

煤矿井下巷道围岩稳定性控制技术研究

李 鹏

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘 要：针对榆横矿区井下软岩巷道变形量大、动压扰动明显、常规支护稳定性差的工程问题，本文依托现场地质条件，开展巷道围岩力学特性与失稳机制研究。通过分析地质条件、施工扰动、采动影响及支护匹配性四类核心因素，梳理传统锚杆、锚索、喷砼支护的现场应用短板。构建围岩卸压、高强锚网索耦合、注浆加固相结合的多技术协同控制体系。研究表明，综合支护体系可有效改善围岩应力状态，提升岩体整体性与支护承载能力，能够有效控制软岩及动压巷道围岩变形。

关键词：煤矿井下巷道；围岩稳定性；失稳机制；锚网索支护；协同控制技术

引言：随着煤矿开采深度与开采强度持续提升，井下巷道围岩地应力水平显著增大，软岩破碎、采动扰动、围岩遇水弱化等问题愈发突出。传统单一支护方式难以适配复杂巷道受力特征，经常出现顶板下沉、巷帮片帮、巷道底鼓等病害，严重制约矿井安全生产与正常接续。为有效解决现场支护失效、围岩持续失稳等工程难题，亟需系统探究围岩失稳机理与主控因素，优化现有支护工艺。本文结合现场实际开采条件，开展围岩稳定性控制技术研究，旨在形成适配性强、稳定性可靠的综合支护方案，保障巷道长期安全稳定。

1 井下巷道围岩力学特性与失稳机制

1.1 巷道围岩岩体物理力学参数测试与分析

巷道围岩力学参数是判定围岩稳定性、设计支护方案的基础依据。本文依托矿井现场工程条件，选取巷道顶底板及两帮典型岩芯试样，通过室内岩石力学试验，精准测定围岩岩体的单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比及内摩擦角等核心参数。试验结果表明，矿井巷道围岩多为泥岩、砂质泥岩互层结构，岩体整体性较差，抗压强度偏低，属于典型软岩围岩。同时岩层节理、裂隙发育，结构面分布杂乱，大幅降低了岩体整体承载能力，使得围岩受外力作用后易产生变形、开裂，为后续巷道失稳隐患提供了先天地质条件。

1.2 巷道围岩变形破坏特征与类型划分

结合井下现场观测情况，该矿井巷道围岩变形破坏具备明显的阶段性特征。巷道掘进初期，围岩主要表现为弹性变形，变形量小、增速缓慢；掘进扰动影响持续作用后，围岩进入塑性变形阶段，巷道两帮收缩、顶板下沉、底鼓现象逐步显现。根据破坏形态可将围岩破坏分为三类，分别是整体结构性破坏、局部裂隙扩张破坏和浅表松散剥落破坏。其中软岩巷道多出现底鼓、帮部

片帮问题，构造破碎带巷道易发生顶板垮落，不同破坏类型的变形规律存在明显差异，直接影响巷道整体稳定状态。

1.3 复杂条件下围岩失稳破坏机制

复杂采掘条件下的巷道围岩失稳，本质是围岩应力平衡状态被打破的结果。巷道掘进破除原有岩体应力平衡，周边围岩产生应力集中现象，当集中应力超过岩体自身强度极限时，围岩内部裂隙持续发育、贯通。同时，工作面采动扰动、断层破碎带、地应力偏高及地下水浸润等多重因素叠加，会持续弱化岩体力学性能，扩大塑性破坏区。常规支护结构难以适配动态变化的围岩应力，导致支护受力失衡，最终引发围岩开裂、变形甚至垮落，造成巷道整体失稳^[1]。

2 巷道围岩稳定性影响因素系统性分析

结合煤矿井下巷道实际开采条件，围岩稳定状态受多重因素共同制约，各因素相互叠加、共同决定巷道变形与破坏程度，具体可分为四类核心影响因素：（1）地质自然因素，围岩岩体强度、岩层结构、节理裂隙发育程度及断层、陷落柱等地质构造为先天控制条件，软弱夹层、破碎岩体及含水岩层整体整体性差、抗变形能力弱，是诱发巷道失稳的基础性条件，复杂构造区域围岩整体稳定性显著低于完整岩层区域。（2）巷道掘进施工工艺因素，井下掘进爆破、截割施工方式直接改变围岩原始应力状态，粗放爆破施工易造成巷道周边岩体损伤、裂隙扩展，超挖、欠挖及成型质量偏差会改变巷道受力结构，降低围岩自承载能力，加剧浅表围岩松动破坏。（3）矿山压力与采动扰动因素，巷道掘进及工作面回采会打破原岩应力平衡，产生应力集中与应力转移，相邻工作面、上下煤层开采形成的重复采动扰动会持续扩大围岩塑性破坏范围，动压冲击作用易造成支护结构

受力异常,引发巷道变形加剧。(4)支护参数与支护方式因素,支护形式选择不合理、锚杆锚索间距及长度参数匹配不当、支护施工滞后等问题,会导致支护体系承载能力不足、受力不均,无法有效约束围岩变形,难以充分发挥围岩自稳性能,最终造成巷道持续变形、片帮及顶板下沉等隐患^[2]。

3 巷道围岩稳定性常规控制技术

3.1 传统锚杆支护控制技术

传统锚杆支护是煤矿井下巷道最基础、应用最广泛的主动支护技术,适用于围岩结构完整、地质条件简单、采动影响较小的普通巷道,核心是通过锚固岩体实现围岩自承结构重塑。目前矿井常用传统锚杆以螺纹钢树脂锚杆为主,施工流程标准化、操作简便、成本较低,能够满足常规巷道的基础支护需求。其核心技术特点主要包含两点:(1)支护原理简单可靠,锚杆通过树脂药卷锚固于深部完整岩体,将巷道浅表松散围岩与深部稳定岩层连为整体,约束围岩裂隙扩张和岩体松动,利用围岩自身强度承担地压荷载,有效控制顶板下沉和两帮收敛变形。(2)施工工艺成熟,现场采用钻孔、清孔、装药卷、安装锚杆、搅拌锚固、托盘压紧的标准化工序,可跟随巷道掘进同步施工,支护时效性强,能够及时封闭裸露围岩,减少掘进扰动对岩体的损伤。

3.2 锚索联合支护控制技术

锚索联合支护是在传统锚杆支护基础上升级的强化支护技术,多用于顶板岩层厚度大、围岩应力较高、存在轻微采动扰动的巷道,是井下中高压巷道的主流常规支护形式。该技术以锚杆为基础支护、锚索为加强支护,搭配金属网、钢带构建联合支护体系,弥补了单一锚杆支护的性能短板。具体技术优势和应用特征分为两方面:(1)支护深度大、承载能力强,锚索锚固深度远大于普通锚杆,可穿透浅层破碎围岩,锚固在深部稳定岩层当中,有效悬吊上位松动岩层,分担浅层支护荷载,抑制巷道顶板整体下沉,解决单一锚杆支护深度不足、支护层次单一的问题。(2)联合支护整体性好,通过钢带和金属网将单根锚杆、锚索连接为整体支护结构,避免单点支护受力集中,均衡巷道整体受力,提升支护体系的抗变形、抗扰动能力。现场施工中,锚索联合支护适配性较强,可根据巷道围岩变形情况调整锚索间距、长度及张拉预紧力,适配大部分中等复杂地质巷道。

3.3 喷射混凝土支护技术

喷射混凝土支护是巷道表层围岩封闭加固的核心常规技术,常与锚杆、锚索配套使用,形成锚喷、锚网喷综合支护结构,广泛应用于各类井下巷道围岩表层防护

与加固。该技术采用湿式喷射工艺,将配比合格的混凝土混合料高速喷射至巷道围岩表面,快速形成连续、致密的混凝土支护层。其核心应用优势体现在三点:(1)快速封闭围岩,巷道掘进完成后可及时喷射混凝土,封堵围岩表面裂隙,隔绝井下空气、水汽与岩体的接触,防止软弱岩层风化剥落、遇水软化,从源头减少浅表围岩破损失稳问题。(2)填充加固表层岩体,高速喷射的混凝土可充填围岩表层张开裂隙、凹凸孔洞,粘结松散破碎岩块,重塑表层围岩整体性,提升浅表岩体的整体强度和抗渗性能。(3)协同支护效果显著,喷射混凝土层可与内部锚护结构紧密结合,形成表层封闭、深部锚固的分层支护体系,约束围岩浅表变形,弥补锚护支护表层防护不足的缺陷^[3]。

4 优化型巷道围岩稳定性综合控制技术体系构建

4.1 围岩卸压减压优化技术

深部矿井、动压及破碎巷道普遍存在应力集中显著、围岩变形持续增大等问题,常规被动支护难以消除高地应力引发的失稳隐患,围岩卸压技术通过人工干预方式重构巷道周边应力场,转移高应力集中区域,降低浅部围岩应力水平,为后续支护与加固创造良好的力学环境。现场主要采用钻孔卸压、切槽卸压和松动爆破卸压三种工艺,适配不同顶板与围岩条件。(1)深孔钻孔卸压技术,在巷道顶板及两帮高应力区施工大直径深孔,切断围岩应力连续传递路径,促使浅部集中应力向深部完整岩体转移,消除局部应力叠加现象,有效抑制巷帮片帮、顶板挤压变形,施工安全性高、对巷道正常作业干扰小。(2)定向切槽卸压技术,针对厚层坚硬顶板巷道,采用机械切槽方式切断顶板连续岩层结构,弱化顶板悬臂承载作用,减少岩层弹性应变能积聚,降低坚硬顶板瞬间断裂、冲击地压及顶板垮落风险。(3)松动爆破卸压技术,针对高强度完整岩体,采用可控松动爆破适度扰动深部岩体,释放围岩内部积聚的弹性应变能,避免高地应力突然释放造成巷道结构性破坏。卸压处理后,巷道浅部围岩应力显著回落,支护结构长期受力更加均衡,有效降低高强支护体系的承载压力,为锚固支护和注浆加固提供稳定的围岩基础。

4.2 高强锚网索耦合支护优化技术

高强锚网索耦合支护通过优化支护参数、施工工艺和整体布局,实现锚杆、锚索、钢带、金属网协同受力,形成高强度、高整体性的主动支护体系。(1)支护构件参数优化,采用高强高延伸率螺纹钢锚杆与大吨位预应力锚索替代传统普通支护材料,提升单根构件承载能力;配套加厚高强钢带与密闭菱形金属网,合理缩

小支护间距,消除支护空白区域,提升整体支护密度。

(2) 预应力耦合调控,施工阶段对锚杆、锚索施加标准预紧力,使支护结构提前形成主动约束应力场,保持支护构件与围岩紧密贴合,有效抑制掘进初期裂隙萌生与扩展,解决传统支护滞后受力的缺陷。(3) 整体结构耦合优化,利用钢带贯通各支护点位,依托金属网封闭巷道围岩表面,将离散的点状锚固结构整合为连续面状支护体系,避免单点受力过载、局部支护失效。该技术有效改善了传统支护零散受力、整体刚度不足的问题,大幅提升支护体系抗变形、抗扰动能力,可有效控制软岩大变形、动压巷道反复变形问题,适配深部复杂巷道支护工况。

4.3 围岩注浆加固补强技术

围岩注浆加固技术通过高压注浆方式,将改性浆液注入围岩裂隙,实现破碎岩体充填、胶结与整体改性,从根本上提升围岩力学性能。(1) 裂隙充填固结,浆液在高压作用下渗透贯通围岩各级裂隙,充填岩体空隙,浆液凝固后将松散破碎岩块胶结为整体,修复破损岩体结构,提升围岩强度与整体性。(2) 围岩隔水改性,固化浆液在围岩内部形成致密隔水结构,阻断井下淋水、积水渗入岩体内部,防止软弱岩层遇水软化、泥化崩解,削弱水害对围岩稳定性的劣化影响。(3) 深浅孔分层加固,采用浅孔、深孔交替注浆工艺,分别加固巷道浅表松散层与深部破碎岩层,扩大有效加固范围,形成分层补强的稳定围岩结构。注浆加固后的岩体连续性、完整性显著提升,围岩自承载能力明显增强,可与锚护结构协同承载,有效解决破碎围岩巷道支护难度大、后期失稳频发的工程问题。

4.4 多技术协同的综合支护体系搭建

单一卸压、锚护或注浆技术均存在适用局限,无法完全适配深部、软岩、强采动巷道的复杂工况。结合各技术优势,构建“应力卸压+注浆改性+高强锚护”多技术协同支护体系,是复杂巷道围岩稳定控制的有效方案。体系遵循“先卸压、后加固、再支护”的施工逻辑,

实现应力调控、岩体改性、结构支护的全方位协同控制。(1) 应力前置调控,巷道掘进完成后先实施深部卸压工艺,释放围岩弹性应变能,转移集中应力,降低高应力导致的围岩损伤,为后续加固支护提供安全作业条件。(2) 岩体结构改性加固,卸压作业结束后开展深浅孔注浆施工,固结松散岩体、封堵贯通裂隙,改善围岩物理力学参数,恢复并提升围岩自稳能力。(3) 高强耦合支护成型,待注浆体达到设计强度后,施工高强锚网索支护体系,通过预应力耦合约束围岩残余变形,形成深部注浆加固、中部锚护承载、表层整体封闭的立体支护结构。(4) 动态闭环管控,依托巷道现场变形监测数据,动态优化卸压参数、浆液配比、支护间距及预紧力参数,实现支护方案与围岩变形规律精准匹配。多技术协同体系弥补了单一技术的应用短板,实现应力调控、岩体加固、主动支护的有机融合,能够长期保障复杂巷道围岩稳定,工程适用性强、推广价值高^[4]。

结束语:本文系统完成了巷道围岩力学特征、失稳机制、影响因素及支护技术的系统性研究,明确了软岩巷道变形破坏的阶段性特征与多因素耦合失稳规律。对比分析各类常规支护技术的适用条件与存在缺陷,搭建了“卸压调控+注浆加固+高强锚护”协同支护体系。该技术体系改变了传统被动支护模式,通过应力优化、岩体改性和结构强化多重手段协同控顶控帮,有效解决复杂巷道围岩难支护、易变形问题。

参考文献

- [1] 陈小玉,杨喜君,刘国伟,等.煤矿软弱围岩巷道稳定性控制技术优化研究[J].陕西煤炭,2026,45(2):7-12.
- [2] 马国伟,贺增吉.巷道交叉点围岩稳定性分析及控制技术[J].陕西煤炭,2026,45(2):90-96.
- [3] 宋林.金矿深部开采巷道围岩的稳定性控制技术研究[J].世界有色金属,2026,(9):127-129.
- [4] 徐国梁.煤矿小煤柱沿空掘巷围岩稳定性控制技术研究[J].能源与节能,2026,(7):217-219+223.