

峰后脆性对非均质岩石试样破坏及全部变形的影响

王学滨

(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新, 123000)

摘要: 在平面应变压缩条件下, 采用FLAC模拟峰后脆性对含初始随机材料缺陷的岩样的破坏过程、前兆、声发射及全部变形特征的影响。利用若干FISH函数预置初始随机缺陷, 计算全部变形特征, 并统计每10个时间步内的破坏单元数。密实的岩石服从莫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。缺陷在破坏之后经历理想塑性行为。不同脆性岩石的峰后的应力-轴向应变曲线、应力-侧向应变曲线、侧向应变-轴向应变曲线、体积应变-轴向应变曲线及由侧向应变及轴向应变计算得到的泊松比-轴向应变曲线于应力峰值之前发生分离。由于缺陷的依次破坏, 在初始加载阶段之后, 计算得到的泊松比随着轴向应变的增加而直线上升, 这使侧向应变增加的速度超过轴向应变增加的速度。随着峰后脆性的降低, 岩样失稳破坏的前兆变得明显, 破坏变得不突然。脆性越强的材料, 体积膨胀之后发生应变软化越早; 剪切应变集中的位置越少; 在硬化阶段及软化阶段, 声发射持续的时间越短。

关键词: 非均质性; 材料缺陷; 峰后脆性; 剪切带; 轴向应变; 侧向应变; 体积应变; 前兆

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)05-1105-07

Effects of post-peak brittleness on failure and overall deformational characteristics of rock specimen with random material imperfections

WANG Xue-bin

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

Abstract: In uniaxial plane strain compression, the failure processes, precursors, acoustic emissions and overall deformational characteristics of rock specimens with initially random material imperfections were modeled using FLAC. FISH functions were used to generate initial imperfections, calculate overall deformational characteristics and to remember the number of failed elements per 10 timesteps. For intact rock element exhibiting linear strain-softening behavior after the occurrence of failure and then ideal plastic behavior, the failure criterion is a composite Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off. Initial imperfections undergo ideal plastic behavior after the occurrence of failure. At different post-brittleness, the stress-axial strain curve, stress-lateral strain curve, lateral strain-axial strain curve, volumetric strain-axial strain curve and calculated Poisson's ratio-axial strain curve separate prior to the peak stress. After the initially loading stage, the calculated Poisson's ratio linearly increases with axial strain since material imperfections fail progressively so that the increase in the lateral strain exceeds the increase in the axial strain. As post-brittleness decreases, precursors to failure tend to be apparent and failure processes become less sudden. For more brittle rock, strain-softening behavior occurs earlier after the volume dilation; shear strain concentration zones are fewer and the acoustic emission duration in strain-hardening and strain-softening stages is longer.

Key words: heterogeneity; material imperfections; post-peak brittleness; shear band; axial strain; lateral strain; volumetric strain; precursor

收稿日期: 2007-11-23; 修回日期: 2008-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309004)

通信作者: 王学滨(1975-), 男, 黑龙江双鸭山人, 博士, 副教授, 从事工程材料变形、破坏及稳定性研究; 电话: 0418-3350924; E-mail: wxbbb@263.net

对于岩石等准脆性材料,除非受到高围压作用,其峰后的力学行为通常是应变软化的。在软化阶段,由于岩样内部出现应变局部化现象,试样内部的变形包括均匀变形和非均匀变形,因而,通过实验测量得到的峰后应力-应变曲线(应变局部化带与带外材料构成的结构的响应)不能代表岩石单元的本构关系,是本构关系与几何尺寸共同作用的结果^[1]。

研究岩石的峰后脆性对岩样破坏过程、宏观力学行为、前兆及声发射的影响具有重要的现实意义。例如,断层岩爆是否发生取决于断层带之外弹性体的刚度与断层带的峰后刚度(取决于岩石的峰后脆性)的比值的绝对值^[2-3];多种岩爆的倾向性指标的建立都需要利用岩样的峰后应力-轴向应变曲线的斜率(取决于岩石的峰后脆性)的绝对值^[4-5]。

在实验研究中,不能确保若干岩样仅有不同的峰后应变软化的本构关系(或峰后脆性),而有相同的其它物理、力学参数。因此,峰后脆性的单独影响难于从实验角度进行研究。该不足可采用有限元法或有限差分法的数值试验予以避免。

在平面应变压缩条件下,本文作者采用FLAC模拟峰后脆性对含初始随机材料缺陷的岩石试样的破坏过程、前兆、声发射及全部变形特征的影响。利用过去编写的若干FISH函数^[6-7]预置初始随机缺陷,计算全部变形特征,并统计每 10 个时间步内的破坏单元数。

1 本构关系及计算模型

计算模型的几何尺寸、单元划分及边界条件见图 1,图中黑色单元代表材料缺陷,白色单元代表密实的

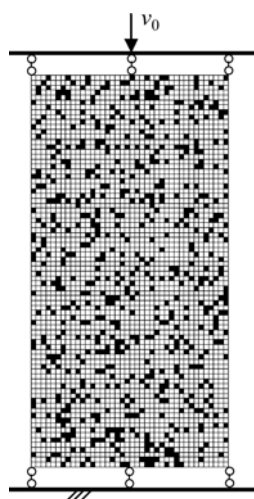


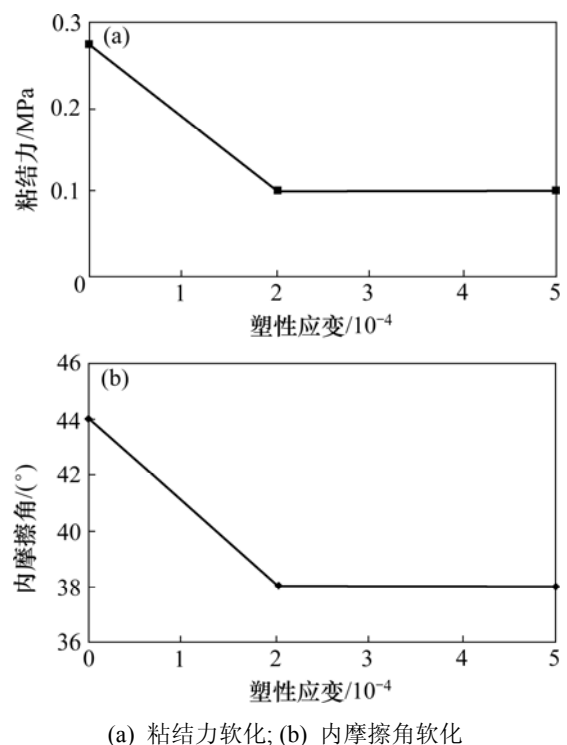
图 1 模型的几何特征及边界条件

Fig.1 Model geometry and boundary conditions

岩石。试样的高度及宽度分别为 10 cm 及 5 cm。试样两端面是光滑的,在试样的上端面施加常速度, $v_0 = 5 \times 10^{-10}$ m/时间步,计算在小变形模式及平面应变状态下进行。将试样划分为若干正方形单元,单元边长为 1.25 mm。

在弹性阶段,密实岩石和材料缺陷具有相同的本构关系,弹性模量取为 26.6 GPa,泊松比取为 0.21。材料缺陷发生破坏之后经历理想塑性行为。材料缺陷的粘结力和内摩擦角分别取为 0.1 MPa 及 38° 。密实岩石一旦发生破坏先是经历线性应变软化行为(对应应变软化阶段),然后是理想塑性行为(对应残余阶段)。密实岩石的破坏准则选取莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的模型,抗拉强度取为 0.2 MPa。

本文共选择 5 个计算方案,各方案中密实岩石的初始(塑性应变为零时的)粘结力均取为 0.275 MPa,初始内摩擦角均取为 44° 。方案 1 至 5 的差别仅在于应变软化阶段粘结力、内摩擦角与塑性应变的关系不同,方案 1 的粘结力、内摩擦角与塑性应变的关系见图 2。在应变软化阶段,粘结力-塑性应变关系及内摩擦角-塑性应变关系(均呈线性关系)的斜率的绝对值分别为 $c_c = 0.86$ GPa, $c_f = 3.00 \times 10^4$ ($^\circ$)。 c_c 及 c_f 分别为粘结力软化模量和内摩擦角软化模量,为了表述方便,二者统称为软化模量(c)。在方案 2 中, $c_c = 0.65$ GPa, $c_f =$



(a) 粘结力软化; (b) 内摩擦角软化

图 2 方案 1 中材料缺陷之外的密实岩石的峰后本构关系
Fig.2 Post-peak constitutive relation for intact rock outside imperfections in scheme 1

$2.28 \times 10^4(^{\circ})$; 在方案 3 中, $c_c=0.47 \text{ GPa}$, $c_f=1.56 \times 10^4(^{\circ})$; 在方案 4 中, $c_c=0.24 \text{ GPa}$, $c_f=0.84 \times 10^4(^{\circ})$; 在方案 5 中, $c_c=0.03 \text{ GPa}$, $c_f=0.12 \times 10^4(^{\circ})$ 。

在方案 5 中, c 最小, 因而, 密实岩石的峰后脆性最弱(或韧性最强); 在方案 1 中, c 最大, 因而, 密实岩石的峰后脆性最强(或韧性最弱)。

2 计算结果及分析

2.1 具有初始随机材料缺陷试样的一般破坏过程

图 3 和图 4 所示分别为方案 1 及方案 5 的破坏过程((a)~(d))及宏观应力-轴向应变曲线(e)。图中黑色单元表示已经发生剪切或拉伸破坏; 白色单元表示尚处于弹性状态。

当图 3(e)中应力处于 a 点时的结果见图 3(a), 当图 3(e)中应力处于 b 点时的结果见图 3(b), 当图 3(e)

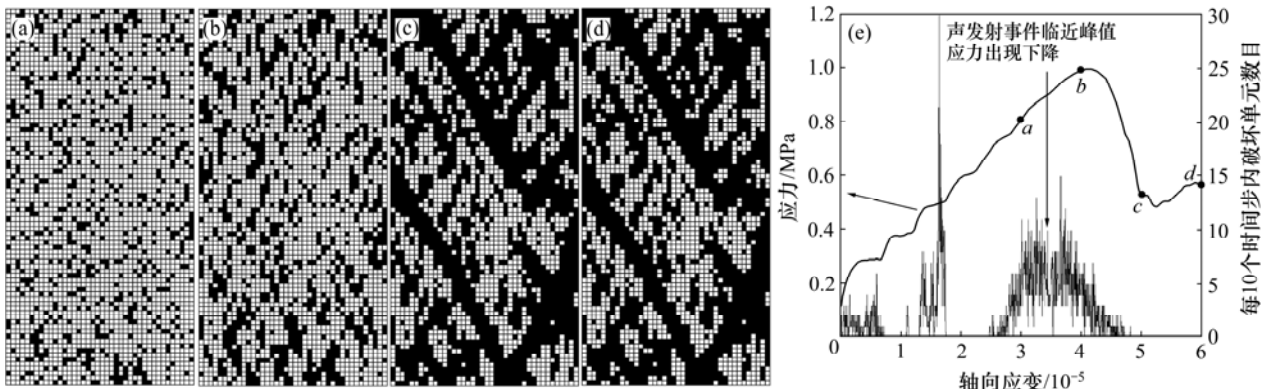
中应力处于 c 点时的结果见图 3(c), 当图 3(e)中应力处于 d 点时的结果见图 3(d)。

以方案 1 为例, 具有初始随机材料缺陷试样的渐进破坏过程叙述如下^[6]。

首先, 缺陷发生破坏; 少量缺陷在轴向得到一定程度的长大; 然后, 一些缺陷相继长大, 它们之间相互竞争, 处于无序的状态之中, 见图 3(a); 其次, 一些屈服的单元聚结, 形成了较短的剪切破裂带(简称为剪切带), 试样具有最高的承载能力, 见图 3(b); 最终, 一些短剪切带联结成有序的倾斜的贯通试样的宏观长剪切带, 试样的承载能力下降至基本保持恒定, 见图 3(c)和 3(d)。

2.2 不同软化模量时试样破坏模式的差异

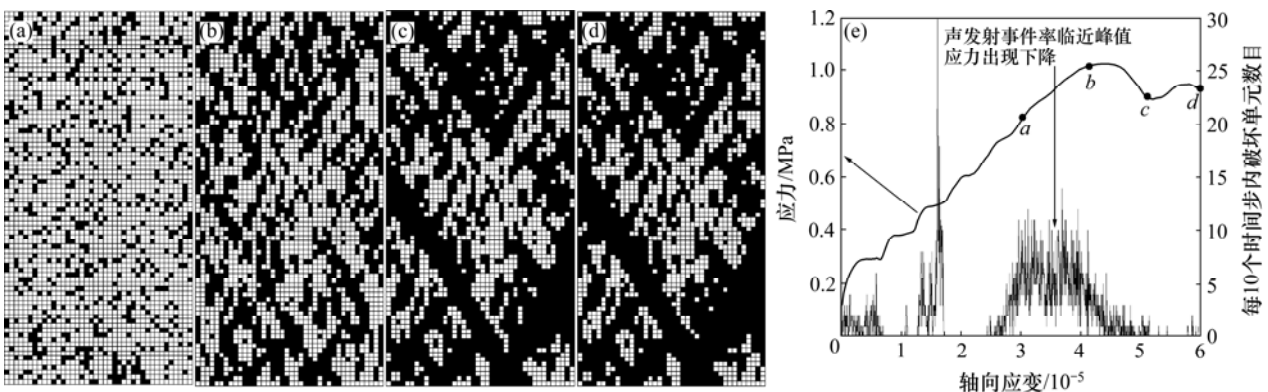
由图 3 和图 4 可见, 随着峰后脆性(软化模量)的增加, 剪切带变得不粗壮, 即剪切带厚度(或宽度)降低。而且随着峰后脆性的降低, 试样最终发生破坏的单元数目增加。



(a) 时间步为 6 000; (b) 时间步为 8 000; (c) 时间步为 10 000; (d) 时间步为 12 000; (e) 宏观应力-轴向应变曲线

图 3 方案 1 中(脆性最高)的破坏过程((a)~(d))及宏观应力-轴向应变曲线(e)

Fig.3 Failure processes ((a)~(d)) and macroscopic stress-axial strain curve (e) in scheme 1 (the highest brittleness)



(a) 时间步为 6 000; (b) 时间步为 8 000; (c) 时间步为 10 000; (d) 时间步为 12 000; (e) 宏观应力-轴向应变曲线

图 4 方案 5 中(脆性最低)的破坏过程((a)~(d))及宏观应力-轴向应变曲线(e)

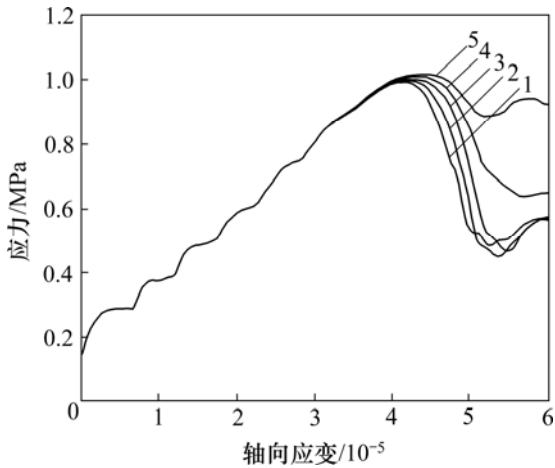
Fig.4 Failure processes ((a)~(d)) and macroscopic stress-axial strain curve (e) in scheme 5 (the least brittleness)

不考虑剪胀的剪切带厚度公式^[8]不能解释峰后脆性对剪切带厚度的影响。考虑剪胀后, 剪切带厚度与剪切带内部的平均塑性剪切应变有关, 剪切带厚度与剪切软化模量成反比^[9]。因而, 随着剪切软化模量降低, 剪切带厚度增加。这与本文的数值结果在定性上一致。

2.3 不同软化模量时试样全部变形特征的差异

2.3.1 应力-轴向应变曲线

图 5 所示为各方案的应力-轴向应变曲线。可见, 随着峰后脆性的降低, 试样的峰值应力增加; 峰值应力所对应的轴向应变增加; 峰后应力-轴向应变曲线变得比较平缓。



1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3; 4—方案 4; 5—方案 5

图 5 各方案的应力-轴向应变曲线

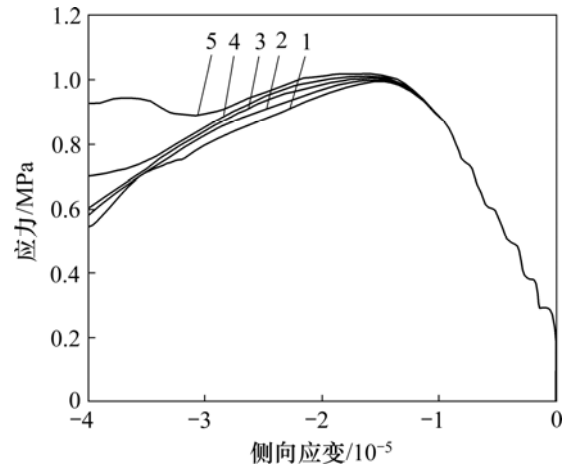
Fig.5 Stress-axial strain curves for five schemes

单轴压缩试样发生单一剪切破坏条件下, WANG^[1]得到了应变软化阶段应力-轴向应变曲线的斜率的解析解, 该斜率受软化模量影响。软化模量的增加使峰后应力-轴向应变曲线变得陡峭。本文的数值结果与文献[1]中的理论结果在定性上是一致的。单向拉伸条件下的理论结果^[10-11]也与本文的数值结果在定性上一致。但是, 上述理论结果与数值结果与文献[12]中采用RFPA的数值结果(不同软化曲线方案对宏观响应没有明显的影响)不同。

由前面的分析可知, 随着峰后脆性的增加, 试样最终发生破坏的单元数目增加。破坏单元的数目增加, 将消耗更多的能量, 这要求应力-轴向应变曲线所围的面积在软化模量较低时较大。图 5 所示的数值结果证明了这一点。

2.3.2 应力-侧向应变曲线

图 6 所示为各方案的应力-侧向应变曲线。由图 6 可见, 随着峰后脆性的降低, 峰值应力所对应的侧向



1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3; 4—方案 4; 5—方案 5

图 6 各方案的应力-侧向应变曲线

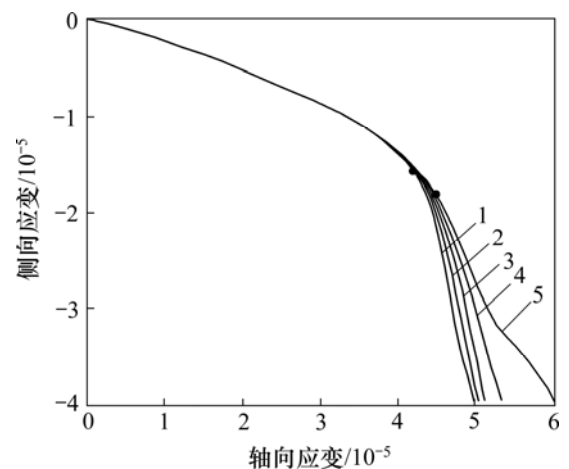
Fig.6 Stress-lateral strain curves for five schemes

应变增加; 峰后应力-侧向应变曲线的韧性增加(变得比较平缓)。

单轴压缩试样发生单一剪切破坏条件下, WANG^[13]得到了应变软化阶段应力-侧向应变曲线的斜率的解析解, 该斜率也受软化模量影响。软化模量增加使峰后应力-侧向应变曲线变得陡峭。本文的数值结果与文献[13]中的理论结果在定性上是一致的。

2.3.3 侧向应变-轴向应变曲线

图 7 所示为各方案的侧向应变-轴向应变曲线。其中各黑点的位置表示此时应变软化行为刚好发生(应力开始下降), 图中仅标注了方案 1 及方案 5 的应力始降点。由图 7 可见, 随着峰后脆性的降低, 峰后(黑点之右)侧向应变-轴向应变曲线变得平缓。在峰前(黑



1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3; 4—方案 4; 5—方案 5

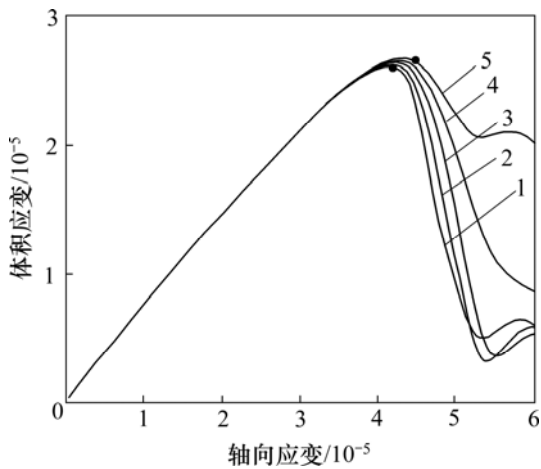
图 7 各方案的侧向应变-轴向应变曲线

Fig.7 Lateral strain-axial strain curves for five schemes

点之左), 侧向应变-轴向应变曲线呈现非线性特征, 这与文献[7]中针对均质岩样得到的线性结果不同。产生非线性特征的原因是在峰前材料缺陷的依次破坏, 导致试样侧向膨胀的快速发生。

2.3.4 体积应变-轴向应变曲线

图 8 所示为各方案的由轴向应变及侧向应变计算得到的泊松比-轴向应变曲线。图 8 中标明了方案 1 及方案 5 的应力始降点。可见, 随着峰后脆性的降低, 峰后(黑点之右)体积应变-轴向应变曲线变得平缓。在峰前(黑点之左), 体积应变-轴向应变曲线也呈现非线性特征, 其原因与侧向应变-轴向应变曲线的非线性特征的原因相同。随着峰后脆性的降低, 体积应变的峰值增加, 这意味着当峰后脆性较低时, 试样可以达到的最小体积较小。随着峰后脆性的降低, 体积最小点(体积应变的峰值点)与应力的峰值点(黑点)之间的距离增加。这表明对于脆性较强的材料, 体积膨胀之后马上发生应变软化; 而对于韧性较强的材料, 体积膨胀之后过一段时间才发生应变软化。这也说明脆性较强的材料的破坏更突然。



1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3; 4—方案 4; 5—方案 5

图 8 各方案的体积应变-轴向应变曲线

Fig.8 Volumetric strain-axial strain curves for five schemes

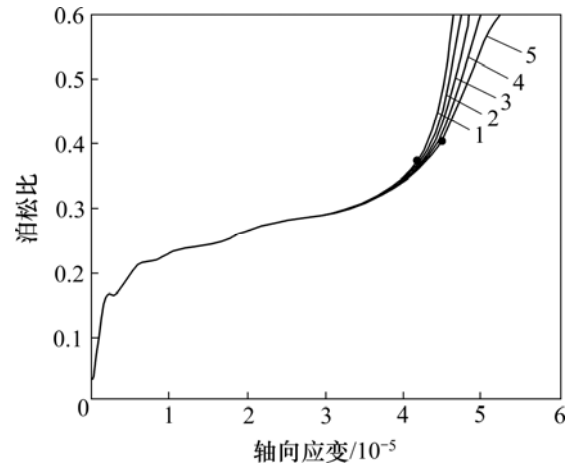
图 8 表明, 尽管在体积最小点之后, 试样的体积发生膨胀, 但是, 体积应变总为正。未观测到变形后试样的体积反而大于初始体积的现象。这一反常现象(剪胀或扩容)可在扩容角^[14]和孔隙压力^[15]较高的条件下的数值结果中观察到。

2.3.5 计算得到的泊松比-轴向应变曲线

图 9 所示为各方案的体积应变-轴向应变曲线。可见, 泊松比-轴向应变曲线大致可以划分为 3 个阶段: 第 1 阶段为泊松比快速上升阶段; 第 2 阶段为泊

松比直线上升阶段; 第 3 阶段为泊松比快速上升阶段。

第 1 阶段对应初始加载阶段, 泊松比从 0 开始, 快速上升^[7]。第 2 阶段对应材料缺陷的逐渐破坏阶段。应当指出, 在第 1 和第 2 阶段, 不同峰后脆性的泊松比-轴向应变曲线尚未发生分离, 这意味着密实岩石(在不同的方案中, 遵循不同的线性应变软化关系)尚未发生峰后的应变软化, 处于弹性阶段。



1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3; 4—方案 4; 5—方案 5

图 9 各方案的应力-计算得到的泊松比曲线

Fig.9 Calculated Poisson's ratio-axial strain curves for five schemes

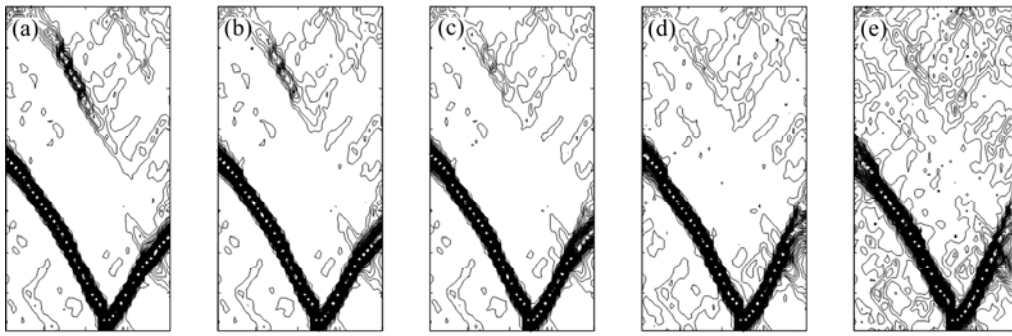
在第 3 阶段, 不同峰后脆性的泊松比-轴向应变曲线已经分离, 这意味着密实岩石已发生破坏, 承载能力逐渐下降。图 9 中标明了方案 1 及方案 5 的应力始降点。图 9 中的 2 个黑点(应力始降点)位于第 3 阶段的曲线上。因此, 第 3 阶段对应应力-轴向应变曲线的应变软化阶段和之前的应变硬化阶段。图 5 表明, 在应变硬化阶段, 不同脆性的岩石的应力-轴向应变曲线已经发生分离。

图 9 表明, 随着峰后脆性的降低, 第 3 阶段的泊松比-轴向应变曲线变得平缓。最终计算得到的泊松比大于 0.5。文献[16]从理论角度分析了这一现象。

文献[7]针对均质试样(仅具有一个缺陷)的数值进行分析发现, 在第 2 阶段, 泊松比保持为常量, 对应试样的均匀变形阶段。而本文针对非均质试样的计算结果表明, 不存在泊松比保持为常量的第 2 阶段。在第 2 阶段, 泊松比以直线方式上升。这是由于材料缺陷的依次破坏, 使试样发生快速的侧向膨胀, 使侧向应变大小增加的速度超过了轴向应变增加的速度。

2.4 破坏的前兆

图 7 和图 8 表明, 在应力始降点(各黑点)之前, 不同峰后脆性的侧向应变-轴向应变曲线及体积应



(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3; (d) 方案 4; (e) 方案 5

图 10 方案 1 至 5 当时间步达到 12 000 时的剪切应变增量

Fig.10 Shear band patterns at 12 000 timesteps for schemes 1 to 5

变-轴向应变曲线已发生分离。当应力开始下降时,上述 2 种曲线已明显偏离分离点的切线。峰后脆性越低,偏离量越大。这种偏离量可视为岩样失稳破坏的前兆。因而,峰后韧性越高,岩样失稳破坏的前兆越明显。这一结论与文献[7]中的结论不同。

图 9 表明,在应力始降点之前,峰后韧性越高,泊松比-轴向应变曲线偏离第 2 阶段(线性阶段)越明显。这种偏离也可视为岩样失稳破坏的前兆。因而,峰后韧性越高,岩样失稳破坏的前兆越明显。这一结论与图 7 和图 8 的结果相同。

2.5 最终的剪切带图案

图 10 所示为方案 1 至方案 5 当时间步达到 12 000 时的剪切带图案。由图 10 给出的剪切应变增量等值线可见,峰后韧性越高,剪切带越粗壮,这与图 3 和图 4 所示的结果一致。

对于方案 1(峰后脆性最强),除了可在试样下部观察到“V”型剪切带外,在试样上部也可观察到一条较显著的剪切带(通过试样的左上角)。对于方案 5(峰后脆性最弱),除了可在试样下部观察到“V”型剪切带外,在试样内部多处均可以观察到剪切应变集中现象。上述结果说明,当峰后脆性极强时,试样除了发生主导的剪切破坏(“V”型剪切带)外,还有个别地方发生破坏。但是,当峰后韧性极强时,试样除了发生主导的剪切破坏(“V”型剪切带),还有多处地方发生破坏,材料性能可得到更充分发挥。

2.6 声发射数(每 10 个时间步内的破坏单元数-轴向应变曲线)

图 3(e)和图 4(e)所示分别为方案 1 及方案 5 的每 10 个时间步内破坏单元数目-应变曲线。可以发现,在加载过程中,在 3 个区段内破坏单元数目有显著的

增加。其中,第 3 个区段绝大部分位于应力的峰值之前,因此,具有一定的前兆意义。岩石的峰后脆性越高,声发射数在第 3 个区段所持续的时间越短,这与常识相符,即,越脆的岩石的破坏越突然,越迅猛,前兆及破坏过程持续的时间短。姚改焕等^[17]针对石灰岩的实验结果表明,临近峰值应力时,声发射事件率有所增加,然后有所下降,之后有大量的声发射事件,这一现象类似于本文第 3 个区段的模拟结果。

3 结 论

a. 随着峰后脆性的降低,含初始随机缺陷的岩样的剪切带宽度增加,试样发生破坏的单元数增加,体积应变的峰值增加,应力峰值、所对应的轴向应变及侧向应变的大小均增加。

b. 在由侧向应变及轴向应变计算得到的泊松比-轴向应变曲线的第 2 阶段,泊松比以直线方式上升,这是由于材料缺陷的依次破坏,使侧向应变大小的增加超过了轴向应变的增加。

c. 不同峰后脆性时,本文中的 5 种曲线于应力的峰值之前发生分离。随着峰后脆性的降低,岩样失稳破坏的前兆变得明显,破坏变得不突然。

d. 脆性越强的材料,体积膨胀之后发生应变软化越早;剪切应变集中的位置越少;在硬化阶段及软化阶段,声发射持续的时间越短。

参考文献:

- [1] WANG Xue-bin. Prediction of height effect, plastic deformation and fracture energy for high-strength concrete by linear shear

- softening constitutive relation based on energy conservation method[J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59(5): 341-350.
- [2] 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.
- [3] WANG Xue-bin, YANG Xiao-bin, ZHANG Zhi-hui, et al. Dynamic analysis of fault rockburst based on gradient-dependent plasticity and energy criterion[J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2004, 11(1): 5-9.
- [4] 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]. J Cent South Univ: Science and Technology, 2004, 35(2): 304-309.
- [5] 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]. J Cent South Univ Technol: Natural Science, 2002, 33(2): 129-132.
- [6] WANG X B. Failure process and stress-strain curve of plane strain rock specimen with initially random material imperfections[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353-358: 1133-1136.
- [7] 王学滨. 软化模量对岩样全部变形特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 600-605.
WANG Xue-bin. Effect of softening modulus on entire deformational characteristics of rock specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 600-605.
- [8] De Borst R, Mühlhaus H B. Gradient-dependent plasticity: formulation and algorithmic aspects[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1992, 35(3): 521-539.
- [9] WANG Xue-bin, TANG Ju-peng, ZHANG Zhi-hui, et al. Analysis of size effect, shear deformation and dilation in direct shear test based on gradient-dependent plasticity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1095-1099.
- [10] Schreyer H L. Analytical solutions for nonlinear strain-gradient softening and localization[J]. Journal of Applied Mechanics, ASME, 1990, 57(3): 522-528.
- [11] Ottosen N S. Thermodynamic consequences of strain softening in tension[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1986, 112(11): 1152-1164.
- [12] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Damage and fracture of concrete: numerical test[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] WANG Xue-bin. Shear deformation, failure and instability of rock specimen in uniaxial compression based on gradient-dependent plasticity[J]. Geotechnical Special Publication ASCE, 2006, 150: 213-219.
- [14] 王学滨. 剪胀对岩样全部变形特征的影响[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37(5): 25-30.
WANG Xue-bin. Effects of shear dilatancy on entire deformational characteristics of rock specimen[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37(5): 25-30.
- [15] 王学滨. 孔隙压力对岩样全部变形特征的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(6): 31-35.
WANG Xue-bin. Effect of pore pressure on entire deformational characteristics of rock specimen[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute: Natural Science, 2005, 21(6): 625-629.
- [16] 王学滨. 岩样单轴压缩峰后泊松比理论研究[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 99-103.
WANG Xue-bin. Analysis of the post-peak Poisson's ratio of rock specimens in uniaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 99-103.
- [17] 姚改焕, 宋站平, 余贤斌. 石灰岩声发射特性的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(6): 44-46.
YAO Gai-huan, SONG Zhan-ping, YU Xian-bin. Experimental study on acoustic emission characteristics of limestone[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(6): 44-46.