

文章编号: 1000-7598(2009)08-2501-05

深部岩柱在动态扰动下力学响应的数值模拟

隋斌, 朱维申, 李树忱

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘要: 在复杂应力状态下对深部岩柱动态扰动的力学响应进行了数值模拟。通过改变侧压系数, 来改变岩柱所受的地应力状态, 进而分析不同应力状态下岩柱对外界动力扰动的力学响应; 通过改变动态扰动的作用时间, 来分析动态扰动时间的变化对处于不同应力状态下的岩柱稳定性的影响。数值模拟结果表明, 动态扰动对巷道岩柱破坏的触发与岩柱所处的地应力状态密切相关, 侧压系数越小, 外界的动态扰动对其影响就越明显。动态扰动的作用时间也是影响巷道岩柱稳定的重要因素, 随着应力波作用时间的延长, 动态扰动给巷道稳定性带来的影响越大。

关键词: 深部岩体; 动态扰动; 侧压系数; 失稳破坏; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Simulation of mechanical response of deep rock pillar triggered by dynamic disturbance

SUI Bin, ZHU Wei-shen, LI Shu-chen

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The mechanical response of deep rock pillar, which is under complicated stress condition and then subjected to dynamic disturbance, is numerically simulated. Under different lateral pressure coefficients, the dynamic response characteristics of the pillar are characterized; and the effect of the duration of dynamic disturbance on the pillar stability is studied. Through the numerical analysis of the pillar in deep rock, it is found that the triggering action of dynamic disturbances is closely pertinent to the static in-situ stress condition and the action time of the dynamic disturbance. In general, it brings about greater influences on the stability of underground tunnels with the decreasing lateral pressure coefficient and with the prolonged duration of dynamic disturbance.

Key words: deep rock; dynamic disturbance; lateral pressure coefficient; unstable failure; numerical simulation

1 引言

随着我国西部大开发, 一大批重大基础设施建设, 如南水北调、西电东送等, 正以前所未有的速度展开。资源开发、石油开采、地热开发等也已开始向深部发展。西部地区的高山峡谷以及采深的增加, 使得复杂地应力、高地应力的问题日益突出。工程实践表明, 在高地应力下的矿产开采过程中, 不同阶段的爆破作业对上一阶段或下一阶段采场中矿柱的承载强度及巷道的围岩稳定性产生较大影响, 自然地震或人工地震也会使巷道和矿柱突然失稳^[1-2]。同时, 在开挖过程中处于高地应力区的地

下工程, 其硬脆性岩体能量急剧释放的现象表现得较为突出, 这种能量的急剧释放能够引起岩体的失稳破坏, 在工程中往往体现为岩体的灾变破坏。

人们对在高应力下岩石的力学性质、动力特性、岩爆的机制和预测等方面进行了大量研究, 得出了一些重要成果, 但在研究高应力下岩石力学性质的过程中, 主要研究的是岩石在高静载应力下的性质, 而未考虑动态扰动对高应力岩石的影响^[2]。岩体这种由于动态扰动产生的破坏可以是“自励”的, 也可是“远距离诱发式”的。“自励”是指岩体在由三向受力状态突然变为单向或双向受力时岩体强度迅速降低, 岩体储存的弹性应变能超过岩体的极

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 90510019); 国家自然科学基金面上项目(No. 50579033); 国家 973 项目(No. 2002CB412705)。

第一作者简介: 隋斌, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学数值计算方面的研究。E-mail: suibin666@163.com

通讯作者: 朱维申。E-mail: zhuw@sdu.edu.cn

限储存能,从而导致岩体存储的弹性应变能迅速释放。“远距离诱发式”是指在远处微震事件的应力波的激发下,使处于较高的应力状态并且接近极限平衡状态局部的围岩获得动能而产生不稳定破坏^[3-4]。对于深部高地应力下的岩体,它首先承受高地应力的作用。随着开挖的进行,会在巷道周边引起应力的重新分布,同时应力集中较为明显,这些都会使围岩的应力状态变得更为复杂。在复杂应力状态下,动态扰动往往会成为触发巷道破坏和岩爆的一个重要因素,研究动态扰动对于巷道的失稳以及岩爆的触发作用也更加突出。因此,研究处于复杂应力状态的岩体在动态扰动条件下的破坏过程对于认识岩爆等矿山动力灾害的发生机制是至关重要的。

许多学者测试了岩石在动态载荷作用下的动态强度并建立了本构关系,提出了许多基于断裂力学或损伤力学的模型^[5-6]。还有不少学者运用能量的方法对动态扰动下岩体的破坏和岩爆的发生机制进行了研究^[1,3,7]。李夕兵等^[2]对深部矿柱在承受高静载应力时的动力扰动力学模型进行应力波传播力学响应分析,研究了圆形矿柱在承受不同静载作用时对动力扰动的力学响应特性,但并未考虑三向的受力状态和动载作用时间的影响。左宇军等^[5]在对受静载下岩石动态断裂的突变理论模型研究之后,进行了动静组合加载下岩石失稳破坏的突变理论及试验分析。朱万成^[11]采用 RFPA 软件对动态扰动触发深部巷道的失稳破坏进行了数值模拟,分析了不同因素对巷道稳定的影响。

FLAC^{3D} 程序中的动力计算模块在岩土工程分析中的优势和求解动力问题的特点^[12],使其能很好地解决非线性动力分析问题。本文利用 FLAC^{3D} 对深部高应力区的岩柱在动力扰动下的三维力学响应进行分析,目的在于研究不同的地应力状态和动态扰动作用时间对深部巷道岩柱失稳破坏的影响,为复杂地应力条件下巷道的设计与施工安全提供一些参考和依据。

2 计算模型

本文选取深部巷道周围的岩柱作为研究对象,对其在动态扰动下的力学响应进行三维数值分析。选取图 1(a)所示范围内的岩柱进行分析,岩柱高为 20 m,计算区域被划分为 2 703 单元、3 372 个节点,网格划分如图 1(b)所示。静态计算时模型下部边界施加法向固支约束(x, y, z 三个方向位移

均等于 0),四周边界约束水平方向的位移,在上部边界施加竖直方向静载 P 。初始地应力按照施加体力的方式进行计算,即分别对单元的应力进行赋值:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \lambda \sigma_{zz} \quad (1)$$

式中: λ 为侧压系数。为研究外界动力扰动对岩柱稳定性的影响,静载计算平衡后在模型上边界施加动载 $P(t)$,同时将固定约束变为黏滞边界。

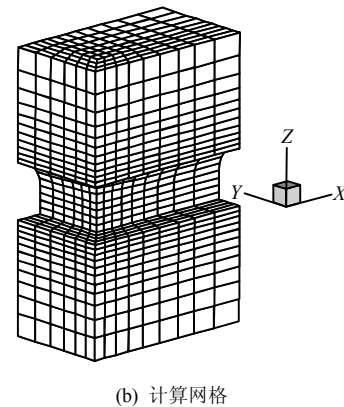
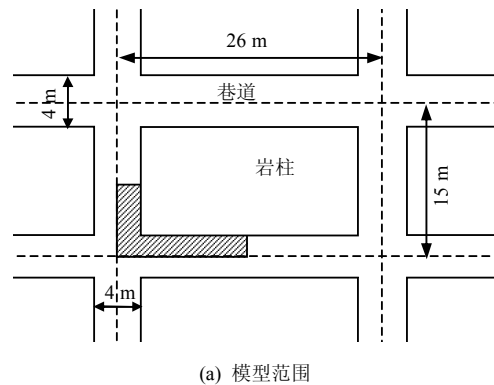


图 1 数值模型和网格划分

Fig.1 Numerical model and mesh of pillar in deep rock

为了更好地模拟高地应力下硬岩的脆性破坏,计算本构模型采用一种弹脆塑性本构模型——黏聚力弱化摩擦强化模型(CWFS)^[13],其基本原理如图 2 所示,岩体的物理力学参数见表 1^[3]。

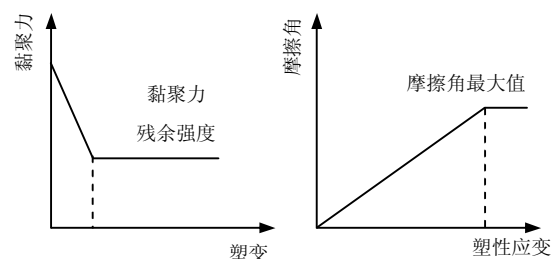


图 2 CWFS 模型

Fig.2 Illustration of the CWFS model

表1 深部岩体的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of pillar in deep rock

弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	黏聚力残余值 /MPa	黏聚力临界 塑性应变/%	摩擦角峰值 /(°)	摩擦角临界塑性 应变/%	抗拉强度 /MPa	密度 /(g/m ³)
30	0.2	35	3.5	0.16	43	0.45	10	2.65

为了计算方便,假设动态扰动荷载 $P(t)$ 表示为图3所示的梯形脉冲应力^[11]。扰动荷载的峰值为 $P_{\max}$, 总的作用时间为 t , 其中上升段和下降段的时间均为 1.0 ms, 峰值持续段时间为 $t-2.0$ ms。本文主要研究侧压系数和作用时间取不同数值时巷道岩柱的破坏形态和力学响应。数值计算中所考虑的侧压系数和动态扰动参数见表2。

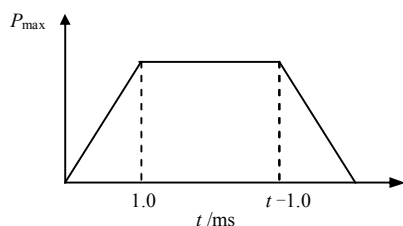


图3 应力波-时程曲线

Fig.3 Time-history curve of stress wave

表2 数值计算的参数

Table 2 Parameters of dynamic disturbance used in numerical simulations

静载 /MPa	侧压系数	应力波峰值 $P_{\max}$ /MPa	应力波作用时间 t /ms
30	0.5	100	3
	1.0		4
	2.0		6

3 计算结果与分析

3.1 侧压系数的影响

侧压系数直接决定巷道周边的静态应力分布,使巷道处于复杂的应力状态中。在本文中,假定水平方向的侧压系数相同,分别采用 λ 为 0.5、1.0 和 2.0 来研究不同应力状态下动态扰动对深部巷道岩柱稳定性的影响。为较为真实地反映地应力状态,首先按侧压系数不同进行初始地应力计算,然后开挖巷道部分,计算平衡后施加动力荷载进行动力计算。

图4为岩柱中心单元的应力-时程曲线。可以看出,当侧压系数较高时($\lambda=2.0$),单元的竖向应力 σ_{zz} 在增大到峰值以后基本都能恢复到初始的应力状态,而水平方向的应力则基本保持不变,单元在应力波作用下大都表现为弹性状态。对比各不同侧压系数的情况可知,侧压系数对岩柱中单元的竖向应力的峰值影响不是很大。由于岩柱本身的阻尼作用,远离岩柱顶部的单元其应力峰值逐渐减小。

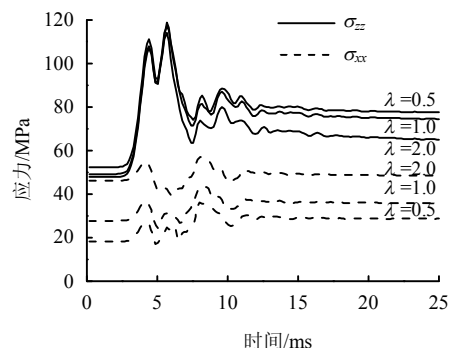
图4 岩柱监测单元应力时程曲线($t=4$ ms)Fig.4 Time-history curves of stress for monitoring zone when $t=4$ ms

图5为不同时间阶段岩柱塑性区分布图。可以看出,静态平衡后,当 $\lambda=0.5$ 时,破坏主要分布在巷道的顶板和底板部分;当 $\lambda=1.0$ 时,在巷道交叉的部位有少量的破坏;当 $\lambda=2.0$ 时,巷道的两帮处于高拉伸应力区,出现大量拉伸破坏。动态扰动结束以后,在侧压系数较小情况下($\lambda=0.5$),破坏主要

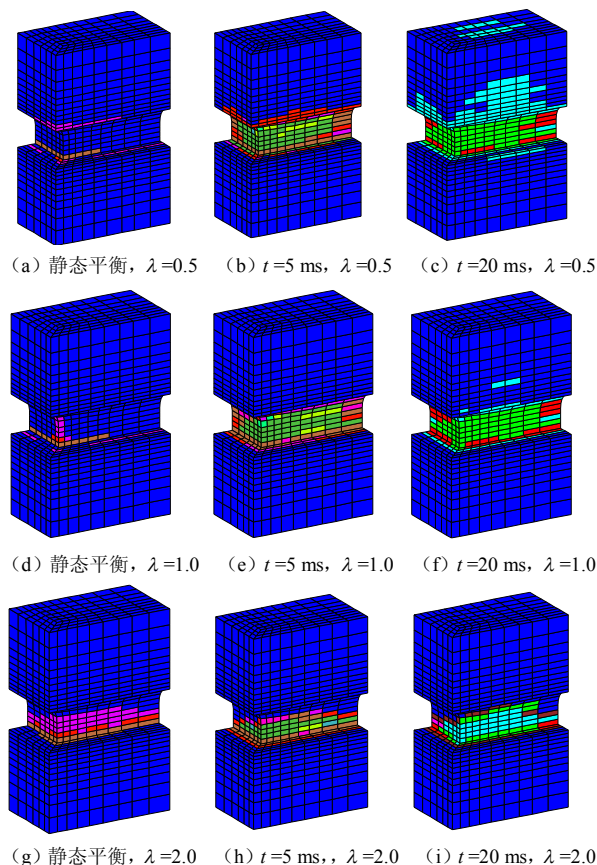


图5 岩柱的塑性区分布图

Fig.5 Distribution of plastic zones

集中于巷道的顶板和两帮位置,在远离巷道周围的地方也有部分单元破坏;随着侧压系数的增大($\lambda=2.0$),在巷道顶板附近也形成了塑性区,底板的塑性区的范围有所减少,在远离巷道周边则没有单元破坏。侧压系数的变化影响着巷道的塑性区范围,随着侧压系数从 0.5 增加到 2.0,在顶、底板以及两帮的塑性区范围均有减少。在动态扰动作用下,当侧压系数较低($\lambda=0.5$)时,巷道的稳定性较差。而在侧压系数较大的地应力条件下巷道是较为稳定的,但动态扰动的触发也会使得巷道产生破坏。

3.2 应力波作用时间的影响

沿 z 轴方向从上而下每隔 5 m 布置一个监测单

元(1[#]~5[#])以监测单元竖向应力的变化。图 6 为单元竖向应力-时程曲线。可以看出,监测单元竖向应力的峰值基本不变,只是峰值的持续时间有所延长,最后基本恢复到初始的静载状态,随着距岩柱顶部距离的增加竖向应力的峰值逐渐减小。同时,塑性区分布也因动态扰动作用时间的不同而有所变化。当动态扰动荷载的作用时间为 3、4 ms 时,顶板和两帮出现一定塑性区。当作用时间为 6 ms,除了巷道顶板和两帮有相似的破坏外,底板也出现了局部破坏。总的来说,随着应力波作用时间的延长,动态载荷作用下巷道的破坏区范围增大,而且在距离巷道顶板更远的位置也开始出现破坏。

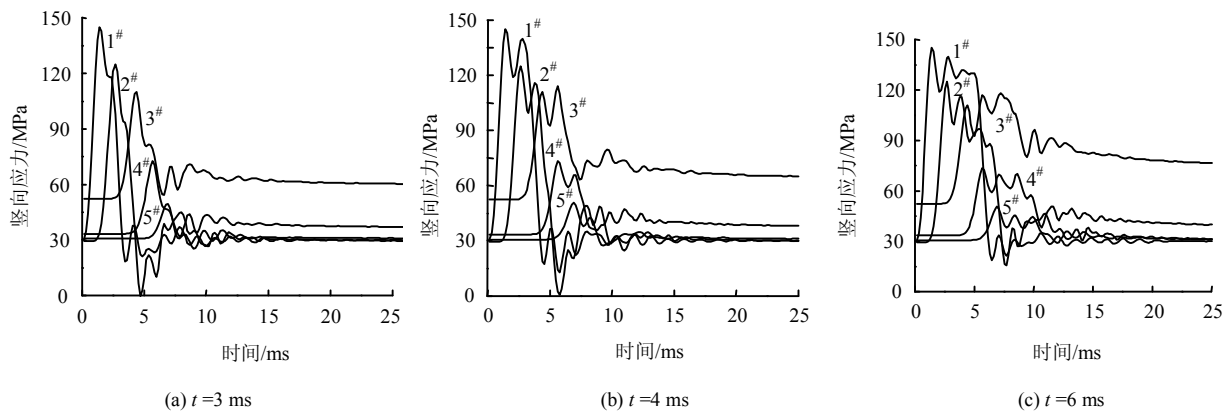


图 6 岩柱各监测单元竖向应力-时程曲线($\lambda=2.0$)

Fig.6 Time-history curves of vertical stress for monitoring zones when $\lambda=2.0$

3.3 动态扰动对弹性释放能的影响

动态扰动下岩柱单元的应变能-时程曲线形状与应力-时程曲线相似。表 3 为部分计算结果的比较。在侧压系数不变的情况下,随着动态扰动持续时间的增加,单元的塑性区范围和弹性释放能都随之增大;而如果动态扰动的作用时间不变,随着侧压系数的增大,单元的塑性区范围和弹性释放能则显著减少,分别降到 50.37 m^3 和 6.51 MJ 。

表 3 部分计算方案及其计算结果

Table 3 Calculation schemes and corresponding results

工况编号	λ	t/ms	塑性区体积/ m^3	弹性释放能/ MJ
1	2.0	3	41.19	5.28
2	2.0	4	50.37	6.51
3	2.0	6	57.14	8.71
4	0.5	4	344.36	20.48
5	1.0	4	126.05	9.41
6	2.0	4	50.37	6.51

局部岩体能量急剧释放的发生可看作一微震事

件,它可成为附近的接近极限状态岩体失稳破坏的能量来源。因此,局部岩体释放的能量越大,诱发附近的岩体发生应变型岩爆的可能性越大。由图 7 可以看出,该工况下弹性释放能较大的位置主要位于巷道两帮、底板靠近拐角的地方。这些部位弹性能量比较容易集聚,易发生岩爆。

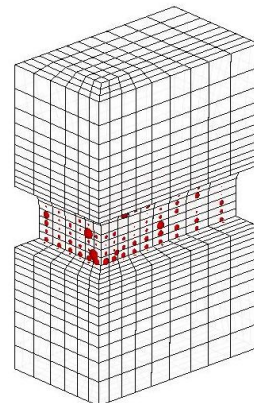


图 7 弹性释放能的空间分布($\lambda=1.0$)

Fig.7 Spatial distribution of elastic released energy

4 结 论

采用 FLAC^{3D} 程序对动态扰动触发深部巷道岩柱发生破坏的过程进行研究,探讨了不同地应力条件下动态扰动对岩柱破坏的影响,得出以下结论。

(1) 深部岩柱所处的地应力状态是决定动态扰动引发围岩破坏区范围大小的重要因素。地应力状态不同,动态扰动对于巷道围岩稳定的影响程度也不同。一般来说,侧压系数较低时,动态扰动较易引起巷道的失稳破坏。

(2) 动态扰动的作用时间也对巷道围岩的稳定性有较大影响。应力波作用的时间越长,巷道围岩的破坏区范围也就越大。

(3) 动态扰动会导致巷道某些部位能量的急剧释放,因此,在巷道的开挖支护设计与施工中应重点关注上述易发生岩爆的部位。

参 考 文 献

- [1] 潘岳, 王志强, 吴敏应. 岩体动力失稳终止点、能量释放量解析解与图解[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1915—1921.
PAN Yue, WANG Zhi-qiang, WU Min-ying. Analytic solution and illustration on destabilization and energy releasing amount of rock dynamic destabilization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1915—1921.
- [2] 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 Xi-bing, LI Di-yuan, 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.
- [3] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453—2460.
SU Guo-shao, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2453—2460.
- [4] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[R]. [S. l.]: Ontario Geomechanics Research Centre, 1996.
- [5] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 受静载作用的岩石动态断裂的突变模型[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 654—658.
ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan. A catastrophe model for dynamic fracture of static loaded rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(6): 654—658.
- [6] 许红涛, 卢文波. 爆破破岩过程中的动态卸载效应探讨[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 969—973.
XU Hong-tao, LU Wen-bo. Study on dynamic unloading effect during process of fragmentizing rock by blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 969—973.
- [7] 李夕兵, 古德生. 岩石在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 129—139.
LI Xi-bing, GU De-sheng. Energy dissipation of rock under impulsive loading with different waveforms[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1994, 14(2): 129—139.
- [8] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300—303.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong-lin. Study on mechanism and judgement of rockbursts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 300—303.
- [9] 徐林生, 唐伯明, 慕长春, 等. 高地应力与岩爆有关问题的研究现状[J]. 公路交通技术, 2002, (4): 48—51.
XU Lin-sheng, TANG Bo-ming, MU Chang-chun, et al. Current research situation of problems related to high ground stress and rock blasting[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2002, (4): 48—51.
- [10] 王贤能, 黄润秋. 动力扰动对岩爆的影响分析[J]. 山地研究, 1998, 16(3): 188—192.
WANG Xian-neng, HUANG Run-qiu. Analysis of the influence of the dynamic disturbance on rock burst[J]. **Journal of Mountain Science**, 1998, 16(3): 188—192.
- [11] 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 Wan-cheng, ZUO Yu-jun, SHANG Shi-ming, 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.
- [12] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D user's guide (Version 2.1)[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [13] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18(1): 35—48.