

# 基于声发射不同粒径黄砂岩裂纹扩展研究

倪彬, 谢伟, 李乾龙, 王立

(中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 西安 710054)

**摘要:** 岩石受荷载后内部微裂纹扩展及其震源机制反演有助于认识宏观裂纹扩展过程的非线性断裂力学行为。基于声发射定位技术对不同粒径大小的黄砂岩试件进行了单轴压缩试验, 结果表明: 通过声发射定位技术以及矩张量反演等手段可以更为直观地反映出岩石内部的损伤程度; 试验过程中黄砂岩试件的微裂纹破裂模式主要以张拉型裂纹为主, 随着构成岩石的矿物颗粒粒径的增大, 试件内部的剪切型微裂纹占比逐渐增大, 试件微裂纹的破坏模式呈现出由张拉型破坏向剪切型破坏过渡的趋势; 结合声发射震源空间分布可知, 初始裂纹产生位置以及裂纹的扩展方向具有随机性, 但随着荷载增加, 其内部裂纹演化的有序度不断提高。研究成果可为地下岩体工程开挖稳定性评价提供理论参考。

**关键词:** 岩石力学; 裂纹扩展; 破坏特性; 声发射定位

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2023)03-0824-09

## Study on Crack Propagation Modes of Yellow Sandstone with Different Particle Sizes Based on Acoustic Emission Technology

Ni Bin, Xie Wei, Li Qianlong, Wang Li

(Xi'an Engineering Investigation & Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Xi'an 710054, P. R. China)

**Abstract:** The internal microcrack propagation and focal mechanism inversion of rock under load are helpful to understand the nonlinear fracture mechanical behavior of macroscopic crack propagation process. Therefore, uniaxial compression tests of yellow sandstone specimens with different particle sizes are carried out based on acoustic emission positioning technology. The test results show that acoustic emission positioning technology and moment tensor inversion can reflect the damage degree of rock more directly. In the test process, the microcracks of yellow sandstone specimens were mainly tensile cracks. With the increase of the mineral particle size of the rock, the proportion of shear microcracks in the specimen gradually increased, and the failure mode of the specimen showed a trend of transition from tensile to shear failure. Combined with the spatial distribution of acoustic emission source, it can be seen that the initial crack location and crack propagation direction are stochastic, but with the increase of load, the order degree of internal crack evolution keeps improving. Research results can provide some theoretical reference for excavation stability evaluation of underground rock mass engineering.

**Keywords:** rock mechanics; crack propagation; failure characteristics; acoustic emission location

收稿日期: 2022-10-13(修改稿)

作者简介: 倪彬(1981—), 男, 陕西汉中, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿床开采设计与安全评价方面的研究工作。

E-mail: nibin5119@163.com

通讯作者: 王立(1992—), 男, 甘肃会宁, 硕士, 工程师, 主要从事矿床开采设计与安全评价方面的研究工作。

E-mail: 1798075175@qq.com

0 引言

岩石作为一种天然多孔介质材料,因构成岩石的各种矿物成分在物理性质上的差异性以及微裂纹分布的不均匀性,导致岩石的力学特性及声发射响应特征不尽相同。大量的试验表明,构成岩石内部的各种矿物成分、种类、大小、以及排列方式等细观结构共同决定了岩石的材料特性<sup>[1-4]</sup>。

为了从机制上分析裂纹起裂、汇聚、贯通等过程,诸多学者对不均质脆性材料的破坏机制进行了研究,并提出了裂纹扩展模式和断裂准则。例如李博等<sup>[5]</sup>基于室内花岗岩试验及 FPC 离散元数值模拟软件对 2 种不同类型花岗岩矿物晶体模型进行分析,结果表明:岩石试样加载过程中的新生裂纹以晶内和晶间的拉伸裂纹为主,且双轴压缩时破坏形式更易从拉伸破坏向剪切破坏转换。张国凯等<sup>[6]</sup>对裂隙花岗岩进行了单轴压缩下的声发射测试,同时基于 AE 定位技术很好地描绘了 AE 震源时空演化裂纹的三维扩展区域以及分布规律。武东阳等<sup>[7]</sup>分别制作了不同裂隙倾角的类岩石试块,进行了单轴压缩试验及 PFC 模拟,结果表明:锚杆的存在降低了拉伸裂纹萌生和扩展时的应力强度因子,能够有效限制拉伸裂纹的萌生和扩展,并且抑制剪切裂纹的出现。同时,随着锚固角度的增加,拉伸翼裂纹发育程度先增高后降低,预制裂隙试块破坏模式由剪切破坏转为拉剪复合破坏,再转变为剪切破坏。岑夺丰等<sup>[8]</sup>利用自主研发的拉剪辅助装置开展了单裂隙砂岩试样在法向拉应力条件下的直接剪切试验,结果表明:预制裂隙受到的应力状态与裂隙角有较大关系,当裂隙角为 90° 以下时,随着裂隙角增大,预制裂隙从受拉至拉剪再到剪切变化,而当裂隙角为 90° 以上时,仅受拉剪作用。王笑然等<sup>[9]</sup>借助声发射监测手段,通过各位

置处传感器耦合质量标定及点源远场 P 波矩张量反演获得了含预制裂纹砂岩受载过程的震源机制解及时变响应特征,在全局坐标系下分析了微裂纹的 3 种断裂力学行为。赵程等<sup>[10]</sup>使用高强石膏采用预埋薄片法制作含不同角度裂隙的类岩石试样,得出完整试样破坏断裂角随水压增大而增大,并由剪切破坏向劈裂破坏转化,而含裂隙试样的破坏形态主要为剪切破坏。赵兴东等<sup>[11]</sup>基于声发射定位技术,直观地反映出了岩样内部裂纹扩展空间位置、扩展方向以及裂纹扩展的空间曲面形态。

综上所述,目前众多学者对岩石裂纹的扩展规律、强度特性进行了大量试验研究,并从理论层面解释其断裂机制。但由于岩石内部矿物结构复杂、随机性大,并且不同岩性岩石的破坏机制不同,因此本文选取同一岩性不同粒径大小的黄砂岩作为研究对象,对其进行单轴压缩声发射试验,通过声发射定位、矩张量反演理论等技术手段,分析矿物颗粒大小、组成对岩石受力破坏过程中裂纹扩展模式演化特征。

1 试验材料及方案

1.1 试样材料

本次试验选用的样品来自四川省自贡市采石场,为了保证试验的准确性,所有样品取自同一矿区岩石,如图 1。试验选取粗粒、细粒 2 种黄砂岩岩样,依照国际岩石力学与工程学会岩样制作要求进行制作岩石试件。加工成直径为 50 mm,长度为 100 mm 的标准圆柱形样品,岩石试件直径误差控制在 0.3 mm 以内,端面不平行度误差控制在 0.05 mm 以内。最后利用超声波检测仪对每个岩石试件的波速进行测定,方便挑选岩性相近的试件进行声发射试验。表 1 为不同粒径黄砂岩试件基础物理参数。

表 1 不同粒径黄砂岩试件基础物理参数

Table 1 Basic physical parameters of yellow sandstone specimens with different particle sizes							
	编号	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	质量/g	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	波速/(m·s <sup>-1</sup> )	矿物组成
细粒黄砂岩	X1	9.46	49.80	434.09	2.21	2 260	石英(含量约占 83%)
	X2	10.6	63.06	432.64	2.20	2 299	长石(含量约 5%)
	X3	9.7	60.41	434.85	2.21	2 270	白云母(含量 1%)
粗粒黄砂岩	C1	6.7	43.57	436.27	2.24	2 073	石英(含量约占 75%)
	C2	7.1	45.57	426.26	2.19	2 000	长石(含量 12%)
	C3	6.9	44.32	428.89	2.20	2 092	云母(含量约 1%)

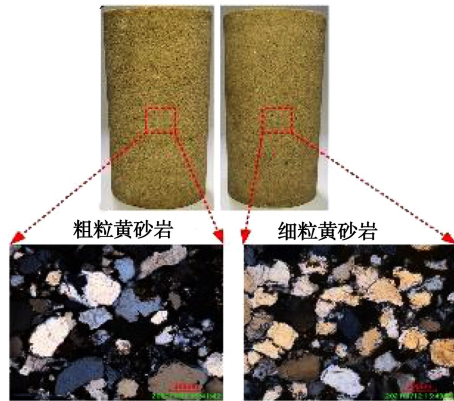


图 1 测试岩样部分试件显微照片

Fig. 1 Micrographs of the origin and part of the test samples

## 1.2 试验方案

为了测得不同粒径黄砂岩试件的全应力-应变曲线,本次试验选择位移控制方式对岩石试件进行加载试验,将加载速率设置为 0.002 mm/s,整个过程连续加载直至岩石试件完全失稳破坏。声发射震源测试试验布置了 8 个传感器,传感器类型为 Nano30 型,频率范围为 125~750 kHz,中心频率为 140 kHz。试验过程中声发射传感器在试件上的固定位置如图 2 所示,目的是尽可能多地接收岩石试件变形破坏过程中不同位置产生的声发射波形信号。为了保证声发射传感器与岩石试件之间能够充分耦合,在声发射传感器与试件接触位置处均匀涂抹一层凡士林。为消除试验环境噪音对本次试验的影响,声发射参数设定如表 2 所示,利用上述制定的试验方案对不同粒径黄砂岩试件进行单轴压缩声发射试验研究。



图 2 声发射传感器布置照片

Fig. 2 Photo of acoustic emission sensor layout

表 2 声发射信号采集设置

Table 2 Acoustic emission signal acquisition settings

门槛/ dB	前方 增益/ dB	模拟滤波 器下限/ kHz	模拟滤波 器上限/ MHz	采样率/ MSPS	采样 长度/k
35	40	100	3	1	1

## 2 基于最小二乘法的 Geiger 算法声发射震源定位原理

### 2.1 Geiger 叠代算法原理

由于 p 波在地震中的传播速度最快,并且初至时间更加容易识别到。通常传统的算法包括最小二乘法、单纯形算法以及 Geiger 算法,鉴于此,本文基于最小二乘法的 Geiger 算法对不同粒径黄砂岩进行声发射震源定位分析。

Geiger 迭代定位算法是以时差定位法为基础,应用该算法时每次迭代过程均基于最小二乘法得到一修正向量,经由多次迭代以逼近声发射源实际坐标,因而其定位效率以及收敛性均对初始点的选取有一定要求<sup>[12-13]</sup>。

在 Geiger 算法的定位过程中,假设共有  $n$  个声发射传感器,则对应到时差算法目标函数为:

$$Q(x_0, y_0, z_0) = \min \sum_{i=1}^n \sqrt{(t_{pi} - t_{ci})^2} \quad (1)$$

式中:  $t_{pi}$  为表示第  $i$  个传感器接受到的初始到时;  $t_{ci}$  为表示迭代试验点到达第  $i$  个传感器的时间。

由上述目标函数可知,为了使迭代点朝着实际点方向收敛,应使得每一迭代点到各传感器时间与各传感器实际接受时间在每一迭代过程中尽可能地接近。

对于第  $i$  个传感器有时间距离方程:

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{C_p} \quad (2)$$

化简后得:

$$(t_{ci} - t) \times C_p = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (3)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i)$  表示第  $i$  个传感器坐标;  $(x_0, y_0, z_0)$  为每次迭代试验点的位置坐标;  $t$  为声发射源发生的实际时间;  $C_p$  为声发射源产生 P 波的波速。

对于每一个传感器探头检测到 P 波到达的时间  $t_{pi}$ , 可在每一试验点  $(x_0, y_0, z_0, t_i)$  做多元函数的一阶泰勒展开式:

$$t_{pi} = t_{ci} + \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t \quad (4)$$

式中:

$$\frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{(x_i - x_0)}{C_p \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{(y_i - y_0)}{C_p \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial z} = \frac{(z_i - z_0)}{C_p \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial t} = 1$$

对于上述一阶时间距离方程的一阶泰勒展开式, 假设共有  $n$  个传感器, 则式(4)共有  $n$  个方程, 可写为如下矩阵形式:

$$A \Delta \theta = B \quad (8)$$

其中:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x} & \frac{\partial t_n}{\partial y} & \frac{\partial t_n}{\partial z} & 1 \end{pmatrix} \quad \Delta \theta = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} t_{p1} - t_{c1} \\ t_{p2} - t_{c2} \\ \vdots \\ t_{pn} - t_{cn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于该矩阵形式的表达式, 为保证对该矩阵表达式左乘消元化简的可逆性, 可做如下变换:

$$A^T A \Delta \theta = A^T B \quad (10)$$

$$\Delta \theta = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (11)$$

因此, 基于 Geiger 定位算法的每一次迭代过程中, 迭代试验点可通过上述  $\Delta \theta$  的表达式计算出修正向量, 再以  $(\theta + \Delta \theta)$  作为下一次迭代的新的试验点继续迭代, 以此类推, 逐步逼近声发射震源的

实际坐标, 直到误差精度在要求范围内为止。

Geiger 定位算法广泛应用于实际的地震定位工作中, 已被证实是一种可靠的、精度较高的、适用范围广的定位算法。但是通过上述的 Geiger 定位算法原理可知, 利用该算法进行迭代计算的过程中, 需要预先设定一个迭代的初始值  $(x_0, y_0, z_0, t_0)$ , 所以迭代初始值的是否准确选取对于迭代过程中收敛性、迭代运算的效率、精准度均有一定的影响。

为了验证编制的基于最小二乘法的 Geiger 声发射定位算法程序的可行性, 在一个  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  标准黄砂岩试件上进行断铅实验, 8 个声发射传感器探头布置位置如图 3 所示。在试件表面上通过铅笔芯断裂生成声发射源, 铅笔芯与黄砂岩试件表面断铅角度为  $30^\circ$ 。通过岩石的声波由电压传感器接收, 经过 40 db 的增益放大, 由 PIC-II AE win 声发射信号分析仪采集并储存在计算机中以作进一步分析。表 3 显示声发射震源坐标与实际断铅点坐标总体误差控制在  $0 \sim 3 \text{ mm}$  之间, 满足声发射震源定位要求。

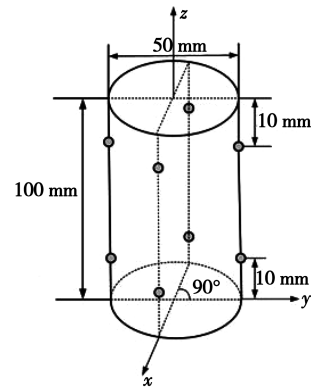


图 3 声发射传感器布置示意

Fig. 3 Acoustic emission sensor layout

## 2.2 声发射 P 波初到时与初始振幅拾取

本文基于 STA/LTA 算法进行声发射震源 P 波初始到达时间与初始振幅的拾取<sup>[14]</sup>。当 STA/LTA 的比值变化不大时, 表示声发射信号主要以背景噪音为主, 真正岩石声发射事件并未发生或只有较少一部分; 当基于 STA/LTA 算法变换后的波形曲线呈现出瞬时陡增的现象时, 则代表岩石内部声发射事件濒临发生, 最终通过设定的电压阈值统计信号幅值较大的“尖峰”, 以此达到声发射震源事件的识别与初始拾取的目的。



表 3 基于最小二乘法的 Geiger 算法断铅试验结果  
Table 3 Lead breaking test results of Geiger algorithm based on least square method

破裂点	断铅点坐标			定位点坐标			误差/mm
	X/mm	Y/mm	Z/mm	X/mm	Y/mm	Z/mm	
1	0	0	100	-0.84	0.20	98.15	2.16
2	0	0	100	0.49	-0.06	97.65	2.48
3	0	0	100	0.39	-0.16	101.68	1.73
4	0	0	100	-0.02	-0.13	99.56	0.45
5	0	0	100	0.35	-0.15	100.36	0.52
6	0	0	100	-0.98	-1.31	100.56	1.73
7	0	0	100	0.20	-0.15	102.31	2.32

$$LTA(i) = \frac{1}{L} \sum^{i+Lj=i} CF(j) \tag{12}$$

$$STA(i) = \frac{1}{S} \sum^{i+L+Sj=i+L} CF(j) \tag{13}$$

$$R(i) = \frac{STA}{LTA}(i) \geq \lambda \tag{14}$$

式中： $i$  为采样点； $L$ 、 $S$  为分别为长时窗与短时窗长度； $R(i)$  为表示基于  $STA/LTA$  算法计算后的幅值； $\lambda$  为设定的触发阈值； $CF(j)$  采样点  $i$  处所对应的特征函数。

特征函数的选取、时窗大小选择及电压阈值的设定等，均会影响  $STA/LTA$  算法识别声发射 P 波初始到达时间与初始振幅拾取的准确度。如图 4 所示为基于  $STA/LTA$  算法的 P 波初始到时与初始振幅拾取示意图。

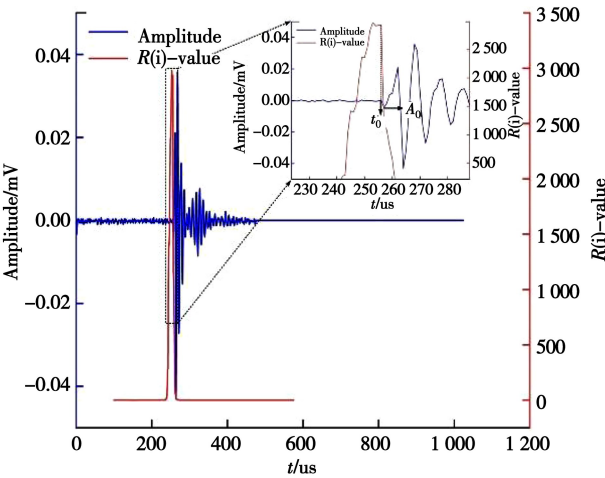


图 4 基于  $STA/LTA$  算法拾取 P 波初始到时与初始振幅

Fig. 4 Initial p-wave pickup time and amplitude based on  $STA/LTA$  algorithm

3 不同粒径黄砂岩声发射震源空间分布

通过声发射震源空间定位结果可以将岩石内部声发射源位置、裂纹初始位置、岩石损伤状况、不同加载阶段裂纹的发展程度等直观反映出来,为进一步研究岩石声发射特性以及内部微裂纹扩展过程奠定了基础<sup>[15]</sup>。声发射源三维定位是事件点的空间表示形态,但当岩石试件到加载后期时声发射定位点出现激增,因此,从直观上确定微裂纹扩展的具体形态存在一定的难度。但与此同时声发射源在空间形态上又是有序的,因为从宏观角度观察岩石微裂纹的扩展方向是有一定的规律性,所以声发射源的空间分布形态、集聚位置与岩石内部应力集中以及宏观破碎严重区域具有对应关系。以粗黄砂岩 C1 试件为例,试件上部 2#、3#、4#传感器附近声发射定位点出现较早且集聚特征明显。随着试件所受荷载的持续增加,当岩石试件所受荷载加载到后期时声发射定位点出现激增的现象,预示着试件内部该部位声发射现象活跃,微裂纹迅速扩展贯通,岩石试件表现失稳破坏。

为此本文基于矩张量反演理论对不同粒径黄砂岩试件受荷载作用下声发射源的空间分布进行了分析。限于篇幅,列举 C1、X1 试件的声发射震源空间分布及占比如图 5 所示。

如图 5 所示,为不同粒径黄砂岩试件声发射震源空间分布以及不同类型裂纹数量统计,通过分析可知,粗粒黄砂岩试件在整个受力过程中,大部分声发射震源点在试件上部分布,表明岩样上端最早产生裂纹,随着岩石承受荷载的持续增加,试件上

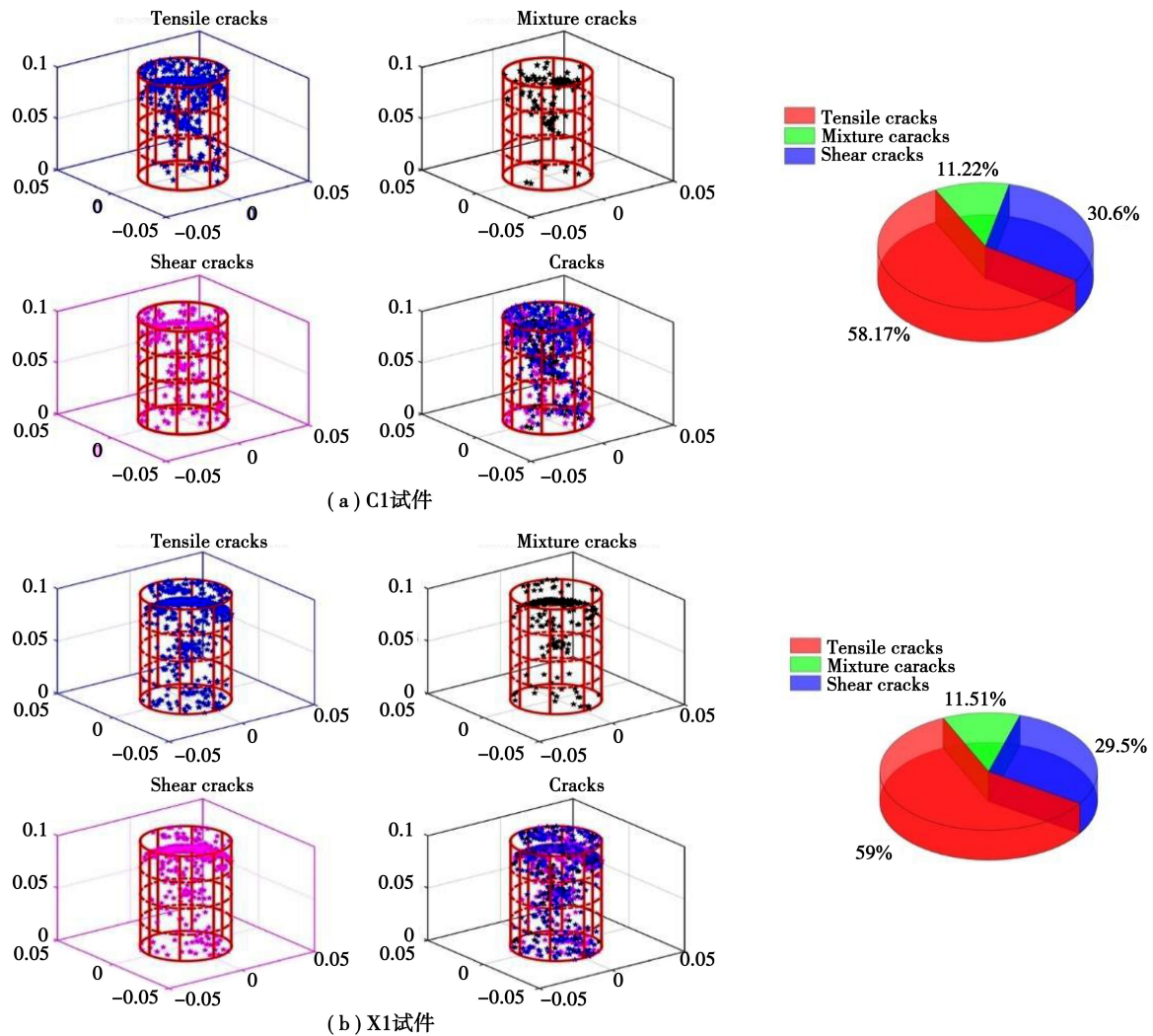


图 5 不同粒径黄砂岩声发射震源空间分布及占比

Fig. 5 Spatial distribution and proportion of acoustic emission sources of yellow sandstone with different particle sizes under stress

部较早出现微破裂并向试件中部及下部发育扩展,最终相互贯通形成大的宏观裂纹,导致岩石试件发生失稳破坏,如图 6。细粒径黄砂岩声发射震源点最早开始的位置与粗粒径黄砂岩相类似,当试件邻近峰值破坏时,在中部及下部出现大量声发射震源点,表明这 2 种砂岩破坏模式大致相同,其微裂纹的演化过程都是从试件上部向中部以及下部发育、扩展。尽管这 2 种岩石破坏模式都以张拉型破坏为主,但是试件破坏后的宏观裂纹形态各不相同,分析产生这种现象的主要原因是裂纹初始位置以及裂纹的扩展方向的不一致,导致不同粒径黄砂岩试件在外力作用下发生变形破坏后的宏观裂纹形态具有了一定的差异。

岩石作为一种复杂的非均质、天然材料,当受到外部载荷作用时岩石内部微裂纹开始孕育、扩展、聚集,最终相互贯通形成大的宏观破裂面。当

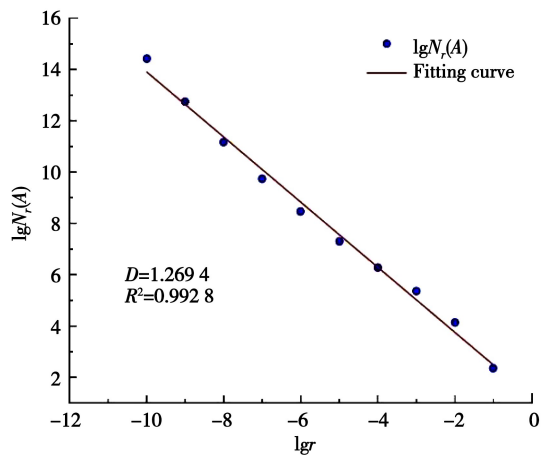


图 6 试件破坏形式

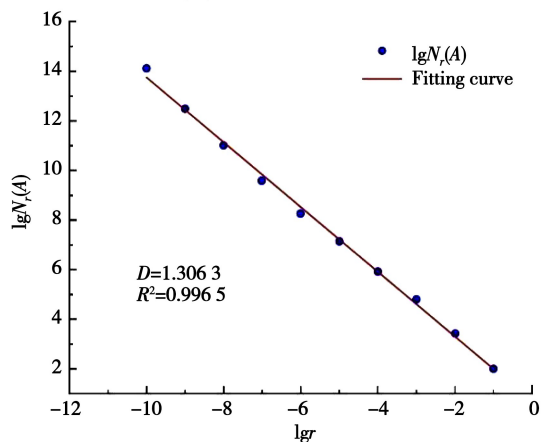
Fig. 6 Failure mode of specimen

岩石在外力作用下发生变形破坏的过程中,从内部细观损伤到宏观裂纹演化具有明显的非线性特征,而分形几何的实质是用定量表征方式去描述事物整体与局部之间的自相似性。因此本文对破坏后的试件宏观裂纹进行分形维数的分析,通过将岩石声发射时空演化与宏观裂纹结合起来可更好地阐释岩石破坏机理。图 7 所示为不同粒径黄砂岩宏

观裂纹分形维数拟合曲线。



(a)粗粒径黄砂岩C1试件



(b)细粒径黄砂岩X1试件

图 7 不同粒径黄砂岩试件宏观裂纹分形维数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of fractal dimension of macroscopic crack of yellow sandstone specimens with different particle sizes

由图 7 可知,不同粒径试件破坏后宏观裂纹空间分布的分形维数线性回归相关系数均大于 0.99,表示不同粒径黄砂岩试件破坏后的表面宏观裂纹空间尺度分布具有明显的分形特征;其中粗粒黄砂岩试件破坏后的表面宏观裂纹分形维数分别为:1.269 4、1.254 8、1.241 4;细粒黄砂岩试件分形维数依次分别为:1.306 3、1.321 7、1.353 3。通过宏观裂纹的分析可知,在一定的意义上来阐释,声发射震源空间演化过程是随机中存在一定的有序性。

结合图 6 可以看出,声发射震源定位结果与试件破坏后的宏观裂纹演化具有较高的相似性。通过对 C1 试件空间定位可知,在声发射震源时空演化过程中,表现为张拉裂纹的有 4 007 个,混合裂纹有 733 个,剪切裂纹有 2 108 个,总共 6 888 个裂纹。其中张拉裂纹、混合裂纹、剪切裂纹占比分别

为 58.17%、11.22%、30.60%;X1 试件张拉型裂纹有 7 800 个,混合型裂纹有 1 522 个,剪切型裂纹有 3 900 个,各裂纹占比分别为 59%、11.51%、29.50%等。其余试件将不作过多赘述,对不同粒径黄砂岩试件声发射震源裂纹数量及占比进行了统计,其统计结果如表 4 所示。

表 4 不同粒径黄砂岩试件声发射震源类型统计

Table 4 Ae source types statistics of yellow sandstone specimens with different particle sizes

类型	张拉型	混合型	剪切型	张拉型裂	混合型	剪切型
试件	裂纹	裂纹	裂纹	纹占比/%	裂纹占	裂纹占
					比/%	比/%
C1	4 007	773	2 108	58.17	11.22	30.60
C2	8 724	1 877	4 916	53.97	14.89	31.14
C3	7 782	2 147	4 491	56.22	12.10	31.68
X1	7 800	1 522	3 900	59.00	11.51	29.50
X2	8 037	1 319	3 751	61.32	10.06	28.62
X3	8 055	1 759	4 005	58.29	12.73	28.98

为了更加直观的分析裂纹类型的占比情况,对上表的数据进行统计其结果如图 8 所示。

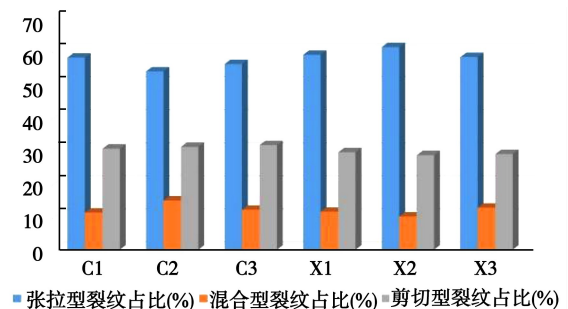


图 8 不同粒径黄砂岩声发射震源类型占比

Fig. 8 Proportion of AE source types of yellow sandstone with different particle sizes

通过对表 4 及图 8 分析可知,试验中的所有黄砂岩试件的破裂模式主要以张拉型裂纹为主,并且从细粒黄砂岩到粗粒黄砂岩随着构岩矿物颗粒粒径的增大,剪切型裂纹占比也在逐渐增大,黄砂岩试件的微裂纹破坏模式表现为,由张拉型破坏为主导向剪切型破坏转变的趋势。通过声发射定位算法程序将不同粒径黄砂岩声发射震源可视化,可观察到黄砂岩试件内部微裂纹演化过程以及微裂纹扩展的曲面形态与试件破坏后的宏观裂纹形态具有较好的一致性。

## 4 讨论

通过试验可知,粗粒组黄砂岩的峰值强度处于



43.57~45.64 MPa 之间,求取平均峰值强度为 44.51 MPa;细粒组黄砂岩试件的峰值强度大致处于 49.80~63.06 MPa 之间,其平均峰值强度为 57.76 MPa。

粗粒组黄砂岩的细观构造为不等粒砂状结构,成分主要为石英,含量约 75%,胶结物属于泥质胶结形式。细粒组黄砂岩石属于微-细粒砂状结构,主要成分为石英,含量约占 83%,其胶结物以泥质胶结形式。虽然粗粒组黄砂岩组成成分以及胶结物类型与细粒组黄砂岩较为接近,但是两者的单轴抗压强度存在差异性,这是因为细粒黄砂岩内部构岩矿物石英颗粒含量较高,含量占比为 83%,其峰值强度的平均值是中粒黄砂岩的 1.29 倍。即使属同一粒径组的细粒组黄砂岩试样 X1(49.80 MPa)与同一粒径组的试样 X2(63.06 MPa)和 X3(60.41 MPa)的抗压强度相差较大,主要是岩石内部的石英含量不同导致,导致不同岩石的裂纹扩展模式具有一定的差异性,但是其整体的变化趋势不变。

## 5 结论

(1)基于最小二乘法的 Geiger 算法声发射震源定位原理,通过矩张量反演理论对试验过程中的不同粒径黄砂岩的声发射震源进行了识别,更为直观地反映出岩石内部声发射源位置以及损伤程度。

(2)通过声发射定位试验分析得出,所有黄砂岩试件的微裂纹破裂模式主要以张拉型裂纹为主,随着构岩颗粒粒径的增大,剪切型裂纹占比逐渐增大,试件微裂纹的破坏模式存在由张拉型破坏向剪切型破坏过渡的趋势。

(3)结合声发射震源空间分布与试件宏观裂纹可知,岩石初始裂纹产生位置具有随机性,但是随着受到外部荷载的持续增加,试件内部裂纹相互贯通,其裂纹演化的有序性不断提高,为阐释岩石裂纹起裂机理提供了一定依据。

## 参考文献(References)

- [1] 赵阳升,孟巧荣,康天合,等.显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):28-34. (Zhao Yangsheng, Meng Qiaorong, Kang Tianhe, et al. Micro-ct Experimental Technology and Meso-investigation on Thermal Fracturing Characteristics of Grani[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 28-34. (in Chinese))
- [2] Martin C D, Stimpson B. The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(5):692-702.
- [3] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008. (Xu Xiaoli. Study on mechanical properties evolution and microscopic mechanism of granites under temperature loading [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese))
- [4] Zhao Y, Liu S, Zhao G F, et al. Failure mechanisms in coal: dependence on strain rate and microstructure [J]. Journal of Geophysical Research. Solid Earth, 2014, 119(9):6924-6935.
- [5] 李博,朱强,张丰收,等.基于矿物晶体模型的非均质性岩石双裂纹扩展规律研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1119-1131. (Li Bo, Zhu Qiang, Zhang Fengyu, et al. Study on crack propagation of heterogeneous rocks with double flaws based on grain based model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 201, 40(6):1119-1131. (in Chinese))
- [6] 张国凯,李海波,王明洋,等.单裂隙花岗岩破坏强度及裂纹扩展特征研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增1):2760-2771. (Zhang Guokai, Li Haibo, Wang Mingyang, et al. Study on characteristics of failure strength and crack propagation . of granite rocks containing a single fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp. 1): 2760-2771. (in Chinese))
- [7] 武东阳,蔚立元,苏海健,等.单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC~(3D)模拟[J].岩土力学,2021,42(6):1681-1692. (Wu Dongyang, Wei Liyuan, Su Haijian, et al. Experimental study on crack propagation and PFC~(3D) simulation of rock specimens with anchor crack under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 201, 42(6):1681-1692. (in Chinese))
- [8] 岑夺丰,刘超,黄达.拉剪应力作用下单裂隙砂岩裂纹扩展规律试验研究[J].煤炭学报,2021,46(增2):731-739. (Cen Duofeng, Liu Chao, Huang Da. Shear stress effect order fracture crack propagation laws of test research [J]. 2021, 46(Supp. 2): 731-739. (in Chinese))
- [9] 王笑然,李楠,王恩元,等.岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J].地球物理学报,2020,63(7):2627-2643. (Wang Xiaoran, Li Nan, Wang Enyuan, et al. Acoustic emission quantitative inversion of microcosmic mechanism of rock crack propagation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7):2627-2643. (in Chinese))
- [10] 赵程,幸金权,牛佳伦,等.水-力共同作用下预制裂隙类岩石试样裂纹扩展试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增1):2823-2830. (Zhao



- Cheng, Xing Jinqian, Niu Jialun, et al. Experimental study on crack propagation of precrack rock-like specimens under hydro-mechanical coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp. 1):2823-2830. (in Chinese))
- [11] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944-950. (Zhao Xingdong, Li Yuanhui, Yuan Ruifu, et al. Study on Crack Dynamic Propagation Process of Rock Samples Based on Acoustic Emission Location [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 944-950. (in Chinese))
- [12] Ohtsu, M. Innovative AE and NDT techniques for on-site measurement of concrete and masonry structures [M]. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2016.
- [13] 梅明星. 基于声发射技术的损伤检测应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. (Mei Mingxing. Research on damage detection based on acoustic emission technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese))
- [14] 刘建坡. 深井矿山地压活动与微震时空演化关系研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011. (Liu Jianpo. Study on temporal-spatial evolution relationship between ground pressure activity and microseismic in deep mine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese))
- [15] 何云松. 基于矩张量的岩石破裂微观机制声发射研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. (He Yunsong. Study on acoustic emission of rock fracture micromechanism based on moment tensor [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese))

### (上接第823页)

- [15] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1409-1412. (Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. A preliminary study on the effect of freezing temperature on the extensional characteristics of rock fine view damage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1409-1412. (in Chinese))
- [16] 刘杰, 张瀚, 王瑞红, 等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394. (Liu Jie, Zhang Han, Wang Ruihong, et al. Study on the deterioration law of sandstone layer into damage under the action of freeze-thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1381-1394. (in Chinese))
- [17] 张慧梅, 杨更社. 冻融荷载耦合作用下岩石损伤力学特性[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 161-165. (Zhang Huimei, Yang Gengshe. Damage mechanical characteristics of rock under freeze-thaw and load coupling [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 161-165. (in Chinese))
- [18] 袁小清, 刘红岩, 刘京平. 冻融荷载耦合作用下节理岩体损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1602-1611. (Yuan Xiaoqing, Liu Hongyan, Liu Jingping. Damage constitutive model of jointed rock mass under coupled freeze-thaw loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1602-1611. (in Chinese))
- [19] 谭贤君, 陈卫忠, 伍国军, 等. 低温冻融条件下岩体温度-渗流-应力-损伤 (THMD) 耦合模型研究及其在寒区隧道中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 239-250. (Tan Xianjun, Chen Weizhong, Wu Guojun, et al. Study on coupled temperature-seepage stress-damage (THMD) model of rock mass under cryogenic freezing-thawing conditions and its application to tunnels in cold regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 239-250. (in Chinese))
- [20] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. (Xu Guangmiao. Mechanical properties and multi-field coupling of rock mass damage at low temperature and freezing-thawing in cold zone [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [21] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 2008(5): 808-825. (Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. Causes of rare low-temperature rain, snow and freezing disaster in January 2008 in Southern China and its relationship with climate warming [J]. Journal of Meteorological, 2008(5): 808-825. (in Chinese))
- [22] 国家气象信息中心-中国气象数据网 [DB/OL]. <http://data.cma.cn/>. (National Meteorological Information Center-China Meteorological Data Network [DB/OL]. <http://data.cma.cn/>. (in Chinese))
- [23] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程 (SL 264-2001) [S]. 2001. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China Code of Rock test for hydraulic and hydropower engineering (SL 264-2001) [S]. 2001. (in Chinese))
- [24] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2015. (Shen Mingrong, Chen Jianfeng. Rock mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese))