

“十四五”我国地质岩心钻探技术装备 发展现状及趋势分析

梁健^{1,2,3}, 李小洋^{1,3}, 周红军^{1,3,4}, 车延岗^{1,2,3},
宋韦剑⁵, 刘蓓⁶, 侯岳^{1,3}, 李鑫淼^{1,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 中国地质学会探矿工程专业委员会, 天津 300399; 3. 自然资源部地质钻探找矿装备创新中心, 天津 300399; 4. 《钻探工程》编辑部, 北京 100037; 5. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083; 6. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 科技创新是驱动地质岩心钻探工程发展的核心动力。本文系统总结了我国地质岩心钻探装备在“十四五”期间的创新成果, 深入分析了其发展所面临的政策、经济、技术环境及市场竞争等瓶颈。在此基础上, 文章展望了“十五五”期间以大数据、智能化、绿色低碳为导向的技术装备创新方向与任务, 旨在为国家深地、深海、深空战略的实施提供支撑, 为提升行业科技创新能力与影响力提供参考。

关键词: 地质岩心钻探; 技术装备; “十四五”; 创新发展; 大数据; 智能化; 绿色低碳; 回顾与展望

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0001-14

Analysis of the development status and trends of geological core drilling equipment in China during the 14th Five-Year Plan period

LIANG Jian^{1,2,3}, LI Xiaoyang^{1,3}, ZHOU Hongjun^{1,3,4}, CHE Yangang^{1,2,3},
SONG Weijian⁵, LIU Bei⁶, HOU Yue^{1,3}, LI Xinmiao^{1,3}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, Tianjin 300399, China; 3. Innovation Center for Geological Drilling and Mineral Exploration Equipment, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300399, China; 4. Editorial Office of Drilling Engineering, Beijing 100037, China; 5. Geoscience Documentation Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China; 6. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Technological innovation is the primary driver of advancement in geological core drilling engineering. This paper reviews the innovative achievements in China's geological core drilling equipment throughout the “14th Five-Year Plan” period and analyzes the associated development bottlenecks in policy, economics, technology, and market competition. Furthermore, it provides an outlook on the innovation directions and tasks for the “15th Five-Year Plan” period, focusing on big data, intelligentization, and green low-carbon technologies. The goal is to support the national strategies for “deep earth,” “deep sea,” and “deep space” and to offer insights for enhancing the industry's technological innovation capacity and impact.

Key words: geological core drilling; technical equipment; the 14th Five-Year Plan; innovative development; big data; intelligentization; green and low-carbon; review and outlook

收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-09-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.001

基金项目: 深地国家科技重大专项课题“超万米绳索取心工艺及钻具研制”(编号: 2024ZD1000901)

第一作者: 梁健, 男, 汉族, 1980年生, 中国地质学会探矿工程专业委员会秘书长, 自然资源部科技领军人才, 正高级工程师, 钻探工程专业, 博士, 长期从事地质钻探找矿技术装备研发工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, liangjian_cniet@qq.com。

引用格式: 梁健, 李小洋, 周红军, 等. “十四五”我国地质岩心钻探技术装备发展现状及趋势分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 1-14.

LIANG Jian, LI Xiaoyang, ZHOU Hongjun, et al. Analysis of the development status and trends of geological core drilling equipment in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 1-14.

0 引言

在新一轮找矿突破战略行动中,地质岩心钻探是验证矿产资源赋存状态的终极手段。尽管航空重力测量、地球化学填图等技术可实现地表靶区快速圈定,但地下矿山的真实品位、储量及开采可行性,必须通过钻探取样进行最终验证。这一环节直接决定了找矿成果的可靠性和有效性,更是连接勘查理论与工程实践的关键纽带。

“十四五”期间,我国地质钻探领域实现了从装备到技术的全面升级。在装备研发方面,迭代升级的模块化、车载式及履带式液压力头钻机,电动、液压顶驱钻机,电驱立轴钻机,车载式、履带式多功能钻机等装备,覆盖了从浅孔到深孔的全系列需求。例如,模块化钻机凭借轻量化和模块化设计,解决了高海拔等难进入地区设备运输难题,隧道勘察水平孔用岩心钻机在复杂地层中实现精准定向钻探等^[1-2]。在技术创新方面,持续改进绳索取心钻进技术,最深钻孔深度突破4000 m,显著提升了深部资源勘查效率,支撑构建了深部地质取心及数据采集体系^[3];反循环取样技术通过实时获取岩屑样本,在异常区浅中部普查中展现出高效低成本优势^[4]。两种技术在钻进深度和钻探效率方面的互补应用,为不同勘查阶段提供了灵活的钻探技术方法选择。例如,西藏罗布莎矿区通过深孔绳索取心钻探验证了铬铁矿深部延伸稳定性,青海、新疆等地锂矿通过反循环技术快速圈定矿体范围,为找矿突破提供了技术支撑。同时,干热岩勘查高温硬岩定向钻探技术实现重大进展,单井深度突破4000 m^[5]。在绿色勘查方面,加速泥浆不落地系统、新能源电动钻机等装备的推广应用,使钻探作业对生态环境的扰动大幅度降低。得益于钻探技术装备迭代升级,“十四五”期间资源勘查成效显著,铜、锂资源量大幅增加,稀土、铌钽等战略矿产实现重大突破^[6],西藏甲玛铜矿通过深孔钻探新增储量超百万吨^[7]。

随着找矿工作向深部、复杂成矿带和难进入区域的延伸拓展,“十五五”期间钻探技术装备面临多重挑战:在深部科学钻探创新研发方面,高温高压高地应力等苛刻环境下的钻头寿命、钻杆强度,取心钻具高效性、可靠性等核心技术亟待突破。在绿色勘查、低碳减排等技术升级方面,生态敏感脆弱区勘查需进一步降低扰动,研发新能源钻机、环保钻探冲洗液、废浆无害化处理技术、低噪声装备等,

并加快推广应用,同时建立钻探全流程低碳减排和污染防控标准。在自动化操作、智能化控制等转型发展需求方面,大数据、人工智能(AI)技术在钻探施工中的应用尚处初级阶段,实时数据分析与决策支持系统亟待构建,研发自动化智能化钻机、取样机器人等高端装备,全力支撑“星空地海井”三测体系“井”维度建设。为此,本文通过分析“十四五”期间我国地质岩心钻探技术装备的发展情况,总结存在的差距与问题,提出未来发展趋势及措施建议,展望“十五五”科技创新的发展方向 and 主要任务。

1 “十四五”期间地质岩心钻探行业发展环境

1.1 政策环境

“十四五”期间,我国《全国矿产资源规划(2021—2025年)》明确将新一轮找矿突破战略行动列为保障能源资源安全的核心任务,围绕锂、稀土、铜等战略性矿产强化勘查力度^[8]。自然资源部等部门通过《矿产资源法》(第三次修订)《新一轮找矿突破战略行动纲要(2021—2035年)》《关于加强装备建设的指导意见》《首批找矿装备升级、研发、推广、替换清单》等文件,构建了“基础地质调查+技术攻关+绿色勘查”三位一体的政策体系。这些政策明确了到2035年形成现代化勘查装备体系的目标,将通过资金支持、技术标准制定和产业协同机制,引导岩心钻探装备向智能化、绿色化方向升级。

1.1.1 绿色低碳转型

2024年,自然资源部发布的《关于加强装备建设的指导意见》将绿色勘查列为核心任务,要求装备具备“高效低扰”特征。例如,推广新能源电动钻机、环保冲洗液循环系统,使钻探作业对生态敏感区的扰动降低40%以上,碳排放降低60%以上。政策通过设定装备能耗标准、污染排放限值,倒逼研发低噪声、模块化钻机,如某锂矿勘查中应用的车载式反循环钻机,实现了单日钻进效率提升30%,且污染物排放大幅下降^[9]。

1.1.2 技术攻关与国产化替代

针对深部找矿和地质科学研究需求,政策重点支持超深钻探装备研发。例如,“松科二井”工程突破7000 m取心钻探技术后,政策进一步推动13000 m特深科学钻探技术研发,目前国家深地科技专项已经立项启动,鼓励高校、科研院所和企业形成创新联合体,开展有组织科研,形成政产学研用协同

集智攻关的创新生态,突破高温高压钻具材料、智能随钻系统等“卡脖子”技术,推动我国超万米科学钻探关键技术装备和工艺达到国际领先水平^[10]。

1.1.3 产业协同与创新生态

党的二十大报告中明确指出要加强国家战略科技力量与科技领军企业之间的协同创新,各地方政策也倡导“产学研用”深度融合(见图1),建立了多个绿色勘查装备创新中心,通过协同联动推进关键技术攻关。例如,山东省联合高校与企业成立地质勘查投资基金,支持智能化钻机研发^[11];四川省通过矿业权收益分配改革,激励企业投入深部钻探技术攻关^[12]。这些举措推动行业形成“需求导向-技术研发-工程验证-市场推广”的良性循环,培育具有全球竞争力的龙头企业。



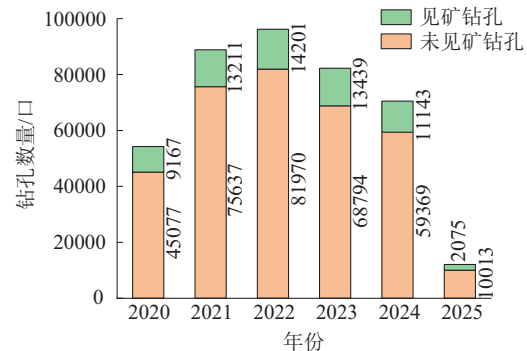
图1 地质钻探行业产学研用循环促进示意

Fig.1 Schematic diagram of the promotion of industry-university-research-use cycle in geological drilling industry

1.2 经济环境

1.2.1 全球地质勘探投入及钻孔数量分布

全球地质勘探投入及钻探工作量的演变与全球经济、能源转型及技术创新深度关联,呈现出资源需求驱动、区域分化显著、技术迭代加速的特征。图2显示了2020—2025年全球地质勘探钻孔数量的变化趋势,图3展示了该时间段内全球地质勘探预算投入的变化趋势^[13]。



注: 2025年仅统计1—2月份

图2 2020—2025年全球地质勘探钻孔数量及钻孔见矿比例

Fig.2 Global number of geological exploration drill holes and percentage of holes that have intersected mineralization, 2020–2025

从2020到2021年,地质勘探钻孔数量急剧增加,增长幅度为63.79%。同时,勘探预算增长幅度为33.64%,2021年的预算金额达到了111.70亿美元。2022年,勘探钻孔数量和勘探投入资金均达峰值,之后的2023年、2024年钻孔数量和投入资金逐年下降,其中钻孔数量分别下降14.49%、14.25%,投入资金减少幅度较低,分别为1.46%、3.30%。从

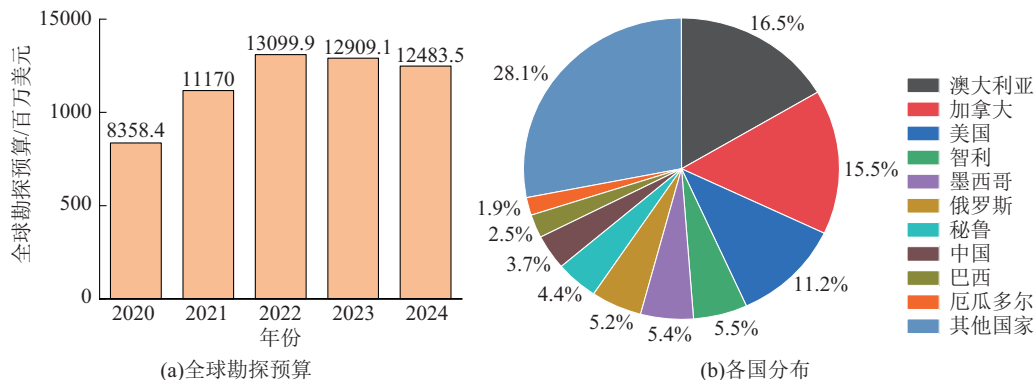


图3 2020—2025年全球地质勘探预算投入及各国分布

Fig.3 Global budgetary inputs to geological exploration and distribution by country, 2020–2025

近5年统计数据来看,见矿钻孔数量占钻孔总数量的14.77%~17.17%,平均见矿率15.60%。从勘探资金投入各国比例来看,前十名依次为澳大利亚、加拿大、美国、智利、墨西哥、俄罗斯、秘鲁、中国、巴西、厄瓜多尔,其地质勘探投入资金总和约占全球的71.9%。主要原因是上述大部分国家在矿产资源种类和资源储量方面都有显著优势,资源勘探投入也与世界经济形势有着紧密关联,且主要分布于铜、钴、金、锂、稀土等战略性矿种勘探^[14-15]。

1.2.2 国内地质勘探投入及钻探工作量

2020—2024年,国内钻探工作量和地质勘查资金投入呈逐年递增趋势(见图4)^[16-19],其中2024年达到顶峰,全年钻探工作量达到了906万米,资金投入为229.57亿元,投入前5位的省(自治区)依次为内蒙古、新疆、甘肃、广东、四川^[20]。2024年的钻探工作量和投入资金稳步增长,有力地推动地勘行业的发展。勘探矿种主要有煤炭、镍、铅锌、稀土、铜、钼、金、铁等^[21]。

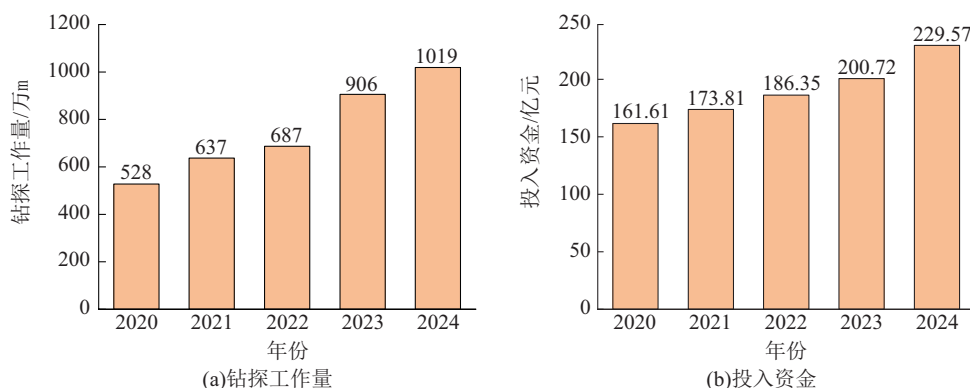


图4 2020—2024年国内钻探工作量及地勘投入情况

Fig.4 Domestic drilling workload and geological exploration investment, 2020–2024

据中国地质学会探矿工程专业委员会调研统计,固体矿产勘探钻孔深度集中在420~1800 m,多数采用绳索取心工艺,终孔口径以N口径($\Phi 76$ mm)为主(占比58%),其次为H口径($\Phi 96$ mm)。油气资源勘探钻孔深度多为650~2350 m,地热(干热岩)资源勘探钻孔深度集中在1100~2630 m,常采用提钻取心工艺,终孔口径以 $\Phi 215.9$ mm和 $\Phi 152.4$ mm为主(占比75%)。

1.3 技术环境

1.3.1 复杂地质条件随钻智能探测与识别系统

无线通信和高精度传感器的技术发展,以及大数据和机器学习等技术的兴起,进一步推动了随钻智能探测与识别系统的发展。基于大量历史钻探数据,融合AI、信息工程、孔底控制工程等理论与技术,构建勘查开发全过程数字化、自动化、智能化的一体化应用平台,有望大幅度提高钻进效率和储层钻遇率,降低钻探成本,实现钻进工况、储层物性的精细刻画。其中我国在智能探测领域的核心专利数量处于第一位,专利公开量占比达96.45%^[22],具体见表1。

表1 复杂地质条件随钻智能探测与识别系统核心专利主要产出国家^[22]

Table 1 Main countries with core patents on intelligent detection and identification systems for drilling in complex geological conditions

国 家	公开数量	公开数量比例/%	被引数量	被引数量比例/%	平均被引次数
中国	1032	96.45	8688	92.30	8.42
美国	11	1.03	274	2.91	24.91
日本	9	0.84	113	1.20	12.56
韩国	9	0.84	104	1.10	11.56
加拿大	3	0.28	85	0.90	28.33
澳大利亚	1	0.09	73	0.78	73.00
伊朗	1	0.09	39	0.41	39.00
法国	1	0.09	30	0.32	30.00
荷兰	1	0.09	30	0.32	30.00
瑞典	1	0.09	19	0.20	19.00

1.3.2 深地复杂地层钻探技术与设备

基于我国深部矿产、地热等资源开发的现实需求,现有装备难以满足5000 m以深地质勘查对高精度岩心采集与地层分析的要求,传统钻机存在功能

单一、自动化程度低等问题,在国家“深地资源勘查开采”重点专项中设立了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”,研发了高性能绳索取心薄壁钻杆、多工艺交流变频钻机、小口径高效取心钻具、孔内信息采集工具、高温环保冲洗液等,成功开展了4000 m以深的钻探取心示范应用(见图5),标志着我国在5000 m钻探装备能力、极端环境适应能力方面取得了突破,为后续超深井工程的实施提供了技术储备^[23]。



图5 5000 m地质岩心钻探装备示范应用
Fig.5 5000m geological core drilling equipment demonstration application

1.3.3 绿色便携式地质岩心钻探装备

基于轻量化、模块化设计研发的便携式地质岩心钻探装备包括轻便化钻机(图6)、泥浆不落地装置及取心器具等,易于拆装搬运,适用于交通不便、施工场地受限等地区的地质勘查取样^[24-25]。研发重点包括:(1)结构、材料优化,提高整体便携性,同时开展钻进过程自动化升级;(2)通过清洁能源驱动、环保冲洗液、泥浆不落地等技术的研发与应用实现绿色勘查;(3)取心技术体系满足不同地质条件、地质需求的高效原位无污染取样;(4)钻机多工艺、多载体集成,实现一机多能,提高复杂地层钻进能力;(5)研发配套的参数监测系统,结合人工智能技术,实现工况诊断、岩性识别等。

2 我国地质岩心钻探装备发展现状剖析

2.1 装备技术水平

2.1.1 “十四五”主要发展成果

2.1.1.1 自动化智能化水平稳步提升

(1)孔口自动化装备

中国地质装备集团有限公司、晋控装备天和众邦公司、河北永明地质工程机械有限公司和英格尔地质装备科技股份有限公司先后成功开发了适用



图6 便携式地质勘探钻机
Fig.6 Portable geological exploration drilling rigs

于地质岩心钻探的液压钳、液压排管机、动力猫道、铁钻工等孔口自动化装备,极大地降低了工人的劳动强度,提高了操作的精准度和安全性。

(2)数据采集与传输

中国地质科学院勘探技术研究所初步集成了地面钻探装备与井下随钻测量系统,实现多源钻探数据实时采集与云端融合,构建“井-地-云”一体化感知网络。基于钻探知识库与大语言模型构建专家智能体(大模型),结合机器学习算法研究工程参数与钻遇地层的特征识别(小模型),驱动地层识别、钻参优化、事故预警三大决策模块,建成钻探调度中枢,实现“采集-分析-决策”闭环,显著提升深地工程等复杂场景的远程决策能力(见图7)。

(3)数据分析与处理

中国地质大学(武汉)、成都理工大学等开展了钻进过程中的大数据分析与应用研究。基于钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理框架和机器学习优化算法,从钻井相关特征参数中选取井径、岩性、钻井液密度、钻压、转速、泵量、上覆压力和孔隙压力等参数,研究不同工况下的钻速预测模型,并结合实钻数据进行优化完善,支撑深部钻探安全高效实施^[26-29]。

2.1.1.2 三深一极、水平定向钻探能力显著提升

(1)深海进入能力取得重大突破

2024年,中国地质调查局牵头建设的“梦想号”大洋钻探船建成入列,集成50余项核心技术,具备大洋科学钻探、深海油气勘探和天然气水合物勘查试采等多种功能,配套了全球首套船载自动化岩心采集传输系统,具有11000 m的全球最深钻探能力^[30]。

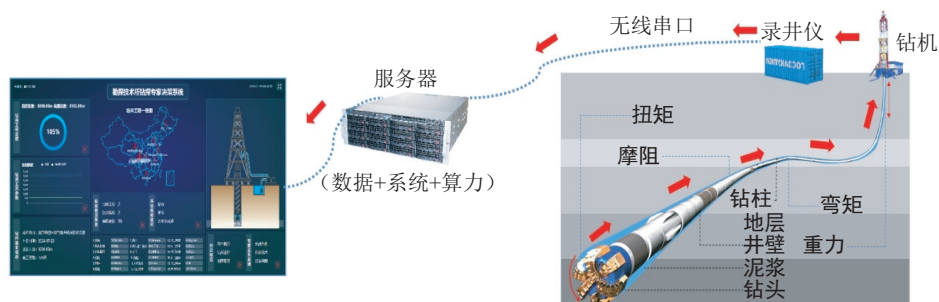


图7 钻探数据采集-传输-决策示意

Fig.7 Drilling data acquisition-transmission-decision making

深海取样装备方面也取得多项突破。2021年,湖南科技大学研发的我国首套“海牛Ⅱ号”海底钻机系统在南海超2000 m水深钻进231 m并进行保压取心,刷新深海海底钻探深度世界纪录^[31]。2022年,深圳大学与四川大学自主研制的深海沉积物(天然气水合物)保温保压取样装备海试成功,首次获得保温保压的深海沉积物(天然气水合物)原位保真样本^[32]。2023年,长沙矿山研究院自主研发的深海岩心取样系列钻机在西南印度洋执行我国多金属硫化物海底矿区调查航次(大洋78航次)任务中,取得重大的突破性成果,创下我国最大钻进深度16 m、完整硫化物岩心长度4.95 m的钻进勘探纪录。10 m和20 m深海岩心取样钻机具有完全自主知识产权,核心部件国产化率100%^[33]。2023年,中国地质科学院勘探技术研究所研发的井底动力硬岩取心钻具,在汕尾海域成功完成了世界首次中空螺杆马达硬岩取心^[34]。

(2) 陆地钻深能力不断延伸

依托一系列科研专项和企业投入,成功研发出适用于陆地不同场景、不同钻深的多类型钻机,钻深能力由3000 m延伸到5000 m^[35-36],并进行了7000 m取心钻机的研发,极大地拓展了我国陆地深部地质勘探的范围。

2021年,中国地质科学院勘探技术研究所牵头研发的“5000米智能地质钻探技术装备”在JZ04地热地质勘探井中成功应用,钻孔深度达到4017.5 m,岩心采取率达到97.08%,实现了钻探装备轻量化、智能化、自动化等目标^[23]。2024年,山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队联合中地装集团研制的大型深部钻探装备ZJ50DB/XD70DB型钻机,通过验收并投入使用。该装备可实现5000 m标准化油气、新能源钻井和7000 m取心钻探,具备多领

域应用、多工艺顶驱钻进、大口径管柱作业、自动化一键作业等功能^[30]。

近年来施工了多个3000 m深度的取心钻孔,如西藏甲玛、川西甲基卡、辽宁丹东、湘南、山东招远矿区等,采用的钻机包括立轴式岩心钻机、电动顶驱钻机等^[37-41]。2023年,山东省第三地质矿产勘查院使用XD-40DB钻机完成小秦岭金矿田南中矿带3500 m深部探测项目,终孔孔深3491.90 m,为河南金属矿产勘查第一深孔,也是小秦岭金矿田南中矿带南部矿区唯一一口成功贯穿小河断裂带的钻孔^[42]。

(3) 水平定向钻探及随钻测量装备逐步推广

水平定向取心钻具在川藏铁路、引大济岷等工程中成功应用^[43-44]。2024年,中国地质科学院探矿工艺研究所承担的国家骨干水网引大济岷工程超长水平定向勘察钻孔项目,钻孔深度突破2000 m,采用全国产化水平定向岩心钻机施工,全孔岩心采取率96.3%,并创新性地构建了多种水平定向钻进全孔取心勘探工法体系,为国家重大工程地质条件认识与选线规划提供了重要支撑^[30]。小排量随钻测量系统逐步在地质钻探领域推广应用,泥浆泵排量有效控制在300 L/min以下,提高了小口径钻孔轨迹控制精度。

(4) 月球及极地等极端环境钻探装备取得突破

2024年,中国嫦娥六号完成人类首次月球背面表层钻探取样任务,成功采集并返回1953.3 g月壤样品^[45]。同年,在中国第40次南极考察期间,吉林大学和中国地质大学(北京)联合俄罗斯海洋与地质矿产资源科学研究所组成联合科研小组,在中山站以南约25 km处,利用我国自主研发的新型铠装电缆悬吊式电动机械深冰及冰下基岩取心钻机(IBED)成功钻穿了545 m厚的冰层及冰岩夹层,获

取了连续冰芯样品和0.48 m的基岩样品^[30,46]。

2.1.1.3 绿色环保理念深入践行

“十四五”期间,我国在绿色勘查法规与标准体系建设方面取得了显著成效,与绿色勘查有关的一系列法律、法规、规章、标准等相继发布,从国家层面、地方层面至企业层面因地制宜制定绿色勘查工作相关制度规范,初步构建了绿色勘查法规与标准体系框架,极大地推动了绿色钻探技术的实施^[2]。

尤其是环保冲洗液和泥浆固控装置应用效果显著^[47],废弃冲洗液无害化处理技术装备逐步推广。北京探矿工程研究所针对水敏性地层、松散煤

层和盐膏层容易出现坍塌、缩径、掉块等难题,成功研发了成膜防塌环保冲洗液和抗盐膏侵成膜环保冲洗液,有效提升了复杂孔段的护壁能力^[48]。此外,还研发了小型一体化冲洗液固控不落地处理系统(见图8),关键设备包括小型离心机、振动筛和远程在线监测与控制系统,完全满足冲洗液循环、固控、配制功能,有效清除冲洗液中5 μm 以上的固相颗粒,维护冲洗液性能,并使用岩屑收集装置实现不落地循环净化的功能,有效降低冲洗液消耗和环境污染^[49]。



图8 冲洗液固控循环系统

Fig.8 Mud solid control circulation system

2.1.2 存在的差距

国外先进的地质勘探钻机普遍具备高度自动化和智能化的特点。例如,Epiroc、Sandvik的钻机能够实现全流程自动化操作,从钻孔定位、钻进过程控制到岩心采集与处理,均可通过智能化系统精准控制。同时,借助先进的传感器技术和数据分析算法,这些钻机能够实时监测钻进状态,对可能出现的故障进行预警,并自动调整钻进参数以提高钻进效率。我国目前多数钻机的自动化程度有限,智能化功能尚处于探索阶段,在远程操控、智能化决策等方面与国际先进水平差距较大。

尽管我国在地质钻探装备的研发上取得诸多成果,但在深部钻探高端装备制造工艺与材料方面,与国际先进水平仍存在差距。例如,在高端钻机的关键零部件制造上,国外先进企业凭借高精度的加工设备和成熟的制造工艺,生产出的零部件精度更高、可靠性更强。在材料领域,国外企业在材料研发上投入巨大,其生产的材料具有更高的强度、耐磨性和耐腐蚀性。我国自主生产的同类材料在性能上存在一定差距,导致国产钻机在使用寿命

和极端条件下的作业能力方面相对不足,用于制造钻具、钻头的关键部件的高端材料部分仍然依赖进口。

在绿色钻探方面,一些新技术、新方法的推广缺乏示范平台,在不同场景、地质条件下的应用方法组合和装备配备需深入探索。同时,我国地勘队伍装备陈旧,绿色先进装备配备少,研发保障能力不足,难以有效满足绿色钻探需求。此外,绿色钻探所需技术和人力投入大,但勘查资金支持不足,缺乏独立的经费核算体系。部分勘查人员对绿色钻探理念理解不深,存在将地质矿产勘查与生态破坏简单对等的观念,导致绿色钻探设计与工程实施脱节。

2.2 装备产品类型与结构

2.2.1 市场现状

2.2.1.1 钻机

地质勘探用钻机类型主要有地质岩心钻机、地热水井钻机、浅层取样钻机、工程勘察钻机、多功能多工艺钻机等,各类型钻机保有量占比见图9。其中岩心钻机作为矿产勘查的主力钻探装备,市场保

有量最大。总体呈现以下两个特点:(1)能力齐全规格丰富。钻探能力覆盖0~5000 m,回转型式涵盖转盘、立轴、动力头和顶驱,驱动型式涵盖机械传动、液压传动和电传动,装载型式涵盖滑撬、步履、履带、车装、拖挂和散装。(2)供应基本自主可控。除全液压岩心钻机(动力头和便携式)有部分国外品牌外,其他岩心钻机均为国产,国产品牌自主供给率超过96%。国外品牌占比约20%,主要为瑞典Epiroc、美国Boart Longyear、加拿大Hydracore。国内地质勘探钻机生产商主要有连云港黄海机械股份有限公司、晋控装备天和众邦公司、中国地质装备集团有限公司、广东英格尔地质装备科技股份有限公司、四川诺克钻探机械有限公司、普华英工(山东)装备制造有限公司等,年销售额5~7亿元,出口占比25%~30%,多为“一带一路”沿线国家。

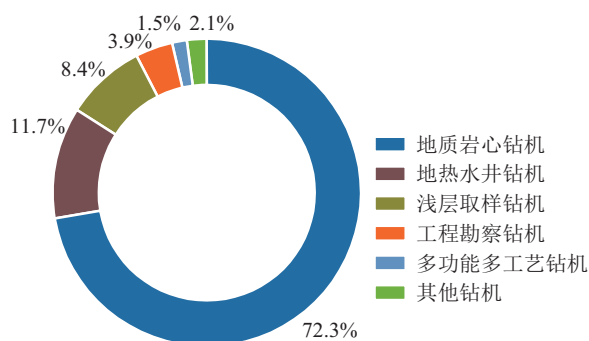


图9 各类型钻机保有量占比

Fig.9 Percentage of Rig Ownership by Rig Type

2.2.1.2 孔内钻探工具

随着钻具材料、热处理工艺和加工能力的不断提升,国内生产的钻探工具占据市场份额的绝对优势地位。国内主要的钻探工具制造企业有金石钻探(唐山)股份有限公司、中地装(无锡)钻探工具有限公司、无锡锡钻地质装备有限公司等,年销售额为8~10亿元,出口约占33%,出口国家集中于中亚、中东、东南亚、澳洲及南美等区域。根据相关数据,定向钻杆、加重钻杆、扶正钻具、不对称钻具等定制款钻具的销量逐年攀升。虽然我国在电磁波随钻测量系统、涡轮井底动力钻具、轻合金钻杆、小口径膨胀套管护壁、钻探现场实时数据远程传输可视化等技术已成熟,但未大规模推广。

2.2.2 存在的问题

2.2.2.1 国内地质岩心钻机自动化、智能化基础薄

弱,与国外差距较大

自动化和智能化是地质岩心钻机未来发展的重要方向。欧美发达国家一直引领地质钻探装备的发展,其中美国Boart Longyear公司、瑞典Atlas Copco公司陆续完成岩心钻机的自动化和智能化升级,送钻精度大幅提升,钻杆操作一键完成,大幅度提高了取心效率、取心质量,降低了工作强度。我国地质钻探技术装备的自动化和智能化刚刚起步^[50]。

2.2.2.2 固体矿产勘查深度不断增大,高端测量仪器的可靠性与环境适应性有待深入研究

新一轮找矿突破战略行动大力勘查深部隐伏矿,3000 m以深钻孔逐步增多,孔底的温度和压力也越来越高。因此,高温高压工况、复杂的地层等也对测量仪器提出了更高要求。当前国内的钻井液高温性能测试仪、随钻测量系统(MWD)和定/导向钻进系统等仅有中低端产品,在耐温耐压、测量精度和工作稳定性等方面与国外同类型产品相比,还存在较大的差距^[51-52],需要进一步深入研究。

2.3 产业规模与市场格局

从地质勘查投入来看,2020—2024年中国地质勘查投入规模呈现波动增长态势,累计全国地质勘查投入达到了952亿元^[53]。地质钻探作为地质勘查的重要手段,其市场规模也随着地质勘查投入的增加而扩大。从地质钻探市场来看,近年来呈现出稳步增长的趋势,在基础设施建设、矿产资源开发等领域需求的推动下,市场增长率保持在较高水平。预计中国地质勘查行业市场规模将以约3%的复合增速保持增长,2028年市场规模有望突破1500亿元。

国内地质勘查行业企业数量众多,行业集中度较低,主要有专业勘查技术服务公司、地方性地质勘查单位和大型矿业公司下属勘查企业三大类^[54]。从市场分布来看,东部沿海地区由于经济发展水平较高,市场需求较大,市场规模占全国总量的比例较高,特别是长三角、珠三角和环渤海等经济圈,市场规模较大,竞争也较为激烈;中西部地区市场份额相对较少,但拥有丰富的矿产资源,随着国家政策的支持和区域经济的发展,对地质钻探的需求也逐步增加,再加上国家加大对中西部地区基础设施建设的投入,需要进行大量的地质勘探工作,从而带动了地质钻探行业的发展。

2.4 面临的挑战

2.4.1 技术创新瓶颈

在核心部件方面依然存在“卡脖子”现象,如超高温高压冲洗液测试装置、耐高温随钻测量仪器用到的高端传感器、精密轴承等仍依赖进口,该成本占装备总价值的30%以上,压缩了国产装备的利润空间。在自动化智能化方面较为滞后,目前国内半自动化/局部自动化钻探装备占比逐年提升,但整体占比仍然较低,而挪威、加拿大等国已达40%^[55]。虽然有部分钻探现场通过数字司钻驾驶舱、远程操控等方式提升了钻探效率,但仍处于初级探索阶段,没有形成真正的生产力^[56]。在绿色钻探方面还有待提高,环保冲洗液普及率不足20%,泥浆不落设备使用率不足50%,而欧盟要求2030年新型工业设备配备零排放系统的比例不低于40%,届时国内企业的钻探装备出口将会面临壁垒。

2.4.2 地质勘探人才出现结构性失衡与培养断层

截至2024年底,全国地勘单位在职人员40.24万人,其中技术人员14.13万人,但高级技术人员仅占37.7%,且50岁以上占比超40%。钻探装备研发需要跨地质、机械、材料等多学科人才,而高校相关专业招生规模却逐年下降。由于野外作业环境艰苦,一线工作人员流失严重,青年从业者占比不足25%,大部分现场人员年龄超过50岁,出现青黄不接现象。

2.4.3 产业配套不完善和市场竞争加剧

国内钻探装备制造企业超过2000家,但规模以上企业不足5%,企业标准众多,导致零部件标准化率低,维修更换成本高。例如,山西汾西某矿区因采购的钻头规格不统一,造成单孔施工周期延长30%。同时,80%以上的产品集中于固体矿产勘查,而地热、页岩气等新兴领域占比不足10%,市场扩张能力较弱,逐渐趋于饱和,内卷严重,导致全行业毛利率不足20%,低于国际平均水平10个百分点。在国际市场方面,因俄乌冲突、关税波动及碳排放等因素,2024年我国钻探装备出口额同比下降12%,海外市场销售突破有限。

3 我国地质岩心钻探装备发展趋势预测

3.1 自动化智能化趋势

随着智能控制技术与自动化技术的发展,现代钻探装备将出现革命性的智能化转型升级。以人

工智能、工业物联网、大数据分析和深度学习为代表的先进技术,正在重塑地质岩心钻探装备的智能化架构,使其具备自主决策、实时状态感知和动态自适应调节等高级功能(如图10所示)^[57],从而显著提升钻探作业的精准性、可靠性和安全性。

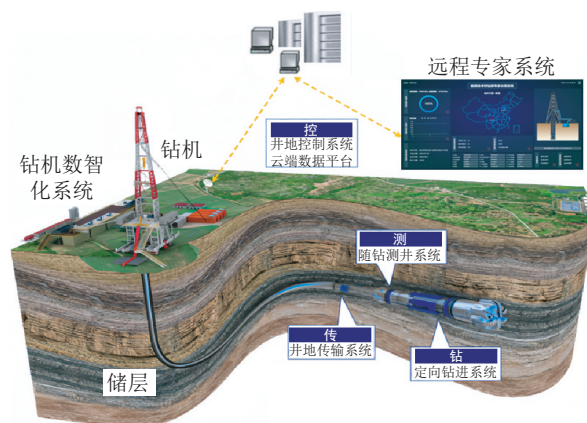


图10 智能钻探系统组成示意^[57]

Fig.10 Schematic diagram of intelligent drilling system composition

在钻探装备智能化进程中,智能钻机、智能泥浆泵、智能固控系统及智能泥浆配制设备等关键子系统已取得突破性进展,这些智能化装备通过工业互联网平台实现系统级协同,构建了具有自感知、自决策、自执行能力的智能钻探系统。自动化操作不仅大幅降低了人工操作风险,更通过工艺参数的数字建模与实时优化,极大地提升了钻孔轨迹的精准度。从技术经济角度来看,智能控制与自动化技术的深度融合正在产生显著的协同效应,有效降低能耗和非生产时间,提升作业效率^[58]。这种技术变革不仅推动了钻探行业向智能化、数字化方向发展,更通过精准控制和工艺优化,为绿色低碳钻探提供了技术路径,代表着未来地质勘探装备的发展方向。

3.2 高端化与定制化趋势

随着全球能源勘探、地质调查和工程建设的需求日益多元化,钻探装备正朝着高端化与定制化方向加速发展——高端化聚焦技术指标提升与智能化应用(见图11),定制化则致力于提供差异化的客户解决方案,共同驱动行业转型升级。在此背景下,我国地质勘探开发已全面挺进资源储量巨大但开发难度极高的深层、深水及非常规领域,亟需围

绕工程技术需求和关键装备研发开展科技攻关。通过突破“卡脖子”核心技术难题,实现关键技术的自主可控,不仅能满足深层、深水和非常规油气资源的高效勘探开发需求,更能推动装备制造与能源开发体系的协同创新,最终构建起支撑国家资源安全的核心技术屏障。



图 11 钻杆自动化生产线(来源:金石钻探(唐山)股份有限公司)

Fig.11 Drill pipe automated production line (from Jinshi Drilling Tangshan Co., Ltd.)

钻探装备的高端化与定制化是行业应对市场分化的必然选择。未来,供给端需以技术创新为核心,以客户需求为导向,通过智能化升级与柔性化生产构建竞争优势,推动钻探装备向高效、绿色、个性化方向发展。

3.3 绿色环保化趋势

世界能源体系正处于向“绿色智慧能源体系”转变的进程中,环保型冲洗液与绿色、低碳钻探技术成为核心发展方向,旨在减少环境污染、降低能源消耗并提升资源利用效率。全球年钻井作业量超5万口,仅我国每年产生的废弃钻井液就超过百万吨^[59]。传统钻井液因含有高分子材料、油基成分等污染物,易导致土壤退化、地下水污染等环境问题,影响范围可达上百平方千米。为应对这一挑战,新一代环保冲洗液以可生物降解、低生态毒性、高性能为研发方向,通过优化配方体系(如合成基、水基及纳米增强型冲洗液),显著降低对生态环境的负面影响。未来,高性能生物基材料、智能响应型冲洗液将成为技术突破点,进一步推动冲洗液向绿色化、功能化发展。同时,通过加强对钻探废弃物的处理和回收,进一步减少其对周边土壤、水资源、空气等环境的不良影响。结合新时代的低碳技术——采用电动钻机、混合动力系统及可再生能源供电,减少化石燃料依赖,降低碳排放,不断提高绿色钻采水平。

绿色钻探技术的推广应用不仅契合全球环境、社会与治理要求,更能为企业带来显著的经济效益与品牌溢价。通过降低环境合规成本、提升能源利用效率,绿色环保技术正成为地质勘探行业可持续发展的关键竞争力^[60]。未来,随着电动化、数字化与生物材料等技术的深度融合,钻探行业将加速向“零污染、低能耗、高智能”的目标迈进,为我国资源安全与生态安全提供双重保障。

4 促进我国地质岩心钻探装备发展的对策建议

4.1 加强政策支持与引导

地质岩心钻探装备是矿产资源勘探、能源开发及地质科学研究的关键技术装备,其发展水平直接影响国家资源保障能力和地质勘探效率。然而,目前我国地质钻探装备仍面临核心技术依赖进口、高端装备供给不足、产业协同创新不足等问题。为此,需加强政策支持与引导,完善产业扶持政策与资金投入机制,推动行业高质量发展。具体建议如下:

(1)政府应设立专项扶持资金,重点支持钻探装备研发创新、关键技术攻关及产业化应用。可通过税收减免、研发费用加计扣除等政策,降低企业创新成本。同时,鼓励金融机构提供低息贷款、融资担保等支持,引导社会资本参与新型高端钻探装备的研发,形成多元化资金投入机制。

(2)建议行业主管部门或协会牵头制定《地质岩心钻探装备产业发展规划》,明确技术路线和发展目标。支持企业、高校和科研院所联合建立创新中心,推动关键核心技术突破。鼓励龙头企业牵头组建产业联盟,促进产业链上下游协同发展,提高国产装备的市场竞争力。

(3)目前我国地质钻探装备的标准体系尚不完善,部分标准滞后于技术发展。应加快制定和修订钻探装备的技术标准、安全规范和环保要求,使其全面与国际标准接轨,从而有力促进我国钻探装备向“一带一路”沿线国家出口。同时,加强行业监管,建立质量认证体系,确保装备可靠性和安全性,提升国产钻探装备的国际认可度。

4.2 强化技术创新与人才培养

(1)技术创新方面,应建立更加完善的科研投入体系,重点支持智能化钻探装备、特深孔钻探技术等前沿领域的研发工作。通过设立专项科研基金、提供税收优惠等方式,鼓励企业加大研发投入。

同时,要着力推动产学研深度融合,支持企业、高校和科研院所组建创新联合体,共建研发平台和成果转化基地。特别要重视核心技术的自主可控,针对“卡脖子”技术实施重点攻关,加快国产高端钻探装备的研发进程。通过建立更加开放的创新生态,促进技术交流与合作,不断提升我国钻探装备的技术水平和市场竞争力。

(2)人才培养方面,我国地质钻探领域既缺乏高层次的研发人才,也面临技能型操作人才不足的问题。为此,需要构建多层次、全方位的人才培养体系。在高等教育层面,应优化相关学科专业设置,加强地质工程、机械电子、材料、人工智能等交叉学科建设,培养更多复合型技术人才。在职业教育方面,要深化产教融合,通过校企合作培养适应行业发展需求的高素质技术工人。完善企业内部培训机制,建立有效的人才激励机制,为技术人才提供良好的发展空间。此外,还应加大国际人才引进力度,通过专项计划吸引海外高端人才,带动国内技术水平的提升。

4.3 优化产业结构与市场布局

当前,我国地质勘探装备产业面临着产业结构分散、市场布局不合理、国际竞争力不足等突出问题,亟需通过优化产业结构与市场布局来提升整体发展质量。

在产业结构优化方面,应当着力推动产业整合与企业协同发展。针对当前行业内企业规模偏小、同质化竞争严重的问题,鼓励优势企业通过兼并重组、战略合作等方式整合行业资源,培育具有国际竞争力的龙头企业。同时,支持中小企业走“专精特新”发展道路,在特定细分领域形成技术优势。要重点加强产业链上下游协同,推动装备制造企业、勘探单位、科研院所建立产业技术创新联盟,形成产学研用紧密结合的创新体系。通过建立产业协同发展机制,促进技术、人才、资金等要素的优化配置,提升整个产业链的协同效率。

在市场布局拓展方面,需要实施更加积极的国内外市场开发战略。在国内市场,要抓住新一轮找矿突破战略行动机遇,推动装备制造企业与地勘单位深度合作,建立示范性项目,带动高端装备的应用推广。同时,要加快构建现代化的营销网络和服务体系,提升售后服务质量。在国际市场开拓上,要重点加强与“一带一路”沿线国家的合作,这些国

家矿产资源丰富但勘探开发水平相对落后,对我国地质勘探装备有着巨大需求。还可以通过政府间合作项目、援外项目等方式带动装备出口,建立海外示范工程,提升中国装备的国际影响力。此外,要支持企业参与国际标准制定,推动中国标准“走出去”,增强在国际市场的话语权。

5 结语

深地国家重大专项的实施,找矿深度和广度的拓展,绿色环保发展理念的深入,人工智能的普及,都为我国“十五五”地质岩心钻探装备的发展提出了更高的要求,具体发展方向建议如下:

(1)以传感器和物联网技术为基础,通过人工智能和机器学习算法,研发智能高效、绿色低碳的钻探装备,实现自动寻优钻进、自适应岩层变化、智能防卡钻等自主决策与精准控制。依托高速通信网络,技术人员可在远程控制中心对现场装备进行监控与操作,形成装备运行状态、地质参数、环境数据的全面实时采集与互联,显著提升钻探效率和安全性。

(2)随着“三深一极”勘探进程的快速发展,超高温、超高压、强腐蚀等极端工况环境对钻探装备提出了更高的要求。以耐高温、耐高压为出发点,采用高效隔热与主动冷却系统、高强韧合金外壳及抗干扰高速数据传输技术,通过材料科学与电子技术的深度融合,研发新型随钻探测仪器装备,突破地下175℃的极限环境“禁区”,为拓展人类勘探深度、广度提供坚实的技术保障。

(3)通过加强政策引导、技术创新、产业结构优化等系统性措施,我国地质岩心钻探装备产业将实现从规模扩张向质量提升的转变。这不仅能提升国内资源勘探的装备保障能力,更能推动中国装备走向世界,为全球矿产资源开发贡献中国智慧和方案。未来,随着产业结构的持续优化和国际合作的深入推进,我国地质勘探装备产业必将实现更高水平的发展,为国家资源安全和全球矿业发展作出更大贡献。

参考文献(References):

- [1] 肖华,刘建国,徐正宣,等.川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J].钻探工程,2021,48(5):18-26.
XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway [J]. Drilling Engineering,

- 2021, 48(5):18-26.
- [2] 刘蓓, 寇少磊, 朱芝同, 等. 便携模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(2):30-39.
LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):30-39.
 - [3] 国机集团. 微知国机 | 入地4000多米! 我们在地球深部开岩破土[EB/OL]. (2022-09-14)[2025-05-25]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_19909770. China National Machinery Industry Corporation. Weizhi Guoji | Over 4000 meters into the ground! We are excavating rocks and breaking soil in the deep part of the Earth [EB/OL]. (2022-09-14) [2025-05-25]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_19909770.
 - [4] 王立新, 聂洪岩. 空气反循环钻探技术在超高海拔地区的应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(4):64-69.
WANG Lixin, NIE Hongyan. Application of air reverse circulation drilling technology in ultra-high altitude area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):64-69.
 - [5] 陈东方, 杨跃辉, 牛兆轩, 等. 青海共和盆地干热岩GR2井现今地应力特征及断层稳定性分析[J]. 中国地质, 2025, 52(2):425-437.
CHEN Dongfang, YANG Yuehui, NIU Zhaoxuan, et al. In-situ stress characteristics and fault stability analysis of hot dry rock GR2 well in the Gonghe Basin, Qinghai [J]. Geology in China, 2025, 52(2):425-437.
 - [6] 王立彬. 青藏高原新“铜”话! [N]. 新华每日电讯. 2025-01-07(001).
WANG Libin. The new “copper” dialect of the Qinghai Tibet Plateau! [N]. Xinhua Daily Telegraph, 2025-01-07(001).
 - [7] 地调局资源所. 青藏高原首个固体矿产勘查领域3000米科学深钻竣工[J]. 地质装备, 2020, 21(6):6-7.
The Resource Department of the Geological Survey Bureau. The first 3000 meter scientific deep drilling in the field of solid mineral exploration on the Qinghai Tibet Plateau has been completed[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020, 21(6):6-7.
 - [8] 刘雨晨, 苗琦, 孟刚, 等. 我国战略性矿产资源管理制度梳理及政策建议[J]. 中国矿业, 2025, 34(2):20-28.
LIU Yuchen, MIAO Qi, MENG Gang, et al. Research on China's strategic mineral resource management system and policy suggestions[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2):20-28.
 - [9] 马军. 绿色钻探, 让美丽中国更精彩[EB/OL]. (2023-11-29)[2025-05-15]. <https://www.iziran.net/news.html?aid=5284989>.
MA Jun. Green drilling makes beautiful China more exciting [EB/OL]. Nature. (2023-11-29)[2025-05-15]. <https://www.iziran.net/news.html?aid=5284989>.
 - [10] 刘烜. 深地国家科技重大专项“超万米科学钻探技术与装备”项目启动[EB/OL]. (2025-01-24)[2025-05-15]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202501/t20250124_2880447.html.
LIU Heng. The launch of the “Ultra Ten Thousand Meter Scientific Drilling Technology and Equipment” project, a major national science and technology special project in Shenzhen, China [EB/OL]. (2025-01-24) [2025-05-15]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202501/t20250124_2880447.html.
 - [11] 邢卫彬, 霍斐. 山东地勘集团与济南大学联袂成立新能源产业技术研究院[N]. 齐鲁晚报. 2020-10-30.
XING Weibin, HUO Fei. Shandong Geological Prospecting Group and Jinan University jointly establish New Energy Industry Technology Research Institute [N]. Qilu Evening News. 2020-10-30.
 - [12] 四川省自然资源厅. 四川省自然资源厅关于促进地质勘查行业高质量发展的实施意见[EB/OL]. (2022-09-22)[2025-05-15]. <http://dnr.sc.gov.cn/scdnr/sckclwj/2022/9/22/2d740ca65fce45f18cb5b2ba2f2884f0.shtml>.
Sichuan Provincial Department of Natural Resources. Implementation opinions of Sichuan provincial department of natural resources on promoting high quality development of geological exploration industry [EB/OL]. (2022-09-22) [2025-05-15]. <http://dnr.sc.gov.cn/scdnr/sckclwj/2022/9/22/2d740ca65fce45f18cb5b2ba2f2884f0.shtml>.
 - [13] 柳海华. 全球战略性矿产勘查投入趋势及对中国的启示[J]. 矿产勘查, 2024, 15(6):1113-1121.
LIU Haihua. The investment trend of global strategic mineral exploration and its Enlightenment to China [J]. Mineral Exploration, 2024, 15(6):1113-1121.
 - [14] 王圳, 吴巧生, 刘泽群. 战略性矿产勘查投资分析与政策启示[J]. 中国矿业, 2025, 34(2):29-38.
WANG Zhen, WU Qiaosheng, LIU Zequn. Analysis of strategic mineral exploration investment and policy implications [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2):29-38.
 - [15] 陈从喜. 战略性矿产资源开发利用研究进展与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2):4-19.
CHEN Congxi. Progress and prospects in the development and utilization of strategic mineral resources [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2):4-19.
 - [16] 自然资源部编写组. 2021年全国地质勘查通报[R]. 北京: 自然资源部, 2022.
Compiling Group of the Ministry of Natural Resources. 2021 national geological survey report [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2022.
 - [17] 自然资源部编写组. 2022年全国非油气地质勘查统计年报[R]. 北京: 自然资源部, 2023.
Compiling Group of the Ministry of Natural Resources. 2022 Annual statistical report on national non-oil and gas geological Exploration [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2023.
 - [18] 自然资源部编写组. 2023年全国非油气地质勘查年报[R]. 北京: 自然资源部, 2024.
Compiling Group of the Ministry of Natural Resources. 2023 National Annual Report on Non-oil and Gas Geological Exploration [R]. 2024.
 - [19] 自然资源部办公厅. 自然资源部办公厅关于印发《2024年全国非油气地质勘查统计年报》的函[EB/OL]. (2025-05-21)[2025-05-20]. https://gi.mnr.gov.cn/202505/t20250527_2884805.html.
Office of the Ministry of Natural Resources. Letter from the General Office of the Ministry of Natural Resources on Issuing the “2024 National Non Oil and Gas Geological Exploration Statistical Annual Report” [EB/OL]. (2025-05-21) [2025-05-20]. https://gi.mnr.gov.cn/202505/t20250527_2884805.html.
 - [20] 中国地质矿产经济学会, 中国自然资源经济研究院. 全国地质勘查行业发展报告—2024[M]. 北京: 地质出版社, 2024.
Chinese Society of Geology and Mineral Resources Econom-

- ics, Chinese Academy of Natural Resources Economics. National Geological Exploration Industry Development Report-2024[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2024.
- [21] 吕志成, 龙宝林, 庞振山, 等. 找矿突破战略行动以来中国主要金属矿产勘查进展及未来勘查规划[J]. 矿产勘查, 2024, 15(11): 1974-1990.
- LV Zhicheng, LONG Baolin, PANG Zhenshan, et al. Exploration progress of major metal mineral resources in China and future exploration plan[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(11): 1974-1990.
- [22] 中国工程院全球工程前沿项目组. 全球工程前沿—2023[M]. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- Project Group of Global Engineering Fronts of Chinese Academy of Engineering. Engineering fronts-2023 [M]. Beijing: Higher Education Press, 2024.
- [23] 薛倩冰, 刘凡柏, 张金昌, 等. 特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 8-16.
- XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 8-16.
- [24] 王伟, 邵兴隆. 便携式全液压钻机在雅江木绒地区地质钻探中的应用[J]. 四川有色金属, 2022(4): 44-47.
- WANG Wei, SHAO Xinglong. Application of portable full hydraulic drill in geological drilling in Yajiang Murong area[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2022(4): 44-47.
- [25] 薛倩冰, 王晓赛, 樊广月, 等. 钻井利器故事之“全液压岩心钻机”[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 172-176.
- XUE Qianbing, WANG Xiaosai, FAN Guangyue, et al. The story of a drilling weapon: Full hydraulic core drill [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 172-176.
- [26] 甘超, 曹卫华, 王鲁朝, 等. 深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理——以辽宁丹东 3000m 科学钻探工程为例[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 1-7.
- GAN Chao, CAO Weihua, WANG Luchao, et al. Streaming big data analysis and dynamic pre-processing in deep geological drilling process: a case study on the 3000m scientific drilling project in Dandong, Liaoning province [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 1-7.
- [27] 文浩贤, 杜胜, 张典, 等. 地质钻探过程状态监测 App 软件设计与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 41-48.
- WEN Haoxian, DU Sheng, ZHANG Dian, et al. Design and application of a condition monitoring App for the geological drilling process [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 41-48.
- [28] 周长春, 姜杰, 李谦, 等. 基于融合特征选择算法的钻速预测模型研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 31-40.
- ZHOU Changchun, JIANG Jie, LI Qian, et al. Research on drilling rate prediction model based on fusion feature selection algorithm [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 31-40.
- [29] 甘超, 汪洋, 王鲁朝, 等. 基于区域多井数据优选与模型预训练的深部地质钻探过程钻速动态预测方法[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 1-8.
- GAN Chao, WANG Xiang, WANG Luchao, et al. Dynamic prediction method of rate of penetration (ROP) in deep geological drilling process based on regional multi-well data optimization and model pre-training [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 1-8.
- [30] 《钻探工程》编辑部. 2024 年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 1-3.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2024 top 10 news in exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 1-3.
- [31] 《钻探工程》编辑部. 2021 年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 1-4.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2021 top 10 news in exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 1-4.
- [32] 《钻探工程》编辑部. 2022 年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 1-4.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2022 top 10 news in exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 1-4.
- [33] 俞昭君. 刷新纪录! 中国五矿自主研制的深海岩心取样钻机取得重大突破[EB/OL]. 中国五矿集团有限公司. (2023-05-15) [2025-05-25]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c27916641/content.html>.
- [34] 《钻探工程》编辑部. 2023 年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 1-4.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2023 top 10 news in exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 1-4.
- [35] 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.
- ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 1-8.
- [36] 朱恒银, 王强, 刘兵, 等. 5000 m 新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 110-119.
- ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 110-119.
- [37] 杨芳, 翟育峰, 田志超, 等. 西藏甲玛 3000m 科学深钻经济技术指标统计与分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 113-119.
- YANG Fang, ZHAI Yufeng, TIAN Zhichao, et al. Statistics and analysis of economic and technical indexes for 3000m scientific drilling in Jima, Tibet [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 113-119.
- [38] 杨芳, 曹凡, 刘振新, 等. 川西甲基卡锂矿 3000 m 科学深钻高效钻进措施分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 47-53.
- YANG Fang, CAO Fan, LIU Zhenxin, et al. Analysis of efficient drilling measures for 3000m scientific deep drilling in Jiajika Lithium Mine, western Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 47-53.
- [39] 田志超, 翟育峰, 刘振新, 等. 辽宁丹东 3000m 科学深钻施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 233-239.
- TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIU Zhenxin, et al. Drilling technology of 3000m scientific deep drilling in Dandong, Liaoning Province [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 233-239.
- [40] 翟育峰, 赵辉, 王鲁朝, 等. 湖南 3000 m 科学深钻孔内事故处理及对策[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 32-40.
- ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, WANG Luchao, et al. Down-hole incident treatment and prevention for the 3000m scientific deep borehole in southern Hunan [J]. Drilling Engineer-

- ing, 2023, 50(4):32-40.
- [41] 李宽, 张晓龙, 王文龙, 等. 山东招远大尹格庄 3000m 科学钻探施工技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(4):145-153.
LI Kuan, ZHANG Xiaolong, WANG Wenlong, et al. Construction technology of the 3000m scientific drilling project in Dayingezhuang, Zhaoyuan County, Shandong Province [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):145-153.
- [42] 地矿三院. 3491.90 米! 钻探铁军深部钻探再创佳绩[EB/OL]. (2023-03-17) [2025-05-20]. http://dkj.shandong.gov.cn/art/2023/3/17/art_110095_10308599.html.
- [43] 吴金生, 罗显梁, 王子忠, 等. 水平定向钻探与综合测试技术研究及应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1):200-204.
WU Jinsheng, LUO Xianliang, WANG Zi Zhong, et al. Research and application of horizontal directional drilling and comprehensive testing technology [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):200-204.
- [44] 张恒春, 刘广, 吴纪修, 等. 川藏铁路 3000 m 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.
ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan Tibet Railway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11):1-6.
- [45] He H C, Li L X, Hu S, et al. Water abundance in the lunar far-side mantle [J]. Nature, 2025, 643:366-370.
- [46] 张北辰. 中国第 40 次南极科学考察简报[J]. 极地研究, 2024, 36(3):496-497.
ZHANG Beichen. Briefing of the 40th Chinese National Antarctic research expedition [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2024, 36(3):496-497.
- [47] 温得全, 冯美贵, 李斌, 等. 智能高效小型一体化泥浆不落地系统的应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(4):49-54.
WEN Dequan, FENG Meigui, LI Bin, et al. Research and application of the intelligent and efficient small size integrated mud non-landing system [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):49-54.
- [48] 麻朗朗, 陶士先, 邹志飞. 白银市土红湾-李家沟煤炭资源详查 23-2 孔冲洗液技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(5):81-87.
MA Langlang, TAO Shixian, ZOU Zhifei. Drilling fluid technology for Hole 23-2, detailed investigation of coal resources in Tuhongwan-Lijiagou, Baiyin City [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):81-87.
- [49] 王琳, 孙祺斌, 赵延亮, 等. 铀矿地质钻探移动式泥浆净化设备设计[J]. 现代矿业, 2024, 40(4):162-165, 169.
WANG Lin, SUN Qibin, ZHAO Yanliang, et al. Design of Mobile mud purification equipment for Uranium geological drilling [J]. Modern Mining, 2024, 40(4):162-165, 169.
- [50] 张金昌, 尹浩, 刘凡柏, 等. 自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J]. 地质评论, 2022, 68(4):1382-1392.
ZHANG Jinchang, YIN Hao, LIU Fanbai, et al. Development and application of intelligent and automatic drilling technology and equipment [J]. Geological Review, 2022, 68(4):1382-1392.
- [51] 赵建刚, 王雪竹, 石凯, 等. 高温高压钻井液性能测试仪器简介[J]. 地质装备, 2022, 23(5):8-12.
ZHAO Jiangang, WANG Xuezhu, SHI Kai, et al. Brief introduction of several testing instruments for drilling fluid performance at high temperature and high pressure [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022, 23(5):8-12.
- [52] 翁炜, 吴烁, 贺云超, 等. 高温硬岩受控钻进新技术、新方法及应用[J]. 地学前缘, 2024, 31(6):120-129.
WENG Wei, WU Shuo, HE Yunchao, et al. New technologies, methodology and application in directional high-temperature hard rock drilling: a critical review [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6):120-129.
- [53] 自然资源部. 2024 年中国自然资源公报[R]. 北京: 自然资源部, 2025.
Ministry of Natural Resources. China natural resources bulletin 2023 [EB/OL]. (2024-02-29) [2025-0520]. https://gi.mnr.gov.cn/202402/t20240229_2838490.html.
- [54] 前瞻产业研究院. 2025—2030 年中国地质勘查行业市场前景预测与投资战略规划分析报告[DB]. 深圳: 前瞻产业研究院. Prospective Industry Research Institute. Market prospect forecast and investment strategic planning analysis report for China's geological exploration industry from 2025 to 2030 [DB]. Shenzhen: Prospective Industry Research Institute.
- [55] 佚名. 全球及中国半潜式钻探平台行业头部企业市场占有率及排名调研报告[R/OL]. <https://www.renrendoc.com/paper/402453931.html>.
Anon. Research report on market share and ranking of leading enterprises in the global and Chinese semi-submersible drilling platform industry [R/OL]. <https://www.renrendoc.com/paper/402453931.html>.
- [56] 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.
ZHANG Yongqin. Discussion on aspiration and mission and AI & green development of the drilling techniques [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):5-9.
- [57] 朱日祥, 金之钧, 底青云, 等. 智能导钻技术体系与相关理论研发进展[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1):1-15.
ZHU Rixiang, JIN Zhijun, DE Qingyun, et al. Research and progress of Intelligent Drilling Technology System and related theories [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1):1-15.
- [58] 于兴军, 景佐军, 智庆杰, 等. 自动化钻机向智能化发展的关键技术分析[J]. 石油矿场机械, 2020, 49(5):1-7.
YU Xingjun, JING Zuojun, ZHI Qingjie, et al. The key technology analysis of the rig development from the automation to intelligence [J]. Oil Field Equipment, 2020, 49(5):1-7.
- [59] 林新越, 刘国梁, 金在兴, 等. 环保型水基钻井液技术研究进展[J]. 化学工程师, 2025, 39(2):59-62, 101.
LIN Xinyue, LIU Guoliang, JIN Zaixing, et al. Research progress of environmental friendly water based drilling fluid [J]. Chemical Engineer, 2025, 39(2):59-62, 101.
- [60] 渠洪杰, 谭春亮, 冉灵杰, 等. 面向新一轮找矿突破战略行动绿色勘查的钻探技术研发与应用建议[J]. 中国矿业, 2024, 33(10):246-256.
QU Hongjie, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Research and application suggestions on drilling technology of green exploration for the new round of prospecting breakthrough strategy [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10):246-256.

(编辑 王跃伟)