

掘锚一体化施工围岩损伤机制及参数匹配优化

王莉迪

怀化市财政投资评审服务中心 湖南 怀化 418000

摘要：掘锚一体化是煤矿巷道快速掘进核心工艺，但截割扰动、空顶时效及支护参数错配易引发围岩渐进损伤，造成顶板离层、煤壁片帮等隐患。为解决参数匹配失衡问题，本文基于松动圈与卸荷损伤理论，系统分析掘锚施工围岩损伤演化机制，依托 FLAC^{3D} 数值模拟与正交试验，探究空顶距、截割进尺、支护参数对围岩损伤的影响规律，优化得到最优施工参数匹配及时序协同体系。工程实践表明，优化方案有效抑制围岩塑性损伤，围岩收敛量降低 43.8%，掘进效率提升 18.5%，可为掘锚一体化安全高效施工提供理论与工程参考。

关键词：掘锚一体化；围岩损伤；损伤机制；参数匹配；工艺优化

Mechanism of Surrounding Rock Damage and Parameter Matching Optimization for Integrated Excavation-Bolting Construction

Lidi Wang

Huaihua Fiscal Investment Review Service Center, Huaihua, Hunan, 418000

Abstract: Integrated excavation-bolting serves as the core technology for rapid roadway excavation in coal mines. Nevertheless, cutting disturbance, exposed roof time and mismatched supporting parameters tend to induce progressive damage of surrounding rock, which further leads to potential hazards such as roof separation and coal wall spalling. To address the imbalance of parameter matching, this paper systematically analyzes the damage evolution mechanism of surrounding rock during excavation-bolting construction based on the loose circle theory and unloading damage theory. With FLAC^{3D} numerical simulation and orthogonal tests, the influences of exposed roof distance, cutting advance and supporting parameters on surrounding rock damage are investigated. The optimal construction parameter matching and time-sequence coordination system are obtained through optimization. Engineering practice shows that the optimized scheme effectively restrains plastic damage of surrounding rock. The surrounding rock convergence is reduced by 43.8 %, and the excavation efficiency is increased by 18.5 %. It can provide theoretical and engineering references for safe and efficient integrated excavation-bolting construction.

Keywords: Integrated excavation-bolting; Surrounding rock damage; Damage mechanism; Parameter matching; Process optimization

引言

随着煤矿智能化快速掘进技术迭代升级，掘锚一体化装备与施工工艺在全国大中型矿井广泛应用，彻底改变了传统“先掘进、后支护”分步施工模式，大幅缩短巷道掘进循环周期，有效提升巷道掘进效率。掘锚一体化技术通过掘进截割、锚杆锚索支护同步并行作业，大幅缩减工序间隔时间，适配深部矿井长距离、大断面巷道高效掘进需求，是实现采掘接替平衡、提升矿井产能的核心技术路径。但相较于传统分步施工工艺，掘锚一体化高速截割扰动、短时空顶卸压、同步支护滞后效应叠加，围岩应力卸荷速率更快、损伤演化更剧烈、时序特征更显著，极易引发差异化围岩损伤破坏。

国内众多学者围绕掘锚一体化施工技术开展了大量研究，王虹等梳理了掘锚一体化高效掘进理论体系，明确了截割、支护工序协同对施工效率的影响机制^[1]；康红普等探究了不同支护参数

对巷道围岩稳定性的控制效果，验证了主动支护对围岩损伤的抑制作用^[2]；吴建星等通过数值模拟优化了常规巷道掘锚支护间距与施工工艺^[3]。现有研究多聚焦于单一工艺优化与现场应用，对掘锚一体化全过程围岩损伤的时序演化机制、多参数耦合损伤规律、参数精准匹配体系研究不够系统，尚未形成适配围岩损伤特征的成套参数优化方案。

基于此，本文以典型大断面煤巷掘锚一体化施工为工程背景，从理论层面揭示掘锚协同施工围岩损伤机理，依托数值模拟量化多参数耦合损伤响应规律，通过正交试验完成关键施工参数匹配优化，最终形成适配围岩动态损伤的成套施工技术体系，实现掘锚施工效率与围岩稳定性双向提升。

1 掘锚一体化施工围岩损伤机制理论分析

1.1 掘锚施工围岩卸荷损伤基本理论

巷道掘锚施工过程是典型的围岩快速卸荷、应力重分布、损

伤累积演化过程,掘进截割破除围岩原有应力平衡,使围岩由三向应力约束状态转为双向甚至单向约束状态,产生瞬时卸荷回弹变形与损伤裂隙扩展。根据围岩松动圈理论,巷道开挖后围岩会形成破碎区、塑性损伤区与弹性稳定区,掘锚一体化快速掘进模式下,开挖卸荷速率大幅提升,围岩裂隙萌生、扩展、贯通速度显著加快,塑性损伤区范围持续扩大。同时,掘锚同步作业模式存在短时空顶窗口期,围岩在无支护约束状态下自由变形,损伤持续累积,是区别于传统掘进工艺的核心损伤特征。

围岩损伤演化遵循时效累积规律,损伤变量随卸荷时间、扰动强度的增大呈非线性增长,高速截割产生的动载扰动会进一步加剧围岩内部微裂隙发育,造成岩体力学强度劣化,最终导致围岩承载能力下降、结构失稳破坏。掘锚施工围岩损伤主要包含截割瞬时冲击损伤、空顶时效累积损伤、支护滞后诱发损伤三类,三类损伤相互耦合、持续叠加,共同决定巷道围岩最终损伤程度与稳定性状态。

1.2 掘锚全过程围岩损伤演化机制

(1) 掘进截割冲击损伤。掘锚一体机高速截割破煤过程会产生高频冲击动载,应力波快速向围岩深部传播,诱发围岩内部原生裂隙张开、新生裂隙萌生,形成瞬时冲击损伤。相较于传统慢速掘进,掘锚一体化单次截割进尺大、截割速度快,动载扰动强度更高,浅层围岩破碎程度显著提升,易造成巷道表层岩体松散、强度降低,为后续围岩变形破坏提供基础条件。截割参数不合理是诱发冲击损伤的核心因素,截割进尺过大、滚筒转速过高会大幅加剧围岩扰动损伤。

(2) 空顶时效累积损伤。掘锚一体化“掘支并行”工艺存在固定空顶区间,巷道顶板、煤壁岩体在无支护约束的裸露状态下,受地应力与自重应力作用产生持续流变变形,内部微裂隙不断扩展贯通,形成时效累积损伤。空顶距越大、空顶时间越长,围岩流变损伤越充分,塑性区扩展范围越广,当空顶参数超过围岩稳定临界值时,会出现顶板离层、煤壁片帮等显性失稳灾害。软岩、破碎围岩条件下,空顶诱发的时效损伤尤为突出,是围岩失稳的主控因素。

(3) 支护参数错配诱发损伤。支护体系是抑制围岩损伤扩展的核心手段,锚杆锚索间距、预紧力、布设角度等参数直接决定围岩损伤控制效果。传统经验化支护参数普遍存在支护密度不足、预紧力偏低、布设不合理等问题,无法有效约束围岩卸荷变形与裂隙扩展,导致围岩损伤持续累积;同时,支护施工时序滞后、掘锚工序衔接不畅,会错过围岩损伤初期控制窗口期,小幅损伤逐步演化成大范围塑性破坏,严重影响巷道整体稳定性。

1.3 围岩损伤主控影响因素

综合理论分析,影响掘锚施工围岩损伤的核心参数主要包括四类:一是空顶参数(空顶距、空顶时间),决定围岩自由流变

损伤程度;二是截割参数(单次进尺、截割速度),控制施工动载扰动强度;三是支护参数(锚杆间距、预紧力、锚固长度),影响围岩损伤抑制效果;四是工序时序参数(掘锚间隔时间、支护滞后距离),决定损伤控制时机。四类参数相互耦合、共同作用,直接决定巷道围岩损伤演化规律与最终稳定状态,实现参数精准匹配是抑制围岩损伤、平衡掘进效率与施工安全的关键。

2 掘锚施工围岩损伤数值模拟及参数敏感性分析

2.1 数值模型构建

以某矿大断面煤巷掘锚一体化施工为工程背景,巷道断面宽5.2 m、高3.8 m,采用FLAC^{3D}有限差分数值软件构建三维计算模型,模型尺寸长60 m、宽40 m、高30 m,消除边界效应影响。模型采用摩尔-库仑本构模型,贴合煤岩体塑性损伤破坏特征,岩层力学参数依据现场取样试验结果赋值,顶板以砂质泥岩、粉砂岩为主,底板为泥岩,煤层结构完整、局部含软弱夹层。模型四周及底部设置位移约束边界,顶部施加等效覆岩自重应力,模拟深部地应力环境,精准还原现场掘锚施工工况。

模拟过程严格复刻掘锚一体化施工工序,依次完成巷道开挖、截割扰动、空顶流变、同步支护、应力平衡计算,重点监测不同参数条件下巷道围岩应力分布、塑性区范围、围岩收敛变形、顶板离层量四大指标,量化各参数对围岩损伤的影响规律。

2.2 单参数损伤敏感性分析

通过控制变量法开展单参数敏感性模拟,明确各关键参数对围岩损伤的影响权重与变化规律。空顶距模拟结果表明,空顶距由2 m增大至4 m时,围岩塑性区面积增大38.6%,顶板最大离层量提升52.3%,空顶距超过3 m后,围岩损伤增速显著加快,损伤累积呈指数增长趋势,短时空顶可有效控制围岩流变损伤。

截割进尺模拟显示,单次循环进尺由0.8 m提升至1.6 m,截割动载扰动强度持续增大,巷道浅层围岩破碎程度加剧,煤壁塑性区明显扩展,围岩整体变形量提升29.7%,大进尺高速掘进虽可提升效率,但会大幅加剧围岩瞬时冲击损伤。

支护参数模拟表明,锚杆间距过大易形成支护盲区,围岩裂隙无法有效约束,塑性损伤持续扩展;锚杆预紧力不足会导致主动支护效果失效,无法抵消围岩卸荷回弹变形,围岩损伤抑制能力大幅下降,适当加密支护、提升预紧力可显著弱化围岩损伤程度。

2.3 多参数耦合正交试验设计

为实现多参数协同匹配优化,选取空顶距、单次截割进尺、锚杆间距、锚杆预紧力四项核心参数开展四因素三水平正交试验,以围岩塑性区面积、巷道总收敛量为评价指标,开展参数耦合优化分析。通过极差分析明确各参数对围岩损伤的影响权重,结果显示参数敏感性排序为:空顶距>单次截割进尺>锚杆预紧力>锚杆间距,空顶时序参数是控制掘锚施工围岩损伤的最关键因素。

3 掘锚一体化施工参数匹配优化体系构建

3.1 核心施工参数优化确定

结合正交试验结果、数值模拟数据与现场施工条件,兼顾围岩稳定性与掘进效率,确定最优参数匹配组合:空顶距控制在2.0~2.5 m,严格缩短围岩无支护裸露时间,从源头抑制时效累积损伤;单次循环截割进尺优化为1.2 m,平衡掘进效率与截割扰动损伤,规避大进尺强扰动诱发的围岩破碎;顶板、煤壁锚杆支护间距优化为0.8 m×0.8 m,支护布设均匀全覆盖,消除支护盲区;锚杆预紧力统一提升至80 kN,充分发挥主动支护作用,有效约束围岩早期裂隙扩展与卸荷变形。

3.2 掘锚工序时序匹配优化

针对传统掘锚工序衔接滞后、支护不及时的问题,优化施工时序流程,构建“短空顶、快支护、速闭环”的时序匹配模式。严格执行掘进截割完成后3 min内启动支护作业,实现掘锚工序无缝衔接,最大限度压缩围岩空顶流变时间,阻断损伤累积路径。优化施工组织方式,采用分区并行作业模式,掘进机组完成截割后退机让位,支护机组同步跟进作业,杜绝工序等待、支护滞后问题,实现掘进扰动与支护管控的时序精准匹配。

3.3 差异化围岩参数适配策略

针对不同地质条件围岩损伤差异,制定差异化参数适配标准,提升参数体系通用性。地质条件简单、围岩完整区域,采用标准优化参数组合,保障高效掘进;围岩破碎、裂隙发育区域,适当缩小空顶距至2.0 m、加密支护间距至0.7 m,强化围岩损伤控制;高地应力、软岩流变区域,在优化参数基础上增设锚索补强支护、浅层注浆加固,协同抑制围岩塑性损伤扩展,实现不同工况下掘锚参数的精准适配。

4 工程应用效果分析

将优化后的掘锚一体化参数匹配体系应用于某矿3102大断面煤巷掘进工作面,该巷道围岩中等破碎、局部含软弱夹层,传统施工模式下巷道变形量大、顶板零星离层、掘进效率偏低,围岩损伤失稳隐患突出。优化施工参数与工序时序后,开展为期3个月的工业性试验,布设巷道表面位移、顶板离层、围岩塑性区监测点位,全方位验证优化效果。

工程监测结果表明,参数优化后巷道围岩损伤得到显著抑制,围岩塑性区范围大幅收缩,浅层破碎现象彻底消除。巷道顶板最

大下沉量由优化前的42.6 mm降至24.0 mm,两帮收敛量由58.3 mm降至32.8 mm,围岩整体收敛变形量降低43.8%,围岩完整性与稳定性大幅提升。顶板离层监测数据显示,浅层、深层离层量均大幅减小,无持续性离层发育现象,有效杜绝了顶板失稳隐患。

施工效率方面,优化时序流程后掘锚工序衔接效率显著提升,单循环施工时长缩短12.3%,巷道月进尺由285 m提升至338 m,掘进效率提升18.5%,彻底解决了传统施工“重效率、轻稳定”或“重安全、低效率”的矛盾。同时,围岩损伤可控后巷道后期返修率大幅降低,支护材料消耗与运维成本显著下降,实现了安全、高效、经济的多重效益统一。

结论:

1) 掘锚一体化施工围岩损伤由截割瞬时冲击损伤、空顶时效累积损伤、支护参数错配损伤三类耦合形成,具有时效性、渐进性、不可逆特征,空顶距、截割进尺、支护参数、工序时序是主控影响因素,其中空顶时序参数对围岩损伤敏感性最高。

2) 数值模拟结果表明,过大空顶距与截割进尺会大幅加剧围岩塑性区扩展与变形损伤,支护密度不足、预紧力缺失会导致围岩早期裂隙无法有效约束,诱发持续损伤破坏,传统经验参数存在明显匹配失衡缺陷。

3) 通过正交试验与参数优化,确定最优掘锚施工参数匹配体系:空顶距2.0~2.5 m、单次截割进尺1.2 m、锚杆布设间距0.8 m×0.8 m、锚杆预紧力80 kN,配套形成快速支护、时序闭环的掘锚协同施工工艺,适配围岩动态损伤防控需求。

4) 工程实践验证,优化参数体系可有效抑制掘锚施工围岩损伤扩展,围岩收敛变形量降低43.8%,掘进效率提升18.5%,实现了围岩稳定管控与快速掘进协同发展,可为同类矿井掘锚一体化安全高效施工提供重要的理论依据与工程借鉴。

参考文献:

- [1] 王虹,王建利,张小峰.掘锚一体化高效掘进理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(06):2125-2136.
- [2] 康红普,姜鹏飞,高富强.煤巷钻锚一体化快速掘进技术与装备及应用[J].煤炭学报,2024,49(01):131-145.
- [3] 吴建星,吴拥政.基于掘锚一体机的煤巷锚杆支护参数及施工工艺优化[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,32(06):112-118.