

文章编号: 1671-251X(2024)09-0090-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024070074

近距离煤层采空区下综放工作面巷道合理位置研究

张伟¹, 张国俊¹, 石永光¹, 甄伟杰¹, 王玉亮², 李宜杭², 李杨²

(1. 内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司, 内蒙古 赤峰 024000;

2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 近距离煤层综放工作面开采空间大, 采动强度高, 下位煤层回采巷道受上煤层采动影响存在应力集中、巷道支护困难等问题, 因此近距离煤层综放工作面巷道合理位置的选取对后期支护控制起到关键性作用。以西露天煤矿2煤层和1煤层1分层为研究对象, 综合考虑了上煤层开采时的底板应力降低区域和下煤层开采时的极限平衡区域, 确定了下煤层巷道的合理位置应在距离实体煤柱内错 22.79 m 以上的区域。基于上述理论计算结果, 分析了上煤层开采后底板应力分布规律及不同内错距下巷道围岩变形破坏特征及规律, 结果表明: ① 距离采空区底板越近, 应力最大值与最小值相差越明显; ② 随着内错距不断增大, 围岩应力和应力集中系数呈现急剧降低-缓慢增大-稳定的趋势, 在内错距 20~25 m 内应力及应力集中系数相对较小; ③ 巷道围岩塑性区范围呈现先减小后增大的趋势, 当巷道处于内错 20, 25 m 时巷道围岩破坏相对较小; ④ 巷道变形量随着内错距增大而逐渐减小, 当内错距增加至 25 m 时, 巷道围岩移进量基本保持不变; ⑤ 确定巷道合理内错距为 20~25 m。工程应用结果表明: 巷道采用内错距 24 m 布置时, 巷道围岩松动破坏深度及变形量均在可控范围内, 进一步证明了该内错距的合理性。

关键词: 近距离煤层; 综放工作面; 巷道布置; 围岩破坏; 内错距; 底板应力

中图分类号: TD353

文献标志码: A

Research on the optimal position of roadways in fully mechanized caving faces in mine-out areas of close distance coal seams

ZHANG Wei¹, ZHANG Guojun¹, SHI Yongguang¹, ZHEN Weijie¹, WANG Yuliang², LI Yihang², LI Yang²

(1. Inner Mongolia Pingzhuang Coal Industry (Group) Co., Ltd., Chifeng 024000, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Fully mechanized caving faces in close-distance coal seams involve extensive extraction spaces and high mining intensity. The extraction of roadways in lower coal seams is affected by stress concentration and support challenges resulting from the mining of upper seams. Hence, determining the optimal roadway position is crucial for effective support control in these settings. This study focused on the No. 2 coal seam and the No. 1-1 sub-seam at Xilutian Coal Mine. It evaluated both the stress reduction zone in the floor caused by upper seam extraction and the limit equilibrium zone during lower seam extraction, concluding that the optimal roadway position should be more than 22.79 meters away from the solid coal pillar. Theoretical calculations were used to analyze the stress distribution pattern in the floor following upper seam extraction, as well as the deformation and failure characteristics of the surrounding rock at various internal offsets. The results revealed: ① A pronounced difference between maximum and minimum stresses occurred closer to the floor of the mine-out area. ② With increasing internal offset, the surrounding rock stress and stress concentration coefficient initially decreased

收稿日期: 2024-07-21; 修回日期: 2024-09-01; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074293); 国家重点研发计划项目(2022YFC3004603, 2023YFC2907501)。

作者简介: 张伟(1985—), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 硕士, 研究方向为巷道围岩控制, E-mail: 346954535@qq.com。通信作者: 张国俊(1979—), 男, 内蒙古丰镇人, 高级工程师, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的工作, E-mail: zgj13694772626@126.com。

引用格式: 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.



扫码移动阅读

sharply, then increased slowly, and eventually stabilized, with relatively low values observed within the 20-25 meters internal offset range. ③ The plastic zone of the surrounding rock decreased and then increased, with minimal damage to the roadway rock observed at internal offsets of 20 and 25 meters. ④ Roadway deformation decreased as the internal offset increased, and surrounding rock displacement stabilized when the internal offset reached 25 meters. ⑤ The optimal internal offset for the roadway was determined to be 20-25 meters. Engineering applications confirmed that a 24-meter internal offset maintained both rock looseness and deformation within controllable limits, further validating this internal offset.

Key words: close distance coal seam; fully mechanized caving face; roadway layout; surrounding rock damage; internal offset; floor stress

0 引言

煤炭资源作为全球能源结构的重要组成部分,其安全、高效开采一直是矿业工程领域的重点^[1-4]。但近距离煤层的采空区对下覆煤层的开采环境和工程稳定性带来了严峻挑战,特别是综放工作面巷道的布置,直接关系到工作面的开采效率、安全性及矿工的生命安全。因此,对近距离煤层采空区下综放工作面巷道的合理位置进行研究,具有重要的理论意义和实际应用价值。

近年来,许多学者针对近距离煤层开采巷道布置问题进行了大量的理论和实践研究,例如底板应力状态解析式及多因素影响下底板应力增高区定量关系的构建等,并基于底板应力分布特征,提出了确定下煤层回采巷道与遗留煤柱之间合理错距的方法,为巷道的合理布局提供了科学依据^[5-10]。张宝优^[11]针对极近距离煤层群分层开采支护难度大、危险性高的问题,探索了错层位巷道布置采煤法及区段间相邻巷道联合支护技术的应用前景。戴文祥等^[12-13]采用理论分析、数值模拟和现场实测等方法,研究了上覆煤柱集中应力在底板的传递特征,优化了煤柱及巷道布置方式和围岩支护参数。郑俊林等^[14]从理论和数值模拟的角度出发,研究了近距离煤层群开采下位煤层回采巷道的合理布置,分析了上位煤层开采后底板破坏深度、残留煤柱在底板中的应力分布等因素。张杰等^[15]构建了上煤层遗留煤柱与铰接岩块的协同承载结构模型和底板应力传递计算模型,研究了上煤层遗留煤柱下底板应力及影响因素。王志强等^[16-17]针对近距离煤层上行开采中上煤层台阶状下沉问题,采用数值和相似模拟模型,模拟了留煤柱和错层位巷道布置开采,分析了上行开采煤层垮落形式和卸压效果。刘超等^[18]通过对比内错布置与外错布置的优缺点,提出了一种内外错相结合的回采巷道布置方式,并分析了煤柱宽度和巷道偏移距离对煤柱下巷道围岩变形的影响。刘洪

涛等^[19-20]对下层煤巷道非对称变形破坏机理进行了深入探究,结果表明,上覆煤层开采改变了巷道所处位置的主应力大小、主应力比值及应力偏转角,导致巷道非对称破坏。

上述研究分析了上煤层开采底板应力分布规律与破坏特征,为近距离煤层巷道合理位置的选择及围岩控制研究奠定了基础,但对于下煤层自身的采动活动造成的影响考虑不足。下煤层的区段煤柱面临上煤层煤柱在底板区域引起的应力集中问题,同时也承受着由于本煤层自身的采动活动而造成的影响。此外,厚煤层综放工作面开采空间大,采动强度高,极易导致巷道围岩破坏范围大而难以控制,故厚煤层综放工作面巷道合理位置的选取对后期支护控制起到关键性作用。因此,本文以内蒙古平庄煤业西露天煤矿作为研究背景,考虑下煤层自身的采动活动造成的影响,通过理论分析、数值模拟、现场监测等综合方法开展下综放工作面巷道合理位置研究。

1 工程背景

西露天煤矿主要可采煤层为1煤层和2煤层,煤层倾角为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$,平均倾角为 7° ,煤层平均间距为11.5 m,属于近距离煤层。1煤层总厚度为30.14 m,分为3个分层,厚度分别为11.55, 11.2, 7.39 m,煤层顶板以砂岩为主,次为泥岩,底板多为砂岩、泥岩,平均埋深为201.32 m; 2煤层厚度为7.16 m,煤层顶板以泥岩为主,底板一般为泥岩、砂岩。开采021N₂综放工作面时,根据现场实际需求,需在1煤层1分层布置011N₁⁻¹接续工作面,由于煤层间距较小、厚度大,上部的2煤层开采过程中,位于其下方的1煤层1分层将受到严重的采动影响,应力重分布,存在应力集中区和应力降低区,因此,1煤层1分层011N₁⁻¹综放工作面巷道面临合理位置布置及支护问题有待解决。021N₂工作面与1煤层1分层层位关系及各层岩性如图1所示。

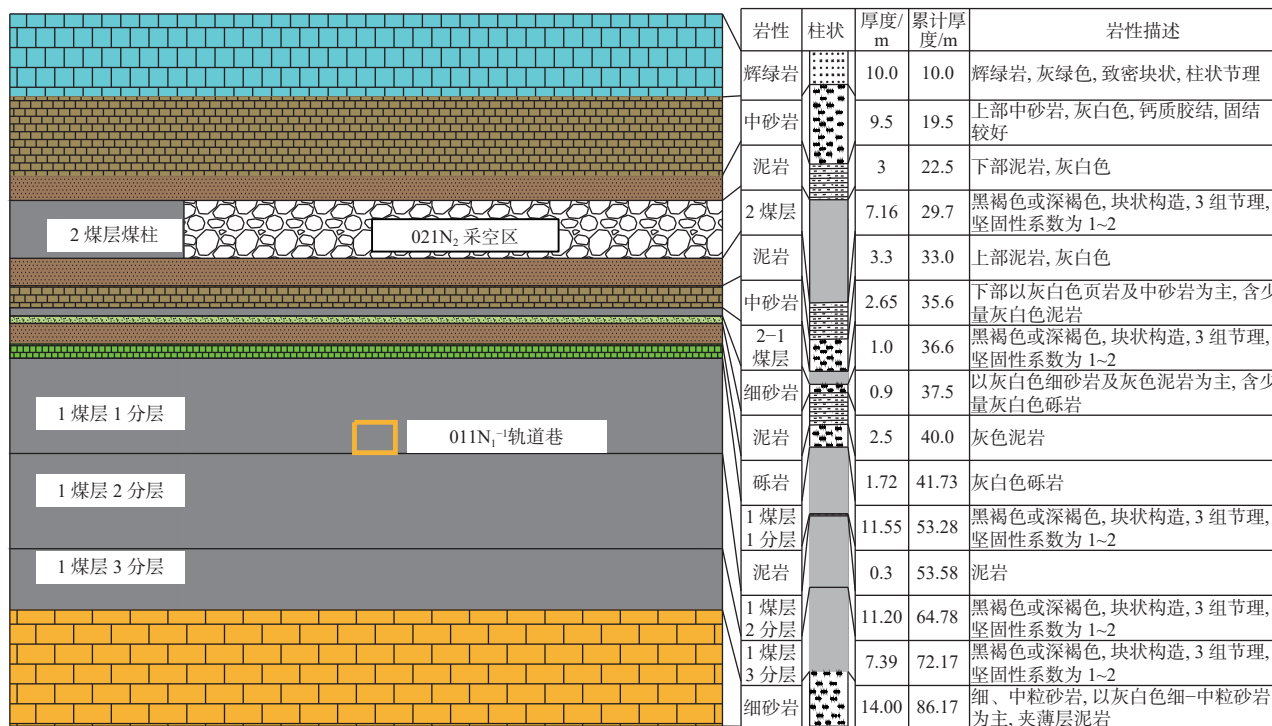


图 1 层位关系及岩性

Fig. 1 Stratigraphic relationship and lithology

2 下煤层巷道合理位置理论分析

当 1 煤层 1 分层采用内错式巷道布置时, 1 煤层的区段煤柱在左侧面临 2 煤层煤柱在底板区域引起的应力集中问题, 并且应力从左到右逐渐降低, 降低区一直延伸到残留煤柱的边缘, 距离为 S_m ; 同时, 1 煤层区段煤柱的右侧也承受着由于本煤层自身的采动活动而造成的破坏, 这种破坏所影响的区域宽度为 X_0 , 如图 2 所示。进一步深入分析, 当 1 煤层回采巷道距 2 煤层煤柱距离超过两侧影响距离总和时, 1 煤层区段煤柱不仅能自稳, 而且还能沿着走向形成一个弹性承载区域。该弹性区域对于巷道的稳定性至关重要, 因为它能够有效承载来自上覆岩层的大部分载荷, 使得巷道所处的区域受到的上覆岩层载荷相对较小, 这为巷道提供了更高的稳定性和安全性。因此, 若区段煤柱的长度设计得当, 采用内错式布置巷道的方法不仅能够有效分散和承载来自上覆岩层的载荷, 而且还能显著提高巷道的稳定性。因此, 在工程实践中, 这种布置方式被认为是一种更为稳妥和可靠的选择, 尤其是在地质条件复杂、需要确保巷道长期稳定性的场合。

1 煤层应力降低区距 2 煤层采空区残留煤柱边缘的水平距离 S_m 为^[21]

$$S_{m|lm} \geq \frac{h_r + M_b}{\sin(90 + \alpha - \delta)} \sin \delta = 21.19 \quad (1)$$

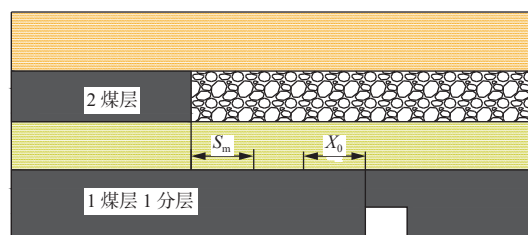


图 2 巷道分布垂直剖面

Fig. 2 Vertical profile of roadway distribution

式中: h_r 为岩层间距, 取 12.07 m; M_b 为 1 煤层 1 分层厚度, 取 11.55 m; α 为煤层倾角, 取 7° ; δ 为煤柱支承压力影响传播角, 取 45° 。

1 煤层 1 分层区段煤柱右侧受 1 煤层采动影响形成塑性区破坏, 1 煤层区段煤柱支承压力峰值与煤体(柱)边缘之间的距离 X_0 为^[21]

$$X_{0|lm} = \frac{m}{2\xi f} \ln \frac{K\gamma H + C \cot \varphi}{\xi(p_1 + C \cot \varphi)} = 1.60 \quad (2)$$

式中: m 为 1 煤层 1 分层采高, 取 11.55 m; ξ 为三轴应力系数, $\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$, φ 为煤体的内摩擦角, 取 30° ; f 为煤层与顶底板接触面的摩擦因数, 取 0.1; K 为应力集中系数, 取 1.5; γ 为上覆岩层平均容重, 取 25 kN/m^3 ; H 为巷道埋深, 取 201.32 m; C 为煤体的黏聚力, 取 0.6 MPa; p_1 为支架对煤帮的阻力, 取 0.1 MPa。

巷道合理内错距 L 为

$$L_{lm} = S_m + X_0 = 22.79 \quad (3)$$

3 采空区下综放工作面巷道合理位置分析

为了进一步确定1煤层1分层011N₁⁻¹综放工作面轨道巷最佳位置,需要充分考虑其所在区域应力环境、巷道掘进后围岩破坏及变形情况,因此采用数值模拟的研究方式,分析上煤层021N₂综放工作面开采后底板应力分布规律,同时研究021N₂综放工作面开采后1煤层1分层011N₁⁻¹综放工作面轨道巷围岩破坏及变形特征,以便确定巷道最佳位置,确保巷道所处位置应力相对较小,巷道掘进后变形破坏最小。

3.1 数值模型建立

数值模型根据工作面综合地质柱状图构建,共划分为14层,采用1:1局部建模的方式建立尺寸为215 m×10 m×86 m(长×宽×高)的数值模型。将巷道所在的关键位置进行网格细分,在上表面施加边界为5.0 MPa荷载代替省略的部分岩层。设置模型侧面为滚支,限制其侧向水平移动;底部采用固支,限制水平位移和垂直位移。在巷道覆岩上方3 m处设置监测线,监测不同外错巷道开挖后巷道上方垂直位移及垂直应力的演化规律。采用Mohr–Coulomb弹塑性屈服准则,结合室内岩石力学试验所获得煤体力学参数进行数值计算,各岩层物理力学参数见表1,数值模型如图3所示。

表1 各岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock layer							
序号	名称	密度/ (kg·m ⁻³)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa	内摩擦 角/(°)
1	中砂岩	2 640	14.8	9.7	11.8	8.9	46
2	细砂岩	2 500	10.8	7.5	8.4	6.1	42
3	煤	1 560	1.8	1.2	1.69	1.24	34
4	泥岩	2 640	3.2	2.6	2.8	0.9	38
5	辉绿岩	2 500	28.8	22.5	10.4	6.1	40
6	砾岩	2 653	16.5	13.4	6.5	3.4	36

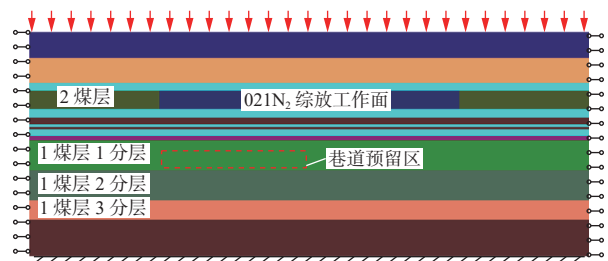


图3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

3.2 模拟方案

基于理论计算结果,下煤层巷道的合理位置应

在距离实体煤柱内错22.79 m以上的区域。为了进一步检验这一结果的精确性,设计了9种不同内距模拟方案,这些方案的外错距范围为0~40 m,每5 m作为1个梯度。其中,有5个方案的内错距不足22.79 m,另外4个方案的内错距超过22.79 m。具体的内错式巷道布置模拟方案见表2。

表2 内错式巷道布置模拟方案

Table 2 Simulation scheme for internal offset roadway layout					
方案	内错距/m	方案	内错距/m	方案	内错距/m
1	0	4	15	7	30
2	5	5	20	8	35
3	10	6	25	9	40

3.3 模拟结果分析

1) 上煤层工作面开采底板应力演化分析。上煤层021N₂综放工作面开采后,其采场围岩应力重分布,煤柱前方形成应力集中区,而采空区则形成卸压区,尤其是采空区两侧尤为明显,而采空区中部由于垮落矸石堆积及覆岩下沉,从而逐渐被压实,形成压实区,该区域应力逐渐恢复,其应力值要高于采空区两侧,但又明显低于煤柱前方。采空区底板应力分布如图4所示。

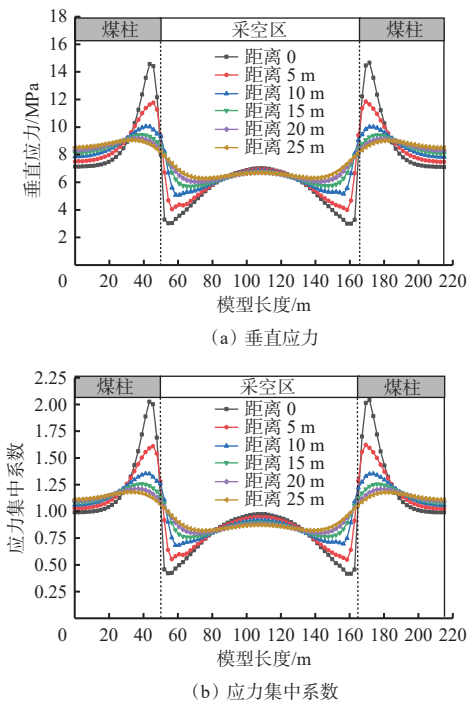


图4 采空区底板应力分布

Fig. 4 Stress distribution in the floor of mine-out area

由图4可以看出,021N₂综放工作面开采后,其底板应力分布及其应力集中系数呈现明显分区特性,煤柱前方出现明显的应力集中,最大应力集中系数为2.0,而采空区两侧明显卸压,最小应力集中系

数为 0.37。距离采空区底板越近,应力最大值与最小值相差越明显,即应力集中系数差异性越大,随着距采空区底板距离逐渐增加,这种差异性明显降低,因此,煤层间距越大,上煤层开采后对下煤层的影响越小。

巷道最佳位置的选取首先要考虑其应力环境,其基本原则为避开应力集中区,布置于应力降低区,确保巷道围岩破坏范围降到最小。根据现场生产需求,1 煤层 1 分层 $011N_1^{-1}$ 综放工作面轨道巷位于 $021N_2$ 采空区下方 20~25 m,为获取巷道与煤柱最佳内错距,沿采空区侧分别提取距离煤柱 0~60 m 且距离采空区底板 20, 25 m 的应力数据,绘制应力曲线,如图 5 所示。可看出随着距煤柱距离不断增大,其应力和应力集中系数呈现先急剧降低再逐渐缓慢增大后趋于稳定,在距离煤柱 20~25 m 处应力及应力集中系数相对较小,从应力环境角度来看,距离煤柱 20~25 m 为巷道的最佳位置,即 $011N_1^{-1}$ 综放工作面轨道巷最佳内错距为 20~25 m。

2) 不同方案下巷道围岩塑性分布特征分析。不同内错距下巷道围岩塑性特征如图 6 所示。可看出不同内错距方案下巷道围岩塑性区的形态和范围存在明显差异,随着内错距逐渐增大,巷道围岩塑性区范围呈现先减小后增大的趋势,主要是由于其所处的应力环境所导致。当内错距从 0 增加至 20 m 时,塑性区范围逐渐缩小,且塑性区形态发生明显变化。当内错距为 0 时,巷道围岩发生非对称破坏,巷道左下角和右上角破坏明显大于其左上角和右下

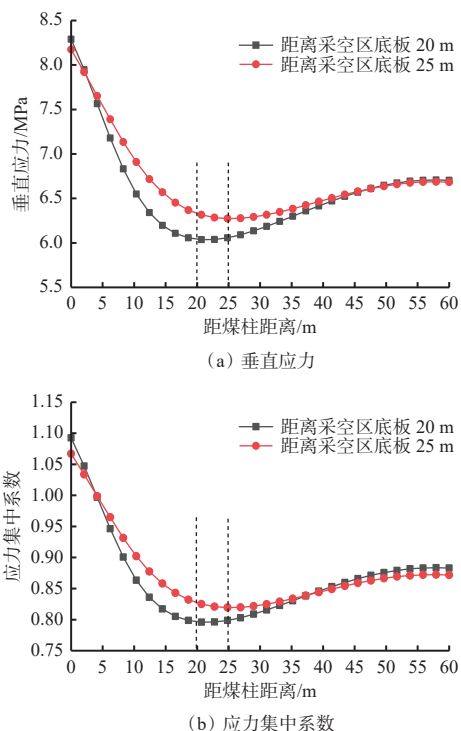


图 5 距煤柱不同距离处应力曲线

Fig. 5 Stress curves at different distances from the coal pillar

角,但随着内错距的增加,这种非对称破坏逐渐转变为对称破坏,其主要原因是应力发生偏转,导致其破坏形态也相应偏转。当内错距从 25 m 增加至 40 m 时,其塑性区范围略有增加,但塑性区形态基本一致,主要是由于其应力逐渐增大所导致的。从塑性区变化可以发现,当巷道处于内错 20 m 和 25 m 时巷道围岩破坏最小。

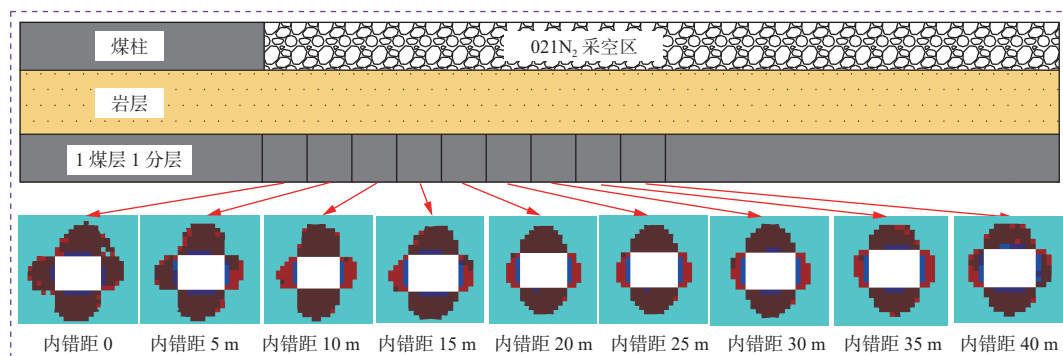


图 6 不同外错距下巷道围岩塑性特征

Fig. 6 Plastic characteristics of roadway surrounding rock under different external offset distances

3) 不同方案下巷道围岩变形特征分析。不同内错距下巷道围岩变形如图 7 所示。可看出巷道最大移进量位于顶底板中部及帮部中部位置,随着内错距逐渐增加,巷道顶底板及帮部移进量逐渐减小,当内错距增加至 25 m 时,巷道围岩移进量基本保持不变,此时巷道顶底板最大移进量为 69 mm,两帮最大移进量为 63 mm。故巷道内错距大于 25 m 时,巷道围岩变形处于相对较小值,有利于巷道维护。

综合应力环境、巷道围岩破坏及移进量分析结果,1 煤层 1 分层 $011N_1^{-1}$ 综放工作面轨道巷与上工作面煤柱内错距为 20~25 m 时最有利,这进一步验证了理论计算结果的合理性。

4 工程实践应用效果

为验证西露天煤矿 1 煤层回采巷道最佳方案,以 $011N_1^{-1}$ 轨道巷为试验巷道,并设置内错距为

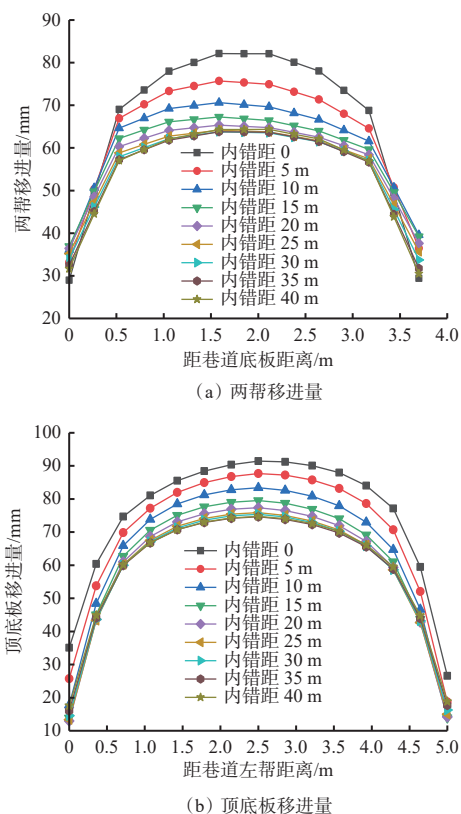


图7 不同内错距下巷道围岩变形

Fig. 7 Surrounding rock deformation of the roadway under different internal offset distances

24 m, 为检验其工程应用效果, 开展了巷道围岩松动范围测试及巷道围岩变形监测。

4.1 围岩破坏范围实测分析

采用 ZTR12 本安型防爆地质雷达系统对 $011N_1^{-1}$ 轨道巷进行顶底板及两帮破坏范围测试, 测试范围为 $011N_1^{-1}$ 工作面超前 20~170 m, 共布置 3 个测点, 每个测点沿着巷道轴向覆盖长度 50 m, 测点布置及覆盖范围如图 8 所示, 测试结果如图 9 所示。

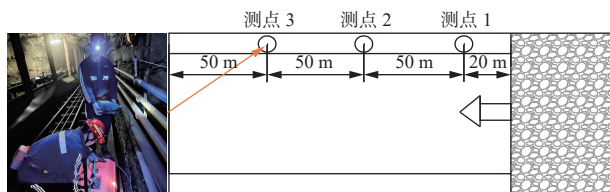


图8 测点布置

Fig. 8 Measurement points layout

从图 9 可看出, 随着测试区逐渐远离工作面, 其巷道围岩破坏影响深度逐渐降低, 当距离工作面 100 m 时趋于稳定, 距离工作面 20~100 m 时主要是受本工作面采动影响, 巷道围岩破坏范围相对较大, 其中顶板破坏范围为 3.0~3.6 m, 底板破坏范围为 1.6~2.2 m, 左帮破坏范围为 1.4~2.1 m, 右帮破坏范围为 1.3~1.9 m; 在远离工作面 100 m 之外的巷道围岩破坏范围较小, 基本不受本工作面采动影响, 其中

顶板、底板及帮部平均破坏深度分别为 3.2, 2.0, 1.6 m, 巷道围岩破坏范围相对较小, 其破坏范围与数值模拟结果具有较好的吻合性。

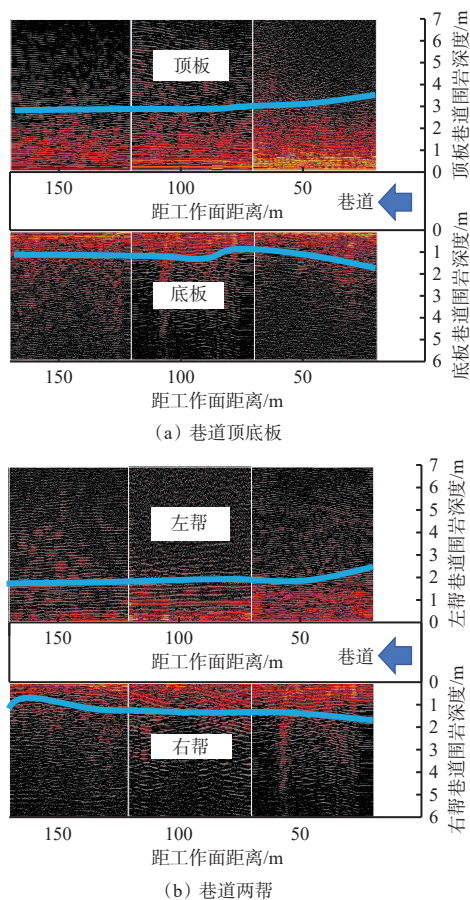


图9 测试结果

Fig. 9 Test results

4.2 围岩变形实测分析

对 $011N_1^{-1}$ 轨道巷在回采期间的围岩变形进行监测, 结果如图 10 所示。工作面采动影响期间, 巷道顶底板移进量为 16~128 mm, 两帮移进量为 12~84 mm, 巷道整体变形较小。结合现场测试确认 $011N_1^{-1}$ 工作面轨道巷采用内错距 24 m 的方式布置时, 围岩可保持较高的稳定性, 进一步验证了 1 煤层 1 分层回采巷道布置采用内错距 24 m 方式为合理布置方案。

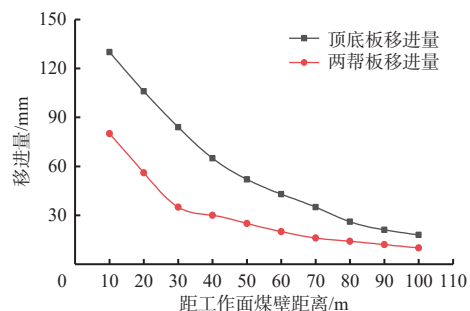


图10 巷道围岩位移曲线

Fig. 10 Displacement curves of surrounding rock in the roadway

5 结论

1) 通过理论分析,综合考虑了上煤层开采时底板应力降低区域和下煤层开采时的极限平衡区域,得出上煤层采动引起的底板应力降低区域距离采空区残留煤柱边缘的水平距离为 21.19 m,同时,下煤层开采时煤柱右侧受到采动影响而形成塑性区的破坏距离为 1.6 m,确定了下煤层巷道的合理错置距离为 22.79 m。

2) 通过数值模拟,获得了上煤开采后底板应力分布规律,距离采空区底板越近,应力最大值与最小值相差越明显;随着距煤柱距离不断增大,其应力和应力集中系数先急剧降低再逐渐缓慢增大后趋于稳定,在距离煤柱 20~25 m 内其应力及应力集中系数相对较小;此外,随着内错距逐渐增大,巷道围岩塑性区范围呈现先减小后增大的趋势,当巷道处于内错距 20, 25 m 时巷道围岩破坏最小,而巷道顶底板及帮部移进量逐渐减小,当内错距增加至 25 m 时,巷道围岩移进量基本保持不变。综合确定了巷道合理内错距为 20~25 m。

3) 设置 $011N_1^{-1}$ 轨道巷内错距为 24 m 进行试验,通过地质雷达进行巷道围岩松动范围测试及巷道围岩变形监测,得到巷道围岩松动破坏深度及变形量均在可控范围内,进一步证明了该内错距的合理性。

参考文献(References):

- [1] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 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.
- [2] 赵洪宝, 刘一洪, 李金雨, 等. 孤岛煤柱下底板岩体损伤过程与分区破坏特征分析[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 963-974.
ZHAO Hongbao, LIU Yihong, LI Jinyu, et al. Analysis of damage process and zonal failure characteristics of rock mass under floor of isolated coal pillar[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 963-974.
- [3] 冯国瑞, 郝晨良, 王鹏飞, 等. 近距采空区下回采巷道非对称变形机理及控制对策[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 617-631.
FENG Guorui, HAO Chenliang, WANG Pengfei, et al. Asymmetric deformation mechanism and control

measures for mining roadway under gob in close proximity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 617-631.

- [4] 潘坤, 鞠文君, 王俊超, 等. 大倾角近距离煤层综采运输巷断面形状与支护参数优化[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11[2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240509.1326.002.html>.
PAN Kun, JU Wenjun, WANG Junchao, et al. Optimization of cross-sectional shape and support parameters of headgate in fully mechanized coal seam with large dip angle and close distance[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-11[2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240509.1326.002.html>.
- [5] 王龙飞, 常泽超, 杨战标, 等. 深井近距离煤层群采空区下回采巷道联合支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 686-692.
WANG Longfei, CHANG Zechao, YANG Zhanbiao, et al. Combined support technology of roadway under mined gob of ultra-distance seams in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 686-692.
- [6] 赵象卓, 高照宇, 吴涛, 等. 近距离煤层群上行开采工作面巷道布置研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 194-201.
ZHAO Xiangzhuo, GAO Zhaoyu, WU Tao, et al. Study on roadway layout of the ascending mining panels in closed distance coal seams[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 194-201.
- [7] 范文生. 高应力软岩条件下的错层位巷道布置系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
FAN Wensheng. Research on the stagger arrangement roadway layout system in soft rock under the conditions of high stress[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2013.
- [8] 王泓博, 张勇, 庞义辉. 近距离煤层下行跨煤柱开采巷道的合理布局[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 100-109.
WANG Hongbo, ZHANG Yong, PANG Yihui. Rational layout of roadway for downward cross-pillar mining in close distance coal seams[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(1): 100-109.
- [9] 吕凯, 何富连, 许旭辉, 等. 考虑工作面出煤柱尺度效应的下位回采巷道布置优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 52-60.
LYU Kai, HE Fulian, XU Xuhui, et al. Layout of roadway under goaf based on scale effect of mining cross upper coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 52-60.
- [10] 马力. 极近距离煤层下伏回采巷道分区支护技术及应用[J]. 煤炭工程, 2024, 56(3): 51-56.

- MA Li. Zoning support technology for entries under contiguous coal seams and its application[J]. Coal Engineering, 2024, 56(3): 51-56.
- [11] 张宝优. 极近距离煤层错层位巷道布置方式及围岩控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 88-95.
ZHANG Baoyou. Study on layout of staggered roadway and surrounding rock control technology for ultra contiguous coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 88-95.
- [12] 戴文祥, 孔令海, 张宁博, 等. 特厚煤层掘进巷道强矿压显现机理及防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 74-79.
DAI Wenxiang, KONG Linghai, ZHANG Ningbo, et al. Research on strong strata behaviours mechanism and prevention technology of heading roadway in extra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 74-79.
- [13] 戴文祥, 潘卫东, 李猛, 等. 近距离煤层强扰动巷道布置与支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 61-67.
DAI Wenxiang, PAN Weidong, LI Meng, et al. Study on layout and support technology of strongly disturbed roadway in contiguous coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 61-67.
- [14] 郑俊林, 刘水, 邓芹. 近距离煤层群开采下位煤层回采巷道合理布置的研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 75-78.
ZHENG Junlin, LIU Shui, DENG Qin. Research on reasonable layout of mining roadway in lower coal seam in close distance coal seam group[J]. Coal Technology, 2023, 42(8): 75-78.
- [15] 张杰, 孙建平, 何义峰, 等. 近距离煤层底板应力分布规律及巷道布局研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-13 [2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240315.1112.001.html>.
ZHANG Jie, SUN Jianping, HE Yifeng, et al. Study on floor stress distribution law and roadway layout of close distance coal seams[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-13 [2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240315.1112.001.html>.
- [16] 王志强, 高健勋, 武超, 等. 近距离煤层上行开采巷道优化布置及煤层卸压效果试验分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 61-67.
WANG Zhiqiang, GAO Jianxun, WU Chao, et al. Testing analysis on optimized layout of ascending mining roadway and effect of coal seam pressure relief in close distance coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 61-67.
- [17] 王志强, 郭磊, 苏泽华, 等. 倾斜中厚煤层错层位外错式巷道布置及相邻巷道联合支护技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 542-555.
WANG Zhiqiang, GUO Lei, SU Zehua, et al. Layout and combined support technology of alternate exterior stagger arrangement roadway and adjacent roadways in inclined and medium-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 542-555.
- [18] 刘超, 赵国贞, 王帅. 近距离煤层下位煤层巷道内外错布置及应力分布规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(12): 63-69.
LIU Chao, ZHAO Guozhen, WANG Shuai. Study on the internal and external staggered arrangement of roadway in lower coal seam and stress distribution law in close-distance coal seam[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(12): 63-69.
- [19] 刘洪涛, 韩洲, 韩子俊, 等. 近距离煤层下行采动应力场分布规律与巷道合理位置研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 1-10.
LIU Hongtao, HAN Zhou, HAN Zijun, et al. Research on the distribution law of downward mining stress field in close-distance coal seam and reasonable location of the roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 1-10.
- [20] 刘洪涛, 韩子俊, 韩洲, 等. 叠合采动下围岩破坏区非均匀扩展机理及巷道稳定控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 522-532.
LIU Hongtao, HAN Zijun, HAN Zhou, et al. Mechanism of non-uniform expansion and stability control in surrounding rock failure zone due to superimposed mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 522-532.
- [21] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mine pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.