

文章编号:1673-9469(2023)03-0056-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.008

# 分级循环加载下缺陷砂岩裂纹扩展及声发射频谱特征分析

张五洲<sup>1,2</sup>,鲁鲲鹏<sup>1,3\*</sup>,张合星<sup>1</sup>,熊 贇<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省智恒交通设计院有限公司, 贵州 贵阳 550004;  
3. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 针对因岩石力学性能劣化而诱发的工程灾害,以砂岩为研究对象,开展不同裂纹倾角下分级循环加载试验,分析了裂纹倾角对砂岩力学特性和裂纹扩展特征的影响;结合声发射频谱特征对微裂纹的发展情况进行了分析,最后利用关联维数对其变形破坏的有序度进行定量描述。结果表明:随着裂纹倾角的增大,试件的峰值荷载呈逐渐降低的趋势,但是预制裂纹的扩展无明显规律。其中频域信号的出现具有一致性,说明岩石内部微裂纹的萌生、发育、扩展形成大尺度裂纹具有同步性。岩石变形破坏的有序度可用关联维数进行定量描述,表现为关联维数越大,岩石破坏越复杂,其中关联维数变化幅度可以表征岩石内部裂纹的发展剧烈程度。

**关键词:** 岩石破坏;多级循环加载;声发射;主频;关联维数

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Characterization Analysis of Crack Propagation and Acoustic Emission Spectrum of Defective Sandstone under Graded Cyclic Loading

ZHANG Wuzhou<sup>1,2</sup>, LU Kunpeng<sup>1,3\*</sup>, ZHANG Hexing<sup>1</sup>, XIONG Yun<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;  
2. Guizhou Zhiheng Engineering Survey and Design Consulting Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550004, China;  
3. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** In view of the engineering disasters caused by the deterioration of rock mechanical properties, the sandstone was taken as the research object, and the graded cyclic loading tests were carried out under different crack dip angles. The effects of crack dip angles on the mechanical properties and crack growth characteristics of sandstone were analyzed. The development of microcracks was analyzed based on the characteristics of the acoustic emission spectrum, and finally, the ordered degree of the deformation and failure was quantitatively described using the correlation dimension. The results indicate that as the crack inclination angle increases, the peak load of the specimen gradually decreases, but there is no obvious pattern of pre-crack propagation. The occurrence of frequency domain signals is consistent, indicating that the initiation, development, and propagation of microcracks within rocks are synchronized to form large-scale cracks. The orderliness of rock deformation and failure can be quantitatively described by the correlation dimension, which indicates that the larger the correlation dimension, the more complex the rock failure. The magnitude of the change in the correlation dimension can characterize the severity of the development of internal cracks in the rock.

**Key words:** rock failure; multi-stage cyclic loading; acoustic emission; dominant frequency; correlation dimension

收稿日期:2023-01-10

基金项目:贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2021]一般512);贵州省交通厅科技项目(2020-123-003)

作者简介:张五洲(1982-),男,安徽宿州人,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程勘察设计及公路地质灾害致灾机理研究。

\* 通讯作者:鲁鲲鹏(1985-),男,河南新密人,博士,讲师,主要研究方向为岩石力学及支护结构可靠度。

岩石是一种极其复杂的非均质材料,它包含了许多天然的不连续性结构,如节理、断层和裂隙等,这些结构面的存在使岩土工程的理论研究和实践变得复杂。现有研究表明不连续结构影响着岩石的力学特性,其中原生裂隙的存在往往直接决定了岩体强度和稳定性<sup>[1-2]</sup>。因此研究裂隙岩石的力学特性和裂纹扩展特征对工程实践具有重要的现实意义。

近年来国内外学者对裂隙岩体的损伤演化过程进行了更深入的论证,即探究岩石在应力作用下细观结构与各参数的联系,主要通过采用声发射、红外热成像和数字散斑等物理方法<sup>[3-4]</sup>。何满潮等<sup>[5]</sup>对北山花岗岩进行室内瞬时岩爆模拟试验,发现了岩爆过程中主频带的变化特征,并确定了花岗岩加载初期、岩爆前、岩爆时声发射主频值均为 106 kHz。Wang 等<sup>[6]</sup>对白色大理石进行了直接加载和平台加载巴西拉伸试验,研究了加载过程中的主频演化特征。陈国庆等<sup>[7]</sup>通过室内岩桥直剪试验发现了主频呈高低频带状分布,并且主频带向中频分散的声发射特征可作为试验主破裂的前兆信息。Niu 等<sup>[8]</sup>发现完整和缺陷岩石在破坏过程中主频具有四种模态,即低频高幅信号、低频低幅信号、中频低幅信号和高频低幅信号。班宇鑫等<sup>[9]</sup>对黑色页岩进行劈裂试验,建立了声发射频谱带特征与页岩微损伤机制的对应关系,最后用主频、次主频之比定量描述了不同层理角度页岩破坏时裂缝形态。董方方等<sup>[10]</sup>通过试验和数值模拟研究了冻融循环对砂岩抗拉强度和裂隙扩展的影响。朱其志等<sup>[11]</sup>对不同状态灰砂岩应力的松弛特性进行了试验,并初步研究了其本构模型研究。由此可见,研究岩石的损伤演化时不能局限于单一的时域参数分析法,频域的特征也应取得足够的重视,因此,对岩石破裂过程中声发射频谱信号特征的研究具有重要意义。

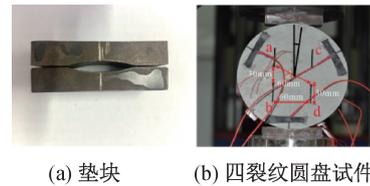
本文对多裂隙岩石开展分级循环加卸载试验,探讨裂纹倾角对试件抗拉强度的影响,进一步分析预制裂纹的扩展规律,并且通过声发射频谱信号变化趋势探索试件内部的微裂纹演化特征,最后利用关联维数对变形破坏的有序度进行定量描述,以期对含不连续结构面的岩石破坏机理和工程应用提供参考依据。

## 1 试验条件和方法

### 1.1 试样制备

试验采用的砂岩取自重庆市某采石场,为降低试验结果的离散性,试件出自同一地点同一批

次岩块。本次试验采用四条裂纹圆盘试件,圆盘直径 170 mm,厚 30 mm,裂纹的长度为 30 mm,宽度为 2~4 mm,同一竖直方向上的两条裂纹相邻 30 mm,同一水平线上相互平行的两条裂纹间距为 60 mm;对角线上裂纹连线相交于圆心,长度为 60 mm;预制裂纹通过高压水枪制成。加载过程中为避免试件出现应力集中现象,受压两端放置垫块。图 1 为所用垫块与圆盘试件。



(a) 垫块 (b) 四裂纹圆盘试件

图 1 试样制备

Fig. 1 Sample preparation

### 1.2 试验设计

本次试验测试系统采用贵州大学 WAW-1000 伺服压力机进行加载,该伺服控制测试系统可以由位移或荷载控制。声发射信号由美国物理声学公司生产的 DISP 系列 PCI-2 全数字化声发射仪采集,设定主放为 40 dB,门槛值为 45 dB,采样频率为  $10^6/s$ ,探头型号为 NANO-30。试验过程中荷载采集系统、数字照相技术、声发射仪对试件破坏过程进行记录及声发射数据采集。

试验共用 12 块圆盘试件,以加载方向为中轴,预制裂纹与加载方向夹角为裂纹倾角。通过旋转试件得到 4 组不同裂纹倾角 ( $\beta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 35^\circ$ ),每组倾角 3 块试样,为减小误差取试验结果相近的试样作为最终结果进行分析。因为试件表面传感器较多干扰摄影机工作,为更直观观察裂纹的扩展情况,采用裂纹扩展素描图代替图片。分级循环加载试验设 A、B ( $A = 25 \text{ kN}, B = 30 \text{ kN}$ ) 两级荷载值, B 大于 A;循环次数 (N) 为 3。具体加载方案如下:(1)第一次加载到 A 后保载 60 s;(2)保载完成后进行卸载,然后再次加载至 B 后保载 60 s;(3)第二次保载完成后进行卸载,最后一次加载直到试件完全破坏。加载方案见图 2。

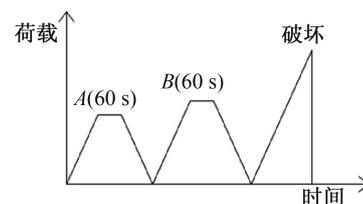


图 2 加载方案

Fig. 2 Loading scheme

## 2 试件抗拉强度分析

根据试验结果统计不同裂纹倾角下峰值荷载,对每组试件峰值荷载求平均值,结果见表1。

表1 不同裂纹倾角试件峰值荷载统计

Tab. 1 Peak load statistics of specimens with different crack inclinations

数值	预制裂纹倾角			
	$\beta=5^\circ$	$\beta=10^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=35^\circ$
试验值/kN	60.76	47.9	47.88	37.75
	67.56	43.24	42.31	33.21
	56.42	51.98	45.68	39.53
平均值/kN	61.58	47.7	45.29	36.83

根据表1统计结果绘制不同裂纹倾角试件的峰值荷载关系图,如图3所示。由图3可见,试件的峰值荷载总体上随裂纹倾角的增大逐渐下降。当 $\beta=5^\circ$ 时,试件的峰值荷载为61.58 kN;当倾角增大到 $10^\circ$ 时,峰值荷载降低至47.7 kN,降幅为22.53%;随后裂纹增至 $15^\circ$ 时,峰值荷载为45.29 kN,此时荷载的变化并不明显,说明当 $\beta$ 为 $15^\circ$ 时,预制裂纹倾角与峰值荷载无明显相关性; $\beta=35^\circ$ 时,峰值荷载下降至36.83 kN,较 $\beta=5^\circ$ 时降幅为40.19%。总的来说,试件峰值荷载随裂纹倾角的增大而降低,以 $\beta=5^\circ$ 试件的峰值荷载为基准,其降幅依次为22.53%、26.45%、40.19%。但是以试验值来看,试件 $\beta=15^\circ$ 较 $\beta=10^\circ$ 时峰值荷载无明显减小,并且试验数据分布范围出现重合。

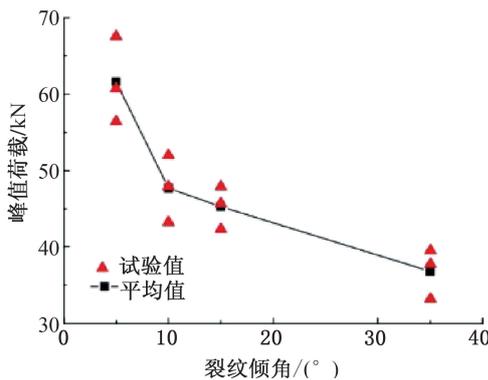


图3 裂纹倾角与峰值荷载变化曲线

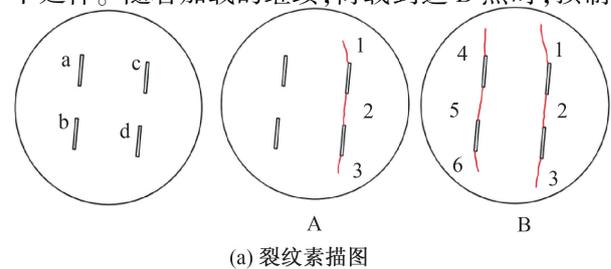
Fig. 3 Variation curve of peak load with crack inclination angle

## 3 声发射特征与裂纹演化规律

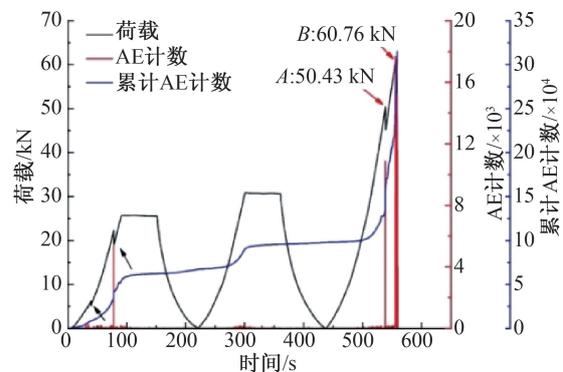
声发射是指金属等材料在受到外部荷载或者处于高温高压等环境条件下,材料内部应变能快

速释放产生的瞬态弹性波,它能够反映材料的微观破坏特征,因此,声发射技术可用于实时监测和分析岩体内部破坏情况<sup>[12-14]</sup>。所以本节利用数字照相技术与荷载-时间与声发射 AE 计数、累计 AE 计数-时间曲线分析圆盘试件裂纹的演化规律。

图4是裂纹倾角为 $5^\circ$ 时预制裂纹扩展及荷载、AE计数与累计AE计数曲线演化特征情况。从图4中可知, $N=1$ 时,加载初期荷载曲线出现跌落(图中黑色箭头所指),然而试件表面未出现宏观裂纹,岩石处于裂隙压密阶段,内部的原生裂隙在荷载的作用下逐渐闭合,充填物被压密,荷载曲线出现轻微跌落。 $N=2$ 时,当荷载超过初始加载值后,AE计数出现小范围活跃,累计AE计数曲线呈近似 $90^\circ$ 陡增,表现出明显的Kaiser效应(Kaiser效应是德国科学家Kaiser对金属进行二次拉伸试验时,发现第二次应力值超过初次应力时有明显的声发射信号产生<sup>[15]</sup>),原因是初次加载时岩体内微元体产生不可逆的损伤破裂,当荷载超过初始荷载范围时,微元体扩展或者产生新的损伤释放出弹性波使声发射信号出现局部活跃。 $N=3$ 时,荷载增加到A点时曲线再次跌落,此时预制裂纹c、d尖端出现裂纹1、2、3,其中裂纹1自c尖端向上扩展,裂纹2连接c、d两端,裂纹3自d尖端向下延伸。随着加载的继续,荷载到达B点时,预制



(a) 裂纹素描图



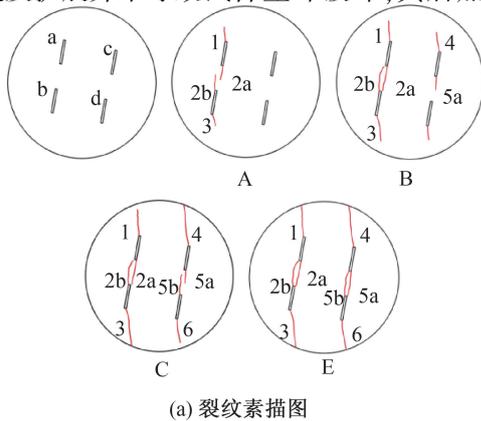
(b) 声发射-时间图

图4 四裂纹圆盘试件倾角为 $5^\circ$ 时裂纹扩展及荷载/声发射-时间图

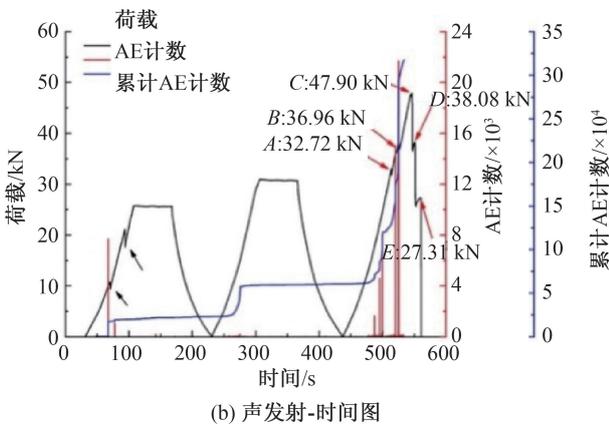
Fig. 4 Crack growth and load/AE time diagram of the four-crack disk specimen when the dip angle is  $5^\circ$

裂纹 a、b 尖端同时出现裂纹 4、5、6, 裂纹 1、3、4、6 在荷载作用下迅速扩展。随后试件出现清脆的断裂声, 荷载曲线完全跌落, 表现出良好的脆性破坏, 此时应变能快速释放产生大量弹性波, 声发射 AE 计数、累计 AE 计数随之激增; 从中可以看出声发射计数不仅能反映岩体内损伤发展程度, 还与裂纹的萌生、扩展和贯通呈现良好的一直性, 最后试件完全破坏后分为左、中、右三部分。

图 5 是裂纹倾角为 10° 时预制裂纹扩展及荷载、AE 计数与累计 AE 计数曲线演化特征情况。N=1、2 时,  $\beta$  为 10° 与 5° 荷载曲线表现出较高的相似性, 加载初期均出现荷载跌落与 Kaiser 效应。N=3 时, 当荷载增加到 A 时, 试件表面萌生了裂纹 1、2(2a、2b)、3, 其中裂纹 2a 自预制裂纹 a 尖端向预制裂纹 b 尖端扩展, 而裂纹 2b 相反。随着荷载继续增加至 B 时, 预制裂纹 c、d 尖端产生了裂纹 4、5a、6, 此时裂纹 1、3 不断向试件边缘扩展, 岩石内部损伤程度急剧增加, 应变能释放剧烈, AE 计数达到峰值, 累计 AE 计数曲线不断增高。裂纹的出现及扩展并未导致试件立即破坏, 其后加载不



(a) 裂纹素描图



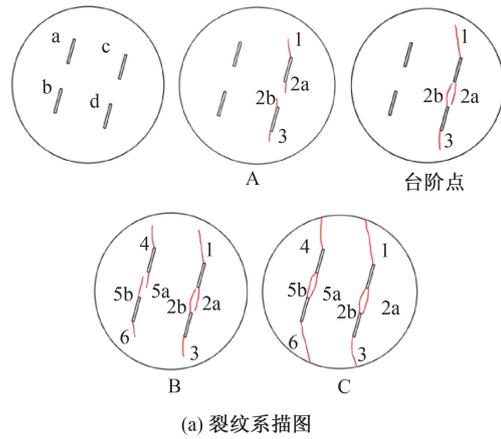
(b) 声发射-时间图

图 5 四裂纹圆盘试件倾角为 10° 时裂纹扩展及荷载/声发射-时间图

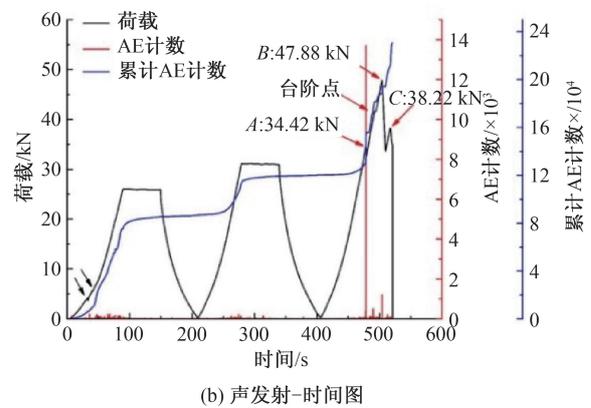
Fig. 5 Crack growth and load/AE time diagram of the four-crack disk specimen when the dip angle is 10°

断继续, 荷载上升至峰值 C 点跌落至 D 点, 此时试件表面萌生新裂纹 5b, 原有裂纹的发育更加明显, 裂纹 3、4 向试件边缘上不断扩展并且贯通, 而裂纹 1、2、5、6 的不完全贯通使得试件残存一定强度, 荷载再次跌落后升至 E 点时裂纹完全贯通试件发生破坏。对比  $\beta$  为 5° 试件可知, 当  $\beta$  从 5° 增大到 10° 时, 预制裂纹尖端所产生的应力场出现明显增大, 表现为预制裂纹两端萌生裂纹 2a、2b、5a、5b, 随后新生裂纹的连通导致“鱼眼状”断裂块的出现, 除此之外所有次生裂纹均产生于峰值荷载前。

图 6 是裂纹倾角为 15° 时预制裂纹扩展及荷载、AE 计数与累计 AE 计数曲线演化特征情况。由图 6 可知, N=1、2 时,  $\beta$  为 15° 荷载曲线变化趋势与声发射特征与  $\beta$  为 5°、10° 时基本一致。N=3 时, 预制裂纹 c、d 在 A 点产生裂纹 1、2(2a、2b)、3, 伴有荷载跌落和 AE 计数的激增, 随后在荷载上升至台阶点的过程中, 裂纹 1、3 不断向试件边缘扩展, 其中裂纹 1 的发育较为明显。当荷载增大到峰值强度 B 时, 预制裂纹 a、b 尖端萌生裂纹 4、5(5a、



(a) 裂纹系素描图



(b) 声发射-时间图

图 6 四裂纹圆盘试件倾角为 15° 时裂纹扩展及荷载/声发射-时间图

Fig. 6 Crack growth and load/AE time diagram of the four-crack disk specimen when the dip angle is 15°

5b)、6;伴随裂纹的萌生试件荷载曲线发生跌落,此时裂纹的不完全扩展使得试件承载能力在小幅度增长到  $C$  后才完全跌落。短时间内多裂纹的萌生和扩展及碎屑颗粒的脱落,内部大范围损伤释放的弹性波导致 AE 计数大幅度增长。 $\beta = 15^\circ$  时,预制裂纹尖端所产生的应力场增大的位置由左侧转变为试件右侧,表现为 2a、2b、5a、5b 出现的时间及位置不同。

图 7 是裂纹倾角为  $35^\circ$  时预制裂纹扩展及荷载、AE 计数与累计 AE 计数曲线演化特征情况。从图 7 中可知, $N=2$  时,恒载时荷载曲线小幅度下跌迅速上升,声发射 AE 计数、累计 AE 计数曲线出现局部陡增,但是试件表面未出现宏观裂纹,推测是加载时垫片与试件摩擦滑动激发 AE 事件。 $N=3$  时,荷载在未达到峰值强度之前,声发射活动进入平静期,累计 AE 计数曲线总体平缓有轻微上升,说明试件内部损伤处于停滞阶段。随着加载至峰值  $A$  时,预制裂纹 a、d 尖端裂纹 1、2a、2b、3 的萌生使荷载曲线立即跌落,并且试件依稀发出清脆的断裂声,损伤的剧烈发育使 AE 计数增长至峰值。荷载经历小幅度增长至  $B$  后完全破坏,此时预制裂纹 a 尖端再次萌生裂纹 4 向上扩展,试件上下受压端部萌生次生裂纹 5、6 向内不断延伸与裂纹 4、3 搭接。试件完全破坏后整体上破裂成两部分,这与  $\beta$  在  $15^\circ$  内破裂模式截然不同。

上述分析已经充分认识了四裂纹圆盘试件破坏过程中裂纹的扩展情况,为进一步对比分析不同倾角对试件破裂模式的影响,对试件最终破裂形态素描图进行联合分析,如图 8 所示。试验结果表明,预制裂纹尖端发育的新裂纹为翼型裂纹、剪切裂纹及反翼型裂纹(此时裂纹类型仅以形态进行区分)。

$\beta = 5^\circ$  时,预制裂纹尖端发育翼型裂纹与剪切裂纹为主,数量相当。 $\beta = 10^\circ$  时试件破裂模式与前者基本相同,区别在于预制裂纹尖端萌生的翼型裂纹更为发育,其中翼型裂纹扩展与预制裂纹搭接形成剪切裂纹,最后呈现为翼型裂纹与剪切裂纹数量相同。 $\beta$  增长至  $15^\circ$  时无明显区别。总的来说, $\beta$  在  $15^\circ$  内时,试件破裂模式基本一致,在荷载作用下同侧预制裂纹间出现贯通现象,导致试件完全破坏后呈现左、中、右三部分断裂块;而预制裂纹尖端间翼型裂纹的贯通使得试件出现“鱼眼状”碎裂块;其中首条裂纹起裂位置随裂纹倾角增大在试件上半部分预制裂纹之间依次转变,即

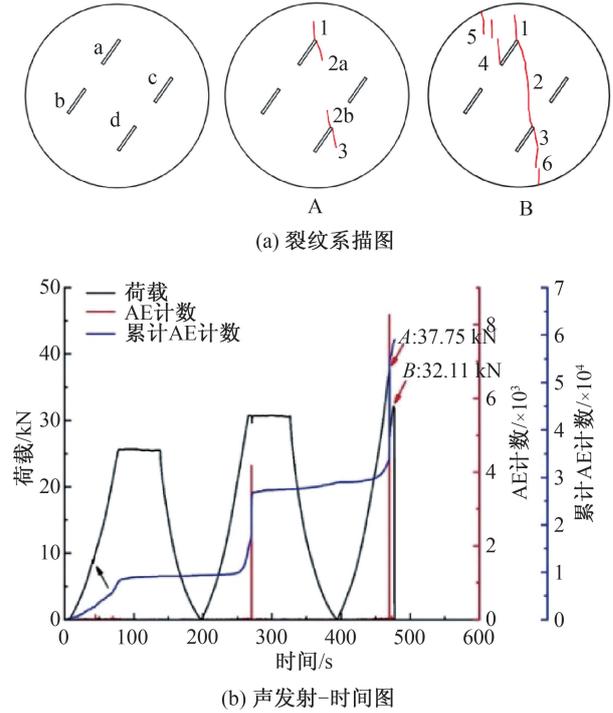


图 7 四裂纹圆盘试件倾角为  $35^\circ$  时裂纹扩展及荷载/声发射-时间图

Fig. 7 Crack growth and load/AE time diagram of the four-crack disk specimen when the dip angle is  $35^\circ$

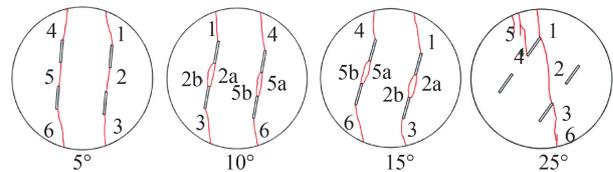


图 8 四裂纹圆盘试件在不同倾角下最终破裂模式素描图

Fig. 8 Sketch of final fracture modes of four crack disc specimens at different dip angles

“左-右-左”,说明试件内部的应力集中区域也随着裂纹倾角的增大而改变。 $\beta$  为  $35^\circ$  时试件破裂模式与小裂纹倾角时截然不同,预制裂纹的位置近似平行分布在加载方向上,翼型裂纹与反翼型裂纹均出现同一预制裂纹尖端,与此同时,试件受压两端远场裂纹较为发育,试件完全破坏后呈现为左、右两部分。

#### 4 声发射信号频域特征演化分析

为研究分级循环加载下试件破裂过程中声发射信号主频演化特征,对采集的声发射时域数据进行批量快速傅里叶变换,得到相应的二维谱图,定义主频为最大振幅对应的频率<sup>[16-17]</sup>。不同裂纹倾角的主频分布范围基本一致,均在  $75 \sim 350$  kHz

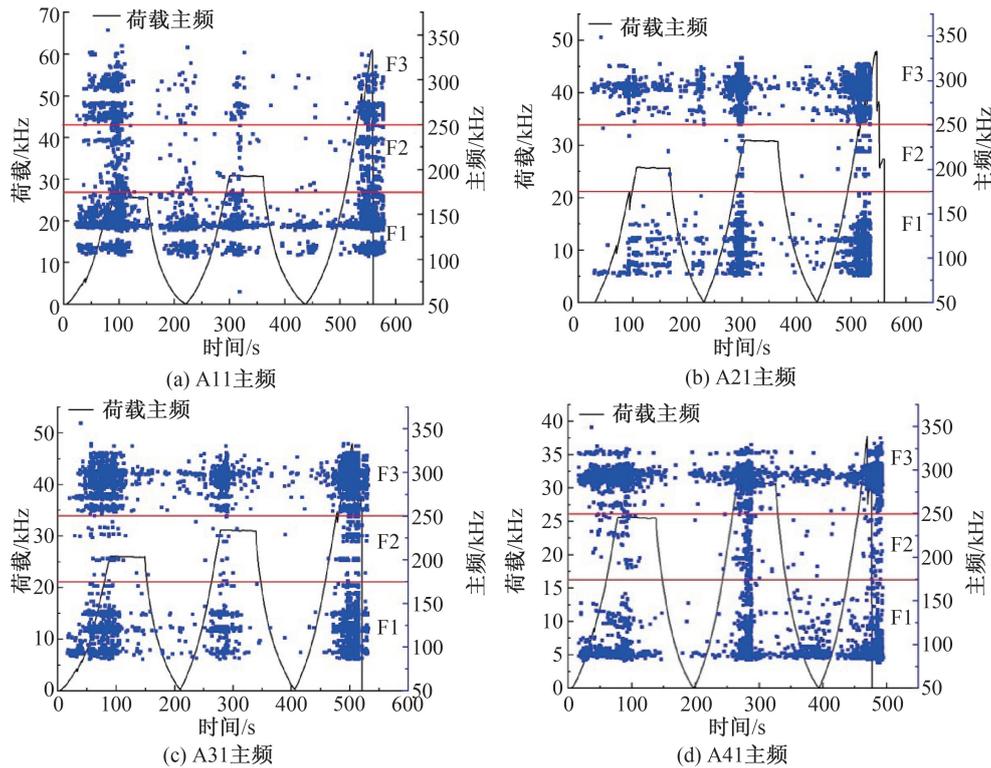


图9 荷载与主频时间关系图

Fig. 9 Relationship between load and dominant frequency time

范围内,结合声发射主频的分布特征,将主频频率分为低、中、高三个频段,即低频部分范围在 75 ~ 175 kHz,中频部分为 175 ~ 250 kHz,高频部分为 250 ~ 350 kHz,其中各频段信号近似带状演化,其对应频带用 F1、F2、F3 表示。通过绘制荷载、主频与时间的关系图,分析不同裂纹倾角试件破裂过程中的信息。

结合不同裂纹倾角的循环加载过程来看(图9),各裂纹倾角主频变化规律高度相似。即  $N=1$  时,随着荷载的增加,各频段信号几乎同时出现,其中高、低频段信号较为致密,中频信号稀疏;恒、卸载阶段,信号数量逐渐减少,且呈随着  $\beta$  增大而减少的趋势。 $N=2$  时,加载初期有主频信号零星出现,当荷载超过上一级荷载峰值时,各频段主频信号开始密集出现,恒、卸载阶段主频特征与初次循环演化规律一致。 $N=3$  时,当荷载接近峰值强度时,各频段出现大量主频信号,且低、高频信号向中频扩散,中频信号逐渐密集。总的来说,三个频段信号近似带状演化,各频段信号数量有明显的差异,即低频、高频信号致密,中频信号相对稀疏,表现出“密-疏-密”的演化规律;当应力超过上级荷载时,各频段信号密集出现,表现出主频信号的类“岩石 Kaiser 效应”。

现有研究表明,声发射主频特征能反映岩石变形破坏中裂纹发育的情况。一般来说,高频信号对应微裂纹的萌生、发育;低频信号对应大尺度裂纹的产生<sup>[18-19]</sup>。结合图9,由于不同裂纹倾角试件主频特征具有相似性。以  $\beta=5^\circ$  为例进行分析。当  $N=1$  时,随着荷载的增加,各频段信号的出现具有同步性。说明试件在破坏过程中微裂纹的萌生、发育、扩展向大尺度裂纹过渡具有同步性;并非按照微裂纹的萌生、发育、扩展,最后形成大尺度裂纹的顺序发展,而是各种类型裂纹同步产生。恒载后期及卸载阶段,主频信号数量明显减少,表明该阶段岩体内部裂纹发育、扩展活动进入平静期。 $N=2$  时,当荷载超过上级峰值荷载时,各频段信号密集出现,表明岩石内部裂纹萌生、扩展活动再次进入活跃阶段,该特征与岩石“Kaiser 效应”高度相似。 $N=3$  时,试件破裂过程中裂纹的萌生、扩展及裂纹间摩擦滑动进入剧烈期,宏观裂纹相互搭接贯通,试件出现不同尺寸的碎屑块,此时低频、高频向中频逐渐扩散,中频信号数量更加密集。不同之处在于,当  $\beta$  为  $5^\circ$ 、 $35^\circ$  时,分级循环时中频信号的数量略多,说明此时岩石内部微裂纹的萌生、扩展并向大尺度裂纹过渡的时间早于其他试件。

表 2 不同倾角试件关联维数统计

Tab. 2 Correlation dimension statistics of specimens with different dip angles

数据单元	试件编号 A11		试件编号 A21		试件编号 A31		试件编号 A41	
	关联维数 $D$	相关系数 $R^2$						
1	1.142 6	0.983 9	1.353 7	0.937 3	1.433 5	0.979 8	0.572 9	0.871 1
2	1.678 1	0.851 9	1.519 0	0.958 5	1.519 0	0.957 0	0.588 1	0.864 3
3	1.420 9	0.879 0	1.460 5	0.960 7	1.406 6	0.965 1	0.753 4	0.908 3
4	1.789 0	0.855 1	1.430 8	0.962 4	1.470 2	0.951 8	0.907 9	0.945 3
5	1.125 4	0.818 6	1.558 9	0.967 3	1.131 5	0.920 7	0.942 5	0.983 3
6	1.477 4	0.831 2	1.361 9	0.957 5	1.383 9	0.980 5	0.814 8	0.968 7
7	1.254 0	0.900 7	1.401 1	0.977 3	1.450 0	0.951 7	0.744 3	0.879 3
8	1.605 8	0.909 1	1.513 9	0.966 2	1.522 3	0.963 0	0.896 9	0.958 4
9	1.206 0	0.858 1	1.347 9	0.951 6	1.429 4	0.964 3	0.736 6	0.901 1
10	0.779 0	0.907 4	1.288 5	0.958 5	1.580 5	0.966 4	0.446 6	0.928 5
11	0.662 6	0.967 0	1.242 0	0.955 1	1.207 5	0.935 2	0.431 9	0.818 6
12	0.624 8	0.956 5	1.362 9	0.960 7	1.203 5	0.937 8	0.456 6	0.849 7

## 5 声发射主频的分形特征

目前研究表明,声发射频谱信号可视为单时间变量的序列集,可能具有明显的分形特征。在分形理论中,关联维数常用来表征分形特征的分形维数<sup>[17,20]</sup>。1983年学者 Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和重构相空间思想,提出从混沌时间序列直接计算关联维数的 G-P 算法,这是混沌时间序列研究中的一个重要突破,其原理是采用延迟坐标状态空间重构法充分揭露时间序列集中蕴含的信息<sup>[21]</sup>。

本文将声发射主频信号作为研究对象,通过 G-P 算法对试件加载全过程的声发射参数进行关联维数的计算,分析不同裂纹倾角试件主频信号的分形维数特征,进而探索试件破坏时内部破坏特征,其中相空间维数  $m$  结合文献取  $m=5$ <sup>[17,20,22]</sup>。由于本文试验采用循环加载,只有最后一次加载是完整的破坏过程,所以对前两级主频信号取三个数据单元计算,最后一次加载时对主频信号取六个数据单元进行计算分析,结果如表 2 所示,其中  $D$  为分形维数,  $R^2$  为相关系数。

由表 2 可知,关联维数拟合曲线相关系数范围在 0.81~0.98,说明声发射主频信号具有明显的分形特征。为进一步探索主频信号关联维数的演化规律,对循环加载次数和关联维数进行结合分析,如图 10 所示。

现有研究表明,关联维数能对岩石受载变形破坏的有序度进行有效表征,即关联维数的降低往往说明岩石内部变形破坏正在有序发展。由图 10 可知,不同裂纹倾角试件的关联维数总体上呈

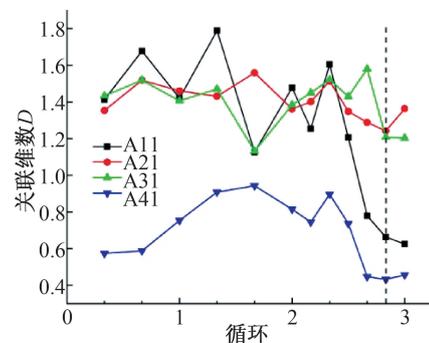


图 10 试件主频关联维数变化曲线

Fig. 10 Variation curve of dominant frequency correlation dimension of specimens

现先上升再下降的变化趋势。循环初期,关联维数呈现增大的趋势,说明受载初期岩石内部的天然不连续性结构在荷载作用下闭合、扩展,即裂纹的萌生、扩展时数量、尺寸自相似性较低,反映出岩石内部裂纹发育的复杂性。 $N=3$ 时,加载后期关联维数大幅下降后轻微上升,说明变形破坏后期,岩石内部微裂纹相互贯通形成主破裂面并向宏观破裂面靠近,宏观裂纹发育从离散无序向聚集有序过渡。仔细观察得知, $\beta=5^\circ、35^\circ$ 时,试件 A11 和 A41 关联维数变化幅度均大于 A21 和 A31;而试件 A21 和 A31 关联维数分布较为一致, A21 范围在 1.24~1.51 之间, A31 范围在 1.2~1.52 之间。说明 A11 和 A41 宏观裂纹的萌生、扩展及裂纹间摩擦滑动均比 A21 和 A31 剧烈,与图 8 中  $\beta=5^\circ、35^\circ$  时中频信号略多对应。由上述分析可知,不同裂纹倾角试件的主频信号具有分形特征,关联维数能很好从微观维度描述岩石内部变形破坏的趋势,其中关联维数变化幅度可以表征岩石

内部裂纹的发展剧烈程度。

## 6 结论

本文对四裂纹圆盘试件进行分级循环加载试验,结合数字照相技术和声发射分析了不同裂纹倾角对试件力学性能和裂纹扩展的影响,并通过声发射频域演化规律分析了试件内部的微裂纹发展情况,最后利用关联维数对变形破坏的有序度进行定量描述,得到以下结论:

1) 试件峰值荷载随裂纹倾角的增大呈逐渐降低的趋势,各裂纹倾角的峰值荷载依次为 61.58、47.7、45.29、36.83 kN;以  $\beta=5^\circ$  试件的峰值荷载为基准,其降幅依次为 22.53%、26.45%、40.19%;但是以试验值来看,试件  $\beta=15^\circ$  较  $\beta=10^\circ$  时峰值荷载无明显减小,并且试验数据分布范围出现重合。

2) 随着裂纹倾角的增大,试件预制裂纹的扩展无明显规律。其中首条裂纹起裂位置随裂纹倾角增大在试件上半部分预制裂纹之间依次转变,即“左-右-左”,说明试件内部的应力集中区域随着裂纹倾角的增大而改变。

3) 不同裂纹倾角 ( $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $35^\circ$ ) 试件主频均分布在 75~350 kHz 范围内,分为三个特征频段,即低频部分为 75~175 kHz,中频部分为 175~250 kHz,高频部分为 250~350 kHz。试件破坏过程中,各频段信号的出现具有一致性,说明岩石内部微裂纹的萌生、发育、扩展,与大尺度裂纹的出现具有同步性。总体上各频段信号的数量具有明显差异,即高、低频信号较为致密,中频信号稀疏,表现出“密-疏-密”的特征。

4) 分级循环加载下缺陷砂岩主频信号具有明显的分形特征,关联维数总体上呈现先上升再下降的变化趋势,变形破坏后期关联维数大幅下降后轻微上升,标志着岩石内部微裂纹相互贯通形成主破裂面并向宏观破裂面靠近,宏观裂纹发育从离散无序向聚集有序过渡;关联维数变化幅度可以表征岩石内部裂纹的发展剧烈程度。

## 参考文献:

[1] 董晋鹏,杨圣奇,李斌,等. 共面双裂隙类岩石材料抗拉强度试验研究[J]. 工程力学,2020,37(3):188-201.  
[2] 杨圣奇,张鹏超,滕尚永,等. 含三裂隙巴西圆盘抗拉强度和裂纹特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(1):90-98.

[3] ZHANG Z, DENG J, ZHU J, et al. An Experimental Investigation of the Failure Mechanisms of Jointed and Intact Marble under Compression Based on Quantitative Analysis of Acoustic Emission Waveforms[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51:2299-2307.  
[4] ZHOU J, ZENG Y, GUO Y, et al. Effect of Natural Filling Fracture on the Cracking Process of Shale Brazilian Disc Containing a Central Straight Notched Flaw[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2020,196:107993.  
[5] 何满潮,赵菲,张昱,等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学,2015,36(1):1-8.  
[6] WANG Y, DENG J, LI L, et al. Micro-failure Analysis of Direct and Flat Loading Brazilian Tensile Tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 4175-4187.  
[7] 陈国庆,唐鹏,李光明,等. 岩桥直剪试验声发射频谱特征及主破裂前兆分析[J]. 岩土力学,2019,40(5):1649-1656.  
[8] NIU Y, ZHOU X P, FILIPPO B. Temporal Dominant Frequency Evolution Characteristics During the Fracture Process of Flawed Red Sandstone[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2020,110:102838.  
[9] 班宇鑫,傅翔,谢强,等. 页岩巴西劈裂裂缝形态评价及功率谱特征分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(12):2307-2315.  
[10] 董方方,朱谭谭,屈子健. 基于颗粒流的富水岩石冻融后拉伸力学行为研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2021,38(3):22-29.  
[11] 朱其志,陈毓栋,余健,等. 不同状态灰砂岩应力松弛特性试验及本构模型研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2022,39(1):38-45.  
[12] 马春德,龙珊,胡顺喜,等. Kaiser 效应激发验证中的压头尺寸效应研究[J]. 实验力学,2020,35(1):91-99.  
[13] 张延新,曹龙辉,李泽杰,等. 不同循环加载应力下花岗岩 Kaiser 效应特征的试验研究[J]. 实验力学,2021,36(1):123-132.  
[14] 耿志伟,苏占东,王磊,等. 高径比对砂岩单轴压缩声发射特性的影响研究[J]. 实验力学,2021,36(2):250-258.  
[15] KAISER J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von Metallischen Werkstoffen[J]. John Wiley & Sons, Ltd. 1953,24(1-2):43-45.  
[16] 王创业,常新科,刘沂琳,等. 单轴压缩条件下大理岩破裂过程声发射频谱演化特征实验研究[J]. 岩土力学,2020,41(S1):51-62.

(下转第76页)

- 建筑,2019,49(5):159-165.
- [3] 胡苏,苏庆田,吴冲.正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J].结构工程师,2015,31(2):131-137.
- [4] KIM H Y, JEONG Y J. Steel-concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8-9):1751-1762.
- [5] 郭敏,张静,任伟新.波形钢-混凝土组合桥面板受力性能研究[J].世界桥梁,2016,44(3):73-77.
- [6] 朱伟庆,崔越,刘永健,等.开孔板连接件受剪承载力研究[J].建筑结构学报,2017,38(7):129-136.
- [7] KONG F L, HUANG P M, HAN B, et al. Experimental Study on Behavior of Borrugated Steel-concrete Composite Bridge Decks with MCL Shape Composite Dowels[J]. Engineering Structures,227(2021):111399.
- [8] 安然,王有志,周磊,等.剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):42-52.
- [9] 孔凡磊,黄平明,梅葵花,等.改进螺旋线型组合销剪力连接件承载力试验研究[J].桥梁建设,2020,50(2):43-48.
- [10] 蒋洪波,邱洪兴,杨原,等.钢-混凝土组合螺栓连接件极限强度及剪力-位移关系[J].东南大学学报:自然科学版,2020,50(1):56-63.
- [11] 苏庆田,田乐,曾明根,等.正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能研究[J].工程力学,2016,33(S1):138-142.
- [12] 张清华,程震宇,廖贵星,等.波形顶板-UHPC组合桥面板优化设计[J].西南交通大学学报,2018,53(4):14-22.
- [13] 徐宙元,赵人达,牟廷敏.带开孔钢板剪力连接件的钢-混凝土组合桥面板受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(S1):382-388.
- [14] KIM H Y, JEONG Y J. Ultimate Strength of a Steel-Concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Engineering Structures,2010,32(2):534-546.
- [15] 王涛,方淑君.PBL剪力键静承载能力试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(6):1249-1254.
- [16] 杨梦月.波形顶板-UHPC组合桥面板正弯矩作用下的受力性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- (责任编辑 王利君)

(上接第63页)

- [17] 张艳博,梁鹏,孙林,等.单轴压缩下饱水花岗岩破裂过程声发射频谱特征试验研究[J].岩土力学,2019,40(7):2497-2506.
- [18] 张艳博,于光远,田宝柱,等.花岗岩破裂过程声发射主频多元前兆信息识别[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):355-362.
- [19] 张艳博,梁鹏,田宝柱,等.花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2248-2258.
- [20] 赵奎,杨道学,曾鹏,等.单轴压缩条件下花岗岩声信号频域特征分析[J].岩土工程学报,2020,42(12):2189-2197.
- [21] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of Strange Attractors[J]. Physical Review Letters,1983,50(5):346.
- [22] 张艳博,梁鹏,孙林,等.基于HHT的粉砂岩破裂声发射信号频率特性研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):179-184.
- (责任编辑 王利君)

(上接第69页)

- [9] 唐晨景,杨贵,许建宝.玻璃球模拟堆石料强度和变形特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):861-865.
- [10] 孔德志,张丙印,孙逊.人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(3):464-469.
- [11] 何森林,黄昕,张子新.石膏试件的力学特性研究[J].地下空间与工程学报,2016(S1):7.
- [12] 杨贵,许建宝,孙欣,等.颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3113-3118+3153.
- [13] 周泳峰,王俊杰,王爱国,等.缩尺效应对堆石料颗粒破碎特性的影响[J].水电能源科学,2021,39(8):165-168+65.
- [14] 杨少博,邱珍锋,王爱国,等.考虑缩尺效应对颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J].长江科学院院报,2022,39(2):122-128.
- [15] 魏巍,姜程程,覃燕林,等.人工模拟堆石料颗粒破碎的分形特性[J].人民黄河,2014,36(12):126-129.
- (责任编辑 王利君)