

# Application of Discrimination Algorithms Based on AE Waveform Parameters in Model Test

Qiang Sun, Chun Gao, Hairui Yuan, Yinhao Song, Cengceng Wu

College of Mechanics and Architectural Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

Email: sunq\_208@163.com, 1192555319@qq.com

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2019; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the duration, amplitude and rising time of 2.42 million acoustic emission impact events obtained in the whole process of uniaxial compression test of single porous rock in three tests, eight types of acoustic emission characteristic waveforms are obtained by discriminant algorithm, and then fast Fourier transform (FFT) and Matlab statistical analysis are carried out. This paper focuses on the relationship between the classification of rock acoustic emission signals and stress. The results show that the frequency domains of the eight types of waves are mainly concentrated in the two frequency bands of 0~50 kHz and 250~300 kHz, and their distribution proportion is regular with the change of stress level. Waves with short duration, low amplitude and long rise time occupy the majority. Before approaching the peak intensity, the proportion of waveforms with high amplitude and short rise time increases, while the proportion of waveforms with long duration decreases. After entering the destruction stage, the proportion of waveforms with high amplitude and short rise time decreases. In general, there is a significant correlation between the amplitude of the waveform parameters and the rising time, which has an early warning effect on the failure of the specimens. The research method is based on large data and is a supplement to the original acoustic emission parameter evaluation method. The subsequent rock tests of different types will improve the application of this method.

## Keywords

Model Test, Acoustic Emission, Discriminant Algorithm, Waveform Parameters, Fast Fourier Transform (FFT)

---

## 基于声发射波形参数的判别算法在模型试验中的应用研究

孙 强, 高 淳, 袁海瑞, 宋银豪, 吴层层

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京  
Email: sunq\_208@163.com, 1192555319@qq.com

收稿日期: 2019年8月5日; 录用日期: 2019年8月21日; 发布日期: 2019年8月28日

## 摘要

本文以三次试验中单个孔隙类岩石单轴压缩全过程试验中获取的242万个声发射撞击事件为样本, 基于持续时间、幅值和上升时间三个参数, 应用判别算法获得八类声发射的特征波形, 进而开展快速傅里叶变换(FFT)和matlab统计分析, 重点研究岩石声发射信号的特征分类与应力的对应关系。研究表明: 在整个试验阶段, 八类类型波的频域主要集中在0~50 kHz和250~300 kHz二个频段, 并随应力水平的变化其分布占比具有规律性; 自始至终持续时间长、幅值较低、上升时间较长的波占据着大多数, 接近峰值强度前, 高幅值、上升时间较短的波形比例上升, 持续时间长的波比例下降, 进入破坏阶段后与之前相反。总体上波形参数中幅值与上升时间存在明显相关性对试件的破坏具有预警作用。该研究方法以整体大数据为研究基础, 是对原有声发射参数评价方法的补充, 后续进行不同类型岩石试验, 将更加完善该方法的应用。

## 关键词

模型试验, 声发射, 判别算法, 波形参数, 快速傅里叶变换(FFT)

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩石可视为一种非均质的多相复合结构, 存在大量不同尺度和随机分布的各种微缺陷, 对于受载后的内部微裂隙萌生、扩展、贯通和相互作用的力学行为仍有大量的研究工作需要开展。本文尝试在素混凝土中添加陶粒模拟孔隙, 是基于类岩石的条件开展试验。其中, 作为一种研究手段, 在可视化受到一定条件限制后声发射技术的应用有其优越性。

声发射(AE)可以定义为物体或材料内部迅速释放能量而产生瞬态弹性波的一种物理现象, 而 AE 信号则表示一个或多个 AE 事件经传感器接收并经系统处理后以某种形式出现的电信号[1]。因此, 岩石破裂时内部裂缝的产生与发展是良好的声发射信号源, 其声发射波形携带有岩石受力状态、结构、物理力学性质等全部信息[2], 探究岩石破裂过程中声发射信号特征与岩石内部破裂过程之间的关系, 寻找岩石损伤过程中的异常前兆信息特征, 有助于研究岩石破坏的力学行为。

目前, 声发射信号处理的方法, 文献中应用比较广泛是按确定性信号处理的参数法, 包括振铃计数、撞击事件; 基于傅里叶变换的能量法; 包括功率谱、幅值、主要频率; 即现有方法主要分析 AE 事件发生的频度, 其次就是分析其能量释放率; 其优势是处理简便, 并可以粗略反应信号强度和频度。例如, 姜耀东等[3]将声发射振铃计数和能量与煤样的单轴破坏结合起来进行了研究, 左建平[4]研究了单轴应力状态下煤体、岩体和煤岩组合体的声发射规律, 并揭示了三者的破坏机制。Yuyama 等[5]发现材料失效会产生显著幅度高的 AE 信号。姜德义等[6]分析了加载应变率对声发射频率的影响, 认为加载速率越

快, 岩石的脆性特征越显著, 声发射振铃数越少。纪洪广等[7]首次对声发射的频域进行了分析, 并引入了“优势频率”等概念, 将频域纳入了声发射信号分析的指标。李楠等[8]对岩石破裂过程中声发射信号主频变化规律进行了研究; 逢焕东等[9]对去噪后的信号能量谱密度进行分析, 发现大能量声发射信号的能量谱密度与小能量声发射信号的能量谱密度存在明显的差异, 这些差异基本上不随试样材料和加载方式变化, 其次随着模态声发射理论和技术的逐渐成熟, 人们又开始对声发射信号按随机的瞬态信号处理产生了浓厚的兴趣, 小波分析、现代谱分析和神经网络分析等技术也得到应用[10], 即基于模态法; 依据模糊数学、神经网络的方法获得声发射信号时序演化特征参量等, 例如沈功田等[11]针对压力容器开展了声发射信号人工神经网络模式识别方法研究, Arakawa 等[12]开发了基于模拟 AE 波形的声发射信号分类方法, 对 AE 信号进行了分类。张艳博等[13][14]利用神经网络对波形进行了聚类分析。王宗炼等[15]通过小波变换对声发射信号进行了聚类并结合岩石细观破坏进行了分析。其他如在岩石损伤声发射研究中罗津辉等[16]对花岗岩加载过程中声发射信号的波速和幅值变化进行了初步分析, 并将其用于判断岩石的结构变化以及加载过程的演化。上述的研究对研究岩石破裂机制都取得很好的效果。

然而由于岩石内部缺陷的多样性, 其损伤过程中行走的 AE 信号与固定的传感器匹配性, 都将使得声发射传播的速度、频率、能量等基于同样的破损机制接收到信号形态也会发生变化, 以至于传感器所接收到的每一个声发射信号都是个体与整体的结合, 难以确定其具体是哪个破裂的真实的, 完整的信号; 因此, AE 源机制的多样性、声波传播途径的复杂性、本身的突发性以及干扰噪声的严重性等因素都使 AE 信号的处理和分析的方法有待进一步进行挖掘。

随着计算机技术的快速发展, 大量数据的批量处理变为可能, 我们可以不拘泥于实现单个或者部分信号参数, 从整个破坏过程中所有信号的多个参数进行分析研究。为此, 将统计学中的距离判别分析与计算机算法结合起来, 形成判别算法, 对整体信号进行分类, 在此基础上对分类后的特征波形进行频谱分析和沿时间序列进行分类统计, 从中寻找 AE 信号的分布规律, 以期对岩石内部损伤破坏过程有一个新的研究角度。

## 2. 试验设计

本次试验所用试样为混凝土制成的两端面平行且垂直于纵轴的圆柱样试样, 规格为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。试件原料: 水泥: 325 号普通硅酸盐水泥, 试件配合比: 水泥: 砂: 水 = 1:3:0.6 (质量比), 孔隙率为 10%, 陶粒为烧结粉煤灰陶粒, 粒径为 10 mm、8 mm、6 mm、4 mm、2 mm。

本次试验使用的岩石控制加载系统主要由主机、全数字控制系统、计算机系统等组成。主机上部置有球面调心压板, 可在一定范围内调整压板的角度, 使试验中压板能够与试样紧密接触, 受力均匀; 全数字测控系统主要由 EDC220 测量控制器与伺服系统、引伸计等部件构成。开始加载试验时, 首先对岩样施加压强 2 MPa 的力, 保证压力机压头与岩样紧密结合, 加载速度为 0.01 MPa/s, 直到岩石破碎, 试件强度在 20 MPa 左右。声波检测采用美国物理声学公司(PAC) SAMOS PCI-8 声发射系统, 布置采 4 个传感器可用于声发射信号的接收, 上下顶部与底部及试件左右各一个布置, 试件破坏信号采集以上端部和试件左右对称通道为主, 声波信号接受门槛设置为 30 db。

## 3. 基于判别算法的声发射信号波形的分类

试验一共进行了三次, 除第一次试验中途压力信号中断外, 其他二次试验完整, 加载条件相同, 峰值强度分别为 19.54 MPa 和 19.66 MPa。上述试验结束后, 将收集到的信号文件以 txt 格式的文档导出, 而后对三次实验全过程信号波形进行抽样分析, 发现其变化规律高度相似, 故以第三次试验试件上侧面的两个对称的探头所获得的全部 2,421,733 个波形数据为样本, 引入了判别算法对其进行分析。

### 3.1. 判别算法的基本原理

判别分析是根据表明事物特点的变量值和它们所属的类别，建立判别函数，对给定的新样本判断它来自哪个总体的分析方法，是多元统计分析中的一个重要分支，该方法由英国统计学家 Pearson 在 1921 年率先提出，在自然科学、社会科学中具有广泛的应用。基本原理是用研究对象的大量资料确定判别函数中的待定系数，总结出客观事物分类的规律性，建立一个或多个判别函数和判别准则[17]。

### 3.2. 判别参数的选取

相比于传统的只考虑振铃计数的分析方法，将持续时间、幅值和上升时间这三个参数结合起来将是声发射信号的分析的一个新的补充。其中声发射信号的持续时间与发出信号的那一部分材料的破坏尺度和信号的总能量相关；信号波形上升时间的长短与发出信号的那部分材料的性质有关，是短时输出的能量率的反应，短时能量高则上升时间短，反之则长；而幅值变化规律与短时能量和裂隙密度相关，幅值变化规律将比较频率更有利于判别材料的损伤状况(魏建新[18]等发现)。同时这三种特性参数比较容易从撞击的时间图中被识别出来，故依据代表性与可行性的原则，选取了从声发射撞击信时域中得到的持续时间、幅值、上升时间三个维度的信息，以  $x, y, z$  的形式投影到坐标轴上，并进行分类与占比分析，声发射信号参数，如图 1 所示：

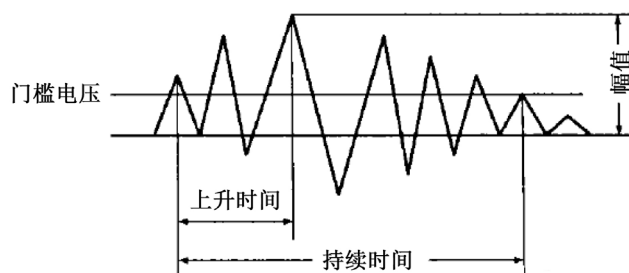


Figure 1. Acoustic emission signal and parameter diagram  
图 1. 声发射信号参数示意图

### 3.3. 信号波形的分类方法

以持续时间为例，设存在两个总体  $L$  (持续时间较长)和  $S$  (持续时间较短)，定义该样品波形持续时间到总体  $L$  和  $S$  的距离  $d(x, L)$  和  $d(x, S)$ ；若样品  $x$  到总体  $L$  的距离小于等于到总体  $S$  的距离，则认为样品属于总体  $L$ ，反之，则认为样品属于总体  $S$ ；这个准则的数学模型如下所述：

$$\begin{cases} x \in L, d(x, L) < d(x, S) \\ x \in S, d(x, L) > d(x, S) \end{cases} \quad (1)$$

同理可将幅值和上升时间占比进行判别，即根据持续时间分为长时  $L$  (long)和短时  $S$  (short)、根据幅值分为强  $P$  (powerful)和弱  $W$  (weak)、根据上升时间分为突发  $U$  (urgent)和缓慢  $D$  (delay)。而后通过抽样分析，可对信号波形根据事件的持续时间，幅值与上升时间所占比例对其进行分类，建立基于持续时间长时  $L$  (long)和短时  $S$  (short)、幅值强  $P$  (powerful)和弱  $W$  (weak)、上升时间突发  $U$  (urgent)和延迟  $D$  (delay)的维度空间，其关系如图 2，以此确定判别函数  $f_1, f_2$  和  $f_3$ ：

$f_1$ ：持续时间  $t$  判别； $f_2$ ：信号幅值  $v$  判别； $f_3$ ：上升时间占持续时间比例  $n$  判别。

即通过建立判别函数的判别算法，对数据进行处理分析，执行后便可将所有事件分为八类如表 1，执行的逻辑框图如图 3，为方便表示，八类波形缩写为 LPU、LPD、LWU、LWD、SPU、SPD、SWU、

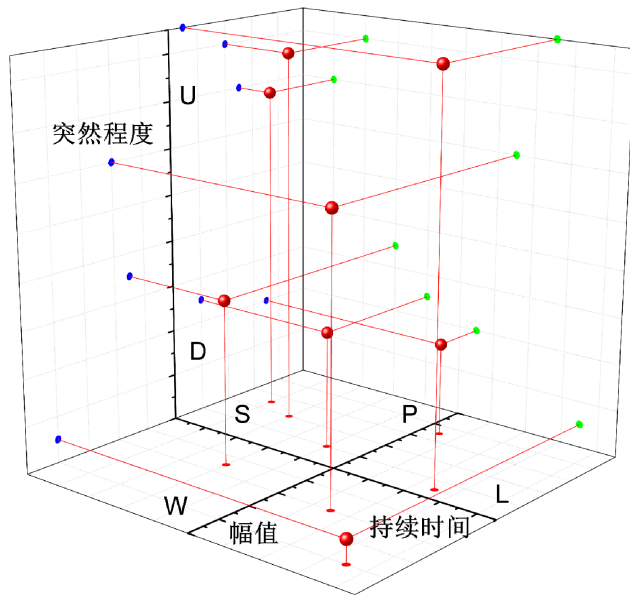


Figure 2. Concept map of waveform classification  
图 2. 波形分类概念图

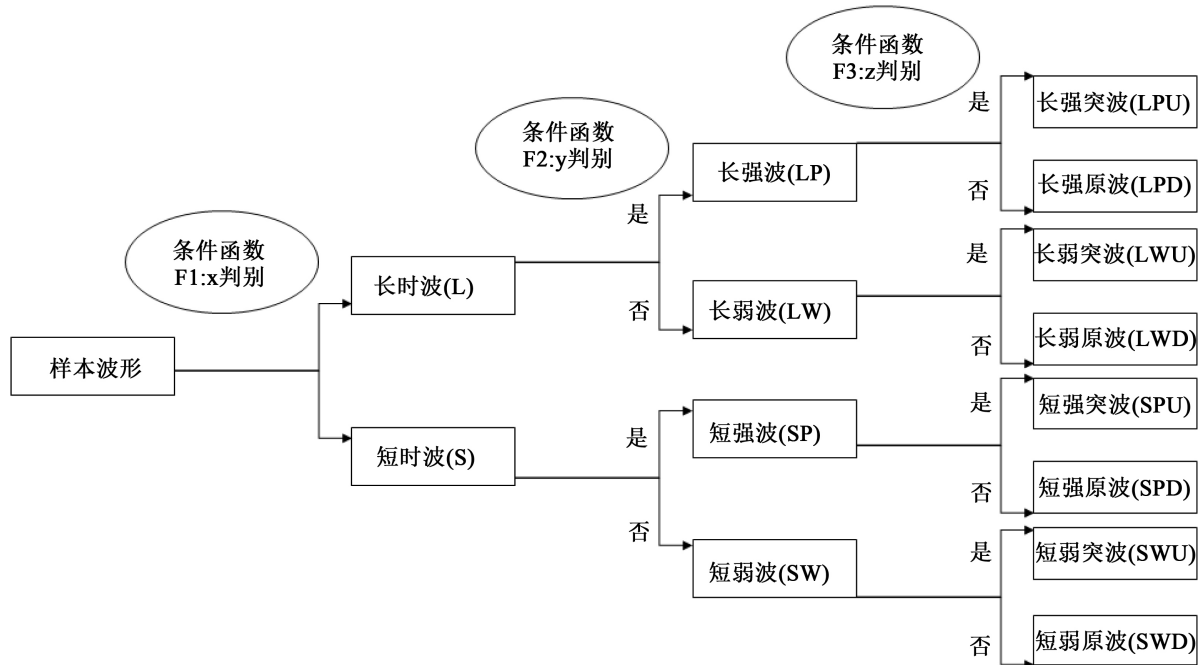


Figure 3. Logic block diagram of waveform classification  
图 3. 波形分类逻辑框图

SWD，并经快速傅里叶变换(FFT)获得其频域图，具体解释见表 1，结果见表 2。

在整个试验阶段，上述基于判别算法的声发射信号波形的分类是基于三个特征参数以及每个参数的二个条件形成，可以获得八种典型波形，由表 2 可知八类类型波的频域都主要集中在 0~50 kHz 和 250~300 kHz 二个频段，该结论表明，针对某一类材料，声发射信号的频域有其固有特征。另外通常突发波对应的破坏状态是基于高能量条件下应力集中点的材料某区域的突然开裂，信号波形时间的长短又可定义破

**Table 1.** Names and waveform characteristics of eight typical waveforms**表 1.** 八类典型波形的名称与波形特点

中文名	英文简称	波形特点
长强突发波	LPU	<i>L</i> (long, 持续时间较长) <i>P</i> (powerful, 幅值较高) <i>U</i> (urgent, 发生较突然)
长强延迟波	LPD	<i>L</i> (long, 持续时间较长) <i>P</i> (powerful, 幅值较高) <i>D</i> (delay, 发生不突然)
长弱突发波	LWU	<i>L</i> (long, 持续时间较长) <i>W</i> (weak, 幅值较低) <i>U</i> (urgent, 发生较突然)
长弱延迟波	LWD	<i>L</i> (long, 持续时间较长) <i>W</i> (weak, 幅值较低) <i>D</i> (delay, 发生不突然)
短强突发波	SPU	<i>S</i> (short, 持续时间较短) <i>P</i> (powerful, 幅值较高) <i>U</i> (urgent, 发生较突然)
短强延迟波	SPD	<i>S</i> (short, 持续时间较短) <i>P</i> (powerful, 幅值较高) <i>D</i> (delay, 发生不突然)
短弱突发波	SWU	<i>S</i> (short, 持续时间较短) <i>W</i> (weak, 幅值较低) <i>U</i> (urgent, 发生较突然)
短弱延迟波	SWD	<i>S</i> (short, 持续时间较短) <i>W</i> (weak, 幅值较低) <i>D</i> (delay, 发生不突然)

裂尺度的大小，而幅值的变化与初始能量和裂纹密度关联并且，低能微弱信号通常对应微裂隙压密、微裂纹萌生、岩石内部摩擦滑移等事件。因此，八类波形除了频域以外随时间和应力水平的分布特征，可以进一步了解材料破坏的特征信息。

## 4. 信号波形随时间和应力水平变化的分布

### 4.1. 信号的分类

本文第 3 节主要基于大数据的判别算法提取了八种特征波形，而借助于 matlab 统计分析则可获得所有八种类型的波随时间和应力水平变化的分布占比，具体全过程分布如图 4~6：图 4 为八类典型波随时间占比变化图，为方便理解与对比，我们将除 SWD 外的七种波形在图 4 五条虚线对应的应力处(即约 20%、60%、80%、峰值应力和峰后应力)的比例变化提取成图 5，将三个指标参数的占比和应力水平、时间关系提取出来作图 6。

### 4.2. 信号的分类分析

结合图 4~6，进行了如下分析：

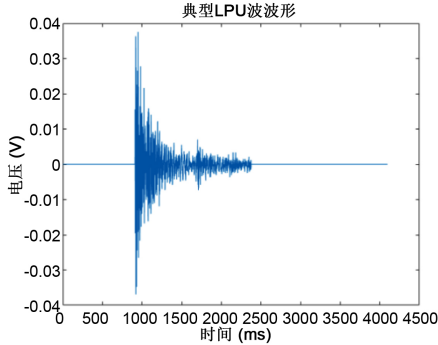
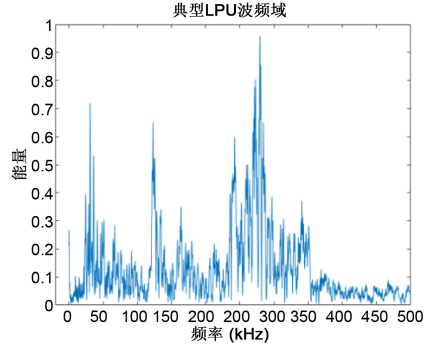
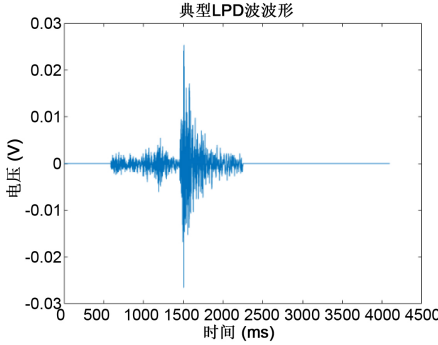
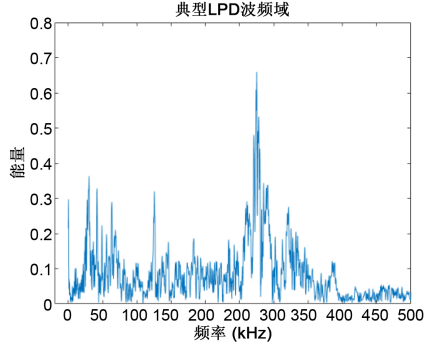
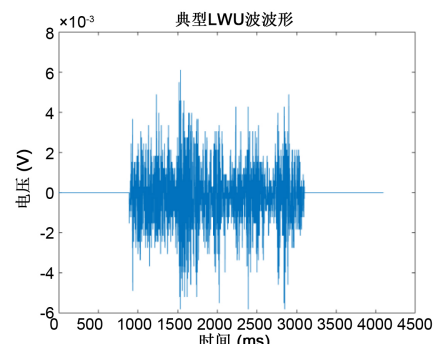
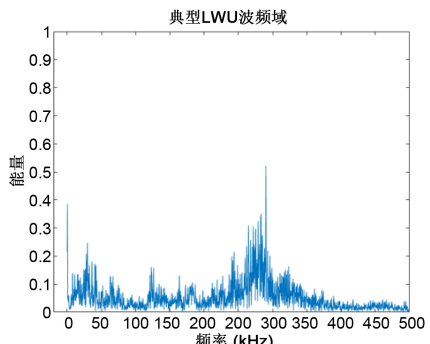
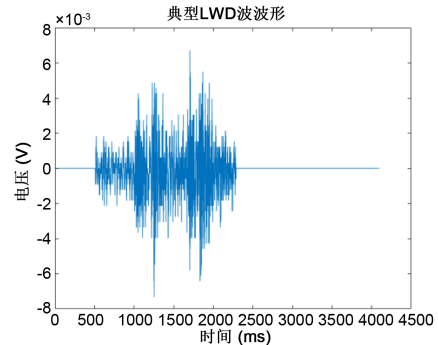
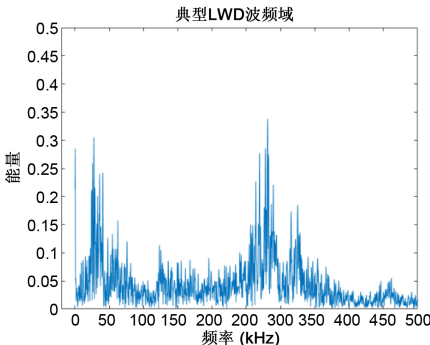
1) 由图 4 可知；SWD 低能微弱信号普遍无差异存在于岩石破裂过程各个阶段，且总体数量占比极大，自始至终，SWD 波都占据着大多数，说明大多数声发射的事件都是相对低能的，也可以说缓慢变形与低能量破坏的声发射事件贯穿于整个试验过程。

2) 在破坏后期 LPD 与 LWD 波占据比较突出的位置，达到较高值，LWD 型波更是在 2500 秒后占比增加了约 100%，该二类波形共有的特征都体现非突发以及作用时间长特点。这与失稳破坏后，基于摩擦阻力下大量的长裂隙发展状况相一致，而幅值的大小变化则对应于新裂纹的产生和原有裂纹的发展。

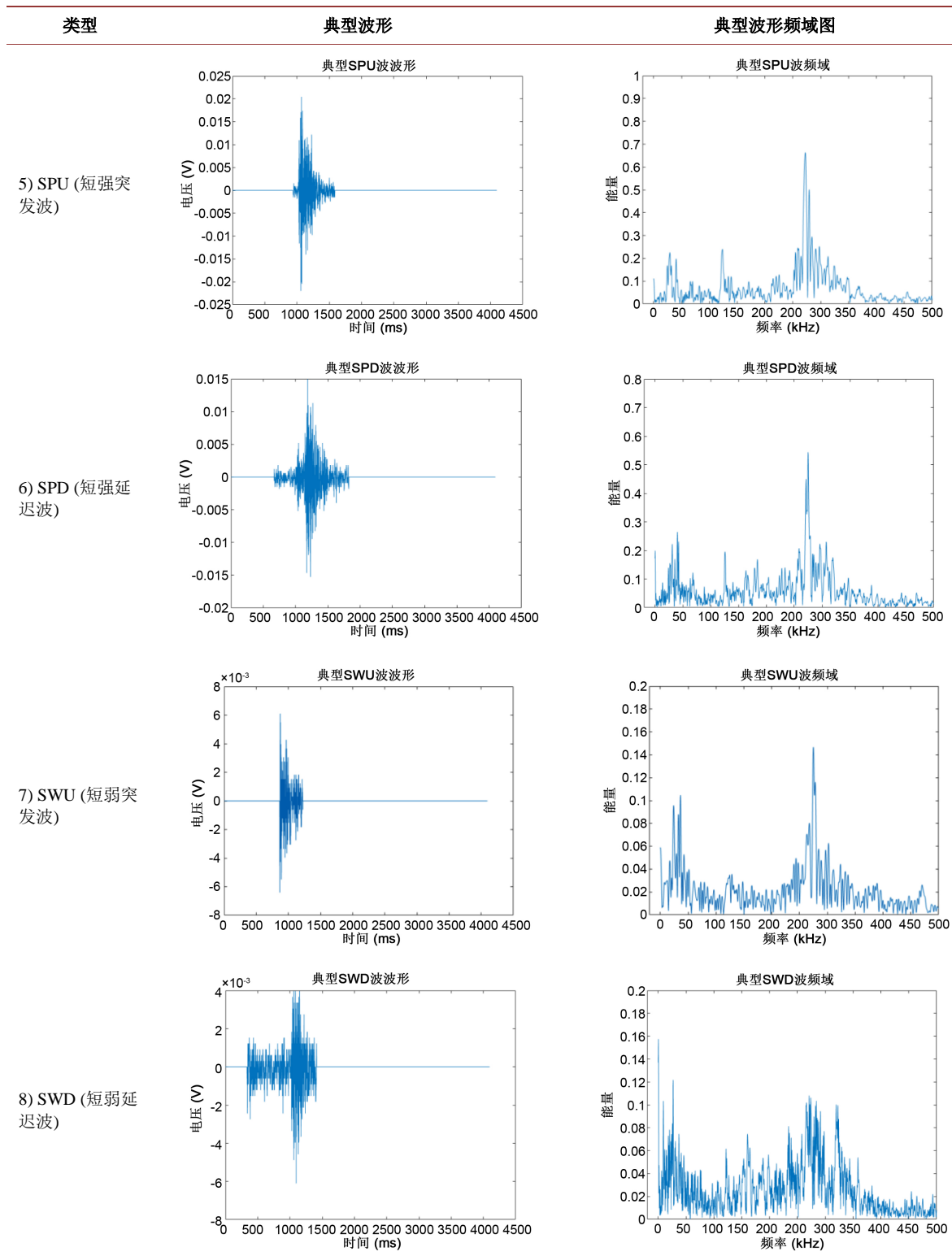
3) 加载初期应力总体上达到 20% 水平时，LPD、SPD 处于较高比例，该二类波形共有的特征是具有较高的幅值，以及非突发性，但其非突发性的形成机制却与破坏后期有所不同，更多地体现在初期载荷作用下，持续的端部效应以及孔隙混凝土材料较多的微裂隙闭合与滑移产生的过程。

4) 加载后期应力水平从 60%、80% 到峰值阶段，LPD、SPU 和 SPD 波形占比大致相当，出现了明显的升高的现象，其共同点是代表幅值高的 *P* 同时出现，表明其内部有大量新微裂缝产生、扩展、汇聚，这个时期微裂纹对应的短波形，而长波形对应裂纹的扩展，而峰值处的 LPU 波形占比明显高于其他波形，可作为材料破坏的预警指标。

**Table 2.** Time domain and frequency domain diagrams of eight typical waveforms  
**表 2.** 八类典型波形和频域图

编号/类型/能量集中频率	典型波形时域图(a)	典型波形频域图(b)
1) LPU (长强突发波)	 <p>典型LPU波波形</p> <p>电压 (V)</p> <p>时间 (ms)</p>	 <p>典型LPU波频域</p> <p>能量</p> <p>频率 (kHz)</p>
2) LPD (长强延迟波)	 <p>典型LPD波波形</p> <p>电压 (V)</p> <p>时间 (ms)</p>	 <p>典型LPD波频域</p> <p>能量</p> <p>频率 (kHz)</p>
3) LWU (长弱突发波)	 <p>典型LWU波波形</p> <p>电压 (V) <math>\times 10^{-3}</math></p> <p>时间 (ms)</p>	 <p>典型LWU波频域</p> <p>能量</p> <p>频率 (kHz)</p>
4) LWD (长弱延迟波)	 <p>典型LWD波波形</p> <p>电压 (V) <math>\times 10^{-3}</math></p> <p>时间 (ms)</p>	 <p>典型LWD波频域</p> <p>能量</p> <p>频率 (kHz)</p>

Continued



5) LWU 波自始至终占比极低，没超过 0.2%，主要以高频成分为主，基本判断为连续的机器噪声与原不是现有材料重点关注波形。



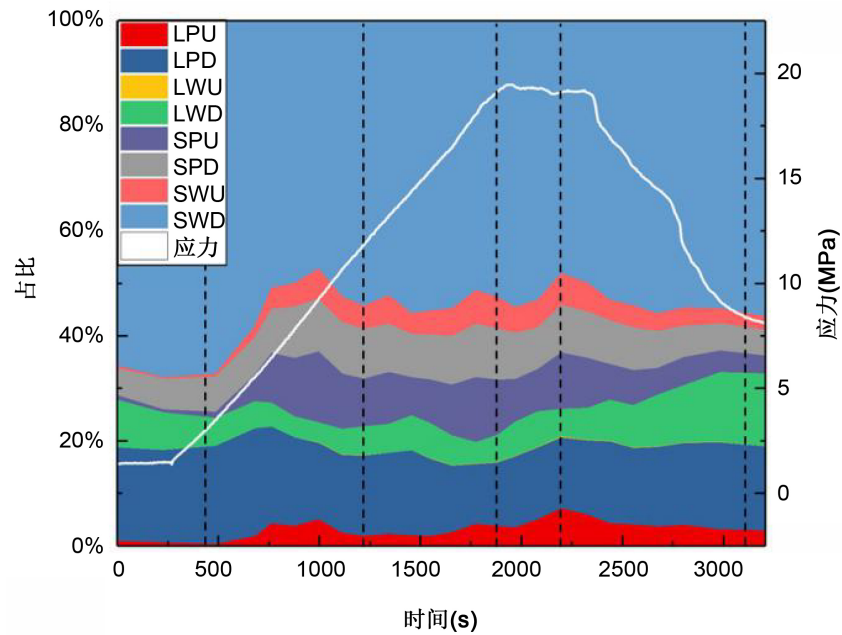


Figure 4. Changes of eight kinds of waves with time ratio and stress level  
 图 4. 八类典型波随时间和应力水平占比变化图

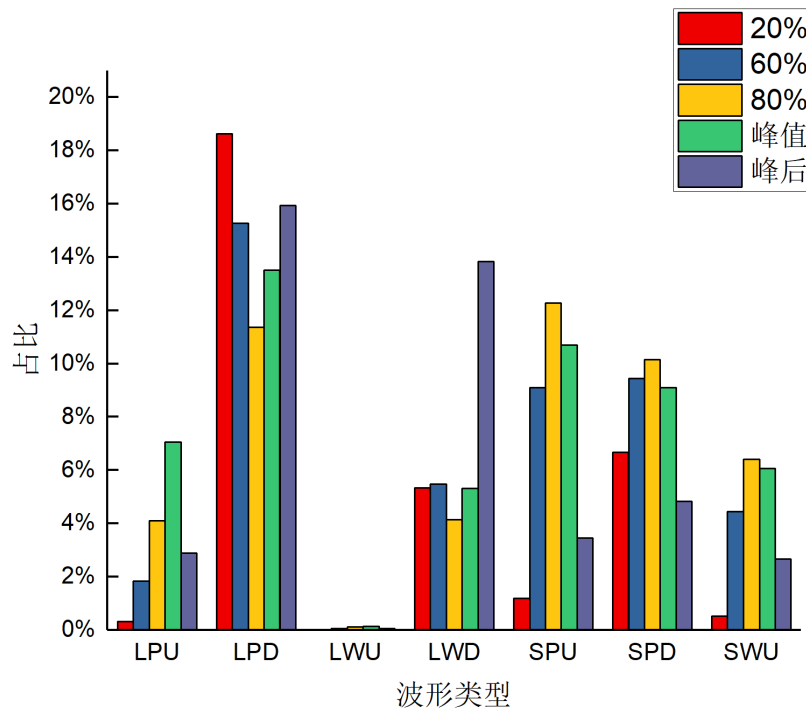


Figure 5. Distribution of other waveforms with stress level and time except SWD  
 图 5. 除 SWD 外其余波形随应力水平和时间分布图

6) 从图 6 波形三指标参数看,  $P$  与  $U$  存在明显正相关性, 通过计算得知相关性系数为 0.9093。故可推断相对幅值高的声发射事件往往发生的也比较突然, 而  $L$  则呈现两端相对较高的现象, 特别是进入破坏阶段后  $L$  上升较为明显, 表明除除了主断裂外, 基于摩擦阻力下的大量裂隙发展的破坏尺度偏大。

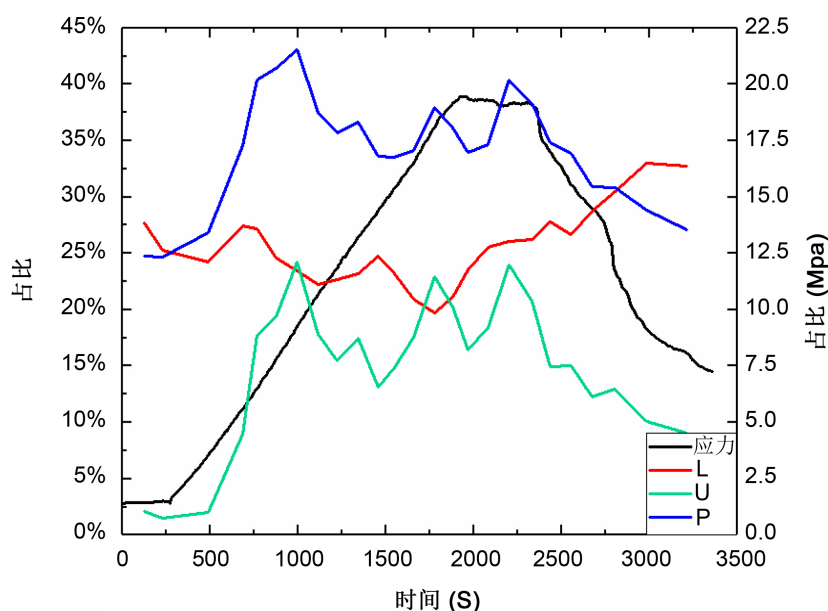


Figure 6. Curves of three parameter ratios of  $L$ ,  $U$ ,  $P$  and stresses versus time  
 图 6.  $L$ 、 $U$ 、 $P$  三个典型波形指标参数占比随应力和时间变化曲线

## 5. 结论

1) 从大数据的角度, 通过判别算法、FFT 将声发射事件全过程进行波形特征化分类, 并结合 matlab 统计分析, 建立了八类典型波随时间和应力水平占比的分布规律。

2) 统计分析表明: 孔隙混凝土材料变形及破坏的声发射信号波形的频域主要集中在 0~50 kHz 和 250~300 kHz 二频段, 且自始至终, 低能微弱信号 SWD 波都占据着大多数, 也可以说缓慢变形与低能量破坏的声发射事件贯穿于整个试验过程。

3) 波坏发展阶段, 幅值高的声发射波形, LPD、SPU 和 SPD 波占比出现了明显的升高的现象, 而峰值处的 LPU 波形占比明显高于其他波形, 可作为材料破坏的预警指标。峰后作用时间长的波形, LPD 与 LWD 波占据比较突出的位置。这与失稳破坏后, 基于摩擦阻力下大量的裂隙发展状况相一致且破坏尺度偏大。

4) 该方法可作为现有声发射检测技术分析的补充, 待不同类型材料, 以及波形参数与声发射传统特征参量的比对的试验研究进一步完善后, 将有助于更加全面了解岩石材料内部破坏的发展历程。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(51574247)。

## 参考文献

- [1] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23-28.
- [2] 贾雪娜. 应变岩爆试验的声发射本征频谱特征[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [3] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 宋义敏, 陶磊. 煤样失稳破坏的多参量监测试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 667-674.
- [4] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 彭瑞东, 李岳春. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564-1570.
- [5] Yuyama, S., Yokoyama, K., Niitani, K., Ohtsu, M. and Uomoto, T. (2007) Detection and Evaluation of Failures in

High-Strength Tendon of Pre-Stressed Concrete Bridges by Acoustic Emission. *Construction and Building Materials*, **21**, 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.04.010>

- [6] 姜德义, 陈结, 任松, 王维忠, 白月明. 盐岩单轴应变率效应与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 326-336.
- [7] 纪洪广, 王宏伟, 曹善忠, 等. 花岗岩单轴受压条件下声发射信号频率特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 2900-2905.
- [8] 李楠, 王恩元, 赵恩来, 马衍坤, 许福乐, 钱伟华. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1099-1103.
- [9] 逢焕东, 张兴民, 姜福兴. 岩石类材料声发射事件的波谱分析[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 540-544.
- [10] 王伟魁, 曾周末, 杜刚, 魏永佳, 宋哲哲. 304 控氮不锈钢应力腐蚀过程中声发射信号聚类分析[J]. 化工学报, 2011, 62(4): 1027-1033.
- [11] 沈功田, 段庆儒, 周裕峰, 李帮宪, 刘其志, 李春树, 蒋仕良. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 144-146+149.
- [12] Arakawa, K. and Matsuo, T. (2017) Acoustic Emission Pattern Recognition Method Utilizing Elastic Wave Simulation. *Materials Transactions*, **58**, 1411-1417. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017104>
- [13] 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 姚旭龙, 孙林, 刘祥鑫. 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.
- [14] 张艳博, 杨震, 姚旭龙, 梁鹏, 田宝柱, 孙林. 基于声发射信号聚类分析和神经网络识别的岩爆预警方法实验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 89-98.
- [15] 王宗炼, 任会兰, 宁建国. 基于小波变换的混凝土压缩损伤模式识别[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1745-1753.
- [16] 罗津辉, 蔡忠理, 刘克, 李小春. 用声波参数确定岩石加载破坏过程的不同阶段[J]. 岩土力学, 1992(1): 51-56.
- [17] 李春林, 陈旭红. 应用多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [18] 魏建新, 狄帮让. 裂隙密度对纵波传播特性影响的实验观测[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 554-559.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)