

钻探工程技术发展趋势与前景分析

李国栋^{1,2}, 李壮^{1,2*}, 赵剑^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 刘正宏^{1,2}, 翡哲羽^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要 钻探工程技术在矿产资源勘探、地质灾害防治和地下水资源调查等领域发挥着重要作用。不同类型的钻探技术如回转、冲击和振动钻探在各自适用地层中展现出优异性能。未来, 钻探技术的发展趋势集中在智能化、高效化和环保化, 以应对复杂地质条件和环保要求。面临的挑战包括技术更新换代、环保法规遵守等, 应对策略包括加大研发投入、产学研合作和行业交流。

关键词 钻探工程技术; 矿产资源勘探; 地质灾害防治; 智能化

Trend Analysis and Prospects of Drilling Engineering Technology Development

Li Guodong^{1,2}, Li Zhuang^{1,2*}, Zhao Jian^{1,2}, Zhao Donglai^{1,2}, Liu Zhenghong^{1,2}, Ji Zheyu^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : Drilling engineering technology plays a crucial role in mineral resource exploration, geological disaster prevention, and groundwater resource investigation. Different types of drilling techniques, such as rotary, percussion, and vibration drilling, exhibit excellent performance in their respective applicable strata. In the future, the development trend of drilling technology will focus on intelligence, efficiency, and environmental protection to address complex geological conditions and environmental requirements. Challenges include technological upgrading and compliance with environmental regulations, and strategies to overcome these challenges include increasing research and development investment, industry-academia-research cooperation, and industry exchanges.

Keywords : drilling engineering technology; mineral resource exploration; geological disaster prevention and control; intelligence

引言

钻探工程技术作为探索地下资源、了解地下构造以及开展各类地下工程建设的关键手段, 其应用范围广泛, 技术发展日新月异。随着全球经济社会的快速发展, 对钻探技术的需求日益增长, 同时对技术的要求也越来越高。本文将探讨钻探工程技术的应用现状、发展趋势、前景分析以及面临的挑战与应对策略, 旨在为钻探行业的未来发展提供参考。

一、钻探工程技术的应用现状

(一) 不同类型钻探技术应用

矿产资源是在一定地质资源条件下, 受到地壳运动、地质结构和环境演变发展形成的产物, 大量的矿物在外部的作用下集中分布富集构成的资源。在不同类型的地质作用影响下, 最终形成的矿产资源类型有很大不同, 矿产将根据人们的需求使用, 满足生产、生活的需要。由于矿产资源的形成需要极长的时间, 所以地质矿产资源是有限的, 需要采用合理的方式进行开发, 避免资源浪费^[1]。

其中, 回转钻探技术以其高效率和孔径均匀的特点, 在软到

中硬地层的钻探中表现优异, 广泛应用于常规矿产资源勘探和地质勘察。在某金属矿勘探项目中, 通过高速旋转的钻头切削和研磨岩石, 配合循环液带出岩屑, 达到了高效钻进, 获取了岩芯样本, 为分析地层结构和矿石品位变化提供了重要依据。而冲击钻探技术则在坚硬地层如卵石、漂石层中显示出独特的优势, 在某山区桥梁基础建设地质勘探中, 通过冲击钻头破碎坚硬岩体, 为工程设计提供了重要地质资料。振动钻探技术在软弱地层如粘土、淤泥中表现良好, 如在某城市地下水资源调查项目中, 振动器产生的激振力帮助钻头轻松切入粘土层, 最小化了对地层的扰动, 有利于获取准确的地下水文地质信息, 并减少了钻探对周边

环境的影响。这三种技术的应用，不仅提高了钻探效率，也确保了在不同地质条件下勘探工作的顺利进行。

（二）钻探技术在多领域的贡献

钻探技术在矿产资源勘探、地质灾害防治以及地下水水资源调查等多个领域扮演着至关重要的角色。在矿产资源勘探过程中，钻探不仅有助于确定矿体的位置、形态和规模，而且通过所获取的岩芯样本，为开采设计提供了宝贵的数据支持，确保了矿产资源开发活动的科学性和效率。在地质灾害防治方面，钻探技术同样发挥着关键作用^[2]。在地下水水资源调查领域，钻探技术的应用有助于获取地下水样品，深入了解地下水的分布和水质状况，为水资源的合理开发和利用提供了关键信息。例如，在干旱地区的找水工程中，通过钻探技术确定了地下水资源的分布范围和水质情况，成功识别了富水区域，并据此进行了水资源开发利用工程的建设，有效缓解了当地的水资源短缺问题。

二、钻探工程技术的发展趋势

（一）智能化发展

随着科技的不断进步，钻探设备的智能化水平日益提升，智能钻机和智能钻具等先进设备的发展为钻探行业带来了革命性的变革。这些智能钻机具备自动调节钻进参数的功能，能够根据不同的地质条件和钻探需求，实时精准调整钻进速度、压力等关键参数，同时通过内置传感器和智能诊断系统，实时监测设备状态，快速定位故障点并发出警报，极大地提升了钻探效率和安全性^[3]。

智能化控制钻探参数是另一大亮点，利用先进算法和高精度传感器，实时调控钻进速度、压力、扭矩等参数，以适应不同地层的变化。这种智能化的参数调控在地层复杂时尤为有效，能够根据岩石硬度信息自动调整钻头压力和扭矩，确保钻进效率和质量，为地质分析提供准确可靠的数据支撑。此外，钻探数据的智能化处理也是钻探技术发展的重要方向。通过安装传感器实时采集地层参数、设备状态、钻进参数等多维数据，并利用大数据分析技术进行深度挖掘和分析，为钻探方案的优化提供了重要参考。在某大型地质勘探项目中，工作人员通过对大量数据的分析，发现了地层的变化规律，据此改进了钻探工艺，优化了钻孔布局和钻进参数，显著提升了钻探效率，降低了成本。

（二）高效化发展

随着钻探工程技术的持续进步，新型高性能钻头与钻具的研发及应用成为提高钻探效率的关键。科研人员通过采用特殊材料和创新结构设计，研制出了多种钻头和钻具，以应对复杂多变的地质条件。例如，在超深地层的油气勘探中，国产金刚石钻头以其卓越的破岩能力，在高温、高压和高硬度岩石的恶劣环境中表现出色，如深地塔科1井所使用的7刀翼金刚石钻头，其耐磨性、韧性和抗冲击性确保了钻探工作向万米深层的顺利推进^[4]。同时，中煤地第二勘探局集团有限责任公司推出的油电混合动力分体式声频钻机，通过结合油电双重动力源，不仅满足了不同作业环境的需求，还显著降低了排放，提高了钻探效率和经济效益。

钻探工艺的优化也是提升钻探效率的重要途径，涵盖了钻进

流程和泥浆使用等多个方面。通过精细化管理技术创新，钻进流程得到了优化，如开滦集团唐山矿业公司使用的智慧钻机，实现了钻杆的快速接续和钻孔深度的精确测量，大幅提高了钻探效率和质量。在泥浆使用方面，科研人员不断研发和优化新的泥浆体系，如低固相泥浆体系，它不仅减少了钻具磨损和钻井成本，还具有良好的携岩能力和稳定性，有效提高了钻井效率。

（三）环保化发展

随着环保标准的提高，钻探工程领域正逐步转向环保型钻探设备的研发与应用，这些设备以其低噪音、低能耗和低排放的特点，显著减少了对环境的干扰。电动钻机在城市钻探工作中尤为突出，其低噪音运行和高效能源利用，避免了噪声污染和尾气排放，如在城市地铁建设前的地质勘探项目中，电动钻机的使用不仅确保了岩土样本的采集，还维护了周边区域的正常生活秩序，为工程建设的环保基础提供了保障。

与此同时，绿色钻探工艺与材料的推广也在钻探行业中发挥着重要作用。新型可回收泥浆材料的应用，有效避免了传统泥浆可能对土壤和地下水的污染，特别是在环保要求高的区域，如自然保护区周边的矿产资源勘探，使用可降解润滑剂、无污染冲洗液和可回收泥浆等绿色材料，不仅完成了地质信息的获取，还保护了生态环境，实现了工程与环保的和谐共进^[5]。在某湿地保护区附近的地质勘查中，全套绿色钻探工艺和材料的应用，大幅降低了钻探活动对土壤、水体及动植物的影响，确保了生态系统的稳定与安全。

三、钻探工程技术的前景分析

（一）能源领域前景

在全球能源结构中，传统能源如石油和天然气仍占据重要地位，其开采高度依赖钻探工程技术。随着浅层资源逐渐枯竭，深部地层的钻探成为新趋势，这要求钻探设备具备更高的抗压、耐高温性能和更精准的钻探工艺。例如，超深油气井的钻探深度可达数千甚至上万米，钻探设备必须克服地层压力，保证高温环境下的钻具稳定性和可靠性。海上油气田的开采则面临更加复杂的环境挑战，如强风浪和暗流，需要半潜式钻井平台等先进装备来应对，同时还要解决深水钻探的关键技术问题，确保安全高效的开采^[6]。

与此同时，非传统能源如页岩气和煤层气的开发也日益受到重视，为钻探工程技术提供了新的应用前景。页岩气开发中，水平井钻探技术至关重要，它通过增加井筒与储层的接触面积来提高采收率。在四川盆地的页岩气开发中，高精度、长距离的水平井钻探是关键，这要求钻探技术能够精确控制井眼轨迹，解决钻具摩阻和井筒清洁等问题。煤层气开发则需要特殊的钻探工艺和钻具来应对松软储层的坍塌和煤粉产出问题，通过优化钻井液体系和研发柔性钻具来提高开采效果。

（二）基础设施建设领域前景

在公路、铁路、桥梁等交通基础设施的建设中，钻探工程技术扮演着至关重要的角色，尤其在地质勘察和基础施工环节，其应用前景十分广阔。以高铁建设为例，线路规划前期的地质勘探工作依赖钻探技术来获取准确的岩土参数，这些参数对于轨道铺

设和列车运行安全至关重要^[7]。随着交通基础设施向复杂地质区域的延伸,以及对建设质量要求的提升,钻探工程技术的需求日益凸显。未来,对深部地层信息的获取将要求更高的精准度,促使钻探技术创新,如研发适用于超深地层钻探的设备与工艺,以满足复杂交通建设场景的需求。同时,提升钻探效率也将成为重点,通过优化钻探流程和采用新型高效钻头,以缩短勘探周期,保障交通工程建设的顺利推进。

在高层建筑和大型场馆等建筑工程领域,钻探技术同样对工程安全和顺利实施起着至关重要的作用。超高层建筑对地基承载能力和稳定性的要求极高,钻探技术通过获取岩土样本,分析了地下各土层的物理力学性质,为地基处理和设计提供了关键依据。在大型场馆建设中,钻探技术帮助全面了解场地地质情况,为地基处理和建筑功能分区提供了重要信息。

(三) 地质科研与环境监测领域前景

在地质科研领域,钻探技术为地球深部探测和地质构造研究提供了直观样本和数据,对揭示地壳深部的奥秘、了解地球演化历史和板块运动机制等科学问题起到了关键作用。例如,大陆科学钻探计划通过钻探技术获取的岩芯样本,就像开启地壳深部秘密的“钥匙”,为科研人员提供了宝贵的一手资料^[8]。随着科研的深入,钻探技术在地质科研中的应用前景更加广阔,不仅将探索地球更深部的未知区域,还将在月球、火星等外星地质研究中发挥重要作用,为星际探索和开发奠定基础。

在环境监测领域,钻探技术是获取地下水污染和土壤环境样本的重要手段。在某地下水污染治理项目中,钻探技术帮助工作人员准确掌握了污染程度、范围及污染物种类和分布,为污染治理提供了数据支撑。同样,在土壤环境监测中,钻探技术能够分析土壤样本中的污染物含量和迁移规律。随着环境保护意识的增强和治理要求的提高,环境监测对钻探技术的需求将持续增长。未来,钻探技术将朝着更精准、高效、环境影响小的方向发展,研发适用于复杂环境的小型化、便携化设备,提高采样质量和分析效率,实现实时在线监测,为环境治理和生态保护提供保障。

四、面临的挑战与应对策略

(一) 面临的挑战

在钻探工程实践中,复杂地质条件如溶洞、硬岩夹层等给技

术带来了极大挑战。例如,在岩溶地区,溶洞的不规则分布和内部复杂填充物常导致塌孔和卡钻事故,影响钻探进度和信息质量。硬岩夹层中岩石硬度变化大,对钻头磨损严重,且钻进参数难以把控,增加了施工难度和成本。技术更新换代的压力也是钻探行业面临的一大挑战^[9]。随着智能化、高效化技术的发展,企业若不能及时更新技术,就会面临被市场淘汰的风险。例如,一家传统钻探企业因技术落后,在竞标大型项目时失去资格,凸显了技术更新换代的重要性。此外,环保与安全法规的日益严格也对钻探工程提出了更高要求。废弃物处理、施工噪音控制等环保要求增加了工程成本,迫使行业探索更环保、安全的钻探技术和设备。在城市地铁建设等项目中,低噪音设备和合理施工时段的安排非同小可。

(二) 应对策略

在钻探工程技术领域,面对未来复杂的地质条件和行业需求,企业和科研机构加大新技术、新装备研发的投入显得尤为关键。通过产学研合作机制,如山东省地矿局水文二队与山东省科技大学的“深部热储高效钻采关键技术与产业化项目”,以及吉林大学的“地壳一号”万米钻机研发,不仅实现了技术创新,还填补了国内深部钻探装备的技术空白,为行业提供了强有力的技术支撑^[10]。这些成功案例体现了研发投入和产学研合作在推动技术突破中的重要作用。

此外,行业合作与交流对于钻探工程行业同样至关重要。国际大洋钻探计划通过组织学术研讨会、编写科学计划等方式,促进了国际在钻探技术、测井技术等方面的交流与进步。国内企业间的合作交流,如在大型钻探项目中分享复杂地层施工经验,也有助于提高项目效率和质量,推动新技术、新工艺的推广应用,促进行业整体水平的提升。

五、结束语

钻探工程技术是关键地下探索和建设工具,广泛应用于各领域,不同钻探技术满足不同地层需求。未来,技术发展将注重智能化、高效化和环保化,以提高自动化程度、效率和减少环境影响。随着能源和建设需求增长,钻探技术的重要性凸显,需加强研发、人才培养和合作。未来,技术创新、应用拓展和行业协作将推动钻探技术进步,增强竞争力,助力可持续发展。

参考文献

- [1] 刘中阳.资源勘查中钻探工程技术的应用研究[J].世界有色金属,2022,(15):187-189.
- [2] 樊建刚.新形势下探矿工程中钻探技术的应用研究[J].中国金属通报,2023,(10):104-106.
- [3] 张英传,王鲁朝,宋世杰,等.罗布莎科学钻探工程技术及应用[J].西部探矿工程,2022,34(06):84-88+90.
- [4] 刘森峰.三维可视化及绳索钻探技术的工程布置形式[J].世界有色金属,2021,(24):154-156.
- [5] 童俊涛,吕文军,曾令,等.绿色勘查技术在广东诸广矿集区铀矿钻探工程中的应用与分析[J].世界核地质科学,2021,38(04):526-532.
- [6] 薛倩冰,梁楠,韩丽丽,等.大陆科学钻探工程技术发展动态及趋势分析[J].钻探工程,2021,48(12):1-6.
- [7] 本刊编辑部.新起点,新征程——《钻探工程》发刊词[J].钻探工程,2021,48(01):1-2.
- [8] 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(09):1-31.
- [9] 陈程.地质探矿工程中地质勘探技术运用研究[J].世界有色金属,2022,(23):100-102.
- [10] 刘中阳.矿山小孔径固体岩芯钻探孔技术[J].建筑技术开发,2022,49(02):22-24.