

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

朱江龙^{1,2}, 胡时友³, 黄洪波², 刘跃进², 张伟⁴

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

摘要:深孔取心钻探设备是为满足汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD)3000 m 深部取心钻探需要而自主研发的我国首套科学钻探专用设备,包括 KZ3000 型全液压钻机以及深部钻探配套用高压泥浆泵和钻杆钻具等。该套设备集全液压、高速顶驱、大口径、深部取心于一身,具有综合能力强、工艺适应性广、操控智能程度高等特点,在 WFSD-2 孔深部取心钻探中,各项功能满足设计要求,应用情况良好。该套设备作为我国深部钻探装备的阶段性创新成果,在科学钻探、深部找矿和浅层油气钻采中,具有一定的推广价值。

关键词:汶川地震;地震断裂带;科学钻探;深孔取心;钻探设备;高速顶驱;液压驱动;智能控制

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)09-0022-06

The Research and Application of Deep Hole Core Drilling Equipment for Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/ZHU Jiang-long^{1,2}, HU Shi-you³, HUANG Hong-bo², LIU Yue-jin², ZHANG Wei⁴ (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Geo-equipment Coporation, Beijing 100102, China; 3. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 4. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Deep hole core drilling equipment, including KZ3000 drill rig, high-pressure mud pump and wire-line coring rods and tools, is the first scientific drilling system in China, which was independently designed and manufactured to meet the needs of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project (WFSD). The equipment is set fully hydraulic, high-speed top drive, large diameter and deep coring in one, featuring good comprehensive capability, wide process adaptability and high intelligence of manipulation. During the WFSD-2 deep hole core drilling, it worked well by meeting the design requirements in all functions. As stage innovations for deep drilling equipment, it has a potential market value in scientific drilling, deep prospecting and shallow oil and gas drilling.

Key words: Wenchuan earthquake; earthquake fault; scientific drilling; deep hole coring; drilling equipment; high-speed top drive; hydraulic drive; intelligent control

1 项目的提出

1.1 项目背景

2008年四川汶川特大地震后,国家迅速组织启动了汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD,以下简称“汶川科学钻探”),研究地震断裂和地震机理,建立我国第二个深孔长期地震观测站,为未来地震的监测、预报或预警提供基本数据。

WFSD项目共设17个课题,其中“科学钻探与科学测井”课题的主要任务是通过5口科学群钻的取心钻探、测井和录井施工,为地震研究提供岩心和测井资料,为在地层深部进行科学实验和长期监测提供通道条件。该课题的顺利实施将关系到整个项目的总体进度和众多科学目标的实现。

1.2 项目对设备的要求

汶川科学钻探具有以下特点:一是地质条件复杂,地层异常破碎且缩径、涌水严重;二是取心质量要求高,全孔取心,取心直径 ≥ 85 mm;三是钻孔设计口径和深度大,WFSD-2孔原设计深度3000 m,开孔直径445 mm,终孔直径150 mm,5级井身结构,采用逐级取心、分段扩孔;四是钻进工艺方法采用大直径绳索取心钻具,半合管取心为主。特定的地质条件、工艺技术、取心效率以及钻深能力的要求,相对于常规固体矿产岩心钻探,对取心钻探设备提出了更高的要求,即具有更强的取心钻进能力、大口径扩孔钻进能力以及复杂地层孔内事故处理能力。

1.3 研制内容

在当时情况下,无论是钻机、钻杆、钻具还是配套的泥浆泵,国内外没有任何一款现成产品能满足汶川

收稿日期:2012-08-08

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

作者简介:朱江龙(1974-),男(汉族),山西运城人,中国地质大学(北京)博士研究生在读,中国地质装备总公司副总工程师,地质工程专业,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1503, zhujianglong@cgeg.com.cn。

科学钻探的特殊需求。

钻机方面,标称3000 m小口径取心的HXY-8B型立轴式岩心钻机无法满足大直径取心的钻深能力和口径要求;采用提钻取心的3000 m的地热钻机或浅层油气钻机,无法满足金刚石绳索取心工艺方法要求;石油钻机的低速大扭矩顶驱无法满足金刚石取心的高转速要求。

钻杆钻具和配套泵方面,钻深3000 m的 $\varnothing 127$ mm绳索取心钻杆以及配套的 $\varnothing 150$ mm绳索取心钻具也无产品可用,当时国产 $\varnothing 71$ mm绳索取心钻杆的钻深记录为2100 m,固体矿床所用绳索取心目前最大直径是P规格,且钻深很少超500 m,常用的大直径钻具多为单管钻具或双管钻具。同时,当时市场上也无法找到能同时满足流量和压力要求的适用的高压泥浆泵。

基于上述情况,WFS D工程中心的专家团队经过多次论证考察,认为必须重新研制一整套针对本项目的特定需求的取心钻探设备:

(1)研制一套顶驱/转盘组合式取心钻机,以高转速顶驱满足 $\varnothing 150$ mm口径金刚石取心钻进3000 m需求,用大扭矩转盘满足多级井身结构的扩孔钻进需要,该钻机型号定为KZ3000型;

(2)研制一台可满足3000 m取心钻进用的配套高压泥浆泵;

(3)研制一套钻深能力可达3000 m的 $\varnothing 127$ mm绳索取心钻杆;

(4)研制一套 $\varnothing 150$ mm绳索取心钻具(含钻头、扩孔器等)。

2 设备研制

2.1 技术路线

以钻机的集成创新为主体,钻机要充分吸收HCD-6F型分体式塔式全液压岩心钻机、RPS3000型转盘式水文水井钻机和德国RB130顶驱取心钻进系统的结构和技术优势,以K31钻塔和高架平台为载体,配置高速顶驱和大扭矩转盘,采用全液压驱动、电液比例控制和智能化参数显示控制,按照模块化组合设计方式进行集成式研制;同时以钻杆材料为突破口,提升钻杆的钻深能力,泥浆泵以压力和流量的最优级配提供配套。

2.2 技术方案和参数

2.2.1 钻机

功能上,KZ3000型全液压钻机由以下9个系统

组成:(1)顶驱回转系统;(2)转盘回转系统;(3)油缸给进系统;(4)绞车升降系统;(5)操作监控系统;(6)液动力机组;(7)绳索取心绞车;(8)强力起拔装置;(9)钻塔与平台。

布局上,钻井平台分上下2层。下层布置钻井液固控系统(包括2个泥浆灌、振动筛、离心机、射流混浆器及4台搅拌机)、液动力机组和液压绞车等;上层安装液压转盘、独立司钻房、全液压绳索取心绞车、液气大钳、液压“猫头”和2台气动绞车等,最大限度地拓宽井口的工作空间(图1)。钻机主要技术参数见表1。

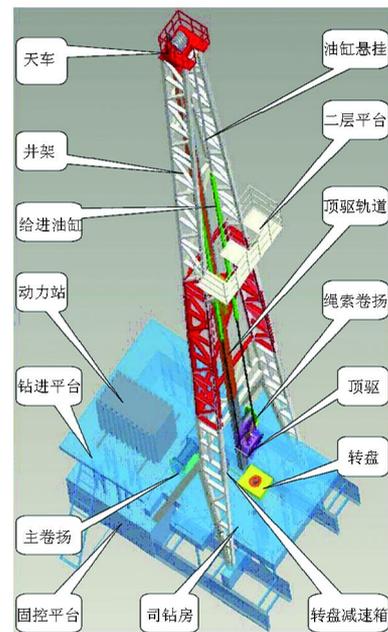


图1 KZ3000型钻机布局图

2.2.2 钻杆主要参数

钻杆规格: $\varnothing 127$ mm加厚绳索取心钻杆;

材质: $\geq S135$;

杆体尺寸: $\varnothing 127$ mm $\times 6.35$ mm;

接头尺寸:外径 $\varnothing 142^{+0.25}$ mm,内径 $\varnothing 112 \pm 0.25$ mm;

钻杆长度:钻杆有效长度9 m;

连接形式:自接式整体钻杆。

2.2.3 配套高压泥浆泵

卧式三缸往复单作用柱塞泵,5种流量和5种压力级配,满足不同孔径、孔深或钻探工艺的需要,主要参数见表2。

2.3 研制过程

(1)2008年6月至2009年2月在WFS D-1孔施工期间,WFS D工程中心着手进行WFS D-2和

表1 KZ3000型全液压钻机主要技术参数

序号	系统组成	项目	参数
1	顶驱回转系统	转速/(r·min ⁻¹)	0~480(无级变速)
		最大扭矩/(kN·m)	16
		六方通孔直径/mm	146
2	转盘回转系统	转速/(r·min ⁻¹)	0~120(无级变速)
		最大扭矩/(kN·m)	40
		通孔直径/mm	445
		承载力/kN	2700
3	油缸给进系统	最大行程/m	10
		起拔能力/kN	1000
4	绞车升降系统	单绳最大拉力/kN	125
		单绳绳速/(m·s ⁻¹)	0~5
		功率/kW	180
5	绞车	游车最大负荷/kN	1000
		最大拉力/kN	40
		容绳量/m	4000
6	液压动力机组(独立集装箱)	绳径/mm	8
		电动机功率/kW	160×2
		系统最大压力/MPa	32
		主泵流量/(L·min ⁻¹)	560
7	操作与监控系统(独立司钻房)	辅泵流量/(L·min ⁻¹)	110
		监控界面	动态监控4处井场区域
		控制程序	微处理器全面控制液压执行元件
		数据通信	采集处理20多组传感器信号
8	钻塔及平台载体	钻进参数	包括取心和扩孔2个可视化工作主界面
		钻塔净高/m	31
		最大负荷/kN	1350
9	强力起拔装置	平台高度/m	4
		起拔载荷/kN	2500
		起拔行程	单回次500mm,可无限制连续起拔

表2 BW280/30型高压泥浆泵主要技术参数

型式	卧式三缸往复单作用柱塞泵				
行程/mm	80				
缸径/mm	80				
挡位	6	5	4	3	2
泵速/min ⁻¹	234	190	134	81	49
流量/(L·min ⁻¹)	280	230	160	100	60
额定压力/MPa	11	15	20	25	30
输入功率/kW	75				
进水管直径/mm	89				
排水管直径/mm	51				
体积(长×宽×高)/mm	2950×1500×1140				
质量/kg	3000				

WFSD-4孔取心钻探设备的选型调研,在市场无可用产品的情况下,初步确定由中国地质装备总公司进行设备方案的设计准备,作为储备方案;

(2)2009年2月至2009年5月中国地质装备总公司会同WFSD工程中心的专家对钻机总体设计方案进行研究,确定总体方案,5月5日通过了由业内

专家组成的专家委员会的审查;

(3)2009年5月至2009年10月完成招标程序和全部图纸设计工作;

(4)2009年10月至2010年5月完成外购件采购、加工件和外协件制造、钻机组装和厂内调试;

(5)2010年6月至2010年7月完成WFSD-2孔现场组装试车,顺利交付。

在国内外没有成熟的设备及技术可供参考借鉴的情况下,中国地质科学院探矿工艺研究所和中国地质装备总公司协同配合,通过科学论证、精心组织,在不到一年的时间里,顺利完成了设备的设计、制造、组装和调试工作,保障了汶川科学钻探项目的顺利推进。

2.4 创新成果

借助WFSD项目深孔取心钻探设备的研制,中国地质装备总公司、中国地质科学院探矿工艺研究所以及业内专家针对深部取心钻探的特殊要求,开展了大量工作。在整机、关键零部件和配套产品等方面取得了一系列创新成果,填补了我国地质勘探装备的诸多空白,是对我国深部取心钻探装备体系的一次有益的完善和补充。

KZ3000型全液压钻机充分吸收和借鉴国内外先进技术进行集成创新,采用高速顶驱/大扭矩转盘组合型式,集全液压、高速顶驱、大口径、深部取心于一身,在地质勘探钻机的钻进能力、送钻控制、智能操控和参数可视化方面取得一定的突破,是我国第一台自主研发的智能化程度较高的3000m全液压大口径深孔取心钻机。

在关键零部件和配套产品方面,自主研发了一系列创新产品,并取得5项国家专利。自主研发了带有张力测试装置和自动排绳的4000m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;自主研发了适用于金刚石绳索取心用的高速顶驱,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;自主研发了可折叠式的顶驱反扭矩长行程桅杆,可在K塔上进行上下、左右、前后调整,实现不摘顶驱让开孔口,进行转盘扩孔钻进;自主研发了对心式强力拔管装置,适配各种直径的取心用钻杆和扩孔用钻杆,可实时监测起拔力;自主研发了适用于3000m钻深要求的高强度自接式整体钻杆等。

3 应用情况

3.1 整体运行状态

截止目前,WFS D项目深孔取心钻探设备已完成汶川科学钻探WFS D-2孔的钻探施工,运行区间为2010年7月10日至2012年4月29日,总体运行时间659天。累计取心钻探工作量1550.41 m,最终钻探孔深2283.56 m,孔深675.05~1349.50 m的侧钻绕障施工,孔深1356.00~1468.38 m的套管开窗侧钻补心施工,取得了岩心采取率达到90.8%

的良好效果。维护保养及检修停工时间24个工作日,维修时间率为4.8%。

在汶川科学钻探WFS D-2孔的施工过程中,WFS D项目深孔取心钻探设备完成的工艺过程有:取心钻进、扩孔钻进、全面钻进/侧钻、下套管、处理孔内事故等工作(详见表3)。

3.2 综合运行评价

表3 钻机不同孔段、工艺和运行方式下运行参数情况

运行状况	孔段/m	工 艺	运行方式	参 数
(一) 取心 钻进	838.66~894.17	三开 Ø150 mm 绳索半合管取心	液压顶驱回转、油缸减压钻进	钻压:10~50 kN, 转速:85~150 r/min, 扭矩:6000 N·m, 钩荷:200 kN
	894.17~1369.80	三开 Ø150 mm 普双半合管取心	液压顶驱回转、油缸减压钻进	钻压:25~55 kN, 转速:120~220 r/min, 扭矩:7000 N·m, 钩荷:250 kN
	1360.26~1500.99	四开 Ø150 mm 普双半合管取心	液压顶驱回转、油缸减压钻进	钻压:20~40 kN, 转速:60~130 r/min, 扭矩:15 kN·m, 钩荷:350 kN
	1500.99~1859.78	四开 Ø150 mm 普双取心+螺杆马达	液压顶驱回转、油缸减压钻进、 液压转盘回转、主卷扬自动送钻	钻压:15~42 kN, 转速:180+10~20 r/min, 扭矩:3000 N·m, 钩荷:380 kN
	1859.78~2165.5	五开 Ø122 mm 普双取心+螺杆马达	液压转盘回转、主卷扬自动送钻	钻压:7~18 kN, 转速:160+10 r/min, 扭矩:2500 N·m, 钩荷:360 kN
	2165.5~2283.56	五开 Ø122 mm 普双取心+螺杆马达+液动锤	液压转盘回转、主卷扬自动送钻	钻压:6~15 kN, 转速:150+10 r/min, 扭矩:2500 N·m, 钩荷:370 kN
(二) 扩 孔/全面钻 进	637.56~1330.23	三开 Ø200 mm 牙轮/PDC 扩孔 钻进	液压转盘回转、主卷扬自动送钻	钻压:20~60 kN, 转速:30~40 r/min, 扭矩:20 kN·m, 钩荷:250 kN
	675.05~1349.50	三开 Ø200 mm 牙轮钻进(侧钻)	液压转盘回转、主卷扬自动送钻	钻压:35~80 kN, 转速:40~50 r/min, 扭矩:20 kN·m, 钩荷:250 kN
(三) 下套 管/固井	0~1296.60	三开 Ø168 mm 套管	液压驱动主卷扬	钩荷:300 kN
	1258.13~1859.78	四开 Ø139.7 mm 尾管	液压驱动主卷扬	钩荷:250 kN
(四) 处理 孔内事故	637.56~1330.23	三开 Ø200 mm 提钻时遇阻严重	强力起拔+震击器震击	钩荷:1100 kN, 给进油缸:1000 kN
	1301.57	四开 Ø150 mm 单管套捞探管	顶驱上顶、BG250 拔管机强力起 拔	给进油缸:1200 kN, 强力起拔:2100 kN, 起拔行程:2000 mm

WFS D工程中心在WFS D-2孔施工完成后对KZ3000型全液压钻机的运行报告中对设备的综合运行评价为:WFS D深孔取心钻机在汶川地震科学钻探工程二号孔(WFS D-2)取心钻进、扩孔钻进、全面钻进、下套管、处理孔内事故等方面应用,基本满足WFS D-2孔各种钻孔口径及钻进工艺的施工需求。在三开扩孔钻进、全面钻进,四开取心钻进时,孔径大、钻孔深、扭矩大、摩擦阻力大的情况下,转盘/顶驱设计能力有限的条件下,结合不同规格的螺杆马达和液动冲击锤等孔底动力钻具,满足半合管提钻取心,钻进平稳,钻机运行正常。

3.3 钻机运行特点

WFS D项目深孔取心钻探设备的创新设计,在汶川科学钻探WFS D-2孔钻进施工过程中,得到了充分验证,除系统运行总体平稳正常,各项功能满足设计要求外,在顶驱、绞车、液压驱动、控制、打捞和事故处理等方面,与市场上其他在用的取心钻机相比,表现优越,呈现以下特点。

(1)精确的绞车自动送钻系统:KZ3000型钻机

配置的全液压绞车不仅可实现大吨位(125 t)提升,还可以实现无动力可控精确送钻(送钻精度:3000~5000 N),在膨胀缩径、坍塌掉块、地应力较大的孔段,当采用手动送钻控制下钻速度不稳,出现憋泵、扭矩过大情况时,采用自动送钻方式,可平稳通过该地段。图2是送钻录井状态曲线。当WFS D-2孔取心钻进至2210.95 m时,因2012年春节放假2天,再次下钻时在距孔底60 m处遇阻,循环泥浆划眼,手动送钻,速度快且不稳定,经常憋泵,后来采取自动送钻,很平稳地穿过憋泵地段,当泵压稳定时,又可以采用手动送钻,这样交替变换送钻方式,顺利划眼到底。

(2)稳定的打捞系统:自主研发的4000 m液压驱动绳索取心绞车带有张力测试装置和自动排绳装置(图3),在增减速时柔和平顺、张力的监测准确灵敏、自动排绳平稳可靠,提高了绳索取心打捞内管的成功率。

(3)独立司钻智能操控:KZ3000型钻机的所有运动部件均通过计算机控制,控制器采用Bosch

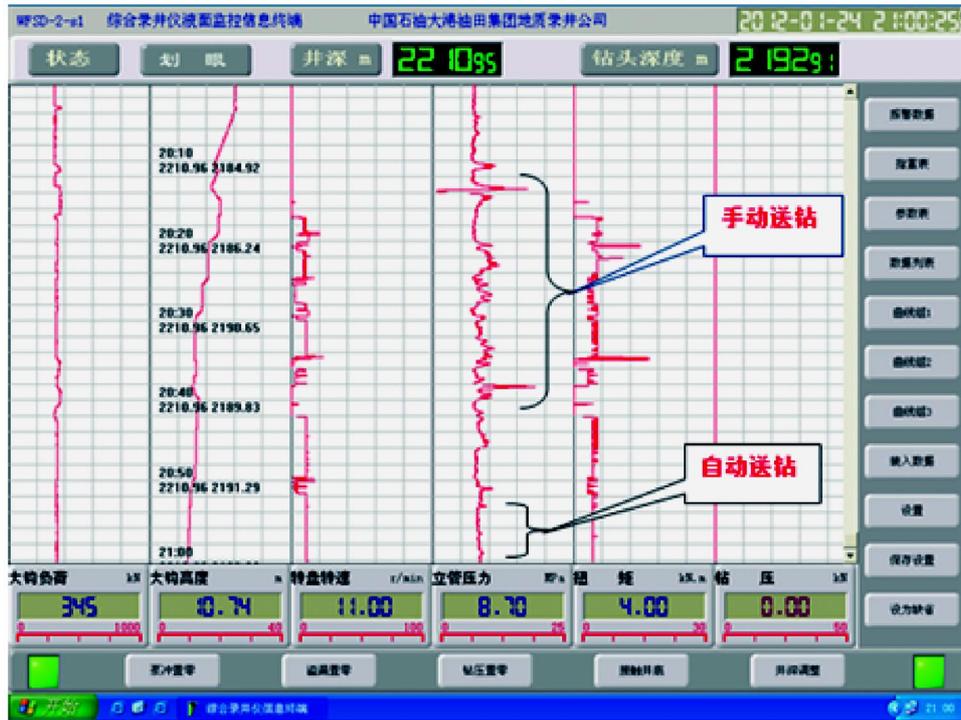


图2 送钻录井状态



图3 自动排绳装置



图4 独立司钻房

Rexroth 公司提供的 BODAS 可编程专用液压控制微处理器,实现比例电磁铁精确电流控制、电磁铁开关控制、数字和传感器信号输入、数据通信等多项功能,控制精确可靠。独立的司钻房提供设备的集中远程操作和控制,操作环境清洁、安全、稳定(图4),钻机运行参数直观可视、菜单式界面便于调整(图5),避免了手动调节的不稳定性。

(4)长行程的顶驱油缸给进系统:高速顶驱通过2个长行程油缸,可实现长行程(10 m)精确的钻压和钻速控制(图6),完成取心、扩孔、扫孔、倒划眼等执行动作。

(5)全液压驱动:KZ3000 型钻机的转盘、主绞车、顶驱、绳索绞车、给进油缸和其他辅助动作全部采用液压驱动,回转的无极调速可提供更好的钻探工艺适应性,实现更灵活的模块化组合,提高过载情况下的有效保护,可实现有效的机电液一体化控制。



图5 操作界面

独立的液压动力站(图7),通过快速接头与站外执行器连接,便于整体搬迁和安装。

(6)强力拔管装置:自主研发的BG250型拔管机(图8)创造性地采用大直径带有中心通孔的起拔

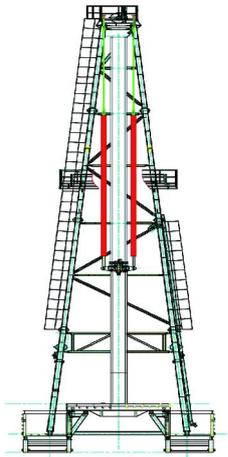


图6 长行程油缸



图7 液压动力站

油缸,可实现对心起拔;配备超高压电动液压泵站,起拔能力高达 2500 kN,并可实时监控起拔力,具有较强的处理事故能力。在 WFSD-2 孔施工过程中,曾成功地处理过严重的卡钻事故。



图8 BC250型拔管机

4 存在的问题

KZ3000 型钻机在汶川科学钻探二号孔的使用过程中,也暴露出一些问题。其中,大功率下的传动

效率过低的问题比较突出,这也是液压传动无法避免的弊端。此外,在大功率和重载条件下钻机的绞车系统采用液压驱动方式是否合适,也是一个值得进一步探讨的问题。据分析,深钻施工中起下钻过程中,绞车要频繁地在重载条件下进行刹车,使绞车的液压系统频繁受到大的加速度和冲击力的作用,系统部件容易损坏。

5 发展与思考

WFSD 项目深孔取心钻探设备作为我国在全液压大口径深部取心钻探设备的全新尝试,经过 WFSD-2 孔实钻验证,探索了一条可完成顶驱取心钻进和转盘扩孔钻进功能的低成本(相对于石油钻探)深孔取心钻探设备的技术路线。除用于 3000 m 左右的科学钻探以外,还可用于 3000~5000 m 的深孔岩心钻探,3000 m 左右的地热和水文水井钻探和 3000 m 左右的煤层气和浅层油气钻探等领域。此外,该设备的多个创新成果可移植到水文水井钻机、岩心钻机、煤层气钻机和浅层油气钻机,提升我国各类钻探设备的技术水平。

随着我国“攻深找盲”战略和“深部探测”专项的实施,深部取心钻机将迎来一个发展机遇期,同时在钻进能力、钻进效率和节能环保方面也将提出更高的要求。在实现途径上,对现有的机械和液压传动岩心钻机可以进行进一步的完善和优化,但机械以及液压传动自身固有的弊端可能对更大功率应用形成制约,而基于交流变频技术的电驱电控岩心钻机因其在传动效率、控制智能、节能环保和维护保养等方面的优势,或将为深部取心钻机的发展提供一条新的解决途径。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 张伟,贾军,胡时友.汶川地震科学钻探项目的概况和钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1).
- [3] 张伟,贾军.汶川地震科学钻探二号孔取心钻进方法的选择[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7).
- [4] 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).
- [5] 胡时友,宋军,张伟,等.汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)项目钻探和测井课题的组织实施与管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12).
- [6] 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).
- [7] 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).