

层的重量  $\gamma H$ 。巷道开挖后,破坏了原有的应力平衡,产生应力集中从而产生了二次应力平衡。长期以来,巷道围岩应力采用在均压( $\lambda=1$ )情况下,圆形巷道塑性区半径及应力都采用 Fenner 或 Kastner 公式以及修正后的公式进行计算。然而,在实际的巷道开挖过程中,更多的是非均匀应力场。学者陈立伟等<sup>[15]</sup>推导了圆形巷道在不等应力场下的围岩应力场为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2}P_0(1+\lambda)\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(1-\lambda)\sigma_0\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta + p_i\frac{a^2}{r^2}; \\ \sigma_\theta = \frac{1}{2}P_0(1+\lambda)\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}P_0(1-\lambda)\left(1+\frac{4a^2}{r^2}\right)\cos 2\theta + p_i\frac{a^2}{r^2}; \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2}P_0(1-\lambda)\left(1+\frac{2a^2}{r^2}-\frac{3a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\theta$ 为极角; $r$ 为极半径; $p_0$ 为原岩应力; $p_i$ 为支架反力; $a$ 为巷道半径。

根据非均匀应力场的应力状态,以及极限状态(莫尔强度准则)判断准则,在不等压力应力条件下( $\lambda \neq 1$ 情况下),圆形巷道最小塑性区的半径<sup>[12]</sup>:

$$R = \sqrt{\frac{2a^2P_0(1-\lambda)\sin\varphi\cos 2\theta}{2C\cos\varphi + P_0(1+\lambda)\sin\varphi - (S_1 - S_3)}} \quad (6)$$

式中: $R$ 为塑性区半径; $C$ 为内聚力; $\varphi$ 为内摩擦角; $\lambda$ 为侧压系数; $\theta$ 为极角。

## 2 巷道围岩塑性区形态变化规律

### 2.1 巷道形状影响

采用 FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件,根据木孔煤矿的工程地质条件(岩层各力学参数如表 1 所示),建立了模型大小为 200( $x$ ) m $\times$ 100( $y$ ) m $\times$ 200( $z$ ) m,以不同形状(圆形、半圆拱及矩形)的巷道开挖,选取侧压系数为 0.1 计算,如图 1 显示:不同形状的巷道,开挖后的巷道围岩塑性区的形状都趋于“蝶形”形态,并且蝶形的  $a, b$  值与侧压系数  $\lambda$  有关,文献<sup>[12]</sup>中:随着侧压系数的增大,水平方向的塑性区减小,而垂直方向的塑性区增大。说明巷道形状对塑性区的形状影响不大。

表 1 围岩物理力学计算参数

| 岩性名称              | 厚度/m | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 抗拉强度/MPa | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) |
|-------------------|------|-------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 砂质泥岩              | 48.4 | 2 350                   | 2.1      | 2.0      | 1.0      | 1.8     | 25       |
| 粉砂黏土岩             | 20.0 | 2 600                   | 5.3      | 4.5      | 2.8      | 1.9     | 31       |
| 3 <sup>#</sup> 煤层 | 1.80 | 1 350                   | 2.1      | 2.0      | 0.8      | 1.8     | 20       |
| 砂质泥岩              | 12.0 | 2 350                   | 2.1      | 2.0      | 1.0      | 1.8     | 24       |
| 中粒砂岩              | 30.0 | 2 700                   | 6.8      | 5.1      | 3.1      | 2.5     | 35       |
| 炭质页岩              | 40.0 | 2 700                   | 6.2      | 5.0      | 3.0      | 2.2     | 32       |
| 硅质灰泥岩             | 47.8 | 2 400                   | 5.6      | 4.4      | 2.0      | 2.2     | 34       |

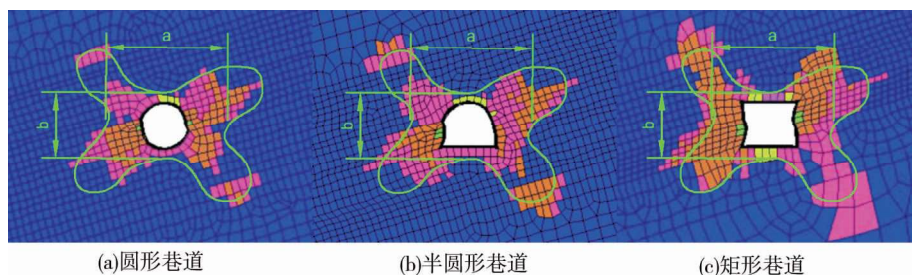


图 1 当  $\lambda=0.1$ ,不同形状的巷道的塑性区形态变化规律

### 2.2 侧压系数影响

对同一形状(半圆拱)巷道在不同侧压系数条件下进行模拟计算,计算结果如图 2 所示。由图可知:当侧压系数  $\lambda=0.1$  时,形成的塑性蝶形区最为明显,面积相对最大。而当  $\lambda=0.2, 0.3, 0.8, 1.0$  时,则显示的塑性区范围逐渐变小,且逐渐变得分布均匀,特别是  $\lambda=1$  时,塑性区仅沿较软岩层面向上出现部分扩展。

说明在深度一定均压的状态下,围岩塑性区的形成也是相对均匀的,呈现塑性环的形式,并且巷道变形破坏也是相对较小的.

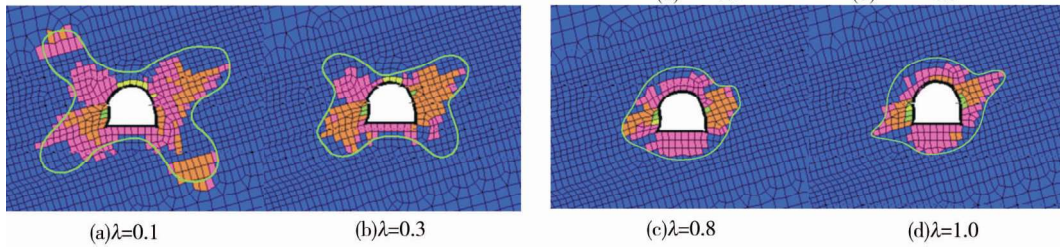


图2 不同侧压系数,同一巷道形状的塑性区形态变化规律

### 2.3 主应力与竖直方向不同角度影响分析

为了研究作用于巷道的主应力方向,开采影响后主应力方向有所改变导致巷道塑性区形态的变化.将侧压系数 λ 设为 0.1,模拟主应力(σ<sub>v</sub>)方向与垂直方向成 0°, 35°, 45°, 65° 不同角度时,巷道塑性区形态变化规律.结果如图 3 所示,在侧压系数 λ = 0.1 情况下,主应力(σ<sub>v</sub>)方向与水平方向的角度增大时,形成的蝶形塑性区范围随着主应力方向同步转动和扩展,也就是说巷道围岩“蝶形”塑性区形状与主应力方向保持相对一致.

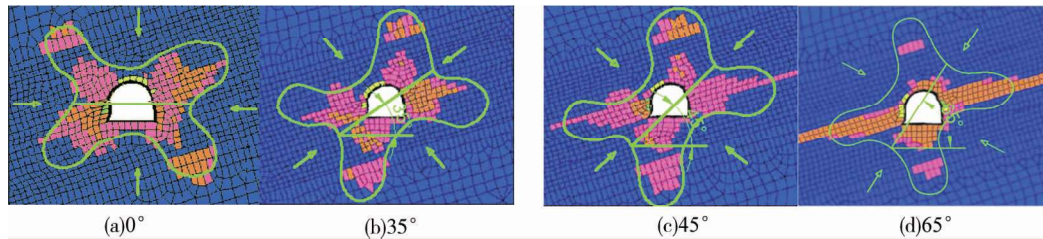


图3 主应力与水平成不同角度下,侧压系数为 0.1 时的塑性区形态变化规律

## 3 巷道破坏机理与支护分析

### 3.1 +700 瓦斯抽放巷概况

木孔煤矿+700 底板抽放巷位于 11301 工作面下部,巷道与工作面法向距离为 25 m,巷道布置相对位置如图 4 所示.目前巷道工作面已推进超过 80 m,+700 抽放巷道掘进成形 15 个月,采用锚索+锚杆+钢带联合支护.利用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件,对 +700 抽放巷道在 11301 工作面推进后,巷道周围的应力、应变和塑性区的变化规律进行模拟,分析期巷道上端部锚杆(索)整体下沉失效的原因,给出新的修帮支护建议.



图4 +700 底板抽放巷相对位置图

### 3.2 模型建立与边界条件

根据木孔煤矿 3# 煤层的工程地质资料,利用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分程序进行数值分析,煤矿的基本条件为:开采深度范围 190~240 m,平均为 230 m,煤层厚度 0.9~2.3 m,平均厚度 1.8 m,煤层平均倾角 18°,工作面长度为 150 m,沿走向推进.建立计算模型 200(x) m×100(y) m×200(z) m,模型有 39 850 单元,44 660 节点,设置底部、侧面为位移边界,上表面为上覆岩层的重力(应力)边界,其值为 6.2 MPa,侧压系数取 1.2,采用 Mohr-Coulomb 强度准则.为了弄清巷道围岩偏应力变化规律,将在离巷道表面 5 m 的顶部和底部的两侧各做了监测点,以及巷道四周(顶、顶板,左、右帮)共设置 8 个监测点.如图 5 为物理尺寸及监测点布置.根据实验室力学实验和工程类比选取计算的力学参数见表 1 所示.

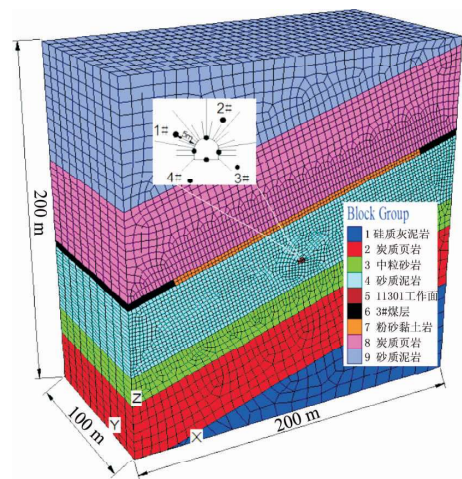


图5 物理模型及监测点布置

### 3.3 结果分析与讨论

#### 3.3.1 巷道应力变化

由图 6 所示的+700 抽放巷道周围偏应力变化规律图.从图可以看出:抽放巷道的应力由于上部工作面的推进而出现了卸压,围岩压力减小了 2 个以上的数量级,并且重直应力( $\sigma_v$ )卸压至整体小于水平应力( $\sigma_h$ ),工作面开采后,水平方向为最大应力.从图中可以看出:偏应力数值有正有负,说明随着工作面的推进,在巷道周围的浅部岩层内出现了压应力和拉应力相间变换的现象,这也说明在上部 11301 工作面采动影响下致使下部法向距离 25 m 处的抽放巷道在开挖稳定后,应力场发生了二次改变,巷道其受到的主偏应力的方向发生了变化,使得在巷道周围的塑性变化扩展向着受到上部工作面开采影响后的方向进行,下部抽放巷道的主应力方向逆时针旋转了  $18^\circ$ ,旋转了与煤岩层一样的角度,并且沿着煤岩层倾向方向的偏应力比其法向偏应力较大.如图 8a 所示,在工作面推进 40 m 时,巷道左帮的偏应力由+45.7 kPa 变为了-38.6 kPa,出现了突变现象,说明此时采动影响较为明显.

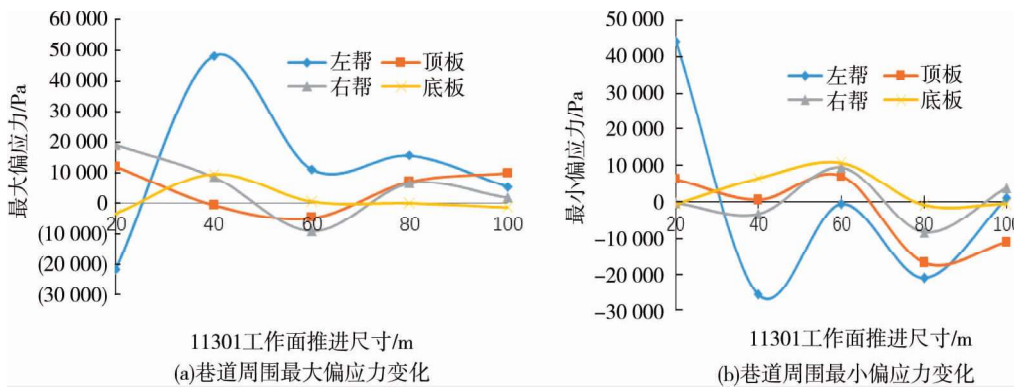


图 6 随着工作面推进,+700 抽放巷道周围偏应力变化规律

图 7 为随上部 11301 工作面的推进,+700 抽放巷道围岩位移变化规律.从图 7 可知:随着工作面的推进,下部抽放巷的水平位移整体为负,垂直位移值为正,说明整个巷道在受上部工作面的采动影响下,巷道表面位移整体  $x$  轴的负方向和  $y$  轴的正方向移动,并随着工作面的推进尺寸越远移动位移相对越大,且水平位移值比垂直位移整体偏小.

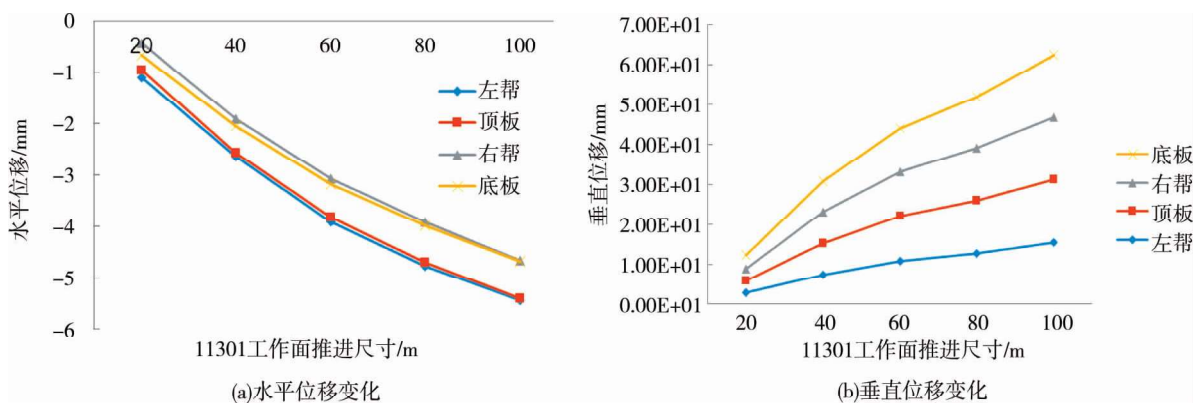


图 7 随上部工作面推进,+700 抽放巷道围岩位移变化规律

图 8 为离巷道表面 5 m 处的围岩中设置的 4 个监测点的偏应力变化规律.由图可知:在上部工作面推进下,各点的偏应力一直发生变化.最大主应力在由工作面从 20 m 推进至 40 m 时后的过程中,最大、最小偏应力均由负转正,产生的偏应力差最大.这可充分的说明了工作面在推进 40 m 后产生了较大的影响,导致的偏应力差较大.随后工作面继续推进时,最大、最小偏应力呈整体减小趋势,采动影响在减弱,并成动态的相对稳定.



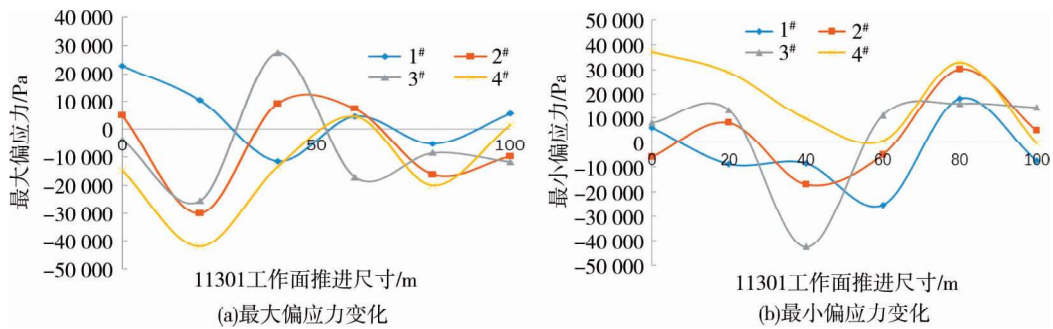


图8 随着工作面推进,监测点偏应力变化规律

### 3.3.2 巷道塑性区形态变化分析

图9a为11301工作面推进前时的巷道塑性区的形态,可以看见巷道塑性区呈现“正蝶形”形状.图9b~图9f为11301工作面推进20,40,60,80,100 m后,巷道变形及塑性区的形态变化情况.由图可知:+700抽放巷道周围的塑性区形态随着上部工作面的推进而产生了变化,变化规律由6幅图可见.上部工作面未开采时,蝶形塑性区的长、短轴分别为水平和垂直方向,而当上部工作面逐渐向前推进后,由图9f所示,工作面推进了100 m后的“蝶形”塑性区发生了扩展和转向的动作,并且发生转向的角度与煤岩层倾角 $18^\circ$ 基本一致,说明由于上部的工作面推进同时,使得巷道受到的主偏应力发生了 $18^\circ$ 转向.

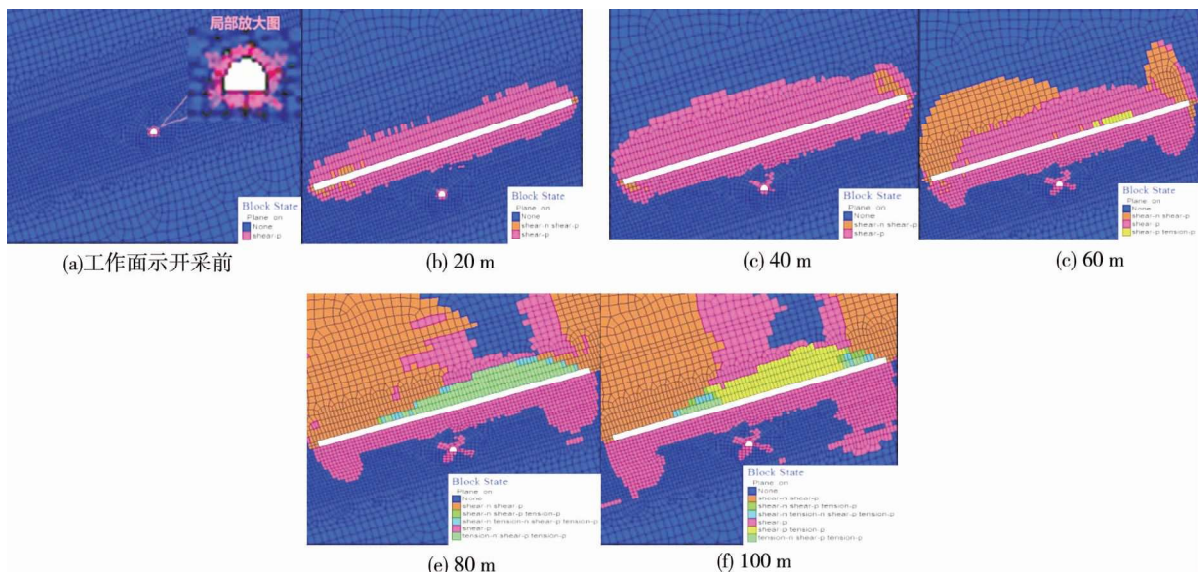


图9 工作面推进后,巷道塑性区形态变化

### 3.3.3 巷道破坏特性与二次支护

#### 1) 原支护方案

+700抽放巷道设计为锚杆+网喷+钢带+锚索联合支护.锚杆采用 $\Phi 20 \times 2\ 200$  mm 高强螺纹钢树脂锚杆,间、排距 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ ,每根锚杆安装K2335树脂药卷2卷.钢筋网 $\Phi 6.5-100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,C20喷射混凝土厚100 mm.3根顶锚索(2#~4#) $\Phi 17.8 \times 5\ 500\text{ mm}$ ,2根墙锚索(1#,5#) $\Phi 15.2 \times 3\ 500\text{ mm}$ ,每1600 mm施工5根锚索,锚索间距1600 mm.施工锚杆、锚索时辅以钢带支护,锚杆钢带规格 $4\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2\ 000\text{ mm}$ ,锚索钢带规格 $4\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 4\ 000\text{ mm}$ ;锚杆钢带开孔间距800 mm,锚索钢带开孔间距1600 mm.

#### 2) 锚杆(索)失效机理分析

巷道支护抗力与原岩应力的值有2个数量级的差异,支护抗力只对围岩浅部破碎岩石有抵抗其继续破坏和加固已破碎岩层的作用,如果锚杆(索)的锚固端置于塑性变形区或是破碎区内,则会使锚杆降低锚固效力,甚至锚杆(索)无效支护.

图10a为巷道受上部工作面推进后的塑性区旋转变化后的示意图.如图所示:在工作面推进后,围岩

塑性区发生了恶性扩展并发生了转向,使得 1<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup> 和上帮部的帮锚杆锚固端处在了新的扩展转向塑性区内,导致锚杆(索)受力失稳而产生失效.而上端顶锚索 4<sup>#</sup> 锚索由于 4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup> 锚杆和上帮部锚杆产生了失效,导致了 4<sup>#</sup> 锚索受力超过了锚索极限承载强度,产生了拉断失效,如图 10c 所示为现场锚索被拉断后钢带分开的照片.

3) 二次支护设计

通过以上分析可以将二次支护设计为:如图 10b 所示,将巷道的变形失效处的 1<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup> 和上帮部的帮锚杆加长:锚杆  $\Phi 20 \times 2\ 200\ \text{mm}$  变为  $\Phi 20 \times 3\ 500\ \text{mm}$ ,顶锚索  $\Phi 17.8 \times 5\ 500\ \text{mm}$  变为  $\Phi 17.8 \times 6\ 500\ \text{mm}$ ,以及帮部  $\Phi 17.8 \times 3\ 500\ \text{mm}$  变为  $\Phi 17.8 \times 5\ 500\ \text{mm}$  锚索,锚杆(索)间、排距与原设计一致,巷道周边浅部及表面喷射混凝土进行加固.加长锚杆(索)的锚固端位于塑性区以外的弹性区坚硬岩层内,起到锚固受力的作用.

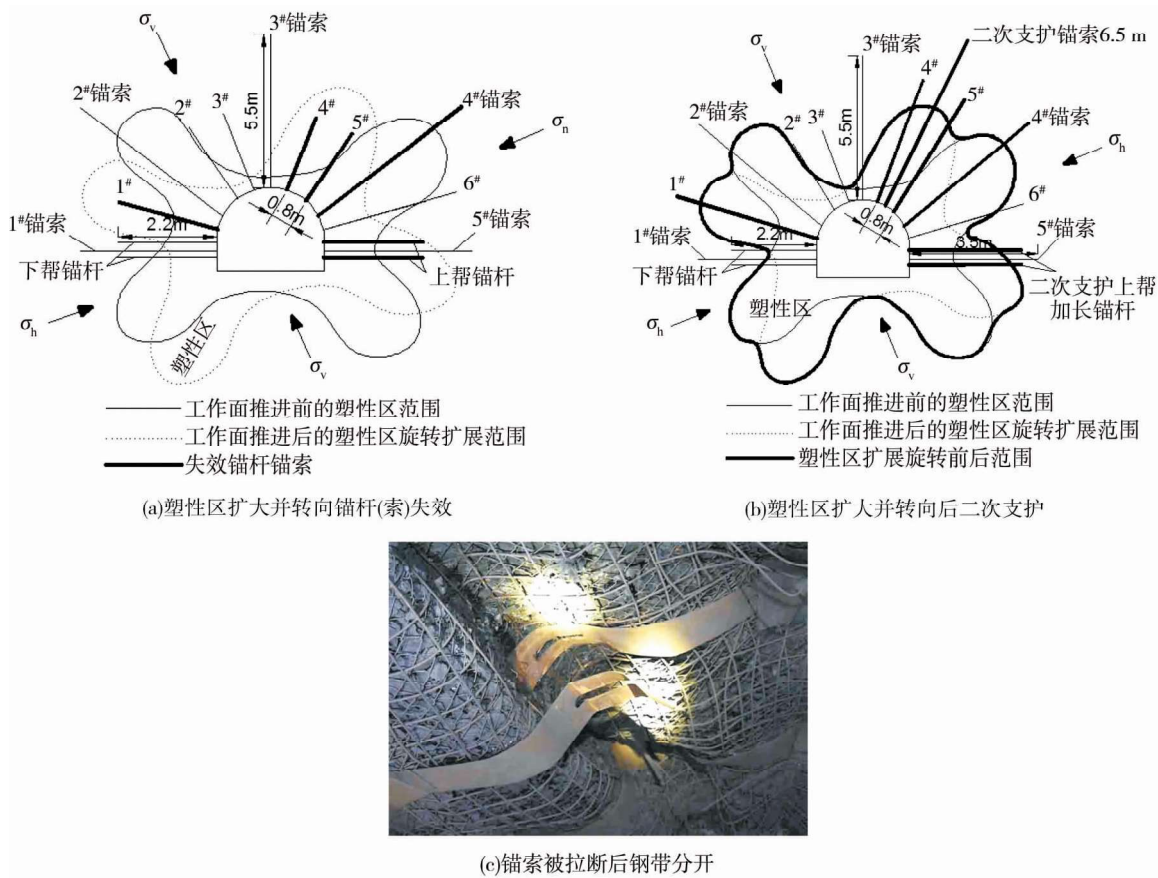


图 10 +700 抽放巷道围岩塑性区受采动影响的形态变化分析图

如图 11 所示的变形收敛监测和修帮后的照片.可以看到,通过对巷道进行修帮二次支护后,在 6 个月以后,巷道变形得以有效控制.

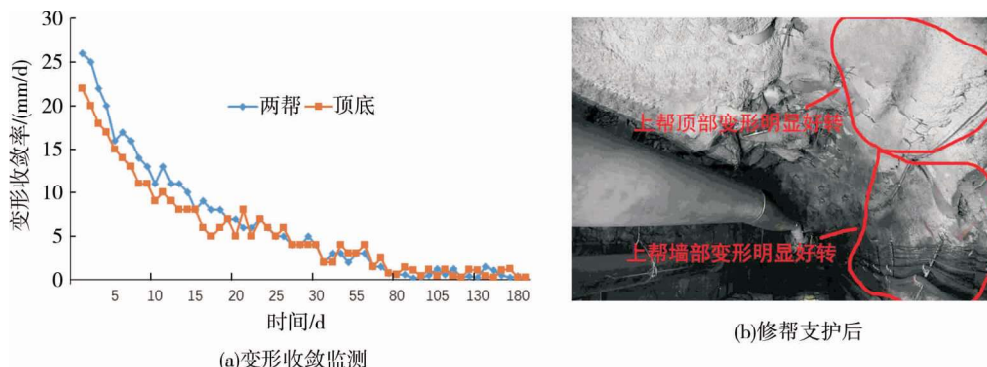


图 11 抽放巷道围岩的收敛变形监测结果及支护效果

## 4 结论

1)不同形状的巷道,在同一应力条件(同一侧压系数)下,巷道的塑性区的形态变化都趋于“蝶形”形态.巷道的开挖形状对巷道围岩产生的塑性区形态影响较小.

2)对同一形状巷道在侧压系数( $\lambda=0.1\sim 1.0$ )的范围内,当 $\lambda=0.1$ 形成的塑性蝶形区最为明显,面积相对最大.而当 $\lambda=0.8$ 或 $1.0$ 时,则显示的塑性区范围逐渐变小,且分布变得逐渐均匀.说明在围压均匀条件下,塑性区的形成也相对均匀,且巷道变形破坏也相对较小.

3)当主应力与巷道底板成不同角度时,巷道开挖形成的“蝶”形塑性区始终与主偏应力方向呈相对一致性.结论可解释工作面推进后,下部巷道上帮变形明显,支护失效的现象.由此设计修帮方案,达到了修帮目的.

### 参考文献:

- [1] 杨伯源,张义同.工程弹塑性力学[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] 董方庭.巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [4] 于学馥,乔端.轴变论和围岩稳定轴比三规律[J].有色金属工程,1981(3):18-25.
- [5] 冯豫.我国软岩巷道支护的研究[J].矿山压力与顶板管理,1990(2):44-46.
- [6] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].煤炭工业出版社,2007.
- [7] 康红普,林健,杨景贺,等.松软破碎硐室群围岩应力分布及综合加固技术[J].岩土工程学报,2011,33(5):808-814.
- [8] 方祖烈.拉压域特征及主次承载区的维护理论[M].煤炭工业出版社,1999:48-51.
- [9] 侯朝炯.巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013:70-77.
- [10] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [11] 潘岳,李爱武,戚云松.圆巷开挖围岩偏应力应变能生成的分析解与图解[J].岩土工程学报,2007,29(12):1780-1786.
- [12] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [13] Lu Y L, Wang L G, Bei Z. Roadway failure and support in a coal seam underlying a previously mined coal seam[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012,22(5):619-624.
- [14] 余伟健,冯涛,王卫军,等.软弱半煤岩巷围岩的变形机制及控制原理与技术[J].岩石力学与工程学报,2014,4(33):658-671.
- [15] 陈立伟,彭建兵,范文,等.基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J].煤炭学报,2007,1(32):20-23.
- [16] 姚琦,冯涛,王卫军,等.极破碎围岩半煤岩巷变形破坏机理及支护控制研究[J].中国安全生产科学技术,2015(5):32-39.
- [17] 王卫军,彭刚,黄俊.高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究[J].煤炭学报,2011,36(2):223-228.