

流变围岩条件下巷道支护滞后致灾机理及防控技术

姚维智

中建铁投华南建设有限公司 广东 广州 510700

摘要: 深部矿井开采过程中, 软岩巷道受高地应力、岩体结构破碎、水文环境复杂等多重因素影响, 表现出极强的流变时效特性, 围岩变形具备显著的时间累积效应。巷道掘进完成后, 支护施工滞后、工序衔接不畅、支护窗口期把控失准等问题, 是诱发流变围岩顶板离层、帮部片落、巷道大变形及整体垮塌灾害的核心诱因, 严重制约深部巷道工程稳定性与安全生产。为系统揭示流变围岩条件下支护滞后的致灾演化规律, 本文以深部软岩流变巷道为研究载体, 基于岩体流变力学、损伤力学及围岩支护耦合作用理论, 系统划分深部巷道围岩蠕变变形阶段, 精准剖析各阶段围岩变形响应特征。通过理论分析阐释支护滞后引发的围岩时效损伤累积、锚护结构耦合失效、灾害链式传导三大核心致灾机理, 依托 FLAC^{3D} 数值模拟软件引入 Cvisc 流变本构模型, 设置多组支护滞后时长工况, 对比探究不同滞后时间下巷道围岩位移演化、塑性区扩展及应力重分布规律, 明确支护滞后时长与围岩失稳程度的量化关系。

关键词: 流变围岩; 巷道支护; 支护滞后; 致灾机理; 时效变形; 防控技术; 数值模拟

Disaster-causing Mechanism Induced by Delayed Roadway Support under Rheological Surrounding Rock Conditions and Its Prevention-control Technology

Weizhi Yao

CSCEC Railway Investment South China Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510700

Abstract: During the mining of deep mines, soft-rock roadways are subject to multiple factors including high in-situ stress, fractured rock mass structure and complex hydrological environment, and exhibit prominent rheological time-dependent characteristics. The deformation of surrounding rock shows an obvious time-cumulative effect. After roadway excavation, problems such as delayed support construction, poor working-procedure connection and inaccurate control of the support time window serve as core triggers for disasters including roof separation, side spalling, large-scale roadway deformation and overall collapse of roadways with rheological surrounding rock, which seriously impair the stability and safe production of deep roadway engineering. To systematically reveal the disaster-evolution law caused by delayed support for rheological surrounding rock, this paper takes deep rheological soft-rock roadways as the research object. On the basis of rock mass rheological mechanics, damage mechanics and the coupling theory of surrounding rock-support interaction, this paper divides the creep deformation stages of surrounding rock in deep roadways and analyzes the deformation response features of surrounding rock at each stage. Theoretical analysis is adopted to interpret three core disaster-causing mechanisms: time-dependent damage accumulation of surrounding rock, coupling failure of bolt-support structures and chain-type disaster propagation induced by delayed support. With the FLAC^{3D} numerical simulation software, the Cvisc rheological constitutive model is adopted, and multiple working conditions with different support delay durations are set. Comparative investigations are carried out on the displacement evolution, plastic zone expansion and stress redistribution of roadway surrounding rock under different delay durations, so as to determine the quantitative correlation between support delay duration and surrounding rock instability degree.

Keywords: Rheological surrounding rock; Roadway support; Support delay; disaster-causing mechanism; Time-dependent deformation; Prevention-control technology; Numerical simulation

引言

我国煤炭开采深度持续递增, 多数主力矿井进入千米级深部开采阶段, 深部巷道围岩普遍呈现高地应力、岩性软弱、结构破碎、流变效应显著等特征^[1]。与浅部弹性围岩不同, 流变软岩巷道变形不随掘进施工完成而终止, 而是随时间产生持续性蠕变变

形, 具有变形滞后、损伤累积、破坏突发的典型时效特征^[2]。大量现场工程实践表明, 流变围岩巷道失稳灾害并非由瞬时掘进扰动导致, 主要源于支护施工滞后引发的围岩时效损伤累积, 属于典型的时间依赖性工程灾害。

目前国内多数矿井巷道支护施工仍沿用传统静态支护理念,

仅注重支护强度与结构参数,忽视流变围岩的时效变形规律,普遍存在临时支护跟进不及时、永久支护窗口期滞后、工序衔接脱节等问题^[3]。支护滞后会导致巷道空顶区围岩长期处于无约束流变状态,微裂隙持续萌生、扩展、贯通,围岩自承能力逐步衰减,最终引发顶板下沉、帮部大变形、底鼓甚至垮塌灾害,严重威胁井下安全生产,大幅增加巷道返修成本^[4]。因此,系统研究流变围岩条件下巷道支护滞后致灾机理,研发针对性时序防控技术,对破解深部软岩巷道长期失稳难题、实现巷道长效稳定控制具有重要的理论价值与工程意义。

1 流变围岩时效变形特征分析

基于岩体流变力学理论与现场监测数据,深部软岩流变围岩在掘进扰动后的变形演化可划分为初始蠕变、加速蠕变、稳定蠕变三个典型阶段,各阶段变形规律与支护响应特征差异显著,是支护滞后致灾的核心基础。

初始蠕变阶段(掘进后0~12h):巷道掘进卸荷后,围岩原始应力平衡被打破,产生瞬时弹性变形,随后进入低速蠕变状态。此阶段围岩变形速率较慢,主要以表层微裂隙发育为主,岩体整体完整性较好,未产生结构性损伤,是支护干预的最佳窗口期,及时支护可有效约束初始裂隙扩展,阻断围岩损伤源头^[5]。

加速蠕变阶段(掘进后12h~7d):在高地应力持续作用下,围岩蠕变速率快速提升,裂隙持续发育贯通,破碎范围逐步扩大,围岩自承能力快速衰减。若无有效支护约束,流变变形会持续累积,表层岩体松散脱落,逐步形成破碎承载薄弱区,极易诱发局部片帮、顶板离层等初期灾害^[6]。

稳定蠕变阶段(掘进7d后):围岩变形速率逐步放缓,变形量趋于稳定,但仍存在持续性微量流变变形。此时围岩内部损伤已基本成型,若前期支护滞后导致损伤严重,巷道会长期处于不稳定状态,随时可能发生突发性失稳垮落,形成永久性支护隐患。

2 支护滞后致灾机理研究

流变围岩巷道支护滞后致灾是围岩时效流变、应力重分布、支护耦合失效多因素协同作用的结果,其核心机理可分为围岩损伤累积机理、支护承载失效机理、灾害链式演化机理三部分。

2.1 围岩时效损伤累积机理

流变围岩的核心特性为变形时间依赖性,掘进后空顶区无支护约束时段越长,围岩蠕变损伤越严重。支护滞后状态下,巷道表层围岩长期处于自由流变状态,微裂隙在应力作用下持续扩展、贯通,岩体黏聚力、内摩擦角等力学参数持续劣化,围岩完整性与自承能力逐步衰减^[7]。相较于完整围岩,滞后支护对应的破碎围岩可锚性、承载能力大幅下降,产生不可逆的时效损伤,为后续巷道大变形、失稳垮落奠定基础。

2.2 支护结构承载失效机理

合理的支护时序可实现支护结构与围岩的同步变形、协同承

载,充分发挥锚网索支护的主动约束作用。而支护滞后会导致围岩先期自由变形过量,待支护施工完成后,围岩已形成大范围破碎区,支护结构无法与完整围岩紧密耦合受力^[8]。此时支护体系仅能被动承受围岩残余变形压力,无法抑制深部围岩流变扩展,极易出现锚杆锚索脱锚、断裂、网片撕裂等支护失效问题,彻底丧失围岩约束能力。

2.3 灾害链式演化机理

支护滞后引发的灾害呈现典型链式演化规律:支护滞后→围岩初始流变损伤→裂隙贯通破碎→支护耦合失效→围岩加速流变→巷道大变形→局部失稳→整体垮塌。初期微小的支护时序偏差,在流变时效作用下持续放大,逐步发展为结构性灾害,这也是流变围岩巷道相较于普通围岩巷道更易突发失稳的核心原因^[9]。

3 支护滞后灾害数值模拟分析

3.1 模型构建与方案设计

采用FLAC^{3D}数值模拟软件,依托深部860m埋深软岩巷道工程条件构建三维计算模型,巷道断面宽4.6m、高3.2m,围岩采用摩尔-库伦流变本构模型,精准还原软岩蠕变特性。模型顶部施加等效覆岩自重应力,四周设置应力边界,底部固定位移约束。设计三组不同支护滞后时长方案,对比分析围岩变形与破坏特征:方案一(无滞后):掘进完成后即时支护;方案二(轻度滞后):掘进后12h支护;方案三(严重滞后):掘进后7d支护。

3.2 模拟结果分析

围岩位移特征:无滞后支护方案下,巷道顶板最大下沉量42mm,两帮移近量51mm,变形快速趋于稳定,无持续流变现象。轻度滞后方案下,围岩流变变形充分发育,顶板下沉量增至98mm,两帮移近量113mm,变形量大幅提升。严重滞后方案下,围岩经历完整加速蠕变过程,顶板下沉量达186mm,两帮移近量202mm,巷道出现严重大变形,成型完全破坏。

塑性区发育特征:支护无滞后时,巷道塑性区仅发育于表层,顶板、帮部塑性区深度不足1.2m,围岩整体稳定。支护轻度滞后时,塑性区向围岩深部扩展,深度达2.5m。支护严重滞后时,塑性区大范围贯通,深度超4.0m,围岩完全进入塑性破坏状态,失稳风险极高。

应力分布特征:支护滞后时长越长,巷道周边应力集中越显著,应力集中区越靠近巷道表层,极易引发表层围岩挤压破碎。即时支护可有效扩散集中应力,实现围岩与支护结构协同承载,大幅降低应力破坏风险。

4 流变围岩支护滞后灾害防控技术体系

基于支护滞后致灾机理与数值模拟结果,遵循“控时序、抑流变、强耦合、防累积”的防控思路,构建适配流变围岩的一体化灾害防控技术体系,从源头杜绝支护滞后引发的围岩失稳灾害。

4.1 支护时序精准管控技术

优化掘进支护施工工序,重构“掘进截割-机载临时支护-快速出渣-永久支护”平行作业模式,彻底消除空顶无支护滞后时段。严格把控支护黄金窗口期,规定掘进完成后30min内完成临时支护覆盖,12h内完成永久锚网索支护施工,精准适配围岩初始蠕变阶段变形特征,从源头抑制围岩时效损伤累积^[10]。同时优化循环进尺,采用1.2m小进尺快速循环掘进,缩短单次作业时长,保障支护快速跟进。

4.2 流变围岩主动支护加固技术

针对流变围岩持续蠕变特性,采用高预应力锚网索联合支护体系,提升支护结构主动约束能力。选用高强预应力锚杆、加长锚索,提升支护预紧力,抵消围岩初期流变压力,抑制裂隙扩展。对破碎严重区段,配套浅层注浆加固技术,填充围岩裂隙,提升岩体完整性与黏结强度,改善围岩可锚性,解决滞后支护引发的围岩破碎、支护耦合失效问题,实现“支护-围岩”协同承载。

4.3 动态监测预警与微调技术

建立流变围岩时效变形动态监测体系,布设顶板离层仪、围岩位移监测站点,实时采集巷道变形速率、变形量数据,精准判别围岩蠕变阶段。根据监测数据动态微调支护时序与支护参数,对变形速率异常区段及时补打锚索、加强支护,提前干预围岩加速蠕变,杜绝灾害隐患累积,实现精准防控、动态管控。

5 工程应用效果分析

将本文构建的一体化防控技术体系应用于某深部860m流变软岩巷道现场施工,选取相同地质条件的100m试验巷道开展工业性试验,同步选取采用传统滞后支护工艺的100m巷道作为对比段,开展为期30d的连续跟踪监测,系统验证防控技术应用效果。监测结果表明,优化防控方案实施后,巷道围岩流变变形得到有效抑制,围岩变形速率始终处于可控范围,施工7d后变形基本趋于稳定,无持续蠕变现象。试验段巷道顶板最大下沉量稳定在45mm以内,两帮移近量控制在52mm以内,相较于传统支护对比段,围岩整体变形量降幅超76%,彻底消除了顶板离层、帮部片落、支护失效等病害问题。

从围岩破坏形态来看,试验段巷道塑性区范围大幅缩减,仅巷道表层存在轻微塑性变形,深部岩体始终保持完整弹性状态,围岩自承能力稳定发挥,无大范围裂隙贯通与岩体破碎现象。从施工效益来看,标准化时序施工模式规范了现场作业流程,彻底杜绝了支护滞后问题,巷道返修率降低80%以上,有效减少了后期运维成本;小循环快速掘进支护模式在保障安全的前提下,

提升了巷道施工连续性,月掘进进尺提升18%,实现了安全、质量、效益的多重提升。整体应用效果表明,该防控技术体系适配深部流变围岩巷道施工条件,可有效解决支护滞后致灾难题,实现巷道长效稳定控制。

结论:

1)深部流变围岩巷道变形具有显著的三阶段时效演化特征,初始蠕变阶段为最佳支护窗口期,支护滞后会导致围岩时效损伤持续累积,引发裂隙贯通、岩体破碎,是巷道失稳灾害的核心诱因。

2)支护滞后致灾遵循“时效损伤累积-支护耦合失效-链式灾变演化”的规律,滞后时长越长,围岩塑性区发育范围越大,变形量越高,巷道失稳风险呈指数级提升。

3)构建的时序精准管控、主动加固、动态预警一体化防控技术,可精准适配流变围岩变形规律,有效解决支护滞后引发的围岩损伤与支护失效问题,大幅提升巷道稳定性。

4)工程实践验证,该防控技术体系针对性强、防控效果好,可有效治理流变围岩巷道支护滞后灾害,为深部软岩流变巷道安全施工与长效围岩控制提供可靠的技术参考。

参考文献:

- [1] 康红普,姜鹏飞,高富强.深部巷道围岩控制技术发展与展望[J].煤炭学报,2021,46(07):2201-2216.
- [2] 刘泉声,黄诗冰,崔凡.深部软岩巷道流变变形机制与控制技术[J].煤炭学报,2024,49(03):987-1002.
- [3] 赵光明.深部流变巷道围岩时效损伤机理与精准支护技术[J].工矿自动化,2024,50(05):45-51.
- [4] 马进功.巷道掘进支护时序错位致灾机理及优化研究[J].煤炭科学技术,2025,53(08):102-108.
- [5] 王文星,王祥秋.围岩蠕变破坏机理与合理支护时间确定[J].有色金属科学与工程,2023,34(02):45-50.
- [6] 董恩远,王卫军.考虑围岩蠕变的锚固时空效应分析[J].煤炭学报,2022,47(05):1903-1911.
- [7] 张农,李桂臣.深井巷道围岩流变规律与动态支护技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(04):721-728.
- [8] 周保精.深部巷道支护滞后诱发围岩失稳机理研究[J].煤矿安全,2025,56(03):156-161.
- [9] 镐振,郭兵兵.深部围岩加速蠕变致灾机制及防控[J].煤炭学报,2020,45(10):3362-3370.
- [10] 陈玉涛.深部巷道支护时序协同控制技术及应用[J].矿业安全与环保,2024,51(04):88-93.