

“十三五”地质钻探工程技术发展回顾及 “十四五”展望

冉恒谦^{1,2}, 梁健^{*1,2}, 张林霞^{1,2}, 周红军^{2,3}, 李艺^{2,3}

(1. 中国地质学会探矿工程专业委员会, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 3.《钻探工程》编辑部, 北京 100037)

摘要:技术创新发展是地质钻探工程事业的核心、灵魂和第一驱动力。本文通过总结我国地质钻探工程领域“十三五”科技创新成果,深刻认识地质科技创新发展新要求,系统把握地质科技创新基础,展望了地质钻探工程技术“十四五”科技创新的总体思路、发展目标和主要任务,以深入实施国家创新驱动发展战略,提升地质科技创新能力。

关键词:地质钻探工程;“十三五”;“十四五”;回顾;展望

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2021)S1-0001-13

Technology Review of the Geological Drilling Engineering of the “13th Five-Year Plan” and prospect the “14th Five-Year Plan”

RAN Hengqian^{1,2}, LIANG Jian^{*1,2}, ZHANG Linxia^{1,2}, ZHOU Hongjun^{2,3}, LI Yi^{2,3}

(1. *Mineral Engineering Committee, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China;*

2. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

3. *Editorial Board of Exploration Engineering, Beijing 100037, China.*)

Abstract: Technological innovation and development is the core, soul and first driving force of geological drilling engineering. This paper summarizes the science and technology innovation achievements in geological drilling engineering field, deeply understands the new requirements, systematically controls the base, prospects the overall plan, the development goal and the main tasks, in order to further implements the national innovation development strategy and promotes the geological science and technology innovation ability.

Key words: geological drilling engineering; the “13th Five-year Plan”; the “14th Five-Year Plan”; review; prospect

0 引言

地质钻探工程是地质工作多工种合成作战的重要方面军,是地质调查、矿产勘探、工程地质勘察、地球与地外行星科学研究、验证地质认识、直接获取地下实物的唯一技术方法,也是各种工程基

础、隧涵洞、环境保护和地质灾害防治等工程施工的重要技术方法,同时钻孔(井)为获取地下地质信息、探测深部地壳、开采矿产资源、建设地下实验室或观测站等提供通道^[1]。回顾“十三五”,地质钻探工程技术与装备的发展有效地促进了我国深地

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.001

作者简介:冉恒谦,男,汉族,1963年生,副所长,教授级高级工程师,探矿工程专业,博士,中国地质学会第十届探矿工程专业委员会副主任委员,《钻探工程》期刊编委会委员,主要从事科研项目管理及清洁能源钻探技术研究工作,河北省廊坊市市金光道77号,13803221648@139.com。

通信作者:梁健,男,汉族,1980年生,科技处副处长,教授级高级工程师,地质工程、机械工程专业,博士,中国地质学会第十届探矿工程专业委员会副秘书长,中国地质学会第五届青年工作委员会委员,《钻探工程》期刊青年编委会主任委员,主要从事科研项目管理及深部钻探技术研究工作,河北省廊坊市市金光道77号,raul9942718@163.com。

引用格式:冉恒谦,梁健,张林霞,等.“十三五”地质钻探工程技术发展回顾及“十四五”展望[J].钻探工程,2021,48(S1):1-13.

RAN Hengqian, LIANG Jian, ZHANG Linxia, et al. Technology Review of the Geological Drilling Engineering of the “13th Five-Year Plan” and prospect the “14th Five-Year Plan”[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):1-13.

探测、深海探测、战略性矿产勘查、深部热能(干热岩)勘探等的高效高质量发展,支撑了重大工程项目的建设,取得了卓越的成绩。上天:嫦娥五号圆满完成中国首次月球采样返回任务,地质钻探工程技术支撑“嫦娥”挖土攻关;入地:实施完成“松科2井”重大科学钻探工程,实现了理论、技术、工程、装备的重大突破;下海:地质钻探工程技术助力海域天然气水合物第二轮试采实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越;登极:突破热水钻机技术为南极科考增利器,成功钻取南极冰下岩心。

展望“十四五”,2021年3月12日《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》正式发布。其中,全社会研发经费投入年均增长7%以上,力争投入强度高于“十三五”时期实际,基础研究经费投入占研发经费投入比重提高到8%以上,战略性新兴产业增加值占GDP比重超过17%,具体数字背后,科技分量凸显;“赛马”制与“揭榜挂帅”相互促进,组建一批国家实验室,完善自由探索型和任务导向型科技项目分类评价制度,适度超前布局国家重大科技基础设施,增强科创板“硬科技”特色,加快建设数字经济,科技未来发展可期。技术创新发展是地质钻探工程事业的核心、灵魂和第一驱动力。本文通过总结我国地质钻探工程领域“十三五”科技创新成果,深刻认识地质科技创新发展新要求,系统把握地质科技创新基础,展望了地质钻探工程技术“十四五”科技创新的总体思路、发展目标和主要任务,以深入实施国家创新驱动发展战略,提升地质科技创新能力。

1 “十三五”地质钻探工程技术发展回顾

1.1 地质岩心钻探技术装备

1.1.1 钻探装备

2018年4月,中国地质调查局勘探技术研究所牵头开展的国家高新技术研究发展计划(863计划)“4000米地质岩心钻探成套技术装备”课题通过技术验收,研发了4000 m交流变频电驱动地质岩心钻机和系列钻具等,可用于金刚石绳索取心等多种高效钻探工艺方法,并助力京津冀及雄安新区地热资源调查钻探工程^[2-4],见图1。

2018年8月,中国地质调查局勘探技术研究所牵头并联合国内9家单位,成功获批了“十三五”国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装



图1 地热资源调查钻探工程

备研发及应用示范”。项目从构建大深度绳索取心钻孔口径系列入手,开展了复杂地层钻进智能控制^[5-6]、地质岩心钻机关键技术研究与装备研制^[7-10]、大深度高性能薄壁绳索取心钻杆研制^[11-12]、小口径高效系列钻具研究^[13-15]、环保冲洗液体系与废浆处理技术^[16-18]、钻探技术装备集成与示范等研究。拟突破智能控制、高效钻进、轻量化与模块化等关键技术^[3,19],见图2。2020年11月,项目通过中期评审验收。

2018年11月,北京探矿工程研究所牵头开展的国家国际科技合作专项“新一代3500米永磁直驱顶驱地质钻机研制”顺利通过专家组现场验收。钻机



图2 5000米智能地质钻探岩心钻机

采用变频永磁电机直接驱动顶驱和绞车,具有无级调速、恒压自动送钻、大于30 m长行程立根钻进和提下钻开泵扫孔等特点,具备钻进参数实时监测、故障实时显示和历史数据回放等功能^[3,20]。

2019年11月,中国地质大学(北京)牵头开展的国家重点研发计划“多金属矿岩心钻探关键技术装备联合研发及示范”项目国内示范应用钻探工程在山东省平度市山旺—上马台矿区现场顺利通过专家组现场验收,见图3。绳索取心钻杆自动排放装置与钻杆移摆机械手的成功应用,在国内首次实现了加接钻杆、提下钻的自动化;智能钻探控制系统实现3种优化钻进模式^[21-22]。



图3 平度市山旺—上马台矿区示范应用

“十三五”期间,我国对岩心钻机进行了重大的改进与创新,在施工效率、驱动方式、安全性、电气化程度、操作劳动强度和操控环境等方面取得了巨大的进步。以传统立轴钻机为原型,集成模块化交流变频电驱动及数据采集单元,采用PLC与现场总线进行电气系统配置的新型节能深孔岩心钻探成套装备^[1,8,19]。深化“产学研用”合作模式,充分发挥科研院所、高等院校、龙头企业、典型用户的互补优势,形成协同创新环境,以中地装(北京)科学技术研究院有限公司为代表的企业已初步形成了“XD 20/30/40/50 DB系列电动变频顶驱钻机”产品。

1.1.2 钻探工艺器具

2016年1月,安徽省地质矿产勘查局313地质队牵头研发的大直径组合式加重管绳索密闭取心钻具在页岩气勘探钻进中获得成功,Φ152 mm口径绳索密闭取心钻深2328.18 m^[23-24]。

2016年6月,中国地质调查局勘探技术研究所自主研发的钻孔“支架”修复技术——“小直径膨胀套管护壁技术”在广西柳州地区页岩气地质调查井工程“雒容1井”1470 m孔深处成功护壁^[23]。目前,已完成了Φ241 mm口径30 m长距离的大洋钻探复杂地层膨胀套管护壁技术野外试验。

2015—2016年,中国地质调查局勘探技术研究所牵头研制的铝合金钻杆结合“松科2井”,开展了工程应用,进行的Φ147 mm规格铝合金钻杆野外第一次生产试验,下井21回次,累计进尺233.13 m,井下使用时间634 h(约27 d),使用井段为2966.11~3199.24 m。进行的第二次生产试验,下井8回次,累计进尺103.96 m,井下使用时间336 h(约14 d),使用井段为4862.94~4963.05 m^[25]。

2017年,北京探矿工程研究所等单位共同申报的“地质钻探复杂地层冲洗液关键技术研究与应用”成果荣获了2017年度国土资源科学技术奖二等奖。研制的耐高温钻井液成功应用于青海共和盆地干热岩GR1井施工,环保型海水冲洗液应用南黄海大陆架环境科学钻探CSDP-2井施工;成膜防塌、强抑溶及快速凝胶堵漏等多项关键技术金属、钾盐、页岩气等的钻探中得到了应用。

2018年,北京探矿工程研究所牵头开展的超高温高压钻井液流变仪(Super HTHP Rheometer 2018,见图4)仪器产业化样机通过了可靠性测试,无故障工作累计时长超1000 h,成功实现在高温高压(320 °C、220 MPa)及低温高压(-10 °C、220 MPa)^[26]条件下的流变性能测试。



图4 超高温高压流变仪实物

2019年6月,由中煤地华盛水文地质勘察有限公司承钻的滇西南钻探工程(见图5),采用了金刚石绳索取心工艺,选用HXY-9型钻机、绳索取心液动潜孔锤、 $\text{O}114\text{ mm}$ 绳索取心钻具、饱和盐水泥浆等,钻孔直径 $\text{O}127\text{ mm}$ 、岩心直径 $\text{O}80\text{ mm}$,绳索取心钻进深度达到 2700 m ^[21]。



图5 滇西南钻探工程现场

2019年,中国地质调查局勘探技术研究所完善了KT系列取心钻具及其应用技术(见图6),在新疆克拉玛依玛湖区块的风险探井“玛页1井”进行了取心技术服务, $\text{O}216\text{ mm}$ 口径单回次取心 41.97 m ;同时,连续取心 445.58 m ,岩心采取率 97.96% ,设计取心工期 125 d ,仅用工期 61 d ,即用 48.8% 的时间完成了 162% 的取心工作量^[21]。



图6 KT系列取心钻具

2020年,北京探矿工程研究所牵头开展了绿色勘查高温环保冲洗液研究,研制了一套耐温 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环保冲洗液体系,冲洗液经过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温滚动后仍具有良好的流变性、降滤失性及页岩抑制性能,并具备较易降解($\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 值为 21.5%)和经济性好的特点^[27]。

“十三五”期间,在地质岩心钻探技术与器具方面硕果累累。借鉴油气井新技术,研发了小口径膨胀波纹管护壁技术,实现了钻孔事故井段的“支架”

修复;此外,孔底动力钻具、铝合金钻杆、高温环保冲洗液体系、超高温高压钻井液流变仪研发应用、硬岩钻探金刚石钻头等都取得了重大的突破,钻探工程钻深纪录持续被打破。

1.2 科学钻探

1.2.1 大陆科学钻探

2018年5月,中国地质调查局勘探技术研究所牵头实施完成了“松科2井”重大科学钻探工程(见图7),完钻深度为 7018 m ,孔径 $\text{O}152\text{ mm}$,创新了超深井大口径取心技术体系,研究并应用了抗高温水基钻井液^[28],是亚洲国家实施的最深大陆科学钻井^[2-3,29],是国际大陆科学钻探计划(ICDP)组织成立22年来实施最深的钻井。



图7 松科2井

2018年,吉林大学“‘地壳一号’深部大陆科学钻探钻机关键技术及应用”项目入选2018年度“中国高等学校十大科技进展”^[3]。攻克了高转速全液压顶部驱动钻井技术、高难度自动化摆排管技术^[30]、高速度钻杆柱自动拆卸和输送技术、高精度自动送进技术等4大关键技术,“地壳一号”钻机成功应用于“松科2井”。2020年7月,“地壳一号”钻机在新疆塔里木油田完成了“博孜8井”钻井工程,完钻井深 8235 m 。

2020年7月,中科院“丝路环境”先导专项和第二次青藏科考湖泊团队利用搭建好的水上钻探平台(见图8),在西藏纳木错中心湖区水深 95 m 的地方成功钻取长 100.63 m 的湖心,总取心率达到 98% ^[31]。



图8 水上钻探平台

2020年10月,山东省第三地质矿产勘查院组织施工的青藏高原首个3000 m科学深钻(见图9)——西藏甲玛3000 m科学深钻竣工,终孔孔深3003.33 m,孔径 $\varnothing 98$ mm^[31-32]。



图9 西藏甲玛3000 m科学深钻

2021年1月,南京大学、四川省地质调查院、山东省第三地质矿产勘查院联合开展的川西甲基卡锂矿3000 m科学钻探竣工(见图10),终孔深度3211.21 m,孔径 $\varnothing 98$ mm,实现了全孔98%的岩心采取率的好成绩^[33]。

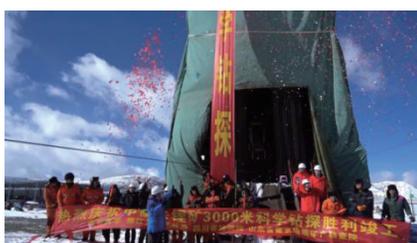


图10 川西甲基卡锂矿3000 m科学钻探

1.2.2 海洋科学钻探

2016年9月,山东省第三地质矿产勘查院承钻的南黄海大陆架科学钻探全取心第一深井CSDP-2井顺利终孔^[23],孔深2843.18 m,终孔孔径 $\varnothing 98$ mm,全孔岩心采取率97.7%。自主研发的多功能海洋钻探平台,使钻探成本降为同功能石油钻探平台的1/10。

2017年10月,北京探矿工程研究所研制的

ROV深海反循环结壳钻机搭载广州海洋地质调查局“海马”号,在大洋41B航次第三航段成功应用到大洋富钴结壳矿区岩心取样工作,在水下1500 m实现了与声学测厚装备同步勘查^[34]。

2018年11月,湖南科技大学自主研制的“海牛”号深海海底深孔钻机系统与取心技术(见图11),在北京通过了由中国海洋工程咨询协会组织的科技成果评价会,钻机应用水深可超3000 m,最大钻深能力达90 m^[3]。



图11 “海牛号”深海海底深孔钻机系统

2018年至今,广州海洋地质调查局开展了大洋钻探船设计与建造工作。中国地质调查局勘探技术研究所和北京探矿工程技术研究所等单位协研了深海钻探钻杆柱组合、膨胀套管护壁及事故处理工艺、硬岩取心钻进和连续取心工艺等关键技术研究,攻关无隔水管泥浆循环系统、钻井重返位系统、岩心处理系统等关键设备^[35-40],见图12。

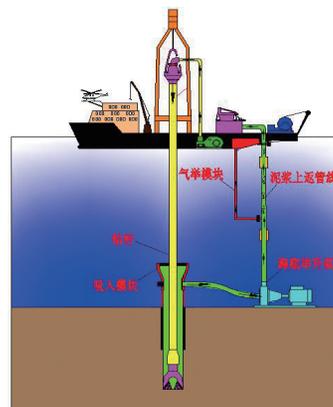


图12 无隔水管泥浆循环系统示意

1.2.3 月球钻探

2020年12月,“嫦娥五号”返回器携带月球样品在内蒙古四子王旗预定区域安全着陆,探月工程“嫦

娥五号”任务取得圆满成功。“嫦娥”的取土作业采用表取和钻取2种方式进行,表取1.5 kg,钻取0.5 kg^[31]。表取由机械臂采用挖、夹、铲等动作完成。

1.2.4 极地钻探

2016年1月,第32次南极科学考察队在昆仑站冰心房钻取出一支长3.55 m的深冰心^[23]。深冰心钻探系统由冰心钻取系统、绞车提升体系、控制系统和支撑系统等组成。

2017年4月,吉林大学国土资源部复杂条件钻采试验基地完成了第四次热水钻联调联试和低温模拟钻冰试验,经现场专家组确认,相关系统已经具备赴南极埃默里冰架开展1500 m冰层钻探的技术能力^[34]。

2019年2月,吉林大学在南极中山站往南约12 km的南极冰盖上钻探取得突破,成功钻穿近200 m厚的南极冰盖,获取了连续的冰心样品和冰下岩心样品(见图13)。这是中国自行研制的极地冰盖及冰下基岩钻探装备首次在南极应用,所获冰下岩心样品是国际上在这一区域首次获得^[21,41]。



图13 冰下岩心样品

“十三五”期间,地质钻探工程技术实现了“上天、入地、下海、登极”。“上天”,“嫦娥五号”圆满完成中国首次月球采样返回任务,地质钻探工程技术支撑“嫦娥”挖土攻关;“入地”,实施完成“松科2井”重大科学钻探工程,实现了理论、技术、工程、装备的重大突破;“下海”,地质钻探工程技术助力大洋钻探船设计与建造;“登极”,突破热水钻机技术为南极科考增利器,成功钻取南极冰下岩心。

1.3 天然气水合物钻采

2016年,中国地质调查局勘探技术研究所扩展了高精度定向钻井中靶导向技术应用领域,应用于青海木里陆域天然气水合物试采工程,提出的小直径水平定向穿越地下水合物层的对接井钻探技术,

达成多井连通水合物试开采^[23,42],见图14和图15。

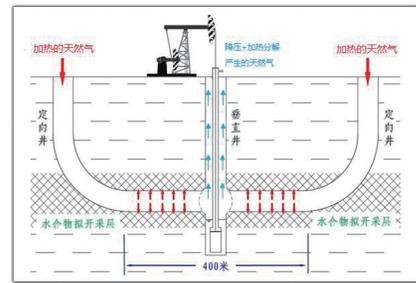


图14 水平对接井试采原理



图15 青海木里试采点火

2017年,中国地质调查局组织实施的海域天然气水合物第一轮试采,使用平台直井钻探技术在神狐海域1200 m水深首次获得天然气水合物试采的成功。

2019年,中国地质调查局广州海洋地质调查局和勘探技术所联合攻关团队成功研制了国内首套深海井口吸力锚技术装备(直径6.5 m、高12 m、重96 t,承载力 ≥ 5000 kN,见图16),结合第二轮海域天然气水合物试采工程的具体需求,创新解决了吸力锚结构形式、姿态监控方式和安装工艺等关键技术(垂直精度 $< 1^\circ$),解决了深海浅软地层井口支撑力不足的难题。

2020年,攻克了深海浅软地层水平井钻采关键技术,创新升级了第四代“慧磁”中靶系统(见图17),系统采用了低噪版传感器,通过增强磁信号、干扰波过滤和电路重组等多种手段,将探测距离增加了30%,对接精度 ≤ 10 cm,磁信标正常工作时间可达25 d,助力海域天然气水合物第二轮试采实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越^[31,43]。

“十三五”期间,深海井口吸力锚技术、深海浅软地层定向造斜工具及技术、高精度定向钻井中靶导向技术成功研发和优化升级,有效地支撑了我国陆



图16 深海井口吸力锚

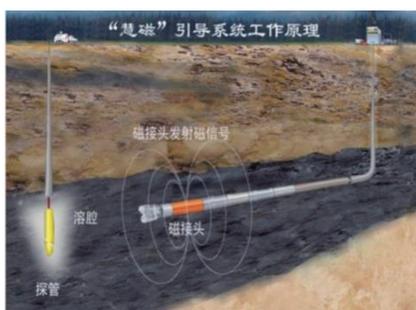


图17 “慧磁”中靶系统原理

海水合物钻采重大工程,大大增加了井眼与储层的接触面积,助力实现连续产气30 d,日产气 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$,是首次试采日产气量的5.57倍^[43],成功实现试验性试采,实现工程突破。

1.4 深部热能(干热岩)勘探

2016年4月,中国地质调查局勘探技术研究所研制的直径 $\text{O}140 \text{ mm}$ 涡轮钻具配套KT-140型取心钻具在青海省共和地区干热岩资源勘查GR1号井成功入井实钻。试验入井井段为2156.93~2160.13 m、2273.42~2276.00 m,第一回次进尺3.2 m,机械钻速1.6 m/h,岩心采取率100%;第二回次进尺2.58 m,机械钻速1.41 m/h,取心2.58 m,岩心采取率100%。

2016年12月,山东省鲁北地质工程勘察院承钻的东南沿海深部地热科学钻探工程(HDR-1)钻孔顺利终孔,孔深4000.86 m。采用了高温螺杆复合钻进方式及取心工艺,提高了钻探时效和岩心采取率。

2017年8月,共和盆地GR1干热岩勘探孔在地下3705 m深处探获温度达到 $236 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的干热

岩^[34]。这是我国首次在青海共和盆地钻获高温优质干热岩体,实现了我国干热岩勘查重大突破。

2018年,恒泰艾普(海南)清洁能源发展有限公司成功在琼北地区深度4387 m处钻获超过 $185 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温干热岩^[3](非稳态测温)。

2019年11月,中国煤炭地质总局水文地质局中深层地热“取热不取水”技术成果发布会在河北邯郸召开(见图18)。首次成功施工了我国第一眼大口径长距离换热U型对接井,施工了垂直深度2500 m、水平距离684 m、孔径 $\text{O}311 \text{ mm}$ 的对接井。利用外部水流介质在全封闭金属套管中循环获取岩层地热能,探索了在不扰动地下热水系统的前提下获取岩层地热。



图18 中深层地热“取热不取水”技术成果发布会

2020年,中国地质调查局青海共和盆地干热岩勘查与试采取得重要进展^[31,44]。创新探索了高温硬岩高效钻完井技术方法,完成干热岩试采井钻探(见图19);自主研发温度测量仪实现深井测温,采用多种先进测井技术,获得干热岩开发关键参数,准确掌握了深部热储特征及属性;成功开展了干热岩试验开发井试压裂,初步试验形成了干热岩安全造储工艺;研发了高温硬岩钻井、地应力测量、高温测井、微震监测等材料工具和仪器设备。

“十三五”期间,攻关了深部热能(干热岩)提速增效钻探技术,钻探深度超4000 m,温度超 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。开发了高压高能液动锤、全金属涡轮钻等工具,研发了抗 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 水基钻井液体系,研发出低温循环钻井技术与装置,形成了高温硬岩钻探技术方法。同时,开展了中深层地热双水平井取热不取水技术试采工程应用示范,加快推进了该项技术的攻关进程。

1.5 水平定向钻探

2016年至今,中国地质调查局勘探技术研究所

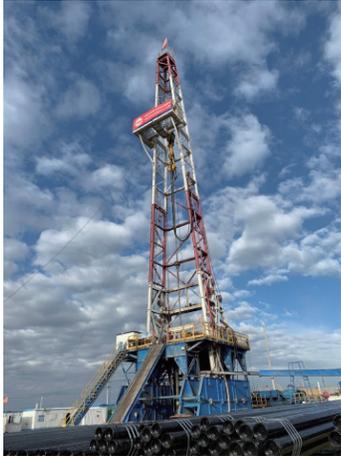


图19 干热岩试采井GH02井

依托高精度定向钻井中靶导向技术——“慧磁”中靶系统,开发出多井组对接技术,实施了土耳其贝帕扎里5期的46个三井组对接井、6期的33个三井组对接井和卡赞1~3期天然碱对接井采矿工程的99个三井组对接井^[3,23],见图20;2019年与美国PACIFIC SODA公司开展了水溶采矿的定向对接井技术咨询服,见图21;2020年,助力海域天然气水合物第二轮试采实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越^[43]。

2019年5月,广东省湛江市通明海畔,我国大陆最长海底成品油管道定向钻穿越成功,4071 m管道(管径 $\Phi 508$ mm)刷新中国大陆海底定向钻长度纪录。

2019年,中国地质调查局勘探技术研究所针对浅软地层造斜率低的难题,创新性提出大弯角、高垫块、超短螺杆马达造斜钻具组合,探索出了一套定向钻进、扩孔钻进、动力导向下管施工工艺,大幅度提升软弱地层的造斜能力和造斜稳定性^[43],探索出了海域水合物浅软地层大直径高效造斜的钻具组合和成井工艺,为第二轮水合物试采水平井方案设计提供了关键依据和关键钻井技术。

2019年9月,中煤科工集团西安研究院有限公司成功研制了ZDY15000LD型定向钻进装备、无缆大通孔高强度钻具、泥浆脉冲无线随钻测量系统,在神东保德煤矿实施的沿煤层超长定向钻孔成功贯穿工作面,完成主孔深度3353 m沿煤层超长贯通定向钻孔(见图22),创造了沿煤层定向钻孔新的孔深纪录^[21]。



图20 土耳其卡赞天然碱矿



图21 美国定向对接井技术服务

“十三五”期间,定向钻探方面走向了更高级的阶段,攻克了高精度对接连通井关键技术,研发的

“慧磁”高精度中靶导向系统不断拓展其应用领域范围,实现水合物试采监测井与水平井间距的精准测

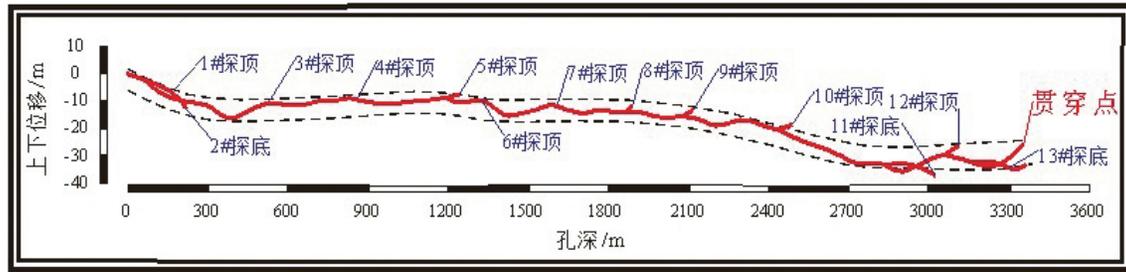


图22 超长贯通定向钻孔轨迹

量与控制。研制深海浅软地层定向造斜工具及技术,实现了深海浅软地层大直径、高曲率水平井的高质量建井。沿煤层定向钻孔创造了新的孔深纪录。

1.6 矿山抢险救灾

2016年1月29日,山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故发生36 d后,被困井下的4名矿工,通过大直径救援钻孔成功获救。大直径救援钻孔采用空气潜孔锤正循环钻井工艺方法,一开:采用旋挖钻机钻进口径 $\Phi 1250$ mm、深度8 m的孔口,下 $\Phi 1200$ mm护筒;二开:继续用旋挖钻机钻进口径 $\Phi 1000$ mm、深度到54 m,下 $\Phi 850$ mm套管固井;三开:采用 $\Phi 711$ mm潜孔锤,深度到195 m,下 $\Phi 600$ mm套管,下深185 m固井;四开:采用 $\Phi 580$ mm潜孔锤直接打到底,结果由于没有打导向孔, $\Phi 580$ mm孔段未直接透巷,在井下被困人员的配合下施工找到救生孔。因 $\Phi 580$ mm孔段无法再下护壁套管,只得采取绳索直接升井;钻机设备主要采用宝峨RBT90和雪姆T200^[45]。

2021年1月24日,山东笏山“1·10”金矿爆炸事故发生14 d后,小直径生命保障孔顺利透巷,为救援赢得宝贵时间,11人从风井内提升至地面获救。小直径生命保障孔采用空气潜孔锤正循环钻井工艺方法和螺杆马达+PMWD纠偏。一开:用 $\Phi 311$ mm潜孔锤钻进穿过覆盖层后下入 $\Phi 245$ mm护筒;二开:用 $\Phi 216$ mm潜孔锤钻进(部分钻孔进行纠偏),下入 $\Phi 178$ mm套管固井;三开:用 $\Phi 152$ mm潜孔锤进行透巷。钻机设备主要采用雪姆T130和T200、徐工XSC1200、正远SL1000、金科JKS800。

“十三五”期间,矿山抢险救灾成功救援实践表明,“小直径生命保障孔+大直径救援井”的模式是进行矿山灾害救援的一种有效途径。但现有的大部分钻井救援装备为进口装备,且这些装备不能满足我国矿山灾害事故应急救援要求,所以亟待研发适

用于矿山灾害事故应急救援的先进钻井装备来解决现存问题,进一步提升我国钻井救援能力。

1.7 其他钻探技术方面

2016年,中国地质调查局探矿工艺研究所针对覆盖层钻孔易垮塌、岩心松散易被泥浆冲失和钻孔漏失等钻进技术难题,将常规的回转取心钻进方法与潜孔锤跟管钻进优化组合,形成了一种有效的覆盖层钻探新方法——空气潜孔锤取心跟管钻进技术^[23]。

2017年12月,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心与贵州111地质大队合作实施完成了贵州省首个基岩水井水力压裂实验工程,完井井深178 m,含水层为三叠系中统关岭组灰岩,地下水类型为溶洞-裂隙水,总压入清水量 113.3 m³,压裂作业后,经过72 h抽水试验结果显示,该井稳定出水量由不到 96 m³/d,增加到超过 235 m³/d。

2018年10月,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心自主研发了“一孔同径、分层成井、分段洗井、分层抽水、实时监控”的地下水分层勘查技术,已经在10余个省份的近40个地质调查、科研项目中推广应用。

2020年,安徽省地质矿产勘查局313地质队承担了中国石油西部钻探所属新疆克拉玛依准格尔盆地玛北油田风南4井区7口井施工任务。5月,已顺利完成首口井FNHW4048井施工任务,该井在井深2192 m处开始造斜,造斜段长度638 m,水平段长度1460 m,在2872~3447 m水平段采用顶驱+旋导钻进工艺;设备采用河北永明地质工程机械有限公司联合研发的5000 m多功能交流变频电动钻机(ZJ50/3150-ZDB型)。

2020年,国内多家公司推出了土壤地下水取样修复一体化钻机^[46],可进行直推式土壤取心、直推式地下水取样、原位药剂注入式修复及设置环境监

测井。

“十三五”期间,地质钻探工程在绿色勘查、地下水分层勘探、页岩油气勘探等领域中一展身手。覆盖层钻探新方法——空气潜孔锤取心跟管钻进技术研发成功,贵州省首个基岩水井水力压裂工程成功实施,地下水分层勘查技术取得重大突破,土壤地下水取样修复一体化钻机开始量产;地质队转型发展,顺利完井高质量石油定向钻井工程。

2 “十四五”地质钻探技术业务展望

2.1 科技创新与技术装备研发

2.1.1 地质岩心钻探技术装备

生态文明建设和矿业转型发展必须走绿色、低碳、可持续发展之路,在开发中保护,保护中开发。智能地质岩心钻探技术需要构建以绳索取心工艺为主体的智能化、模块化、轻量化钻探装备及配套的高效环保钻探工艺技术^[47]。矿井坑道钻探智能化包括:自动化定向钻机集成控制、多参数随钻测量信息融合、高精度导向控制、冲洗液循环自动控制等方面^[48]。绿色勘查技术需要深化“绿色钻探、以钻代槽、一基多孔、一孔多支”钻探方法。

2.1.2 科学钻探技术装备

(1)外太空科学钻探技术装备。展望在未来深空钻探相关任务中,可根据任务的特点、钻探对象的属性、探测器功耗等影响因素有针对性地选用最合适的钻探方法,研发多元化的钻探取样方法和取心钻具结构,研发钻探过程中工况识别相关技术和具有高度自适应的无人自动控制技术^[49]。

(2)大陆特深科学钻探技术装备。深化地球科学认识和完善地球系统科学研究需要不断提升深部钻探工程技术水平,同时拓展深部资源是国际矿产勘查趋势所在,我国资源勘查也正向深部转移。我国即将启动的地球深部探测工程亟待攻关万米以深科学钻探技术与装备(15000 m),完善地球深部探测技术体系,形成地球深部探测国家战略科技力量,为创新深地科学提供工程技术支撑与保障。

(3)全海域大洋科学钻探技术装备。海洋资源是人类可持续发展不可或缺的重要领域,发展深海资源勘探技术,提升我国深海资源探测能力,自主创新海洋地质钻探取心技术、深海井口吸力锚技术与装备、无隔水管钻探技术与装备、钻孔重返技术与装备等深水深井钻探关键技术,形成海域勘探开发技

术体系,支撑深海科学国际前沿领域取得原创性突破,助力海洋强国建设。

(4)极地科学钻探技术装备。先进的钻探取样技术支撑服务极地科学领域所面临的重大科学问题和研究趋势,加快开展极地探测与采样关键技术和装备研发,探索快速钻进和装备轻便化,优化改进热水取心钻进技术及系统轻型化,深入研究冰岩夹层及冰下基岩取心钻探和孔底驱动循环、暖冰层取心钻进等方面技术和无污染钻进采样装备的自动化^[41,50]。

2.1.3 定向钻探技术仪器

海域天然气水合物作为我国重要的战略资源,加快推进其提高产量、降低成本,实现商业化开采需要进一步研制长距离超高精度中靶仪,攻关套管定向钻井、对接井和群井成井技术,为天然气水合物生产性试采及商业化开采提供工程技术和装备支撑。

深部热能(干热岩)低碳清洁、环境友好且资源潜力巨大,其开发利用需要攻关非取水换热技术装备、耐260℃高温泥浆、高精度井眼轨迹测控工艺与仪器、硬岩高效钻进工艺及配套机具、硬岩水力压裂等工艺技术装备,加快地热能的开发与利用,从钻探工程角度落实国家“3060”双碳目标。

川藏铁路、雅鲁藏布江下游水电开发是国家中长期建设规划的重大工程,其建设难度系数极高,沿线地质条件极其复杂,亟须攻关3000 m水平定向钻探、复杂地层取心等勘查技术与装备^[51],支撑解决重大工程地质安全风险的勘探和治理问题。

2.1.4 矿山抢险救灾钻探技术装备

深化研究“小直径生命保障孔+大直径救援井”的矿山灾害救援模式,制定全国统一的矿山灾害救援钻井技术装备规范,包括:钻井装备和工具、工程方案设计与施工等内容。深入开展套管钻进技术装备、环保可控凝胶注浆材料、随钻注浆机具与工艺等方面研究^[45]。开展适用于矿山灾害事故应急救援的遇险人员定位技术及装备研究。

2.1.5 地质钻探技术工程信息化建设

目前,地质钻探信息化工作起步晚、投入少,信息化程度低,缺乏转换为创新动能的机制。“十四五”期间,国家信息化进入全面推进、快速发展的新征程,自然资源信息化迈入深入推进新阶段,新一轮信息技术革命的快速发展为地质钻探信息化建设提供了先决条件。围绕地质钻探业务信息化、管理信息

化、服务信息化三大应用,应开展地质钻探的大数据、智能化、应用服务、业务管理、网络安全、制度标准等方面重点工作任务。

2.1.6 变革性技术加快推进

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署,国家重点研发计划启动实施“战略性矿产资源开发利用”重点专项。其中提出了战略性矿产勘探开发利用基础研究与前沿技术探索(青年科学家项目),研究内容要求形成战略性矿产成矿新理论,战略性矿产勘探新方法及新设备。

钻探工程技术应基于三个层级推进变革性技术(勘探新方法及新设备)的落地,第一层级为现有技术成熟、未大规模推广的,技术包括:电磁波随钻测量系统、涡轮井底动力钻具、小口径膨胀套管护壁技术、钻探现场实时数据远程传输可视化等;第二层级为急需突破的卡脖子技术,技术包括:旋转导向钻进技术、高温测井技术、轻合金钻杆、各类抗超高温材料、一趟钻套管定向钻进技术等;第三层级为颠覆性、革命性技术,技术包括:毫米波钻探技术、激光脉冲钻井技术、超深井核动力盾构钻进技术、非金属高强度3D打印套管护壁技术等。

2.2 人才团队建设

科技自立自强,人才的质量和数量决定着国家科技水平的高低。构建科学的人才考核评价体系,实施人才培养引进系统工程,实行梯次人才培养机制,巩固和保持传统优势业务领域的人才需求,调整优化拟拓展业务领域人才需求,建设国际化地质钻探人才队伍。加强国家级高端人才培养,形成国际高水平科研团队。

2.3 科技创新平台建设

国家科技项目的申报和科技创新能力建设将逐渐侧重于科技创新平台的支撑作用,加强科技创新平台建设势在必行,包括直接参与到技术研究过程中的平台,如生产力促进中心、国际和省级技术中心和工程技术中心等;以及通过为科技创新提供技术、管理与成果转化等的咨询平台。进一步建设地质钻探“产学研用”技术创新联盟,搭建重要科学实验仪器设备,逐步提升平台的规模与能力。加强应用基础研究,提升理论水平及技术含金量。

2.4 支撑服务能力建设

《钻探工程》、《煤田地质与勘探》、《地质装备》、《西部探矿工程》等期刊坚持学术期刊的办刊方针,

顺应媒体发展趋势;坚持地质钻探工程的行业特色,理论与实践相结合,服务地质钻探工程行业发展。同时,加强中国地质学会探矿工程专业委员会、中国矿业联合会地质与矿山装备分会、中国煤炭学会钻探工程专业委员会等秘书处的队伍建设,拓展专业委员会的工作抓手,做好行业优秀人才、奖励申报等推举、标准制修订和会员发展工作,加强新媒体的行业动态宣传工作,建成一支高素质的支撑服务队伍。

3 结语

展望“十四五”,深入贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想和党的十九大及十九届二中、三中、四中全会、五中全会精神,全面落实《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》,进一步发挥好地质钻探工程技术在新时代地质调查事业中的重要作用,精准对接国家重大需求,迅速找准自身定位,加快推进转型发展,更加主动地为经济社会发展服务。地质钻探工程技术要把握发展新态势,加强与其他学科的交叉融合,促进地球系统科学的发展;加强与新技术的结合,推进钻探技术科学与大数据融合,促进钻探技术科学向现代化方向发展。打造多元化合作模式,将国家重大需求作为推进“产学研用”结合的源动力,充分发挥科研院所、高等院校、龙头企业、典型用户的互补优势,形成协同创新模式,再学习、再认识、再出发,继续在地质钻探新技术研发与应用上创造出更辉煌的明天。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 冉恒谦,梁健,梁楠,等.定向钻井技术引领聚焦深地深海探测——勘探技术所“十三五”科技创新回顾及“十四五”业务展望[J].钻探工程,2021,48(1):7-14.
- [3] 本刊编辑部.2018年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):1-4.
- [4] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000m交流变频电驱岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40-46.
- [5] 范海鹏,吴敏,曹卫华,等.基于钻进状态监测的智能工况识别[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):106-113.
- [6] 丁立钦,王志乔,凌雪,等.深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):

- 122-128.
- [7] 高鹏举,董耀,刘凡柏,等.5000米地质岩心钻机主绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):40-45.
- [8] 沈怀浦,何磊,黄洪波,等.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[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):31-39.
- [9] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.5000米绳索取心绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):46-52,57.
- [10] 欧阳志强,贺建波,石卫民,等.5000米智能地质钻探配套泥浆泵的方案设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):53-57.
- [11] 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.
- [12] 尹浩,梁健,孙建华,等.地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):58-64.
- [13] 张翔,周琴,张蔚,等.小口径涡轮钻具减速器非对称齿轮弯曲强度分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,7(4):80-86.
- [14] 柴麟,张凯,张耀澎,等.小直径垂钻工具推力执行机构性能测试[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):87-93.
- [15] 陈西,沈立娜,杨甘生,等.陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):101-105.
- [16] 丁立钦,王志乔,凌雪,等.深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):122-128.
- [17] 张统得,蒋炳,严君凤.地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):134-139.
- [18] 熊正强,陶士先,刘俊辉,等.延迟交联凝胶研制及其在广西某铀矿堵漏应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):140-144.
- [19] 张金昌,刘凡柏,黄洪波,等.5000米智能地质钻探技术与装备研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):1-8.
- [20] 李超,翁伟,郭坤,等.永磁直驱顶驱钻机转速精准控制的探讨[J].地质装备,2018,19(1):16-18.
- [21] 本刊编辑部.2019年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):1-4.
- [22] 杨明晟,胡远彪.基于Unity3D的岩心钻机模拟操作系统设计与实现[J].有色金属工程,2020,10(9):117-121.
- [23] 本刊编辑部.2016年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):1-3.
- [24] 朱恒银,王强,张正,等.大直径加重管绳索取心技术在页岩气勘探中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):160-164.
- [25] 梁健,顾艳红,岳文,等.科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):60-66.
- [26] 赵建刚,王雪竹,王琪,等.超高温高压流变仪的研发及应用[J].钻探工程,2021,48(5):83-87.
- [27] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
- [28] 许洁,乌效鸣,王稳石,等.松科2井抗超高温钻井液技术[J].钻井液与完井液,2018,35(2):29-34,39.
- [29] 中国地质学会2018年度十大地质科技进展[J].地质论评,2019,65(2):430,437.
- [30] 张飞宇.全液压排管机动力学特性研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [31] 本刊编辑部.2020年探矿工程十大新闻[J].钻探工程,2021,48(1):3-6.
- [32] 翟育峰.西藏甲玛3000m科学深钻施工技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.
- [33] 刘振新,翟育峰,宋世杰,等.川西甲基卡锂矿3000m科学深钻关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):29-32.
- [34] 本刊编辑部.2017年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):1-3.
- [35] 朱芝同,刘晓林,田烈余,等.大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):8-15.
- [36] 秦如雷,许本冲,王嘉瑞.海洋钻井钻柱升沉补偿系统分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):22-27.
- [37] 王志刚,胡志兴,李小洋,等.水力喷射微小井眼技术用于海域水合物钻探的可行性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):30-35.
- [38] 王偲,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.
- [39] 熊亮,谢文卫,卢秋平,等.我国深海钻探重入钻孔技术优选及设计思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):1-7.
- [40] 熊亮,谢文卫,张伟,等.跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):16-22,35.
- [41] 张楠,王亮,Pavel Talalay,等.极地冰钻关键技术研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):1-16.
- [42] 李鑫森,张永勤,尹浩,等.水平对接井钻井技术在天然气水合物试采中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):13-17.
- [43] 叶建良,秦绪文,谢文卫,等.中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J].中国地质,2020,47(3):557-568.
- [44] 中国地质学会2020年度十大地质科技进展[J].地质论评,2021,67(2):339,366.
- [45] 杨涛,杜兵建.山东平邑石膏矿矿难大口径救援钻孔施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):19-23.
- [46] 孙平贺.直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究[J].钻探工程,2021,48(1):95-102.
- [47] 薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):9-14.
- [48] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J].煤炭学报,2020,45(6):2217-2224.
- [49] 李谦,高辉,谢兰兰,等.月球钻探取样技术研究进展[J].钻探工程,2021,48(1):15-34.

- [50] 张哈,陈晨,Pavel Talalay,等. 极地深部冰层取心钻探孔壁水压致裂研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(11):5-11.
- [51] 张恒春,刘广,吴纪修,等. 川藏铁路3000m水平定向钻井技术方案[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.

致谢:

本文中“十三五”地质钻探工程技术发展回顾信息主要来自探矿工程十大新闻、作者平时掌握和关注的行业信息,同时得到了各有关单位的专家和学者的帮助,在此表示衷心地感谢! 由于作者撰稿的时间限制和能力限制,本文中未提及的领域重要技术和成果,还请各位专家理解和支持。