

煤矿巷道主动支护系统认知重构与精细化管控关键技术研究

陈开奎

江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿, 江苏 徐州 221600

[摘要]深部煤矿巷道开采过程中, 围岩受力状态复杂多变, 现有支护方案很难精准适配现场实际工况, 再加上现场管控方式较为粗放、管理精度不足, 导致巷道支护失效、变形破坏等问题频繁发生。传统的被动支护方式和粗放的现场管控模式, 已经无法适配深部煤矿智能化开采的发展需求。依托围岩应力演化-支护耦合机理, 清晰界定了主动支护的核心内涵、围岩调控作用机制以及整套技术体系架构。聚焦巷道支护施工全流程的精细化管控需求, 针对性研发了围岩动态实时感知、支护参数自适应优化、支护状态智能监测、全流程闭环管控等关键核心技术, 提升了巷道围岩稳定性和整体支护系统的安全可靠性, 以供参考。

[关键词]煤矿巷道; 主动支护; 认知重构; 精细化管控; 围岩控制; 智能监测

DOI: 10.33142/ec.v9i9.20414

中图分类号: TD322

文献标识码: A

Research on Key Technologies for Cognitive Reconstruction and Fine Control of Active Support System in Coal Mine Roadways

CHEN Kailuan

Zhangshuanglou Coal Mine of Jiangsu Xukuang Energy Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221600, China

Abstract: In the process of deep coal mine roadway mining, the stress state of the surrounding rock is complex and varied. The existing support scheme is difficult to accurately adapt to the actual working conditions on site. In addition, the on-site control method is relatively extensive and the management accuracy is insufficient, resulting in frequent problems such as roadway support failure, deformation and damage. The traditional passive support method and extensive on-site control mode are no longer suitable for the development needs of intelligent mining in deep coal mines. Based on the coupling mechanism of rock stress evolution support, the core connotation of active support, the mechanism of rock control, and the overall technical system architecture have been clearly defined. Focusing on the refined control requirements of the entire process of roadway support construction, targeted research and development have been carried out on core key technologies such as real-time perception of surrounding rock dynamics, adaptive optimization of support parameters, intelligent monitoring of support status, and closed-loop control of the entire process, which have improved the stability of roadway surrounding rock and the safety and reliability of the overall support system for reference.

Keywords: coal mine roadway; active support; cognitive reconstruction; refined control; surrounding rock control; intelligent monitoring

引言

现阶段, 我国煤矿开采深度持续增加, 深部矿井普遍出现地应力显著升高的情况。受高地应力影响, 井下巷道围岩整体稳定性大幅下降。巷道支护是保障煤矿井下安全生产的核心关键环节, 传统巷道支护方式属于被动支护模式, 大多依托现场经验制定, 支护参数固定死板、现场管理方式粗放, 严重限制了深部煤炭资源安全、高效开采作业的开展^[1]。相比传统被动支护, 主动支护技术能够提前对围岩进行加固干预、主动调整围岩应力分布、强化围岩

自身的承载能力, 目前已经成为深部巷道围岩控制的主流技术方向^[2]。但当前行业对主动支护的整体认知较为零散、碎片化, 大部分研究和应用只聚焦于支护构件改良、施工工艺优化, 没有形成一套完整、系统的理论支撑体系^[3]。基于此, 文章探讨煤矿巷道主动支护系统认知重构与精细化管控关键技术。

1 传统巷道支护系统认知缺陷与管控短板分析

1.1 传统支护系统的认知局限

传统煤矿巷道支理论论与认知体系成型于浅部开采

工况,整体遵循“围岩变形-支护承载-被动抗险”的工作逻辑,该认知体系存在三处核心缺陷。其一,支护本质认知存在偏差,仅将支护结构定义为被动承载构件,忽略了井下应力动态演化规律及支护的主动应力调控效能,普遍存在支护时机滞后、支护干预不及时的问题。其二,原有对支护系统的认识比较零散,往往把不同支护构件当成单独受力部件,没有考虑构件之间相互配合、共同承载的耦合效应,很容易造成巷道局部应力集中、支护整体刚度不均等工程隐患。其三,对围岩-支护之间的耦合协同作用认识不足,工程中多采用静态、统一的支护参数,忽视围岩应力存在时空演化差异,使得浅部成熟支护方案难以满足深部高地应力、复杂地质条件下的开采需求。

1.2 传统支护管控模式的核心短板

传统粗放的管理方式,已经跟不上深部巷道的安全管控现实需要,各类问题越来越突出。支护方案大多仅凭现场工程经验和静态力学计算来确定,没有根据围岩真实变化情况动态调整优化,经常出现要么支护用料过多造成浪费,要么支护强度不够发生破坏失效的情况。施工现场缺少数字化实时监控手段,施工过程中出现的各类质量问题不能第一时间发现处理。巷道监测还主要靠人工现场巡查,获取的数据滞后性强。设计、施工、监测、参数调整各个环节的数据互不连通,没有搭建起完整的全流程闭环管理链条,支护体系容易随着围岩变化逐步失去稳定性^[4]。

2 煤矿巷道主动支护系统认知重构理论体系

2.1 主动支护系统核心内涵重构

结合深部巷道围岩的应力变化规律与支护结构和围岩的协同作用机制,对巷道主动支护系统进行全新定义。不同于传统被动支护,煤矿巷道主动支护的核心工作目标,通过人工施加预应力、改良围岩原有结构、优化巷道周边应力分布状态等技术手段,提前干预围岩的损伤发展过程,从根源上遏制围岩松动、开裂、破碎、大变形等病害问题。这种新型主动支护的核心逻辑,是实现支护结构与围岩之间的实时适配、动态耦合、协同工作。通过支护与围岩的联动配合,持续改善围岩自身的力学性能,优化巷道周边的应力环境,切断围岩从细微损伤到整体失稳破坏的发展路径。本次重构的巷道主动支护体系,主要具备以下核心特征。一是前置干预,赶在围岩产生塑性变形、发生结构性破坏之前,提前完成支护布设与应力干预,从源头防控风险;二是动态耦合,能够根据巷道围岩实时的受力、变形、损伤状态,动态调整支护参数与支护力度;三是主动预判,依托实时监控数据,提前分析研判支护失效、围岩失稳的潜在风险,实现隐患提前防控;四是系统协同,实

现支护构件、施工工艺、现场管控的一体化协同;

2.2 主动支护系统作用机理重构

构建起一套主动支护体系,围绕应力调控、结构强化、变形约束三者协同作用的机理实现围岩管控。依靠锚杆、锚索施加较大预紧力,在围岩内部形成压应力壳,改变围岩应力场分布状态,缓解应力集中问题。利用锚注加固手段把岩体内部的缝隙填满,把碎散的岩石重新粘结成整体。支护同时兼顾刚性阻挡和柔性让压的特点,完整跟踪围岩从开裂到变形的整个过程,避免支护结构受荷载超标出现失稳失效。

2.3 主动支护系统架构重构

基于围岩认知与支护作用机理的全新研究成果重构主动支护系统架构,改变传统各类构件简单拼接的固有模式,打造感知、支护、管控、迭代四层一体化体系,感知层采集围岩关键监测数据为方案决策提供现实依据,支护层通过各类主动支护单元对围岩实施干预,实现围岩稳定控制,管控层落实支护全流程的精细化现场管理,迭代层依托大数据动态调整优化支护参数与处置策略,以此破解传统支护体系部件割裂、与现场工况适配性差、过程管控跟不上现场变化的突出难题^[5]。

3 巷道主动支护精细化管控关键技术

3.1 围岩动态智能感知技术

想要把主动支护做细做实,前提就是摸清楚围岩的真实情况。传统监测大多只测个别点位,属于单点取样,不仅数据更新慢,能测的项目也少,很难把围岩变化完整展现出来。针对这些现实问题,搭建一套分布式、全覆盖的围岩实时动态感知系统,采用光纤传感、微应力检测、三维变形监测设备,不间断采集围岩应力、位移变形、松动圈范围、裂隙发展变化这些关键数据。对多渠道采集来的数据做融合处理,完成降噪、误差修正之后,就能准确判断围岩实际状况,及时找出应力集中、岩体破碎软弱、变形超标等危险区域。以此作为依据,针对性开展分级支护和主动加固补强,摆脱过去只靠单点监测的不足,避免主动支护施工凭经验、盲目作业的问题。

3.2 支护参数自适应优化技术

主动支护参数自适应精细化优化技术,从根本上改善传统支护模式长期存在的支护参数固定死板、通用性差、适配性不足的突出问题。该技术依托井下围岩实时动态监测感知数据,精准掌握围岩应力、变形等实时变化情况,搭建起围岩-支护参数耦合匹配模型,打通围岩状态与支护参数的联动匹配关系。同时兼顾围岩支护稳定性、工程支护成本、现场施工效率三大核心目标进行多维度优化计

算,能够根据围岩实时变化情况,动态调整、实时优化支护各项参数,彻底摆脱参数固化的局限。在现场应用中,严格按照不同区域的围岩实际条件,推行差异化、分区化支护模式^[6]。围岩条件好、整体稳固的巷道区段,可合理删减非必要支护工序与冗余支护结构,在确保施工安全的前提下,减少支护材料、人工以及设备投入。针对围岩破碎、地应力突出的高危复杂区域,则要针对性加大支护强度,优化支护体系,严抓施工质量,切实增强巷道支护的安全储备与整体稳定性。

3.3 支护施工全过程精准管控技术

针对传统支护施工管控不到位、各类质量问题频繁出现的现实问题,搭建一套主动支护全流程精细管控技术体系。把预应力锚护、高压锚注这些关键工序整理出一套标准施工做法,把各项技术指标、现场操作明确清楚。利用数字化监测设备,实时把锚杆锚索预紧力、注浆压力核心施工数据采集,和设定好的合理范围做对比,一旦超标就自动报警。同时配套建立支护质量等级评判,对巷道支护情况进行量化,切实确保施工的精度,让巷道支护达到应有的承载能力。

3.4 支护运行状态智能预警技术

针对传统巷道支护存在监测不及时、很难提前预判安全风险的短板,采用主动支护工作状态智能预警技术,用长期积累的现场监测海量数据,搭建多维度风险评判指标;通过机器学习算法训练风险预测模型,划分出高、中、低三级风险临界值。系统会不间断对比实时监测数据,捕捉支护结构快要失效的早期信号,做到风险早发现、预警更准确。同时还能根据不同风险等级,自动给出对应的管控和处理方案,推动支护风险由事后处置向事前预警转变,实现从被动抢险转向主动防范、靶向处理,切实减少巷道支护发生失稳破坏的概率。

3.5 全流程闭环迭代管控技术

建立感知-设计-施工-监测-预警-优化全流程闭环精细化迭代管控技术体系,解决传统模式下各环节相互脱节、没法实时动态调整优化的突出问题。搭建主动支护数字化管控平台,打破不同系统之间的数据孤岛,把各类来源的数据统一归集、互通共享。依托平台整合支护监测、设备运行、隐患处置等核心信息,打通数据流转壁垒,强化数据协同应用,为主动支护工况研判、风险预警、现场管控提供一体化数据支撑,分析支护实际发挥的作用,梳理不同地质条件下支护方式的适配特点,持续调整更新设计参数、施工做法以及风险预警界限,能够跟着围岩的变化自动适配调整,进而保障巷道可以长期安全稳定。

4 主动支护精细化管控技术体系优势与应用价值

认知重构型主动支护精细化管控技术体系,整体应用优势十分显著,具体优势体现在四个核心方面。第一,理论体系更加完整系统,打破了行业内以往零散、碎片化的认知局限,重新梳理并定义了主动支护的核心内涵、作用机理与整体架构,搭建起一套完整、规范的系统化理论框架,有效填补了巷道主动支护领域的理论认知空白。第二,支护适配性能大幅提升,一改传统支护过度依赖施工经验、参数固定僵化的静态作业模式,依托围岩动态感知技术和支护参数自适应优化算法,能够根据巷道现场不同工况、围岩实时状态调整支护方案,真正实现不同复杂场景下的精准适配、按需支护。第三,管控精细化程度显著提高,实现了巷道支护设计、现场施工、后期运行、迭代优化的全流程数字化、智能化精细管控,彻底规避了传统粗放式管控模式容易产生的疏漏、偏差,从管理层面杜绝各类安全隐患和质量问题。第四,安全防控主动性全面强化,颠覆了传统事故发生后被动处置的管控思维,构建了事前风险预判、施工过程动态管控、完工后复盘迭代优化的全周期防控模式,从源头把控围岩状态、强化围岩控制效果。

该技术体系针对性适配深部高应力、围岩松软破碎、动力灾害高发的复杂巷道工况,具备极高的工程推广应用价值。从安全角度,可有效遏制围岩大变形、支护损毁失效等突出风险,减少巷道返修工作量,降低井下安全事故发生几率,夯实井下作业安全屏障,避免巷道变形垮塌威胁人员设备安全。从效率成本角度,剔除传统支护模式下多余工序与无效作业,切实提高支护施工速度,减少后期维护、返修产生的各类综合开支。从技术角度,推动行业技术实现跨越式提升,完成由被动挡护围岩向主动调控围岩状态、由凭经验粗放作业向智能化精细化管控、由一成不变的固定支护向动态调整持续优化的全面转型,不仅为矿山深部智能开采作业提供了坚实的技术保障,也推动巷道支护行业技术朝着系统化、精细化、智能化的主流方向迭代升级^[7]。

5 结论与展望

开展主动支护理念更新与精细化管控关键技术研究,梳理传统支护思想存在的短板,重新建立对主动支护整套系统的科学认识,明确主动支护的核心特点以及支护构件和围岩之间的相互作用规律,建立四层一体化支护结构体系,开发围岩状态监测感知、支护参数智能优选、现场施工质量管控等关键技术,搭建一套完整的精细化管控体系,更新巷道支护设计施工思路,为深部煤矿安全、高效、绿色开采提供技术保障,切实解决了传统煤矿传统巷道支护

存在认识不到位、现场管理粗、支护方案 and 实际围岩条件不匹配等问题。下一步还可以结合数字孪生等技术搭建智能化管控平台,进一步完善极端复杂条件下的支护作用机理与参数优化方法。

[参考文献]

- [1]王亚楠,崔海龙.钱营孜煤矿巷道锚索式主动超前支护研究与应用[J].能源技术与管理,2025,50(6):71-74.
- [2]岳楹沁.大跨度隧道主动支护施工体系及现场应用研究[J].工程建设与设计,2024(7):177-179.
- [3]马科.基于离散荷载整体稳定性的隧道围岩承载机理及主动荷载调节技术研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [4]左建平,刘海雁,徐丞谊,等.深部煤矿巷道等强支护力学理论与技术[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):625-647.
- [5]吴景铜,高荣.煤矿巷道支护技术研究现状[C].北京:北京力学会,北京力学会第二十八届学术年会论文集(下),2022.
- [6]郭新新.软岩隧道中基于主动-让压支护理论的大变形控制技术研究[D].四川:西南交通大学,2021.
- [7]雷忠青.同煤集团虎龙沟煤矿巷道支护优化技术探析[J].中国科技信息,2010(23):66-67.

作者简介:陈开奎(1981—),男,汉族,江苏省徐州市人,工程师,本科,中国矿业大学采矿工程专业,现从事采煤、安全生产标准化工作。