

# 动力扰动下含软弱夹层巷道围岩力学响应特性

唐礼忠, 高龙华, 王春, 蒋锋

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 为了研究动力扰动下有软弱夹层对巷道围岩稳定性的影响, 利用大型通用有限元软件Abaqus对冬瓜山铜矿深部出矿巷道受到采场爆破作用下围岩的力学响应进行了数值分析并提出支护优化方案。结果表明: 由于软弱夹层的存在, 巷道拱顶和底板竖向应力波动幅值大于无软弱夹层巷道, 底板竖向应力波动幅值变化较明显, 而巷道拱顶和底板水平应力波动幅值却小于无软弱夹层; 巷道拱顶和两帮的变形明显大于底板, 对于无软弱夹层的巷道围岩变形明显大于有软弱夹层巷道, 且变形速率较大; 离爆炸源越远巷道围岩的应力和变形越小, 但变化不明显, 并在动力扰动0.15 s左右后趋于稳定; 基于对冬瓜山铜矿现场调查, 发现巷道顶板冒落破坏形式, 从而提出支护优化方案, 使得巷道围岩变形是无支护时的1/3, 有效地控制了巷道围岩变形。

**关键词** 动力扰动; 软弱夹层; 力学响应; 支护优化; 数值模拟

**中图分类号** TU457

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.21.009

## Mechanical Response Features of Roadway Surrounding Rock with Weak Interlayer Under Dynamic Disturbance

TANG Lizhong, GAO Longhua, WANG Chun, JIANG Feng

School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** To study the influence of weak interlayers on the stability of roadway surrounding rocks under dynamic disturbance, the finite element software Abaqus was used to numerically analyze the mechanical response of surrounding rocks of Dongguashan copper mine roadway under blasting, and an optimized support scheme was proposed. The results show that the vertical stress of roadway vault and bottom amplitude fluctuation of the roadway with weak interlayers are higher than those of the roadway without weak interlayers, and the bottom changed apparently, while the horizontal stress fluctuation amplitude of the roadway with weak interlayers is lower than that of the roadway with no weak interlayers. The deformation of the vault and two sides of the roadway is larger than that of the bottom, and roadway surrounding rocks without weak interlayers apparently have larger deformation than those with weak interlayers, and have larger deformation rate. The farther away from the explosion source, the smaller the stress and deformation of roadway surrounding rocks, but the change is not apparent, which tends to be stabilized after about 0.15 s under dynamic disturbance. Based on the investigation of Dongguashan copper mine, the destruction form of surrounding rocks is roof caving. Thus an optimized support scheme was proposed, with which the deformation of surrounding rocks is about 1/3 of that with no support, effectively reducing the deformation of roadway surrounding rocks.

**Keywords** dynamic disturbance; weak interlayer; mechanical response; support optimization; numerical simulation

矿产资源大多通过地下开采的方式获取, 由于长期高强度的开采, 浅部的矿产资源日益减少和枯竭。随着开采深度的不断增加, 进入深部区域进行资源开采已成为必然趋势。

在深部开采中, 机械振动、老顶来压、开采扰动、岩爆和地震波等都可能对巷道围岩的稳定性产生一定的影响。深部的岩体在“三高一扰动”的特殊环境下, 巷道周边应力集中明

收稿日期: 2014-3-27; 修回日期: 2014-05-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732004)

作者简介: 唐礼忠, 教授, 研究方向为岩石力学与地下空间结构稳定及工程地质灾害防治, 电子信箱: lztang11@csu.edu.cn

引用格式: 唐礼忠, 高龙华, 王春, 等. 动力扰动下含软弱夹层巷道围岩力学响应特性[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 56-61.

显,动力扰动对巷道围岩稳定性影响突出<sup>[12]</sup>。

有不少学者对动力扰动下巷道围岩稳定性的影响进行了研究,李夕兵等<sup>[3]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>有限差分程序对深部开采圆形矿柱进行高应力下动力扰动数值计算,得出随着初始静载应力的增大,外界的扰动对其的影响越明显;朱万成等<sup>[4]</sup>利用RFPA数值软件模拟不同侧压力系数条件下动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的整个过程,得出随着动态扰动应力波幅值和作用时间的增加,动态扰动对巷道稳定带来的影响越大;杨金林等<sup>[5]</sup>采用离散元程序对地下采空区进行动力扰动计算,通过改变扰动应力波峰值的大小对采空区的稳定性影响;高富强等<sup>[6]</sup>利用有限差分计算软件FLAC对动力扰动下巷道围岩力学响应进行数值分析,得出原岩应力越大,动力扰动对巷道应力场、位移场及塑性区范围影响越明显。温颖远等<sup>[7]</sup>通过分析动力扰动对不同硬度煤层巷道围岩稳定性的影响规律,得出软煤巷道顶板水平应力波动幅值、顶板及帮部围岩变形明显大于硬岩,硬岩帮部垂直应力、底板水平应力波动幅值、底板变形程度及帮部和底板的塑性区面积大于软煤。

以上研究分别从静载应力大小、动力扰动应力波幅值和作用时间、不同侧压力系数、不同岩层、巷道埋深和不同硬度煤层巷道等条件下分析了动力扰动对巷道围岩稳定性的响应规律,尚未考虑软弱夹层的位置和角度等条件下动力扰动对深部巷道围岩稳定性的影响规律。本文采用大型通用有限元软件Abaqus对安徽铜陵冬瓜山铜矿<sup>[8]</sup>开采的具体情况,在采场爆破地震波的作用下对出矿巷道围岩力学响应进行了数值分析,研究动力扰动下有无软弱夹层对巷道围岩的应力场、位移场和塑性区范围的相对变化情况并采取相应的支护措施,为理论分析提供一定的参考依据。

## 1 深部开采的力学分析

### 1.1 冬瓜山铜矿深部开采概况

冬瓜山铜矿是国内首先进入深部开采的金属矿山之一,目前处于多盘区、多采场、不同开采作业阶段同时进行的大规模复杂开采情况。因此采用了阶段空场嗣后充填采矿方法<sup>[9]</sup>,沿矿体走向划分盘区长80 m、宽18 m,盘区间留18~20m的隔离矿柱,采场依次作为开采区和矿柱,充填后再进行二步骤回采,回采顺序有“隔一采一”或“隔三采一”,如图1所示。

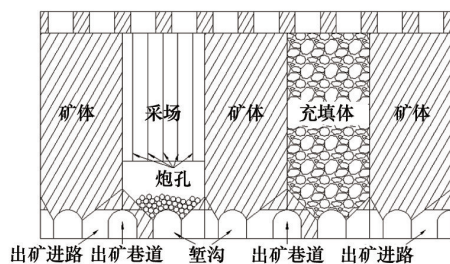


图1 采场分布情况

Fig. 1 Distribution of stopes

采场爆破不仅对自身采场和相邻采场及围岩产生动力作用,而且爆破产生的能量释放是以弹性波形式在岩层中传播,对远距离采场围岩也产生动力作用。因此在实际生产过程中还是会出现大规模的巷道冒顶,矿柱失稳和岩爆等灾害现象。

### 1.2 动力扰动下深部巷道失稳机制

对于受高静载作用下的深部巷道围岩,外界较小强度的动力扰动有可能诱发巷道失稳,甚至发生岩爆。假设原岩铅垂应力为 $P$ ,侧压力系数为 $k$ ,作用在巷道围岩边界。按弹性理论中的基尔希公式计算,则巷道围岩中任一点 $M(\gamma, \theta)$ 的应力和位移<sup>[10]</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_s}{2} \left[ (1+k) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - (1-k) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta = \frac{P_s}{2} \left[ (1+k) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + (1-k) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} = \frac{P_s}{2} \left[ (1-k) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \right] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_r = \frac{P_s a^2}{4Gr} \left\{ (1+k) - (1-k) \left[ 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta \right\} \\ u_\theta = \frac{P_s a^2}{4Gr} \left\{ (1-k) \left[ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right] \sin 2\theta \right\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\sigma_r$ 为径向正应力; $\sigma_\theta$ 为环向正应力; $\tau_{r\theta}$ 为切向应力; $u_r$ 为径向位移; $u_\theta$ 为环向位移; $a$ 为圆形巷道半径; $G$ 为剪切模量; $\nu$ 为泊松比。

由于拱形巷道围岩应力、位移计算缺乏精确的理论解,故采用当量半径折算法,任意形状巷道尺寸折算成圆形巷道<sup>[11]</sup>表示如下

$$r_0 = b(S/\pi)^{1/2} \quad (3)$$

其中, $r_0$ 为圆形巷道当量半径; $b$ 为断面形状修正系数,拱形取1.1; $S$ 为实际巷道断面积。

假设在距拱形巷道中心 $d$ 处发生扰动应力波作用,该动态应力波从震源传至巷道围岩近表面处时,扰动引起的应力强度为

$$\sigma_t = \sigma_0 e^{-\lambda(d-r_0)} \quad (4)$$

其中, $\sigma_0$ 为动态应力波初始强度; $\lambda$ 为动态应力波能量衰减指数。

由于岩体动量守恒、质量守恒及应力波边界条件可得反射波强度为

$$\sigma_{if} = \sigma_t f_a \quad (5)$$

其中, $f_a$ 为反射系数, $f_a = \frac{1-n_A}{1+n_A}$ ,巷道围岩表面波阻抗相对于空气为无穷大,故 $n_A$ 趋于 $\infty$ , $f_a = -1$ 。

此时入射应力波几乎全部变成拉应力波,应力仍为 $\sigma_t$ ,故巷道围岩表面总应力为 $\sigma_t + \sigma_{if}$ 。由于岩体抗拉强度很小,当动力扰动强度较大时,易导致巷道围岩拉伸破坏<sup>[12]</sup>。深部巷道围岩由于爆破动力扰动作用,造成周围岩体应力重分布,当扰动应力达到一定值时,围岩的拉应变达到极限拉应变,导致围岩产生不同程度的破坏,形成破裂区。

## 2 数值计算模型和方案

### 2.1 数值计算模型的建立

为了研究动力扰动下软弱夹层对巷道围岩稳定性的响应规律,共建立2个数值模型。巷道为半圆直拱形式,跨度4 m,高度2 m,拱半径2 m,如图2所示,其中 $K_{BN}$ 、 $K_{BT}$ 分别为弹簧法

向与切向刚度,  $C_{BN}$ 、 $C_{BT}$ 分别为阻尼器法向与切向阻尼器系数。在上部自由边界施加应力 $P_s=8.69$  MPa,在前后、左右分别限定相应的 $y$ 、 $x$ 轴方向的位移,模型底部边界为固支约束。模型的岩性参数取自冬瓜山铜矿地下760 m岩样,如表1所示。

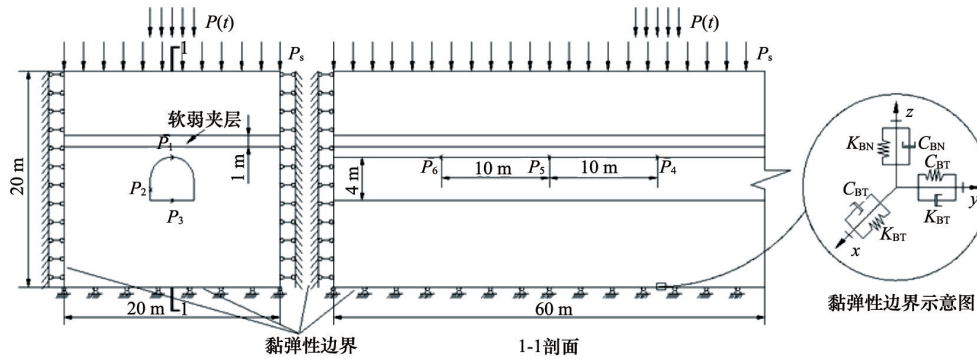


图2 巷道的数值模型

Fig. 2 Numerical model of the roadway

表1 岩体和软弱夹层的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the rock mass and weak interlayer

岩层	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	黏结力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	抗拉强度/MPa
岩体	3970	35.50	0.26	3.69	45.07	3.04
软弱夹层	2000	5.00	0.26	0.40	33.00	0.40

爆破震源采用剪切应力波,施加在距巷道中心点10 m正上方处,应力波取荷载波形中谐波的一段<sup>[13]</sup>,其应力时程表达式如下

$$P(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} P_{\max} [1 - \cos(\frac{2\pi t}{t_0})] & t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $t_0$ 为爆炸荷载的作用时间

$$t_0 = \frac{84}{k} \sqrt{r^{2-r}} \cdot q^{0.2} \quad (7)$$

其中,  $P_{\max}$ 为扰动应力峰值,  $t$ 为持续时间;  $q$ 为单排孔中最大一段总药量;  $r$ 为应力波传播距离;  $k'$ 为体积模量,  $k' = E/3(1-2\nu)$ 。采用如图所示的应力波时程曲线,按式(7)和文献[8]中冬瓜山铜矿采场爆破参数,计算得出动载持续作用时间为5.6 ms,应力峰值为30 MPa,如图3所示。

### 2.2 数值模拟方案

利用Abaqus数值模拟软件中的Dynamic, Implicit等模块功能,计算在应力波的扰动下,有无软弱夹层对巷道围岩应力、变形及塑性区的影响。在巷道顶底板及两帮设置监测点,监测巷道围岩应力和位移变化等动态响应规律。

模拟分3步计算:1)模型施加上述应力算至平衡,得到原岩应力场;2)开挖巷道并算至平衡后得到围岩应力重分布状态;3)在模型顶板施加剪切波,采用三维黏弹性人工边界<sup>[14,15]</sup>设置,开启动力分析计算程序进行计算,计算时间为0.5 s。

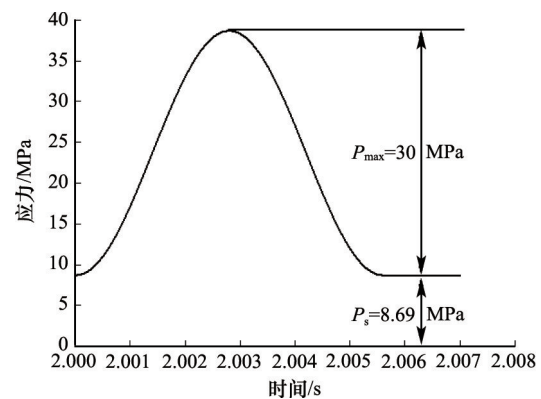


图3 应力波时程曲线

Fig. 3 Time history curve of stress wave

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 应力分析

为了研究在动力扰动下有无软弱夹层对巷道围岩的应力和位移的影响,分别取爆炸源正下方巷道拱顶中点 $P_1(P_4)$ 、左右两帮中点 $P_2$ 、底板中点 $P_3$ 、离爆炸源10 m和20 m的巷道拱顶中点 $P_5$ 和 $P_6$ 作为监测点,得出其相应的动态响应规律,如图4所示。

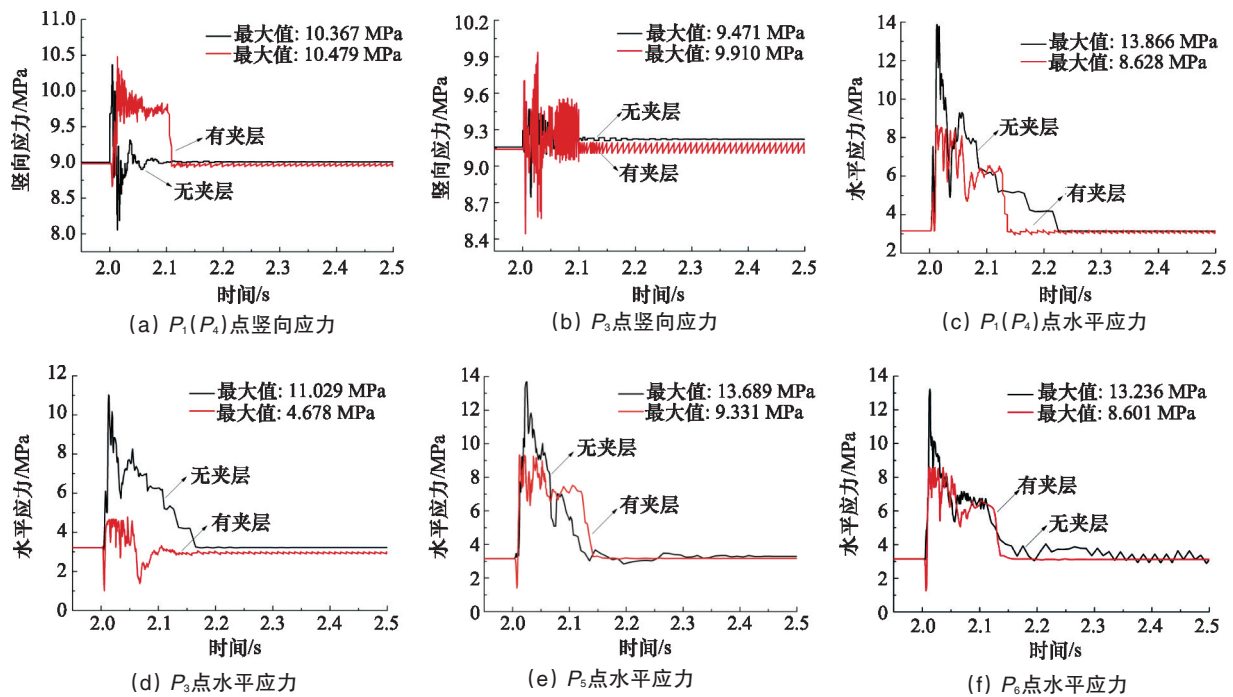


图4 应力动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curve of stress

由图4各应力动态响应曲线可以看出:首次接收应力波时对巷道围岩应力影响最为强烈,应力波动幅值最大,随后受往复的振荡作用,在动力扰动0.15 s左右后基本趋于稳定。由图4(a)和图4(b)可得出:含有软弱夹层的巷道拱顶中点竖向应力波动幅值略大于无软弱夹层,而巷道底板中点竖向应力波动幅值明显大于无软弱夹层的巷道;由图4(c)和图4(d)可得出:对于巷道围岩水平应力,无软弱夹层的巷道拱顶和底板中点波动幅值明显大于有软弱夹层巷道;由图4(c)、图4(e)及图4(f)可得出:离爆炸源越远,巷道拱顶中点水平应力波动幅值越小,但变化不明显,并且无软弱夹层明显大于有软弱夹层的巷道。

### 3.2 位移分析

在动力扰动下,巷道围岩的各监测点的位移表现出不同的动态响应规律,如图5所示。

由图5应力动态响应曲线可以看出:在动力扰动下,无软弱夹层巷道围岩变形速率大于有软弱夹层的巷道,并且在0.15 s左右后基本趋于稳定。由图5(a)可以得出:巷道拱顶和两帮中点的变形明显大于顶板中点,并且无软弱夹层的各监测点的变形明显大于有软弱夹层的巷道;由图5(b)可以得出:离爆炸源越远,巷道围岩拱顶中点的变形就越小,并且无软弱夹层的巷道拱顶中点变形明显大于有软弱夹层的巷道。由于软弱夹层的消减作用,应力波经过夹层后能量衰减,使得巷道围岩变形小于无软弱夹层的巷道。值得注意的是,在动力扰动下,巷道围岩变形先是达到最大值,然后有部分下降,最后趋于稳定。可能原因是黏弹性边界并没有把应力波全部消减掉,而是仍有小部分反射。

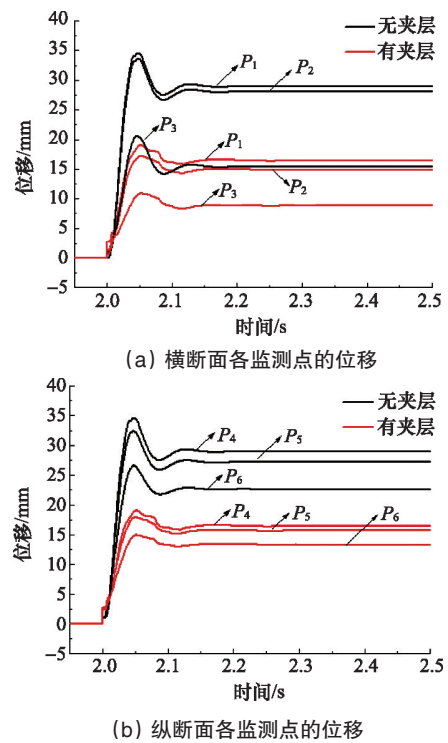


图5 位移动态响应曲线

Fig. 5 Dynamic response curve of displacement

### 3.3 塑性区分析

等效塑性应变等于初始等效塑性应变加上等效塑性应变率按时间的积分,是个累计的塑性变形(绝对值累加),可以表示结构变形中哪里发生过塑性变形,如图6所示。

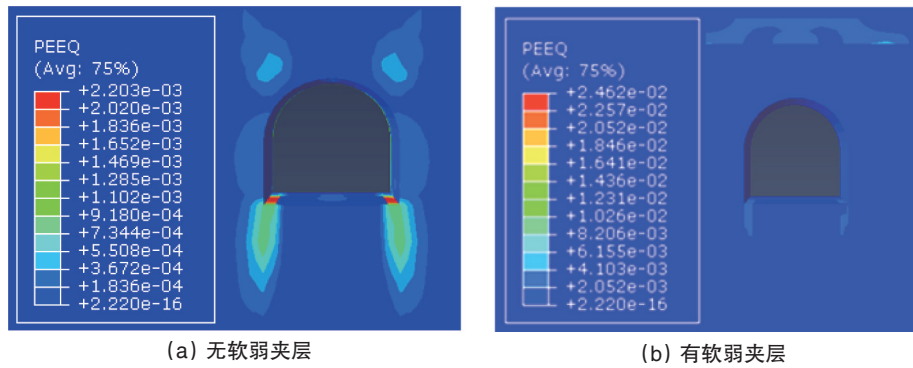


图6 巷道围岩等效塑性应变

Fig. 6 Equivalent plastic strain of roadway surrounding rocks

由图6可以看出:在动力扰动作用下,由于存在软弱夹层,应力波经过消减作用后,达到巷道围岩的应力会变小,因此巷道周围塑性区分布范围小于无软弱夹层的巷道。在图6(a)中,最先出现塑性区的是两帮与底板的交叉处和拱顶两侧,并逐渐向两边扩散;而在图6(b)中,软弱夹层比巷道围岩先出现塑性区,因此塑性区主要分布在软弱夹层,而巷道围岩较少。

### 3.4 支护优化

为了与冬瓜山铜矿实际情况对比,针对-760m水平52-11~12采场的出矿巷道进行调查分析。该巷道部分区段穿过蛇纹岩与矽卡岩的接触带,上部为矽卡岩,下部为蛇纹岩,软弱夹层(接触带)厚度约为1.0 m,离巷道顶板的距离约为1.0 m,呈水平赋存。该采场的出矿巷道拱顶是按一般的锚杆挂网喷射混凝土支护,但两帮则采用了锚杆挂网和浇筑混凝土支护,锚杆长度为1.5 m,方向基本呈扇形布置。

图7为巷道顶部蛇纹岩发生了冒落的破坏情况,而上部的矽卡岩却稳定,说明巷道顶板存在蛇纹岩与矽卡岩的接触带。在长期变化的高静应力和频繁的爆破振动的作用下,巷道顶板和两帮的稳定性大大降低,存在不同程度的破坏。在这种情况下,出矿巷道受到的垂直应力大于水平应力,当蛇纹岩不是很厚时,由于接触带的存在,使得其与上部坚硬的矽卡岩发生离层冒落。



图7 蛇纹岩层顶板冒落

Fig. 7 Roof caving of serpentinite

根据上述巷道的具体破坏形式,说明现行支护效果并不明显。主要是由于巷道顶板锚杆支护长度只有1.5 m,并没

有完全穿过矽卡岩与蛇纹岩接触带,没有起到很好的锚固作用,容易发生离层冒落。本文提出采用加大混凝土强度等级和厚度,加长锚杆的长度(完全穿透软弱夹层)并改变布置形式,发挥其有效的锚固力的数值模拟方案<sup>[16]</sup>,如图8所示。

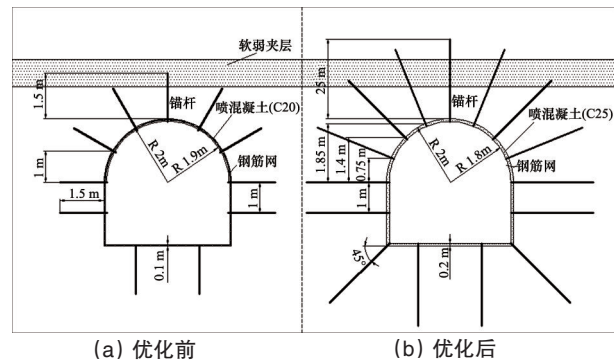


图8 巷道支护示意

Fig. 8 Sketch map of roadway support

经过上述支护方案的优化,巷道围岩的变形成得到有效的控制,效果显著,如图9所示。各监测点的位移都是原来无支护时的位移的1/3左右,巷道围岩变形成得到有效的控制,说明此方案可行。

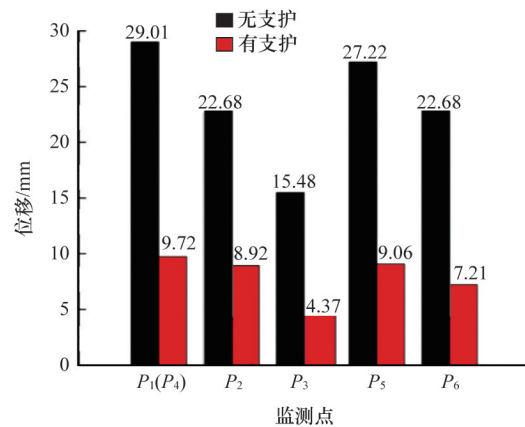


图9 支护前后的位移对比

Fig. 9 Comparison of displacement before and after the supporting

#### 4 结论

1) 动力扰动对有无软弱夹层的出矿巷道围岩的应力场、位移场和塑性区的影响有明显的不同:

(1) 含有软弱夹层的巷道拱顶竖向应力波动幅值略大于无软弱夹层巷道, 底板竖向应力波动幅值明显大于无软弱夹层巷道; 而巷道拱顶和底板水平应力波动幅值却小于无软弱夹层的巷道。

(2) 巷道顶板和两帮的变形明显大于底板的变形, 对于含有软弱夹层的巷道围岩变形明显小于无软弱夹层的巷道。

(3) 离爆炸源越远, 巷道围岩的应力和变形越小, 但变化不是很明显, 并且在动力扰动 0.15 s 左右基本趋于稳定。

(4) 由于软弱夹层的存在, 使得巷道围岩塑性区分布范围小于无软弱夹层巷道, 而在夹层上分布较多。

2) 基于对冬瓜山铜矿现场调查, 发现现行的支护方法效果并不好, 出现巷道顶板冒落的破坏形式, 从而提出了支护优化方案。该支护方法有效控制了巷道围岩的变形, 为改善现场支护提供一定的参考意义。

#### 参考文献 (References)

- [1] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448-455.  
Wang Mingyang, Zhou Zeping, Qian Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 448-455.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.  
He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922-928.  
Li Xibing, Li Diyu, Guo Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922-928.
- [4] 朱万成, 左宇军, 尚世明, 等. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 915-921.  
Zhu Wancheng, Zuo Yujun, Shang Shiming, et al. Numerical simulation of instable failure of deep rock tunnel triggered by dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 915-921.
- [5] 杨金林, 李夕兵, 周子龙, 等. 动力扰动对采空区稳定性影响的离散元分析[J]. 科技导报, 2010, 28(24): 48-52.  
Yang Jinlin, Li Xibing, Zhou Zilong, et al. Stability analysis of underground goaf influenced by dynamic disturbance with dimensional distinct element[J]. Science and Technology Review, 2010, 28(24): 48-52.
- [6] 高富强, 高新峰, 康红普. 动力扰动下深部巷道围岩力学响应 FLAC 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 680-685.  
Gao Fuqiang, Gao Xinfeng, Kang Hongpu. FLAC analysis of mechanical response of surrounding rock mass in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 680-685.
- [7] 温颖远, 牟宗龙, 易恩兵, 等. 动力扰动下不同硬度煤层巷道围岩响应特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 555-559.  
Wen Yingyuan, Mou Zonglong, Yi Enbing, et al. The response features of roadway surrounding rock in different hardness coal seams under dynamic disturbance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 555-559.
- [8] 唐礼忠, 周建雄, 张君, 等. 动力扰动下深部采空区围岩力学响应及填充作用效果[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(6): 623-628.  
Tang Lizhong, Zhou Jianxiong, Zhang Jun, et al. Mechanical response of deep stoped-out areas and filling effect under dynamic disturbance[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(6): 623-628.
- [9] 唐礼忠, 潘长良, 杨承祥, 等. 冬瓜山铜矿微震监测系统及其应用研究[J]. 金属矿山, 2006(10): 41-45.  
Tang Lizhong, Pan Changliang, Yang Chengxiang, et al. Establishment and application of microseismicity monitoring system in Donggua shan copper mine[J]. Metal Mine, 2006(10): 41-45.
- [10] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. Dordrecht: Springer, 2006: 166-167.
- [11] 李夕兵, 廖九波, 赵国彦, 等. 动力扰动下高应力巷道围岩动态响应规律[J]. 科技导报, 2012, 30(22): 48-54.  
Li Xibing, Liao Jiubo, Zhao Guoyan et al. Dynamic response of surrounding rock in highly-stressed tunnel under dynamic disturbance[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(22): 48-54.
- [12] 陈国祥, 窦林名, 高明仕, 等. 动力扰动对回采巷道冲击危险的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 153-157.  
Chen Guoxiang, Dou Linming, Gao Minshi, et al. Numerical simulation of dynamic vibration affecting rock burst in mining gateway caused by tremor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 153-157.
- [13] 龙源, 冯长根, 许全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(3): 1-7.  
Long Yuan, Feng Changgen, Xu Quanjun, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(3): 1-7.
- [14] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37.  
Gu Yin, Liu Jingbo, Du Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37.
- [15] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.  
Liu Jingbo, Wang Zhenyu, Du Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51.
- [16] Briaud J, Lim Y. Tieback walls in sand: numerical simulation and design implications[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 101-110.

(责任编辑 刘志远)