

高应力破碎顶板巷道掘进工艺优化及支护参数数值模拟分析

夏瑞泽

内蒙古蒙东能源有限公司 – 敏东一矿 内蒙古 呼伦贝尔 021100

摘要：针对深部矿井高应力破碎顶板巷道掘进过程中存在的围岩变形量大、顶板易冒落、支护失效频发、掘进效率低等工程难题，本文以典型深部采掘巷道为研究对象，分析高应力破碎顶板巷道围岩失稳机理，优化传统巷道掘进施工工艺，依托 FLAC^{3D} 数值模拟软件开展不同支护参数下围岩应力、位移及塑性区演化规律研究，确定最优支护参数。工程实践表明，优化后的掘进工艺与支护方案可有效控制顶板破碎围岩变形，缩小围岩塑性破坏范围，提升巷道整体稳定性，同时提高巷道掘进施工效率，可为同类深部高应力破碎顶板巷道工程支护设计与施工提供参考依据。

关键词：高应力；破碎顶板；巷道掘进；工艺优化；支护参数；数值模拟

Optimization of Roadway Excavation Technology and Numerical Simulation Analysis of Supporting Parameters for Roadways with Highstress Broken Roof

Ruize Xia

Inner Mongolia Mengdong Energy Co., Ltd., Mindong No.1 Mine, Hulunbuir, Inner Mongolia Autonomous Region, 021100

Abstract: Aiming at the engineering problems such as large surrounding rock deformation, frequent roof caving, recurrent support failure and low excavation efficiency during the excavation of roadways with highstress broken roof in deep mines, this paper takes typical deep mining roadways as the research object. The instability mechanism of surrounding rock in roadways with highstress broken roof is analyzed, and the traditional roadway excavation construction technology is optimized. By means of FLAC^{3D} numerical simulation software, the evolution laws of surrounding rock stress, displacement and plastic zone under different supporting parameters are studied, and the optimal supporting parameters are determined. Engineering practice indicates that the optimized excavation technology and supporting scheme can effectively control the deformation of broken roof surrounding rock, narrow the plastic failure range of surrounding rock and improve the overall stability of the roadway. Meanwhile, the roadway excavation construction efficiency is enhanced. It can provide reference for support design and construction of similar deep roadway projects with highstress broken roof.

Keywords: Highstress; Broken roof; Roadway excavation; Technology optimization; Supporting parameters; Numerical simulation

引言

随着我国煤炭资源开采深度逐年增加，深部矿井地应力水平显著提升，巷道普遍面临高应力、围岩破碎、地质条件复杂等开采工况。高应力破碎顶板巷道围岩结构松散、裂隙发育，掘进扰动后围岩应力快速重分布，极易出现顶板离层、片帮、冒顶等灾害事故，不仅严重威胁井下施工人员与设备安全，还会导致巷道返修率高、掘进进度滞后、支护成本攀升等问题，极大制约矿井安全高效生产^[1]。

传统巷道掘进工艺多适用于浅部低应力完整围岩巷道，存在掘进扰动大、临时支护滞后、施工工序繁琐等缺陷，配套的支护参数针对性不足，难以适配深部高应力破碎顶板的围岩控制需求。目前，数值模拟技术已成为巷道围岩控制、支护参数优化的主流研究手段，可精准揭示围岩破坏演化规律，规避传统经验设计的

盲目性^[2]。因此，开展高应力破碎顶板巷道掘进工艺优化及支护参数数值模拟分析，对解决深部巷道围岩失稳难题、实现安全快速掘进具有重要的工程意义。

1 工程概况与围岩失稳机理

1.1 工程概况

本文研究对象为某深部矿井 2102 运输巷，巷道埋深 820m，属于典型深部高应力巷道。巷道设计断面为矩形，宽 4.8m、高 3.2m，沿煤层底板掘进。巷道顶板以泥岩、砂质泥岩为主，岩层胶结性差、裂隙极其发育，完整性极差，属于破碎软弱顶板；巷道两帮为煤体，结构松散，承载能力低。现场地应力测试结果显示，巷道区域最大水平主应力达 21.6MPa，垂直应力 18.3MPa，高应力叠加破碎围岩结构，导致巷道掘进过程中围岩变形剧烈，原支护方案频繁出现锚杆锚索失效、顶板下沉、帮部鼓出等问题，严重

影响巷道正常施工与使用。

1.2 围岩失稳机理分析

结合现场地质条件与巷道破坏特征,总结高应力破碎顶板巷道围岩失稳机理主要分为三方面。一是高地应力驱动破坏,深部围岩初始应力水平高,巷道掘进打破原有应力平衡,围岩应力向巷道周边集中,远超破碎软弱围岩的自身承载强度,导致围岩产生挤压破碎、裂隙持续扩展^[3]。二是顶板结构稳定性差,顶板岩层破碎松散,层间黏结力弱,无完整稳定的承载结构,掘进扰动后易出现层间离层,失去整体承载能力,逐步发生弯曲下沉、冒落。三是施工扰动加剧失稳,传统爆破掘进方式震动大,进一步加剧顶板围岩裂隙发育,破坏围岩完整性,同时临时支护滞后,空顶区暴露时间过长,极大增加顶板失稳风险^[4]。多重因素耦合作用下,巷道围岩呈现“变形量大、破坏速度快、失稳范围广”的破坏特征。

2 巷道掘进工艺优化

针对传统掘进工艺存在的扰动大、空顶时间长、工序衔接不合理等问题,从掘进方式、施工工序、临时支护三个维度进行工艺优化,形成适配高应力破碎顶板巷道的安全高效掘进工艺。

2.1 掘进方式优化

摒弃传统爆破掘进工艺,采用综合机械化掘进方式,选用悬臂式掘进机截割掘进。相较于爆破掘进,机械截割无爆破震动,可最大程度保留围岩原始完整性,减少顶板围岩二次破碎,从源头降低裂隙扩展与顶板离层风险。同时优化截割顺序,采用“由下至上、由中间至两侧”的分层截割方式,减少单次截割厚度,控制掘进扰动范围,避免一次性大面积扰动顶板围岩,保障掘进过程中顶板的相对稳定。

2.2 施工工序优化

传统施工工序存在掘进、支护、出渣工序脱节,空顶区暴露时间过长的问题。优化后采用“掘进-临时支护-出渣-永久支护”循环作业工序,压缩各工序衔接间隔,实现平行作业。严格控制单次掘进进尺,将循环进尺由原2.0m调整为1.2m,小进尺循环掘进可有效降低围岩应力扰动幅度,减少空顶区面积。同时优化施工排班,细化各工序施工时长,杜绝工序等待、施工滞后等问题,大幅缩短空顶围岩暴露时间,有效规避临时空顶段顶板冒落风险。

2.3 临时支护工艺优化

原临时支护采用单体支柱支护,支护速度慢、覆盖面小、整体性差,无法适配破碎顶板支护需求。优化后采用机载临时支护装置,掘进机截割完成后立即展开临时支护,快速贴合顶板围岩,实现掘进后即时支护。该支护方式支护覆盖面完整、支护强度均匀,可全程覆盖空顶区域,有效限制掘进后初期围岩变形,避免顶板松散岩体脱落,为后续永久支护施工提供安全作业环境,解

决了传统临时支护滞后、支护效果差的难题。

3 支护参数数值模拟分析

3.1 数值模型建立

采用FLAC^{3D}有限差分数值模拟软件,结合2102运输巷实际地质条件建立三维计算模型。模型尺寸设定为长80m、宽60m、高50m,巷道位于模型中心位置,消除边界效应影响。模型采用摩尔-库伦本构模型,贴合破碎围岩塑性破坏特征,根据现场岩层力学试验结果赋值各岩层物力学参数,主要包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、容重等^[5]。模型顶部施加等效覆岩荷载模拟深部地应力,四周设置应力边界条件,底部固定位移约束,精准还原现场地应力环境与围岩状态。

3.2 模拟方案设计

原支护方案采用普通锚杆+金属网支护,支护强度不足、整体性差,无法有效控制围岩变形。为优化支护参数,设计三组不同支护参数方案进行对比模拟,重点分析锚杆、锚索间距对围岩控制效果的影响,具体方案如下。方案一(原方案):顶板 $\phi 20\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 普通锚杆,间距 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$,无锚索支护;方案二:顶板 $\phi 22\text{mm} \times 2200\text{mm}$ 高强锚杆,间距 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$,配套锚索补强;方案三:顶板高强锚杆间距 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$,加密锚索布置。通过对比三组方案下巷道顶板下沉量、帮部移近量、围岩塑性区范围、应力分布特征,筛选最优支护参数。

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 围岩位移特征分析

模拟结果表明,不同支护参数下巷道围岩变形差异显著。方案一原支护方案下,巷道顶板最大下沉量达128mm,两帮最大移近量156mm,围岩变形量大,变形持续时间长,顶板破碎下沉问题突出,与现场实际破坏情况一致。方案二优化支护参数后,围岩变形得到明显控制,顶板最大下沉量降至52mm,两帮移近量降至68mm,变形量大幅降低。方案三进一步加密支护参数后,顶板下沉量降至41mm,帮部移近量55mm,变形控制效果略有提升,但优化幅度较小,支护材料投入大幅增加,经济性较差。综合来看,方案二可在有效控制围岩变形的同时,兼顾施工成本与效率。

3.3.2 围岩塑性区分析

塑性区范围可直接反映围岩破坏程度与稳定性。方案一原支护条件下,巷道顶板、两帮塑性区发育范围大,顶板塑性区深度达3.2m,帮部塑性区深度2.8m,围岩大范围进入塑性破坏状态,裂隙发育充分,围岩稳定性极差。方案二支护方案下,顶板塑性区深度缩减至1.5m,帮部塑性区深度1.2m,塑性区范围大幅缩小,仅巷道表层围岩出现轻微塑性破坏,深部围岩保持稳定。方案三塑性区范围与方案二差距较小,无明显优化效果,说明过度加密支护参数对围岩塑性区控制的提升作用有限。

3.3.3 围岩应力分布分析

高应力集中是围岩失稳的核心诱因。原支护方案下,巷道围岩应力集中系数高,顶板、帮部应力集中区域靠近巷道表面,极易造成表层围岩挤压破碎。优化支护参数后,高强锚杆锚索联合支护可有效扩散围岩集中应力,使应力集中区向围岩深部转移,降低巷道周边应力集中程度,围岩应力分布更加均匀,有效避免了表层围岩应力超限破坏,显著提升巷道整体承载稳定性^[6]。

3.4 最优支护参数确定

综合围岩位移、塑性区、应力分布及经济适用性分析,确定最优支护方案:巷道顶板采用 $\phi 22\text{mm} \times 2200\text{mm}$ 高强螺纹钢锚杆,间排距 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$,搭配 $\phi 17.8\text{mm} \times 6000\text{mm}$ 锚索补强支护,锚索间排距 $2.4\text{m} \times 1.6\text{m}$,铺设金属网封闭围岩;两帮采用 $\phi 20\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 锚杆支护,间排距 $0.9\text{m} \times 0.9\text{m}$ 。该参数方案可有效控制高应力破碎顶板巷道围岩变形,缩小塑性破坏范围,同时避免支护材料浪费,适配现场施工需求。

4 工程应用效果分析

将优化后的掘进工艺与最优支护参数方案应用于 2102 运输巷现场施工,通过布置围岩位移监测站点,连续 30d 监测巷道顶板下沉、两帮移近变形情况。监测结果显示,巷道掘进完成后围岩变形快速趋于稳定,最终顶板最大下沉量稳定在 55mm 以内,两帮移近量稳定在 70mm 以内,围岩无持续变形、无顶板离层冒落、片帮等病害问题。

相较于原施工方案,优化方案下巷道围岩变形量降低 57% 以上,围岩塑性破坏范围大幅缩减,巷道成型质量显著提升,返修率降低 80%。同时,优化后的循环掘进工序大幅提升施工效率,巷道月掘进进尺提升 22%,有效解决了高应力破碎顶板巷道掘进安全隐患大、施工效率低、支护成本高的难题,实现了巷道安全、高效、经济掘进。

结语:

1) 高应力破碎顶板巷道围岩失稳是高地应力、破碎围岩结构、掘进施工扰动多重因素耦合作用的结果,传统爆破掘进与常规支护方案扰动大、支护针对性不足,无法满足深部巷道围岩控制需求,易引发顶板冒落、帮部失稳等灾害。

2) 通过优化掘进方式、施工工序与临时支护工艺,采用机械掘进、小进尺循环、即时临时支护的施工模式,有效降低了掘进扰动对破碎围岩的破坏,缩短空顶区暴露时间,从施工源头提升巷道掘进稳定性。

3) 通过 FLAC^{3D} 数值模拟对比多组支护参数方案,确定了适配该工程的高强锚网索联合支护参数,优化方案可有效扩散围岩集中应力、缩小塑性破坏范围、抑制围岩大变形,围岩控制效果显著。

4) 工程实践证明,优化后的掘进工艺与支护参数适配高应力破碎顶板巷道施工条件,可显著提升巷道围岩稳定性与施工效率,降低巷道返修成本,可为同类深部复杂地质条件巷道工程提供技术参考。

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] 耿继业,王方田,张洋.高应力煤巷围岩控制关键技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(09):168-173.
- [3] 镐振.高应力破碎巷道失稳演化机制与协同控制技术[J].煤炭科学技术,2026,54(03):89-95.
- [4] 樊金虎.深部高应力巷道围岩支护技术研究与实践[J].煤矿现代化,2025(05):112-115.
- [5] 邸旭峰.迎采对掘巷道密集孔卸压及分段控制技术研究[J].矿业安全与环保,2023,50(04):76-81.
- [6] 王琦,张朋,蒋振华.深部高强锚注切顶自成巷方法与验证[J].煤炭学报,2021,46(02):487-496.