

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. **DOI**: 10.19835/j.issn.1008-4495.20240033

# 近距离煤层上覆遗留煤柱应力扰动特征研究及应用

杜怀龙1.刘忠平2.田志诚1

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司大柳塔煤矿,陕西神木 719300; 2. 陕西开拓建筑科技有限公司,陕西西安 710054)

摘要:为了研究近距离煤层上覆遗留煤柱对下位煤层的应力扰动特征,以大柳塔煤矿活鸡兔井地质条件为工程背景,综合运用理论分析、数值计算、物理相似模拟等方法,研究了1<sup>-2</sup>煤层10~20m宽遗留煤 柱底板的应力分布规律。结果表明:10m宽遗留煤柱对下位岩层应力扰动影响角为煤柱左侧10°及右侧 19°,并且右侧应力集中程度高于左侧;20m宽遗留煤柱对下位岩层应力扰动影响角为煤柱左侧14°及右 侧11°。应力峰值位于煤柱左侧1/3处正下方,右侧应力集中程度低于左侧。1<sup>-2</sup>煤层10~20m宽遗留煤 柱对2<sup>-2</sup>煤层的应力扰动范围为42~47m。研究结果对近距离煤层中确定下位煤层回采巷道布设位置及 巷道补强支护范围具有一定的理论和应用价值,可为类似工况条件下巷道稳定性控制提供借鉴。

关键词:近距离煤层;遗留煤柱;应力传递;物理相似模拟实验;巷道稳定性

中图分类号:TD322;TD713 文献标志码:A 文章编号:1008-4495(2024)06-0112-10

# Research and application of stress disturbance characteristic of overlying residual coal pillar in contiguous seams

DU Huailong<sup>1</sup>, LIU Zhongping<sup>2</sup>, TIAN Zhicheng<sup>1</sup>

(1. Daliuta Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719300, China;

2. Shaanxi Pioneering Architectural Technology Co. , Ltd. , Xi' an 710054, China)

Abstract: In order to study the stress disturbance characteristics of the overlying residual coal pillar on the lower coal seam in contiguous seams, taking the geological conditions of Huojitu Well in Daliuta Coal Mine as the engineering background, the stress distribution law of the coal pillar floor of  $1^{-2}$  coal seam with a width of 10 m to 20 m was studied by means of theoretical analysis, numerical calculation and physical similarity simulation. The results show that the influence angle of the residual coal pillar with a width of 10 m on the stress disturbance of the lower strata is  $10^{\circ}$  on the left side of the coal pillar and  $19^{\circ}$  on the right side, and the stress concentration degree on the right side is higher than that on the left side of the coal pillar and  $11^{\circ}$  on the right side. The peak stress is located directly below 1/3 on the left side of coal pillar, and the stress concentration on the right side. The peak stress is located directly below 1/3 on the left side of a pillar, and the stress concentration on the right side. The peak stress is located directly below 1/3 on the left side of  $1^{-2}$  coal seam with a width of 10 m to 20 m to  $2^{-2}$  coal seam is 42 m to 47 m. The research results have certain theoretical and application value for determining the layout position of mining roadway and the range of roadway reinforcement support in lower coal seam in contiguous seams, and can provide reference for roadway stability control under similar working conditions.

Keywords: contiguous seams; residual coal pillar; stress transfer; physical similar simulation experiment; roadway stability

随着我国主要矿区上部煤炭资源逐年减少,神 东、神南、大同等矿区逐渐进入下位煤层开采阶段。 上部煤层开采后遗留了各类采空区和残留煤柱,而 采空区垮落的矸石和残留煤柱的应力集中改变了其 底板岩层的应力状态,并对其产生损伤破坏,使得近 距离下煤层围岩的完整性及物理力学性质发生改 变,造成下层煤的工作面开采和巷道稳定性控制面 临巨大难题<sup>[1-3]</sup>。

煤柱应力集中现象向下煤层传递,是影响区段 煤柱稳定性的重要因素。近年来,国内外学者对上 煤层残留煤柱底板应力分布规律进行了大量的研

收稿日期:2024-01-08;2024-05-26 修订

作者简介:杜怀龙(1988—),男,甘肃庆阳人,硕士,工程师,大柳塔煤矿副总工程师,主要从事煤矿安全管理工作。 E-mail:duhuailong@163.com。

究。李胜等<sup>[4]</sup>综合运用理论分析与数值计算等方 法,分析了均布载荷和三角载荷作用下,遗留煤柱垂 直应力传递规律: 胡少轩等<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法研 究了上煤层不同尺寸遗留煤柱底板应力分布特征, 分析了下煤层应力演化规律;岳喜占等<sup>[6]</sup>建立了关 于边界煤柱"椭圆应力拱"力学模型,研究得出巷道 底板应力分布的主要影响因素,包括开采高度、层间 距及巷道内错距离;王想君等[7]以神东某矿回采巷 道为研究背景,计算出呈垂直分布的上覆遗留煤柱 对下煤层应力扰动范围约为 170 m;魏辉等<sup>[8]</sup>以河 北某矿近距离煤层开采为工程背景,研究了在上覆 遗留煤柱扰动下,下位8\*、9\*煤层应力分布规律;梁 华杰等[9]通过理论分析,对煤柱塑性区宽度及上煤 层底板应力分布规律开展了研究;徐青云等[10]通过 力学分析,计算出底板岩层的应力分量,研究了近距 离煤层群下位煤层巷道合理布设位置;何富连等[11] 通过力学分析,推导出"主应力差值",并以此定量描 述煤岩体变形破坏的程度,分析了上煤层残留煤柱 对底板的应力传递规律;徐军见<sup>12]</sup>研究了外错巷道 在上层煤回采后和本层煤回采前的叠加应力影响 下,巷道发生塑性破坏特点、应力分布及位移变化规 律:SHI 等<sup>[13]</sup>综合运用理论分析和现场监测等手段, 研究了051606回风平巷沿空掘巷期间受上覆遗留 煤柱的影响;LIU 等<sup>[14]</sup>以塔山煤矿为工程背景,利用 UDEC 分别模拟了工作面未开采、一侧采动、两侧采 动条件下,煤柱底板应力分布特征,分析得出采空区 下为应力降低区,并且应力值为原岩应力的一半,煤 柱下为应力增高区;杨红运等[15]通过搭建物理相似 模型,分析了近距离煤层群切顶留巷上覆岩层应力 及变形演化规律;李松峰等[16]综合运用理论分析、 数值模拟、工业性试验的方法,研究了极近距离煤层 上煤层开采后应力、采空区对下煤层回采巷道布置 及支护效果的影响。

综上所述,针对近距离煤层底板应力分布特征, 多通过理论计算和数值模拟方法进行分析。随着物 理相似模拟实验技术的发展,越来越多的学者将传 感器预埋入物理模型<sup>[17-18]</sup>,监测采动条件下岩层应 力、应变演化规律。笔者以大柳塔煤矿活鸡兔井为 工程背景,搭建平面物理相似模型,研究上覆遗留煤 柱在底板形成的应力集中程度、应力扰动范围、应力 分布形态。以期为类似工况条件下煤层巷道合理布 设及支护提供科学合理的依据。

### 1 工程概况

大柳塔煤矿活鸡兔井主采 1<sup>-2</sup> 和 2<sup>-2</sup> 煤层,平均 层间距约 30 m,2<sup>-2</sup> 煤层埋深 80~130 m,留设 15 m 宽区段煤柱。22206 工作面距开切眼 70~1 475 m 区域处于上覆开采遗留煤柱区域。22206 工作面运输巷老顶为粉砂岩、细砂岩,厚度 13.6~20.2 m,平均厚度 19.6 m;直接顶为泥岩,局部相变为粉砂岩,厚度 0~1.2 m;掘进段局部伪顶发育,厚度 0~0.4 m,岩性以砂质泥岩为主。层间岩性以粉砂岩或长石中细砂岩为主,层理较发育。工作面岩层综合柱状图如图 1 所示。

岩层 剖面 1:200		层厚/ m	平均 层厚/ m	岩层类别	岩性描述				
	°°° °°°		9.8~ 10.0	9.90	黄土	砂土为第四系覆盖层			
			76.8~ 96.0	82.90	粉砂岩	灰白色至灰绿色粉砂岩,分选中等,基底 式版结,水平均匀层理			
	ZIZ:		5.0~8.9	7.14	长石中细 粒砂岩	灰白色中细粒长石砂岩,分选中等,棱角状,基 底式胶结,均匀层理,泥质包体及黄铁矿结核			
			3.1~4.3	3.60	1-2上煤	以亮煤为主、暗煤次之,已回采			
7	N=	/	0.1~0.3	0.15	粉砂岩	灰色粉砂岩,水平层理			
	2 2 2 2 2 2		12.0~15.6	13.10	长石中细 粒砂岩	灰白色中细粒长石砂岩,分选中等,棱角状, 孔隙式胶结,均匀层理,钙质胶结			
	-		17.7~19.0	18.07	粉砂岩	灰色粉砂岩, 主要为小型交错层理			
	2008		5.1~5.5	5.35	1-2煤	以灰暗煤为主			
			16.0~ 26.3	22.10	粉砂岩	灰色粉砂岩,小型交错层理,也可见变形 层理,植物化石碎片丰富			
	0000		1.5~2.1	1.80	长石细粒 砂岩	灰白色细粒长石砂岩,分选中等,基底式 胶结,夹微层状粉砂岩,平行层理			
7		/	0~0.4	0.30	粉砂岩	灰色粉砂岩,水平层理			
			3.7~4.2	4.00	2-2煤	黑色,煤层结构较简单,煤岩类型以半暗 型、半亮型为主,部分为暗淡和光亮型煤			
7			0.3~0.8	0.65	膨润土	蒙脱质泥岩, 遇水化解膨胀			
	-		4.1~5.6	4.91	粉砂岩	灰色粉砂岩,水平层理,滑面构造发育			

图 1 22206 工作面岩层综合柱状图 Fig. 1 Comprehensive histogram of rock strata in 22206 working face

22206 工作面上覆开采遗留煤柱区域 1<sup>-2上</sup>及 1<sup>-2</sup>煤层采空区内遗留了 30、15 m 宽度的区段煤柱。 受上覆煤层开采影响,22206 工作面回风巷及其煤柱



图 2 22206 工作面上下层位关系图 Fig. 2 22206 bit-relation diagram of upper and lower layers ・113・

# 2 遗留煤柱底板应力传递规律

#### 2.1 煤柱集中应力影响范围理论计算

建立近距离煤层开采煤柱群应力影响计算模型,并通过求解得到煤柱群应力传递规律及其对下 位工作面和回采巷道应力的影响规律,分析上覆遗 留煤柱和下位工作面推进方向之间夹角对下位工作 面的影响规律。

煤柱压力在煤层底板岩层内传递是由近及远、 由大到小的,沿远离煤柱方向,煤柱底板中的深度愈 大位置,产生的垂直应力愈小<sup>[19]</sup>,如图 3(a)所示。 应力在煤层底板岩层内将传递相当远的范围,而且 沿远离煤柱方向而逐渐衰减,其应力影响范围可以 简化为 2 条直线包络下的范围,如图 3(b)所示。



水平方向受上覆遗留煤柱的影响范围 *L* 可通过 下式计算:

$$L = 2h \tan \theta + b \tag{1}$$

式中:h为2层煤的间距;b为上覆遗留煤柱宽度。

将相关数据代入后求得 L≈49.6 m,即 22206 工 作面回采巷道受上覆遗留煤柱影响范围为 49.6 m。

#### 2.2 上覆采空区应力传递分析

以上覆遗留煤柱下区段煤柱多源应力集中实际 情况为基础,分别沿工作面倾向与走向,建立2种应 力叠加影响区段煤柱力学模型,如图4所示。可以 看出,在工作面回采过程中,前方产生超前支承压 力,当工作面回采至遗留煤柱附近时,下煤层区段煤 柱还会受到超前支承压力的影响。



图 4 上覆遗留煤柱下区段煤柱多源应力集中示意图 Fig. 4 Multi-source stress concentration diagram of coal pillar under overlying residual coal pillar

上覆煤层自重应力等于单位面积上覆岩层的重量:  
$$\sigma_z = \gamma H$$
 (2)

式中: $\sigma_z$ 为单位面积上覆岩层的重量; $\gamma$ 为上覆岩层 平均重度;H为煤层与地表的距离。

假设岩体为均匀岩体且无构造应力影响,则原 岩应力场如下<sup>[20]</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \gamma H \\ \sigma_x &= \sigma_y = \lambda \sigma_z \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 为水平主应力; $\lambda$ 为侧压系数。

若岩体为各向同性弹性体,则λ=μ/(1-μ),其 中μ为岩石泊松比,一般为0.2~0.3,则λ一般取值 为0.25~0.43。

上覆煤层开采遗留煤柱上的载荷,是由煤柱上 覆岩层自重及煤柱一侧或两侧采空区悬露顶板产生 的侧向支承压力的叠加。上覆煤层采空后,经长时 间再平衡,采空区和煤柱上的载荷趋于均匀分布。

假定煤柱两侧采空区宽度不同,则煤柱上的平均载荷 $\overline{\sigma_{M}}$ 计算公式如下:

$$\overline{\sigma_{\rm M}} = \left[ \left( B + \frac{D_1 + D_2}{2} \right) H - \frac{D_1^2 + D_2^2}{8} \cot \alpha \right] \frac{\gamma}{B} \tag{4}$$

式中:B 为煤柱宽度; $D_1$ 、 $D_2$  为煤两侧采空区宽度;  $\alpha$  为顶板垮落角。

自重应力减去遗留煤柱承载的载荷即为采空区 承载的载荷,则采空区平均载荷 $\overline{\sigma_{\kappa}}$ 计算公式如下:

$$\overline{\sigma_{\rm K}} = \left[\gamma H \left(\frac{D_1 + D_2}{2} + B\right) - \overline{\sigma_{\rm M}}B\right] \div \left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right) \tag{5}$$

在得到上覆煤层煤柱和采空区应力分布后,建

• 114 •

立上覆煤柱、采空区的应力传递模型,如图 5 所示。 其中 x 轴向右为正, y 轴向下为正。



图 5 上覆遗留煤柱和采空区应力传递模型 Fig. 5 Stress transfer model of overlying residual coal pillar and goaf

以 AB 段煤柱为例,计算上覆遗留煤柱和采空区 传递到下煤层 M 点的应力值,图 5 中  $A \ B \ M$  点的坐 标分别为 $(x_A, y_A) \ (x_B, y_B) \ (x \ y)$ ,在 AB 段上距坐 标原点  $\xi$  处取微元长度  $d\xi$ ,根据弹性力学理论,该微 元在 M 点引起的应力如下:

$$d\sigma_{y} = \frac{2\sigma_{2}' d\xi}{\pi} \frac{y^{3}}{[y^{2} + (x - \xi)^{2}]^{2}}$$
(6)

将 AB 段上各个微元应力进行积分,即对式(6)

进行积分,从 $\xi = x_A$  到 $\xi = x_B$ ,则得到 *AB* 段应力传递 到 *M* 点的垂直应力:

$$\sigma_{2} = \frac{2}{\pi} \int_{x_{A}}^{x_{B}} \frac{\sigma_{2}' y^{3} \mathrm{d}\xi}{\left[y^{2} + (x - \xi)^{2}\right]^{2}}$$
(7)  
 
$$\pi^{2} \psi \mathcal{A}_{x}^{B} ,$$

$$\sigma_{2} = -\frac{\sigma_{2}'}{\pi} \left[ \arctan \frac{x - x_{B}}{y} - \arctan \frac{x - x_{A}}{y} + \frac{y(x - x_{B})}{y^{2} + (x - x_{B})^{2}} - \frac{y(x - x_{A})}{y^{2} + (x - x_{A})^{2}} \right]$$
(8)

通过式(8)即可计算得到上覆遗留煤柱和采空 区对区段煤柱传递的应力值。

# 3 近距离煤层开采应力场分布规律

#### 3.1 模型建立

根据大柳塔煤矿活鸡兔井 22206 工作面采掘工 程平面图和岩层物理力学信息(见表1),利用犀牛 三维建模软件搭建长×宽×高为1 200 m×825 m×111 m 的三维数值模型,如图6所示。模型留设100 m 作 为后期计算的边界,未模拟的表土以均布载荷形式 施加于模型上面,载荷为0.37 MPa。

	表1 模型力学参数
Table 1	Mechanical parameters of model

它早			休和档昰/CP。	→ 油灶槽昰/CP。		拮圧强度/MD。	拮拉强度/MD。	泊松臣	赴取力/MD。
20	古広天川	留度/(kg・m)	1 1	20 40	20.6	15 2	0.020	0.21	0 1
30	男工	1 730	1.1	20.40	30.0	13. 3	0.029	0.51	0.1
29	甲枢伊石	2 700	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
28	粉砂宕	2 600	4.6	2. 31	38	41.9	0.9	0.32	2.5
27	细粒砂岩	2 580	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
26	中粒砂岩	2 700	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
25	粉砂岩	2 650	4.3	2.31	38	41.9	0.9	0.32	2.5
24	细粒砂岩	2 580	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
23	炭质泥岩	2 370	3.2	1.50	26	42.5	0.9	0.27	1.3
22	中粒砂岩	2 750	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
21	粉砂岩	2 680	4.3	2.11	38	41.9	0.9	0.32	2.5
20	细粒砂岩	2 610	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
19	中粒砂岩	2 750	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
18	粉砂岩	2 680	4.0	2.66	38	41.9	0.9	0.32	2.5
17	细粒砂岩	2 130	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
16	粉砂岩	2 680	4.0	2.66	41	41.9	0.9	0.32	2.5
15	1 <sup>-2</sup> 煤	1 350	1.8	0.60	25	10. 9	0.5	0.29	1.5
14	细粒砂岩	2 650	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
13	中粒砂岩	2 610	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
12	粗粒砂岩	2 450	8.4	3.80	27	36.6	1.3	0.27	3.1
11	粉砂岩	2 700	4.0	2.66	41	41.9	0.9	0.32	2.5
10	细粒砂岩	2 650	15.1	12.00	28	29.6	2.1	0.29	5.9
9	粉砂岩	2 700	4.0	6.51	41	41.9	0.9	0.32	2.5
8	中粒砂岩	2 640	6.3	4.50	44	40.6	2.3	0.28	1.9
7	粉砂岩	2 700	4.0	6.51	41	41.9	0.9	0.32	2.5
4	粉砂岩	2 700	4.0	6.51	41	41.9	0.9	0.32	2.5
3	泥岩	2 460	3.2	1.50	26	48.5	0.9	0.27	1.3
2	2 <sup>-2</sup> 煋	1 350	1.8	0, 60	25	11.0	0.5	0.29	1.5
-	2 / ^ / 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》 》	2 700	4 0	6 51	41	41.9	0.9	0.32	2.5
1	רוי עי געוי	2,00	1. 0	0.01	11	11. /	0. /	0.52	2.5

Vol. 51 No. 6 Dec. 2024



图 6 22206 工作面数值计算模型 Fig. 6 Numerical calculation model of 22206 working face

模拟方案中,1<sup>-2</sup>煤层遗留煤柱宽度取15 m, 斜交角度为75°,2<sup>-2</sup>煤层区段煤柱宽度取15 m。 模型计算流程:模型达到初始应力平衡→1<sup>-2</sup>煤层 工作面开挖形成遗留煤柱和采空区→2<sup>-2</sup>煤层巷道 掘进→以10 m 开挖步距开采22206 工作面(一次 采动)→以10 m 开挖步距开采22208 工作面(二 次采动)。

将建立的网格文件导入 FLAC3D6.0 软件中,如 图 7 所示。本次模拟采用弹塑性本构模型,选取莫 尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度准则作为屈服准则。 初平衡后模型最大垂直应力为 4.0 MPa。



图 7 22206 工作面区段煤柱数值模型 Fig. 7 Numerical model of section coal pillar in 22206 working face

### 3.2 遗留煤柱下围岩应力分布数值模拟

在初始应力场条件下,对 2<sup>-2</sup> 煤层上覆 1<sup>-2</sup> 煤层 工作面进行开挖,开挖后,地表形成了以遗留煤柱和 边界煤柱为界的平底碗状下沉盆地。同时采空区遗 留煤柱形成了应力增高区,并向底板方向传播,如 图 8 所示。



(a)1<sup>-2</sup>煤层工作面开挖地表下沉形态



(b)遗留煤柱倾向垂直应力场



1<sup>-2</sup>煤层开采结果表明,采空区内遗留区段煤柱 应力升高,局部应力增高至 34 MPa,在底板形成了 大约 47 m 的影响范围。在该影响范围内应力由初 始 4.0 MPa 升高至 11.5 MPa。表明上覆遗留煤柱 对底板应力产生了较大的扰动,形成应力增高区,对 2<sup>-2</sup>煤层开采具有较大的影响。

# 4 上煤层开采底板应力分布相似模拟

# 4.1 相似模拟实验设计

为探究遗留煤柱对底板造成的应力集中程度、应力扰动范围及应力分布形态的影响,设计采用长×宽×高为 3.0 m×0.2 m×1.5 m 的相似模拟支架进行模拟开挖。模拟实验的几何相似常数为 100,时间相似比  $\alpha_i = 10$ ,重力密度相似比  $\alpha_y = 1.6$ ,应力相似常比  $\alpha_g = 160$ 。

物理相似模拟实验选取活鸡兔矿井典型遗留煤 柱与下伏工作面相对位置进行模拟,具体选取断面 如图9所示。



图 9 活鸡兔矿井典型遗留煤柱与下伏工作面位置关系 Fig. 9 The relationship between the position of the typical residual coal pillar and the underlying working face in Huojitu Well

# 4.2 开挖方案

本次实验关键在于 1-2 煤层中形成的遗留煤柱

载荷传递对 2<sup>-2</sup> 煤层开采造成的影响规律研究。在 1<sup>-2</sup> 煤层形成遗留煤柱过程中拟采用半无限开采形 式,1<sup>-2</sup> 煤层两侧布置 2 个双侧半无限开采工作面, 即图 10 中所示的 1<sup>-2</sup> 煤层 Ⅰ、Ⅲ工作面,2 个遗留煤 柱中间为 1<sup>-2</sup> 煤层 Ⅱ工作面,推进方向为箭头方向。 为保证实验效果,综合实验测试手段,将整个模型架 在1500mm位置垂直划分2个工作区域,设计2个 宽度分别为100、200mm的遗留煤柱,形成对比实 验。最大垮落角按60°~70°考虑,相似模型开采后 煤柱相对位置如图10所示。



图 10 煤层开挖模型设计 Fig. 10 Model design for coal seam excavation

# 4.3 底板应力监测方案

为研究采动过程中1<sup>-2</sup>煤层遗留煤柱下方应力分 布特征及2<sup>-2</sup>煤层垂直应力演化过程,在1<sup>-2</sup>煤层底 板铺设60个小型压力传感器,2<sup>-2</sup>煤层底板均匀铺设 60个压力传感器,传感器布设如图 11 所示。在模型 搭建完后采集压力传感器初值,每刀进尺 50 mm,每 刀进尺完后自动采集压力传感器数据。上煤层 3 个 工作面回采完毕覆岩垮落形态如图 12 所示。





模型宽度/mm

图 12 1<sup>-2</sup> 煤层回采后覆岩垮落形态

Fig. 12 The caving form of overlying strata after  $1^{-2}$  coal seam mining

4.4 上覆遗留煤柱底板应力分布特征

4.4.1 1<sup>-2</sup> 煤层 I 工作面开挖

1<sup>-2</sup> 煤层 I 工作面开采至 200、300、400、700 mm 时,工作面应力集中系数变化情况如图 13 所示。



由图 13 可以看出:当 1<sup>-2</sup> 煤层 I 工作面开采至 · 118 ·

200 mm 时,应力集中系数最大为 1.18,最小为 0.79,应力增高区主要出现在模型长度 320 mm 以 后;当工作面开采至 300 mm 时,应力集中系数最大 为 1.20,最小为 0.80,应力增高区范围、应力峰值大 小相较于上一步开挖过程基本不变,此时 1<sup>-2</sup> 煤层 对 2<sup>-2</sup> 煤层的应力影响角度为 3°;当工作面开采至 400 mm 时,应力集中系数最大为 1.12,最小为 0.67,应力增高区前移至模型长度 650 mm 以后,此 时应力影响角为 26°;当工作面开采至 700 mm 时,应力集中系数最大为 1.08,最小为 0.71;当 1<sup>-2</sup> 煤层 I 工作面开采结束时,应力增高区出现在模型长度 1 100 mm 以后,应力影响角为 47°。

在 1<sup>-2</sup> 煤层整个开采过程中,随着工作面不断推进,采过工作面岩层属于应力降低区,应力影响角呈现递减的趋势,应力增高区也不断向右平移,开采结束,应力增高区超前工作面范围增大至 450 mm。

当1<sup>-2</sup>煤层 I 工作面回采完毕,采集2 排压力传 感器数值,分别与初始值求比值,得到1<sup>-2</sup>煤层、 2<sup>-2</sup>煤层底板应力集中系数,最后采用自然邻点插值 法得出底板应力分布等值线云图,如图14所示。 1<sup>-2</sup>煤层 I 工作面开采结束,应力增高区超前工作面 450 mm 左右,此时,1<sup>-2</sup>煤层的开采对下位岩层的应 力主要分布在遗留煤柱右侧未开采区域。



图 14  $1^{-2}$  煤层 I 工作面开采结束应力分布云图 Fig. 14 The stress distribution cloud diagram of the I working face of  $1^{-2}$  coal seam at the end of mining

# 4.4.2 1<sup>-2</sup> 煤层Ⅱ工作面开挖

1<sup>-2</sup>煤层 II 工作面累计回采 1 350 mm,与 I 工作 面采空区形成 100 mm 宽遗留煤柱,该遗留煤柱底板 应力集中系数分布如图 15 所示。可以看出,其应力 集中系数最大为 1.82,最小为 0.72,应力集中系数峰 值位于 100 mm 煤柱中心处正下方。此阶段,煤柱左 侧岩层垮落角为 68°02′,右侧岩层垮落角为 48°19′,上 覆岩层呈倒梯形结构状作用于煤柱,煤柱上方右侧倾 覆力矩大于左侧,遗留煤柱对下位岩层应力扰动影响 区为煤柱左侧 10°92′及右侧 19°56′范围内。



1<sup>-2</sup>煤层 II 工作面开采结束,形成 100 mm 遗留 煤柱时的应力分布云图如图 16 所示。可以看出,煤 柱在受到上覆岩层所形成的倒梯形结构作用下,其 集中应力呈椭圆状压力泡并传递到 2<sup>-2</sup>煤层。煤柱 两侧的应力影响角及应力峰值所处位置与图 15 中 的相对应,右侧应力集中程度高于左侧,对 2<sup>-2</sup>煤层 的应力扰动范围为 420 mm。



图 16 1<sup>-2</sup> 煤层 II 工作面开采结束应力分布云图 Fig. 16 The stress distribution cloud diagram of the II working face of 1<sup>-2</sup> coal seam at the end of mining

1<sup>-2</sup> 煤层Ⅲ工作面开采至 350、450、550、650 mm

4.4.3 1<sup>-2</sup> 煤层Ⅲ工作面开挖





由图 17 可以看出:当 1<sup>-2</sup> 煤层Ⅲ工作面开采至 350 mm 时,工作面应力集中系数最大为 1.11,最小 为 0.81,其峰值位于 200 mm 遗留煤柱正下方,此时 应力影响角为 8°;当工作面开采至 450 mm 时,应力 集中系数最大为 1.18,最小为 0.72,其峰值位于 200 mm 遗留煤柱正下方,此时应力影响角度为 10°; 当工作面开采至 550 mm 时,应力集中系数最大为 1.55,最小为 0.59,其峰值位于 200 mm 遗留煤柱正 下方,此时应力影响角为 6°;当工作面开采至 650 mm 时,应力集中系数最大为 1.74,最小为 0.44,其峰值位于 200 mm 遗留煤柱正下方,此时应 力影响角为 11°;当 1<sup>-2</sup>煤层 III 工作面开采结束, 1<sup>-2</sup>煤层全部回采完毕,200 mm 遗留煤柱对下方岩 层的应力影响范围分别为 13°62′、10°51′,应力增高 区集中在此应力影响范围内。在 1<sup>-2</sup>煤层整个开采 过程中,随着工作面不断推进,应力影响角呈现递减 的趋势,最大应力集中系数为 1.74。如图 17(d)所 示,此时 III 工作面开采结束,形成 200 mm 遗留煤柱, 其应力集中系数最大为 1.74,最小为 0.44,应力集 中系数峰值位于 200 mm 煤柱左侧 1/3 处正下方。 此阶段,煤柱左侧岩层垮落角为 53°,右侧岩层垮落 角为 47°,上覆岩层形成倒梯形结构作用于煤柱,煤 柱上方右侧倾覆力矩小于左侧,遗留煤柱对下位岩 层应力扰动影响区为煤柱左侧 14°及右侧 11°范 围内。

当 1<sup>-2</sup> 煤层Ⅲ工作面开采结束,形成 200 mm 遗 留煤柱时的应力分布云图如图 18 所示。可以看出, 煤柱在受到上覆岩层所形成的倒梯形结构作用下, 其集中应力呈椭圆状压力泡并传递到 2<sup>-2</sup> 煤层。煤 柱两侧的应力影响角及应力峰值所处位置与图 17 中的相对应,右侧应力集中程度小于左侧,对 2<sup>-2</sup> 煤 层的应力扰动范围大约为 450 mm。



图 18 1<sup>-2</sup> 煤层Ⅲ工作面开采结束应力分布云图 Fig. 18 The stress distribution cloud diagram of the Ⅲ working face of 1<sup>-2</sup> coal seam at the end of mining

### 5 工程实践

实验结果表明,受1<sup>-2</sup>煤层遗留煤柱影响,2<sup>-2</sup>煤 层会形成42~47 m的应力增高区,基于此,为了提高2<sup>-2</sup>煤层回采巷道的稳定性,应对该区段巷道进 行补强支护。巷道原支护方案:顶板采用ø18 mm× 2 100 mm 锚杆、ø6.5 mm×150 mm×150 mm 钢筋网进 行支护,锚杆排距1 m;副帮采用ø18 mm×2 100 mm 锚 杆、ø4 mm×150 mm×150 mm 冷拔丝网进行支护,锚 杆排距1 m。

遗留煤柱影响下巷道采用锚索补强支护方案:顶板采用 ø21.6 mm×8 000 mm 锚索+3.0 m 两眼 W 钢带进行支护,锚索间排距 2.4 m×3.0 m;副帮采用 ø21.6 mm×6 500 mm 锚索+2.6 m 两眼 W 钢带,纵 · 120 ·





根据实验结果在补强支护范围设置围岩观测点,并与上个工作面进行对比,发现遗留煤柱下巷道帮鼓量明显减小,顶板网兜数量减少并且顶底板移 近量由 300 mm 减小至 100~200 mm,围岩稳定性得 到明显提升。

### 6 结论

1)通过物理模拟得出,在上煤层正常开采阶段 内,基本顶初次来压步距 60.0 m,周期来压步距 20.5 m,与现场实测数据基本一致,表明物理相似模 拟实验可靠。从上煤层开采完遗留煤柱应力分布云 图能够直观地看出,煤柱在受到上覆岩层所形成的 倒梯形结构作用下,其集中应力呈椭圆状压力泡并 传递到 2<sup>-2</sup> 煤层。

2)10 m 宽遗留煤柱对下位岩层应力扰动影响 角为煤柱左侧 10°及右侧 19°,并且右侧应力集中程 度高于左侧;20 m 宽遗留煤柱对下位岩层应力扰动 影响角为煤柱左侧 14°及右侧 11°,应力峰值位于煤 柱左侧 1/3 处正下方,右侧应力集中程度低于左侧。

3)综合数值模拟及物理相似模拟实验结果得 出,10~20 m 宽遗留煤柱对 2<sup>-2</sup>煤层的应力扰动范 围为42~47 m,对此范围内 2<sup>-2</sup>煤层回采巷道进行补 强支护后,巷道顶底板移近量由 300 mm 减小至 100~200 mm。实践表明,现场应用效果良好,可为 下一接续工作面巷道支护设计提供参考依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘峰,曹文君,张建明,等. 我国煤炭工业科技创新进展及"十四五"发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
  LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(1):1-15.
- [2] 柴敬,刘永亮,袁强,等. 矿山围岩变形与破坏光纤感测理论技术 及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(1):208-217.
  CHAI Jing, LIU Yongliang, YUAN Qiang, et al. Theory-technology and its application of optical fiber sensing on deformation and failure of mine surrounding rock[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1):208-217.
- [3] 刘忠平,马亮,高亮,等. 超长沿空留巷挡矸支架随采随装技术研究[J]. 矿业安全与环保,2023,50(5):105-110.
  LIU Zhongping, MA Liang, GAO Liang, et al. Study on technology of super-long gob-side entry retaining gangue support with mining and assembling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(5):105-110.
- [4] 李胜,周利峰,罗明坤,等.煤层群下行开采煤柱应力传递规律[J]. 辽 宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(6):661-667.
  LI Sheng, ZHOU Lifeng, LUO Mingkun, et al. Strata behaviors analysis of stage coal pillar in Tong Xin Mine caused by repeated mining [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2015,34(6):661-667.
- [5] 胡少轩,许兴亮,田素川,等.近距离煤层协同机理对下层煤巷道位置的优化[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1008-1013.
  HU Shaoxuan, XU Xingliang, TIAN Suchuan, et al. Optimization of roadway location in lower coal seam from synergy mechanism of contiguous seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016,33(6):1008-1013.
- [6] 岳喜占,涂敏,李迎富,等.近距离煤层开采遗留边界煤柱下底板巷道采动附加应力计算[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2): 246-252.

YUE Xizhan, TU Min, LI Yingfu, et al. Calculation of subsidiary mining stress in floor roadway under the remaining boundary pillar of close coal seam mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 246-252.

- [7] 王想君,陈登红,华心祝,等. 神东矿区深部多次采动巷道稳定性影响规律与协调控制研究[J]. 煤炭工程,2021,53(7):48-54.
  WANG Xiangjun, CHEN Denghong, HUA Xinzhu, et al. Influence law and coordinated control of the stability of multiple mining roadways in the deep part of Shendong mining area [J]. Coal Engineering, 2021, 53(7):48-54.
- [8] 魏辉,宋世康,李杰.遗留煤柱扰动下服务巷道变形破坏机理及防冲技术[J].煤矿安全,2022,53(12):68-75.
   WEI Hui, SONG Shikang, LI Jie. Deformation mechanism and rock burst prevention technology of service roadway under residual coal pillar[J]. Safety in Coal Mines,2022,53(12):68-75.
- [9] 梁华杰,顾天州,赵忠义.近距离煤层开采巷道布置合理性分析[J].

煤矿安全,2019,50(7):249-253.

LIANG Huajie, GU Tianzhou, ZHAO Zhongyi. Analysis on rationality of roadway layout in close coal seam mining [ J ]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7); 249–253.

- [10] 徐青云,谭云,黄庆国.近距离煤层群下行开采底板应力分布规 律研究[J].煤炭工程,2019,51(8):89-92.
  XU Qingyun, TAN Yun, HUANG Qingguo. Study on floor stress distribution in close distance downward mining coal seam[J]. Coal Engineering,2019,51(8):89-92.
- [11] 何富连,郑铮,杨增强,等. 基于主应力差影响的底板应力分布 状态研究[J].煤矿安全,2019,50(11):67-71.
  HE Fulian,ZHENG Zheng,YANG Zengqiang, et al. Study on stress distribution state of floor based on the influence of principal stress difference[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(11):67-71.
- [12] 徐军见. 近距离煤层下位外错巷道变形机理及控制技术[J]. 矿 业安全与环保,2020,47(4):88-92.
  XU Junjian. Deformation mechanism and control technology of the external dislocation roadway under the close distance coal seam[J].
  Mining Safety & Environmental Protection,2020,47(4):88-92.
- [13] SHI W, LIU H T, LIANG C, et al. Research on mine pressure behave law in mining of face under the coal pillar [J]. Advanced Materials Research, 2011, 217/218:1721-1724.
- [14] LIU X J,LI X M, PAN W D. Analysis on the floor stress distribution and roadway position in the close distance coal seams [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2):83.
- [15] 杨红运,刘延保,李勇,等. 近距离煤层群切顶留巷覆岩应力及 变形响应研究[J]. 矿业安全与环保,2022,49(1):8-13.
  YANG Hongyun,LIU Yanbao,LI Yong, et al. Study on strata stress and deformation response of contiguous seams under cutting roof for entry retaining [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(1):8-13.
- [16] 李松峰,陈军锋. 极近距离煤层下行开采巷道围岩支护技术研究[J]. 矿业安全与环保,2022,49(2):127-131.
  LI Songfeng, CHEN Junfeng. Research on supporting technology of roadway surrounding rock for downward mining in extreme contiguous seams[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(2):127-131.
- [17] 高士岗,陈苏社,柴敬,等.极近距离采空区下大断面开切眼支 护工艺优化研究[J].煤炭科学技术,2021,49(12):20-28.
  GAO Shigang, CHEN Sushe, CHAI Jing, et al. Study on optimization of supporting technology for large cross section open-off cut under contigous gob [J]. Coal Science and Technology, 2021,49 (12): 20-28.
- [18] 柴敬,杨玉玉,欧阳一博,等. 采场覆岩变形破坏模拟试验的光测方法对比[J]. 煤炭学报,2021,46(1):154-163.
  CHAI Jing, YANG Yuyu, OUYANG Yibo, et al. Comparison of optical measurement methods for deformation and failure simulation test of overburden in working face [J]. Journal of China Coal Society,2021,46(1):154-163.
- [19] 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 miningin close distance coal seams[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023,44(1):100-109.
- [20] 康红普.煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J].煤炭学报, 2008,33(12):1329-1335.
  KANG Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1329-1335.

(责任编辑:陈玉涛)