

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0203-06

# 非软顶底板煤巷锚杆支护及围岩松动规律

辛亚军<sup>1</sup>, 勾攀峰<sup>1</sup>, 俞东风<sup>2</sup>, 陈小绳<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西煤业化工集团红柳林矿业有限公司, 陕西 神木 719300)

**摘要** 分析巷道围岩松动规律是优化锚杆支护的基础。通过对非软顶底板煤巷围岩松动特征与锚杆支护关系的分析, 理论计算了非软顶底板煤巷围岩的松动范围, 提出了非软顶底板煤巷锚网索耦合支护方案, 运用数值计算分析了非软顶底板煤巷锚杆支护前后围岩松动规律, 并对试验巷道围岩松动范围进行了钻孔窥视和超声波探测。结果表明: 非软顶底板煤巷围岩松动范围在顶板两角及两帮中部, 两帮呈半圆形破坏, 顶板呈马鞍形破坏。锚杆支护后, 围岩松动范围减小, 围岩应力由顶板两角沿两帮向底板两角深部转移, 顶底角锚杆(索)耦合支护利于巷道围岩的稳定。

**关键词** 围岩松动范围; 锚杆支护; 数值分析; 钻孔窥视; 超声波

中图分类号 TD 353

文献标识码 A

## Loose Regularity of Bolting and Surrounding in A Non-Soft Floor and Roof Gateway

XIN Ya-jun<sup>1</sup>, GOU Pan-feng<sup>1</sup>, YUN Dong-feng<sup>2</sup>, CHEN Xiao-sheng<sup>3</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;  
2. College of Energy and Resource, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
3. Hongliulin Mining Limited Company, Shaanxi Coal & Chemical Group, Shenmu, Shaanxi 719300, China)

**Abstract** Analyzing the loose regularity of gateway surrounding is the base for optimum bolting. After analysis of the relationship between surrounding loose characteristics and bolting in non-soft roof and floor gateway, the paper calculates theoretically surrounding loose scope of non-soft floor and roof gateway, obtains the scheme of bolt-mesh-cable coupling supporting in non-soft roof and floor gateway, analyzes surrounding loose regularity of non-soft roof and floor gateway before and after bolting by numerical calculation, and monitors with drilling and detects with ultrasonic surrounding loose scope in test gateway. Results show that surrounding loose scope of non-soft roof and floor gateway lies in both two angles of roof and the middle of two sides. Two sides show semicircle destruction, roof saddle destruction. Surrounding loose scope reduces and surrounding stress transfers from two roof angles to deep in two floor angles along two sides after bolting. Bolt (cable) coupling supporting in roof and floor angles is favorable for stability of gateway surrounding.

**Key words** surrounding loose scope; bolting; numerical analysis; drilling peep; ultrasonic

收稿日期: 2011-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874037); 陕西省岩层控制重点实验室重点项目(101-DGKY1401)

作者简介: 辛亚军(1974-), 男, 河南省襄城县人, 博士, 从事巷道围岩控制与支护技术方面的研究。

E-mail: xinyj2007@163.com

Tel: 13569120613

围岩松动范围是指巷道开挖应力重新分布后巷道周边出现裂隙至塑性变形而形成的应力降低区。围岩松动圈是围岩应力和围岩强度的函数,定量地反映了岩体强度及其受力状况,巷道支护的对象是松动围岩的自重和深部围岩的部分弹塑性变形及松动围岩的碎胀变形。围岩松动范围越大,碎胀力(围岩体积变形)越大,支护越困难。而围岩应力不仅包括巷道的埋深、构造应力、动压应力等因素的影响,还包括围岩的层理、节理及夹层等因素的影响。可以看出,围岩松动圈理论能很好地反映围岩的应力变化特征及围岩的发展破坏过程,对分析锚杆作用机理及支护参数设计有重要的作用。近年来,对煤巷围岩松动规律及煤巷锚杆支护技术的相关研究已取得了较大进展<sup>[1-10]</sup>。但随着综采技术的发展及现代化大型矿井的出现,对煤巷断面的要求不断加大,使得非软顶底板煤巷围岩松动规律趋于复杂,主要表现为两帮变形及破坏深度较大、顶板破坏主要在两顶角处及采用理论方法计算出的围岩松动范围还需要做进一步的修正等。因而,对非软顶底板煤巷围岩松动范围的研究还有待做进一步探索。本文在分析非软顶底板煤巷围岩松动特征与锚杆支护关系的基础上,理论计算了非软顶底板煤巷围岩松动范围,提出了锚杆索耦合支护方案。通过对非软顶底板煤巷锚杆支护前后围岩松动范围发展过程的数值分析,得出了非软顶底板煤巷的围岩松动规律,并对现场围岩松动范围进行了钻孔窥视和超声波探测,其理论计算、数值分析及现场实测数据基本吻合,均表现为两帮松动范围大,顶板松动范围小。

红柳林煤矿年设计生产能力12.0 Mt/a,是陕西煤业化工集团投资兴建的现代化大型骨干矿井。5<sup>-2</sup>煤层为主采煤层,平均厚度6.3 m,为近水平煤层,倾角0~2°,含1~2层夹矸,煤层顶板以细砂岩为主,局部为粉砂岩、中粒砂岩,厚度1.6~32 m,平均厚度16.8 m,偶见薄层泥岩、碳质泥岩伪顶。煤层底板岩性以粉砂岩为主,细粒砂岩次之,厚度0.95~14.75 m,平均厚度7.4 m,偶见薄层泥岩、砂质泥岩底板。其煤巷为大断面巷道,掘进时沿煤层底板掘进,巷道呈矩形,巷道宽度5.6 m,巷道高度4.2 m,预留顶煤2.1 m。

## 1 围岩松动范围与支护设计

### 1.1 松动围岩锚杆支护分析

当巷道围岩周边应力超过围岩极限强度时,周

边围岩就会出现塑性破坏(裂隙或大变形),并向围岩深部发展,造成巷道周边一定深度围岩的松动破坏,如果巷道围岩具有弱结构或抗压强度较低则破坏加剧<sup>[11]</sup>。而锚杆支护具有良好的让压性能、组合作用及提高围岩强度的特性,采用锚杆支护是能够控制围岩松动范围的扩展。同时,根据围岩松动范围的不同,采取不同的锚杆支护方式(参数)<sup>[12]</sup>,可较好地实现动压条件下巷道围岩的稳定。可以看出,围岩松动范围越大,巷道稳定性越差,需要锚杆支护的强度越大。

对于非软顶底板煤巷来说,其巷道矿压显现不强烈,巷道收缩变形量小,底板破坏不明显。而顶板失稳主要是在两顶角处以简支梁形式发生的剪切破断(而软顶破断主要是在顶板中部),顶板(煤)岩体在应力重新分布过程中表现为马鞍形塑性破坏。同时,通过运用压杆理论分析<sup>[13]</sup>,巷道两帮最大破坏部位在两帮偏中上部(距底板0.65倍处),且当两帮为坚硬脆性煤体时,两帮容许变形量减小。在顶板压力作用下,两帮内产生横向拉应力大于抗拉强度出现两帮中部先压剪后拉剪失稳,表现为半圆形破坏。因此,可采取针对性的锚杆支护方式,支护的重点部位应是顶角、两帮中部和两底角(主要是由于顶板和两帮支护后应力向底角转移),锚杆索耦合支护易于非软顶底板煤巷围岩的稳定。

### 1.2 围岩松动范围理论计算

对于巷道围岩松动范围主要依据非弹性区理论进行计算求解,但矩形巷道(特别是巷道两帮为煤体时)采用圆形围岩松动圈计算公式求解时,其松动范围会存在一定的偏差。因而,对于求出的巷道两帮围岩松动范围可以乘以系数 $k_1$ (可取 $k_1=3$ (相似模拟实验所得数据))进行修正。同时,为提高围岩松动范围计算的合理性,可采用等效半径作为近似半径。则矩形巷道的等效半径为

$$r_0 = \sqrt{a^2 + (h/2)^2} \quad (1)$$

式中: $r_0$ 为等效圆半径,m; $a$ 为巷道半跨,m; $h$ 为巷道高度,m。

无支护时围岩内部最大非弹性区(塑性区)半径 $R_0$ 为

$$R_0 = r_0 \left[ \frac{(p + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (2)$$

式中: $p$ 为上覆岩层原岩应力,MPa; $c$ 为煤体内聚力,MPa; $\varphi$ 为煤体内摩擦角;(°)。

根据煤岩力学参数实验，设计计算的煤层原始参数为： $c=2.3\text{ MPa}$ ， $\varphi=30^\circ$ ，巷道埋深  $H=167\text{ m}$ ， $p=\gamma H=0.025\times 167=4.175\text{ MPa}$ ，上覆岩层平均体积力  $\gamma=0.025\text{ MPa}$ 。

巷道宽  $B=5.6\text{ m}$ ，半跨  $a=2.8\text{ m}$ ，高  $h=4.2\text{ m}$ ，则  $r_0=3.5$ ， $R_0=3.5418$ 。

因而，可以得出

$$L_{\text{顶}}=R_0-h/2=1.4418$$
$$L_{\text{帮}}=k_1(R_0-a)=2.2254$$

即顶板的松动深度为  $1.441\text{ 8 m}$ ，两帮的松动深度为  $2.225\text{ 4 m}$ 。

1.3 锚杆支护参数设计

通过对非软顶底板煤巷(两帮为坚硬脆性煤体)围岩破坏特征分析，并根据理论计算的围岩松动范围，设计煤巷支护参数为(图 1)：顶部锚杆采用  $\Phi 20\text{ mm}\times\text{L}2\text{ 600 mm}$  II 级矿用无纵筋左旋螺纹钢锚杆，呈矩形布置，间排距  $1\text{ 100 mm}\times 1\text{ 100 mm}$ ，每排 5 根锚杆，锚杆拉拔力不小于  $60\text{ kN}$ 。每根锚杆充填 K2360 树脂锚固剂 1 支，并在顶部布置  $\Phi 15.24\text{ mm}\times\text{L}6\text{ 300 mm}$  锚索，间排距  $3\text{ 000 mm}\times 3\text{ 000 mm}$ ，每排 2 根锚索，每根锚索充填 K2360 树脂锚固剂 2 支，铺设  $\Phi 6\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  冷拔丝金属塑封(铁塑)网片；两帮各布置 3 根 II 级矿用无纵筋左旋螺纹钢锚杆，呈矩形布置，规格  $\Phi 18\text{ mm}\times\text{L}2\text{ 600 mm}$ ，间排距  $1\text{ 100 mm}\times 1\text{ 100 mm}$ ，每排 4 根锚杆。每根锚杆充填 K2360 树脂锚固剂 1 支，在两帮铺设  $\Phi 6\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  冷拔丝金属网片，锚杆拉拔力不小于  $60\text{ kN}$ 。

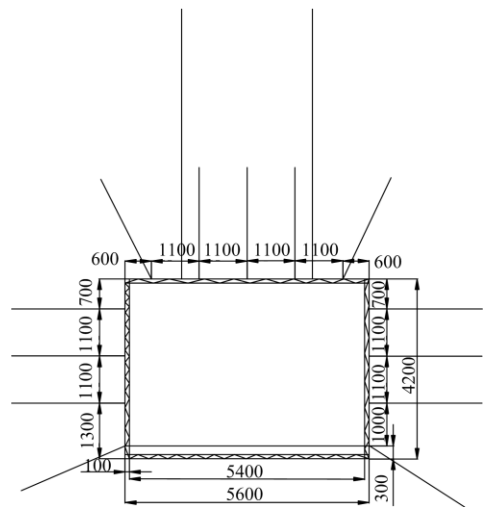


图 1 巷道支护参数图 (mm)  
Fig.1 Support parameters of gateway

2 巷道围岩松动规律数值分析

2.1 模型构建

煤岩层力学参数以红柳林煤矿地质资料为参考(表 1)，采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算软件进行模拟，计算采用莫尔-库仑屈服准则判断煤岩体的破坏。

表 1 煤岩体力学参数  
Table 1 Mechanism parameters of rock and coal

名称	容重/ (kg m <sup>-3</sup> )	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa	黏结 力/ MPa	内摩 擦角/ (°)
细粒砂岩	2580	1.422	0.866	2.26	4.76	35
煤	1360	1.417	0.444	1.50	2.30	30
粉砂岩	2520	1.266	0.571	3.08	4.60	35

计算模型简化为三维计算模型，尺寸为宽×厚×高=30 m×8 m×30 m(模型厚度选取 8 m，是为了在不影响计算精度的条件下，减少单元数，降低计算步数)。巷道推进方向沿 y 轴正方向，采用 Mohr-coulomb plasticity model 本构模型，应变模式采用大应变变形模式，用 brick 单元模拟煤岩层，模型限制两边为水平约束，无水平位移，底部边界为固定约束，顶部施加上部岩层等效载荷，模型共划分为 28 800 个单元，33 489 个节点。对围岩初始松动圈、中间松动圈及最终松动圈主要以软件运行的时间步进行划分。

2.2 无支护围岩松动分析

回采巷道开挖后，巷道围岩支承压力的向巷道两帮煤体深处转移，造成巷道围岩局部变形破坏，顶板表现为拉裂破坏，两帮表现为剪切破坏，且两帮破坏程度较大，两帮中部破坏严重，围岩应力得到重新分布，形成初始围岩松动圈(图 2a)。随着巷道围岩应力的集中，巷道围岩松动范围继续向围岩外围扩展，松动范围较大部分为顶板两角和两帮中部，顶板呈拉裂破坏，两帮为剪切破坏，顶板应力向两帮转移，形成中间松动圈(图 2b)。当围岩应力集中趋于稳定，围岩松动范围从两帮煤体中部及顶板两顶角处向外扩展，且顶角松动深度增加较大，顶角为压剪破坏，两帮除压剪破坏外，中部有一定的拉剪破坏，形成最终围岩松动圈(图 2c)，可以看出，顶板呈马鞍形破坏，而两帮为半圆形破坏。在整个无支护巷道围岩松动圈发展过程中，由于底板为非软岩层，其松动范围变化不明显。

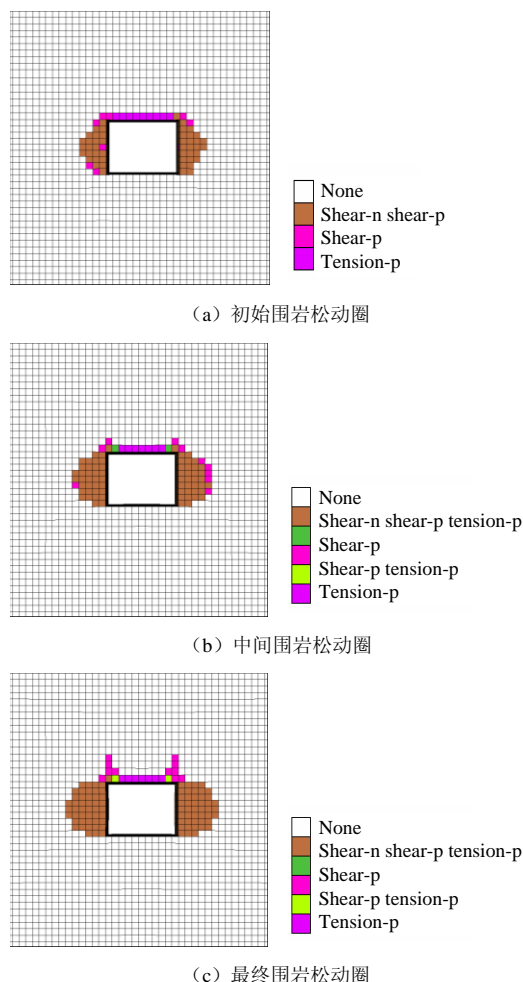


图 2 无支护围岩松动规律

Fig.2 Regularity of surrounding loose before supports

巷道围岩形成松动圈后, 顶板塑性破坏深度在 0.5~2.0 m, 两帮塑性破坏深度在 1.5~3.0 m。从围岩松动圈的发展过程可以看出, 受拉裂作用的顶板两角及受拉剪的两帮中部塑性破坏范围发展较大, 此区域是煤巷锚杆支护控制的重点。

### 2.3 支护后围岩松动分析

回采巷道开挖支护后, 在形成初始围岩松动圈时, 两帮围岩的松动范围减小了 1 倍, 且整个煤帮的松动深度近似一致, 破坏方式为拉裂与压剪破坏, 顶板中部围岩松动不明显, 由拉裂破坏逐步转变为剪切破坏 (图 3a)。在形成中间松动圈时, 两帮及顶部的松动范围变化不大, 只有顶板中部有轻微的松动范围扩大, 两帮受应力集中及锚杆支护控制, 压剪破坏发展不大 (图 3b)。在形成最终松动圈时, 两帮松动深度继续增加, 底板两底角深处出现小范围松动破坏, 主要是由于锚杆支护提高了两帮的支护强度, 使得围岩应力沿两帮向底板深处转移所致 (图 3c)。

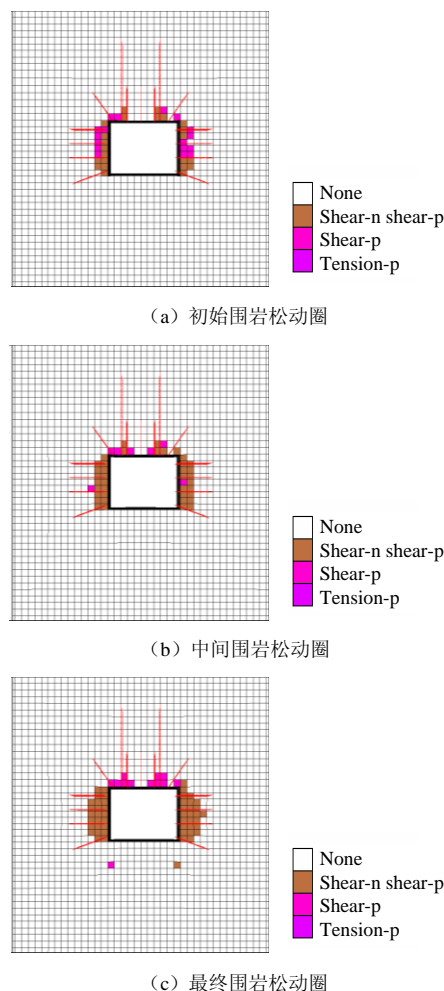


图 3 支护后围岩松动规律

Fig.3 Regularity of surrounding loose after supports

巷道支护后, 顶板的塑性破坏深度在 0~1.5 m, 两帮的塑性破坏深度在 1.0~2.0 m, 底板两角深部 1.5~2.0 m 有塑性破坏。可以看出, 支护后巷道围岩松动范围整体较无支护松动范围小, 顶板两角锚索及顶底四角倾角锚杆支护有效保证了围岩应力沿两帮向底板深处转移后巷道围岩的稳定。

## 3 巷道围岩松动范围实测

### 3.1 钻孔布置

考虑到煤巷两帮围岩松动范围的对称性, 在 5<sup>-2</sup> 煤 520 辅助运输巷道中部垂直拐角 16 m 处煤巷两帮和顶板用  $\Phi 75$  mm 钻机共打 3 个测试钻孔 (图 4)。依据巷道支护形式、支护参数及便于测试时向钻孔注水等条件, 1, 2 号 (左右帮) 钻孔深度为 5 m, 距巷道底板 1 m, 向下水平倾角 5°。3 号 (顶板) 钻孔深度 6 m, 距 1 号煤帮水平距离 2.4 m, 向上水平倾角为 60°, 3 个钻孔的成形钻孔直径均为 80 mm。

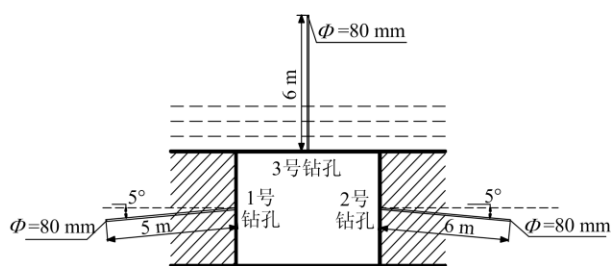


图4 钻孔布置

Fig.4 Layout of drilling

### 3.2 钻孔窥视分析

YSZ(B)钻孔窥视仪可实时图像显示、录制和存储,根据被测物性质可调节窥视镜光源亮度,以达到最清晰图像。现场钻孔窥视仪图像监测以沿钻孔长度每隔0.5 m作为观测停顿点进行数字图像采集,对围岩松动破坏程度的大小主要是通过窥视到的横

向裂隙和纵向裂隙来进行判断。横向裂隙可视为围岩松动圈的发展范围,即判定围岩塑性破坏较大,纵向裂隙的来源可能是由于围岩有少许松动钻机钻孔时振动所致,即判定围岩塑性破坏较小。通过对5<sup>2</sup>煤520运输巷拐角16 m处两煤帮和顶板3个钻孔的观测,1,2号(左右帮)钻孔孔口到1.5 m位置钻孔内壁有横向裂隙(围岩塑性破坏较大)(图5a),1.5~2.3 m位置有可见纵向裂隙(围岩塑性破坏较小)(图5b),2.3 m以上裂隙不明显。3号顶板钻孔孔口到1.0 m位置有横向裂隙(围岩塑性破坏较大)(图5c),在1.0~1.8 m位置有少许纵向裂隙(围岩塑性破坏较小)(图5d),1.8 m(按倾角折算为1.56 m)以上顶板完整。两帮松动破坏较大,主要是由于矩形巷道断面大,巷道上覆岩层重力(即支承压力)由巷道两帮承担所致。

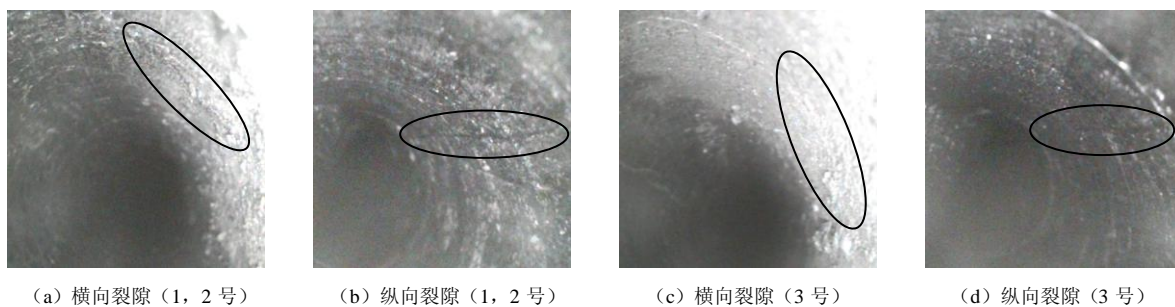


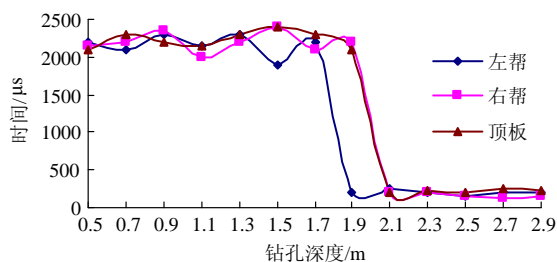
图5 钻孔窥视分析

Fig.5 Analysis of drilling peep

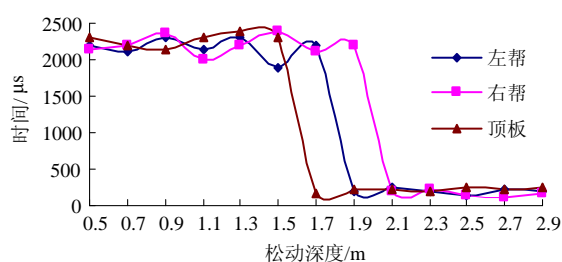
### 3.3 超声波探测分析

由于超声波在实煤体中的传播速度为 $4.0 \times 10^3$  m/s,根据经验和仪器的使用情况确定当接收到的声波速度小于 $3.0 \times 10^3$  m/s时认为煤体出现破碎或有较大裂隙,从而判断围岩松动的范围。通过对3个钻孔的超声波探测,将数据进行转换得到超声波传播时间和孔深关系曲线(图6a)。由于考虑到两帮

钻孔5°的俯角和顶板钻孔60°的水平仰角,将数据修正得到巷道两帮和顶板的松动范围分别为:左帮的松动范围在1.75 m内,右帮的松动范围在1.96 m内,顶板松动范围在1.64 m内(图6b)。应当指出,右帮受相邻综采面采空区的影响,巷道煤柱受压较大,松动范围稍有偏大。



(a) 超声波传播时间与钻孔深度关系图



(b) 超声波传播时间与松动深度关系图

图6 超声波探测分析

Fig.6 Analysis of ultrasonic detection

## 4 结 论

1) 非软顶底板煤巷围岩松动范围主要在顶板两角及两帮中部, 两帮呈先压剪后拉剪半圆形破坏, 顶板呈马鞍形破坏, 且顶板中部为水平拉剪破坏, 顶角为压剪破坏。

2) 巷道支护后, 围岩松动范围整体减小, 围岩应力由顶板两角沿两帮向底板转移, 底板两角深处出现小范围破坏。

3) 巷道围岩松动范围的理论计算、数值分析与巷道实测数据基本吻合, 均表现为两帮松动范围大, 顶板松动范围小。

4) 非软顶底板煤巷锚杆支护主要区域为顶底板四角, 顶角锚索及底角锚杆的耦合支护利于巷道围岩的稳定。

## 参考文献:

- [1] 杨胜利, 王进学, 张鹏, 等. 基于围岩松动圈理论的锚杆支护技术研究[J]. 金属矿山, 2010(6): 44-47.  
YAN Sheng-li, WANG Jin-xue, ZHANG Peng, et al. Study of bolt support technique based on surrounding rock loose circle theory[J]. Metal Mine, 2010(6): 44-47.
- [2] 王小平. 软岩巷道合理支护时间模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 103-106.  
WANG Xiao-ping. Time simulation of rational support for soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 103-106.
- [3] 初明祥, 颜景光. 回采巷道松动圈厚度的确定与控制[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(9): 53-55.  
CHU Ming-xiang, YAN Jing-guang. Definition and control of thickness of relaxed zone around mining gateway[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(9): 53-55.
- [4] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342-345.  
HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342-345.
- [5] 李树清, 王卫军, 潘长良, 等. 加固底板对深部巷道两帮稳定性影响的数值分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 123-126.  
LI Shu-qing, WANG Wei-jun, PAN Chang-liang, et al. Numerical analysis on influence of reinforcing floor on stability of sides in deep soft rock roadways [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 123-126.
- [6] 刘刚, 宋宏伟, 段现军. 矩形巷道松动圈回归公式[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(6): 38-40.  
LIU Gang, SONG Hong-wei, DUAN Xian-jun. Regressive formula for released zone in mine square type roadway[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(6): 38-40.
- [7] 靖洪文, 李元海, 许国安, 等. 深埋巷道破裂围岩位移分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 565-570.  
JING Hong-wen, LI Yuan-hai, XU Guo-an, et al. Analysis of displacement of broken surrounding rock of deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 565-570.
- [8] 刘刚, 宋宏伟. 煤巷围岩松动圈规律研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 31-35.  
LIU Gang, SONG Hong-wei. Study on the distribution law of the broken rock zone around rectangular-shape coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 31-35.
- [9] 周钢, 戴标兵. 回采巷道的联合支护新技术研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 145-149.  
ZHOU Gang, DAI Biao-bing. Study of new technique for supporting gateway in soft rock[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(2): 145-149.
- [10] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [11] 樊克恭, 蒋金泉. 弱结构巷道围岩变形破坏与非均称控制机理[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 54-59.  
FAN Ke-gong, JIANG Jin-quan. Deformation failure and non-harmonious control mechanism of surrounding rocks of roadways with weak structures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 54-59.
- [12] 伍永平, 杨永刚, 来兴平, 等. 巷道锚杆支护参数的数值模拟分析与确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 398-401.  
WU Yong-ping, YANG Yong-gang, LAI Xing-ping, et al. Numerical Simulation and Determination of Bolt Parameters of Roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 398-401.
- [13] 尹希文, 闫少宏, 安宇. 大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 222-225.  
YIN Xi-wen, YAN Shao-hong, AN Yu. Characters of the rib spalling in fully mechanized caving face with great mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 222-225.