

深部煤层开采围岩变形特征及支护控制技术应用研究

吴东东 刘欢 张斌

兖矿能源集团东滩煤矿, 中国·山东 邹城 273500

摘要: 由于浅部煤炭资源逐渐耗竭, 煤矿采深不断加大, 深部高地应力、高渗透压及强采动扰动等复杂的地质条件, 使得巷道围岩的变形与损伤与浅部采动影响明显不同, 且易发生围岩失稳、巷道垮落等事故, 对深部煤矿的安全、高效生产造成了极大的影响。针对我国煤矿井下采动巷道围岩, 开展其典型的变形特性研究, 探明高应力条件下井下围岩的变形机制和演化过程。并根据深部矿井特殊的地质情况, 有目的地梳理出适用于深部复杂环境的巷道支护系统。研究结果将丰富我国深部煤岩围岩控制的理论体系, 填补我国在深井条件下浅部支护技术适配性的不足, 为我国深部巷道稳定控制、灾害预防和安全高效开采等方面具有重要的科学意义和工程实用价值。

关键词: 深部煤层; 围岩变形; 变形特征; 支护控制技术

Research on Deformation Characteristics of Surrounding Rock in Deep Coal Seam Mining and Application of Support Control Technology

Wu Dongdong, Liu Huan, Zhang Bin

Yankuang Energy Group Dongtan Coal Mine, China Shandong Zoucheng 273500

Abstract: As shallow coal resources are gradually being depleted, coal mines are going deeper. Complex geological conditions in deep mines, such as high ground stress, high permeability pressure, and intense mining disturbances, make the deformation and damage of roadway surrounding rock quite different from those affected by shallow mining. This can easily lead to surrounding rock instability and roadway collapses, significantly impacting the safety and efficiency of deep coal mining. This study focuses on the deformation characteristics of mined roadways in Chinese coal mines, aiming to uncover the deformation mechanisms and evolution process of surrounding rock under high stress. Based on the unique geological conditions of deep mines, the research also organizes roadway support systems suitable for complex deep environments. The findings will enrich the theoretical framework for controlling deep coal rock surrounding rock in China, address the lack of adaptability of shallow support techniques under deep mine conditions, and have important scientific and practical implications for stable control, disaster prevention, and safe and efficient mining in deep roadways in China.

Keywords: Deep coal seam; Surrounding rock deformation; Deformation characteristics; Support control technology

0 引言

煤炭是国家能源的主要组成部分, 对国家经济发展具有举足轻重的作用, 是工业生产和能源供应的主要保证。随着我国矿产资源的不断开发, 我国浅部可采储量急剧下降, 煤矿开采逐渐向地下数千米及以上的深部发展。深部围岩普遍面临着地应力大幅提升、结构复杂和力学性能弱化等难题, 且采矿活动将导致围岩应力重分布, 诱发持续大变形的围岩损伤问题。传统支护体系对浅部围岩适配性较强, 在深部工况下适配性不足, 难以实现对深部围岩的变形与灾害的高效控制, 容易导致巷道损毁和采矿中断等重大安全问题。因此, 对深部巷道围岩变形的本质特性进

行分析, 并寻求一种有效的巷道支护调控方法, 对于提高深部巷道围岩稳定性, 防控围岩灾害, 实现煤炭资源的绿色、安全生产有着重大意义^[1]。

1 深部煤层开采围岩变形特征

1.1 高地应力引发围岩持续性流变变形

深层开采条件下, 围岩受重力和构造应力场的双重作用, 其总体地应力强度远远高于浅部, 破坏了原有的应力平衡, 导致围岩表现出显著的流变变形特征。区别于浅部围岩瞬时变形和弹性变形占主导地位的特点, 在长期高应力条件下, 围岩变形并非迅速趋于平稳, 而表现出长期不断发展的流变变形。岩石中的微裂隙在不断地受采动压力

的作用下不断起裂、扩展和贯通,岩石由弹性逐渐转变为塑性,并在较长时间内维持着稳定增长的状态。由于其具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特性,其初始变形量很少,很难被监测识别,其长期积累将导致深部巷道断面持续缩小、顶板下沉和两帮持续移动,这是导致其长期失稳的主要原因,也是其与浅部围岩不同的重要特征^[9]。

1.2 采动扰动导致围岩非均匀破碎变形

深部地层构造较为复杂,各岩层的力学强度和裂隙发育程度差别较大,导致巷道顶板、底板及两帮的变形与损伤程度不一。在高应力集中区,岩石破裂迅速发展,形成块体破碎、剥落垮落,而在卸压范围内,岩石呈现松散扩容,整体呈现局部破碎和整体收缩的不均匀变形。多重采动作用的叠加干扰将使岩体的破碎度不断提高,使其整体稳定性不断下降,并产生围岩松动圈,使其支护难度显著增加,传统的均布支护方式已不能适应这种变形特性。

1.3 高水压作用诱发围岩渗透扩容变形

深层地层地下水储量丰富,岩石孔隙裂隙水压高,高渗透压条件下,围岩的力学特性发生明显变化,导致岩石的渗透扩容变形。地下水对围岩不断渗透软化,导致岩石颗粒间粘着力和整体抗压强度下降;而高压水进入岩石中的微裂隙,形成裂隙扩展压力,促进已存在的裂缝不断扩大,形成新生裂隙。在水岩耦合的共同影响下,围岩不断扩张并发生扩容变形的问题,并将随着水体的扩散而逐渐扩展。这种变形特性将显著提高岩体的松动度,使岩体的整体性和稳定性急剧下降,容易诱发底板鼓胀、帮部渗水垮塌等灾害,大幅降低了围岩的稳定性,是深部地层岩体变形与损伤的核心主控因素。

1.4 岩层结构失衡造成围岩阶梯式失稳变形

深层煤炭资源赋存地层,多为软硬岩层交替分布,层间黏结强度较弱、界面整体性差,导致其整体结构稳定性较差,在采动作用下极易发生失稳,诱发阶梯式失稳变形。巷道开挖后,原有地层原始应力平衡被打破,表层软弱岩层最先失稳,在受力条件下最先发生变形破裂,并向深部地层传导应力,引起深部地层的应力过载,并逐渐产生裂缝发展和变形。这种从表层到深层的失稳过程,逐层递进叠加损伤效应,导致了随着地层破裂次数的增多,岩体的变形逐渐增大。与浅部岩体的整体均匀变形相比,深层复杂地层中的结构性损伤对采动扰动的作用会被进一步放大,其变形破坏呈现渐进性和层级性特征,围岩可控性大幅降低,如不加以控制,将逐渐演变成大范围巷道垮塌,对采矿生产造成极大的危害^[9]。

2 深部煤层开采围岩支护控制技术应用策略

2.1 基于应力监测的超前卸压支护技术应用

为解决深部高地应力引起的围岩流变与变形难题,采用应力监测和超前卸压的联合控制方法,依托监测数据精准判定围岩应力响应规律,实现从根源上消除高应力对围岩的损伤效应的目的。在开挖初期,工作人员将进行高精度的围岩应力监测,覆盖巷道全部受力关键区域,在顶板、两帮和底板等关键位置分别放置钻孔应力计,分别在 5m 和 10m 两个层次进行测量,精准捕捉围岩应力动态演化特征,获取围岩应力分布、应力变化速率和应力集中区的分布情况。在高应力地区进行定向钻孔卸压,在实际施工中,卸压钻孔直径为 125mm,实体煤帮孔深为 10m,钻孔间距为 1.3m,钻孔贯通后,围岩内累积的应力被释放,岩体承载负荷降低,从源头弱化岩体流变损伤动力,流变变形的发展过程得到抑制。在卸压工作完成后,在巷道中布置预应力锚杆和锚索主动支护,保持 80-100kN 的预紧力,张拉荷载 250kN,并通过预应力锚索的预紧力消除了残余应力引起的变形作用,约束岩体内部微观裂隙发育,抑制了岩石的塑性变形和裂隙扩展。围岩应力和位移监测装置连续运行,获取的应力和位移数据,为卸压参数和支护预应力的调整提供了最直观的参考,实现了围岩的卸压和支护工作的动态匹配,实现了围岩的长期稳定性,解决了深部围岩的流变破坏问题。

2.2 适配非均匀变形的分区差异化支护技术应用

由于深部开采引起的岩石非均匀破裂与变形特性,围岩应力分布无序且损伤程度差异显著,常规的单一支护模式已无法满足要求,而通过监测获得的岩石状况作为进行分区支护的基本依据。采用地质雷达对巷道进行全范围探测,精准识别围岩内部隐蔽损伤与裂隙发育范围,并以岩体破碎程度、裂隙发育深度、表面变形速率等为评判标准,将巷道分为严重破碎区、轻微扰动区、整体稳定区,明确各区段的破裂机制和支护难点。强破碎带大多集中在顶板和煤柱帮部位,此类区域采动响应剧烈、围岩自稳能力极差,以锚网索耦合支护系统为主体,选择直径 22mm、长度 2.4m 的杆体,锚索为 6300mm 长度的钢绞线,构件间排距为 900mm × 900mm,金属网与喷射混凝土对围岩表层实施封闭,阻止破碎岩石继续剥离垮落。在弱扰动区,适当地简化了支护构件的布置,使锚杆能够保持岩体的稳定性,并能有效地控制物料的输出。在未破坏的区域,主要采取预防保护措施,支护构件的布置密度有所下降。工作面超前 200m 范围,是受采动叠加干扰的高频区,在此区

间内增加模块化临时补强支护单元,以抵抗采动应力的冲击作用。采用差异化支护后,巷道破裂段最大下沉量为44mm,两帮移尽量保持49mm,有效规避了支护冗余或支护不足的工程问题,实现了深部巷道围岩承载适应性的大幅提高。

2.3 水害耦合条件下的防参加固一体化支护技术应用

为解决深部高水压引起的岩石渗透扩容变形问题,深部富水巷道水岩耦合作用频繁,围岩软化劣化问题突出,采用“防渗堵水—加固”一体化支护系统,同时解决水渗漏和围岩失稳问题。在开挖结束后,采用高效的防水喷射混凝土,快速完成巷道表层封闭作业,将围岩所有表面的裂缝全部封闭,并阻断了水渗入到岩石中的渗透通道。采用深浅孔组合注浆技术对围岩深层的导水裂缝进行处理,其中,浅层钻孔深度2.5m,处理表层渗水裂隙,在8m深的大范围内填充岩石中的大裂缝,在此过程中,以42.5级普通硅酸盐水泥为主要材料,浆液可充分充填岩体裂隙孔隙,胶结松散岩体,使其成为一个完整的结构体,彻底消除渗透扩容变形的物质基础。在灌浆结束后,支护结构与已被加固的岩石组成一个共同的受力结构,并通过主动约束来增强其整体性和抗变形能力。在巷道底板铺设了疏水管路,将渗漏的水不断排出,持续降低围岩水环境带来的劣化影响,减少了地层中的孔隙水压,减弱了岩体中的持续水力作用。富水巷施工实测资料显示,全流程施工后,底板最大鼓胀量已基本控制在70mm以内,且周边渗水点明显减少,从而有效地控制了由水岩耦合作用引起的围岩变形灾变,符合深部富水煤层的采矿条件^[4]。

2.4 复合岩层阶梯式防控的逐层支护加固技术应用

通过采用喷射混凝土与金属网格相结合的方式,隔绝外部采动扰动对浅表破碎岩体的进一步侵蚀,实现对表层松动岩体的控制,避免了表层岩石率先破裂、失稳引发的连锁破坏。在表层支护状况基本稳定后,继续进行中部岩层的锚固施工,充分调动中部岩层自身的承载潜能,该锚固结构位于距离巷道巷壁4m处的完整硬质岩层内,使其与深层的稳定岩层发生力学连接,提高了岩层间的协同受力性能,抑制了中部岩层的破裂和变形扩展过程。在高风险围岩区,布置高强锚索,在6.5m深度位置布置高强锚索,并对其进行张拉预紧,传递高预紧力约束深部岩体的萌生裂隙,形成深层高强承载体,消除阶梯传导的应力损伤作用。由于软硬岩层交界面是地层中天然薄弱部位,因此采用了局部加固锚杆和定点注浆技术,弥补界面位置胶

结不足的固有缺陷,可以有效地解决因地层结构缺陷而造成的安全隐患。对复杂岩层巷道进行现场观测,4m和6.5m深度的测点,其围岩离层值保持在6mm和7mm,层间错动位移的范围很小,各层支护单元协同发挥约束作用,逐层支护方式能够有效地控制岩体的变形,完全阻断了阶梯式破坏的演化链条,从而提升了复合岩层巷道的整体稳定性。

2.5 动态采动扰动的智能监测与自适应支护技术应用

在矿山采动条件下,采动扰动呈现动态演变特性,围岩的变形状况不断演变,将智能监测和自适应支护相结合,形成了一套动态闭环的围岩支护调控系统。在整个巷道中布置变形、应力和裂隙等监测设备,并对其进行24h连续监测,将围岩表面位移、锚索载荷、裂隙扩展等参数都列入监测范围,并导入后台处理软件进行分析,从而定量判定采动扰动对围岩的作用程度,并对围岩的失稳前兆信息进行预警。根据实测的围岩应力和位移数据,实现了对各种参数的调整,实现了对围岩应力和位移的实时调整,避免了支护结构应力超载和支护抗力不足的问题。在采动扰动达到峰值时,在巷道中迅速布置模块化的临时支护单元,抵抗短期强烈的采动冲击,在干扰减弱后,将其全部拆除,保证了不会在较长时间内占用巷道的工作空间。在已有的监测数据基础上,基于已有的监测资料,对支护参数和构件布置方案进行反复优化,形成“监测—分析—调控—加固”的闭环工作模式。从现场工程监测数据中可以看出,50m处的煤体应力值为27.5MPa,300m处的压力值下降到5.3MPa,整个系统能够与开采距离下的岩体力学特性相适应,从而保证了深部巷道对于动态采动扰动的抵抗能力。

3 结语

综上所述,本文对我国深部煤矿井下四种主要类型的围岩变形特性进行系统性的整理,阐明高地应力、采动扰动、高水压及岩层结构失衡是导致其变形失稳的主要原因,揭示深部围岩变形失稳与浅部围岩在变形与损伤机制上的本质区别。在此基础上,根据不同类型的变形特征,分别制定适应性强、实用性强的五种支护控制方法,构建多维度、差异化、动态变化的深部岩体支护控制体系。通过本项目的研究,将明确深部巷道围岩的变形演化及支护调控的关键科学问题,可有效填补我国在深井复杂条件下浅部支护技术适配性的不足,丰富和发展我国深部巷道围岩灾害防治的理论和技术体系,对于促进我国深部煤炭资源安全高效绿色开采发展具有重大价值。

参考文献:

- [1] 李通. 深部厚煤层软岩巷道围岩支护技术研究与实践[J]. 晋控科学技术, 2026(1):34-37.
- [2] 赵磊, 王泽东, 陈星明等. 深部厚煤层采动大巷破坏特征及补强支护研究[J]. 矿业安全与环保, 2026,53(2): 144-154.
- [3] 吕华新. 深部厚煤层孤岛工作面巷道支护方案优化[J]. 煤炭科技, 2025,46(6):78-84.
- [4] 张永彬, 沈斌. 深部煤层切顶留巷巷道围岩破坏特征及控制技术[J]. 黑龙江科技大学学报, 2025,35(5):738-746.

作者简介: 吴东东 (1987-), 男, 汉族, 山东省临朐县人, 本科, 工程师, 技术员, 研究方向: 煤矿开采。