

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0843

基于声发射的岩石破裂应力场动态反演

刘飞跃^{1,2}, 杨天鸿^{1,2}, 张鹏海^{1,2}, 周靖人^{1,2}, 邓文学^{1,2}, 侯宪港^{1,2}, 赵永川^{1,2}

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为获取岩石在破裂过程中的动态应力场, 首先进行室内物理试验获取声发射数据, 在此基础上基于能量耗散原理, 利用实测声发射信息建立起岩石细观损伤表征方程, 并通过 FLAC^{3D} 内嵌 FISH 语言进行二次开发, 自动搜索声发射损伤影响范围内岩石单元并对其力学参数进行弱化, 计算得到较为真实的岩石破裂动态应力场。结果表明, 计算得到的岩石破裂应力场与实测结果有良好的对应关系, 验证了岩石细观损伤表征方法的合理性。同时, 获得的岩石动态破裂应力场不仅可以从岩石力学的角度解释破坏产生的原因, 也对预测岩石下一步破坏具有指导意义。但这种方法仍具有一定的局限性, 需要进一步的探索研究。

关 键 词: 声发射; 应力场; FLAC^{3D} 数值模拟; 动态反演

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1517-08

Dynamic inversion of rock fracturing stress field based on acoustic emission

LIU Fei-yue^{1,2}, YANG Tian-hong^{1,2}, ZHANG Peng-hai^{1,2}, ZHOU Jing-ren^{1,2},
DENG Wen-xue^{1,2}, HOU Xian-gang^{1,2}, ZHAO Yong-chuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: This study aims to investigate the dynamic stress field during the process of rock failure. Firstly, physical model experiments were conducted to obtain the results of acoustic emission (AE) in the laboratory. According to the measured results, an equation was established for describing characteristics of the rock mesoscale damage based on the energy dissipation theory. Then this equation was implemented to FLAC^{3D} software by using the FISH language. The improved equation can not only automatically search rock units within the damage scope of AE, but also weaken mechanical parameters of meso units. Finally, the relatively true rock fracture dynamic stress field was successfully acquired. The calculated results of rock failure stress field showed good agreement with the experimental results, which verified the rationality of mesoscale damage characterisation method. Simultaneously, the obtained dynamic rock fracturing stress field can not only explain the damage causes from the point view of rock mechanics, but also can predict the location of next rock failure. However, this method still has some limitations, and it needs for further explorations.

Keywords: acoustic emission; stress field; FLAC^{3D} numerical simulation; dynamical inversion

1 引 言

岩石是一种天然的地质体, 是一种非均质材料, 在外部荷载作用下, 其内部存在着复杂的原生和新生裂纹, 这些裂纹对岩石破裂失稳过程有着显著的影响^[1-2]。而数值计算方法中很难对此进行合理地估测模拟, 因此, 基于实测数据的反分析方法体现出了巨大的优越性^[3]。对此, 国内外许多专家学

者进行了大量的研究工作。Sakurai 等^[4]进行了关于岩体弹性模量及初始地应力的线弹性有限元位移反分析。Kaiser 等^[5]基于实测应力数据, 利用边界元对地下隧洞开挖应力场进行了修正计算。Cai 等^[6-7]应用声发射监测手段反分析隧道围岩强度分布, 并提出了一种更符合现场实际岩体破裂情况的拉伸模型用于计算岩石微破裂尺寸。冯夏庭等^[8]运用进化神经网络算法, 结合有限元方法用位移数据反演出

收稿日期: 2016-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2013CB227902); 国家自然科学基金资助项目(No. 51574059, No. 51404067)。

This works was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (2013CB227902) and the National Natural Science Foundation of China (51574059, 51404067).

第一作者简介: 刘飞跃, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学声发射方面的研究工作。E-mail: leapliu@126.com

岩体参数。徐奴文等^[9]利用微震监测数据,提出一种基于微震信息反演的岩体损伤模型,对锦屏一级水电站左岸边坡稳定性进行了三维反馈分析。

上述的研究极大地扩展了反分析方法在岩土工程中的应用范围,但上述研究很少将数值计算与实际监测数据进行有机结合,仅是将实测数据作为反分析岩石力学参数或证明数值模拟计算结果的正确性之用,降低实测数据在数值模拟过程中的作用。同时,对岩石破坏的分析主要集中在岩石破裂的最终现象,结合实测数据对岩石破裂过程中岩石内部应力场的演化过程的分析研究较少。因此,难以准确表述岩石在外部载荷作用下的力学响应,无法获得岩石破坏过程中真实演化过程。

声发射(AE)是材料破坏过程中常见的一种物理现象,指的是材料在受外部荷载或内力的作用下出现变形或裂纹扩展,在其破坏过程中产生的瞬时应变能以弹性波的形式快速释放的现象^[10]。岩石在受到外部载荷的作用下,伴随着微裂隙的萌生、扩展直至产生宏观破坏,有声发射事件的发生,且声发射事件与岩石内部缺陷的演化有着良好的对应关系^[7]。因此,在本文中,建立起基于室内声发射实测数据的岩石细观损伤表征方程,通过FLAC^{3D}内

嵌FISH语言进行二次开发,自动搜索声发射事件损伤影响范围内岩石单元并对其力学参数进行弱化,获得了岩石破裂过程中较为真实的动态演化应力场。不仅可以从岩石力学的角度解释岩石失稳破裂的原因,还可以对岩石下一步破坏进行分析预测。

2 声发射信息的获取

2.1 试验过程

试验设备包括TAW-3000微机控制电液伺服压力机及PCI-II型声发射监测系统。声发射监测系统由8个宽频传感器(Nano30)、8个前置放大器、PCI-II主机、采集卡及AEwin声发射采集与分析软件构成。声发射监测系统参数设置如下:前置增益,40 dB;频率范围,5~500 kHz;采样频率,1 MHz;预触发,256;门槛值,45 dB(背景噪音为40 dB)。

岩石试样取自陕西榆林城北西方向直距约20 km处的小纪汗煤矿的底板砂岩,试件为圆柱形尺寸为 $\Phi 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ (如图1所示)。试验采用加载速率为0.2 mm/min的单轴位移加载方式。声发射系统的8个传感器分别布置于距试件顶、底端2 cm的位置,用胶皮带固定至岩石表面并以凡士林为耦合剂增加传感器及岩石表面的耦合效果。

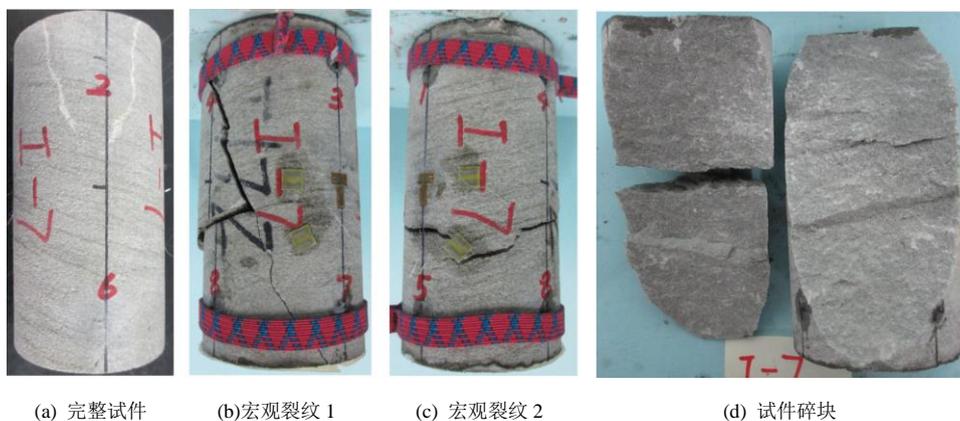


图1 试件照片

Fig.1 Photos of specimens

2.2 试验结果

通过声发射采集系统可以获取岩石破裂过程中的声发射信息,包括声发射事件的三维空间坐标、出现时间以及能量大小、地震距等,为下一步的分析提供数据。

在本文中声发射事件能量的计算公式为

$$E = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{r_i}{10} E_i \right)^2} \quad (1)$$

式中: E_i 为第 i 个传感器接收到波形的能量 (aJ);

r_i 为声发射源距第 i 个传感器的距离 (mm); k 为接收到波形传感器数量。该式计算的值实际上是在假设波是由震源产生的球面波且传播过程为弹性传播的前提下,将各传感器接收到波形能量按照几何扩散原理修正到半径为 10 mm 的球面上,并进行平均的结果^[11]。

图2试件在加载过程中声发射定位结果,从左向右依次是峰值应变40%、60%、90%、95%、100%时的声发射定位结果,小球的颜色表示声发射事件

能级大小 ($E_m = \lg E$)。利用激光扫描技术, 获得试件破坏后的破裂面, 图 2 中红线为破裂面在纵剖面 (定义与破裂面垂直且平分圆柱试件的面为纵剖面) 上的投影。对声发射事件定位结果进行分析可以发现, 声发射事件首先出现在岩石试件的上部和下部两个集中区域; 随着应力水平的增加, 声发射事件继续在这两个区域集中出现, 并向中部扩展; 在加载的最后阶段, 试件中部的声发射事件开始急

剧增多直至宏观破裂面的产生和贯通。从图 3 中可以发现, 声发射事件的出现贯穿岩石试件的整个破坏过程, 在加载初期就有较多的声发射事件产生, 随着加载过程进行, 声发射事件率较为平稳, 直至破坏也没有出现较为明显的突增, 表明整个试验过程中试件内部微观裂纹平稳产生, 对于运用声发射技术深入分析岩石破坏内部破坏扩展演化全过程很有利。

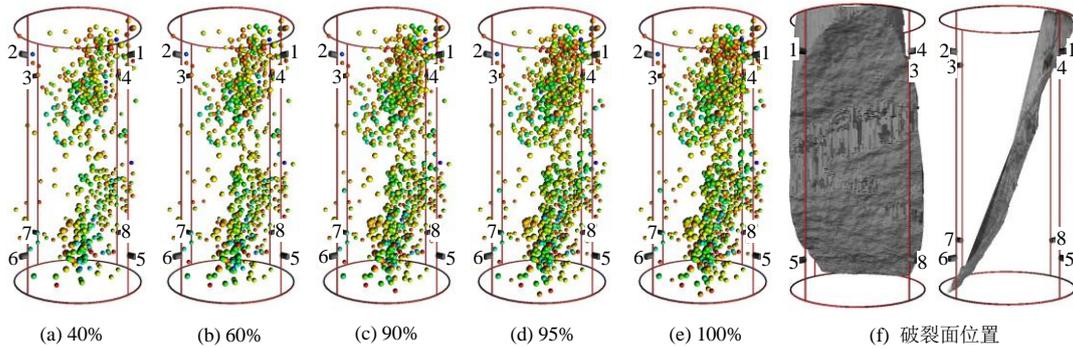


图 2 声发射定位结果与破裂面
Fig.2 Positioning results of acoustic emission and fractured plane

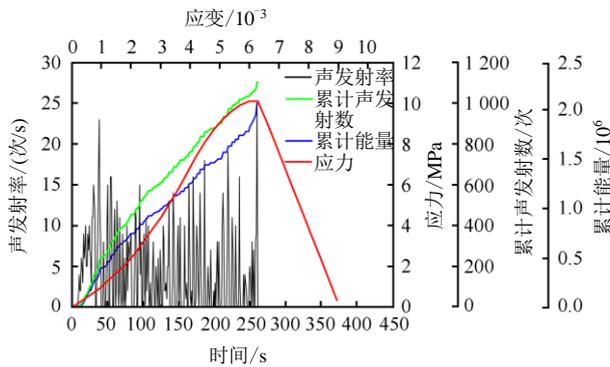


图 3 声发射率-累计声发射数-累计能量-应力-时间-应变曲线
Fig.3 AE rate, AE count, energy and stress vs. time and strain curves

3 基于声发射岩石微观损伤表征

3.1 损伤程度的表征

考虑一个单位体积的岩石单元在外力作用下产生变形, 假设该物理过程与外界没有热交换, 外力功所产生的总输入能量为 U , 根据热力学第一定律, 有^[12]

$$U = U_d + U_e \quad (2)$$

式 (2) 中各量值的几何意义如图 4 岩石单元应力-应变曲线所示。 U 为主应力在主应变方向上做的总功, 在图中表示为总应力-应变曲线下的面积; U_e 为单位体积内储存的可释放弹性应变能, 在图中

由卸载线下的三角形面积来表示; U_d 为受力过程中的耗散能, 单元耗散能 U_d 用于形成单元内部损伤和塑性变形, 在图中表示为曲边梯形的面积, 即 U 与 U_e 面积之差。

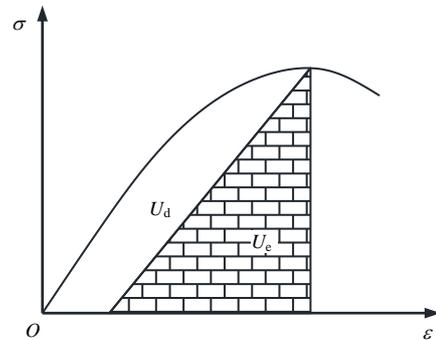


图 4 单位体积中能量耗散与可释放应变能的量值关系
Fig.4 Quantitative relationship of energy release with energy dissipation

谢和平等^[12]基于能量耗散与释放原理, 将岩石单元的损伤变量定义为

$$\omega = \frac{U_d}{U_e} \quad (3)$$

式中: U_e 为岩石单元的强度在完全丧失时临界能量耗散值, 是一个材料常数, 并且与岩石单元的应力情况不相关, 由岩石的单轴拉压或剪切试验得到。无论何种应力情况, 当 $\omega = 1$ 时表示岩石单元的强度完全丧失。

在本文中, 假定岩石单元的破裂过程属于弹脆性变形, 对单元体积内能量耗散与可释放应变能定量关系的简化处理, 如图 5 所示。此时, 单元岩石单元的耗散能 $U_d = 0$, 岩石在线弹性变形过程弹性模量保持不变。图中 ΔU 为单位体积内岩石损伤释放的弹性应变能; U_h 为单位体积内岩石损伤后残余的弹性应变能; E_0 为单位体积内岩石初始弹性模量; E_1 为岩石损伤后的弹性模量。

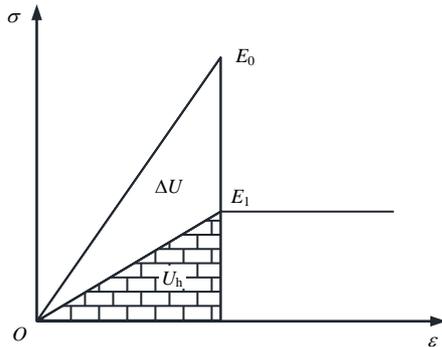


图 5 弹性变形过程岩石能量耗散与可释放应变能定量关系

Fig.5 Quantitative relationship of energy release with energy dissipation during elastic deformation process

若将压应力看作为正且假定岩石表现为各向同性, 在岩石单元没有损伤时(即线弹性变形过程), 基于声发射监测得到的能量进行实际损伤程度反演分析, 单个单元可释放应变能用 U_e 表示:

$$U_e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比。每个岩石单元分配到的声发射能量 ΔE 与该单元岩石损伤释放的弹性应变能 ΔU 的关系可表示为^[13]

$$\Delta E = \Delta U \eta \quad (5)$$

式中: ΔU 可通过声发射能量确定; η 为一常数。

在此, 声发射事件周边一定范围内的单元损伤变量 D 为该岩石损伤释放的弹性应变能 ΔU 与单元可释放应变总能 U_e 的比值^[14], 即

$$D = \frac{\Delta U}{U_e} \quad (6)$$

在岩石损伤检测中, 应用最多的是基于弹性模量变化的损伤变量描述, 该方法用无损弹性模量 E_0 和损伤弹性模量 E_1 定义损伤变量:

$$D = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (7)$$

将式 (4) ~ (6) 代入式 (7) 得

$$E_1 = \left[1 - \frac{2E_0\Delta E}{\eta[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]} \right] E_0 \quad (8)$$

即可确定出弹性模量的弱化程度。在考虑声发射信息反演岩石破裂应力场中, 岩石力学参数弹性模量按照损伤变量 D 进行弱化。假定声发射事件产生的能量损失只对三维模型中其影响范围内的单元有影响。根据声发射事件的三维坐标自动搜索其对应的网格单元, 在一定尺寸范围内的网格单元均匀分配声发射事件能量, 然后基于上述能量损伤准则修正对应的单元岩石力学参数。

3.2 损伤范围的表征

对于所有的声发射事件, 无论其破坏模式如何, 都是在周边形成一个非弹性变形区域, 称为视体积, 它表示了声发射事件波及范围的大小。

视体积为

$$V_A = \frac{M^2}{2GE} \quad (9)$$

式中: V_A 为视体积, 表示震源非弹性变形区的体积; M 为地震矩, 表示声发射事件强度的大小; E 为声发射事件能量; G 为剪切模量。

将视体积看作一个球体区域, 那么球体的半径 R 为

$$R = \sqrt[3]{\frac{3M^2}{8\pi GE}} \quad (10)$$

这个半径是声发射事件所波及到的最大范围, 而声发射事件形成损伤范围会小于这个半径^[7], 为此添加一个小于 1 大于 0 的修正系数 b , 则弱化球体的半径 R 为

$$R = b \sqrt[3]{\frac{3M^2}{8\pi GE}} \quad (11)$$

4 岩石破裂应力场动态反演

4.1 数值模拟计算

参照物理试验, 建立 $\Phi 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 的圆柱形模型, 按照试验过程中, 采用上下端部同时位移加载的方式, 两端加载速率均为 $3.33 \times 10^{-10} \text{ m/step}$; 采用 FLAC^{3D} 软件中摩尔-库仑强度模型, 弹性模量取为 2 GPa, 泊松比取为 0.25, 内摩擦角取为 28° ,

黏聚力取为 1.6 MPa，抗拉强度取为 1.0 MPa。采用位移约束，约束数值圆柱模型上下两端轴向位移速度为 0。

FLAC^{3D} 为单元赋予材料参数过程中，给定一个几何范围，不同的网格精度对实际参数的赋予有很大的影响，如图 6 所示，圆圈为给定的弱化几何范围，灰色单元为 FLAC^{3D} 软件确定出的弱化单元，可以看出当网格精度较高时，与理论状态下弱化范围偏差较小，但相应的计算速度就会有所下降。为确保网格精度兼顾计算速度和计算精度的要求，对不同网格划分精度对应的弱化体积与理论计算出弱化体积进行比对，得到每次弱化过程中两者的差值并求出方差，由方差的大小可以直观地得到真实弱化体积与理论弱化体积的偏离程度。如图 7 所示，当划分的单元数目较少时，真实弱化体积与理论弱化体积差异较大，容易出现计算失真，当划分单元数目较多时，误差较小，但计算速度较慢。在虚线左侧，方差-单元数目曲线急剧下降，虚线右侧，方差-单元数目曲线趋于平稳。因此，在虚线位置处的

网格划分精度在保证计算精度的基础上最大程度地缩短了计算时间。最终确定划分单元数目为 47 880，节点数目为 51 191，网格大小均匀，无尖角空洞，如图 8 所示。

通过 FLAC^{3D} 内嵌 FISH 语言进行开发，使之按照声发射事件真实出现时间先后顺序，自动读入声发射事件三维空间坐标，根据上文提及的强度弱化范围与强度弱化程度自动搜索并弱化该范围内的岩石材料力学参数，边计算边弱化。将每一秒内出现的声发射事件反演到数值计算模型中去，为确保系统的最大不平衡力率小于 10^{-5} ，达到相对平衡的状态，计算 5 000 step，模拟出真实物理试验的加载过程，得到对应的应力场，同时作为下一秒的初始应力场。

事实上，考虑到岩石的非均匀性与各向异性，将岩石损伤范围看作一个球体并将处于损伤范围内的岩石单元力学参数进行等同弱化，并不能够精确模拟声发射事件周围岩石单元的损伤情况，对此需进一步的研究探讨。

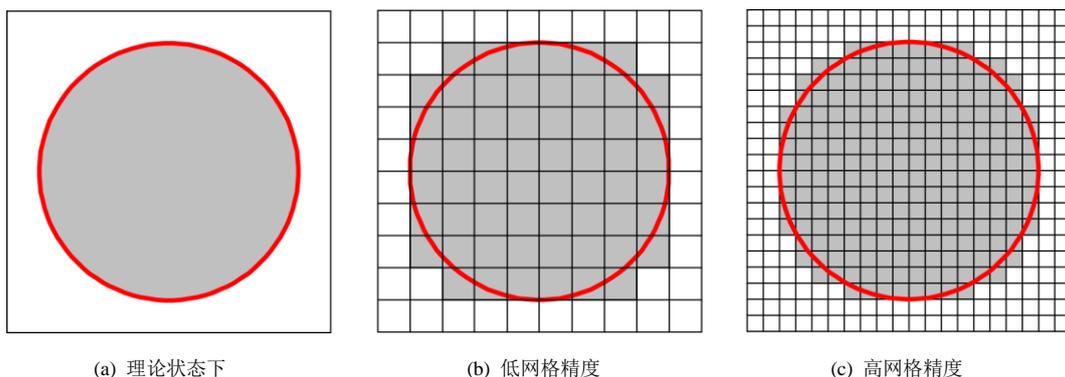


图 6 不同网格精度下弱化区域示意图

Fig.6 Illustrations of weakened region in different grid resolutions

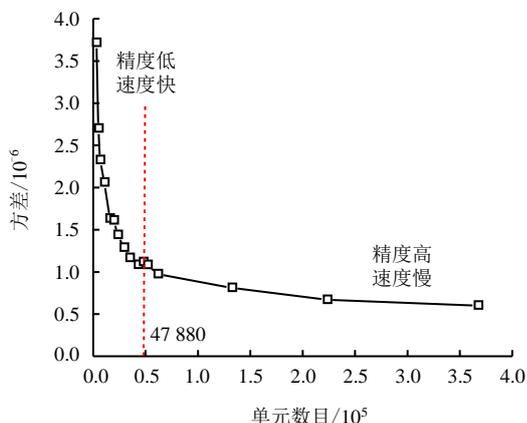


图 7 单元数目与方差关系图

Fig.7 Relationship between element number and variance

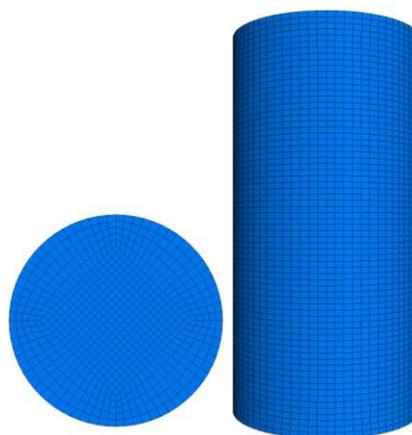


图 8 岩石试件数值模型

Fig.8 Numerical model of rock specimen

4.2 岩石破裂应力场分析

计算获得的岩石破裂应力场如图 9 所示，从左向右依次为对应峰值应变 90%、95%、100% 时的最大主应力云图 (FLAC^{3D} 中应力拉为正压为负)。图 10 从左向右依次为对应峰值应变 60%、90%、100% 时的最大主应变云图。在加载过程中，试件上、下两个声发射事件集中区域的岩石单元物理学参数遭到反复弱化，对应力的分布产生了明显的影响。在数值模型中，与声发射事件集中区域对应，出现了两个较为明显应力水平偏低、应变水平偏高的区域，称之为弱区，且随着应变水平增加这种趋势愈加明显。由于弱区承载能力较低，引起应力向周边

区域转移，在弱区周边形成高应力集中区域。临近破坏时，岩石试件中部的单元在应力作用下被剪断，对应的应力水平急剧下降，应变水平急剧上升，宏观断裂面形成。

分析纵剖面上岩石破裂应力场，在图 9 中，上、下两个弱区的左、右两侧由于应力转移，对应地出现了两个高达 13 MPa 的高应力集中区 (A 区)，两个弱区中间的应力明显较低为 8 MPa (B 区)。但是由于 B 区声发射事件密度较高，较 A 区岩石单元力学参数得到弱化，在较低的应力状态下即发生破坏。在得知较为准确的应力场和岩石单元力学参数时，可以对岩石的下一步破坏进行合理的分析预测。

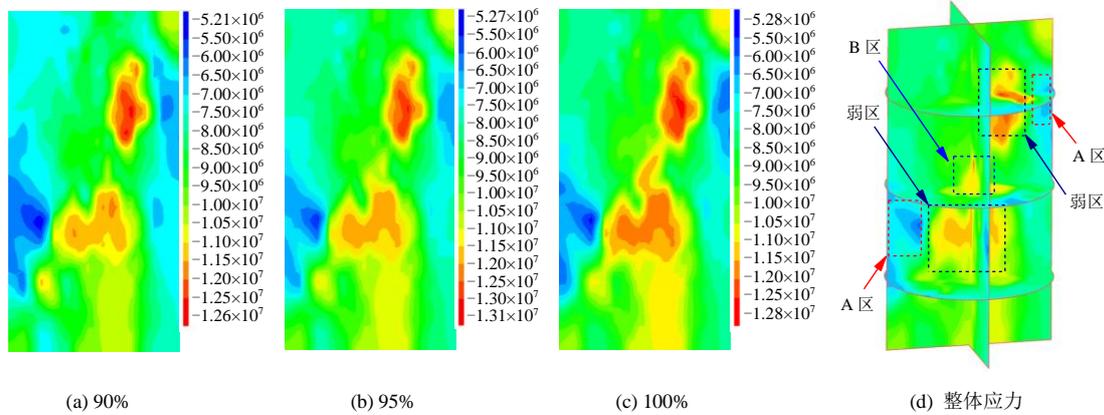


图 9 不同应变水平下最大主应力云图 (单位: Pa)

Fig.9 The max principle stresses at different strain levels (unit: Pa)

图 10(a)中，在外部载荷作用下形成一条较宽的应变局部化带，且在上、下两弱区较为集中，且各自向最大应力方向扩展，此时 B 区应变变化不大，说明其受上、下两个弱区之间相互作用还不明显。如图 10(b)所示，随着加载的进一步进行，可以发现 B 区应变局部化带发生融合且随加载进一步扩展演

化，但此时宏观裂纹并未贯通。当加载到峰值应变时，如图 10(c)所示，B 区在应力作用下被剪断，应变急剧增大，上下两个弱区贯通形成一条较高应变集中带。在图 10(c)中可以观察到，剪应变集中带与试验实测的宏观破裂面 (红色虚线) 有着较好的对应关系，验证了数值计算的正确性。

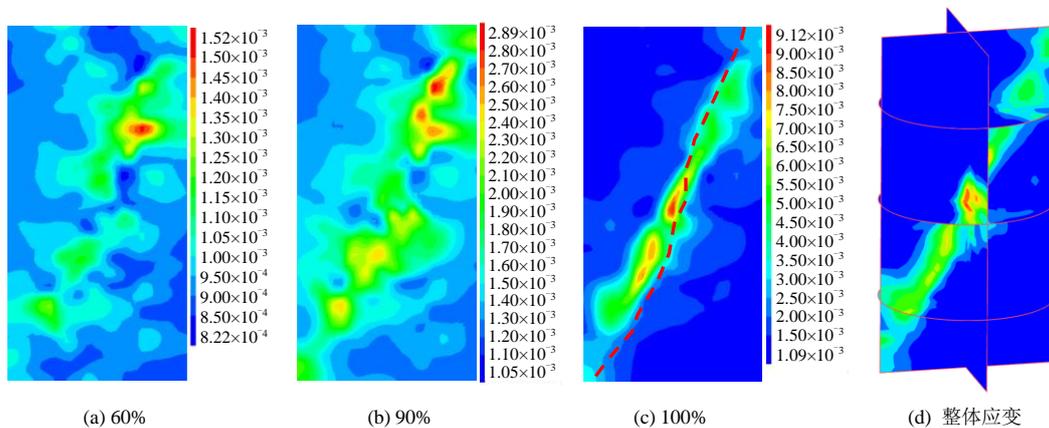


图 10 不同应变水平下最大主应变云图

Fig.10 The max principle strains at different strain levels

计算得到的岩石单元塑性区如图 11 所示, 从左向右依次为对应峰值应变 50%、60%、70%、80%、90%、100% 时的塑性区。红色表示单元发生了当前剪切破坏以及过去剪切破坏 (shear-n, shear-p), 蓝色表示单元发生过去剪切破坏 (shear-p), 青色表示单元发生当前拉伸破坏以及过去拉伸破坏 (tension-n, tension-p)。与图 2 中声发射事件定位结果对照, 可以看出, 塑性区与声发射集中区有较好的对应关系, 进一步验证了数值计算的正确性。

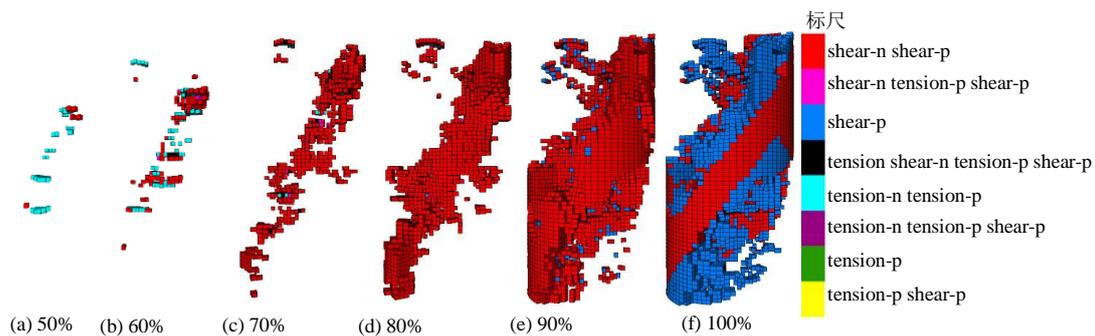


图 11 不同应变水平下塑性区

Fig.11 Plastic zones at different strain levels

5 结 论

本文系统地论述了通过声发射信息反演岩石破裂动态应力场的一种方法, 初步建立起了声发射信息与岩石细观力学参数之间的对应关系, 并以此确定了岩石在外部载荷作用下的强度弱化方法, 以 FLAC^{3D} 计算出岩石试件破裂过程中的动态应力场, 进行了一次有意义的尝试探索。

(1) 基于岩石耗散能与可释放应变能之间的关系, 建立起岩石细观损伤表征方程, 初步确定出岩石在外部载荷作用下的强度弱化方法, 得到了声发射信息与岩石细观力学参数之间的联系。

(2) 利用 FISH 语言对 FLAC^{3D} 进行开发, 读入声发射数据, 进行声发射事件在数值模型中的自动定位并弱化对应单元岩石力学参数, 实现了基于声发射信息的岩石破裂应力场动态反演, 获得了岩石破裂过程中较为真实的动态应力场。

(3) 利用岩石动态破裂应力场, 从岩石力学的角度解释岩石产生破裂的原因。参照应力场和基于岩石细观损伤表征方程修正得岩石力学参数, 对预测岩石下一步破坏具有一定的指导意义。

(4) 本文试图通过声发射信息反演岩石破裂动态应力场的方法是建立在一系列的假设与简化的基础上的, 存在着一定的局限性, 需要进一步的研究

本方法在利用声发射数据反演岩石力学参数时, 仅利用众多实测声发射参数中的能量与地震距两个, 利用信息较少。且在数值模拟过程中, 没有考虑到声发射事件对应的破坏模式, 将声发射事件影响范围内的岩石单元不加区分的进行弱化。同时, 声发射事件的定位精度也对计算结果有着很大影响。上述这些问题会导致计算得到的岩石破裂应力场与实际存在偏差, 需要进一步的研究工作来完善。

探索。

参 考 文 献

- [1] 梁正召, 李连崇, 唐世斌, 等. 岩石三维表面裂纹扩展机理数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1615-1622.
LIANG Zheng-zhao, LI Lian-chong, TANG Shi-bin, et al. 3D numerical simulation of growth of surface crack of rock specimens[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1615-1622.
- [2] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 763-769.
ZHAO Cheng, TIAN Jia-shen, SONG Tian-hao, et al. Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4):763-769.
- [3] 杨志发, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
YANG Zhi-fa, WANG Si-jing, FENG Liang-zi, et al. The principle and application of back analysis in geotechnical engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 2002.
- [4] SAKURAI S, TAKEUCHI K. Back analysis of measured

- displacements of tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1983, 16(3): 173—180.
- [5] KAISER P K, ZOU D, LANG P A. Stress determination by back-analysis of excavation-induced stress changes—A case study[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1990, 23(3): 185—200.
- [6] CAI M, MORIOKA H, KAISER P K. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(4): 538—549.
- [7] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. A tensile model for the interpretation of micro seismic events near underground openings[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 1998, 153(1): 67—92.
- [8] 冯夏庭, 张治强. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529—533.
FENG Xia-ting, ZHANG Zhi-qiang. The theory of calcareous soils mechanics and its application in engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 529—533.
- [9] 徐奴文, 梁正召, 唐春安, 等. 基于微震监测的岩质边坡稳定性三维反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3093—3104.
XU Nu-wen, LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, et al. Three-dimensional feedback analysis of rock slope stability based on microseismic monitoring[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.1): 3093—3104.
- [10] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(7): 883—899.
- [11] GOEBEL T H W, BECKER T W, SCHORLEMMER D, et al. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2012, 117: B03310.
- [12] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003—3010.
- [13] FRANCISCO SAGASTA, AMADEO BENAVENT-CLIMENT, ANDRÉS ROLDÁN, et al. Correlation of plastic strain energy and acoustic emission energy in reinforced concrete structures[J]. **Applied Sciences**, 2016, 6(3): 84.
- [14] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析用(RFPA^{2D})系统的细观单元本构关系及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 24—29.
ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 24—29.
- [13] CHEN G X, JIN D D, ZHU J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2015, 105(2A): 928—949.
- [14] MAKRA K, CHÁVEZ-GARCÍA F J. Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: An evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2016, 14(4): 1177—1194.
- [15] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(3): 205—222.
- [16] 朱姣, 陈国兴, 许汉刚. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2079—2087.
ZHU Jiao, CHEN Guo-xing, XU Han-gang. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(11): 2079—2087.
- [17] HANCOCK J, BOMMER J J. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(4): 291—299.

上接第 1490 页