

Optimization and stability analysis of roadway support structure under complex geological conditions

Changbao Li Pengfei Li Guotai Hou Jiewei Zhao

Shanxi Coal Transport and Marketing Group Puxian Haoxingyuan Coal Industry Co., Ltd., Linfen, Shanxi, 041206, China

Abstract

Complex geological conditions (high stress, soft rock, fault fracture zones, and mining-induced zones) are critical factors affecting roadway stability. Traditional support structures often fail to adapt adequately, leading to uncontrollable deformation of roadways and significantly increased maintenance costs. This study systematically investigates the impact mechanisms of high-stress soft rock creep characteristics, heterogeneity of fault fracture zones, and dynamic stress transmission patterns in mining-induced zones on roadway stability, starting from the mechanical properties of complex geological conditions and the mechanisms causing disasters. Following the collaborative concept of "active load-bearing + passive protection," this paper proposes optimization principles and technical approaches for support structures, including high-strength bolt-sling support systems, flexible-rigid coupling designs, and integrated solutions combining surrounding rock modification with support systems. These findings provide theoretical support for roadway support design under deep and complex geological conditions.

Keywords

complex geological conditions; roadway support; structure optimization; stability analysis; mechanical mechanism

复杂地质条件下巷道支护结构优化与稳定性分析

李长宝 李鹏飞 侯国泰 赵杰伟

山西煤炭运销集团蒲县昊兴煤业有限公司, 中国·山西临汾 041206

摘要

复杂地质情况(高应力、软岩、断层破碎带、采动影响区)是影响巷道稳定的关键因素,传统支护结构常因适应性不够,造成巷道变形无法控制、维护成本大幅增加,本文从复杂地质条件的力学特性和导致灾害的机理入手,系统研究高应力软岩蠕变特性、断层破碎带非均质性、采动应力动态传递规律对巷道稳定性的影响机制;按照“主动承载+被动防护”协同理念,提出支护结构优化的主要原则与技术途径,有高强度锚杆-锚索协同支护、柔性支护和刚性支护耦合设计、围岩改性与支护一体化方案,给深部复杂条件下巷道支护设计提供理论支撑。

关键词

复杂地质条件; 巷道支护; 结构优化; 稳定性分析; 力学机理

1 引言

随着矿产资源开采向深部推进,复杂赋存条件资源开发力度增大,巷道面对的地质环境愈发复杂,高应力、软岩、断层破碎带、采动叠加影响等情况成了工程常见现象。复杂地质条件下,围岩力学性质变差、应力分布混乱,传统“被动抵抗”式支护结构(单一锚杆、砌碛支护)无法适应围岩动态变形特点,常出现锚杆断裂、锚索不管用、巷道顶板垮落或两帮片帮等问题,这既威胁施工安全,还让巷道返修率上升、开采成本提高。

目前学术界对复杂地质巷道支护的研究大多围绕现场试验和参数调整展开,没有对“地质条件-力学响应-支护

作用”耦合关系进行系统的理论分析,导致支护优化变得盲目。本文以复杂地质条件的力学本质为切入点,剖析巷道失稳的机理,推出支护结构优化的理论依据,搭建稳定性分析框架,目的是为复杂地质巷道支护设计提供通用理论指导,填补“地质特征-支护设计”间的理论衔接空白。

2 复杂地质条件的力学特征与巷道失稳机理

2.1 高应力软岩的蠕变特性与失稳机制

高应力软岩是复杂地质状况的典型体现,它的力学特点是强度低、孔隙率高、蠕变性强,长期恒定应力作用下的软岩,软岩在长期恒定应力作用下会历经瞬时弹性变形、衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变四个阶段,巷道开挖打破原岩应力平衡以后,围岩应力集中系数能达到2到5倍,远远超过软岩长期强度阈值。

软岩的蠕变失稳表现出“渐进性”与“突发性”这双

【作者简介】李长宝(1986-),男,中国云南曲靖人,本科,工程师,从事采矿工程研究。

重特点：围岩主若弹性变形，支护结构承受的荷载不大，时间慢慢过去，软岩内部微裂隙扩展、孔隙被压缩，然后进入稳定蠕变阶段，这时支护结构得持续抵抗围岩的缓慢变形，若支护刚度不够，微裂隙会一直贯通。应力超过软岩长期强度时，蠕变进入加速期，围岩快速被破坏，出现顶板下沉、两帮收敛速率猛增的情况，最后造成巷道失稳，软岩水理特性会让失稳风险加剧，水分子渗入软岩矿物晶格后，会减小颗粒间的黏结力，还会削弱围岩强度，进而产生“水-力-化学”耦合致灾效应^[1]。

2.2 断层破碎带的非均质性与应力扰动效应

断层破碎带由断层泥、角砾岩、糜棱岩等松散介质构成，其力学性质表现出显著的“非均质性”与“各向异性”特点，岩体各部位强度差异有1~3个数量级，垂直断层走向的强度远小于平行方向的强度，因为这种不均匀，巷道开挖后应力分布特别不规则。

断层破碎带对巷道稳定性的影响主要有两个方面，一是“应力扰动”，断层属于天然应力边界，原岩应力在断层附近会出现畸变，开挖之后容易形成局部应力集中区，让破碎带岩体更易出现剪切破坏^[2]。二是“承载能力劣化”，破碎带岩体颗粒间的胶结情况很差，不能形成有效的自承载结构，巷道开挖完，围岩难以凭借自身变形达成应力重分布，荷载直接传递到支护结构上，若支护方案没考虑破碎带的非均质性，容易出现局部支护过载失效，随后引发整体失稳，断层破碎带常是地下水的导水通道，水渗透会降低岩体抗剪强度，使巷道变形加剧。

2.3 采动应力的动态传递与叠加致灾机理

多工作面开采时，采动应力动态传递是巷道失稳的关键原因，采动应力产生于工作面回采时顶板垮落和煤层开采后的应力释放，其传播具备“时效性”与“方向性”，采动应力会以弹性波的形式迅速传播，对周围巷道造成即刻冲击；回采稳定之后，采动应力形成稳定应力场，这个应力场和原岩应力叠加，改变了巷道周边的应力分布状态。

采动应力叠加造成灾害的机理体现为“双重应力集中”。工作面回采结束后，采空区上方产生应力降低区，两侧出现应力升高区，若巷道处于应力升高区，围岩应力集中系数可提高至3~6倍。相邻工作面的采动应力会彼此叠加，产生“应力叠加区”，导致巷道承受的载荷远超单一采动情况^[3]。

3 巷道支护结构优化的核心原则与技术路径

3.1 “主动承载 – 被动防护”协同的优化原则

复杂地质条件下，巷道支护结构优化得摒弃传统“刚性抵抗”理念，转向做“主动承载-被动防护”协同设计，核心原则包含“应力调控优先”“刚度匹配适配”“时空效应兼顾”“多场耦合适应”。

“应力调控优先”要借助支护结构主动去改变围岩应力分布，并非只是抵抗载荷，用高强度锚杆-锚索系统给围

岩施加预紧力，能压缩围岩内部裂隙，使围岩体完整性提高，增加它的自承载能力，让应力集中区往围岩深部转移。

“刚度匹配适配”规定支护结构的刚度要与围岩变形特性相符合，软岩巷道应采用“柔性支护+刚性约束”的组合样式，如金属网、土工格栅这类柔性部分能吸收围岩瞬时变形，刚性部分（高强度锚杆、锚索）限制长期蠕变^[4]。“时空效应兼顾”会考虑巷道开挖后应力的动态演化规律，前期用临时支护控制马上出现的变形，后期借助永久支护抵御长期蠕变。“多场耦合适应”针对水、温度等环境因素，支护设计时融入防水，减轻多场耦合对围岩稳定性的不利影响。

3.2 高强度锚杆 – 锚索协同支护的参数优化

复杂地质巷道主动承载的核心技术是高强度锚杆-锚索协同支护，参数优化要根据围岩力学特性和应力分布规律，着重关注预紧力、间排距、锚固方式、材料选型这四个维度。

要平衡“应力传递”与“围岩损伤”来确定预紧力，预紧力要是太小，没法有效挤压围岩裂隙，锚杆-锚索仅仅发挥“悬吊”作用，不易形成主动承载结构；预紧力太大，会造成锚杆周围围岩出现压溃破坏，进而形成“应力松弛区”，要把锚杆预紧力控制在围岩抗压强度的0.3到0.5倍，锚索预紧力为锚杆的3~5倍，从而使应力均匀传递。优化间排距要依据“有效支护范围”理论，锚杆有效支护半径和杆体直径、预紧力成正相关，在软岩或破碎围岩里，间排距要减小到0.8~1.0m，保证相邻锚杆有效支护范围重叠。选择锚固方式要考虑围岩完整性，完整围岩可采用端锚，破碎或者软岩就得全长锚固，依靠树脂药卷和围岩黏结，让载荷均匀传递，选材料的时候，锚杆需选用屈服强度 $\geq 500\text{MPa}$ 的高强度螺纹钢，锚索需用破断拉力 $\geq 300\text{kN}$ 的钢绞线，从而适应复杂地质下高载荷的需要。

3.3 柔性支护与刚性支护的耦合设计思路

要解决复杂地质巷道动态变形问题，核心是将柔性支护与刚性支护耦合设计，重点在于利用柔性支护的“变形适应性”以及刚性支护的“长期承载能力”，让二者形成互补协同的效果。

柔性支护可起到“吸收瞬时变形、分散局部载荷”的作用，常用材料有金属网、土工格栅、聚氨酯泡沫等，金属网抗拉强度高，可防止围岩表面岩块掉落，并且能承受一定程度的变形，防止局部应力集中；土工格栅优势明显，它的三维网状结构，能把局部载荷分散到更大范围的围岩，适合用在断层破碎带或软岩巷道；聚氨酯泡沫有柔性和密封性，注入围岩裂隙，能填充孔隙，阻挡水侵入，还能吸收围岩微小变形^[5]。

刚性支护可起到“限制长期变形、提供稳定支撑”的作用，常用的形式有高强度锚杆-锚索系统、钢支架、混凝土砌碹等，刚性支护得跟柔性支护形成“时空协同”：巷道开挖刚开始的时候，柔性支护先起作用，把围岩的瞬时弹性变形和部分蠕变变形吸收掉；时间慢慢过去，刚性支护慢慢

承担起主要载荷,防止围岩长期蠕变,防止进入加速蠕变阶段。在软岩巷道里,在软岩巷道里,能采用“金属网+聚氨酯泡沫+高强度锚杆-锚索”的耦合结构,金属网可防止表面岩块掉落,聚氨酯泡沫能填充裂隙、吸收微小变形,锚杆-锚索可提供长期稳定的预紧力,这三者配合起来,能控制软岩变形的整个阶段。

3.4 围岩改性与支护一体化优化方案

面对极软岩、断层破碎带等极端复杂的地质情形,仅仅依靠支护结构的优化没办法保证巷道稳定,需要采用“围岩改性+支护一体化”方案,改善围岩力学性质,提升它的自承载能力,减少支护结构的载荷。

围岩改性的重点是“强化岩体结构、提升力学参数”,常用的技术包含注浆加固、化学改性以及物理改性,注浆加固是往围岩裂隙注入水泥浆、环氧树脂等浆液,把孔隙填满,把微裂隙胶结起来,形成“注浆-岩体”复合结构,能让软岩强度提高30%-80%;化学改性是让化学溶液(硅酸钠溶液)和岩体矿物起反应,产生高强度胶结物,让岩体的水理特性和黏结强度变好;物理改性可借助冻结、加热等手段改变岩体物理状态,如冻结法能把软岩里的水变成冰,大幅提升岩体强度,可用于富水软岩巷道。

围岩改性与支护一体化,关键就在于“时空同步”,改性作业得跟支护施工紧密衔接,巷道开挖结束后,先进行临时支护,以此控制瞬时变形,接着开展围岩改性作业;改性结束后,然后施工永久支护结构,这时候围岩已经形成一定自承载能力,支护结构仅要抵抗残余变形。一体化方案打破“支护仅抵抗载荷”传统模式,依靠“改性增强围岩+支护辅助承载”,从根本上提升巷道稳定性。

4 巷道稳定性分析的理论模型与力学机理

4.1 基于弹塑性力学的围岩应力分布模型

对于圆形巷道,可采用霍克-布朗强度准则与摩尔-库仑强度准则结合的方法,构建弹塑性应力分布模型。假设巷道半径为 r_0 ,原岩应力为 σ_0 ,围岩黏聚力为 c ,内摩擦角为 φ ,根据弹塑性力学理论,巷道开挖后,围岩分为弹性区与塑性区:塑性区半径 r_p 可通过平衡方程与强度准则联立求解,其表达式为,其中 σ_1 为塑性区与弹性区的界面应力。

4.2 基于损伤力学的围岩劣化演化模型

复杂地质状况下,围岩损伤的演化是符合“应力-损伤”耦合规律的:围岩损伤变量 $D=0$,岩体是完整的;应力超

出围岩损伤起始阈值,微裂纹开始产生, D 随应力增加线性增长;应力达到围岩的峰值强度时,大量微裂隙贯通, D 急剧地增大,岩体开始破坏。损伤演化受时间因素影响,要引入“时间损伤变量”,描述蠕变期间微裂隙的逐步扩展。

4.3 基于数值模拟的支护-围岩协同作用模型

数值模拟模型中,围岩用弹塑性本构关系,支护结构(锚杆、锚索、金属网)用杆单元、壳单元或者实体单元来模拟,通过明确支护与围岩接触关系,实现“支护-围岩”力学耦合,模拟的时候,可施加位移约束或者力约束,模拟不同支护方案效果,分析支护结构应力分布以及围岩位移变化规律。

5 结语

复杂地质条件下巷道失稳机理有明显的“场景依赖性”,应力软岩的问题以蠕变失稳为主,断层破碎带主要因非均质性应力扰动引发灾害,采动影响区主要是应力叠加破坏,需要针对不同场景制定有差异的支护优化策略,要优化巷道支护结构,核心就是实现“支护-围岩”力学协同。用高强度锚杆-锚索系统施加主动预紧力,提升围岩自承载能力。采用柔性和刚性支护结合的设计,适应围岩动态变形特点;运用围岩改性技术,从根本上提高岩体力学参数,这三者一起构成“主动调控-被动防护-本质强化”的一体化支护体系。未来复杂地质条件下巷道支护工作,可以采用“新型支护材料的力学特性研究”,通过研究新材料应力和应变的关系,拓展支护结构优化空间。

参考文献

- [1] 陈东,姬克敏.复杂地质条件下的矿山巷道支护技术优化研究[J].世界有色金属,2024,(20):229-231.DOI:CNKI:SUN:COLO.0.2024-20-072.
- [2] 伏晓斌,任少峰,张祥,等.复杂地质条件的磷矿巷道支护方法研究与应用[J].现代矿业,2024,40(06):257-260.DOI:CNKI:SUN:KYKB.0.2024-06-062.
- [3] 袁如江.复杂地质条件下的煤矿巷道掘进支护技术及实践[J].内蒙古煤炭经济,2024,(06):172-174.DOI:10.13487/j.cnki.imce.024899.
- [4] 张亚飞.矿井深部复杂地质条件下巷道支护技术研究[J].机械管理开发,2023,38(12):286-288.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2023.12.109.
- [5] 朱荣彬.大理深复杂地质条件下巷道掘进与支护技术研究[J].能源技术与管理,2023,48(06):74-76.DOI:CNKI:SUN:JSMT.0.2023-06-022.