

上盘采空断层下盘开采的煤柱宽度优化研究*

伍永平^{1,2}, 曹建利², 孙明明³, 张浩^{1,2}, 皇甫靖宇², 杜玉乾², 胡涛²

(1.西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2.西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;

3.中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要:在断层和采动影响下,下盘工作面断层侧煤柱宽度制约着工作面的安全生产。以黄陵煤矿二盘区203下盘工作面为工程背景,采用理论分析、数值模拟和相似模拟相结合的方法,研究上盘工作面采空后,下盘工作面断层侧煤柱上方载荷与煤柱尺寸之间的关系,揭示煤柱宽度为30, 26, 22, 20, 13和6 m时的位移、应力演化及塑性区分布特征,分析煤柱宽度为30 m时的覆岩结构特征,并通过综合分析,优化了工作面合理煤柱宽度。研究表明:上盘工作面采空时,在断层和采动的影响下,随着煤柱宽度的减小,下盘工作面断层侧煤柱上方的载荷分为载荷降低区、载荷过渡区和载荷稳定区;当煤柱宽度为30 m时,下盘工作面断层侧高位岩层出现离层,煤柱上方应力集中程度大于另一侧,承载能力强,稳定性高;当煤柱宽度减小至22 m时,靠近断层侧的顶板最大下沉量和应力集中程度显著增大,煤柱开始发生塑性破坏,承载能力逐渐减弱;当煤柱宽度减小到13 m时,断层侧塑性区向工作面两端及上方发展至贯通煤柱,煤柱稳定性较差;当煤柱宽度减小至6 m时,靠近断层侧顶板最大下沉量和应力集中程度继续增大,塑性区继续发育。通过相似模拟试验研究发现,当煤柱宽度为30 m时,顶板垮落并充填采空区,下盘工作面断层侧煤柱上方无明显变化。经综合分析,确定下盘工作面断层侧煤柱的合理宽度为18~22 m,可提高工作面回采率,同时可保证工作面安全生产。

关键词:上盘采空;下盘开采;断层侧煤柱;煤柱宽度

中图分类号:TD822⁺.3 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)04-0046-09

0 前言

断层的存在打断了岩层连续整体的赋存状态,影响围岩的稳定性^[1]。在断层和采动双重影响下,巷道围岩应力、变形等发生明显改变,造成回采巷道难以正

常使用,因此,断层侧煤柱宽度的合理留设对于回采巷道的正常使用、工作面的安全开采具有重要意义。

在煤柱宽度优化方面,国内学者进行了一系列相关研究,主要依据护巷煤柱平衡理论^[2]、极限平衡理论^[3-6]、煤矿防治水细则^[7-10]、强度理论^[11-12]、内外应力场理论^[13-14]等计算煤柱宽度,通过数值模拟和相似模拟试验等方法研究巷道的应力分布、塑性区等特征,优化煤柱宽度,提高工作面的开采率,保证工作面的安全稳定生产。但已有的研究主要集中在断层影响下防水煤柱、区段异形煤柱、沿空掘进煤柱宽度优化等,鲜有考虑在断层和工作面一侧采空条件下的断层侧煤柱宽度留设问题。有学者考虑上下盘开采顺序,采空区形成铰接结构后断层煤柱上方载荷和煤柱尺寸的关系^[15-16],为此类工作面断层侧煤柱宽度优化提供了借鉴和理论基础,但并没有深入研究一盘已采,另一盘在采动和断层影响下的断层侧煤柱宽度留设问题。因此,笔者在此基础上,结合数值模拟和相似模拟试验,以黄陵煤矿二盘区203下盘工作面为工程背景,分析断层侧煤柱上方载荷与煤柱宽度关系,揭示工作面不同煤柱宽度条件下的覆岩运移、应力演化、塑性区分布和覆岩结构特征,优化了煤柱宽度,为该类型工作面的安全开采提供一定的借鉴。

1 工程概况

黄陵煤矿位于黄陵矿区南部,201工作面位于该煤矿北部二盘区,呈东西向布置,北侧为规划的203工作面,西侧为井田边界,南侧为进风顺槽,东侧为北翼回风大巷。201工作面长度为180 m,203工作面长度为150 m。煤层走向长度为2272 m,埋深270

* 收稿日期:2023-07-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51974230,52204151,52104147)。

作者简介:伍永平(1962—),男,陕西汉中,人,博士,教授,博士生导师,从事大倾角煤层走向长壁综合机械化开采技术研究,E-mail:wuyyp@xust.edu.cn。

通信作者:曹建利(1995—),男,陕西商洛人,硕士研究生,主要从事相似材料模拟试验研究,E-mail:2936236515@qq.com。

m,平均厚 2.1 m,倾角为 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$,煤层平均抗压强度为 14.04 MPa;直接顶以泥岩为主,平均厚度为 2.5 m;基本顶以细粒砂岩、粉砂岩为主,平均厚度为 14 m;直接底以泥岩为主,平均厚度为 1.5 m。201 工作面至 203 工作面之间存在与工作面推进方向平行且横贯

井田境界东西两侧的 3DF4 断层,断层倾角为 74° ,断层落差为 5 m,如图 1 所示。201 上盘工作面已采,在 203 下盘工作面采动和断层影响下,断层侧巷道容易发生冒顶、破坏,因此需要设计合理的煤柱宽度,以保证下盘工作面的安全开采,提高工作面开采率。

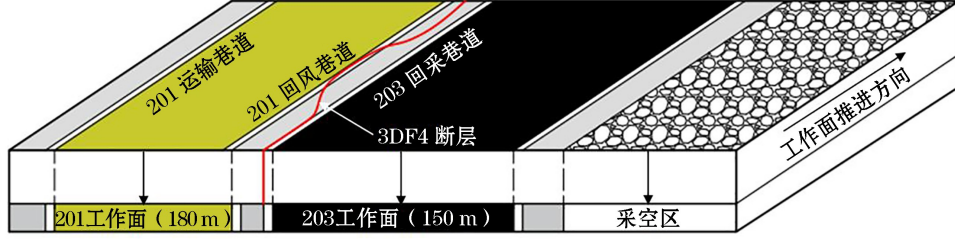


图 1 工作面分布

Fig.1 Distribution of working faces

2 下盘工作面煤柱宽度优化理论分析

断层上盘工作面开采时,采空区基本顶断块垮落形成铰接结构,断层面面向另一侧倾斜,煤柱上方载荷一部分由破断铰接块体提供,另一部分来自于上覆岩层自身载荷,载荷由断层面、断层侧煤柱和工作面矸石共同承担。为便于表述,在含有断层的工作面,将已经开采的工作面称为已采盘,将未采的工作面称为待采盘。如图 2 所示。

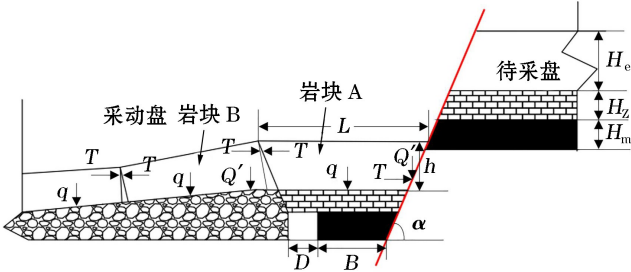


图 2 断层上盘工作面开采时采空区基本顶断块结构

Fig.2 Fault block structure of basic roof in the goaf during mining in the upper wall working face of fault

根据砌体梁理论^[17-18],建立力学平衡方程,其中工作面矸石上方基本顶断块载荷的二分之一由工作面矸石承担,另外二分之一由断层侧煤柱上方基本顶岩梁传递给煤柱及断层面,断层面按照一定压力传递系数 K_1 将断层侧煤柱上方基本顶岩梁载荷的二分之一及工作面矸石上方旋转断块的垂直载荷传递到待采盘,则通过断层面传递到待采盘的载荷^[15]为:

$$Q_1 = K_1 \left(qL_A + \frac{Q'}{2} \right) = K_1 \left(qL_A + \frac{qL_A}{2} \right) = \frac{3K_1 qL_A}{2} \quad (1)$$

式中, Q_1 为上盘工作面(采动盘)采空区基本顶破断岩块传递给待采盘的集中载荷, MN/m; Q' 为工作

面矸石上方基本顶旋转破断岩块传递给煤柱上方基本顶岩块的载荷, $Q' = qL$, MN/m; K_1 为上盘工作面(采动盘)通过断面向待采盘传递压力的系数; q 为上盘工作面(采动盘)上方基本顶断裂岩块单位面积承受的上覆岩层载荷, $q = \gamma h$, MN/m²; γ 为上盘工作面(采动盘)煤柱上方基本顶破断岩块上覆岩层平均容重, N/m³; h 为上盘工作面(采动盘)煤柱上方基本顶断裂岩梁上覆岩层及本层厚度, m; L_A 为上盘工作面(采动盘)煤柱上方基本顶断裂岩块 A 的长度^[19], m。

$$L_A = \frac{2L_1}{17} \left[\sqrt{\left(10 \frac{L_1}{S} \right)^2 + 102} - 10 \frac{L_1}{S} \right] \quad (2)$$

式中, L_1 为周期来压步距, m; S 为工作面长度, m。

根据现场观测, 201 工作面周期来压步距为 16~18 m, 取平均值 17 m, 工作面长度 180 m, 代入式(2)可得岩块 A 的长度 L_A 为 18.4 m。

断层上盘工作面(采动盘)开采后, 下盘工作面面向断层方向开采, 即开采待采盘, 原先的采动盘成为已采盘, 待采盘成为采动盘, 采空区基本顶断块形成铰接结构, 如图 3 所示。

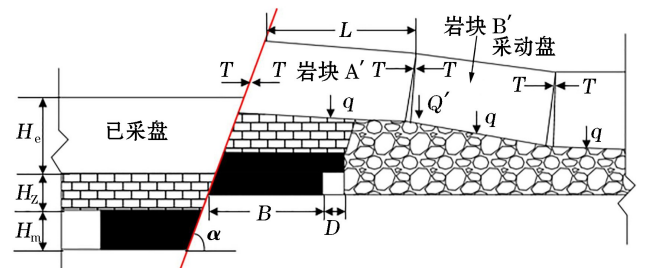


图 3 断层下盘工作面采动时采空区基本顶断块结构

Fig.3 Fault block structure of basic roof in the goaf during mining in the foot wall working face of fault

采动盘工作面断层煤柱上方载荷一部分来自于

采空区上方基本顶旋转断块挤压,一部分来自煤柱上方覆岩自身载荷,另一部分是已采盘通过断层面传递到采动盘的载荷,其中部分载荷由采动盘通过断面向已采盘传递(若已采盘断层侧留有煤柱),则下盘工作面(已采盘)通过断层面传递到采动盘煤柱上方的载荷 Q_2 由式(1)计算得,即 $Q_2=Q_1$ 。

未通过断层面传递到采动盘的载荷为:

$$\begin{aligned} Q_3 &= (1-K_2)(qL'_A + \frac{Q'}{2}) = \\ K_2(qL'_A + \frac{qL'_A}{2}) &= \frac{3(1-K_2)qL'_A}{2} \quad (3) \\ q_d &= \frac{\frac{3q(K_1L_A + (1-K_2)L'_A)}{2} + \gamma_z h_z (B + D - h_d c \tan \alpha - \frac{h_z c \tan \alpha}{2}) + \gamma_d h_d (B + D - \frac{h_d c \tan \alpha}{2})}{B} + \gamma H \quad (4) \end{aligned}$$

式中, q_d 为断层煤柱上覆载荷, MN/m^2 ; γ_z 为直接顶岩层容重, N/m^3 ; h_z 为直接顶岩层厚度, m ; γ_d 为煤层的容重, N/m^3 ; h_d 为煤厚, m ; α 为断层倾角, $(^\circ)$; B 为断层煤柱宽度, m ; D 为断层面附近回采巷道的宽度, m ; γ 为基本顶上覆岩层的容重, N/m^3 ; H 为基本顶上覆岩层厚度, m 。

从式(4)可看出:在已采盘工作面断层侧煤柱宽度已知情况下,煤柱上方的载荷与断层面压力传递系数、煤柱宽度有关。煤柱宽度越小,载荷向已采盘传递的系数越大,已采盘煤柱承担载荷越大,而传递到采动盘断层侧煤柱上方的载荷越小。当煤柱尺寸小到无法承受采空区基本顶施加的载荷时,采空区基本顶承受的载荷将全部通过断层传递给已采盘,此时断面向已采盘传递压力的系数 K_2 取 1。考虑到采动和断层的影响,采动盘断层侧回采巷道的变形破坏将会更加严重,增加冲击矿压风险。

黄陵煤矿二盘区煤层、直接顶、基本顶的参数见第 1 节,基本顶上方载荷层厚度取 30 m,回采巷道宽度取 4 m。在不考虑断层带宽度影响的条件下,断层的荷载传递系数与断层煤柱尺寸的关系见表 1 和图 4。

分析图 4 可知,随着下盘工作面断层侧煤柱尺寸的减小,煤柱上方载荷不断增加,采动盘断层侧煤柱上方载荷与煤柱尺寸关系呈负相关。在下盘工作面断层侧煤柱尺寸为 6~0 m 时,煤柱上方载荷随煤柱宽度的增加急剧减小,降低了 61.48%,处于载荷降低区,表明随着煤柱宽度的减小,受断层及采动盘影响,较小的煤柱承载能力急剧下降;煤柱宽度在 18~6 m 时,煤柱上方载荷减小缓慢,降低了 7.86%,处于载荷过渡区,表明煤柱宽度在 18 m 至 6 m 之间逐渐减小时,煤柱的承载能力也逐渐减弱;煤柱宽度大于 18 m 后,载荷基本无明显变化,降低了 3.1%,处于

式中, Q_3 为下盘工作面(采动盘)采空区基本顶破断岩块传递给采动盘断层侧煤柱上方的集中载荷, MN/m ; K_2 为从采动盘通过断层向已采盘传递载荷的压力系数; L'_A 为采动盘煤柱上方及工作面矸石上方基本顶断裂岩块 A' 的长度,由式(2)计算得到 $L'_A=16.5\text{ m}$ 。

在已采盘留设 20 m 煤柱时,断层与采空区之间的煤柱上承受的载荷为整个基本顶断块结构所承担的载荷与直接顶、顶煤和已采盘通过断层面传递的载荷的总和,则煤柱上的载荷强度 q_d 为:

载荷平稳区,表明断层和开采扰动对断层侧煤柱的稳定性无明显影响。合理的断层煤柱宽度应该处于围岩应力稳定区域,若要提高工作面的开采率,可允许有一定的塑性区。根据图 4 分析可知,在煤柱宽度大于 10~12 m,采动盘断层侧煤柱上方载荷变化率开始趋于稳定,因此确定煤柱宽度应大于 12 m。

表 1 不同断层煤柱尺寸下的压力传递系数 $K^{[15]}$

Table 1 Pressure transfer coefficient K under different coal pillar widths of fault^[15]

煤柱尺寸/m	向下盘传递压力的系数 K_1	向上盘传递压力的系数 K_2
0	1.00	1.00
2	1.00	0.96
4	0.97	0.92
6	0.92	0.87
8	0.88	0.82
10	0.84	0.78
12	0.80	0.74
14	0.74	0.68
16	0.70	0.64
20	0.60	0.60
25	0.48	0.54
30	0.36	0.46
35	0.24	0.30
40	0.10	0.24
45	0	0.10

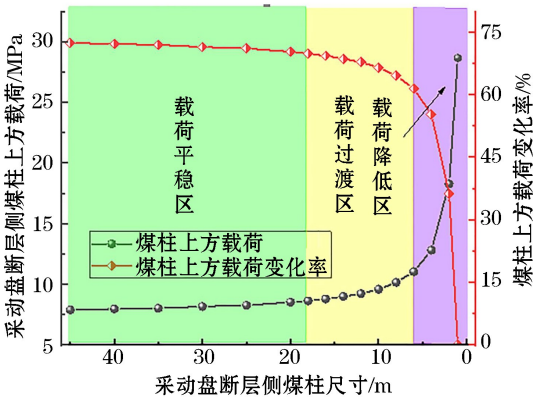


图 4 采动盘断层侧煤柱上方载荷与煤柱尺寸的关系

Fig.4 Relationship between load above the coal pillar on the fault side of the mining area and the size of the coal pillar

3 下盘工作面不同煤柱宽度的模拟分析

基于上述理论计算结果,在上盘开采距离断层20 m处,从下盘工作面向断层侧开挖,在断层侧分别留设宽度为30 m、26 m、22 m、20 m、13 m和6 m的煤柱,分析不同煤柱宽度下工作面和断层侧煤柱上方的位移、应力演化、塑性区特征及覆岩结构特征,旨在为下盘工作面断层侧煤柱合理宽度优化提供借鉴。

3.1 数值模拟设计

采用FLAC3D数值模拟软件建立计算模型,模型尺寸为:长(X)×宽(Y)×高(Z)=880 m×565 m×283 m(Z值为模拟地表最高点高度),工作面沿x

轴负方向推进,采用摩尔-库伦塑性本构模型,用brick单元模拟煤层及围岩,模型底部限制竖向移动,模型前后和侧面采用位移约束限制水平向移动,然后进行模型初始最大不平衡力计算,待模型达到初始平衡后进行开挖。数值模型及测线布置如图5所示,煤岩力学参数见表2。

模型中201工作面长度为180 m,203工作面长度为150 m,左右边界煤柱各留100 m,前后边界煤柱各留50 m,两工作面间煤柱宽30 m。为分析203下盘工作面断层侧和边界煤柱附近支承压力,沿煤层、直接顶及基本顶中部各布置一条测线,每条测线上隔5 m布置1个测点,对应力进行监测。

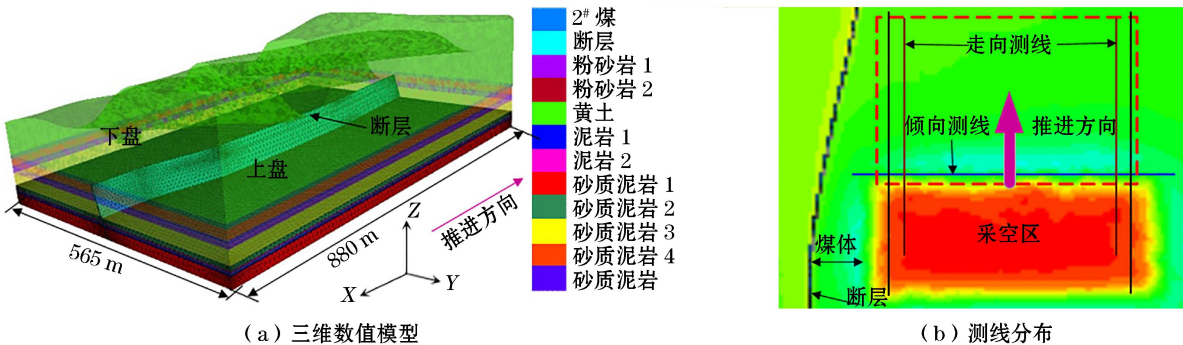


图5 三维数值模型及测线布置

Fig.5 Three dimensional numerical model and measurement line layout

表2 煤岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal rock

岩石名称	密度/(kg/m³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏结力/MPa	内摩擦角/(°)
砂质泥岩1	2310	8.30	8.00	0.09	2.00	3.50	38
泥岩1	2420	4.17	2.86	0.22	1.40	1.00	30
2#煤	1381	2.38	2.06	0.29	0.40	0.50	23
泥岩2	2420	2.77	2.86	0.09	0.33	1.00	30
砂质泥岩2	2310	4.16	2.10	0.09	2.00	3.50	38
砂质泥岩3	2310	2.13	1.60	0.09	2.00	3.50	38
粉砂岩1	2530	3.37	1.76	0.14	0.60	1.20	34
细粒砂岩	2640	3.22	2.51	0.09	2.10	2.40	29
砂质泥岩4	2530	2.13	1.76	0.09	1.90	3.50	38
粉砂岩2	2530	3.37	3.81	0.14	2.40	4.70	24
黄土	1910	7.68	0.80	0.31	34.00	1.28	18

向的前方煤壁5 m、10 m、15 m、20 m、25 m和30 m,工作面上下端头附近沿倾向各布置一条测线,观测工作面端头及前方煤壁超前支承压力,考虑到模型计算时边界效应的影响,使主要研究区域处于边界效应影响的范围之外,以达到更接近实际的计算结果。

3.2 结果分析

3.2.1 垂直位移分布

由图6可以看出,上盘201工作面开采完毕,下盘203工作面向断层方面开采,工作面顶板中部运移量最大,随着煤柱宽度的减小,靠近断层侧工作面顶板运移量有所增加,位移拱谷向断层侧偏移。这表明随着煤柱宽度的减小,煤柱逐渐发生破坏,承载能力逐渐减弱。

同时,分别在201工作面和203工作面推进方

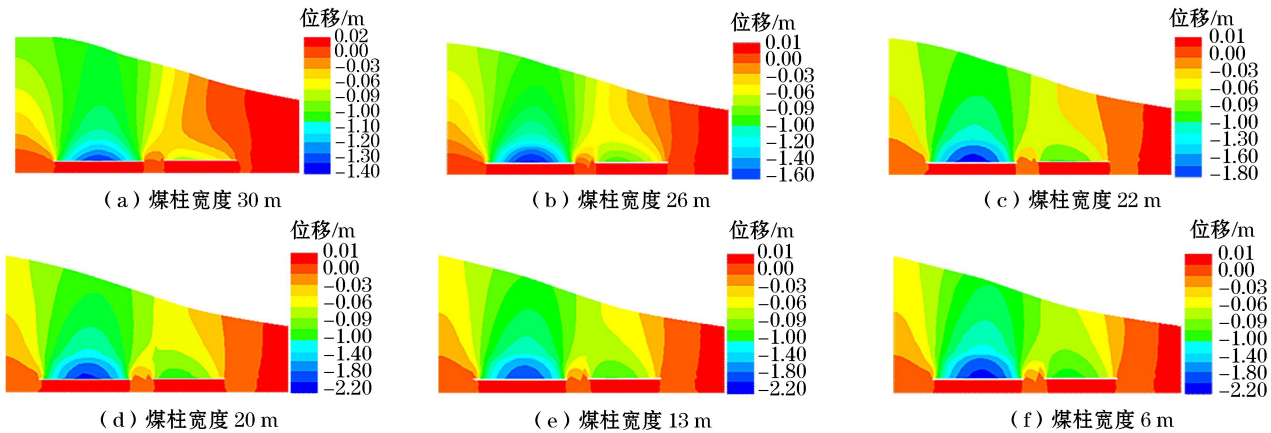


图6 不同煤柱宽度下顶板垂直位移分布云图

Fig.6 Cloud map of vertical displacement distribution of roof under different coal pillar widths

由图 7 可以看出,在断层侧煤柱宽度为 30~26 m 的条件下,因工作面中部靠近断层侧出现离层(见图 12),导致工作面垂直位移较大。当煤柱宽度由 22 m 减小至 6 m 时,最大下沉量由 77.61 mm 增至 107.55 mm。分析可知,煤柱宽度越小,承载能力越低,对顶板约束作用越弱,靠近断层侧的顶板下沉量越大,呈“反拱形”的垂直位移曲线的拱谷向断层方向偏移越明显。图 8 为下盘工作面推进过程中顶板垂直位移分布图,可以看出,下盘工作面顶板下沉曲线呈偏拱形态,拱峰向断层方向偏移,断层侧顶板下沉剧烈,围岩下沉整体性强,下沉量突增,存在大面积冒顶的危险。

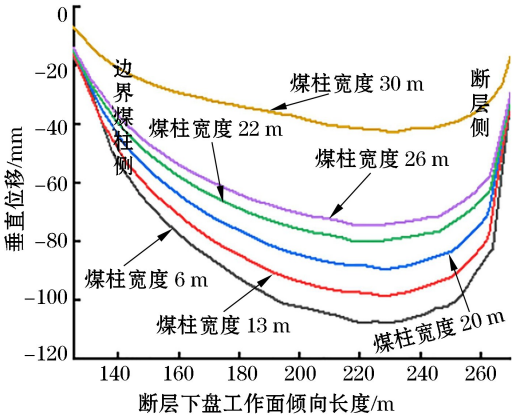


图 7 不同煤柱宽度下顶板垂直位移分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of vertical displacement of roof under different coal pillar widths

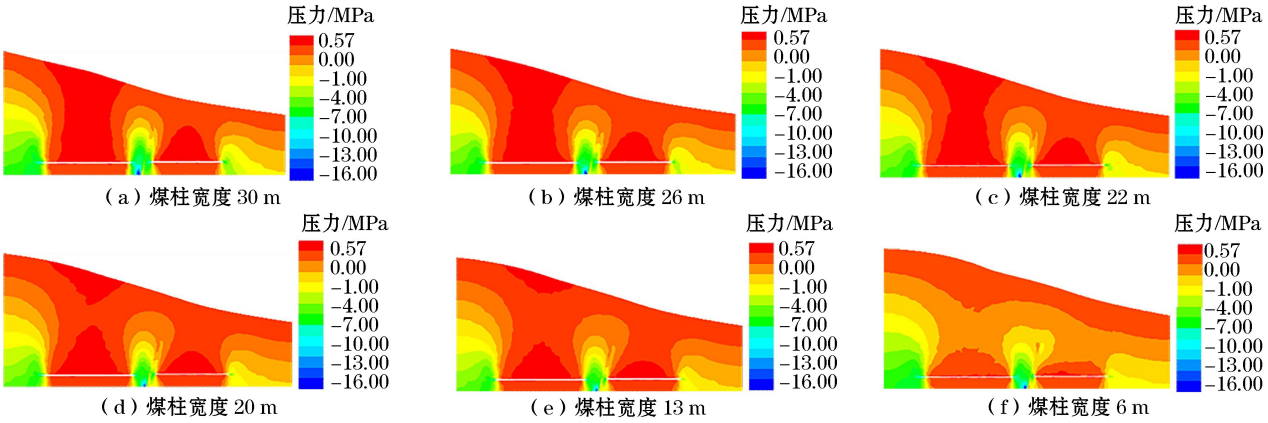


图 9 不同煤柱宽度下顶板支承压力分布云图

Fig.9 Cloud map of roof support pressure distribution under different coal pillar widths

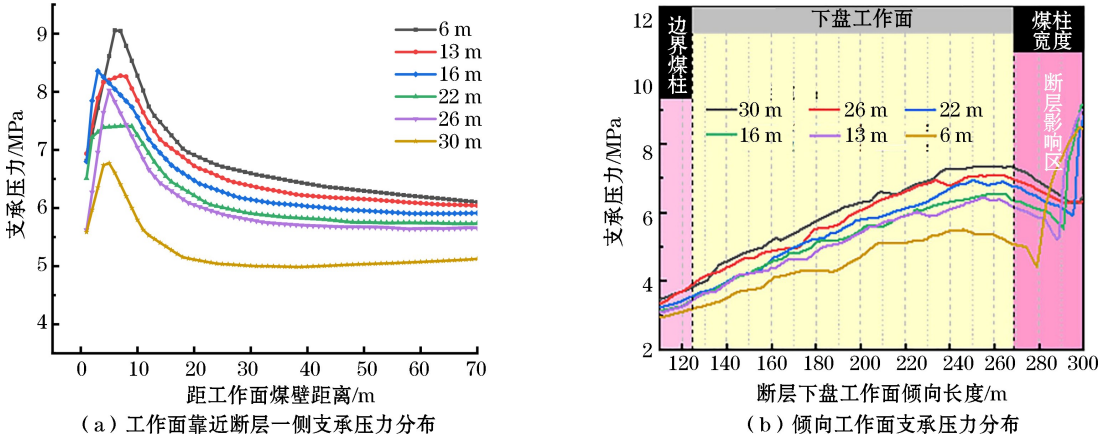


图 10 下盘工作面不同煤柱宽度下的支承压力曲线

Fig.10 Support pressure curves of the foot wall working face under different coal pillar widths

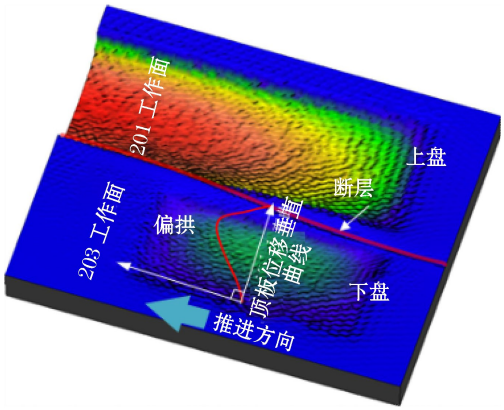


图 8 下盘工作面顶板垂直位移分布

Fig.8 Vertical displacement distribution of roof of the foot wall working face

3.2.2 垂直应力分布

图 9 为下盘工作面断层侧不同煤柱宽度下垂直应力分布云图。煤柱宽度为 30 m 时,工作面两端头处顶板应力集中,靠近断层侧顶板应力集中程度大于另一侧,断层阻隔效应不明显。当煤柱宽度减小为 22 m 时,工作面两端头侧顶板应力集中程度不断升高,当煤柱宽度减小为 13 m 时,小煤柱承载能力显著降低。

在模型测线布置上提取煤柱宽度为 30 m、26 m、22 m、20 m、13 m、6 m 时工作面端头的支承压力,绘制下盘工作面断层侧不同煤柱宽度下的支承压力曲线(见图 10)。

由图 10(a)可知,当煤柱宽度为 30, 26, 22, 20, 13, 6 m 时,应力峰值分别为6.77, 8.02, 7.41, 8.35, 8.45, 9.05 MPa,应力集中系数分别为 2.25, 2.67, 2.47, 2.78, 2.82, 3.02。随着断层侧煤柱宽度不断减小,断层侧煤柱支承压压力明显升高,应力集中程度愈加明显。由图 10(b)可知,无论煤柱宽度大小,断层带始终处于低应力状态,工作面靠近断层侧煤柱的应力集中程度大于另一侧,且随着煤柱宽度的减小,采动应力升高。由于上盘工作面已采,此时下盘煤柱所承受的载荷除了煤柱上方覆岩的载荷,还有上盘通过断层向下盘传递的载荷,煤柱所承载的应力远高于上盘未采时的应力,导致断层侧工作面支承压最大,中部次之,边界煤柱侧最小。

3.2.3 塑性区分布特征

图 11 为不同煤柱宽度下的顶板塑性区分布云图,由图 11 可知,在上盘工作面已采情况下,下盘工作面断层侧煤柱宽度为 30 m 时并未破坏,此时顶板和断层侧煤柱塑性区范围较小。随着煤柱宽度减小,塑性区范围逐渐扩展,煤柱宽度减小至 22 m 时,工作面两端头上方岩层破坏高度大于工作面中部上方顶板。煤柱宽度减小为 13 m,下盘工作面断层侧塑性区贯通煤柱,煤柱稳定性较低。煤柱宽度减小至 6 m 时,断层活化加剧,顶板破坏范围向工作面两侧及上方扩展,下盘工作面断层侧塑性区发育范围进一步增大,而下盘煤柱上方部分直接顶及断层上盘高位岩层未受影响,为稳定区域。

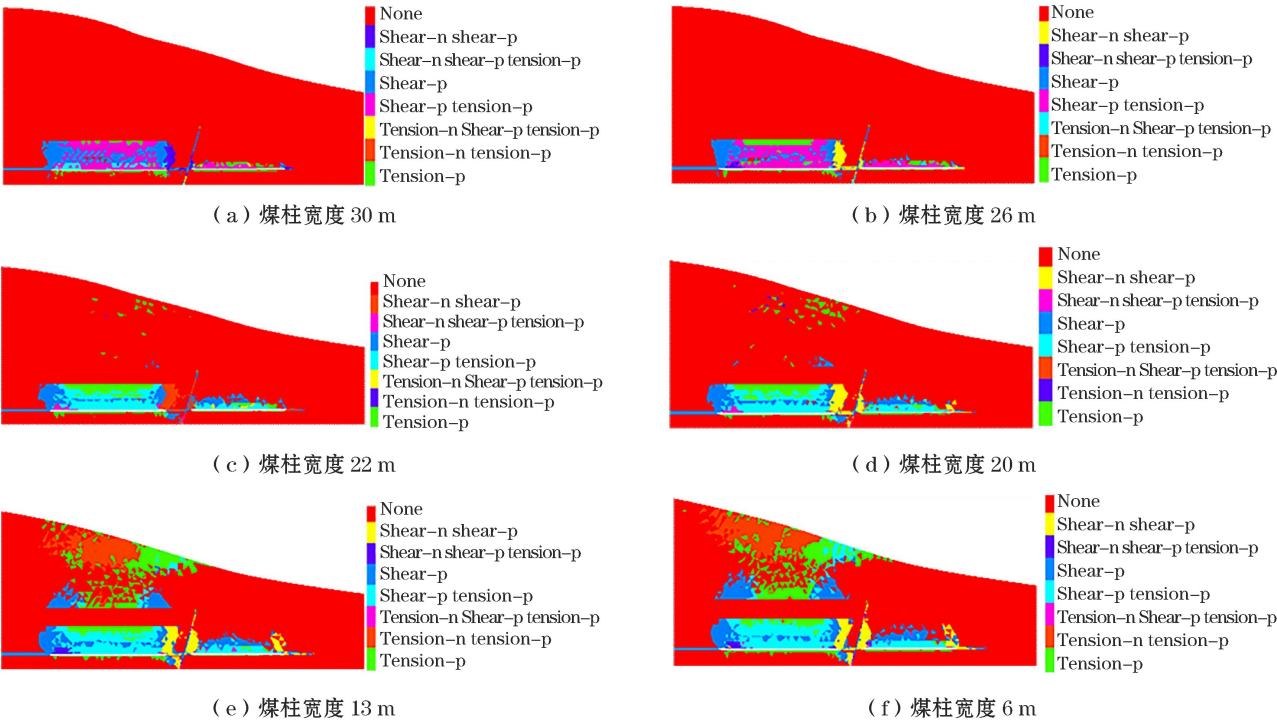


图 11 不同煤柱宽度下的顶板塑性区分布

Fig.11 Plastic zone distribution of roof under different coal pillar widths

3.2.4 覆岩结构分析

根据二盘区 201 工作面、203 工作面顶底板岩性及物理力学参数,将河沙、粉煤灰、石膏、大白粉等相似材料按照不同配比混合搅拌均匀,然后装入模型架,模型几何相似比 $C_L=100$,容重相似比 $C_\rho=1.6$,其他相似比关系可根据几何相似比和容重相似比计算得出。断层由力学强度较低的不规则泥岩岩块铺搭而成。通过填充、夯实制作成模型。上盘工作面无煤柱、下盘工作面断层侧留设 30 m 煤柱时,断层巷道附近的覆岩结构如图 12 所示。203 下盘工作面低位岩层垮落,采空区基本顶岩块破断形成铰接结构,移架前,巷道顶板稳定,移架后,在断层影

响和采动影响下,高位岩层出现离层,巷道顶板明显发生冒顶,甚至可能诱发断层活化或冲击地压现象。

为进一步说明下盘工作面断层侧留设 30 m 煤柱时覆岩结构特征,采用散斑测量的方法获取断层两侧工作面顶板位移数据,绘制顶板下沉位移云图,如图 13 所示。由图 13 可以看出,断层侧上盘工作面发生明显变形,而断层侧下盘工作面煤柱上方无明显位移变化,高位岩层形成类似“倒梯形”覆岩结构向工作面发生回转现象,距断层较远处高位顶板明显下沉,下沉量为 5.48 mm,但受到采空区矸石的支承作用,运移量并不明显,下盘工作面断层侧煤柱附近并无明显影响。

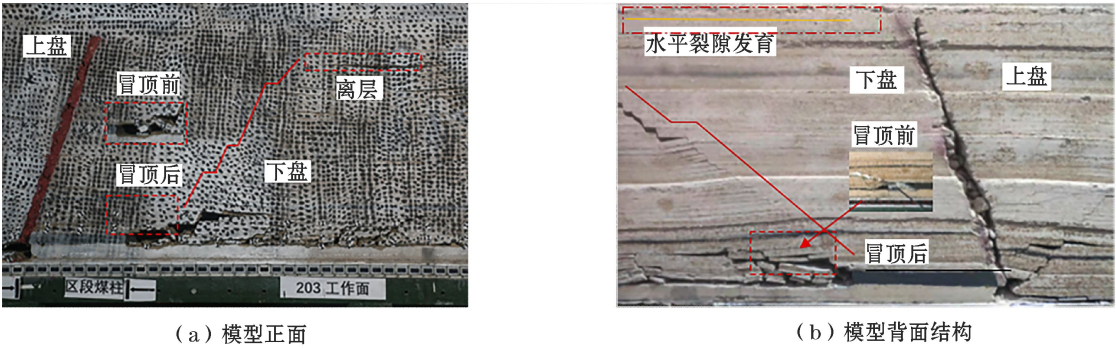


图 12 断层侧下盘开采区域覆岩结构特征

Fig.12 Characteristics of overburden structure in the mining area of the foot wall on the fault side

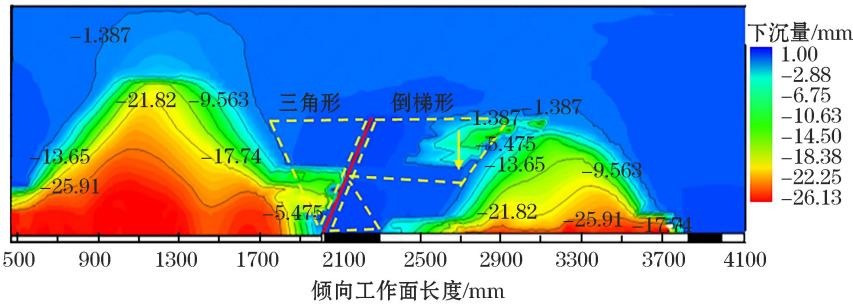


图 13 顶板下沉位移云图

Fig.13 Cloud map of roof subsidence displacement

4 煤柱宽度优化分析

(1) 通过理论分析,确定了上盘已采,下盘工作面断层侧煤柱宽度在 18~6 m 时,煤柱上方载荷处于过渡区;在 10~12 m 时煤柱载荷变化率开始趋于稳定,据此确定下盘工作面断层侧煤柱宽度为 12~18 m。

(2) 采用 FLAC3D 建立上盘已采,下盘工作面断层侧煤柱宽度分别为 30, 26, 22, 20, 13 和 6 m 的三维数值模型。在上盘采空和断层影响下,在煤柱宽度为 30 m 时,工作面靠近断层侧煤柱上方应力集中大于另一侧,煤柱承载能力强;在煤柱宽度减小至 22 m 时,断层侧应力集中和顶板下沉量明显增大,煤柱开始发生塑性破坏,承载能力降低;煤柱宽度减小至 13 m 时,塑性区贯通小煤柱,承载能力较差;煤柱宽度减小至 6 m 时,靠近断层侧顶板最大下沉量和应力集中程度继续增大,塑性区继续发育,煤柱承载能力进一步降低。相似模拟试验结果表明,在下盘工作面断层侧煤柱宽度为 30 m 时,煤柱上方无明显位移,顶板垮落充填采空区。

因此,综合理论分析、数值模拟和相似模拟试验,在既提高工作面煤炭开采率,又保证工作面的安全开采的前提下,确定黄陵煤矿二盘区下盘工作面断层侧煤柱的合理宽度为 18~22 m。

5 结论

通过理论分析和数值模拟等方法优化了黄陵煤矿二盘区下盘工作面断层侧煤柱宽度,并得到以下的结论。

(1) 下盘工作面断层侧煤柱上方载荷与煤柱宽度尺寸呈负相关,依据煤柱载荷下降趋势,分为载荷降低区、载荷过渡区和载荷平稳区。

(2) 下盘工作面中部垂直位移最大、应力释放,两端垂直位移较小,应力集中程度明显,塑性区处于低位岩层及工作面两端。随着断层侧煤柱宽度的减小,垂直位移向断层侧转移,断层煤柱上方应力集中明显,塑性区向工作面两端及上方发育,煤柱承载能力减弱,稳定性降低。

(3) 在提高工作面开采率和保障工作面安全开采的前提下,确定工作面断层侧煤柱的合理宽度为 18~22 m。

参考文献(References):

[1] 孙延斌,宋厚武,彭向锋.沿断层异形区段煤柱密集钻孔卸压护巷技术研究[J].煤炭工程,2023,55(3):36-40.
SUN Yanbin, SONG Houwu, PENG Xiangfeng. Dense drilling pressure relief in irregular district pillar along fault [J]. Coal Engineering, 2023, 55(3): 36-40.

[2] 殷帅峰,李娅琪,李昊,等.沿空煤巷过断层破碎带围岩控制技术[J].矿业安全与环保,2022,49(5):102-108.

- YIN Shuaifeng, LI Yaqi, LI Hao, et al. Study on surrounding rock control technology of gob-side entry passing through fault fracture zone [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(5): 102-108.
- [3] 张伟光,张腾飞,陈俊智,等.近距离煤层群开采遗留煤柱下沿空掘巷煤柱宽度研究[J].新疆地质, 2022, 40(4): 542-547.
- ZHANG Weiguang, ZHANG Tengfei, CHEN Junzhi, et al. Study on the width of coal pillar in goaf roadway under short seam group mining [J]. Xinjiang Geology, 2022, 40(4): 542-547.
- [4] 李金刚.特厚煤层综放沿空掘巷煤柱宽度及支护优化研究[D].包头:内蒙古科技大学, 2020.
- LI Jingang. Research on coal pillar width and support optimization of roadway driving along goaf in extra-thick coal seam [D]. Baotou: Inner Mongolia University Of Science & Technology, 2020.
- [5] 高晓旭,史向前,石新禹,等.浅埋工作面区段煤柱留设尺寸优化研究[J].矿业安全与环保, 2023, 50(3): 68-73+80.
- GAO Xiaoxu, SHI Xiangqian, SHI Xinyu, et al. Study on the optimization of reserved size of section coal pillar in shallow buried working face [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(3): 68-73+80.
- [6] 姜耀东,宋红华,马振乾,等.基于地应力反演的构造应力区沿空巷道窄煤柱宽度优化研究[J].煤炭学报, 2018, 43(2): 319-326.
- JIANG Yaodong, SONG Honghua, MA Zhenqian, et al. Optimization research on the width of narrow coal pillar along goaf tunnel in tectonic stress zone [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 319-326.
- [7] 邓兆睿.赵楼煤矿深部断层采动活化应力演化特征及防水煤柱合理留设研究[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2021.
- DENG Zhaorui. Research on evolution characteristics of activation stress in deep fault mining and reasonable setting of waterproof coal pillar in Zhaolou coal mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [8] 王浩杰,方家虎,孙萍.钱营孜矿 F_{22} 高角度正断层防水煤柱留设宽度研究[J].煤矿安全, 2023, 54(1): 188-197.
- WANG Haojie, FANG Jiahu, SUN Ping. Study on retaining width of waterproof coal pillar of F_{22} high angle normal fault in Qianyingzi coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(1): 188-197.
- [9] 刘闯,李化敏,鲁智豪,等.下伏煤层开采导水断层防水煤柱留设宽度研究[J].煤炭技术, 2022, 41(12): 5-9.
- LIU Chuang, LI Huamin, LU Zhihao, et al. Research on width of water-proof coal pillar in water-conducting fault under mining condition of underlying coal seam [J]. Coal Technology, 2022, 41(12): 5-9.
- [10] 朱敬忠,刘启蒙,刘瑜,等.断层活化特征及防隔水煤柱合理化留设研究[J].煤炭科学技术, 2022, 50(8): 166-171.
- ZHU Jingzhong, LIU Qimeng, LIU Yu, et al. Research on activated fault characteristics and rational design size of water-proof coal pillar [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 166-171.
- [11] 高林生,邓广哲,索永录,等.厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度优化研究[J].矿业研究与开发, 2022, 42(12): 1-6.
- GAO Linsheng, DENG Guangzhe, SUO Yonglu, et al. Optimization research on reasonable width of section coal pillar in fully mechanized caving face of thick coal seam [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(12): 1-6.
- [12] 王刚,刘志文,张满国,等.深埋薄煤层沿空巷道煤柱宽度确定及稳定性分析[J].煤炭技术, 2023, 42(5): 56-60.
- WANG Gang, LIU Zhiwen, ZHANG Manguo, et al. Determination and stability analysis of coal pillar width of gob-side roadway in deep and thin coal seam [J]. Coal Technology, 2023, 42(5): 56-60.
- [13] 郑文翔,庄志鹏,郭帅,等.大采高大断面迎采沿空巷道窄煤柱宽度研究[J].太原理工大学学报, 2023, 54(3): 466-472.
- ZHENG Wenxiang, ZHUANG Zhipeng, GUO Shuai, et al. Study on width of narrow coal pillar in goaf roadway with large mining height and section [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(3): 466-472.
- [14] 孙东飞,尚奇.深井 6.8 m 大采高大断面沿空掘巷窄煤柱宽度及围岩控制研究[J].煤矿安全, 2022, 53(7): 166-173.
- SUN Dongfei, SHANG Qi. Study on narrow coal pillar width and surrounding rock control of gob-side entry driving with large mining height and section of 6.8 m in deep coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 166-173.
- [15] 代进,蒋金泉.上下盘开采顺序对断层煤柱采动应力的影响[J].采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 35-41.
- DAI Jin, JIANG Jinquan. Influence of mining sequence of hanging wall and foot wall on mining-induced stress of fault coal pillar [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 35-41.
- [16] 姚强岭,王夫榕,马守龙,等.正断层区段异形煤柱护巷矿压显现特征及控制[J].采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1095-1107.
- YAO Qiangling, WANG Furong, MA Shoulong, et al. Characteristics and control of strong underground pressure appear under irregular section normal fault roadway pillar [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1095-1107.
- [17] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社, 2003: 84-99.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu. Kuangshan yali yu yanceng kognzhi [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 84-99.
- [18] 钱鸣高,缪协兴,何富连,等.采场“砌体梁”结构关键块分析[J].煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, et al. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 1994(6): 557-563.
- [19] 双海清.综放沿空掘巷围岩稳定性分析与控制技术研究[D].西安:西安科技大学, 2015.
- SHUANG Haiqing. Advantageous channel evolution mechanism and application of pressure relief gas storage and transportation in gently inclined coal seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.

Optimization of Coal Pillar Width in the Mining of the Foot Wall of Faults Under the Mined Out of Upper Wall

WU Yongping^{1,2}, CAO Jianli², SUN Mingming³, ZHANG Hao^{1,2}, HUANGFU Jingyu², DU Yuqian², HU Tao²

(1.Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2.College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3.China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Under the influence of faults and mining, the coal pillars width on the fault side of the foot wall working face restricts the safe and stable production of the working face. Based on the engineering background of the 203 foot wall working face in the second panel of Huangling Coal Mine, a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and similarity simulation was used to study the relationship between the load above the fault side coal pillar and the size of the coal pillar after the upper working face was mined out. The displacement, stress evolution, and plastic zone distribution characteristics under the coal pillar widths of 30, 26, 22, 20, 13, and 6 meters were revealed, and the overburden structure characteristics with coal pillar width of 30 meters were analyzed. Through comprehensive analysis, the reasonable coal pillars width in the working face was optimized. The results show that when the upper working face is mined out, under the influence of fault and mining, with the decrease of coal pillar width, the load above the coal pillar on the fault side of the foot wall working face is divided into load reduction zone, load transition zone and load stability zone. When the coal pillar width is 30 m, the high rock layer on the fault side of the foot wall working face separates, and the stress concentration degree above the coal pillar is greater than that on the other side, with strong bearing capacity and high stability. When the coal pillar width is reduced to 22 m, the maximum subsidence and stress concentration of the roof near the fault side increase significantly, and the plastic failure of the coal pillar begins to occur, and the bearing capacity gradually weakens. When the coal pillar width is reduced to 13 m, the plastic zone on the fault side develops towards both ends and above the working face to connect the coal pillar, resulting in poor stability of the coal pillar. When the coal pillar width is reduced to 6 m, the maximum subsidence and stress concentration of the roof on the fault side continue to increase, and the plastic zone continues to develop. Through similar simulation test, it is found that when the coal pillar width is 30 m, the roof collapses and fills the goaf, and there is no obvious change above the coal pillar on the fault side of the foot wall working face. Through comprehensive analysis, it is determined that the reasonable coal pillar width on the fault side of the foot wall working face is 18–22 m, which can improve the recovery rate of the working face and ensure safe production of the working face.

Key words: Mined out of upper wall, Mining of foot wall, Coal pillar on the fault side, Coal pillar width