

软弱顶底板下沿空掘巷小煤柱 合理宽度的确定

李瑞豪¹, 黄文标², 冯涛¹, 余伟健¹, 马平原¹, 武剑¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 广西煤矿安全监察局, 广西 南宁 530000)

摘要:针对软弱顶底板下沿空掘巷的具体生产地质条件,以东怀煤矿3100工作面为研究对象,通过对沿空掘巷上覆岩层结构在掘进和回采期间稳定性的分析,阐述了沿空掘巷围岩稳定的基本原理,认为维护巷道围岩小结构的稳定是沿空掘巷稳定的基础。通过理论计算与数值模拟相结合的方法,确定小煤柱的合理宽度为5 m。经过现场工业性试验,留设5 m小煤柱的方案,能较好满足生产要求,保证工作面顺利回采。

关键词:软弱顶底板;沿空掘巷;围岩稳定性;小煤柱合理宽度

中图分类号:TD822.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5876(2014)01-0063-05

Rational width of narrow coal pillar at roadway driven along gob with weak roof and floor

LI Ruihao¹, HUANG Wenbiao², FENG Tao¹, YU Weijian¹, MA Pingyuan¹, WU Jian¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Bureau of Guangxi Coal Mine Safety Supervision, Nanning 530000, China)

Abstract: A research has been proceeded at 3100 working face in Donghuai Coal Mine, for the specific geological conditions of the roadway driven along gob with the weak roof and floor. It illustrates the basic principles of roadway driven along gob by analyzing stability of the structural of overlying rock mass when the working face is tunneling and mining. The foundation to maintain surrounding rock stability at roadway driven along gob is to keep the small structure stability. By applying the method of theoretical analysis and numerical simulation, the rational narrow coal pillar width is intended to 5 m. The industrial case study indicates that the requirements in production can be met, and the working face can be mined smoothly by determining the wide of narrow coal pillar width is 5 m.

Key words: the weak roof and floor; roadway driven along gob; surrounding rock stability; narrow coal pillar width

留设较大的区段护巷煤柱是煤矿中常用的护巷方式,虽然这种方式技术管理等相对简单,但极大地浪费了煤炭资源。而通过沿空掘巷技术,可以极大的减少资源损失。针对不同的矿区,其水文地质、开采技术条件、煤岩体的物理力学性质、采空区

处理方法等的不同,小煤柱的留设,各矿区不尽相同。东怀煤矿以往留设的35 m左右的大煤柱使工作面煤炭损失高达20%~30%,极大的浪费煤炭资源,降低了企业效益。要提高煤炭资源的利用率,就一定要缩减区段煤柱的尺寸。如果小煤柱宽度设

置不合理,不仅不能防止有害气体和上区段采空区的水涌入工作面,更不能维护巷道的稳定性,保证矿井的安全正常生产^[1,2].因此,小煤柱尺寸的合理确定是减少煤炭资源损失、提高企业经济效益的重要措施,同时合理煤柱尺寸使煤柱位于应力降低区,益于巷道的维护,减小工人劳动强度和巷道维修费用^[3].

1 工作面地质概况

东怀煤矿 3100 工作面为提高煤炭采出率,工

作面进风巷拟采用沿空掘巷.该巷道沿 I 煤层掘进,为煤巷施工.根据相邻 1201 已回采工作面巷道的掘进揭露情况看,该煤层赋存较为稳定.煤厚约 2.8~3.2 m,平均厚度 3 m,以暗煤为主,暗淡型光泽,条带状结构.根据煤层地质柱状图可知,煤层伪顶岩性为含碳质泥岩,灰黑色,性软,断口粗糙;直接顶大部为泥岩,较破碎,遇水易膨胀,局部含砂质泥岩;基本顶为灰白色砂质泥岩、细砂岩;直接底为深灰色泥岩,硬度小.老底为砂质泥岩,硬度较大,局部含有细砂岩.具体情况见表 1.

表 1 煤层顶底板岩层情况

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
基本顶	砂质泥岩、细砂岩	16.0	灰白色砂质泥岩,细砂岩,细砂岩含水
直接顶	泥岩、含砂质泥岩	3.6	遇水膨胀,较破碎
伪顶	含碳质泥岩	0.9~1.2	灰黑色,性软,断口粗糙
直接底	泥岩	4.0	深灰色泥岩,硬度小,遇水易变软
老底	砂质泥岩	14.0	硬度较大,有时见细砂岩

2 沿空掘巷围岩稳定的基本原理

2.1 沿空掘巷围岩的应力环境

当 1201 工作面从开切眼开始回采时,原来处于三向应力状态的完整岩体,由于煤层被采出,造成直接顶的垮落,进而带动基本顶下沉并形成“O-X”破断,煤层上的顶板以一定角度向采空区倾斜,侧向支承压力逐渐向煤体深部移动^[4].在顶板弯曲下沉、侧向支承压力向深部转移过程中,一个相对低应力状态的峰后煤体区(即煤体内的塑性区和破碎区)在采空区边缘应力高峰区一侧形成^[5,6].此煤体内的支护载荷相对较小,为 3100 工作面的沿空掘巷创造了合适的应力环境.沿空巷道的特殊性使其具有处于应力降低区、掘进时应力集中小、回采时应力集中大等特点.

2.2 沿空掘巷上覆岩体的稳定性分析

沿空掘巷与采空区上覆岩层的结构空间关系如图 1 和图 2.随着上区段工作面回采的推进,直接顶岩层首先垮落,然后老顶在煤体内周期性的断裂、回转或者弯曲下沉,断裂后的岩块沿工作面走向形成了由在工作面的端头形成的弧形三角岩块 B、在采空区上覆的岩块 C 及在下区段的岩块 A 组合而成的铰接结构.沿空掘巷是在上覆岩层运动基本停止,形成稳定的大结构之后开始的.当沿空巷道掘出以后,原来处于极限平衡状态的巷道围岩遭到破坏,进

而引起围岩应力的重新分布,造成巷道围岩变形,但由于上覆岩层大结构的稳定性没有被打破,因此沿空巷道在掘进期间的巷道移近量不会很大^[4].

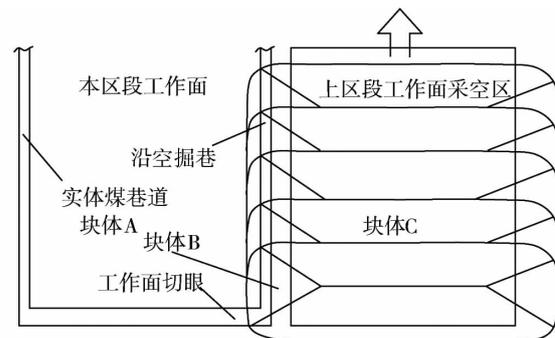


图 1 沿空掘巷与上覆岩体结构的平面关系示意图

本区段工作面回采时,受采动形成的较高超前支承压力的影响,上覆岩层大结构将会产生新的运移,岩块 B 将继续回转下沉,岩块 A 随之也将会发生弯曲下沉,采空区老顶岩层也将形成新的破断.上覆岩层大结构的这种回转运移和不稳定状态,引起巷道围岩应力的再次重分布和集中,造成回采时期巷道矿压显现强烈,巷道压力和围岩变形量明显增大.工作面回采期间,上覆岩层大结构继续回转下沉^[7],大结构上的载荷不断增加,稳定性产生新的变化,但各岩块之间的支承条件并没有根本性的变化,只是各块体间的受力情况有所改变,在回转下沉后仍能保持随机的平衡状态.因此,在本区段工作面回采结束之前,沿空巷道上覆岩层的大结构

环境始终能够保持动态平衡,并没有发生根本性的变化,只需选取合理的支护方式和支护参数,提高巷道支护系统的支护阻力,使锚杆支护系统与围岩组成的小结构保持稳定,就能维持巷道的稳定。

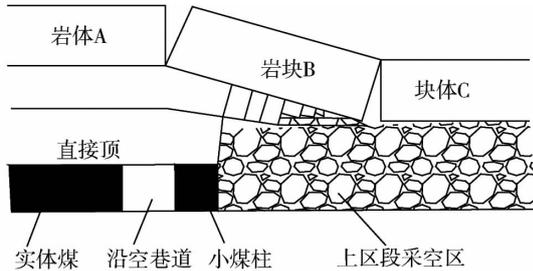


图2 沿空掘巷沿工作面倾向岩体结构示意图

通过以上分析可知,留设合理的小煤柱,使沿空巷道处于相对低应力状态的应力峰后煤体区域内,设计合理的支护方式与支护参数,形成巷道锚固区域的支护小结构,而维护小结构的整体稳定是控制沿空巷道围岩稳定的关键^[8,9]。

3 沿空掘巷合理煤柱宽度的确定

3.1 理论分析

根据小煤柱设计原则,采用应力极限平衡理论,计算合理的最小护巷煤柱宽度^[10]。

$$B = X_1 + X_2 + X_3 \quad (1)$$

式中, X_1 :煤柱因受上区段工作面回采而形成的塑

性区宽度, m; X_2 :锚杆进入煤柱的长度,取 2 m; X_3 :煤柱的安全(富裕)宽度,一般按照 $0.2(X_1 + X_2)$ 计算, m。

X_1 按照式(2) 计算:

$$X_1 = \frac{mA}{2\tan\varphi_0} \ln \left(\frac{k\gamma H + \frac{C_0}{\tan\varphi_0}}{\frac{C_0}{\tan\varphi_0}} \right) \quad (2)$$

式中, m :煤层采厚, 2.8 ~ 3.2 m; k :应力集中系数, 取 2.0; A :侧压系数, 泊松比 $\mu = 0.32$, $A = \mu / (1 - \mu)$, 则 $A = 0.47$; C_0 :煤层的内聚力, 0.5 MPa; γ :岩层平均容重, 0.025 MN/m³; φ_0 :煤层的内摩擦角, 18°; H :巷道埋深, 168 m。根据以上条件估算, 得到 $X_1 = 2.0 \sim 2.3$ m, $X_3 = 0.80 \sim 0.86$ m, 代入式(1), 可以得出 $B = 4.80 \sim 5.16$ m。

3.2 数值模拟及结果分析

模拟采用 FLAC 数值计算软件进行模拟分析, 所建立的模型长 400 m, 宽 200 m, 高 120 m。3 m 煤柱的模型共 116 000 单元块, 124 230 个节点, 模型侧面限制水平移动, 模型底部限制垂直方向的移动, 模型上部施加均布应力来模拟上覆岩层对模型的应力影响。根据矿井岩层柱状图以及岩石物理力学参数, 数值模拟计算采用摩尔-库仑模型, 具体围岩参数值如表 2 所示。

表2 主要岩层力学参数表

岩层名称	容重 $\gamma / (\text{g}/\text{cm}^3)$	单轴抗压强度 R / MPa	单轴抗拉强度 R_t / MPa	粘聚力 C / MPa	内摩擦角 $\Phi / (^\circ)$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
粉砂泥岩	2.65	18.28	1.71	1.25	31	12.65	0.25
灰白色砂质泥岩	2.48	13.82	0.99	0.82	27	6.67	0.29
炭质泥岩	2.32	10.02	0.64	0.52	25	4.38	0.32
I 煤	1.60	3.19	0.45	0.50	18	0.45	0.42
深灰色泥岩	2.32	10.02	0.64	0.52	23	4.38	0.32
砂质泥岩	2.50	11.43	1.10	0.45	28	11.85	0.21
粉砂岩	2.65	13.56	2.32	1.05	31	12.65	0.25

本次数值模拟共设计了 4 种方案, 煤柱尺寸为 3, 5, 7, 10 m, 并模拟了各种尺寸煤柱在二次采动条件影响下的塑性区破坏范围和应力分布变化规律, 具体结果如下。

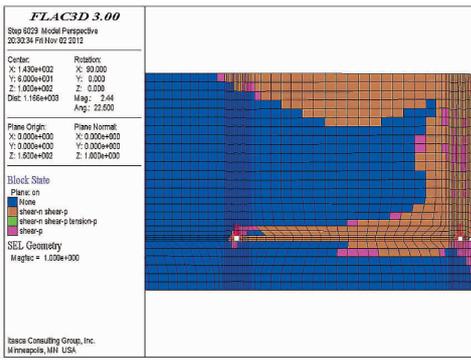
3.2.1 塑性破坏区范围

沿空掘巷小煤柱及围岩塑性区的演化规律对巷道围岩整体稳定性极为重要, 图 3 为不同煤柱宽度巷道围岩塑性区分布。当小煤柱宽度为 3 m 时, 沿空巷道塑性区破坏范围和临近采空区引起的塑性区贯通了整个煤柱, 煤壁帮塑性区破坏范围较

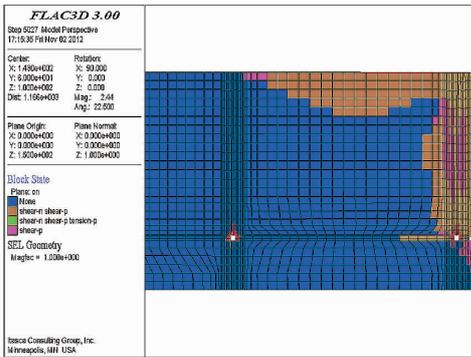
大, 巷道两帮向巷内挤进严重, 底板塑性区范围 4 ~ 7 m, 特别是两边的底角, 顶板塑性区与采空区基本连通, 煤柱稳定性差, 不能保证巷道的安全使用; 当煤柱宽度为 7, 10 m 时, 掘巷位置距支承压压力峰值位置较近, 沿空掘巷承受着较大的应力, 煤壁帮塑性区破坏范围同样较大, 底板塑性区范围 5 m 左右, 顶板塑性区破坏范围与采空区基本连通, 同样不能保证巷道的安全使用。当煤柱宽度为 5 m 时, 巷道开掘在侧向支承压压力降低区, 相比 3, 7, 10 m 的方案, 沿空巷道围岩变形量较小, 巷道两帮

塑性区发育范围较小,更有利于巷道的维护.

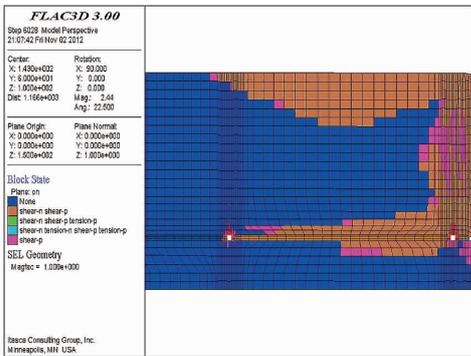
用.煤柱最大应力出现在煤柱侧1~2 m的范围内最大应力为8.75 MPa,沿空巷道实煤体帮应力较低,但距煤帮2~3 m之后出现较大应力集中现象.当煤柱宽度为7,10 m时,此时的应力集中现象更大,而且在煤柱侧3~8 m的范围内出现最大应力.当煤柱宽度为5 m时,小煤柱内应力集中程度较弱,煤柱最大应力出现在煤柱侧2~3 m的范围内最大应力为8.57 MPa,沿空巷道实煤体帮应力也较低.



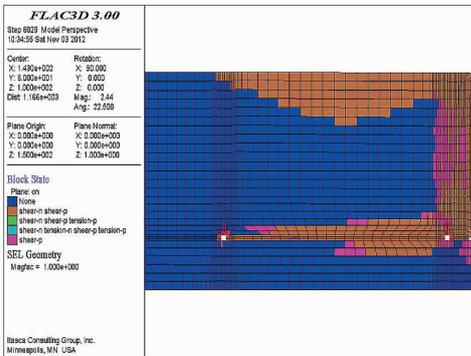
(a) 3 m 煤柱



(b) 5 m 煤柱



(c) 7 m 煤柱

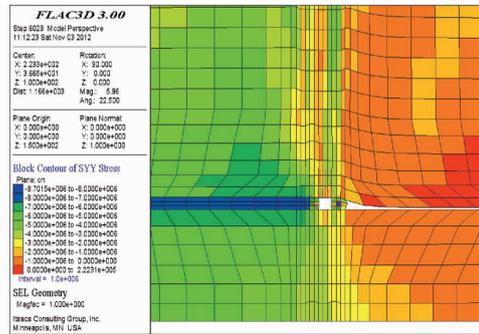


(d) 10 m 煤柱

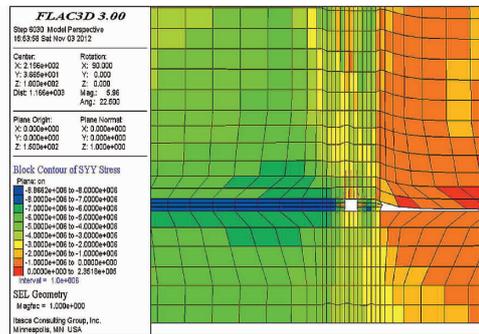
图3 不同煤柱宽度巷道围岩塑性区分布

3.2.2 应力分布

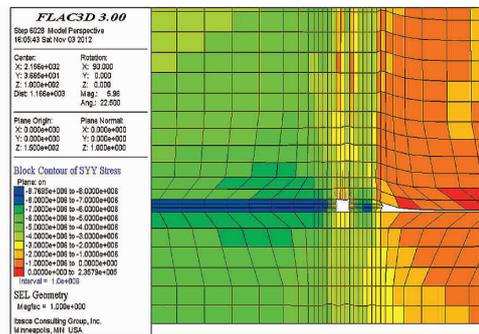
由巷道围岩垂直应力分布(图4)可知,沿空巷道顶底板垂直应力集中程度较小,小煤柱内与实体煤侧垂直应力集中明显.当煤柱宽度为3 m时,煤柱在巷道掘出之后两帮塑性区即连通,煤柱内不存在弹性核区,小煤柱已产生失稳破坏,不能保证安全使



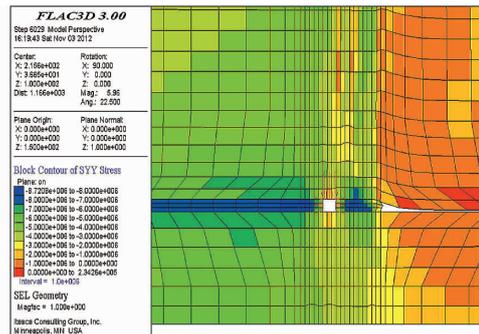
(a) 煤柱为3 m



(b) 煤柱为5 m



(c) 煤柱为7 m



(d) 煤柱为10 m

图4 不同煤柱宽度巷道围岩垂直应力分布

4 工程应用

根据以上沿空掘巷设计原则、理论分析计算及数值分析的结果,工作面沿空掘巷确定小煤柱留设尺寸为5 m。

4.1 支护方案

巷道预留200 mm宽度来保证巷道变形之后仍能安全生产,巷道净宽为4.0 m,中线不低于3.0 m。为了提高巷道支护系统的支护阻力,巷道采用锚杆、金属网、H型钢带和锚索进行联合支护,具体锚杆及锚索布置方式见图5。

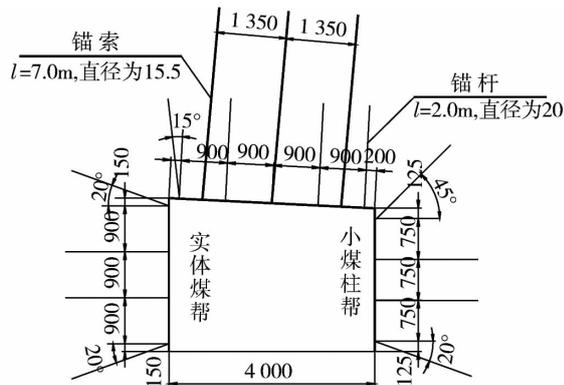
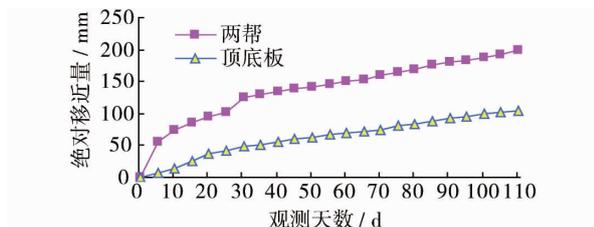


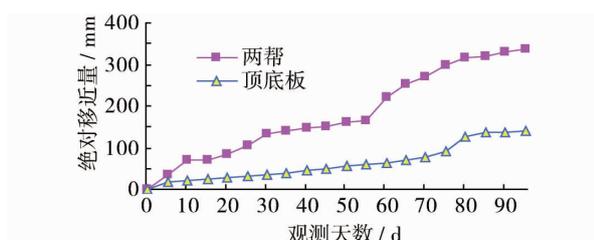
图5 沿空巷道支护设计方案

4.2 观测数据结果

为了检验小煤柱宽度的合理性,在3100工作面沿空巷道共设置了2个监测点,对巷道在掘进和回采期间进行矿压监测,各个监测点的围岩变形情况如图6所示。



(a)1号监测点



(b)2号监测点(掘支一段时间后进行观测,59天后受采动影响)

图6 沿空掘巷围岩变形情况

从图中各个监测点巷道围岩变形情况可知:1号测点在观测110 d后,两帮向巷内移近量为200 mm,顶底板向巷内移近量为105 mm;2号测点在观测95 d后,两帮向巷内移近量为336 mm,顶

底板向巷内移近量为141 mm。各测点两帮移近量明显大于顶底板移近量,且两帮总量约为顶底板的2倍。截至目前,工作面已经顺利回采了250 m。另外,根据观测数据生成曲线的发展趋势可以发现,两帮及顶底板移近趋势逐渐减缓,巷道围岩的收敛率逐渐变小,表明巷道顶板逐渐处于稳定状态,能较好满足行人、通风等生产要求,保证工作面顺利回采。

5 结论

1)合理的煤柱宽度应使沿空巷道处于应力峰后的相对低应力状态煤体区域内,结合理论分析和数值计算,最终确定东怀煤矿3100工作面进风巷小煤柱的合理宽度为5 m,建议类似地质条件的矿山可留设5~6 m。

2)数值模拟分析表明,留设5 m煤柱时,沿空巷道围岩变形量及两帮塑性区发育范围较小,且应力向深部转移,作用在煤柱上的应力也相对较小,而留设7 m及以上尺寸的煤柱,沿空巷道围岩变形量较大,且在小煤柱上容易形成较高的应力集中。

3)在使用锚索网联合支护的情况下,留设5 m煤柱,巷道掘进和回采期间,两帮相对位移量和顶底板相对移近量均在340 mm以内,既保持了巷道稳定,保证工作面的顺利回采,又减少了煤柱损失,提高企业经济效益。

参考文献:

- [1] 柏建彪.沿空掘巷围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [2] 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.
- [3] 余伟健,朱川曲.沿空掘巷围岩稳定性可控因素的敏感度及稳定性分析.[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(1):21-27.
- [4] 孟金锁.综放开采“原位”沿空掘巷探讨[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):205-208.
- [5] 王晨辉,汪苗盛.孤岛工作面沿空掘巷合理窄煤柱宽度模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2013,32(6):726-737.
- [6] 王卫军,黄成光,侯朝炯,等.综放沿空掘巷底鼓的受力变形分析[J].煤炭学报,2002,27(1):26-30.
- [7] 王卫军,冯涛,侯朝炯,等.沿空掘巷实体煤帮应力分布及围岩损伤关系分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1590-1593.
- [8] 李学华.综放沿空掘巷围岩大小结构稳定性的研究[D].徐州:中国矿业大学,2000.
- [9] 侯朝炯,李学华.综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J].煤炭学报,2001,26(1):2-3.
- [10] 李学华,张农,侯朝炯.综采放顶煤面沿空掘巷合理位置确定[J].中国矿业大学学报,2000,29(2):186-188.