

以新质生产力助力钻探技术装备创新发展 应用再作为

张永勤¹, 李小洋¹, 李宽^{2*}, 李凯舟², 陈石², 魏益强², 王京兵²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 山东省地质矿产局第六地质大队, 山东威海 264209)

摘要: 本文全面解读了新质生产力的特质、内涵及根本目的, 针对新质生产力的要义及当前人类正在面对节能降碳、绿色环保趋势及应对气候变化的挑战, 分析探讨了在地质调查工作中起到结论性作用的钻探技术培育新质生产力的重要意义, 提出了可形成自主知识产权并具有巨大市场应用前景的三大钻探装备与技术的重点发展方向, 预测这些发展方向将引领钻探装备与技术创新驱动与革命, 也将为人类应对上述挑战发挥积极作用。

关键词: 新质生产力; 创新驱动; 钻探技术; 高效低耗; 绿色环保

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0029-06

By using the new-quality productive force to push forward innovation development utilization and another accomplishment of drilling equipment and technologies

ZHANG Yongqin¹, LI Xiaoyang¹, LI Kuan^{2*}, LI Kaizhou², CHEN Shi², WEI Yiqiang², WANG Jingbing²

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

2. The 6th Geological Brigade of Shandong Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Weihai Shandong 264209, China)

Abstract: The paper entirely elaborates the peculiarity, connotation and fundamental purpose of the new-quality productive force fostered in the practice. Important meaning that drilling technique could play a conclusive role with the new-quality productive force in the geological survey is analyzed and discussed aiming at the key meanings of the new-productive force and the challenges which humankind will have to face the energy-saving and lowing-carbon, green and environmental protection and climate change. Three key points of development direction for the drilling equipment and technologies that could form a proprietary intellectual property right and have a huge market prospective are pointed out. The paper predicts that the key development points will lead a innovation and revolution for the drilling equipment and drilling technologies.

Key words: new-quality productive force; innovation-driven; drilling techniques; high-efficiency and low-energy consumption; green and environment protection

0 引言

钻探技术是集地表设备、地下钻具、工艺方法、冲洗介质循环冷却、人为操控、参数控制、事故预防

与处理等于一体的综合体现。随着人类对地下矿产资源的需求、基础设施建设的需要、对地球起源与深处奥秘及外空间探测等的求知, 钻探技术的应

收稿日期: 2024-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.005

第一作者: 张永勤, 男, 汉族, 1960年生, 教授级高级工程师(二级), 长期从事各种钻探核心技术、器具及设备的研发及工程施工管理工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, zyqietlfb@sina.com。

通信作者: 李宽, 男, 汉族, 1992年生, 高级工程师, 从事固体矿产钻探技术、工艺及设备研究和钻探工程施工管理等工作, 山东省烟台市招远市金城路78号, 350812906@qq.com。

引用格式: 张永勤, 李小洋, 李宽, 等. 以新质生产力助力钻探技术装备创新发展应用再作为[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 29-34.

ZHANG Yongqin, LI Xiaoyang, LI Kuan, et al. By using the new-quality productive force to push forward innovation development utilization and another accomplishment of drilling equipment and technologies[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 29-34.

用领域不断拓展,并迅速发展和不断进步。除了最初用于人们较熟悉的打水井和寻找地下矿产资源外,钻探技术在城市建筑、铁路、公路、桥梁、地下空间基础工程、地下管道铺设及置换等各类基础工程建设中都发挥了积极作用,做出了巨大贡献^[1]。随着工业革命、科技与社会的进步及自身的不断完善,钻探技术从初始的地下矿产资源和地下水资源探寻发展到今天人类与地下打交道的各个方面,并已形成了具有自身特点和多个分支的巨大工程技术体系^[2-4]。当前人类社会生存发展面临资源环境及气候变化的巨大挑战,针对这种挑战及我国另一个百年发展目标,习近平总书记根据中国的经济技术发展现状,提出了各行业领域要培育新质生产力的重要论断。作为地质调查工作关键手段的钻探技术是科研与生产于一体的实用技术,虽然在国家经济社会建设中发挥了重要作用,但按照总书记新质生产力的内涵,还有一定的技术创新发展和再作为的空间。因此,钻探技术行业也要培育发展新质生产力,为满足人类生存发展需要发挥应有的作用。

1 认真领会新质生产力的内涵与实质

根据马克思主义政治经济学的范畴,生产力是指人类在生产实践中形成的改造和影响自然的能力,它包括劳动者、劳动资料、劳动对象3个要素。邓小平同志在我国改革开放初期提出了科学技术就是第一生产力的论断。习近平总书记2023年9月在黑龙江考察期间首次提出“新质生产力”一词,而后又在许多场合对新质生产力做出了展开解读和论述,并指出新质生产力就是以科技创新推动产业创新,特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能。新质生产力的提出,实际上是习近平总书记对马克思关于生产力的概述及邓小平同志关于科学技术就是第一生产力论断的创新与发展。笔者认为,“新质生产力”的特质和内涵首先体现在“新”与“质”二字上,解读“新质生产力”要从“新”和“质”二字入手。新质生产力之“新”,核心在于以科技创新为引领,不断推动产业创新,就是将科学研究的最新发现和技术发明的先进成果应用到具体产业中,不断创造新价值。所谓“质”就是生产的全流程要体现高效低耗、绿色环保、持续可行、产品质优价廉的特点。新质生产力的宗旨就是

强调首先以科技创新驱动,带动各行业、各领域工作与生产提质增效,最终以质变方式达到全产业优质高效、少能低碳、绿色环保、持续可行的发展过程。

关于科技创新,习近平总书记曾指出:我们的科学技术要实现颠覆性的创新和突破,才能在国际上真正实现科学技术领先。原有的第一生产力在推动经济社会发展过程中确实发挥了巨大作用,但在效率和质量方面有的已经满足不了时代的要求,所以要发展更新和质量更高的科学技术。钻探技术作为一种技术与生产相互依存的行业,新质生产力就是当前钻探装备技术创新发展的指南。

2 以新质生产力引领钻探技术装备创新发展再作为

2.1 以“新质生产力”核心要义开发高效节能新钻机

如前所述,新质生产力的核心首要要义就是科技创新驱动、提质增效、绿色环保推动生产,钻机是钻探技术的关键要素之一,创新研发符合当前人类高效低耗、绿色环保发展趋势的钻机就是新质生产力在钻探技术领域的具体体现。当前地质勘探钻机已从古老的转盘钢丝绳给进加压方式,发展到机械传动液压给进加压立轴钻机方式,再到欧美较普遍使用的全液压驱动控制方式以及电驱电控方式等。从当前地质勘探钻机的结构特性及驱动方式看,具有较大的优化创新的可行性。机械传动液压给进控制的立轴钻机在我国市场占有率仍占多数,虽然有专家学者提倡我们要学习欧美国家发展液压传动的顶驱钻机,而市场也有一定占有率,但从液压传动的特性看,其能量利用率只有机械及电传动的60%,从能量利用率看,液压传动是否符合节能环保的发展趋势还有待商榷,能量利用率低就意味着增加碳排放的风险,这是无法改变的科学现实^[2-5]。

有关科技资料显示,变频调速技术以其高效节能、平滑调速、终端设备转速易于控制等优点在现代工业和民用领域得到广泛应用,尽管其成本和维修复杂性相对较高,但随着技术的进步和成本的降低,变频调速系统的优势越来越明显,这种优势已经引起了地质勘探钻机研发制造领域的重视,并已经尝试将变频调速技术应用于地质勘探钻机的传输系统中。如果将变频传动和调控技术应用于立

轴钻机上,钻机的传动系统可以得到进一步简化,为了实现卷扬机工作和立轴转动功能,只需要分动箱和正反转变换机构,钻机的所有转速都通过变频器实现。虽然立轴钻机在给进行程方面具有给进行程短的不足,但从技术角度可以容易实现不停车倒杆,上下卡盘夹持及倒杆换向可采用程控方式,钻机的所有动作及功能控制可实现按钮控制,并将所有控制按钮布置在一个控制盘上。这种变频调速电机驱动、不停车倒杆按钮控制钻机将是地质勘探钻机的一次重要创新和成为真正的自主知识产权的新型技术产品,它将在地质勘探工作中发挥节能高效、绿色环保的效能,并具有可期的市场前景^[3-6]。

2.2 开发减少海洋调查钻探泥浆污染新技术

海洋面积占地球面积的71%,它已经为人类生存发展发挥了重大作用,海洋已被认为未来能源接替及人类生存和发展的希望所在。习近平总书记许多场合就有关海洋资源开发利用及保护海洋工作事项做出过重要论断:要像对待生命一样对待海上绿洲和这一汪湛蓝海水,要建立健全陆海统筹的生态系统保护修复和污染防治区域联动机制,要加强海洋污染防治,实现海洋资源有序开发利用,为子孙后代留下一片碧海蓝天,要不断提高海洋开发能力,使海洋经济成为新的增长点。为了使海洋成为国民经济新的增长点和为人类未来生存发展提供希望,减少海洋污染和保护海洋生态应从避免陆路污物排放、航行污物丢弃及海洋地质调查与海洋资源勘探开发活动等方面入手。2024年中国政府发布的《中国的海洋生态环境保护》白皮书展示了中国在海洋生态环境保护及系统治理方面取得的成就,并强调要进一步加强海洋生态环境保护与系统治理,要加强国际合作进一步提升海洋绿色发展水平,这充分说明成就的取得及未来强调的工作都与降低对海洋的污染有密切关系。可以说海洋地质调查与海洋资源勘探开发活动所造成的污染,特别是无隔水导管钻探施工泥浆直排海底是主要污染源之一。针对海洋钻探泥浆直排海底造成的污染,国外已研发出一种可以降低无隔水导管钻进泥浆污染的方法(Riserless Mud Recovery,简称RMR技术)。据介绍,该系统主要包括海底泥浆举升泵、泥浆上返管线、吸入模块、脐带缆与绞车、举升泥浆的排出管、控制系统及海底动力系统等。从配置

看,这种技术方法不仅设备配置复杂,而且安放过程和工作程序也非常繁琐,对于较深海水钻井作业,泥浆上返管线盘绕绞车庞大,由于管线强度有限,下放及施工过程中需要在其一定距离固定浮球。泥浆回收工作过程中引入了“双梯度”概念,并要求始终设法维持吸入模块内外压力差为零的量值,为了保证正常工况,必须能实时对吸入模块内部的泥浆液位、压差及举升泵流量等进行监控。另外,举升泵在输送泥浆上返时,泥浆是没有经过除砂除泥处理的,固相颗粒较多,无疑会增加举升泵的磨损及降低寿命。一旦正常钻井时举升泵发生故障无法工作时的处置将是较复杂的工作过程,势必影响钻进施工。从以上RMR技术的配置及工作过程看,该减少泥浆污染的技术方法应该是十分复杂的^[7-10]。

为了简单实用、高效可行地降低海洋钻探无隔水导管时泥浆污染和浪费,笔者认为我们完全可以开发利用具有我国自主知识产权的水力反循环钻探技术(其原理钻探界已熟知)。水力反循环钻探技术在陆地及近海海洋地质调查钻探施工中获得了成功的应用(如图1所示)。将水力反循环钻探技术发展用于海洋地质调查及海洋油气钻探施工只需将钻杆或主动钻杆加工成满足要求的双壁钻杆,水龙头制造成双通道。如果采用顶驱钻机,则无需双壁主动钻杆。该技术方法工作过程可实现泥浆的闭路循环,既减少了泥浆的污染,也减少了泥浆的浪费。配套的双壁钻杆及双通道水龙头等费用与RMR技术配套器具虽然不能给出详细的对比,但可以肯定水力反循环的工作过程要大大简化,而且施工效率要远远高于RMR技术。将水力反循环钻探技术用于海洋地质调查及油气资源勘探开发施工将是钻探技术践行新质生产力,推动钻探技术创新发展的真实体现的一个方面,必将成为具有我国自主知识产权的海洋钻探技术,并为保护和系统治理海洋环境生态、提升海洋绿色发展发挥积极作用。

2.3 钻探技术应在地热能开发应用中展现更大的作为

地热能是一种由地壳抽取的天然热能,这种能量来自地球内部的熔岩,并以热力形式存在。作为一种清洁低碳的可再生能源,具有资源量大、能源利用率高、节能减排效果好等诸多优点,在全球绿



图1 水力反循环连续取心钻探技术在近海海洋钻探取样施工现场

色能源转型,推动可持续发展中发挥着重要作用。这种巨大的可再生清洁能源已经引起人类的高度关注并积极设法开发应用。根据科学家预测,地球核心区域的温度高达 6000°C ,来自地球内部的热量是一种几乎取之不竭的热能,不仅可以用它取暖,也可以用它来发电。有关数据显示,离地心越近,地下温度也就越高,虽然目前人类不可能钻探到地球内部温度最高的位置,但钻探深度已超过 1万m ,实际测量数据显示,万米处的温度超过 200°C 。科学家大量理论研究及实践验证,地球表面几乎所有地区向地球内部每垂直延伸 100m ,温度就增加 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

因此,笔者认为,地表以下 5000m 深处所具有的热能足以开发用于冬季供暖。可以设想,我们用钻探技术在需要供暖城市的市区及周围以一定的间隔钻探形成一定数量深度 5000m 的钻孔,并使这些钻孔在地下 5000m 深处相互连通,实现地下“人造锅炉”和“地下管网”,按照前述 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 地温梯度,地下 5000m 的温度应该达到 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。可以假想地将地下 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的热源作为“地下锅炉”,把

钻入地下的钻孔及钻孔之间连接起来的水平钻孔作为“地下管网”,在地表建造可向地下注排水及向住宅输送的热循环水的泵站,形成常规的供暖锅炉及泵站。如果地下 5000m 深处有足够的水源,可以通过地表建造泵站和钻孔将地下热水输送到地表,然后再通过地表输管网将热水输送到住宅的散热器,散热后的水流通过回流管路被压送到地下热源区,吸收热量后重复以往过程,这样往复循环,达到常规锅炉供暖的目的效果。如果地下没有水,可以通过地表注水来达到吸收热能的介质目的(还可以采用热力管)。不管地下有无水,我们都可以利用钻探技术吸取传输并利用地下热能。

实现建造上述“地下锅炉”和“地下管网”的这种设想的论点需要有以下3方面的论据支撑:一是地下 5000m 有足够高的温度和足量的热源;二是利用循环水交换热能的过程中,热源补充及保持稳定供热的时间;三是钻探技术能否按所设计的垂直及水平钻孔轨迹高效可靠地形成,达到可实际应用的“地下锅炉”和“地下管网”的目的。

根据科学家关于地温梯度的理论,第一个论据应该是成立的,并有充分的理论推断和实测数据支撑,即5000 m 地下地温至少可达到100℃,关于足够热能,只要地水平钻孔穿过的热源区有足够的面积即可满足。

关于热源补充及稳定供热时间,可参考目前国内热水循环供暖的有关数据资料论述,按照北方气温环境供暖,对于面积100 m²的房间,如果入口温度75℃,出口温度50℃的循环水,供水量只需1200 L/h即可满足居民家庭取暖温度20~23℃的室内温度,从上述满足供暖要求的供水温度及温差看,在5000 m 深度的地温达到100℃应该是有保证的。如果地温保证在100℃,按照供暖进水达到室内的温度75℃,散热后从室内回水温度50℃可满足正常取暖要求,即被输送到地下热储层的水温为50℃与100℃热储层进行热量交换,理论上分析可以瞬时达到75℃综合温度。因此,只要地下热储层的交换面积足够大,假定100℃热源,75℃热水进水,50℃出水实现常规要求,并保持稳定供热和热能补充是可能的^[11]。关于热源补充和稳定供热是一个十分复杂的问题,探讨这一论据,首先从考虑循环水吸收热能时地温能否及时补充并保持恒温;二是循环水在热储层的接触面积;三是循环水量;四是进出热储层水的温差大小。上述4个方面的论点,可以通过仿真模拟得出一些理论论据,较准确有力的论据应该是通过一个实际示范工程来进行佐证。

关于热源补充及稳定供热等问题不是笔者在此探讨的主要论点,笔者想表达的主题是,钻探技术应在新质生产力重要论断的引导下,不断技术创新,利用自身能力为人类生存和发展寻找新的机遇和再作为的舞台。如果5000 m 深度满足不了长期稳定提供热能要求,完全可以利用钻探技术增加钻孔深度以提高地温,钻探技术完全有能力利用自身专业特长加深钻孔深度到6000 m 甚至更深,使水平钻孔长度更长,从目前钻探技术能力和水平看,利用钻探技术建造“地下锅炉”和“地下管网”的设想,达到取代现行锅炉供暖的目的不仅是可行的,而且也是可能的。助力地热能开发应用是钻探技术展示自身能力和为实现“碳中和”及绿色发展再作为的重要方面^[12]。

3 钻探技术装备技术创新发展的经济社会意义

根据当前地质勘探钻机三种结构及驱动控制方式分析,变频调速钻机驱动电液控制应该是较优的选择,从前述的变频调速钻机的结构性能看,一是比液压传动效率高,二是钻机的传动结构简单。对于笔者所建议的立轴式不停车倒杆钻机,传动机构只需配备具有正反转的传动箱即可实现钻进的各项功能,具体结构不再详述。开发这种地质勘探钻机一是钻探装备的传动结构简单,可实现液压钻机手把及操纵台按钮控制,减轻劳动强度;二是产生节能降碳和助力“碳中和”实现的社会效益。与全液压力头钻机相比,变频调速钻机驱动结合不停车倒杆立轴钻机的结构形式可节省55%~60%动力消耗。按目前1000 m 钻进能力全液压力头岩心钻机及电驱机械传动立轴式岩心钻机各自配备动力分析,全液压钻进配备的柴油动力机136 kW,电动机械传动立轴式钻机配备柴油动力机75 kW,假设每台钻机年完成钻探工作量3600 m,平均台月效率600 m,全年开动钻机1万台套,按照1 t 柴油完全燃烧可释放3.16 t 二氧化碳估算,虽然不能确定具体每米进尺消耗多少燃料,但可以得出两种钻机驱动方式所释放的二氧化碳有着较大差别以及对节能降碳和助力“碳中和”所产生的经济社会效益有深刻的认知。笔者提出开发变频调速机械传动加不停车倒杆立轴钻机结构的思维主要是想引领钻探装备行业如何发展创新,怎样开发出符合高效节能降碳发展趋势和广阔市场应用前景的新产品,如何以创新驱动发展展示自身存在对经济社会发展的意义。

从水力反循环连续取心(样)技术的工作原理及工作过程看,将其拓展应用于海洋地质调查及油气资源勘探钻进施工已被实践证明是可行的,它在减少海洋钻探泥浆污染及浪费、提高钻探施工效率要明显优于常规海洋钻探技术及国外的RMR技术。由于钻进过程中泥浆直接经双壁钻杆的中心通道上返至钻井平台的岩心(样)接收装置,泥浆不仅没有直排到海底,而且钻进过程中还实时观察到所钻地层的岩心(样),理论和室内模拟实验显示,对于从井底到钻井平台钻4000 m 的深度,采用水力反循环钻进技术和常规的海洋油气钻井泥浆泵两台并联输送泥浆,不到11 min 就可观察到4000 m 深处的岩心样品,这是现有海洋钻井方法及RMR技

术无法实现的。另外,水力反循环钻探技术采用取心钻头,与常规不取心油气钻井钻头相比,钻头没有中心“死点”,在相同钻进参数的情况下,时效明显高于常规油气钻进全面钻进钻头。因此,将水力反循环连续取心钻探技术拓展到各种海洋钻探施工的经济社会效益是显而易见的。

开发地热源,钻探最关键。根据科学家地温梯度的预测,地下5000 m深处的地温足以满足冬季取暖要求,关键是钻探技术要能随心所欲地将钻孔轨迹穿越到地下热储层需要到达的部位。钻探技术要能实现“一孔(井)一趟钻,钻头地下既能穿针又能引线”的能力和水平,它所产生的经济社会效益将是巨大的。在此引用一些有关数据资料,简述开发深层地热能取暖的经济社会效益。根据有关水加热及降温所需能量的资料,1 m³水降低或升高1℃需要的能量约为1.17 kW,按照当前热水供暖25℃的温差要求,1 m³水所需的能量约为29.25 kW。在此以一个100万m²的住宅面积供暖为例,每小时供水量12000 m³即可满足供暖要求。100万m²的住宅区如果采用锅炉供暖,每小时消耗的能量将达到351000 kW。如果采用地热能供暖应该可节省351000 kW的能量,根据标准煤的热值与燃料热值之比,1 kWh折合标准煤约0.1229 kg,100万m²的住宅取暖消耗标准煤约43 t。目前我国每年取暖消耗标准煤约5亿t,其中用于锅炉供暖用煤4亿t,直接燃烧取暖用煤1亿t。如果目前我国冬季供暖能够实现全部用地热能供暖,根据1 t标准煤燃烧可释放2.86 t二氧化碳的理论数值,理论上可减少14.3亿t二氧化碳排放,即使有50%的供暖能采用地热能,其减排的效果也是十分可观的^[11,13]。因此,利用钻探技术的优势开发利用地热能供暖的社会经济效益十分重大。从目前钻深能力、定向钻探技术水平、多分支井及对接井连通钻探技术水平看,实现上述目的是完全可能的,因为钻探施工过程中很多因素都是人为和可控的。

4 结语与认知

从当前钻探技术发展现状及技术水平看,与机械加工、交通、通讯、高铁、造船、航空航天、农业机械、医疗与器械、金融支付等行业创新发展水平及成就相比,钻探技术装备几十年来看不出有明显的创新性技术成果,主要原因是钻探技术装备的生产

对象是面向地球内部不定因素,创新发展难度较大。看到上述其他行业已经取得了令人惊叹的技术创新和进步,解读习近平总书记强调要培育新质生产力的重要论断,感觉作为已形成完整产业体系的地质装备与技术行业,应积极响应习近平总书记的号召,紧跟创新发展的时代潮流,以钻探技术装备的专业优势和特点为人类生存、进步发展发挥应有的作用。就目前地质钻探装备技术发展现状及专业技术特点看,地质勘探装备技术行业要想取得重大创新发展和突破确实有很大难度。笔者经过长时间认真思考,认为地质钻探装备技术应着重在上述3个方面开展工作,进行攻关和拓展应用,极有可能取得创新性突破和实用成果,特别是钻探技术在开发深层地热能大面积取代常规锅炉供暖方面将更能显示自身的再作为。上述3个方面的认知也可能有一定的片面性,不当之处,望同行们批评指正。

参考文献:

- [1] 张永勤.论地质钻探技术的担当使命及智能化与绿色发展[J].钻探工程,2023,50(1):5-9.
- [2] 张永勤.提高金刚石绳索取心钻探效率的技术创新[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):78-82.
- [3] 张永勤.论提高我国地质找矿钻探综合效益的措施[J].地质与勘探,2007,43(6):107-111.
- [4] 张永勤.新型高效实用岩心钻机的研发及应用[M]//第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2011:86-90.
- [5] 张永勤.我国地质勘探钻机发展方向及应用的思考[J].地质装备,2008,9(4):11-16.
- [6] 张永勤,王汉堡,屠德刚,等.新型高效节能地质岩心钻机及配套技术研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):35-39.
- [7] 张永勤,孙建华,等.近海勘探取样钻机及反循环钻探工艺的研究与应用试验[M]//第十七届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流会论文集.北京:地质出版社,2013:35-39.
- [8] 张永勤,孙建华,刘秀美,等.水力反循环连续取心(样)钻探在浅海砂矿勘查中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(6):15-18.
- [9] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.
- [10] 陈浩文,王林清,王德,等.400m无隔水管泥浆回收系统研发及海试[J].钻探工程,2023,50(6):37-44.
- [11] 王文,吴纪修,施山山,等.探秘“能源新星”——干热岩[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):88-93.
- [12] 施山山,李宽,马晓鹏,等.干热岩资源高效钻采理论探讨[J].钻探工程,2023,50(S1):121-125.
- [13] 张炜,王海华,翁炜,等.美国能源部地热钻井技术研发最新部署及干热岩开发示范创新实践[J].钻探工程,2024,51(3):1-8.

(编辑 荐华)