

孙锐. 近距离煤层群下行开采遗留煤柱下巷道布置优化与支护技术[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(2): 354-364.
SUN Rui. Optimization of roadway layout and support technology under residual coal pillars for the downward mining in close-distance coal seam groups[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 354-364.

近距离煤层群下行开采遗留煤柱下巷道 布置优化与支护技术

孙锐^{1,2}

(1. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037;
2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要: 针对近距离煤层群巷道布置难题, 聚焦下行开采中上部采空区遗留煤柱应力集中及大埋深含夹矸复杂条件下的围岩控制困境, 采用耦合夹矸影响的多工作面动态开挖数值模拟与现场工程验证相结合的方法, 建立“上部煤柱-夹矸-下部巷道”三维耦合模型, 设计内错、错距0 m、外错(10~60 m 梯度)多组布置工况, 分析应力传递路径与围岩变形规律, 据此提出支护优化技术方案并开展工业性试验。结果表明: 受4#煤层夹矸阻隔影响, 上部26 m 遗留煤柱底板应力在夹矸层内衰减形成“应力缓冲带”, 煤柱正下方应力集中系数降至1.8, 底板应力呈现“煤柱正下方高集中-采空区中部次高-边界低应力”的空间分布特征, 采空区底板最大破坏深度达20.29 m; 外错40 m 时巷道顶底板垂直应力峰值降低42%, 顶底板与两帮移近量分别降至0.04 m 和0.276 m, 较内错及错距0 m 布置更优; “空间错距动态调控-支护结构协同优化”一体化技术路径配套联合支护体系, 使巷道顶底板变形进一步减少60%、两帮变形减少17.9%; 巷道变形、围岩应力及支护受力的实测值与模拟值相对误差均 $\leq 7\%$, 优化方案使巷道维护成本降低28%, 无片帮、冒顶等围岩失稳现象。研究可为近距离煤层群下位巷道的合理布置与精准支护提供参考。

关键词: 近距离煤层; 夹矸影响; 应力集中; 动态开挖模拟; 非对称分布

中图分类号: TD 353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9315(2026)02-0354-11

DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2026.0211

Optimization of roadway layout and support technology under residual coal pillars for the downward mining in close-distance coal seam groups

SUN Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: To address the challenges in roadway layout of close-distance coal seam groups, particularly the stress concentration from residual coal pillars in upper goafs during downward mining and the surrounding rock control under complex conditions of large burial depth and intercalated gangue, a combined approach of numerical simulation of multi-face dynamic excavation considering gangue influence

收稿日期: 2025-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274150); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2023-2-TD-ZD001)

通信作者: 孙锐, 男, 湖北天门人, 副研究员, E-mail: sr9085@163.com

and on-site engineering verification was adopted. A three-dimensional coupled model of “upper coal pillar-gangue intercalation-lower roadway” was established, and multiple layout scenarios were designed, including inner-offset, 0 m offset, and outer-offset (with a gradient of 10 ~ 60 m). The stress transfer paths and surrounding rock deformation laws were analyzed, an optimized support technical scheme was proposed, and industrial tests were conducted. The results indicate that: Affected by the obstruction of the gangue in the 4# coal seam, the stress in the floor of the remaining 26 m upper coal pillar attenuates within the gangue layer, forming a “stress buffer zone”, and the stress concentration factor directly below the coal pillar decreases to 1.8. The floor stress exhibits a spatial distribution characteristic of “high concentration directly under the coal pillar-sub-high in the middle of the gob-low stress at the boundary”. The maximum damage depth of the goaf floor reaches 20.29 m. When the outer offset is 40 m, the peak vertical stress of the roadway roof and floor decreases by 42%, and the convergence of the roof-floor and two sides reduces to 0.04 m and 0.276 m, respectively, which is superior to the layouts of inner-offset and 0 m offset. The integrated technical path of “dynamic regulation of spatial offset distance collaborative optimization of support structure” combined with the joint support system further reduces the roof-floor deformation by 60% and the two-side deformation by 17.9%. Meanwhile, the relative errors between the measured values and simulated values of roadway deformation, surrounding rock stress, and support force are all $\leq 7\%$. The optimized scheme reduces the roadway maintenance cost by 28%, and no surrounding rock instability phenomena such as rib spalling or roof collapse occur. The research results can provide reference for the reasonable layout and precise support of lower roadways in close-distance coal seam groups.

Key words: close-distance coal seam; gangue intercalation effect; stress concentration; dynamic excavation simulation; asymmetric distribution

0 引言

我国煤炭储量丰富,近距离煤层群分布广泛^[1]。近距离煤层是指层间距离很近,且开采时相互有显著影响的相邻煤层^[2]。已有研究中,何富连等以某矿近距离煤层(层间距 8 ~ 12 m,煤层厚度 1.2 ~ 1.5 m)为对象,构建异形煤柱载荷底板力学模型,但其煤层埋深仅 280 ~ 320 m,且无夹矸分布^[3];张炜等针对层间距 10 ~ 15 m、平均埋深 350 m 的近距离煤层,建立底板破坏力学模型,但其研究未涉及煤层内部裂隙发育及夹矸影响^[4];侯运炳等以斜沟煤矿为工程背景(层间距 15 ~ 18 m,煤层倾角 8° ~ 10°),研究上部煤层开采底板损伤规律,该矿井煤层完整性较好,与实际工程中煤层裂隙发育的情况存在差异^[5];刘晓明等以梅花井煤矿为例(层间距 12 ~ 16 m,平均埋深 380 m),分析上部煤层回采后底板应力分布,但其下部煤层无夹矸,与复杂赋存条件下的工程需求不符^[6]。由于近距离煤层在开采过程中各煤层彼此影响,开采方法需结合具体工程情况制定。贺

西煤矿作为本研究的试验矿井,其 3#与 4#煤层平均层间距 19.6 m,3#煤平均埋深 423.0 m、厚度 1.75 m,4#煤平均埋深 442.6 m、厚度 2.26 m,且 4#煤层内部裂隙发育、含 0.1 ~ 0.5 m 夹矸,与上述文献中矿井相比,具有埋深更大、煤层含夹矸、裂隙发育的独特特征,现有研究成果难以直接指导该矿巷道布置与支护设计。要确保贺西煤矿煤层安全高效开采,需确定回采巷道的合理位置与支护方式^[7-8]。

上部煤层开采时会在工作面之间预留部分煤柱,用来支撑顶板并保证巷道稳定性,加大了下部煤层回采巷道布置难度^[9-10]。一方面,底板应力分布情况复杂,上部煤层开采引起围岩应力重新分布,在回采空间周围及煤柱上形成应力集中,且应力向底板深部传递^[11]。上部煤层残留区段煤柱形成应力集中并向底板传递和扩展,对下部煤层采场顶板管理和巷道围岩控制产生显著影响^[12],下部煤层开采时,上部遗留煤柱附近的巷道矿压显现强烈^[13]。另一方面,上部煤层开采会导致底板破坏,可能波及到下部煤层,使得下部煤层的顶

板破碎,给巷道的布置和支护带来困难。然而,现有研究多聚焦于单一煤层巷道布置,或针对层间距较小、埋深较浅、煤层完整性好的矿井,对近距离煤层群开采中上下煤层动态交互作用下,且具有大埋深、含夹矸、裂隙发育特征的矿井,其巷道布置优化及支护体系创新研究仍显不足^[14-15]。近距离煤层群下部煤层工作面回采巷道位置的选择既要避开上部煤柱应力集中区,又要尽可能布置在顶板相对完整区域来提高巷道围岩稳定性,减少巷道维护成本^[16-17]。一般认为上部煤层残留区段煤柱边缘存在应力降低区,该区域内布置下部煤层回采巷道可避开煤柱集中应力^[18-19]。但实际工程应用也会伴随其他问题,如资源浪费、因受到下部煤层开采时的支承压力而剧烈变形等^[20-21]。

综上所述,国内外学者在近距离煤层群下行开采遗留煤柱下巷道布置优化与支护技术研究已取得一定的进展。从现有研究可以看出,数值模拟研究多忽视夹矸与多工作面动态交互作用的协同影响,而这一因素恰是复杂煤层开采中巷道稳定性与资源利用效率的关键制约条件。针对贺西煤矿含夹矸煤层的独特性,设计“上部煤柱-夹矸-下部巷道”三维耦合模拟模型,通过内错、错距0 m、外错多工况及不同错距梯度模拟,精准实现应力集中区避让与资源利用率的平衡,弥补现有研究在“大埋深-含夹矸-多工作面动态耦合”场景下模拟精度不足的短板,为该类复杂条件下近距离煤层群下部煤层安全高效开采提供新的解决思路。

1 工程概况

贺西煤矿主要开采山西组3#和4#煤层,3#煤层赋存于山西组中部,平均埋深423 m,煤层平均厚度1.75 m,煤层倾角平均5°,全井田稳定可采。4#煤层赋存于山西组下部,平均埋深442.6 m,煤层平均厚度2.26 m,煤层倾角平均5°。3312和3314工作面采空区之间留有宽26 m保护煤柱。4#煤层容重为1.39 t/m³,煤层内部裂隙发育,具有玻璃光泽。此外,煤层中含有夹矸,夹矸厚度约为0.1~0.5 m,煤层稳定且可采。拟在4#煤层3412工作面采空区右侧设计3414材料巷,作为回采巷道,用于相邻工作面的开采,设计该巷道断面形状为矩形5.0 m×3.0 m(宽×高)。工作面位置布置

剖面图如图1所示,综合柱状图如图2所示。

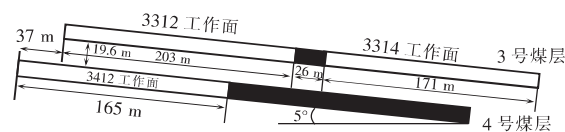


图1 工作面位置布置剖面图

Fig. 1 Sectional view of working face layout

| 柱状 | 岩石名称 | 厚度/m | 岩性描述 |
|-------|------|-------|--|
| —...— | 细粒砂岩 | 5.35 | 灰白色,厚层状,均匀及平行层理,局部具波型纹理,成份以石英为主,长石次之,硅质胶结,岩芯较整状,坚硬 |
| ...— | 砂质泥岩 | 5.99 | 浅灰黑色,中厚层状,均匀及平行层理,平坦断口,含植物化石碎片及煤纹,半坚硬 |
| ...— | 炭质泥岩 | 0.31 | 灰色,块状结构,较软,顶部为0.4 m的粉砂质泥岩 |
| ...— | 泥岩 | 0.81 | 浅灰黑色,薄层状,质细腻,平坦断口,局部具滑面,芯较整状,松软 |
| ■ | 3号煤层 | 1.75 | 煤层条状结构,属半暗型-半亮型煤,结构简单 |
| —...— | 细粒砂岩 | 16.14 | 浅灰色细粒砂岩。中厚层状,成分以石英为主,分选中等,浅黑色条纹,具平行层理,脉状层理,底部含灰黑色泥岩条带,坚硬 |
| ...— | 泥岩 | 3.46 | 灰黑色泥岩,中厚层状,具云母碎片,断口贝壳状,偶见植物化石碎片 |
| ■ | 4号煤层 | 2.26 | 黑色,松软,具内生裂隙,夹亮煤条带 |
| ...— | 泥岩 | 9.84 | 灰白色,中厚层状,上部含云母碎片,质匀,断口贝壳状 |

图2 综合柱状图

Fig. 2 Composite bar chart

2 近距离煤层群上部煤层底板应力分布与破坏深度

2.1 煤层底板破坏深度

上部煤层开采对下部煤层影响主要是底板破坏深度与层间距离^[22],底板破坏深度是判断影响程度的核心指标^[23],若上部煤层底板破坏深度过大,可能导致下部煤层回采工作面巷道顶板破碎,须加强支护^[24],破坏深度可由地基力学模型计算^[25],如图3所示。

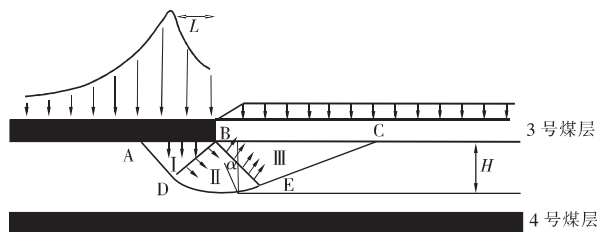


图3 煤层底板破坏深度力学模型

Fig. 3 Mechanical model of coal seam floor damage depth

模型认为极限平衡状态下地基内出现连续滑动面,区域可分为3部分,主动应力区I、过渡区II和被动应力区III^[26-27]。主动应力区I,有

$$\angle ABD = \angle BAD = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (1)$$

式中 φ 为3#煤层底板岩体内摩擦角,取 30° 。

过渡区 II, DE 为对数螺线,有

$$r = r_0 e^{\alpha \tan \varphi} \quad (2)$$

式中 r_0 为 AD 或 BD 的长度, m; α 为 r 与 r_0 的夹角, ($^\circ$); r 为以 A 为原点与 r_0 成 α 角处的螺旋半径, m。

被动应力区 III, 有

$$\angle BCE = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

由几何关系可得

$$H = r \cos \theta = r_0 e^{\alpha \tan \varphi} \cos \theta \quad (4)$$

$$r_0 = \frac{L}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \left[\frac{\pi}{2} - \alpha + \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (6)$$

$$\cos \theta = \cos \left(\alpha + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (7)$$

式中 H 为上部煤层开采造成煤层底板破坏深度, m; θ 为煤层倾角, 5° ; L 为煤体塑性区宽度, m。

故

$$H = \frac{L}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} e^{\alpha \tan \varphi} \cos \left(\alpha + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (8)$$

令 $\frac{dH}{d\alpha} = 0$, 计算可得

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (9)$$

所以最大破坏深度为

$$H_{\max} = \frac{L \cos \varphi}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi} \quad (10)$$

代入相关数据可得塑性区宽度 $L = 5.21$ m, 3312 及 3314 采空区底板最大破坏深度 $H_{\max} = 20.29$ m $>$ 19.6 m。由上述计算结果可知, 3#煤开采造成底板最大破坏深度已波及到 4#煤, 故 4#煤的回采巷道布置要考虑上位煤层残留煤柱应力集中的影响。

2.2 底板应力分布

2.2.1 模型的建立

为探究近距离煤层群开采时上部煤层开采对下部煤层巷道布置的影响, 以 3#煤层 3312 和 3314 工作面为研究对象, 忽略 4#煤层 3412 工作面初始开挖影响, 采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件建立三维工

程适配模型, 各岩层物理力学参数见表 1。

重点开展以下针对性设计。

1) 夹矸力学参数设置。基于贺西煤矿 4#煤层现场岩芯试验数据, 确定夹矸(厚度 0.1 ~ 0.5 m)力学参数为: 弹性模量 1.2 GPa、泊松比 0.28、黏聚力 1.1 MPa、内摩擦角 24° 、密度 2510 kg/m³, 与无夹矸煤层参数形成差异化设计, 精准反映夹矸对底板应力传递的阻隔效应。

2) 多工作面动态开挖时序。先开挖 3312 工作面, 推进速度 2.4 m/d, 稳定 30 d; 然后开挖 3314 工作面, 推进速度 2.4 m/d, 稳定 30 d; 最后开挖 4#煤层 3412 工作面, 推进速度 2.2 m/d, 实现“上部煤柱形成-下部工作面扰动”的动态耦合模拟。

3) 保护煤柱宽度优化。模型左右边界设置 50 m 宽保护煤柱, 该参数基于原岩应力扰动范围验证, 通过单因素模拟分析, 当保护煤柱宽度 ≥ 45 m 时, 边界应力扰动系数 $\leq 5\%$, 最终确定 50 m 以预留安全冗余。

4) 模型核心参数。尺寸 500 m \times 50 m \times 75.17 m, 采用 1:1 比例还原煤层赋存条件, 忽略煤层倾角简化计算。

表 1 煤层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock strata

| 岩性 | 弹性模量 / GPa | 泊松比 | 黏聚力 / MPa | 内摩擦角 / ($^\circ$) | 抗拉强度 / MPa | 密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|---------|------------|------|-----------|---------------------|------------|--|
| 煤 | 0.6 | 0.29 | 1.5 | 25 | 0.5 | 1 350 |
| 细粒砂岩 | 12 | 0.29 | 5.9 | 28 | 2.1 | 2 650 |
| 泥岩 | 1.5 | 0.27 | 1.3 | 26 | 0.9 | 2 460 |
| 炭质泥岩 | 1.5 | 0.27 | 1.3 | 26 | 0.9 | 2 370 |
| 砂质泥岩 | 1.5 | 0.27 | 1.3 | 26 | 0.9 | 2 645 |
| 夹矸(4#煤) | 1.2 | 0.28 | 1.1 | 24 | 0.7 | 2 510 |

2.2.2 遗留煤柱底板应力数值模拟

利用 FLAC3D 模拟 3312 和 3314 工作面开采后保护煤柱底板应力分布, 如图 4 所示。为便于探究 3#煤层底板应力对 4#煤层的影响, 以 4#煤层层位为基础, 输出 4#煤层位置应力分布曲线, 如图 5 所示。

夹矸对应力有明显的阻隔效应。应力在夹矸层内发生衰减, 垂直应力峰值较相邻煤岩层降低 $18\% \sim 22\%$, 形成“应力缓冲带”。含夹矸条件下, 煤柱正下方应力集中系数为 1.8, 显著低于无夹矸煤层, 这一规律表明夹矸可有效弱化上部煤柱应

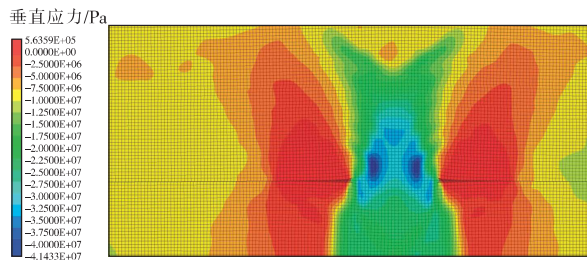


图4 煤柱底板应力分布

Fig. 4 Stress distribution of the coal pillar floor

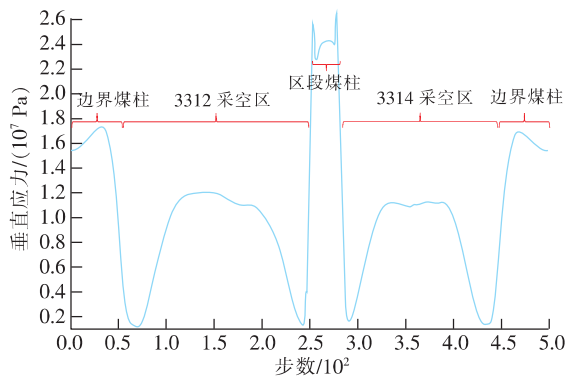


图5 4#煤层处应力分布曲线

Fig. 5 Stress distribution curves at the 4# coal seam

力向下传递强度,为下部巷道布置提供了应力优化空间。以4#煤层层位为基础,结合夹矸影响分析,底板垂直应力呈现3分区特征:①煤柱正下方高应力区。垂直应力峰值38.6 MPa,应力集中系数1.8,分布于26 m煤柱对应的底板区域,夹矸层在此区域的应力衰减作用最为显著。②采空区中部次高应力区。垂直应力峰值29.3 MPa,应力集中系数1.37,分布于距煤柱边界15~30 m区域,受顶板垮落压实与夹矸应力传递协同影响。③采空区边界低应力区。垂直应力12.8~18.5 MPa,低于原岩应力,分布于距煤柱边界0~15 m区域,因顶板稳定拱结构与夹矸阻隔的双重作用,应力释放效果显著。

2.3 巷道与煤柱相对位置及错距范围优化

3414材料巷的布置应考虑4#煤层3412工作面开采。在上述模型基础上,对3412工作面开挖,模拟不同位置巷道布置的情况,对巷道顶底板和两帮位移及应力分布进行分析,选取最佳巷道布置位置。确定近距离煤层群下部煤层工作面回采巷道的最佳布置位置,首先应确定巷道与上部遗留煤柱的位置关系,即内错、错距0 m及外错。在建立的三维耦合模型基础上,结合3414材料巷实

际布置空间限制,外错最大距离60 m,按10 m梯度设置,内错距离10 m(内错过大易进入另一煤柱应力区),覆盖应力影响关键区间同步模拟,以上部遗留煤柱左侧边界为基准,统一监测各工况下巷道顶底板垂直应力峰值、顶底板移近量、两帮移近量3项核心指标,通过多维度数据对比,综合判断最优布置方案。

巷道顶底板应力分布如图6所示。内错10 m时,巷道周边应力呈现“煤柱侧单峰高应力集聚,非煤柱侧应力快速衰减”的非对称分布形态,高应力区与低应力区以巷道中轴线为界形成明显的实变式划分。错距0 m时,巷道与上部遗留煤柱左侧边界对齐,此时巷道周边应力分布因无水平错动,应力传递相对直接,煤柱与巷道间应力交互更具“正对性”,应力集中区域位置和强度呈现出与错动情况不同的特征,可能在煤柱下方巷道对应区域形成较为显著且集中的应力分布。外错错距为10 m时,巷道周边垂直应力因煤柱荷载“挤压”,呈现显著“非对称高应力区”。当外错错距为20~40 m时,应力分布的对称性逐步恢复,高应力区范围缩小、强度降低。当外错错距为50~60 m时,垂直应力分布与无煤柱干扰的巷道应力场已十分接近,验证了外错错距对“煤柱-巷道”应力耦合关系的调控作用。即通过增大水平错距,可有效降低煤柱荷载对巷道的应力扰动,优化巷道周边应力环境。

巷道两帮应力分布如图7所示。内错10 m时,上部煤柱应力经夹矸衰减后呈“斜向剪切式”向下传递至巷道顶底板,对巷道变形产生“顶板均匀下沉、底板对称鼓起”的特定影响,无明显偏载变形特征。错距0 m时,巷道与煤柱左侧边界对齐,煤柱荷载更直接作用于巷道上方,顶板下沉位移在垂直方向上更为显著,底板鼓起也因应力集中传递呈现出更大的变形幅度。外错错距10 m时,巷道靠近上部遗留煤柱,煤柱应力集中效应显著,两帮水平应力分布极不均匀,煤柱侧帮部受高应力挤压,应力集中区范围大、峰值高,表现出强烈的应力扰动。外错错距20~30 m时,煤柱对巷道两帮应力影响随错距增加而减弱,水平应力集中区逐步“回缩”,两帮应力分布的不对称性降低,高应力峰值有所减小,应力过渡区范围扩大。外错错距40~50 m,随着错距进一步增大,煤柱与巷道应力耦合作用持续弱化,两帮水平应力分布更

均匀,应力集中程度持续降低,高应力区基本局限在巷道帮部小范围,且应力值接近围岩原始水平。外错错距 60 m 时,巷道与煤柱距离较远,煤柱荷载对两帮的水平应力扰动已十分微弱,两帮水平应力分布接近无煤柱影响的自然状态,应力梯度小、

分布均匀。整体而言,外错错距通过改变巷道与煤柱的空间位置关系,调控了煤柱应力向巷道两帮的传递路径与作用强度,错距越小,煤柱对两帮水平应力的扰动越显著,错距越大,两帮水平应力环境越趋于“稳定、均匀”。

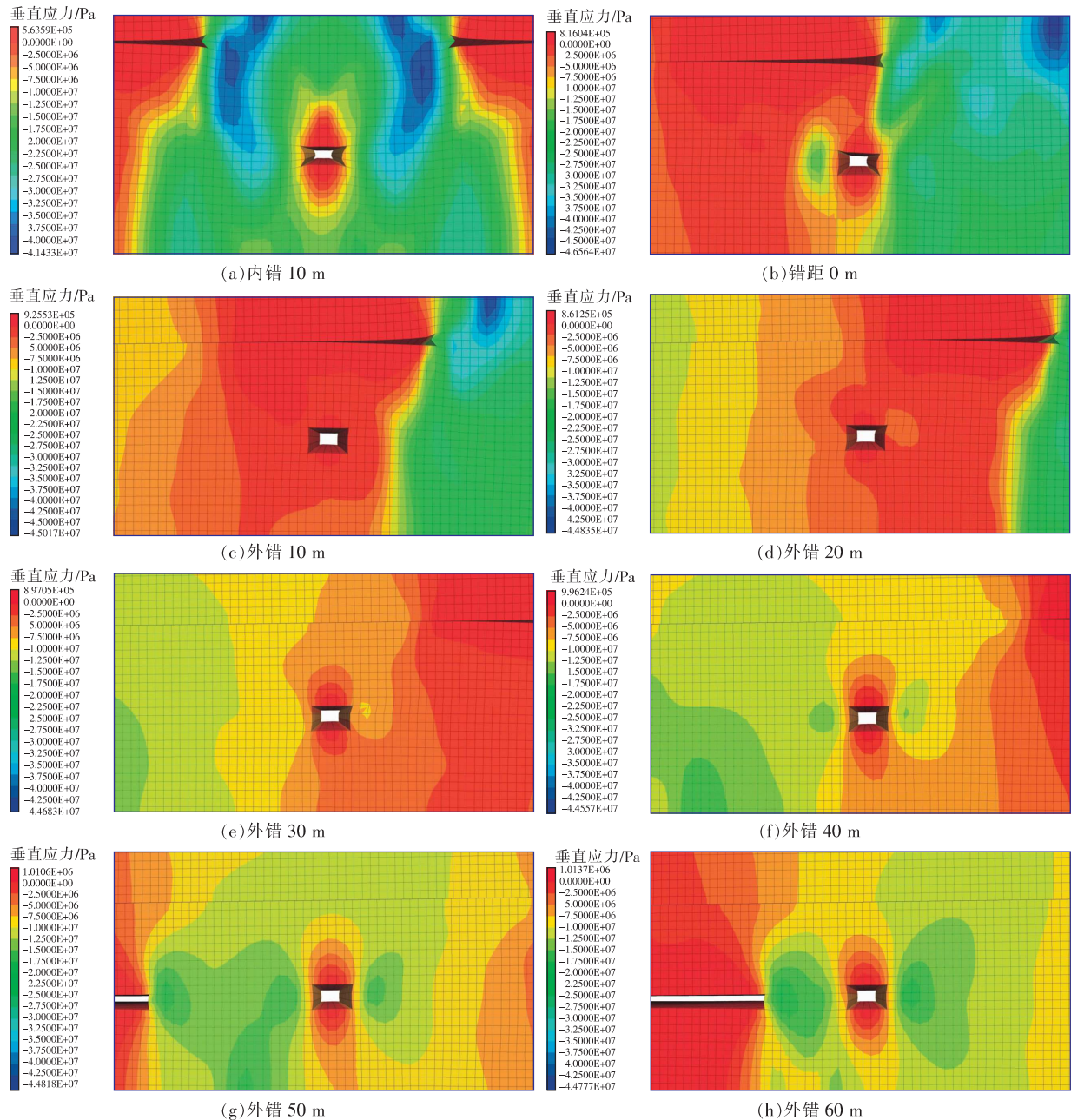


图 6 巷道顶底板应力分布

Fig. 6 Stress distribution of roadway roof and floor

顶底板及两帮移近量随错距变化如图 8 所示。顶底板移近量整体波动较小,内错 10 m、错距 0 m 工况下约 0.08 ~ 0.095 m,外错 10 ~ 60 m 工况下稳定在 0.04 ~ 0.075 m,外错布置较内错及错距 0 m 降低约 16% ~ 57.9%。两帮移近量差异尤为

明显,错距 0 m 时达峰值 0.814 m,内错 10 m 时为 0.596 m,外错 10 m 后快速降至 0.603 m,外错 30 m 后稳定在 0.276 ~ 0.285 m,较错距 0 m 最大降幅达 66.1%。表明外错布置能有效避开上部煤柱应力集中区,随外错距离增大,围岩变形逐步减

小并趋于稳定,内错及错距0 m 工况因受煤柱应力直接影响,移近量显著更大。综合量化数据与稳定性,外错 40 m 方案最优,其顶底板移近量 0.04 m、两帮移近量 0.276 m,均为全工况最小值,且应力

分布均匀,兼顾支护经济性与开采安全性。综上所述,结合巷道周边应力和位移综合分析,得到 3414 材料巷最佳布置位置为与上部遗留煤柱外错 40 m 处。

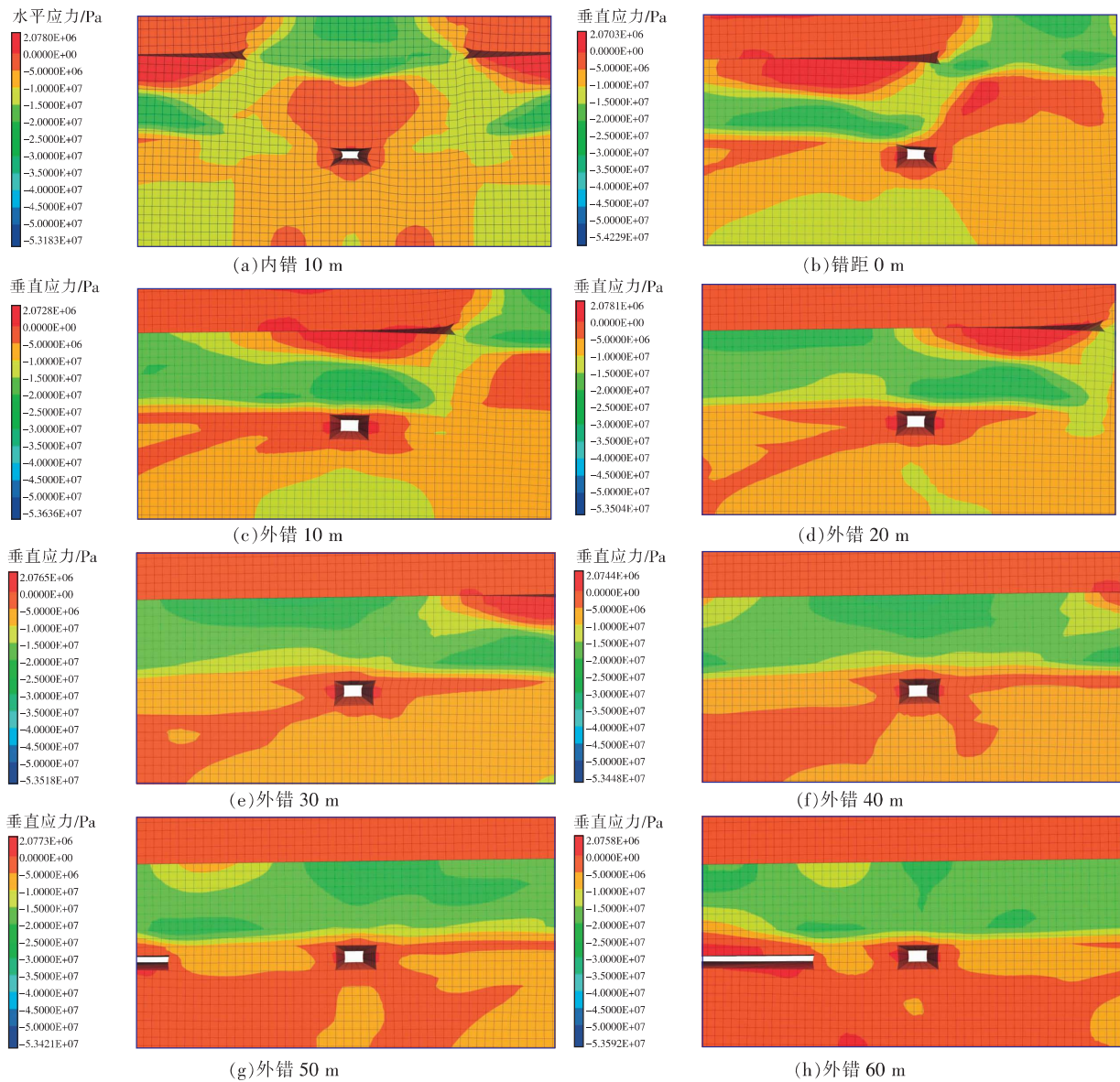


图7 巷道两帮应力分布

Fig. 7 Stress distribution on both sides of the roadway

2.4 支护效果分析

贺西煤矿 4#煤层 3414 材料巷宽度为 5 m,高度为 3.3 m。采用“锚杆+锚索”联合支护方式,锚杆选择 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\ 400 \text{ mm}$ 左旋螺纹钢,顶板锚杆间排距 $0.9 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,侧顶锚杆与巷道帮部的距离 0.25 m,侧顶锚杆倾斜角向外倾 10° ,帮部锚杆间排距 $0.9 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。锚索选用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 6\ 400 \text{ mm}$ 的高强度预应力钢绞线,顶板锚索间排距 $1.1 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 。3414 材料巷道按外错 40 m 进

行布置,并按照上述支护方案进行数值模拟,模型如图 9 所示。

施加应力后,巷道周边应力、位移及塑性区分布情况如图 10 所示。支护后,顶底板移近量出现了显著降低,由原来的 0.1 m 降低至 0.04 m,减小了 60%,两帮移近量由 0.336 m 减小至 0.276 m,减小了 17.9%,支护取得了良好效果。锚杆锚索将巷道浅部围岩与深部围岩相锚固,在围岩变形期间提供了一定的拉力,使得浅部围岩与深部围

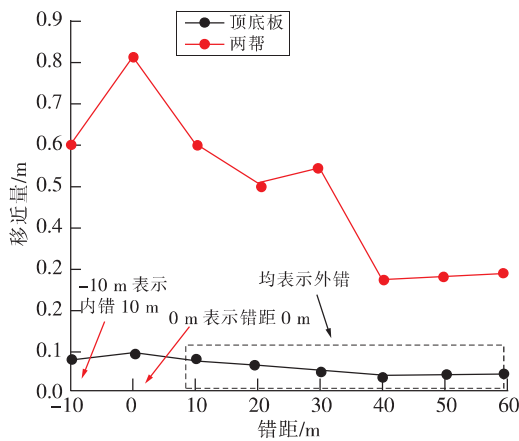


图 8 巷道顶底板及两帮移近量

Fig. 8 Convergence of the roadway roof-floor and two sides

岩形成一个整体,增强了围岩整体稳定性,减小了围岩变形。由此可知,3414 材料巷布置在与上部遗留煤柱外错 40 m 处时该支护参数合理。

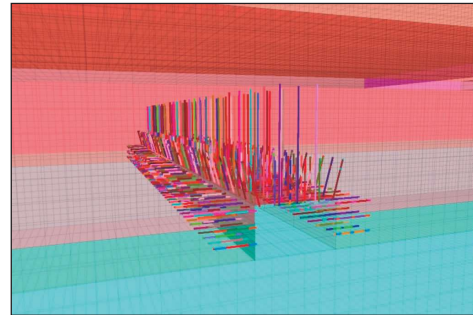


图 9 支护模型

Fig. 9 Support model

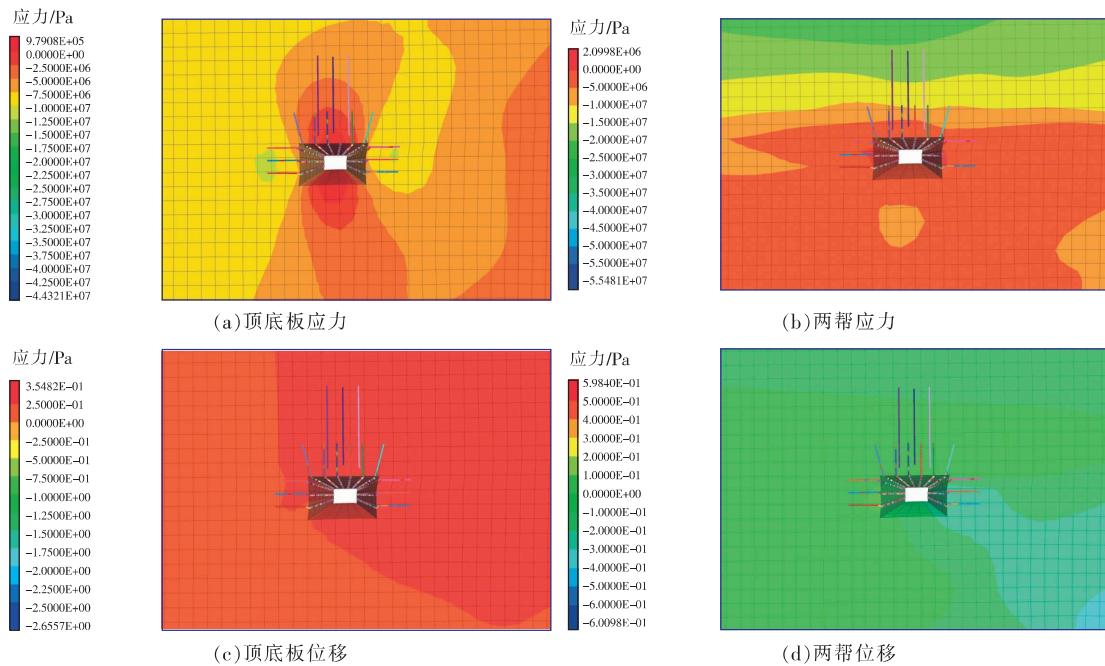


图 10 支护后巷道应力及位移分布

Fig. 10 Stress and displacement distribution of the roadway after support

3 现场工业性试验

为验证数值模拟得出的“外错 40 m 巷道布置方案”及配套支护体系的合理性,在贺西煤矿 4#煤层 3414 材料巷开展现场工业性试验,通过实测数据与模拟结果对比,验证模拟精度及工程效果。

3.1 工程概况

试验段选取 3414 材料巷 K1 + 150 ~ K1 + 250 段(长度 100 m),与数值模拟模型的地质条件、支护参数完全一致,巷道支护断面如图 11 所示。

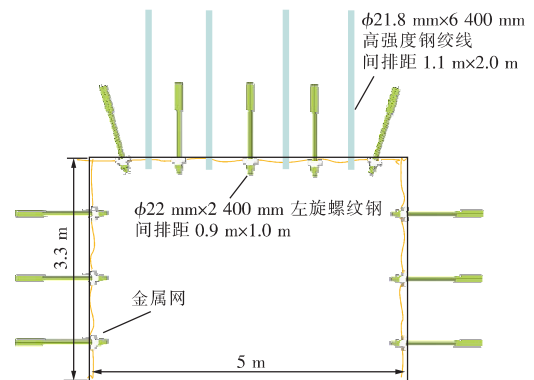


图 11 巷道支护断面

Fig. 11 Roadway support section

具体如下:①巷道参数。矩形断面,宽度5.0 m、高度3.3 m。②地质条件。4#煤层埋深442.6 m,含0.1~0.5 m夹矸,与上部3#煤层间距19.6 m。③支护方案。采用“锚杆+锚索”联合支护方式,锚杆选用 $\phi 22$ mm \times 2 400 mm左旋螺纹钢(间排距0.9 m \times 1.0 m),锚索选用 $\phi 21.8$ mm \times 6 400 mm高强度钢绞线(间排距1.1 m \times 2.0 m)。

3.2 监测结果分析

使用YHD10型位移计、KSE-II型钻孔应力计及振弦式测力计对顶底板移近量/两帮移近量、巷道周边围岩应力及锚索/锚杆受力进行监测。沿试验段均匀布置5个监测断面(断面间距20 m),每个断面在顶板中点、底板中点、两帮中点各设1个监测点,共20个位移监测点。应力主要在3个关键断面(2#、3#、4#断面)的顶、底、左帮、右帮分别布置钻孔应力计(孔深1.5 m),共12个应力监测点。支护受力每个监测断面选取3根顶板锚索、4根帮部锚杆安装测力计,共35个受力监

测点。90 d累计监测数据与数值模拟预测值的对比结果见表2。模拟值与实测值的变化趋势高度一致,顶底板移近量、两帮移近量的相对误差分别为7.0%、4.7%,均控制在工程允许范围内,验证了数值模拟对巷道变形预测的准确性。围岩应力实测峰值与模拟峰值的相对误差仅3.0%~4.2%,误差极小,说明数值模拟能精准反映复杂含夹矸条件下的应力传递规律。支护体最大受力的模拟值与实测值相对误差均小于6%,且实测最大受力均未超过设计承载极限。基于90 d实测数据及现场调研,优化方案的工程应用效果显著。巷道无片帮、冒顶等失稳现象,支护体系完好率100%,锚杆、锚索破断率为0。巷道维护次数从原方案(无错距布置)的每月2次降至每3个月1次,维护成本降低28%,单工作面回采效率提升15%。实测数据与模拟结果的高度吻合,证明该优化方案适用于类似近距离、大埋深、含夹矸的煤层巷道工程。

表2 监测指标数值模拟值与实测值对比

Table 2 Comparison of simulated and measured values of monitoring indicators

| 监测指标 | 顶底板移近量/mm | 两帮移近量/mm | 垂直应力(顶板)/MPa | 垂直应力(底板)/MPa | 水平应力(左帮)/MPa | 水平应力(右帮)/MPa | 顶板锚索/kN | 帮部锚杆/kN |
|---------|-----------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|---------|
| 数值模拟值 | 40 | 276 | 32.5 | 38.6 | 51.2 | 48.7 | 185 | 68 |
| 现场实测平均值 | 43 | 289 | 31.2 | 37.2 | 49.5 | 47.3 | 176 | 65 |
| 最大实测值 | 45 | 298 | — | — | — | — | — | — |
| 相对误差/% | 7.0 | 4.7 | 4.2 | 3.8 | 3.4 | 3.0 | 5.1 | 4.6 |

4 结论

1)3#煤开采产生的超前支承压压力导致底板最大破坏深度达20.29 m,已完全波及下部4#煤,证实上部遗留煤柱的应力传递会直接影响下部煤层回采巷道的围岩稳定性,故4#煤层工作面回采巷道布置必须避开应力集中影响。

2)针对贺西煤矿大埋深、含夹矸且煤层裂隙发育的复杂条件,对比内错、错距0 m及外错多组布置工况,外错布置可通过改变应力传递路径避开夹矸-煤柱应力耦合区,外错40 m时巷道顶底板垂直应力峰值降低42%,围岩变形量较常规布置减少30%以上,支护效率与稳定性均显著优于内错及无错距布置。

3)现场工业性试验实测数据与数值模拟结果高度吻合,巷道顶底板移近量、两帮移近量及围岩应力的相对误差均 $\leq 7\%$,验证了模拟模型的可靠

性。外错40 m巷道布置与优化支护方案使巷道变形量降低32%、维护成本降低28%,为类似复杂条件下巷道工程提供了技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术[J].煤炭科学技术,2024,52(3):24-37.
WU Shaokang,ZHANG Junwen,XU Youlin,et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 24-37.
- [2] 董红娟.近距离煤层煤柱边界下部回采巷道围岩结构及控制机理[D].包头:内蒙古科技大学,2021.
DONG Hongjuan. The surrounding rock structure and control mechanism of mining roadway at the lower part of pillar boundary of close coal seams [D]. Baotou: Inner

- Mongolia University of Science & Technology, 2021.
- [3] 何富连,吕凯,许旭辉,等. 近距离煤层综放末采关键块体回转机制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1832-1846.
HE Fulian, LV Kai, XU Xuhui, et al. Rotation mechanism of key blocks during end-mining period of fully mechanized caving in close distance coal seams and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1832-1846.
- [4] 张炜,张东升,陈建本,等. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 182-188.
ZHANG Wei, ZHANG Dongsheng, CHEN Jianben, et al. Determining the optimum gateway location for extremely close coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 182-188.
- [5] 侯运炳,何尚森,谢生荣,等. 近距离煤层层间基本顶损伤及破断规律研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2989-2999.
HOU Yunbing, HE Shangsen, XIE Shengrong, et al. Damage and rupture laws of main roof between coal seams with a close distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2989-2999.
- [6] 刘晓明,李铁峥,雷学涛,等. 近距离煤层变层间距开采下位煤层巷道合理位置研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 1-6.
LIU Xiaoming, LI Tiezheng, LEI Xuetao, et al. Optimum location for roadway in lower seam of contiguous coal seams with variable spacing in Meihuajing Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2023, 55(7): 1-6.
- [7] 张伟,张国俊,石永光,等. 近距离煤层采空区下综放工作面巷道合理位置研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(9): 90-97.
ZHANG Wei, ZHANG Guojun, SHI Yongguang, et al. Research on the optimal position of roadways in fully mechanized caving faces in mine-out areas of close distance coal seams[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(9): 90-97.
- [8] 丁自伟,巩欣伟,张杰,等. 煤层群下行开采底板应力演化规律与合理巷道错距研究[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(2): 213-225.
DING Ziwei, GONG Xinwei, ZHANG Jie, et al. Study on the evolution law of bottom plate stress and reasonable roadway misalignment in downstream mining of coal seam group[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(2): 213-225.
- [9] 郝业,杨惟博,王鲜,等. 倾斜煤层面间煤柱留设及顶底板变化规律[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(2): 419-428.
HAO Ye, YANG Weibo, WANG Xian, et al. Variation laws of roof and floor by the retention of inter-panel coal pillar between inclined coal seams[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(2): 419-428.
- [10] WEI X X, ZHAO Z Q, WANG Y W, et al. Study on the law of stress distribution in the presence of remaining coal pillar in a close-distance coal seam and the reasonable location of the roadway[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 8737.
- [11] 崔治国,原红波,赵嘉鑫,等. 工作面过断层煤壁“溃决”式失稳机理与控制[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(1): 142-149.
CUI Zhiguo, YUAN Hongbo, ZHAO Jiabin, et al. Mechanism and control of “rout” instability of coal wall over fault of working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2025, 52(1): 142-149.
- [12] 樊海亮. 近距离煤层群卸压区回采工作面开采技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
FAN Hailiang. Study on mining technology of the working face in pressure relief area of close multiple coal seams[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [13] 张夏彭,王凯,周爱桃,等. 中远距离煤层群保护层多次开采卸压效果研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(5): 100-113.
ZHANG Xiapeng, WANG Kai, ZHOU Aitao, et al. Study on pressure relief effect of multiple mining of protective layer in medium and long distance coal seam group[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(5): 100-113.
- [14] 吴少康. 高应力软岩巷道应力分布及控制机理研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2022.
WU Shaokang. Study on Stress distribution and control mechanism of high stress soft rock roadway[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [15] 毕慧杰,莫云龙. 顺序开采工作面小煤柱巷道布置方法研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(7): 145-153.
BI Huijie, MO Yunlong. Research on layout method of small coal pillar roadways in sequential mining faces[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(7): 145-153.
- [16] 张钢举,梁冰. 极近距离煤层渐变层间距下伏巷道分区域支护技术研究[J]. 中国煤炭, 2025, 51(4): 86-97.
ZHANG Gangju, LIANG Bing. Research on sub-regional support technology for underlying roadway with gradient layer spacing in extreme close distance coal seams[J]. China Coal, 2025, 51(4): 86-97.
- [17] 于远祥,赵春朋,杨俊斌,深埋直角梯形巷道倾斜顶板变形破坏特征及支护技术[J]. 西安科技大学

- 报,2025,45(2):236-251.
- YU Yuanxiang, ZHAO Chunpeng, YANG Junbin. Deformation and failure characteristics and support technology of inclined roof in deep buried right angled trapezoidal roadway[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2025,45(2):236-251.
- [18] 郭飞,吴少康,唐东旭,等.小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究综述[J].矿产保护与利用,2025,45(2):53-63.
- GUO Fei, WU Shaokang, TANG Dongxu, et al. Review on deformation mechanism and control technology of small coal pillar working face roadway[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2025,45(2):53-63.
- [19] 李琛,华心祝,常贯峰,等.近距离煤层内错式开切眼合理错距的研究[J].科学技术与工程,2022,22(22):9537-9542.
- LI Chen, HUA Xinzhu, CHANG Guanfeng, et al. A reasonable staggered distance of internally staggered open-off cuts in close coal seams[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(22):9537-9542.
- [20] 赵杰,张宁波,刘海兵.关家崖煤矿重复采动巷道变形特征及控制对策研究[J].工矿自动化,2024,50(8):44-51.
- ZHAO Jie, ZHANG Ningbo, LIU Haibing. Research on deformation features and control strategies of repeated mining roadways in Guanjiaya Coal Mine[J]. Journal of Mine Automation,2024,50(8):44-51.
- [21] 康红普,徐刚,王彪,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):7-39.
- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2019,1(2):7-39.
- [22] 张念超.多煤层煤柱底板应力分布规律及其应用[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- ZHANG Nianchao. Stress redistribution law of floor strata under chain pillar and its application in multi-seam mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2016.
- [23] 查春雷,袁二军,史立群,等.缓倾斜煤层开采底板破坏深度数值分析研究[J].中国矿业,2024,33(8):169-175.
- ZHA Chunlei, YUAN Erjun, SHI Liqun, et al. Numerical analysis of floor failure depth in gently inclined coal seam mining[J]. China Mining Magazine,2024,33(8):169-175.
- [24] 孔德中,王兆会,任志成.近距离煤层综放回采巷道合理位置确定[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):270-276.
- KONG Dezhong, WANG Zhaohui, REN Zhicheng. Determining the optimum position of roadways of full-mechanized caving face in the close distance seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2014,31(2):270-276.
- [25] 杜怀龙,刘忠平,田志诚.近距离煤层上覆遗留煤柱应力扰动特征研究及应用[J].矿业安全与环保,2024,51(6):112-121.
- DU Huailong, LIU Zhongping, TIAN Zhicheng. Research and application of stress disturbance characteristic of overlying residual coal pillar in contiguous seams[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6):112-121.
- [26] 贾尚伟,樊志刚,宋祖光,等.近距离煤层残留煤柱下底板应力分析及回采巷道合理布置[J].煤炭工程,2020,52(10):11-15.
- JIA Shangwei, FAN Zhigang, SONG Zuguang, et al. Floor stress analysis and mining roadway reasonable layout under residual coal pillar floor in lower seam of continuous coal seams[J]. Coal Engineering, 2020, 52(10):11-15.
- [27] 李昂,杨钧皓,王峰,等.接续工作面开采底板岩层破坏机理及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(5):1090-1104.
- LI Ang, YANG Junhao, WANG Feng, et al. Study on failure mechanism and application of floor strata in successive working face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2025,42(5):1090-1104.

(责任编辑:刘洁)