

复杂地质条件下软岩巷道变形监测与稳定性评价

虎焱桐

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756504

摘要: 本文系统阐述了复杂地质条件下软岩巷道的工程特性与变形破坏机理,深入探讨了以多源信息融合为核心的综合监测技术体系,并构建了一套基于监测数据驱动的动态稳定性评价方法。研究首先分析了软岩在复杂地质环境下的流变性、膨胀性及强度劣化等关键力学行为;其次,详细论述了地表与井下协同、宏观与微观结合、静态与动态互补的立体化监测网络构建策略,重点介绍了三维激光扫描、光纤光栅传感、微震监测等先进技术的应用;进而,提出了一种融合位移、应力、能量释放率等多维指标的巷道稳定性动态分级评价模型,并通过数值模拟反演与现场实测数据相互验证,实现了对围岩稳定状态的精准判识与未来趋势的科学预测。研究表明,建立“精细感知-智能分析-动态评价-主动防控”一体化的技术路径,是保障复杂地质条件下软岩巷道长期安全服役的有效途径,对推动深部地下工程的安全高效建设具有重要的理论价值与实践指导意义。

关键词: 软岩巷道;复杂地质条件;变形监测;稳定性评价;多源信息融合

引言

随着浅部资源枯竭,矿产资源开发与地下空间利用向深部推进,但深部工程环境“三高一扰动”使岩体力学行为复杂。软岩巷道是深部作业面生命线,其稳定性关乎工程安全与效率,而穿越复杂地质构造时围岩稳定性面临挑战。传统支护设计依赖经验或静态分析,难反映深部围岩非线性特性,实践中常出现失稳、成本高昂甚至安全事故,原因在于对围岩变形破坏认知不足且缺乏科学评价决策技术体系。近年来,传感等技术的发展促使工程监测评价领域变革,单一监测手段难满足需求,多源信息融合与智能分析成趋势。因此,开展复杂地质条件下软岩巷道变形监测与稳定性评价研究,是解决工程痛点、推动学科发展的必然。本文旨在梳理变形破坏机理,构建综合解决方案并验证,为同类工程提供借鉴。

1 复杂地质条件下软岩巷道的工程特性与变形破坏机理

软岩巷道在复杂地质条件下的失稳并非单一因素作用的结果,而是多种不利地质因素与软岩自身物理力学特性耦合作用下的复杂过程。

1.1 软岩的基本力学特性

软岩的核心特性决定了其在工程中的“难缠”属性:(1)流变性:软岩在持续荷载作用下,应变会随时间不断增长,表现为蠕变(Creep)。在深部高地应力环境下,即使初始应力未超过岩体瞬时强度,长期的蠕变效应也可能导致围岩产生不可恢复的大变形,最终引发支护结构屈服或破坏。(2)膨胀性:许多软岩(如蒙脱

石含量高的泥岩、页岩)具有强烈的亲水性。当巷道开挖揭露含水层或遭遇淋水时,水分渗入围岩,引起矿物颗粒水化、晶格膨胀,产生巨大的膨胀压力,对支护体形成持续的径向挤压^[1]。(3)强度劣化:软岩暴露于空气后易风化,遇水后强度急剧下降。此外,在反复的应力扰动(如邻近工作面回采)下,围岩内部微裂隙不断萌生、扩展、贯通,导致其峰值强度与残余强度均呈现明显的劣化趋势。(4)低承载能力与高塑性:软岩的单轴抗压强度通常较低($<25\text{MPa}$),且在达到峰值强度后表现出显著的塑性流动而非脆性断裂,这使得传统的刚性支护难以有效约束其变形。

1.2 复杂地质条件的耦合效应

复杂地质构造极大地加剧了软岩巷道的不稳定性:

(1)构造应力场扰动:断层、褶皱等地质构造往往是地应力高度集中的区域。巷道穿越此类区域时,围岩所受的构造应力远超区域平均应力水平,极易诱发剪切滑移、劈裂等破坏模式。(2)结构面控制作用:断层破碎带、节理密集带等由大量结构面切割而成,其整体强度远低于完整岩体。这些结构面不仅为地下水提供了良好的导水通道,其自身的低摩擦角和粘聚力也使其成为潜在的滑移或塌落面。(3)高水压与水岩耦合:深部含水层水压巨大。高水压一方面通过降低有效应力削弱岩体强度(Terzaghi有效应力原理),另一方面通过水化学作用加速软岩的软化、泥化过程。水-岩-力的多场耦合作用是导致巷道失稳的关键机制。(4)采动扰动影响:在煤矿等开采工程中,邻近工作面的回采活动会引起覆岩移动和应力重新分布,形成动态的、周期性的应力扰动。

这种扰动对已处于临界稳定状态的软岩巷道而言，往往是压垮骆驼的最后一根稻草。

综上所述，复杂地质条件下的软岩巷道变形破坏是一个集“时间效应（流变）、环境效应（水）、结构效应（构造）和动力效应（扰动）”于一体的多物理场、多尺度耦合演化过程。对其稳定性的准确评价，必须建立在对该一复杂过程全面、动态认知的基础之上。

2 基于多源信息融合的巷道变形综合监测技术体系

为了全面捕捉上述复杂的变形演化过程，必须摒弃单一、孤立的监测方式，构建一个覆盖时空全域、融合多物理量信息的立体化监测网络。

2.1 监测体系构建原则

理想的监测体系应遵循以下原则：一是全面性：监测对象应涵盖围岩位移、支护体受力、围岩内部应力/应变、微破裂活动、环境参数（温度、湿度、水压）等。二是层次性：形成“地表宏观沉降—巷道表面变形—围岩深部响应—微破裂前兆”的多层次监测架构。三是动态性：具备高频次、甚至连续的数据采集能力，以捕捉快速变形或突发事件。四是智能性：集成数据自动采集、传输、存储、初步处理与异常报警功能。

2.2 关键监测技术及其应用

2.2.1 巷道表面变形监测

（1）收敛计与顶底板离层仪：作为最基础的监测手段，用于获取巷道两帮相对位移和顶底板离层量。虽然精度有限且为点式测量，但成本低廉、操作简单，适用于大范围布设，作为变形趋势的宏观指示。（2）三维激光扫描：该技术通过发射激光束快速获取巷道表面数百万个点的三维坐标，生成高精度的点云模型^[2]。通过不同时期点云数据的精确配准与对比，可定量计算出巷道任意位置的三维变形矢量、体积变化量及变形速率场，实现对巷道整体形态演变的可视化、精细化描述，尤其擅长识别局部鼓包、片帮等非均匀变形。

2.2.2 围岩内部状态监测

（1）多点位移计：安装于钻孔内不同深度，可连续监测围岩内部各层面相对于基点的位移，揭示围岩松动圈的发育深度、范围及随时间的变化规律，是评估围岩自承能力和确定合理锚固长度的关键依据。（2）光纤光栅传感技术（FBG）：FBG传感器体积小、抗电磁干扰、可分布式布设。将其嵌入围岩或集成于锚杆/锚索中，可实现对围岩内部应变、温度以及支护体轴力/剪力的长距离、准分布式、高精度实时监测。一根光纤上可串联数十甚至上百个传感器，构成“感知神经”，为构建围岩内部状态的数字孪生体提供海量数据支撑。

2.2.3 微破裂活动与能量释放监测

微震监测系统通过在巷道周边布设高灵敏度检波器阵列，捕捉围岩因损伤累积而产生的微弱弹性波信号。通过对微震事件的时空定位、震级计算和能量分析，可以反演围岩内部破裂区的扩展、高应力集中区的迁移以及潜在失稳区域的能量积聚与释放过程。微震监测被视为预测岩爆、大范围冒顶等突发性灾害的“前兆”技术。

2.2.4 环境与辅助参数监测

一是水文监测：在关键部位安装水压计、流量计，监测涌水量和水压变化，评估水害风险及水岩耦合作用强度。二是应力解除法/应力计：通过应力解除法或埋入式应力计直接测量围岩原岩应力及二次应力分布，为数值模拟提供边界条件。

2.3 多源信息融合策略

单一数据源往往存在片面性和局限性。例如，表面收敛数据无法反映深部松动情况，微震事件虽能指示破裂但难以量化变形量。因此，必须采用信息融合技术：

（1）时空配准：将来自不同传感器、不同时间尺度的数据统一到同一时空坐标系下。（2）数据关联与互补：利用统计学方法（如主成分分析、相关性分析）或机器学习算法（如支持向量机、神经网络）挖掘不同物理量之间的内在联系。例如，将微震事件频次、能量与表面变形速率进行关联，可更准确地判断围岩是否进入加速破坏阶段。（3）构建综合指标：基于融合后的信息，提炼出更能表征围岩整体稳定状态的综合指标，为后续的稳定评价奠定基础。

3 基于监测数据驱动的巷道稳定性动态评价

稳定性评价的目标是从海量监测数据中提取有价值的信息，对巷道当前的稳定状态进行科学判识，并对未来发展趋势做出可靠预测。

3.1 传统评价方法的局限性

长期以来，巷道稳定性评价主要依赖于两类方法：一是基于工程类比的经验法，如新奥法（NATM）中的收敛-约束法；二是基于连续介质力学的理论解析或数值计算法。这类方法通常假设材料均质、边界条件明确、荷载恒定，难以适应软岩大变形、非线性、时变性强特点，且无法充分利用现场实测数据进行动态修正。

3.2 动态评价模型的构建思路

3.2.1 构建多维综合评价指标体系

模型的基石是建立一个能够全面刻画围岩稳定状态的多维指标体系。该体系超越了单一的位移阈值判据，整合了以下四个核心维度：（1）位移维度：不仅关注累计位移量，更重视其一阶导数（变形速率）和二阶导数

(变形加速度)。根据流变理论,当变形进入加速阶段(加速度 >0),往往预示着失稳的临近。(2)应力/应变维度:通过FBG等传感器获取的支护体轴力、剪力以及围岩内部应变数据,可直接反映“支护-围岩”相互作用的强度与协调性。支护体荷载的突增或骤降均为危险信号^[3]。(3)能量维度:微震监测提供的累计视体积、释放能量及Gutenberg-Richter关系中的b值,是量化围岩内部损伤演化与能量积聚状态的有效手段。b值的系统性下降通常被视为大破裂事件的前兆。(4)时间维度:引入时间效应函数,将流变三阶段(初始、稳定、加速)的概念融入评价过程,使模型具备对长期稳定性的判断能力。

3.2.2 引入数值模拟进行参数反演与机理探查

单纯的指标阈值判断缺乏物理内涵。为此,引入数值模拟作为连接数据与机理的桥梁。具体步骤为:首先,依据地质勘探和初期监测数据,建立包含真实地质构造(如断层、含水层)的三维地质力学模型。然后,将现场持续获取的位移、应力等关键监测数据作为目标函数,采用优化算法(如遗传算法、粒子群算法)对模型中的关键未知参数(如破碎带岩体的粘聚力、内摩擦角、流变参数等)进行反演。经过反复迭代,直至模拟结果与实测数据达到最佳拟合。此过程不仅校准了模型参数,更重要的是,它使数值模型成为一个能够真实反映当前围岩力学状态的“数字孪生体”,可用于深入探究变形破坏的内在机理。

3.2.3 实施稳定性动态分级与智能预警

基于校准后的“数字孪生体”和实时更新的多维指标,对巷道稳定性实施动态分级。本模型将稳定性划分为四个等级(I级-稳定,II级-基本稳定,III级-欠稳定,IV级-失稳),每个等级对应一套由多维指标共同定义的判据集。例如,判定为III级(欠稳定)可能需要同时满足:位移速率超过5mm/d、锚杆轴力达到其屈服强度的80%、且微震b值连续一周低于0.9。这种多指标联合判据大大提高了预警的准确性,避免了单一指标误报。预

警信息可通过可视化平台实时推送,为现场决策提供直观、可靠的依据。

3.2.4 建立评价-反馈-优化的闭环机制

动态评价的最终目的是指导工程实践。因此,模型设计了一个完整的闭环机制:评价结果直接反馈至支护设计与施工部门,触发相应的响应措施(如加强监测、局部加固或调整掘进参数)。新的工程措施实施后,其效果又会通过监测网络被捕捉,并用于更新评价模型,形成“监测→评价→决策→行动→再监测”的良性循环^[4]。这一闭环机制确保了支护策略能够始终与围岩的实际状态保持同步,从而实现巷道全生命周期的主动、精准管控。

4 结语

本文针对复杂地质条件下软岩巷道稳定性难题开展变形监测与稳定性评价研究,得出重要结论:机理认知是基础,软岩巷道失稳是多因素协同作用,具非线性等特性,理解其耦合破坏机理才能制定有效对策;多源融合监测是关键,构建含多种先进技术的监测网络,能全面精准动态感知围岩变化,为评价提供数据支撑;数据驱动评价是核心,基于监测数据构建的动态稳定性评价模型,融合多维指标与数值反演技术,实现科学分级与动态预警,克服传统方法局限。未来研究应聚焦提升监测数据智能化处理水平,融合人工智能算法,实现从“被动响应”到“主动预测”的跨越,探索数字孪生巷道全生命周期智能管控平台,助力深地工程安全高效开发。

参考文献

- [1]王建辉,王树明,彭伟.深井强采动软岩巷道围岩变形影响因素及监测分析[J].陕西煤炭,2021,40(S1):59-63.
- [2]李刚,刘明.基于工程试验和现场监测的软岩回采巷道变形控制技术研究[J].陕西煤炭,2025,44(02):148-152.
- [3]柳长荣.软岩巷道支护方案实施及变形监测[J].机械管理开发,2023,38(07):301-302.
- [4]杨金虎.高应力软岩巷道变形机理及协同支护技术研究[J].能源与环保,2025,47(10):241-246.