

岩石直接拉伸破坏过程及其分形特征的 三维数值模拟研究

梁正召^{1,2}, 唐春安², 张永彬², 唐世斌¹, 马天辉¹

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过建立带有残余强度的弹脆性拉伸损伤细观力学模型, 运用并行有限元计算手段, 模拟不同均匀程度的岩石试样在直接拉伸应力作用下的破坏演化过程, 得到拉伸断裂位移-应力全过程曲线, 并进行理论和试验对比分析验证。通过分析非均匀性对拉伸过程中非线性力学行为及断裂破坏形态, 最后讨论了拉伸断裂破坏的分形特征。数值试验结果表明, 非均匀程度对岩石直接拉伸破坏过程中的非线性行为有很重要的影响。岩石细观非均匀程度越高, 宏观表现出的直接拉伸强度和初始弹性模量越高, 破坏的脆性程度越强, 但是残余变形能力和残余强度越低, 断口表现出更为光滑的形态。三维空间的破坏分形分析表明, 分形维数随着拉伸的进行而逐渐增加, 当岩石完全拉伸断裂之后分形维数增加到一个恒定的最大值, 而分形维数的变化情况同样反映了岩石的非均匀程度和脆性拉伸破坏程度。

关键词: 数值模拟; 直接拉伸; 非均匀性; 断裂形态; 分形; 并行计算; 应力-应变全过程曲线

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)07-1402-09

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL STUDY OF DIRECT TENSILE FRACTURE OF ROCK AND ASSOCIATED FRACTAL

LIANG Zhengzhao^{1,2}, TANG Chun'an², ZHANG Yongbin², TANG Shinbin¹, MA Tianhui¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Research Center for Rock Instability and Seismicity, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: A numerical mode is developed to simulate the completely failure process of rock subjected to direct tension with the aid of the parallel computing. The mechanical properties follow a certain distribution function, including elastic modulus, Poisson ratio and peak tensile strength. When the maximum tensile stress in the element meets its tensile strength, the element loses its bearing capacity and the elastic modulus will be reduced to a small value. Then the numerical model is proved to be efficient compared with the theoretical model, experimental results and other numerical models. Five specimens with different heterogeneities at meso-scopic level are undertaken direct tension test. The complete loading-displacement curves as well as the nonlinear mechanical behaviors are obtained. Numerical tests show that the rock specimens with higher homogeneities at meso-scopic level have the higher tensile strength, the higher initial elastic modulus at macroscopic level and show a more brittle failure and a lower residual strength. The surfaces of the fracture are rougher in the more heterogeneous rock specimens. The results of the fractal of the distribution of the failure elements(AE events)

收稿日期: 2008-01-16; **修回日期:** 2008-03-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)课题(2007CB209404); 国家自然科学基金重点项目(40638040)

作者简介: 梁正召(1977-), 男, 博士, 2005年于东北大学获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩石等脆性材料破坏及其工程稳定性数值模拟方面的教学与研究工作。E-mail: Z. Z. Liang@163.com

show that fractal dimensions increase with the increase of the tensile stress and will arrive to a certain value when the specimens are fractured totally. The fractal of the failure elements distribution represents the heterogeneity and the brittleness of different rocks.

Key words: numerical simulation; direct tension; heterogeneity; fracture surface; fractal; parallel computing; complete stress-strain curve

1 引言

岩石或岩体所能承受的拉应力很小, 边坡和地下工程开挖卸荷时往往产生拉应力, 并且拉应力随着结构尺寸的增大而增加。在拉应力作用下岩石的变形特性在地下工程和边坡稳定性评价中占有重要地位, 因而研究拉应力作用下特别是单轴拉伸条件下岩石应力-应变关系具有重要的理论和现实意义^[1]。然而, 在岩石力学领域中有关压应力作用下的试验和理论研究成果比较多, 而有关拉应力作用下的研究成果则极少。主要原因有两点: 一是实际岩土工程中所涉及到的也大多是受压应力状态; 二是由于试验条件限制, 以往的力学试验机和测试装置无法定量研究拉应力作用下的裂缝扩展和变形破坏规律。

尽管对岩石受拉应力作用下的变形特性进行了一些有价值的试验研究, 但无论是直接拉伸还是劈裂试验, 大多局限于测定到岩石拉伸破坏为止的拉伸强度, 而有关拉伸破坏过峰值之后的岩石特性的试验研究成果很少^[2]。目前对直拉法的研究还不是很多, 其中主要原因是作为直接拉伸岩石试样加工和两端固定比较困难^[3]。因此, 许多学者^[3~9]针对试样与试验机连接的问题采用了各种办法来寻求既简单又精确的岩石拉伸试验方法。另外, 试样尺寸的大型化将使裂纹扩展的稳定性大大降低, 为提高裂纹扩展的稳定性, 必须大幅度提高试验机的刚度。由于试样的非均匀性以及试样制作不精确引起的拉应力集中也经常导致试验失败^[7]。从理论上进行研究尚不多见, 同实验室试验研究一样, 以往模型仅仅研究极限荷载以前的本构关系, 而对极限荷载以后的本构关系几乎没有研究^[10]。

很多学者采用分形理论来研究岩石等脆性材料断裂问题。在以往的试验研究中, 通常只考虑了峰值载荷前的分维变化情况, 对于开始加载到岩石残余变形阶段研究比较少。然而, 在数值模拟方面, 大多数岩石分形模拟研究通常是建立在微裂隙随机分布假定下, 没有考虑应力分布和岩石微破裂引起

的物理力学过程和能量变化^[8]。必须从物理上深入探索岩石破裂过程中非线性相变本质, 才能对岩石破裂模型及地震学含义有真正的理解。另外, 大多数的数值模拟分析都是应用二维模型来研究岩石损伤破坏中的分形现象, 有关三维分析较为少见。

细观损伤力学和数值方法结合起来给人们提供了一种把细观损伤机制的研究结果反映到材料宏观破裂过程的力学行为中去的办法。国内外许多学者^[11~19]也研究了非均匀的脆性材料破坏过程, 但是这些研究方法通常都忽略了岩石细观单元破坏后的残余变形能力, 而残余承载能力对于矿山等岩石工程来说有重要的利用价值和研究意义。另外, 由于计算单元有限, 细观力学计算单元必须满足一定数量的要求才能反映宏观上的力学响应, 同时有限单元模型也难以反映岩石破坏过程中的应力场演化规律。

在考虑岩石材料非均匀性的基础上, 本文首先提出岩石拉伸条件下的带残余强度的弹脆性本构方程, 然后通过建立三维细观力学模型, 编制 RFPA^{3D} 软件并进行数值模拟分析岩石单轴拉伸下的破坏断裂过程, 从细观层次来分析岩石断裂这种宏观的非线性变形破坏行为。

2 直接拉伸破坏过程的数值模型

2.1 细观非均匀性分布

所谓非均匀性就是材料力学参数(例如弹性模量、强度、泊松比和自重等)随空间位置的不同而发生变化。在模型的单元划分中, 除了单元参数的样本满足非均匀性分布之外, 不同性质的单元在空间分布上还必须满足随机性。也就是说, 非均匀性包括空间上的非均匀性和数量上的非均匀性(见图 1)。岩石是一种细观上非均匀的无序材料, 可以采用统计分布函数来描述岩石细观单元的物理力学性质。在 RFPA^{3D} 中, 可以采用 Weibull 分布和正态分布来随机自动生成单元性质。RFPA^{3D} 中采用 Monte Carlo 方法来自动生成随机变量^[20~22], 即

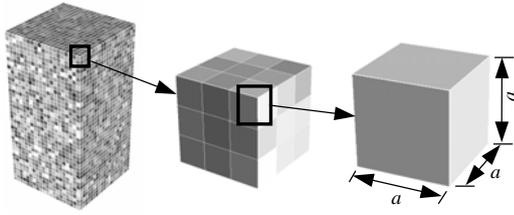


图1 细观非均匀性模型示意图

Fig.1 Sketch of meso-scope model considering heterogeneity

$$f(x) = \alpha\beta^{-\alpha} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (x \geq 0) \quad (1)$$

2.2 细观拉伸损伤本构关系

假设组成模型每一个细观单元的力学性质是均匀的，因此可以用简单的本构关系来描述其力学行为。这里采用简单的带有残余强度的弹脆性模型，单元在破坏之前保持弹性状态，在达到拉伸准则之后承载能力降低，这里采用刚度逐渐弱化的办法来处理。单元达到破坏准则之前满足线弹性本构关系，即

$$\{\sigma\} = [K_e]\{\varepsilon\} \quad (2)$$

式中： $\{\sigma\}$ ， $[K_e]$ 和 $\{\varepsilon\}$ 分别为单元的应力矩阵，弹性矩阵和应变矩阵。

产生损伤单元的本构关系为

$$\{\sigma\} = [K_d]\{\varepsilon\} \quad (3)$$

式中： $[K_d]$ 为单元损伤之后的弹性矩阵， $[K_d] = (1-D)[K_e]$ ，也可用下式表示：

$$[K_d] = \frac{E_0(1-D)(1-\bar{\mu})}{(1+\bar{\mu})(1-2\bar{\mu})}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{\bar{\mu}}{1-\bar{\mu}} & \frac{\bar{\mu}}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\bar{\mu}}{1-\bar{\mu}} & 1 & \frac{\bar{\mu}}{1-\bar{\mu}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\bar{\mu}}{1-\bar{\mu}} & \frac{\bar{\mu}}{1-\bar{\mu}} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\bar{\mu}}{2(1-\bar{\mu})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\bar{\mu}}{2(1-\bar{\mu})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\bar{\mu}}{2(1-\bar{\mu})} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $\bar{\mu}$ 为单元破坏后的泊松比。有关 D 以及损伤演化方程可参见相关研究成果^[21]。

2.3 破坏准则

从细观层次出发来研究脆性材料破坏问题，通常只是考虑到拉伸破坏准则。岩石并非完全脆性材料，另外由于计算机计算能力的限制，所划分的单元尺寸并不满足细观的特征尺度。模型中的拉伸破坏准则采用最大拉应变准则：

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{i0} \quad (5)$$

单元满足破坏准则之后，还具有一定的残余强度，只有单元的拉伸应变达到极限拉伸应变之后才完全失去承载能力。这里的破坏准则也可以当作损伤准则，只有单元的应力满足该准则之后，其力学性能才逐渐降低。

2.4 软件模块和计算过程

岩石破裂过程分析系统由前处理、应力分析、破坏分析和后处理4部分组成。前后处理是图形方式进行的人机交互过程，为了方便用户，采用普通微机 Microsoft Windows XP 下的 Visual C++.Net 和 OpenGL 开发。数值模型按照规则的正方体划分网格，该网格一方面是体现材料非均匀性的六面体八节点基本单元，另一方面作为有限元应力计算的网格。应力分析是采用有限元计算，是整个分析过程中最为耗时，由于采用分步加载，对于每一个加载分步都要进行刚度计算和系统方程组的求解。通过线弹性应力分析的并行化，能够有效提高系统的计算规模和速度。计算中采用全量位移加载模式，第 i 步施加一个位移量 $\{\delta_i\}$ 之后，满足破坏准则单元的力学性质发生弱化，弹性模量逐渐降低。当有单元破坏时，需要在外载荷 $\{\delta_i\}$ 不变的情况下重复进行应力计算，然后重新进行单元力学性质调整，直到在该加载条件下满足应力平衡，没有新的破坏单元出现才进行第 $i+1$ 步计算。虽然单元本构关系只是一个弹性损伤本构关系，但整个宏观系统也是一个平衡迭代计算的非线性过程。

3 数值模拟与理论分析和物理试验对比

由于岩石材料的内部构造极不均质，岩石中可能存在强度不同的许多薄弱环节。各微元所具有的拉伸强度也就不尽相同，并考虑到岩石材料在加载过程中的损伤是一个连续过程，故假设：(1) 无损

伤岩石微元的平均弹性模量为 E , 在微元破坏前, 服从虎克定律, 微元具有线弹性性质; (2) 各微元在达到拉伸强度之后失去承载能力; (3) 各微元的强度服从统计规律, 且服从 Weibull 分布函数:

$$\phi(\varepsilon) = \frac{m}{a} \varepsilon^{m-1} e^{-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m} \quad (6)$$

式中: a 为 Weibull 分布参数, 反映了微元强度的整体效应; m 为形状参数, 代表分布的非均匀程度, 值越大表示分布越均匀。进一步得到描述岩石应力 - 应变全过程曲线的本构方程为

$$\sigma = E \varepsilon e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m} \quad (7)$$

假设一个三维岩石试样在单向拉伸应力作用下, 取平均弹性模量为 20 GPa, 单轴拉伸强度为 10 MPa, 泊松比为 0.18, 岩石的弹性模量、强度和泊松比服从 Weibull 分布, 形状参数 $m = 2.5$, 试样为一个立方体, 尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm, 网格划分为 40×40×40 = 64 000 个单元, 数值试验中的拉伸载荷为 0.000 1 mm/步。从图 2 可以看出, 模拟结果和解析解的曲线变化趋势比较接近, 特别是在峰值前的加载初期阶段, 2 条曲线几乎重合。在残余变形阶段, 模拟曲线的残余强度比理论解残余强度高, 这是因为在理论模型中并没有考虑残余强度。图 2 的结果是通过峰值强度及其对应的应变进行等效化处理的结果曲线, 因此比较一下数值模拟结果和解析解峰值强度之间的差异更有意义。

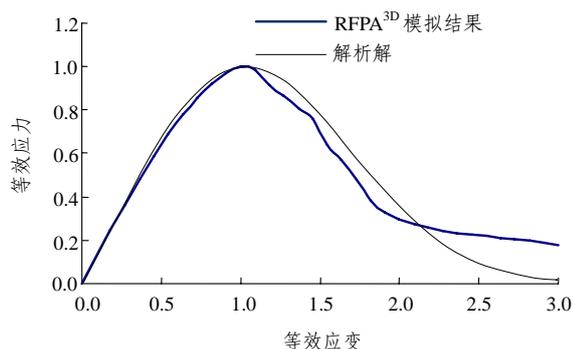


图 2 模拟结果和解析解的曲线对比

Fig.2 Comparison between simulated results and analytical results

将式(7)两边对 ε 取导数, 可得

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \left[1 - m \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{m-1}\right] \quad (8)$$

令

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$$

可得

$$\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_0}\right)^m = \frac{1}{m} \quad (9)$$

在峰值处, 有

$$\sigma_{\max} = E \varepsilon_{\max} \exp\left[1 - \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 变化后可得

$$\sigma_{\max} = E_0 \varepsilon_0 \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{m}} e^{-\frac{1}{m}} \quad (11)$$

将模型参数代入式(11)计算可得一维条件下的峰值应力 $\sigma_{\max} = 3.44$ MPa。

数值模拟结果得到的峰值载荷为 5 664 N, 可以计算得到单轴拉伸强度为 3.54 MPa, 比解析解所得结果偏高, 主要是因为理论解考虑到的是一个面上的微元损伤, 可以看作一个一维问题, 而且没有考虑微元达到破坏后的残余强度。朱之芳等^[23, 24]采用物理试验得到了黑色花岗岩、大理岩和细砂岩的单轴拉伸结果曲线。陈永强等^[12]也通过数值分析模拟了单轴拉伸破坏过程, 在文中也和试验结果进行了对比验证。本文将数值模拟结果与陈永强等^[12]的模拟结果和物理试验结果放在一起进行比较(见图 3)可以发现, 数值模拟所得到的宏观等效应力 - 应变曲线与陈永强等^[12]中砂岩、大理岩的关于应变软化现象的物理试验数据符合较好。RFPA^{3D} 模拟结果和陈永强等^[12]中的曲线最为接近, 但同样是数值模拟的结果, RFPA^{3D} 模拟的应力水平比陈永强等^[12]中所得到的应力水平要高, 主要是因为陈永强等^[12]中没有考虑破坏单元的残余强度。黑色花岗岩均质度较高,

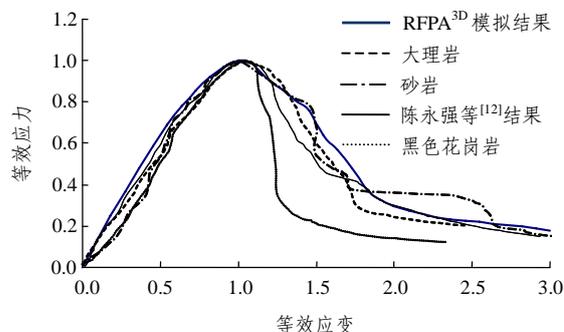


图 3 模拟结果和其他破坏过程曲线的比较

Fig.3 Comparison of simulated complete stress-strain curves with other studies

表现出比较强的脆性破坏，其拉伸试验结果和数值模拟结果差别较大，主要是数值模拟中均质度系数(形状参数)取的较小。

4 数值模拟分析

4.1 直接拉伸断裂的位移 - 应力全过程曲线

一共采用 5 个岩石试样，其均质度分别为 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 和 10.0, 依次分别代表从不均匀到均匀的岩石。岩石尺寸为 80 mm×40 mm×40 mm, 网格划分为 80×40×40 = 128 000 个单元。x 向施加均匀速率的拉伸位移载荷 0.000 1 mm/步。

图 4 给出了不同均匀性的岩石试样直接拉伸断裂的 x 向位移 - 应力全过程曲线。随着均质度系数的提高，岩石的峰值强度逐渐增加，并且曲线的性状和变形破坏模式由脆性破坏到延性破坏转变。均质度 $m = 1.5$ 时，曲线很快偏离线弹性状态，逐渐达到峰值强度；当 $m = 10.0$ 时，拉伸应力几乎呈现直线增长，这也表明在峰值之前岩石发生损伤很小，破坏单元很少，达到峰值之后应力突然跌落。值得注意的是残余变形阶段，均质度系数较小的时候应力逐渐跌落到接近零，表现出逐渐损伤的特点。岩石在单轴拉伸过程中，同样存在延性破坏和残留强度现象。

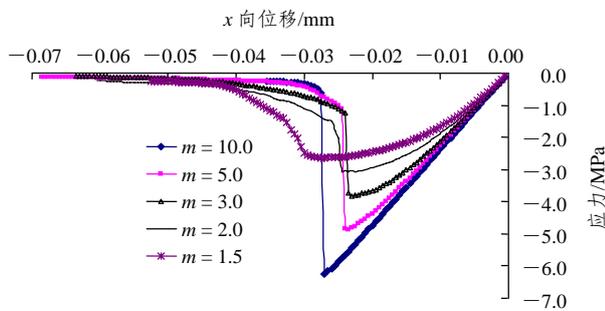


图 4 不同非均匀系数的岩石试样直接拉伸断裂的 x 向位移 - 应力全过程曲线

Fig.4 Influence of heterogeneity on tensile failure process and x-displacement-stress curves

破坏准则只是达到破坏门槛的条件，而曲线的形态主要由岩石的细观结构特征决定。虽然从细观上来看直接拉伸过程中主要是拉伸应力引起的单元损伤破坏，而单轴压缩破坏中是由于剪切和拉伸损伤破坏的共同作用，但是 5 个试样宏观上表现出来的载荷 - 位移关系全过程曲线和单轴压缩下的载荷 - 位移关系全过程曲线非常相似。这个结果与 S.

Okubo 和 K. Fukui^[6]所得到的结论一致。

图 5 给出了直接拉伸破坏中的非均匀系数与杨氏模量及抗拉强度之间的关系。随着均质度系数的提高，岩石的拉伸强度和宏观等效杨氏模量也是逐渐增大。图 5 对均质度系数进行了拟合，可以根据该拟合关系式，在已知实际岩石的拉伸强度、杨氏模量和均质度系数的情况下来反算选择细观单元的平均力学参数。

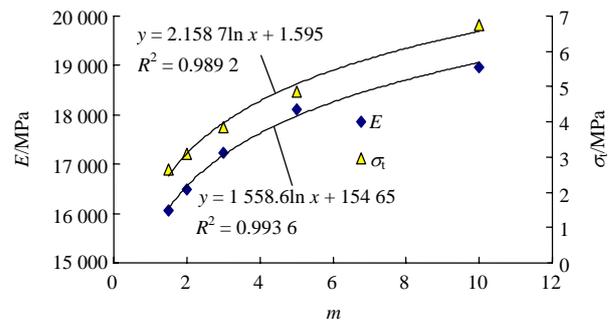


图 5 直接拉伸破坏中的非均匀系数与杨氏模量及抗拉强度之间的关系

Fig.5 Relationship between heterogeneity index to Young's modulus and peak tensile strength

4.2 三维断裂破坏形态及其应力场演化

图 6 给出了不同均匀性岩石拉伸断裂形态。在均质度较低的岩样中，虽然破坏单元遍布整个试样，但是最终却只是形成了一条宏观主裂纹。而均质度较高的岩样中，破坏单元都是集中在几条裂纹上。拉伸裂纹都是弯曲拐折相互啮合，并没有像单轴压缩下形成的剪切带。在应力完全下降以后，虽然施加了很大的位移载荷，但这些拉伸裂纹很难发现有明显向前扩展。这些裂纹并没有完全贯通试样，裂纹之间是相互重叠，并且存在有岩桥相互连接作用，促使岩石并不完全失去承载能力。J. G. M. van Mier^[11]在直接拉伸试验中也发现这一现象在许多岩石中存在。

图 7 显示的是 $m = 10.0$ 的岩样的内部裂纹分布图和声发射空间分布图。岩样被 2 条裂纹分割开，裂纹之间存在很长的一个岩桥连接区。然而，这 2 条裂纹与断裂力学中所描述的裂纹有很大差别。由于非均匀性的影响，拉伸裂纹是蜿蜒曲折的一个空间曲面，很难判断裂纹尖端甚至裂纹过程区。J. G. M. van Mier^[11]在试验中也观察到了这一结果。

岩石破裂过程是一个应力场、变形场不断演化的过程。在拉伸过程中的拉伸应力场的转移都是和拉伸裂纹的形成、扩展以及空间位置密切相关。

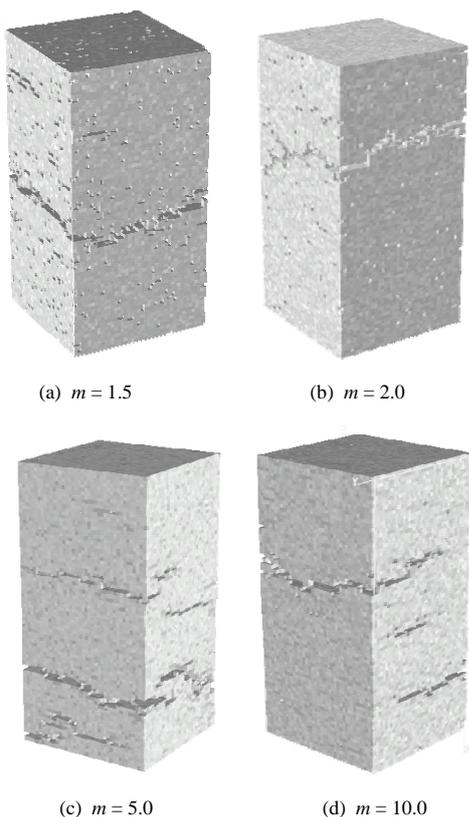


图 6 不同均匀性岩石拉伸断裂形态

Fig.6 Tensile fracture shapes of rocks with different heterogeneities

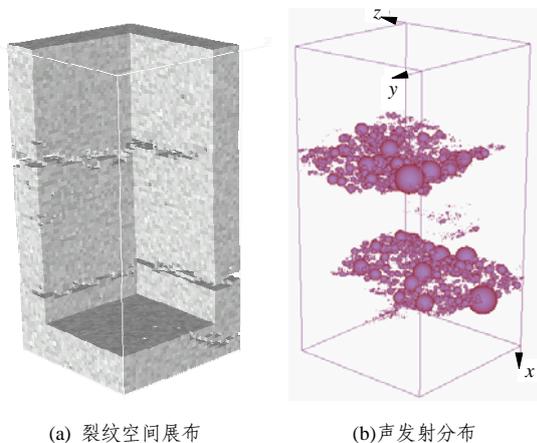
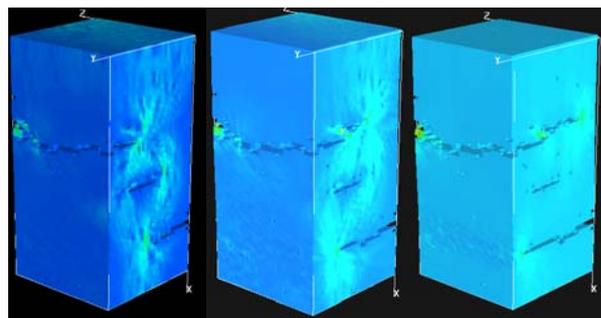


图 7 拉伸裂纹的三维空间分布(m = 10.0)

Fig.7 Three-dimensional spatial distribution of tensile fractures(m = 10.0)

图 8 给出了拉伸断裂演化过程中的应力场转移 ($m = 5.0$)。第 48 步时上下 2 条裂纹逐渐稳定扩展阶段, 在裂纹尖端形成很高的拉应力集中。由于在 2 条裂纹中间已经形成了 1 条拉伸裂纹, 这条裂纹明显的阻止了拉伸应力向前传递, 形成了 1 块低应力区。在第 60 步时上下裂纹分别继续向前边界和向后边界扩展, 导致上下裂纹中间的拉应力降低。第 110 步时上下裂纹面积几乎都占了整个试样的绝大部分



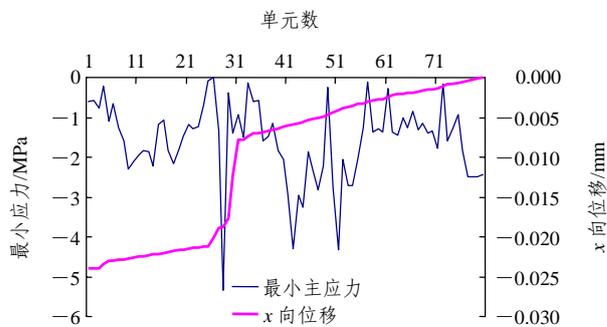
(a) 第 48 步 (b) 第 60 步 (c) 第 110 步

图 8 拉伸断裂演化过程中的应力场转移($m = 5.0$)

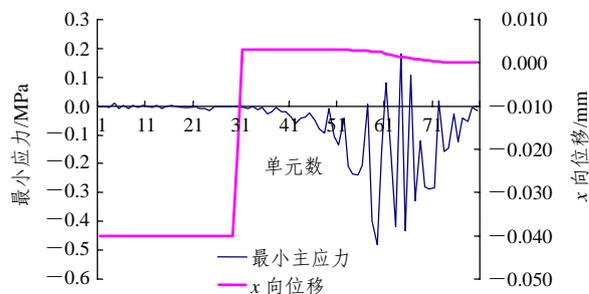
Fig.8 Stress transition in tensile failure process for specimen $m = 5.0$

截面面积, 未贯通部分的应力却也降低下来。

上面考察的是应力场演化定性和图像分析情况, 图 9 考察的是沿着 x 轴附近(坐标范围(0, 0, 0)~(80, 1, 1))的长方体区域)80 个单元在第 48 和 110 步的最小主应力和 x 向位移曲线。由于这 80 个单元只是通过了 1 条裂纹, 因此在裂纹上下出现了一个位移的突然跳跃(第 31 个单元附近)。第 48 步时拉应力保持较高水平, 裂纹并没有完全贯通。在第 110 步时裂纹完全贯通, 裂纹上下应力释放, 几乎都不到裂纹贯通前的十分之一, 同时上下位移跳跃急剧增大, 而形成的裂纹正好是分界区。



(a) 第 48 步



(b) 第 110 步

图 9 拉伸断裂过程中的最小主应力和 x 向位移曲线
Fig.9 Curves between minimum principal stress and x -displacement during tensile failure process

从上面的直接拉伸试验中，由于2条拉伸裂纹中间岩桥的连接作用，因而很难观察到拉伸断口的形状。下面的一组试验采用带预制切口的试样来考察非均匀性对拉伸断口粗糙程度的影响。岩石试样尺寸为60 mm×50 mm×50 mm，切口宽度和深度为2 mm。5个试样的 $m = 1.5, 2.0, 3.0, 6.0, 15.0$ 分别代表不同均匀性的岩石。采用位移控制加载0.000 5 mm/步，直到岩石完全失去承载能力，试样沿着预制切口断开为止。从图10可以看出，随着岩石均匀性的提高，断口的粗糙程度逐渐减小，裂纹扩展逐渐集中在一个光滑的平面上。

4.3 拉伸加载过程中的分形特征

地下的岩石都是处于复杂的三维应力状态下，拉伸断裂形成节理的粗糙程度可以影响岩体的摩擦角、膨胀和峰值剪力等力学性质。早期 N. Barton 和 V. Choubey^[25]与 J. C. Jaeger^[26]分别提出了预测岩石节理峰剪强度的经验公式；谢和平^[27]采用激光扫描量测来描述岩石节理(断裂)表面的分形特征。也有很多学者采用分形来研究材料断裂表面的粗糙性。以往的试验研究中，通常只考虑了峰值载荷前的分形变化情况，对于开始加载到岩石残余变形阶段研究很少。岩石加载破坏过程其实就是损伤累计

发展过程，在每一个加载步中统计出微破裂(破坏单元或声发射)的分维值，就可以观测得到整个损伤演化过程中的分维变化规律。上述研究集中于表面的粗糙性，不涉及到材料内部渐进破坏问题。虽然上面模拟预制切口试样直接拉伸在切口断开，但是破坏单元却是弥散分布于整个试样。这里采用分形盒子维数来描述拉伸断裂的空间分布，也可以间接反映断口表面的粗糙程度。由于本文研究中考虑到了应力分布和岩石微破裂引起的物理力学过程和能量变化，并且并不需要预先假设破坏(损伤)的随机分布，因此模拟结果可能更为接近岩石破坏的实际情况。有关岩石损伤破裂的分形与逾渗模型详见梁正召等^[28]的研究。

图11给出了5个具有不同均匀程度的岩石在加载过程中分形维数的变化曲线。在加载过程中，空间声发射分布的分形维数呈现出保持不变-逐渐增加-保持不变3个阶段。均质度较低时由于在加载初期就出现了很多单元破坏，断口附近应力积累的过程中声发射已经离散分布在试样整个空间，因此在初始阶段分形维数就稳定增加，进入非线性变形阶段分形维数已经接近3.0了。随着应力降低、断口形成阶段分形维数并没有显著增加。在均匀程度

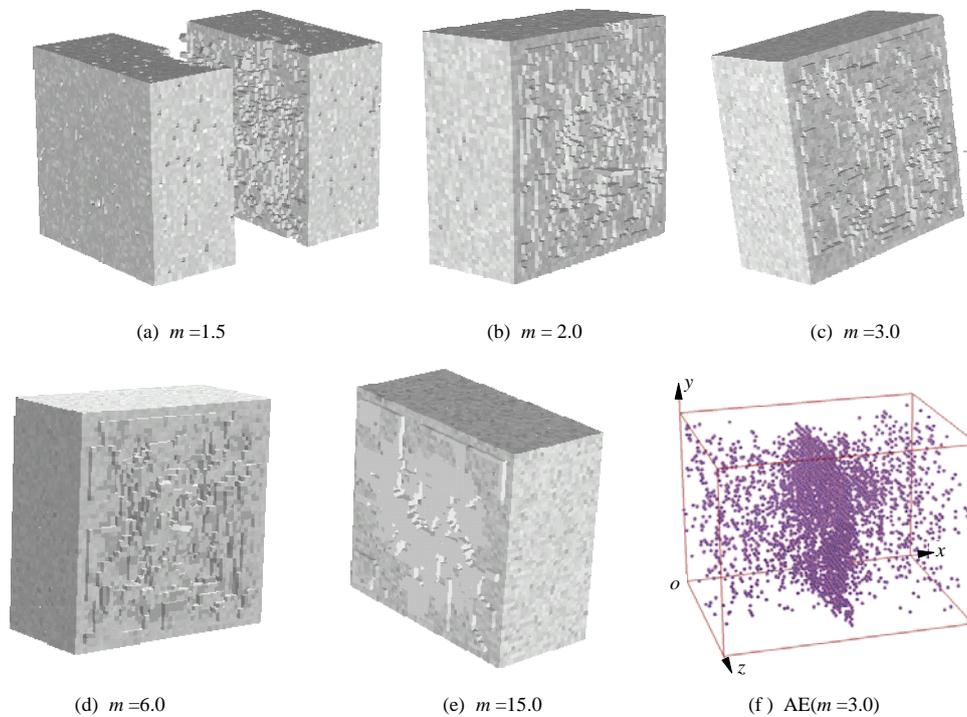


图10 预制切口的岩样拉伸断口形状和空间声发射分布

Fig.10 Shapes of tensile-fracture surfaces and AE distribution for notched rock specimens

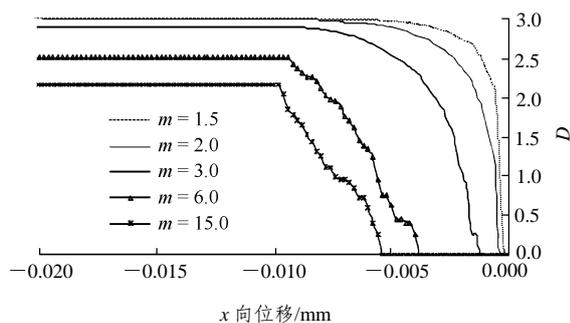


图 11 5 个具有不同均匀程度的岩石在加载过程中分形维数的变化曲线

Fig.11 Fractal dimension variation of the five specimens with different heterogeneities during loading process

较高的岩石中, 虽然应力增加, 但是开始阶段几乎没有破坏单元和声发射出现, 空间分形维数保持为 0; 只有在接近峰值前分形维数很快上升。因为均质岩石表现出脆性断裂, 当应力突然降低时, 分形维数就增加到了最大值。在均匀程度较低的岩石中, 破裂分布非常离散, 其断裂面更加粗糙, 而随着均匀程度的提高, 岩石断裂愈加集中于一个平面上。因此, 最终的分形维数随着均质度的提高而逐渐降低是必然了(见图 12)。

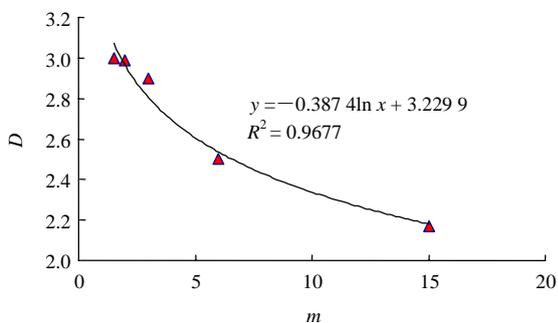


图 12 最终分形维数和非均匀系数之间的关系

Fig.12 Relationship between final fractal dimension and heterogeneous coefficient

5 结 论

通过本文的研究可以得到如下结论:

(1) 通过考虑岩石细观层次上力学参数的非均匀性, 采用简单的本构关系, 可以较好地模拟岩石宏观破坏过程的复杂现象。

(2) 数值模拟结果不但得到了岩石直接拉伸断裂过程的全应力 - 应变曲线, 而且还再现了岩石拉伸断裂过程及其应力场的变化规律。

(3) 均匀性对岩石破坏的力学行为有很重要的

影响。岩石的均匀性程度越高, 宏观表现出的刚度就越高、拉伸强度越高, 同时岩石破坏过程越趋向于脆性破坏, 而岩石均匀程度越高, 其宏观等效拉伸强度就越低, 同时残余变形越明显。

(4) 三维空间的破坏分形分析表明, 分形维数随着拉伸的进行而逐渐增加, 当岩石完全拉伸断裂之后分形维数增加到一个恒定的最大值。最终的分形维数随着均质度的提高而逐渐降低, 分形维数的变化情况同样也反映了岩石的非均匀程度和准脆性拉伸破坏的剧烈程度。

参考文献(References):

- [1] 陶履彬, 夏才初, 何之民. 花岗岩拉伸全过程变形特性的试验研究[J]. 同济大学学报, 1997, 25(1): 34 - 38.(TAO Lubin, XIA Caichu, HE Zhimin. Experimental studies on the total course stress-strain curves of granite specimens under tensile condition[J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(1): 34 - 38.(in Chinese))
- [2] 周小平, 王建华, 张永兴, 等. 单轴拉伸条件下微观非均匀性岩石损伤局部化和应力应变关系分析[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(9): 943 - 950.(ZHOU Xiaoping, WANG Jianhua, ZHANG Yongxing, et al. Analysis of the localization of damage and the complete stress-strain relation for meso-scope heterogeneous rock under uniaxial tensile loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(9): 943 - 950.(in Chinese))
- [3] 张少华, 缪协兴, 赵海云, 等. 试验方法对岩石抗拉强度测定的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 243 - 246.(ZHANG Shaohua, MIAO Xiexing, ZHAO Haiyun, et al. Influence of test methods on measured results of rock tensile strength[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(3): 243 - 246.(in Chinese))
- [4] 王金星, 王灵敏, 杨小林. 对岩石拉伸试验方法的探讨[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2004, 123(13): 205 - 208.(WANG Jinxing, WANG Lingmin, YANG Xiaolin. Tensile test methods for rock materials[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology(Natural Science), 2004, 123(13): 205 - 208.(in Chinese))
- [5] NOVA R, ZANINETTI A. An investigation into the tensile behavior of a schistose rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(4): 231 - 242.
- [6] OKUBO S, FUKUI K. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(5): 549 - 556.
- [7] PELLIS P J N. Uniaxial strength testing, comprehensive rock

- engineering[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [8] PENG S S. A note on the fracture propagation and time-dependent behavior of rocks in uniaxial tension[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1975, 12: 125 - 127.
- [9] 金丰年, 钱七虎. 岩石的单轴拉伸及其本构模型[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(6): 5 - 8.(JIN Fengnian, QIAN Qihu. Uniaxial tension and mechanical model of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 5 - 8.(in Chinese))
- [10] 周小平, 张永兴, 朱可善. 单轴拉伸条件下岩石本构理论研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增2): 143 - 147.(ZHOU Xiaoping, ZHANG Yongxing, ZHU Keshan. A study of complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous rocks under uniaxial tensile loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.2): 143 - 147.(in Chinese))
- [11] VAN MIER J G M. Fracture process of concrete[M]. New York: CRC Press, 1997: 253.
- [12] 陈永强, 郑小平, 姚振汉. 三维非均匀脆性材料破坏过程的数值模拟[J]. *力学学报*, 2002, 34(3): 351 - 361.(CHEN Yongqiang, ZHENG Xiaoping, YAO Zhenhan. Numerical simulation of failure processes in 3D heterogeneous brittle material[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(3): 351 - 361.(in Chinese))
- [13] SCHALAGEN E, VAN MIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. *Materials and Structures*, 1992, 25(4): 534 - 542.
- [14] LILLIU G, VAN MIER J G M. 3D lattice type fracture model for concrete[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(6): 927 - 941.
- [15] FRANTZISKONIS G, RENAUDIN P, BREYSSSE D. Heterogeneous solids—part I: analytical and numerical 1D results on boundary effects[J]. *European Journal of Mechanics(A/Solids)*, 1997, 16(3): 409 - 423.
- [16] BLAIR S C, COOK N G. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part I. a nonlinear rule-based model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(7): 837 - 848.
- [17] 杨强, 张浩, 周维垣. 基于格构模型的岩石材料破坏过程的数值模拟[J]. *水利学报*, 2002, (4): 46 - 50.(YANG Qiang, ZHANG Hao, ZHOU Weiyuan. Lattice model for simulating failure process of rock[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (4): 46 - 50.(in Chinese))
- [18] 周维垣, 剡公瑞. 岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学研究[J]. *水电站设计*, 1997, 13(1): 1 - 9.(ZHOU Weiyuan, YAN Gongrui. Micro-mechanical research on fracture process zone in rock concrete materials[J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1997, 13(1): 1 - 9.(in Chinese))
- [19] 张德海, 邢纪波, 朱浮声. 三维梁-颗粒模型在岩石材料破坏模拟中的应用[J]. *岩土力学*, 2004, 25(9): 33 - 36.(ZHANG Dehai, XING Jibo, ZHU Fusheng. 3D beam-particle model for simulating fracture in rock material[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 33 - 36.(in Chinese))
- [20] 梁正召. 三维条件下岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2005.(LIANG Zhengzhao. Three-dimensional failure process analysis of rock and associated numerical tests[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.(in Chinese))
- [21] 梁正召, 杨天鸿, 唐春安, 等. 非均匀性岩石破坏过程的三维损伤软化模型与数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(12): 1 147 - 1 152.(LIANG Zhengzhao, YANG Tianhong, TANG Chun'an, et al. Three-dimensional damage soften model for failure process of heterogeneous rocks and associated numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(12): 1 147 - 1 152.(in Chinese))
- [22] 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 Zhengzhao, TANG Chun'an, ZHANG Yongbin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 931 - 936.(in Chinese))
- [23] 朱之芳. 刚性试验机[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.(ZHU Zhifang. Stiff test machine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985.(in Chinese)).
- [24] HUDOSN J A, GROUCH S L, FAIRHURST C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines[J]. *Eng. Geol.*, 1972, 6(3): 155 - 189.
- [25] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[C]// *Rock Mechanics*. [S. l.]: [s. n.], 1977: 1 - 54.
- [26] JAEGER J C. Friction of rock and stability of rock slopes[J]. *Geotechnique*, 1971, 21(2): 97 - 134.
- [27] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 129 - 186.(XIE Heping. Fractal—rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1997: 129 - 186.(in Chinese))
- [28] 梁正召, 唐春安, 唐世斌, 等. 岩石损伤破坏过程中分形与逾渗演化特征[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(9): 1 386 - 1 391.(LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, TANG Shinbin, et al. Characteristics of fractal and percolation of rocks subjected to uniaxial compression during their failure process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(9): 1 386 - 1 391.(in Chinese))