

DOI: 10.11779/CJGE202012004

# 单轴压缩条件下花岗岩声学信号频域特征分析

赵奎<sup>1, 2</sup>, 杨道学<sup>1, 2</sup>, 曾鹏<sup>\*1, 2</sup>, 丁健华<sup>1, 2</sup>, 龚鹵<sup>1, 2</sup>, 王晓军<sup>1, 2</sup>, 钟文<sup>1, 2</sup>

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 岩石失稳破坏往往会导致严重的工程问题和地质灾害, 为了探讨花岗岩失稳破坏过程的演化机制及前兆特征, 进行了单轴压缩声学试验, 对花岗岩试件失稳破坏过程伴生的声发射信号及次声信号频域信息演化特征进行了分析。研究表明: 低于 100 kHz 频段的声发射事件在花岗岩试件峰值破坏前夕逐渐减少, 而高于 250 kHz 频段的声发射事件在花岗岩试件峰值破坏前夕逐渐增多; 花岗岩试件在发生峰值破坏前会经历平均频率质心的“相对上升期”及“相对稳定期”, 并且会在“相对稳定期”发生峰值破坏; 次声信号主频分布在 0.01~20 Hz, 其中 5~15 Hz 频段的次声信号分布最多, 占比约为 62.5%; 峰值应力前相对应力水平大于 80%时, 第一频段和第三频段的次声信号占比达到最低值, 第二频段占比达到最高值; 最后, 计算了花岗岩变形破坏过程次声信号主频的分形维数, 该分形维数在临近峰值应力时下降到最小值。上述峰值应力前声学信号的特征可作为其破坏前兆特征。

**关键词:** 声学信号; 主频; 平均频率质心; 分形维数; 破坏前兆

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)12-2189-09

**作者简介:** 赵奎(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: yglmf\_zk@163.com。

## Frequency-domain characteristics of acoustic signals of granite under uniaxial compression

ZHAO Kui<sup>1, 2</sup>, YANG Dao-xue<sup>1, 2</sup>, ZENG Peng<sup>1, 2</sup>, DING Jian-hua<sup>1, 2</sup>, GONG Cong<sup>1, 2</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1, 2</sup>, ZHONG Wen<sup>1, 2</sup>

(1. Jiangxi University of Science and Technology School of Resources and Environmental Engineering, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Mining Engineering of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Instabilities that have the potential to cause rock failures are serious engineering problems that can lead to geological disasters. In this study, a uniaxial compression acoustic test is conducted to explore the precursors of instability failures in granite, and the evolution characteristics of the accompanying acoustic emission (AE) and infrasound signals are evaluated in the frequency domain. The experimental results show that the AE events below 100 kHz decrease gradually before the peak failure of granite specimens, while the AE events above 250 kHz increase gradually. The average frequency centroid of rock specimens undergoes a “relative rising period” and a “relative stable period” before the peak failure, which occurs during the relative stable period. The dominant frequencies between 5 to 15 Hz of infrasound signals are about 62.5% of the total on average. When the relative stress level before the point of peak stress is more than 80%, the infrasound signal proportion in the first and third frequency bands is at its lowest, whereas the proportion in the second frequency band is at its highest. Finally, the dominant frequency of infrasound signal in the process of granite deformation and failure is fractal-processed, and it is found that the fractal dimension of the dominant frequency of infrasound signal decreases to the minimum value before the peak stress. The above characteristics of acoustic signal before the peak stress can be regarded as the precursory features of the critical failure.

**Key words:** acoustic signal; main frequency; average frequency centroid; fractal dimension; failure precursor

## 0 引言

随着国民经济的快速发展, 社会对能源需求量也在不断地增加, 浅部矿产资源的日益衰竭, 国内外部分矿山相继实施了深部矿产资源的开采计划<sup>[1]</sup>。随着矿山开采的深度增加, 地质灾害出现的频率也在不断

增加, 对深部矿产资源的安全高效开采造成了巨大威

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0804601); 国家自然科学基金项目(51664018, 51704128); 江西理工大学优秀博士论文培育项目(3105500025)

**收稿日期:** 2020-03-01

**\*通信作者** (E-mail: zengpeng23@126.com)

胁，引起了国内外研究学者的广泛关注<sup>[2]</sup>。

经研究发现：无论是各种自然灾害或地质灾害的产生过程，还是岩石、煤样加载破坏过程，都是材料内部能量释放的过程，这种能量释放的过程中经常伴随着声发射、次声波、电磁辐射的产生<sup>[3-4]</sup>。目前，国内外学者在岩石变形破坏过程的声发射时域参数特征及破坏征兆方面取得了大量研究成果<sup>[5-8]</sup>，但由于声发射信号频率较高，尤其是在岩石峰值应力破坏前大量微裂纹合并形成宏观裂纹，导致声发射信号能量在传播过程中加快了其衰减速率。因此，声发射信号时域参数在工程实际应用中仍受到较大限制。次声是一种频率在 0.01~20 Hz 的低频声波信号，次声在含有大量微裂纹的岩石内部传播时，由于其波长较长，可以直接穿过岩石内部的微裂纹，不易发生声波绕射、折射、反射等物理现象，所以次声波在传播过程中能量衰减速率较慢且其穿透力较强<sup>[9-11]</sup>。因此，通过研究岩石变形破坏过程中声学信号的频域特征及其力学特性之间的变化规律，对深入研究岩体破坏发生机制具有重要的科学意义和实际指导意义。

自 1883 年喀拉喀托火山爆发时低频次声波信号被首次记录以来<sup>[12]</sup>，国内外学者对次声波信号在监测、预警自然灾害和地质灾害方面，进行了大量研究。美国国家海洋和大气管理局早期研究表明，雪崩过程中会产生大量的 1~5 Hz 次声信号，最终科学家在欧洲利用设计的雪崩预测次声探测系统对雪山雪崩发生时刻进行了有效预测<sup>[13]</sup>。Zhu 等<sup>[14-15]</sup>对花岗岩等 6 种不同岩性的试样进行了单轴压缩次声试验，结果表明，岩石在破坏前加载过程中存在明显的次声信号现象，在结构较完整的情况下，硬岩在变形破坏过程中产生的次声信号数量要比软岩多，不同岩性的岩石试件变形破坏过程中次声信号主频分布情况未存在较为明显的差异性。以上研究结果表明：次声信号对地质灾害及岩石工程的稳定性监测有着重要意义。

同时，国内外学者利用声发射信号特征对岩石变形破坏的研究也取得了丰硕成果：Lavrov 等<sup>[16]</sup>利用声发射事件和能量，对黏土和盐岩在外部载荷作用下的内部损伤演化特征进行了研究；Zhang 等<sup>[17]</sup>利用声发射技术，对深部煤层开采时应力集中造成的岩石破裂演化机制进行了研究；邓建辉等<sup>[18]</sup>、Zhang 等<sup>[19]</sup>对声发射信号主频与大理岩破坏形式之间的关系进行了研究，结果表明大理岩试件压缩过程多产生微观剪切破坏(对应高频声发射信号)，高频声发射信号占比更大。Wong 等<sup>[20]</sup>通过对 AE 事件和能量的分析，研究了花岗岩 I 型断裂过程中微裂纹的分布特征。上述研究结果表明，声发射的时域参数可以表征岩石内部的微裂纹发展。但是，这些时域参数相对较容易受到工作环

境的噪音污染，从而影响对岩石变形破坏过程内部损伤特征的判断。因此，利用声发射信号的频域信息表征岩石内部微裂纹演化特征，显得尤为重要。

以上文献分析表明，目前对岩石变形破坏过程中声学信号的研究，主要集中在对次声信号主频、幅值、能率及声发射事件率、振铃计数、能率等方面，但通过声发射及次声相耦合的方法对岩石破坏机制及其破坏前兆特征的研究还相对比较少见。本文拟在单轴压缩条件下花岗岩试件变形破坏过程中的声发射信号及次声信号时频分析的基础上，着重研究峰值应力前不同主频频段次声信号及声发射信号平均频率质心的变化特征，以及峰值应力前次声信号主频的分形维数分布特征，寻求花岗岩变形破坏过程中声学信号的前兆特征，为实现通过声学信号监测、预测围岩失稳破坏提供一定的理论依据。

1 试验过程

1.1 花岗岩试件制备

花岗岩是地壳岩层中较为常见的一类岩浆岩，本文对取自于内蒙古某铜矿深部采场的花岗岩试件进行单轴压缩声学信号采集试验，利用套孔应力解除法测得取样点处的原岩应力：最大主应力为 20.74 MPa，中间主应力为 10.46 MPa，最小主应力为 2.33 MPa。按照国际岩石力学学会 (ISRM) 试验规程将花岗岩加工成  $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的标准圆柱形试件。为了弱化压力机对花岗岩试件在加载过程中的端部效应，利用打磨机对花岗岩试件两端进行了打磨，尽量保证花岗岩试件两端面的平整。然后测量记录每块花岗岩试件的质量、波速及其尺寸，挑选 4 块波速相近的花岗岩试件进行单轴压缩声学信号采集试验，具体参数参见表 1。

表 1 花岗岩试件几何尺寸及波速

Table 1 Geometric dimensions and wave velocities of granite specimens

试件编号	直径/mm	高度/mm	质量/g	波速/(m·s <sup>-1</sup> )
H-1	48.50	99.30	485.73	3478
H-2	48.64	99.70	486.45	3561
H-3	48.64	99.44	488.01	3587
H-4	48.38	99.30	483.67	3459

1.2 试验设备及试验方案

加载设备为 RMT-150C 岩石力学试验系统，次声波信号采集设备是中国科学院声学研究所研发的 CASI-ISM-2009 型次声波采集仪及配套的数字记录仪，声发射采集系统是美国物理声学公司生产开发的 Micro-II Digital AE System 硬件和 AEwin 软件。加载方式为轴向位移控制，加载速率为 0.001 mm/s；次声传感器放置在与加载设备相距 50 cm 处桌面上，次声

信号采集频率设置为 640 点/秒; 本文选择 UT1000 型的声发射探头, 声发射探头与岩石试件接触面涂抹一层凡士林, 以确保声发射探头与岩石试件之间的充分耦合。

试验中 AE 的门槛阈值设置为 35 dB, 前置增益设置为 40 dB, 采样率为 1MSPS。加载试验之前, 次声信号采集设备采集一段加载系统处于开机状态下的次声信号, 作为本次试验的环境噪音信号。

试验开始时, 同步运行加载系统、次声信号采集设备及声发射信号采集设备, 同时记录加载过程的轴向应力、轴向应变、次声信号及声发射信号的相关参数。试验测得的各花岗岩试件轴向应力 - 应变曲线如图 1 所示。

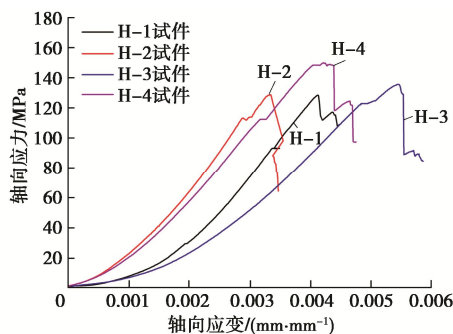


图 1 轴向应力 - 应变曲线

Fig. 1 Curves of axial stress-strain

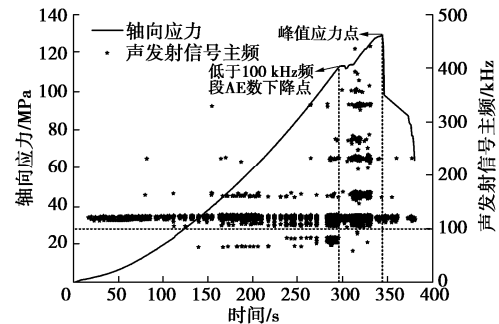
## 2 声发射信号频域特征演化分析

岩石试件内部含有大量随机分布的微裂纹, 在变形破坏过程中会出现应力集中现象, 驱动其内部的微裂纹萌生与扩展, 最终导致岩石内部储存的应变能以弹性波的形式被瞬间释放, 产生声发射现象<sup>[21]</sup>。因此, 声发射信号中包含着大量岩石变形破坏过程中的内部损伤断裂演化信息。其中, 主频与频率质心是声发射信号的两个重要频域特征。频率质心是指由其振幅谱与其频率乘积之和除以振幅谱之和而得到的, 其也被称为信号的第一惯性矩。频率质心与声发射信号频段能量之间存在如下关系: 声发射信号的高频能量越高, 则该声发射信号的频率质心就会越大; 否则, 该声发射信号的频率质心就会越低。

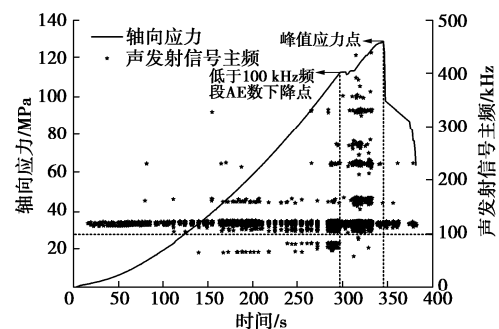
为了研究单轴压缩条件下花岗岩试件在变形破坏过程中的声发射信号主频变化特征, 对采集到的声发射信号在 MATLAB 计算平台进行快速傅立叶转换, 提取所有声发射信号的主频, 并绘制如图 2 所示的声发射信号主频、轴向应力与时间之间关系曲线。

由图 2 可知: 花岗岩试件变形破坏过程中会产生大量的声发射事件, 并且, 声发射信号主频主要集中于 100~120 kHz 频段; 高于 250 kHz 频段的声发射事

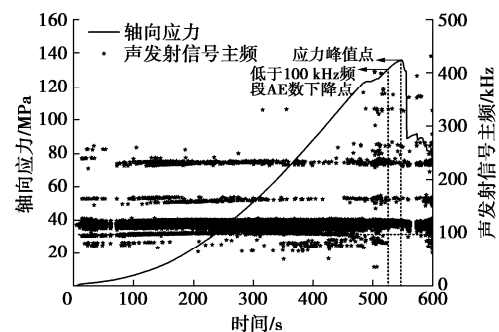
件主要集中于岩石试件峰值破坏前夕及其峰后破坏阶段; 同时, 低于 100 kHz 频段的声发射事件在岩石试件峰值破坏前夕逐渐减少, 而高于 250 kHz 频段的声发射事件在岩石试件峰值破坏前夕逐渐增多。



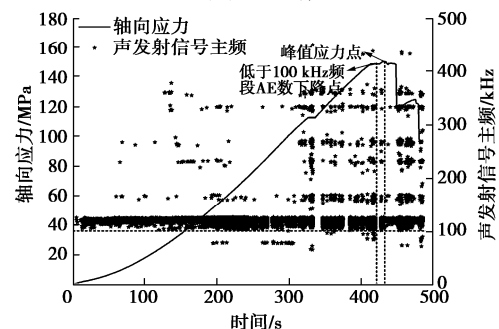
(a) H-1 试件



(b) H-2 试件



(c) H-3 试件



(d) H-4 试件

图 2 声发射信号主频、轴向应力与时间之间的关系曲线

Fig. 2 Curves of main frequency of acoustic emission signal, axial stress and time

为了进一步研究花岗岩试件变形破坏过程中声发射信号的频域信息演化特征, 本文提出了平均频率质心这一概念。平均频率质心是指每秒内所有声发射信

号的频率质心平均值,通过 MATLAB 计算平台对各岩石试件的平均频率质心进行统计分析,并绘制如图 3 所示的平均频率质心、轴向应力与时间之间关系曲线。

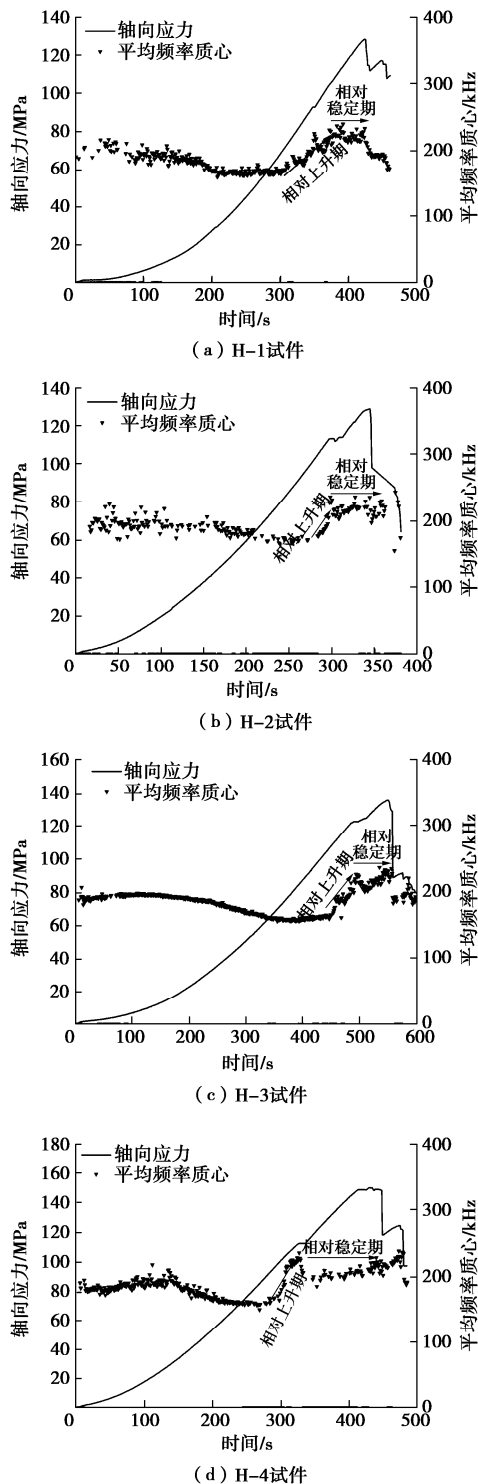


图 3 平均频率质心、轴向应力与时间之间的关系曲线

Fig. 3 Curves of average frequency centroid of acoustic emission signal, axial stress and time

由图 3 可知:花岗岩试件在发生峰值破坏前会经历平均频率质心的“相对上升期”及“相对稳定期”,

并且在“相对稳定期”会发生峰值破坏。结合图 2 可知,平均频率质心的“相对上升期”与主频高于 250 kHz 频段的声发射事件激增息息相关;随着时间的推移,主频高于 250 kHz 频段声发射事件的发生概率保持相对稳定,此时平均频率质心进入了“相对稳定期”,岩石试件发生峰值破坏,这一特征可作为岩石试件临界破坏的前兆特征。以上研究结果表明:声发射信号的频率质心变化特征与花岗岩试件内部的微裂纹萌生、扩展及合并过程息息相关。

3 次声信号频域特征演化分析

3.1 小波阈值滤波处理

由于试验过程中次声信号的采集方式为非接触式,空气作为次声波传播的主要载体,采集到的次声信号中将掺杂着许多环境噪音信号,为了消除采集到的次声信号中环境噪音,需对采集的次声信号进行滤波处理。目前常用的信号滤波方法有:傅里叶变换滤波、小波包滤波,小波阈值滤波等各种方法<sup>[22]</sup>,限于篇幅原因,各种滤波算法原理就不详细地介绍,滤波详细原理参见文献<sup>[22]</sup>。本文利用小波阈值滤波方法对采集到的次声信号进行滤波处理,对试验中采集到的次声信号进行小波分解、重构,得到滤除环境噪音后的次声信号时域波形。

3.2 次声信号主频不同频段分布规律

对时域波形进行快速傅里叶变换,可以得到信号的能量频域分布信息,进而揭示信号在频域内分布特征,为人们提供了将时域信号转换到频域观察的一种手段,在传统的信号分析与处理发展史上发挥着不可替代的作用。故本文采用快速傅里叶变换对岩石试件变形破坏过程中的次声信号进行时频分析。本次试验中次声采集设备的采样频率为 640 点/秒,对小波阈值滤波处理后的连续次声信号以 640 个点为一个次声事件进行截取,对截取后次声事件进行快速傅里叶变换,通过快速傅里叶变换后绘制了岩石试件次声信号的时频分析图,如图 4 所示。

由图 4 可知:花岗岩试件变形破坏过程中的次声信号主频主要分布在 0.01~20 Hz 范围内,次声信号主频分布随着试验时间的增大在不断发生变化,没有特别显著的时间序列分布规律。因此,为了对岩石试件变形破坏过程中的次声信号主频分布特征进行研究,可将次声信号按照主频大小划分不同频段进行分析,根据次声信号主频分布范围,可以将其的主频划分成 4 等分,得到各频段的长度为 5 Hz,频段范围为 0.01~5 Hz, 5~10 Hz, 10~15 Hz, 15~20 Hz,统计各频段次声信号数占整个试验过程中次生信号数的比

例<sup>[23]</sup>, 则各频段次声信号数占比详细参数如表 2 所示。

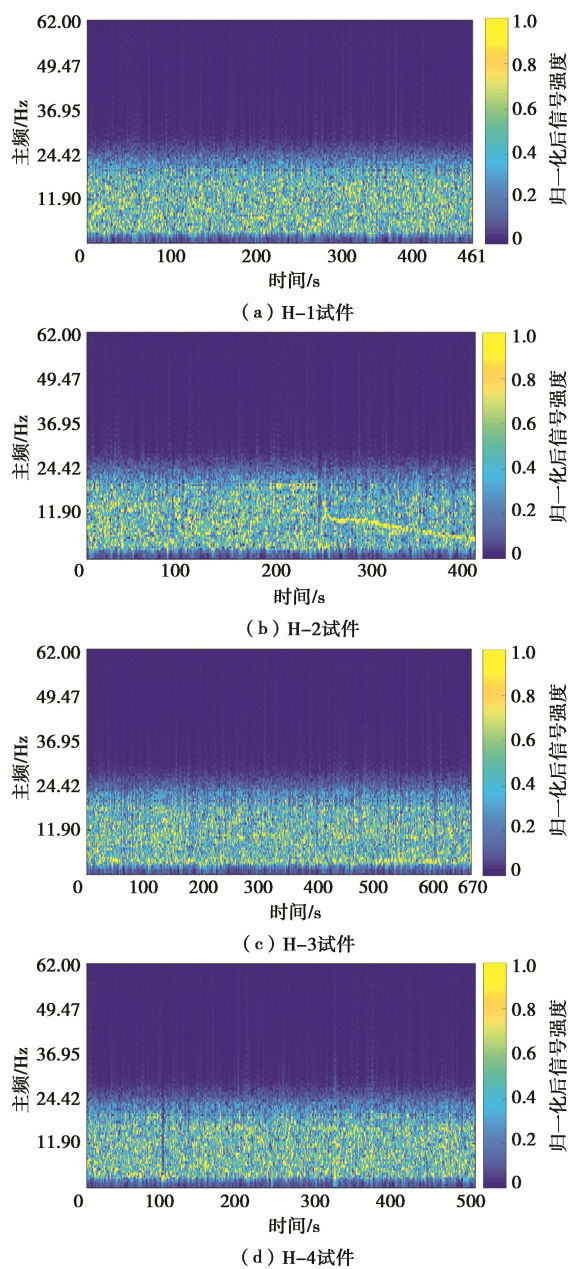


图 4 次声信号的时频分析结果  
Fig. 4 Time-frequency results of infrasound signal

表 2 不同频段占比

Table 2 Proportions of different frequency bands				
试件编号	0.01~5 Hz	5~10 Hz	10~15 Hz	15~20 Hz
H-1	0.260	0.320	0.286	0.134
H-2	0.179	0.375	0.309	0.137
H-3	0.233	0.311	0.305	0.152
H-4	0.234	0.301	0.291	0.173
平均值	0.226	0.327	0.298	0.149

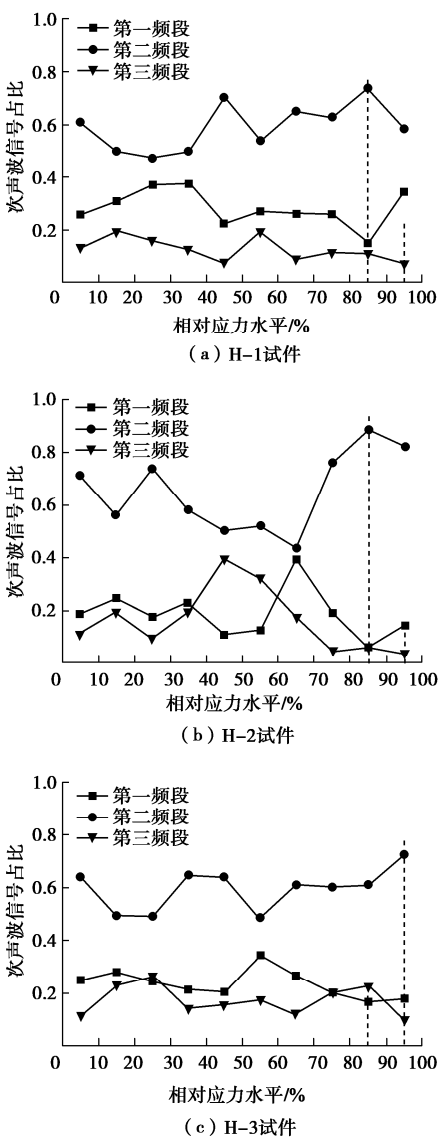
表 2 分析表明: 0.01~5 Hz 频段的次声信号数平均占比为 22.6%; 5~10 Hz 频段的次声信号数平均占比为 32.7%; 10~15 Hz 频段的次声信号数平均占比为 29.8% (高于 0.01~5 Hz 频段及 15~20 Hz 频段的次声信号数平均占比); 15~20 Hz 频段的次声信号数平

均占比为 14.9%。4 块花岗岩试件变形破坏过程中的次声信号主频主要集中在 5~10 Hz 及 10~15 Hz 频段内, 平均占比为 62.5%; 主频在 15~20 Hz 频段的次声信号占比最少。

根据岩石试件变形破坏过程中次声信号主频分布特征, 将岩石试件变形破坏过程中次声信号主频为 0.01~5 Hz 频段定义为第一频段, 5~15 Hz 为第二频段, 15~20 Hz 为第三频段, 将峰值应力前相对应力水平划分 10 个分段, 对每个分段的 3 个频段按照下式进行次声信号数量统计分析:

$$\eta_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_{j=1}^3(n_{i,j})} \quad (i=1,2,\cdots,10; j=1,2,3), \quad (1)$$

式中,  $\eta_{i,j}$  为第  $i$  个相对应力水平分段的第  $j$  频段次声信号占比,  $n_{i,j}$  为第  $i$  个相对应力水平分段的第  $j$  频段次声信号数量。不同相对应力水平下 3 个频段次声信号数量占比的变化情况如图 5 所示。





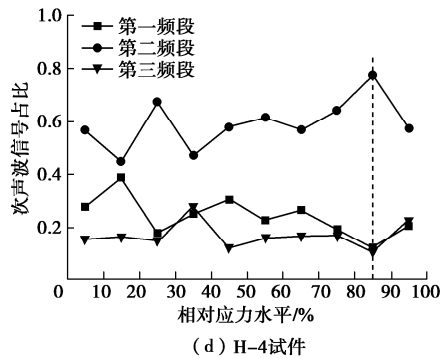


图 5 不同相对应力水平不同频段次声信号占比

Fig. 5 Proportions of different frequency bands of infrasound signals with different relative stress levels

由图 5 可知：H-1、H-2 试件的第一频段（0.01~5 Hz）和第三频段（15~20 Hz）分别在相对应力水平为 80%~90%、90%~100%分段内占比最低，而其第二频段（5~15 Hz）在相对应力水平为 80%~90%分段内占比最高；H-3 试件的第一频段和第三频段分别在相对应力水平为 80%~90%、90%~100%分段内占比最低，第二频段在相对应力水平为 90%~100%分段内占比最高；H-4 试件的第一频段和第三频段在相对应力水平为 80%~90%分段内占比最低，第二频段在相对应力水平为 80%~90%分段内占比最高。

上述结果分析表明，第一频段和第三频段占比在相对应力水平大于 80%以后，达到最低值，而第二频段占比达到最高值。因此，次声信号主频的第一、第三及第二频段占比的变化规律可作为应力峰值前的特征，进而可作为其破坏前兆特征。

3.3 次声信号主频的分形特征

20 世纪末期岩石力学研究学者将分形理论引入到岩石力学中，用于研究和描述复杂的岩石自然结构形状和物理力学性质中的非线性问题。岩石是一种复杂的自然地质体，在外部载荷作用下岩石内部的各种微裂纹会发生萌生、孕育、传播和合并等活动，并且最终贯通形成宏观裂纹及其主破裂面，该过程中往往会释放出各种频段的声信号<sup>[14]</sup>。由于岩石试件内部的矿物成分含量、结晶颗粒大小及其微裂纹结构的差异性，导致岩石试件变形破坏过程中产生不同主频的次声信号。本文采用 G-P 关联维度计算方法<sup>[24-27]</sup>，对花岗岩试件变形破坏过程中的次声信号主频进行分形维数计算，分析花岗岩试件次声信号随主频时间分布的分形维数特征，进而研究花岗岩试件峰值破坏的前兆特征。

将连续的次声信号以 640 个点为一个次声事件进行截取，通过快速傅里叶变换计算出各次声信号的主频，最终依次选取 30 个次声信号主频作为一个数据单元，通过 G-P 关联维度计算方法得到分形维数  $D$  值与

相空间维数  $m$  值的关系<sup>[27]</sup>，最终确定相空间维数  $m$  值取 5，根据相空间维数  $m$  值和 G-P 关联维度算法，得到不同尺度  $r$  及其相应的关联函数  $C(r)$  对数关系曲线，该曲线的直线拟合的斜率即为次声信号主频的分形维数  $D$  值。这里仅列出 4 个试件最后一次计算得到的次声信号主频的分形维数线性拟合图，如图 6 所示。

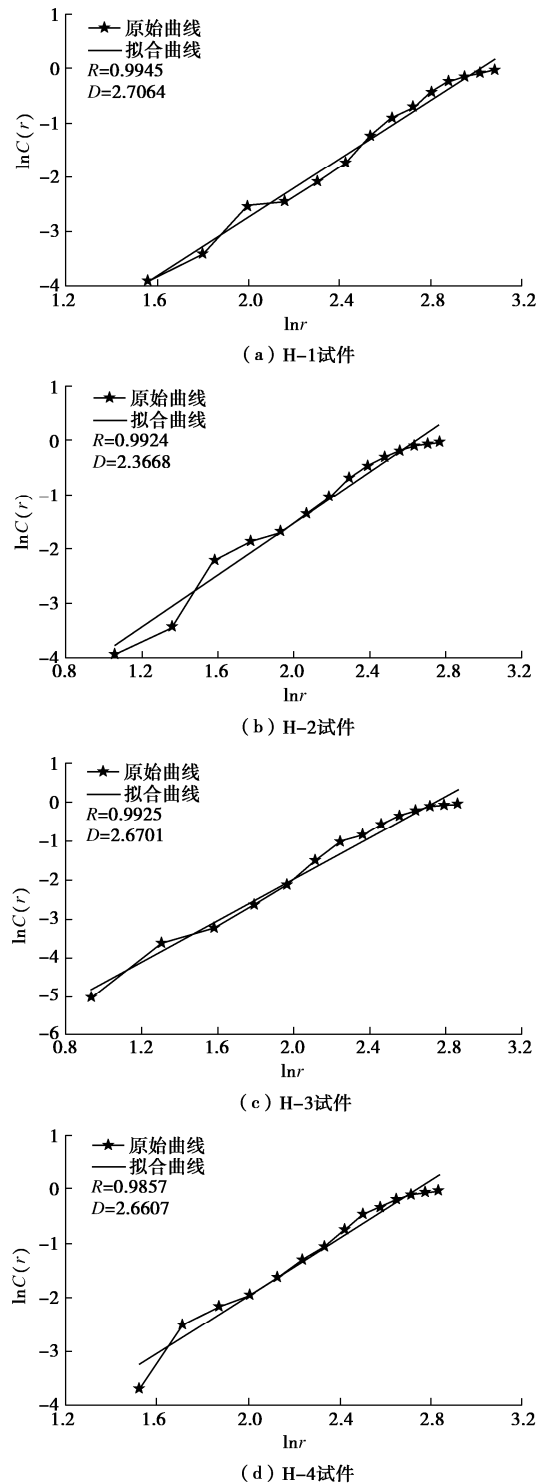


图 6 次声信号主频的分形维数线性拟合图

Fig. 6 Linear fitting of fractal dimensions of main frequency

由图 6 可知，最后一次计算得到的次声信号主频

的分形维数线性回归分析的相关系数均大于 0.98, H-1 试件所有分形维数线性回归拟合的相关系数最小值为 0.9623, H-2 试件为 0.9572, H-3 试件为 0.9487, H-4 试件为 0.9579, 说明次声信号主频随时间分布具有明显的分形特征。为了进一步研究分形维数在岩石试件变形破坏过程中的变化特征, 对次声信号主频的分形维数、轴向应力与时间关系进行联合分析, 如图 7 所示。

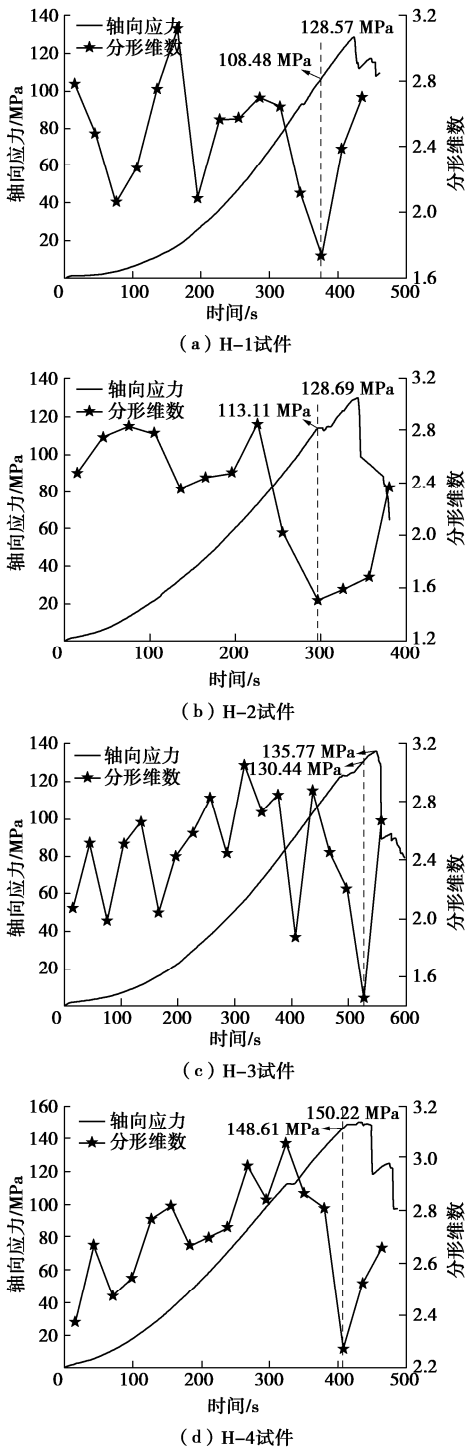


图 7 次声信号主频分形维数、轴向应力与时间的关系

Fig. 7 Relationship among fractal dimensions of main frequency, axial stress and time

分形维数和岩石试件内部破坏形式有序度相关<sup>[26-29]</sup>, 研究表明: 分形维数的减小往往标志着岩石试件内部破坏有序度增加, 反之亦然。由图 7 可知, 单轴压缩条件下加载初期, 次声信号主频分形维数整体上呈现上升的变化趋势, 说明岩石试件内部的破坏形式有序度在逐渐降低, 伴随着微裂纹闭合、扩展等复杂过程。随着应力的不断增加, 分形维数增加、减小的变化幅度更大, 反映了岩石内部破坏的复杂性。值得注意的是, 岩石试件在峰值应力前, 次声信号主频分形维数都会持续下降到最小值, 然后再增加。H-1、H-2、H-3、H-4 试件的分形维数最小值对应的应力分别为 108.48, 113.11, 130.44, 148.61 MPa, 与对应的峰值应力比值即相对应力水平分别为 84.37%, 87.89%, 96.07%, 98.92%, 峰值前次生信号主频分形维数下降到最小值是岩石试件临界破坏前兆特征。

## 4 结 论

(1) 花岗岩试件变形破坏过程中的声发射信号主频主要集中于 100~120 kHz 频段; 高于 250 kHz 频段的声发射事件主要集中于岩石试件峰值破坏前夕及其峰后破坏阶段; 低于 100 kHz 频段的声发射事件在岩石试件峰值破坏前夕逐渐减少, 而高于 250 kHz 频段的声发射事件在岩石试件峰值破坏前夕逐渐增多。

(2) 岩石试件在发生峰值破坏前会经历平均频率质心的“相对上升期”及“相对稳定期”, 并且会在“相对稳定期”发生峰值破坏, 这一特征可作为岩石试件临界破坏的前兆特征。

(3) 单轴压缩条件下花岗岩次声信号主频随时间变化具有明显的分形特征, 加载初期阶段, 次声信号主频分形维数表现为上升的趋势, 随着应力的增加, 分形维数呈现增加、减小交替变化, 在峰值应力前, 相对应力水平超过 80% 以后, 下降到最小值。

(4) 利用声发射信号及次声信号的频域特征相耦合方法对花岗岩试件临界破坏进行判断, 可以弱化岩石试件内部微裂纹的不均匀分布对破坏前兆特征判断的影响, 为岩石工程提供一种对更加安全可靠的监测方法。

## 参考文献:

[1] 何满朝, 钱七虎. 深部岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (HE Man-cao, QIAN Qi-hu. The Basis of Deep Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))

[2] HE M C. Rock mechanics and hazard control in deep mining engineering in China[C]// In Rock Mechanics In

- Underground Construction: (With CD-ROM). 2006.
- [3] BULASHEVICH Y P, UTKIN V I, YURKOV A K, et al. Possibility to predict the time of rock bursts from radon emanation variations[J]. Gornyi Zhurnal, 1996, **6**: 33 – 37.
- [4] MARUYAMA T, SHINAGAWA H. Infrasonic sounds excited by seismic waves of the 2011 Tohoku-oki earthquake as visualized in ionograms[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, **119**(5): 4094 – 4108.
- [5] KIM J S, LEE K S, CHO W J, et al. A comparative evaluation of stress-strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**: 495 – 508.
- [6] LIANG Y P, LI Q M, GU Y L, et al. Mechanical and acoustic emission characteristics of rock: effect of loading and unloading confining pressure at the post-peak stage[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, **44**: 54 – 64.
- [7] PETRUZALEK M, LOKAJICEK T, SVITEK T, et al. Fracturing of migmatite monitored by acoustic emission and ultrasonic sounding[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**: 47 – 59.
- [8] FLORIAN A, YVES L G, MONTSE S, et al. Analysis of acoustic emissions recorded during a mine by experiment in an underground research laboratory in clay shales[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, **106**: 51 – 59.
- [9] 李朝安, 王良玮, 廖凯, 等. 山区铁路沿线泥石流灾害预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 2): 3810 – 3816. (LI Chao-an, WANG Liang-wei, LIAO Kai, et al. Study of early warning mechanism of debris flow of along railway line in mountainous areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 3810 – 3816. (in Chinese))
- [10] 孟亮, 李夕海, 刘代志. 远程事件次声监测中的信号参数二维子空间计算方法[J]. 地球物理学报, 2017, **60**(2): 678 – 687. (MENG Liang, LI Xi-hai, LIU Dai-zhi. Two-dimensional subspace algorithm for the slowness and azimuth of infrasound signals in the distant events monitoring[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, **60**(2): 678 – 687. (in Chinese))
- [11] 徐洪, 周廷强. 岩石变形破坏次声异常的能量特征研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(6): 1044 – 1050. (XU Hong, ZHOU Ting-qiang. Energy characteristics of infrasound abnormality during rock deformation and failure of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(6): 1044 – 1050. (in Chinese))
- [12] MATOZA R S, HEDLIN M A H, MILTON A. An infrasound array study of Mount St. Helens[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 2007, **160**(3): 249 – 262.
- [13] SCOTT E D, HAYWARD C T, KUBICHEK R F, et al. Single and multiple sensor identify-cation of avalanche-generated infrasound[J]. Cold Regions Science & Technology, 2007, **47**(2): 160 – 170.
- [14] ZHU X, XU Q, ZHOU J, et al. Experimental study of infrasonic signal generation during rock fracture under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **60**(2): 37 – 46.
- [15] 朱星, 许强, 汤明高, 等. 典型岩石破裂产生次声波试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1306 – 1312. (ZHU Xing, XU Qiang, TANG Ming-gao, et al. Experimental study of infrasound wave generated by typical rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1306 – 1312. (in Chinese))
- [16] LAVROV A, VERVOORT A, FILIMONOV Y, et al. Acoustic emission in host-rock material for radioactive waste disposal: comparison between clay and rock salt[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, **61**(4): 379 – 387.
- [17] ZHANG M W, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. Evolution and effect of the stress concentration and rock failure in the deep multi-seam coal mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**: 629 – 643.
- [18] 邓建辉, 李林芮, 陈菲, 等. 大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探[J]. 工程科学与技术, 2018, **50**(5): 12 – 17. (DENG Jian-hui, LI Lin-rui, CHEN Fei, et al. Twin-peak frequencies of acoustic emission due to the fracture of marble and their possible mechanism[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, **50**(5): 12 – 17. (in Chinese))
- [19] ZHANG Z H, DENG J H, ZHU J B, 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**(7): 2299 – 2307.
- [20] WONG L N Y, GUO T Y. Microcracking behavior of two semi-circular bend specimens in mode I fracture toughness test of granite[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, **221**: 106565.



- [21] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, et al. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, **51**: 969 – 988.
- [22] 范 虹. 非平稳信号特征提取方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (FAN Hong. Nonstationary Signal Feature Extraction Method and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [23] 曾 鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(3): 509 – 517. (ZENG Peng, LIU Yang-jun, JI Hong-guang, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(3): 509 – 517. (in Chinese))
- [24] 赵 奎, 王更峰, 王晓军, 等. 岩石声发射 Kaiser 点信号频带能量分布和分形特征研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(11): 3082 – 3088. (ZHAO Kui, WANG Geng-feng, WANG Xiao-jun, et al. Research on energy distributions and fractal characteristics of Kaiser signal of acoustic emission in rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(11): 3082 – 3088. (in Chinese))
- [25] 汪富泉, 罗朝盛, 陈国先. G-P 算法的改进及其应用[J]. *计算物理*, 1993, **10**(3): 345 – 351. (WANG Fu-quan, LUO Chao-sheng, CHEN Guo-xian. An improvement of G-P algorithm and its application[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1993, **10**(3): 345 – 351. (in Chinese))
- [26] 曾 鹏, 纪洪广, 高 宇, 等. 三轴压缩下花岗岩声发射 Kaiser 点信号频段及分形特征[J]. *煤炭学报*, 2016, **41**(增刊 2): 376 – 384. (ZENG Peng, JI Hong-guang, GAO Yu, et al. Characteristics of fractal and frequency bands at Kaiser signal of acoustic emission in granite under triaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, **41**(S2): 376 – 384. (in Chinese))
- [27] 赵 奎, 周永涛, 曾 鹏, 等. 三点弯曲作用下不同粒径组成的类岩石材料声发射特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, **43**(11): 3107 – 3114. (ZHAO Kui, ZHOU Yong-tao, ZENG Peng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock-like materials with different particle sizes under three points bending[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, **43**(11): 3107 – 3114. (in Chinese))
- [28] 赵 奎, 杨泽元, 曾 鹏, 等. 单轴压缩下尾砂胶结充填材料次声波特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(增刊 1): 92 – 100. (ZHAO Kui, YANG Ze-yuan, ZENG Peng, et al. Infrasound characteristics of cemented tailing filling material under uniaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(S1): 92 – 100. (in Chinese))
- [29] 丛 宇, 冯夏庭, 郑颖人, 等. 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(7): 1193 – 1201. (CONG Yu, FENG Xia-ting, ZHENG Ying-ren, et al. Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(7): 1193 – 1201. (in Chinese))