

缺陷数目对岩样声发射及应变能降低的影响

王学滨

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 阜新 123000)

摘要:利用拉格朗日元法(FLAC)模拟了单轴平面应变压缩条件下缺陷数目对含初始随机材料缺陷岩石试样声发射及弹性应变能降低的影响。比密实岩石弱的缺陷在破坏之后经历理想塑性行为。密实岩石在破坏之后先是经历线性应变软化行为, 然后是理想塑性行为。随着缺陷数目的增加, 每 10 个时间步内弹性应变能降低量(弹性应变能降低率)的峰值有下降的趋势。峰后的应力—应变曲线越陡峭, 弹性应变能降低率的峰值越高。弹性应变能降低率的峰值发生于应变软化阶段。随着缺陷数目的增加, 弹性应变能降低总量有降低的趋势。密实岩石的破坏使弹性应变能降低总量快速增加, 随着施加应变的增加, 其增加速度变缓。含缺陷试样可以较好地模拟岩石类材料的真实破坏过程, 均质试样(不包含任何缺陷)则不然。

关键词: 岩石; 随机缺陷; 破坏过程; 声发射; 弹性应变能; 应变软化; 缺陷数目

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Influence of imperfection number on acoustic emissions and elastic strain energy decrease of rock specimens with initially random imperfections

WANG Xue-bin

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

Abstract: The acoustic emissions and elastic strain energy decrease of rock specimens with initially random material imperfections in uniaxial plane strain compression were numerically modeled by using FLAC. Beyond the failure of the imperfection that is weaker than the intact rock element, it undergoes ideal plastic behavior, while the intact rock element exhibits the linear strain-softening behavior and then the ideal plastic behavior once failure occurs. As the imperfection number increases, the peak of elastic strain energy decrease rate (elastic strain energy decrease per 10 timesteps) decreases. The steeper the post-peak stress-axial strain curve is, the higher the peak of elastic strain energy decrease rate is. The peak of elastic strain energy decrease rate occurs in strain-softening stage. As the imperfection number increases, the total elastic strain energy decrease has a decreasing tendency. The failure of intact rock elements leads to a rapid increase in the total elastic strain energy decrease. As the exerted axial strain increases, its increasing tendency becomes slow. The numerical rock specimen with initially random material imperfections can better model the actual failure process of rock material, while the homogeneous specimen cannot.

Key words: rock; random imperfection; failure process; acoustic emissions; elastic strain energy; strain-softening; imperfection number

研究人员历来关注各种缺陷对试样或结构破坏及力学行为的影响, 得到了许多有价值的结论^[1-6]。岩石

是一种或多种矿物的集合体, 内部含多种缺陷(例如: 孔洞、孔隙、裂隙或微裂纹)。缺陷的力学性质较差,

不同缺陷的力学性质各异，且缺陷的分布是随机的。在外力的作用下这些缺陷将发生核、扩展、贯通、甚至闭合。由于动态断裂的结果引起了边界条件的复杂改变，因而，利用断裂力学理论，裂纹的聚结和传播很难描述。最近，一些研究人员已考虑非均质性，采用数值方法模拟了地质体材料的破坏过程和宏观力学行为^[7-8]。通常，采用威布尔分布函数描述单元强度的随机变化。在数值模拟中，广泛采用峰后脆—塑性的本构关系，未考虑相对复杂的峰后应变软化—塑性的本构关系。

拉格朗日元法(FLAC)是一个显式的有限差分程序，可以有效地模拟地质体材料的屈服极限被达到之后的塑性流动行为。FLAC 的一个突出特点是包含了一个强有力的内嵌的编程语言 FISH。FISH 允许用户定义新的变量、函数和本构模型。为了适合特殊的需要，用户开发的 FISH 函数不仅扩展了 FLAC 的功能，而且添加了用户自定义的特色。

本文作者利用 FLAC 模拟了材料缺陷数目对具有初始随机材料缺陷岩样的声发射及弹性应变能降低的影响。利用编写的 5 个 FISH 函数于岩样内部预制初始随机材料缺陷，统计试样发生破坏的单元总数(声发射累计数)及弹性应变能降低总量，统计试样每 10 个时间步内破坏的单元数(声发射数)及每 10 个时间步内弹性应变能降低量(弹性应变能降低率)。

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如图 1 所示。岩样的高度及宽度分别为 10 cm 及 5 cm。岩样两端面是光滑的，在岩样的上端面施加常速度， $v = 5 \times 10^{-10}$ m/时间步，计算在小变形模式及平

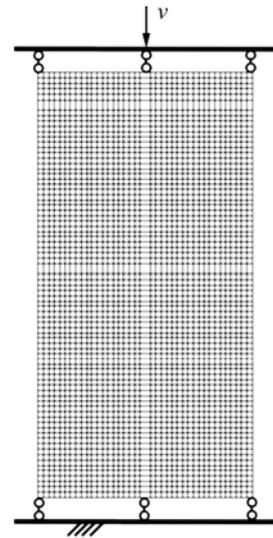


图 1 模型的几何特征及边界条件

Fig.1 Model geometry and boundary conditions

面应变状态下进行。将岩样划分为若干正方形单元，单元边长为 0.001 25 m。

本文共采用 7 个计算方案。方案 1 为均质试样(不包含材料缺陷)。在方案 2 及 3 中，随机预置缺陷 300 次，但是缺陷的位置并不相同。在方案 4 及 5 中，随机预置缺陷 500 次，但是缺陷的位置并不相同。方案 6 及 7 中，随机预置缺陷 700 次，但是缺陷的位置并不相同。图 2 所示为方案 2~7 中岩样内部的初始缺陷分布。黑色单元代表材料缺陷，白色单元代表密实岩石。经过统计，方案 2~7 的缺陷数目分别为 290、286、457、466、620 及 624。

在弹性阶段，密实岩石和材料缺陷有相同的本构关系，弹性模量取为 26.6 GPa，泊松比取为 0.21。

在 FLAC 中，粘结力和内摩擦角与塑性应变之间的关系可以任意指定。这样，可以方便地模拟岩石在

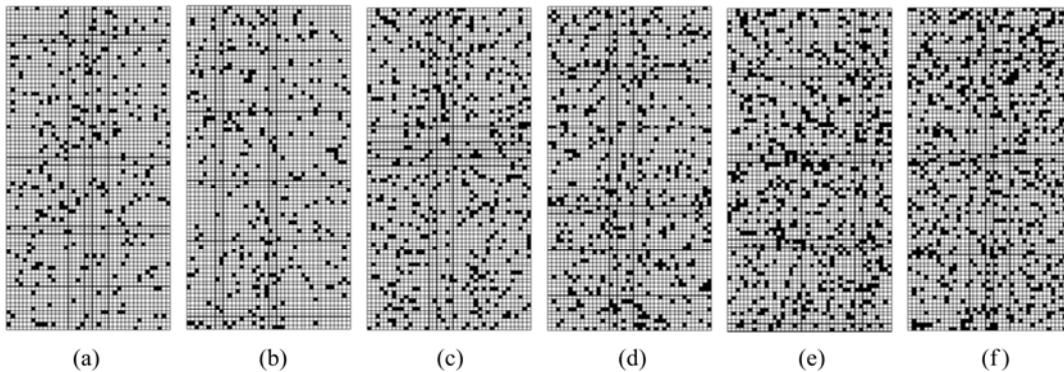


图 2 方案 2 至 7 中岩样内部的初始缺陷分布

Fig.2 Distributions of initially random imperfections within rock specimens: (a) Scheme 2; (b) Scheme 3; (c) Scheme 4; (d) Scheme 5; (e) Scheme 6; (f) Scheme 7

峰后应变软化阶段及残余阶段的力学行为。若粘结力和内摩擦角均被规定为常数, 则可以模拟理想塑性行为。在本研究中, 密实岩石一旦发生破坏先是经历线性应变软化行为, 然后是理想塑性行为。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。密实岩石发生破坏之后的粘结力、内摩擦角与塑性应变的关系见文献[9-13]。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° (分别等于密实岩石的残余粘结力及残余内摩擦角), 抗拉强度取为 0.2 MPa。

2 FISH 函数编写

本研究共采用了作者编写的 5 个 FISH 函数, 用于下列目的: 1) 于试样内部预置随机材料缺陷; 2) 计算试样每 10 个时间步内破坏的单元数(声发射数); 3) 计算破坏的单元总数(声发射累计数); 4) 计算试样每 10 个时间步内弹性应变能降低量(弹性应变能降低率); 5) 计算弹性应变能降低总量。前 3 个 FISH 函数在过去的文献[9-13]中已被采用。下面, 简要叙述后两个 FISH 函数的编程思路。

当某单元破坏之后, 在之后的任一 10 个时间步内, 若发现该单元弹性应变能(依赖于各主应力、弹性模量、泊松比及单元体积)是降低的(由于各主应力的降低), 则计算该单元在该 10 个时间步内的弹性应变能的降低量。将所有破坏单元在该 10 个时间步内的弹性应变能降低量求和, 即可以得到当前 10 个时间步内的弹性应变能降低量。上述思路即为第 4 个 FISH 函数的编程思路。

设当前的时间步为 t , 首先, 根据上述思路计算此前每 10 个时间步内的弹性应变能降低量。然后, 迭代 10 个时间步, 按照上述思路计算当前的 10 个时间步内的弹性应变能降低量。之后, 将当前的 10 个时间步内的弹性应变能降低量与此前每 10 个时间步内的弹性应变能降低量求和, 即可以得到当前的(时间步 $= t + 10$)弹性应变能降低总量。上述思路即为第 5 个 FISH 函数的编程思路。

文献[8]针对弹脆性材料计算了弹性应变能耗散率, 对于弹性应变软化材料, 不易计算出弹性应变能耗散率。但是, 可以计算出本研究中的弹性应变能降低率。对于弹脆性材料, 亦可计算出本研究中的弹性应变能降低率, 计算出的弹性应变能降低率将稍为大于文献[8]中的弹性应变能耗散率, 见图 3。

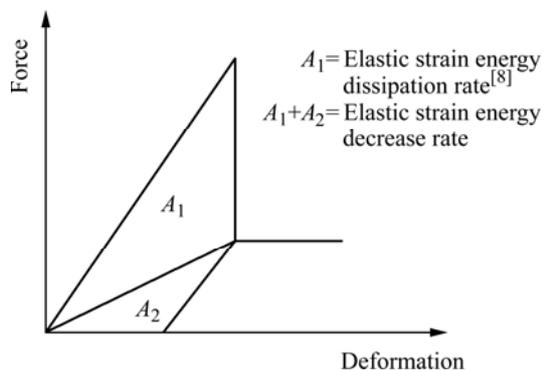


图 3 弹脆性材料的弹性应变能耗散率及弹性应变能降低率

Fig.3 Elastic strain energy dissipation rate and elastic strain energy decrease rate of elastic-brittle material

3 计算结果及分析

3.1 弹性应变能降低率—应变曲线及应力—应变曲线

图 4 至图 7 所示分别为方案 1、2、4、6 的破坏过程(图 4(a)~(d))、宏观应力—应变曲线(图 4(e)至图 7(e)中粗曲线)、弹性应变能降低率—应变曲线(图 4(e)至图 7(e)中细曲线)。

图 4(a)~(d)至图 7(a)~(d)中时间步(t)也都在各图片中给出。由各图片的 t , 易于计算出试样此时的(加载方向)应变。图 4(a)~7(a)与图 4(e)~7(e)上 a 点对应; 图 4(b)~7(b)与图 4(e)~7(e)上 b 点对应依此类推, 依此类推。黑色单元表示这些单元正在发生剪切或拉伸破坏; 灰色单元表示已经发生了剪切或拉伸破坏; 白色单元表示这些单元尚处于弹性状态。

需要指出, 为了节省篇幅和作一对比, 在图 5 至图 7(e)中也同时给出了方案 3、5、7 的弹性应变能降低率—应变曲线(图中虚曲线), 限于篇幅, 未给出方案 3、5、7 的破坏过程, 方案 3、5、7 的最终($t=12\ 000$)破坏形态见图 8。

对于均质试样(方案 1), 在 8 000 时间步之前, 试样未发生破坏(图 4(b))。当时间步达到 10 000 时, 几乎所有的单元都发生了破坏, 仅有零星的几个单元未破坏(图 4(c))。

对于含缺陷试样, 破坏是按下列方式逐渐发生的: 缺陷长大→聚合成短裂纹→形成长裂纹→形成贯通试样的裂纹。显然, 含缺陷试样的模拟结果更符合岩石类材料的破坏实际^[14-15]。

尽管在方案 2 及 3 中、方案 4 及 5 中、方案 6 及

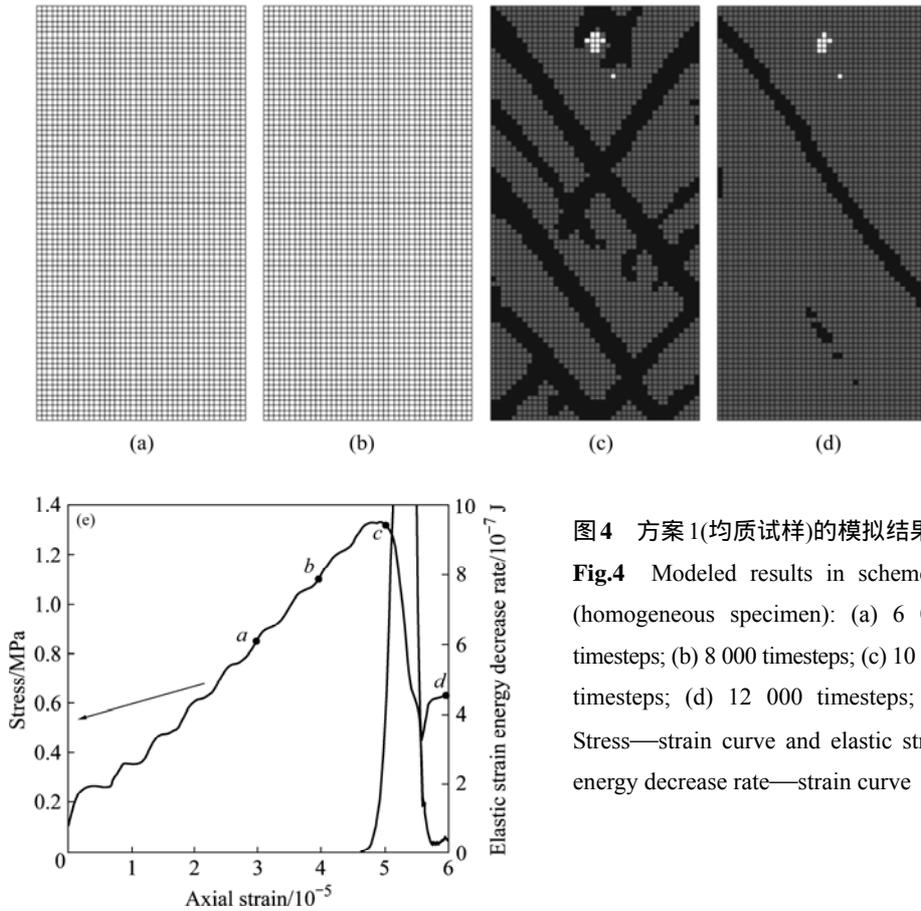


图4 方案1(均质试样)的模拟结果
Fig.4 Modeled results in scheme 1 (homogeneous specimen): (a) 6 000 timesteps; (b) 8 000 timesteps; (c) 10 000 timesteps; (d) 12 000 timesteps; (e) Stress—strain curve and elastic strain energy decrease rate—strain curve

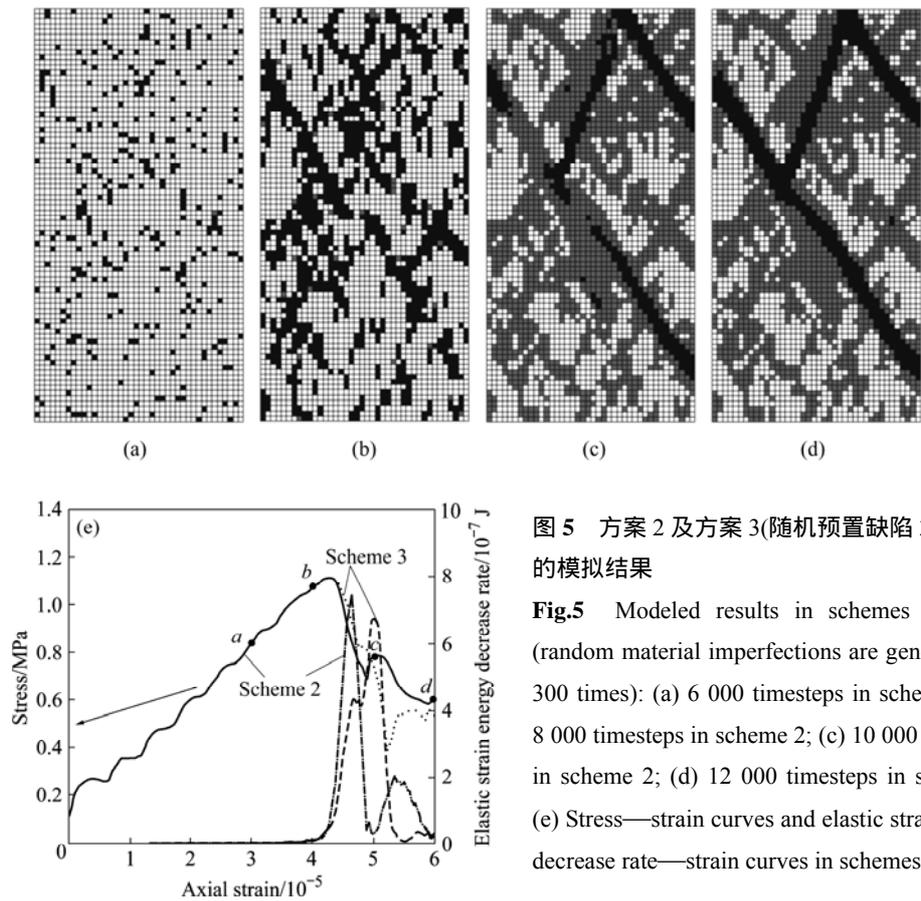


图5 方案2及方案3(随机预置缺陷300次)的模拟结果
Fig.5 Modeled results in schemes 2 and 3 (random material imperfections are generated for 300 times): (a) 6 000 timesteps in scheme 2; (b) 8 000 timesteps in scheme 2; (c) 10 000 timesteps in scheme 2; (d) 12 000 timesteps in scheme 2; (e) Stress—strain curves and elastic strain energy decrease rate—strain curves in schemes 2 and 3

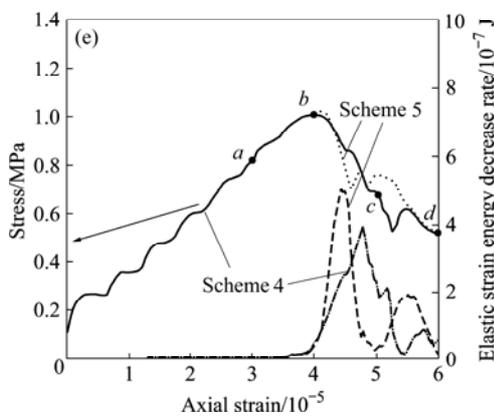
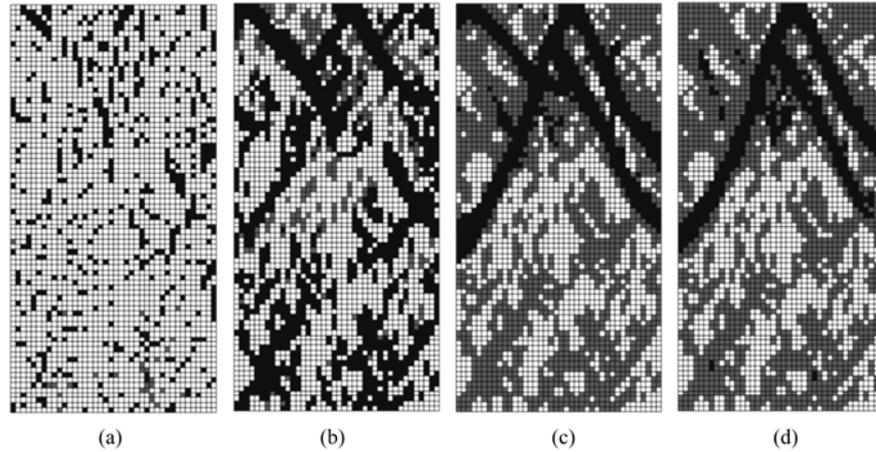


图 6 方案 4 及方案 5(随机预置缺陷 500 次)的模拟结果

Fig.6 Modeled results in schemes 4 and 5(random material imperfections are generated for 500 times): (a) 6 000 timesteps in scheme 4; (b) 8 000 timesteps in scheme 4; (c) 10 000 timesteps in scheme 4; (d) 12 000 timesteps in scheme 4; (e) Stress-strain curves and elastic strain energy decrease rate—strain curves in schemes 4 and 5

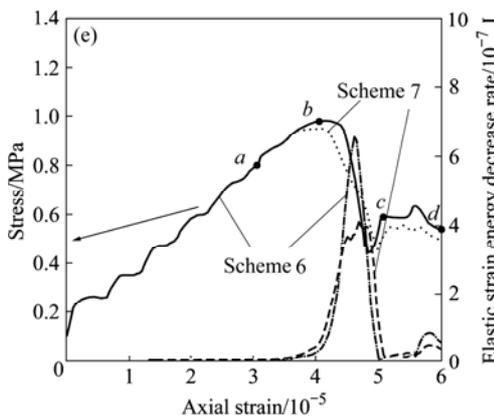
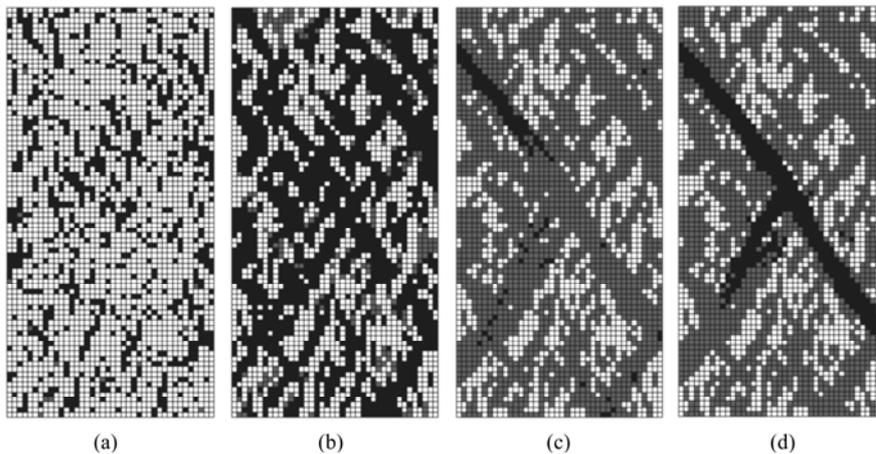


图 7 方案 6 及方案 7(随机预置缺陷 700 次)的模拟结果

Fig.7 Modeled results in schemes 6 and 7(random material imperfections are generated for 700 times): (a) 6 000 timesteps in scheme 6; (b) 8 000 timesteps in scheme 6; (c) 10 000 timesteps in scheme 6; (d) 12 000 timesteps in scheme 6; (e) Stress—strain curves and elastic strain energy decrease rate—strain curves in schemes 6 and 7

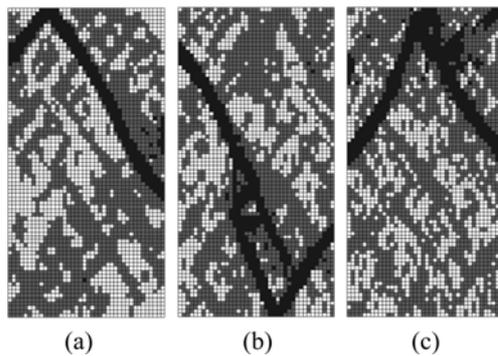


图8 方案3、5、7的最终破坏形态

Fig.8 Final failure patterns when timesteps=12 000: (a) Scheme 3; (b) Scheme 5; (c) Scheme 7

7中抽取的随机数的次数相同(分别为300次、500次及700次),但是,由于缺陷的具体位置不同,因而导致了方案2及3、方案4及5、方案6及7的应力—应变曲线的峰后部分及弹性应变能降低率—应变曲线有一定的差别。尽管如此,随着缺陷数目的增加,尚有一些规律可循。

表1所列关于弹性应变能降低及声发射的计算结果。可以发现,均质试样(方案1)弹性应变能降低率的峰值最大,达到 2.456×10^{-6} J。为了保证图4(e)至图7(e)中右手边纵坐标具有相同的刻度,图4(e)仅给出了部分弹性应变能降低率—应变曲线。

随着缺陷数目的增加,弹性应变能降低率的峰值有下降的趋势。可以想象,若试样的单元全由缺陷构成,则破坏之后,将不会有弹性应变能降低。

此外,可以发现,弹性应变能降低率的峰值发生于应变软化阶段。而且,峰后的应力—应变曲线越陡峭,则弹性应变能降低率的峰值越高,例如:在图5(e)中,方案2的峰值应力稍后的应力—应变曲线比方案3的陡峭,方案2的弹性应变能降低率的峰值比方案3

的高;在图6(e)中,方案5的峰值应力稍后的应力—应变曲线比方案4的陡峭,方案5的弹性应变能降低率的峰值比方案4的高;在图7(e)中,方案6的峰值应力稍后的应力—应变曲线比方案7的陡峭,方案6的弹性应变能降低率的峰值比方案7的高。

在图5(e)至图7(e)中,在弹性应变能降低率猛增之前,仍可以观察到微弱的弹性应变能降低现象。而且,弹性应变能降低率的猛增发生于应力的峰值之前,这具有一定的前兆意义。但是,在图4(e)中则不然,弹性应变能降低率猛增之前,未观察到弹性应变能降低现象,这是由于此时试样尚未发生破坏。

3.2 弹性应变能降低率—应变曲线与声发射数—应变曲线

图9(a)~(d)分别给出了方案1、方案2、方案4、方案6的宏观应力—应变曲线、弹性应变能降低率—应变曲线及声发射数—应变曲线。弹性应变能降低率—应变曲线的纵坐标未在图9中标出,等同于图4(e)至图7(e)右手边纵坐标。与图4(e)类似,为了保证图9(a)~(d)中右手边纵坐标具有相同的刻度,图9(a)仅给出了部分声发射数—应变曲线。

可以发现,尽管声发射数—应变曲线及弹性应变能降低率—应变曲线都可以在某方面表示岩样的破坏过程,但是二者却有重大的差别。上文提过,弹性应变能降低率—应变曲线的峰值发生在应力降低的过程之中,而声发射数—应变曲线在软化阶段没有明显的突增(这表明在软化阶段,未发生破坏的单元不再大量发生破坏,试样的变形主要集中于宏观破裂带上,这一过程仅能判断少量阻碍试样进一步变形的单元),其突增发生于峰前。

当应变在 1×10^{-5} 与 2×10^{-5} 之间时,声发射数发生突然的增加,这是由于缺陷的破坏。随后,试样处于平静状态,之后发生由短裂纹合并成较长的裂纹的

表1 关于弹性应变能降低及声发射的计算结果

Table 1 Numerical results of elastic strain energy decrease and acoustic emissions

Scheme	Peak elastic strain energy decrease rate/ 10^{-7} J	Total elastic strain energy decrease/ 10^{-5} J	Peak acoustic emission count	Accumulated acoustic emission count
1	24.56	17.86	123	3 191
2	7.429	7.626	16	1 945
3	6.765	6.010	19	1 984
4	3.893	6.480	35	2 100
5	5.015	6.847	26	2 172
6	6.555	6.666	26	2 227
7	4.122	6.289	39	2 161

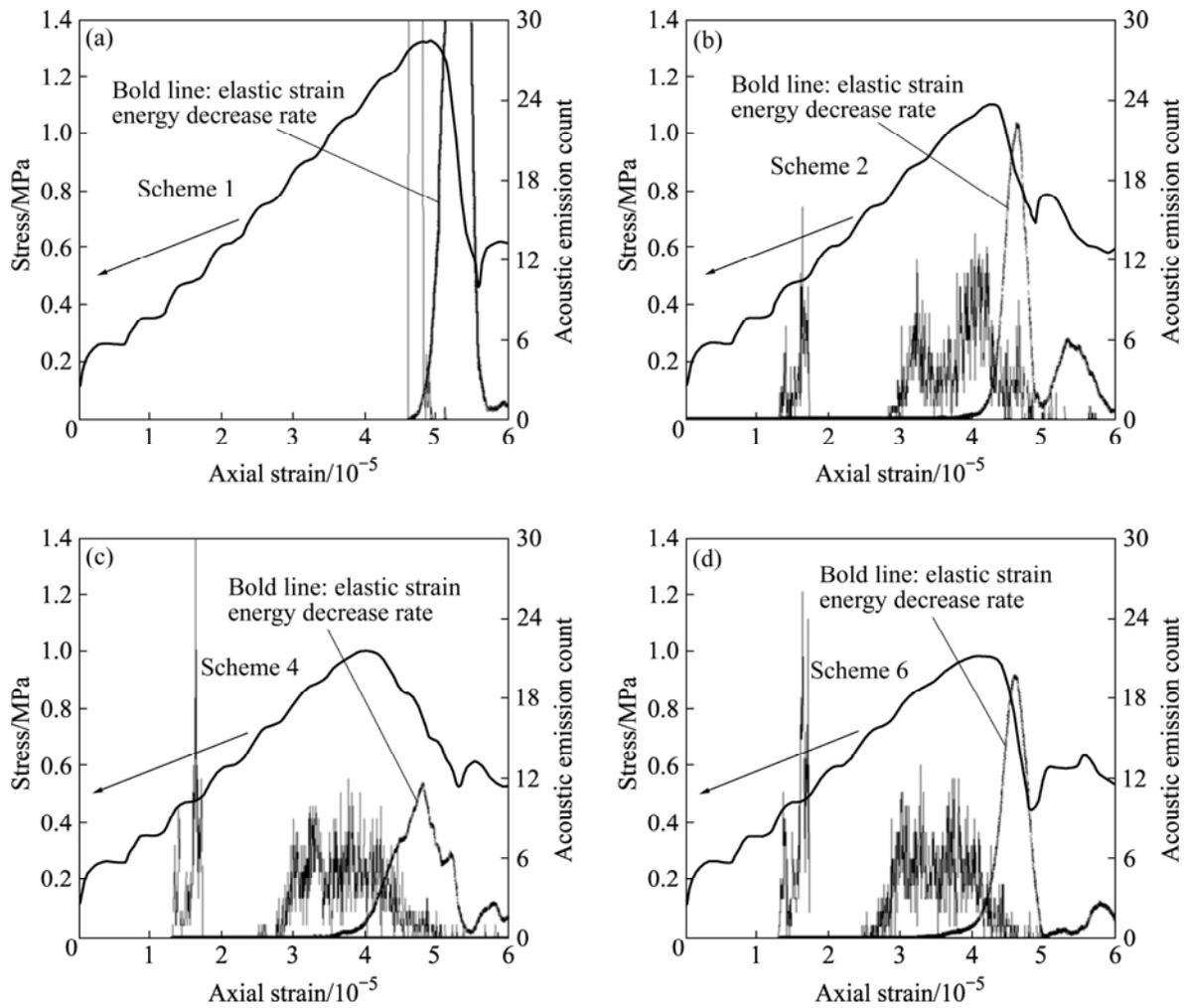


图 9 应力—应变曲线、弹性应变能降低率—应变曲线及声发射数—应变曲线

Fig.9 Stress—strain curves, elastic strain energy decrease rate—strain curves and acoustic emission count—strain curves

破坏过程,最终形成贯通试样的长裂纹。在软化阶段,贯通的长裂纹已形成,未破坏的裂纹带之外的弹性单元基本上不再发生破坏。

3.3 弹性应变能降低总量及声发射累计数

图 10(a)~(b)分别给出了 7 个方案的弹性应变能降低总量—应变曲线及声发射累计数—应变曲线。表 1 也给出了当时间步达到 12 000 时(即应变为 6×10^{-5})的弹性应变能降低总量及破坏的单元总数。

可以发现,最终均质试样(方案 1)的弹性应变能降低总量最高,可达 1.786×10^{-4} J。最终的弹性应变能降低总量由高至低的方案依次为:方案 1、方案 3、方案 2、方案 5、方案 6、方案 4 及方案 7。上文提过,在方案 2 及 3 中、方案 4 及 5 中、方案 6 及 7 中抽取的随机数的次数相同(分别为 300 次、500 次、700 次)。因而,随着缺陷数目的增加,弹性应变能降低总量有

降低的趋势。

另外,由图 10(a)可以发现,弹性应变能降低总量—应变曲线具有下列特点。首先,在缺陷破坏之前,未观察到弹性应变能降低现象;然后,当缺陷破坏之后,可观察到微弱的弹性应变能降低现象;之后,弹性应变能降低总量快速增加(弹性应变能降低总量—应变曲线呈现上凹现象),这是由于密实岩石发生了破坏;随后,曲线几乎变成直线(弹性应变能降低总量增加速度变缓);接下来,增加速度继续变缓,直到弹性应变能降低总量—应变曲线呈现上凸现象。

由图 10(b)可以发现,当时间步达到 12 000 时,均质试样(方案 1)的破坏单元总数为 3 191,仅有 9 个单元未破坏,见图 4(d)。其它方案的最终破坏单元总数均小于方案 1。方案 2 至 7 的声发射累计数—应变曲线经历了下列 4 个阶段。首先,缺陷发生破坏,声发射累计数第 1 次发生突增;随后,试样处于平静状

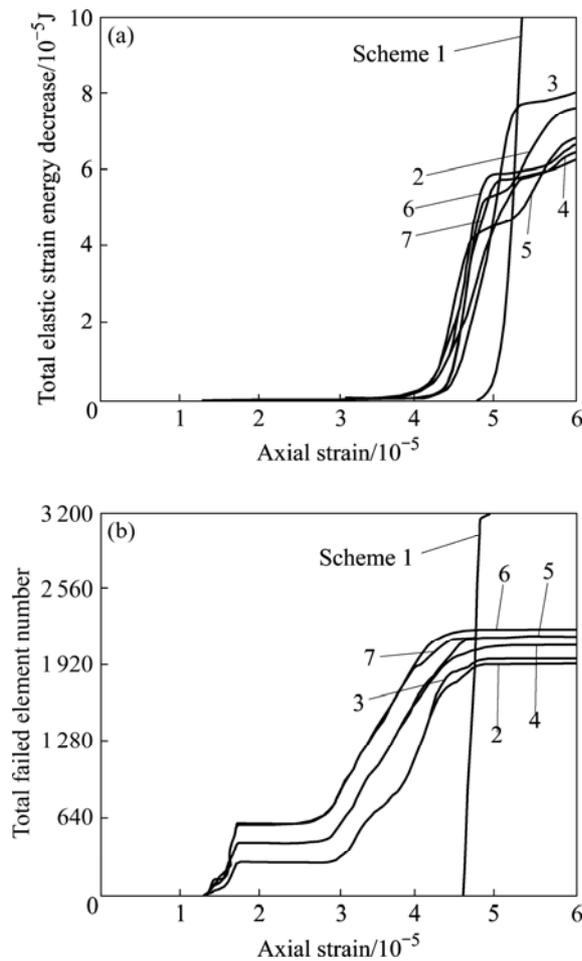


图 10 弹性应变能降低总量—应变曲线

Fig.10 Total elastic strain energy decrease—strain curves (a) and total failed element number—strain curves (b)

态。之后，缺陷长大，破坏的单元聚合，短裂纹合并成长裂纹，直到贯通试样；最后，试样再次处于平静状态。这一模拟结果与岩石类材料的真实破坏过程^[14-15]非常类似。对于含缺陷试样而言，随着缺陷数目的增加，试样的声发射累计数有增加的趋势。

对于均质试样(方案 1)，其声发射累计数最高，几乎全部单元都发生了破坏，几乎未观察到破坏的前兆，这离岩石类材料的破坏实际^[14-15]有一定的差别。

4 结 论

1) 随着缺陷数目的增加，弹性应变能降低率的峰值有下降的趋势。峰后的应力—应变曲线越陡峭，弹性应变能降低率的峰值越高。声发射数—应变曲线在软化阶段没有明显的突增，其突增发生于峰前。然而，弹性应变能降低率的峰值发生于应变软化阶段。

2) 随着缺陷数目的增加，弹性应变能降低总量有降低的趋势。密实岩石的破坏使弹性应变能降低总量快速增加，随着应变的增加，其增加速度变缓。对于含缺陷试样，缺陷数目越多，破坏单元数越多。含缺陷试样可以较好地模拟岩石类材料的真实破坏过程。

3) 和含缺陷试样相比，均质试样(不包含任何缺陷)的声发射累计数、弹性应变能降低总量、弹性应变能降低率最高。均质试样的破坏更加突然，几乎没有前兆，最终几乎所有的单元都发生了破坏，这离岩石类材料的真实破坏过程有一定的差别。

REFERENCES

- [1] BELYTSCHKO T, CHIANG H Y, PLASKACZ E. High-resolution 2-dimensional shear-band computations—imperfections and mesh dependence[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, 119(1/2): 1–15.
- [2] TVERGAARD V, REDANZ P. Shear band instabilities in compacted metal powder with or without interparticle cohesion[J]. *Journal de Physique IV*, 2001, 11(4): 339–347.
- [3] HU N, MOLINARI J F. Shear bands in dense metallic granular materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(3): 499–531.
- [4] PAPADOPOULOS V, PAPADRAKAKIS M. The effect of material and thickness variability on the bulking load of shells with random initial imperfections[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194: 1405–1426.
- [5] WANG W M, SLUYS L J, DE BORST R. Interaction between material length scale and imperfection size for localisation phenomena in viscoplastic media[J]. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 1996, 15(3): 447–464.
- [6] WANG W M, SLUYS L J, DE BORST R. Viscoplasticity for instabilities due to strain softening and strain-rate softening[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1997, 40(20): 3839–3864.
- [7] TANG C A, KOU S Q. Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 61(3/4): 311–324.
- [8] FANG Z, HARRISON J P. Development of a local degradation approach to the modeling of brittle fracture in heterogeneous rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4): 443–457.
- [9] 王学滨. 具有初始随机材料缺陷的矿柱的渐进破坏模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2): 196–200.
WANG Xue-bin. Numerical simulation of progressive failure in mine pillars having initially random material imperfections[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008,

- 37(2): 196–200.
- [10] 王学滨. 扩容角对初始随机材料缺陷岩石试样破坏过程及力学行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1063–1071. WANG Xue-bin. Effects of dilation angle on failure process and mechanical behavior for rock specimen with random material imperfections[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1063–1071.
- [11] 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.
- [12] WANG X B. Effects of post-peak brittleness on failure and overall deformational characteristics for heterogeneous rock specimen with initial random material imperfections[C]// International workshop of 5th Computational Mechanics in Geotechnical Engineering. London: Taylor & Francis Group (Balkema), 2007: 65–76.
- [13] WANG X B. Effects of pore pressure on failure process and axially deformational characteristic for rock specimen with random material imperfections[C]// Water-Rock Interaction (Proceedings of the 12th International Symposium on Water–Rock Interaction). London: Taylor & Francis Group (Balkema), 2007: 1421–1426.
- [14] SCHOLZ C H. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(4): 1417–1432.
- [15] 张 清. 岩石力学基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986. ZHANG Qing. Fundamentals of rock mechanics[M]. Beijing: China Railway Press, 1986.

(编辑 何学锋)