

# 动力扰动下高应力巷道围岩动态响应规律

李夕兵, 廖九波, 赵国彦, 周子龙, 邹洋

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 采矿过程中, 爆破震动等动载荷常会导致高应力巷道失稳塌陷, 诱发岩爆发生。根据弹性力学和应力波理论, 分析扰动波诱发高应力巷道失稳破裂的机制。针对用沙坝矿高应力巷道受到动力扰动破坏的情况, 运用颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 对动载荷作用下高应力巷道的稳定性进行数值计算, 通过改变动载荷幅值的大小, 探讨扰动应力波强度的变化对巷道围岩应力场、位移场及破坏区范围的影响, 对模型采用静力和动力两种计算方案。研究表明: 动载作用下巷道围岩应力场、位移场及破坏区范围相对静力计算结果显著增大; 随扰动应力波强度增加, 巷道顶、底板的应力、位移及裂纹数量也显著增加。为了避免动力扰动诱发高应力巷道失稳塌陷, 给出了几条建议。

**关键词** 动力扰动; 高应力巷道; 应力波; 动态响应; PFC<sup>2D</sup>

中图分类号 TD322

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.22.006

## Dynamic Response of Surrounding Rock in Highly-stressed Tunnel Under Dynamic Disturbance

LI Xibing, LIAO Jiubo, ZHAO Guoyan, ZHOU Zilong, ZOU Yang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Hunan 410083, China

**Abstract** The dynamic loading due to blasting vibrations often leads to local instability of the highly-stressed tunnel and the rock burst during mining. Based on the elasticity and the stress wave theory, the mechanism of the instability and the crack development due to the dynamic vibrations in the highly-stressed tunnel are analyzed. In order to see why the highly-stressed tunnel in Yongshaba mine might be severely destroyed by dynamic vibrations, the numerical simulations of the highly-stressed tunnel under dynamic loading are carried out with the particle flow software PFC<sup>2D</sup>, and the effects of the disturbance stress wave intensity on the stress fields, the displacement fields and the crack fields in the surrounding rock are investigated by varying the peak value of the dynamic loading. The static and dynamic calculations are carried out, separately. The results show that the extents of the stress fields, the displacement fields and the crack fields in the surrounding rock under a dynamic disturbance will increase obviously as compared to the static calculation results. The higher the disturbance stress wave intensity, the more significant the dynamic disturbance influences on the stress, displacement and crack fields both in the roof and the floor of the tunnel will be. Several suggestions are made to avoid the instability and the subsidence of the highly-stressed tunnel induced by the dynamic disturbance.

**Keywords** dynamic vibration; highly-stressed tunnel; stress wave; dynamic response; PFC<sup>2D</sup>

### 0 引言

目前, 对矿产资源需求量的日益增大已使浅部资源不断减少和枯竭, 国内外矿山开采深度逐年递增, 深部开采时代已经来临, 南非部分金矿开采深度已达 5km。深部工程岩体处于高温、高应力及采矿扰动等复杂条件下, 如何确保深部资源能

安全开采已成为矿业工程科学研究领域的难点和热点<sup>[1]</sup>。

对于深部高应力工程岩体的定义国内外尚未达成统一认识, 一般硬质岩体初始应力大于 20MPa 即为高地应力<sup>[2-3]</sup>。在深部仅重力产生的原岩垂直应力就可能引起深部巷道、矿柱及采场等失稳破坏, 同时深部岩体工程还处于各种不同的

收稿日期: 2012-06-18; 修回日期: 2012-07-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004); 国家自然科学基金资助项目(50934006); 中南大学学位论文创新资助项目(2011ssxt277)

作者简介: 李夕兵(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S032200319M), 教授, 研究方向为岩石破裂与岩石动力学, 电子信箱: xbli@mail.csu.edu.cn

扰动作用下,这将进一步诱发巷道和采场围岩的岩爆和局部失稳。在采矿工程中,机械振动、掘进爆破、地震波、四周采场作业产生的应力调整等都可能在岩体中产生动力扰动,进而诱发巷道等工程失稳。

李夕兵等<sup>[4]</sup>最早提出动静组合加载的思想,并采用大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对深井高应力矿柱在动力扰动下的三维动态力学行为进行了研究,认为外界较小强度的扰动都可能诱发深部承受极高初始静载的矿柱产生塑性破坏。朱万成等<sup>[5-6]</sup>对深部巷道工程围岩在动态应力作用下发生的破裂过程利用数值软件系统 RFPA 进行了分析,模拟结果表明:动态扰动导致巷道破坏与其所处的地应力状态息息相关。闫长斌等<sup>[7]</sup>对爆破载荷作用下采空区的围岩状况运用 FLAC<sup>3D</sup>进行了数值模拟分析,认为爆破震动波形对围岩位移分布有极大地影响,爆破动载扩大了围岩塑性区面积,同时使围岩应力场重新分布。左宇军等<sup>[8]</sup>对在动力扰动作用下高应力巷道围岩失稳过程利用 RFPA 软件进行了模拟,探讨了在动力扰动下受不同静载或不同埋深的高应力巷道的破坏规律。雷光宇等<sup>[9]</sup>则对扰动波作用下巷道围岩裂纹扩展过程利用 LS-DYNA 软件进行了模拟,分析了巷道围岩层裂结构的产生与扰动波强度、时程特性及巷道埋深等的关系。但用二维颗粒流程序 (PFC<sup>2D</sup>) 研究动力扰动下高应力巷道围岩的力学响应和失稳机制,由于问题的复杂性,相应的研究材料很少见于报道。

本文以用沙坝矿某高应力巷道受到动力扰动为背景,首先用一维应力波理论对高应力巷道在承受初始静载时的动力扰动模型进行了力学响应分析,然后利用颗粒流分析软件 PFC<sup>2D</sup>对动力扰动下该高应力巷道围岩力学响应进行了数值分析,研究在动力扰动下高应力巷道围岩的应力场、位移场及破坏区范围的变化规律。本文研究有助于探讨在动力扰动下深部高应力巷道发生失稳破坏的机制。

### 1 工程地质概况

用沙坝矿位于贵州省开阳县金中镇,是国内特大型磷矿床之一。在该矿区深部高应力巷道的稳定性深受爆破、地震等动力扰动的影响,动载荷不仅对巷道围岩产生损伤和破裂,甚至引起巷道塌陷,为此,有必要研究该矿高应力巷道在动力扰动下的动态力学响应规律。

本次计算区域选择位于用沙坝矿 W<sub>2+3</sub>-W<sub>3+1</sub> 勘探线之间埋深 660m 的某巷道及其周边围岩,该区域中岩性相对简单,仅分为磷矿石和红页岩 2 种,红页岩在矿体下盘,巷道主要布置在红页岩中,为直墙三心拱断面,净跨度 2.0m,墙高 1.5m,大芯弧半径为 1.81m,2 个小芯弧半径为 0.35m,巷道周围岩体节理不太发育,原始垂直应力为 10.67MPa,侧应力系数为 0.4。

### 2 扰动波诱发高应力巷道失稳机制

对于受高静载作用的深部巷道围岩,外界较小强度的动力应力扰动就可能诱发巷道失稳,甚至岩爆。图 1 是承受静载

和动载双重应力的某高应力巷道的力学模型。设原岩铅垂应力为  $P_s$ ,水平应力为  $F_s$ ,作用在围岩边界,按基尔希公式计算与水平轴夹角为  $\theta$  的径向线上距巷道中心为  $r$  处的围岩应力、位移<sup>[10]</sup>为

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

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

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

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

$$u_{\theta} = -\frac{P_s a^2}{4Gr} \left\{ (1-k) \left[ 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right] \sin 2\theta \right\} \quad (5)$$

其中,  $\sigma_{rr}$  为径向正应力;  $\sigma_{\theta\theta}$  为环向正应力;  $\sigma_{r\theta}$  为切向应力;  $u_r$  为径向位移;  $u_{\theta}$  为环向位移;  $k$  为侧压系数;  $P_s$  为铅垂应力;  $a$  为圆形巷道半径;  $r$  为离巷道中心的距离;  $\theta$  为极角;  $G$  为剪切模量;  $\nu$  为泊松比。

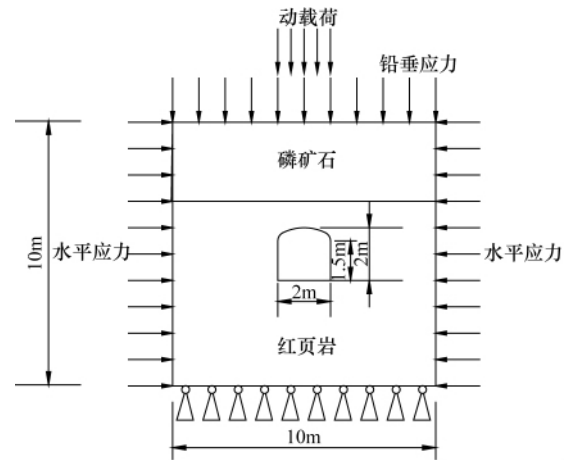


图 1 巷道的力学模型  
Fig. 1 Mechanical model of tunnel

由于拱形巷道围岩应力、位移分布缺乏精确的理论解,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表示如下:

$$r_0 = b(S/\pi)^{1/2} \quad (6)$$

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

$$\sigma_r = \sigma_0 e^{-\lambda(d-r_0)} \quad (7)$$

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

由岩体动量守恒、质量守恒及应力波边界条件可得反射波强度为

$$\sigma_{rr} = \sigma_r f_a \quad (8)$$

其中,  $f_a$  为反射系数,  $f_a = (1-n_A)/(1+n_A)$ 。巷道围岩表面波阻抗相

对于空气为无穷大,故  $n_A \approx \infty, f_c = -1$ 。此时入射应力波几乎全部变成拉应力波,应力仍为  $\sigma_t$ ,故巷道表面总应力为  $\sigma_n + \sigma_t$ 。由于岩体抗拉强度很小,当扰动波强度  $\sigma_t$  较大时,易导致巷道围岩受拉伸破坏<sup>[11]</sup>。如果外界应力波引起的围岩应力与扰动前的围岩应力场叠加,则巷道周围应力会急剧升高,当大于围岩的极限承载强度时,易诱发巷道围岩失稳,产生冒顶、片帮和底鼓等地压现象,能量急速释放,还有可能出现岩爆。

### 3 数值计算模型和方案

#### 3.1 颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 简介

PFC<sup>2D</sup> 采用离散单元法能直接模拟球形颗粒间的运动和相互作用的物理问题,特别适于研究颗粒集合体 (particles assemblies) 的破裂和破裂发展以及大位移的颗粒流问题。PFC<sup>2D</sup> 模型中离散的颗粒单元不断进行平移和旋转运动,分离的颗粒在计算过程中又可重新形成新的接触。颗粒流方法的理论基础是力-位移定律和牛顿第二定律,采取显式时步循环运算规则对球形颗粒进行循环计算。根据力-位移定律确定两个实体(颗粒-墙体或颗粒-颗粒)间的相对运动,并计算其间的接触力。根据牛顿第二定律计算每个颗粒由于体积力或接触力变化引起的颗粒运动(速度和位置)<sup>[12]</sup>。

PFC<sup>2D</sup> 既可解决静态问题也可解决动态问题,既可用于参数预测,也可用于在原始资料详细情况下的实际模拟。Fakhimi 等<sup>[13-14]</sup>对岩石中的开挖问题运用 PFC<sup>2D</sup> 进行了模拟,探讨了圆洞周围的破坏情况。

用 PFC<sup>2D</sup> 本身自带的 FISH 语言,PFC<sup>2D</sup> 程序在宏观方面可以监测模型的宏观应力-应变关系、局部位移及表面裂隙的扩展情况,微观方面可以观察到模型内部各点的应力-应变关系、接触力、速度、裂纹及应变能等物理量的变化。同时,PFC<sup>2D</sup> 中有专门用于动力学分析的模块,可以研究动态载荷

导致物体发生相应的动态响应规律。

#### 3.2 PFC<sup>2D</sup> 动力计算步骤

应用 PFC<sup>2D</sup> 动力计算程序对高应力巷道进行动静计算,其分析步骤如下:(1) 固定模型下部边界,对上部边界施加与覆岩厚度相应的垂直应力,对两侧边界分别施加相应的水平应力,模型施加上述应力,算至初始平衡状态,得到原岩应力场;(2) 挖去模型中间的部分颗粒,模拟高应力巷道开挖,算至平衡得到此时巷道围岩应力场、位移场和破坏区情况;(3) 在巷道对应范围内的上部边界施加不同扰动波,底面设置安静边界条件,两侧面设置自由域边界条件,最后给模型设置动力计算时步和阻尼,得到动力计算结果<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 数值分析模型

将室内试验的岩石物理力学参数折减换算成岩体物理力学参数(表 1)。

表 1 用沙坝矿岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the rocks in Yongshaba mine

类别	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	内摩擦角/(°)
磷矿石	20.65	3.34	0.22	0.89	41.9
红页岩	9.73	1.49	0.33	0.52	42.8

数值计算采用 PFC<sup>2D</sup> 建立二维数值模型。共定义上、下、左、右 4 道墙体,模型宽 10m,高 10m,模拟时颗粒半径为 10—30cm,服从高斯分布。为了使模拟结果更接近实际情况,即数值模型和室内试验两者所得岩体物理力学参数比较一致,需要调试 PFC<sup>2D</sup> 数值模型中的参数,经过反复试算,最后选定合理的参数(表 2),并建立了基本的数值模型(图 2),模

表 2 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟参数

Table 2 PFC<sup>2D</sup> numerical simulation parameters

参数名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	摩擦系数	粒径/cm	颗粒法向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	颗粒切向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	接触黏结强度/N	平行黏结刚度/(N·m <sup>-3</sup> )	平行黏结强度/(N·m <sup>-2</sup> )
磷矿石	2875	1.0	10—30	1.5×10 <sup>11</sup>	1.5×10 <sup>11</sup>	2.2×10 <sup>7</sup>	0	0
红页岩	2785	1.0	10—30	4.5×10 <sup>10</sup>	4.5×10 <sup>10</sup>	7.4×10 <sup>6</sup>	0	0

型中颗粒总数目为 70028 个,拱形巷道区域共挖去 2673 个颗粒,剩余 67355 个颗粒。

#### 3.4 计算方案

为了研究在动载荷作用下高应力巷道围岩应力场、位移场和破坏区的变化规律,采用颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup> 较为系统地模拟分析了巷道在开挖和动力扰动下的稳定性,研究结果有利于对巷道失稳和岩爆进行预测。计算方案分为:自重应力场下高应力巷道开挖计算;动力扰动下高应力巷道动态计算。

在数值计算时巷道附近掘进爆破、岩板断裂等类似扰动应力波可取动载波形中谐波<sup>[16]</sup>的一段,其应力时程表征为

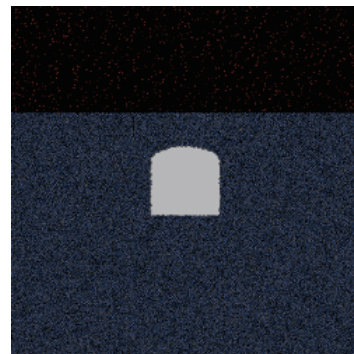


图 2 巷道的数值模型

Fig. 2 Numerical model of tunnel

$$P(t) = \begin{cases} P_{\max} [\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\pi\omega t)] & t \leq 1/\omega \\ 0 & t > 1/\omega \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $P_{\max}$  为扰动应力峰值,  $\omega$  为动载作用频率,  $t$  为持续时间。

在 PFC<sup>2D</sup> 动力计算程序中, 动载持续作用时间取为 15ms, 计算时间取为 250ms。为了分析不同扰动应力波峰值  $P_{\max}$  对高应力巷道围岩动态响应的影响, 分别选取 3 种动载作用方案: 第 1 动力扰动  $P_{\max}=30\text{MPa}$ , 应力波时程曲线如图 3 所示; 第 2 动力扰动  $P_{\max}=60\text{MPa}$ ; 第 3 动力扰动  $P_{\max}=90\text{MPa}$ 。

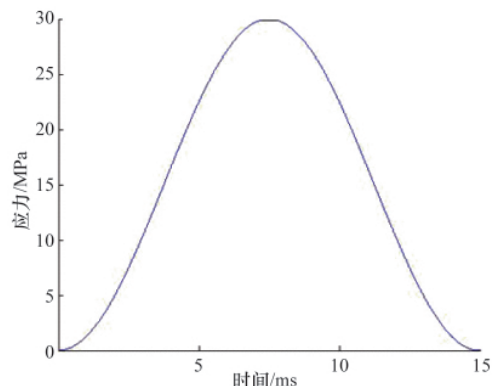


图 3 应力波时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of stress wave

#### 4 数值模拟计算结果分析

##### 4.1 应力场分析

图 4 为巷道开挖后拉应力分布图, 巷道围岩在开挖前都是以压应力为主, 但在开挖后许多关键部位应力集中比较明显, 出现了较大的拉应力, 巷道顶、底板和两帮数值较大, 其最大拉应力值分别为 0.28、0.53 和 0.47MPa, 说明这些区域易受开挖的影响, 由于岩体抗拉强度很小, 易导致巷道围岩受拉伸破坏。这些拉应力集中的关键部位, 不利于巷道的稳定, 易出现较大破坏, 应在最佳支护时间段内加强支护。

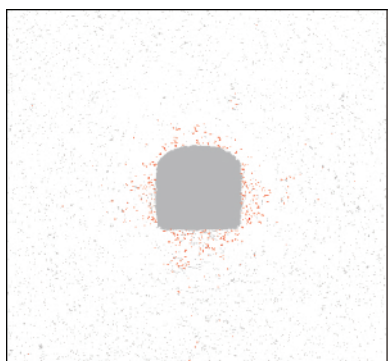


图 4 开挖后围岩拉应力分布

Fig. 4 Distribution of tensile stresses in surrounding rock after excavation

图 5 为巷道施加动载荷 1 后拉应力分布图, 可以看出, 巷道两帮处的拉应力集中程度有所减小, 而巷道顶、底板拉

应力集中明显加强, 并有向 4 个角延伸的趋势, 这些区域最大拉应力很可能大于岩体的抗拉强度, 应加强支护措施, 预防巷道出现冒顶等地压现象。动载荷 2 和动载荷 3 作用后对围岩拉应力二次重分布的影响与动载荷 1 作用后基本类似, 但随动载荷强度的增加, 拉应力影响范围变大。

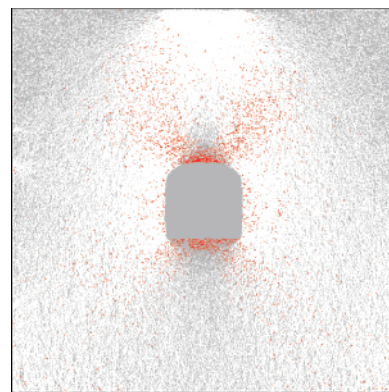


图 5 施加动载 1 后围岩拉应力分布

Fig. 5 Distribution of tensile stresses in surrounding rock after dynamic loading 1

在计算分析过程中, 分别在拱顶和拱底处布置 1 个测量圈, 监测其围岩应力重分布状况。图 6、图 7 分别为不同动力扰动峰值下拱顶和拱底竖向应力时程曲线。可以看出, 巷道开挖后, 围岩应力重新分布, 此时顶、底板围岩竖向应力分别为 2.95 和 1.79MPa, 施加动载荷后, 顶、底板竖向应力明显增大, 但增大到峰值后, 又快速地恢复到初始的围岩应力状态。在动载荷 1 作用下, 顶、底板竖向应力分别为 41.19 和 13.55MPa; 在动载荷 2 作用下, 顶、底板竖向应力分别为 71.96 和 19.99MPa; 在动载荷 3 作用下, 顶、底板竖向应力分别为 99.79 和 24.90MPa, 可见, 随动载荷强度的增加, 竖向应力也明显增大, 在深部高应力环境下, 这部分在动力扰动作用下达到极高应力状态的巷道顶、底板竖向应力峰值具有诱发岩

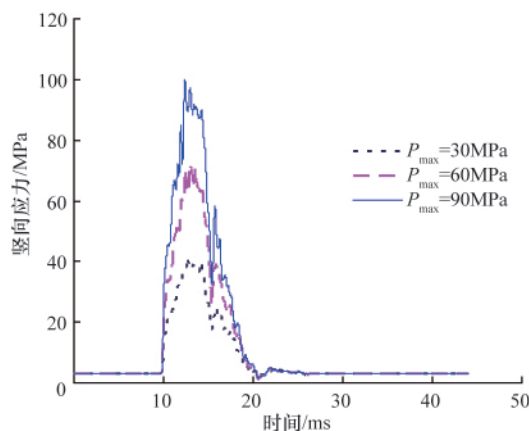


图 6 不同动力扰动峰值下拱顶竖向应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of vertical stress in vault under the action of dynamic disturbance of different amplitudes

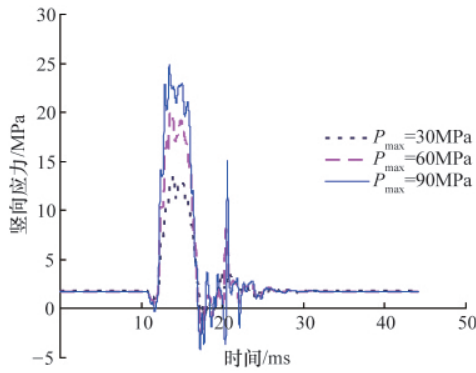


图7 不同动力扰动峰值下拱底竖向应力时程曲线

Fig.7 Time-history curves of vertical stress in arch foot under the action of dynamic disturbance of different amplitudes

爆的危险,这也是动力扰动诱发深部高应力巷道围岩失稳破裂的主要机制。

#### 4.2 位移场分析

图8为巷道开挖后围岩位移场图,可见,高应力巷道受开挖和原岩应力场的影响,巷道顶、拱板及两帮的位移较大,说明这些位置受开挖的影响较大,而左上、左下、右上和右下4个角点处位移较小。位移最大值发生在拱底的位置,其值达到31.25mm,易出现地压底鼓现象,这些结论与现场变形监测一致。在深部围岩中,顶板下沉量、底鼓量和两帮移近量是整个巷道变形量的主要部分,在支护设计时主要就是控制巷道围岩的3种变形。数值模拟结果表明,软岩巷道开挖后,应尽早地进行支护以便有效地控制围岩的变形。

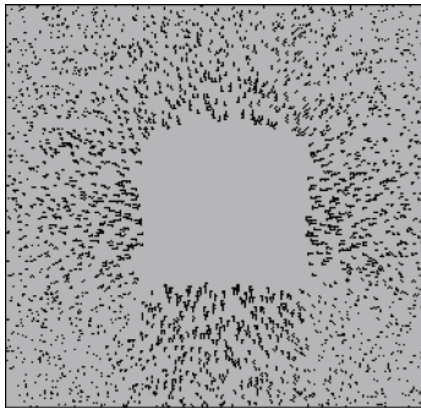


图8 开挖后围岩位移场

Fig.8 Displacement field in surrounding rock after excavation

图9为巷道施加动载荷1后围岩位移场图,可以看出,相对静力计算结果,巷道两帮位移变化不明显,而顶、底板围岩处位移明显增大,动载荷2、3作用对巷道围岩位移变化的影响与动载荷1作用基本类似,只是影响范围有所增大。图10为不同动力扰动峰值下巷道顶板下沉量时程曲线,可见,

在不同的扰动应力波强度作用下巷道顶板下沉量明显不同。巷道开挖后顶板的下沉量为26.68mm,在扰动波峰值 $P_{\max}=30\text{MPa}$ 的作用下,巷道顶板下沉量为52.47mm,相对静力计算结果增加了23.73mm。在扰动波峰值 $P_{\max}=60\text{MPa}$ 的作用下,巷道顶板下沉量为58.17mm,相对静力计算结果增加了29.43mm。在扰动波峰值 $P_{\max}=90\text{MPa}$ 的作用下,巷道顶板下沉量为63.14mm,相对静力计算结果增加了34.40mm。可见,扰动应力波强度越高,动载荷作用前后巷道顶板下沉量的增量越大。这说明,施加动力扰动,不仅改变了围岩位移的分布范围和形式,而且增大了巷道顶、底板的位移量。

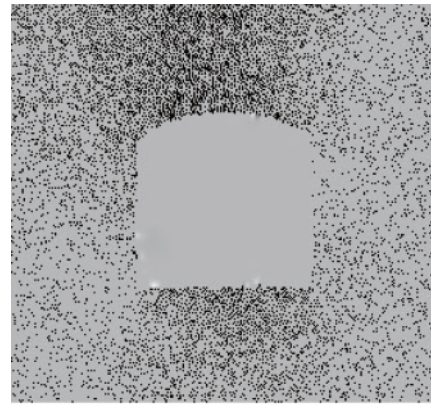


图9 施加动载荷1后围岩位移场

Fig.9 Displacement field in surrounding rock after dynamic loading 1

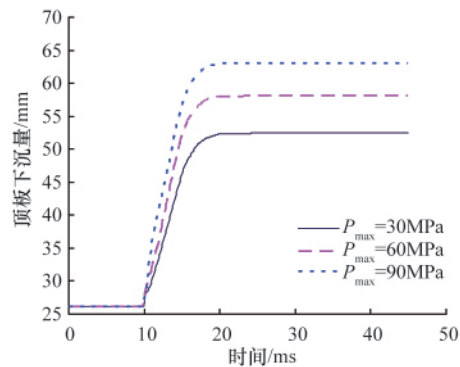


图10 不同动力扰动幅值下顶板下沉量时程曲线

Fig.10 Time-history curve of roof displacement under the action of dynamic disturbance of different amplitudes

#### 4.3 破坏区分析

图11,图12分别为开挖后和施加动载荷1后围岩裂纹分布图,可见,施加动载荷1后,顶板裂纹数量相对静力计算结果明显增加,破裂区已与巷道顶板贯通,其主要由静态的拉伸应力与扰动波到达顶板后反射为拉伸应力波叠加引起。当施加动载荷2、3时,破坏模式基本类似,但破坏区的范围加大,底板也会逐渐出现裂纹扩张情况。说明破坏区分布面积与扰动波强度呈正比。

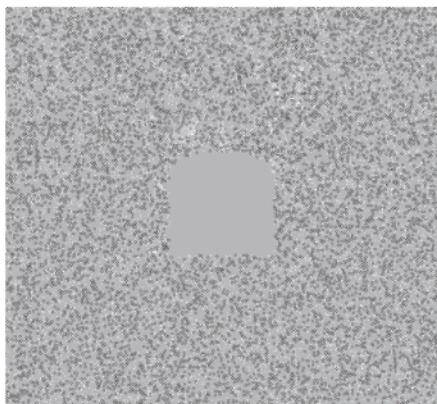


图 11 开挖后围岩裂纹分布

Fig. 11 Distribution of crack in surrounding rock after excavation

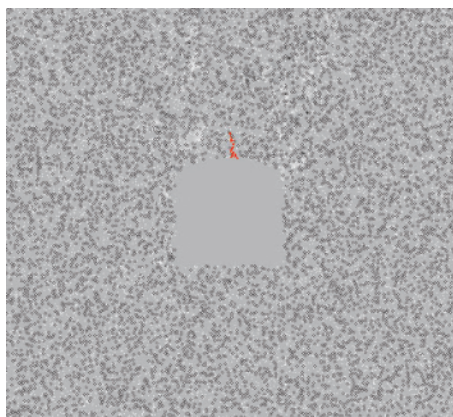


图 12 施加动载 1 后围岩裂纹分布

Fig. 12 Distribution of crack in surrounding rock after dynamic loading 1

图 13 为不同动力扰动下拉伸裂缝和剪切裂缝比较图,在不同的动力扰动作用下巷道围岩裂纹扩展情况明显不同。在扰动波峰值  $P_{max}=30\text{MPa}$  的作用下拉伸裂缝和剪切裂缝数量分别为 23 和 12, 在扰动波峰值  $P_{max}=60\text{MPa}$  的作用下拉伸裂缝和剪切裂缝数量分别为 105 和 43, 在扰动波峰值  $P_{max}=90\text{MPa}$  的作用下拉伸裂缝和剪切裂缝数量分别为 332 和 73。

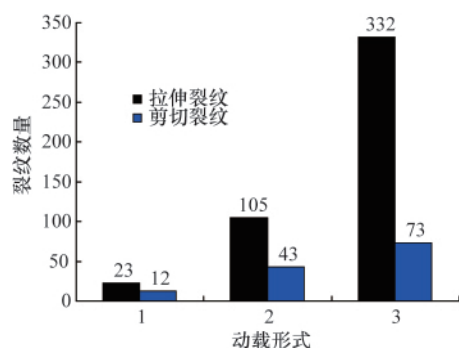


图 13 不同动力扰动下拉伸裂缝和剪切裂缝

Fig.13 The comparison of tensile crack and shear crack under different dynamic disturbances

90MPa 的作用下拉伸裂缝和剪切裂缝数量分别为 332 和 73。可见随着扰动波强度的增加,模型中由拉应力或剪应力形成的裂纹数量显著增加,其中又以拉伸破坏为主<sup>[17-18]</sup>。

### 5 结论

通过对在动力扰动下用沙坝矿高应力巷道围岩进行力学响应分析和 PFC<sup>2D</sup> 数值计算,可得到以下结论。

(1) 巷道开挖后,围岩会产生应力重分布现象,巷道顶、底板和两帮处拉应力集中程度较高;施加动力扰动后,围岩应力场再次发生重分布,巷道顶、底板拉应力集中相对静力计算结果明显加强,并有向 4 个角延伸的趋势;随动载荷强度的增加,拉应力影响范围变大,顶、底板竖向应力也明显增大。

(2) 静力开挖后,巷道顶、底板及两帮的位移较大;施加动载后,巷道两帮位移变化不明显,而顶、底板围岩位移明显增大;动力扰动作用不仅改变了围岩位移的分布范围和形式,而且增大了巷道顶、底板的位移量;动载幅值越高,巷道顶板下沉量的增量越大。

(3) 动载作用下巷道顶、底板裂纹数量相对静力计算结果明显增加,局部破裂区已与顶板贯通;随扰动波强度的增加,不仅破坏区的范围加大,而且由拉应力或剪应力形成的裂纹数量也显著增加,其中又以拉伸破坏为主。

(4) 为了避免动力扰动诱发沙坝矿高应力巷道顶板塌陷,建议采取如下措施:① 尽可能减少动载荷的幅值,使用小药量微差爆破;② 对巷道顶板采用新型顶角吸能锚杆、锚索、金属网和喷射混凝土等有效措施加强支护;③ 加强地压监测,可采用微震监测系统。

### 参考文献 (References)

- [1] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿 [J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 1-5.  
Gu Desheng, Li Xibing. *Mining research and development*, 2003, 23(2): 1-5.
- [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. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变 [C]//科学前沿与未来, 第 6 集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 101-108.  
Li Xibing, Gu Desheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth [C]//Science Foreland and Future, Volume 6. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 101-108.
- [4] 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 Diyuan, Guo Lei, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 922-928.
- [5] Zhu W C, Tang C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading [J]. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(2): 236-252.
- [6] 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. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 915-921.
- [7] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵, 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC 加分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894-2899.  
Yan Changbin, Xu Guoyuan, Li Xibing, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [8] 左宇军, 唐春安, 朱万成, 等. 深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 742-746.  
Zuo Yujun, Tang Chunan, Zhu Wancheng, et al. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(6): 742-746.
- [9] 雷光宇, 卢爱红, 茅献彪. 应力波作用下巷道层裂破坏的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1477-1480.  
Lei Guangyu, Lu Aihong, Mao Xianbiao. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9): 1477-1480.
- [10] Brady B H G, Brown E T. *Rock mechanics for underground mining*[M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [11] 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. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(2): 153-157.
- [12] Itasca Consulting Group. PFC<sup>2D</sup> theory and background [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2008.
- [13] Hazard J F, Young R P. Simulating acoustic emissions in bonded-panicles models of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5): 867-872.
- [14] Wang C, Tannant D D, Lilly P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2003, 40(3): 415-424.
- [15] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2551-2563.  
Li Xibing, Yao Jinrui, Gong Fengqiang. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [16] 龙源, 冯长根, 徐全军, 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. *Engineering Blasting*, 2000, 6(3): 1-7.
- [17] 张晓春, 缪协兴. 层状岩体中洞室围岩层裂及破坏的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1645-1650.  
Zhang Xiaochun, Miao Xiexing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1645-1650.
- [18] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 247-293. (责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



## “第 19 届中国大气环境科学与技术大会”征文

中国环境科学学会大气环境分会定于 2012 年 11 月 7—10 日在山东省青岛市举行“第 19 届中国大气环境科学与技术大会暨中国环境科学学会大气环境分会 2012 年学术年会”。

征稿范围:(1)大气气溶胶科学;(2)大气复合污染和区域空气质量;(3)污染气象与大气污染过程;(4)环境空气质量与人体健康;(5)环境空气质量与气候变化;(6)大气综合观测与遥感技术;(7)大气监测新技术与仪器研制;(8)空气质量模拟与预报预警;(9)大气污染控制与减排;(10)大气环境管理与政策。

摘要截稿日期:2012 年 8 月 31 日

全文截稿日期:2012 年 10 月 5 日

联系电话:0532-66781397

电子信箱:liuxh1983@ouc.edu.cn

会议网站:[http://www.chinacses.org/c/cn/news/2012-07/05/news\\_5067.html](http://www.chinacses.org/c/cn/news/2012-07/05/news_5067.html)