

加载速度对岩样全部变形特征的影响

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: 利用编制的计算平面应变压缩岩样轴向、侧向、体积应变及泊松比的 FISH 函数, 采用 FLAC 模拟了加载速度对剪切带图案及岩样全部变形特征的影响。在峰前及峰后, 本构模型分别取为线弹性及莫尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型。加载速度较低及适中时, 岩样发生单剪切破坏, 剪切带倾角及宽度不受加载速度影响, 应力-轴向应变曲线及应力与侧向应变曲线软化段的斜率不依赖于加载速度; 高加载速度使岩样发生 X 型剪切破坏, 两种曲线软化段较平缓; 在相同的轴向应变时, 高加载速度使剪切带长度降低。随着加载速度的增加, 岩样失稳破坏的前兆越来越明显, 当加载速度较高时, 前兆反而不明显, 这是由于应力存在较大的波动, 导致不正确地估计了应力峰值所对应的轴向应变。在应变软化阶段, 高加载速度使侧向应变与轴向应变曲线、泊松比与轴向应变曲线及体积应变与轴向应变曲线变平缓, 也使体积应变与轴向应变曲线的峰值及对应的轴向应变增加。

关 键 词: 加载速度; 剪切带; 轴向应力; 侧向应变; 体积应变; 泊松比

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Effect of loading rate on entire deformational characteristics of rock specimen

WANG Xue-bin

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

Abstract: FISH functions written are used to calculate axial, lateral and volumetric strains as well as Poisson's ratio of rock specimen in plane strain compression. Influence of loading rate on shear band (SB) pattern and entire deformational characteristics is investigated numerically using FLAC. In elastic and strain-softening stages, the constitutive relations are linear. A composite Mohr-Coulomb criterion with tension cut-off is used. For lower and moderate loading rates, a SB whose inclination angle and thickness are not influenced by loading rate bisects the specimen, so that the post-peak slopes of stress-axial strain curve and stress-lateral strain curve are not related to loading rate. Higher loading rate leads to the conjugate SBs, resulting in less steep post-peak stress-axial strain curve and stress-lateral strain curve. At the same axial strain, higher loading rate leads to shorter SB. With an increase of loading rate, the precursor to failure is more apparent unless the loading rate is very high. At higher loading rate, the great fluctuation in stress exists so that the axial strain corresponding to the peak stress is estimated inappropriately. In strain-softening stage, higher loading rate results in ductile lateral strain-axial strain curve, Poisson's ratio-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve as well as higher peak of volumetric strain and the corresponding axial strain.

Key words: loading rate; shear band; axial stress; lateral strain; volumetric strain; Poisson's ratio

1 引 言

人们很早就注意到, 即使岩石、混凝土等准脆性材料处于单向受力状态, 其变形也不是单向的, 例如, 弹性阶段在轴向压缩应力作用下试样侧向或横向要膨胀, 岩样的变形特征至少包括轴向及侧向及体积变形特征。

在动态载荷条件下脆性材料的应力-应变曲线、强度特性及破坏模式有着重要的工程背景, 一直得到了较多的关注^[1-10]。但是, 几乎所有的试验研究仅涉及轴向变形, 对侧向变形与轴向变形之比、侧向变形及体积变形很少涉及。

脆性材料在较高的应变率加载条件下的试验本身就比较困难, 花费巨大。而且, 在动态载荷条件

下, 试样的破坏程度远高于静载作用下的破坏, 因此, 难以收集并拼接破坏后的试件^[10]。数值模拟研究在一定程度上避免可以试验研究的不足, 加深对脆性材料破坏机制、过程及全部变形特征的理解。

本文利用编制的计算平面应变压缩岩样全部变形特征的 FISH 函数^[11], 采用 FLAC 模拟了加载速度对岩样破坏过程、模式及全部变形特征的影响。

2 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。试样的高度及宽度分别为 10 cm 及 5 cm, 下端面被固定铰支座约束, 在试样的上端面施加常速度, 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 1.25 mm。为了得到不对称的剪切带图案, 在试样的左下部预制了一个材料缺陷, 材料缺陷是 4 个空单元。另外, 试样上端面的岩石质点仅允许向下运动, 这对应于上端面与试验机压头之间存在较大摩擦力的情形。

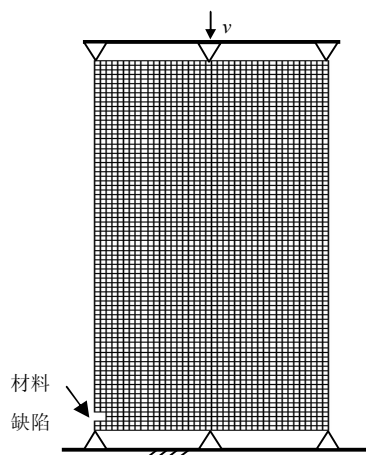


图 1 模型的几何特征及边界条件

Fig.1 Model geometry and boundary conditions

弹性阶段岩石的本构关系为线弹性, 弹性模量取为 26.6 GPa, 泊松比取为 0.21。峰后岩石的本构模型取为莫尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型, 抗拉强度取为 200 kPa。岩石凝聚力、摩擦角与塑性应变的关系见文献[11], 初始 (塑性应变为 0 时) 凝聚力取为 275 kPa, 初始摩擦角取为 44°。

3 结果分析及讨论

3.1 加载速度对岩样破坏过程及模式的影响

图 2 给出了不同加载速度 (v) 时, 岩样的破坏过程及模式。黑色单元表示这些单元已经发生了破坏, 白色单元表示这些单元尚处于弹性状态。

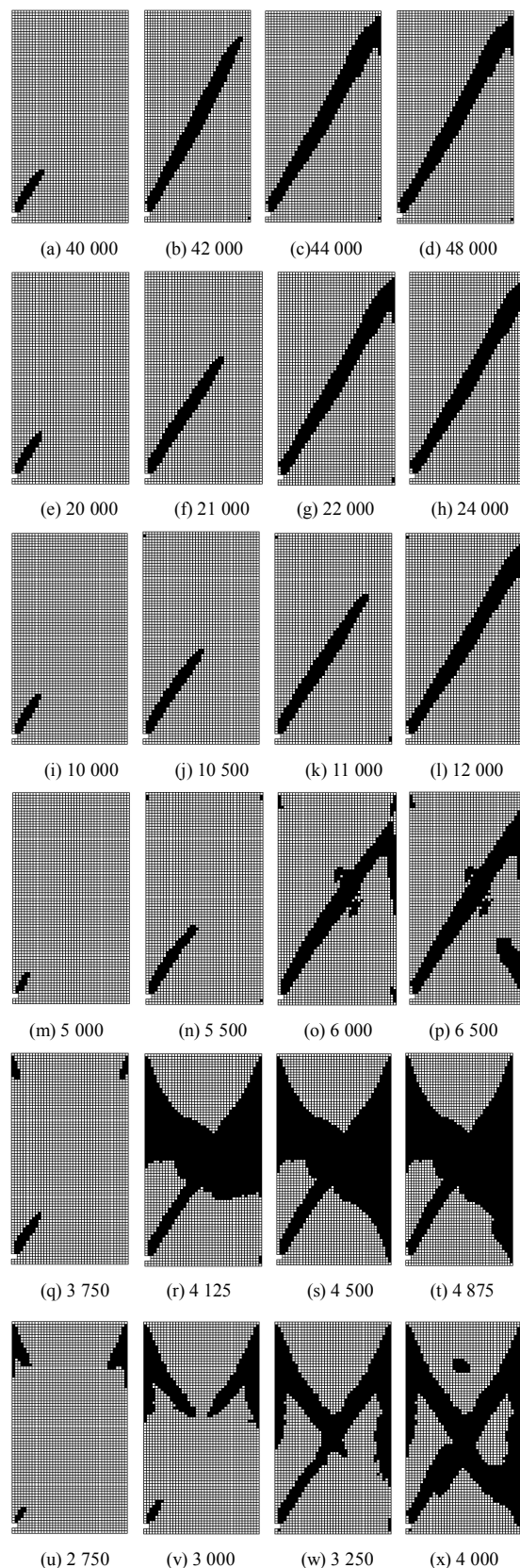


图 2 不同加载速度时的破坏过程

Fig.2 Failure processes at different loading velocities

图 2(a)~2(d)、图 2(e)~2(h)、图 2(i)~图 2(l)、图 2(m)~2(p)、图 2(q)~2(t)及 图 2(u)~2(x) 的 v 分别为 1×10^{-9} , 2×10^{-9} , 4×10^{-9} , 8×10^{-9} , 1.2×10^{-8}

米/时步和 1.6×10^{-8} 米/时步。各图片的时间步 (t) 也都在各图片中给出, 例如图 2(a) 的 $t = 40\ 000$ 。由各图片的 t , 易于计算出试样的轴向 (加载方向) 的应变 (ε) 或位移, 如图 2(a)、图 2(e)、图 2(i) 及图 2(m) 的 $\varepsilon = vt/L = 4 \times 10^{-4}$ 。

当 v 较低时 ($v = 1 \times 10^{-9} \sim 4 \times 10^{-9}$ 米/时步), 图 2(a)~2(l) 可以发现, (1) 塑性单元首先启动于材料缺陷附近。(2) 众多塑性单元按一定方向排列, 形成了一条狭长的剪切带; 随着时间步的增加, 剪切带的长度增加, 直到贯穿岩样的右侧面。(3) 对比图 2(a)、2(e) 及 2(i), 或对比图 2(b)、图 2(f) 及图 2(j) 可以发现, 当岩样具有相同的 ε 时, 随着 v 的增加, 剪切带的长度降低, 单位轴向应变内的剪切带长度增量降低。

当 v 适中时 ($v = 8 \times 10^{-9}$ 米/时步, 图 2(m)~2(p)) 可以发现, (1) 塑性单元仍然首先启动于缺陷附近, 这与 v 较低时相同。(2) 在岩样内部, 除了出现贯穿岩样左右侧面的倾斜剪切带 (占主导地位) 之外, 位于岩样右侧面、岩样右下角以及岩样中部的许多单元也发生了破坏; 在占主导地位的剪切带之外, 位于岩样右下角及岩样中部的塑性单元有联结成另一条剪切带的趋势, 以与占优势的剪切带相共轭。(3) 对比图 2(i) 及图 2(m), 或对比图 2(k) 及图 2(n) 可以发现, v 适中时单位轴向应变内的剪切带长度增量低于 v 较低时。

当 v 较高时 ($v = 1.2 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-8}$ 米/时步, 图 2(q)~2(x))。可以发现, (1) 塑性单元既首先启动于缺陷附近, 见图 2(q) 或图 2(u), 也首先出现在岩样加载端附近; 这一点与 v 较低时及 v 适中时很不相同。(2) 随着时间步的增加 (图 2(v)), 岩样内部的 3 条倾斜的剪切带的长度均增加。此外, 位于岩样两侧面上的屈服单元的数目也增加。(3) 随着时间步的增加 (图 2(r) 及图 2(w)), 位于岩样左下角的剪切带与位于岩样右上角的剪切带联合, 形成了较长的一条剪切带; 位于岩样左上角的剪切带的前端发展至岩样中部后, 继续向岩样的右下角发展, 最终, 也形成了一条贯通岩样两侧面的狭长的剪切带, 并与先前形成的狭长剪切带相共轭, 见图 2(s)~2(t) 或图 2(x)。(4) 岩样发生了明显的“X”型剪切破坏, 这与一点与 v 较低时及 v 适中时很不相同。与岩样发生单一剪切带破坏 (脆性剪切破坏) 相比, 岩样发生“X”型剪切破坏 (韧性剪切破坏) 需要涉及更多的塑性单元, 也需要消耗更多的能量。

v 较低时, 岩样两侧面上的单元几乎总是处于弹性状态; v 适中时, 岩样两侧面上的屈服单元数

目少于 v 较高时; v 较高时, 岩样的破坏形态的复杂性和不规则性高于 v 适中时, 更高于 v 较低时。

测量图 2 中的各条剪切带倾角 (剪切带的切向与水平方向所夹的锐角) 可以发现, 剪切带的倾角基本上不受加载速度的影响, 均为 60° 左右。根据 Coulomb、Roscoe 及 Arthur 倾角公式^[12]可以计算出剪切带倾角分别为 67° , 45° 及 56° , 发现相比之下本文的数值解与 Arthur 倾角最接近。试验证明 Arthur 倾角与某些岩土材料的试验结果比较接近, 获得了较多的试验支持。

3.2 轴向及侧向变形特征

图 3~5 分别给出了 v 对应力-轴向应变曲线、应力-侧向应变曲线及侧向应变-轴向应变曲线的影响。为了清晰地显示应力峰值附近的侧向应变-轴向应变曲线的形态, 图 5 的局部被放大, 放大图仍绘于图 5 中。图 5 中的各黑点的位置表示此时应力峰值刚好被分别达到。可以看出, (1) 应力峰值随着 v 的增加而增加。当 v 较低及 v 适中时, 应力峰值所对应的轴向应变随 v 的增加而增加。但是, 当 v 较高时, 应力峰值所对应的轴向应变反而降低。这可能是由于当 v 较高时, 应力存在较大的波动, 进而不正确地估计了应力峰值所对应的轴向应变。

(2) 应力峰值达到之前, 应力-轴向应变曲线及轴向应力-侧向应变曲线出现了一定的波动, 波动幅度随着 v 的增加而增加。(3) 应力峰值达到之后, 在相同的应力时, v 较高时的轴向应变及侧向应变的大小要大一些, 见图 3 及图 4。在应变软化阶段相同的应力水平时, 较高的 v 可使岩样获得更大的变形量。(4) 侧向应变-轴向应变曲线在应力峰值之前未发生波动, 见图 5, 不同 v 时的曲线非常平坦、光滑。 v 对应力峰值之后的侧向应变-轴向应变曲线有明显的影, v 增加将导致侧向应变-轴向应变曲线变得平缓。应力峰值达到之后, 应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线均呈现应变软化行为; 随着 v 的增加, 两种曲线软化段的斜率变化不大, 尤其是当 v 较低和 v 适中时。但是, 严格地讲, v 较高时, 两种曲线软化段比 v 较低和 v 适中时更平缓一些, 这与上文提过的当 v 较高时, 岩样发生倾向于韧性的剪切破坏是相对应的。

3.3 峰前及峰后泊松比

图 6 给出了不同 v 条件下的泊松比-轴向应变曲线的数值计算结果。图 6 中的各黑点的位置表示此时轴向应力峰值刚好分别达到。可以看出, (1) 不同 v 时的泊松比-轴向应变曲线均可以划分为 3 个阶段: 泊松比不断增加; 泊松比基本上保持不变; 泊

松比继续增加。在文献[11]中, 已经对泊松比 3 个阶段的原因进行了讨论。

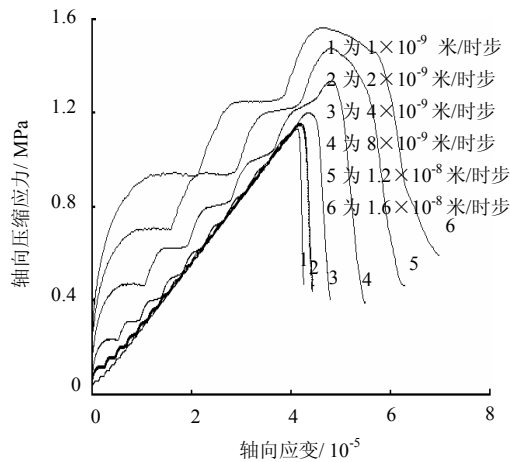


图3 不同加载速度时应力-轴向应变曲线

Fig.3 Stress-axial strain curves at different loading velocities

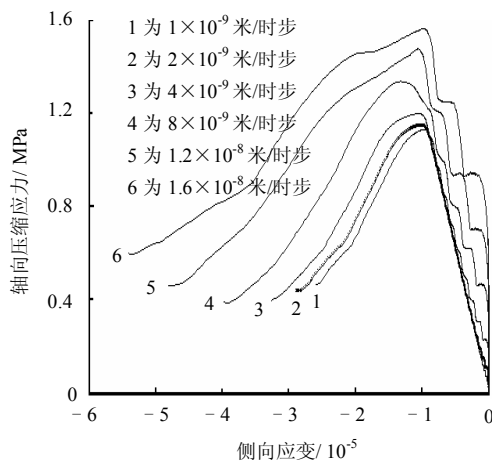


图4 不同加载速度时应力-侧向应变曲线

Fig.4 Stress-lateral strain curves at different loading velocities

在第 2 个阶段, 泊松比基本上保持为常量, 不随时间步的增加而改变, 尤其是当 v 较低时, 第 2 阶段非常明显。在第 1 及第 2 阶段, v 较低时的泊松比都比 v 较高时大。这说明, 在达到相同的轴向应变时, 慢速加载可以使岩样的侧向变形得到更充分的发展, 这与上文提过的慢速加载时单位轴向应变内的剪切带长度增量较大是相对应的。

3.4 体积变形特征

图 7 给出了不同 v 条件下的体积应变-轴向应变曲线。图中的各黑点的位置表示此时应力峰值刚好分别达到。可以发现, (1) v 的增加使体积应变-轴向应变曲线的峰值增加。这说明, v 较高时, 岩样可以达到的最小体积较小。(2) v 的增加导致体积应变-轴向应变曲线的峰值所对应的轴向应变增加。

这说明, v 较高时, 岩样达到最小的体积所经历的轴向应变较大。(3) 随着 v 的增加, v 较低时体积应变-轴向应变曲线的软化段斜率没有大的改变。当 v 较高时, 随着 v 的增加, 曲线的软化段变得平缓。

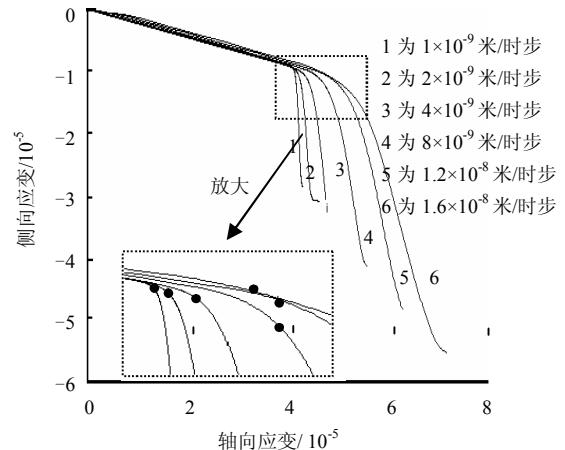


图5 不同加载速度时, 侧向应变-轴向应变曲线

Fig.5 Lateral strain-axial strain curves at different loading velocities

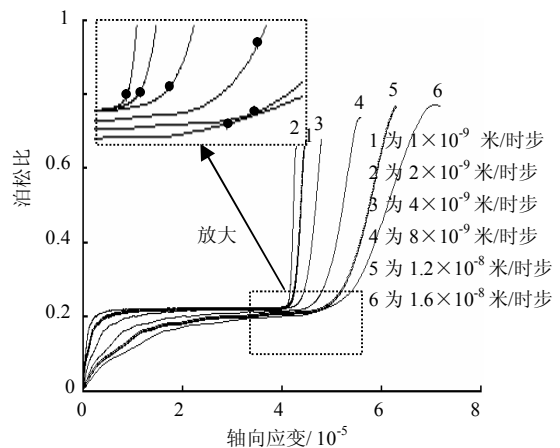


图6 不同加载速度时泊松比-轴向应变曲线

Fig.6 Poisson's ratio-axial strain curves at different loading velocities

3.5 失稳破坏前兆的差别

(1) 由于图 3 及图 4 给出的应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线在峰值强度之前具有一定的波动性, 因此, 很难在峰值强度之前识别出岩样失稳破坏 (发生在应变软化阶段) 的前兆。从图 5~7 可以发现, 峰前, 三种曲线均发生了一定程度的转折, 这种转折可视为岩样失稳破坏的前兆^[11]。

(2) v 较低时, 随着 v 的增加, 岩样失稳破坏的前兆越来越明显; v 适中时的失稳破坏的前兆最明显。当 v 较高时, 失稳破坏的前兆反而不明显, 这可能是由于当 v 较高时, 应力波动较大, 导致不正地估计了应力峰值所对应的轴向应变。

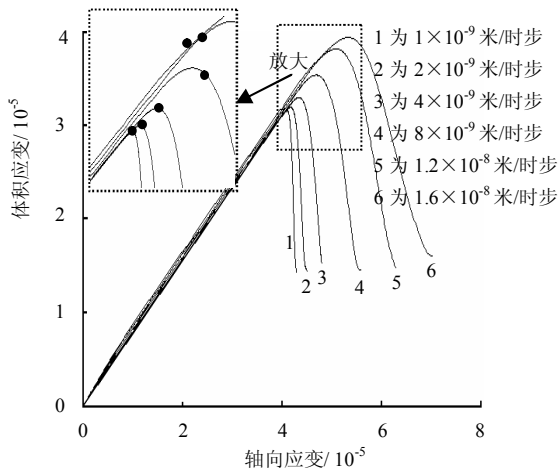


图7 不同加载速度时体积应变-轴向应变曲线
Fig.7 Volumetric strain-axial strain curves at different loading velocities

3.6 讨论

(1) 可以采用基于梯度塑性理论得到的解析解^[13]对应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线软化段的数值计算结果的合理性进行定性的解释。在单轴压缩条件下,当岩样受到剪切破坏时,应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线的软化段斜率的解析解表明,两种曲线软化段斜率受岩石的本构参数(弹性模量、软化模量及剪切带宽度或内部长度参数)、岩样的几何尺寸(试样的高度或宽度)及结构形式(剪切带倾角)影响。当 v 较低和 v 适中时,本文的数值结果表明,不同 v 时的剪切带的宽度和倾角没有明显的差别,见图2(d)、图2(h),2(1)及图2(p),而且所采用的岩石的本构参数及岩样的几何尺寸均相同。因此,两种曲线的软化段斜率将不受 v 的影响。当 v 较高时,本文的数值结果表明剪切带为两条,见图2(t)及图2(x)。为考虑多条剪切带情形,可将剪切带宽度乘以剪切带数目^[13]。剪切带数目增加使应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线的软化段变平缓。这与图4相一致。

(2) 本文的数值结果表明,随着加载速度的增加,应力-轴向应变曲线软化段的斜率先是不受加载速度的影响,然后变得平缓。这一数值结果与有的试验结果(随着应变率的增加,岩样变脆,应力-轴向应变曲线的软化段变陡峭)不一致,见文献[14]的图6,但是本文数值结果与有的试验结果(随着应变率的增加,应力-轴向应变曲线的软化段斜率变化不明显)有类似之处,见文献[14]中图8,也与文献[3]的试验结果(在高应变率条件下,应力-应变曲线的后破坏区(post-failure region)将围绕(enclose)低应变率条件下的曲线)相类似。

(3) 图3及图4表明,应力峰值随加载速度的增加而增加,这一数值结果在定性上与众多文献[1~10, 14]的试验结果是一致的。一些岩石的试验结果还进一步表明,随着应变率的对数的降低,强度线性降低^[1,6]。另外,图3表明,与应力峰值对应的轴向应变随着加载速度的增加而增加,除非加载速度较高时。一些岩石的试验结果也表明,随着应变率的降低,应力峰值对应的轴向应变降低^[4,5]。

(4) 文献[5]在单轴压缩条件下测试了大概100个凝灰岩试样,发现破坏主要开始于缺陷(flaws)。这一结果与本文的数值结果有类似之处。但是,当加载速度较高时,本文的数值结果表明缺陷处裂纹可能启动,靠近加载端的位置裂纹也可能启动。文献[9]对混凝土的试验结果表明,应变率提高时,试样的最终破坏形式是相同的。这与本文的部分模拟结果有类似之处,见图3(d)、图3(h)及图3(l)。文献[2]对灰泥的试验结果表明,当应变率增加时,裂纹和碎片的数目增加。这一试验结果与本文的部分数值模拟结果(当应变率较高时,发生破坏的单元数目较多,剪切带条数较多)有类似之处,见图2(p)、图2(t)及图2(x)。在平面应变直接剪切条件下,试样内部发生破坏的单元数目也随加载速度的增加而增加^[15]。文献[7]的观点(动态加载下花岗岩的裂纹数目远大于静态条件下的裂纹数目)也表明了这一点。另外,文献[10]的观点(动载荷使得岩石试件在完全破坏之前大量的裂纹得以产生并扩展,导致试件在其作用下的破裂程度远远高于静载作用下的破坏)也是类似的。但是,文献[8]的观点(应变率越低,试样破坏时的宏观裂纹愈多,试样破坏的程度愈强。反之,应变速率快,裂隙的传播和应力的转移不充分,试样只能沿开始的破裂方向产生少数的几个破裂面)不支持上述观点。

4 结论

(1) 加载速度较低及适中时,塑性单元均首先启动于材料缺陷附近,岩样最终发生了单剪破坏。加载速度较高时,塑性单元出现于缺陷及岩样加载端附近,最终发生复杂的破坏模式。在相同的轴向应变时,高加载速度使剪切带长度降低。

(2) 剪切带倾角基本上不受加载速度的影响,与Arthur倾角接近。峰值强度随着加载速度的增加而增加。应力峰值所对应的轴向应变随着加载速度的增加而增加,加载速度较高时则不然。

(3) 在峰后相同的应力时,较高的加载速度可使岩样获得更大的轴向及侧向变形量。加载速度较

低及适中时, 应力-轴向应变曲线及应力-侧向应变曲线软化段的斜率不依赖于加载速度; 高加载速度使岩样发生X型剪切破坏, 两种曲线软化段变平缓。

(4) 加载速度增加使软化阶段的侧向应变-轴向应变曲线、泊松比-轴向应变曲线及体积应变-轴向应变曲线变平缓。加载速度增加使体积应变-轴向应变曲线的峰值及所对应的轴向应变增加。

(5) 加载速度较低时, 随着加载速度的增加, 岩样失稳破坏的前兆越来越明显; 加载速度适中时的失稳破坏的前兆最明显。当加载速度较高时, 前兆反而不明显, 这可能是由于应力波动较大, 导致不正确地估计了应力峰值所对应的轴向应变。

参 考 文 献

- [1] MASUDA K, MIZUTANI H, YAMADA I. Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite[J]. **Journal of Physics of the Earth**, 1987, 35(1): 37—66.
- [2] LI Zhao-xia, HUANG Yao-ping. Effect of strain rate on the compressive strength surface cracking and failure mode of mortar[J]. **ACI Materials Journal**, 1998, 95(5): 512—518.
- [3] OKUBO S, HE Changrong, NISHIMATSU Y. Time dependent behavior in uniaxial compression - rheological behavior of rock in post-failure region (1st report)[J]. **Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan**, 1987, 103(1189):177—181.
- [4] SWAN G, COOK J, BRUCE S, et al. Strain rate effects in Kimmeridge Bay shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1989, 26(2): 135—149.
- [5] MA L, DAEMEN J J K. Strain rate-dependence of mechanical properties of welded Topopah Spring tuff[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(Supp. 1): 1B 04 1—6.
- [6] MASUDA K. Effects of water on rock strength in a brittle regime[J]. **Journal of Structural Geology**, 2001, 23(11): 1 653—1 657.
- [7] 刘剑飞, 胡时胜, 胡元育, 等. 花岗岩的动态压缩试验和力学性能研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(5): 618—621.
LIU Jian-fei, HU Shi-sheng, HU Yuan-yu, et al. Research on dynamic compressive testing and mechanics properties of granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 618—621.
- [8] 徐松林, 吴文, 张华, 等. 大理岩单轴压缩过程的强度确定及其应变率影响[J]. **地下空间**, 2001, 21(4): 272—275, 279.
- XU Song-lin, WU Wen, ZHANG Hua, et al. Analyses on strength of marble under uniaxial compression and the influences of strain rates[J]. **Underground Space**, 2001, 21(4): 272—275, 279.
- [9] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的试验研究及其本构模型[J]. **水利学报**, 1997, (7): 72—77.
DONG Yu-li, XIE He-ping, ZHAO Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rates [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, (7): 72—77.
- [10] 东兆星, 单仁亮. 岩石在动载作用下破坏模式与强度特性研究[J]. **爆破器材**, 2000,(2): 1—5.
DONG Zhao-xing, SHAN Ren-liang. Research on the failure pattern and strength properties of rock under dynamicloading[J]. **Explosive Materials**, 2000,(2): 1—5.
- [11] 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.
- [12] VARDOULAKIS I. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1980, 4: 103—119.
- [13] 王学滨, 马剑, 刘杰, 等. 基于梯度塑性本构理论的岩样侧向变形分析(I): 基本理论及本构参数对侧向变形的影响[J]. **岩土力学**, 2004, 25(6): 904—908.
WANG Xue-bin, MA Jian, LIU Jie, et al. Analysis of lateral deformation of rock specimen based on gradient-dependent plasticity(I)-basic theory and effect of constitutive parameters on lateral deformation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 904—908.
- [14] 卢应发, 邱一平, 吴玉山. 岩石类材料试验系统的一些力学特性[J]. **岩石力学与工程学报**, 1995, 14(1): 59—67.
LU Ying-fa, QIU Yi-ping, WU Yu-shan. Mechanical characteristics of testing system for rock material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1995, 14(1): 59—67.
- [15] 王学滨. 加载速度对断层-围岩系统变形及快速回跳的影响[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 242—246.
WANG Xue-bin. Numerical simulation of influence of loading rate on deformation characteristics and snap-back for fault band and elastic rock system [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 242—246.