DOI: 10.11883/bzycj-2017-0383 文章编号: 1001-1455(2018)04-0716-09

岩爆预警与烈度评价的声音信号分析*

苏国韶,刘鑫锦,闫召富,张 洁,李燕芳,燕柳斌
(广西大学土木建筑工程学院工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要: 利用真三轴岩爆实验系统在室内再现了岩爆动力破坏过程,采用数字录音笔对岩爆过程的声音信号进行监测,在声音信号预处理的基础上,对岩爆过程中的颗粒弹射、岩板劈裂、块片弹射 3 种岩石脆性破坏现象的不同声音特征指标进行分析。结果表明:3 种典型脆性破坏现象的声音信号在波形、频谱、声纹和短时能量等特性指标上存在明显差异,这些特征指标适用于岩爆的特征提取。提出了一种基于声音信号的岩爆烈度评价指标——局部声响总能量,该指标适用于定量评价岩爆发生的剧烈程度。

关键词: 岩石工程;岩爆预警;岩爆烈度;声音信号
中图分类号: O381;TU458;TV672 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

岩爆是高地应力区地下工程开挖时由于岩体中积聚的弹性应变能突然释放而发生的动力地质灾害现象,岩爆的预警是岩石力学领域的热点与难点[1-2]。当前,基于声发射(10~100 kHz)、微震(10 Hz~10 kHz)等声信号的预警方法扮演着重要角色[3-4]。采用这两种预警方法时,由于信号的传播介质为岩体,信号传播容易受到传感器与岩体的贴合紧密度、岩体结构面和不良地质构造的影响,信号的衰减与空间变异性往往较大。实际上,岩爆孕育过程中常伴随着人耳可识别的声音信号(20 Hz~20 kHz),它能够在空气中传播,便于接收与采集,是一种潜在的岩爆预警物理信号。当前,一般采用声响作为岩爆等级划分的依据[5-6],例如《水力发电工程地质勘查规范》[5]给出撕裂声、清脆爆裂声、爆炸声、闷雷声分别对应于轻微、中等、强烈、极强岩爆。然而,关于岩爆声音信号定量化分析的研究尚未系统开展。

工程实践和室内实验均表明[7-11],在岩爆发生整体性失稳破坏前,常出现颗粒弹射、岩板劈裂等岩石脆性破坏现象,并伴随不同的声音信号,为现场施工人员提供了宝贵的预警信息。但是,在现场诸多噪音和不良环境的影响下,人为经验往往难以保证预警的准确性,而误判则会对工程进度产生不利的影响。此外,通过人员对岩爆声响的记忆与描述判断是否发生岩爆及岩爆等级通常并不可靠,可能造成对同一岩爆事件有不同等级的划分,进而使制定岩爆防治措施时出现很大的偏差。因此,对于具有岩爆倾向的深部隧道,通过对岩爆前声音信号的记录与分析,开展基于声音信号的岩爆识别与烈度定量化评价研究,实现精准而及时的岩爆预警,具有重要的现实意义。

本文中,利用自主研发的真三轴岩爆实验系统,在室内实现应变型岩爆的模拟,利用数字录音笔对岩爆声音信号进行全程监测,定量分析颗粒弹射、岩板劈裂、块片弹射等岩爆过程中典型脆性破坏现象的声音信号特征,由此建立基于随机森林机器学习的岩爆声音自动识别方法,并提出一种基于声音信号的岩爆烈度评价指标,为建立基于声音信号的现场岩爆预警与烈度评价方法提供基础和参考。

1 岩爆实验

1.1 实验方案

岩样包括锦屏二级水电站大理岩、白鹤滩水电站玄武岩、广西岑溪花岗岩、广东黄陵闪长花岗岩等各种完整硬岩,尺寸为 200 mm× 100 mm×100 mm,加工精度严格按国际岩石力学协会标准执行。

* **收稿日期**: 2017-10-24; **修回日期**: 2018-01-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(41472329)
第一作者: 苏国韶(1973—),男,博士,教授,suguoshao@163.com。

采用广西大学真三轴岩爆实验系统进行隧洞围岩环向应力集中导致的应变型岩爆模拟，应力加载路径如下[12]：试样保持一个临空面，临空面对立面施加最小主应力 σ_3，以模拟高地应力条件下圆形隧洞开挖后围岩的径向应力梯度，中间主应力 σ_2 达到预设应力值后保持不变；加载轴向应力 σ_1 直至试件发生岩爆破坏。利用 DVR-116 型数字录音笔进行声音信号实时监测，录音笔放置在距离岩样约 0.5 m 处，录音文件格式为.wav 文件，采样率为 192 kpbs。

1.2　实验结果

多个不同硬岩的真三轴应变型岩爆实验结果表明，岩样的临空面出现了颗粒弹射、岩板劈裂和块片弹射 3 种依次发生的破坏现象。受篇幅限制，并考虑到各实验的声音信号变化过程具有一定的相似性，采用图 1 给出的典型岩爆过程及其声音波形进行分析。由图 1 可知：1.35 s(图 1 中的起始时间)时，临空面局部开裂，出现清脆开裂声；14、17、32、43 s 后，临空面分别出现颗粒弹射现象，伴随着清脆而短促的声音，相应的声音信号幅值出现突增；45 s 后，临空面出现局部岩块剥落，声音幅值增大，紧接着出现岩板劈裂现象，相应的声音信号幅值较大，随后出现持续的低幅值的岩石破裂声；47 s 时，临空面岩板开始出现横向裂缝；49 s 时，岩板突然折断并高速弹射出去，随后大量的岩石块片弹射而出，伴随有巨大爆炸响声，相应的声音信号幅值最大。由此可见，岩爆过程中的各种宏观破坏现象与声音信号波形图中的幅值突增现象是一一对应的，为基于声音信号的岩爆预警提供了基础。

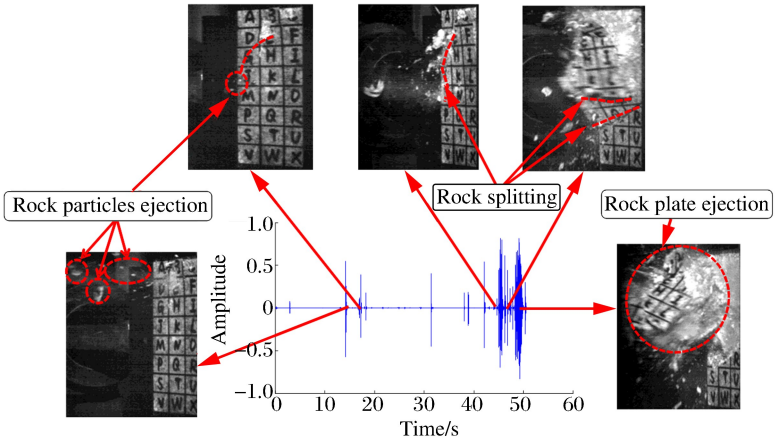


图 1　典型岩爆过程及其声音波形

Fig. 1　Typical rockburst process and its sound waveform

2　典型脆性破坏现象的声音信号特征分析

对声音信号的原始数据进行预处理，主要包括分帧、加窗、滤波和端点检测等，提取声音信号的特征。在短时分析中，首先将声音信号按照固定时长分成很多个“标准段”，其中的一个标准段称为一“帧”。为了使声音信号的相邻两帧之间平稳过渡，在两帧之间插入一帧，使相邻两帧之间的信号有部分重叠，称为“帧移”。根据以往的声音信号处理经验[13]，帧长取为 200 样本点，帧移取为 80 样本点(见图 2)。声音信号数字化处理过程中，分帧相当于乘以一个有限长的窗函数，本文中采用汉明窗函数，可避免频谱能量泄漏现象[14]。无论是在现场施工还是在实验室，岩爆实验声音信号会受到不同程

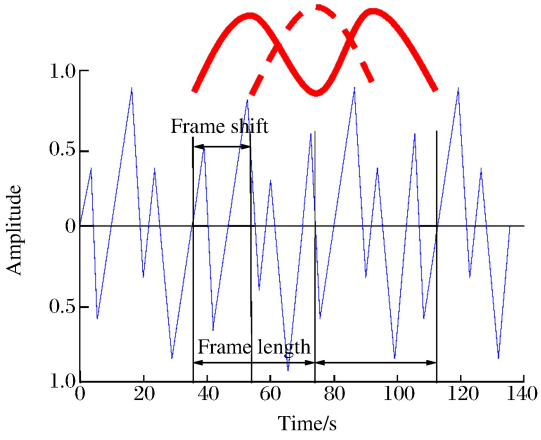


图 2　声音信号的分帧

Fig. 2　Framing of sound signal

度环境噪声的污染。当前,噪声滤波技术发展较为成熟,可以采用对时变信号和突变信号去噪适用性较强的小波法滤除环境噪声[13]。最后,对完成滤波的声音信号进行端点检测[15-16],自动检测出声音信号波形图中幅值突增声音的起始点及结束点,以获取岩样典型破坏现象相应的声音波形。

2.1 波形特征

声音信号波形是指声音信号幅值随时间的变化过程。图 3 为利用端点检测所得 3 种典型破坏现象的波形,不难发现,3 种典型破坏现象所对应的波形差异明显。表 1 列出了三者之间的具体差异,其中 $N_{A>0.4}$ 为声音信号波形幅值 $A>0.4$ 的声波信号数。

(1) 颗粒弹射的波形呈“笋芽”状,持续时间为 0.03 s,约为块片弹射持续时间的 1/20。颗粒弹射现象的声音信号波形幅值随时间推移逐渐减小,且幅值在 0.003 s 内从 0.4 迅速减小到 0.1 以下,只有在颗粒弹射发生开始时的很短一段时间内超过 0.4。这些现象反映了岩爆过程颗粒弹射现象声音信号具有发生时间短、消失速度快、发生具有不连续性的特点。颗粒弹射的稀疏波形表明,在颗粒弹射现象发生时,岩样内部的破坏活动较少。

(2) 岩板劈裂的波形呈“矛头”状,持续时间为 0.47 s,约为颗粒弹射的 15 倍。幅值在岩板劈裂过程中数次达到或超过 0.4,且在整个劈裂过程中声音信号的幅值并不是持续减小的,局部甚至出现了幅值短暂增大的现象。引起幅值突然增大的原因可能是岩板劈裂过程中,由于岩样持续加载,岩样内部裂缝出现局部发展、贯通,致使声音信号突然增强。该现象与实验过程中在岩板劈裂现象发生时能听到连续的“吱吱”剪切破坏声响相符合。

(3) 块片弹射波形呈“三角”状,发生时伴随着巨大的爆炸式声响。由图 3(c)可知,幅值超过 0.4 的部分较多,持续时间为 0.76 s,约为颗粒弹射的 20 倍。幅值随着时间推移逐渐减小,但是与颗粒弹射和岩板劈裂相比,块片弹射的幅值随时间减小的速率较缓慢。块片弹射现象发生时伴随着很多小颗粒随岩板块片一起从临空面飞出,因此,岩样内部破坏活动较多,相应的声音信号波形分布较浓密。

表 1 3 种典型破坏现象的声音信号波形特性

Table 1 Features of voice signal waveform for three typical failure phenomena

破坏现象	波形	持续时间/s	$N_{A>0.4}$	破坏现象	波形	持续时间/s	$N_{A>0.4}$
颗粒弹射	“笋芽”状	0.03	1	块片弹射	“三角”状	0.76	>100
岩板劈裂	“矛头”状	0.47	<10				

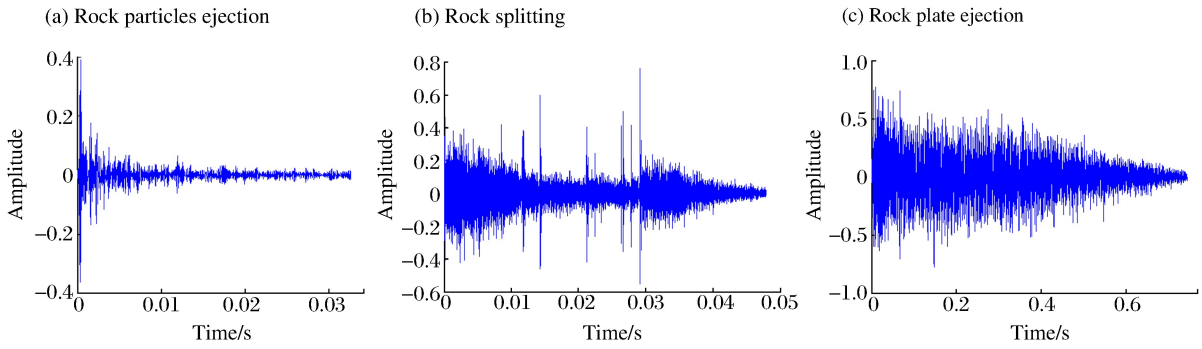


图 3 3 种典型破坏现象的声音信号波形

Fig. 3 Waveforms of sound signals for three typical failure phenomena

2.2 频谱特征

将时域信号变换至频域加以分析的方法称为频谱分析,有助于揭示岩爆过程中声音信号的频率分布情况。快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)是应用最广泛的一种频谱分析手段,能够实现波形由时域向频域的转变。将岩爆典型破坏现象对应的声音信号波形提取出来,利用 MATLAB

时频分析工具箱对所提取的声音信号进行 FFT，从而得到岩爆过程中不同破坏现象声音信号的频谱，如图 4 所示，其中经 FFT 处理后的幅值是由傅里叶变换的返回值乘以 2 再除以数据长度得到的归一化幅值。由图 4 可知，3 种典型破坏现象声音信号频谱特征有明显区别。表 2 列出了 3 种典型破坏现象的具体差异，以下分别进行说明。

(1) 颗粒弹射的频率范围为 7～11 kHz，频谱呈“多峰”状，最大归一化幅值为 0.009，仅为块片弹射时幅值的 1/3；主频的范围较块片弹射时的频率高，主频带较宽。

(2) 岩板劈裂的频率范围 2～8 kHz，频谱呈“单峰”状，最大归一化幅值为 0.005，比颗粒弹射和块片弹射时幅值小；主频带较颗粒弹射和块片弹射时更宽，这与岩板劈裂过程中岩石内部裂纹持续产生、发展、贯通有关；此外，岩板劈裂的频率范围与颗粒弹射频率范围有部分重叠。

(3) 块片弹射的频率范围为 0～2 kHz，频谱呈“单峰”状，最大归一化幅值为 0.021，较颗粒弹射和岩板劈裂的幅值大，呈现出低频率、高幅值的现象，说明在岩爆孕育过程中块片弹射比颗粒弹射和岩板劈裂更剧烈。

表 2　3 种典型破坏现象的声音信号频谱

Table 2　Spectra of sound signals for three typical failure phenomena

破坏现象	频谱形状	主频值/kHz	归一化幅值	破坏现象	频谱形状	主频值/kHz	归一化幅值
颗粒弹射	多峰	10.58	0.009	块片弹射	单峰	0.46	0.021
岩板劈裂	单峰	2.13	0.005				

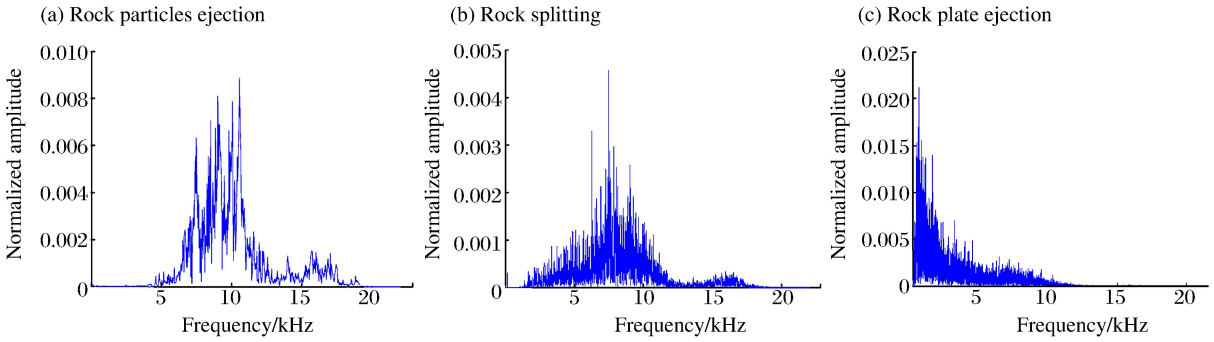


图 4　3 种典型破坏现象的声音信号频谱

Fig. 4　Spectra of sound signals of three typical failure phenomena

2.3　声纹特征

声纹图描述了声音信号的频率、时间和幅值三者之间的关系，它反映了声音信号的动态频谱特性，在语音信号特征分析中具有重要的实用价值[13]。

对第 n 帧语音信号进行短时傅立叶变换：

$$X_n(\mathrm{e}^{j\omega})=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)w(n-m)\,\mathrm{e}^{-j\omega m} \tag{1}$$

式中：$w(m)$为窗函数，ω 为频率。类似地定义离散傅里叶变换，令 $n=2\pi k/N$，$0\leqslant k\leqslant N-1$，可得：

$$X_n(k)=X_n(\mathrm{e}^{2\pi kj/N})=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)w(n-m)\,\mathrm{e}^{-2\pi kj/N} \tag{2}$$

短时功率谱和短时傅里叶变换有如下关系：

$$S_n(\mathrm{e}^{j\omega})=X_n(\mathrm{e}^{j\omega})X_n^{*}(\mathrm{e}^{j\omega})=|X_n(\mathrm{e}^{j\omega})|^2 \tag{3}$$

将式(2)代入式(3)得：

$$S_n(\mathrm{e}^{j\omega})=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)w(n-m)x(m+k)w(n-m-k) \tag{4}$$

声纹图是指声音信号在时间-频率空间的功率谱。图 5 给出了 3 种典型破坏现象的声纹图，横坐标表示时间，纵坐标表示频率，颜色表示在时间和频率确定的条件下 $S_n(e^{j\omega})$ 的取值，颜色越深，表示该点处声音的响度越大。

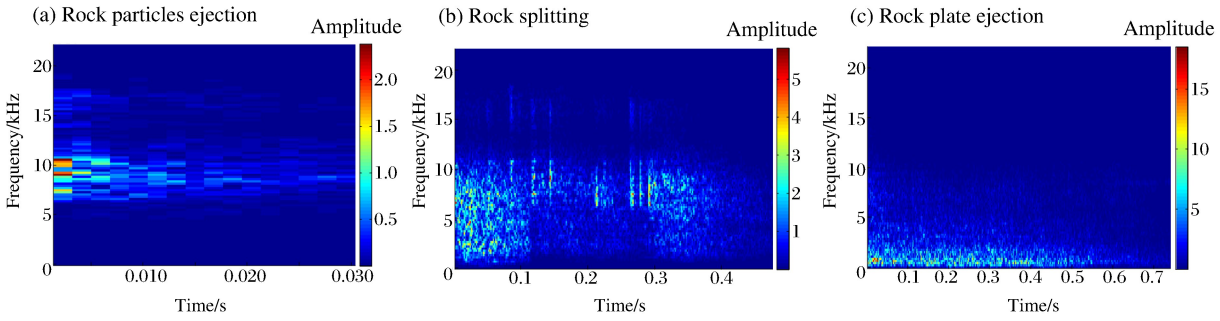


图 5 3 种典型破坏现象的声音信号声纹

Fig. 5 Voiceprints of sound signals for three typical failure phenomena

由图 5 可知，3 种典型破坏现象的声纹图存在明显差异，表 3 给出了具体的差异。

(1) 颗粒弹射的声纹呈“带”状，频率范围为 7～11 kHz，能量幅值为 1.0～2.4；能量幅值最大值出现在 0.005 s 范围内，说明颗粒弹射现象发生时间短，发生范围小，且能量瞬间释放。

(2) 岩板劈裂的的声纹呈“鳞片”状，频率范围为 2～8 kHz，能量幅值为 2.0～5.7；由于岩板劈裂是相对连续的过程，因此岩板劈裂时的能量释放也是一个持续的过程，持续时间为 0.35 s，是颗粒弹射的 70 倍。

(3) 块片弹射声纹呈“条”状，频率范围为 0～2 kHz，能量幅值范围为 4.0～18.0；块片弹射的能量幅值分别为岩板劈裂和颗粒弹射时能量幅值的 3.0 和 7.5 倍。

表 3 3 种典型破坏现象的声纹特性

Table 3 Voiceprints of sound signals for three typical failure phenomena

破坏现象	声纹体型	能量幅值	频率范围/kHz	破坏现象	声纹体型	能量幅值	频率范围/kHz
颗粒弹射	“带”状	1.0～2.4	7～11	块片弹射	“条”状	4.0～18.0	0～2
岩板劈裂	“鳞片”状	2.0～5.7	2～8				

2.4 短时能量特征

短时能量是一个度量声音信号能量释放强弱的指标，其计算式[13]为：

$$E_t = \sum_{m=0}^{N-1} x_t^2(m) \tag{5}$$

式中：E_t 为第 t 帧的短时能量；m 为一帧内的样本点；N 为帧长。

岩爆过程中，3 种典型破坏现象伴随的声音强弱是不同的，以下采用声音信号的短时能量来反映各破坏现象剧烈程度。短时能量计算结果如图 6 所示，三者之间的主要差异见表 4。

(1) 颗粒弹射的能量释放主要集中在前 0.005 s 内，最大能量幅值为 0.34；短时能量曲线平滑，短时能量随时间推移逐渐减小，且 0.005 s 之前下降斜率较大，基本呈垂直下降，能量幅值随时间迅速减小。

(2) 岩板劈裂的能量释放集中在前 0.1 s 内，最大能量幅值为 2.30；岩板劈裂对应的短时能量幅值随着时间的推移逐渐减小，并且减小过程中伴随着一定的振荡，振荡频率不大，这与岩板劈裂过程中裂纹的持续产生、发展、贯通时能量逐步释放有关。

(3) 块片弹射的能量释放集中在前 0.2 s，最大能量幅值为 8.60；短时能量幅值随时间的推移逐渐减小，减小过程中也出现了振荡，且振荡频率较岩板劈裂高。说明块片弹射较颗粒弹射和岩板劈裂时能量释放的释放面广、路径多，这与岩爆实验临空面能够较大范围产生块片弹射有关。

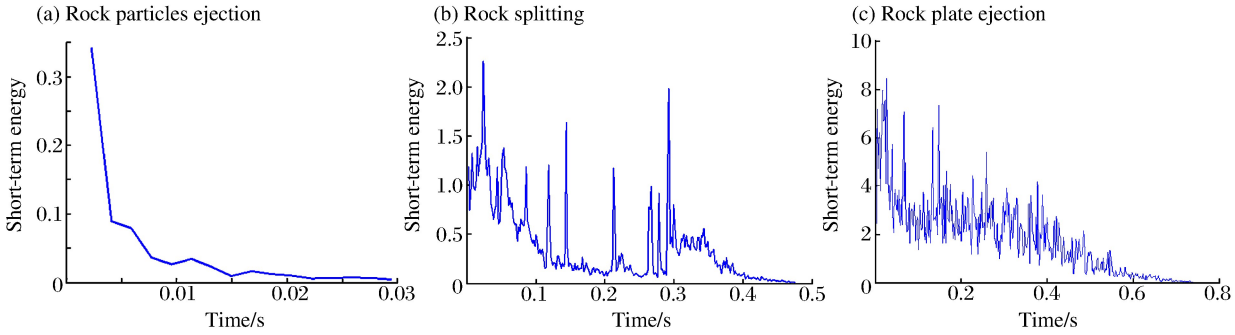


图 6　3 种典型破坏现象的声音信号短时能量

Fig. 6　Short-time energies of sound signals for three typical failure phenomena

表 4　3 种典型破坏现象的声音信号短时能量特性

Table 4　Short-time energy features of sound signals for three typical failure phenomena

破坏现象	形状	振荡频度	最大幅值	破坏现象	形状	振荡频度	最大幅值
颗粒弹射	平滑曲线	无振荡	0.34	块片弹射	连续振荡	急速	8.60
岩板劈裂	局部振荡	快速	2.30				

3　岩爆过程典型破坏现象智能识别的案例

随机森林(random forest，RF)是近年来出现的一种可用于数据自动分类的机器学习方法[17-19]。RF 处理高维小样本数据时不易过拟合，适用于数据集中存在大量未知特征，并具有分类性能优良、抗噪声能力强等特点，被广泛应用于模式识别领域。本文中将 RF 作为岩爆过程上述 3 种典型破坏现象声音信号自动识别的工具。

在已完成的 66 个室内岩爆实验声音监测结果中，随机抽取 56 个岩爆过程构建训练样本，从余下的 10 个岩爆过程中构建预测样本，其中 56 个岩爆过程训练样本中包含颗粒弹射现象 131 个，岩板劈裂现象 56 个，块片弹射现象 56 个；10 个岩爆过程预测样本中包含颗粒弹射现象 25 个，岩板劈裂现象 11 个，块片弹射现象 10 个。为使自动识别方法易于实现，将波形的持续时间、频谱的主频值及短时能量的最大幅值 3 种特征指标进行组合，构建样本输入向量。采用随机森林对岩爆典型破坏现象进行自动识别，结果见表 5，可以看出，预测样本中 3 种典型破坏现象的识别准确率均在 88%以上，说明本文中方法是可行的。需要指出的是，如果采用更多训练样本，识别准确率也会有所提高。

表 5　基于 RF 模型的岩爆典型破坏现象识别结果

Table 5　Identification of typical failure phenomena using RF model

名称	训练样本数	训练样本识别率/%	预测样本数	预测样本识别准确率/%
颗粒弹射	124	95	22	88
岩板劈裂	52	93	10	91
块片弹射	54	96	9	90

4　岩爆烈度评价的声音指标

当前，基于声响特性的岩爆等级识别主要是依据现场人员对岩爆发生瞬间的声响特性进行的定性描述，识别结果受人为主观判断的影响较大，可靠性不高。声音信号的记录与分析可以克服人为因素的影响，有助于实现基于声响特性的岩爆剧烈程度的定量化评价。

波形最大幅值、短时能量等指标常用于声音强弱的定量表征。但是，利用一般的录音设备记录声音信号时，为保护设备信号采集子器件的安全，当声响过大时，设备将对声音的幅值进行“削峰”。因此，对于声响较大的多个岩爆发生声音信号，其波形的最大幅值往往是一样的，难以通过波形最大幅值来区分其强弱。岩爆发生时，短时能量幅值虽然能够准确反映声音信号每帧对应的能量幅值，但仅能反映岩爆块片弹射过程中某一段极短时间内所对应的声音能量幅值，难以反映具有一定时间历程的岩爆整体能量释放情况。为了克服波形幅值、短时能量在定量刻画岩爆发生时块片弹射破坏剧烈程度上的局限性，提出了一种新指标——局部声响总能量 E_{total}(total energy of local sound, TELS)。

室内岩爆过程声音信号波形时域信号为 $x(L)$、加窗分帧处理后得到的第 t 帧语音信号为 $x_t(m)$，则 $x_t(m)$满足：

$$x_t(m)=w(m)x(n+m) \tag{6}$$

当 $m=0,1,\cdots,N-1$ 时，$w(m)=1$；当 m 取其他值时，$w(m)=0$。与第 t 帧岩爆声音信号 $x_t(m)$对应的短时能量 E_t 可通过式(5)进行计算，而岩爆破坏过程能量释放的总和可以表示为：

$$E_{\text{total}}=\int_0^{t_s}E_t\,\mathrm{d}t=\int_0^{t_s}\sum_{m=0}^{N-1}|x_t(m)|^2\,\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：t_s 为岩爆过程声音信号的持续时间，E_{total}为短时能量曲线与时长所围成面积的积分。

为了验证短时能量指标的可行性，从大量的岩爆实验中选取了具有代表性的强、中、弱 3 种岩爆烈度的声音信号进行短时能量分析，结果如图 7 所示。可以看出，3 种等级岩爆的短时能量最大幅值相差较小，且强岩爆的声音历时约为中、弱岩爆的 2 倍，因此仅采用短时能量指标难以反映岩爆的强弱。

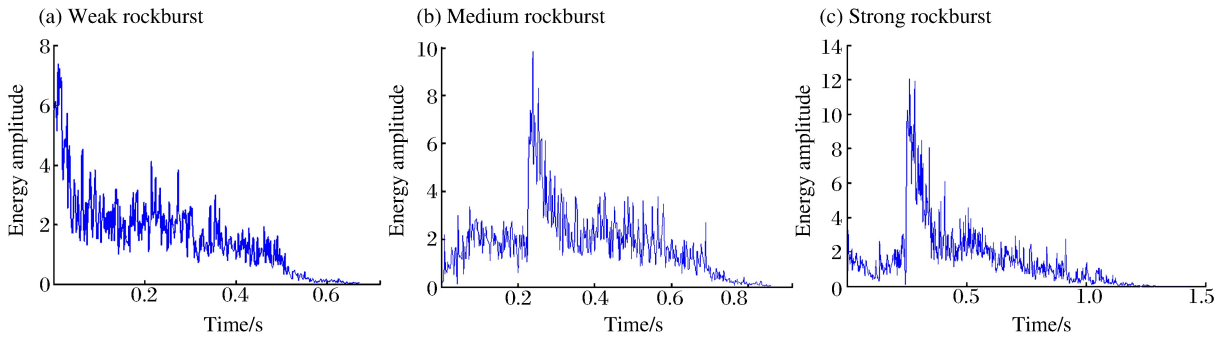


图 7 不同等级岩爆短时能量

Fig. 7 Variation of short-time energies with time for different grades rockbursts

强、中、弱 3 种岩爆的弹射动能和局部声响总能量如图 8 所示。其中，岩爆烈度采用岩爆碎块的弹射动能进行划分，岩爆碎块弹射动能估算方法参见文献[12]，这里不再赘述。由图 8 可知，岩爆越强，弹射动能越大，E_{total}也越大；强烈岩爆的 E_{total}分别是弱岩爆、中等岩爆的 1.5、1.4 倍。由此可见，用该指标来评价岩爆发生的剧烈程度是可行的。

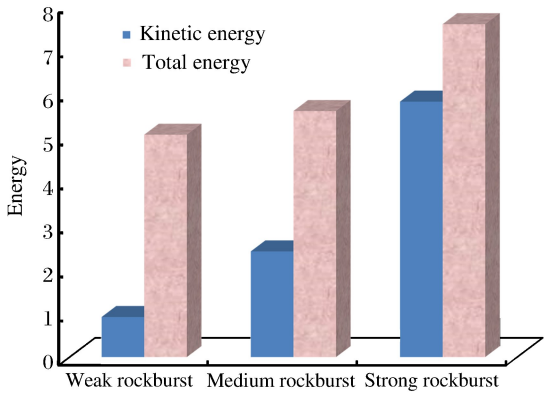


图 8 不同等级岩爆的弹射动能与局部声响总能量

Fig. 8 Kinetic energy and total energy of local sound for different grades of rockbursts

5 结 论

(1) 对岩爆过程中声音信号特征的分析结果表明，岩爆过程中颗粒弹射、岩板劈裂和块片弹射 3 种典型破坏现象的声音信号在波形、频谱、声纹特性和短时能量等特征指标上存在明显差异：颗粒弹射的

波形较稀疏，岩板劈裂与块片弹射的波形较浓密；颗粒弹射的波形持续时间最短，块片弹射的波形持续时间最长；颗粒弹射、岩板劈裂、块片弹射的声音主频值分别约为 11.0、2.0、0.5 kHz；颗粒弹射、岩板劈裂、块片弹射的声纹图分别呈“带”状、“鳞片”状、“条”状，频率范围分别为 7～11、2～8、0～2 kHz；颗粒弹射、岩板劈裂、块片弹射短时能量的最大能量幅值依次增大。

(2) 局部声响总能量反映了具有一定时间历程的岩爆能量释放特性，能够用于岩爆发生剧烈程度的定量评价，克服传统定性化方法可靠性欠佳的不足。

(3) 与声发射与微震相比，声音信号的监测设备较廉价。因此，岩石声音信号的监测与分析是一种具有良好发展潜力的岩爆预警途径，也是对当前基于声发射与微震监测的岩爆预警方法的有益补充。鉴于室内岩爆与现场岩爆存在一定差异，将来须加强现场岩爆声音研究，进一步揭示现场岩爆孕育过程中各种典型破坏现象的声音信号特性，为建立基于声音信号自动识别的现场岩爆预警与烈度评价方法提供科学依据。

参考文献：

[1] 冯夏庭. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京：科学出版社，2013.

[2] 高玮，张飞君. 深部地下工程岩爆预测的筛选蚁群聚类算法[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：568-572.
GAO Wei, ZHANG Feijun. Forecasting of rockburst indeep underground engineering based on abstraction ant colony clustering algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):568-572.

[3] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010,47(2): 286-298.

[4] 陈炳瑞，冯夏庭，曾雄辉，等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(2)：275-283.
CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):275-283.

[5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50287—2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京：中国计划出版社，2006.

[6] 刘正雄. 岩爆预防及防治技术研究[J]. 中国铁道科学，2001，22(4)：74-76.
LIU Zhengxiong. Technical study on the prevention and cure of rockburst[J]. China Railway Science, 2001,22(4): 74-76.

[7] 周辉，孟凡震，张传庆，等. 深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(4)：720-727.
ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Analysis of the structural plane controlling mechanism on rockburst in deep hard rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(4):720-727.

[8] 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 and Engineering, 2007,26(5):865-876.

[9] 冯夏庭，陈炳瑞，明华军，等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制：即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(3)：433-444.
FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(3):433-444.

[10] SU Guoshao, JIANG Jianqing, ZHAI Shaobin, et al. Influence of tunnel axis stress on strainburst: an experimental study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017,50(6):1551-1567.

[11] 宫凤强，罗勇，司雪峰，等. 深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(7)：1634-1648.
GONG Fengqiang, LUO Yong, SI Xuefeng, et al. Experimental modelling on rockburst in deep hard rock circular

tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(7):1634-1648.

[12] 苏国韶,蒋剑青,冯夏庭,等.岩爆弹射破坏过程的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):1990-1999.
SU Guoshao, JIANG Jianqing, FENG Xiating, et al. Experimental study on ejection process in rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(10):1990-1999.

[13] 王小川.MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013.

[14] 李宏松,苏健民,黄英来,等.基于声音信号的特征提取方法的研究[J].信息技术,2006,30(1):91-94.
LI Hongsong, SU Jianmin, HUANG Yinglai, et al. The research on characteristics extraction based on voice signal[J]. Information Technology, 2006,30(1):91-94.

[15] GIANNAKOPOULOS T, PIKRAKIS A. Introduction to audio analysis[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2014.

[16] 刘庆升,徐霄鹏,黄文浩.一种语音端点检测方法的探究[J].计算机工程,2003,29(3):120-121.
LIU Qingsheng, XU Xiaopeng, HUANG Wenhao. Research on a speech endpoint detection method[J]. Computer Engineering, 2003,29(3):120-121.

[17] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.

[18] DONG Longjun, LI Xibing, PENG Kang. Prediction of rockburst classification using random forest[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23(2):472-477.

[19] CUTLER A, CUTLER D R, STEVENS J R. Random forests[M]//ZHANG Cha, MA Yunqian. Ensemble Machine Learning. US: Springer Publishing, 2012:157-175.

Sound signal analysis for warning and intensity evaluation of rockburst

SU Guoshao, LIU Xinjin, YAN Zhaofu, ZHANG Jie, LI Yanfang, YAN Liubin

(*Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning* 530004, *Guangxi*, *China*)

Abstract: The rockburst process was reproduced using a true-triaixal rockburst test system in laboratory. The sound signal in the rockburst process was recorded and preprocessed, and the feature indexes of the sound signals in three typical failures in the rockburst process, including rock particles ejection, rock splitting, and rock plate ejection, were investigated. The results show that the feature indexes in the three typical failures such as the waveform, the spectrum, the sound print and the short-term energy exhibit significant differences from each other. Finally, an indicator called total energy of local sound (TELS) was proposed as applicable to assessing the rockburst intensity.

Keywords: rock engineering; rockburst warning; rockburst intensity; sound signal

(责任编辑 王玉锋)