

# 动静载荷下岩石声发射特性试验

章思平<sup>1</sup>, 赵伏军<sup>1,2\*</sup>, 叶洲元<sup>1,2</sup>, 李玉<sup>1</sup>, 樊勇<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 利用 RMT-150C 静载岩石力学试验系统和 SPHB 冲击试验系统, 分别对花岗岩、大理岩和白砂岩进行了单轴压缩试验和冲击试验。试验过程中, 检测声发射(AE)信号, 得到了3种岩石试样在静载和动载下的声发射能量特征参量。结果表明: 静载加载方式下岩石声发射行为演化过程大致相似, 可划分为 I 平静期、II 提速期、III 加速期以及 IV 峰值期; 而动载作用下可划分为 I 能量积聚时期和 II 能量释放时期; 静载作用下, 岩样的提速期的能量是平静期的能量的 17 倍、6 倍、4 倍, 加速期的能量较之提速期又提高了 4.7 倍、3.2 倍、2.1 倍; 静载作用下的平静期和动载下的前期都是为岩石破坏积聚能量。

**关键词:** 声发射; SPHB; 动静载荷; 能量; 声发射能量率

**中图分类号:** TD315      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2018)01-0001-05

## Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics of Rock Under Impact Loading and Static Loading

Zhang Siping<sup>1</sup>, Zhao Fujun<sup>1,2</sup>, Ye Zhouyuan<sup>1,2</sup>, Li Yu<sup>1</sup>, Fan Yong<sup>1</sup>

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The conventional uniaxial compression test and impact test on granite, marble and white sandstone are carried out by using RMT-150C static rock mechanics test system and SPHB impact test system. The acoustic emission (AE) signals are detected at the same time. In addition, the acoustic emission energy parameters of three kinds of rock samples under static load and dynamic load are obtained. Results show that the evolution process of the acoustic emission behavior of rock under the same loading method is similar. The static load can be divided into four periods, i.e. stationary period, speed up period, acceleration period, and peak period. The impact load can be divided into two periods, namely energy accumulation period and energy release period. The energy of the speed up period is respectively 17 times, 6 times and 4 times of the energy of the stationary period, while the energy of the acceleration period is respectively 4.7 times, 3.2 times and 2.1 times of the energy of the speed up period under static load. The stationary period under static load and the early stage of impact load are the accumulation of energy for rock damage.

**Keywords:** acoustic emission SPHB; static and dynamic load; energy; acoustic emission energy rate

岩石在外力作用下, 其内部原有的裂隙开始闭合、扩展和贯通, 并产生新的裂隙, 在此过程中有部分能量以弹性波的形式释放出来, 这种现象称之为声发射<sup>[1]</sup>。在岩石力学的试验中声发射技术已被广泛应用, 我国学者陈颢<sup>[2]</sup>早在 20 世纪 70 年代就开始了室内的岩石声发射试验研究。文圣勇等<sup>[3]</sup>利用岩石三轴伺

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474103; 51674116); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2082); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B646)

\* 通信作者, E-mail: zfxn@263.net

服试验机,对砂岩进行了单轴压缩试验,研究砂岩在不同含水率下的声发射特性,得到了声发射振铃计数与含水率有存在明显的关系.左建平<sup>[4]</sup>利用 MTS 岩石试验机对岩体、煤体和煤岩组合体进行了声发射特性试验,发现煤岩组合体的声发射数比岩石单体的声发射数要高并且声发射的空间分布受煤体内部结构和其内部原有的裂隙影响.任松<sup>[5]</sup>通过改变荷载值、加载速率等试验条件来研究盐岩声发射特征参数的变化,发现荷载上限应力的增加导致盐岩的声发射振铃数明显提高,而下限应力对此几乎无影响.纪洪广<sup>[6]</sup>在单轴压缩和三点弯曲下对混凝土试块进行声发射特性试验,通过对声发射特征参数的分析,发现混凝土试块的断裂演化过程与声发射信号特征曲线有较好一一对应关系.综合上述学者对岩石声发射活动的研究,我们发现上述研究以静载声发射为主,动载声发射试验研究次之,而进行动静载荷下的声发射特性的对比试验研究则几乎没有<sup>[7-12]</sup>.因此,开展动静载荷作用下岩石声发射试验研究,对于丰富岩石破碎理论、提高岩石破碎技术和促进深部矿井的开发具有一定指导意义.

## 1 试验概况

### 1.1 试样制备

试验所用岩样均是分别从同块完整性及均质性较好的花岗岩、大理岩、白砂岩中切割提取.单轴压缩下所采用的岩石试样为 50 mm×100 mm(直径×长)的标准圆柱体试样,而冲击试验下岩样尺寸的不同会对试验结果产生影响,因此动载下的岩石试样均加工成 50 mm×50 mm(直径×长)圆柱体.动静载荷下每种类型的岩石试样均加工 5 个且保证岩石试样上下表面的不平行度和不垂直度均小于 0.01 mm.

### 1.2 试验方案

单轴压缩试验在如图 1 所示的 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行,所采用的加载方式为轴向位移加载,设定的加载速率为 0.01 mm/s,单轴压缩试验直至岩石试样破坏后停止.冲击试验在如图 2 所示霍普金森(SHPB)压杆实验系统下进行,冲击试验装置由锥形冲头、入射杆、透射杆等组成.将试样放置在入射杆和透射杆之间,锥形冲头被高压氮气冲出,作用于入射杆,产生应力



图 1 RMT-150C 岩石力学试验系统

脉冲,在入射杆、试样和透射杆三者间传播,当岩石试样内部积聚的能量达到一定值时,岩石试样破坏,冲击试验停止.其中采用的高压氮气均为 1 MPa,以保证试样所受的冲击动力一致.在进行动静载荷下的岩石破坏试验时,在此期间同时接收试验过程中的声发射信号.声发射信号的接收采用 AEwin-USB 型声发射检测系统.为保证采集数据的一致性,将动静载荷下的声发射检测器阈值设定为 50 dB,采样率设定为 10 Msps,选定全局波形采集.

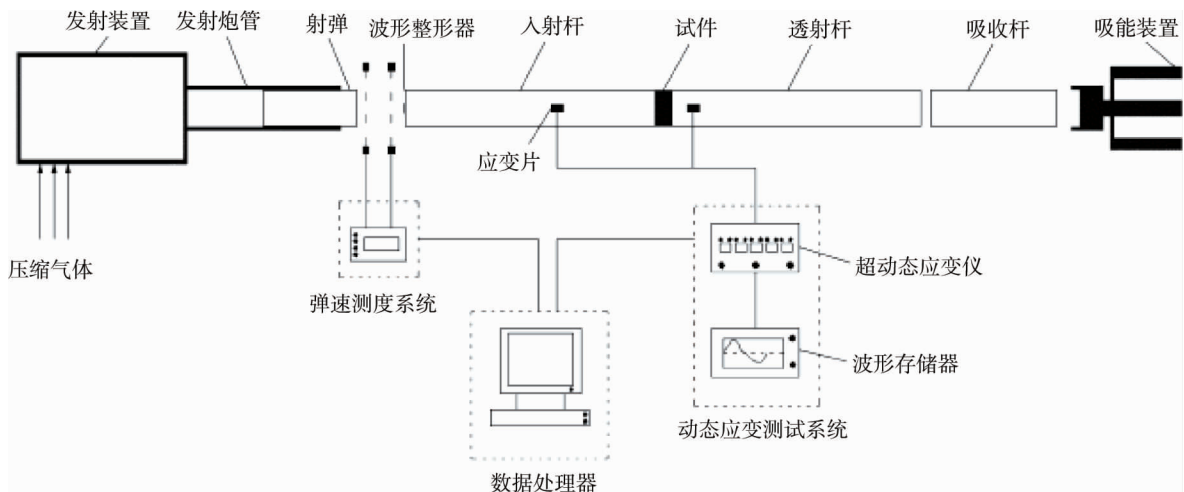


图 2 SHPB 试验装置

## 2 试验结果分析

### 2.1 常规单轴压缩下岩石声发射特性分析

不同类型岩样在单轴压缩破坏过程中载荷、能量、声发射能量率随时间演化如图 3 所示.根据岩石失稳破坏过程中时间-能量变化曲线形态可以将整个过程划分为 4 个时期: I 平静期,从开始加载至弹性变形全过程结束,仅仅发生原有裂隙和孔隙的压缩、闭合,因而此时期能量释放率相对较小,能量相对于总数未出现明显变化; II 提速期,当载荷增加到岩石屈服强度时,岩石内部出现损伤、裂隙开始发育及扩展,岩石处于损伤的塑性变形阶段,声发射活动较为活跃,声发射能量率开始增加,总能量曲线斜率开始增加; III 加速期,此阶段岩石内部裂隙扩展、贯通,岩石开始出现宏观破坏,应变能大量的释放,促使总能量急剧增加,并将能量达到平静期的几十倍; IV 峰值期,随着载荷的进一步增加,试样内部除了原有裂隙的扩展,并且产生大量新裂纹,裂纹汇合、贯通,导致试样出现宏观破坏,裂纹之间相互作用加剧,声发射率和总能量迅速增加,并达到各自的峰值.

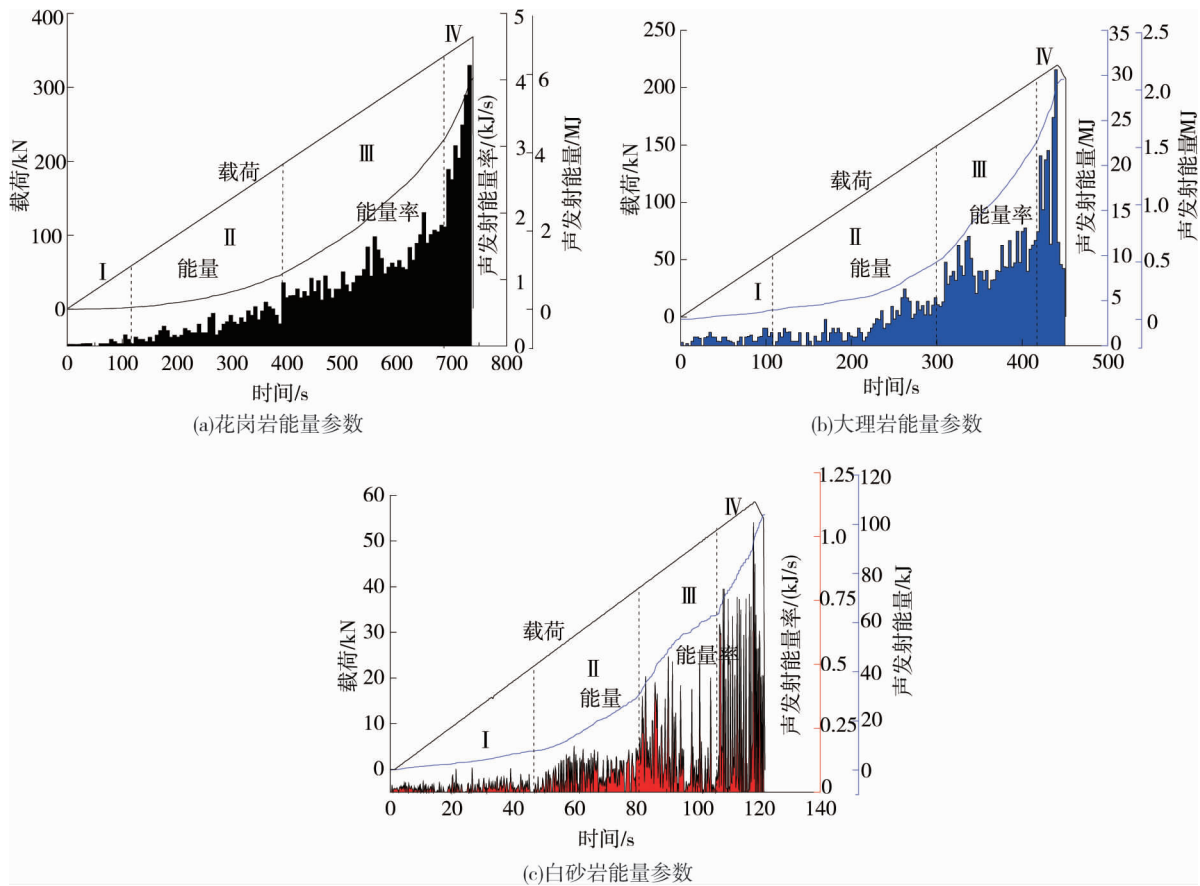


图 3 单轴压缩下岩石声发射参数演化过程

根据图 3 所示的载荷-时间、能量-时间和能量率-时间曲线,得到静载作用下岩石的特征参数,如表 1 所示.

表 1 静载作用下岩石特征参数

岩石类型	载荷峰值 /kN	能量率峰值 /(kJ/s)	能量峰值 /MJ	各时期占破岩时间百分比/%			
				平静期	加速期	提速期	峰值期
花岗岩	370.0	4.20	5.9	15.6	37.3	39.7	7.4
大理岩	206.0	3.00	2.1	24.0	42.0	26.0	8.0
白砂岩	58.6	1.05	0.1	38.4	27.0	21.3	13.3

### 2.2 冲击载荷下岩石声发射特性分析

不同类型岩样在动载作用下,应力、声发射能量率随时间的变化如图 4 所示.根据岩石失稳破坏过程

中时间-应力、时间-能量率变化曲线形态可以将整个过程划分为2个时期：I 能量积聚时期，冲击试验以恒定气压的氮气冲击锥形冲头，锥形冲头撞击入射杆，能量以应力脉冲形式在入射杆、试样和透射杆三者间传递，在此期间能量以应力脉冲的形式积聚于试样内部；II 能量释放时期，当岩石内部积聚的能量达到岩石承受极限值时，岩石内部裂纹迅速扩展、贯通，岩石出现宏观破坏发生明显的脆性崩裂，在此时期能量率达到最大值。

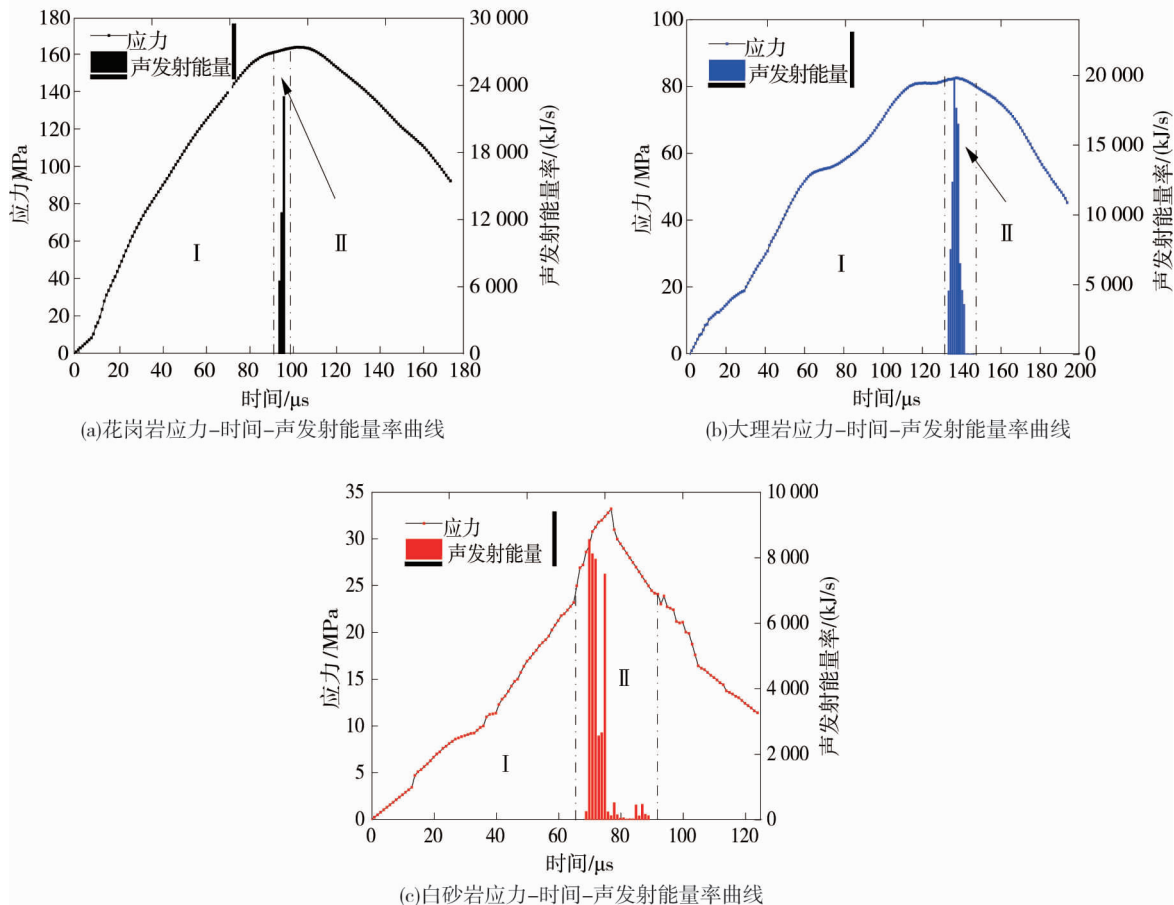


图4 冲击荷载下岩石声发射特征曲线

根据图4岩石在动载作用下的特征曲线和划分的时期,可以得到如表2所示的特征参数。

表2 冲击试验下岩石的特征参数

岩石类型	应力峰值/MPa	声发射能量率 峰值/(kJ/s)	各时期占破坏时间百分比/%	
			能量积聚时期	能量释放时期
花岗岩	170.0	23.00	93.0	7.0
大理岩	86.0	19.80	89.0	11.0
白砂岩	34.0	8.30	73.0	27.0

### 2.3 动静载荷下声发射特性分析

根据表1所列数据,计算得到花岗岩、大理岩的能量分别是白砂岩能量的59倍、21倍。从实验结果可以得到,岩石的强度越大,在静载作用下破岩所消耗的时间越长,岩石破坏释放的能量越大。岩石在静载作用下可以划分为4个不同时期。平静期的能量相对于总数无明显变化;加速期的能量相对于平静期能量有明显变化,花岗岩、大理岩、白砂岩加速期的能量分别为其平静期能量的17倍、6倍和4倍;3种岩石提速期的能量相对于加速期的能量提高了4.7倍、3.2倍、2.1倍;岩石在峰值期的能量率、能量达到最大值。

冲击载荷作用下岩石的破岩时间较之静载非常短,因而动载能量不能与静载的能量相比较。依据能量的积聚和释放将动静载荷相联系起来。动载作用下的能量积聚时期与静载下的平静期对岩样的整个声发射活动作用相类似,都是将岩石破坏所需的能量以一定的形式积聚于岩石内部。而能量释放的具体特征表

现就是声发射信号的增加,静载下岩石的声发射信号经过加速期、提速期和峰值期将能量逐步释放,而冲击载荷作用下,由于破岩时间非常短,岩石达到其所承受极限时,岩石瞬间发生破坏,积聚的能量释放,声发射活动的特征参量达到最大值。

根据图3和图4可以得到,在不同加载方式下,同一类型岩样其声发射信号存在较大的差异;而在相同加载方式下,不同类型岩样虽然由于个体的差异导致声发射信号量有所不同,但其声发射信号特征参量的趋势都是一致的。

### 3 结论

1) 动静载荷下作用岩石的声发射特性有明显不同.单轴压缩下声发射活动可分:平静期、提速期、加速期及峰值期4个时期,而冲击载荷作用下的声发射活动分为能量积聚时期和能量释放时期。

2) 静载作用下,试验得到花岗岩、大理岩、白砂岩在提速期的能量分别为平静期能量的17倍、6倍、4倍,加速期的能量相比于提速期的能量提高了4.7倍、3.2倍、2.1倍。

3) 不同加载方式下,同一岩石其声发射信号存在较大的差异;相同加载方式下,不同类型岩样声发射信号量有所不同,但其声发射信号特征基本是一致的。

#### 参考文献:

- [1] 张俊哲.无损检测技术及其应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 陈颢.声发射技术在岩石力学研究中的应用[J].地球物理学报,1977,20(4):312-322.
- [3] 文圣勇,韩立军,宋义江,等.不同含水率红砂岩单轴压缩试验声发射特征研究[J].煤炭科学技术,2013,41(8):46-48.
- [4] 左建平,裴建良,刘建锋,等.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] 任松,白月明,姜德义,等.周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究[J].岩土力学,2012,33(6):1613-1620.
- [6] 纪洪广,王基才,单晓云,等.混凝土材料声发射过程分形特征及其在断裂分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):801-804.
- [7] 秦四清,李造鼎,张倬元,等.岩石声发射技术概论[M].成都:西南交通大学出版社,1993:57-78.
- [8] 赵毅鑫,姜耀东,祝捷,等.煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):339-346.
- [9] 刘希灵,李夕兵,宫凤强,等.露天开采台阶面下伏空区安全隔离层厚度及声发射监测[J].岩石力学与工程学报,2012,31(s1):3357-3362.
- [10] 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征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503.
- [11] 饶蒙,刘希灵,潘梦成,等.动静载荷下岩石声发射特性的对比研究[J].世界科技研究与发展,2016,38(4):783-787.
- [12] 孟磊,王宏伟.含瓦斯煤破裂过程中声发射行为特性的研究[J].煤炭学报,2014,39(2):377-383.