

工程管理

大倾角工作面回采巷道支护参数优化与设计

肖茂由

贵州盘江精煤股份有限公司金佳矿

DOI: 10.32629/jpm.v7i7.8965

[摘要] 针对西南地区某矿下采区首采面某工作面埋深大 ($-750\text{ m} \sim -1\,200\text{ m}$)、煤层倾角达 23.5° 的复杂条件,回采巷道围岩变形严重,传统支护方式难以维持稳定。本文基于该工作面地质力学参数,采用 FLAC^3D 数值模拟方法,建立 $160 \times 100 \times 30\text{ m}$ 三维模型,系统分析巷道断面布置方式(不掘底板与部分掘底)对塑性区分布的影响,并通过 5 组 15 个方案正交模拟,优化顶板锚杆间距、帮锚杆间距、锚杆排距、顶锚杆长度及帮锚杆长度等关键参数。结果表明:巷道部分掘底可显著缩小两帮及顶板塑性破坏范围,改善应力分布;优化后支护参数为顶板锚杆间排距 $800 \times 900\text{ mm}$ 、长度 $2\,200\text{ mm}$,帮锚杆间排距 $750 \times 900\text{ mm}$ 、长度 $2\,200\text{ mm}$ 。相比原方案,优化后围岩塑性区范围大幅减小,剪应力集中区域明显收窄,顶板与帮部变形得到有效控制。研究为大倾角深部回采巷道支护设计提供了可靠的计算依据和参数优化方法,具有重要的工程应用价值。

[关键词] 深部;大倾角;回采巷道;数值模拟

Optimization and Design of Support Parameters for Mining Roadways in High-Inclination Mining Faces

Xiao Maoyou

Panjiang Precious Coal Co., Ltd., Jinjia Mine

[Abstract] This study addresses the challenges encountered at a mining face in the underground mining area of a mine in Southwest China, where the burial depth is significant (-750 m to $-1,200\text{ m}$) and the coal seam inclination reaches 23.5° —leading to severe surrounding rock deformation in the mining roadway, making traditional support methods inadequate for maintaining stability. Based on the geomechanical parameters of this mining face, this paper employs the FLAC^3D numerical simulation method to construct a 3D model with dimensions of $160 \times 100 \times 30\text{ m}$. It systematically analyzes the impact of different roadway cross-sectional layout configurations (no bottom plate excavation versus partial bottom plate excavation) on the distribution of plastic zones, and utilizes five sets of orthogonal simulations comprising 15 different scenarios to optimize key parameters such as the spacing between roof bolts, the spacing between side wall bolts, the bolt row spacing, the length of roof bolts, and the length of side wall bolts. The results demonstrate that partial bottom plate excavation can significantly reduce the extent of plastic failure in both side walls and the roof, thereby improving the stress distribution; the optimized support parameters are: a row spacing of $800 \times 900\text{ mm}$ and a length of $2,200\text{ mm}$ for the roof bolts, and a row spacing of $750 \times 900\text{ mm}$ and a length of $2,200\text{ mm}$ for the side wall bolts. Compared with the original scheme, the plastic zone in the surrounding rock is substantially reduced after optimization, the shear stress concentration region is markedly narrowed, and the deformation of both the roof and side walls is effectively controlled. This study provides a reliable computational basis and parameter optimization methodology for the support design of mining roadways in deep high-inclination mines, offering significant engineering application value.

[Key words] deep; steep inclination; mining roadway; numerical simulation

1.引言

西南地区某矿下采区位于矿井东北部,是目前开采最深的区域,煤层开采标高为 -750 m 至 $-1\,200\text{ m}$,首采工作面为某工作面,走向长度约 $1\,440\text{ m}$,倾向长度 198.5 m ,煤层平均厚

度 5.20 m ,平均倾角 23.5° ,属典型的大倾角深部煤层。直接顶为砂质泥岩(平均 4.70 m),老顶为中砂岩(平均 11.71 m),底板以灰黑色泥岩为主(平均 1.50 m)。由于埋深大、地应力高,且受大倾角影响,回采巷道开挖后围岩应力重分布

剧烈，帮部煤体易发生剪切破坏，顶板离层下沉显著，底鼓问题突出，严重制约工作面的安全高效推进。该矿此前采用的常规锚杆锚索支护方案，因未充分考虑深部高应力与大倾角耦合作用，巷道返修率高，不仅增加成本，更影响采掘接续。

回采巷道支护参数优化是深部大倾角煤层安全开采的关键技术之一。国内外学者针对不同地质条件开展了大量研究，涉及锚杆长度、间排距、预应力等参数的敏感性分析，以及巷道断面布置对塑性区演化的影响。然而，对于埋深超过千米、倾角大于 20° 的特定工况，既有研究成果的适用性有限，亟需针对本矿实际条件进行系统性的参数优选。大倾角条件下，巷道两帮受力不对称，顶板锚杆与帮锚杆的协同作用机理更为复杂，若参数设计不合理，易导致局部应力集中引发失稳破坏。因此，本文以某工作面回采巷道为对象，首先通过对比巷道不掘底板与部分掘底两种断面布置方式，明确有利于控制变形的最佳断面形式；继而采用数值模拟正交试验方法，分别研究顶锚杆间距、帮锚杆间距、锚杆排距、顶锚杆长度及帮锚杆长度对围岩变形和锚杆受力的影响规律，综合确定最优支护参数组合。研究成果可直接指导该矿首采面巷道支护设计，并为类似深部大倾角条件下回采巷道支护优化提供理论依据和工程参考。

2.巷道支护优化设计模型

西南地区煤矿下采区在矿井东北部，是西南地区目前开采最深的区域，采区煤层的开采标高-750m~-1200m。采区首采工作面为该工作面，工作面走向长度 1438.8~1448.8m，倾向长度 198.5m；煤层平均厚度 5.20m，平均倾角 23.5°；煤层无伪顶发育，直接顶为砂质泥岩，平均 4.70m；老顶为中砂岩，平均 11.71m；底板以泥岩为主，灰黑色，含碳量较高，平均 1.50m。

根据该工作面的采矿地质条件，建立计算模型尺寸为 160×100×30m，如图 1 所示。计算区域的岩层破坏准则为莫尔-库仑模型，固定模型底部边界，横向约束前后左右边界；工作面标高-760m~-863.61m，地表标高+30.4m~+33.7m，根据工作面埋深，巷道垂直(z 轴方向)地应力施加应力分量 16.00MPa，水平面上沿南北方向(x 轴)应力分量 10.67MPa；考虑到计算模型主要考察巷道围岩变形和破坏情况，同时也为了满足 FLAC 软件对网格单元尺寸的规定要求，共划分出 89,742 个长方体单元和 87,675 个网格点，计算参数见表 1。

表格 1 岩层的物理力学参数

岩层	摩擦 f/(°)	粘结 C/Mpa	抗拉强度/Mpa
砂质泥岩	38	7.6	2.5
细砂岩	36	8.0	3.1
砂质泥岩	38	7.6	2.5
7#煤层	35	1.2	1.4
泥岩	37	2.8	2.2

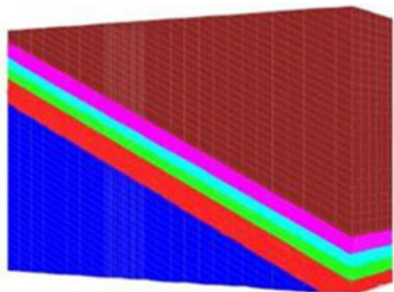
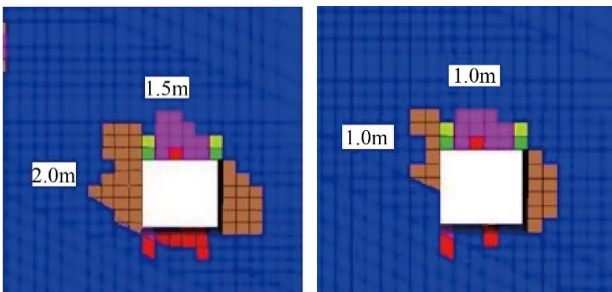


图 1 数值模拟模型

3.巷道围岩破坏特征分析

图 2 为巷道断面布置在煤层中和部分掘底两种情况下巷道围岩塑性区。当巷道不对底板掘进时，巷道开挖导致上帮肩角

方向与采空区两个塑性区域相互贯通，两帮煤体塑性区类型为剪切屈服，实体煤塑性破坏范围 2.0m，巷道顶煤塑性范围 1.5m 左右，塑性区类型为受拉屈服；巷道部分掘进底板时，两帮煤体剪切屈服式塑性区，实体煤帮塑性区范围明显缩小，同时煤柱帮塑性破坏范围大面积减小，巷道顶煤减小至不到 1.0m，为受拉屈服塑性破坏。



(a) 巷道不掘底板 (b) 巷道部分掘底板

图 2 巷道围岩塑性区分布

对比巷道断面布置在煤层与部分掘底两种情况，巷道开挖支护后围岩发生塑性变形，引起围岩的应力重分布，在巷道断面角边出现应力集中现象，巷道断面采用部分掘底的方式能有效减缓主应力对巷道顶帮的破坏，特别是对于巷道底鼓变形控制具有明显优势，一定程度改善了围岩的应力状态，使巷道周边围岩的应力分布均匀，有利于巷道围岩维持稳定。巷道断面部分掘底增加了顶板留煤的厚度，一定程度提高了顶板煤体完整性。综合考虑上覆岩层厚度、锚杆锚固位置以及施工进度，巷道采用部分掘底的方式布置。

4.巷道支护模拟计算

4.1. 数值模拟方案

巷道断面整个支护结构的关键是围岩支护，而影响巷道断面稳定性的关键因素又是，锚杆支护参数因此设计合理可靠的锚杆长度和间排距是保障悬吊单轨吊巷道支护成功的基础。根据工程项目背景要求，基于地质条件分析结果和物理模拟研究结论，本节采用动态设计法调整锚杆间排距和锚杆长度等参数，模拟分析不同支护方案，设计 5 组，合计 15 组数值计算方案，数值模拟计算方案如表 2 所示。对于所有模拟方案，锚杆参数和巷道锚索支护条件统一如下：

顶板锚索：规格为直径 17.8mm；间排距：1600×2400mm，每排布置 3 根锚索；顶板锚杆：采用直径 22mm 的高强螺纹钢锚杆；锚杆长度和间排距由模拟方案确定；两帮锚杆：采用 22mm 高强螺纹钢锚杆；锚杆长度和间排距由模拟方案确定。

表格 2 数值模拟计算方案

模拟参数	方案数量	方案编号	顶锚杆间距/mm	锚杆排距/mm	帮锚杆间距/mm	顶板锚杆长度/mm	两帮锚杆长度/mm
顶锚杆间距	3	1-1	800	900	800	2200	1800
		1-2	850	900	800	2200	1800
		1-3	900	900	800	2200	1800
帮锚杆间距	3	2-1	900	900	800	2200	1800
		2-2	900	900	850	2200	1800
		2-3	900	900	900	2200	1800
锚杆	3	3-1	900	700	800	2200	1800
		3-2	900	800	800	2200	1800
		3-3	900	900	800	2200	1800
顶锚杆	3	4-1	900	900	800	1800	1800
		4-2	900	900	800	2000	1800
		4-3	900	900	800	2200	1800
帮锚杆	3	5-1	900	900	800	2200	1800
		5-2	900	900	800	2200	2000
		5-3	900	900	800	2200	2200

4.2. 模拟结果分析

1) 顶锚杆间距

图3为不同顶板锚杆间距与巷道围岩变形和锚杆支护受力的变化关系。对比模拟分析结果,顶板锚杆间距对巷道顶板锚杆受力和断面围岩变形影响较大,而对两帮锚杆受力变化影响较小。顶板变形量较两帮变形大约60mm,巷道上帮锚杆较下帮锚杆受力稍大,结合巷道断面宽度,围岩在锚杆锚固作用下形成的受力结构需相互交叉,因此顶板锚杆间距宜小于850mm,距设计为800mm,布置6根锚杆较为适宜。

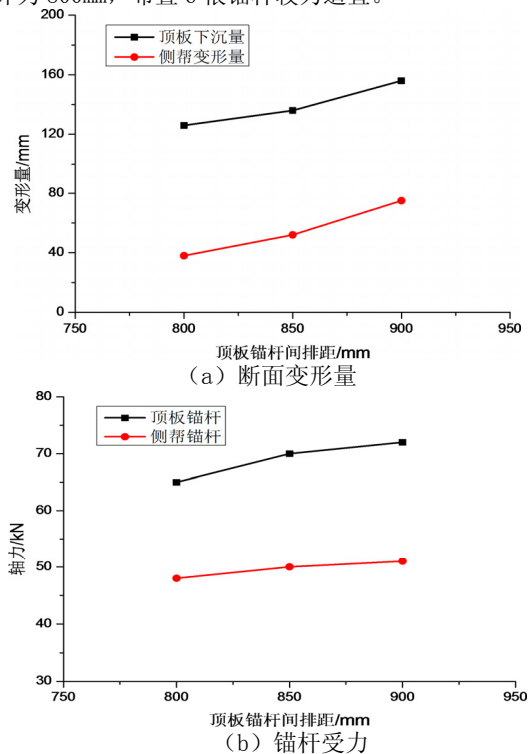


图3 不同间距顶板锚杆模拟结果

2) 帮锚杆间距

帮部锚杆间距对锚杆受力、围岩变形产生较大的影响较大,对顶板锚杆受力、顶板变形产生的影响则不大。巷道锚杆受力、围岩变形产生较大变形时,巷道帮锚杆间距为850~900mm,结合考虑巷道断面高度、现场施工便利性、单轨吊运行影响以及后期存在沿空掘巷的情况,材料道两帮布置5课锚杆,间距宜小于850mm,使得锚杆锚固体形成的应力三角可以连成一个整体。

3) 锚杆排距

巷道锚杆受力、围岩断面变形对锚杆排距变化较为敏感,特别是顶板围岩变形和顶板锚杆受力,当模拟方案中,800、700mm锚杆排距时,顶板变形量有较大的差别;两支护方案为900、800mm锚杆排距时,为巷道锚杆受力、断面变形相差不大,考虑到目前巷道都为实体煤巷道,锚杆排距可设为900mm。

4) 顶锚杆长度

巷道顶板锚杆长度增加充分发挥高强螺纹钢锚杆承载能力,有效控制了顶板下沉量。此外,考虑到巷道顶板需要悬吊单轨吊辅助运输,运输液压支架对断面高度具有严格要求,顶板锚杆2200mm长时,顶板岩层结构稳定性可进一步提高,因此选用2200mm,更加符合工程需求。

5) 帮锚杆长度

计算方案选用长度为2000、2200mm两种帮锚杆时,断面变形量较小,结果相差不大。考虑到顶板悬吊单轨吊,帮部采

用长2200mm锚杆能一定程度减小顶板锚杆受力,因此帮锚杆长度选用2200mm,可满足帮部围岩变形控制。综上结果,首采面回采巷道支护参数:顶板锚杆间排距选用800×900mm,2200mm长锚杆;帮锚杆间排距选用750×900mm,2200mm长锚杆。

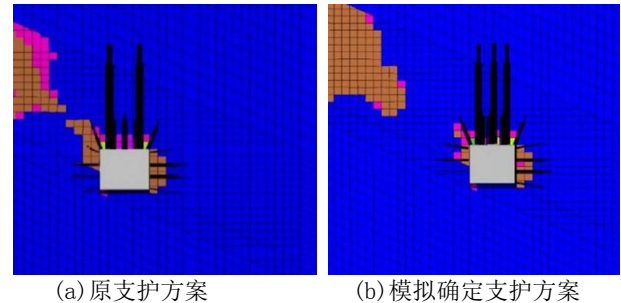


图4 巷道围岩塑性区

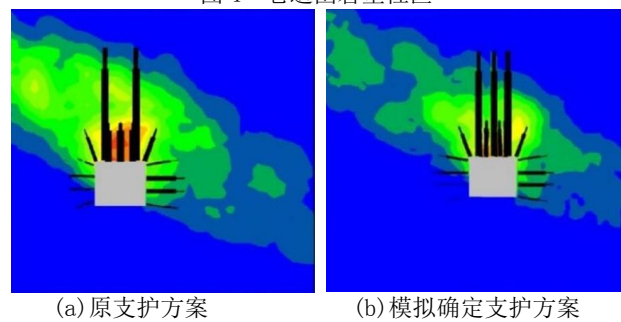


图5 剪应力云图

图4、图5为材料道两种支护方案下,巷道塑性区发育情况对比。在该支护方案下围岩应力显著改善,最大水平主应力扩展区域增大明显,巷道帮部应力、顶板及上帮区域应力集中区域明显减小,巷道围岩应力集中现象较小,可以看出,由计算分析所优选的支护方案对塑性区应变可有效控制,特别是对煤柱受剪塑性破坏,控制效果明显提升。

5 结论

本文针对深部大倾角回采巷道支护难题,通过FLAC^{3D}数值模拟,系统优化了该工作面材料道的支护参数。研究表明,巷道采用部分掘底方式可有效减小两帮和顶板塑性区范围,改善围岩应力环境,是适宜该地质条件的断面布置形式。在支护参数优化方面,顶板锚杆间距、帮锚杆间距、排距及锚杆长度均对围岩变形和锚杆受力有显著影响,其中顶板锚杆间距宜≤850mm,帮锚杆间距宜≤850mm,排距以900mm为宜,顶板及帮锚杆长度均选用2200mm可充分发挥锚固承载能力。最终确定的优化方案(顶板间排距800×900mm,帮锚杆间排距750×900mm,长度均为2200mm)使围岩塑性区范围显著缩小,剪应力集中区域得到有效控制,较原方案明显提升了巷道整体稳定性。研究成果为该矿及同类深部大倾角条件下回采巷道支护设计提供了量化依据,后续可结合现场矿压监测数据进行动态调整,并进一步探索锚索预应力优化及非对称支护策略,以形成更加完善的技术体系。

【参考文献】

- [1]李文斌,徐利宏. 银源煤矿113104工作面巷道支护参数优化设计[J]. 能源与节能, 2026, (1): 212-214+221.
- [2]常立. 大采高工作面回采巷道支护设计优化[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(11): 37-42.
- [3]李晓东. 贺西矿3413工作面回采巷道支护参数优化设计研究[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(10): 158-160+164.