

不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析

何满潮¹, 赵菲^{1,2}, 杜帅^{1,2}, 郑茂炯^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 对北山花岗岩进行4种不同速率卸载的岩爆试验, 收集试验后产生的碎屑, 进行粒径分布和基本尺寸量测, 得到碎屑尺度特征。利用声发射系统采集试验过程中声发射信号, 采用典型的时频分析手段, 提取每一个声发射波形信号的主频值, 绘制整个试验全局主频分布图, 找到花岗岩岩爆主频分布带。试验结果表明: 随着卸载速率的降低, 碎屑总数量, 块状、板状碎屑所占百分比均呈下降趋势。而声发射分布带主要位于中低频带内, 且随着卸载速率降低逐渐上移, 由密集变离散。根据声发射参数 RA 和 AF 特征值分布情况, 结合核心密度定义, 揭示裂纹类型演化过程。发现在卸载岩爆过程中产生了大量张拉裂纹和一定量的剪切裂纹, 随着卸载速率的降低, 声发射信号量减少, 预示着岩石内部裂纹数量明显减少。以上室内试验结果对于认识不同卸载速率下岩爆机制具有重要意义, 同时为工程实际中通过调整开挖速率降低岩爆风险的可行性提供了室内试验支持。

关键词: 岩爆试验; 声发射; 裂纹类型; 粒度分布; 卸载速率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates

HE Man-chao¹, ZHAO Fei^{1,2}, DU Shuai^{1,2}, ZHENG Mao-jiong^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presents the experimental study of the granite rockburst under four different unloading rates. With the help of the collected fragments measurement after tests, the scale features of fragments can be obtained. Acoustic emission system is used to monitor the internal damage of the rock; and the typical time-frequency analysis tool is applied to the major frequency extraction of every acoustic emission (AE) waveform. The tested results indicate that the total number of fragments and the portion of fragments with blocky structure and plate shape have a decreasing trend with the unloading rate dropping down. The AE major frequency band is found to be located in the moderate low frequency band and it is up-shifting as the unloading rates decrease changing from intensive broadband to discrete narrowband. According to the distribution of RA and AF , the crack type evolution can be determined. During the unloading rockburst test, the cracks generating in the specimen are mainly tensile cracks. Further decreases in unloading rate do appear to drive the AE signals reduced indicating crack amount decrease. All these results will be helpful for us to understand the rockburst mechanism under different unloading rates and prove the feasibility of adjusting excavation speed to reduce rockburst risk in field site.

Key words: rockburst test; acoustic emission; crack type; size distribution; unloading rate

1 引言

岩爆是在地下岩体开挖过程中围岩发生破坏的一种形式。由于岩爆时经常伴随着岩石碎屑的弹射、抛出, 对施工人员造成伤害, 因此, 备受关注。在

过去的100多年里, 众多学者关于岩爆进行了大量的室内外工作, 并积累了丰富的现场资料^[1-5]。冯夏庭^[6]以锦屏二级水电站深埋引水隧洞为实例, 介绍了岩爆孕育过程的机制及动态调控方法。影响岩爆的因素有很多, 包括岩石矿物成分, 岩石内部结

收稿日期: 2013-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 51134005); 中央高校基本科研业务费(No. 2010YL05); 2014年博士拔尖创新人才培养基金(No. 80015Z675)。第一作者简介: 何满潮, 男, 1956年生, 博士, 中国科学院院士, 现任教授、博士生导师, 主要从事深部岩石力学理论及工程方面的教学与研究工作。E-mail: hemanchao@263.com

构, 围岩受力情况, 开挖方式等, 而卸载速率是众多因素中最为重要的一个。地下开挖过程中, 岩体实质上处于卸载状态, 岩体岩爆破坏与卸载速率有密切关系。在实际的施工中, 人们通过降低开挖速率, 减少开挖进尺来降低岩爆发生的风险, 其实质上是在调整围岩的卸载速率, 降低岩爆发生的强度和可能性。

针对卸载速率对岩石力学性质的影响, 已经有很多学者进行了大量的研究, 得到了很多有意义的成果。黄润秋等^[4]通过室内岩石三轴卸载试验发现, 卸载速率和初始围压越大, 岩石的脆性及张性断裂特征越明显。张凯等^[7]进行了大理岩室内卸围压试验得出围压卸载速率越大, 岩样强度就越高的结论。邱士利等^[8]分析了不同围压卸载速率下, 锦屏深埋大理岩的变形规律, 发现大理岩的轴向变形和扩容过程受围压卸载速率的影响很显著。陈卫忠等^[9]利用脆性花岗岩常规三轴试验, 从能量原理角度, 研究了不同卸载速率下, 峰前和峰后卸围压能量积聚-释放的全过程, 并指出不同卸载速率对应着不同的极限能量值, 卸载速率越快, 裂隙的传播和应力的转移越不充分, 能量得不到充分地释放, 在破坏时释放的能量越大, 破坏强度越大。以上研究结果对于认识不同卸载速率对岩石力学性质的影响机制有重要的意义, 同时可以发现, 前人的研究都是基于传统的假三轴试验进行卸围压研究, 没有利用室内试验模拟出岩石在岩爆过程中的真实应力转化过程。卸载速率对岩爆的影响机制并没有进行深入研究, 因而, 本文基于真三轴岩爆试验系统, 对北山花岗岩进行三向六面加载, 单面以 4 种不同速率卸载的试验方法来进行研究, 以期找到卸载速率对岩

爆的影响机制。

此外, 声发射监测手段作为一种典型的无损检测手段, 越来越多地应用于岩石领域, 它可以监测岩石内部微观裂隙发育直至形成宏观破坏的全过程, 表征岩石内部损伤^[10-13]。许多学者针对岩石不同受力情况下声发射特征进行了大量的研究, 采用多种信息分析手段, 取得了很多有意义的结果^[14-17]。本文中的岩爆试验, 利用声发射全程实时监测信号, 并对采集的信号进行频域分析和多参数分析, 找到不同卸载速率下花岗岩岩爆声发射特征变化规律, 为岩爆预测预报提供有意义的素材。

2 试验方法及结果

2.1 岩石试样

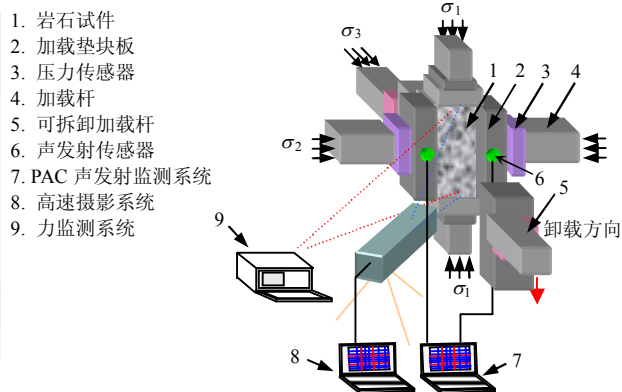
试验样品为花岗岩标准长方体板状试件, 取自甘肃北山, 尺寸为高 150 mm, 宽为 60 mm, 厚为 30 mm, 密度约为 2.6 g/cm³。X 衍射分析其矿物组成为石英 30.9%, 钾长石 27.0%, 斜长石 27.3%, 黏土矿物 1.3%。单轴抗压强度为 74 MPa, 通过电镜扫描观察到该岩石试样较完整致密, 原生裂隙很少。且花岗岩岩石试件经波速测试仪器检验后, 纵波波速大致为 3 500 m/s, 横波波速为 2 000 m/s, 该批岩样具有相似的完整性。

2.2 试验方法

试验采用深部岩爆过程模拟试验系统进行。试验系统包括试验主机, 可实现对长方体岩石试件三向六面独立加载单面突然卸载, 并配备了动态高速压力监测系统, 声发射测试系统以及高速摄影系统。深部岩爆模拟试验系统及监测系统室内照片及示意图如图 1 所示。



(a) 室内照片



(b) 示意图

图 1 深部岩爆模拟试验系统及监测系统室内照片及示意图

Fig.1 Photo and sketch map of deep underground rockburst analogue testing machine and its monitoring systems

岩爆试验过程采用液压载荷手动控制对试件进行加载, 试验时采用分级加载, 每级应力为 3 MPa, 加载间隔约 5 min。首先, 对试件逐级施加至三向不等的应力, 模拟地下工程围岩的初始应力状态, 根据现场地应力测试, 得到采样深度 500 m 处初始围岩应力状态为 $\sigma_1/\sigma_2/\sigma_3=14/13/9$ MPa, 保持约 30 min 后, 以某一速率卸载水平最小主应力单面荷载 σ_3 至 0, 并暴露该方向的试件表面, 按照 Kirsch 方程 ($\sigma_{\max}=3\sigma_1-\sigma_3$) 得出的最大切向应力重分布值, 竖向加载最大主应力 σ_1 至 33 MPa 来模拟开挖引起的应力集中现象。保持约 15 min, 观察试件表面, 如果没有岩爆现象发生, 证明该深度处岩石岩爆现象不易发生, 则增加模拟深度至 700 m, 重新加载岩石至该深度处对应应力状态, $\sigma_1/\sigma_2/\sigma_3=18.3/17.3/12.4$ MPa。为避免轴向最大主应力循环加、卸载对岩石产生影响, 因而 σ_1 仍保持 33 MPa, 仅改变 σ_2 和 σ_3 应力水平值, 并保持该状态 15 min, 以同一速率卸载水平最小主应力单面荷载 σ_3 至 0, 并暴露该方向的试件表面, 同样按照 Kirsch 方程所确定的 700 m 深度轴向集中 σ_1 至 42.5 MPa, 保持约 15 min, 观察试件表面, 若仍然没有岩爆现象发生, 则继续增加模拟深度至 900 m, 重复上述加载、卸载过程, 依次类推, 直至岩爆现象的发生。岩爆试验采用卸载速率 $V_{卸}$ 为 20.000(突然卸载)、0.100、0.050 和 0.025 MPa/s 4 种。

2.3 试验结果

图 2 为 4 种速率条件下典型实测应力路径。根据试验加载曲线及试件最终的破坏特征, 试验过程可以分为 3 个阶段。①加载到初始围压状态; ②岩爆发生前多次加、卸载阶段; ③岩爆阶段; 图 3(a)~(d)列出了高速摄影系统捕捉的 4 种不同卸载速率下岩爆破坏发生时的照片。表 1 列出了 4 例岩爆试验的测试结果, 包括岩爆发生时的应力及其对应深度, 最终岩爆破坏现象描述。对比可以发现, 随着卸载速率的降低, 花岗岩岩爆临界应力值呈下降的趋势, 对应岩爆临界深度随之减少, 而岩爆过程持续时间也相应变短。同时, 岩爆发生时的破坏现象也从大量碎屑弹射掉落变为少量颗粒碎屑弹出, 部分片状碎屑弯折剥落, 动力学破坏现象越来越不明显。粗略量测岩石表面爆坑尺寸, 当卸载速率大时, 岩爆多出现大量块状颗粒弹射, 最后伴随有片状碎屑弯折剥离, 因而爆坑较深, 而卸载速率很小时, 岩爆前期的碎屑弹射现象不明显, 主要是片状、薄片状碎屑的剥落, 所以爆坑很浅。据粗略量测的尺寸, 可以计算出爆坑体积, 发现随着卸载速率的降低,

该体积逐渐呈下降趋势, 预示着岩爆破坏强度的减弱。

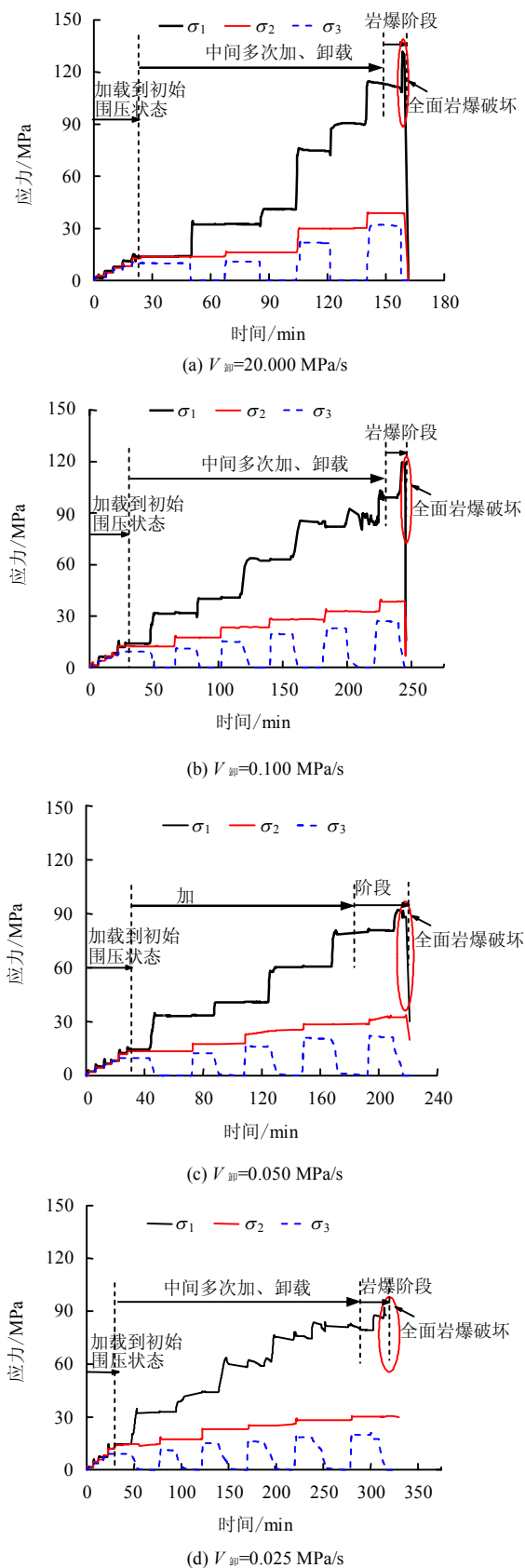


图 2 花岗岩岩爆试验典型实测应力路径曲线
Fig.2 Stress path curves by actual measurement for granite rockburst

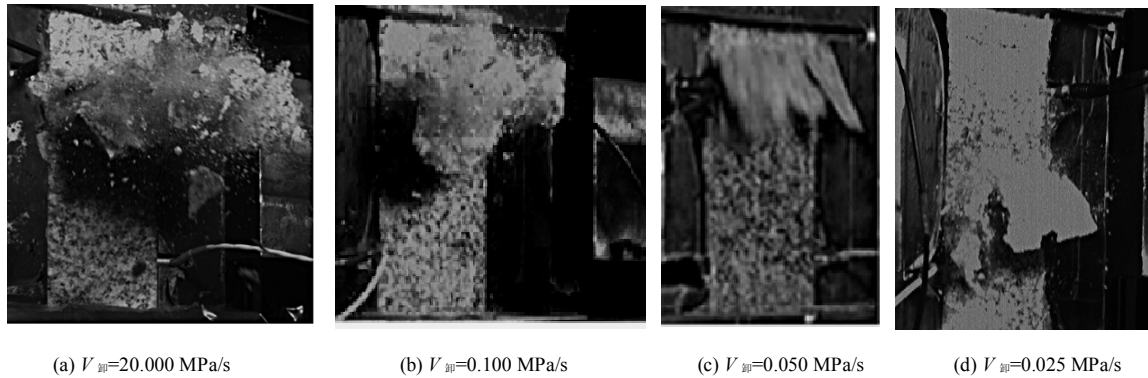


图 3 4 例岩爆试验最终破坏高速照片

Fig.3 Failure images of rockburst pictured by high speed video

表 1 4 种不同卸载速率下岩爆试验测试结果

Table 1 Rockburst test results under four different unloading rates

卸载速率 $V_{卸}/(\text{MPa/s})$	破坏时应力 $\sigma_1/\sigma_2/\sigma_3/\text{MPa}$	对应岩爆临界深度 /m	发生最终岩爆破坏 现象描述	爆坑尺寸 /(cm×cm×cm)
20.000	130.9/38.8/0.0	2 400	卸载后应力集中过程中声发射频繁, 试件表面有裂纹出现并伴随局部较小颗粒弹射。36 s 时顶部出现微小颗粒弹射, 约 59 s 时, 试件顶部出现片状弹射, 紧接着试件上部约占临空面 1/3 的面积出现较猛烈的片状剥离, 并折断后以较高速度飞出, 伴随较大响声。整个过程持续了约 1 min。	3.7×5.9×0.7
0.100	119.6/38.5/0.0	2 000	卸载后约 40 s, 试件发生破坏。试件破坏过程持续约 30 s, 经历两次顶端大量碎屑弹射, 最终在试件上部发生较大的片状弯折弹射破坏, 伴有剧烈声响, 整个过程持续了约 30 s	2.3×5.8×0.5
0.050	92.3/32.4/0.0	1 700	卸载后即发破坏, 试件顶部发生两次明显细小颗粒弹射、随后片状碎屑剥离弹出, 整个过程持续了约 23 s。	4.8×6.0×0.2
0.025	92.1/30.1/0.0	1 500	试件破坏前出现较小颗粒弹射, 随后出现片状剥离及折断后掉落, 伴随较大声响, 整个过程持续了约 17 s。	3.4×6.0×0.2

3 试件表面破裂特征

3.1 微观特征

裂纹是沿晶扩展还是穿晶扩展, 主要取决于晶界强度与晶内强度的相对大小, 若晶界强度高于晶内强度, 则裂纹呈穿晶扩展, 反之则沿晶扩展。沿晶断裂是一种较低应力水平的断裂, 预示着低能量的释放^[18], 更易出现在发生破裂的试件内部。为了得到花岗岩岩样在不同卸载速率下的岩爆过程中微观影响效应, 对试验后的试件典型破裂断面碎屑进行了电镜扫描分析。图 4 为 4 种不同卸载速率下花岗岩试件典型破裂面碎屑微观电镜扫描结果, 即 SEM 图像。对比分析可以发现, 在卸载速率不同的情况下, 发生岩爆后试件破裂断面碎屑的特征存在明显的差异。当卸载速率为 20.000 MPa/s, 放大倍数为 100 倍时 (见图 4(a)左), 碎屑微观表面主

要有钾长石和斜长石晶间沿晶张性裂纹, 右上角出现凹凸不平的沿晶穿晶复合裂纹。放大 300 倍后, 可以清楚看到泛白的石英与钾长石晶体间沿晶裂纹及石英晶体内部少量穿晶裂纹。当卸载速率为 0.100 MPa/s, 放大倍数为 100 倍时 (见图 4(b)左), 碎屑微观表面不仅有石英和钾长石晶体的晶间沿晶张性裂纹, 还有石英与石英间的晶间缝。放大 500 倍后, 可以看到凸起的钾长石晶粒和石英晶粒的内部穿晶剪切断裂。当卸载速率降为 0.050 MPa/s, 放大倍数为 100 倍时 (见图 4(c)左), 碎屑微观表面分布有凹凸不平的片柱状黑云母, 还有少量的黑云母与钾长石晶体的沿晶裂纹, 中部有细长斜向裂纹。放大 500 倍后, 观察该斜向裂纹, 可以看到钾长石晶体表面有两条近乎平行的剪切错位穿晶裂纹, 构成了表面开口的片状体, 且中上部有一条细长穿晶

裂纹。当卸载速率为 0.025 MPa/s, 放大倍数为 100 倍时 (见图 4(d)左), 碎屑微观表面有少量的石英晶体与钾长石晶体的沿晶裂纹, 中间有一条细长钾长石表面的横向穿晶剪切裂纹。放大 500 倍后, 可以看到该裂纹的扩展走向及角度。从微观角度可以发

现, 在岩爆过程中, 破裂面碎屑微观均表现为沿晶张拉和穿晶剪切断裂的复合形态。由于开挖卸荷, 岩石内部微裂纹以沿晶张拉型为主, 当卸载速率较大时, 破裂面的张性特性越明显。随着卸载速率的降低, 微观裂纹越来越不易被观察到。

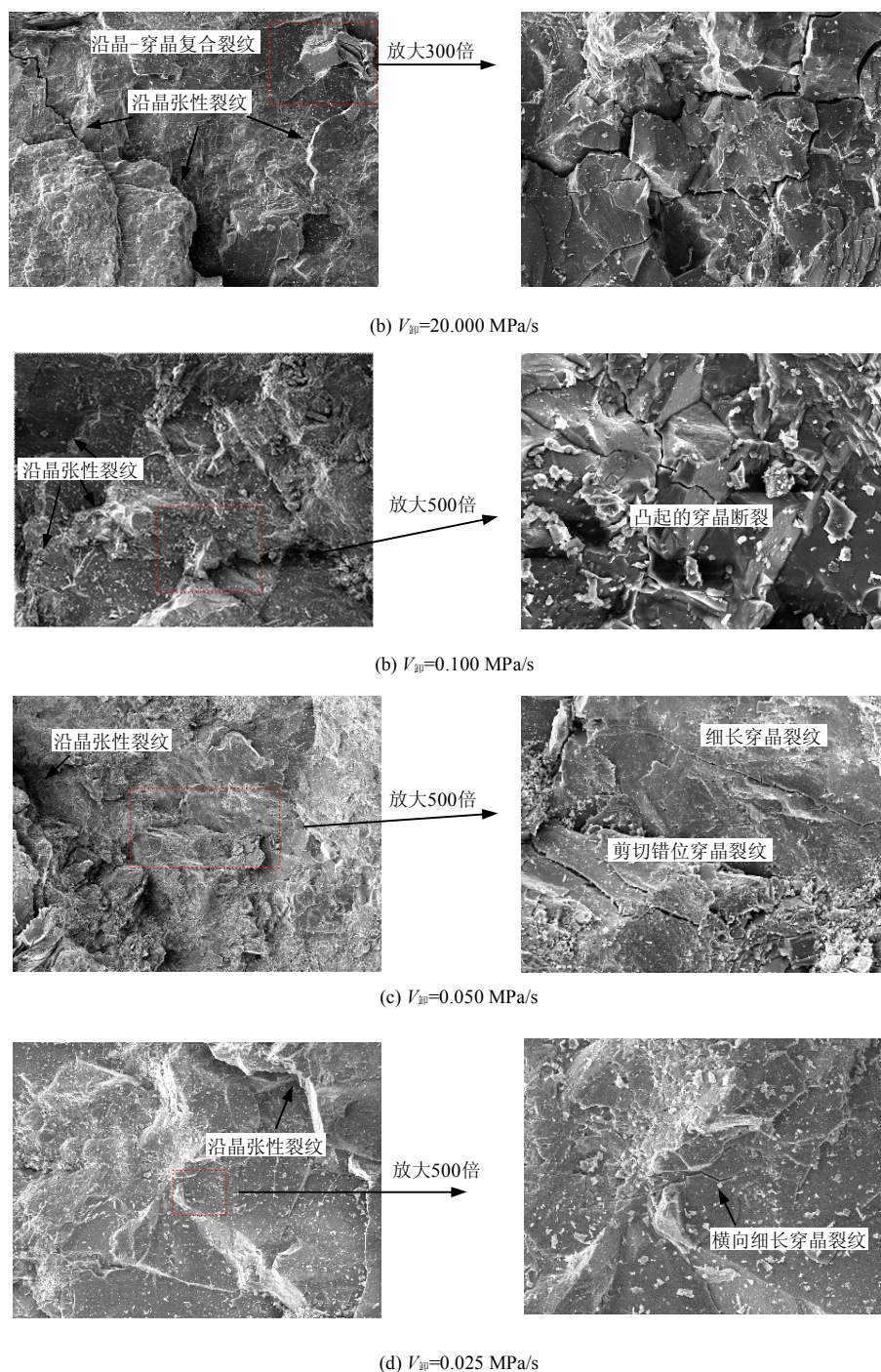


图 4 花岗岩试件破裂表面碎屑微观特征

Fig.4 Microscopic characteristics of fragments from fracture surface of granite specimens

3.2 碎屑粒径及尺度特征

对于岩石岩爆后产生的碎屑可以对其包含的信息进行多种分析, 包括碎屑质量分布、粒径分布、

尺度分布等。岩爆碎屑宏观块体特征可以反映岩石破碎程度, 与岩爆发生时的能量释放相对应, 对岩爆发生的能量机制研究具有重要意义。本节对 4 种

不同卸载速率下发生的岩爆试验中产生的碎屑进行收集, 并进行筛分, 筛分粒径分别为 0.075、0.25、0.50、1.00、2.00、5.00 和 10.00 mm 7 种。依照以往研究人员对碎屑粒度的划分依据, 将岩爆试验后碎屑分为粗粒碎屑、中粒碎屑、细粒碎屑和微粒碎屑 4 类^[19], 分别对应于 $d \geq 30$ mm、 $5 \text{ mm} \leq d < 30$ mm、 $0.075 \text{ mm} \leq d < 5$ mm 和 $d < 0.075$ mm。对于粒径大于 10 mm 的部分中粒碎屑和粗粒碎屑进行计数和质量称量, 并用游标卡尺分别量测每块碎屑的长、宽、厚, 用于计算碎屑尺度特征。对于粒径小于 10 mm 的剩余中粒碎屑、细粒和微粒碎屑则只进行每个粒径范围内的质量称重。以 $V_{卸}=0.10$ MPa/s 的岩爆碎屑为例, 图 5 给出了岩石在该卸载速率下发生岩爆后产生的 4 种粒径范围内的碎屑。从中可以看出, 该岩爆试验产生的粗粒和中粒碎屑数目众多, 多呈不规则的块状、片状结构, 破碎程度较高。表 2 列出了 4 种不同卸载速率下, 不同粒径范围内的岩爆碎屑质量分布及计数统计情况。随着卸载速率的降低, 中粒、粗粒碎屑数量减少且细粒和中粒碎屑质量有明显下降趋势。根据列表统计结果, 绘制质量百分比分布图, 如图 6 所示 (纵坐标为对数坐标)。对于粗粒, 4 种卸载速率岩爆试验产生的碎

屑所占比重是相近的。相比较小的卸载速率, 当卸载速率较大时, 岩爆碎屑微粒、细粒和中粒碎屑所占的比例更大, 说明破碎的更加剧烈, 动力学破坏过程更加明显。

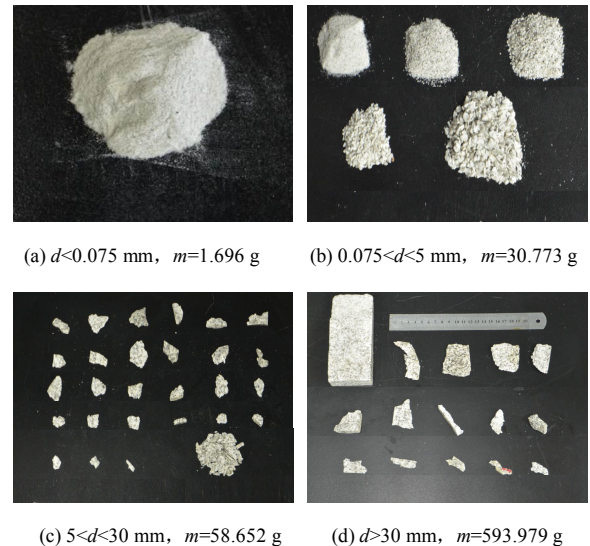


图 5 $V_{卸}=0.10$ MPa/s 岩爆试验产生的 4 种粒径范围内碎屑照片

Fig.5 Photos of fragments in the four grain ranges for the case of $V_{卸}=0.10$ MPa/s

表 2 4 种不同卸载速率下不同粒径范围内岩爆碎屑质量及计数

Table 2 Rockburst test results for four different unloading rates

碎屑分类	粒径范围 /mm	$V_{卸}=20$ MPa/s		$V_{卸}=0.1$ MPa/s		$V_{卸}=0.05$ MPa/s		$V_{卸}=0.025$ MPa/s	
		质量/g	计数	质量/g	计数	质量/g	计数	质量/g	计数
微粒	<0.075	1.512		1.696		0.560		0.382	
细粒	0.075~5	57.683		30.773		13.527		19.419	
中粒	5~30	74.436	47	58.652	27	21.432	18	30.364	18
粗粒	>30	576.169	24	593.979	15	674.881	8	662.035	14

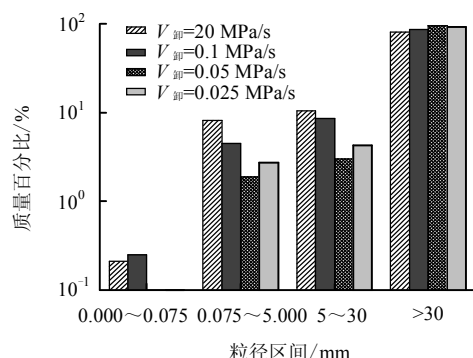


图 6 不同卸载速率下碎屑粒径质量分布图

Fig.6 Mass distributions of fragments of different grain sizes for different unloading rates

作为碎屑最基本的特征, 尺度特征可以通过量测碎屑的长度、宽度和厚度, 并求出 3 种相应的比值分析岩石碎屑的形状特征, 包括长宽比、长厚比

及宽厚比。根据长厚比碎屑被分为块状、板状、片状和薄片状 4 种类型, 分别对应长厚比 < 3 、 $3 < \text{长厚比} < 6$ 、 $6 < \text{长厚比} < 9$ 和长厚比 > 9 4 个尺度区间范围^[20]。图 7(a)所示为 $V_{卸}=20.000$ MPa/s 时, 岩爆碎屑尺寸比值分布。其长度与厚度、长度与宽度和宽度与厚度的比值分布区间分别为 2.24~14.52、1.01~3.32 和 2.24~14.53。长厚比大于 6 的片状、薄片状碎屑数量占到了总数目的 58%, 平均长厚比为 6.58。图 7(b)所示为 $V_{卸}=0.100$ MPa/s 时, 岩爆碎屑尺寸比值分布。其长度与厚度、长度与宽度和宽度与厚度的比值分布区间分别为 2.64~16.51、1.03~5.42 和 1.54~9.09。长厚比大于 6 的片状、薄片状碎屑数量占到了总数目的 60%, 平均长厚比为 7.43。图 7(c)所示为 $V_{卸}=0.050$ MPa/s 时, 岩爆碎屑尺寸比值分布。其长度与厚度、长度与宽度和宽度

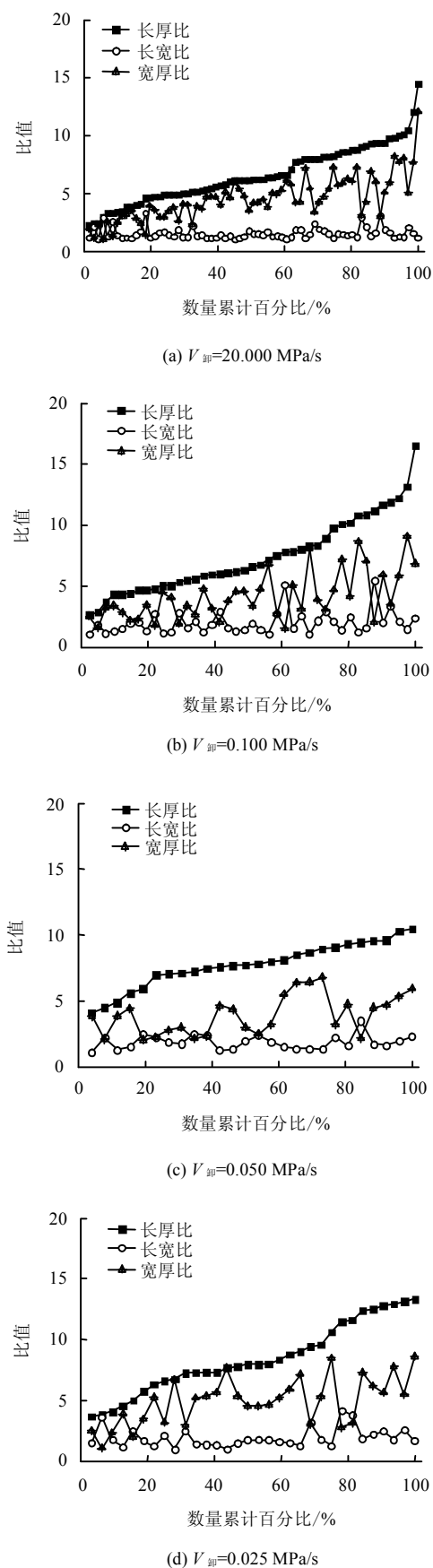


图 7 不同卸载速率下花岗岩试件岩爆碎屑尺度特征比值图

Fig.7 Scale features of fragments of granite specimens for different unloading rates

与厚度的比值分布区间分别为 4.09~10.45、1.07~3.49 和 2.00~6.77。长厚比大于 6 的片状、薄片状碎屑数量占到了总数目的 77%, 平均长厚比为 7.74。图 7(d)所示为 $V_{卸}=0.025$ MPa/s 时, 岩爆碎屑尺寸比值分布。其长度与厚度、长度与宽度和宽度与厚度的比值分布区间分别为 3.65~13.31、1.00~4.16 和 1.05~8.62。长厚比大于 6 的片状、薄片状碎屑数量占到了总数目的 78%, 平均长厚比为 8.45。从以上数据可以看出, 岩爆时产生的多是片状, 薄片状碎屑。卸载速率越快, 弹射的块状、板状碎屑无论从数量还是质量上都越多, 岩爆动力破坏现象越明显。

4 声发射特征

高应力状态下岩石内部产生的裂纹, 无论是在微观下的位错还是宏观下的孪晶作用和晶间滑移, 抑或是穿过或沿着矿物晶体的断裂扩展现象都会导致声发射的出现。岩石在单轴, 双轴和三轴受力情况下的声发射特征已经研究了许多, 并且大多数认为, 声发射特征是与岩石种类及加载方式密切相关^[21]。分析不同卸载速率下岩爆的声发射特征, 进而探究岩石内部裂纹发育扩展机制, 对于岩石岩爆破坏特征研究具有重要意义。本文利用美国 PAC 声发射公司提供的 PCI-2 系统进行试验中的声发射监测。实时观察声发射各项参数变化, 包括撞击数、幅值、频率和波形持续时间等。

4.1 主频带与本征频率

与时域和空间域的信号相比, 频域特征往往具有本征性、惟一性, 小到基本粒子, 大到宏观世界的物体以至天体, 都有其固有的频率特征。对于诸如岩爆与煤岩冲击失稳等复杂非线性问题, 其时域信号的高度的非平稳过程, 信号的基本组成成分具有高度的相关性, 因此, 用简单地基于全域分析的傅里叶谱分析往往难以得到信号频谱的本征特征。建立由声发射基本波形组成的基本事件空间、利用傅里叶谱、时间-频率谱, 在岩爆试验模拟过程中, 对在不同应力路径、不同物理与力学特性的岩石, 将其声发射基本波形信号时间发展过程的主要频率分带中的密集分布频率称为本征频率。本文对完整岩爆试验中的每一个声发射波形信号进行傅里叶变换 (FFT) 得到二维频谱图, 去噪后提取具有尖点峰值性质的主要频率, 定义为主频, 如图 8 所示。将所有主频值绘制在以声发射波形文件数为横坐标的图上, 观察找到主频分布最为密集的区域带即主频带和花岗岩岩石岩爆本征频率, 分析卸载速率对其影响。

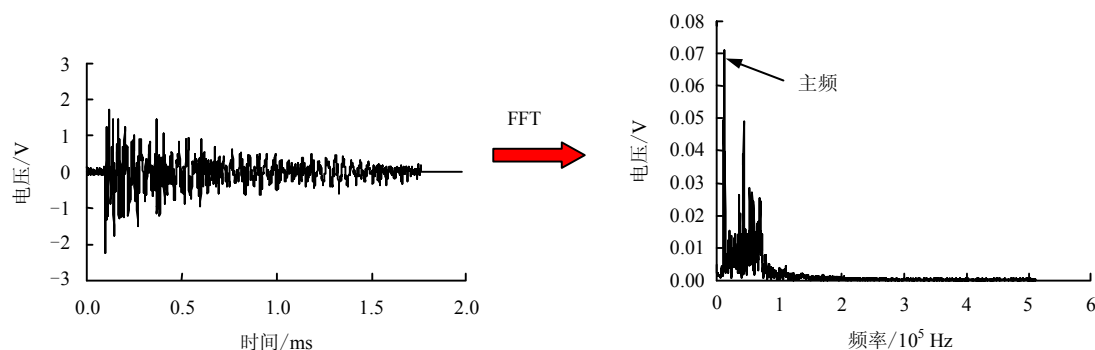


图 8 主频提取示意图

Fig.8 Sketch map of major frequency extraction

图 9 为不同卸载速率下岩爆试验全过程的声发射主频分布情况,将频率分布区间分为 5 个频率带,包括低频带、中低频带、中频带、中高频带和高频带,分别对应的频率区间范围为 0~50、50~150、150~250、250~350、350~500 kHz。将各分布带上的数据点用不同的颜色覆盖,以便观察各试验下主频带分布特征。从图 9(a)到(d),可以看出,随着卸载速率的降低,声发射波形信号数据点骤减,由将近 250 000 个波形数据降低为近 35 000 个,且高频信号逐渐消失,中高频和中频信号在卸载速率较大时,数据点相对较多,但都很分散。中低频带是花岗岩卸载岩爆试验的主频带,从图中可以看出,随着卸载速率的降低,中低频主频带由宽变窄,逐渐由 75 kHz 左右上移至 150 kHz 左右。但该频带信

号点都十分密集,是本征频谱所在位置。对于低频信号,4 例卸载试验的分布很相似,位置区间也比较接近,可见卸载速率对低频部分的声发射信号影响不大。

由以上分析和图 9 中的主频带分布特征可以得出,无论何种卸载速率下的岩爆试验,花岗岩声发射本征频率均在中低频区域内,这可能是与 4 例花岗岩试件本身的矿物含量相近,内部结构较均一相关。但卸载速率对本征频率所在位置还是有很大影响,分别对 4 例卸载速率岩爆试验中包含本征频率的声发射信号数据点进行提取,并采用密度函数的概念,找到分布最为密集的区域平均频率,即为岩爆本征频率。经计算,4 例试验的本征频率分别为 75、80、105、140 kHz。

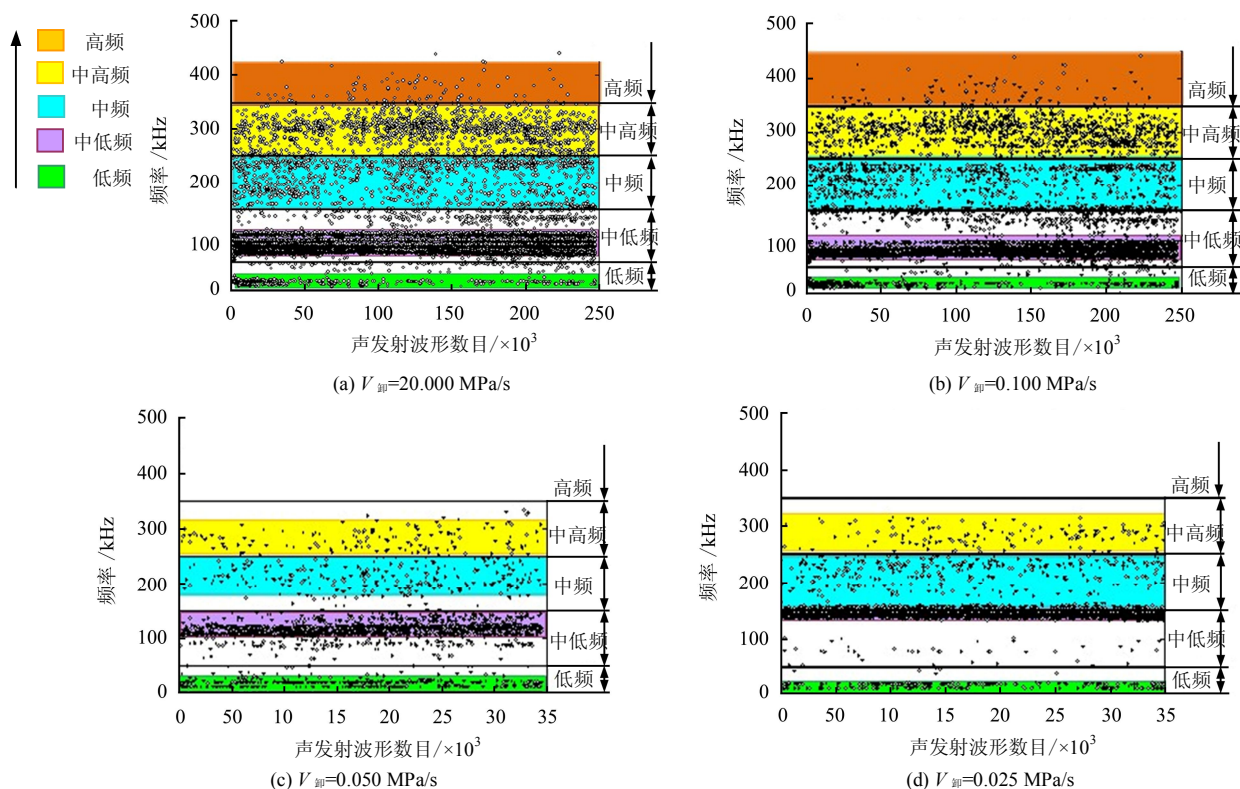


图 9 不同卸载速率下声发射主频带分布图

Fig.9 Distributions of AE major frequency bands for different unloading rates

4.2 RA 参数值与裂纹演化

声发射特征参数分析方法是找到声发射源的特性和内在规律, 分析材料或结构损伤的一种最基本的方法。声发射信号特征参数包括振铃计数、幅值、能率、持续时间、上升时间、峰值频率等^[22]。其中, 声发射波形特征通常被认为是反映断裂破坏模式的有效途径。研究表明, 声发射参数中的 RA 值和平均频率 AF 可以反映材料结构内部的裂纹类型, RA 值是上升时间和幅值的比值, 而平均频率 AF 则由振铃计数和持续时间的比值获得。一般来说, 具有低 AF 、高 RA 值的声发射信号通常代表剪切裂纹的产生或发育, 相反, 若是高 AF 、低 RA 值则是张拉裂纹的产生或发育, 声发射波形基本参数示意图及裂纹分类如图 10 所示。计算 4 次试验中岩爆时刻的所有声发射波形的 RA 值和 AF , 绘制散点分布图, 如图 11 所示。从分布情况可以看出, 随着卸载速率的降低, 数据点总量降低, 分布域有向竖轴靠拢的趋势。平均频率 AF 的变化范围很大, 布满了整个纵轴, 而 RA 值则随着卸载速率的降低, 最大值由 490 减少到 240 左右。

为了更好地表示出声发射参数特征分布情况, 进而反映裂纹类型, 采用数学上的随机数据概率密度函数的概念, 对 RA - AF 参数进行分布密度计算, 如图 12 所示, 红色区域表示密度最大区域, 即数据分布核心区域, 蓝色区域即无数据点分布域, 密度为 0。而由红色过度至蓝色区域则代表有一定量的

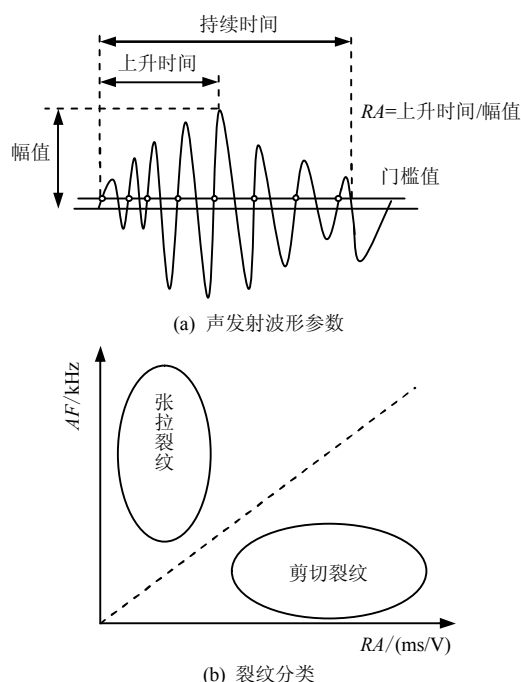
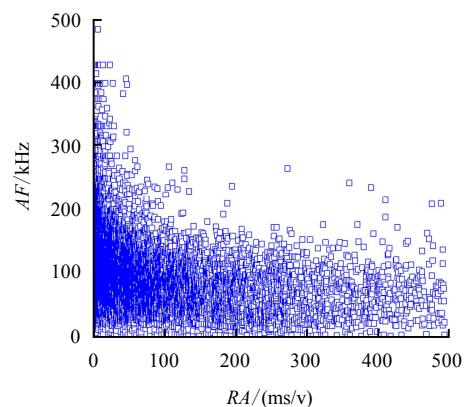
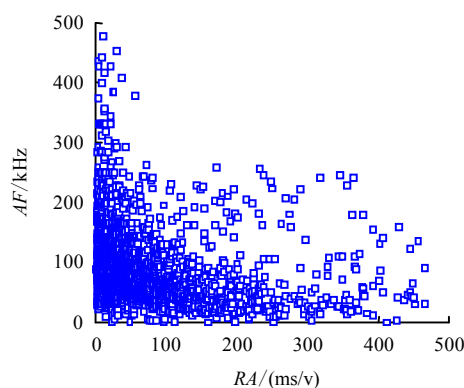


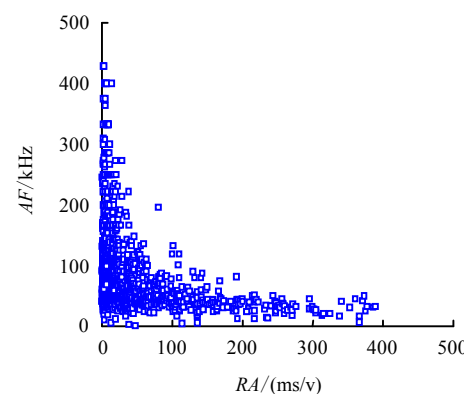
图 10 声发射波形参数及裂纹分类示意图
Fig.10 Sketch map of AE waveform parameters and crack classification



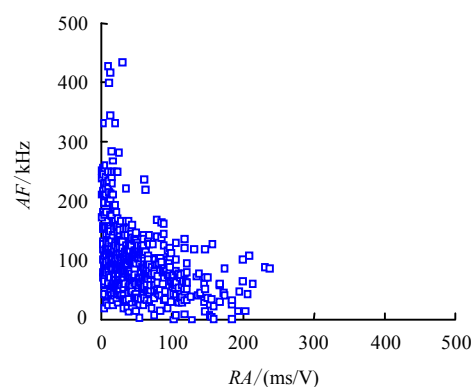
(a) $V_{卸}=20.000$ MPa/s



(b) $V_{卸}=0.100$ MPa/s



(c) $V_{卸}=0.050$ MPa/s



(d) $V_{卸}=0.025$ MPa/s

图 11 声发射参数 RA - AF 散点分布图
Fig.11 Distribution of AE parameters of RA versus AF

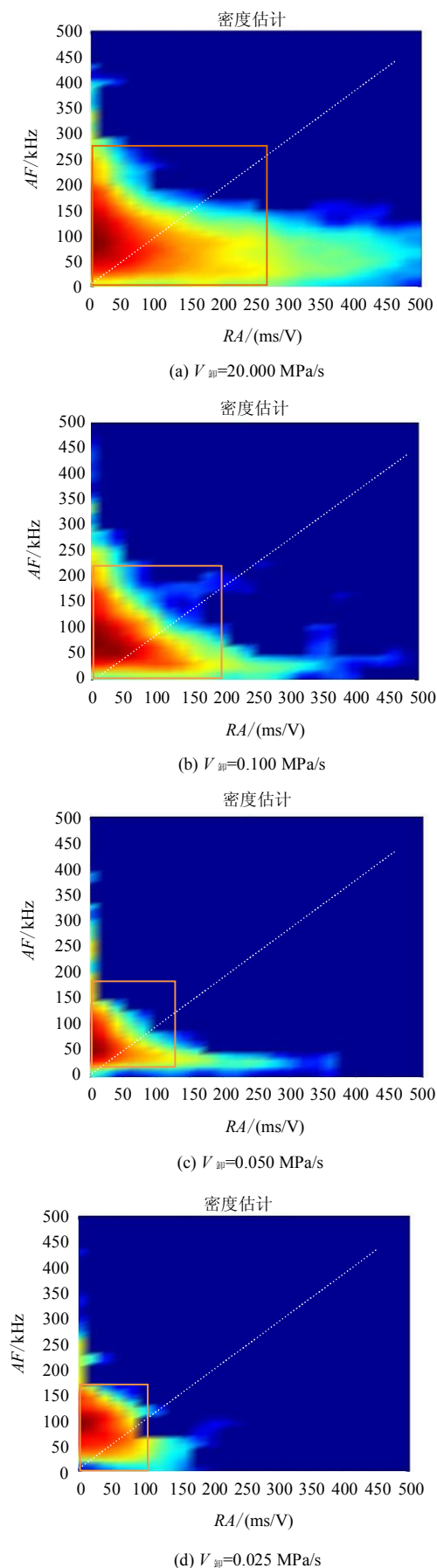


图12 声发射参数 RA - AF 密度分布图
Fig.12 Density distributions of AE parameters of RA versus AF

数据。由密度分布图可以看出, 4 例岩爆试验产生的裂纹均为张剪复合裂纹, 且均以张拉裂纹为主, 但随着卸载速率的降低, 核心密度区域逐渐变小, 裂纹总量变少, 尤其剪切裂纹明显减少。卸载速率较快时, 裂纹扩展完全, 应变能大, 张性破坏明显。卸载速率较小时, 裂纹来不及扩展, 发育不完全, 应变能较少, 张性破坏减弱。

5 结 论

(1) 不同卸载速率对花岗岩岩爆破坏强度有很大影响, 随着卸载速率的降低, 岩爆临界轴向最大主应力由 130 MPa 左右降低到了 92 MPa, 岩爆破坏宏观过程也有很大差异, 卸载速率越大, 碎屑弹射等动力学现象越明显, 且最后岩石表面留下的爆坑深度大, 体积也大。卸载速率降低, 岩石碎屑大多片状弯折剥落, 相应爆坑深度小, 体积也小。

(2) 不同卸载速率下, 花岗岩试件岩爆后表面破裂特征有明显差异。从岩爆破裂面碎屑微观特征可以看出, 卸载岩爆产生的裂纹为沿晶穿晶复合裂纹, 且随卸载速率的增大, 试件破裂面张性特性越明显。卸载速率降低, 沿晶裂纹、穿晶裂纹都相应的减少, 难以被观察到。依据碎屑粒径范围分类可以看出, 卸载速率越大, 碎屑块数总量越多, 且微粒、细粒和中粒所占比例也越大, 证明了快速卸载将产生更加剧烈的颗粒弹射等动力学破坏现象。碎屑尺度特征值中的长厚比可以表征碎屑形状特征, 岩爆发生时, 碎屑多是片状、薄片状。但随着卸载速率增大, 长厚比小的柱状、块状碎屑所占的比例也增大。

(3) 不同卸载速率对花岗岩试件岩爆过程中的声发射特征也有很大影响。声发射主频分布被分成 5 个带区域。随着卸载速率的降低, 主频带变窄, 高频信号消失, 中高频和中频带由密集变的松散。中低频带内数据量大, 十分密集, 是本征频率所在位置。低频带数据分布相似, 证明卸载速率对该区域信号分布影响不大。随着卸载速率的降低, 中低频主频带由宽变窄, 本征频率值由 75 kHz 提高到了 140 kHz。

(4) 依据声发射多参数特征值分析方法, 可以反映岩石内部裂纹类型, 通过分析得知, 4 例岩爆试验产生的裂纹均为张剪复合裂纹, 且均以张拉裂纹为主, 但随着卸载速率的降低, 裂纹总量变少, 尤其剪切裂纹明显减少, 而卸载速率增大时, 岩石内部裂纹种类和数量相应增多, 张性破坏越明显。

同时, 值得注意的是, 本文基于室内岩爆模拟

试验进行了卸载速率效应的研究, 该试验是在小尺寸岩石上进行的, 与工程现场复杂的岩体结构、应力条件及破坏现象都有较大差异, 需要对试验条件、岩石试件特性进一步改进, 以更好地与工程实际相结合。

参 考 文 献

- [1] 冯夏庭, 张传庆, 陈炳瑞, 等. 岩爆孕育过程的动态调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1983—1997.
FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, CHEN Bing-rui, et al. Dynamical control of rockburst evolution process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1983—1997.
- [2] 尚彦军, 张镜剑, 傅冰骏. 应变型岩爆三要素分析及岩爆势表达[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1520—1527.
SHANG Yan-jun, ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1520—1527.
- [3] HE Man-chao, JIA Xue-na, COLI M, et al. Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carrara marble[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 52: 1—8.
- [4] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21—33.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 21—33.
- [5] LI Shao-jun, FENG Xia-ting, LI Zhan-hai. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station [J]. **Engineering Geology**, 2012, 137—138: 85—96.
- [6] 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.
- [7] 张凯, 周辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2072—2078.
ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2072—2078.
- [8] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807—1817.
QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(9): 1807—1817.
- [9] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530—1540.
CHEN Wei-zhong, LU Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1530—1540.
- [10] HE Man-chao, MIAO Jin-li, FENG Ji-li. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2010; 47: 286—98.
- [11] 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82—85.
WU Gang, ZHAO Zhen-yang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 82—85.
- [12] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147—152.
LI Shu-lin, TANG Hai-yan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 147—152.
- [13] 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 Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, 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.
- [14] HE Man-chao, MIAO Jin-li, FENG Ji-li. 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.