系统/kW	500
	自动送钻系统/kW	30
	顶驱/转盘变频系统/kW	250

3.3.1 顶驱

高速电驱动直驱顶驱作为核心部件,具备回转、泥浆循环、加接单根、起下立根等综合功能。顶驱包含托架-滑车总成、电机-水龙头总成和自动摆管装置。特点如下:

(1)顶驱电机既满足金刚石钻进的 480 r/min 高转速、额定扭矩 10 kN·m 的需要,又能实现拧卸扣等短时间过载扭矩 15 kN·m 的超载运行。

(2)液压系统可完成浮动、摆臂、吊卡开合、伸缩背钳、机上卸扣等动作,实现顶驱的机械化卡夹拧卸功能。

3.3.2 主绞车

主绞车提升装置采用 450 kW 交流变频电机,通过减速机、卷筒离合器输出扭矩与速度到卷筒,再通过游车系统实现快速升降钻具;绞车自动送钻装置采用 22 kW 电机通过大速比送钻减速机、送钻离合器、减速机、卷筒离合器输出扭矩与转速给主绞车卷筒,送钻控制原理见图 5。特点如下:

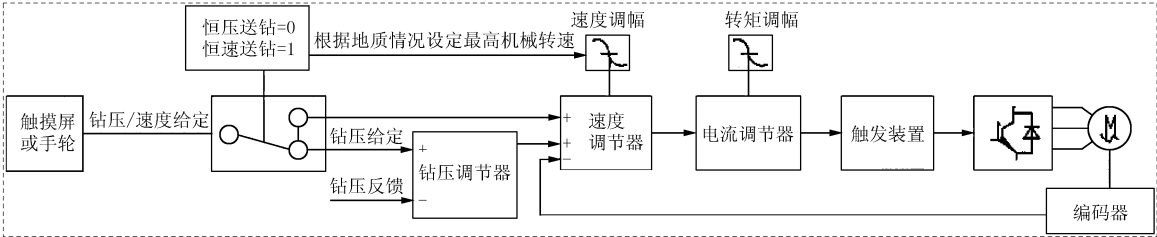


图 5 自动送钻原理

- (1)控制方式:闭环控制,可实现零位悬停;
- (2)安全模式:过卷防碰,井架防碰;
- (3)刹车模式:液压盘刹,能耗制动;
- (4)制动形式:驻车、工作、紧急制动;
- (5)送钻控制:可实现 3 kN 钻压控制精度。

频装置均采用 ABB 工业变频器,采用德国西门子的 PLC 逻辑编辑器及 HMI 触摸屏;现场采用 PROFIBUS 数字控制与通讯系统,增强了系统的可靠性;电控系统的动力来源可实现网电与柴油发电机组供电之间的切换;电控系统可以与司钻房与工程师监督房之间进行数据传输。

3.3.5 司钻房

司钻房是整个钻井现场的“司令部”,实现集中、智能、舒适、安全的操控(图 7)。主要组成部分为电气控制区域和数字化操控界面,电气控制区域完成顶驱、绞车、盘刹、打捞、井口等装置的动作;数字化操控界面显示工艺参数及设备运行参数并可进行设定,设计有综合钻井、顶驱取心、转盘扩孔、打捞岩心、故障报警等界面(图 8)。除此之外,司钻房还包含现场多点视频监控、独立检测系统、现场通信装置等。

3.4 工程总结

KZ30DB 型电驱动钻机在汶川地震断裂带科学钻探工程四号孔(WFSD-4)中使用天数555天,

3.3.3 转盘

(1)结构型式:特制的直驱电机通过万向轴驱动 ZP175 转盘(图 6);

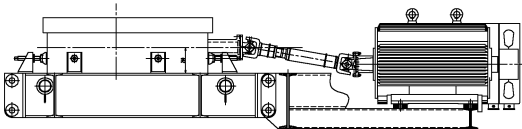


图 6 电驱动直驱转盘

(2)动力驱动:直驱转盘与顶驱共用 1 套变频装置,可以方便进行切换。

3.3.4 电控系统

转盘、顶驱、绞车、绳索卷扬、送钻电机都由独立的变频器驱动;所有的变频装置、进线柜、电源柜、控制柜、制动单元、接线室都安装在一个集装箱内;变



图 7 司钻房



图 8 数字化操控界面

完成提钻取心钻进(顶驱、螺杆马达、螺杆马达+液动锤)、扩孔钻进、定向钻进、侧钻及全面钻进等作业,完成孔深 2388.77m,达到了全电驱升级改造的设计要求,完成了 WFSD-4 孔的钻探施工任务。现场使用表明,KZ30DB 型钻机具有以下优势特点。

(1)工艺适应:钻机总体运行平稳,在钻进、起下钻、加接钻杆等各环节中,表现出了较好的工艺适应性和工序流畅性。

(2)输出特性:变频电机的转速、扭矩、拉力、速度等控制精度高,回转及提升无级调速,自动送钻精确控制钻压;带载启停好;过载特性增强了钻机处理事故的能力。

(3)操控性能:可选择恒钻压、恒钻速两种钻进控制模式;人机界面有起下钻、钻进、打捞等工艺流程界面;可选择触摸屏、电子器件操控两种模式。钻机工作过程中的所有动作均由电控元件或数字化操作完成,减轻操作者的劳动强度。

(4)自动送钻:可实现立根钻进;在钻进过程中,可任意位置提起钻具倒划眼并循环、清洗钻孔,有效地避免卡钻事故。

(5)钻参监控:设备运行参数与工艺参数,可实现实时远程监控、存储和传输。

(6)与液压传动钻机相比,效率高、能耗低;与机械传动钻机相比,传动链简化;维护保养便利性大大增强。

钻机在使用中,在顶驱的综合性能与多工艺的适应配合以及传感系统的稳定性等方面还存在一些问题,有待继续完善。

4 结语

依托于汶川地震断裂带科学钻探项目钻探工程的实施,探矿工艺研究所和中装集团在深孔取心钻进技术装备方面进行了有益的探索和实践,经历了从机械立轴岩心钻机到液压顶驱式岩心钻机,最终升级改造为交流变频电驱动高速顶驱式岩心钻机的全过程,对于建立深部勘查、科学钻探技术装备体系有了全新的体会和认识:

(1)高速顶驱系统以其高速回转、超长行程钻进、精确自动送钻、工艺参数的精确控制等优点,在深孔复杂地层条件下,相对机械立轴和动力头等传统地质勘查钻进系统,显示出了比较明显的综合性能优势。

(2)顶驱/转盘双回转钻进模式,可以实现转盘低速大扭矩钻进和顶驱高转速取心钻进的良好结合,是多级井身结构、多种工艺方法的钻探工程的优化选择。

(3)交流变频电驱动钻探装备因其在能力、效率、能耗、操控、可靠等方面的优势,在深孔、超深孔钻探领域具有非常良好的推广发展前景。

依托国家重大科技计划项目,工程承担单位、设备研制单位和工程施工单位,通过产学研合作,围绕行业关键共性技术难题组织攻关和研究,促进工艺技术与装备的有机融合,对于行业技术进步和装备升级换代具有重要的推动作用。

参考文献:

- [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).
- [2] 张伟, 王达, 刘跃进, 等. 深孔取心钻探装备的优化配置[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(10).
- [3] 王达. 我国地质钻探设备发展战略探讨[J]. 地质装备, 2009, 10(6).
- [4] 朱恒银, 刘跃进. FVD-2200 型全液动力头钻机的研制及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1).
- [5] 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): 8-14.
- [6] 朱江龙, 胡时友, 黄洪波, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目深孔取心钻探设备的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 22-27.
- [7] 朱江龙, 刘跃进, 潘飞, 等. 我国深孔钻探装备发展与展望[J]. 地质装备, 2013, 14(6): 9-14.