

厚煤层回采工作面区段煤柱的合理宽度

王涛*, 赵曦, 宋宇鹏

(山西煤炭运销集团 长治有限公司, 山西 长治 046000)

摘要:回采工作面区段煤柱宽度的合理性直接影响着采掘工作面的顶板控制及安全生产,是进行工作面布置和支护设计的重要依据.为确定福达煤矿合理的区段煤柱宽度,本文根据矿井的工程地质和开采条件,通过对煤柱内弹塑性区的理论分析,计算出煤柱的留设宽度,并结合数值模拟的方法,分析了不同尺寸煤柱下应力分布和破坏范围.通过煤柱留设后的矿压实测,最终确定了福达煤矿回采工作面合理的区段煤柱宽度为19 m.

关键词:区段煤柱;弹塑性区;支承应力;煤柱宽度

中图分类号:TD822 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)02-0035-08

On Reasonable Width of Section Coal Pillar in Thick Coal Working Face

Wang Tao, Zhao Xi, Song Yupeng

(Changzhi Ltd. Company of Shanxi Coal Transportation and Marketing Group, Changzhi 046000, China)

Abstract: The reasonable width of the coal pillar in the mining face directly affects the roof control and safety production in extracting coal face, which is the important basis for working face layout and supporting design. In order to determine the reasonable width of the pillar in Fuda Mine, by analyzing the engineering geological and mining conditions, the paper calculates the width of the protection pillar through the theoretical analysis of the elastoplastic zone in the coal pillar. With the method of numerical simulation, the stress distribution and damage zone range of coal pillar size in different pillar size are analyzed. Finally, through the mineral pressure observation after the coal pillar setting, it is determined that the reasonable width of the coal pillar in Fuda Mine is 19 m.

Keywords: section coal pillar; elastic-plastic zone; bearing stress; width of coal pillar

随着煤矿装备技术水平的不断提高,开采力度的不断加大,导致剩余可采煤炭资源的日益减少,这对煤炭的采出率指标提出了更高要求.通过减小井下回采工作面之间区段煤柱宽度,对减少开采损失、提高煤炭回收率、延长矿井服务年限、提高矿井综合效益具有重要意义.区段煤柱的作用不仅在于隔离上一个工作面回采后的采空区,也是相邻工作面两巷道之间支承压力的承载体,对工作面顶板控制和回采巷道变形破坏有着极大的影响^[1-4].因此,必须科学合理确定区段煤柱的宽度,才能保证采掘工作面安全生产的同时提高经济效益.由于煤柱尺寸的选择受到上覆岩层岩性、矿井开采深度、煤层赋存特征、采煤工艺等条件的综合影响,通过对各类因素综合分析,为煤柱合理尺寸的确定提供依据^[5-7].

1 工程地质条件

福达煤矿开采的太原组15号煤平均埋深400 m,煤层厚度4.47 m,倾角4°~8°,属于近水平厚煤层.煤

收稿日期:2019-01-21

*通信作者, E-mail:568733226@qq.com

层上覆直接顶为4.09 m厚砂质泥岩,单轴抗压强度32 MPa,基本顶为3.05 m厚细砂岩,抗压强度80 MPa,直接底为1.78 m厚的灰黑色泥岩,抗压强度21.7 MPa,基本底为1.15 m厚的砂质泥岩.根据已批复的矿井初步设计和采区设计,15号煤层首采工作面为15101大采高工作面,工作面采用双巷布置,区段运输巷道和回风巷道均沿煤层顶底板掘进,巷道断面为矩形,宽4.5 m高4.0 m,采用锚网锚索支护,间隔一定宽度的区段煤柱布置接续的15102工作面.工作面布置如图1所示.

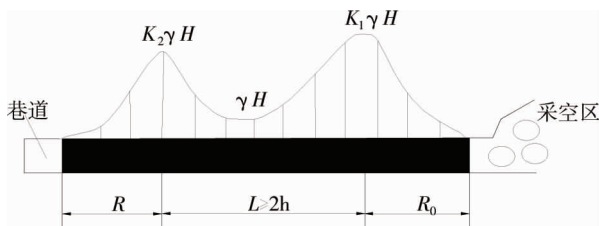


图1 福达煤矿15号煤工作面

2 基于弹塑性理论的煤柱宽度计算

2.1 区段煤柱稳定性分析

区段煤柱的宽度决定着巷道受动压破坏的程度,是回采巷道围岩稳定性控制的主要因素之一,在进行采掘工作面支护设计时需要重点考虑^[8-10].按照目前的矿山压力理论,在工作面回采和相邻工作面巷道掘进后,煤柱边缘处会产生数倍于原岩应力的集中应力,形成两个宽度分别为 R_0 与 R 的塑性变形区.当煤柱宽度较小导致两侧形成的塑性区相贯通时,煤柱可能将长期处于塑性状态而遭到严重破坏,煤柱将出现失稳崩塌现象.由此可见,当煤柱两侧产生塑性变形后,中央区域仍处于弹性状态,才能实现煤柱的基本稳定.根据弹性区的大小不同又可分为2种情况:弹性区宽度较大时,煤柱中央载荷为均匀分布,且为原岩应力状态,此时煤柱较稳定,变形量小;弹性区宽度较小时,由于支承压力的叠加,煤柱中央应力大于原岩应力,沿煤柱宽度方向应力呈“驼峰形”分布,如图2所示.一般而言,该弹性区的宽度应不低于煤柱高度 h 的2倍,因此合理护巷煤柱宽度应满足 $B \geq R_0 + 2h + R$.



K_1 和 K_2 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重; H 为煤层埋深; R 为巷道侧塑性区宽度; R_0 为回采侧塑性区宽度;
 L 为弹性区宽度; h 为煤柱高度

图2 煤柱中应力分布

2.2 煤柱宽度理论计算

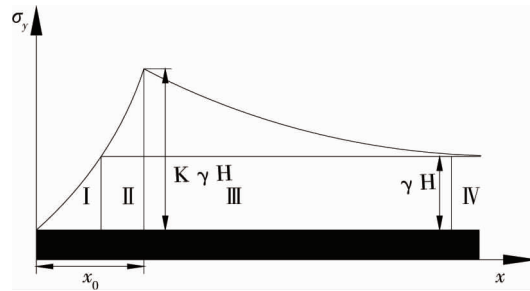
结合上文的分析可知,工作面回采或巷道掘进后,煤体中的应力重新分布如图3所示,根据支承应力大小分为塑性区、弹性区和原岩应力区,现分别计算工作面回采侧和相邻巷道掘进侧的塑性区宽度范围.

2.2.1 确定侧向砌体的长度

由于采场的顶板可以简化为“板”模型,根据板的屈服线分析法计算老顶的侧向跨度:

$$l = \frac{2L}{17} \left[\sqrt{\left(10 \frac{L}{S}\right)^2 + 102} - 10 \frac{L}{S} \right]. \quad (1)$$

式中: l 为侧向砌体长度,m; L 为周期来压步距,约15~20 m; S 为工作面长度,取200 m.将以上参数代入式(1),得 $l=17.56$ m.



K 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重; H 为煤层埋深; x_0 为塑性区宽度

图3 支承应力分布

2.2.2 确定侧向砌体的回转下沉角

$$\theta = \arctan \frac{Mck_d + \sum_{i=1}^m h_i(1 - k_i)}{l}. \quad (2)$$

式中: M 为采高,取4.47 m; c 为工作面回采率,取95%; k_d 为煤体碎胀系数,取1.25; h_i, k_i 为冒落的直接顶和老顶岩层的厚度及碎胀系数,分别取4.09,3.05 m,1.2和1.4.以上参数代入式(2),计算可得 $\theta=11.3^\circ$.

2.2.3 回采侧塑性区宽度

煤层直接顶的变形破坏符合莫尔-库伦强度准则,并可将其模型简化为弹性力学的平面应变问题.经过推导计算,得塑性区宽度:

$$x = l_p - \frac{\sigma_c}{\tan\theta(k_p\mu - 1)} \left[\frac{H_d}{E} (1 - 2\mu^2 - \mu^3) + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_i} \right]. \quad (3)$$

式中: l_p 为侧向砌体梁长度,根据2.2.1计算结果取17.56 m; σ_c 为煤体单轴抗压强度; k_p 为与摩擦角有关的比例系数,取2.77; H_d 为煤层厚度,取4.47 m; E 为煤的弹性模量,取 3.55×10^3 MPa; μ 为煤层的泊松比,根据物理力学测试结果取0.32; h_i, E_i 为冒落带岩层的厚度、弹性模量.将实测的各参数取值代入式(3),可得回采侧塑性区宽度 $R_0 = x = 6.57$ m.

2.2.4 巷道掘进侧的塑性区宽度

巷道开挖后,在巷道周边围岩中应力重新分布,由浅向深形成塑性区和弹性区,根据极限平衡理论可进一步求得掘进后形成的塑性区范围:

$$R = \frac{h\lambda}{2\tan\varphi_0} \ln \left[\frac{K\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan\varphi_0} + \frac{P_x}{\lambda}} \right]. \quad (4)$$

式中: h 为巷道高度,取掘高4.0 m; λ 为侧压系数,取0.47; φ_0 为内摩擦角,取 28° ; C_0 为煤体粘聚力,取2.9 MPa; K 为巷道掘进时产生的应力集中系数,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400 m; P_x 为巷道煤帮支护强度,根据福达煤矿的支护经验,取0.25 MPa.

将以上参数代入式(4),可求出掘巷侧的塑性区宽度为 $R=2.37$ m.

2.2.5 弹性区宽度确定

为保证巷道安全和煤柱的稳定性,煤柱中弹性区宽度一般取巷道高度的2倍.福达煤矿15号煤层回采巷道高度4 m,则弹性区宽度至少取8 m.大量研究表明^[11-14],煤岩体处于弹性状态时,工作面回采及巷

道掘进产生的支承压均近似服从负指数规律衰减,并且由于弹性区的临界宽度较小,可简化为二次曲线分析,在求解主应力及计算弹性区尺寸时,采用广义 Von Mises 准则,近似计算回采侧弹性区的宽度:

$$L_1 = \frac{(k_1 - 1)\eta\gamma HM}{2\sqrt{[k + 3\alpha(\eta + 1)k_1\gamma H/2]^2 - [(1 - \eta)k_1\gamma H/2]^2}} \quad (5)$$

同理,可计算出巷道侧的弹性区宽度:

$$L_2 = \frac{(k_2 - 1)\eta\gamma HM}{2\sqrt{[k + 3\alpha(\eta + 1)k_2\gamma H/2]^2 - [(1 - \eta)k_2\gamma H/2]^2}} \quad (6)$$

根据潞安矿区的煤矿开采经验,对于一侧采空的工作面,当开采尺寸达到岩层充分采动的要求时,回采引起的应力集中系数 k_1 一般为 2.5~3.0,巷道掘进引起的应力集中系数 k_2 一般为 2.0~2.5.福达煤矿 15 号煤层埋深约 400 m,上覆岩层体积力为 25 kN/m³,则式中: γH 取 10 MPa, η , α , k 均为与内摩擦角有关的系数,经计算分别取 0.361,0.151 和 2.470.将以上数据代入式(5)和式(6),可计算出煤柱中弹性区的宽度为

$$L = L_1 + L_2 = 4.31 \text{ m.}$$

2.2.6 煤柱宽度的确定

根据 2.2.1~2.2.5 的计算结果,合理的区段煤柱宽度为

$$B = 13.25 \sim 16.94 \text{ m.}$$

为确保煤柱留设的足够安全,额外取 1.1 倍的富裕系数,计算出最终的区段煤柱宽度为 14.6~18.6 m.即福达煤矿 15 号煤的区段煤柱宽度应不小于 14.6 m,才可避免回采与掘进形成的两个塑性区相连通.

3 煤柱宽度的数值模拟分析

3.1 数值模型的建立

根据福达煤矿的工程地质条件,结合矿井的地质综合柱状图建立数值模型,利用 FLAC^{3D} 软件对不同宽度下煤柱中应力分布和煤柱破坏情况进行数值模拟分析,从而进一步确定区段煤柱的合理宽度.本数值模型中包括 8 层顶板岩层、15 号煤层及 4 层底板岩层,更上部的岩层作为载荷施加在模型顶部,如图 4 所示.根据前文理论计算结果,在模型中对 14,16,18,20,22,24,26,28 m 共 8 种不同宽度煤柱的应力分布及变形破坏情况进行了分析.

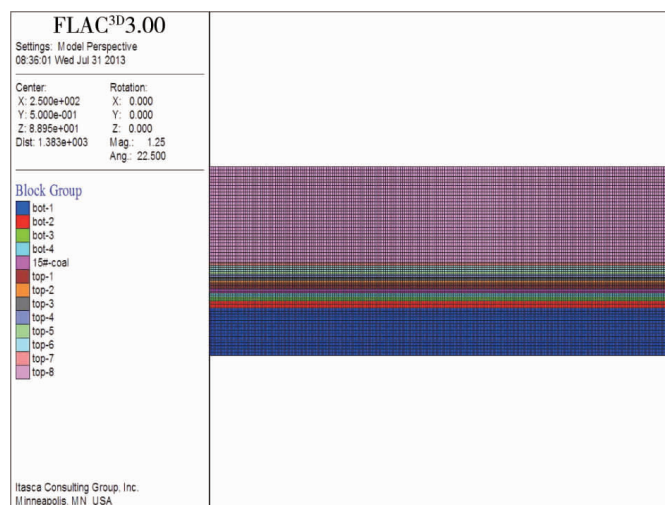


图 4 数值模拟模型

3.2 不同宽度煤柱中支承应力分析

对不同宽度下煤柱中应力集中程度进行了模拟分析,模拟结果如图 5 所示.

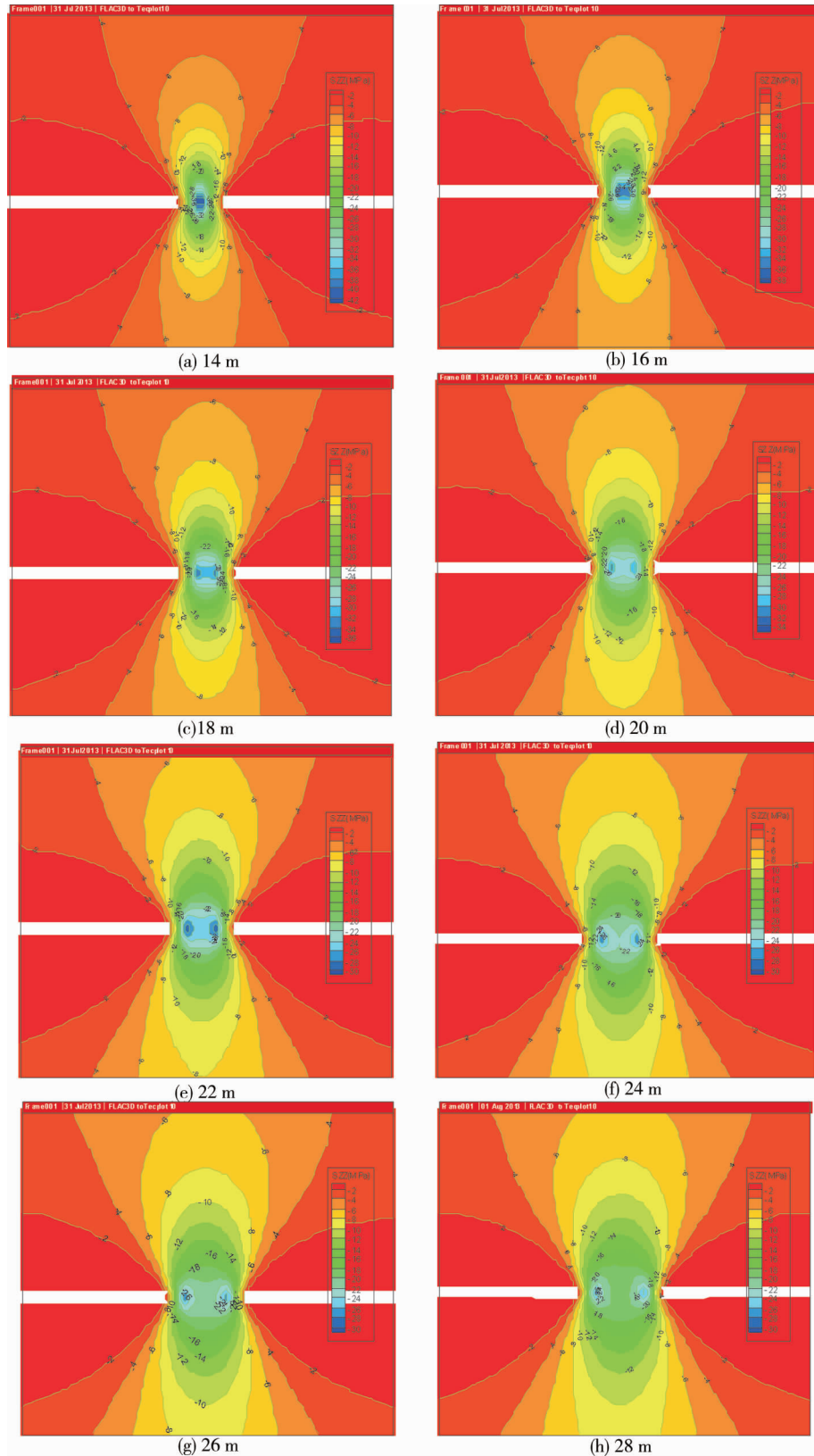


图 5 煤柱中支承应力分布模拟结果

由图 5 可知,当区段煤柱宽度小于 18 m 时,煤柱两侧工作面产生的侧向支承压力在煤柱内叠加,并表现为“单峰”现象,煤柱中央载荷急剧增大,应力趋向于均匀分布,其集中应力达到 40 MPa 左右;当煤柱宽度增加至 18 m 时,支承压力表现为明显的“双峰”现象,且峰值明显减弱;当煤柱宽度继续增加到 20 m 时,中央出现了 7 m 左右的弹性区,约为 2 倍的巷高;随着煤柱宽度继续增加,煤柱中央弹性区不断扩展,

当煤柱宽度达到 26 m 时,弹性区宽度增至 13 m 左右.对比不同煤柱宽度下集中应力的分布情况,煤柱的合理宽度取值应为 18~20 m.

3.3 不同宽度的煤柱破坏范围分析

对不同宽度下煤柱的破坏情况进行了模拟分析,结果如图 6 所示.

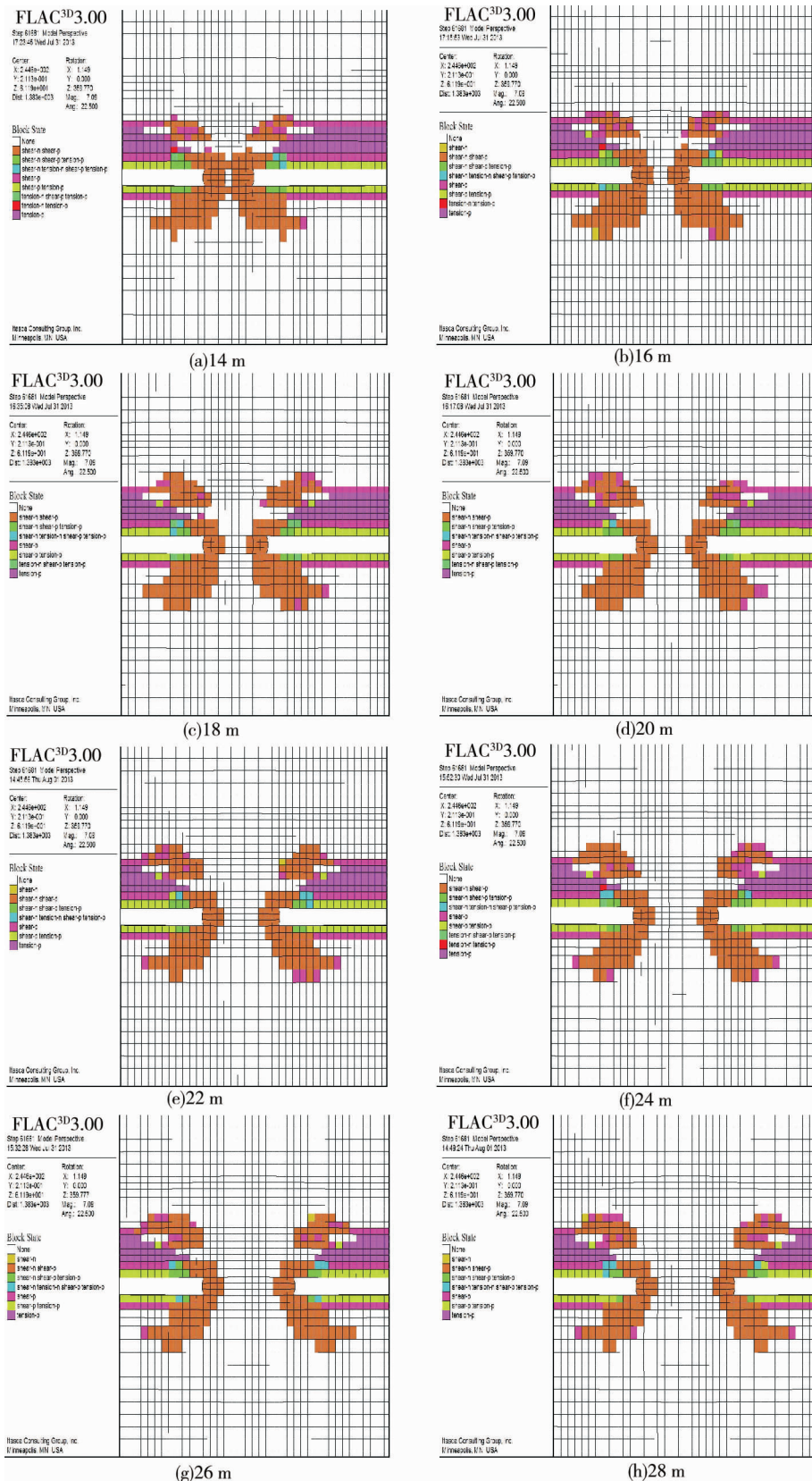


图 6 煤柱破坏情况模拟结果

由图6可知,当煤柱宽度为14 m时,煤柱处于完全塑性破坏状态;宽度增加至16 m时,煤柱中央开始出现小范围的弹性区,且弹性区内应力集中程度较大;宽度增加至18 m时,中央弹性区扩展至6 m;当煤柱宽度增至20 m时,弹性区扩展至8 m,即随着煤柱宽度的增加,其弹性区范围不断增大.结合以上模拟结果,区段煤柱合理宽度应不低于18 m.

4 现场实测

福达煤矿按照平均20 m的宽度留设了回采工作面间的区段保护煤柱,并于2014年7月份开始了15号煤首个工作面的回采.通过对工作面的煤柱进行矿压观测,可以掌握采场压力的显现规律,从而为进一步修正区段煤柱的合理尺寸提供补充依据.

4.1 观测方案

在15101工作面区段回风巷道的煤柱侧实体煤上用 $\Phi 48$ mm的煤电钻垂直打设2~11 m深度不等的钻孔,打孔时保持钻孔同煤层走向相同的方向,孔壁光滑,排尽孔内煤粉.钻孔内安装KSE-III型钻孔应力计,并保持传感器水平位置,至孔底后用手动液压泵将油压枕压力调节到原岩应力状态.由于现场操作及原岩应力取值各方面的影响,应力计测量的数值为支承压力变化的相对值,而非绝对值,只可以反映其变化规律和应力的集中程度.

4.2 矿压观测结果

15101工作面的矿压观测从7月份正常回采开始至10月份结束,期间工作面累计回采133.4 m.通过对回风巷道内的应力计监测数据反映出的集中应力变化趋势分析可知,当观测钻孔进入工作面超前支承压力区后,随着工作面的推进,3~10 m钻孔深度处应力集中程度逐渐增大,2 m及11 m钻孔深度处集中应力基本维持不变,表明巷道掘进造成的塑性区的宽度为2~3 m,工作面回采造成的塑性区的宽度小于10 m.

为了更准确的分析工作面回采造成的塑性区的宽度,统计不同钻孔深度处应力集中程度,如图7所示:工作面回采后煤柱内应力峰值位于煤体内8 m深度处,表明工作面回采造成的塑性区宽度约为8 m.

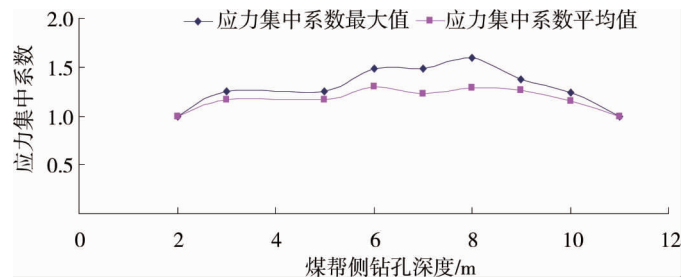


图7 不同钻孔深度处集中应力程度

综合以上分析,巷道掘进造成的塑性区宽度为2~3 m,工作面回采造成的煤帮侧塑性区宽度为8 m,当弹性区宽度取4.31~8.00 m时,现场实测分析确定的合理区段煤柱宽度为15.31~19.00 m.

5 结论

1)工作面回采侧煤柱塑性区宽度为6.57 m,巷道掘进侧煤柱塑性区宽度为2.37 m,弹性区宽度为4.31~8.00 m,理论计算确定的煤柱合理宽度为14.6~18.6 m.

2)当煤柱宽度增至18 m及以上时,煤柱内支承压力出现了明显的“双峰”现象,中央弹性区扩展至6 m以上,煤柱的稳定性得到明显改善,模拟分析确定的煤柱合理宽度应不低于18 m.

3)巷道掘进造成的塑性区宽度为2.0~3.0 m,回采造成的塑性区宽度为8 m,弹性区宽度取4.31~8.00 m,现场实测分析确定的煤柱合理宽度为15.31~19.00 m.

4) 福达煤矿 15 号煤层的合理区段煤柱宽度为 19 m.

参考文献:

- [1] 贾光胜,康立军.综放开采采准巷道护巷煤柱稳定性研究[J].煤炭学报,2002,27(1):6-10.
- [2] 张少杰,王金安,吴豪伟,等.综放开采合理护巷煤柱宽度研究[J].中国矿业,2012,21(3):52-55.
- [3] 胡大冲,张保良,孙传平,等.浅埋煤层护巷煤柱合理留设研究[J].煤炭技术,2017,36(6):96-98.
- [4] 耿耀强,陈通,黄克军,等.庙哈孤矿区浅埋煤层护巷煤柱合理宽度研究[J].中国矿业,2016,25(1):97-100.
- [5] 李来源.浅埋深厚煤层护巷煤柱合理尺寸研究[J].中国煤炭,2017,43(4):79-83.
- [6] 张念超,孙元田,蔡胜海,等.基于统一强度理论的护巷煤柱尺寸与支护技术研究[J].煤矿安全,2016,47(6):209-213.
- [7] 康义.浅埋深护巷煤柱优化与回采巷道支护效果分析[J].内蒙古煤炭经济,2017(13):125.
- [8] 李源东.煤矿井下长壁综采工作面护巷煤柱应力演变特征[J].内蒙古煤炭经济,2017(22):146-148.
- [9] 高峰.浅埋深工作面回采巷道护巷煤柱合理宽度确定[J].煤,2017,26(7):24-26.
- [10] 姚福艳,褚夫运,储丹东,等.厚煤层不同尺寸护巷煤柱的支承应力研究[J].煤,2017,26(2):58-60.
- [11] 任建喜,王东星,王江,等.浅埋煤层大采高区段煤柱合理宽度留设研究[J].煤炭技术,2016,35(9):1-3.
- [12] 张杰,霍军鹏,王斌,等.浅埋煤层区段煤柱稳定性实验分析及应用[J].矿业安全与环保,2016,43(1):30-33.
- [13] 侯海潮,伊西锋.双巷掘进合理区段煤柱宽度研究[J].煤炭技术,2016,35(4):29-30.
- [14] 张学亮.新窑上煤矿大采高综采工作面合理煤柱尺寸留设研究[J].煤矿开采,2018,23(2):22-26.