

文章编号: 1000-7598(2009)02-0413-06

侧压系数对圆孔周边松动区破坏模式影响的数值试验研究

张 哲¹, 唐春安², 于庆磊³, 段 东³

(1. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110178; 2. 大连理工大学 土木与水利学院, 大连 116024;
3. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110004)

摘 要: 利用岩石破裂过程分析软件 RFPA^{2D}, 对岩体中的圆孔周边的变形及非线性渐进破坏特征、巷道周边关键部位的应力变化进行了分析, 研究了应力场中侧压力系数对围岩应力场分布的影响。研究指出, 侧压系数 λ 对应力场分布及圆孔周边松动区的破坏特征起决定作用。当 $\lambda \leq 1$ 时, 顶板的塑性区和卸压范围较大, 但顶板挠度却较小; 当 $\lambda > 1$ 时, 顶板的塑性区和卸压范围较小, 但顶板挠度却较大。对于进一步深入理解深部岩体中巷道破坏失稳机制并采取有效的加固措施等具有重要的理论和实践意义。

关 键 词: 圆孔; 地应力; 松动区; 侧压系数; 数值模拟

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

Numerical simulation on influence coefficient of lateral pressure on broken zone of circular aperture

ZHANG Zhe¹, TANG Chun-an², YU Qing-lei³, DUAN Dong³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In light of the heterogeneity of rock, by introducing the constitutive model based on damage mechanics and statistical theory and using the RFPA^{2D}, the influence of the horizontal in-situ stresses on the distributions of plastic zones is discussed. The deformation and nonlinear gradual failure characteristics of circular roadway in deep rock mass as well as the displacement and the stress variation of the key positions in the periphery of the roadway are analyzed. When $\lambda \leq 1$, the plastic area is large-scale, but deflection more little; when $\lambda > 1$, the plastic area is little-scale, but deflection more big. The study indicates that the stress concentration occurs in the periphery of the roadway after evacuation and plastic deformation zone engenders under the persisting stress of the surrounding rock; then the cracks appear and expand continuously; the broken rock zone appears at last and the intensity of the stress concentration decreases as well as the stress field shifts beyond. This study is very useful and significant both on the theoretical and practical aspects.

Key words: circular aperture; in-situ stresses; broken rock zone; coefficient of lateral pressure; numerical simulation

1 引 言

在深部采矿、人防工程以及其他一些地下活动中, 水平圆形巷道相对于其他形状巷道周边应力集中程度最低, 是人们经常采用的一种地下结构形式。围岩破坏一般表现为裂纹形成和集结、多裂纹

相互贯通, 并引起表面岩石的剥落, 严重的将引发围岩的动力失稳等灾害。由于埋深和构造应力的不同, 破坏的形式也存在差异, 因此, 研究不同侧压系数条件下岩壁裂纹分布和发展规律是一项有意义的工作, 它可以为钻孔和巷道支护和设计提供更可靠的依据。

收稿日期: 2007-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50474017, No.50490274)。

第一作者简介: 张哲, 男, 1977年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程稳定性及数值模拟方面的研究。E-mail: zh.zhe@163.com

地下工程中围岩的失稳主要是由于开挖过程中临空面的产生而引起应力重分布超过围岩强度或导致围岩过分变形造成的,而应力重分布是否会达到危险的程度取决于地应力场的大小、方向、分布、岩体状态和开挖次序。其中,地应力是影响地下洞室等工程稳定的最主要的基本因素之一。现场实测地应力是提供地应力场最直接的途径,但是在工程现场,由于场地和经费等原因,不可能进行大量测量;另一方面,地应力场成因复杂,影响因素众多,人们对具体工程的地应力的认识往往是不充分的。同时,由于岩石材料组成的非均匀性和非连续性,理论上很难对其构成特征做出准确描述。此外,由于实验设备、测试手段的局限性,也不能对岩石破裂过程中的细观层次结构变化进行分析。目前,针对围岩破裂区的研究多是采用理论推导与相似材料试验相结合,或是以现场监测进行研究^[1-7],这些方法对围岩破裂区的研究提供了有效的手段,却很难反映围岩破裂区形成过程的详细情况,而一般的数值分析程序对于围岩损伤弱化以及裂纹萌生、扩展、贯通直至洞室破坏失稳的过程却难以直观显现。

人们常将平均水平应力与垂直应力的比值称之为侧压比,对于不同地区、不同深度, k 值各有差异^[8]。试验结果表明,侧压除影响岩石的变形和强度特性外,也对岩石的破坏机制产生重要的影响。因此,侧压是影响孔洞周边裂纹演化研究中必须考虑的重要因素。

本文从岩石的细观结构出发,用若干简单的、能反映岩石基本特性的细观模型来模拟复杂的宏观岩石力学行为。利用 RFPA 真实破裂过程数值分析系统对岩体中圆形孔洞周边松动区演化形成机制进行数值模拟研究,研究结果有助于提高岩体的自稳能力,为巷道围岩稳定性评价、支护设计提供必要的指导。

2 数值分析方法及模型参数

本文采用真实破裂过程分析 RFPA (realistic failure process analysis) 数值模拟方法作为分析工具。RFPA^{2D} 系统是一个基于有限元应力分析模块和微观单元破坏分析模块的岩石变形、破裂过程研究的数值分析程序,将损伤力学与数值计算方法有机地结合起来,通过考虑岩石性质的非均匀性特点,模拟岩石变形和破裂的非线性行为,是一种用连续介质力学方法解决非连续介质力学问题的新型数值分析工具。RFPA^{2D} 可以解决介质的非连续性和变

形的非线性,而且能够体现岩石材料基本的物理力学性质。有关 RFPA^{2D} 程序,文献[9-11]中进行了详细介绍。

本研究分别选取了 5 种不同侧压比系数的情况,进行圆形孔洞开挖的数值试验研究。试样模型尺寸为 200 mm×200 mm,圆孔直径为 20 mm,网格划分为 200×200 个单元。采用平面应变模型,整个加载过程采用侧压控制的加载方式,侧压加载量 $\Delta p = 0.2$ MPa,模拟侧压系数 λ 分别为 0.3、0.75、1.0、1.5、2.0 (参数详细意义参见文献[11])。模型的示意图如图 1 所示,图中围岩体的灰度代表围岩力学参数(如弹性模量、抗压强度等)的大小,灰度越亮,其值越大。试样的力学性质参数见表 1。

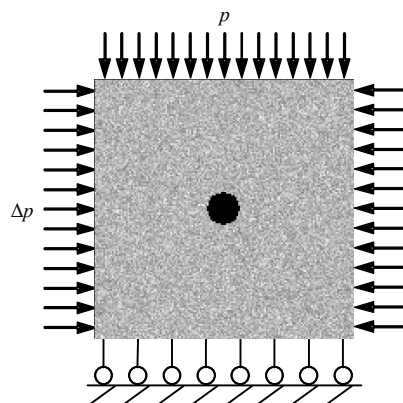


图 1 数值模型

Fig.1 Numerical simulation model

表 1 材料力学参数

Table 1 Material mechanical properties

均质度 系数	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	侧压系数
3, 30	60	60	0.3	32	0.3, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0

3 计算结果分析

3.1 侧压系数对应力场的影响

图 2 示出了侧压系数为 0.3、0.75、1.0、1.5 和 2.0 时孔洞周边的最小主应力(拉应力)分布情况。图中亮度值越高,表示拉应力的值越大。

从图 2 中可以看出:在 $\lambda = 1$ 时,巷道围岩应力集中呈现圆形分布;当 $\lambda < 1$ 时,随着 λ 值减小,孔洞周边的剪应力集中区向孔洞两帮转移,孔洞周边的应力梯度外轮廓线呈现长轴水平的椭圆形分布;当 $\lambda > 1$ 时,随着 λ 值增大,孔洞周边的剪应力集中区向孔洞上下方转移,孔洞周边的应力梯度外轮廓线呈现长轴竖直的椭圆形分布。该结果与弹性力学分析的结论是一致的。

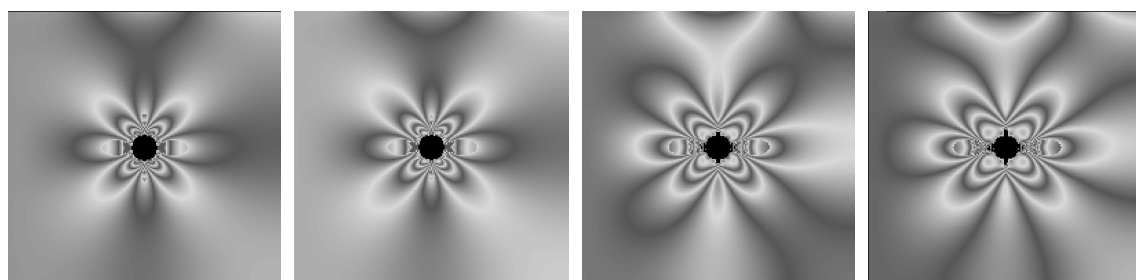
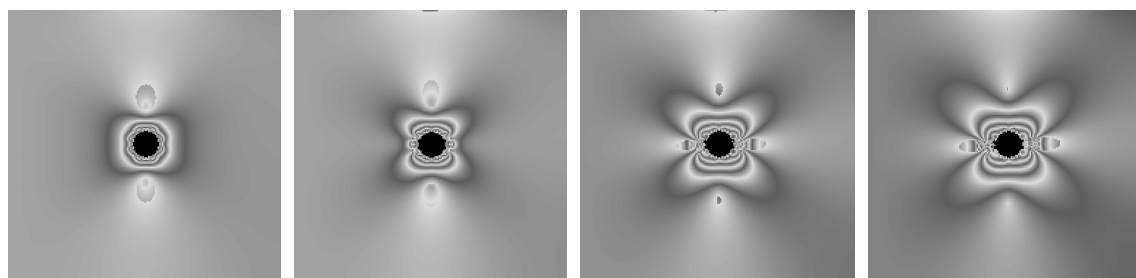
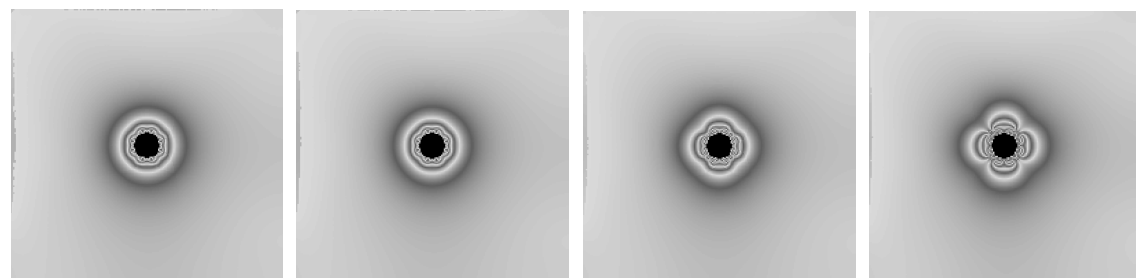
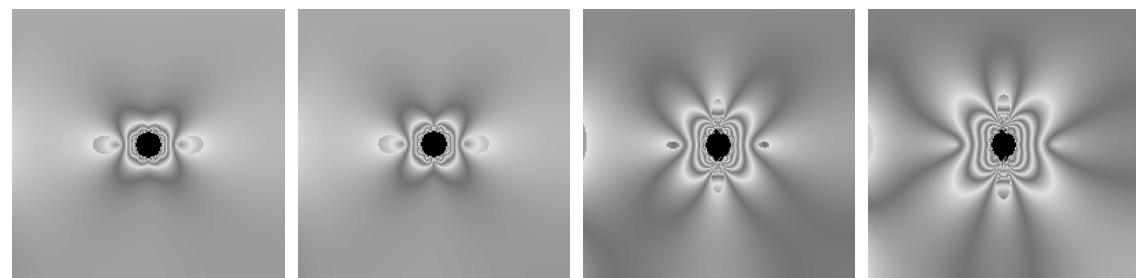
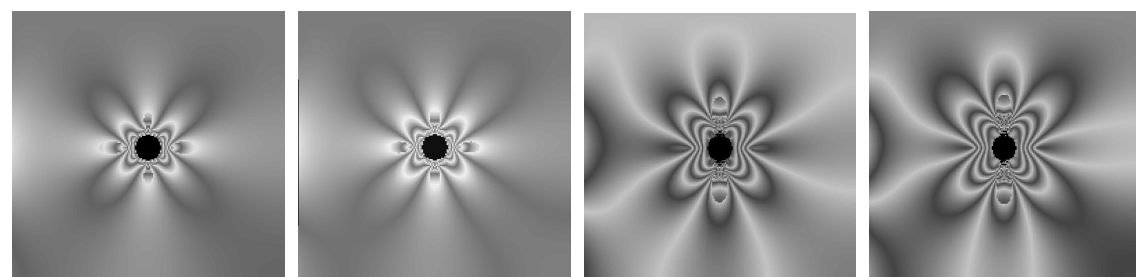
(a) 侧压系数 $\lambda = 0.3$ 时最小主应力图(b) 侧压系数 $\lambda = 0.75$ 时最小主应力图(c) 侧压系数 $\lambda = 1$ 时最小主应力图(d) 侧压系数 $\lambda = 1.5$ 时最小主应力图(e) 侧压系数 $\lambda = 2$ 时最小主应力图

图2 不同侧压系数对圆孔周边应力场分布情况

Fig.2 The effect of different coefficient of lateral pressure on pressure field

值得说明的是,随着侧压系数增大,拉应力集中区由圆孔上下方向左右两帮逐渐转移。根据这一

分析,进行支护设计时必须考虑巷道的顶压和侧压情况。传统的支护理论和方法一般只考虑顶压的作

用, 所以支护设计不能与实际条件相适应, 因而不能充分利用围岩的自稳特性, 达不到技术、经济最佳的双重效果。在目前的开采深度条件下, 构造应力的存在使得大多数条件下垂直应力成为中间主应力, 最大和最小主应力往往是近似于水平的, 因而在同一岩层条件下, 不同的巷道布置方向上会出现 $\lambda > 1$ 与 $\lambda < 1$ 的情况, 所以应该相应改变支护设计方案。

当 $\lambda < 1$ 时, 圆孔上方拉剪应力的集中程度较大, 随着 λ 值的减小, 应力集中的影响范围增大, 但破坏形式基本相同; 当 $\lambda \geq 1$ 时, 破坏仅发生在圆孔上部很小的范围内, 随着 λ 的增大, 应力集中的影响范围增大。通过分析认为, 当 $\lambda < 1$ 时, 水平挤压力较小, 圆孔周边产生的水平拉伸作用较强, 导致岩体的整体性能减弱, 因此圆孔上方应力集中范围大; 当 $\lambda \geq 1$ 时, 水平应力较大, 圆孔上、下方首先发生屈曲而产生拉剪破坏, 此时如果能有效地控制或削弱水平应力的作用, 将有利于顶板的稳定性。

3.2 松动区形成过程分析

采用如表 1 所示的材料属性, 只把均质度系数取为 6, 考察圆孔周边松动区演化形成过程。

在侧压力系数 λ 较小时, 岩石试件呈典型的脆性张破坏, 即破裂面平行于主压应力作用力方向。随着侧压系数 λ 的增加, 岩石试件由剪张破坏 (即以张破坏为主, 剪破坏为辅的破坏型式) 到张剪破坏 (即剪破坏为主, 张破坏为辅的破坏型式), 然后向典型的剪切破坏转化。在高侧压条件下, 岩石试件呈塑性破坏, 破裂面交汇处有较大范围的挤压松动区, 有显著的侧向膨胀。

图 3 是侧压系数为 0.3 时巷道围岩变形破演化过程。从模拟结果中可以看出, 当载荷达到 18.6 MPa 时 (图 3 (a)), 在巷道上下顶端处的显现拉应力集中区, 并开始出现初始裂纹 (primary crack); 随着垂直载荷的增加, 拉伸裂纹的长度不断增加 (见图 3 (b))。随着载荷的继续增加, 剪切裂纹数量不断增加, 开始在水平方向的孔洞两侧压应力集中区出现剪切裂纹 (shear crack), 在孔洞两侧逐渐形成压裂区, 如图 3 (c) 所示。此后, 开始出现随机的、无序的、相互独立的小裂纹。由于远场裂纹 (remote crack) 的增加, 在外载荷的作用下, 裂纹间尚未贯通的部分扭剪, 产生剪切破裂, 原来彼此相互独立的裂纹相互贯通, 形成大的宏观裂纹, 见图 3 (d)。E. Z. Lajtai^[12]和 B. J. Carter 等^[13]曾于 1974 和 1992 年用石膏和 Potash 盐岩分别进行了单孔洞和多孔洞

周边裂纹演化的模型试验, 其最终破裂模式与模拟结果 (图 3) 表现出较好的一致性。

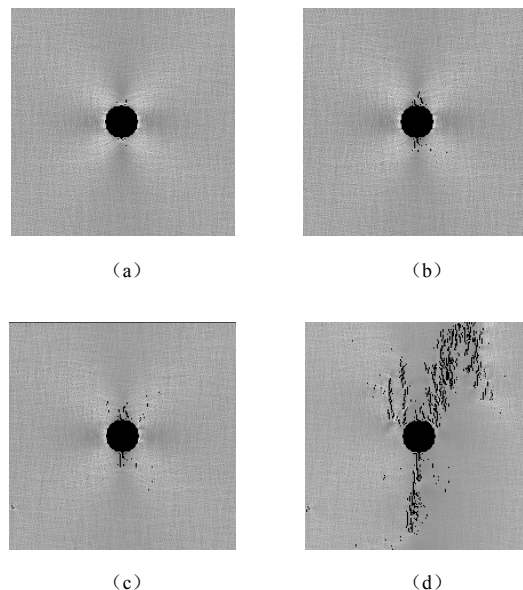


图 3 $\lambda = 0.3$ 时巷道围岩破裂区演化形成过程

Fig.3 The evolution of broken rock zone with $\lambda = 0.3$

同时, 在图中可以发现, 与主应力垂直的孔洞两侧的破裂区呈“V”形, 这种破裂形态多发于构造应力复杂的深部岩石开挖工程中的破裂现象, 其形成原因是由于在特定应力条件下, 开挖改变了原来的三维受力状态, 使其处于单轴受力状态, 在孔壁两侧产生应力集中, 进而产生“V”字形破裂区。

从图 3 中的巷道围岩破裂区的形成、演化过程可以看出, 破裂区裂纹间相互作用和连接将产生局部弱化, 并最终导致岩石的宏观失效。岩石材料抵抗拉伸的能力较低, 但是, 在本研究中影响岩石宏观失效的主要原因并不是孔洞上下端张拉裂纹, 而是剪切力形成的诸多裂纹导致局部区域弱化, 最终导致形成多条平行于最大主应力方向的细小裂纹, 这些裂纹大致呈翼型排列。随着载荷的增加, 弱化区面的剪切滑移发生了剪切破坏, 并逐渐延伸到岩石试样边界的劈裂面, 形成宏观裂纹带。

图 4 示出了在不同侧压系数条件下, 通过圆孔中心不同垂直高度的应力变化情况。从图 4 中可以看出, 在顶板靠近孔洞范围内, 随着 λ 值的增大, 垂直压应力逐渐减小。这是由于随着 λ 值的增大, 导致孔洞上方区域屈曲破坏加剧、垂直应力大量释放。当 $\lambda = 1.5$ 和 2 时, 由于侧压较大, 在上下方岩体中出现压剪应力, 这是孔洞上下方先破坏的直接原因。在巷道顶板 3.0 m 以上的高度, 随着 λ 值增大, 垂直压应力略有增大的趋势, 这是由于远离巷

道开挖空间, λ 增大改善了围岩的三向受力状态, 顶板上位岩层中积聚垂直应力的能力逐渐增强。到了模型顶部, 岩层中的垂直应力稳定在覆岩层重力的数值上。

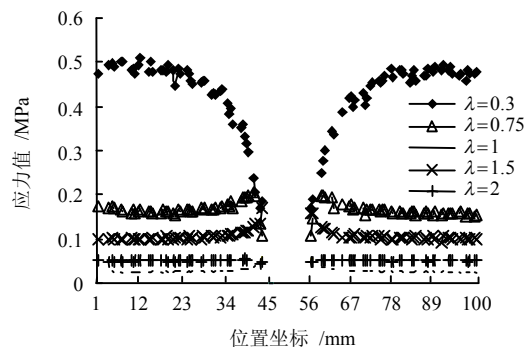


图4 竖直方向最大主应力曲线

Fig.4 Max stress of the roadway vertical section

图5示出了在不同侧压系数条件下, 通过圆孔中心不同水平位置的应力变化情况。从图5中可以看出, λ 值较小时左右两端的应力很大, 随着 λ 值的增大, 水平方向的应力逐渐减小, 这是由于当 λ 值的增大时, 使孔洞左右区域应力释放的结果。

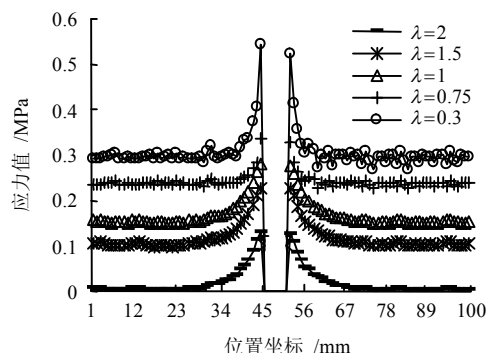


图5 水平方向最大主应力曲线

Fig.5 Max stress of the roadway horizontal section

从图中可以看出, 侧压力系数为1时岩体的应力峰值强度最大; 当侧压系数小于或大于1时, 强度均小于此值, 这符合第三强度理论或莫尔强度理论。由于加载步反应的是围岩侧压力的变化情况, 故岩体在破坏前, 岩体中的应力值相同情况下, 侧压力系数为1时所需要加载的侧压力较大, 侧压力系数增大或减小时, 侧压力均有所减小, 这是由于岩体中单元体的应力状态决定的。受岩石材料非均匀性的影响, 虽围岩的弹性模量相同, 但岩体破坏后的残余强度值不是完全相同, 但是相差不多。

裂纹间的相互贯通, 最终导致条带状破裂区域

发育形成, 在剪应力的作用下, 整个破裂区发生错动, 裂纹间的连接被剪断, 造成整个区域的大面积破坏。这一结果同试验结果文献[14]是吻合的。

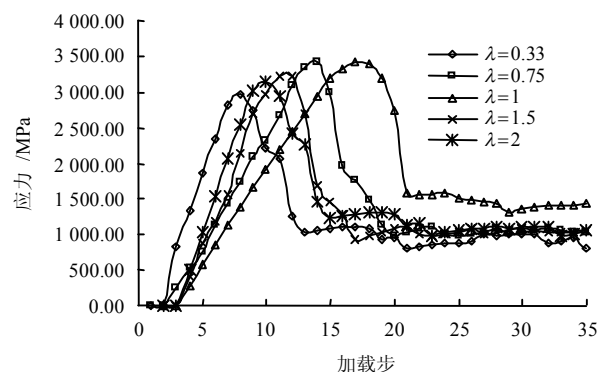
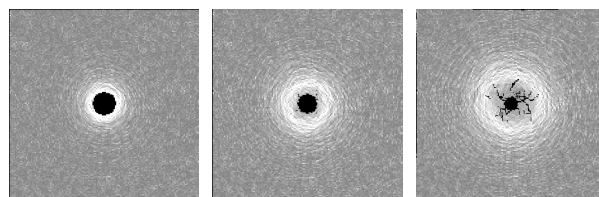


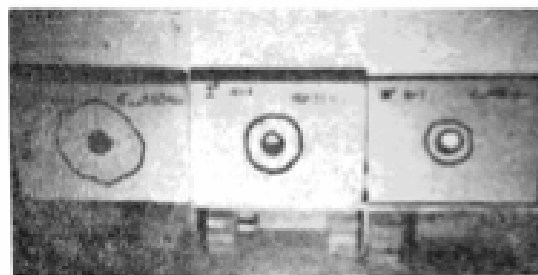
图6 不同侧压系数的应力-加载步曲线

Fig.6 Stress-strain curve of different coefficient

利用 RFPA 模拟的数值模拟结果与相似材料试验结果对比, 得到非常相似的结果, 如图7、8所示。



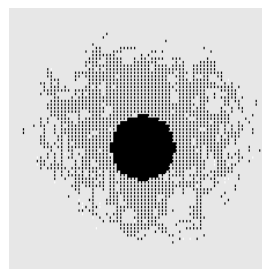
(a) 破裂区形成过程 (RFPA 结果图)



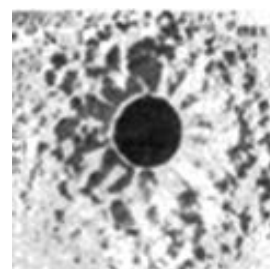
(b) 相似材料试验结果 (董方庭, 1994 年)

图7 数值模拟结果与相似材料试验结果对比

Fig.7 The compared by RFPA result with experiment



(a) RFPA 数值试验结果图



(b) 现场超声波测试图

图8 围岩破裂区数值模拟与现场试验的对比图

Fig.8 The compared by RFPA result with experiment

本文分析了侧压系数对圆形巷道应力分布、松动区形成过程和破坏模式, 仅仅是一个非常初步的研究工作, 实际中的巷道总是处于一个十分复杂的地质环境中, 还需要进行深入的探讨。

4 结 论

本文尝试运用数值模拟方法, 对不同侧压系数时圆孔周边的应力场、关键点位移、松动区的破坏模式进行分析研究, 不仅得到了围岩应力场的形成过程, 而且通过模拟再现了此过程中应力转移及裂缝萌生、扩展过程。经研究得到如下结论:

(1) 巷道周边围岩的应力集中区逐渐向岩体深部转化, 并先形成塑性区。持续的应力作用后, 在巷道周边产生裂纹, 并沿径向扩展, 最终导致围岩破裂区的形成。

(2) 侧压系数 λ 对圆孔周边的应力场和破坏模式有着明显的影响。当 $\lambda < 1$ 时的破坏范围比 $\lambda \geq 1$ 时的明显增大, 但其顶板挠度明显减小。因此, 减小侧向应力有利于巷道顶板下位岩层的稳定。

(3) 围岩破坏一方面产生损伤扩容、剪胀, 引起巷道收敛变形; 另一方面, 强度降低而进一步引起围岩应力场发生改变, 导致围岩弹性体积变形发生改变, 使巷道收敛变形, 两方面的共同作用使应力分布向岩体深部发展。

参 考 文 献

- [1] 董方庭, 宋宏伟, 郭志红, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21—32.
DONG Fang-ting, SONG Hong-wei, GUO Zhi-hong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(1): 21—32.
- [2] 李华晔. 地下洞室围岩稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [3] 范文, 俞茂宏, 石耀武, 等. 围岩塑性松动压力公式的推广和改进[J]. 长安大学学报 (地球科学版), 2003, 25(1): 33—36.
FAN Wen, YU Mao-hong, SHI Yao-wu, et al. The unified solution of the plastic relaxed pressure s computing of surrounding rock masses[J]. *Journal of Xian Engineering University*, 2003, 25(1): 33—36.
- [4] 王鲁明, 赵坚, 万德连. 巷道裂隙围岩稳定性影响因素的数值分析[J]. 岩土力学, 2005, (10): 1 565—1 569.
WANG Lu-ming, ZHAO Jian, WAN De-lian. Numerical analysis of influencing factors in stability of cracked surrounding rock of a laneway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, (10): 1 565—1 569.
- [5] 刘刚, 宋宏伟, 段现军. 矩形巷道松动圈回归公式[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(6): 38—40.
LIU Gang, SONG Hong-wei, DUAN Xian-jun. Regressive formula for released zone in mine square type roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2001, 29(6): 38—40.
- [6] 刘庭金, 朱合华. 围岩卸载损伤演化及应力场调整有限元分析[J]. 地下空间, 2002, 22(4): 310—313.
LIU Ting-jin, ZHU He-huan. Finite element analysis on damage progress by the unloading of surrounding rock and stress field regulation[J]. *Underground Space*, 2002, 22(4): 310—313.
- [7] 宋俐, 张永强, 俞茂宏. 压力隧道弹塑性分析的统一解[J]. 工程力学, 1998, 15(4): 57—61.
SONG Li, ZHANG Yong-qiang, YU Mao-hong. Plastoelastic unified analysis of pressure tunnel[J]. *Engineering Mechanics*, 1998, 15(4): 57—61.
- [8] 陈志敏. 不同岩性侧压比随深度变化规律探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 122(6): 99—101.
CHEN Zhi-min. Discussion on change law of different lithologys side pressure ratio with depths[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2006, 122(6): 99—101.
- [9] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [11] 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践, 1999, 21(2): 21—24.
TANG Chun-an. Numerical tests of progressive failure in brittle materials[J]. *Mechanics and Engineering*, 1999, 21(2): 21—24.
- [12] LAJTAI E Z. Brittle fracture in compression[J]. *International Journal Fracture*, 1974, (10): 525—536.
- [13] CARTER B J, BANDIS S C, LUMSDEN A C. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics*, 1992, 16: 321—331.
- [14] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34 (5): 159—168.