

智能化钻探施工技术在矿产勘查中的应用

梁佳望 冯雪松 侯露露 张俊生

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

【摘要】智能化钻探施工技术正逐步融入矿产勘查的各个环节，通过先进的自动化钻探设备、实时监测系统、AI辅助算法和远程数据分析平台，将精准度、作业效率和安全性提升至新的层次。本文围绕复杂地层对钻探精度的需求、现场安全性要求以及数据采集与实时监测的需求展开分析，为后续的资源评价和开发提供了坚实保障，也为地质工程行业的数字化转型开拓了新的发展空间。

【关键词】矿产勘查；智能化钻探；自动化设备；参数优化；远程监测

引言

随着对矿产资源需求的不断攀升，地质勘查行业面临的挑战和期望也在持续加码。传统钻探施工工艺虽在技术成熟度和操作经验上积累颇深，但在面对日益复杂的地层条件和严苛的施工环境时，难免暴露出效率不高、精度有限和安全保障不足等问题。这种技术不仅能有效提升钻探速率和井下数据采集能力，也能通过实时监测与远程控制，让作业人员迅速对井下异常做出反应并优化施工策略，最大程度降低安全风险和经济损失。尤其在资源探测深度不断加大的当下，高度的智能化与自动化已成为矿产勘查行业亟待解决的核心课题和发展方向。

1 矿产勘查钻探施工应用智能化技术的现实需求

1.1 复杂地层对钻探精度的要求

地质结构的多样性和不均匀性是矿产勘查中最具挑战性的因素之一，尤其当勘查区蕴藏的矿体埋藏深、地层构造相对复杂或断层带发育明显时，传统钻探往往面临井壁失稳、漏失严重以及定向偏差等技术难题。复杂地层带来的地质不确定性对钻探精度提出更高要求，任何细微偏差都可能导致对目标矿体位置的误判，直接影响勘查结果的准确度，甚至在后期矿山开发决策中造成资源浪费或安全隐患。以往传统施工更多依赖操作人员的经验来判断地层变化，一旦井下环境超出既往认知，常规技术手段便显得捉襟见肘，难以应对突发的地层坍塌或井漏等情况；同时，由于缺乏实时数据的支撑，钻进方向和角度难以精确把握，出现井斜或偏航现象时无法迅速修正，耗时耗资且拖延工期。正因为如此，在日趋激烈的矿业竞争和资源管理日益精细化的形势下，复杂地层对钻探精度提出了多重挑战，这就要求施工环节必须具备动态感知、及时调控和智

能决策能力。

1.2 现场作业环境对安全性的影响

矿产勘查往往处于地质条件严苛、交通不便或气象多变的区域，井场环境中更是潜藏诸多安全隐患。除了地表地形的崎岖，井下施工还要面对高温高压、地层不稳、瓦斯或有毒气体潜藏等风险。在传统工艺下，为完成钻探，施工人员需要频繁进入危险作业区，手动搬运和调试设备，并在地层发生井塌或涌水时紧急处理，这些环节极易酿成安全事故。同时，地质构造中的裂隙带、断层面或岩层破碎带的存在使得井下环境十分不确定，一旦预判不足或应急措施不到位，不仅会造成设备和井场设施的损毁，还会对作业人员的人身安全产生威胁。由于缺少实时监测和动态掌控，施工决策往往滞后，对井下情况的响应速度不够快，这就使得潜在的安全问题在积累到临界点时才被发现，造成严重后果。另一方面，极端天气的干扰也会导致露天场地仪器的精密度和使用寿命受损，进一步增大施工作业过程中的风险。鉴于以上因素，现场环境对安全性形成了多重考验，让如何减少井下作业人员数量、降低对人的依赖并提高应急处理效率成为业内长期关注的课题。

1.3 数据采集与实时监测的需求

准确获取井下地质与施工过程数据，是矿产勘查工作有效开展的基本前提。从岩性识别到井壁稳定，再到井漏预警，都需要依赖及时、准确的数据支撑。传统方法大多采用地面仪器间接测量或通过取样后进行实验室分析，然而，这些数据采集模式往往存在滞后性，难以在遇到地质突变或突发事件时做出迅速反应。同时，地层变化本就复杂多变，传统的点状或离线观测难以呈现连续的动态信息，而无法及时掌握地层压力、温度、流体性质等关键指

标会对钻探过程造成不确定性，可能带来井下事故或精度损失。

2 智能化钻探施工技术应用

2.1 自动化钻探设备的应用

自动化钻探设备是智能化施工的重要支柱，其主要特点是利用机械化和信息化技术替代人工完成大部分或全部钻探操作，覆盖从上料、进尺到拆装钻具等多道工序。与传统钻机相比，自动化钻机的设备结构通常更为紧凑，能够在有限场地内实现高效作业，且通过液压或电控系统对钻进速度、扭矩及压力等参数进行精准控制，从而尽量降低井壁冲击或不规则振动带来的风险。在施工中，自动化钻机会依托实时监测数据自动调整进刀速度和负载，使其始终处于最佳工况，避免因人工误判或操作不当而导致的磨损过度 and 井塌事故。再者，自动化设备通常配备故障诊断与预警系统，一旦核心部件温度或压力超限，系统将迅速发出告警并启动保护机制，有效减小设备损坏几率和后期维修成本。在上料与拆卸环节，自动化钻机更能显著降低人力消耗和安全风险。传统模式下，人工搬运钻杆、辅助拧卸螺纹等操作流程繁琐且危险，容易出现磕碰或坠落事故；而自动化设备则通过机械臂与定位系统来完成钻杆的自动抓取与对接，并在智能软件的控制下确保螺纹和传动部件的精准结合。这种高效率、低失误率的自动化作业，大幅缩短非钻进时间，让钻探环节的有效工作时长得到提升。与此同时，自动化钻探设备在智能化施工体系中也与其他模块紧密衔接。通过与远程监测系统联动，设备状态与作业进度可实时传送至指挥中心，让管理者对整个井场一目了然；若配合参数优化算法，还可以实现自动调节钻进策略，以适应多变的地层和工况。很多自动化钻机还具备快速移动和多功能转换能力，即在完成某一井段后，可迅速更换相关工具以适应不同口径或工艺需求。对于资源丰富但地质环境复杂、天气条件恶劣的矿区而言，配备自动化钻探设备有助于减少现场人员数量和劳动强度，将更多资源投入到地质分析和规划优化中。随着硬件成本的逐步下降与关键技术的持续成熟，自动化钻探设备在矿产勘查中的应用前景将日益广阔，为进一步实现全流程智能化夯实了基础。

2.2 智能钻进参数优化技术

智能钻进参数优化技术旨在根据地层特征与实时监测数据，对钻速、泵排量、扭矩、压力等关键参数进行动态调

整，从而在提升钻探效率的同时最大程度减少井下风险和对岩层的破坏。传统的人工参数设定更多依赖现场操作人员的经验，若地层特性发生突变且未被及时发现，就容易出现扭矩超载或泥浆携屑效果不佳等问题，导致钻具磨损加剧、井漏乃至井壁坍塌。在智能化施工体系内，钻进参数的设定与调整被纳入数据驱动的闭环控制流程，通过实时感知井下温度、压力、钻头磨损率、进尺速度以及岩性变化等信息，对系统进行自适应调控。在具体操作层面，钻进参数优化技术往往结合自动化钻机的电子控制系统，借助传感器网络和先进算法对数据进行采集、分析与处理。钻进过程中，若监测到地层硬度突然提高或孔内压力偏低，算法会立刻计算出与该地层相匹配的钻压和转速，并向控制器发出指令，以保证钻头不至于因为过大载荷而崩裂，也不会因载荷不足而削弱钻进效率。类似地，当传感器检测到扭矩频繁波动时，系统可尝试调节泵排量或泥浆黏度，以稳定孔内排屑循环并避免砂粒或碎屑堆积。这样的动态调优过程几乎不需要操作人员的干预，大大提高了施工连贯性与响应速度。与此同时，参数优化过程中的海量数据对于后续地质分析与工程改进也有重要价值。通过对不同地层参数以及相应钻进策略的记录和评估，工程团队可总结出一套针对特定区域或岩层类型的“最佳实践”参数库，为日后的施工提供经验参考。随着矿产勘查作业的不断深入，这些数据也可被用来训练更先进的机器学习模型，进一步增强智能优化模块的自适应能力。更先进的算法甚至能够在地层出现异常征兆之前，就根据历史经验与监测趋势预测可能的问题并提前采取对应策略，让参数优化更具前瞻性与主动性。综上所述，智能钻进参数优化技术在保障安全、提速高效和降低成本方面具有显著作用，并且为矿产勘查全面迈向智能化奠定了关键技术基础。

2.3 远程监测与实时数据分析系统

远程监测与实时数据分析系统是智能化钻探施工的中枢神经，通过对井下及地表传感器数据的统一采集、传输、储存和分析，为施工决策、设备调度和安全管理提供全方位的信息支撑。系统一般由多级硬件设备和软件平台构成，包括嵌入式传感器、数据通信网络、后台数据库以及可视化分析界面等核心模块。现场各项参数数据（如钻速、扭矩、泵压、温度、地层应力信息等）通过有线或无线方式实时上传至云端或边缘计算单元，工程技术人员

可在指挥中心或移动终端上远程查看数据变化曲线、告警信息和施工进度，并进行跨区域协同决策。在这个系统架构下，实时数据分析可采用多种算法对海量的传感器数据进行处理，从最基础的统计检验与阈值判定，到更复杂的机器学习、模式识别和预测模型，都能应用在分析模块中。例如，一旦系统检测到井下压力或钻头扭矩发生剧烈波动，便可立即向操作人员或自动控制系统发出警示，提示可能存在地层塌陷或机械故障的潜在威胁；若监测到温度异常升高，则可能预示地层出现了高温带或设备过热，应当及时采取降温或停机检修措施。对于某些难以用简单规则定义的异常，系统则可综合历史施工数据和地质勘测资料进行多因素评估，生成高维度的健康诊断结果或安全预警等级。除了为井下安全提供快速响应通道，远程监测系统还可帮助管理层进行宏观调度与资源统筹。通过对多个井口的同步监控，管理者能直观对比不同井队的作业效率、地质条件和设备状态，继而对施工进度做出优化安排。借助云平台和协同办公软件，不同专业的技术人员、地质专家以及管理人员可随时共享钻进数据和分析结果，减少沟通滞后造成的损失。更重要的是，远程监测系统在极端天气或高风险作业时，能显著降低人员进场频次，为施工安全赢得宝贵保障。随着通信网络速度和计算能力的不断提升，未来的远程监测系统将进一步向智能化和自动化迈进，在挖掘施工过程数据价值的同时，助力矿产勘查行业实现高效运转与安全可控的双重目标。

2.4 AI辅助地层识别与钻探路径优化

AI辅助地层识别与钻探路径优化是智能化施工的关键环节，其核心在于利用人工智能算法对海量井下数据进行处理和解读，进而快速识别地层特征、预测地质异常，并针对性地规划最优钻进路线。传统上，地层识别主要依靠地质专家对岩心或测井图的肉眼观察与经验判断，这种方法虽在学理层面可行，但在庞大的矿区规模以及深井施工中极易因时间和体力限制而降低精准度。借助AI的强大计算能力，可以将泥浆参数、震动波形、地质电阻率以及钻头负载等信息进行深度学习训练，通过模式识别与聚类方法，从海量数据中归纳出岩层界面、孔隙度变化以及异常结构的关键特征，为后续决策提供详实依据。在地层识别完成后，如何规划钻探路径同样考验智能算法的综合能力。传统定向钻探往往根据地质报告和先期地震勘探结果来制订大致的井眼轨迹，但在实际作业过程中，地层条件

随深度和区域差异出现较大变化，若缺乏实时动态调整，可能出现偏离目标矿体或遭遇高风险断层带等情况。AI算法在路径优化方面能根据地层数据的实时更新不断迭代，综合考虑井眼弯曲度、机械摩擦、井壁稳定性、泥浆压力梯度等多重因素，为钻具选择最佳轨迹和倾斜角度。若监测到潜在井漏或岩层塌方风险增大，系统即可根据算法模型生成一条更安全或更经济的替代路径，减少危险区域的穿越，同时兼顾钻进效率和设备损耗。此外，AI算法的智能决策不仅限于现场实时调度，还可以在施工之前根据历史地质数据和相似地质区域的施工经验，对不同潜在井位进行可行性评分和风险评估，帮助项目管理层更精准地规划勘探方案。针对某些高难度或高成本的地层，AI也可结合数值模拟手段先行进行钻探过程的虚拟演练，找出关键脆弱点并设立应急预案。随着算法模型的持续升级以及数据积累的不断丰富，AI辅助地层识别与路径优化将逐步走向更精细、更具普适性的阶段，为矿产勘查提供强有力的技术支持与决策保障。通过AI工具的融入，矿区的勘查活动将从经验主导模式转变为数据与算法共同驱动的新格局，从而在保证安全与可控的前提下，将钻探精度与效率提升到更高层次。

3 结语

智能化钻探施工技术在矿产勘查中的应用，源于对更高勘查精度、更安全作业环境和更高效施工模式的迫切需求。随着地质构造日益复杂、矿体埋藏深度不断增加，传统依赖人工经验的施工手段显然难以匹配当代矿产资源开发的规模与速度。通信技术、云计算及大数据分析的持续演进，智能化钻探施工技术必将迎来更多创新应用，为地质工程行业和矿产资源领域带来新的发展契机。

参考文献：

- [1] 赵炜. 钻探技术在深部矿产勘查的应用[J]. 中国新技术新产品, 2011(4): 2.
- [2] 谭春亮, 岳永东, 渠洪杰, 等. 多工艺钻探技术在浅覆盖区矿产勘查中的应用研究[J]. 矿产勘查, 2023, 14(4): 631-638.
- [3] 朱恒银. 5000米新型能源勘探智能钻探装备与技术. 安徽省, 安徽省地质矿产勘查局313地质队, 2023-03-10.
- [4] 肖博文. 智能钻探中数据采集单元设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] 林天祥. 深部地质钻探中智能勘查自动控制系统设计及应用[J]. 世界有色金属, 2020, (23): 13-14.