

文章编号: 1000-7598(2009)05-1471-06

脆性岩石破裂演化过程的三维细胞自动机模拟

潘鹏志, 冯夏庭, 周 辉

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 在三维条件下定义了实体细胞自动机的基本组件, 综合运用弹塑性理论、细胞自动机自组织演化理论、统计原理以及岩石力学理论等, 建立了模拟岩石三维破裂过程的张量型细胞自动机模型, 并开发了相应的数值模拟软件 EPCA^{3D}。利用 EPCA^{3D} 对脆性岩石进行单轴压缩破裂过程模拟, 通过破裂模式、岩样内部破裂情况、全应力-应变曲线和声发射曲线等的分析, 揭示岩石破裂的机制。结果表明, EPCA^{3D} 能够较好地模拟非均质岩石在载荷作用下微裂纹的萌生、扩展和贯通的全过程。利用该模拟系统, 采用应力-应变线性组合的加载控制方式, 研究了不同围压对岩石全应力-应变曲线的影响。研究结果表明: 对于脆性非均质岩石, 低围压下容易表现为 II 类行为, 且强度较低; 高围压下容易表现为 I 类变形行为, 且强度较高。

关 键 词: 三维弹塑性细胞自动机; 岩石破裂过程; 非均质性; 围压; I 类和 II 类曲线

中图分类号: TU 452; O 346.1⁺1

文献标识码: A

Failure evolution processes of brittle rocks using 3D cellular automaton method

PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, ZHOU Hui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The basic components of solid cellular automaton were defined in three-dimensional condition. The theories of elastoplasticity, cellular automaton, statistics and rock mechanics are integrated to develop an elastoplastic cellular automaton model to simulate the failure processes of heterogeneous rocks under three-dimensional condition and the associated numerical code EPCA^{3D} was compiled in Visual C++ environment. The EPCA^{3D} code was used to simulate the failure processes of heterogeneous rocks under uniaxial compression. The failure mechanism was well explained by analyzing failure pattern, inner failure position, complete stress-strain curves as well as the acoustic emission. It is found that the EPCA^{3D} has the ability to simulate crack initiation, propagation and coalescence in the failure processes of rocks. Using the developed model, the effect of confinement on the complete stress-strain curves is investigated by using the linear combination of stress and strain loading control method. It is concluded that brittle heterogeneous rock is prone to behave Class II with small confinement and behave Class I with big confinement. The strength of the rock is lower with smaller confinement and vice versa, which is consistent with the results obtained from physical experiments.

Key words: 3D elastoplastic cellular automaton; rock failure process; heterogeneity; confinement; Class I and Class II curves

1 引 言

岩石破裂机制的研究是解决并进而控制重大岩土工程灾害的基础, 这就要求从微细观到宏观尺度上认知岩石破坏的规律。已有许多国内外学者对岩石的破裂机制进行了一些有益的探索, 在理论、试验和数值模拟研究方面取得了重要进展。其中, 数

值模拟被认为是进行岩石破裂机制研究有效的辅助手段。在过去的几十年里, 国内外学者建立了许多数值模型, 如格构模型^[1]、梁-颗粒模型^[2]、岩石破裂过程分析模型 (RFPA)^[3] 等等。陈忠辉等^[4] 建立了三维各向同性损伤模型及弹脆性本构方程; 陈永强等^[5] 采用格构模型模拟了三维非均匀脆性材料的破坏过程; Itasca 公司^[6] 开发了三维颗粒流模型软件

收稿日期: 2008-07-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (No. 2006AA06Z117); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50709036); 湖北省自然科学基金资助项目 (No. 2008CDB368)。

第一作者简介: 潘鹏志, 男, 1976 年生, 副研究员, 主要从事多场耦合下岩石破裂机理与应用方面的研究。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn

PFC^{3D}; 梁正召和唐春安等^[7]开发了三维并行有限元程序 RFA^{3D}, 用于模拟岩石的破裂过程; 王学滨^[8]采用三维拉格朗日元法, 对三维岩样进行单轴压缩断面效应和破坏数值模拟; 邢纪波等^[9]采用三维梁-颗粒模型对岩石类材料进行细观力学行为模拟。上述模型求解问题均遵从从整体到局部的解题思路, 即通常所说的“自上而下”的思想, 忽略了个体与其邻居之间的相互作用关系, 这种思想反映到问题的具体求解当中, 会产生一个共同的问题。由于采用整体求解, 在计算中需要进行总体刚度矩阵的组装, 因此, 需要占用较大的内存, 这成为制约大规模计算的瓶颈。

为克服上述困难, 笔者所在的课题组将细胞自动机的局部作用原理引入到岩石力学问题的求解当中, 建立了岩石破裂过程模拟的二维弹塑性细胞自动机模型^[10]。细胞自动机的局部原理表明, 元胞的状态仅与邻居的状态有关, 与邻域外元胞的状态无关。这种“自下而上”的解决问题的思路使得在具体的计算当中无需形成总体刚度矩阵, 整体的行为通过元胞与其邻居根据更新规则的相互作用依次传递, 达到平衡状态。这种方法的优点是对内存要求极低, 有利于在串行条件下对岩石破裂问题进行较为精细的仿真。

但上述的细胞自动机模型为二维模型, 而岩石力学与工程问题本身是三维的力学问题。要深入理解岩石破裂的机制, 需要在三维条件下研究岩石的破裂问题。

因此, 本文在前期工作^[10-11]的基础上, 定义了三维实体细胞自动机的各个组件, 建立了模拟岩石破裂演化过程的三维弹塑性细胞自动机模型, 并开发了相应的数值模拟软件系统 EPCA^{3D}, 用于对岩石在单轴和三轴压缩条件下的破裂过程进行模拟。

工程岩体总是处于一定的应力场之中, 围压对岩石的破坏模式和变形特征都有着重要的影响, 国内外研究者在围压对岩石破坏过程的影响方面开展了很多研究。在数值模拟方面, Fang 和 Harrison^[12]采用局部退化模型研究了围压对非均质岩石破坏过程的影响; 傅宇方等^[13]采用 RFA 系统研究了围压对岩石破裂过程宏观力学行为的影响; Zhong Liu 等^[14]基于边界元法, 利用微观力学模型研究了不同围压条件下颗粒材料微观结构的随机性对应力-应变关系和破裂的影响, 等等。然而, 上述研究得出的偏应力-应变曲线均为 I 类变形曲线, 很少涉及围压作用下是否会出现 II 类变形行为方面的研究。

因此, 本文利用 EPCA^{3D} 系统在三维条件下,

采用应力-应变线性组合的加载控制方式, 研究围压对全应力-应变曲线的影响。

2 三维实体细胞自动机更新规则

细胞自动机包括元胞、元胞空间、元胞状态、更新规则等组件, 在三维条件下这些组件与二维条件下的细胞自动机各组件的定义类似, 其中, 更新规则在细胞的演化过程中起着非常重要的作用, 也是细胞自动机模型与其他模型的区别所在。

建立细胞自动机更新规则时, 根据局部作用原理, 只需要考虑求解域中的一个元胞(图 1)。相对于二维的更新规则, 三维条件下的更新规则更加复杂, 每个元胞有更多的邻居, 元胞与其邻居之间的信息传递在三维空间上进行。元胞与邻居之间的相互作用关系可以通过力的平衡来建立^[10], 系统中各个元胞按同样的规则进行状态更新, 通过力 \rightarrow 位移 \rightarrow 力等的循环迭代, 使增量 $\Delta u_i \rightarrow 0, \Delta F'_i \rightarrow 0$ 达到自组织平衡。

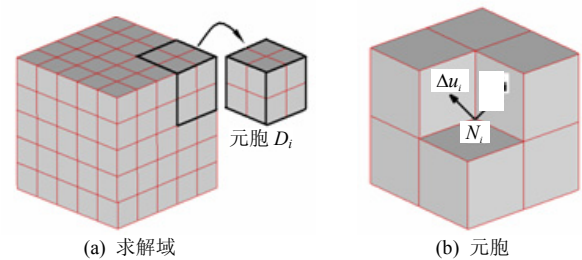


图 1 求解域和元胞

Fig.1 Domain to be solved and cell

为了直观地表达细胞自动机的自组织演化过程, 将模型尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的正方体, 划分为由 125 个正方体元胞单元组成的系统, 该系统包含 216 个元胞节点, 每个元胞单元有 8 个邻居元胞节点。弹性模量为 70 GPa , 泊松比为 0.3 , 不考虑重力的影响。模型上方施加 1000 N 的轴向 (Z 向) 载荷, 模型下方施加 Z 向的位移约束, 元胞自动机迭代精度为 1×10^{-10} 。图 2 为模型 Z 方向的位移自组织演化过程, 可以看出, 在模型 Z 方向施加的轴向载荷的作用下, 上端产生的位移逐步向下端部传递, 经过一定步数的传递, 系统中的位移变化逐渐趋于设定的迭代精度, 即达到其稳定状态。位移随着时间的推移而向下传递的情形也可以从关键点的位移演化曲线来反映。从图 3 中可以看出, 该关键点的位移经过一定时间的演化, 便趋向于一个稳定值。在计算中, 可以根据不同的需要设定不同的细胞自动机迭代精度, 迭代精度越高, 计算的结果越趋向于精确解, 但所需计算的时间越长。

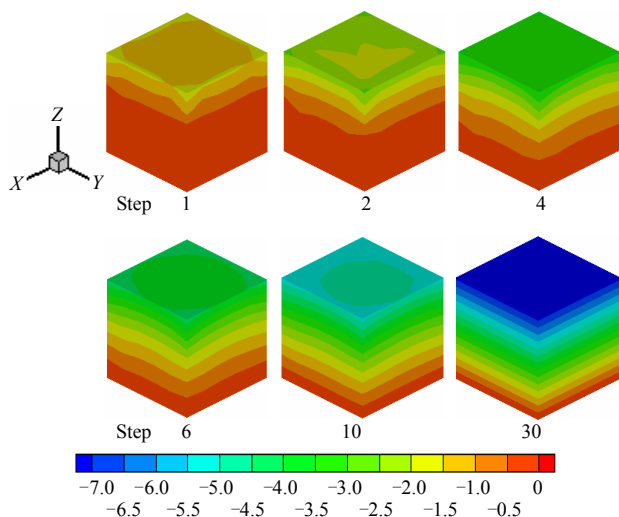


图2 Z方向位移自组织演化过程(单位: 10^{-6} m)
Fig.2 Self-organization process of Z-displacement
(unit: 10^{-6} m)

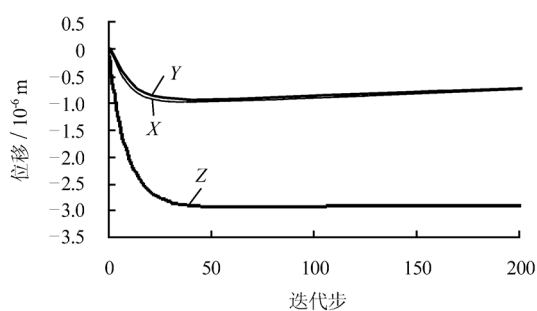


图3 关键点(0, 0, 0.02) X、Y和Z方向位移演化曲线
Fig.3 X, Y and Z-displacements at point (0, 0, 0.02)

3 三维弹塑性细胞自动机模型

3.1 基本内容

基于对岩石材料和岩石力学性质的理解,综合运用弹塑性理论、岩石力学、数理统计以及细胞自动机基本原理等,在二维弹塑性细胞自动机模型的基础上,建立了岩石破裂过程模拟的三维弹塑性细胞自动机模型,该模型包括以下几个方面的内容^[10]: ①非均质材料模型。采用 Weibull 分布或者正态分布等对材料的力学性质进行赋值。②细胞自动机更新规则。③声发射的定义。④元胞单元应变软化本构关系和强度准则。根据需要,可以建立和采用不同的本构关系,例如,文献[10—11]采用软化因子来控制元胞单元峰值后的软化形式,也可以采用 CWFS^[15]等软化模型来反映岩石材料的应变软化特性。模型中考虑了多种强度准则,例如 Mohr-Coulomb、Drucker-Prager 准则等。元胞单元服从弹塑性加载规律和关联(非关联)塑性流动法则。

3.2 模拟过程和模拟系统

在进行岩石试样破裂过程的模拟时,首先将岩

石试样或者求解域离散为由元胞单元组成的网格系统。基于非均质材料模型对元胞单元的力学性质进行赋值,采用一定的加载控制方式对岩石试样进行加载。在每个加载步,用细胞自动机更新规则求解岩石试样的变形场和应力场,采用一定的强度准则判断元胞单元是否达到屈服状态,达到屈服状态的元胞单元,其应力将根据应变软化的本构关系产生跌落,同时产生塑性应变,这一过程产生的不平衡力将传递给邻居的元胞节点,从而引起系统的应力调整。在调整的过程中,如果有元胞单元破裂,应力调整将继续进行,直至系统中没有元胞单元破裂为止。需要注意的是,在应力调整的过程中,一个元胞单元的破裂,有可能导致整个系统的雪崩式的破裂,这种情况在脆性岩石材料的破坏中尤为多见。

基于上述的原理和过程,利用 VC⁺⁺开发工具,编制了岩石破裂过程的三维弹塑性细胞自动机模拟系统 EPCA^{3D}。该系统可以实现多种加载控制方式下的岩石破裂过程模拟,包括常(变)应力、常(变)应变以及应力-应变线性组合的加载控制方式等^[11]。计算过程中,记录试样端部的位移差,并除以试样的高度得到轴向应变,记录试样端部的约束反力并除以试样的横截面积可以得到轴向应力,也可以将试样的所有元胞单元的轴向应变相加以及轴向应力相加后除以元胞单元个数,得到轴向应变和轴向应力,用这两种方法得到的全应力-应变曲线是一致的。

为简便起见,本文以 Tecplot^[16]为工具,对岩样和破坏区进行可视化处理,通过编制适合于 Tecplot 读取的数据格式,来达到有效显示非均质岩样和破坏区的目的。在显示非均质岩样的时候,每个元胞单元用不同的颜色进行区别,其颜色由自身的力学性质来确定。破裂的元胞单元可以用较亮的颜色替代原来的颜色,以达到显示破裂区的目的。

4 岩石单轴压缩破裂过程模拟

4.1 模型简介

岩石试样尺寸为 30 mm×30 mm×60 mm,模型划分为 31 250 个元胞单元,包含 34 476 个元胞节点。材料的力学性质如下:弹性模量均值为 70 GPa,泊松比为 0.3,初始黏聚力均值为 10 MPa,残余强度系数为 0.01,内摩擦角 49°,均质度系数分别为 1.5 和 3.0,随机种子数为 15。假设元胞单元服从弹脆塑性本构关系,软化因子为 1.0,这意味着当系统中任何一个元胞单元达到其峰值强度后,该元胞单元的应力就跌落到其残余强度水平,之后在残余强度

屈服面上做塑性流动。模拟时采用常位移速率加载控制方式进行加载，位移增量为 5×10^{-7} m，细胞自动机迭代精度为 1×10^{-10} 。

4.2 破裂过程、应力-应变曲线和声发射曲线

从图 4 可以看出，主破裂形成以前，试样中即有元胞单元破裂，且破裂的位置表现为明显的随机性，随着载荷的增加，试样中破裂的元胞单元逐渐增加，但增加的数量不是很大。从 25 步到 26 步，岩石发生了雪崩式的破坏，显示了脆性破坏的特点。系统中只要有一个元胞单元破坏，就会引起系统的应力调整，在应力调整的过程中有可能造成其他元胞单元的破坏，这种应力调整有可能持续较长的时间。持续的时间越长，破坏的元胞单元就越多。

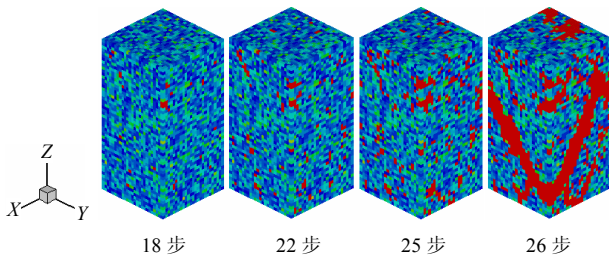


图 4 岩石试样的破裂过程 (亮色表示破坏的元胞单元) ($m = 1.5$)

Fig.4 Failure process of rock specimen with dimension 30 mm×30 mm×60 mm (red color means failed cell element) ($m = 1.5$)

岩石的破裂与应力-应变和声发射曲线 (图 5) 是相对应的，峰值以前弹性极限之后，开始有少量的声发射产生，表明有元胞单元破坏。峰值后，声发射数量急剧增加，强度迅速降低，岩石试样发生宏观破裂，形成了破坏局部化带。

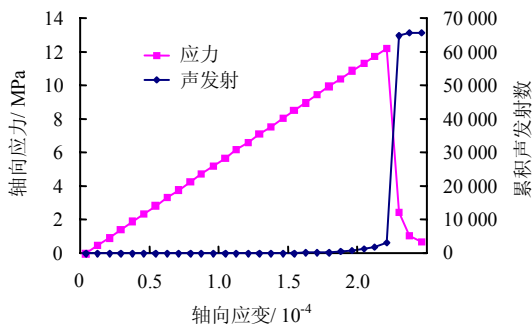


图 5 EPCA^{3D} 模拟得到的应力-应变曲线和累积声发射全程曲线 ($m = 1.5$)

Fig.5 EPCA^{3D} simulated stress-strain and strain-accumulate AE curve ($m = 1.5$)

采用 Tecplot 的切片功能，可以观察岩样内部的破裂过程和破裂情况 (图 6)，可以了解试样中任何

一个元胞单元的状态 (破裂或者完好)。由图 6 可以看出，加载初期，岩样中微破裂的分布和扩展具有随机性，分布不均匀，局域性不明显。岩样内部的微破裂随着载荷的增加而增加，但在峰值强度以前仍然没有形成局部化带。当载荷增加到岩样的峰值强度时，岩样内部的破裂表现为局部化，试样出现整体坍塌，表现为脆性破坏的特点。

岩石本身是非透明的物质，其最终的破坏与内部的微破裂息息相关，是微破裂累积到一定程度的结果。通过切片，数值岩样变成了透明的物体，可以全方位了解岩样的破裂过程，这也是数值模拟的优越性所在。

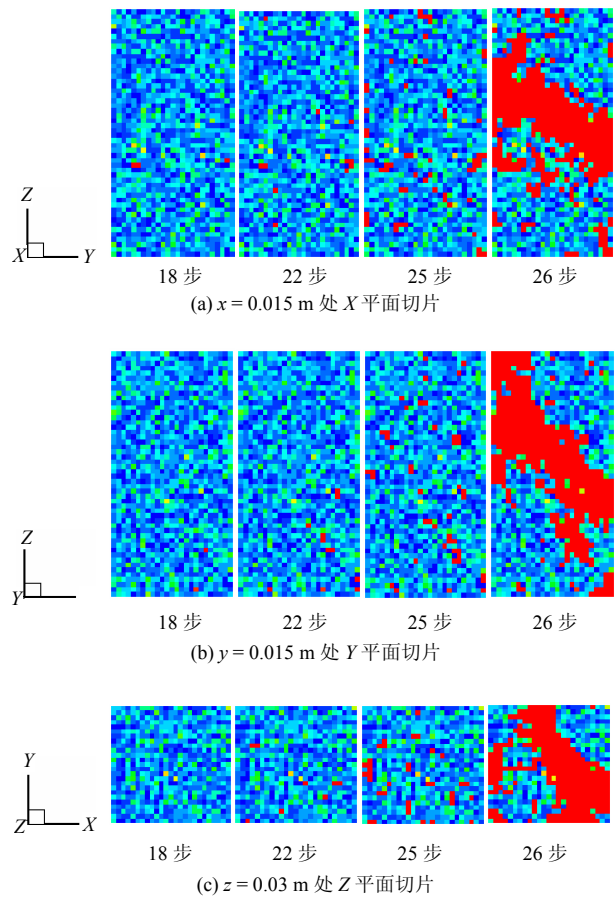


图 6 岩样在不同截面处的破裂过程 ($m = 1.5$)

Fig.6 Failure process of rock ($m = 1.5$)

5 围压对全应力-应变曲线的影响

为了研究围压对全应力-应变曲线的影响，进行了圆柱形试样的破裂过程模拟，试样直径为 50 mm，高度为 100 mm，采用应力-应变线性组合为加载控制方式^[11]，模拟时，取 $E/E' = 0.5$ ， $C = 1 \times 10^{-6}$ m，其中 E 、 E' 分别为弹性模量和修正弹性模量， C 为加载速率，其定义详见文献[11]。岩样的均质度系数为 6.0，随机种子数为 10，采用 Mohr-Coulomb

强度准则和非关联流动法则，塑性势函数采用与屈服函数相同的形式，屈服函数中的内摩擦角在塑性势函数中为剪胀角。初始黏聚力为 10 MPa，残余黏聚力为 0.1 MPa，初始内摩擦角为 30°，残余内摩擦角为 49°，剪胀角为 10°，弹性模量均值为 55 GPa，泊松比 0.3。文献[11]采用软化因子为 0.05 的渐进软化模型，在单轴压缩条件下研究了全应力-应变曲线。这里采用 CWFS 软化模型来研究不同围压下岩样的变形特性，黏聚力和内摩擦角随塑性应变的变化规律如图 7 所示。

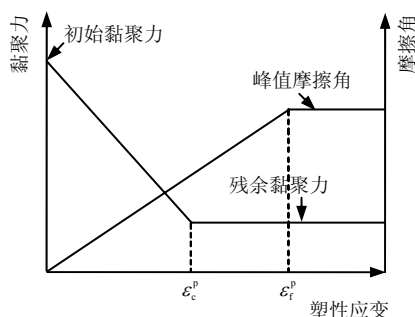


图 7 CWFS 示意图

Fig.7 Schematic diagram of CWFS model

分别考虑 $\epsilon_c^p = 0.0005$ 、 $\epsilon_f^p = 0.004$ 和 $\epsilon_c^p = 0.002$ 、 $\epsilon_f^p = 0.004$ 两种情况，围压分别考虑 1、5、10 MPa 三种情况，进行常规三轴压缩破裂全过程模拟。模拟得到的全应力-应变曲线如图 8 和图 9 所示。可以看出，随着围压的增加，峰后曲线逐渐向右偏移，且对于 $\epsilon_c^p = 0.0005$ 、围压为 1 MPa 的情况，岩样峰后表现为 II 类变形行为（图 8）。围压较高时，岩样则表现为 I 类变形行为，即在应力-应变线性组合的加载控制方式下，岩样在高围压条件下容易表现 I 类变形，低围压下容易表现为 II 类变形行为。而对于 $\epsilon_c^p = 0.002$ 的情况，试样均表现为 I 类变形行为（图 9）。岩样在加载破裂过程中所表现的宏观变形行为是与岩样的本质属性（即内部元胞单元的力学属性）相联系的， ϵ_c^p 越小，表明元胞单元达到峰值后其应力水平在越短的时间内下降到其残余强度水平，即该元胞单元的脆性越强，由此决定了岩样本身具有较强的脆性。 $\epsilon_c^p = 0$ 对应极端的情形，元胞单元在达到峰值强度后其应力水平立即降低到残余强度水平。 ϵ_c^p 越大，表明岩样脆性越弱，延性越强，越容易表现为 I 类变形。

从模拟结果还可以看出，围压越高，试样的峰值强度和残余强度也越高，这与常应变速率加载条件下的物理实验得出的结论是一致的。

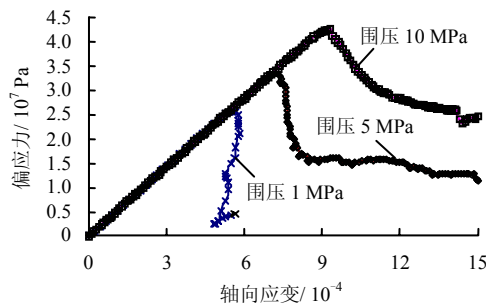


图 8 $\epsilon_c^p = 0.0005$ 不同围压下的全应力-应变曲线

Fig.8 Complete stress-strain curves under different confining pressures when $\epsilon_c^p = 0.0005$

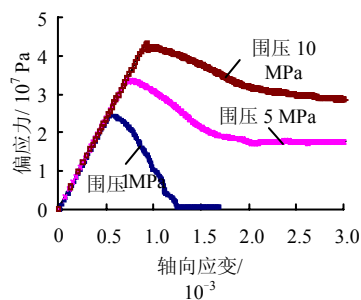


图 9 $\epsilon_c^p = 0.002$ 不同围压下的全应力-应变曲线

Fig.9 Complete stress-strain curves under different confining pressures when $\epsilon_c^p = 0.002$

6 结 语

本文介绍了三维弹塑性细胞自动机模型的基本原理以及模拟岩石破裂过程的基本过程，并编制了相应的数值模拟系统 EPCA^{3D}，该系统能够较好地描述脆性非均质岩石加载过程中裂纹萌生、扩展和贯通的全过程。采用具有“自下而上”特点的细胞自动机局部作用原理，避免了传统有限元中需要集成总体刚度矩阵从而带来的内存不足的缺点，有利于在串行条件下对三维岩石破裂过程进行较为精细的仿真。

利用该系统，以应力-应变的线性组合为加载控制方式，研究了围压对全应力-应变曲线的影响，结果表明，对于脆性岩石试样，低围压下容易表现为 II 类行为，且强度较低；高围压下容易表现为 I 类变形行为，且强度较高。

参 考 文 献

[1] SCHLANGEN E, VAN MIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of concrete material and structures[J]. *Materials and Structures*, 1992, (25): 534-542.

[2] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 砂岩类脆性无序介质连续破坏过程的细观模拟[J]. *地质力学学报*, 1998, 4(3): 28-

35.
XING Ji-bo, YU Liang-qun, WANG Yong-jia. Modeling of progressive failure of brittle disordered materials e.g. sandstone[J]. **Journal of Geomechanics**, 1998, 4(3): 28—35.
- [3] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—Part s: effect of heterogeneity[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2000, 37(4): 555—569.
- [4] 陈忠辉, 林忠明, 谢和平, 等. 三维应力状态下岩石损伤破坏的卸荷效应[J]. **煤炭学报**, 2004, 29(1): 31—35.
CHEN Zhong-hui, LIN Zhong-ming, XIE He-ping, et al. Damage study on brittle failure under complicated stress[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(1): 31—35.
- [5] 陈永强, 郑小平, 姚振汉. 三维非均匀脆性材料破坏过程数值模拟[J]. **力学学报**, 2002, 34(3): 351—361.
CHEN Yong-qiang, ZHENG Xiao-ping, YAO Zhen-han. Numerical simulation of failure process in 3-D heterogeneous brittle materials[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2002, 34(3): 351—361.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. PFC3D user's guide [R]. Mineapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2000.
- [7] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(5): 931—936.
LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 931—936.
- [8] 王学滨. 三维岩样单轴压缩断面效应及破坏数值模拟[J]. **四川大学学报(工程科学版)**, 2005, 37(2): 28—33.
WANG Xue-bin. Numerical simulation of end-restraint and failure process of three dimensional rock specimen in uniaxial compression[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2005, 37(2): 28—33.
- [9] 邢纪波, 俞良群, 王泳嘉. 三维梁-颗粒模型与岩石类材料细观力学行为模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(6): 627—630.
XING Ji-bo, YU Liang-qun, WANG Yong-jia. 3-D beam-particle model for simulating meso-mechanical behavior of rock material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 627—630.
- [10] FENG X T, PAN P Z, ZHOU H. Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elasto-plastic cellular automaton[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1091—1108.
- [11] PAN P Z, FENG X T, Hudson J A. Simulations on Class I and Class II curves by using the linear combination of stress and strain control method and elasto-plastic cellular automata[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1109—1117.
- [12] FANG Z, HARRISON J P. Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 459—476.
- [13] 傅宇方, 祁宏伟, 黄明利, 等. 岩石破裂过程中围压效应的数值试验研究[J]. **辽宁工程技术大学学报(自然科学版)**, 2000, 19(5): 488—492.
FU Yu-fang, QI Hong-wei, HUANG Ming-li, et al. The numerical simulation of effect of confining pressures on failure process of rock[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2000, 19(5): 488—492.
- [14] LIU Z, MAYER L R, COOK N G W. Numerical simulation of the effect of heterogeneities on macro-behavior of granular materials[C]//Computer Mechanics and Advances in Geomechanics. Proceedings of 8th Int. Conf. on Computer Methods and Advances, 1994: 611—616.
- [15] 苏国韶, 冯夏庭. 基于粒子群优化算法的高地应力条件下硬岩本构模型的参数辨识[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(17): 3029—3034.
SU Guo-shao, FENG Xia-ting. Parameter identification of constitutive model for hard rock under high in-situ stress condition using particle swarm optimization algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3029—3034.
- [16] Amtec Engineering, Inc. Tecplot ADK user's manual. (add-on developer's kit). Version 10[R]. Washington: Bellevue, 2003.