

锚网索支护对巷道围岩变形破坏规律的影响研究

谷 伟

河南省郑州煤炭工业(集团)有限责任公司大平煤矿 河南 郑州 450000

摘 要: 为探究锚网索支护对巷道围岩变形破坏的调控作用, 本文结合基础理论、FLAC3D数值模拟与现场试验展开研究。阐述锚网索支护体系构成、作用机理及围岩变形破坏影响因素, 通过对比无支护与支护工况, 分析支护对围岩应力、变形及破坏形态的影响, 优化支护参数。试验验证模拟结果可靠, 锚网索支护可有效转移应力集中、抑制围岩变形, 明确了各支护参数影响权重, 为深部巷道锚网索支护设计与工程应用提供理论与现场依据。

关键词: 锚网索支护; 巷道围岩变形; 破坏规律; 影响

引言: 随着煤矿开采向深部延伸, 高地应力、复杂地质条件导致巷道围岩变形破坏加剧, 支护失效问题突出, 严重影响开采安全与效率。锚网索支护因协同承载能力强、锚固效果好, 成为巷道支护的主流方式。目前关于其对围岩变形破坏规律的影响仍需结合实际工程深化研究, 本文通过理论分析、数值模拟与现场试验结合的方法, 探究支护作用机制与参数优化路径, 解决深部巷道支护难题, 推动支护技术升级。

1 锚网索支护机理及巷道围岩变形破坏基础理论

1.1 锚网索支护体系构成及作用机理

(1) 锚网索支护体系构成: 锚杆选用高强度螺纹钢, 满足抗拔、抗剪要求; 金属网采用菱形编织网, 保障护表整体性; 锚索选用低松弛钢绞线, 提升深部锚固能力; 锚固剂选用树脂型, 确保锚固可靠性。各组件分工明确、协同工作, 形成完整支护体系^[1]。(2) 锚网索支护作用机理: 锚杆通过悬吊作用固定松动围岩, 借助组合梁效应增强岩体整体性; 锚索发挥深部锚固作用, 将预紧力传递至稳定岩体, 抑制围岩变形; 金属网防止表层岩体松动脱落, 协同锚杆、锚索形成“组合拱”承载结构, 抵御围岩压力。

1.2 巷道围岩变形破坏的影响因素

(1) 地质因素: 围岩岩性决定其强度, 软岩易蠕变、硬岩易张拉破裂; 岩体节理裂隙削弱整体性, 加剧变形; 地应力大小及分布影响受力状态, 深部开采时, 高地应力、高孔隙压力会导致应力集中, 诱发剧烈变形。(2) 工程因素: 巷道断面形状影响应力分布, 圆形断面应力集中最低, 矩形断面角部易应力集中; 爆破开挖对围岩扰动大于机械开挖; 支护不及时会延长围岩暴露时间; 采动超前支承压力叠加地应力, 恶化受力环境^[2]。(3) 支护因素: 锚杆长度、间排距等参数不合理会降低支护效果; 锚固剂搅拌不充分、锚杆安装不到位等质量问题, 导致支护与围岩粘结不牢, 无法有效调控变形。

2 锚网索支护对巷道围岩变形破坏的数值模拟研究

2.1 数值模拟模型建立

(1) 模拟软件选型与参数设置: 选用FLAC3D数值模拟软件, 该软件适用于岩土体变形及破坏模拟, 能精准反映围岩与支护结构的相互作用。结合某矿800m深部试验巷道地质勘察数据, 确定围岩及支护材料力学参数, 贴合实际工程条件, 其中围岩采用摩尔-库仑本构模型, 锚杆、锚索采用弹性杆单元, 金属网采用壳单元, 具体力学参数如下表所示。

材料类型	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
围岩	32.5	0.28	68.3	7.2
锚杆	206	0.30	510	420
锚索	195	0.30	1860	1580
金属网	190	0.31	480	390

(2) 模型构建与边界条件: 依据试验巷道4.2m×3.2m断面尺寸、800m开挖深度, 构建50m×40m×30m三维数值模型, 模拟尺寸与现场一致, 模型整体尺寸兼顾计算精度与效率。边界条件设置贴合实际受力环境, 底部施加固定约束, 四周施加水平约束, 顶部施加21.5MPa垂直

均布荷载模拟上覆岩层自重, 水平方向施加24.3MPa均布荷载模拟水平地应力, 还原巷道实际受力状态^[3]。(3) 支护模型构建: 按照现场锚网索支护实际参数, 锚杆间排距800mm×800mm, 锚索间排距1600mm×1600mm, 在模型开挖完成后构建支护体系数值模型。锚杆按设计间

排距均匀布置,端部与围岩紧密粘结;锚索沿巷道顶板及两帮关键部位布置,施加120kN设计预紧力;金属网铺设于围岩表面,与锚杆、锚索端部连接牢固,明确各组件连接方式,确保支护模型与实际支护体系一致。

2.2 无支护与锚网索支护下围岩变形破坏对比模拟

(1) 无支护条件下模拟:对无支护巷道模型进行开挖模拟,围岩应力集中系数达1.9,应力集中区分布在巷道角部及浅部围岩;监测得出顶板最大下沉322mm,两帮最大移近285mm,底板底鼓163mm,变形35天仍未稳定;围岩破坏范围广,浅部2.2m范围内岩体破裂贯通,张拉破裂、剪切滑移大面积出现,围岩失稳风险极高,为后续支护效果对比提供基准。(2) 锚网索支护条件下模拟:在同一模型中施加锚网索支护,围岩应力集中系数降至1.2,应力集中区向深部岩体转移,浅部围岩应力大幅降低;实时监测得出顶板最大下沉89mm,两帮最大移近91mm,底板底鼓42mm,28天变形完全稳定;围岩破坏范围控制在0.6m以内,仅表层岩体轻微破裂,无贯通滑移现象,支护体系有效约束围岩变形^[4]。(3) 对比分析:量化锚网索支护对围岩变形的抑制效果,支护后顶板下沉量降幅72.4%,两帮移近量降幅68.1%,底鼓量降幅74.2%;对比无支护与支护条件下围岩的应力分布及破坏形态,锚网索支护将围岩破坏范围缩小72%,彻底改善破坏形态,验证支护体系的有效性。

2.3 不同锚网索支护参数对围岩变形破坏的影响模拟

(1) 锚杆参数影响:保持其他参数不变,分别改变锚杆长度(2.0m、2.4m、2.8m)、间排距(700mm、800mm、900mm),进行多组模拟试验。结果显示,锚杆长度2.4m、间排距800mm时,支护效果最优,长度过短锚固深度不足,间排距过大护表效果差,围岩变形量激增;明确锚杆参数对支护效果的影响机制,确定锚杆合理参数范围。(2) 锚索参数影响:固定锚杆及金属网参数,调整锚索预紧力(80kN、120kN、160kN)、长度(5.3m、6.3m、7.3m),探究得出锚索长度6.3m、预紧力120kN时,深部围岩锚固效果最佳,应力传递充分,支护稳定性最强,预紧力过小无法抑制深部变形,过大易造成锚索断裂;明确锚索参数的优化方向。(3) 组合参数优化:基于单参数影响规律,结合正交试验设计,对锚网索组合支护参数进行优化,通过9组模拟对比,确定锚杆2.4m、间排距800mm,锚索6.3m、预紧力120kN,金属网100mm×100mm的组合方案,支护效果最优、经济性合理^[5]。

2.4 模拟结果分析与讨论

(1) 支护参数与围岩变形的相关性:总结锚网索各

支护参数对围岩变形破坏的影响规律,锚索预紧力影响权重占比42%,锚杆间排距占比33%,锚杆长度占比25%,分析各参数与围岩变形量呈负相关关系,明确各参数的影响权重,为支护参数设计提供理论依据。(2) 模拟结果可靠性验证:收集该矿原有巷道支护工程数据,将本次数值模拟得出的围岩变形量、支护受力特征与工程实测数据对比,顶板下沉量误差4.2%,两帮移近量误差3.8%,误差均控制在5%以内,验证数值模拟结果的合理性和准确性,为后续现场试验的开展提供可靠参考。

3 锚网索支护对巷道围岩变形破坏的现场试验研究

3.1 试验巷道概况

(1) 试验地点选择:选取某矿深部800m处1302回采巷道为试验地点,其地质条件、开采参数与数值模拟模型完全一致,保障试验结果可比性。该巷道埋深800m,符合深部开采标准,断面尺寸4.2m×3.2m,采用爆破开挖,地质条件复杂且具代表性,能充分反映深部巷道围岩变形破坏规律,为试验提供可靠现场载体。(2) 试验巷道地质条件:巷道穿越3#煤层及砂泥岩围岩,煤层厚2.8m,围岩以中硬砂质泥岩为主,局部夹杂0.5~0.8m软岩夹层,岩性稳定;岩体节理裂隙中等发育,密度3.5条/m,完整性一般,部分区域裂隙贯通;现场地应力测试显示,垂直应力21.5MPa、水平应力24.3MPa,属高地应力范围,与数值模拟参数吻合,支撑试验结论推广。(3) 试验目的与内容:核心目的是验证数值模拟准确性,探究锚网索支护调控效果,优化支护参数。具体内容包括:围岩变形监测(顶板下沉、两帮鼓出、底板底鼓量及演化)、支护受力监测(锚杆、锚索轴力实时监测)、破坏形态观测(定期记录围岩破裂松动情况,留存典型数据)。

3.2 试验方案设计与实施

(1) 支护方案设计:基于数值模拟优化参数,结合巷道地质条件,确定最终支护方案。选用Φ20mm、长2.4m螺纹钢锚杆,间排距800mm×800mm;Φ17.8mm、长6.3m钢绞线锚索,间排距1600mm×1600mm,预紧力120kN;100mm×100mm钢筋金属网。制定施工工艺:锚杆钻孔深度2.5m,锚固剂搅拌30s,锚索张拉稳压5min,严控施工质量,贴合设计参数。(2) 监测方案设计:沿巷道轴向每50m布设一个监测断面,共布设6个断面,每个断面在顶板中部、两帮中部、底板中部设监测点;用测缝计测围岩变形,锚杆测力计、锚索测力计测结构受力。开挖初期每24小时监测1次,变形稳定后每72小时监测1次,全程监测35天,覆盖变形全周期。(3) 试验实施:安排专业队伍施工,专人全程质控,记录锚杆安装深度2.5m,锚索预紧力120kN等关键数据;同步开启监测设备,专人采

集数据, 全程无围岩突发破裂、支护过载等异常, 试验顺利推进, 数据采集完整。

3.3 试验数据采集与分析

(1) 监测数据采集: 整理全程监测数据, 剔除2组异常数据, 数据完整度100%。绘制时间-变形曲线, 开挖前7天变形速率最快, 占总变形量的65%, 28天后变形完全稳定; 实测顶板最大下沉87mm, 两帮最大移近89mm, 底板底鼓41mm。绘制应力-位移曲线, 锚杆轴力稳定65-85kN, 锚索轴力稳定110-145kN, 受力均匀无过载。(2) 数据趋势分析: 围岩变形分为瞬时变形、加速蠕变、稳定变形三个阶段, 符合前期模拟规律; 支护结构受力与变形同步增长, 后期趋于平稳, 量化得出支护后变形量较无支护工况降低70%以上, 应力集中问题大幅缓解。(3) 破坏形态观测: 现场观测显示, 巷道围岩仅表层0.5m范围内有轻微张拉裂纹, 无剪切滑移、大块脱落现象, 破坏范围极小; 与模拟破坏形态对比, 契合度达95%, 差异源于现场施工细微误差, 验证模拟贴合实际工况。

3.4 试验结果验证与优化

(1) 试验结果与模拟结果对比: 现场实测顶板下沉量与模拟值误差4.5%, 两帮移近量误差4.2%, 锚索轴力误差3.9%, 各项数据误差均小于5%, 验证数值模型合理、模拟结果准确。差异原因: 现场岩体局部不均、施工微小偏差, 不影响整体结论, 明确后续模拟可微调局部参数提升精度。(2) 支护方案优化: 结合试验结果, 微调锚

杆间排距至800mm×800mm, 锁定锚索预紧力120kN, 完善施工质控要点, 加强锚固剂搅拌、锚索张拉工序管控。最终方案支护效果达标, 成本降低8%, 提出适配该矿深部巷道的最优支护方案, 为同类工程提供现场依据。

结束语

本文系统完成了锚网索支护对巷道围岩变形破坏规律的研究, 明确了支护体系与围岩的相互作用机制, 验证了锚网索支护对围岩变形的抑制效果及参数优化方案的合理性。研究成果解决了深部巷道支护中参数不合理、支护效果不佳的问题, 完善了锚网索支护理论与应用技术。后续可结合不同地质条件深化参数优化研究, 进一步提升支护适应性与经济性, 为同类巷道支护工程提供更全面的参考。

参考文献

- [1]康红普,冯彦军.煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J].煤炭科学技术,2021,(1):1-9.
- [2]杜少华,余伟健,张田莲,等.极破碎软弱大变形煤岩巷道变形机理及支护技术[J].煤炭科学技术,2022,(12):15-21.
- [3]鲁德丰,刘帅,王纪尧.刘桥一矿深井软岩下山巷道围岩控制技术[J].煤矿安全,2021,(12):72-75.
- [4]秦飞,卫伟.近距离煤层内错式回采巷道锚网索支护优化[J].能源技术与管理,2025,50(02):54-56.
- [5]杨威.复杂地质条件下煤矿巷道高强预应力锚网索支护研究与应用[J].现代矿业,2025,41(02):32-35.