

基于数值模拟的煤巷掘进支护方案优化与工程应用

冯祥祥

河南省新乡市辉县市冀屯镇文庄村南赵固一矿 河南 新乡 453600

摘要:煤巷掘进支护质量对矿井生产安全与效率影响重大。传统支护方案依赖经验,存在适应性差、成本高等问题。本研究以焦作煤业集团赵固一矿16211工作面掘进工作面为背景,开展基于数值模拟的支护优化。通过对比传统支护与高强锚杆+高强锚索在模拟中的力学响应,确定最优方案。工程应用表明,优化方案有效解决软岩段支护难题,降低支护成本,提高了施工效率,为同类煤巷支护设计提供了科学参考。

关键词:数值模拟;煤巷掘进;支护方案优化;工程应用

引言:在煤矿开采进程中,煤巷掘进支护是保障矿井生产安全与提升效率的关键环节。传统支护方案多凭借经验实施,在面对复杂地质条件时,适应性欠佳,且成本偏高,给矿井生产带来诸多不利影响。焦作煤业集团赵固一矿16211上顺槽掘进工作面地质条件复杂,传统支护难题突出。基于此,本文以该工作面为研究背景,开展基于数值模拟的支护优化研究,旨在探寻科学合理的支护方案,确保矿井高效安全生产。

1 煤巷地质条件与力学特性分析

1.1 煤巷地质条件概述

研究对象为焦作煤业集团赵固一矿16211上顺槽掘进工作面,该巷道设计长度1619.57m,掘进断面为矩形,其中0-1048m段净宽5500mm,净高3800mm;1048-1619.57m段净宽5500mm,净高3200mm。根据地质勘察报告,二1煤层平均厚度6.04m,煤层倾角 1° - 4° ,属于近水平煤层。煤层顶板为中粒砂岩,厚度4.77-19.11m,呈灰黑色,成分以石英为主,普氏硬度系数 $f=4-6$;直接顶为砂质泥岩,厚度0.39-7.40m,灰黑色,富含植物化石, $f=3-4$;底板为砂质泥岩和泥岩,厚度分别为6.66-10.88m和2.7-5.4m, $f=3-5$ 。巷道掘进范围内地质构造较复杂,预计揭露4条断层,无岩浆岩体、冲刷带和陷落柱。煤层瓦斯含量为 $0.22\text{m}^3/\text{t}$,属于低瓦斯煤层,水文地质条件中等,主要充水水源为L8灰岩水,预计正常涌水量为 $85.7\text{m}^3/\text{h}$,最大涌水量为 $111.4\text{m}^3/\text{h}$ 。

1.2 煤巷围岩力学特性测试

结合赵固一矿16211上顺槽掘进工作面实际条件,采用现场简易评估与地质资料类比相结合的方式确定围岩力学参数。以巷道掘进掌子面为核心,每隔50m对岩性、层理及完整性等特征进行详细观察记录,同时参考矿井已采区域同类岩层的支护经验。通过岩芯观察直观判断岩石坚硬程度,结合普氏硬度系数简易测试,进一

步区分不同岩层的力学性能差异。针对煤层及顶底板关键岩层,重点明确其强度等级与变形特性,获取准确且贴合现场的基础参数,为后续数值模拟提供可靠依据,确保支护方案设计更具针对性和科学性。

1.3 煤巷掘进过程中的应力分布特征

通过锚索测力计现场监测与理论分析,可明确煤巷掘进时的应力分布规律。在巷道掘进期间,选取已支护稳定的部位设置锚索测力计,定时采集受力数据以反演原岩应力,确定该区域原岩应力类型。掘进过程中,巷道周边应力会重新分布,掌子面前方一定距离处会出现应力集中现象,掘进后顶板及两帮会形成范围不同的卸压区。当掘进至断层附近时,应力集中程度会有所变化,释放范围扩大,顶板卸压区加深,易引发冒落。随着掘进距离的增加,周边应力在开挖扰动后经过一段时间会趋于稳定,此时锚索测力计监测数值波动明显减小。准确掌握这些应力分布特征,对于合理设计支护方案、保障煤巷掘进安全具有重要意义,能为后续支护工作提供有力的理论依据^[1]。

2 支护模拟方法选择与模型构建

2.1 模拟方法选择依据

传统支护方案在煤矿开采中长期依赖经验进行设计与实施,然而在面对复杂多变的地质条件时,其弊端逐渐凸显,不仅适应性大打折扣,难以有效应对各种特殊地质状况,而且成本居高不下,给矿井生产带来较大的经济负担。为切实解决这些问题,挑选一种契合矿井实际、操作简便且能精准反映煤巷掘进支护力学特性的模拟方法迫在眉睫。它基于离散化的先进思想,将连续的求解区域巧妙离散为有限个单元,通过精确求解单元节点上的未知量,进而近似描述整个系统的力学行为。这种方法在处理复杂边界条件和材料非线性问题时展现出独特优势,能够以直观的方式呈现煤巷掘进过程中围岩

的应力、应变分布情况，为支护方案的优化提供直观且可靠的数据支撑，相较于一些过于复杂、矿井难以实际应用的方法，其实用性更为显著。

2.2 模拟模型构建思路

依据煤巷实际地质条件与掘进参数构建科学合理的模拟模型是整个研究的关键环节。以赵固一矿 16211 上顺槽掘进工作面为原型，全面充分考虑巷道走向、断面尺寸、掘进方式等众多因素。模型构建必须涵盖巷道掘进影响的主要范围，只有这样，才能准确无误地反映围岩与支护结构之间的相互作用。在构建过程中，针对巷道周边及关键区域，要进行精细划分网格，确保能够敏锐捕捉到应力集中、变形较大部位的力学变化情况，为后续分析提供详细准确的数据。而对于远离巷道的区域，在不影响整体模拟精度的前提下，可适当简化网格划分，以此提高计算效率，节省计算资源和时间。同时，合理设置模型的边界条件至关重要，如位移约束、荷载施加等，要精准模拟上覆岩层重量和实际开挖环境，使模型最大程度地贴近真实情况，为后续的模拟分析奠定坚实准确的基础。

2.3 模拟参数确定原则

模拟参数的准确性对于模拟结果的可靠性起着决定性作用。由于目前缺乏详细的现场力学测试数据，在确定参数时需要综合多方面因素。一方面，要紧紧密结合工程经验、地质资料以及类似矿井的成功案例。对于煤岩介质的参数，参考矿井已采区域同类岩层的支护经验，依据岩石的岩性、层理、完整性等特征，初步确定其强度等级与变形特性。同时，充分考虑煤层及顶底板关键岩层的特性，结合普氏硬度系数等简易测试方法，进一步细致区分不同岩层的力学性能差异，确保参数能够准确反映煤岩的实际力学性质。另一方面，支护结构参数则要根据常用的支护材料规格和施工工艺进行科学设定，保证参数既符合实际施工情况，又能满足模拟分析的要求，从而为支护方案优化提供合理、准确的参数依据，使优化后的方案更具科学性和可行性。

3 支护方案模拟

3.1 传统支护方案模拟

为对比分析新型支护方案的优势，首先对传统支护方案进行数值模拟。传统支护方案采用普通锚杆与普通锚索结合的支护形式，普通锚杆采用 Q235 级螺纹钢，直径 20mm，长度 2.4m，间排距 0.85m×0.9m，顶板布置 6 根锚杆，两帮各布置 4 根锚杆；普通锚索采用普通钢绞线，直径 17.8mm，长度 4.2m，间排距 900*900mm，顶板每排布置 3 根锚索。模拟结果显示，在传统支护方案下，

巷道顶底板最大移近量达到 158mm，两帮最大移近量为 103mm。顶板塑性区深度较大，达到 2.2 - 2.5m，两帮塑性区深度为 1.4 - 1.6m。锚杆最大轴力为 145kN，锚索最大轴力为 230kN。从受力分布来看，锚杆和锚索受力不均匀，在巷道顶板和两帮的部分区域出现应力集中现象，这可能导致局部支护结构过早失效，影响巷道的整体稳定性^[2]。

3.2 新型支护方案模拟

新型方案采用“高强锚杆+高强锚索+钢筋梯”形式。锚杆直径 22mm、长 2.8m（目前使用锚杆长度为 2.4m，此处 2.8m 为模拟优化方向长度），间排距 0.8m×0.9m，顶板 4 根、两帮各 5 根；让压锚索直径 21.6mm、长度 4.2m，间排距 0.8m×0.9m，顶板每排布置 3 根，同时在巷道顶板中线偏东 250mm 处打设一排走向槽钢梁锚索，该锚索长度 12.3m、直径 21.6mm，配套的槽钢梁长度 4.9m，锚索孔距 1.5m。钢筋梯用 Φ14mm 钢筋制，间距 0.8m。模拟表明，顶底板最大移近量降至 90mm，两帮 62mm，分别降 43% 和 40%，受力均匀，能更好适应围岩变形，提高稳定性。

3.3 不同支护参数的模拟分析

以新型支护方案为依托，开展不同支护参数的模拟优化工作，着重探究锚杆长度、锚索间排距实际现场无喷浆对支护效果的作用。当前实际使用锚杆长度为 2.4m，在此基础上，锚索间排距从 0.8m×0.9m 增至 0.85m×1.0m 时，顶板移近量从 78mm 增至 115mm，当间排距为 0.85m×1.0m 时，移近量为 90mm，兼顾支护效果与成本，选择 0.85m×1.0m 为最优间排距。综合模拟结果，最优支护参数为：锚杆长度 2.4m、间排距 0.85m×1.0m，普通锚索长度 4.2m、直径 21.6mm，走向槽钢梁锚索长度 12.3m、直径 21.6mm，槽钢梁长度 4.9m，锚索孔距 1.5m。

4 煤巷掘进支护方案优化

4.1 优化目标

煤巷掘进支护方案优化以“安全可靠、经济合理、施工便捷”为核心目标，具体量化指标包括：巷道顶底板移近量控制在一定范围内，两帮移近量控制在一定范围内，围岩塑性区深度不超过一定值；支护结构最大应力低于材料强度设计值的一定比例，避免出现结构破坏；在保证支护效果的前提下，支护成本较传统方案降低一定比例以上；优化方案需适应现场施工条件，锚杆锚索安装工序简单，与现有掘进设备匹配度高。同时，优化方案需具备良好的适应性，能够应对巷道掘进过程中可能出现的地质条件变化，确保整个掘进周期内支护结构稳定，为矿井实现高效掘进提供保障^[3]。

4.2 基于数值模拟结果的优化方法

基于数值模拟结果的优化方法采用“模拟分析-参数调整-效果验证”的循环优化流程。首先通过数值模拟对比不同支护方案的力学响应,识别传统方案的薄弱环节,确定优化方向;其次以围岩位移、应力及塑性区分布为评价指标,采用控制变量法逐一调整锚杆长度、锚索类型参数,建立支护参数与支护效果的量化关系;然后结合工程经济学原理,对不同优化方案进行成本核算,剔除成本过高的方案;最后通过数值模拟验证优化方案的长期稳定性,模拟巷道掘进完成后一定时间的力学演化过程,确保支护效果持续可靠。该方法实现了支护方案的定量化优化,避免了传统经验设计的盲目性。

4.3 优化方案的确定

在综合考量数值模拟所呈现的各项数据结果,并结合工程实际对支护强度、稳定性、施工便捷性等多方面的需求后,最终确定采用“高强锚杆+高强锚索+钢筋梯”的联合支护体系。具体而言,锚杆选用高强螺纹钢,其直径、长度以及间排距均严格依据优化结果精准确定,顶板和两帮的布置形式严格遵循设计要求,同时锚杆预紧力不得低于规定数值,以确保其锚固效果。锚索则选用特定规格的高强度低松弛钢绞线,长度与间排距同样依据优化结果确定,顶板每排布置数量及预紧力都严格依照设计要求执行。钢筋梯采用特定规格钢筋焊接而成,长度与锚杆相匹配使用。

4.4 优化方案的工程应用

将优化方案应用于焦作煤业集团赵固一矿16211上顺槽掘进工程,在巷道掘进前制定详细的施工方案,对施工人员进行技术培训,明确锚杆锚索安装工艺及质量控

制标准。施工过程中采用顶板离层仪、锚索测力计对支护效果进行实时监测,监测点布置和监测频率根据实际需求确定。监测结果显示,巷道顶底板和两帮最大移近量均控制在优化目标范围内,锚杆锚索受力稳定,顶板离层量小于一定值,无明显离层现象^[4]。优化方案施工效率较传统方案提升一定比例,单米支护成本降低一定比例,巷道掘进过程中未出现顶板冒落、两帮片帮等安全问题,实现了安全高效掘进目标。

结束语

本文依托焦作煤业集团赵固一矿16211上顺槽掘进工程,综合地质勘察、力学测试、数值模拟与工程应用,完成煤巷掘进支护方案优化。数值模拟实现定量化设计,精准揭示不同支护下围岩力学演化规律,为决策提供依据。优化后的“高强锚杆+让压锚索”方案,有效控制围岩变形破坏,降低成本,提升施工效率,效果良好。研究表明,该优化方法实用科学,能为同类煤巷支护设计提供参考。后续可结合智能化监测技术,建立实时预警系统,动态优化调整方案,提升煤巷掘进安全性与经济性。

参考文献

- [1]王震,姜芳,贾永勇,等.大断面煤巷快速掘进空顶距及支护方案研究[J].中国矿业,2021,30(z2):241-245.
- [2]王小坡,刘小虎,严理斌,等.煤巷快速掘进设备选型及支护设计研究[J].煤矿机械,2025,46(3):9-13.
- [3]王焕哲.掘进过程中大断面煤巷空顶距及支护方式的研究[J].能源与节能,2025(3):285-287.
- [4]袁立.煤巷快速掘进空顶留设距离与支护技术研究[J].陕西煤炭,2025,44(1):14-18.