

Research on Deformation Mechanisms and Support Technology Optimization for Soft-Rock Coal Mine Roadways

Xuehua Liu

Pingliang Xin'an Coal Industry Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 744201, China

Abstract

Soft-rock roadways are widely distributed in coal mines. Due to their pronounced creep, rheological, and plastic yield characteristics, these roadways are prone to deformation phenomena such as convergence, arch collapse, and floor bulging. This study, based on mechanical analysis of soft rock properties and geostress environment, reveals the multi-field coupling mechanism of deformation. It identifies three primary influencing factors: weakening of surrounding rock structure, hydration-induced softening, and support durability. Through numerical simulations and field monitoring, the paper compares different support schemes and proposes an optimized system featuring "strengthened support—multi-stage pressure relief—active control—information-based feedback." Results demonstrate that this system effectively reduces deformation rates and enhances long-term stability, providing scientific basis and practical guidance for deep soft-rock roadway support design and construction.

Keywords

soft rock roadway; deformation mechanism; support technology; mechanical properties; optimization study

煤矿软岩巷道变形机理及支护技术优化研究

刘学化

平凉新安煤业有限责任公司, 中国·甘肃 平凉 744201

摘要

软岩巷道在煤矿中分布广泛, 因蠕变、流变及塑性屈服特征显著, 易产生收敛、拱顶下沉、底鼓隆起等变形。本文基于软岩力学特性与地应力环境分析, 揭示其变形的多场耦合机理, 指出围岩结构弱化、水化软化及支护时效性是主要影响因素。通过数值模拟与现场监测对比不同支护方案, 提出“加强支护—多级卸压—主动控制—信息化反馈”优化体系。结果表明, 该体系能有效降低变形速率, 增强长期稳定性, 为深部软岩巷道支护设计与施工提供科学依据与实践指导。

关键词

软岩巷道; 变形机理; 支护技术; 力学特性; 优化研究

1 引言

近年来, 随着开采深度的增加, 地应力不断提高, 围岩环境更加复杂, 尤其是软岩巷道, 受地应力、水文、温度及开挖扰动等因素共同作用, 极易产生变形破坏, 部分矿井出现巷道持续收敛、拱顶破碎、底鼓严重等现象。国内外学者在软岩力学与支护方面进行了大量研究, 形成了从材料实验、数值模拟到工程控制的多层次研究体系。然而, 不同地质条件下软岩的力学响应差异显著, 支护体系的适应性不足, 仍需针对典型煤层地质环境开展系统性分析^[1]。本文以软岩巷道为研究对象, 探讨其变形破坏机理、控制原理及支护优化路径, 旨在构建符合深部复杂地质条件的科学支护体系, 提升煤矿巷道长期稳定性与安全性。

【作者简介】刘学化(1969-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 高级工程师, 从事煤矿安全生产管理研究。

2 软岩巷道的地质与力学特征分析

2.1 软岩的工程定义与分布特征

在煤矿巷道工程中, 软岩通常指在天然状态下具有一定强度但力学性能极不稳定的岩体, 其遇水易软化、受应力易蠕变、抗剪强度低、长期稳定性差。常见岩性包括泥岩、页岩、膨润土质砂岩及炭质泥岩等。这类岩体普遍含有蒙脱石、高岭石、伊利石等黏土矿物, 晶格间结合力弱, 吸水后体积膨胀、结构松散, 表现出显著的塑性流动特征。在我国, 软岩巷道广泛分布于华北、西北及西南煤田, 如山西沁水盆地、内蒙古鄂尔多斯盆地、陕西韩城矿区、甘肃安新煤田及贵州六盘水矿区。随着开采深度的增加, 地应力集中程度提高, 围岩变形呈现出时间积累性与空间非线性特征, 形成高应力、低强度、大变形的典型软岩地质环境, 为巷道稳定控制带来持续性挑战^[2]。

2.2 软岩的物理力学特性

软岩的物理力学性质复杂多变, 受含水率、结构致密

性和历史应力状态影响显著。实验研究表明,其单轴抗压强度通常低于 30 MPa,泊松比高于 0.35,峰值强度与残余强度差距较大,表明破坏后承载能力迅速衰减。软岩具有明显的粘弹塑性行为和时效性,其变形过程可分为压缩阶段、屈服阶段、稳态蠕变阶段及加速变形阶段。长期加载条件下,围岩内部微裂纹持续扩展,最终引发整体失稳。水化作用对其力学性能影响尤为显著,吸水后颗粒间结合力减弱、孔隙率上升、刚度降低。软岩的蠕变曲线呈“三阶段”规律:初始衰减阶段变形速率逐渐减缓,稳定阶段呈线性增长,而在加速阶段变形突增,最终导致塑性屈服或流变破坏。这种时间依赖性特征是巷道长期变形与支护失效的主要诱因。

2.3 围岩地应力环境及其影响

软岩巷道的应力环境复杂多变,尤其在深部开采条件下,地应力主控方向与构造应力叠加效应显著。巷道开挖导致原始应力重新分布,拱肩及底板区域形成明显的应力集中环^[3]。当主应力超过软岩屈服强度 70% 以上时,围岩将出现持续蠕变与塑性流动,伴随局部剪切破坏带的形成。若巷道布置与主应力方向夹角不合理,应力集中程度将进一步加剧,引发拱顶下沉与帮壁鼓出。水压条件同样对变形过程具有放大效应,孔隙水压力上升会降低岩体有效应力,诱发强度退化,显示应力—水化—时间三重耦合是导致软岩巷道失稳的关键机制。科学掌握应力环境特征并及时响应,是软岩巷道支护优化与稳定控制的基础。

3 软岩巷道变形破坏机理

3.1 结构面弱化与层理滑移机理

软岩巷道的围岩往往由层理、节理及断层等结构面构成,这些不连续面是应力集中与滑移破坏的潜在通道。巷道开挖改变了原岩应力场分布,使层理面上法向应力降低、剪应力增大,导致黏结强度下降和滑移趋势增强。层状泥岩、砂质泥岩、粉砂岩等软岩类型在扰动后极易沿层理面发生“层间剪切—块体剥落”破坏。试验研究表明,当剪应力达到岩体抗剪强度的 60%~70% 时,结构面内微裂隙便开始扩展并连通形成弱化带。此类弱化带的出现使围岩整体刚度下降,拱肩区产生塑性流动,拱顶下沉与帮壁鼓出逐步发展为整体变形。层理密度与倾角对变形模式影响显著,倾角 30°~45° 的结构面最易诱发滑移破坏,且在应力持续作用下会形成明显的滑移带,导致巷道变形呈阶段性加速特征。

3.2 水化软化与溶胀效应

软岩中含有大量易水化的黏土矿物,如蒙脱石、高岭石和伊利石,其化学结合力对含水量极为敏感。地下水渗入后,黏土颗粒间距增大,吸附层水膜形成,孔隙率上升,岩体结构完整性显著削弱^[4]。实验数据显示,泥质岩样在饱和条件下抗压强度可下降 40%~60%,黏聚力降低约一半。水化作用引发强度退化与体积膨胀,形成“水化软化圈”,该区域成为变形与破坏的主控区。长时间渗流作用还会使孔

隙水压力积聚,引起渗透变形与溶蚀,导致围岩出现慢性蠕变。尤其拱顶及底板区域,受水化软化影响最为显著,常表现为顶板片状剥落与底鼓隆起。若排水与防渗措施不到位,岩体长期受浸润,矿物结构转化加速,使巷道产生不可逆的持续变形。

3.3 应力重分布与时效蠕变机理

巷道开挖后,围岩原有应力平衡被破坏,应力场重新分布,局部区域出现高应力集中,尤其在拱肩和底角形成剪切集中带。初期阶段以弹塑性变形为主,随后进入黏塑性流变阶段,表现出时间相关性和不可逆性。软岩在持续高应力作用下,晶粒间滑移与微裂隙扩展逐渐加剧,围岩的内摩擦角与黏聚力随时间衰减。若支护系统滞后或刚度不足,应力将传递至支护构件,导致锚杆拉断、拱架屈曲或喷层剥离。数值模拟结果表明,当主应力超过屈服强度的 70% 且持续作用超过 30 天时,软岩将进入加速蠕变阶段,变形速率呈指数增长。长期应力—时间耦合作用下,巷道围岩产生“渐进式失稳”,即在无显著外力干扰下逐步塌落,构成深部软岩巷道最典型的时效破坏模式。

4 软岩巷道支护体系与失效模式分析

4.1 传统支护方式的局限性

在软岩巷道工程中,传统的支护体系多以锚杆、锚索或钢拱架等单一刚性结构为主,其设计理念主要基于短期稳定控制。该类结构在坚硬围岩中能有效承受静载荷,但在低强度、高塑性、流变性强的软岩条件下,其滞后性和非协调性问题突出。施工实践表明,支护滞后时间超过 24 小时后,围岩松动圈范围显著扩大,初始裂隙向深部发展,支护受力急剧上升。钢拱架因刚度过高、延性不足,易形成“应力集中核”,导致屈曲断裂或底脚滑移^[5]。

4.2 支护失效机理

支护系统失效多源于围岩—支护—应力之间的协同失衡。现场与数值分析均表明,失效形式主要包括锚固体拔出、锚杆剪断、钢架屈曲、喷层剥离及底鼓隆起等。锚固段若进入塑性区,摩阻力急剧下降,锚杆难以发挥承载作用;锚杆长度不足或布置间距过大,会形成力学“空白带”,使应力集中于局部区域,诱发剪切破坏。喷层若与围岩间存在空鼓或粘结力弱,则在动载作用下剥落,失去整体约束力。钢拱架受集中荷载作用产生屈曲变形,加之软岩长期蠕变,造成构件刚度持续退化。蠕变与支护刚度不匹配,是引发二次变形的关键机制。

4.3 典型矿区工程案例析

甘肃某煤矿深部软岩巷道埋深 720-940 m、埋深大,围岩以砂岩泥质、泥岩、粉砂岩、页岩为主,单轴抗压强度 18MPa,围岩松软、破碎,结构面发育且含水率高,属于高地应力、低强度和节理化岩体的复合型软岩。该煤矿巷道原设计采用锚索、锚杆+钢筋托梁+菱形金属网联合支

护方案：即顶板及两肩窝采用 $\phi 18.9\text{mm}$ ， $L=4.3\text{m}$ ，间排距 $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ ，每排9根，帮部采用 $\phi 22\text{mm}$ ， $L=2.5\text{m}$ 锚杆支护，每排4根，加强锚索采用 $\phi=18.9$ ， $L=6.3\text{m}$ 锚索支护，间排距 $1.6\text{m}\times 1.6\text{m}$ ，每排3根，两帮允许滞后6排，开挖后20天内拱顶下沉120 mm，两帮鼓出70 mm。通过监测发现，初期支护滞后36小时，围岩松动圈扩展至2.4 m，支护受力严重超限。经分析研究后，将该方案优化调整为：采用锚索、锚杆+钢筋托梁+菱形金属网+喷浆+局部注浆+局部增加U型棚联合支护，顶帮原支护方案不变，将加强锚索由 $\phi=18.9$ ， $L=6.3\text{m}$ 锚索改为 $\phi=21.8$ ， $L=6.3\text{m}$ 高强锚索，间排距由 $1.6\text{m}\times 1.6\text{m}$ 调整为 $1.2\text{m}\times 0.8\text{m}$ ，3-2-3形式布置，将两帮允许滞后6排调整为允许滞后4排，实施“先支后挖、主被动支护结合”的协同支护。监测结果显示，巷道收敛速率下降70%，支护应力趋于稳定，表明复合支护体系在控制软岩大变形方面具有显著效果，为类似工程提供了可复制经验。

5 软岩巷道支护技术优化与创新

5.1 主动控制理念与高效支护体系构建

主动控制以“早期封闭—协同承载—可控让压”为核心，目标是在松动圈形成前建立连续受力环。工艺路径为“强支护—多级卸压—柔刚结合—动态反馈”：开挖后2小时内完成高强锚索（SKP19 $\phi 18.9\text{mm}$ ， $L=4.3\text{m}$ ， $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ ）、高强锚杆（HRB500 $\phi 22\text{mm}$ ， $L=2.5\text{m}$ ， $0.8\text{m}\times 0.8\text{m}$ ）与钢带内层框架，设置可屈服能量吸收件以允许30~50mm受控收敛；联合布置高强锚索（SKP19 $\phi 21.8\text{mm}$ ， $L=6.3\text{m}$ ， $1.2\text{m}\times 0.8\text{m}$ ）形成深部承载骨架并施加210-280 kN预紧力；局部巷道松软处外层喷射纤维混凝土（C35， $t=100\text{mm}$ ，PP纤维 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ ）实现围岩—支护整体化，配合局部定向卸压，抑制应力集中与裂隙扩展。该体系以刚柔匹配与阶段化加载实现“以变控变”，降低二次扰动风险。

5.2 支护参数优化与数值模拟验证

基于FLAC3D软件建立软岩巷道三维粘弹塑性数值模型，采用莫尔—库仑—蠕变本构模型并引入层理弱面参数，以更真实反映软岩的各向异性与时效特征。模型中对拱肩及底板区域进行网格局部细化（单元尺寸 $\leq 0.25\text{m}$ ），并结合强度折减法与位移收敛判据开展L9正交试验及灵敏度分析。结果表明，采用锚索、锚杆+钢筋托梁+菱形金属网+喷浆+局部注浆+局部增加U型棚联合支护组合最优，拱顶下沉量降至原方案的45%~55%，围岩塑性区体积缩减

38%，侧帮最大收敛降低48%，整体安全系数由1.23提高至1.82。通过现场监测数据反演校核接触参数与初始应力状态，计算结果与实测变形趋势误差控制在 $\pm 10\%$ 以内，说明该优化参数具有良好的工程适应性与可推广性，为软岩巷道支护设计提供了可靠的数值依据。

5.3 信息化监测与智能反馈控制技术

构建“感知—分析—决策—调控”闭环：以分布式光纤应变、锚索计、收敛站、孔压计及微震传感实现5 min粒度数据采集，数据接入数字孪生体并采用扩展卡尔曼滤波与贝叶斯更新进行多源融合；基于LSTM/GBDT的变形速率—危险度映射生成分级预警阈值（位移增量 $> 2\text{mm}/\text{d}$ 、应力增量 $> 0.3\text{MPa}/\text{d}$ ）。当触发阈值时，系统自动下发调控策略（锚索再张拉、局部二衬喷补与限位让压），并滚动评估处置效果。试点表明，数据可用率 $> 99\%$ ，预警提前量48~72 h，处置后变形速率平均下降60%，显著增强软岩巷道的长期稳定与运维韧性。

6 结语

软岩巷道的变形控制是煤矿安全生产中的核心问题，其机理复杂、影响因素多、动态特征明显。研究表明，软岩巷道变形本质上是地应力、水化、结构面及支护响应的多场耦合作用结果。传统支护体系难以适应软岩大变形与时效蠕变特征，需构建主动、协同、信息化的综合控制体系。本文基于力学分析与工程实证，提出了以强支护、多级卸压、柔刚结合和信息反馈为核心的支护优化思路，并通过数值模拟与现场监测验证其有效性。未来研究可在三方面深化：一是进一步揭示软岩蠕变的微观机理；二是完善支护体系的动态演化模型；三是推动智能化监测在复杂矿区的广泛应用。通过技术创新与理论深化，可实现深部软岩巷道的安全、经济与可持续稳定，为煤矿现代化建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张敏.成庄煤矿软岩巷道变形破坏机理及控制技术[J].煤矿安全,2025,56(02):166-172.
- [2] 白艺冰.蒲河煤矿软岩巷道碎胀大变形机理及支护参数优化研究[D].辽宁工程技术大学,2024.
- [3] 张荟懿.木家庄煤矿深部软岩巷道变形破坏机理及支护研究[D].太原理工大学,2021.
- [4] 姜鹏飞.千米深井巷道围岩支护—改性—卸压协同控制原理及技术[D].煤炭科学研究总院,2020.
- [5] 杨逢春,李站飞.辛置煤矿破碎软岩巷道变形破坏机理及支护技术[J].煤炭技术,2018,37(02):49-52.