



## 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

刘洪涛 韩洲 韩子俊 郭晓菲 韦晟杰 罗紫龙 胡正宝

### 引用本文:

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. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1554>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 特厚煤层回采巷道塑性区形态特征及演化规律研究

Morphological characteristics and evolution law of plastic zone of mining roadway in extra-thick coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 77–83 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bf2d2116-7c84-4ff8-8072-0cccf65f9be>

#### 极近距离煤层错层位巷道布置方式及围岩控制技术研究

Study on the layout of staggered roadway and surrounding rock control technology for extremely close coal seams

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 88–95 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/83f316a6-8928-4cce-b93a-5de59f9352b2>

#### 深部近距离下位煤层回采巷道围岩变形控制

Deformation control of surrounding rocks of mining roadway indeep and close lower coal seam

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 76–81 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/de839a88-1f4c-481d-9fad-9abdb61b5ed1>

#### 近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究——以山西吕梁沙曲矿区为例

High efficiency simultaneous extraction technology system of coal and gas in close-distance seam group: taking shaqu mining area in luliang, shanxi province as an example

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 122–137 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.016>

#### 近距离煤层采动裂隙场BBM–DEM模拟研究

Study on mining-induced fracture field of contiguous coal seam with BBM–DEM simulation

煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e85a834a-cb43-4892-b6be-8c04b6f5d4c0>

#### 深部特厚煤层对采对掘巷道围岩综合应力场演化研究

Research on evolution of integrated stress field of surrounding rock of mining while digging opposite roadway in deep and ultra-thick coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 26–36 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2682323f-8632-419a-8455-4505a7c4eeb1>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

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.

## 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

刘洪涛, 韩 洲, 韩子俊, 郭晓菲, 韦晟杰, 罗紫龙, 胡正宝

(中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

**摘 要:** 上层位近距离煤层开采后, 形成的残留煤柱和采空区将会影响下层位的巷道布置。以新柳矿 231101 工作面为工程背景, 采用理论分析和数值模拟的综合研究手段, 研究和分析了上煤层开采后采动应力场的应力演化规律, 对下层煤巷道非对称变形破坏机理进行深入探究, 从而得出下层煤巷道合理布置位置。研究结果表明: ①上覆煤层开采改变巷道所处位置的主应力大小、主应力比值以及应力偏转角、应力矢量的变化是导致巷道呈非对称破坏的主要原因。②巷道在距离煤柱中心 11 m 处, 巷道围岩最大主应力达到 14.43 MPa, 主应力比值为 2.74, 应力偏转角为 52.33°, 此时巷道处于较差的应力环境中, 致使围岩产生蝶形破坏且蝶叶旋转至巷道顶板右侧, 巷道顶板右侧易发生冒顶事故。③为使巷道处于相对稳定区域, 依据 3 个主要影响因素将工作区域划分为 4 个分区, 在考虑煤矿经济与安全因素后建议最佳布置区域为 H-IV, 主应力偏转角在 0°~38°或 45°~90°的范围内, 通过综合分析对该巷道布置及支护提供合理建议, 为类似工程条件提供了借鉴和参考。

**关键词:** 近距离煤层; 回采巷道布置; 蝶形破坏理论; 数值模拟; 塑性区

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)05-0001-10

### Research on the distribution law of downward mining stress field in close-distance coal seam and reasonable location of the roadway

LIU Hongtao, HAN Zhou, HAN Zijun, GUO Xiaofei, WEI ShengJie, LUO Zilong, HU Zhengbao

(School of Energy & Mining Engineering, China University of Mining and Technology—Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The formation of residual coal pillars and void areas after mining of the upper seam close to the coal seam will affect the layout of the lower seam roadway. In this paper, taking 231101 working face of Xinliu Mine as engineering background, the comprehensive research means of theoretical analysis and numerical simulation is used to study and analyze the stress evolution law of mining stress field after overlying coal seam mining, and conduct an in-depth investigation on the asymmetric deformation damage mechanism of lower coal roadway, so as to arrive at the reasonable location of lower coal roadway layout. The research results show that: ① the overlying coal seam mining changes the principal stress magnitude, principal stress ratio and stress deflection angle at the location of the roadway, and the change of stress vector is the main reason for the asymmetric damage of the roadway. ② At 11 m from the center of the coal pillar, the maximum principal stress of the surrounding rock of the roadway reaches 14.43 MPa, the principal stress ratio is 2.74, and the stress deflection angle is 52.33°. At this time, the roadway is in a poor stress environment, resulting in butterfly-shaped damage of the surrounding rock and the rotation of the butterfly leaf to the right side of the roof of the roadway, and the right side of the roof of the roadway is prone to roofing accidents. ③ In order to make the roadway in a relatively stable area, this paper divides the working area into four zones based on three main influencing factors, and suggests that the best layout area is H-IV after considering the economic and safety factors of the coal mine, with the main stress deflection angle in the range of 0°–38° or 45°–90°.

收稿日期: 2022-11-20

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.12438/cst.2022-1554

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004289); 中央高校基本科研业务费资助项目(2022XJNY01)

作者简介: 刘洪涛(1981—), 男, 内蒙古牙克石人, 教授, 博士。E-mail: lht5004@sina.com

通讯作者: 韩 洲(1997—), 男, 山西吕梁人, 博士。E-mail: hanzhou97@163.com

**Key words:** close coal seam; back mining tunnel arrangement; butterfly damage theory; numerical simulation; plastic zone

0 引言

近距离煤层是指煤层间距较小,开采时易受影响的煤层<sup>[1-5]</sup>。下层位巷道的合理布置对于巷道围岩的稳定性具有重要影响,同时在保证安全的前提下要尽量减少煤柱留设的资源损失问题。近距离煤层在我国赋存较多<sup>[6]</sup>,因此研究下煤层在残留煤柱和采空区影响下的巷道合理布置对提高煤矿经济效益,完善运输、通风系统等具有重要的意义。

针对近距离煤层下层位回采巷道的布置位置,国内的学者做了大量的研究工作,张百胜等<sup>[7]</sup>运用数值模拟分析方法,研究了煤柱底板支承压力分布,提出煤柱底板的应力分布呈非对称特征。冯国瑞等<sup>[8]</sup>基于自稳平衡拱理论并结合弹性力学对采空区底板应力分布规律进行计算,提出近距离采空区下回采巷道非对称变形控制机理。赵洪宝等<sup>[9]</sup>对孤岛煤柱下底板岩体的损伤过程进行研究,并对底板分区破坏特征进行深入分析,构建了岩体卸荷应力及推进速度的蠕变本构方程。神文龙等<sup>[10]</sup>为解决近距离残采煤柱下的巷道布置问题,提出了煤柱底板应力场的“三指标法”,发现了煤柱底板的三指标分布特性。

此外,众多学者对巷道围岩的非对称变形破坏特征及支护技术进行深入研究。康红普等<sup>[11]</sup>基于千米深井非对称大变形破坏提出“支护—改性—卸压”的协同控制技术,巷道围岩变形量显著降低。赵志强等<sup>[12]</sup>基于弹塑性理论推导出非均匀应力场下巷道围岩破坏的塑性区八次隐性方程。王卫军等<sup>[13]</sup>提出围岩变形的协调支护控制原则,针对深部围岩破坏大的问题提出巷道围岩预留变形控制技术。

由此可以看出,众多学者通过多种手段对近距离

煤层下层位的应力分布、巷道合理布置及围岩控制进行了深入研究,对近距离煤层的安全回采具有重要意义。下层位巷道的应力分布与塑性区形态对巷道围岩的稳定性具有重要影响,2 者之间的关系息息相关。因此要根据不同状态的应力环境和巷道围岩的塑性区分布情况,来确定巷道的合理布置。新柳煤矿在 11 号煤层全部采用内错距 20 m(距离煤柱边缘)<sup>[14]</sup>的巷道布置,造成煤炭资源严重损失,基于此问题,从采动影响引起周围应力场非等压变化的角度来研究不同位置巷道围岩的破坏情况,并分析巷道的合理布置位置,从而提高煤炭资源利用率,减少煤炭损失。

1 工程概况

新柳煤矿设计生产能力 400 万 t/a,煤层埋藏较浅,瓦斯含量低,水文地质条件简单,易于开采。231101 工作面走向长度为 1 250 m,倾斜长度为 170 m,煤层平均厚度 4.75 m,倾角 0°~6°,属于近水平煤层。

新柳煤矿 9 号、10 号、11 号煤层群中 9 号煤层(平均厚度为 1.22 m)较薄,首先开采的是 10 号煤层,其次开采的是 11 号煤层,其中 10 号煤层(平均厚度为 1.76 m)累深为 235.58 m 与 11 号煤层(平均厚度为 4.7 m)累深为 240 m 的中间有厚 2.66 m 的泥岩层,两煤层属于近水平煤层,受采动影响较大。上层位 10 号煤已经回采完毕,其 10 号煤层中遗留长为 20 m 的残留煤柱,两侧为采空区。采掘关系及柱状图如图 1 所示。

2 理论分析

10 号煤层残留煤柱应力集中以及采空区应力解除造成底板主应力变化,在下层位围岩中形成动态

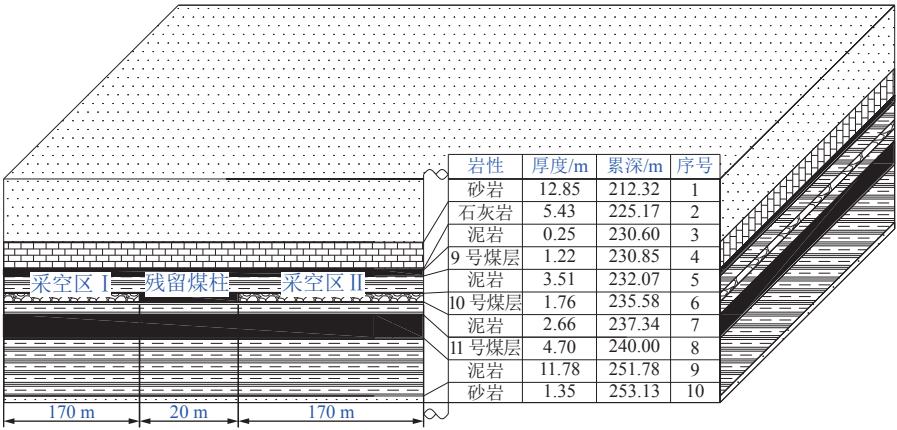


图 1 采掘工程关系及岩层柱状图

Fig.1 Extraction engineering relationship and rock stratigraphic column diagram

的应力环境,以前的研究往往是以均匀应力场为条件进行计算,但是对于井巷工程来说,围岩应力状态时刻受到采动等复杂地质构造的影响,应力场往往为双向不等压应力场。

国内学者在研究巷道围岩破坏方面做了大量的工作,其中文献[15-19]等以弹性力学中圆形孔洞周边围岩破坏的平面应变模型为基础,基于M-C准则提出巷道围岩蝶形破坏理论。该理论研究了不同应力场条件下的塑性区演化规律,揭示了巷道围岩的变形破坏机理,为本文的研究提供了重要的理论依据。

## 2.1 非等压条件下塑性区边界范围

基于弹塑性理论同时借鉴卡斯特奈公式和修正的芬纳公式,采用圆形孔洞平面应变模型,在采动应力等造成应力环境变化的条件下,建立非等压均匀应力场巷道围岩的受力分析模型,如图2所示。图中 $P_3$ 为巷道的垂直应力,MPa; $P_1$ 为巷道的水平应力,MPa; $a$ 为巷道半径,m; $R_0$ 为径向塑性区边界,m; $\theta$ 为任一点极坐标角度,°。

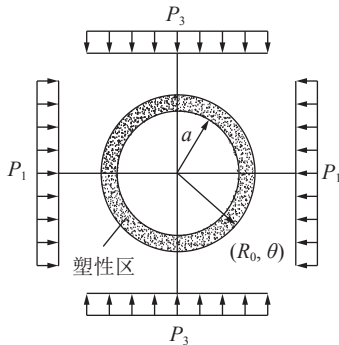


图2 圆形巷道平面受力模型

Fig.2 Circular roadway plane force model

文献[19]基于摩尔-库伦准则获得非等压应力场中圆形巷道围岩塑性区边界的隐性方程。

$$9(1-\eta)^2 \left( \frac{a}{R_0} \right)^8 - [12(1-\eta)^2 + 6(1-\eta^2) \cos 2(\theta-\alpha)] \left( \frac{a}{R_0} \right)^6 + \{2(1-\eta)^2 [\cos^2 2(\theta-\alpha)(5-2\sin^2 \varphi) - \sin^2 2(\theta-\alpha)] + (1+\eta)^2 + 4(1-\eta^2) \cos 2(\theta-\alpha)\} \left( \frac{a}{R_0} \right)^4 - [4(1-\eta)^2 \times \cos 4(\theta-\alpha) + 2(1-\eta^2) \cos 2(\theta-\alpha)(1-2\sin^2 \varphi) - \frac{4}{p}(1-\eta) \cos 2(\theta-\alpha) \sin 2\varphi C] \left( \frac{a}{R_0} \right)^2 (1-\eta)^2 - \sin^2 \varphi \left( 1 + \eta + \frac{2C \cos \varphi}{\gamma H \sin \varphi} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为主应力比值; $\varphi$ 为内摩擦角; $C$ 为黏聚力; $\alpha$

为围压顺时针旋转角度; $\gamma$ 为巷道围岩容重; $H$ 为巷道埋深。

## 2.2 巷道围岩破坏的影响因素

通过式(1)可知,影响巷道破坏的因素有很多,包括围岩力学参数、主应力大小、主应力比值及应力偏转角等,本文结合新柳矿地质条件及岩层力学参数,研究采动应力场对巷道围岩的破坏影响。

### 2.2.1 主应力比值对巷道的影响规律

由于煤层开采破坏了初始的原岩应力平衡,导致周围应力场重新分布,最大、最小主应力比值的变化导致巷道围岩处于偏应力环境中。

图3为不同主应力比值的巷道塑性区形态,可以看出,主应力的比值( $\eta=P_1/P_3$ )影响巷道围岩的塑性区形态,当双向等压条件( $\eta=P_1/P_3$ )时,围岩塑性破坏形态呈圆形分布;当 $\eta=1.8$ 时围岩塑性区形态由圆形转变为椭圆形,塑性区发生扩展;当 $\eta=2$ 时,巷道围岩塑性区呈蝶形破坏形态,塑性区继续扩展;当 $\eta$ 达到2.5时,塑性区急剧破坏,蝶叶范围迅速扩展。

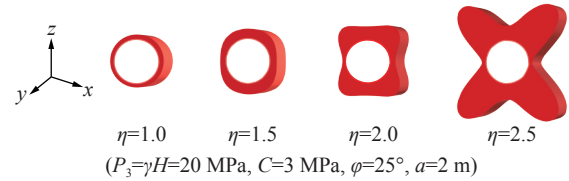


图3 不同围压比巷道塑性区形态

Fig.3 Plastic zone morphology of roadway with different circumferential pressure ratio

### 2.2.2 主应力偏转角对巷道的影响规律

由于煤层开采造成巷道围岩形成偏应力场,使得主应力发生偏转,由式(1)可知,主应力偏转角是影响塑性区形态的重要因素,由图4可知,巷道围岩塑性区的蝶叶具有方向性,蝶叶始终处于最大主应力与最小主应力夹角的角平分线附近,一般为 $38^\circ \sim 45^\circ$ ,当主应力发生偏转时,蝶叶也将发生相应的偏转。

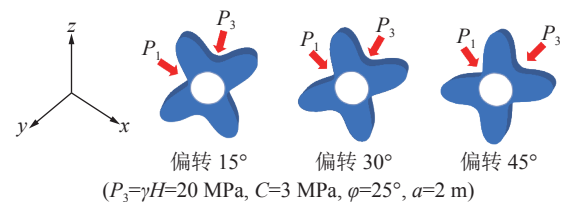


图4 主应力方向与蝶叶转角的关系

Fig.4 Relationship between main stress direction and butterfly leaf rotation angle



2.2.3 主应力大小对巷道的影响规律

由巷道围岩塑性区边界的隐性方程可知,在主应力比值  $\eta$  不变的情况下,主应力大小会影响巷道塑性区形态。

由图 5 可知,当巷道围岩塑性区破坏形态为圆形或椭圆形时,随主应力的持续变大,塑性区最大半径与最大主应力呈线性增长关系,当巷道围岩塑性区破坏形态为蝶形破坏时,随着主应力的增大,蝶叶会发生突变性增大,导致蝶叶急剧扩展,塑性区最大半径与最大主应力呈指数增长关系。

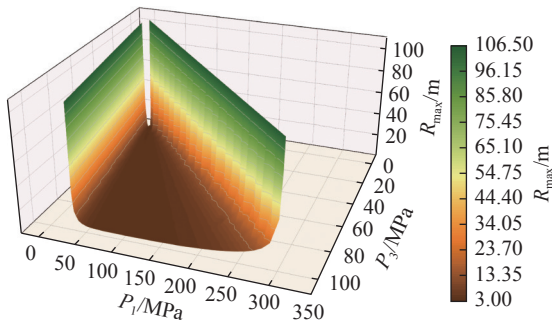


图 5 主应力大小与塑性区半径关系

Fig.5 Relationship between magnitude of the principal stress and the radius of plastic zone

3 残留煤柱及采空区对底板主应力的影响规律

3.1 数值模型

10 号煤层开采之后,残留煤柱及采空区致使煤层底板主应力重新分布。以新柳煤矿地质条件(表 1)为依据,建立长×宽×高为 500 m×200 m×100 m(图 6)的 FLAC<sup>3D</sup> 数值模型,其中模拟 10 号煤层残留煤柱为 20 m,其左右采空区×方向长度各为 170 m,模型左右边界各留 70 m 煤柱以消除边界效应。

表 1 岩石力学参数<sup>[14]</sup>

Table 1 Rock mechanical parameters<sup>[14]</sup>

岩层	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
煤层	1 560	1.25	1.07	30	2.10	1.65
砂岩	2 760	3.52	2.30	42	6.21	5.00
泥岩	2 150	3.15	1.90	31	3.52	2.31
石灰岩	2 380	6.24	3.02	42	3.14	3.90

采用摩尔-库伦准则,约束上下左右和底部边界,根据煤矿地质条件,由煤层的累深计算出上覆岩层的质量,推算出应在模型上部施加 5 MPa 的应力。

依据煤矿作业时的采掘顺序,模拟 10 号煤层开

挖之后对底板的破坏影响,通过模拟 11 号煤层巷道开挖之前的应力变化规律,得出残留煤柱和采空区对底板的应力影响规律及巷道布置的影响因素。

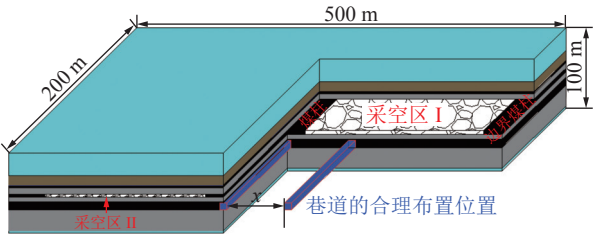


图 6 几何模型

Fig.6 Geometric model

3.2 11 号煤层的主应力分布规律

在 10 号煤层残留煤柱和采空区的影响下,布置在距离残留煤柱中心不同距离的巷道有不同程度的破坏影响。由于边界效应影响,因此 3.2 节将分别研究不同距离(沿 y 轴方向)处工作面的应力状态,通过分析距离模型边界 50, 100, 150 m 处的切片来对比主应力的变化规律。

通过数值模拟计算 10 号煤层开采之后的应力变化情况。图 7 为主应力云图。

由图 7 可知主应力在不同切片处的分布规律大

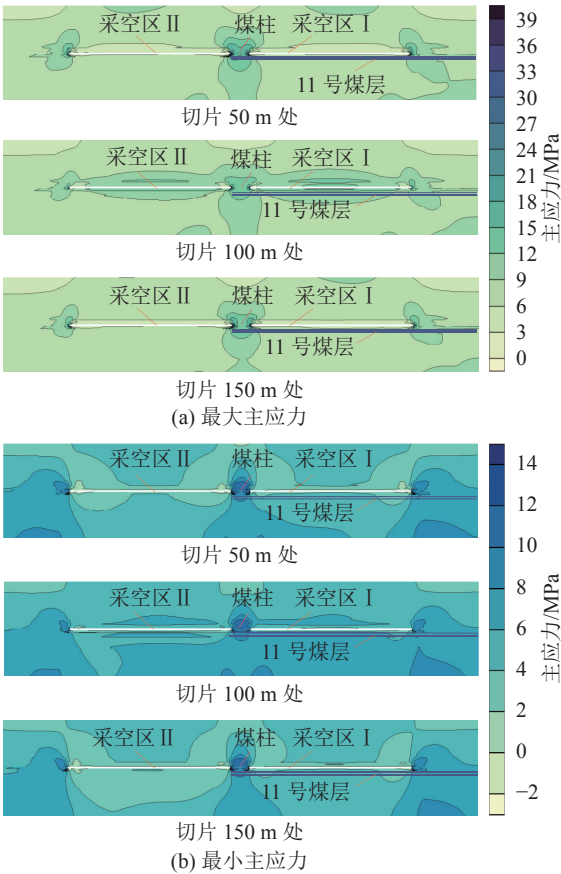


图 7 主应力云图

Fig.7 Main stress cloud diagram

体一致。明显可以看出煤柱和煤壁附近会出现应力集中,表2为应力集中的极值点位置。

表2 煤柱应力集中极值点  
Table 2 Coal pillar stress concentration extreme value point

切片距离/m	监测位置	监测主应力/MPa	应力集中位置/m	距离煤柱中心/m	应力集中系数/(较原岩应力)
50	11号煤层	$P_1/P_3$	0	5.5	1.85/2.98
100	11号煤层	$P_1/P_3$	0	6	1.79/2.60
150	11号煤层	$P_1/P_3$	0.25	7.75	1.78/2.72

由表2看出,切片50 m处11号煤层的最大主应力在煤柱5.5 m处达到原岩应力的2.98倍,最小主应力在煤柱正下方达到1.85倍,随着切片位置的增加,最大最小主应力的应力集中位置逐渐增加,其中最小主应力集中位置从5.5 m增加至7.75 m,但是应力集中系数逐渐从2.98倍减少至2.72倍,最大主应力集中系数也呈现相同的趋势。

本文主要研究11号煤层的巷道合理位置,因此着重对11号煤层周围应力进行分析,图8为切片50、100、150 m处的主应力曲线监测结果。

对11号煤层附近的最大主应力分析得出:从应力峰值起有一个向下的衰减趋势,其中切片50 m与150 m的趋势较为一致,因此只分析50 m切片处的主应力演化规律。其中5.5~34.75 m处为最大主应力单调递减区间,应力由14.90 MPa衰减至7.25 MPa。处于采空区下方的最大主应力基本恒定在7.2 MPa左右。在距离煤柱中心164.25 m时,由于处于采空区右侧煤壁边缘,其周围围岩也处于应力集中状态,因此应力曲线开始急剧增加。

最小主应力由峰值处到距煤柱中心22.5 m处处于单调递减区域,由9.25 MPa减小至3.83 MPa,并且在采空区的影响下有一段圆弧式的起落趋势,在92.25 m处达到圆弧式的最高位置,为4.85 MPa,随

后平缓降低至168.5 m处的2.68 MPa,最后经历一段由采空区边缘煤壁引起的应力集中区域。

由图8切片100 m的应力分布可以看出,最大主应力在峰值结束后受采空区的影响较大,其中峰值后至21.25 m处于单调递减区域,由13.0 MPa下降至8.73 MPa。由图8看出,之后由于采空区的影响,最大主应力会有较明显的起伏,在21.25~94.5 m区域处于逐渐上升阶段,达到此阶段的应力峰值10.06 MPa。此后又逐渐衰减至173.0 m处的8.10 MPa,后由于采空区边缘实体煤影响再次达到应力集中。最小主应力的变化与切片50、100 m处最小应力曲线的趋势大致相同。

由上述可知,煤柱对主应力大小有明显的影响作用,在其附近变化时尤为剧烈,会对巷道围岩的稳定性造成严重影响。

### 3.3 11号煤层主应力比值的分布规律

由上文可知,由于10号煤层残留煤柱和采空区的影响,煤柱引起周边围岩应力环境发生急剧变化,导致 $\eta$ 值也随之变化。 $\eta$ 值为最大主应力与最小主应力的比值,是蝶形破坏理论中影响巷道稳定的最重要因素之一, $\eta$ 值的变化会明显影响巷道塑性区的形态。因此本小节同样研究煤层轴向方向切片50、100、150 m处的 $\eta$ 值情况。图9为主应力 $\eta$ 值的云图。

由图10可以看出 $\eta$ 值在煤柱和采空区边缘附近变化比较明显,本文主要研究11号煤层巷道的合理布置,因此提取11号煤层的数据进行分析研究,图10中为切片50、100、150 m处的 $\eta$ 值曲线。

从总体来看,不同切片位置处的 $\eta$ 值曲线的趋势大致相同,在煤柱和采空区右侧边缘附近均有“犄角形”的突涨趋势。具体分析结果如下所示:

从切片50 m和150 m处的 $\eta$ 值变化规律来看,由于2者曲线的数值和趋势大体一致,因此以切片50 m顶板的数据来研究分析,其中 $\eta$ 值在0~13.25 m

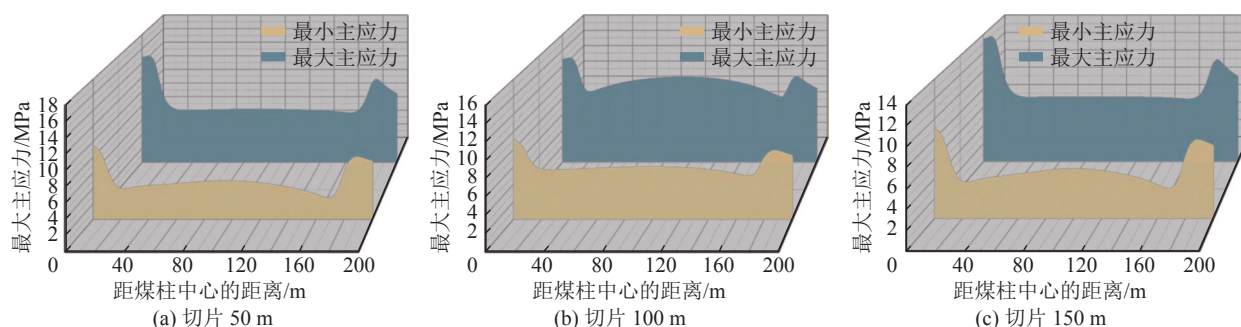
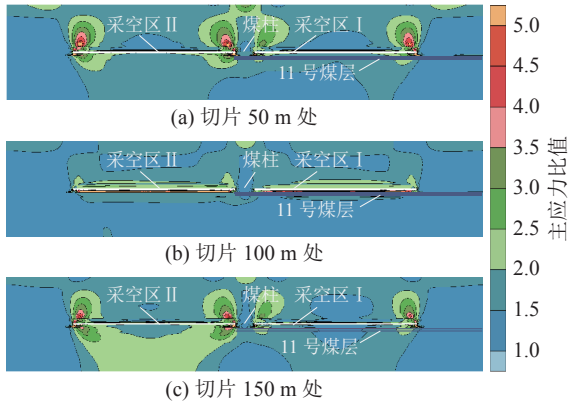
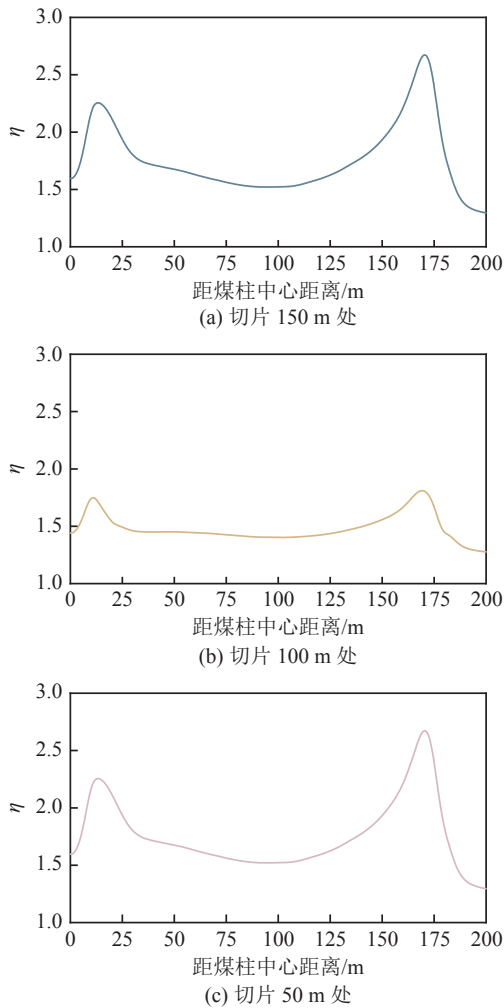


图8 11号煤层附近的主应力分布规律

Fig.8 Distribution law of principal stress near No.11 coal seam

图9 主应力  $\eta$  值云图Fig.9 Cloud of main stress  $\eta$  values图10  $\eta$  值规律曲线Fig.10  $\eta$ -value regular curve

处逐渐增加达到极值  $\eta=2.25$ , 0 m 处为  $\eta=1.60$ , 峰值之后一直单调递减至 94.0 m 处的  $\eta=1.52$ ; 随后又由于采空区右侧煤壁的影响,  $\eta$  值开始逐渐增加, 从 94.0 m 一直增加至 170.5 m, 也达到最高值 2.67, 最后逐渐减小趋于平缓。

由切片 100 m 处可以看出, 其  $\eta$  值总体低于切

片 50 m 处, 曲线趋势与 50, 150 m 处大体一致。

由上述分析来看,  $\eta$  值的变化反应出非等压应力场的变化趋势, 其中在煤柱附近、采空区边缘变化较大, 结合上文理论分析可知, 在  $\eta$  值大的区域会严重影响巷道的稳定性。

### 3.4 11 号煤层主应力偏转角的分布规律

基于弹性力学中空间问题的基本公式可以得出距离煤柱中心不同位置的最大主应力偏转角 (最大主应力方向与水平方向夹角) 的计算公式如式 (2) 所示。

$$\begin{aligned} \tau_{yx} \frac{m}{l} + \tau_{zx} \frac{n}{l} + (\sigma_x - \sigma_1) &= 0 \\ (\sigma_y - \sigma_1) \frac{m}{l} + \tau_{zy} \frac{n}{l} + \tau_{xy} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $l, m, n$  分别为斜面的外法线  $N$  与坐标轴的方向余弦, 即  $\cos(N, x) = l, \cos(N, y) = m, \cos(N, z) = n$ 。

由式 (3) 可以求得比值  $m/l$  及  $n/l$ , 得:

$$l = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{l}\right)^2}} \quad (3)$$

即可由已知的比值  $m/l$  及  $n/l$  计算出  $m$  和  $n$  的值。

将上文求得的 11 号煤层附近的应力变量代入式 (2), 得到的最大主应力与水平方向夹角如图 11 所示, 其中对沿轴向不同切片 50, 100, 150 m 处的最大主应力偏转角进行分析, 研究结果得出: 最大主应力与水平方向夹角如图 11 所示, 其中图 11a—图 11c 分别为沿轴向不同切片 (50, 100, 150 m) 处的最大主应力偏转角。3 个切片处的偏转角各不相同, 但在 11 号煤层残留煤柱和采空区右侧附近的角波动都较大。

对于切片 50 m 位置处, 从煤柱中心的偏转  $89.74^\circ$  一直减小至 22.0 m 处的偏转  $14.41^\circ$ , 随后逐渐增加至 106.75 m 处的偏转  $89.98^\circ$ 。由于接近采空区右侧煤壁边缘, 导致最大主应力与水平方向的夹角急剧减少至 170.5 m 的  $5.6^\circ$ , 随后急剧增加至 184.5 m 处的  $89.87^\circ$ , 最终逐渐减小并趋于稳定。

对于切片 100 m 处, 曲线大致走势与切片 50 m 处大体一致, 但曲线走势比较陡。在  $0 \sim 15.25$  m,  $159 \sim 183.5$  m 阶段, 最大主应力与水平方向的夹角呈大幅度的 V 形趋势。

对于切片 150 m 处, 最大主应力与水平方向的夹角大体是双 V 曲线, 从煤柱中心的偏转  $90^\circ$  逐渐减少至 24.5 m 处的  $7.48^\circ$ , 曲线在 99.5 m 处于峰值, 在 24.5, 170.5 m 处于极小值。

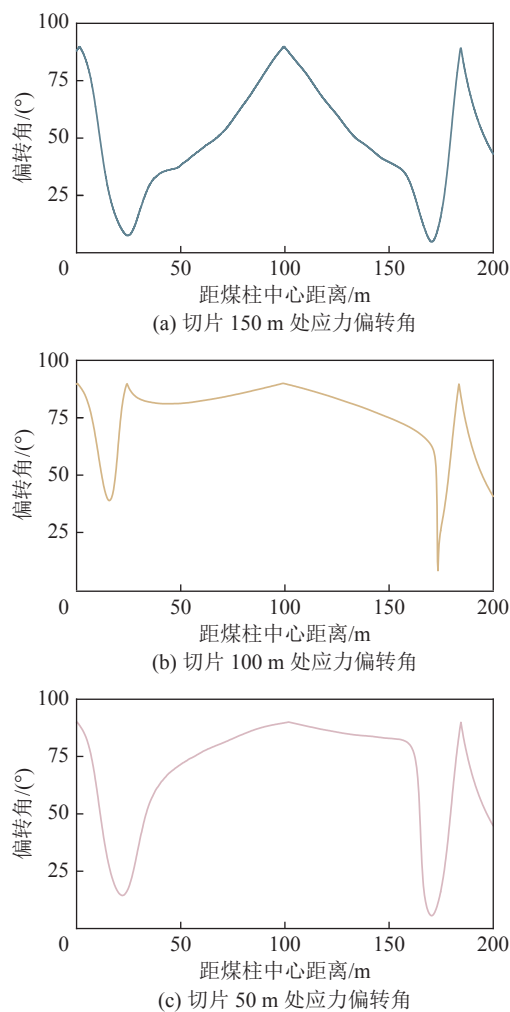


图 11 最大主应力与水平方向夹角

Fig.11 Maximum principal stress and horizontal angle

最大主应力与水平方向的夹角角度也是蝶形破坏理论中影响巷道稳定的最重要因素之一。由上述分析可知,主应力偏转角在煤柱附近时变化较大,极

大增加了巷道围岩的冒顶几率。

## 4 巷道的合理位置

### 4.1 不同位置巷道围岩塑性区的演化规律

通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟,计算出不同位置的巷道围岩塑性区情况,如图 12 所示。

由图 12 巷道塑性区的演化规律中可以看出,距离煤柱中心不同位置的围岩塑性区分布形态各异。首先从距离煤柱中心 0 处一直到 30 m 处可以看出,塑性区在煤柱正下方布置时,巷道顶板破坏较小,两帮破坏严重,塑性区范围较深,但整体性较好。在 5 m 处时巷道围岩整体破坏严重,其顶板两角处塑性破坏大,不易维护。在 10 m 处时,在顶板右侧塑性破坏严重,塑性区扩展至上部采空区影响范围,左帮和底板左侧角塑性区较大。在 15 m 处时巷道整体巷道塑性区小于 5, 10 m 处,在巷道顶板右侧角和底板左侧角受塑性区影响较大。在 20~30 m 时巷道整体塑性区较小,巷道易于维护。

在距离煤柱中心 170~200 m 时,巷道塑性区范围由小变大再变小,其中在 170 m 处巷道整体塑性区影响较小,塑性破坏集中影响巷道四角处,巷道维护较为容易。在 175 m 处巷道总体与 170 m 相似,在巷道顶板左侧、底板右侧影响较大。距离煤柱中心 180 m 处,在顶板右侧、底板左侧塑性破坏严重。在 185 m 处,巷道围岩塑性区范围大,两帮影响最大,顶底帮影响次之。巷道处于 190 m 处,整体和 185 m 塑性区分布一致,但是范围小于 185 m 时的破坏。195~200 m 处,塑性区分布大体相同,塑性破坏集中于顶板右侧、底板左侧,塑性区影响较小,巷道

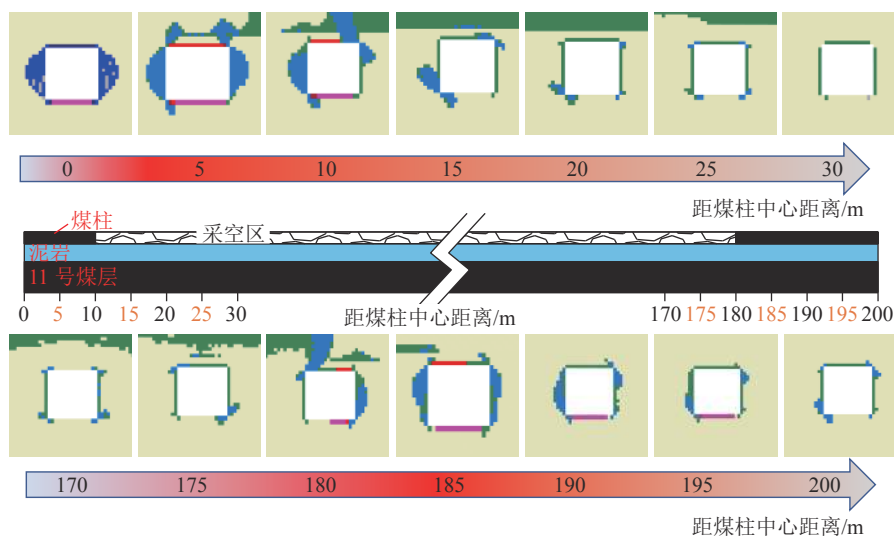


图 12 巷道围岩塑性区的演化规律

Fig.12 Evolution of plastic zone of the tunnel surround rock



易于维护。

4.2 巷道的破坏机理

处在不同采动应力下的巷道, 由于受到不同主应力大小、主应力比值、应力偏转角等破坏因素的影响, 使巷道围岩会受到不同程度的破坏。

图 13a 为煤柱正下方的巷道破坏形态, 巷道围岩在帮部破坏严重, 整体破坏范围呈椭圆形扩展, 符合蝶形破坏理论  $\eta=1.57$  时的破坏形态, 应力偏转角与水平方向的夹角为  $89.95^\circ$ , 因此塑性区几乎没有发生偏转。如果巷道布置于此, 应注重在巷道帮部位置加强支护。

图 13b 为距离煤柱中心 11 m 处的巷道塑性区

形态, 其最大主应力  $P_3=14.43\text{ MPa}$ 、 $\eta=2.74$ , 形成了蝶形破坏的应力环境, 巷道塑性破坏整体呈蝶形破坏, 由于主应力偏转角为  $52.33^\circ$ , 致使蝶叶偏转至巷道顶板右侧, 使巷道顶板不易维护。如果巷道布置于此, 应当加强顶板右侧区域以及帮部左侧区域维护。

图 13c 为距离煤柱中心 25 m 处塑性区情况, 巷道整体塑性破坏较小, 在巷道四角处的塑性破坏比其他位置塑性破坏要大, 主应力比值为 1.86, 塑性形态为类圆形, 而最大主应力仅为  $7.3\text{ MPa}$ , 因此对巷道破坏影响较小。如果巷道布置在此位置, 巷道容易维护, 但应当注重巷道四角处维护。

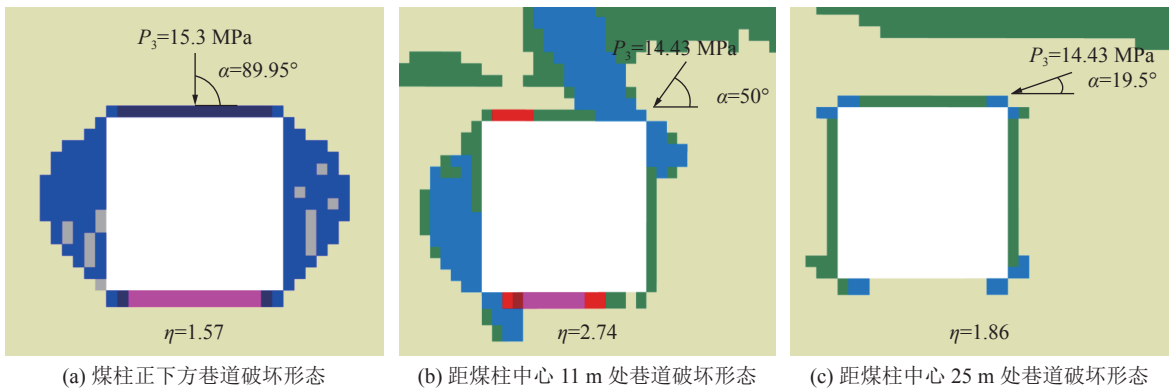


图 13 煤柱下方不同位置巷道破坏程度

Fig.13 Degree of damage to roadway at different locations below coal pillar

巷道围岩破坏形态与蝶形破坏理论指导下所阐述的塑性区破坏有极高的一致性, 因此可基于蝶形破坏理论对巷道围岩破坏规律及维护进行理论指导。

4.3 巷道的合理布置区域

要使巷处在易于维护、合理安全的位置, 应基于采动应力场的分布规律, 选择巷道围岩稳定性好的区域。

首先, 根据蝶形破坏理论<sup>[12]</sup>关于  $\eta$  值影响因素的分析,  $\eta$  值越大, 塑性区也相应急剧扩展, 最终形成塑性区为蝶形的形态。因此巷道布置时应避免形成蝶形塑性区, 尽量使围岩破坏处于圆形或椭圆形态之内。

其次, 最大主应力发生偏转时, 塑性区的蝶叶也随之发生偏转, 由于蝶叶角 (塑性区蝶叶与最大主应力之间的夹角) 方向一般是在  $38^\circ \sim 45^\circ$ ; 因此最大主应力的偏转角  $\alpha$  与蝶叶角  $\theta$  之间的差值越小, 巷道越是处于不利的范围之内, 巷道冒顶的危险性越高。因此巷道应该布置于主应力偏转角在  $45^\circ \sim 90^\circ$  或  $0^\circ \sim 38^\circ$ , 不同最大主应力偏转角的危险程度分区如

图 14 所示:

此外, 由于主应力的逐渐增加会使蝶形塑性区最大半径出现非线性增加, 因此要将巷道布置于主应力小的区域。

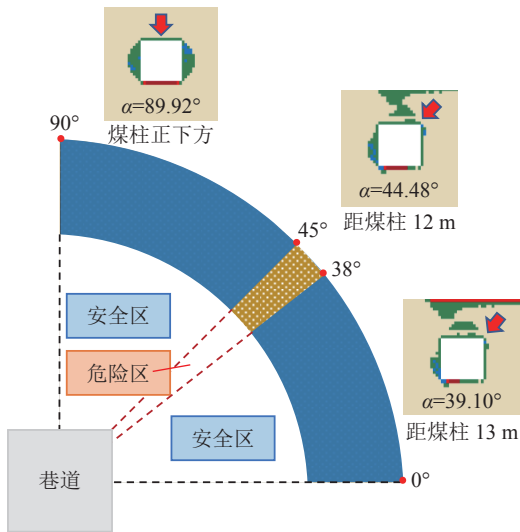


图 14 不同最大主应力偏转角的危险程度分区

Fig.14 Risk zoning of different deflection angles of maximum principal stress

图15为基于蝶形破坏理论下巷道的合理布置范围。H-I为巷道最危险布置区域,处于 $\eta$ 值和主应力大小双不利影响的交集处;H-II为最大主应力影响巷道破坏的范围, $\eta$ 值影响较小;H-III为 $\eta$ 值主导巷道围岩破坏的影响范围,该范围内最大主应力影响较小。H-IV为巷道最佳布置区域, $\eta$ 值与最大主应力对巷道围岩破坏影响较小。

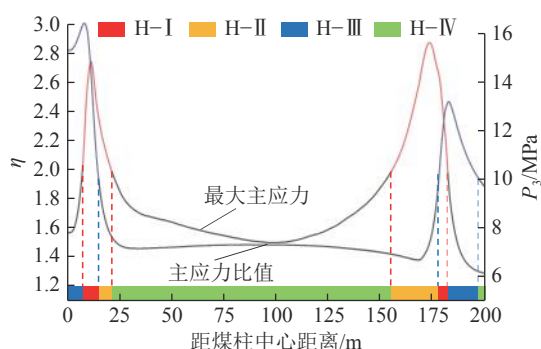


图15 巷道合理布置范围

Fig.15 Rational layout range of roadway

因此要使巷道围岩易于维护,巷道可以有2种布置方式:其一,巷道布置于煤柱正下方,巷道顶板稳定性高,但巷道帮部破坏严重,巷道整体处于高应力场中,需要对巷道帮部加强维护;其二,巷道布置于H-IV区域,巷道整体稳定性高,巷道围岩破坏较小。如果提高煤炭资源采出率,应将巷道布置于距离煤柱中心25m处,从而减少维护成本,提高煤炭利用率。

#### 4.4 巷道围岩稳定性控制建议

根据前文的数值模拟和理论分析,可知影响巷道破坏的主要因素有:①复杂的应力环境。下位煤层受到上方工作面的采动影响使得下位煤层由原岩应力环境转变为工作面回采引起的复杂应力环境。②巷道塑性区分布特征的影响。巷道处于回采工作面下复杂的应力环境中,不同布置位置的巷道会形成不同的塑性区形态,且受主应力旋转的影响使得蝶叶扩展方向旋转至巷道顶板附近,容易造成巷道发生冒顶、底臃及收帮等非线性变形现象。

由于浅部地应力相对较小,由上文蝶形破坏理论可知主应力小巷道围岩的塑性区范围也小。因此可以采取一定的支护措施就可以起到控制塑性区蝶叶扩展的作用。对于浅部巷道围岩控制可以从以下几个方面考虑:

1) 改善巷道周围的应力环境。在选择巷道布置位置时,依据与上文提出的4种巷道布置区域,应尽量将巷道布置于H-IV区域,避免巷道布置于高应力环境以及应力旋转的区域内。

2) 改善巷道围岩力学性质通过新型可接长锚杆<sup>[20-21]</sup>进行巷道支护,构建围岩和支护一体化系统;锚杆(索)的锚固段要布置于塑性区之外的稳定区内;在蝶叶扩展区应加强防漏顶支护并及时对巷道围岩注浆加固,提高巷道围岩的力学性质。

## 5 结 论

1) 上层位煤层开采造成底板巷道所处位置的主应力大小、主应力比值以及应力偏转角变化是导致巷道围岩产生塑性破坏的主要因素,主应力大小控制巷道围岩塑性区的大小,主应力比值影响围岩塑性区的形态,主应力偏转角影响巷道围岩塑性区的方向。

2) 下层位巷道布置围岩塑性区大致呈先增大后减小然后逐渐趋于稳定的趋势,煤柱正下方巷道围岩帮部破坏严重,但是巷道顶板破坏深度小,随着距离煤柱中心越远受上方采空区的影响越明显,巷道顶板围岩塑性区深度增大,在随着主应力大小和比值的减小,巷道围岩塑性区变小并保持稳定状态。

3) 为使布置巷道易于维护并经济,根据主应力大小、主应力比值以及主应力偏转角的对巷道围岩塑性区的影响,并根据本煤矿的地质条件应将巷道布置于主应力小于10MPa、主应力比值小于2和应力偏转角在 $0^\circ \sim 38^\circ$ 或 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的区域内,H-IV区域为最优布置区域。

#### 参考文献(References):

- [1] 姜鹏飞,康红普,张剑,等. 近距煤层群开采在不同宽度煤柱中的传力机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 345-349.  
JIANG Pengfei, KANG Hongpu, ZHANG Jian, et al. Mechanism of load-transfer between coal pillars with different widths in mining the short-range seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(3): 345-349.
- [2] 何富连,康庆涛,殷帅峰,等. 近距离煤层顶板煤柱集中应力影响机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1077-1083.  
HE Fulian, KANG Qingtao, YIN Shuaifeng, et al. Influence mechanism of concentrated stress on coal roof pillars of close coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(6): 1077-1083.
- [3] 黄万朋,邢文彬,郑永胜,等. 近距离煤层上行开采巷道合理布局研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3028-3039.  
HUANG Wanpeng, XING Wenbin, ZHENG Yongsheng, et al. Reasonable layout of roadways for upward mining technology of close coal seams[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3028-3039.
- [4] 解盘石,屈利利,伍永平,等. 大倾角近距离煤层群长壁采场顶板破断机理[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 65-74.  
XIE Panshi, QU Lili, WU Yongping, et al. Roof breaking mechanism

- ism of longwall stope with steeply dipping contiguous coal seam group[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 65–74.
- [5] 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[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 88–95.
- ZHANG Baoyou. Study on the layout of staggered roadway and surrounding rock control technology for extremely close coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 88–95.
- [6] 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(1): 013501.
- 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(1): 013501.
- [7] 张百胜, 杨双锁, 康立勋, 等. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 97–101.
- ZHANG Baisheng, YANG Shuangshuo, KANG Lixun, *et al.* Discussion on method for determining reasonable position of roadway for ultra-close multi-seam[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 97–101.
- [8] 冯国瑞, 郝晨良, 王朋飞, 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 Mining and Safety Engineering*, 2022, 51(4): 617–631.
- [9] 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 Mining and Safety Engineering*, 2021, 50(5): 963–974.
- [10] 神文龙, 柏建彪, 赵志勇, 等. 近距离残留承载煤柱下巷道布置三指标法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 465–472.
- SHEN Wenlong, BAI Jianbiao, ZHAO Zhiyong, *et al.* Three indexes method for roadway layout below the closed residual bearing coal pillar[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(3): 465–472.
- [11] 康红普, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 煤矿千米深井巷道松软煤体高压锚注-喷浆协同控制技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 747–762.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, YANG Jianwei, *et al.* Roadway soft coal control technology by means of grouting bolts with high pressure-shotcreting in synergy in more than, 1000 m deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 747–762.
- [12] 赵志强, 马念杰, 刘洪涛, 等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 969–978.
- ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, *et al.* A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 47(5): 969–978.
- [13] 王卫军, 袁超, 余伟健, 等. 深部高应力巷道围岩预留变形控制技术[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(9): 2156–2164.
- WANG Weijun, YUAN Chao, YU Weijian, *et al.* Control technology of reserved surrounding rock deformation in deep roadway under high stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(9): 2156–2164.
- [14] 孟浩, 近距离煤层群下位煤层巷道布置优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(12): 44–50.
- MENG Hao. Study on layout optimization of seam gateway under contiguous seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(12): 44–50.
- [15] 郭晓非, 马念杰, 赵希栋, 等. 圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(8): 1871–1877.
- GUO Xiaofei, MA Nianjie, ZHAO Xidong, *et al.* General shapes and criterion for surrounding rock mass plastic zone of round roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 1871–1877.
- [16] 赵志强, 马念杰, 郭晓非, 等. 大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 2932–2939.
- ZHAO Zhi Qiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, *et al.* Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 2932–2939.
- [17] 马念杰, 赵希栋, 赵志强, 等. 深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2287–2295.
- MA Nianjie, ZHAO Xidong, ZHAO Zhiqiang, *et al.* Stability analysis and control technology of mine roadway roof in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2287–2295.
- [18] 康红普, 姜鹏飞, 冯彦军, 等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 1–15.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, FENG Yanjun, *et al.* Destressing technology for rock around coal mine roadways and its applications[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 1–15.
- [19] 赵志强. 大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- ZHAO Zhiqiang. Mechanism of surrounding rock deformation and failure and control method research in large deformation mining roadway[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2014.
- [20] 刘洪涛, 王飞, 王广辉, 等. 大变形巷道顶板可接长锚杆支护系统性能研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 600–607.
- LIU Hongtao, WANG Fei, WANG Guanhui, *et al.* research on lengthening bolt roof support system performance in largely deformed roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(4): 600–607.
- [21] 刘洪涛, 王飞, 张胜凯, 等. 巷帮-支护体本构模型及长螺纹扩帮锚杆研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1368–1375.
- LIU Hongtao, WANG Fei, WANG Shengkai, *et al.* research on long-thread lengthened bolt and constitutive model of laneway's side with support body[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1368–1375.