

DOI: 10.11779/CJGE201606010

岩石变形破坏次声异常的能量特征研究

徐 洪^{1, 2, 3}, 周廷强⁴

(1. 重庆地质矿产研究院外生成矿与矿山环境重点实验室, 重庆 400042; 2. 煤矿开采与安全生产重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042;
3. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 4. 重庆三峡学院, 重庆 404000)

摘 要: 采用室内试验方法, 对 8 组砂岩试件进行了压缩破坏试验, 同步记录岩石变形破坏过程中的次声信号, 采用小波分析方法对异常信号的能量特征进行了分析研究。结果表明: 岩石变形破坏次声异常信号能量主要集中在 3.91~7.81 Hz 的中频段和 7.81~15.62 Hz 的高频段两个频率范围内, 其中中频段能量大于高频段能量, 同时在低频段 0~3.19 Hz 内也存在一定的能量分布, 通过不同频段能量分布对比, 可对信号进行识别; 随着岩石变形破坏程度的增加, 次声异常信号的中低频段能量在相对减少, 而高频段能量相对增加, 在岩石临近破坏前, 次声信号的中低频段能量与高频段能量的比值接近 1。以上几个方面特征的发现, 为岩石变形破坏的次声异常信号识别及破坏前兆预警提供了重要的依据。

关键词: 岩石; 变形破坏; 次声波; 频带; 小波分解; 信号能量

中图分类号: TU454 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2016)06 - 1044 - 07

作者简介: 徐 洪(1979 -), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程相关的科研工作。E-mail: njzy_fengyu@qq.com。

Energy characteristics of infrasound abnormality during rock deformation and failure of rock

XU Hong^{1, 2, 3}, ZHOU Ting-qiang⁴

(1. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 2. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China)

Abstract: Eight groups of axial compression tests on sandstone are conducted in laboratory. The infrasound signals of each test process are recorded synchronously, and then the energy characteristics of each specimen are analyzed using the wavelet decomposition method. The results show that the infrasound energy of rock failure is mainly concentrated in two frequency bands. One is the medium frequency band with frequency range of 3.91~7.81 Hz, and the other is the high frequency band with frequency range of 7.81~15.62 Hz. The energy of the former is higher than that of the latter. At the same time there still exists a certain amount of energy with frequency range of 0~3.91 Hz in the signal. By comparing the energy distribution in different frequency bands, the infrasound of rock deformation and failure can be recognized. With the increasing degree of rock deformation, the energy with medium and low frequency bands decreases, and the energy with high frequency band increases relatively. When rock failure is coming, the ratio of the energy in medium and low frequency bands to that in high frequency band is near 1. The discovery of the above characteristics of infrasound during deformation and failure of rock may provide an important basis for recognizing infrasound signals and failure warning of rock.

Key words: rock; deformation and failure; infrasound wave; frequency band; wavelet decomposition; signal energy

0 引 言

声发射是岩石变形破坏过程中的一个重要特征, 因其能连续、实时监测岩石内部裂纹的产生和扩展, 并实现对破坏位置的定位, 已成为岩石、混凝土等脆性材料破裂失稳监测预警的重要手段^[1], 因而相应的研究也成为该领域的一大热点, 并在室内试验^[2-4]和工

程应用^[5-7]等方面均取得了丰富的成果。然而, 分析已有成果不难发现, 当前的研究基本都集中在频率为数千赫兹至数千千赫的高频范围内, 由于该类声波频率

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202252)

收稿日期: 2015 - 05 - 15

较高,波长很短因而在岩体中衰减迅速,有研究显示,大于 3 kHz 的 AE 信号在岩体中离声源 3 m 以外便基本不能接收到^[8-9]。因而在现实应用中常出现漏报的情况,这是当前声发射监测岩体破坏面临的主要问题之一。此外,由于声发射监测频率与声频有较大的频率区间重合,因而易于受到环境噪声的干扰,这也在一定程度上影响到监测成果的可靠性。

事实上,岩石或岩体在变形破坏过程中,除产生高频声发射信号外,还会产生频率低于 20 Hz 的次声信号,国内外学者在这方面已有相关的探索和记录,如 1982 年,北京工业大学地震所对花岗岩、大理岩等岩石做了 35 次破坏性试验,发现在岩石受力过程中,可断续接收到次声波^[10]; 1996 年,Bedard^[11]通过大气探测捕捉到大型山体崩塌前的次声信号,并进行了记录与分析。曾小苹等^[12]对 2009 年 9 月三峡库区数次重大滑坡、崩塌事件的电磁探测发现,这些灾害在发生前均有较明显的次声异常现象。以上案例充分说明,岩石或岩体破坏过程中,存在次声波发射现象,利用次声探测技术对岩体破坏进行临灾预测具有一定的可行性。与传统声发射中的高频信号相比,次声信号具有更多的优势。首先,由于次声波具有在传播过程中能量衰减慢、穿透能力强同时与声频没有明显的频率区间重合等特征,因而可在很大程度上克服当前利用高频声发射信号监测岩体破坏过程中存在的问题;其次,低频次声能轻易穿透岩土体投射到空气中,因而其监测是非接触的,不需要在监测点上安装监测探头,避免了因选点误差对监测效果的影响,同时较传统的声发射监测更加简洁灵活;再次,由于次声信号在空气中衰减慢,可传播较远的距离,因而更适合远距离的区域性监测。

近年来,随着次声探测设备性能以及信号处理技术的提升,国内部分学者在岩石破坏次声波的采集、去噪以及信号特征分析等方面又取得了一些新的研究成果^[13-15],这些成果进一步证实了岩石变形破坏过程中次声信号的存在,同时研究还明确了岩石破坏次声信号的卓越频率范围。但是,因次声波监测是以空气作为信号载体,而空气中充斥着各种干扰信号,如刮风下雨、滑坡泥石流、地震、机械噪音等都存在次声成分,且它们之间也存在一定的频率区间重合,因此单纯知道岩石破坏的次声频率范围还不足以对岩石的破坏进行有效识别及预测。岩石在不同的受力变形阶段,随着内部微裂纹的产生、扩展、汇合直至宏观破坏,所产生的次声波的频率、振幅、能量分布等特性都必将发生相应的变化,只有掌握了这些变化的规律,才能够真正实现岩石破坏的有效识别及预警。本文拟在室内试验的基础上对岩石变形破坏异常次声波的能

量时变特性作一些分析和探讨,为实现利用次声波对岩体破坏进行临灾监测和预警作前期的数据积累和理论储备。

1 试验过程及环境噪声分析

1.1 试验过程及数据采集

试验以砂岩为样本,岩样采自重庆市万州区,表面呈灰白色,细粒。试件按照岩石抗压试验标准制作成圆柱体,柱体直径 50 mm,高 100 mm,共计完成 8 组试件。试验在电液伺服岩石三轴试验机上完成。该试验机可开展岩石单轴、三轴,等试验,并可同步采集岩石变形过程中的时间-荷载数据和时间-变形数据。岩石破坏采用单轴压缩方式,在试验过程中同步采集加载系统的荷载、位移以及加载过程中所产生的次声波数据。次声波测量仪器采用 CASI-ISM-2009 次声传感器以及配套的数字记录仪,传感器可量测频带范围 0.0001~100 Hz,量测精度 368 mV/Pa。在试验过程中,首先将次声传感器与记录仪连接,由数字记录仪将传感器电信号转换为数字信号,再传输给电脑控制系统,次声数据采集采用非接触方式,试件表面不安装任何探测设备,传感器与加载系统相距约 1.5 m,次声数据采集与试件加载同步开始,同步结束。次声数据采集频率为 1000 Hz。试验加载及次声数据采集系统如图 1 所示。

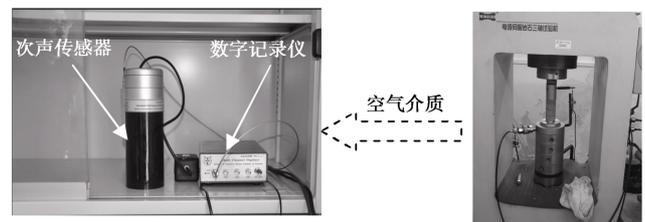


图 1 试验加载及次声采集系统图

Fig. 1 Loading and infrasound collection system

1.2 环境噪声分析

由于本试验中次声波的测量采用非接触方式,主要以空气作为声波的载体,而空气中存在着大量的噪声干扰。为了获得准确的岩石破坏次声波,对试验室噪声进行分析是必要的。

图 2 为环境噪声的波形图,环境噪声的采集是在不加载的条件下开启加载系统的所有设备,并在设备运行稳定后利用次声采集设备采集数据,数据采集时间为 20 s。将采集到的环境噪声进行频谱分析,其结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,环境噪声频率主要集中在 50, 68, 85, 100 Hz 附近,小于 20 Hz 的次声成分相当少,因此采用阻带宽度为 20 Hz 的低通滤波器对环境噪声

进行滤波可以滤除绝大部分的噪声,同时参考文献[14]的研究成果,岩石破坏次声频率主要集中在10 Hz以下,考虑以上两点,结合本试验的实际需求,采用Butterworth低通滤波器对环境噪声进行滤波处理,其中通带宽度设置为10 Hz,阻带宽度为20 Hz,通带最大衰减0.5 db,阻带最小衰减为40 db,滤波后的环境噪声波形图如图4所示。

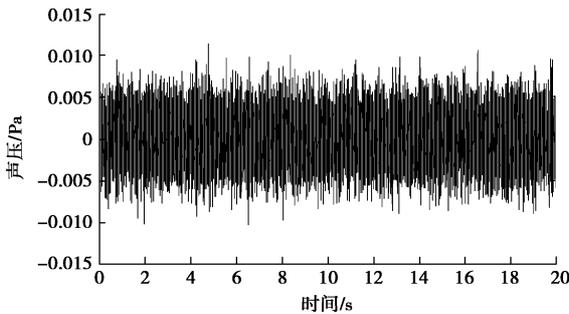


图2 环境噪声波形图

Fig. 2 Waveforms of ambient noise

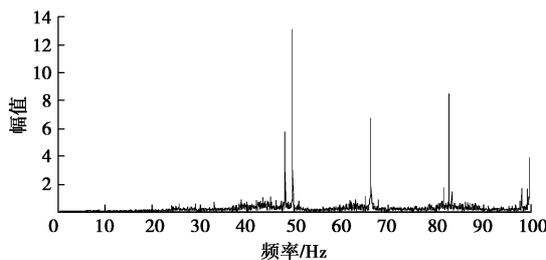


图3 环境噪声频率分布特征

Fig. 3 Frequency distribution of ambient noise

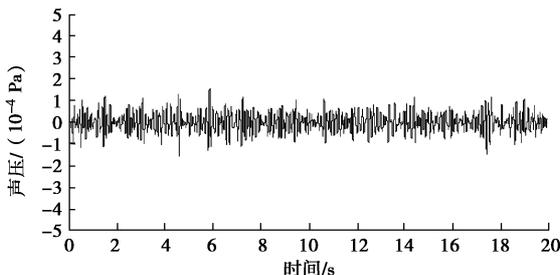


图4 滤波后的环境噪声波形图

Fig. 4 Waveforms of ambient noise after filter

从滤波后的波形图中可以看出,环境噪声次声波形较为平稳,声压幅值多集中在 $\pm 100 \mu\text{Pa}$ 之间,无明显的幅值突变,最大声压幅值低于 $150 \mu\text{Pa}$ 。

2 试验数据处理分析方法

傅里叶变换是信号分析的经典方法,但是该变换只是单纯的时域到频域的转化过程,处理结果丧失了信号的时间信息特征,因而在处理非平稳信号过程中具有较大的局限性。而小波分析方法的出现,则很好地弥补了傅里叶变换的上述不足,小波分析由于具有

多分辨率的特征,其时间窗和频率窗随信号的具体形态可以动态调整,在时域和频域表征局部信息的能力得到明显加强。鉴于本研究所涉及的次声信号非平稳性及对信号时变动态特性研究的要求,选择小波分析方法对信号特征进行分析。

2.1 次声信号能量定义及表述

对于岩石变形破坏过程中的次声信号能量定义,采用大多数文献中的定义方法。对给定信号 $x(t)$,假定它为能量信号,则其能量表述为^[17]

$$E = \int |x(t)|^2 dt \quad (1)$$

按照相同的定义方法,对于离散信号,如信号长度为 N ,则信号能量可表示为

$$E = \sum_{i=1}^N |x(i)|^2 \quad (2)$$

信号经过 m 层的小波分解后可表示为一个低频分量和 m 个高频分量之和,假定信号经小波分解前后总能量不变,则信号分解后总能量可表示为低频分量和各高频分量能量的总和,表达式为

$$E(x) = E_m^a(x) + \sum_{j=1}^m E_j^d(x) \quad (3)$$

式中 $E(x)$ 表示信号总能量; $E_m^a(x)$ 表示信号分解后低频段能量分量; $E_j^d(x)$ 表示信号第 j 层分解后高频部分能量分量。

2.2 小波分解参数确定

在小波分解过程,小波基的选择以及分解层次的确定是小波分析前需要确定的两个重要参数。文献[16]对岩石声发射信号处理过程中小波基选择的原则和依据进行了研究,推荐使用Daudechies小波族中的db4小波基对岩石声发射信号进行分析。在本研究中,考虑到次声信号与一般声发射信号的差别,以及对信号频率分辨率的要求,通过对比选择db6小波基对次声信号进行分析处理。

本试验中,次声信号的采集频率为1000 Hz,根据采样定理,信号可能存在的最高频率为500 Hz。按照小波分解原理,原信号经 m 层小波分解后,将产生 $m+1$ 个信号频段。信号经分解后的频率范围如表1所示。

表1 信号分解后各频段频率范围

Table 1 Frequency ranges of signals after decomposition (Hz)				
频带编号	a7	d7	d6	d5
频率范围	0~3.91	3.91~7.81	7.81~15.62	15.62~31.25
频带编号	d4	d3	d2	d1
频率范围	31.25~62.5	62.5~125	125~250	250~500

注:上述频段频率值是在划分过程中经过四舍五入。

从表1中可以看出,将信号分解到第7层,则信号最低频段可达0~3.9 Hz,考虑以往研究成果中对于岩

石破坏次声信号频率范围的界定, 再继续分解意义不大, 因而本研究中对小波分解层数界定为 7 层。

3 试验结果分析

3.1 次声异常信号能量频段分布特征

本次试验共完成 8 组砂岩试件变形破坏过程中的次声波数据采集, 经滤波处理后典型次声波时域波形如图 5 所示。

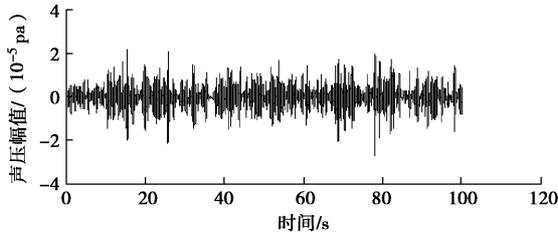
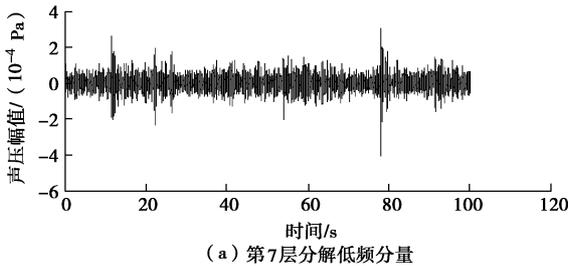


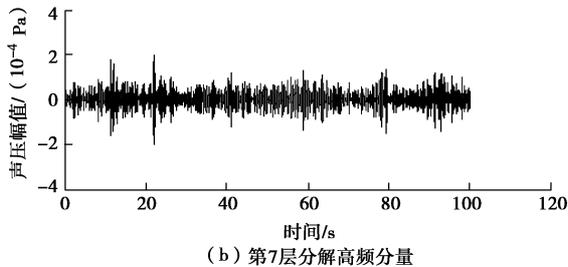
图 5 典型岩石次声波波形图

Fig. 5 Infrasound waveforms of typical rock failure

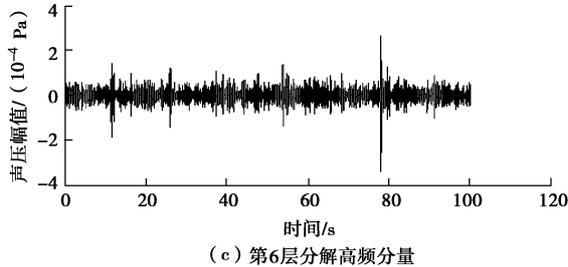
将上述次声信号采用 db6 进行 7 层分解, 并对各分层系数重构, 其结果如图 6 所示。



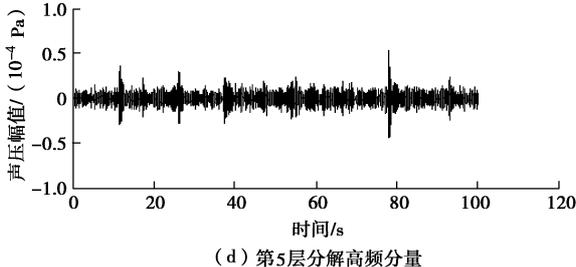
(a) 第 7 层分解低频分量



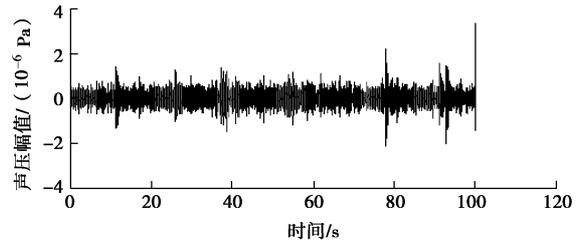
(b) 第 7 层分解高频分量



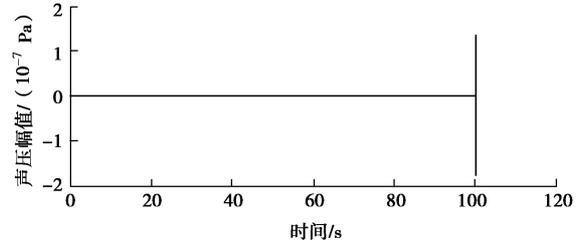
(c) 第 6 层分解高频分量



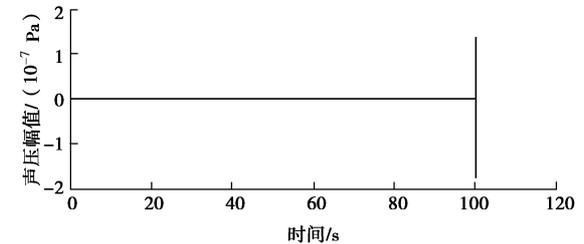
(d) 第 5 层分解高频分量



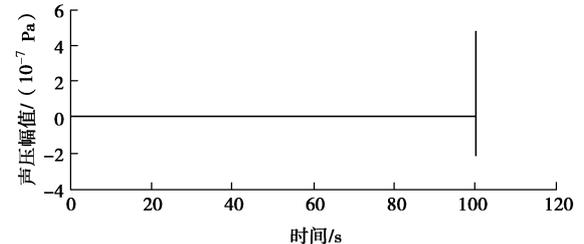
(e) 第 4 层分解高频分量



(f) 第 3 层分解高频分量



(g) 第 2 层分解高频分量



(h) 第 1 层分解高频分量

图 6 信号小波分解各层次次波形图

Fig. 6 Waveforms at different stages after wavelet decomposition

从图 6 中可以看出, 次声信号在不同的分层上具有不同的能量分布和不同的波形特征, 信号在 d6、d7 层上具有最大的能量分布, 并且具有波动性, 而在其他分解层次上能量分布较少。为了直观反应信号能量在各分层上的分布特征, 定义信号小波分量比, 即信号经小波分解后, 各频段能量与总能量的比值, 表达式为

$$\left. \begin{aligned} U^a &= \frac{E_m^a(x)}{E(x)}, \\ U_j^d &= \frac{E_j^d(x)}{E(x)} \quad (j=1,2,3,\dots, m), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, U^a 表示信号分解后低频段小波分量比, U_j^d 表示信号经 j 层分解后, 该分层高频部分小波分量比。

为进一步分析这种能量分布规律, 将试验采集到的 8 组岩石破坏次声异常信号分别进行小波分解, 并分别求取各分层的小波分量比, 同时与环境噪声分解

结果进行对比, 结果列于表 2。

表 2 试验信号小波分量比特征统计表

Table 2 Wavelet component ratios of experimental signals

试件	小波分量比/%								U_7^d/U_6^d
	U^a	U_7^d	U_6^d	U_5^d	U_4^d	U_3^d	U_2^d	U_1^d	
S1	1.40	57.45	39.72	1.43	0.003	4.1×10^{-5}	4.3×10^{-8}	1.4×10^{-9}	1.44
S2	1.54	51.36	45.70	1.39	0.040	4.5×10^{-6}	8.6×10^{-9}	1.5×10^{-8}	1.12
S3	0.95	53.32	44.59	1.14	0.003	3.39×10^{-6}	1.75×10^{-8}	5.34×10^{-8}	1.19
S4	2.29	59.18	36.89	0.95	0.002	1.69×10^{-6}	9.68×10^{-9}	3.62×10^{-8}	1.60
S5	2.56	55.95	40.28	1.21	0.002	2.01×10^{-6}	8.89×10^{-9}	3.49×10^{-8}	1.39
S6	1.79	53.80	43.08	1.32	0.002	6.01×10^{-6}	1.05×10^{-7}	1.69×10^{-7}	1.25
S7	1.93	53.29	43.42	1.35	0.003	4.65×10^{-6}	6.75×10^{-8}	1.89×10^{-7}	1.23
S8	1.45	50.69	46.31	1.55	0.030	3.9×10^{-6}	5.1×10^{-8}	1.42×10^{-7}	1.09
环境	0.708	21.68	71.98	5.61	0.010	7.64×10^{-8}	3.14×10^{-8}	6.65×10^{-8}	0.30

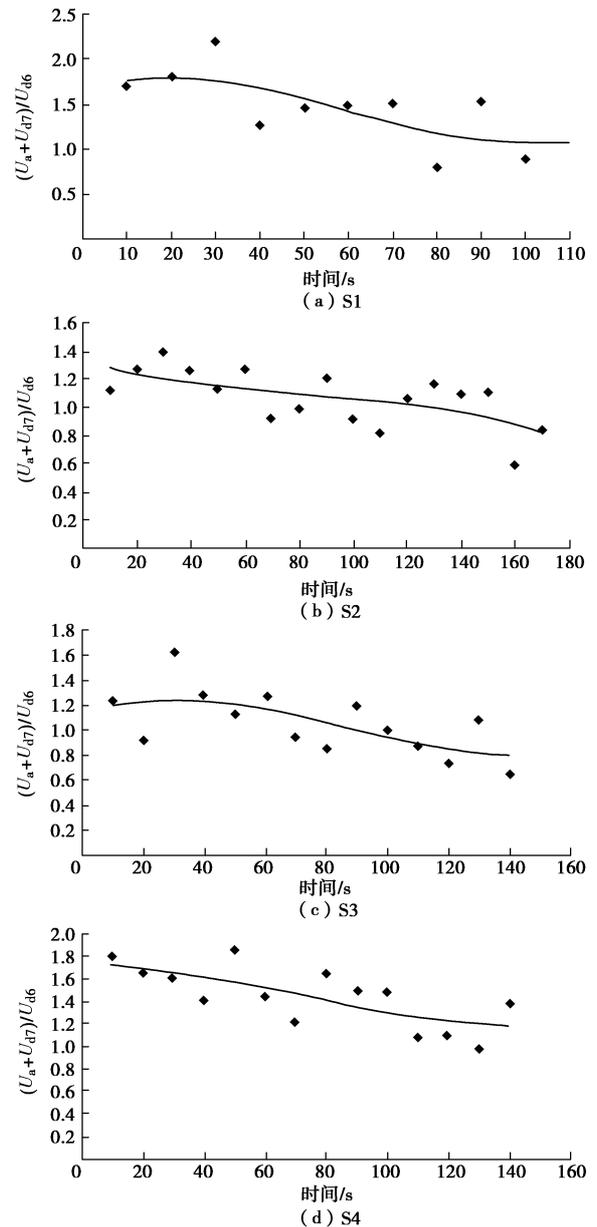
结合图 6 和表 2 可以看出, 岩石变形破坏过程中次声异常信号的能量较为集中, 主要分布在 d7 和 d6 两个频带范围内, 所对应的频率分别为 3.91~7.81 Hz 和 7.81~15.62 Hz, 从 8 个试件的统计结果来看, 以上两个频率段的信号能量占到了总能量的 95% 以上。除此以外, 在频率段 0~3.91 Hz 内也有一定强度的能量分布。这里, 为后续分析方便, 定义 0~3.91 Hz 为岩石破坏次声信号的低频段、3.91~7.81 Hz 为信号的中频段, 而 7.81~15.62 Hz 为信号的高频段。从表 2 中信号中频段和高频段的能量比可以发现, 8 组岩石试件破坏次声信号的 U_7^d/U_6^d 均大于 1, 这说明尽管岩石变形破坏过程中次声信号能量以中频和高频为主, 但中频段的能量大于高频段能量。这是岩石破坏次声信号的一个重要特征。

从试件破坏次声信号与环境噪声信号的对比还可以看出, 岩石破坏次声信号能量分布特征与环境噪声中次声能量分布特征有较大的差别, 虽然环境噪声次声信号能量也主要集中在中频段和高频段, 但环境噪声在高频段能量分布远大于中频段, 这是与岩石破坏次声的一个主要区别。除此以外, 环境噪声在 0~3.91 Hz 的低频段的能量分布较岩石次声更少, 相反, 在 15.62~31.25 Hz 频率段则具有更强的能量分布。以上几点, 可以作为岩石次声与环境噪声次声辨识的一个重要依据。

3.2 次声异常信号频带能量时变特性

从不同层次小波分解波形图中可以看出, 岩石破坏次声波不仅在不同频段具有不同的能量分布, 在不同的变形阶段, 高低频段次声信号能量也在发生变化。为了分析这种相互变化关系特征, 将信号数据作如下处理。首先将数据按照等时间间距进行分割, 分割时间步长设定为 10 s, 将每一时间段数据采用 db6 小波基进行 7 阶分解, 并计算不同频段的信号能量。考虑到能量主要集中在 0~3.91, 3.91~7.81, 7.81~15.62 Hz 三个频段范围内, 而 0~3.91 Hz 范围内信号能量

较少, 这里将其与中频段放在一起讨论, 主要讨论中低频段 (0~7.81 Hz) 能量与高频段 (7.81~15.62 Hz) 能量的相对变化关系, 以 $(U^a + U_7^d)/U_7^d$ 表示, 各组试件次声信号的分析结果如图 7 所示。



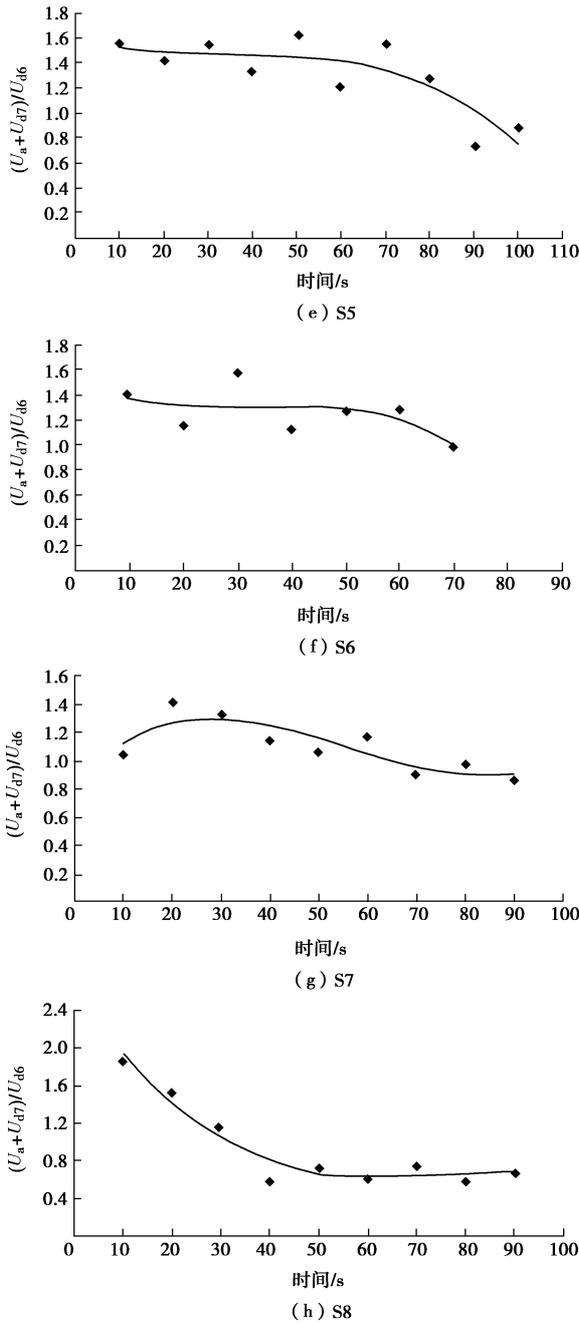


图 7 中低频与高频能量比随时间变化关系图

Fig. 7 Variation of ratio of energy of low and medium frequencies to that of high frequency with time

从图 7 可以看出, 随着时间的推移, 次声信号的中低频段能量与高频段能量的比值有呈逐渐下降的趋势, 说明随着岩石变形破坏程度的增加, 次声信号高频段能量有所增加, 而中低频段能量却相对下降。从图 7 中还发现, 中低频段能量与高频段能量的比值随时间的增加而下降的形式和速度似乎与岩石的强度存在一定的关系, (由于试验中试验机的加载速率是一定的, 因而上图中时间越长, 则代表岩石试件强度越大) 从图中可以大致看出, 试件的强度越大, 则中低频信号与高频信号能量的比值随时间下降过程中的波动也

越大, 下降趋势越不明显, 这可能与加载过程中内部损伤的发展过程有关, 低强度试件在加载过程中内部微裂隙的产生、发展、成核以及最终宏观破裂面的形成更加平稳, 一气呵成, 而高强度试件在这一过程中则可能存在一定的反复, 这可在试件破坏形态上得到一定程度的体现, 如图 8 所示, 低强度试件破坏往往以剪切破坏为主, 破坏面比较单一, 而高强度试件则劈裂的成分更多, 破坏面也更复杂。除上述几点外, 从图 7 的分析中还发现, 岩石在破坏临近前, 中低频段信号能量与高频段信号能量的比值接近 1, 上述 8 组试验中, 试件临近破坏前该比值范围集中在 0.8~1.1 之间, 这一特性有望作为岩石破坏前兆预警的一个重要依据, 但还需要进一步更深入细致的研究来验证。

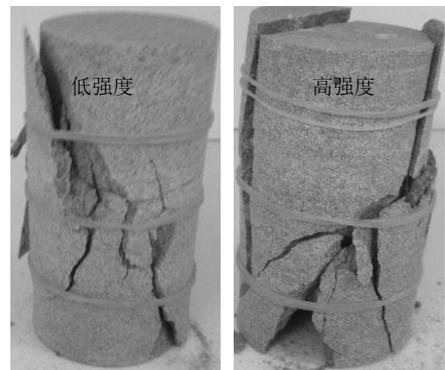


图 8 不同强度试件典型破坏形式

Fig. 8 Failure forms of specimens with different strengths

4 结 论

(1) 岩石变形破坏次声异常信号是随机非平稳信号, 小波分析方法在分析该类信号过程中较传统的傅里叶变换能够更加精细的反应信号内部不同成分, 不同时间的变化特征, 在岩石次声信号的识别及破坏前兆预测等方面具有明显的优势。

(2) 岩石变形破坏次声异常信号能量主要集中在中频段 (3.91~7.81 Hz) 和高频段 (7.81~15.62 Hz) 两个频段范围内, 但中频段的能量大于高频段的能量, 同时在低频段 (0~3.91 Hz) 也有约 1.5%~2.5% 的能量分布, 以上几点可作为岩石变形破坏次声异常信号识别的一个重要标志。

(3) 随着岩石变形破坏程度的增加, 次声异常信号的中低频段能量相对在减少, 相反高频段能量有相对增加的趋势。在临近岩石破坏前, 次声信号的中低频段能量与高频段能量的比值接近 1, 这一特性有望作为岩石破坏前兆预警的一个重要依据。

参考文献:

[1] 康玉梅, 朱万成, 白 泉, 等. 基于小波变换时频能量分析技术的岩石声发射信号延时估计[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2010, **29**(5): 1010 - 1016. (KANG Yu-mei, ZHU Wan-cheng, BAI Quan, et al. Time-delay estimation of acoustic emission signals of rock using time-frequency energy analysis based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 1010 - 1016. (in Chinese))
- [2] 谢强, CARLUOS D G, 余贤斌. 细晶花岗岩的声发射特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(5): 745 - 749. (XIE Qiang, CARLUOS D G, YU Xian-bin. Acoustic emission behaviors of aplite granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(5): 745 - 749. (in Chinese))
- [3] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2499 - 2503. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies of acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2499 - 2503. (in Chinese))
- [4] 刘新平, 刘英, 陈颢. 单轴压缩条件下岩石样品声发射信号的频谱分析[J]. 声学学报, 1986, **11**(2): 80 - 87. (LIU Xin-ping, LIU Ying, CHEN Yong. Spectral analysis of acoustic emissions of rock specimen during uniaxial compression[J]. Acta Acustica, 1986, **11**(2): 80 - 87. (in Chinese))
- [5] 蔡美峰, 来兴平. 岩石基复合材料支护采空区动力失稳声发射特征统计分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 51 - 54. (CAI Mei-feng, LAI Xing-ping. Statistical analysis of the character of acoustic emission for nonlinear dynamical damage in mined out areas supported by composite rock materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 51 - 54. (in Chinese))
- [6] 陈强, 朱宝龙, 胡厚田. 岩石 Kaiser 效应测定地应力场的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7): 1371 - 1376. (CHEN Qiang, ZHU Bao-long, HU Hou-tian. Experimental research on measurement of in-situ stress field by kaiser effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(7): 1371 - 1376. (in Chinese))
- [7] 易武, 孟召平. 岩质边坡声发射特征及失稳预报判据研究[J]. 岩石力学, 2007, **28**(12): 2530 - 2538. (YI Wu, MENG Zhao-ping. Study on acoustic emission feature of rock slope and its instability forecast criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2530 - 2538. (in Chinese))
- [8] 熊庆国. 声发射信号在岩体中传播的衰减[J]. 工业安全与防尘, 1994, **11**: 38 - 40. (XIONG Qin-guo. The attenuation of AE signal propagation in rock body[J]. Journal of Industrial Safety and Dustproof, 1994, **11**: 38 - 40. (in Chinese))
- [9] 李俊平, 周创兵. 岩体的声发射特征试验研究[J]. 岩石力学, 2004, **25**(3): 374 - 378. (LI Jun-ping, ZHOU Chuang-bing. Experimental research on acoustic emission characteristics of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **24**(3): 374 - 378. (in Chinese))
- [10] 李均之, 曹明, 夏雅琴, 等. 岩石压缩试验与震前电磁波辐射的研究[J]. 北京工业大学学报, 1982, **4**: 47 - 53. (LI Jun-zhi, CAO Ming, XIA Ya-qin, et al. An experimental study on rock compressing and emission of electromagnetic waves before earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 1982, **4**: 47 - 53. (in Chinese))
- [11] BEDARD A J Jr. Infrasonic and near infrasonic atmospheric sounding and imaging[C]// Seattle: NOAA/ERL/Environmental Technology Laboratory, 1996.
- [12] 曾小苹, 王墨焱, 蒋瑾, 等. 三峡库区 2009 年 9 月地质灾害的电磁解析初探[C]// 2009 年天灾预测总结学术研讨会论文集. 北京, 2009. (ZENG Xiao-ping, WANG Zhao-yi, JIANG Cui, et al. Preliminary analysis of electromagnetism of geological disasters in the Three Gorges Reservoir Area in September 2009[C]// Proceedings of Conference on Summarizing of Disaster Prediction 2009. Beijing, 2009. (in Chinese))
- [13] ZHU Xing, XU Qiang, et al. Experimental study of infrasonic signal generation during rock fracture under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, **60**: 37 - 46.
- [14] 朱星, 许强, 汤明高, 等. 典型岩石破裂产生次声波实验研究[J]. 岩石力学, 2013, **34**(5): 1306 - 1311. (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 - 1311. (in Chinese))
- [15] 朱星, 许强, 邓茂林, 等. 岩石次声波滤波处理新技术—Sallen-Key 数学模型[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(8): 1358 - 1361. (ZHU Xing, XU Qiang, DENG Mao-lin, et al. A novel filter technology of rock's infrasound: Sallen-Key numerical model[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(8): 1358 - 1361. (in Chinese))
- [16] 金解放, 赵奎, 王晓军, 等. 岩石声发射信号处理小波基选择的研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, **27**(2): 12 - 15. (JIN Jie-fang, ZHAO Kui, WANG Xiao-jun, et al. Study on selection of wavelet basis for processing of rock acoustic emission signal[J]. Mining Research and Development, 2007, **27**(2): 12 - 15. (in Chinese))
- [17] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (HU Guang-shu. Modern signal processing tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))