

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 06 - 0742 - 05

深部岩巷在动力扰动下的破坏机理分析

左宇军^{1,2}, 唐春安^{1,2}, 朱万成¹, 谭志宏¹

(1. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 结合某巷道工程实例, 利用新开发的动态版岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D} 分析了动力扰动对深部岩巷破坏过程的影响, 从细观角度分析了不同深度或受不同静压力的岩石巷道在动力扰动下的破坏规律。结果表明, 对于不同埋深的巷道, 所受应力状态不同, 则所处稳定状态也不同。当巷道埋深较小时, 处于较稳定状态; 当巷道埋深较大时, 越来越接近临界稳定状态, 较小的扰动便可以导致裂纹的大规模瞬时动力扩展, 诱发巷道的失稳破坏, 并伴随着应变能的高速释放。深部巷道所受静压较大, 在动力扰动下比浅部巷道更易发生失稳破坏。

关键词: 深部岩巷; 动力扰动; 失稳破坏; 非均匀性; 数值模拟

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

Mechanism analysis on failure of deep rock laneway under dynamic disturbance

ZUO Yu-jun^{1,2}, TANG Chun-an^{1,2}, ZHU Wan-cheng¹, TAN Zhi-hong¹

(1. Research Center for Rock Instability and Seismicity, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Research Center for Numerical Tests on Material Failure, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Combining an example of laneway engineering, numerical code RFPA^{2D} (dynamic version) was used to simulate the failure process of rock laneway under dynamic disturbance, analyzing the failure mechanism on rock laneway experiencing low static stress and high static stress from the view point of mesoscopic damage mechanics. The results show that rock laneway is in the different state of stability when rock is in the different depth of ground, i.e., rock laneway is stable when it is in the low depth of ground; rock laneway is close to or in the critical state of stability when laneway is in the larger depth of ground, and the less disturbance may cause fractures dynamic expansion instantaneously and cosmically, leading to the laneway losing stability, in the meantime, with much strain energy releasing fast; the occurrence of losing stability is easier in deep rock laneway which is on the condition of high ground stress than that in low rock laneway.

Key words: deep rock laneway; dynamic disturbance; lose stability; heterogeneity; numerical simulation

深部开采已成为国内外矿业界特别关注的问题。就问题的实质而言, 深部与浅部的主要区别在于围岩所处的应力环境的差别, 进而导致围岩强度和变形性质的明显差异^[1]。由于深部岩体处于高应力作用下, 必然在围岩体内积聚很高的弹性应变势能; 外部作用可以造成围岩应力场调整, 易诱发围岩体内弹性应变

收稿日期: 2006 - 04 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50504005, 50374020, 50474017); 国家自然科学基金重大资助项目 (50490274); 中国博士后科学基金资助项目 (2005038250)

作者简介: 左宇军 (1965 -), 男, 湖南湘乡人, 高级工程师, 博士后。Tel: 0411 - 87403601, E-mail: zuo_yujun@163.com

势能突发性释放,造成岩爆等灾害发生;深部岩巷的支护设计存在诸多不确定因素,如围岩性质分布、地应力场分布等,因此,经典的工程设计方法并不适用于深部巷道支护设计^[1]。为了寻求合理的深部巷道支护设计理论与方法,有必要对深部岩巷的破坏机理作进一步分析。

在深部开采中,存在着许多打破巷道围岩应力平衡而导致冲击地压的诱因,如放炮及天然地震引起的震动等。其中,爆破震动是目前诱发巷道围岩冲击地压的一个主要因素。据统计:国内采用炮采的矿井 50%以上存在着严重的冲击地压或煤与瓦斯突出等巷道围岩动力失稳破坏问题^[2]。目前,国内外对放炮等震动影响下的巷道围岩失稳问题的研究主要集中在:根据热力学第二定律,研究震动条件下煤岩体相变以及震动波传播过程中围岩劣化对稳定性的影响、质点振动速度对稳定性的影响、节理岩体在震动条件下的失稳破坏、利用谱分析研究围岩稳定性以及锚网支护对震动波的响应分析等。其中,在震动波诱发巷道动力失稳方面,Litwiniszyn通过作图法说明煤层中传播的震动波在一定条件下会诱发巷道的动力失稳;姜耀东等以一维分析为例,利用解析方法分析了震动波传播对煤岩中应力和变形的影响机制,从理论上解释了炮采震动因素诱发巷道冲击地压动力失稳破坏的原因^[2~7]。

本文尝试利用新开发的岩石动态破裂过程分析系统 RFPA^{2D[8~10]},将岩石视为非均匀介质,从细观角度对动力扰动下岩巷破坏的机理进行分析和探讨。

1 数值模拟与分析

取某巷道工程一断面处的破坏作为计算实例。该处巷道埋深 440 m,水平地应力 σ_h 大致为垂向地应力 σ_v 的 1.3 倍,即侧压系数为 1.3。图 1 为计算模型,模型尺寸为 60 m × 60 m,巷道为马蹄形,其中矩形部分尺寸为 5 m × 5.25 m,圆冠高度为 0.25 m。图 1 中 σ_d 为外部施加的动力扰动。巷道岩石力学计算参数:密度为 2.76 g/cm³,弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.3,抗拉强度为 3 MPa,抗压强度为 30 MPa,内摩擦角为 68°。

对上述巷道的破坏过程采用岩石破裂过程分析系统 RFPA 进行分析。用数值试样模型来表示巷道的实际计算模型,数值试样模型为 60 mm × 60 mm,设定试样单元尺寸为 0.5 mm。假设材料是非均匀的,其力学特性,如弹性模量和抗压强度等服从 Weibull 分布,分布参数赋值见表 1,对于本构关系中的其它参数(如摩擦角),笔者没考虑其非均匀性,其赋值如下:残余强度为 0.1 MPa,压拉比为 10,残余泊松比为 1.1,摩擦角为 68°;最大拉应变为 5,最大压应变为 100。表 1 所示的单元组成试样的宏观力学参数与岩石力学参数近似对应。

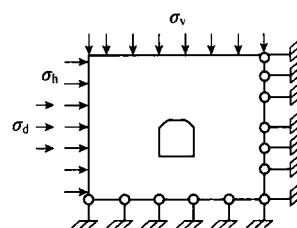


图 1 计算模型

Fig. 1 Model for calculation

表 1 岩石材料的 Weibull 分布参数

Table 1 Weibull distribution parameters of material rock mechanical

弹性模量		抗压强度		泊松比		密度	
均质度	平均值 /MPa	均质度	平均值 /MPa	均质度	平均值	均质度	平均值 /g · cm ⁻³
3.0	35	3.0	200	100	0.3	100	2.67

将上述力学问题简化为平面应变问题进行分析。

2 静压作用下巷道破坏的数值模拟

巷道的地应力是按静应力逐步加载的。在静压加载过程中,竖向方向按 1 MPa/步加载,水平方向按 1.3 MPa/步加载,直到巷道发生破坏。数值模拟结果给出了上述静压作用下试样的破坏过程,图 2 为声发射分布、弹性模量和最大剪应力分布。其中,图 2 (a) 为声发射分布,试样中所有被损伤单元用不同颜

色表示, 其中白色和灰色分别表示当前加载步中被剪切和拉伸破坏的单元, 黑色表示当前加载之前所有被破坏的单元; 图 2(b)为弹性模量分布, 其颜色亮度反映了细观单元弹性模量的相对大小, 越亮的部位表示此处的弹性模量值越大. 单元的损伤引起了弹性模量的退化, 完全被破坏的单元表示为黑色; 图 2(c)为最大剪应力分布, 同样其颜色越亮的部位表示此处的最大剪应力值越大. 在第 9 加载步 (竖向压力为 9 MPa), 可以看到在巷道顶板和底板分别有一个单元出现了剪切破坏, 接着在巷道顶板和底板出现了大量的剪切破坏单元, 这些单元贯通最后形成了剪切裂纹. 在裂纹传播过程中, 也会观察到拉应力破坏, 如第 52 加载步所示. 从模拟结果看, 当地应力上升到 40 MPa 左右时会在巷道的顶板和底板出现主要由剪切破坏模式引起的宏观破坏. 上述结果与现场实测结果是一致的.

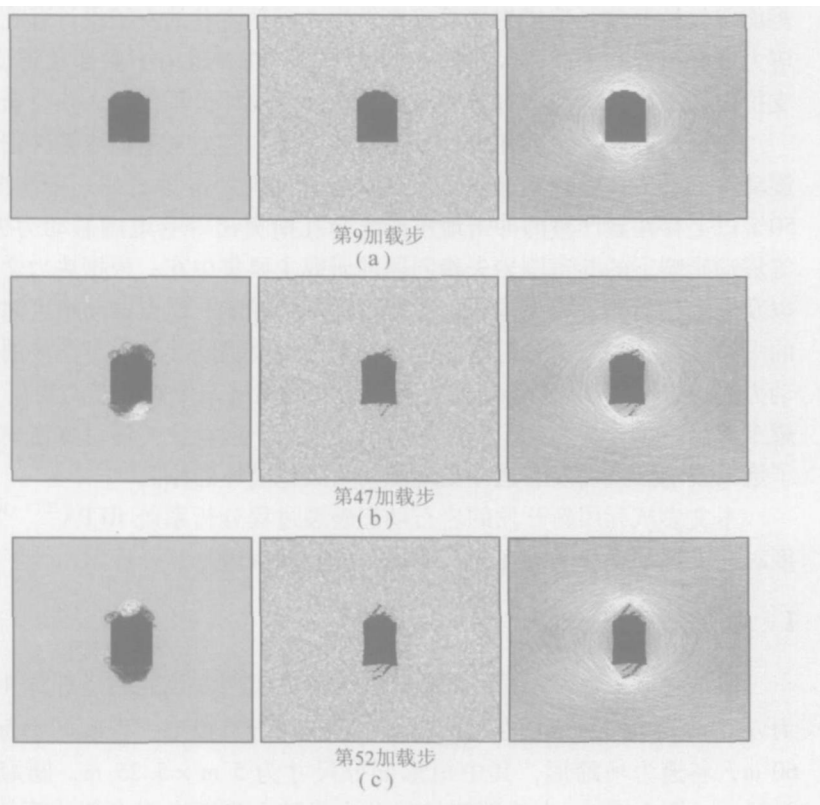


图 2 静载作用下巷道的破坏过程

Fig. 2 The failure process around laneway under biaxial static loading

3 动力扰动对巷道破坏的影响

在通常的动力分析中, 为简化计算, 将动荷载假设成一脉冲荷载. 当扰动源离巷道较远时, 将扰动波简化为平面波是可以接受的. 这里只分析平面波对巷道破坏的影响. 动力扰动波为梯形波, 如图 3 所示, 动载全过程作用时间为 $1.5 \mu\text{s}$, 应力波幅值为 200 MPa

为了比较不同埋深的巷道在动力扰动下破坏机制的差异, 对两种不同地应力下的巷道在动力扰动下的破坏过程进行了数值模拟.

图 4 (a) 给出了竖向压力为 10 MPa、水平压力为 13 MPa 时岩石试样在图 3 所示的动力扰动下的破坏过程的剪应力分布 (以时间 0 点为动荷载加载的起始点); 图 4 (b) 给出了竖向压力为 20 MPa、水平压力为 26 MPa 时

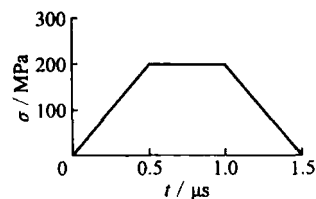


图 3 扰动的波形

Fig. 3 Waveform loaded to specimen

岩石试样在图 3 所示的动力扰动下的破坏过程的剪应力分布 (同样以时间 0 点为动荷载加载的起始点). 在图 4 中, 试样承受不同的静压力, 前者小, 后者大. 如前所述, 静压力越大, 试样内部积聚的弹性应变能越大. 此时相同动荷载作用于上述不同静压的岩石试样, 图 4 中的亮条表示平面应力波波阵面, 平面应力波从试样左边向右边传播. 从剪切图中可以看出, 试样所受静压越大, 应力波传播经过的岩石被破坏的单元数就越少, 在剪切应力图上表现为黑区面积越小. 当应力波传播时间为 $10 \mu\text{s}$ 左右时, 平面应力波到达巷道洞壁, 其中竖向压力为 10 MPa 的试样在 $10.1 \mu\text{s}$ 左右, 应力波在巷道壁产生反射, 巷道壁开始拉裂破坏, 并且, 应力波传播经过巷道后, 巷道没有失稳破坏; 而竖向压力为 20 MPa 的试样在 $10.1 \mu\text{s}$ 时, 巷道壁也由于应力波反射诱发巷道壁产生了拉裂破坏, 并且巷道壁的破坏程度比前者要大, 并在 $11.5 \mu\text{s}$

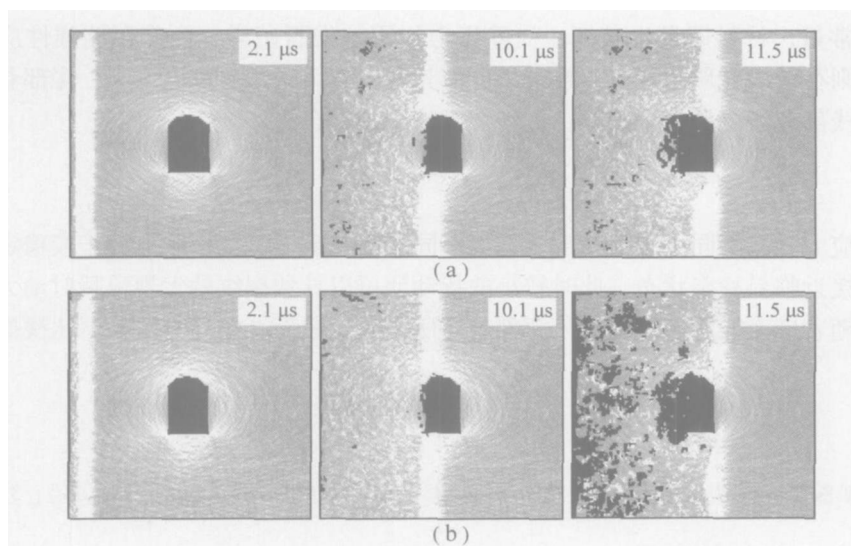


图 4 巷道在动力扰动下的破坏过程剪应力分布

Fig. 4 Shear stress distribution of failure process of laneway under vertical static stress 10 MPa and horizontal static stress 13 MPa and dynamic disturbance

(a) 竖向静压为 10 MPa、水平静压为 13 MPa; (b) 受竖向静压为 20 MPa、水平静压为 26 MPa

计数减少,说明试样所受静压增大,在相同动力扰动下岩石较难破碎,这主要是由于静压增大导致了岩石强度增加造成的。当应力波传播至巷道壁时,巷道被拉伸破坏,对应两条破坏单元累计数曲线会分别出现 1 个拐点。接着,竖向静压为 10 MPa 的试样破坏单元数平稳增加,说明应力波传播经过的岩石只是进一步损伤,没有失稳破坏;但是,竖向静压为 20 MPa 的试样,应力波传播到 11.5 μ s (第 135 加载步) 时,被破坏单元数量有突增的现象,此时对应受扰动的岩石试样被破碎,巷道失稳破坏。

图 5 (b) 为上述两种不同静压情况时试样破坏单元累计释放能量曲线。同样,在岩石失稳破坏之前,随着静压的增加,相同加载步时岩石破坏单元累计释放的能量减少,说明试样所受静压增大,在相同动力扰动下岩石破坏单元数减少,岩石较难破碎。当巷道被拉伸破坏时,对应两条破坏单元释放的能量累计值曲线也分别出现 1 个拐点。接着,竖向静压为 10 MPa 的试样所累计释放的能量平稳增加,同样说明应力波传播经过的岩石只是进一步的损伤,没有失稳破坏;对于竖向静压力为 20 MPa 的试样,应力波传播到 11.5 μ s (第 135 加载步) 时,破坏单元所累计释放能量也有突增的现象,此时对应受扰动的巷道失稳破坏。这与图 5 (a) 所得结论是相同的。

上述结论与文献 [11] 的研究结果是一致的,即当地质体的演化已经处于临界稳定状态时,微小的扰动便可以诱发地质灾害的发生;当地质体的演化仅处于接近临界稳定状态时,强烈的扰动也可以诱发地质灾害提前发生。如前所述,对于竖向静压为 10 MPa 的岩石结构在相同动力扰动下只有破坏没有整体失稳,而对于竖向静压为 20 MPa 的岩石结构在相同动力扰动下发生了整体失稳破坏。这一现象可以从能量角度来解释^[12]。第 4 强度理论 (能量理论) 认为:材料单位体积内所能储藏的变形能是一个常量,与应

时巷道出现了失稳破坏,在剪切应力图上表现为黑区面积突然增加。

为进一步分析受不同静压的巷道在动力扰动下的破坏机制,图 5 (a) 为上述两种不同静压情况时试样破坏单元累计数曲线。当竖向静压为 10 MPa 时,第 10 加载步之前为静压加载,第 11 加载步开始为动加载;竖向静压为 20 MPa 时,第 20 加载步之前为静压加载,第 21 加载步开始为动加载。由图 5 (a) 可知,在岩石失稳破坏之前,随着静压的增加,在相同加载步时岩石破坏单元累

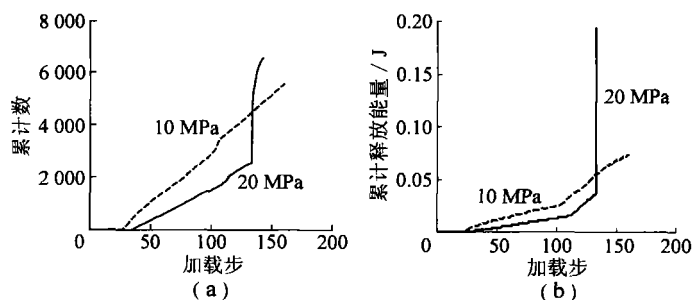


图 5 不同静压下试样破坏单元累计数和累计释放能量

Fig. 5 Cumulative counts and release energy of fractured units in specimen vs loading step

力状态无关,若变形能超过这一常量,材料即发生破坏.受静压力作用的岩石试样,内部存储弹性应变能,在弹性范围内,静压越大,则存储的变形能越多,越容易促使其发生破坏.由此可以认为,深部巷道所受静压越大,在动力扰动下比浅部巷道更易发生破坏,这与实际情况是吻合的.

4 结 论

对于不同埋深的巷道,所受应力状态不同,则处稳定状态也不同.当巷道埋深较小时,处于较稳定状态;当巷道埋深较大时,越来越接近临界稳定状态,此时较小的扰动便可以导致裂纹的大规模瞬时动力扩展,诱发巷道的失稳破坏,并伴随着应变能的高速释放.深部巷道所受静压较大,在动力扰动下比浅部巷道更易发生破坏.

参考文献:

- [1] 刘泉声,张 华,林 涛.煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (21): 3 732 ~ 3 737.
- [2] 姜耀东,赵毅鑫,宋彦琦,等.放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3 131 ~ 3 136.
- [3] 许增会,宋宏伟,赵 坚.地震对隧道稳定性影响的数值模拟分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (1): 41 ~ 44.
- [4] 郑际汪,陈里真.爆破荷载作用下隧道围岩稳定性分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2004 (4): 53 ~ 55.
- [5] 陶连金,张倬元,傅小敏.在地震荷载作用下的节理岩体地下洞室围岩稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9 (1): 32 ~ 40.
- [6] 薛亚东,张世平,康天合.回采巷道锚杆动载响应的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1 903 ~ 1 906.
- [7] Litwiniszyn J. A model for the initiation of coal-gas outbursts [J]. Int J. Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1985, 20 (1): 39 ~ 46.
- [8] Chau K T, Zhu W C, Tang C A, et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program_ DIFAR [J]. Key Engineering Materials, 2004 (261/263): 239 ~ 244.
- [9] 朱万成,唐春安,黄志平,等.静态和动态载荷作用下岩石劈裂破坏规律的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (1): 1 ~ 7.
- [10] 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.
- [11] 许 强,黄润秋,王来贵.外界扰动诱发地质灾害的机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (2): 280 ~ 284.
- [12] Yale D P, Mobil R D Corp, Jamieson W H, et al. Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and panoma fields, Kansas [A]. Proceedings of the Mid-continent Gas Symposium, Amarillo [C]. TX, USA, 1994 209 ~ 219.