

文章编号:1001-4888(2018)06-0902-09

## 传感器类型对岩石破裂声发射 时频特征影响实验研究\*

张艳博<sup>1,2</sup>, 李昆<sup>1,2</sup>, 刘祥鑫<sup>1,2</sup>, 田宝柱<sup>1,2</sup>, 姚旭龙<sup>1,2</sup>, 梁鹏<sup>1,2</sup>, 孙林<sup>1,2</sup>

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北唐山 063000; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北唐山 063000)

**摘要:** 为探究声发射传感器对岩石破裂监测效果的影响, 本文开展了含孔花岗岩双轴加载实验, 选择 R6 $\alpha$ (窄频)和 Nano30(宽频)两类传感器同时监测岩石破裂过程, 分析两种类型传感器接收信号时频特征的异同点。从工作频段及灵敏度讨论两类传感器的适用性, 继而提出岩石破裂监测中声发射传感器的选取原则。研究结果表明, 在时域方面, 两类传感器接收的声发射信号能量演化规律体现出一致性。在频域方面, R6 $\alpha$  传感器接收信号主频集中分布在 33~110kHz, Nano30 接收信号主频在 0~500kHz 内均匀分布。R6 $\alpha$  窄频传感器接收信号的强度较高、数据量较大, 能够隔绝其他频段内噪声信号干扰, 适合分析岩石破裂的时序规律; Nano30 宽频传感器从频率上能保证信号的完整性, 可用于分析岩石声发射信号波形和频率特征。

**关键词:** 岩石力学; 声发射; 传感器类型; 时频特征; 能谱系数

**中图分类号:** TU45      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-099

### 0 引言

声发射(AE)是指材料局部因能量快速释放而发出瞬态弹性波的现象。岩石在外载荷作用下发生变形和损伤时, 一部分应变能会以弹性波的形式释放, 是一种良好的声发射信号源。通过分析岩石声发射信号, 可以了解岩石损伤、破裂等行为信息, 推断岩石内部性态变化, 反演岩石破坏机制<sup>[1]</sup>。而如何对声发射信号准确接收和处理, 以便精确地获取声发射源信息, 是研究岩石破裂问题的关键。

近年来, 学者们通过声发射监测的手段对岩石破裂现象进行了大量研究。Chmel 等<sup>[2]</sup>通过声发射监测研究了花岗岩在冲击载荷下的声发射能量释放规律; 何满潮等<sup>[3]</sup>研究了真三轴岩爆实验的能量释放规律, 发现在试样破坏前会出现明显的声发射事件增加现象, 破坏时有较高的能量释放率; Lei 等<sup>[4]</sup>发现多种声发射参数在岩石破坏前均会产生前兆现象, 提出应采用多参数联合分析进行岩石破裂预测; 孙光华等<sup>[5]</sup>通过研究声发射特征参数解释了充填体损伤演化特征; 魏嘉磊等<sup>[6]</sup>通过对含孔岩石双轴声发射多参数特征的对比分析, 探讨了适宜于岩石破坏预测的声发射参数; 苏国韶等<sup>[7]</sup>通过对岩爆过程的声音信号特征研究, 发现了岩爆过程中声发射信号主频总体呈“高频向低频迁移”的演化趋势; 刘祥鑫等<sup>[8]</sup>通过对岩石声发射信号进行小波包分析, 对比研究了不同岩石的声发射特性; 宫宇新等<sup>[9]</sup>通过对岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究, 提出了一种时频分析综合优化算法。这些研究在岩石声发射信号分析与岩石破坏机理的认识上取得了一定成功。然而, 声发射信号由传感器接收, 不同类

\* 收稿日期: 2017-04-22; 修回日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51574102); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 51604117); 河北省人才工程培养经费资助科研项目(A201500504)

通讯作者: 张艳博(1973-), 男, 博士, 教授。主要从事采矿工程与岩土工程方面的教学和研究工作。

型的传感器在频响宽度、灵敏度等参数上的差异,使其对信号的响应程度不同。声发射传感器是检测系统的关键部位,若选择不合理,则可能会遗漏声发射信号中一些重要信息,造成实验结果的不准确。为避免信号遗漏,提高实验分析数据的准确性,部分学者采用高、低两种不同谐振频率的声发射传感器进行了不同条件下花岗岩破裂声发射实验<sup>[10,11]</sup>。这在一定程度上提高了信号接收的准确性,但是对于不同的实验,如何针对性地选取声发射传感器,提高岩石损伤破坏形态预测的准确性,相关研究仍较少。传感器的作用是接收材料、结构内部的声发射信号,它是连接岩石与分析仪器之间的桥梁,因此在进行岩石声发射实验中,选择适合的传感器是至关重要的。

如何选取合适的声发射传感器,不同种类的传感器之间差异性体现在哪里,不同传感器对相同实验的规律性是否一致,以上问题还需深入研究。本文通过模拟实际工程中因巷道开挖、应力重新分布造成局部应力集中而产生的围岩失稳状态,对含孔花岗岩进行双轴加载,选取两种不同类型的声发射传感器,分别从声发射基本参数和声发射波形分析两方面入手,对比两种传感器接收的声发射信号,以期总结出声发射传感器的选取原则,对室内实验在传感器选择上提供一定理论依据。

## 1 岩石力学实验

在地下工程中,人工开挖破坏了岩体原始的应力平衡状态。围岩由于单向或双向卸载形成临空面,应力的重新分布会导致围岩局部产生应力集中,当应力集聚到一定程度时,就会向临空面释放,造成围岩失稳。因开挖后巷道表面区域近似双向受力状态,故本实验选用双轴加载方式。实验中通过将试件通孔中充填体凿出模拟开挖造成的围岩临空面,在应力调整后继续加载以模拟围岩局部应力集中而造成的围岩失稳状态。

### 1.1 岩样制备

花岗岩试件取自山东莱州,按照国际岩石力学试验规范加工成 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的立方体花岗岩试件。在试件观测面中心钻直径 $45\text{mm}$ 通孔,随后以充填体充填。实验中采用与巷道形状一致的充填柱体,经测试充填体单轴抗压强度为 $62\text{MPa}$ ,与花岗岩相近,且充填体具有一定膨胀性,能与试件孔壁良好接触。本文共进行五组实验,试件编号分别为KZHG-45-1、KZHG-45-2、KZHG-45-3、KZHG-45-4、KZHG-45-5,其中K代表开挖,Z代表自然状态,HG代表花岗岩,45代表通孔直径,1~5表示序号。

### 1.2 实验设备

实验中采用的加载系统为RLW-3000伺服岩石力学试验系统。声发射采集系统采用美国物理声学公司PCI-2型。本次实验采用8个声发射传感器采集声发射数据,传感器选用R6 $\alpha$ ,Nano30两种类型,采样点数设为1024,两类传感器采样率均为 $1\text{MHz}$ 。将两种传感器分别用橡胶条布置在试件前后两面,并在传感器与试件之间涂抹凡士林,使二者充分耦合,传感器布置如图1所示。R6 $\alpha$ 声发射传感器(以下简称窄频传感器)工作频段为 $35\sim 100\text{kHz}$ ,谐振频率为 $55\text{kHz}$ ,是一种窄带谐振传感器,其具有高灵敏度和低共振频率特性。Nano30声发射传感器(以下简称宽频传感器)工作频段为 $125\sim 750\text{kHz}$ ,谐振频率为 $140\text{kHz}$ ,是一种中频谐振微型传感器。

### 1.3 实验过程

将试件在轴向、水平方向预加载至 $20\text{kN}$ ,避免加载初期因试件摩擦滑移而产生噪声信号。初次加载采用力控制,以 $1\text{kN/s}$ 的加载速率在轴向与水平方向同时加载。水平方向加载至 $200\text{kN}$ ,轴向加载至 $800\text{kN}$ 后,保持当前载荷,调整应力状态5分钟。其后将充填体用锤子缓慢凿出,再次调整5分钟。二次加载,声发射系统开始监测声发射数据,加载系统采用位移控制,以 $0.3\text{mm/min}$ 的加载速率加载,直至试件发生破坏。实验加载路径如图2所示。

## 2 实验结果分析

### 2.1 声发射时序特征分析

声发射能量是指事件信号检波包络线下的面积,它可以反映事件的相对能量和强度。将实验中两

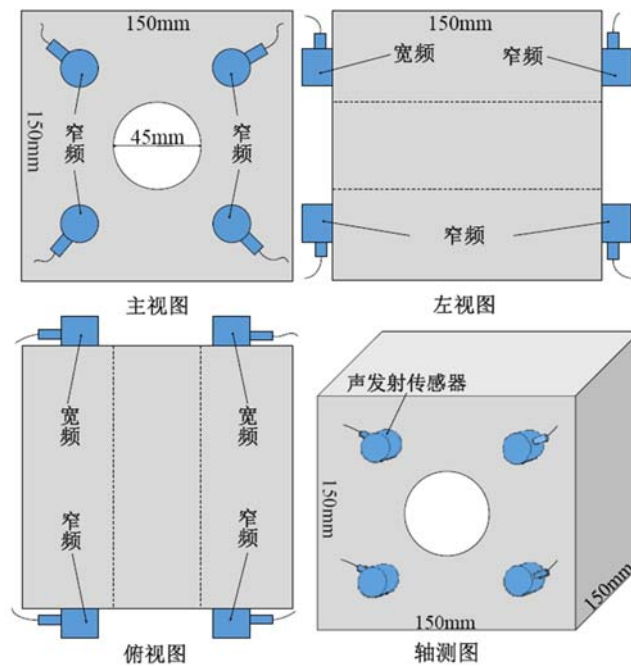


图1 传感器布置位置

Fig.1 Sensor placement position

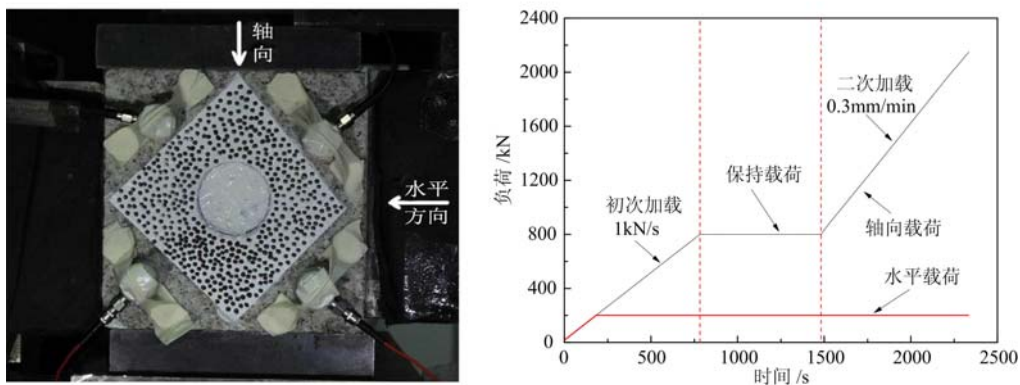


图2 加载方向与加载路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading direction and loading path

类传感器采集的信号绘制成能量—时间—轴向力关系曲线,对比两种传感器的特点。通过对所有试件的实验结果进行数据分析,每组试件的数据呈现出相同的规律,限于篇幅本文只选取了部分试样的实验研究结果作为代表。

图3为两种声发射传感器声发射信号能量—时间—轴向力关系图。从图中可以看出在实验加载初期,声发射信号十分微弱,这是由于该阶段声发射信号由岩石内部原生裂隙压密产生,因此信号强度较弱,信号能量低;继续加载,岩石进入弹性压缩阶段,声发射信号开始变得活跃起来;随着加载的继续进行,岩石内部已经产生损伤,裂纹大量萌生、扩展,声发射信号更加活跃,时而出声发射信号能量突增现象;在岩石破裂前,声发射信号强度异常剧烈,岩石内部裂纹快速扩展贯通并释放较大能量,有大量信号产生,声发射能量急剧增加,并最终达到峰值。

观察两种传感器接收的声发射信号可以看出,二者在信号能量大小上存在显著差异,整个实验过程中宽频传感器接收的声发射能量均小于窄频传感器,信号峰值能量相差一个数量级,表明宽频传感器接收的声发射信号强度较弱;但是在整个实验过程中声发射信号能量变化趋势并无明显差异,加载初期声发射信号较微弱,在加载过程中均出现能量突增现象,岩石主破裂前均出现一致峰值现象,在整个加载

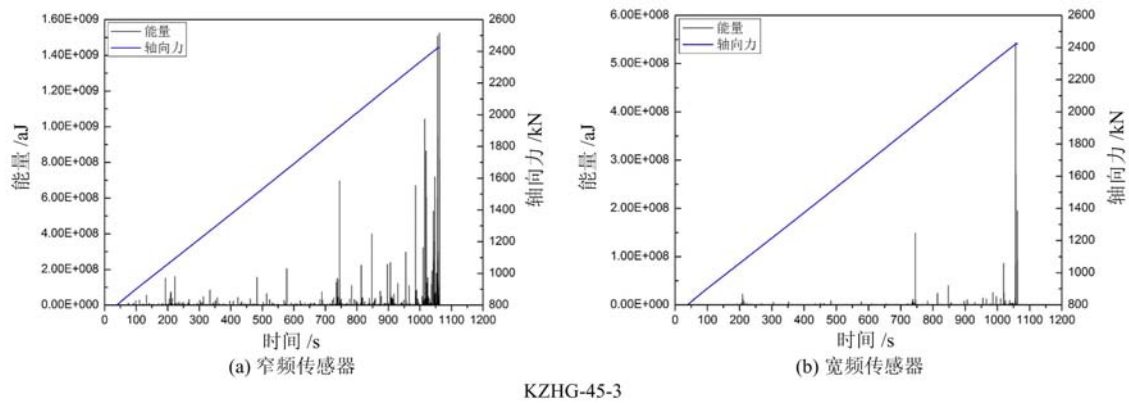


图 3 声发射信号能量—时间—轴向力关系图

Fig. 3 AE signal relation graph of energy-time-stress

过程中声发射信号能量的整体变化趋势相同。

### 2.2 声发射频域分析

#### (1) 声发射主频分析

由于声发射信号是一种非稳定信号,快速傅里叶变换是分析非平稳信号的经典频谱分析方法<sup>[12]</sup>。本文通过对实验加载过程中全部声发射波形信号进行分析,利用 Matlab 进行编程,通过对所有声发射波形文件进行 FFT 变换,获得二维频谱图,提取其最大幅值所对应的频率作为声发射主频<sup>[13]</sup>。以此方法获得主频信息,分析在整个加载过程中声发射信号主频的分布情况。图 4 为声发射主频提取过程示意图。

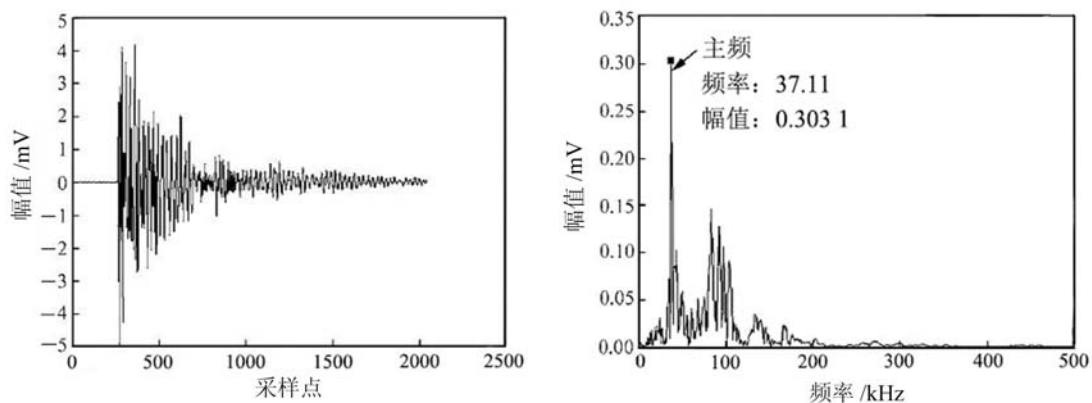


图 4 声发射主频提取过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the main frequency extraction process of AE

每组试件的数据呈现出相同的规律,限于篇幅,本文只选取部分试件进行分析。谐振式窄带传感器并不是只能接收某一频段的声发射信号,而是对某频带信号敏感,其他频带信号灵敏度较低。图 5 为窄频传感器接收的声发射信号主频分布图,从三维关系图中可以看出窄频声发射传感器接收的声发射波形信号主频呈带状分布,主频值分布较为集中,高幅值信号主要集中在 33~110kHz 范围内。由于大尺度破裂声发射信号表现为低主频、高幅值和高能量特征,对应低频高幅值声发射信号<sup>[14]</sup>,因此说明在实验过程中窄频传感器接收的岩石大尺度破裂信号声发射主频集中分布在 33~110kHz 范围内。

图 6 为宽频传感器接收声发射信号主频分布图,从三维关系图可以看出宽频传感器接收的声发射信号比较丰富,在 35~55kHz 有一条明显的主频带,在 90~500kHz 的频域范围内均有信号分布,声发射主频值分布较均匀。从图上也可以看出宽频传感器接收的信号整体幅值较低,其中幅值较高的信号主频集中在 35~55kHz 与 95~110kHz 范围内,而在其他频域内信号幅值较低。故可以认为宽频传感器接收的岩石大尺度破裂信号声发射主频分布在 35~55kHz 与 95~110kHz 范围内。

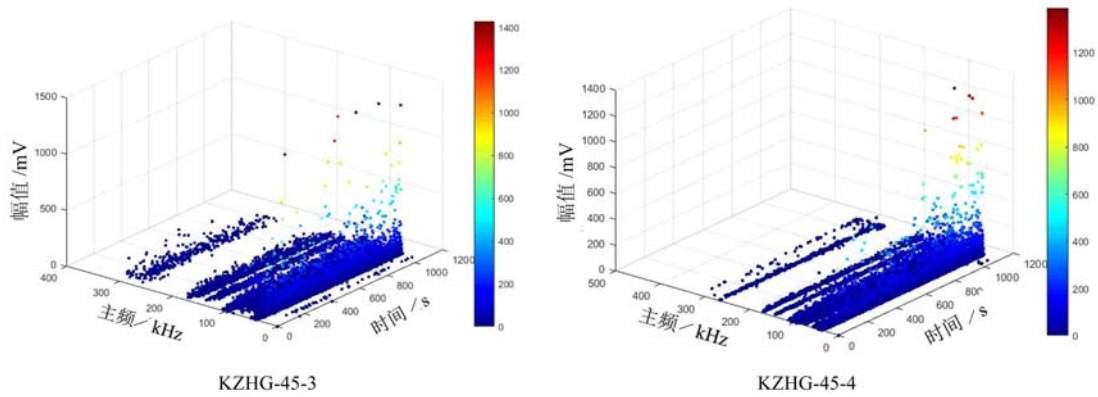


图 5 窄频传感器声发射主频分布图

Fig. 5 Distribution of AE frequency of low frequency sensor

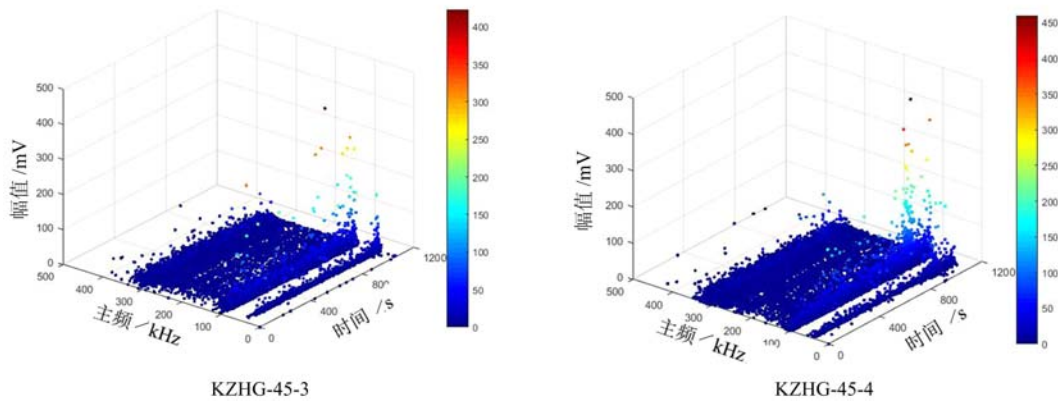


图 6 宽频传感器声发射主频分布图

Fig. 6 Frequency distribution of AE of broadband sensor

观察两种传感器接收的声发射信号主频可以看出,窄频传感器因其工作频段窄、高灵敏度的特性,声发射信号主频分布较为集中,信号整体幅值较高,且高幅值信号主要集中在 33~110kHz 范围内,即位于窄频传感器的工作频率范围内。而宽频传感器因其工作频带较宽的特点,在实验过程中接收的声发射信号主频分布较为均匀,但信号整体幅值较低。宽频传感器的高幅值信号主要集中在 35~55kHz 与 95~110 kHz 范围内,与窄频传感器相同。

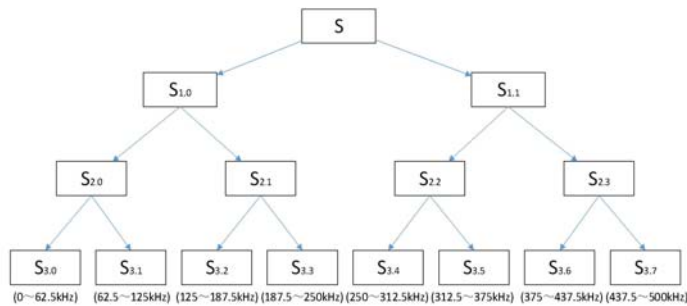


图 7 小波包分解树结构

Fig. 7 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

(2) 声发射能谱系数对比分析

小波包的能谱系数是指在每个小波包分析尺度上能量与信号总能量的比值,及信号能量在各尺度中的分布情况<sup>[15,16]</sup>。由于两类传感器在工作频段上存在差异,两者接收的声发射信号在经过小波包分解后,在各个尺度包含的能量分布情况也不尽相同。小波包分解结构图如图 7 所示。

通过对实验过程中所有声发射原始波形进行小波包分解,统计两类传感器采集的声发射信号在各频段的能谱系数。图 8 为两类传感器的声发射信号能谱系数分布图。从图上可以清楚地看出宽频传感器接收的声发射信号除在  $S_{3.4}$ 、 $S_{3.5}$  这两层能谱系数较低之外,其他分解尺度并无明显规律。窄频传感器接收的声发射信号主要集中在其工作频段范围内,在 0~125kHz 频段内接收的声发射信号能量占比达到 80% 以上。而宽频声发射传感器

信号接收频段广,接收的声发射信号在不同频段内分布较为均匀,波形信号能谱系数分布较为分散,并未出现具有大能量频段。

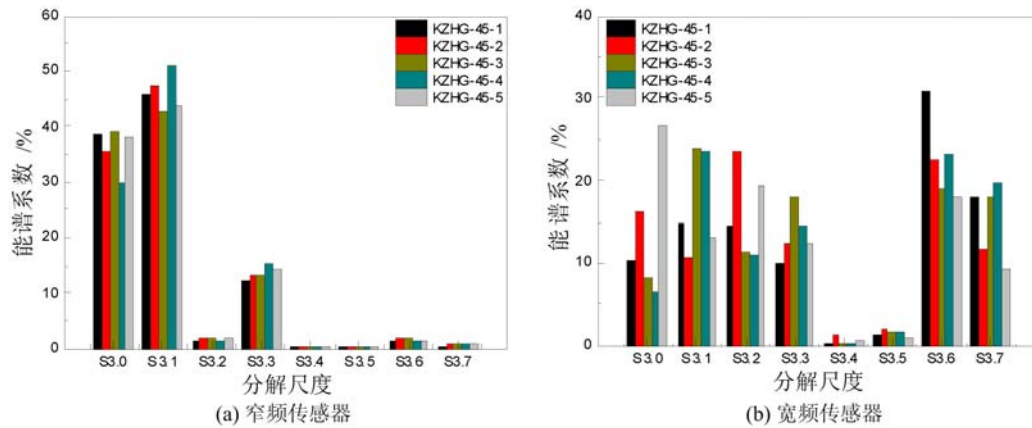


图 8 声发射信号能谱系数分布图

Fig. 8 Distribution coefficient of AE signal

### 3 讨论

通过前文的对比分析发现,两类传感器接收的信号在时域和频域上存在差异性与共性,差异性主要体现在工作频段和对信号的灵敏度上,下面从这两方面开展适用性讨论,并以此总结出声发射传感器的选取原则。

#### 3.1 工作频段的影响

窄频声发射传感器工作频段为 35~100kHz,而宽频声发射传感器工作频段为 125~750kHz。图 9 为美国物理声学公司给出的两种声发射传感器工作频段的敏感度曲线,可以看出窄频传感器在 0~35kHz 范围内对信号的响应波动较大,而在剩余区间曲线比较平坦,说明传感器在 35~100kHz 范围内测得数据是准确可靠的;而宽频传感器在 125~750kHz 区间内曲线比较平坦,在剩余区间内曲线出现多个突变点,因此说明传感器在 125~750kHz 区间内测得数据是准确可靠的。

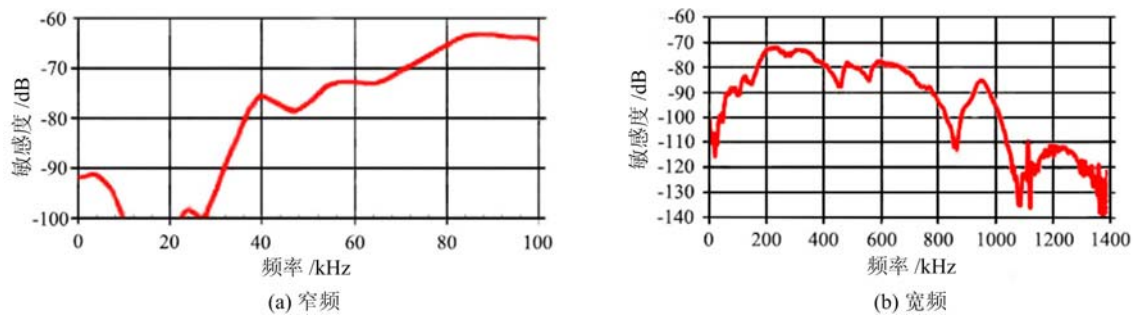


图 9 两种声发射传感器的响应曲线

Fig. 9 Response curves of two kinds of acoustic emission sensors

通过频域分析可以看出,窄频传感器的声发射波形信号有三条主频带,主频值分布较为集中,且通过能谱系数分析表明其波形信号能量主要分布在 0~125kHz 频段内,从频谱分析角度来看窄频传感器接收信号的完整性较差;宽频声发射传感器工作频段较广,在 30~50kHz 有一条明显的主频带,在 100~500kHz 的频段范围内均有信号分布,声发射主频值分布较均匀。通过能谱系数分析可以看出,宽频传感器波形信号能量在不同频段范围内分布较为均匀,能良好地保持声发射波形信号的完整性。

#### 3.2 灵敏度的影响

灵敏度指的是仪器对待测物体变化量的响应程度。窄频传感器是一种高灵敏度谐振传感器,具有很高的信噪比,对声发射信号具有很高的灵敏度。而宽频传感器工作频段较宽,对信号响应的灵敏程度

较差。

对实验过程中声发射信号进行分析发现,无论是声发射信号能量或是信号幅值,宽频传感器接收的声发射信号强度均小于窄频传感器。除了信号强度,信号数量也是体现传感器灵敏度的一项特征。表1为两类传感器接收的声发射数据量统计表,可以看出宽频传感器在实验过程中接收的声发射信号数量远小于窄频传感器,平均数据量只占窄频传感器的51%。说明窄频传感器信号响应程度高于宽频传感器,对信号的灵敏度较高。

表1 两种传感器接收的声发射数据量统计表  
Tab.1 Statistics of acoustic emission data received by two sensors

	KZHG-45-1	KZHG-45-2	KZHG-45-3	KZHG-45-4	KZHG-45-5	平均值
R6 $\alpha$	237214	212123	201152	213790	266395	226134.8
Nano30	141234	120854	68139	70842	171944	114602.6
占比	60%	57%	34%	33%	65%	51%

### 3.3 传感器选取原则

通过对两类传感器接收信号的分析与比较,发现 R6 $\alpha$  传感器与 Nano30 传感器均能得到较为准确的实验数据。但是相比较而言,R6 $\alpha$  频带窄,但响应快,能尽可能多地接收到信号,保证岩石破裂过程的声发射表征更为准确。此外,还可以隔绝一些其他频段的噪声信号干扰,保证时序能量表征的准确性,因此适合分析声发射时域规律。而 Nano30 频带较宽,对于一些频率成分较丰富的突发性信号,在频率上能够尽可能保证声发射信号的完整性,保证岩石破裂过程声发射信号频率分析更为全面,故更适合分析岩石声发射信号波形特征。此外,由于频段较宽,一些非破裂信号也会采集到,在分析时应进行去噪处理。

根据此分析结果,可以总结出选择传感器的两条原则:①在分析岩石破裂的时序规律,表征岩石破坏的演化规律时,为剔除噪音、提高灵敏度,可选择具有高灵敏度的窄频谐振类传感器,如 R6 $\alpha$  传感器。②在分析岩石声发射信号波形特征,探究岩石破裂本质问题时,必须保证声发射信号的完整性,故选择具有较宽信号响应范围的宽频类传感器,如 Nano30 传感器。

总之,声发射传感器的种类众多,在研究岩石破裂问题时,对于不同的问题结合每种传感器的特点,应针对性地选取合适的传感器。

## 4 结论

本文通过对岩石破裂两种不同类型传感器接收的声发射信号进行时频分析,发现信号之间存在差异性与共性,主要结论如下:

(1) R6 $\alpha$  传感器与 Nano30 传感器接收的信号均能很好地表征岩石破裂演化。在时域上,加载过程各个时期声发射信号能量的整体变化趋势相同,加载初期的发射信号较微弱,岩石主破裂前均出现一致的峰值现象;在频域上,表征岩石大尺度破裂的声发射信号主频均分布在 33~110kHz 范围内。

(2) 在声发射时序方面,相较于 Nano30, R6 $\alpha$  传感器接收信号的强度较高、信号数据量较大;在声发射频域方面,R6 $\alpha$  传感器信号主频分布较为集中,呈带状分布,波形信号能量的 80% 集中在 0~125kHz 频段内,Nano30 传感器的声发射波形信号在 0~500kHz 频段均有较明显的响应,不同频段能谱系数分布较为均匀。

(3) R6 $\alpha$  传感器与 Nano30 传感器接收的信号均能很好地表征岩石破裂演化。但是相比较而言,R6 $\alpha$  频带窄,但响应快,能尽可能多地接收到信号,更适合分析时序特征;Nano30 频带较宽,在频率上能够尽可能保证声发射信号的完整性,更适合分析频域特征。

基于双轴岩爆模拟实验,本文总结出在分析岩石破裂的时序规律,可选择高灵敏度的窄频谐振类传感器,如 R6 $\alpha$  传感器;在分析岩石声发射信号波形特征,可选择具有较宽信号响应范围的宽频类传感器,如 Nano30 传感器。这可对室内实验在传感器选择上提供一定理论依据。

## 参考文献:

- [1] 何满潮. 深部岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社, 2010:223—234 (HE Manchao. The basis of deep rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010:223—234 (in Chinese))
- [2] Chmel A, Shcherbakov I. A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64(6):56—59.
- [3] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5):865—876 (HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007, 26(5):865—876 (in Chinese))
- [4] Lei X, Satoh T. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage[J]. Tectonophysics, 2007, 431(1-4):97—111.
- [5] 孙光华, 魏莎莎, 刘祥鑫. 基于声发射特征的充填体损伤演化研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1):137—144 (SUN Guanghua, WEI Shasha, LIU Xiangxin. On the damage evolution of fillings based on acoustic emission characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):137—144 (in Chinese))
- [6] 魏嘉磊, 刘善军, 吴立新, 等. 含孔岩石双轴加载过程声发射多参数特征对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6):1017—1025 (WEI Jialei, LIU Shanjun, WU Lixin, et al. Comparative analysis on different AE parameters in biaxial loading of hole rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6):1017—1025 (in Chinese))
- [7] 苏国韶, 石焱炯, 冯夏庭, 等. 岩爆过程的声音信号特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6):1190—1201 (SU Guoshao, SHI Yanjiong, FENG Xiating, et al. Acoustic signal characteristics in rockburst process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6):1190—1201 (in Chinese))
- [8] 刘祥鑫, 张艳博, 孙光华, 等. 不同岩石声发射时频特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014(4):776—782 (LIU Xiangxin, ZHANG Yanbo, SUN Guanghua, et al. Experimental study on acoustic emission time frequency characteristics of different rock[J]. Chinese Journal of Underground Space & Engineering, 2014(4):776—782 (in Chinese))
- [9] 宫宇新, 何满潮, 汪政红, 等. 岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4):787—799 (GONG Yuxin, HE Manchao, WANG Zhenghong, et al. Research on time-frequency analysis algorithm and instantaneous frequency precursors for acoustic emission data from rock failure experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4):787—799 (in Chinese))
- [10] 纪洪广, 卢翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4):694—702 (JI Hongguang, LU Xiang. Characteristics of acoustic emission and rock fracture precursors of granite under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015, 34(4):694—702 (in Chinese))
- [11] 曾鹏, 纪洪广, 孙利辉, 等. 不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前特征信息试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7):1333—1340 (ZENG Peng, JI Hongguang, SUN Lihui, et al. Experimental study of characteristics of irreversibility and fracture precursors of acoustic emission in rock under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2016, 35(7):1333—1340 (in Chinese))
- [12] Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5):865—873.
- [13] 贾雪娜. 应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D]. 北京:中国矿业大学, 2013 (JIA Xuena. Experimental study on acoustic emission eigen-frequency spectrum of strain bursts[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013 (in Chinese))
- [14] 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 (ZHANG Yanbo, LIANG Peng, TIAN Baozhu, et al. Multi parameter coupling analysis of acoustic emission signals of granite disaster and the precursor characteristics of the main rupture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11):2248—2258 (in Chinese))
- [15] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2004 (JI Hongguang. A research and



application on acoustic emission performance of concrete material[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004 (in Chinese))

- [16] 焦文捷, 马瑾, 吴秀泉, 等. 围压下岩石破坏声发射测试系统及震级频度关系的实验研究[J]. 地震地质, 1991(1):54-60 (JIAO Wenjie, MA Jin, WU Xiuquan, et al. Experimental research on a new AE experimental system for measuring failure rocks under confining pressure and the magnitude-frequency relation[J]. Seismology and Geology, 1991(1):54-60 (in Chinese))

## Experimental study on the influence of sensor type on time-frequency characteristics of rock rupture acoustic emission

ZHANG Yan-bo<sup>1,2</sup>, LI Kun<sup>1,2</sup>, LIU Xiang-xin<sup>1,2</sup>, TIAN Bao-zhu<sup>1,2</sup>,  
YAO Xu-long<sup>1,2</sup>, LIANG Peng<sup>1,2</sup>, SUN Lin<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China;

2. Key Laboratory of Mining and Safety Technology of Hebei Province, Tangshan 063000, Hebei, China)

**Abstract:** In this paper, in order to investigate the effect of the acoustic emission sensor on rock fracture monitoring, biaxial loading experiment of granite with holes was carried out. Selecting two types of sensor: R6 $\alpha$  (narrow band) and Nano30 (broad band) to simultaneously monitor rock failure process, the similarities and differences of the time-frequency characteristics received by two types of sensor were analyzed. The applicability of two types of sensors from the working frequency band and sensitivity is discussed in this paper, and then the selection principle of AE sensors in rock fracture monitoring is put forward. Study results show that in time domain, the energy evolution pattern of acoustic emission signals received by two types of sensor is consistent. In frequency domain, the main frequency of R6 $\alpha$  sensor received signals is concentrated in 33~110kHz, while the main frequency of Nano30 sensor received signals is uniformly distributed within 0 ~ 500kHz. The signal received by R6 $\alpha$  narrow frequency sensor has high intensity and large data amount, which can insulate the interference of noise signal in other frequency bands. So it is suitable for analyzing the timing pattern of rock rupture. Nano30 broad band sensor can guarantee signal integrity in frequency, and can be used to analyze acoustic emission signal waveform and frequency characteristics of rock.

**Keywords:** rock mechanics; acoustic emission (AE); sensor type; time-frequency characteristics; energy spectrum coefficient