

文章编号: 1001-1986(2006) 06-0044-03

# 石灰岩声发射特性的试验研究

姚改焕<sup>1</sup>, 宋战平<sup>2</sup>, 余贤斌<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;  
3. 昆明理工大学, 云南 昆明 610059)

**摘要:** 采用 SYB-4 声发射仪和岩石声发射参数动态测试系统, 对广西高峰石灰岩进行了单轴压缩条件下的声发射试验, 研究了石灰岩在单轴加载过程中声发射活动随时间和岩样应力、变形等变化的内在规律, 在此基础上分析了石灰岩的破坏机理。试验研究表明: 除加载初期外, 石灰岩声发射活动与试样体积变形间有较好的关联性, 岩样中微裂纹形成和原有裂纹扩展是造成岩石声发射活动与体积变化的主要原因。因此, 采用声发射技术可对矿山采场矿岩体变形稳定性进行监测和评价。

**关键词:** 岩石力学; 声发射; 单轴压缩; 破坏机理

**中图分类号:** TU458.3 **文献标识码:** A

## Experimental study on acoustic emission characteristics of limestone

YAO Gai-huan<sup>1</sup>, SONG Zhan-ping<sup>2</sup>, YU Xian-bin<sup>3</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an University of Architect and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Kunming University of Technology, Kunming 610059, China)

**Abstract** With the acoustic emission (AE) instrument of SYB-4 and the help of the rock acoustic parameter dynamic testing system, the acoustic emission characteristics in the process of uniaxial compression test of Gaofeng limestone in Guangxi Province is studied. Based on the experimentation data collected from limestone's uniaxial compression, the principle of the AE and the breakage mechanism of the limestone is analyzed. The test study shows that: out of the initial stages the relationship between the acoustic emission and the displacement of limestone is in evidence, which caused by forming of micro-fractures and expending of original fractures, and the relationship can be used to monitor the stability of mine rock mass.

**Key words:** rock mechanics; acoustic emission; uniaxial compression test; breakage mechanism

## 1 引言

材料在受到外力作用时会发出音频范围和超音频范围的一种非周期性暂态随机弹性波, 这种伴随材料在变形和破坏过程中所出现的弹性能脉冲式释放, 称之为声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE)。声发射是岩石材料及其力学结构稳定性的一个度量, 早在 20 世纪 30 年代末期, 美国工程师奥伯特 (Obert) 和杜瓦尔 (Duvall) 就发现了受压力作用的岩石结构有声发射活动存在。国内学者对岩石 (体) 的声发射作了较深入的研究<sup>[1-3]</sup>。但岩石 (体) 是一种依赖于其地质环境的复杂地质体, 不同岩石的声发射特征不同, 深入了解不同岩石的声发射特性, 对声发射技术在岩石工程中的应用具有重要意义。笔者利用岩石声发射参数动态测试系统<sup>[3,4]</sup>, 对广西高峰石灰岩作了单轴压缩试验, 研究了岩石试样在加载过程中的声发射活动规律, 阐述了岩石的破坏机理。

## 2 室内声发射试验条件及试验方法

### 2.1 声发射试验系统及测试参数

岩石声发射测定采用 SYB-4 声发射仪进行。主要由数据采集系统测定岩石受力过程中的声发射率和能率, 并利用数据处理系统绘制声发射率—时间和能率—时间曲线。该系统充分利用微型计算机与 A/D 转换器高速运转的特点, 将频率较高的声发射参数适时采入。

描述声发射特性的参数很多, 常用的有如下两类: 一类为声发射率 (NR), 是反映声发射突发波频度的一类参数, 它是指每单位时间内观测到的声发射的次数。另一类为声发射的能率 (ER), 是反映发声信号能量的脉冲信号, 它是指单位时间内所观察到的全部事件发射能的总和, 与所观测到的事件所在波形的幅度值平方成正比。

无论是声发射率 (NR) 还是能率 (ER) 都取决于

监听系统的灵敏度、讯噪比和整个监听系统的频率响应。本次试验主要采用声发射率(NR)和能率(ER)来描述石灰岩在受力作用下的声学特性。

## 2.2 岩石单轴压缩测试系统及试样制备

室内声发射试验所用岩样取自广西高峰矿, 按国际岩石力学试验规范, 采用岩石切片机切割岩样, 加工成  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  长方体, 试样两端面平行度控制在  $0.02\text{ mm}$  以内。

岩石加载系统采用  $1\ 000\text{ kN}$  材料压力试验机, 按规范, 试验中加载速度保持在  $0.3 \sim 0.5\text{ MPa/s}$ , 加载直至试样破坏。试验过程中采集岩石全应力—应变曲线, 测量岩石在变形破坏全过程的声发射信号、载荷、变形及时间等参数。声发射探头用胶皮带固定在试件高度中间位置, 声发射探头与试件之间用凡士林耦合, 声发射探头响应频率  $140\text{ kHz}$ 。

试验过程中, 岩石微破裂产生的声发射信号首先被声发射探头检测, 信号经放大器放大后转输到计算机采集分析系统, 声发射检测系统实时显示岩石试样声发射率(NR)和声发射的能率(ER)。

## 3 声发射试验结果及分析

### 3.1 测试结果

单轴压缩状态下广西高峰石灰岩典型单轴压缩试验、声发射信号曲线如图1所示。

### 3.2 声发射特性分析

单轴压缩试验结果分析表明: 石灰岩在加载初期有不同程度的声发射活动, 小事件数较多, 声发射率大, 但能率较小。这主要是较低应力致使试件内

已存裂纹闭合, 在微裂隙闭合过程中, 裂隙粗糙面的挤压破坏产生声发射, 此时声发射能量较低, 且具有很大的波动性。随着荷载的逐步增加, 在荷载小于峰值荷载的  $40\%$  范围内, 石灰岩试样声发射活动恢复平静。在此阶段内, 岩石试件内的应力还不足以使岩石试样内形成新的裂纹, 因此, 岩石试样的应力—应变保持线性关系。但因岩石试样内部局部闭合裂纹表面会发生相对滑移, 在试验过程中可监测到较低的声发射现象。此时, 在  $0.4$  倍峰值荷载之前进行循环加、卸载, 试验过程中并无明显声发射现象出现。即使将虚拟门槛电平降低  $30\%$ , 也未发现声发射现象。在试验荷载水平达到岩石强度的  $40\% \sim 60\%$  时, 石灰岩试样内产生新裂纹, 试样出现扩容现象。此时, 岩样声发射率和能率都逐渐趋于活跃, 并达到较高峰值。在此之后继续加载, 声发射活动进入一个高峰期。此时, 岩样中裂纹之间的相互作用加剧, 某些微裂纹发生聚合、贯通, 导致岩石断裂面形成, 声发射率急剧增加。在试验中, 多数试件在临近破坏时(峰值强度的  $95\%$ ) 声发射活动异常活跃, 且声发射率和能率在试件破坏时均达到最大值。

由以上试验分析可见, 高峰石灰岩试样声发射信号产生的快慢、强弱及其变化过程均与岩石内部节理、裂隙的发展有密切关系。结合试验岩样的应力—应变曲线可以看到, 岩石声发射活动与岩石的体积变形存在一定的内在联系(加载初期除外)。当应力超过强度值的  $50\%$  时, 声发射活动明显加剧, 岩石体积开始膨胀; 在试样临近破坏时, 声发射频率和能率均急剧增加, 并一直持续到岩石破裂。声发

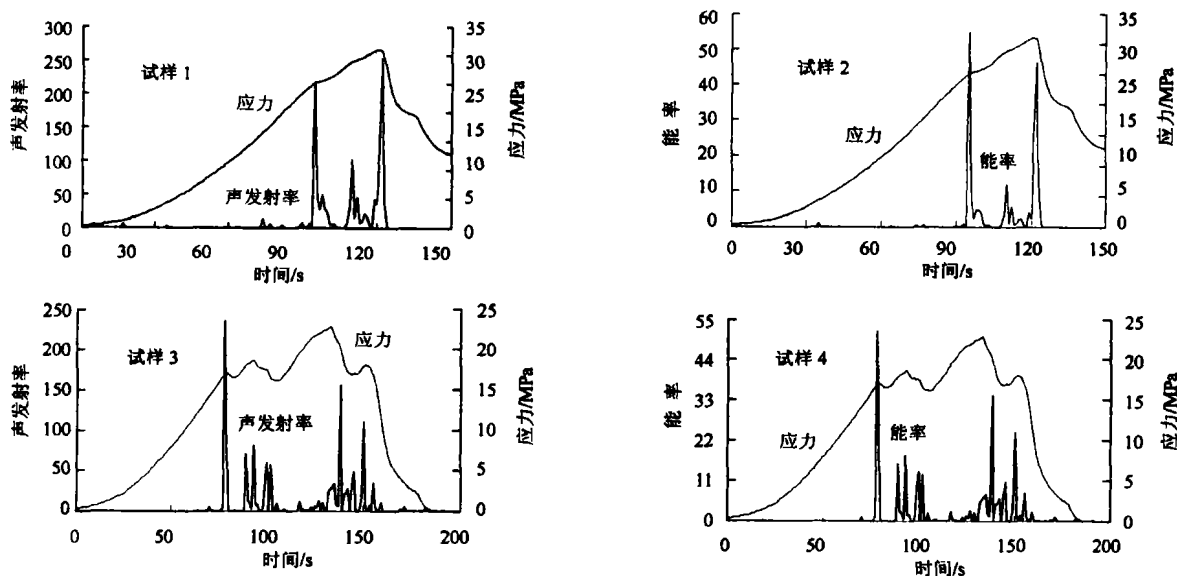


图1 石灰岩声发射事件关系典型试验图

Fig. 1 Sketch of AE-time connection for limestone test

射活动与岩石体积膨胀两者变化相一致说明岩石内部微裂纹的形成与原有裂纹的扩展是造成声发射活动与体积变化内部要素。在试验过程中还发现岩石的均匀性、致密程度以及岩样的平行度等对声发射规律有显著影响。岩石均匀差,内部结构疏松,且平整度不高的岩样,其声发射事件显著且出现的较早,且声发射率水平也较高。

#### 4 相关问题的探讨

已有岩石类材料声发射特性的研究主要着重于压缩试验,大多数研究工作者都企图建立所观测到的声发射事件与岩石物理、力学性质间的可靠关系式。已有粗玄武岩、灰岩、花岗岩等声发射试验研究分析表明,矿岩石(体)的节理、裂隙或结构面破坏后,其声发射率将减小。因此,声发射可以作为矿岩体稳定性程度的定性指标。

昆明理工大学余贤斌、谢强等人的研究表明:砂岩、大理岩和石灰岩等在低应力条件下即出现不平衡的高声发射率,并认为这主要是岩石(体)内微裂纹和空隙的闭合造成的。本文的研究同样证明了这一观点。古德曼(Goodman)对岩石材料在循环加、卸载条件下声发射特性的研究表明:如果荷载不超过“岩音加速点”,则在随后的加载循环中,很少有声发射现象。但是如果施加更大的荷载,则在随后的加载循环中,声发射率上升。对于单轴压缩条件下的声发射试验,广西高峰矿石灰岩试验结果与古德曼的试验结果较为一致。但对于岩音加速点的判断,古德曼认为是在试件强度的 80% 左右。论文对石灰岩的研究表明,岩音的加速点在岩石强度的 60% 附近,较古德曼的结果小。对比两者试验的异同点,笔者认为主要存在如下因素: a. 试验中岩石加卸载系统,尤其是采集系统频率匹配易造成声发射和应力测试迟后效应; b. 试验中岩石试件的岩性、强度参数及岩石试样中微裂隙发育程度的差异; c. 试验中声发射测试系统噪音门槛的设置水平。关于这方面的研究需要进一步加强。

对岩石声发射机制的研究,现有文献资料主要集中在以下 4 种<sup>[6-8]</sup>: a. 岩石(体)内微观结构的水平错位和塑性变形; b. 岩石(体)内新裂纹的产生和已有裂纹的扩展、断裂; c. 岩石(体)沿微观裂纹整体滑动或已有破裂面的滑动; d. 岩石体内即存磁场的磁性效应。对广西高峰矿石灰岩的研究表明:此类岩石中,试样内微裂纹的产生和已有裂纹的扩展、断裂是产生声发射现象的主要因素。且岩石的宏观破裂是其微破裂的发展和积累,是微观破裂发展的

必然趋势,因此,岩石声发射技术可用于对该矿在建和生产采场矿岩体的稳定性进行监测。同时,由于岩石声发射信号的易传播和易接收性,可保证监测系统实现常效化、实时化,并可进一步扩大监测范围。

#### 5 结论

声发射测试技术是靠岩石发声来探测其内部应力—变形状态的一种实验方法。在岩石受力变形时,岩石中原有的或新产生的裂隙周围应力集中,应变能较高。在外力增加到一定程度时,有裂缝缺陷部位会发生微观屈服和裂缝扩展,从而使得应力松弛,贮藏的部分能量以弹性波的形式释放出来。因此,岩石声发射的多少、大小、频率等参数是岩石变形和强度破坏过程的定性量化指标。通过对高峰矿石灰岩的试验研究,可得如下结论。

a. 单轴压缩条件下岩石声发射现象是由于岩石体内微裂纹的产生、发展和岩石体内部颗粒间摩擦引起的,因岩石试样中微裂纹分布的非唯一性和随机性,岩石声发射事件呈间断、频发性。

b. 石灰岩声发射事件率与能量率不完全一致,岩石破坏过程中声发射能量率的变化规律较声发射事件率表现的更为明显。

c. 石灰岩声发射活动与岩石试样的体积变形相关(加载初期除外)。在岩样内应力超过岩石强度 50% 时,声发射活动将明显加剧,岩石体积开始膨胀,此现象一直持续到岩石破裂。

d. 石灰岩内部微裂纹的形成与原有裂纹的扩展是造成声发射活动与体积变化的主要因素,利用两者的相关关系,可采用岩石声发射技术对矿山采场矿岩体的稳定性进行监测,实现采场稳定性的实时自动化监测。

#### 参考文献

- [1] Anisurov M V A. Acoustic emission from failing rock behavior [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1994(3): 173—182.
- [2] Hocknib D J. General theory of the Kaiser effect [J]. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech Abstr., 1993, 30(7): 929—935.
- [3] 宋战平. 岩土工程中的混沌、分形理论及其应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2000.
- [4] 尹贤刚, 李庶林. 声发射技术在岩土工程中的应用[J]. 采矿技术, 2002, 4(2): 39—42.
- [5] 秦四清, 李造鼎, 张俤元. 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [6] 许昭永. 单轴实验时的加载速度与声发射特征[J]. 地震研究, 1985, 8(6): 702—705.
- [7] 王祖荫. 声发射技术基础[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989.
- [8] 袁振明. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.