

# 弹性波在中粒砂岩内传播衰减特性分析\*

赵永川<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 肖福坤<sup>3</sup>, 张鹏海<sup>1,2</sup>, 于庆磊<sup>1,2</sup>, 刘刚<sup>3</sup>

(1. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室 沈阳, 110819)

(2. 东北大学资源与土木工程学院 沈阳, 110819)

(3. 黑龙江科技大学黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室 哈尔滨, 150028)

**摘要** 为研究弹性波在岩石介质传播过程中的衰减特性,利用超声波传感器监测弹性波在中粒砂岩圆柱体内传播不同距离后的波形变化特征,通过频谱转换、数理统计、曲线拟合分析了特征参数的变化规律。研究表明:弹性波信号经滤波模数转化后,频率在 100~500 kHz 的信号随着传播距离的增大,时域波形图和频谱图在振幅上都出现了衰减趋势,且信号中高频成分比低频成分衰减显著。频谱重心频率随传播距离增大按照线性趋势降低,变化趋势比主频稳定,更能全面反映信号的频率衰减特征,采用波形对比法得到的弹性波在中粒砂岩内传播的衰减系数为 0.016 dB/cm。在实验室尺寸范围内,绝对能量按照负指数规律衰减最为显著,幅值和振铃计数出现稳定线性衰减趋势,而上升时间有增加的趋势。波形参数的衰减趋势和敏感程度对于现场微震和室内声发射试验由传感器信号反演破裂源特征有一定的指导作用。

**关键词** 弹性波; 衰减; 频谱; 特征参数; 中粒砂岩

**中图分类号** TH762; TU452

## 引言

弹性波是研究岩石内部损伤演化的有效工具,声发射和微震现象作为一种典型弹性波是指岩石(体)在载荷作用下微破裂活动产生的弹性波辐射释放的过程,随着信号采集硬件的迅速发展,采集精度增高,计算参数增多,声发射和微震在揭示岩石和混凝土的损伤和裂纹扩展中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

监测过程中声发射弹性波信号的分析方法主要有信号参数法、定位分析法、模态<sup>[3]</sup>和频谱分析法等经典方法。Zhao 等<sup>[4]</sup>用声发射表征损伤,分析了单轴和三轴压缩状态下的声发射参数与裂纹起始应力和扩展应力间的关系。Carpinteri 等<sup>[5]</sup>研究发现声发射频率和声发射能量分别与裂纹密度和裂纹尺寸相关,而持续时间和主频则与破裂模式密切相关。文献<sup>[6-7]</sup>分别研究了载荷作用下含水砂岩和静态疲劳作用下的陶瓷复合材料声发射时域参数的变化规律,为预测材料失稳和使用寿命提供了参考。统计分析在研究声发射过程中也进行了广泛的应用,如  $b$  值、分形维数、能量密度分布<sup>[8]</sup>等方法都从能量

大小或事件聚集程度的角度对传感器接收到的声发射信号进行了深入的研究。Zhang 等<sup>[9]</sup>研究了不同应力状态下的声发射定位事件空间维数和时序参数的关联维数,从参数聚集程度和异常程度角度分析了声发射参数特征。刘鸿等<sup>[10]</sup>从概率分布角度通过监测轧制自动厚度控制系统伺服缸在加载条件下的声发射信号,构建了伺服缸保载条件的声发射热图,为早期振动的识别提供了辨识方案。然而以上研究都是基于传感器信号获取的规律,破裂源产生的信号在介质内传播时由于几何扩散、频散衰减、衍射散射和能量耗散衰减等因素与传感器接收信号势必会有一定的差异。针对弹性波传播过程的衰减规律,国内外学者基于介质中吸收衰减,界面反射损耗和扩散衰减建立的弹性波在地层中的损耗模型<sup>[11]</sup>和各向同性板中不同传播方向的声发射信号的衰减规律<sup>[12]</sup>开展了研究。王子振等<sup>[13]</sup>采用数值模拟的方法研究了岩石介质中孔隙结构对弹性波衰减的影响,发现孔隙密度、孔隙形状对弹性波衰减影响显著。以上研究表明,声发射弹性波监测对认识岩石类材料破裂失稳机制有重要意义,但是传播过程中衰减特征也是信号分析时需考虑的一个重要因素。

\* 国家自然科学基金山西煤基低碳联合基金资助项目(U1710253);国家自然科学基金资助项目(51574059,51604062)  
收稿日期:2016-04-26;修回日期:2016-09-19

弹性波传播过程中衰减机制较为复杂,用理论模拟计算往往存在一定难度,多数衰减结果通过实验测定更为直接和准确。本研究用断铅信号模拟岩石破裂声发射弹性波信号在圆柱体砂岩试件中传播过程,通过在破裂源不同距离处布置超声波传感器,接收经滤波后的频率为 100~500 kHz 的超声波信号,分析了传播过程中弹性波信号时域和频域特征参数的变化趋势,为由传感器接收信号反演破裂源信号特征以及波形特征参数变化规律提供参考。

### 1 传播介质与实验方案

选取西部榆林矿区埋深 200 m 白垩系砂岩,制成 70 mm×320 mm 圆柱试件 2 个,编号分别为 A 和 B,如图 1 所示。对岩样取 0.03 mm 切片,用显微镜观测其矿物成分,如图 2 所示。经对比分析,试件 A 和 B 由于取自同一地点,其矿物成分结构构造高度一致,碎屑粒径以 0.4~0.5 mm 为主,从粒级上看属于中粒砂岩;碎屑颗粒以石英为主,棱角明显呈棱角状,平均含量 60%~70%;长石颗粒比较破碎,具有泥化现象,平均含量约为 5%~10%;钙泥质胶结为主,含量 20%~30%(加稀盐酸有气泡产生);含有少量的云母碎片。

监测信号用超声波 Nano30 传感器,其响应曲线如图 3 所示,1#,2#,3#,4# 分别代表 1~4#

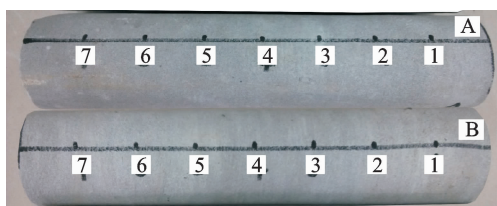
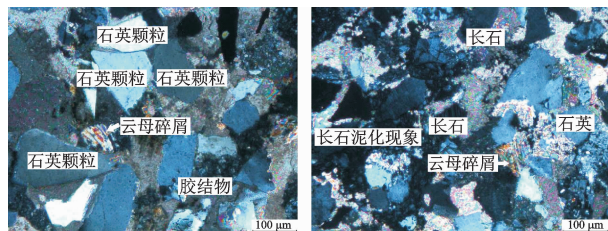


图 1 砂岩试件 A 和 B(弹性波传播介质)

Fig. 1 Sandstone specimens A and B(elastic wave propagating medium)



(a) 矿物颗粒组成  
(a) The composition of mineral particles  
(b) 碎屑和泥化现象  
(b) The phenomenon of clast and mudding

图 2 镜下成分鉴定

Fig. 2 Composition identification under microscope

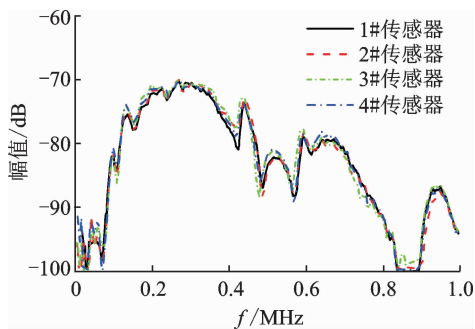


图 3 传感器频率响应曲线

Fig. 3 Response curves of sensors

传感器的响应曲线。可以看出所选用的传感器对弹性波信号响应一致,使实验结果更具有对比性。而经测试弹性波在中粒砂岩介质中的波速在 3 000 m/s 左右,通过下文设置的滤波器参数可知,采集到的波形频率主要位于 100~500 kHz 之间,由  $v=\lambda f$  可粗略获得传播的波长为 6~30 mm,波长大于 10 倍颗粒直径可以有效降低波动在颗粒及空隙间的反射和衍射现象,故可以认为弹性波是在均匀介质中传播。

实验原理如图 4 所示,在轴线方向上将 2 个圆柱体岩芯分别均匀划为 8 等分,在每个均分点上用砂纸打磨成平面以便与传感器紧密接触,传感器和岩样表面用凡士林耦合以增大能量传播效率。在岩石左侧断面中心点处采用 0.7 mm 的 HB 铅芯与断面成 30° 角度进行断铅,每一根试件的同一位置处分别断铅 4 次。文中重点选用频域参数(主频、频谱重心)和时域参数(幅值、振铃计数、上升时间、能量)定量化描述波形特征,部分波形参数意义如图 5 所示。

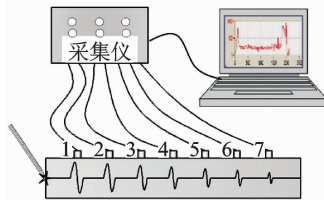


图 4 实验示意图

Fig. 4 Testing diagram

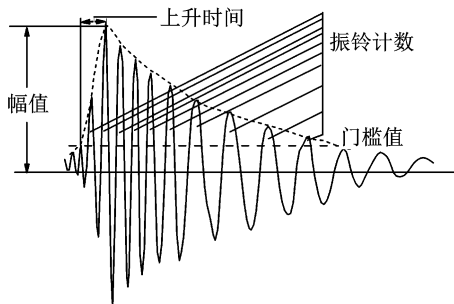


图 5 弹性波参数示意图

Fig. 5 Schematic of elastic wave

断铅产生的弹性波信号在岩石介质中传至距离依次增大的7个响应频率为100~750 kHz的传感器后,经压电效应转换为电压信号传至前置放大器,模拟信号(电压信号)在前置放大器内经过10~1200 kHz带通滤波和放大后,再进行0~500 kHz的抗混叠低通滤波,最后将滤波之后的数字信号进行分析储存。采集过程中,阈值和采样频率分别为35 dB和1 MHz。通过以上采集系统的硬件特性和参数设置,可知本次试验采集和分析的数据主要是频率在100~500 kHz之间的波形数据。

## 2 信号频谱分析

传感器检测到的信号受到破裂源、传播介质、传感器响应曲线、采集设备性能等因素影响。实验过程中破裂源信号、传播介质、响应特征、采集卡设置均一致,所以1#~7#传感器接收信号的差异性主要为弹性波在砂岩介质中传播衰减产生的影响。

### 2.1 信号波形图和频谱图

在一次断铅实验中7个传感器接收到的信号波形如图6所示,为对比衰减效果,时域波形信号均采用相同值域的坐标轴绘图,可以看出7个传感器均可以清楚检测到相似的突发型声发射信号。距离破裂源最远的7#传感器的声发射有效信号依旧远大

于噪音信号,故此实验结果可以用于研究该尺寸范围内有效信号的传播衰减规律,随着传播距离的增大时域信号幅值衰减趋势明显。

声发射信号具有瞬态性和随机性,属于非平稳随机信号范畴,往往是由一系列频率和模式丰富的信号组成,瞬态随机信号不仅与时间相关还与频率相位相关,为分析不同频率信号在传播过程中的衰减情况,将信号进行傅里叶变换得到信号的频域特征。

图6中波形经傅里叶变换后的幅频谱如图7所示,结合滤波器设置和采样频率,可以看出超声波信号频率范围主要为100~400 kHz,并且图中显示随着距离的增大,信号的衰减不仅体现在幅值上,组成信号的频率分布也出现显著变化。在距离声发射源较近的1#和2#传感器的频谱图上,高频信号的比例高于低频信号,随着传播距离的增大在3#和4#传感器位置处,高频信号的比重有所降低,使得高频信号和低频信号比例接近。在传播距离更远的5#~7#传感器处,低频信号所占比重显著大于高频信号,说明在传播过程中高频信号随着传播的进行衰减程度大于低频信号,低频的信号更易在长距离传播过程中稳定传播。弹性波在传播过程中衰减的主要原因是声发射信号在传播过程中以波动即微颗粒振动的形式进行扩散,同等振动幅度下频率越高,振动越快,颗粒间的摩擦阻尼越显著,使得对应频率信号衰减显著。

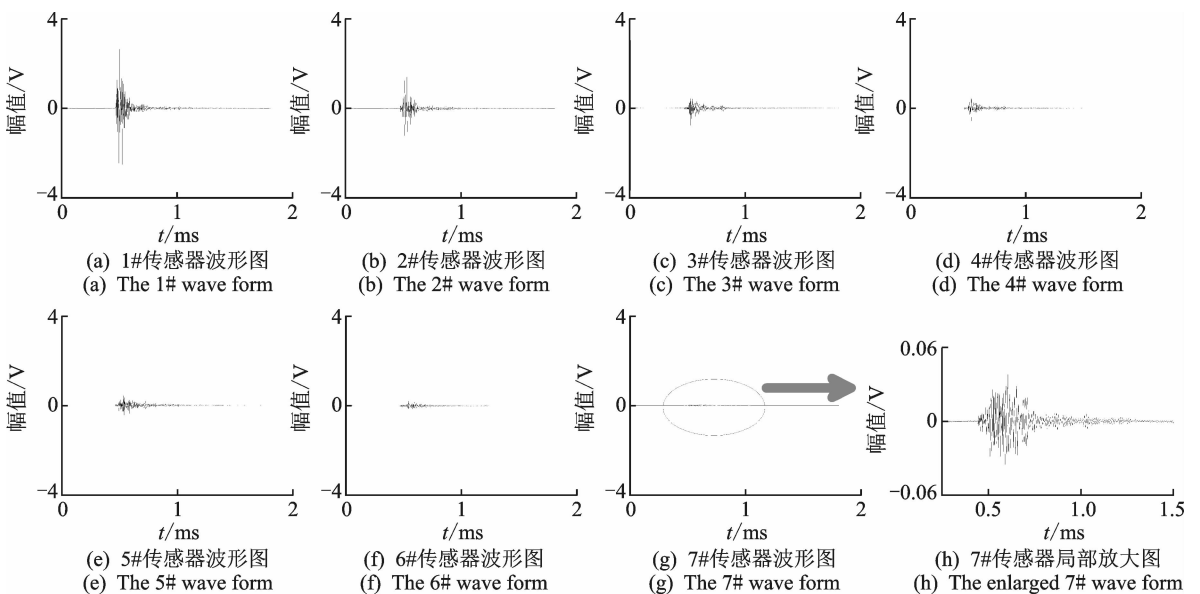


图6 1#~7#传感器接收到的弹性波形

Fig. 6 Elastic waves recorded by 1#~7# sensors

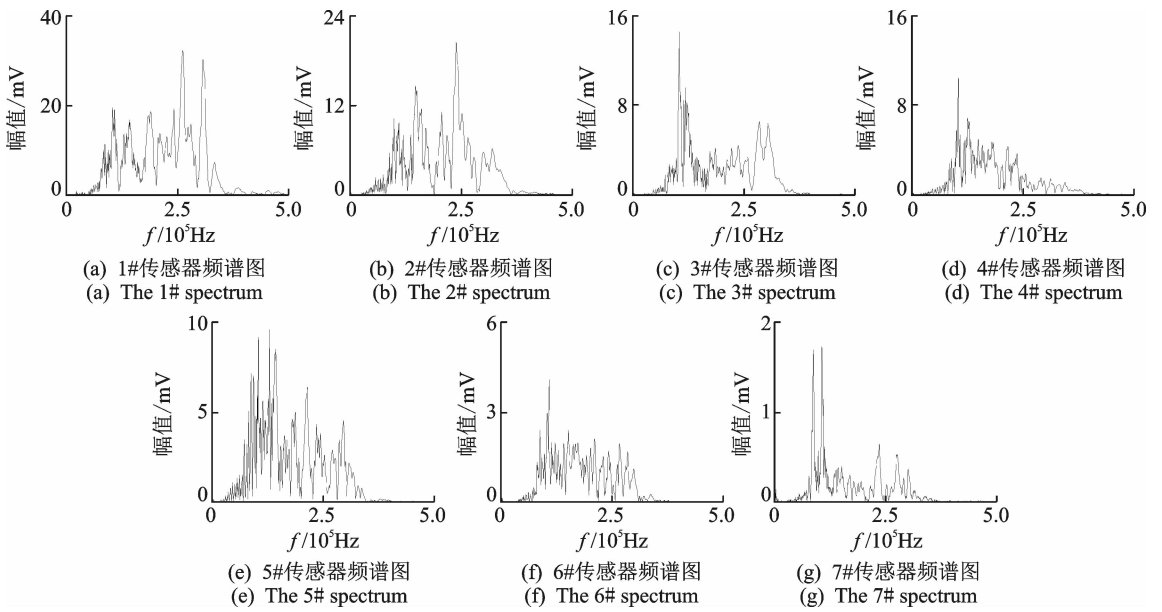


图 7 1#~7# 波形频谱图

Fig. 7 Wave spectrums of 1#~7# sensors

### 2.2 主频衰减变化趋势

从图 7 中可以看出,不同频率信号的幅值随着传播距离增大迅速衰减,且衰减速度存在显著差异性,高频信号衰减的快,为将声发射频率变化趋势进行量化分析,选取主频(峰值频率,图 7 频谱曲线中最大幅值对应的频率)作为分析对象。将 8 次断铅信号的主频变化趋势绘制于图 8 中,可以看出,2 个试件的 8 次断铅实验测试结果的主频随着距离的增加呈现迅速降低的趋势,在传播信号在 0~12.5 cm 的过程中,信号主频由 300 kHz 衰减为 100 kHz 左右。从图 3 传感器的频率响应曲线和采集硬件设置中可以看到,传感器接收信号的频率下限约为 100 kHz,低于 100 kHz 的信号无法接收,最终使 12.5 cm 以外的信号主频在 100 kHz 附近波动。岩石材料在受力变形过程中,会有很宽频段的信号释

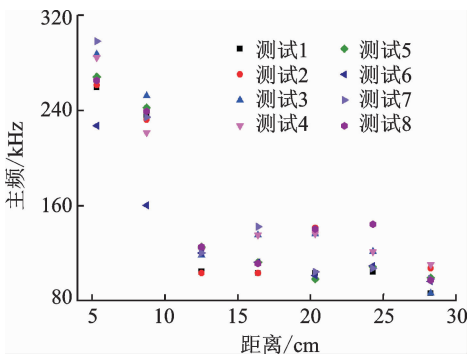


图 8 弹性波主频变化规律

Fig. 8 Elastic wave main frequency variation laws

放,由于传感器采集卡性能的限制,仪器不可能监测所有频带的声发射,针对特定研究对象选取相应频率范围内的信号进行分析是研究弹性波传播规律特别需要注意的问题。

### 2.3 频谱重心衰减变化趋势

主频作为频谱图的单一峰值在较小的传播距离内迅速衰减,在描述多频率信号组成的声发射信号往往存在一定的片面性。为整体分析频谱图在传播过程中的变化趋势,将频谱图频谱曲线进行加权处理,即将某一信号的频率按照幅值作为加权的依据得到频谱信号的频谱重心,计算公式如式(1)所示。频谱重心相比于主频而言,更能全面考虑不同频率信号在合成信号中所占的权重而得到一个综合的描述性物理量,频谱重心的变化趋势如图 9 所示,图 9 是将 8 次断铅实验在同一监测位置结果统计成四分位箱型图,参数异常值为 1.5 倍四分位距,以下同。

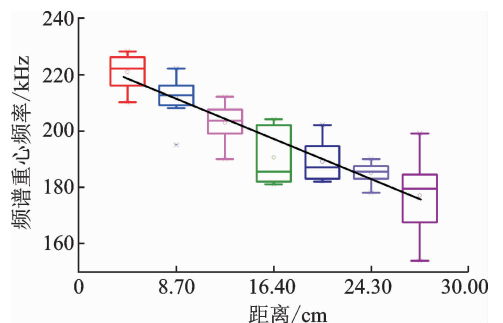


图 9 频谱重心频率变化规律

Fig. 9 Frequency of centroid variation laws

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i f_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \quad (1)$$

其中:  $m_i$  为图 7 中第  $i$  个频率对应的幅值;  $f_i$  为图 7 中第  $i$  个频率大小。

图 8 与图 9 均反映信号的频率组成信息,但频谱重心的衰减趋势比主值频率缓慢平稳的多。为避免测试离散性和偶然性,将 8 次测试的频谱重心频率均值采用线性拟合的方式分析衰减趋势,拟合结果为  $f_c = -1.83x + 227.0, R = 0.94$ ,可以看出频谱重心的衰减明显与传播距离呈线性相关性。随着传播距离的增大,频谱重心呈现线性下降趋势,与主频突降然后趋于平稳变化趋势明显不同,频谱重心相对于单一峰值主频来说是一个统计量,更能全面反映信号的衰减规律。由此可见,在室内尺寸范围内试验分析中,对传感器接收的信号有必要进行一定的反演分析以保证获取正确的破裂源信号频率信息。

### 3 信号时域特征参数分析

#### 3.1 幅值衰减规律分析

弹性波在介质中的传播衰减系数是一个重要的特征参数,文中衰减系数测试方法主要为通过读取不同位置传感器接收到信号的首波振幅采用信号对比法<sup>[14]</sup>公式(2)计算弹性波衰减系数

$$\alpha = (\ln U_0 - \ln U) / \Delta L \quad (2)$$

其中:  $U_0$  和  $U$  为为不同位置的首波振幅,  $V$ ;  $\Delta L$  为波传播距离,  $m$ 。

图 10 为 7 个传感器 8 次测试的波形信号幅值变化离散图,实验过程中采用前置放大器为 40 dB,故幅值  $A$ (单位: dB)和声发射信号最大值  $U$ (单位:  $\mu V$ )存在如下关系

$$A = 20 \lg U - 40 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得传播过程中的衰减系数为

$$\alpha = (A_0 - A) \ln 10 / (20 \Delta L) \quad (4)$$

式(4)为用声发射幅值表示信号对比法衰减系数计算方法,即幅值与传播距离变化斜率的  $\ln 10 / 20$  倍,即为弹性波的衰减系数。对不同传播距离的声发射信号幅值单独进行 8 次实验拟合,即图 10 的散点图进行线性相关分析,拟合函数为  $y = ax + b$ ,其中  $a$  为斜率与衰减系数成正比,  $b$  为截距,拟合结果见表 1。从拟合结果来看,随着传播距离的增大,幅值呈线性衰减。为检验直线拟合的显著程度同时

进行了回归方程相关系数检验(相关系数记为  $R$ )和显著性  $F$  检验(检验统计量记为  $F$ ),8 次测试结果的相关系数  $R$  在 0.6~0.99 之间,选取显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,在数理统计中  $F_{\alpha=0.05}(7-2, 7-2) = 5.05$ ,如果检测结果  $F$  值大于 5.05,即说明离散点在统计意义上具有线性相关性。8 次测试结果的相关系数  $R$  和假设检验  $F$  值见表 1,可以看出在置信水平 0.05 下幅值随距离的衰减变化均呈现出良好的线性相关性,将拟合直线的斜率取平均值乘以  $\ln 10 / 20$  得到弹性波在该类砂岩介质中的衰减系数为  $0.14 \ln 10 / 20 = 0.016 \text{ dB/cm}$ 。

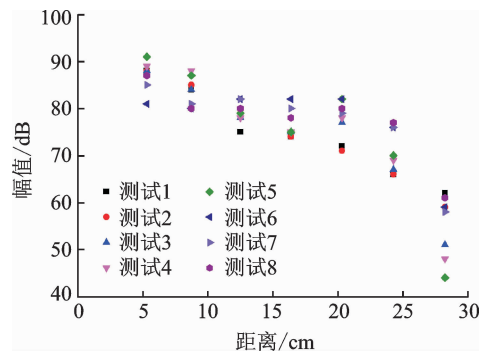


图 10 幅值衰减规律

Fig. 10 Amplitude attenuation laws

表 1 衰减测试参数拟合

Tab. 1 Fitting parameters of testing results

测试次数	幅值线性拟合 $y = ax + b$				能量指数拟合 $y = a \exp(bx)$		
	$a$	$b$	$R$	$F$	$a$	$b$	$R$
1	-0.13	10.63	0.95	116.78	3.07	-0.28	0.97
2	-0.14	10.94	0.99	619.58	6.02	-0.31	0.98
3	-0.16	11.14	0.82	28.79	4.14	-0.34	0.97
4	-0.17	11.49	0.78	21.72	3.63	-0.29	0.99
5	-0.18	11.74	0.68	13.87	5.67	-0.31	0.98
6	-0.12	10.97	0.70	14.76	0.33	-0.09	0.72
7	-0.10	10.57	0.60	10.05	0.33	-0.12	0.70
8	-0.097	10.60	0.67	13.31	0.43	-0.17	0.76

#### 3.2 绝对能量衰减规律分析

幅值的衰减表示着波形振动最大幅值的变化规律,而绝对能量描述了传感器接收到的所有频率信号的能量总和,考虑了幅值、振铃计数、频率和持续时间等因素是一个综合反映损伤的物理量。绝对能量通过对波形电压信号的平方值对持续时间的积分获得,表示着每一个传感器接收到的撞击信号绝对能量值(单位:  $10^{-18} \text{ J}$ )。

不同位置传感器接收到的绝对能量变化规律如



图 11 所示,在距离声发射源较远处绝对能量较大,随后迅速降低。传播过程中绝对能量呈现指数变化规律,将每次的测试结果进行指数形式( $y = a \exp(bx)$ )的拟合,其中  $a$  和  $b$  为回归系数,其意义为能量衰减速度。为形象显示,图 11 中仅画出了第 4 次测试的拟合曲线,所有拟合曲线参数如表 1 所示。可以看出弹性波绝对能量在传播过程中基本符合负指数形式变化,尤其在短距离范围内(150 mm)衰减显著,即能量对小距离的变化较为敏感,而室内声发射实验尺寸多为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  标准圆柱试件,按照负指数函数反演破裂源的真实能量对分析破裂强度具有重要意义。

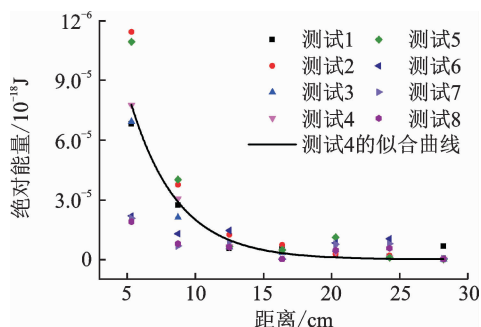


图 11 绝对能量衰减规律

Fig. 11 Absolute energy attenuation laws

### 3.3 声发射振铃数衰减特性分析

当声发射信号幅值超过设定的阈值电压时将产生一个矩形脉冲,超过阈值电信号的每一个震荡波称为一个振铃计数,振铃计数示意图如图 5 所示。振铃计数能粗略反映信号强度和频率,广泛用于声发射活动的动态评价和岩体损伤估计。振铃计数与实验采用阈值密切相关,在整个实验过程中,阈值选择为 35 dB,振动超过 35 dB 即为一个振铃。图 12 描述了不同传播距离的声发射信号振铃计数的变化趋势,可以看出,振铃计数随着传播距离的增大

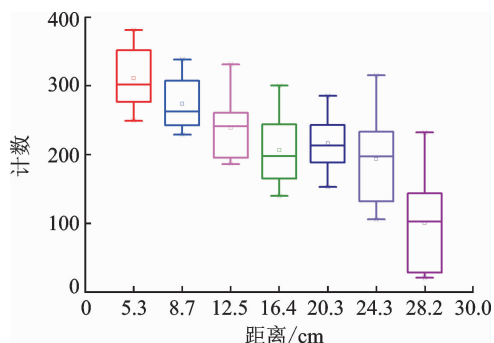


图 12 计数衰减规律

Fig. 12 Ringing counts attenuation laws

也显现出了线性降低趋势。由 3.1 可以看出,在波形传播过程中幅值出现线性降低的趋势,由此可以推断小于振幅的一系列次级振动的幅值也会按照线性规律稳定降低,而当振幅小于阈值时,便使振铃计数减少,振铃计数线性降低与幅值降低可以互为佐证和补充。

### 3.4 上升时间变化规律分析

上升时间为声发射波形信号第一次越过阈值电压至最大振幅所经历的时间间隔,上升时间的示意图如图 5 所示,其主要用于通过波形研究声发射源的破裂模式<sup>[15]</sup>和机电噪声的鉴别。在传播过程中 8 次断铅信号的上升时间的变化规律如图 13 所示,上升时间在传播过程当中不仅没有出现衰减趋势,反而出现显著上升趋势。

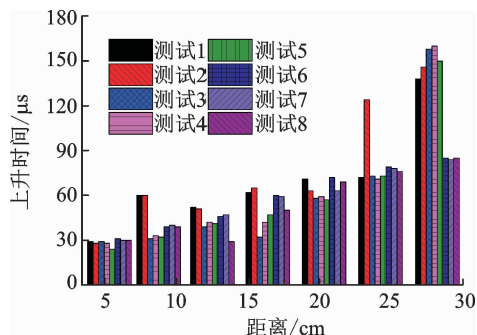


图 13 上升时间变化规律

Fig. 13 Rise time variation laws

上升时间的升高是弹性波在传播过程中的频散现象和衰减作用联合导致的。在岩石介质中,在一定的频率范围内,频率越高波传播速度越快<sup>[16]</sup>。在同一个波形信号传播过程中,频率相对较高的波传播速度较快,故在传感器接收到的信号中前半部分波形中高频信号所占比例较多,且由幅频图 7 可知,在距离声发射源较近的波形中高频信号能量大于低频信号,最终体现为在近声源处波形中的最大幅值主要成分为相对高频大幅震动,使得最大幅值较快到达,从而体现为近声源位置波形上升时间较低;而随着传播距离的增大,高频信号迅速衰减,最大幅值主要成分为相对低频大幅震动,使得最大幅值到达时间较迟,体现为远声源位置波形上升时间升高的趋势。

## 4 结 论

1) 频率成分在 100~500 kHz 的弹性波在室内试验尺寸范围内的中粒砂岩介质中传播时会出现显

著衰减特征,对波形图进行傅里叶变换得到频域和时域参数的变化规律,其中频率和绝对能量的衰减较为显著是导致波形参数变化的主要因素,且在波长远大于矿物颗粒直径时,高频信号仍比低频信号更易衰减。

2) 峰值频率和频谱重心的变化特征存在较大差异,采用幅值加权获得频谱重心比频谱图单一峰值主频更能综合量化反映信号频谱的变化特征,在传播过程中频谱重心以  $f_c = -1.83x + 227.0$  形式稳定衰减,对首波幅值采用信号对比法获得的该中粒砂岩的衰减系数为  $0.016 \text{ dB/cm}$ 。

3) 在传播过程中信号特征参数变化趋势和敏感程度存在一定差异性,能量按照负指数趋势降低衰减最为显著,频谱重心、振铃计数和幅值按照线性规律降低衰减程度次之,而波形上升时间由于频散和振幅衰减作用而体现出增大的趋势。

### 参 考 文 献

- [1] 苏怀智,张林海,佟剑杰. 混凝土结构损伤声发射检测进展[J]. 无损检测,2015,37(1):90-95.  
Su Huaizhi, Zhang Linhai, Tong Jianjie. Review on acoustic emission detection for concrete damage [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(1): 90-95. (in Chinese)
- [2] 李旭,霍林生,李宏男,等. 混凝土结构中 PZT 传感器的多功能性分析及应用[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(4):709-714.  
Li Xu, Huo Linsheng, Li Hongnan, et al. The analysis and application of multi-functional PZT sensors for health monitoring of concrete structure[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2015, 35(4): 709-714. (in Chinese)
- [3] 耿荣生,沈功田,刘时风. 模态声发射一声发射信号处理的得力工具[J]. 无损检测,2002,24(8):341-345.  
Geng Rongsheng, Shen Gongtian, Liu Shifeng. Model acoustic emission: a powerful tool for acoustic emission signal processing[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(8): 341-345. (in Chinese)
- [4] Zhao Xingguang, Cai Ming, Wang Jian, et al. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64: 258-269.
- [5] Carpinteri A, Lacidogna G, Accornero F, et al. Influence of damage in the acoustic emission parameters [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 44: 9-16.
- [6] 李天斌,陈子全,陈国庆,等. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):229-236.  
Li Tianbin, Chen Ziquan, Chen Guoqing, et al. An experimental study of energy mechanism of sandstone with different moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 229-236. (in Chinese)
- [7] Maillat E, Godin N, Mili M R, et al. Analysis of acoustic emission energy release during static fatigue tests at intermediate temperatures on ceramic matrix compos-
- ites: towards rupture time prediction [J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(9): 1001-1007.
- [8] Prikryl R, Lokajčiček T, Li C, et al. Acoustic emission characteristics and failure of uniaxially stressed granitic rocks: the effect of rock fabric [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(4): 255-270.
- [9] Zhang Ru, Dai Feng, Gao Mingzhong, et al. Fractal analysis of acoustic emission during uniaxial and triaxial loading of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 79: 241-249.
- [10] 刘鸿,陈宏志,芦永明,等. 状态热图在 AGC 伺服缸早期振动辨识中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(3):512-517.  
Liu Hong, Chen Hongzhi, Lu Yongming, et al. Early-stage vibration monitoring of AGC hydraulic cylinder using the hits - density imaging [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2016, 36(3): 512-517. (in Chinese)
- [11] 郝建军,赵媛,郭银景. 平面弹性波信号在地层介质中的传输损耗特性[J]. 煤炭学报,2011,36(S1):211-214.  
Hao Jianjun, Zhao Yuan, Guo Yinjing. Power loss characteristics of plane elastic wave signal propagating in layered earth medium channel [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 211-214. (in Chinese)
- [12] Asamene K, Hudson L, Sundaresan M. Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels [J]. Ultrasonics, 2015, 59: 86-93.
- [13] 王子振,王瑞和,李天阳,等. 孔隙结构对干岩石弹性波衰减影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学进展,2014,29(6):2766-2773.  
Wang Zizhen, Wang Ruihe, Li Tianyang, et al. Numerical-modeling of pore structure effects on acoustic attenuation in dry rocks [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2766-2773. (in Chinese)
- [14] 梁利喜,周龙涛,刘向君,等. 孔洞结构对超声波衰减特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3208-3214.  
Liang Lixi, Zhou Longtao, Liu Xiangjun, et al. Study of effect of pore structure on ultrasonic attenuation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3208-3214. (in Chinese)
- [15] Shiotani T, Ohtsu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5-6): 235-246.
- [16] 邓继新,周浩,王欢,等. 基于储层砂岩微观孔隙结构特征的弹性波频散响应分析[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3389-3400.  
Deng Jixin, Zhou Hao, Wang Huan, et al. The influence of pore structure in reservoir sandstone on dispersion properties of elastic waves [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3389-3400. (in Chinese)



第一作者简介:赵永川,男,1989年7月生,博士生。主要研究方向为岩石破裂过程中声发射信号处理。曾发表《西部弱胶结砂岩循环载荷作用下塑性应变能变化规律》(《煤炭学报》2015年第40卷第8期)等论文。

E-mail: yongchuanzhao@sina.com