

岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响*

Numerical simulation on influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure

傅宇方¹, 梁正召¹, 唐春安^{1,2}

(1. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110006; 2. 中国科学院力学研究所 非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京 100080)

摘要: 运用岩石破裂过程分析系统, 研究了岩石介质非均匀性对宏观力学行为的影响。通过对均质度系数 $m = 1.5$ 的 10 个样本破裂过程的模拟, 发现样本的宏观力学行为在变形初期只有微弱的统计涨落, 但在失稳阶段表现出显著的样本个性行为。对 8 种不同均质度系数的 80 个样本破裂过程的模拟结果表明, 岩石介质的非均匀性对岩样宏观强度和变形非线性行为有显著影响, 而且也显著影响试样破裂模式。随着均质度系数的提高, 宏观强度呈现指数规律上升, 宏观变形的线性规律增强, 主破裂呈脆断模式。

关键词: 非均匀性; 破裂过程; 变形局部化; 变形非线性

中图分类号: O 346

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2000)06-0705-06

作者简介: 傅宇方, 男, 1972 年生, 博士研究生。现主要从事岩石破裂过程的理论与实验研究。

FU Yu-fang¹, LIANG Zheng-zhao¹, TANG Chun-an^{1,2}

(1. Center for Rockburst and Induced Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006, China; 2. Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: A newly developed numerical method, RFPA^{2D}, used for analysis of rock failure process is applied to study the influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure. The failure procedures of rock sample with various kinds of heterogeneity are simulated. The results show that the non-linear behaviour of rock deformation and fracture pattern are more pronounced in more heterogeneous cases than in homogeneous cases. With increase in the degree of rock homogeneity the macroscopic strength of rock rises following exponent function, macroscopic linearity becomes more obvious, and the macroscopic failure process presents markedly brittle behavior. The numerical tests on 10 samples with same homogeneity index show that the deformation and failure behavior before reaching the maximum strength is nearly the same but varies greatly during the unstable failure process.

Key words: heterogeneity; failure process; deformation localization; non-linearity

1 前言*

岩石是一种具有内部结构的非均匀介质, 在外载荷作用下, 岩石内部微缺陷的成核、扩展以及相互之间的作用决定了岩石的宏观变形、破裂特性。尽管人们在岩石破裂的研究方面取得了诸多有益的成果^[1~4]。但是, 多年来各种理论一直在均匀介质假设基础上研究局部破坏, 很少涉及岩石自身非均匀性引起的应力分布非均匀性和由此诱发的局部破坏。实际上, 地震孕育、发生过程就是一个典型的破坏局部化和破坏演化问题。但过去的许多地震工作者从玻璃的脆性破坏实验出发, 强调地震是一种没有任何涉及前兆的突然脆性破坏, 所以产生了地震预测是不可能的悲观(Pessimism)观点^[5]。Mogi 早在 70 年代就批驳过这种观点。他指出, 地壳介质不是玻璃, 而是一种复杂的含有诸多断层、弱带的非均匀介质。这些非均匀介质在主破裂发生前有许多前兆现象(如声发射)可被观测到, 一些观测到的前兆信息可用于预测地震, 这就是后来形成的所谓的地震可预测的乐观(Optimism)观点^[5]。是否

考虑非均匀性, 将会得到截然不同的结果。对采矿等岩土工程中诸多同破坏有关的问题而言, 破裂前兆和破裂后承载能力弱化是岩石力学所关心的重要问题。因此, 作为引起破坏原因之一的非均匀性是岩石力学研究中不容忽视的重要因素。

文献[3]指出:“岩石力学最根本的还在于弄清天然岩石的基本特性, 这是检验各种理论和概念、技术和方法的正确性的客观基础。这也正是岩石力学发展的关键课题”。但是, 作为岩石的基本特性之一的非均匀性尚没有成熟的理论方法进行描述。目前, 基于细观结构考虑的数值方法被看成是解决这一问题的有效途径, 其特点在于引入简单的基元本构模型和简单的破坏准则, 同时考虑介质的非均匀性。在这方面已有不少有益的成果, 如 DLNM 模型^[6], Rule-based 模型^[7,8], Micromechanics model^[9], PFC 模型^[10]等。但是, 这些模型均为标量模型, 仅能够考虑拉伸破坏, 尚不能考虑剪

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49974009; 59525408); 国家重点基础研究发展规划项目(973)子课题(G19980407000)

收稿日期: 1999-10-08

切以及拉剪复合破坏的影响。因此, 这些模型在实际应用中受到了限制。

岩石破坏是一个损伤不断产生和宏观裂纹形成的过程。在这一过程中, 细观基元属性的渐进式变化对宏观力学行为产生影响。因此, 从细观非均匀性与宏观力学行为两个层次考察岩石破裂过程, 将有助于深入了解损伤和破裂机制。基于这一点和对岩石破裂物理机制的认识, 东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发了岩石破裂过程分析系统 RFPA (rock failure process analysis)。

2 数值模拟方法简述

2.1 基本思想

对于岩石类非均匀材料的破坏问题, 为了考虑非均匀性对破坏的影响, 可以从低层次的尺度去研究高层次尺度的力学行为变化规律。将细观力学的思想^[11]应用到岩石破坏问题中, 假定细观尺度的基元力学性质服从某种既定的分布, 并沿用连续介质力学方法描述基元的行为, 通过弹性模量和强度等力学性质的弱化或退化描述基元的损伤; 引入简单的细观本构关系(如弹脆性本构关系)。虽然基元的力学行为比较简单, 但宏观复杂的破坏现象可能通过它们的相互作用反映出来。因此, 岩石破裂过程分析系统 RFPA 的原则是^[12, 13]:

(1) 岩石是一种细观上非均匀的无序材料, 引入统计分布规律可对其进行描述;

(2) 基元损伤是材料弹性模量和强度的改变, 通过弹性损伤模型可描述这种力学属性弱化;

(3) 假定基元破坏前和破坏后的材料均为各向同性体(但宏观材料并非一定是各向同性体)。

2.2 本构模型

在不同的应力组合条件下, 岩石的破坏表现出剪切和拉伸两种形式。通常, 可以利用库仑准则判别压缩破坏; 利用最大拉应力准则判别拉伸破坏。因此, 在本文中采用修正的库仑准则(可考虑拉伸破坏)作为基元破坏判据, 表达式如式(1)。其中 σ_c 为单轴抗压强度; σ_t 为单轴抗拉强度, $\sigma_c = \lambda |\sigma_t|$, λ 为拉压比; φ 为内摩擦角; σ_1, σ_3 为最大、最小主应力。由于岩石是一种易拉伸破坏而耐压缩的材料, 在所选择的破坏准则中, 拉伸判据比剪切判据具有更高的优先级。

$$\left| \begin{array}{l} \sigma_3 \leq \sigma_t, \sigma_3 \leq 0 \\ \text{或} \quad \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \geq \sigma_c \end{array} \right. \quad (1)$$

在上述两种破坏发生后, 其强度和弹性模量的弱化将具有不同的形式。对于出现剪切和拉伸破坏的岩

石基元将满足如下假设: ①破坏后基元具有一定的残余单轴压缩和拉伸强度 σ'_c 和 σ'_t ; ②破坏后岩石基元仍然具有线弹性性质; ③破坏后瞬间基元的应力状态由残余强度准则决定, 即满足式(1), 其中 σ_c, σ_t 由 σ'_c, σ'_t 代替, 其关系见图 1。

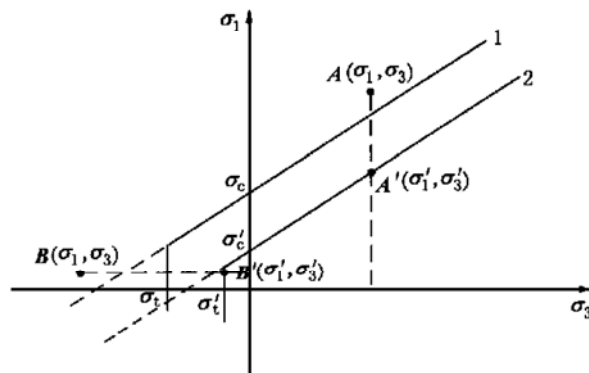
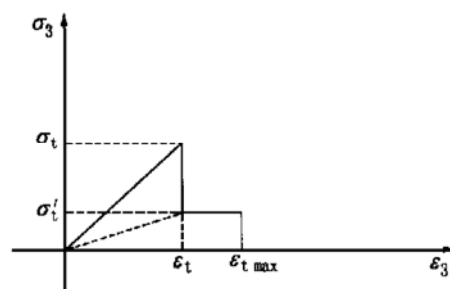


图 1 修正的 Coulomb 准则

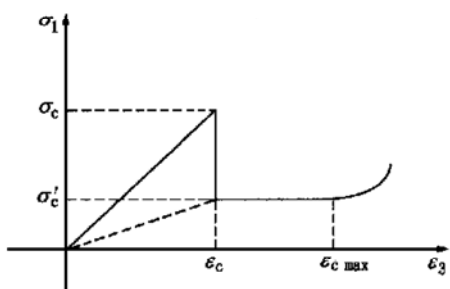
Fig. 1 Revised Coulomb Law

因此, 基元破坏后的强度可通过引入残余强度系数 ζ 来计算, 即: $\sigma'_c = \zeta \sigma_c$, $\sigma'_t = \zeta \sigma_t$; 基元破坏后的弹性模量下降可根据假设 ②运用弹性本构关系计算。

在一维条件下, 岩石的力学行为可见图 2。由于岩石材料在达到一定的拉伸应力后, 发生断裂。因此, 在拉伸破坏时引入分离应变系数 ν , 当 $\epsilon_3 \leq \epsilon_{t \max} = \nu \epsilon_t$ 后, 基元弹性模量 $E = 0$; 相反, 在实际中材料所承受的压缩应力达到一定程度后, 将会出现应力的再次



(a) 拉伸条件下



(b) 压缩条件下

图 2 岩石的力学行为

Fig. 2 Mechanical behavior of rock

升高。对于这种情况,可采用增加弹性模量的方法来处理。因此,又引入接触应变系数 η , 当 $\varepsilon_i \geq \varepsilon_{\max} = \eta \varepsilon_c$ 后,弹性模量开始递增。

2.3 基元赋值

文献[12~14]认为:岩石材料细观非均匀性是产生宏观非线性的主要原因。这种非均匀性使得岩石材料在承载过程中产生不断变化的非均匀应力场,造成细观基元从无序的、随机的破坏向有序的、集中的破坏发展。基于此,RFPA系统引入了Weibull分布函数 $\varphi(m, \beta_0, \beta)$ 描述岩石基元力学性质的非均匀性,其中 m 为均质度系数,反映材料构成基元力学性质的差别程度; β_0 为构成材料基元力学性质的平均值(如 E_0 , σ_0); β 为材料基元力学性质参数。采用 Monte-Carlo 方法对基元进行随机赋值,具体见文献[15]。

3 模型建立和方案选择

笔者采用9种均质度系数的岩样(样本数量为10)研究非均匀性对破裂过程的影响,方案见表1。图3反映了均质度 m 为1.1, 3.0, 7.0, 15.0的材料基元弹性模量分布形式,由图3可以看出,随着均质度的提高,基元间的力学性质(弹性模量)差别越来越小,即材料越来越均质。为了消除随机分布的偶然误差影响,保证计算结果的可靠性,以及研究细观结构随机性对宏观破裂的影响,对每个模型采用10种不同的种子值(反映了宏观力学性质相同的介质的细观结构随机性)进行计算,将10组计算结果的平均值作为最终分析的依据。

表1 模型基本力学性质参数表

Table 1 Mechanical parameters of model

力学参数	参数值
m	1.1, 1.5, 2.0, 3.0, 7.0, 15.0, 30.0, 80.0, 200.0
E_0/MPa	60000
σ_0/MPa	150
μ_0	0.25

注: E_0 , σ_0 , μ_0 分别代表了材料构成基元的弹性模量、强度、泊松比的平均值

本文采用单轴受压的平面应力模型,岩样尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,划分为 100×50 个网格。整个加载过程采用位移控制的加载方式,每步加载位移量 $\Delta s = 0.002\text{ mm}$ 。加载总步数依具体方案而定。模型中基元材料的拉、压强度比为 $1/10$,内摩擦角为 30° 。

4 计算结果分析

数值模拟分两步:①在均质度系数一定的情况下,研究细观结构随机性对宏观力学行为的影响;②研究不同均质度系数即非均匀性对宏观力学行为的影响。

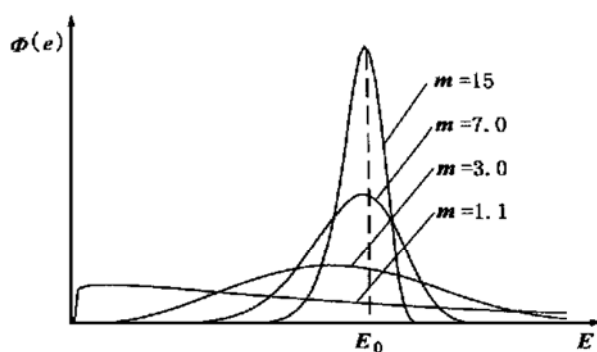


图3 不同均质度材料基元弹性模量的分布

Fig. 3 Distribution of moduli of sample with different homogeneity indexes

4.1 细观结构随机性对宏观力学行为的影响

为了研究在力学性质参数分布相同条件下(即Weibull分布函数的各项参数保持不变)材料细观结构随机性对宏观计算结果的影响,研究中对每一试样采用了10个种子值进行计算,每一个种子值代表了一种细观结构的排列模式。以岩样2的10个样本为例,图4,5是岩样2的10个不同种子值的应力-应变曲线和破裂模式图。从整体加载过程来看,每一个岩样均经历了线性、非线性、失稳、残余变形4个阶段。模拟结果表明,在达到强度极限前的线性阶段和部分非线性阶段,曲线重合得非常好,说明加载初期的低损伤阶段,材料结构的排列模式尚未出现严重的破损,只有微弱的统计涨落,对宏观行为尚无显著影响。但是经过A点后,由于微破裂的发展,不同材料结构排列模式的影响作用开始逐渐表现出来,使得岩样的宏观力学行为表现出显著差别,呈现样本个性行为。尽管峰值载荷基本上在平均值23.52 MPa上下波动,但达到峰值载荷后各条曲线的弱化规律表现出较大的离散性。有些样本弱化过程比较快(样本2,4,5),具有突变性特征,但大多数样本的弱化过程比较平稳,是一个渐进的破裂过程。在残余变形阶段,各条曲线的残余强度有

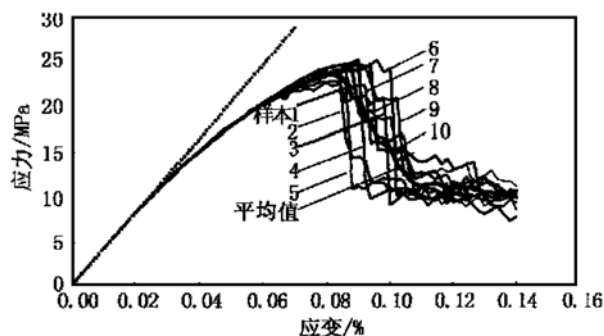


图4 $m = 1.5$ 试样在10种种子值条件下应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of samples with homogeneity index $m = 1.5$ under different random seeds

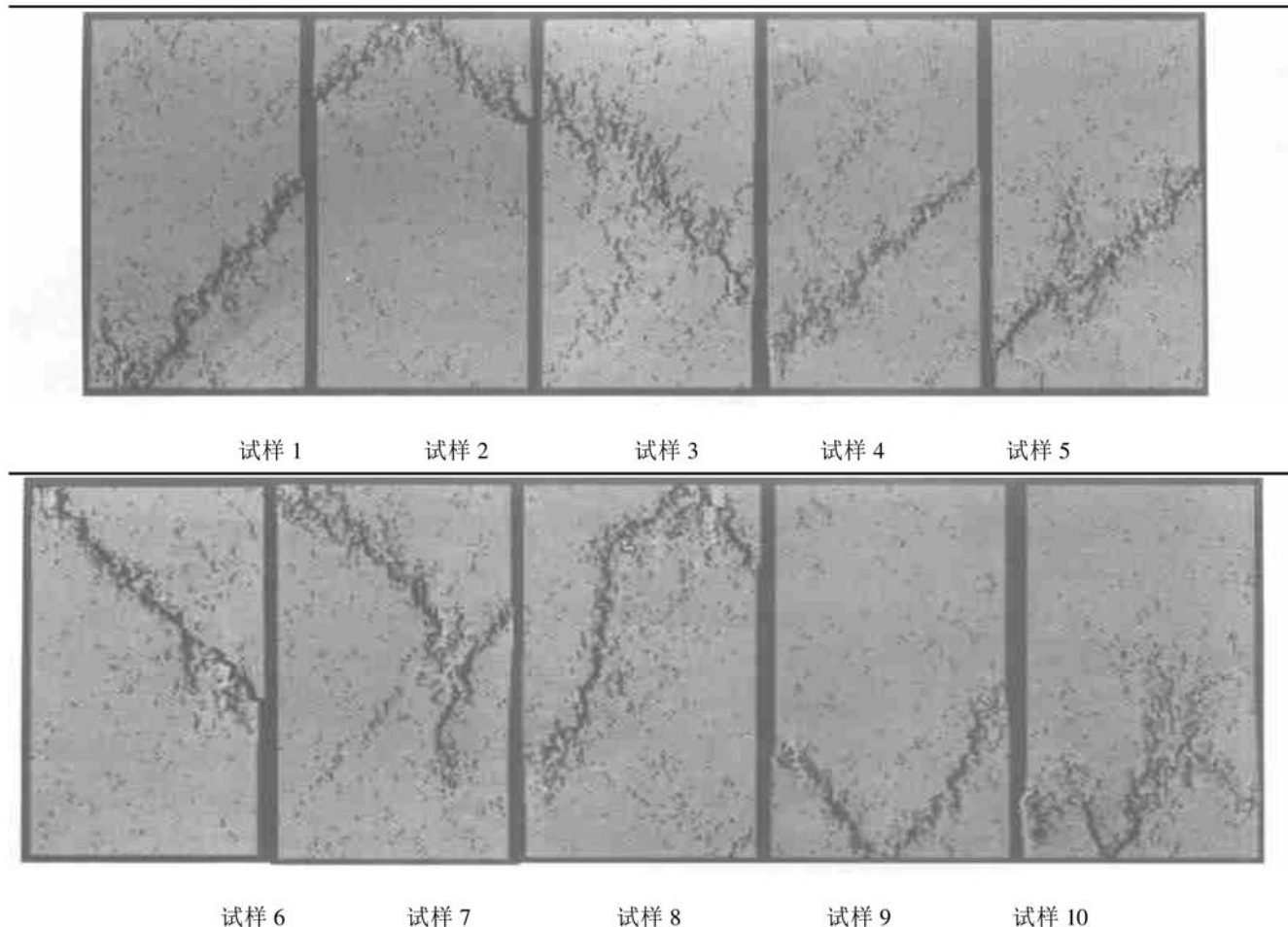


图 5 均质度 $m = 1.5$ 试样在 10 种不同种子值条件下的破裂模式

Fig. 5 The fracture pattern of samples with homogeneity index $m = 1.5$ under different random seeds

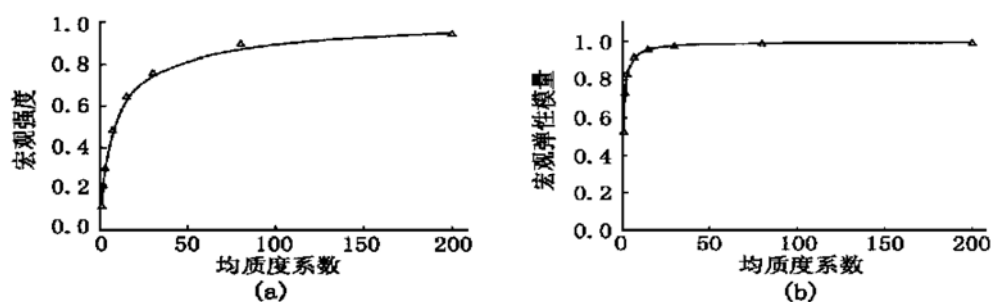


图 6 均质度系数对岩样强度特征的影响

Fig. 6 The influence of homogeneity index on strength characteristic

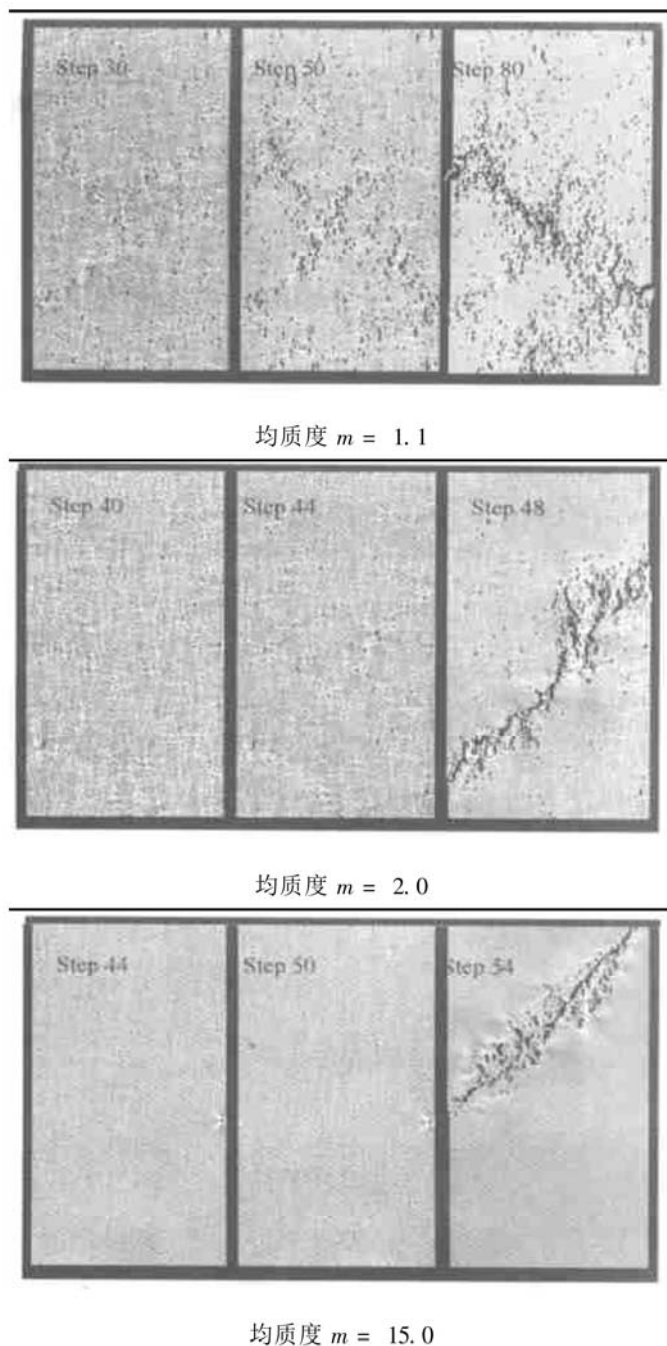
一定的波动,但是发展逐渐趋于一个确定值。综合考察整个加载过程,宏观行为的初期和残余阶段的性质对基元排列的结构模式不敏感,但是接近峰值和破坏后的弱化行为对基元排列的结构模式十分敏感,这一点也正说明峰值载荷后的弱化阶段是一个非常不稳定的阶段,结构模式上的细微差别将导致截然不同的弱化发展方式,这一点同文献[16]的观点是一致的。

图 5 展示了均质度系数 $m = 1.5$ 的 10 个样本宏观破裂模式的模拟结果,破裂模式主要表现为楔形破裂面型和近 45° 的单一破裂面型。看来宏观破裂模式对材料结构排列模式比较敏感,每一种结构模式的破

裂方式均不相同。这说明在实验室中,即便是同一块岩石中采取的试样,宏观破裂形式也表现出很大的随机性,很难有完全一致的破裂形式。实验结果表明,岩石类材料细观结构非均匀性是影响材料宏观破裂模式的重要因素,它解释了实验中岩石试样宏观强度和破裂模式多样性和随机性的本质原因,因此研究岩石破裂,特别是破裂的演化过程就不能忽略岩石非均匀性这一基本特征的影响。

4.2 非均匀性对宏观力学行为的影响

图 6 为 8 种不同均质度岩样经归一化处理后的宏观强度、弹性模量与均质度系数间关系曲线。从曲线



图中单元的亮度代表应力水平的高低
黑色代表一个单元破坏

图7 $m = 1.1, 2.0, 15.0$ 时岩样破裂过程
RFPA 模拟结果——应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of failure process of sample
with homogeneity indexes 1.1, 2.0, 15.0

的发展趋势可以看出,随着均质度系数的提高,基元之间的力学性质差别缩小,岩石的宏观强度和弹性模量逐渐趋近于岩样基元的强度和弹性模量平均值。在均质度系数比较低的条件下,构成材料的基元的力学性质之间差别较大,尽管在外载荷恒定的条件下,由于基元力学性质的离散性,在材料内部仍然会形成分布不均匀的应力场,在局部集中应力的作用下,强度较低区域基元也要发生破坏,众多这种情况的发生使得岩样

宏观破坏规律变得复杂,宏观变形非线性增强,破裂过程呈现弥散性。基元破坏的数量增加,宏观强度随之降低。

4.3 非均匀性对破裂过程的影响

因篇幅有限,图7只显示了均质度 $m = 1.1, 2.0$ 和 15.0 的岩样在压缩载荷作用下破裂过程的模拟结果。图8为6种具有不同均质度系数岩样的应力-应变和声发射-应变曲线。

从图7可以看出,应力场和变形场明显地受岩石非均匀性的影响。随着均质度系数的提高,变形局部化由弥散性分布逐渐集中在特定的区域,主要受高应力场控制,脆性破坏特征表现强烈。随着破裂的发展,其迁移规律更为复杂。均质度系数低时,岩样主破裂发生前破坏的基元数量多,其分布表现出无序、随机的特点;主破裂产生的宏观裂纹分支多,且不集中。随着均质度系数的提高,主破裂前的破坏基元数量逐渐降低,主破裂产生的宏观裂纹分支减少,且集中在某个区域内。

模拟结果(图8)表明,随着均质度系数的提高,宏观破裂前变形的线性增强,非线性及声发射出现得较晚,声发射的数量较少。在主破裂发生后,声发射持续产生,主破裂发生后仍然有声发射发生,这同文献[5]的实验结果非常一致。模拟结果还表明,岩样的宏观刚度和强度明显地受岩石非均匀性的影响,均质度降低,岩样的整体刚度降低(同文献[15]的理论结果一致),宏观强度同时也降低。非均匀材料主破裂发生后,宏观强度的降低是逐渐的,表现出显著的非线性波动。均匀材料在达到峰值强度后立刻出现失稳破坏,破坏后的声发射极少或没有,表现出极强的脆性破坏特性。

5 结 论

(1) 在相同的均质度条件下,材料细观结构的随机性对岩样的宏观强度有较小影响,但宏观破裂模式有一定离散性。此外,材料细观结构的随机性对峰值强度前的宏观力学行为影响较小;在达到峰值强度后,岩样个性行为对材料细观结构的随机性具有很强的敏感性,岩样的宏观破坏呈现突变特征,具有不同的破裂模式,力学行为呈现出显著的样本个性行为。

(2) 岩样的宏观变形非线性行为和强度特征取决于岩石的非均匀程度。随着均质度系数的降低,宏观变形的非线性增强;随着均质度系数的提高,岩样的宏观强度和宏观弹性模量增加,且逐渐趋近于一个稳定值。随着均质度的增加,主破裂前的前兆信息由显著逐渐减少,甚至没有。岩石试样的韧性随着均质度系数的

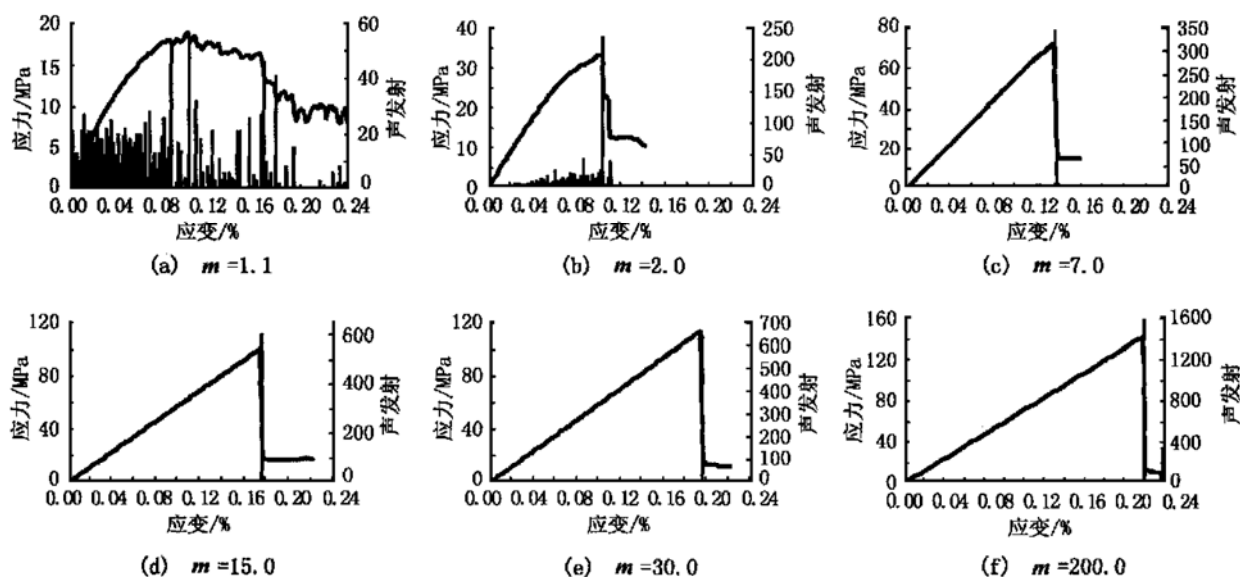


图8 不同均质度岩样的应力-应变曲线和声发射-应变曲线的 RFPA 模拟结果

Fig. 8 Stress-strain curves and AE-strain curves of samples with different homogeneity indexes

降低而逐渐增强;随着均质度系数的提高,岩石的宏观破裂表现为集中破裂模式;反之,则表现出弥散性。

(3) 研究表明,即便宏观力学性质大致相同条件下,样本细观性质的随机性使岩样的宏观行为和破裂过程表现出迥然不同的特点。对于岩石这种非均匀性极其显著的材料,均质度系数极高的岩样主破裂发生前几乎没有前兆发生,而均质度系数低的材料主破裂发生前前兆信息丰富且显著,这个结果表明只有引入非均匀性才能研究主破裂发生前的前兆信息和主破裂后的弱化行为。这一点对于采矿工程中的岩爆和地震预报问题的研究极其重要。正如 Mogi 指出^[4]:“认识非均匀材料(如岩石、混凝土)的破坏发生机制对于理解地震发生过程是非常重要的”。同样,对于预防岩土工程破坏和地质灾害,研究非均匀性影响同样也是一项有价值的应用基础研究,值得进一步探讨。

参考文献:

- [1] Cook N G W. The failure of rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1965, 2: 389~ 403.
- [2] 陈颀, 阎红. 实验室中岩石破裂的变形前兆[J]. 地球物理学报, 1989, 32(增刊): 246~ 251.
- [3] 陶振宇. 试论岩石力学的最新进展[J]. 力学进展, 1992, 22(2): 161~ 172.
- [4] 张玉卓, 等. 岩石的细观断裂机制与模糊强度理论[R]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1992.
- [5] Mogi k. Earthquake prediction[M]. Tokyo: Academic Press, 1985.
- [6] Kunsoo Kim, Yao Cunying. Effect of micromechanical property

variation on fracture processes in simple tension[A]. Daemen, Schultz, eds. Rock mechanics[C]. Rotterdam: Balkema, 1995. 471~ 476.

- [7] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part I — A non-linear rule-based model[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 837~ 848.
- [8] Blair S C, Cook N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: part II — Effect of microscale heterogeneity on macroscopic deformation[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(7): 849~ 861.
- [9] Liu Z, Myer L R, Cook N G W. Numerical simulation of the effect of heterogeneities on macrobehavior of granular materials[A]. Siriwardane, Zaman, eds. Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]. Rotterdam: Balkema, 1994. 611~ 616.
- [10] Fairhurst C. Geomaterials and recent development in micromechanical numerical models[J]. News Journal, 1997, 4(2): 11~ 14.
- [11] 杨卫. 细观力学和损伤力学[J]. 力学进展, 1992, 22(1): 1~ 9.
- [12] Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(2): 249~ 261.
- [13] 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J]. 力学与实践, 1999, 21(2): 21~ 24.
- [14] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [15] 傅宇方. 岩石破裂过程的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1997.
- [16] 夏蒙蒙, 韩闻生, 柯孕久, 白以龙. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变 II[J]. 力学进展, 1995, 25(2): 145~ 173.