

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1937-06

不同侧压系数条件下圆形巷道岩爆过程模拟

王学滨, 潘一山

(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 利用 FLAC 模拟了水平及垂直方向围压不同 (非静水压力) 条件下的圆形巷道的岩爆过程。为了模拟巷道开挖, 利用编写的 FISH 函数删除巷道内部的单元。岩石服从摩尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的破坏准则, 破坏之后呈现应变软化-理想塑性行为。模拟分为 3 步: 首先, 将两个方向压力施加在模型上, 直到达到静力平衡状态; 然后, 利用 FISH 函数开挖巷道; 最后, 计算重新开始, 直到达到静力平衡状态或者塑性流动状态。模拟结果表明, 当水平与垂直方向压力差较小时 (或侧压系数较小时), 围岩中出现了“狗耳”形的 V 型坑, 岩爆之后围岩能保持稳定。当侧压系数适中时, 可以相继观察到 V 型坑和 U 型坑 (或“平底锅”形坑), 岩爆之后围岩仍然是稳定的; 当侧压系数较大时, 围岩中先产生 V 型坑, 然后是 U 型坑, 之后由于剪切带相互贯通, 形成了“鱼鳞”形的破坏区域, 它们位于巷道顶部之上和底部之下, 这将造成围岩的失稳。然而, 在巷道两侧未观察到破坏现象。

关 键 词: 圆形巷道; 岩爆; 剪切带; V 型坑; U 型坑; “鱼鳞”形破坏区; 侧压系数

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Numerical simulation of rockburst processes of a circular tunnel at different lateral pressure coefficients

WANG Xue-bin, PAN Yi-shan

(Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Rockburst processes of a tunnel at different lateral pressure coefficients are modeled by use of FLAC. To model excavation, a FISH function is written and used to delete the elements in the tunnel. For rock elements exhibiting linear strain-softening behavior beyond the occurrence of failure and then ideal plastic behavior, the failure criterion obeys composite Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off. The present calculation is divided into three steps. Firstly, the pressures in the horizontal and vertical directions are applied to the plane strain model until a static equilibrium state is reached. Secondly, the tunnel is excavated using the written FISH function. Thirdly, the calculation renews to achieve a new equilibrium state or a plastic flow state. Results show that at lower lateral pressure coefficients, dog-ear or V-shaped notches are generated in the surrounding rock that is stable after rockbursts. At moderate lateral pressure coefficients, V-shaped and U-shaped (panlike) notches are observed one after the other and the surrounding rock is still stable after rockbursts. When the lateral pressure coefficients are higher, the V-shaped notches are firstly generated and then the U-shaped notches are formed; afterwards, shear bands intersect and scalelike failed zones are formed above the roof and below the floor, leading to the unstable failure of the surrounding rock. However, no failed zones are formed at the two sides of the tunnel.

Key words: circular tunnel; rockburst; shear band; V-shaped notch; U-shaped notch; scalelike failed zone; lateral pressure coefficient

1 引 言

随着经济建设与国防建设的不断发展, 深部岩体工程越来越多^[1]。深部岩体工程在开挖洞室或巷道时, 岩爆 (或冲击地压) 是主要的地质灾害之一^[1]。岩爆的预防及机制分析一直是世界性的难题。由于岩爆不仅影响施工进度, 造成设备损坏、人员伤亡,

还能造成超挖、支护失效, 甚至地震, 因此, 一直以来, 岩爆问题得到了各国学者的密切关注^[2-12]。

大量现场观测表明, 随着开采深度的增加, 岩爆的频次及震级均明显增加^[2]。出现上述情况的原因是多方面的, 但毫无疑问, 深部岩体所处的环境的地应力比浅部要高得多是最主要的原因之一。

众所周知, 地下岩体所受到的水平应力与垂直

收稿日期: 2009-02-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目及面上项目 (No. 50490275, No. 50974069); 国家重点基础研究发展计划项目 (No. 2010CB226803)。

第一作者简介: 王学滨, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事非均质材料变形、破坏及稳定性研究。E-mail: wxbbb@263.net

应力并不是总相等的。以淮南矿区地应力分布为例,侧压系数的值一般在 0.49~1.49 之间^[13]。根据世界范围内 116 个现场资料的统计,埋深超过 1 000 m 时,水平应力为垂直应力的 0.5~2.0 倍^[14]。一些文献的研究表明,侧压系数对巷道围岩的破坏形式、应力分布等方面有重要的影响^[15~17]。但这些文献并没有研究巷道围岩的局部化变形规律,即未研究巷道围岩中剪切带的萌生、发展、分布规律及演变过程,也未研究侧压系数不同时圆形巷道的岩爆过程,这些问题正是本文的目的。

本文的工作是采用 FLAC 模拟不同侧压系数条件下的圆形巷道的岩爆过程,通过 FLAC 的编程语言编写 FISH 函数^[18]模拟开挖。

2 本构关系及计算模型、计算步骤及 FISH 函数编写

2.1 计算模型及本构关系

矩形平面应变模型长(x 方向)及高(y 方向)均为 1 m,未开挖的模型被划分为 40 000 个面积相同的矩形单元。模型受到水平方向压力 p_h 、垂直方向压力 p_v 作用。数值计算在小应变模式下进行。共计算了 3 个方案,方案 1 的 p_h 、 p_v 分别为 6.5 MPa;方案 2 的 p_h 、 p_v 分别为 6.5、5 MPa;方案 3 的 p_h 、 p_v 则分别为 7、5 MPa。各方案的孔径均为 0.32 m。在弹性阶段,岩石的本构关系为线性,弹性模量取 26.6 GPa,泊松比取 0.21。峰后岩石的本构模型为摩尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型^[19],抗拉强度为 2 MPa。黏聚力、摩擦角与塑性应变的关系见文献^[19]中密实岩石的软化规律,所不同的是这里初始黏聚力取为 3 MPa。

2.2 计算步骤

(1) 建立未开挖的模型,给定本构关系、边界条件及加载条件进行计算,直到达到平衡状态。在本文中,若失合力小于 1.5×10^3 N,则停止计算,认为模型已经达到了静力平衡。

(2) 开挖巷道,即将模型中孔洞内部的单元一次性删除。巷道开挖之后,模型仍然受到 p_h 、 p_v 作用,由于开挖卸荷,因而存在失合力,模型将不再处于平衡状态。

(3) 对开挖后的模型进行计算,直到一个新的平衡状态达到,或者达到塑性流动状态。

2.3 FISH 函数编写^[18]

(1) 确定模型的中心及各单元的中心。

(2) 求得各单元的中心至模型的中心的距离,若这一距离小于巷道的半径,则将这些单元设置为

空模型 (null model)。

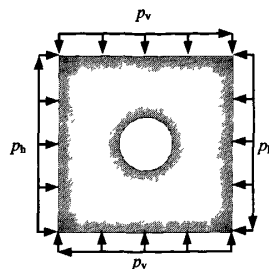


图 1 巷道开挖之后模型的几何特征及边界条件
Fig.1 Model geometry and boundary conditions when the model is excavated

3 计算结果及分析

图 2 (a)~(f)、3 (a)~(i)、4 (a)~(i) 分别给出了各方案围岩的破坏过程,图中颜色越深表示剪切应变增量越大。上述各图中的时步均是从巷道开挖开始计算的。图 2 (g)、3 (j)、4 (j) 分别给出了各方案的最大失合力-时步曲线。

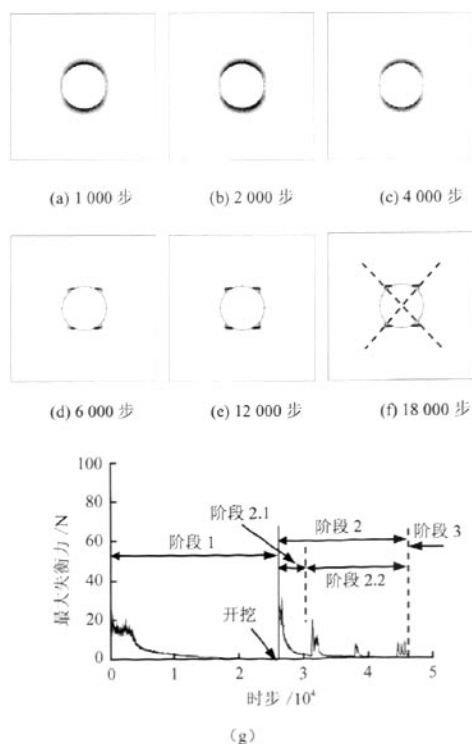


图 2 方案 1 ($p_h=6$ MPa, $p_v=5$ MPa) 的破坏过程及最大失合力-时步曲线

Fig.2 The failure process of scheme 1 ($p_h=6$ MPa and $p_v=5$ MPa) and the maximum unbalanced force-timestep curve

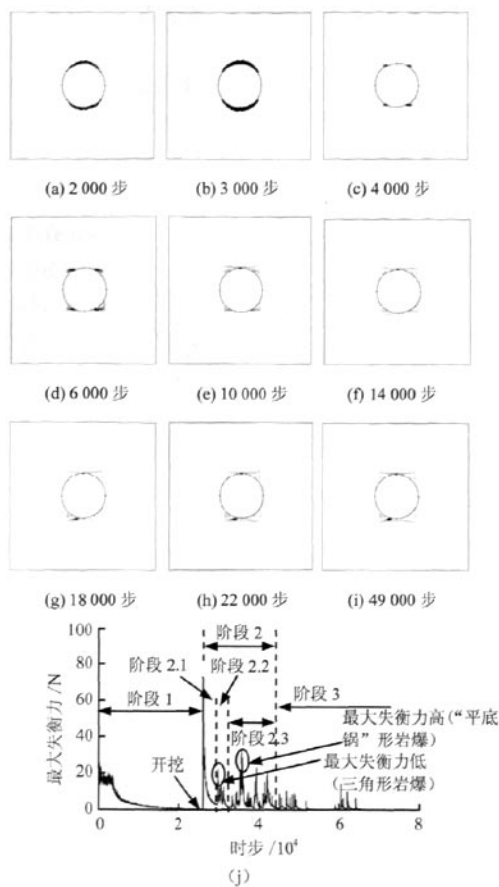


图3 方案2 ($p_h=6.5$ MPa, $p_v=5$ MPa) 的破坏过程及最大失衡力-时步曲线

Fig.3 The failure process of scheme 2 ($p_h=6.5$ MPa and $p_v=5$ MPa) and the maximum unbalanced force-timestep curve

为了表述方便, 将巷道围岩划分为4个区域, 即第1~4象限。坐标原点取在巷道的中心, 水平向右为 x 轴的正向, 垂直向上为 y 轴的正向。 $x>0$ 及 $y>0$ 的区域为第1象限, $x<0$ 及 $y>0$ 的区域为第2象限, 依此类推。

3.1 方案1 ($p_h=6$ MPa, $p_v=5$ MPa)

当巷道开挖之后计算1000~4000个时步时, 见图2(a)~(c), 巷道周边的剪切应变集中区域呈椭圆形, 椭圆长轴方向与 p_h 方向垂直, 与 p_v 方向平行。在巷道的顶部和底部, 剪切应变集中现象非常强烈, 剪切应变集中区域呈现“月牙”形。与巷道的顶部和底部的显著的剪切应变集中现象不同, 巷道两帮几乎没有剪切应变集中现象出现。

p_h 与 p_v 相差不大时的数值结果与常识(当水平应力与垂直应力不同时, 塑性区呈椭圆形)一致。

实际上, 当巷道开挖之后计算4000个时步时, 见图2(c), 在巷道的顶部和底部, 在“月牙”形的剪

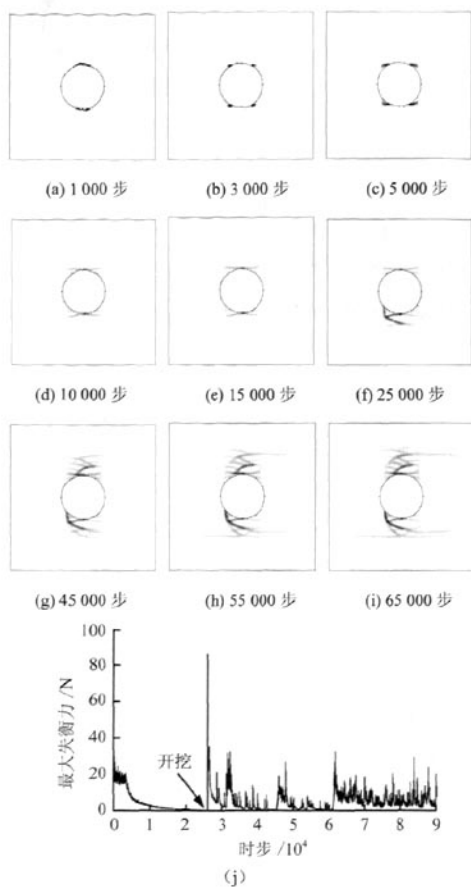


图4 方案3 ($p_h=7$ MPa, $p_v=5$ MPa) 的破坏过程及最大失衡力-时步曲线

Fig.4 The failure process of scheme 3 ($p_h=7$ MPa and $p_v=5$ MPa) and the maximum unbalanced force-timestep curve

切应变集中区域内部, 各存在两个更显著的剪切应变集中区域。此时, 严格地讲, 巷道围岩的剪切应变集中区域已不再是椭圆形了。这4个具有较高的剪切应变集中的区域将是未来剪切带的源头。

当巷道开挖之后计算6000个时步时, 见图2(d), 在上述具有较高剪切应变的4个区域内部, 萌生了8条初步的剪切带, 它们形成“狗耳”形的岩爆坑。共有4个“狗耳”, 任一“狗耳”由两条剪切带构成, 在 p_h 方向剪切带发育较好, 而在 p_v 方向剪切带发育得不好。

当巷道开挖之后计算12000个时步时, 见图2(e), 剪切带已经变得非常明显, 位于任一象限内部的两条剪切带与巷道的周边构成了三角形的岩爆坑(或“狗耳”)。此时, 岩爆坑的深度还较浅, 但比图2(d)中岩爆坑要深。

当巷道开挖之后计算18000个时步时, 见图2(f), 岩爆坑的深度略有增加, 但巷道围岩的破

坏形态没有大的改变。

如果一直计算下去,会发现巷道围岩的破坏形态与过去完全没有差别,这表明巷道围岩在遭受到了4个“狗耳”形的剪切破坏(岩爆)之后,又重新回到了平衡状态。

图2(g)给出了围岩的失衡力-时步曲线。可以发现,本文模拟的模型(包括开挖之前及之后)大致经历了3个变形阶段,即未开挖巷道之前的逐渐趋于平衡的阶段(阶段1)、开挖巷道之后的失衡力突增—衰减、再突增—再衰减的反复过程(阶段2)及开挖巷道之后的平衡阶段(阶段3)。

阶段2对应于图2(a)~(f)。阶段2仍然可以进一步划分为两个阶段:阶段2.1和2.2。

阶段2.1位于巷道开挖之时与巷道开挖之后计算5 000个时步之间。在这一阶段,尽管巷道周边具有一定的剪切应变集中,但未能观察到“狗耳”形的三角坑,仅观察到了椭圆形或“月牙”形的剪切应变集中区以及上述区域内部的高剪切应变区。

阶段2.2位于巷道开挖之后计算5 000~18 000个时步之间。在这一阶段,“狗耳”形的三角坑不断扩大,岩爆坑的深度稍有增加,最终形成了由4个“狗耳”构成的稳定的巷道围岩破坏图案。

在阶段3,“狗耳”不再扩大,巷道围岩已经达到了静力平衡状态。

应当指出,通过两相对“狗耳”尖(两条剪切带的相交处)的直线并不通过模型的四角,见图2(f),这与静水压力条件下的完全对称的剪切破坏形态^[12,18]稍有不同。

3.2 方案2 ($p_h=6.5$ MPa, $p_v=5$ MPa)

当巷道开挖之后计算2 000~3 000个时步时,见图3(a)、(b),巷道周边的剪切应变集中区域呈椭圆形或“月牙”形。

当巷道开挖之后计算4 000个时步时,见图3(c),巷道周边的剪切带初露端倪。

当巷道开挖之后计算6 000个时步时,见图3(d),巷道周边的剪切带已经形成了4个“狗耳”形的岩爆坑。为了便于表述,将这里的剪切带称之为1级剪切带。

当巷道开挖之后计算10 000个时步时,见图3(e),在第1及第2象限交界处的孔边发出了两条剪切带,它们(称之为2级剪切带)位于第1和第2象限1级剪切带的外围。当这些2级剪切带形成之后,它们在巷道围岩深处有产生较大“狗耳”(比1级剪切带形成的“狗耳”大)的趋势。

当巷道开挖之后计算14 000个时步时,见

图3(f),在第3象限“狗耳”的下方又形成了一条近似水平的剪切带。

当巷道开挖之后计算18 000个时步时,见图3(g),在第3及第4象限原来三角坑的外围,形成了一些近似水平的剪切带(2级剪切带),这些剪切带在巷道围岩更深处有产生较大“狗耳”的趋势。

当巷道开挖之后,计算22 000~49 000个时步时,见图3(h)~(i),巷道围岩的破坏形态已经没有明显的改变,这表明巷道围岩在遭受到了剪切破坏之后,又重新回到了静力平衡状态。此时,在巷道围岩的顶部及底部,可以观测到“锅底”形的破坏形态,“锅底”与 p_h 近似平行。

图3(j)给出了围岩的失衡力-时步曲线。可以发现,方案2中的模型(包括开挖之前及之后)也大致经历了3个变形阶段,这与方案1相同。阶段2可以进一步划分为3个阶段。

在阶段2的开始阶段,即第2.1阶段(在2 000~3 000个时步之间),可以在巷道周围观察到椭圆形或“月牙”形的剪切应变集中区域。在阶段2的中期即第2.2阶段(在4 000~6 000个时步之间),可以观察到4个三角形的岩爆坑。在阶段2的后期,即第2.3阶段(在10 000~18 000个时步之间),可以观察到“平底锅”形的岩爆坑。从图3(j)给出的最大失衡力-时步曲线可以发现,形成“平底锅”形岩爆坑的岩爆要比形成三角岩爆坑的岩爆更猛烈。

在阶段3,巷道围岩维持“平底锅”的破坏形态不再改变。在岩爆过后,围岩达到了新的平衡状态。应当指出,尽管在第3阶段,仍然有少量的失衡力突增事件,但它们并不影响围岩的宏观破坏形态。

3.3 方案3 ($p_h=7$ MPa, $p_v=5$ MPa)

从图4(a)~(e)中可以发现与图3(a)~(i)相类似的地方;同理,在图3(a)~(d)中可以发现与图2(a)~(f)相类似的地方。

当巷道开挖之后计算25 000~45 000个时步时,见图4(f)~(g),在巷道顶部及底部(“平底锅”形剪切带之外),出现了一系列的剪切带,这些剪切带相互交织,构成了“鱼鳞”状的大面积破坏区域,而且这些剪切带的扩展长度基本上未能超过巷道的直径范围。也就是说,这些新萌生的剪切带仅位于巷道的顶部之上或底部之下,向围岩深处发展,局限于 $|x|<r$ 的范围,其中 x 为水平方向的坐标,其原点位于巷道的中心, r 是巷道的半径。然而,在 $|x|>r$ 的区域,基本上未能观察到剪切带。

当巷道开挖之后计算55 000~65 000个时步时,见图4(h)~(i),由 $|x|<r$ 区域的某些点向外

发出了若干条剪切带,这些剪切带基本上与最大主应力方向平行。

图4(j)给出了围岩的失衡力-时步曲线。可以发现,开挖巷道之后,失衡力经历了一系列的突增—衰减、再突增—再衰减的反复过程,最终也未能趋于0。也就是说,巷道围岩的应力及应变仍在不断地调整过程中,未达到平衡状态。计算到90 000时步时(图4(j)最右端)尚未发现巷道围岩有平衡的趋势。尽管巷道的全断面未全部发生破坏,但是巷道围岩顶部或底部的碎裂后的岩块很自然地会由上而下或由下而上涌入巷道(这一过程无法进行数值模拟),这将堵塞巷道,影响工人及设备的安全性。上述现象的发生类似于现场发生了强烈的岩爆。

总之,当 p_h 与 p_v 相差较大时,开挖后围岩经历了一系列的破坏现象,破坏形态由“狗耳”形→“锅底”形→“鱼鳞”状,直到碎裂后的岩块失稳成灾。

4 数值结果的合理性讨论

文献[12]在静水应力场条件下进行了模拟试验,隧洞壁上的破坏出现在与水平轴及垂直轴成45°的4个对称位置,见图5(a)。这一静水应力场条件下的现象与图2(d)~(f)、图3(c)、(d)及图4(b)、(c)的数值模拟结果(接近静水应力场条件下)有一定的类似性。

巷道岩爆之后,除了会在围岩中观察到三角坑或“V”型凹坑的破坏形式,围岩还有其他破坏形式。图5(b)~(c)给出了文献[10—11]的一些观察结果(岩爆坑呈“锅底状”(窝状)、阶梯形),这些结果与图3(f)~(i)及图4(d)、(e)相似。

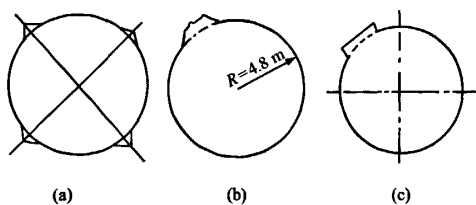


图5 巷道的多种形态的岩爆坑^[10—12]

Fig.5 The notches due to rockbursts of tunnels^[10—12]

文献[20]对坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏过程进行了平面应变物理模拟试验。研究表明,当侧压系数为2时,岩爆破坏主要表现为拱顶大块岩块垮落(在本文图2~4中均可观察到拱顶岩石的破坏)和两帮片状破坏(本文中两帮基本不破坏,可能是洞室形状的差异);当侧压系数为1/2时,岩爆破坏主要表现为两帮片状破坏(这里的两帮对应于

本文中的巷道的顶部和底部)。尽管文献[20]与本文中洞室的形状有所不同,但结果非常类似。

5 结论

(1) 当水平压力与垂直压力相差不大时,围岩发生岩爆之后是稳定的,围岩中形成了4个“狗耳”形(V型)的岩爆坑。相对“狗耳”尖处的连线不通过模型的四角,这与静水压力条件下的结果不同。

(2) 当水平压力与垂直压力相差适中时,巷道以两种方式先后发生岩爆,先是以V型坑方式发生岩爆,然后,以“平底锅”(或U型)型式发生更猛烈的岩爆。尽管如此,岩爆过后围岩仍能保持稳定。

(3) 当水平压力与垂直压力相差较大时,岩爆以多种方式持续发生,先出现“狗耳”形的岩爆坑,然后是“平底锅”形的岩爆坑,最后形成“鱼鳞”形的位于巷道顶部之上和底部之下的大面积破坏区域(更大规模的岩爆),围岩无法保持稳定。

参考文献

- [1] 钱七虎,李树枕.深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1278—1284.
QIAN Qi-hu, LI Shu-chen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1278—1284.
- [2] 牟宗龙, 龚林名, 张广文, 等. 坚硬顶板型冲击矿压灾害防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 737—741.
MU Zong-long, DOU Lin-ming, ZHANG Guang-wen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 737—741.
- [3] 郭立, 吴爱祥, 马东霞. 基于RES理论的岩爆倾向性预测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(2): 304—309.
GUO Li, WU Ai-xiang, MA Dong-xia. The method to predict rockbursts proneness based on RES theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2004, 35(2): 304—309.
- [4] 唐礼忠, 潘长良, 王文星. 用于分析岩爆倾向性的剩余能量指数[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2002, 33(2): 129—132.
TANG Li-zhong, PAN Chang-liang, WANG Wen-xing. Surplus energy index for analyzing rock burst proneness[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2002, 33(2): 129—132.
- [5] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1012—1018.

- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 1012—1018.
- [6] 汪新红, 王明洋. 岩爆与峰后岩石力学特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 913—919.
WANG Xin-hong, WANG Ming-yang. Relation between rock-burst and rock post-peak behavior[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 913—919.
- [7] 王学滨, 潘一山, 海龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 588—591.
WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, HAI Long. Instability criterion of fault rock burst based on gradient-dependent plasticity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 588—591.
- [8] 王学滨. 基于能量原理的岩样单轴压缩剪切破坏失稳判据[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 153—156, 161.
WANG Xue-bin. Unstable criterion of rock specimen subjected to shear failure in uniaxial compression based on energy principle[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(1): 153—156, 161.
- [9] 潘岳, 王志强. 圆形洞室岩爆的折迭突变模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 175—181, 186.
PAN Yue, WANG Zhi-qiang. Fold catastrophe model of circular tunnel rockburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 175—181, 186.
- [10] 万姜林, 周世祥, 南琛, 等. 岩爆特征及机理[J]. 铁道工程学报, 1998, (2): 95—102.
WAN Jiang-lin, ZHOU Shi-xiang, NAN Chen, et al. Characteristics and mechanical analysis of rock burst[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1998, (2): 95—102.
- [11] 万姜林, 洪开荣. 太平驿水电站引水隧洞的岩爆及其防治[J]. 西部探矿工程, 1995, 7(1): 87—89.
WAN Jiang-lin, HONG Kai-rong. Rock burst of division channel of Taipingyi hydroelectrical station and its control[J]. *West China Exploration Engineering*, 1995, 7(1): 87—89.
- [12] 陆家佑, 王昌明. 根据岩爆反分析岩体应力研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 27—30.
LU Jia-you, WANG Chang-ming. Study on back analysis for stress of rock mass from information of rockbursts[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1994, 11(3): 27—30.
- [13] 孟召平, 程浪洪, 雷志勇. 淮南矿区地应力条件及其对煤层顶底板稳定性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(1): 21—25.
MENG Zhao-ping, CHENG Lang-hong, LEI Zhi-yong. Characters of in-situ stress field in Huanan mine area and its influence on stability of coal roof and floor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(1): 21—25.
- [14] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91—99.
ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 91—99.
- [15] 马行东, 李海波, 肖克强, 等. 动荷载作用下地下岩体洞室应力特征的影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 164—169, 228.
MA Xing-dong, LI Hai-bo, XIAO Ke-qiang, et al. Study on the factors influencing stress characteristics of rock cavern under earthquake[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2006, 26(2): 164—169, 228.
- [16] 樊克恭, 蒋金泉. 弱结构巷道围岩变形破坏与非均称控制机理[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 54—59.
FAN Ke-gong, JIANG Jin-quan. Deformation failure and non-harmonious control mechanism of surrounding rocks of roadways with weak structures[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(1): 54—59.
- [17] 黄达, 康天合, 段康康. 侧压系数对巷道软弱互层顶板岩体破坏影响规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(3): 21—24, 31.
HUANG Da, KANG Tian-he, DUAN Kang-lian. Study on the influence laws of side pressure coefficient on roof failure of roadway in alternating stratified soft roof rock[J]. *Mining Research and Development*, 2004, 24(3): 21—24, 31.
- [18] 王学滨, 潘一山, 陶帅. 不同尺寸的圆形隧洞剪切局部化过程模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 101—108.
WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, TAO Shuai. Numerical simulation of shear strain localization processes of circular tunnels with different diameters[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2009, 20(4): 101—108.
- [19] 王学滨. 扩容角对初始随机材料缺陷岩石试样破坏过程及力学行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1063—1071.
WANG Xue-bin. Effects of dilation angle on failure process and mechanical behavior for rock specimen with random material imperfections[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(7): 1063—1071.
- [20] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1520—1526.
CHEN LU-wang, BAI Shi-wei, YIN Xiao-xi, et al. Plane-strain model tests on rock-burst of horseshoe section caverns in hard and brittle rockmass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(10): 1520—1526.

不同侧压系数条件下圆形巷道岩爆过程模拟

作者: [王学滨](#), [潘一山](#), [WANG Xue-bin](#), [PAN Yi-shan](#)
作者单位: [辽宁工程技术大学, 力学与工程科学系, 辽宁, 阜新, 123000](#)
刊名: [岩土力学](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)
英文刊名: [ROCK AND SOIL MECHANICS](#)
年, 卷(期): 2010, 31(6)

参考文献(20条)

1. 郭立;吴爱祥;马东霞 [基于RES理论的岩爆倾向性预测方法](#)[期刊论文]-[中南大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(02)
2. 牟宗龙;窦林名;张广文 [坚硬顶板型冲击矿压灾害防治研究](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2006(06)
3. 钱七虎;李树枕 [深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2008(06)
4. 潘岳;王志强 [圆形洞室岩爆的折迭突变模型](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2005(02)
5. 王学滨 [基于能量原理的岩样单轴压缩剪切破坏失稳判据](#)[期刊论文]-[工程力学](#) 2007(01)
6. 王学滨;潘一山;海龙 [基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(04)
7. 汪新红;王明洋 [岩爆与峰后岩石力学特性](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2006(06)
8. 宫凤强;李夕兵 [岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2007(05)
9. 唐礼忠;潘长良;王文星 [用于分析岩爆倾向性的剩余能量指数](#)[期刊论文]-[中南工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2002(02)
10. 陈陆望;白世伟;殷晓曦 [坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2008(10)
11. 王学滨 [扩容角对初始随机材料缺陷岩石试样破坏过程及力学行为的影响](#)[期刊论文]-[中国有色金属学报](#) 2007(07)
12. 王学滨;潘一山;陶帅 [不同尺寸的圆形隧洞剪切局部化过程模拟](#)[期刊论文]-[中国地质灾害与防治学报](#) 2009(04)
13. 黄达;康天合;段康廉 [侧压系数对巷道软弱互层顶板岩体破坏影响规律研究](#)[期刊论文]-[矿业研究与开发](#) 2004(03)
14. 樊克恭;蒋金泉 [弱结构巷道围岩变形破坏与非均称控制机理](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2007(01)
15. 马行东;李海波;肖克强 [动荷载作用下地下岩体洞室应力特征的影响因素分析](#)[期刊论文]-[防灾减灾工程学报](#) 2006(02)
16. 周宏伟;谢和平;左建平 [深部高地应力下岩石力学行为研究进展](#)[期刊论文]-[力学进展](#) 2005(01)
17. 孟召平;程浪洪;雷志勇 [淮南矿区地应力条件及其对煤层顶底板稳定性的影响](#)[期刊论文]-[煤田地质与勘探](#) 2007(01)
18. 陆家佑;王昌明 [根据岩爆反分析岩体应力研究](#)[期刊论文]-[长江科学院院报](#) 1994(03)
19. 万姜林;洪开荣 [太平驿水电站引水隧洞的岩爆及其防治](#) 1995(01)
20. 万姜林;周世祥;南琛 [岩爆特征及机理](#) 1998(02)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ytlx201006044.aspx