

应用研究·煤矿·

近距离煤层群相向采掘下伏煤层巷道
变形破坏特征Deformation and Failure Characteristics of the Undermining Coal Seam Roadway Under
Opposite Mining and Tunneling of Close Coal Seam Group

高杰, 赵米真, 王力 (陕西煤业化工集团 孙家岔龙华矿业有限公司, 陕西 榆林 719314)

摘要:针对龙华煤矿在近距离煤层下行开采过程中,10205工作面回采巷道与其下方的20203工作面回采巷道存在的相互扰动问题。利用理论分析、FLAC^{3D}数值模拟等方法研究了10205工作面采场20203回采巷道支护参数、应力分布特征、分布规律以及底板破坏深度等,探究了1⁻²煤层的10205工作面在回采过程中对2⁻²煤层的20203工作面回采巷道施工稳定性的影响。结果表明:下煤层20203回采巷道掘进初期,巷道仅受自身掘进的应力扰动影响,巷道围岩应力整体呈现稳定变化。当上煤层工作面长度为325 m时,上煤层工作面底板最大破坏深度为20 m。下煤层回采巷道围岩应力相较于掘进期变化不大,回采巷道在上煤层开采过程中保持稳定。同时,10205工作面主应力均呈扩散状向底板传递,最大主应力扩散区在应力增高区,而最小主应力扩散区在应力降低区,二者分布规律相似均在应力增高区出现应力集中。根据滑移线理论模型计算上煤层底板最大破坏深度理论值为18.6 m,与数值模拟结果接近。研究结果有利于保障近距离煤层下行开采的掘进安全以及回采巷道支护稳定性。

关键词:近距离煤层群; 相向采掘; 巷道支护; 底板破坏特征; 巷道稳定性

中图分类号: TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)05-0028-08

Abstract: Aiming at the mutual disturbance problem between 10205 working face and its lower 20203 working face during the downward mining process of close coal seam in Longhua coal mine. Theoretical analysis, FLAC^{3D} numerical simulation and other methods were used to study the characteristics of the stress distribution in the mining field of the 10205 working face, the distribution law, the depth of the bottom plate damage, and the support parameters of the 20203 roadway, etc., and to investigate the influence of the 10205 working face in the 1⁻² seam on the stability of the construction of the 20203 roadway of the 20203 working face in the 2⁻² seam during the process of the mining back. The results show that, at the initial stage of 20203 roadway excavation in the lower coal seam, the roadway is only affected by the stress perturbation brought by its own excavation, and the roadway peripheral rock stress shows a uniform and stable change as a whole. When the length of the upper seam working face is 325 m, the maximum damage depth of the upper seam working face bottom plate is 20 m. The peripheral rock stress of the lower seam back-mining roadway does not change much compared with the period of digging, and the back-mining roadway is kept stable in the process of mining the upper seam. At the same time, the main stresses in 10205 working face are transmitted to the bottom plate in a diffuse manner, the largest main stress diffusion area is in the stress increase area, while the smallest main stress diffusion area is in the stress decrease area, and both of them are similar in the distribution law, and the stress concentration occurs in the stress increase area. According to the theoretical model of slip line, the maximum damage depth of the upper seam bottom plate is 18.6 m, which is close to the numerical simulation results. The results of the study are helpful to ensure the safety of the downstream mining of the close coal seam and the stability of the support of the roadway in back mining.

Key words: close seam; opposite mining and tunneling; roadway support; floor failure law; roadway stability

1 前言

煤炭作为我国的主要能源,在未来相当长的时期内,我国仍将是煤为主的能源结构^[1-2]。保障我国的煤炭产量稳定对能源安全具有重要作用,而不断提高难采煤层的开采技术,对保障我国煤炭产量稳定具有重要意义^[3-4]。在近距离煤层开采中,主要的问题均集中在下煤层开采中,开采导致煤层底板应力重新分布^[5-7]。

目前,部分研究学者对近距离开采下底板岩体与顶板理论开展了研究。董宇等^[8]模拟了近距离开采引起的围岩应力演化过程和底板岩巷位移特点。鞠杨等^[9]模拟分析了淮南矿区煤矿开采中上覆岩层的应力场变化和变形移动规律。杨建华等^[10]通过对极近距离煤层在上部煤层开采后底板的损伤程度及应力分布进行了分析。程志恒等^[11]采用相似模拟实验研究了沙曲煤矿煤层群双重采动影响下围岩应力-裂隙分布与演化特征。然而,近距离煤层在下部煤层开采的巷道布置和支护方式往往盲目性较大,近距离下部煤层开采巷道合理位置确定的认识还是初步的^[12-15]。

孙家岔龙华煤矿属典型的浅埋近距离煤层群,地质条件较复杂,其主要特征为顶板基岩薄,上覆松散层厚,基岩易风化。其中,10205工作面回采与其下方的20203工作面回采巷道存在相互扰动问题,10205工作面的开采会对20203工作面回采巷道的掘进及支护有影响,在没有探明上煤层开采的超前动压影响程度及应力集中传递效应之前,如果盲目的对20203工作面回采巷道进行掘进,将可能造成该回采巷道在工作面回采前即已发生支护失效、巷道变形失稳、顶板大范围冒顶等安全事故,不利于实现一级安全生产标准化煤矿建设目标。针对10205工作面回采与其下方20203工作面回采巷道存在的互相扰动问题,本研究通过数值模拟和理论分析等方法,研究1⁻²煤层的10205工作面在回采过程中对2⁻²煤层的20203工作面回采巷道施工稳定性的影响,分析了上煤层开采采场应力分布规律、底板破坏深度以及巷道支护稳定性。

2 实验方法

2.1 工作面概况

龙华煤矿位于陕西省神木市北部,井田中心距神木市约40 km,东西长约10.2 km,南北宽约4.5~5.5 km,面积54.369 1 km²。其中,10205工作面位

于1⁻²煤层102盘区,工作面上覆为直罗组底部砂岩裂隙含水层水,富水性较弱。该工作面带式输送机巷走向长1 253.8 m,回风巷走向长1 248.2 m,倾向长一段195 m,二段325 m,面积343 899.13 m²。煤层1.8~2.8 m,平均厚度2.6 m,属中厚煤层,煤层结构简单,煤层倾角为1°属近水平煤层。工作面埋深89~159 m,平均埋深105 m。10205综采工作面开采煤层顶板情况见表1。20203工作面位于2⁻²煤层202盘区,20203掘进范围内地质构造简单,属于单斜构造,煤层赋存稳定,煤层倾向平缓,倾角为0°~3°,平均1°。所采煤层为延安组第四段2⁻²煤层,厚度5.10~8.14 m,平均6.26 m,属于厚煤层,具体顶底板岩性特征见表2。其开口位置位于202盘区辅助运输巷1 430.6 m处,设计巷道形状均为矩形,其断面参数见表3。

表1 10205工作面顶底板情况

顶底板名称	岩石名称	厚度/m
基本顶	细粒砂岩	13.69~17.36
		15.53
直接顶	细粒砂岩	3.69~9.14
		6.41
煤层	1 ⁻² 煤	1.8~2.8
		3.6
直接底	粉砂岩	1.5~3.17
		2.3
基本底	细粒砂岩	4.3~6.78
		5.5

表2 巷道围岩特征

顶底板名称	岩石名称	厚度/m
基本顶	细、中类砂岩	47.79~19.18
		29.62
直接顶	粉砂岩	22.43~1.93
		11.08
煤层	2 ⁻² 煤	5.10~8.14
		6.26
直接底	粉砂岩	30.82~8.30
		21.37
基本底	细类砂岩	21.55~1.00
		6.33

上述两个工作面分别位于两个煤层,10205工作面位于上煤层,20203工作面位于下煤层,20203运输巷拟经过10205工作面下方掘进,20203运输

巷距 10205 工作面回风巷水平投影距离为 220 m,距 10205 工作面底板平均垂直距离为 40 m,其中细、中

类砂岩厚度约为 30 m,粉砂岩约为 10 m。二者空间位置关系如图 1 所示。

表 3 巷道断面参数

巷道名称	巷道形状	断面尺寸/m				净断面/ m ²	掘断面/ m ²
		净宽	掘宽	净高	掘高		
20203 辅助运输巷	矩形	6	6.2	4.5	4.8	27	29.76
20202 避难硐室	矩形	6	6.2	4.5	4.8	27	29.76
	联巷	6	6.2	4.5	4.8	27	29.76

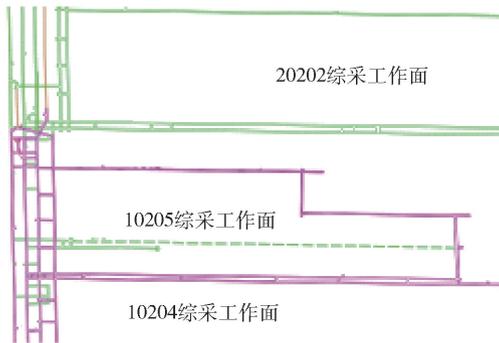


图 1 10205 工作面与 20203 工作面空间位置关系

2.2 数值模型构建

利用非线性数值计算软件 FLAC^{3D} 进行近距离煤层数值模型的构建和分析。本次模拟计算模型尺寸长度/ $X \times$ 宽度/ $Y \times$ 高度/ $Z = 365 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 。模型未建至地表,采用模型顶部施加载荷的方法实现对土层的模拟。

表 4 岩石物理力学参数

岩性	厚度/m	体积模量/GPa	泊松比	剪切模量/GPa	密度/ $10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
细粒砂岩	15.5	24	0.2	15.2	2.6	32	28
细粒砂岩	6	24	0.2	15.2	2.6	32	28
1 ⁻² 煤层	2.5	22	0.25	13.2	1.43	25	18
细、中类砂岩	30	25	0.2	18.75	2.6	35	30
粉砂岩	10	22	0.25	13.2	2.6	25	20
2 ⁻² 煤层	6	22	0.25	13.2	1.43	25	18
粉砂岩	20	22	0.25	13.2	2.6	25	20

依据岩体物理力学参数及工作面空间位置关系,建立下煤层 20203 回采巷道完成掘进、支护模型及上煤层 10205 工作面的回采数值模拟模型,具体如图 2 所示。

3 结果与讨论

3.1 近距离煤层群下煤层回采巷道稳定性分析

1) 下煤层无支护条件下围岩稳定性分析

基于上述近距离煤层数值模拟模型,通过对 2⁻²煤层 20203 工作面回采巷道进行数值模拟掘进,

围岩物理力学性质参照龙华煤矿钻孔地质资料结合实际岩体力学参数确定。围岩本构关系采用理想弹塑性本构模型——莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 屈服准则判断岩体的破坏:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; φ 为内摩擦角; c 为煤体内聚力。

在研究区直接顶板稳定区主要位于煤矿的中部及靠近煤矿边界区域,呈条带状分布,从顶板岩层特征、岩石力学等方面分析,均属于稳定情况,10205 工作面顶板岩层分层数较少、单层厚度较大,岩性主要以粉砂岩、细中类砂岩为主。将煤层地质条件数据进行统一化分析,可得模型中岩体物理力学参数见表 4。

对下层煤层回采巷道掘进期围岩稳定性进行分析。为了对比回采巷道有、无支护情况巷道围岩的变化情况,分别进行了 20203 回采巷道无支护模拟和有支护模拟。

在近距离煤层群下煤层回采巷道掘进时,因上煤层无开采活动覆岩保持完整,未发生任何应力集中及位移现象,覆岩环境相对稳定。因此,下煤层回采巷道掘进过程中巷道围岩变形不受上煤层影响,下煤层回采巷道围岩变形仅为巷道浅部围岩变形,

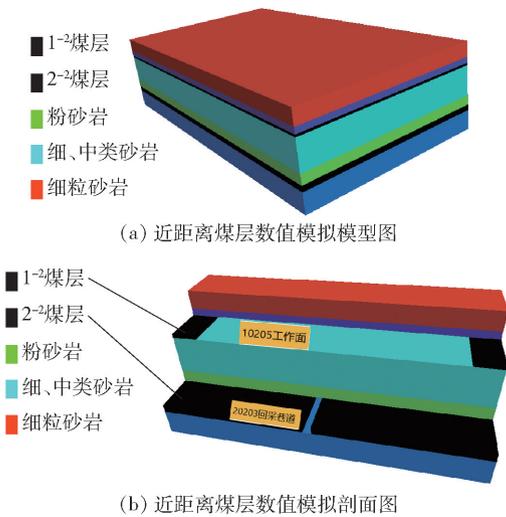


图2 数值模拟模型

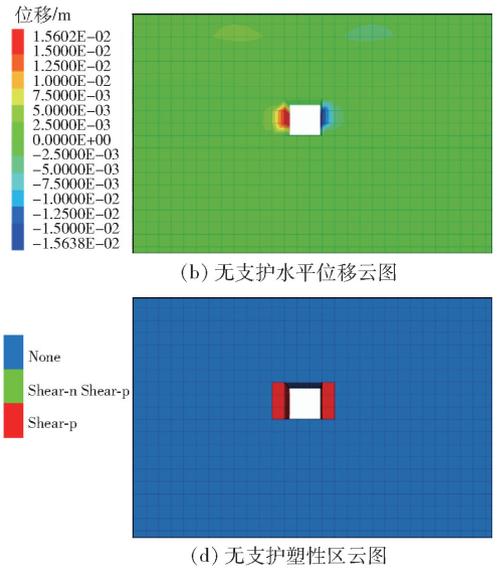
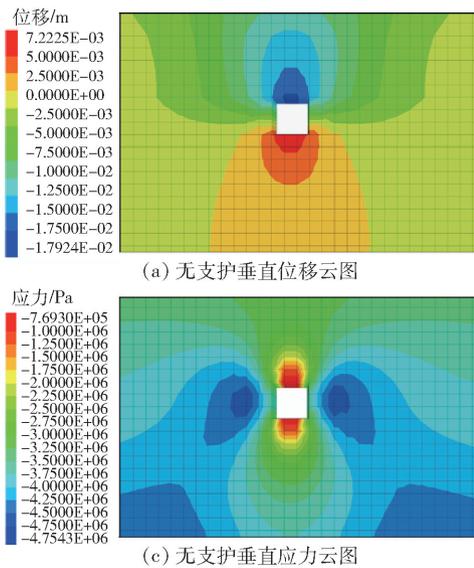


图3 回采巷道无支护模拟云图

2) 下煤层支护条件下围岩稳定性分析

在近距离下煤层回采巷道支护围岩稳定性分析过程中,20203 工作面回采巷道数值模拟支护参数为现场拟采用锚杆+锚索的实际支护参数,其中,巷道顶板锚杆采用每排支护 5 根顶锚杆,间排距为 1 250 mm × 1 000 mm;锚索采用单排锚索布置,排距为 3 000 mm;巷道两帮采用锚杆支护,间排距为 1 300 mm × 1 000 mm,具体如图 4 所示。

模拟得到回采巷道有支护应力分布、覆岩移动及塑性区的情况,由图 5 (a)、(b)可知,下煤层 20203 回采巷道掘进支护后,回采巷道围岩位移得到了一定控制,其中顶板下沉量为 150 mm,底鼓量为 60 mm,两帮移近量为 100 mm。对比无支护回采巷道围岩位移量分析可知,支护后回采巷道顶板下

巷道深部围岩结构并未发生改变。

由图 3(a)、(b)可知,下煤层 20203 回采巷道掘进过程中,巷道围岩发生了一定的移动变形,其中巷道顶板下沉量为 170 mm,位于顶板中部位置,底鼓量为 70 mm,两帮移近量为 150 mm。由图 3(c)、(d)可知,下煤层 20203 回采巷道掘进过程中,巷道围岩应力整体呈现出均匀稳定的变化,巷道顶底板及两帮出现了一定的应力集中,其中巷道两帮集中应力大于顶板为 4.7 MPa,巷道顶底板应力为 0.76 MPa。同时,回采巷道围岩两帮出现塑性剪切破坏,回采巷道顶底板未出现塑性破坏。

由上述无支护模拟结果可知,在下煤层 20203 回采巷道掘进初期,巷道围岩应力整体呈现出均匀稳定的变化,保持巷道围岩稳定所需的支护难度不大。

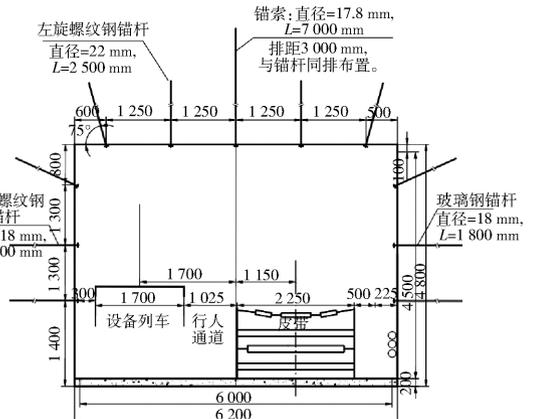


图4 20203 运输巷道断面图(1:50)

沉量减小了 20 mm,两帮移近量减小了 50 mm。

由图 5(c)、(d)可知,下煤层 20203 回采巷道掘

进掘进支护后,巷道围岩应力整体仍呈现较为均匀稳定的变化,受锚杆、锚索联合支护作用,巷道顶底板及两帮应力相较于无支护巷道应力值增大,其中巷道两帮集中应力大于顶板为 4.9 MPa,巷道顶底

板应力为 0.91 MPa。同时回采巷道两帮塑性区得到了有效控制,仅在巷道帮部中间位置出现剪切破坏,其余位置未发生塑性破坏。

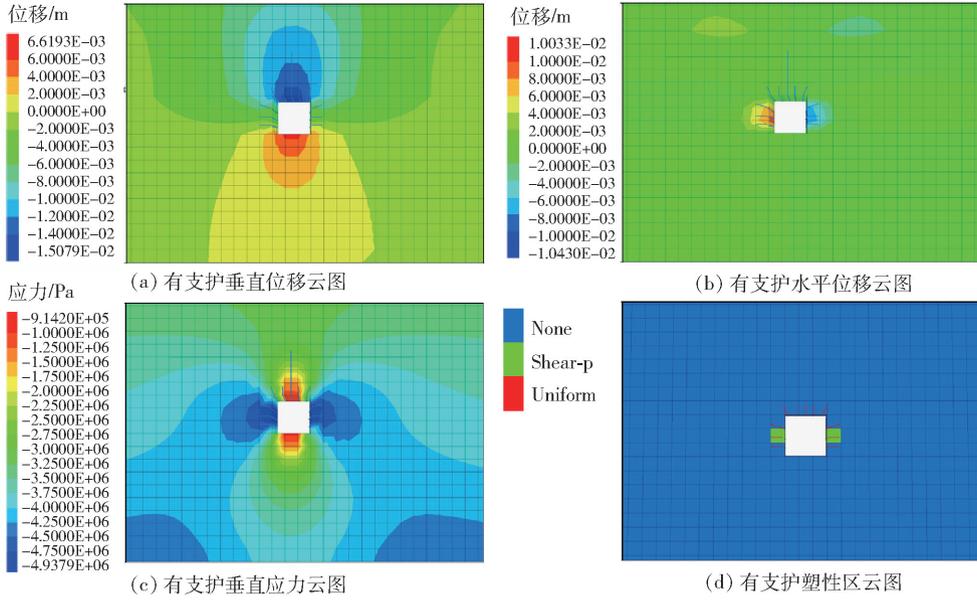


图 5 回采巷道有支护模拟云图

3.2 近距离煤层群上煤层回采期间下煤层巷道变形破坏特征

进一步,分析随近距离煤层上煤层工作面推进对下煤层巷道应力分布、覆岩移动及塑性区的影响。

1) 覆岩应力分布特征

由图 6(a) 所示可知,当工作面推进至 50 m 时,上煤层工作面两侧煤壁出现集中压应力,最大值为 9.23 MPa,工作面顶板出现拉应力,其中工作面顶板中间位置拉应力值最大,为 1.62 MPa,下煤层 20203 工作面回采巷道未受到开采扰动,巷道围岩应力值变化不大。由图 6(b) 所示可知,当工作面推进至 150 m 时,上煤层工作面覆岩发生破断、移动,工作面中间位置覆岩已与工作面采空区底板接触,采空区中间底板出现集中应力。同时,工作面煤壁集中应力向下煤层回采巷道方向传播,下煤层回采巷道围岩应力相较于工作面推进至 50 m 时有所增大。由图 6(b) 所示可知,当工作面推进至 325 m 时,下煤层回采巷道围岩应力进一步增大,其中巷道两帮应力为 4 MPa,巷道顶底板为 2 MPa,相较于回采巷道掘进期,巷道两帮应力减小,顶底板应力增大,巷道稳定性良好。

2) 覆岩位移分布特征

由图 7(a) ~ (c) 所示可知,在近距离煤层上煤

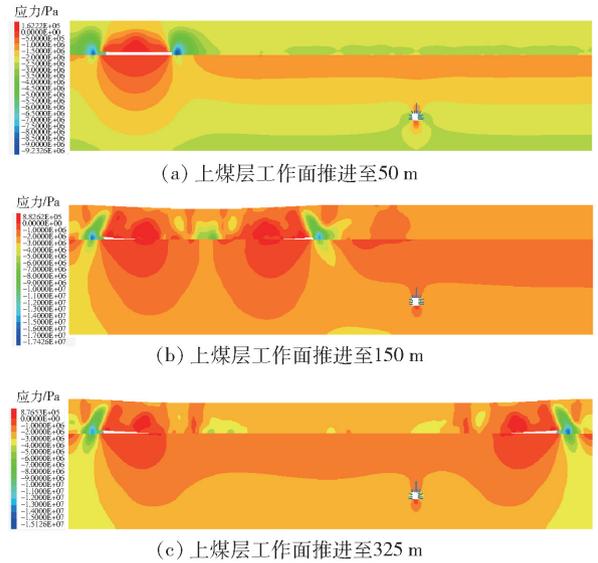


图 6 近距离煤层上煤层开采应力云图

层回采期间,上煤层覆岩随工作面的回采而发生破坏,覆岩进而发生移动。随着工作面开采范围的不断增大,上煤层覆岩移动量随之也在不断增大,当工作面推进至 325 m 时,上煤层覆岩移动量最大,其中,在上煤层 10205 工作面两侧受覆岩结构影响,煤壁上方覆岩位移量最小,其位移量为 25 cm,工作面中间位置覆岩移动量最大,其位移量为 2.9 m。因

下煤层仅存在 20203 回采巷道,未发生采矿活动,层间岩层不受下煤层采矿活动影响,覆岩结构完整未发生破坏,不存在位移。

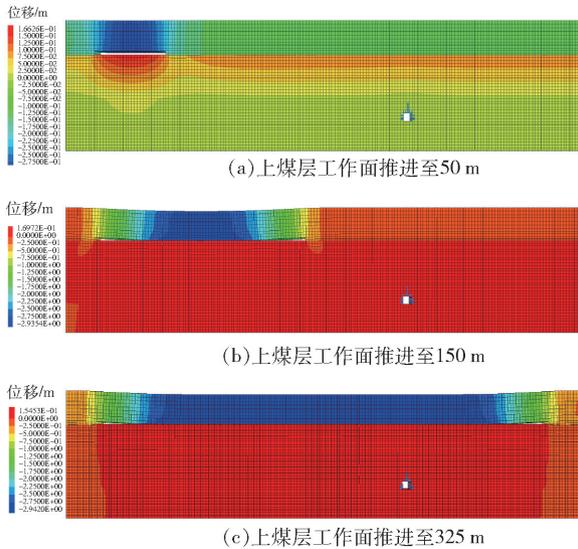


图 7 近距离煤层上煤层开采位移云图

3) 覆岩塑性区分布特征

由图 8(a) 所示可知,当工作面推进至 50 m 时,上煤层工作面中间覆岩发生拉伸破坏,顶板覆岩破坏高度为 9 m,工作面两侧煤壁发生剪切破坏,在煤壁底板处发生同样发生剪切破坏,破坏深度 4 m。由图 8(b) 所示可知,当工作面推进至 150 m 时,工作面覆岩破坏范围进一步增大,其中,上煤层工作面覆岩破坏高度已至顶板,为 21.5 m,工作面两侧煤壁顶板最大破坏深度为 10 m,工作面中间底板位置发生剪切破坏,最大破坏深度为 8 m。对比上煤层工作面底板塑性破坏区域可知,工作面底板最大破坏深度位于工作面两侧煤壁底板位置。

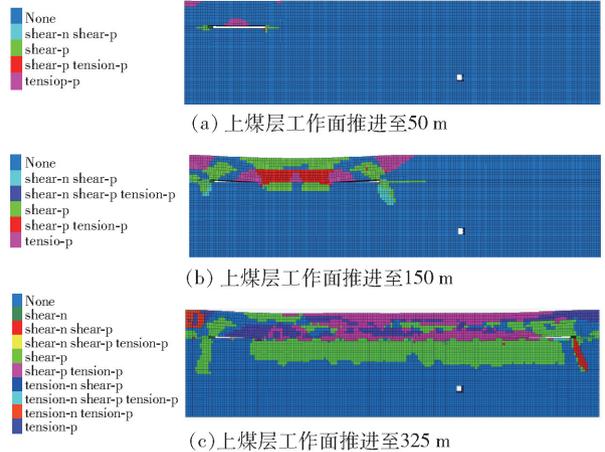


图 8 近距离煤层上煤层开采塑性区云图

由图 8(c) 所示可知,当工作面推进至 325 m 时,在近距离煤层上煤层回采期间,上煤层覆岩随工作面回采发生塑性破坏,工作面外侧覆岩发生拉伸破坏,内侧发生剪切破坏,工作面中间位置覆岩发生剪切-拉伸破坏。上煤层与下煤层之间的层间岩层受上煤层覆岩垮落的作用,其上部发生塑性破坏,其中工作面两侧受工作面边界煤柱向下的集中应力作用,发生剪切破坏,最大破坏深度为 30 m。工作面 40 ~ 300 m 处的层间岩层发生剪切破坏,其破坏深度小于工作面两侧,该区域最大破坏深度为 20 m。层间岩层下部保持完整,未发生塑性破坏。

3.3 近距离煤层群上煤层开采底板应力分布规律及破坏特征

1) 上煤层开采底板应力分布特征

大量工程实践及理论研究表明,在煤层回采的过程中会引起煤层周围出现不同的应力分布区域,在走向方向上底板应力分布与破坏特征如图 9 所示^[16-17]。形成了弧形范围内的应力变化范围,随着

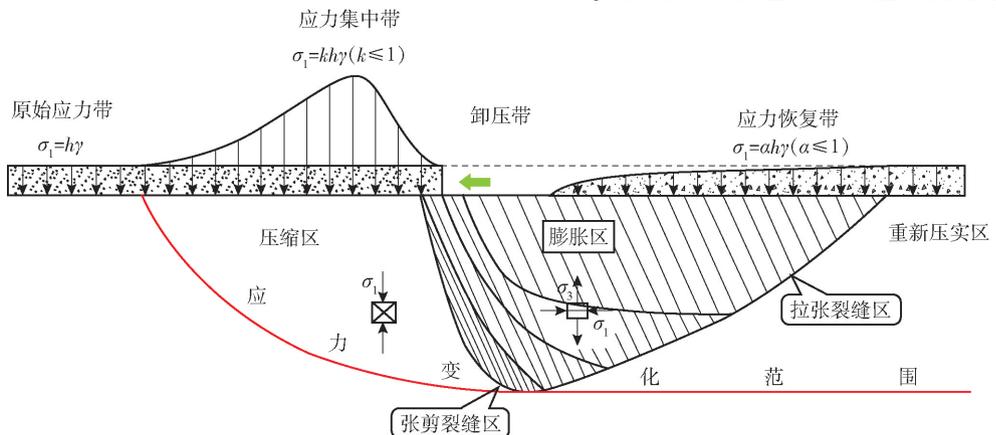


图 9 回采工作面底板应力分布范围示意图

回采工作面不断的推进,底板反复出现增压→卸压→恢复。

2) 上煤层开采底板应力分布特征

上煤层开采后沿工作面走向的水平应力分布如图 10 所示,忽略支架底座压力对底板的影响,则 CD 段底板受到的上覆载荷为 0;考虑采空区岩石压实的时间效应,假设 DE 段采空区上覆载荷随远离煤壁呈线性增大;AC 段为支承压力影响区,应力增高系数为 k 。

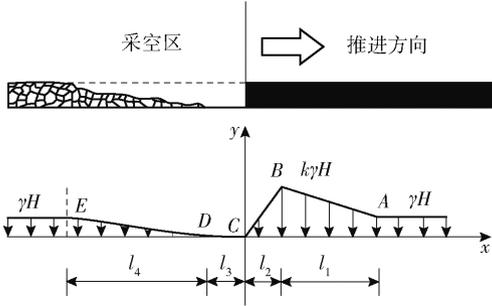


图 10 工作面走向应力分布

对三角形、梯形载荷进行简化,依据图 10 中坐标轴的正方向对前人的研究成果^[18]进行修正,得到均布载荷下底板任意点 (x_0, y_0) 的应力解析式如式(2)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x_0 - x_2}{y_0} - \arctan \frac{x_0 - x_1}{y_0} - \frac{(x_0 - x_2)y_0}{y_0^2 + (x_0 - x_2)^2} + \frac{(x_0 - x_1)y_0}{y_0^2 + (x_0 - x_1)^2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{q}{\pi} \left[\arctan \frac{x_0 - x_2}{y_0} - \arctan \frac{x_0 - x_1}{y_0} - \frac{(x_0 - x_2)y_0}{y_0^2 + (x_0 - x_2)^2} + \frac{(x_0 - x_1)y_0}{y_0^2 + (x_0 - x_1)^2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{q}{\pi} \left[\frac{y_0^2}{y_0^2 + (x_0 - x_2)^2} + \frac{y_0^2}{y_0^2 + (x_0 - x_1)^2} \right] \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: x_1, x_2 为起始点。

最终利用式(3)得到最大和最小主应力。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{aligned} \right. = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

由龙华煤矿 10205 工作面特征参数计算,设其埋深平均约为 105 m,工作面其他参数设置如下: $l_1 = 40$ m, $l_2 = l_3 = 10$ m, $l_4 = 50$ m, $k = 2.5$, 联立式(2)、(3)得到底板最大、最小主应力云图如图 11 所示。

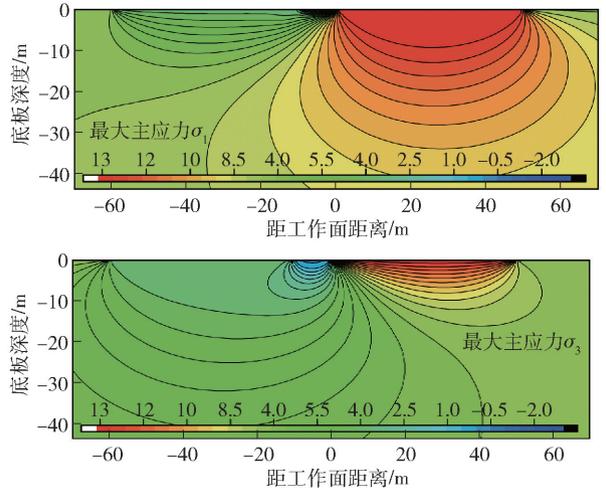


图 11 工作面底板主应力云图

由图 11 可知 1⁻²煤层 10205 工作面煤层工作面在底板最大、最小主应力的分布规律如下:① σ_1, σ_3 均呈扩散状向底板传递, σ_1 的扩散区域集中在煤壁前方的应力增高区(AC 段),而 σ_3 的扩散区域则集中在采空区的应力降低区(CE 段);② σ_1, σ_3 的梯度分布规律总体相似,均以煤壁(C 点)为分界点,并在 AC 段出现应力集中,而在 CE 段出现应力降低,二者的极值也分别出现在上述两个区域。

3.4 上煤层开采底板破坏深度

上煤层采空区顶板垮落方式不同,下煤层的应力环境就不同,利用上煤层开采底板破坏深度滑移线场理论针对长壁式开采覆岩充分垮落情况下的上煤层开采底板破坏状况进行分析^[19-20]。

根据滑移线场理论相关知识^[21],建立模型如图 12 所示。

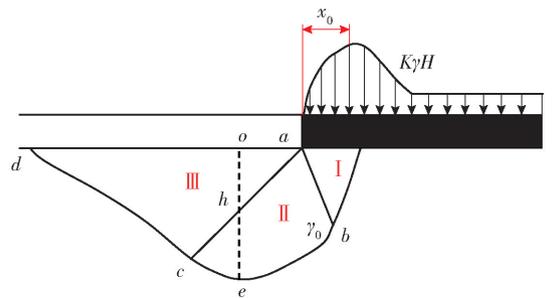


图 12 支承压力作用下底板破坏深度

根据滑移线场理论计算得出底板破坏深度计算公式如下:

$$h = r_0 \cdot e^{\alpha \cdot \tan \varphi_f} \cdot \cos \left(\alpha + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (4)$$

$$r_0 = \frac{x_0}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right)} \quad (5)$$

式(4)对 α 求一阶导,并令该导数等于0为:

$$\frac{dh}{d\alpha} = r_0 \cdot e^{\alpha \tan \varphi_f} \cdot \cos \left(\alpha + \frac{\varphi_f}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \cdot \tan \varphi_f - r_0 \cdot e^{\alpha \tan \varphi_f} \cdot \sin \left(\alpha + \frac{\varphi_f}{2} - \frac{\pi}{4} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\text{则有: } \tan \varphi_f = \tan \left(\alpha + \frac{\varphi_f}{2} - \frac{\pi}{4} \right), \alpha = \frac{\varphi_f}{2} + \frac{\pi}{4}.$$

同样将上式代入到(4)便得到底板破坏深度 h 的最大值为:

$$h_{\max} = \frac{x_0 \cdot \cos \varphi_f}{2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right)} \cdot e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right) \tan \varphi_f} \quad (7)$$

根据相关文献可知,煤壁内塑性区宽度 x_0 为

$$x_0 = \frac{M}{2\xi f} \ln \frac{k\gamma H + C \cdot \cot \varphi}{\xi(p_i + C \cdot \cot \varphi)} \quad (8)$$

联立(7)与(8)便可得到采场底板破坏深度 h_{σ} 为:

$$h_{\sigma} = \frac{M \cdot \cos \varphi_f \ln \frac{k\gamma H + C \cdot \cot \varphi}{\xi(p_i + C \cdot \cot \varphi)}}{4\xi \cdot f \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right) \tan \varphi_f} \quad (9)$$

式中: M 为采厚; k 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重; H 为采深; C 为煤体内聚力; φ 为煤体内摩擦角; f 为摩擦系数; ξ 为三轴应力系数; p_i 为支架对煤帮的支承力; φ_f 为底板内摩擦角。

将龙华煤矿1⁻²煤层相关参数带入式(14)和式(20)即可求得1⁻²煤开采引起底板的破坏深度,具体计算结果如下:

$$h_{\sigma} = \frac{M \cdot \cos \varphi_f \ln \frac{k\gamma H + C \cdot \cot \varphi}{\xi(p_i + C \cdot \cot \varphi)}}{4\xi \cdot f \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_f}{2} \right) \tan \varphi_f} = 18.6 \text{ m} \quad (10)$$

基于上述计算结果可知,开采后造成的底板最大破坏深度约为18.6 m。与2.2.3中上煤层工作面底板最大破坏深度数值模拟结果20 m接近。

4 结论

(1)由FLAC^{3D}数值模拟分析得出,龙华煤矿下煤层20203回采巷道掘进初期,巷道围岩应力整体呈现出均匀稳定的变化,在现有支护参数下,回采巷

道围岩位移量及塑性破坏区域得到了有效控制。

(2)下煤层回采巷道围岩应力相较于掘进期,巷道两帮应力减小4 MPa,巷道顶底板应力增大2 MPa,回采巷道在上煤层开采过程中保持稳定;上煤层工作面两侧受覆岩结构影响,煤壁上方覆岩位移量最小,其位移量为25 cm,工作面中间位置覆岩移动量最大,其位移量为2.9 m;上煤层工作面底板最大破坏深度为20 m,塑性区占层间岩层厚度的50%。

(3)1⁻²煤层10205工作面煤层工作面在底板最大、最小主应力的分布规律为: σ_1 、 σ_3 均呈扩散状向底板传递, σ_1 的扩散区域集中在煤壁前方的应力增高区,而 σ_3 的扩散区域则集中在采空区的应力降低区; σ_1 、 σ_3 的梯度分布规律总体相似,均以煤壁为分界点。基于滑移线理论计算了上煤层底板最大破坏深度得到理论计算值为18.6 m,与数值模拟结果类似。

[参考文献]

- [1] 刘厅,林柏泉,赵洋,等.瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(2):217-231.
- [2] 冉启灿,梁运培,邹全乐,等.倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J].煤炭科学技术,2024,52(4):177-192.
- [3] 邹全乐,王鑫,李左媛,等.木质素磺酸钙对固井水泥石变形破坏特性的影响及其改性机制[J].煤炭学报,2023,48(4):1606-1621.
- [4] 刘厅,赵洋,林柏泉.双重卸压效应下煤体力学行为响应及对渗透率的影响规律[J].煤炭学报,2022,47(7):2656-2667.
- [5] 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.
- [6] 邓兆睿,孙德全,任仲久,等.近距离煤层群半煤岩上保护层开采卸压增透效应研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(2):023524.
- [7] 王志强,苏越,苏泽华,等.外错式区段间相邻巷道锚杆联合支护作用机理研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1):58-67.
- [8] 梁运培,刘莹,邹全乐,等.纳米氧化铝改性地面井固井水泥水化机制研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):68-78.
- [9] 董宇,谢文兵,荆升国,等.近距离煤层采空区下回采巷道高强稳定型支护技术[J].煤炭科学技术,2013,41(2):19-23.