

Study on “long excavation and long exploration” technology for rapid tunneling in coal mine roadway

Zhicun Xia

Shandong Lineng LuXi Mining Co., Ltd., Jining, Shandong, 272053, China

Abstract

The contradiction between the efficiency and safety of coal mine tunnel excavation has long constrained efficient production in mines. Traditional segmented excavation methods are limited by frequent drilling and exploration processes, which not only affect construction progress but also lead to delays in geological information acquisition, making it easy for accidents such as water inrush and gas outburst to occur. The “long excavation, long exploration” technology offers new solutions to these industry challenges. This technology overcomes the time-space fragmentation of traditional processes, enabling coordinated excavation and exploration along with real-time data analysis. Currently, there is an urgent need for in-depth research into process optimization, intelligent equipment upgrades, and the restructuring of safety management systems. Only then can this technology move from the theoretical validation stage to large-scale application.

Keywords

coal mine roadway; rapid excavation; long excavation and long exploration; technical research

煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术研究

夏志村

山东里能鲁西矿业有限公司, 中国·山东 济宁 272053

摘 要

煤矿巷道掘进效率与安全性的矛盾长期制约着矿井高效生产, 传统的分段掘进模式受制于频繁停钻探勘的工艺限制, 这一情况不但对施工进度产生影响, 而且由于地质信息获取滞后, 透水、瓦斯突出等事故也极易发生。“长掘长探”技术在破解上述行业难题方面提供了新的思路, 该技术突破传统工艺的时间空间割裂性, 实现掘探协同作业与实时数据分析。当下亟需在工艺流程优化、装备智能升级以及安全管理体系重构等方面进行深化研究, 如此才能推动这一技术从理论验证阶段迈向规模化应用阶段。

关键词

煤矿巷道; 快速掘进; 长掘长探; 技术研究

1 引言

煤矿巷道掘进效率低是造成采掘失调的主要原因, 而掘进巷道超前探测距离短, 精度低, 且与巷道掘进存在施工时间, 作业空间和探测环境上的矛盾, 是导致掘进效率偏低的地质因素, 常规的“短掘短探”技术已经不能适应巷道快速掘进对长距离, 高精度地质超前探测的技术需求。“长掘长探”的工作模式是以煤矿井下千米定向钻机施工的主孔与分支孔为基础, 实现对掘进巷道前方煤层赋存形态, 隐蔽致灾地质因素的长距离探查。本文聚焦于该技术的核心原理以及应用策略, 着重探讨怎样借助工艺流程的再造以及智能装

备的升级来达成掘探工序在时空上的融合, 构建起兼具高效性与安全性的新型作业模式, 从而为煤矿巷道施工给予技术层面的有力支撑。

2 “长掘长探”技术的原理与特点

2.1 “长掘长探”技术的原理

“长掘长探”技术作为地下工程领域的前沿方法, 其核心在于构建掘进与探测的动态协同机制, 通过多维度感知手段的嵌入式布局形成全时域信息采集网络, 将传统分段式作业转化为连续化流程。对比传统工艺那种间歇式停顿检测模式, 此技术的创新之处在于依靠智能分析系统针对实时地质数据展开动态解译, 进而自主生成风险预警图谱, 并且对掘进参数进行优化, 以此有效平衡了施工效率和安全管控两方面的需求。在技术架构里引入的多源信息融合机制, 具备整合电磁波反射、应力场分布以及岩体振动信号的能力, 通过这种整合形成了三维地质模型可视化界面, 从而给操作人

【作者简介】夏志村（1976-），男，中国山东沂水人，本科，高级工程师，从事快速掘进、无煤柱开采及科技创新管理等研究。

员提供了直观的决策依据。装备系统所具备的自适应调节功能可依据围岩条件的变化自动完成钻进模式的切换,在复杂地质环境当中保持稳定的输出功率,使得人工干预的频率大幅降低。这种呈现集成化特点的作业方式突破了传统工艺对探测周期的依赖,让工程进度不再被固定节拍所限制,为深部资源开发提供了全新的技术范式。

2.2 “长掘长探”技术的特点与优势

该技术的核心特征体现为掘进与探测工序的深度协同,借助随钻测量系统与三维地质建模的实时交互构建起动态感知施工环境变化的作业体系,颠覆传统分段作业中因工序交替产生的设备空转与信息断层问题。工艺革新聚焦于将超前探测模块嵌入掘进设备本体,形成随动式数据采集与处理机制,使得岩层裂隙发育特征与构造异常信号能够在毫秒级响应周期内完成解析,这种无缝衔接的操作模式大幅压缩工序转换时间窗口,为复杂地质条件下施工节奏的连续性提供技术保障。装备集成化设计突破传统分体式探测设备的空间限制,搭载多频段电磁波与弹性波传感器的复合探测单元与截割机构形成刚性连接,在刀具破岩的同时完成全断面地质信息扫描,其优势在于消除人为干预导致的探测盲区,使隐蔽致灾因素的识别精度提升至厘米级分辨率。技术体系的创新性在于重构了地下空间开发的作业范式,将原本割裂的施工环节整合为具备自感知、自决策能力的有机整体,为工程机械的智能化演进提供可复用的技术路径^[1]。

2.3 “长掘长探”技术在煤矿巷道掘进中的应用现状

当前“长掘长探”技术在实际推广过程中面临多重现实难题,地质构造的复杂性和探测精度之间的矛盾始终难以调和,像岩层裂隙发育带或者软弱夹层频繁出现的这类区域,常常致使电磁波信号出现严重衰减的情况,而且多源数据融合算法容易受到井下电磁干扰,进而生成失真模型,这对超前预报的可靠性产生了直接影响。装备系统的智能化升级并没有彻底解决传统钻探工艺遗留下来的兼容性问题,新型复合式钻头和既有支护体系之间的匹配度还需要反复调试。振动传感器在潮湿粉尘环境下的灵敏度下降现象时有发生,设备维护周期与生产节奏之间的平衡点尚未明确。掘进速度突破受到动态地质模型构建效率的制约,大量计算资源被海量异构数据的清洗筛选所消耗,岩体力学参数反演存在滞后性就难以对掘进参数的即时优化调整起到支撑作用,围岩应力释放与支护强度可能因时间差而出现错位情况。系统操作门槛与现场技术人员的认知惯性形成了无形的壁垒,智能决策建议常和经验主义思维产生冲突,设备更新速度远快于复合型人才培养周期,误判风险容易因这种认知断层而被引发。

3 “长掘长探”技术在煤矿巷道快速掘进中的应用策略

3.1 优化掘进工艺流程

工艺流程优化的关键在于消除工序间的物理隔阂与时

间空耗,将超前探测行为无缝嵌入掘进设备的运动轨迹中,具体表现为改造传统分体式设备的机械结构,使截割头与多频段地质探测传感器形成刚性连接体,在刀具旋转破岩的同一时空维度内完成前方二十米范围内岩层物性参数的实时采集。设备改造需重点解决传感器抗振防护与信号保真问题,采用嵌入式安装方式将电磁波发射单元集成于截割臂内部腔体,既避免剧烈振动导致元器件失效,又能借助金属构件的屏蔽效应降低信号串扰。施工参数动态调控体系建立在随钻测量数据的秒级更新基础上,开发具有自主学习能力的控制算法,根据岩石硬度与裂隙发育程度的连续变化自主匹配截齿切入角度与推进油缸压力值,这种自适应调节机制有效平衡了设备损耗与掘进效率的关系。作业规程重构着重打破探测与掘进的人员分工壁垒,培养具备双岗位技能的操作班组,制定融合探测数据判读与设备操控指令的标准化流程,使现场人员能够依据实时反馈的地质异常信息立即调整截割轨迹,避免传统模式下信息传递滞后导致的工序停滞^[2]。环境感知系统的升级体现在毫米波雷达与红外热成像技术的融合应用,针对不同岩性的电磁特性差异设计多源数据交叉验证机制,通过构建巷道三维地质模型预演后续三循环作业的岩层条件,为截割路径规划提供可视化决策支持。

3.2 提高设备自动化与智能化水平

针对钻探系统动力单元与探测模块的耦合问题进行结构重组,采用分布式控制架构替代集中式总线设计,使截割电机转速能依据岩性特征自动匹配推进压力。研发团队着力改进传感器防护等级,在探杆内部集成温湿度补偿装置,将陀螺仪与倾角计的采样频率提升至适应剧烈振动的水平,这种物理层级的改良可显著增强数据采集的稳定性。信息传输通道采用多频段冗余备份机制,即便在金属支护密集区域仍可维持信号完整性,原始波形数据的去噪处理引入小波变换与神经网络混合算法,相比传统滤波方式更能保留地质异常特征。操作界面的人性化改造聚焦于降低误操作概率,将地质雷达剖面图与三维点云模型叠加显示,用不同色阶标注围岩松动圈发育程度,这种视觉化表达方式让复杂地质信息变得直观可辨。

3.3 加强地质超前探测与分析

将瞬变电磁法与地震波法的探测终端集成至掘进设备回转部,在截割头旋转切削岩体的同时发射不同频段的电磁波与弹性波信号,利用岩石介质对电磁场与应力波传播特性的差异构建三维地质反演模型。传感器阵列的布置需突破传统点式探测的局限,沿着截割臂周向安装环形分布的接收单元,形成对前方岩体结构的多角度扫描覆盖。数据解译系统的升级重点解决复杂信号干扰下的有效信息提取难题,开发具备噪声自适应滤波功能的智能算法,针对掘进震动产生的机械波干扰设计时频域联合分析模块,使原始信号的信噪比提升至可识别隐伏构造的水平。探测结果与施工决策的联动机制建立在实时数据传输通道的基础上,构建地质异常体自

动分级预警体系,当识别到低阻异常区或波速突变带时自动触发设备参数调整指令,同步降低截割头转速并启动支护机构预动作程序。人员技能重构注重培养地质工程师与设备操作员的协同作业能力,编制融合物探参数与施工要点的可视化操作手册,使现场人员能够依据实时更新的岩体完整性系数动态调整循环进尺与支护密度。探测精度的持续改进依托于历史数据与实时探测结果的对比验证,建立巷道不同区段地质预测与实际揭露情况的误差反馈模型,利用机器学习算法动态优化反演参数权重系数,逐步缩小理论推测与工程实际的偏差幅度^[3]。

3.4 强化施工安全管理与质量控制

动态监测体系的构建需要将地质雷达与微震监测设备深度耦合,在掘进头后方二十米范围内布置环形传感器阵列,实时捕捉围岩应力场的细微变化,这种立体化监控模式能及时识别顶板离层或帮部变形的早期征兆。作业规程中嵌入风险预判机制,依据探孔返渣颜色与颗粒级配特征建立岩性快速判别标准,当遇到煤岩界面模糊或裂隙渗水异常时自动触发支护强度调整指令,避免因地质突变引发结构失稳。人员定位系统与气体检测模块的联动设计值得关注,在掘锚机驾驶舱加装甲烷浓度超限闭锁装置,一旦检测到特定区域氧含量下降趋势立即切断截割电源。质量追溯体系的创新在于引入数字孪生技术,每循环进尺完成后自动生成包含探孔轨迹、支护参数及围岩位移量的三维档案,质检人员调取任意断面数据都能还原施工时的地质条件与操作记录,为质量争议提供客观依据。班组交接环节推行可视化交底制度,利用增强现实设备将本班探测到的隐伏构造投影至巷道实体表面,接班组员通过头盔显示器可直接查看断层走向或含水层边界线,这种信息传递方式有效消除了口头交接的信息衰减^[4]。

3.5 推动技术创新与集成应用

技术创新的实施需要重新设计掘进设备传动系统的机械接口,在截割部主轴内嵌光纤陀螺仪与应力传感器,形成对设备姿态与岩体反作用力的同步监测能力。集成应用的核心挑战在于不同数据协议的兼容性问题,所以需要建立统

一的数据中台架构,将电磁波探测设备输出的电阻率数据、声波探头的纵波速度信息以及设备运行状态参数进行时间序列对齐,利用边缘计算单元在井下完成多源数据的特征提取与异常识别。研发过程中需着重解决强干扰环境下的信号保真问题,采用自适应滤波算法消除截割头旋转产生的电磁噪声,同时开发具备自学习能力的岩性识别模型,通过对比历史探测数据与实际揭露岩层的结果不断优化反演算法权重系数。技术落地的关键环节在于构建产学研用协同创新机制,建立设备制造商、物探技术服务商与矿山企业三方参与的联合实验室,针对典型地质条件开发模块化的探测参数组合方案,形成可快速复制的技术应用包。创新生态的培育依赖于建立技术迭代升级的反馈通道,收集不同矿井应用场景下的设备运行数据与地质预测误差样本,形成持续优化探测精度与设备适应性的良性循环机制。

4 结语

通过对掘探协同作业模式的重构,“长掘长探”技术有效化解了传统工艺在效率与安全方面的矛盾,其核心价值在于突破工序分割的思维定式,依靠实时地质数据来动态调整施工参数,进而形成能主动防控风险的作业闭环。当前应用需着重突破探测精度和掘进速度相互匹配的难题,强化多源数据融合分析的能力,构建起标准化的施工管理体系。行业方面应加大跨领域技术融合研究的力度,对采掘装备与探测系统深度集成的路径展开探索,推动煤矿建设朝着本质安全、高效低碳的方向实现转型升级。

参考文献

- [1] 程建远,陆自清,蒋必辞,等.煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J].煤炭学报,2022,47(01):404-412.
- [2] 樊智.“长掘长探”技术在煤矿巷道超前探测中的应用[J].能源与节能,2024,(11):240-243.
- [3] 张继昌.矿井巷道实现快速掘进的“长掘长探”技术研究[J].山西冶金,2022,45(09):178-179.
- [4] 孙昊达,王毅,张杰,等.“长掘长探”技术在TBM掘进巷道中的应用研究[J].煤炭技术,2024,43(05):137-141.