

综放面合理护巷煤柱宽度确定与回采巷道支护方案设计

朱志洁¹, 张宏伟¹, 陈 莹¹, 张海峰², 陈雄山²

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 内蒙古伊泰煤炭股份有限公司 阳湾沟煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 010400)

摘要:基于阳湾沟煤矿地质资料,应用极限平衡理论计算得到合理的煤柱尺寸为25m;采用FLAC^{3D}数值模拟分析了不同宽度护巷煤柱的垂直应力和弹塑性区分布规律,得到合理的煤柱尺寸为25~30m;最终确定阳湾沟煤矿合理护巷煤柱宽度不小于25m。针对回风顺槽顶板不同的围岩状态,设计了支护方案,通过数值模拟得到不同支护条件下的围岩应力状态和位移分布,结果表明,支护方案是合理的,能够有效的控制围岩的变形与破坏。

关键词:煤柱留设;FLAC^{3D};数值模拟;回采巷道支护

文章编号:1003-8035(2012)04-0069-07

中图分类号:TD322

文献标识码:A

0 引言

相邻两工作面同时回采时,两工作面侧向支承压力和超前支承压力必然形成叠加,从而支承压力的分布范围和峰值增大,此时护巷煤柱的稳定性决定临近回采巷道的稳定性^[1]。本文以阳湾沟煤矿为实例,通过理论计算和数值模拟,分析了不同宽度煤柱的稳定性,确定合理的煤柱尺寸^[2-11]。同时,由于该矿部分回采巷道上方存在历史遗留下来的房采采空区,巷道顶板完整性较差,给巷道维护带来很大困难。针对不同顶板条件下回采巷道,设计不同的支护方案,通过数值模拟等手段,研究不同支护条件下巷道顶板的受力状态,对其合理性进行验证。

1 地质概况

阳湾沟煤矿6203工作面位于井田的西南,开采煤层为6号煤层。6203工作面布置在原6201、6202采空区的下方,推进总长度为345m,其中采空区下推进长度213m,非采空区下推进长度为132m。6203工作面运输顺槽长578m,切眼长度约150m,均采用锚网、锚索联合支护,已施工完毕。6203工作面回风顺槽正待掘进。

2 合理煤柱尺寸的确定

2.1 理论计算确定煤柱宽度

煤柱极限平衡区的宽度^[12]为:

$$x = \frac{mA}{2\tan\varphi_0} \ln \left[\frac{D(1+\rho)\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan\varphi_0} + \frac{P_x}{A}} \right] \quad (1)$$

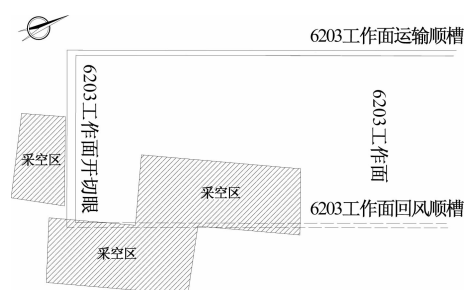


图1 工作面布置平面图

Fig. 1 Layout of coal face

式中: x ——煤柱极限平衡区的宽度;

m ——煤柱高度;

H ——平均采深;

φ_0 ——煤层的内摩擦角;

γ ——岩层的平均容重;

A ——测压系数;

ρ ——采区采出率;

D ——损伤因子。

为了保证煤柱在工作面回采过程保持稳定,煤柱内要存在一定的核区率,回采过程煤柱两侧同时存在极限平衡区,因此有:

$$2x < (1 - \mu)B \quad (2)$$

收稿日期:2012-04-06;修订日期:2012-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(50874058);辽宁工程技术大学研究生科研资助项目(Y201200803)

作者简介:朱志洁(1986—),男,辽宁省调兵山人,在读博士,主要从事矿山压力与岩层控制与采矿工程数值模拟相关研究。

E-mail:zhuzhijie036@qq.com

式中： μ ——煤柱核区率；
 B ——煤柱设计宽度。
因此可得到：

$$B > \frac{mA}{(1-\mu)\tan\varphi_0} \ln \left[\frac{D(1+\rho)\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan\varphi_0}} \right] \quad (3)$$

根据阳湾沟矿提供的地质资料以及前期开展的地质力学测试成果,可知煤柱高度 3m,平均采深 180m,煤层的内摩擦角 30°,煤层的内聚力 0.8MPa,岩层平均容重 2.5kN/m³,侧压系数 1.3,煤炭采出率 0.76,损伤因子 2.5,煤柱核区率 0.7。把上述参数代入公式(3),得到护巷煤柱尺寸:B>22.5。考虑到计算公式中某些参数选择只是凭借工程类比或者经验给出,选择煤柱尺寸要略大于计算得出的值,因而根据理论计算护巷煤柱宽度取 25m。

2.1 数值模拟确定煤柱宽度

根据 6203 工作面及其邻近工作面的基本情况,利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件分别模拟 10m、20m、30m 与 40m 煤柱一侧采空时,煤柱的塑性区分布及垂直力分布情况,根据模拟结果确定煤柱的合理宽度。图 2 为数值计算力学模型,表 1 为数值计算各岩层的物理力学参数。结合邻近矿井地应力测量结果,计算模型边界载荷条件如下:模型 X 轴方向施加 3.5~1.3MPa 的梯度应力;模型 Y 轴方向施加 6.4~2.3MPa 的梯度应

力;模型 Z 轴方向施加 5.0~1.8MPa 的梯度应力,模型上部施加 1.8MPa 的等效载荷,Z 轴方向设定自重载荷(图 2)。

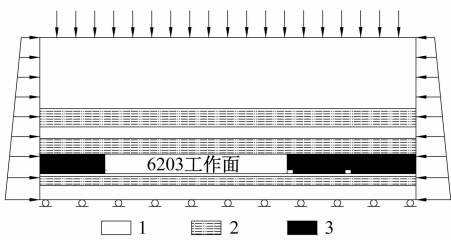


图 2 数值计算力学模型

Fig. 2 Computational mechanics model

1 - 砂岩;2 - 泥岩;3 - 煤层

表 1 煤岩力学参数

Table 1 Coal rock mechanical parameters

样别	岩性	密度 (kg/m ³)	抗拉强 度(MPa)	内摩擦 角(°)	弹性模 量(MPa)	内聚力 (MPa)	泊松比
顶板 4	泥岩	2490	0.42	35	996	2.05	0.34
顶板 3	砂岩	2510	0.62	40	1280	1.10	0.28
顶板 2	泥岩	2490	0.42	35	996	2.05	0.34
顶板 1	砂岩	2510	0.62	40	1280	1.10	0.28
煤	—	1330	0.35	28	304	0.49	0.31
底板 1	砂岩	2510	0.62	40	1280	1.10	0.28
底板 2	泥岩	2490	0.42	35	996	2.05	0.34
底板 3	砂岩	2510	0.62	40	1280	1.10	0.28

图 3 为一侧采空时不同宽度煤柱弹塑性区分布情况(仅截取煤柱部分),由图得出如下结论:

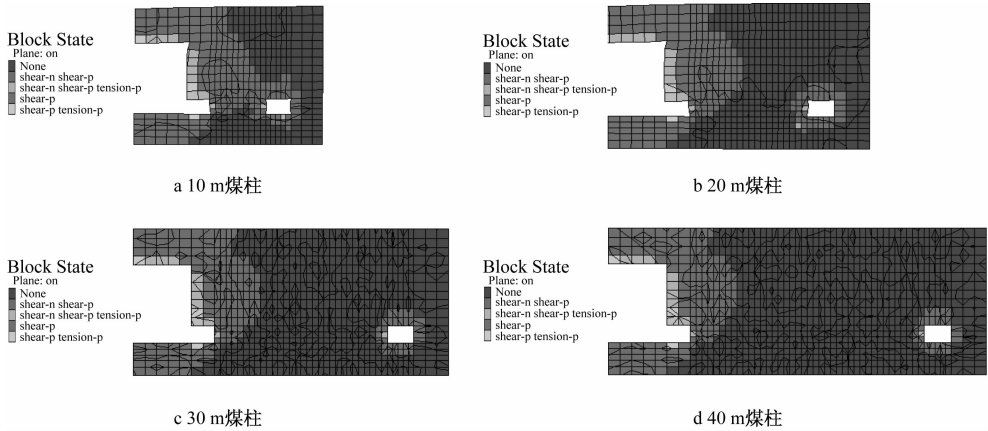


图 3 不同煤柱宽度围岩弹塑性区分布

Fig. 3 Elastic-plastic area deformation in different coal pillars

宽度较小的煤柱(10m),采空区侧与巷道侧的塑性区贯通,分布于整个煤柱,煤柱内没有弹性核区存在,整个煤柱受到破坏,煤柱处于失稳状态;随着煤柱

宽度增加,煤柱内塑性区范围减小。20m 煤柱时,采空区侧的塑性区宽度为 9m,巷道侧为 3m。煤柱中开始出现了弹性核区,宽度为 8m,煤柱内存在没有受到破

坏的区域,煤柱能够保持稳定;煤柱宽度继续增大后(30m、40m),煤柱内塑性区的范围基本不变,弹性区渐渐增大。模拟表明煤柱的宽度存在临界值,超过临界值后虽然煤柱更加稳定,有利于巷道的维护,但增加了煤炭资源的损失。

图4、图5为一侧采空时不同宽度煤柱的垂直应力分布情况,由图可知:当煤柱宽度较小(10m)时,由采空区及巷道在围岩中形成的应力集中区域相互叠加,煤柱

整体承受较大的应力作用,不利于煤柱的稳定;随着煤柱宽度增加(20m、30m、40m),在煤柱中存在由采空区及巷道各自形成的应力集中区,但应力峰值在不断减小。当煤柱宽度为10m、20m时,煤柱中应力曲线为单峰曲线,应力峰值分别为10.4MPa、12MPa;随着煤柱宽度继续增加,应力曲线转变为双峰曲线,30m和40m煤柱右侧应力峰值分别为9.1MPa和8.2MPa,应力变化平缓;煤柱上的整体应力水平在下降,煤柱受力更加均匀。

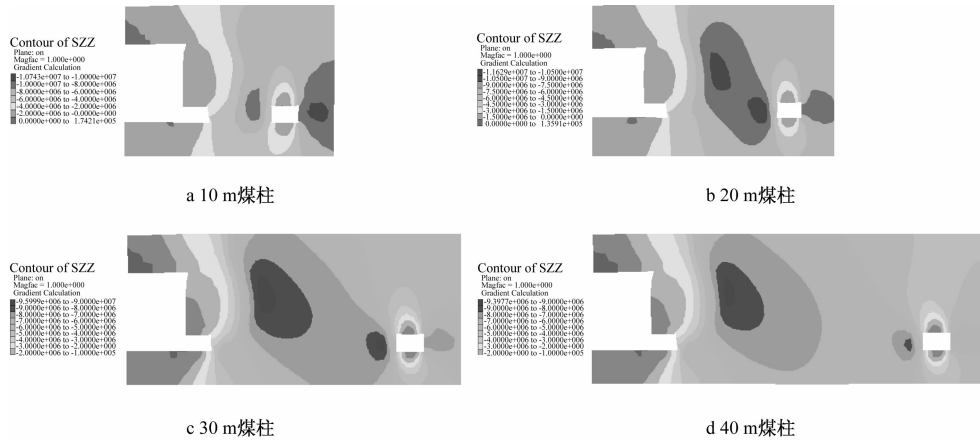


图 4 不同宽度煤柱围岩垂直应力分布

Fig. 4 Vertical stress deformation in different coal pillars

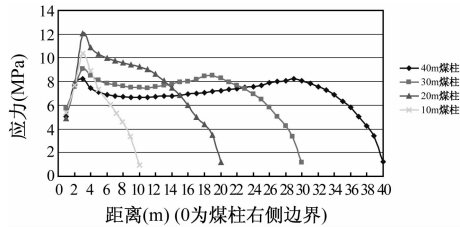


图 5 煤柱应力分布曲线

Fig. 5 Vertical stress distribution curve in different coal pillars

从煤柱塑性区情况来看,随着煤柱宽度的增加,煤柱中弹性核区的宽度不断增加,煤柱趋于稳定;从应力分布情况来看,随着煤柱宽度的增加,煤柱应力集中程度降低,煤柱应力曲线由单峰分布转变为双峰分布,煤柱受力更加均匀。考虑回采安全,兼顾煤炭资源回采率,确定煤柱的合理宽度为25~30m。

通过理论计算和数值模拟确定了煤柱尺寸,二者计算结果相互吻合。最终确定合理的煤柱尺寸不小于25m。

3 回采巷道支护方案设计

通过前文分析,确定合理煤柱尺寸不小于25m,在这样的巷道围岩应力和塑性区的条件下,对巷道进行支护方案设计。由于6203工作面部分处在采空区下方,顶板围岩状态受上部采空区影响明显。因此回采巷道需根据不同的顶板条件制定不同的支护方案。

3.1 回采巷道支护方案确定

6203工作面回风顺槽布置在原6201、6202采空区的下方,巷顶距采空区底板间距为3~5m,上部采空区开采引起的底煤破坏使6203回风顺槽在掘进与回采期间围岩都不易维护,对于破碎严重的局部区域,掘进时可能会出现冒顶,针对此情况,要对巷道进行补强支护并且要对巷道上方破碎的煤体进行加固^[13-14]。根据6203回风顺槽不同区域的地质条件,确定其支护方案分为两种情况,第一种情况为巷道上方为实体煤;第二种情况为巷道上方存在采空区。

支护参数见表2和图6。

表 2 支护方案参数
Table 2 Parameters of supporting schemes

	支护方式	顶板是否采用 锚杆支护	顶锚杆间 排距 (mm)	两帮锚杆间 排距 (mm)	锚杆 规格	钢筋梯排 距 (mm)	工字钢 棚排距 (mm)
第一种情况	锚杆 + 金属网 + 钢筋梯 + 喷浆联合支护	是	900 × 900	900 × 900	Φ18mm × 2100mm 无纵 筋螺纹钢锚杆	900	—
第二种情况	锚杆 + 金属网 + 工字钢棚 + 喷浆复合支护	否	—	900 × 800	同上	—	800

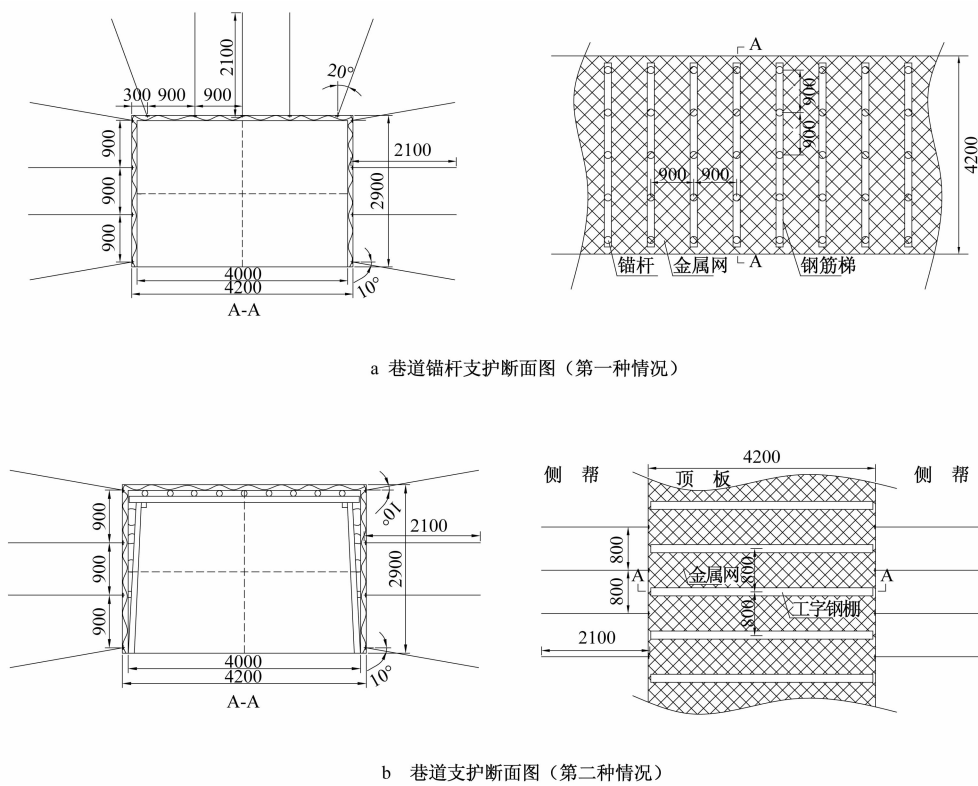


图 6 方案支护断面图
Fig. 6 Support sectional drawing of supporting schemes

3.2 回采巷道支护效果数值模拟分析
通过数值模拟对两种支护方案进行验证,采用

cable 单元模拟锚杆,beam 单元模拟工字钢棚,shell 单
元模拟金属网喷浆。各个结构单元参数见表 3 ~ 表 5。

表 3 cable 单元的计算参数 Table 3 Parameters of cable						
锚杆弹性模量 (GPa)	锚杆截面积 (m ²)	锚杆抗拉强度 (MPa)	粘结剂外圈周长 (m)	粘结剂抗压 (GPa)	粘结剂刚度 (GPa)	粘结剂的粘结力 (MPa)
211	2.54 × 10 ⁻⁴	490	8.79 × 10 ⁻²	60	88.7	20

表 4 beam 单元的计算参数 Table 4 Parameters of beam				
弹性模量 (GPa)	泊松比	横截面积 (m ²)	惯性矩 I _x (m ⁴)	惯性矩 I _z (m ⁴)
200	0.3	0.20	0.4 × 10 ⁻⁴	0.56 × 10 ⁻⁶

表 5 shell 单元的计算参数 Table 5 Parameters of shell			
厚度 (m)	弹性模量 (GPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)
0.20	50	0.25	2800

图 7 和图 8 为第一种情况 (巷道上方为实体煤)

巷道周围和顶板的垂直应力剖面图。由图 7 可知,锚杆形成的应力区相互叠加,形成有效压应力区,并连成一体,形成整体支护结构。在顶板和两帮形成厚度较大、分布比较均匀的压应力区,两帮压应力区应力值为 3.5 ~ 5MPa,顶板压应力区应力值为 1.5 ~ 2MPa,形成的压应力区覆盖了锚固区的大多数面积,锚杆预应力扩散与叠加效果明显。

由图 8 可知,巷道顶板 0.3m 处,在锚杆处有效压应力区呈圆形梯度分布,应力值 2 ~ 4.5MPa,彼此相互连接,形成连续的有效压应力带,预应力扩散范围大;在梯形棚子处,形成应力均匀带状低应力区域,其应力值为 0.15 ~ 0.5MPa。

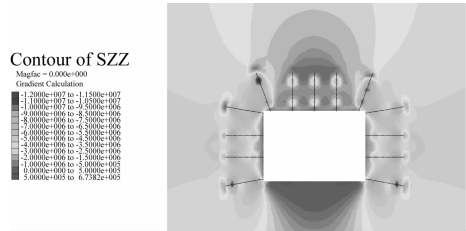


图 7 巷道垂直应力剖面图(第一种情况)

Fig. 7 Vertical stress sectional drawing of roadway (the first case)

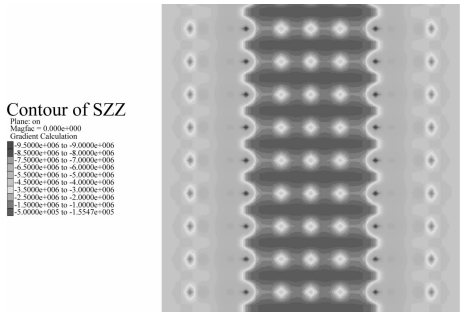


图 8 顶板 0.3m 深处垂直应力平面图(第一种情况)

Fig. 8 Vertical stress sectional drawing in roof 0.3m (the first case)

图 9 和图 10 为第二种情况(巷道上方存在采空区)巷道围岩垂直应力剖面图。由图 9 可知,两帮锚杆形成的应力区相互叠加,形成有效压应力区,两帮压应力区应力值为 3 ~ 4.5MPa,形成的压应力区覆盖了锚固区的大多数面积。由图 10 可知,工字钢棚两端的顶板应力值较高,集中明显,应力值 5MPa;中间为低应力区域,应力趋于稳定,应力值 1MPa。两架工字钢棚之间的顶板整体处在低应力状态,在棚与棚之间存在一个椭圆形的低应力区,在巷道两边形成了类似于锯齿状的应力变化区域。

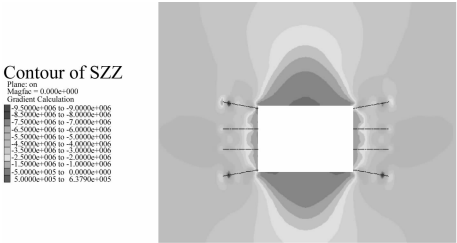


图 9 巷道垂直应力剖面图(第二种情况)

Fig. 9 Vertical stress sectional drawing of roadway (the second case)

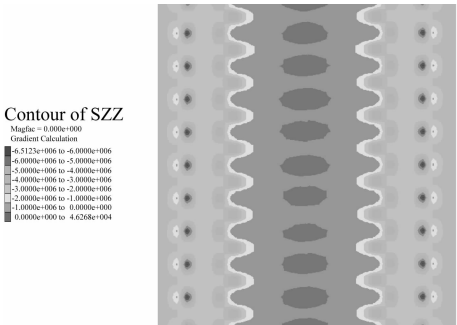


图 10 顶板 0.3m 深处垂直应力平面图(第二种情况)

Fig. 10 Vertical stress sectional drawing in roof 0.3m (the second case)

支护方案在控制巷道围岩变形方面的对比见表 6。

表 6 支护方案控制围岩变形对比

Table 6 Deformation of surrounding rock of supporting schemes

支护方案	顶板下沉 (mm)	两帮收敛 (mm)
第一种情况(实体煤)	50	40
第二种情况(采空区)	65	60

通过以上分析可知,当巷道上方为实体煤时巷道最易维护,在锚杆、锚索联合支护下,巷道受力均匀,围岩变形小;当巷道上方存在采空区时,采用架棚 + 锚杆支护对围岩变形起到了有效控制,且支护密度的提高使支护效果更为明显。两支护方案是合理的,能够有效的控制围岩的变形与破坏,现场施工中,应根据不同的顶板情况采取相应的支护方案。

4 结论

(1)根据阳湾沟矿地质资料,通过数值模拟分析了护巷煤柱宽度为 10m,20m,30m 和 40m 条件下煤柱垂直应力和弹塑性区分布特点,结合理论计算,考虑回采安全,兼顾煤炭资源回采率,最终确定合理护

巷煤柱宽度不小于 25m。

(2) 针对回风顺槽不同的顶板状态, 设计了支护方案, 分析了不同支护状态下的应力和位移分布, 得出支护方案是合理的, 能够有效的控制围岩的变形与破坏。

参考文献:

- [1] 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, 2010.
QIAN Minggao, SHI Pingwu. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China university of mining and technology, 2010.
- [2] 谢广祥, 王磊, 常聚才. 煤柱宽度对综放工作面巷道位移的影响规律[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(12): 28 - 30.
XIE Guangxiang, WANG Lei, CHANG Jucui. Influence law of coal pillar width to mining gateway displacement of fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(12): 28 - 30.
- [3] 奚家米, 毛久海, 杨更社. 回采巷道合理煤柱宽度确定方法研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 400 - 403.
XI Jiami, MAO Jiuhai, YANG Gengshe. Method for determining rational pillar width in mining roadway along goaf. [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 400 - 403.
- [4] 屠世浩, 白庆升, 屠洪盛. 浅埋煤层综采面护巷煤柱尺寸和布置方案优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 505 - 509.
TU Shihao, BAI Qingsheng, TU Hongsheng. Pillar size determination and panel layout optimization for fully mechanized faces in shallow seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 505 - 509.
- [5] 柏建彪, 侯朝炯, 黄汉富. 沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 475 - 3 479.
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong, HUANG Hanfu. Numerical simulation study on stability of narrow coal pillar of roadway driving along goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 475 - 3 479.
- [6] 朱若军, 郑希红, 徐乃忠. 深井沿空掘巷小煤柱合理宽度留设数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 300 - 305.
ZHU Ruojun, ZHENG Xihong, XU Naizhong. Study on the reasonable pillar width of roadway driving along goaf in deep mine [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 300 - 305.
- [7] 姜鹏飞, 康红普, 张剑. 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): 346 - 349.
JIANG Pengfei, KANG Hongpu, ZHANG Jian. Mechanism of load-transfer between coal pillars with different widths in mining the short-range seams [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 346 - 349.
- [8] 刘增辉, 康天合, 李东勇. 顺槽煤柱合理尺寸的三维数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(4): 27 - 29.
LIU Zenghui, KANG Tianhe, LI Dongyong. Three dimensional numerical simulation of reasonable size of coal pillar protecting sublevel roadway [J]. Mining Research and Development, 2005, 25(4): 27 - 29.
- [9] 石亮, 邢桂新, 徐腾飞. 区段煤柱合理尺寸数值模拟研究[J]. 煤, 2010, (132): 9 - 11.
SHI Liang, XING Guixin, XU Tengfei. Study on numerical simulation of rational width of section coal pillar [J]. Coal, 2010, (132): 9 - 11.
- [10] 王永革, 肖辉赞. 大采高工作面区段煤柱合理尺寸的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 中国矿业大学学报, 2011, 30(5): 645 - 648.
WANG Yongge, XIAO Huizan. Numerical simulation on reasonable size of section coal pillar in the face of big mining height [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(5): 645 - 648.
- [11] 王永秀, 齐庆新, 陈兵. 煤柱应力分布规律的数值模拟分析[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(10): 59 - 62.
WANG Yongxiu, QI Qingxin, CHEN Bing. Analysis on digital simulation for stress distribution law of coal pillar [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(10): 59 - 62.
- [12] 李德海, 赵忠明, 李东升. 条带煤柱强度弹塑性理论公式的修正[J]. 矿冶工程, 2004, 24(3): 16 - 20.
LI Dehai, ZHAO Zhongming, LI Dongsheng. Theoretical formula of elast-plasticity of strip coal pillar——a revision [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(3): 16 - 20.
- [13] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
KANG Hongpu, WANG Jinhua. Rock bolting theory and complete technology for coal roadways[M]. Beijing: China coal industry publishing house, 2007.

- [14] 陈玉祥,王霞,刘少伟. 锚杆支护理论现状及发展趋势
探讨[J]. 西部探矿工程 2004(10):155-157.
CHEN Yuxiang, WANG Xia, LIU Shaowei. Discussion of

bolt support situation and the development trend of the
theory [J]. West-china Exploration Engineering, 2004
(10):155-157.

Confirmation of reasonable chain pillar width and supporting scheme design of mining gateway in fully mechanized caving face

ZHU Zhi-jie, ZHANG Hong-wei, CHEN Ying, ZHANG Hai-feng, CHEN Xiong-shan

(1. Liaoning technical university, College of mining engineering, Fuxin 123000, China;

2. Inner Mongolia Yi Tai Coal CO. LTD, Yangwangou coal mine, Ordos 010400, China)

Abstract: Based on geological data of Yangwangou coal mine, applied limit equilibrium theory, it can conclude that reasonable pillar width is 25m; Adopting the research methods of FLAC^{3D} numerical simulation, the distributional regularities of the vertical stress and elastic-plastic area in different coal pillar width were analyzed, and the result show that reasonable pillar width is 25~30m; Eventually, it is certain that the reasonable pillar width is not less than 25m of Yangwangou coal mine. Supporting schemes were designed for different state of surrounding rock in air return way. Stress state and displacement distribution of supporting schemes were analyzed by numerical simulation. The result show that supporting schemes are reasonable and can effectively control deformation and failure of surrounding rock.

Key words: leaving coal pillar; FLAC^{3D}; numerical simulation; gateway support

第六届《中国地质灾害与防治学报》编辑委员会

名誉主任:李烈荣

主任:侯金武

委员:岑嘉法 陈梦熊 陈毓川 程伯禹 邓霁松 丁建博 段永侯 范宏喜 范相德 方鸿琪
葛文彬 何满潮 贺咏梅 胡时友 侯金武 黄润秋 黄学斌 姜建军 鞠建华 雷明堂
李烈荣 李善峰 李世海 李铁锋 李廷栋 刘传正 刘广志 刘希林 柳源 罗元华
马凤山 乔建平 孙党生 石建省 孙晓明 唐辉明 田廷山 王来贵 王兰生 王思敬
王树仁 文宝萍 伍法权 武强 徐开祥 殷坤龙 殷跃平 曾青石 张进德 张杰坤
张咸恭 张新兴 张永波 张宗祜 张作辰 赵运昌 钟立勋 周平根 朱汝烈

主编:张咸恭 副主编:文宝萍 黄润秋 殷跃平 张新兴 赵运昌

编辑部主任:范宏喜 副主任:李善峰

编辑:李善峰 赵慧

编务:董建英