

文章编号:1001-4888(2012)06-0727-07

应力波作用下岩石声发射能量特征^{*}

万国香¹, 王其胜², 李夕兵³

(1. 嘉应学院 物理与光信息科技学院, 广东梅州 514015; 2. 嘉应学院 土木工程学院, 广东梅州 514015;

3. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 通过霍普金森(SHPB)实验系统,对应力波作用下岩石破坏进行声发射实验,获得了该加载条件花岗岩声发射能量的变化规律。实验结果表明,声发射能量变化呈现出两种明显不同的特征:I型,声发射峰值能量之后,能量迅速衰减,到加载的末期,能量出现一定的回升,产生“拐点”;II型,声发射峰值能量之后,能量衰减相对I型较慢,且不出现“拐点”。通过对岩石破碎块度的分析,得到了声发射峰值能量与岩石破碎分维之间的关系。本文的研究有助于重新寻求应力波下岩石破坏的声发射前兆规律。

关键词: 应力波; 声发射; 峰值能量; 破碎

中图分类号: TD31

文献标识码: A

0 引言

当岩石、混凝土等脆性材料受外力或内力作用时,以弹性波形式释放的应变能现象称为声发射。声发射作为一种无损检测技术是研究脆性材料失稳破坏演化过程的一个良好工具。真正意义上的声发射研究以1953年德国物理学家Kaiser所作的工作为标志^[1],这之后,人们对不同载荷条件下岩石破裂过程中的声发射及其应用展开了大量的理论和实验研究工作,取得了丰硕的成果^[1-9]。

大量的实验结果表明,岩石破裂的声发射特征是与岩石性质、加载条件等密切相关的。Rudajev等人^[10]通过对单轴压缩条件下岩石的声发射研究,认为声发射时间系列参数包含了有关应力率和岩石破裂阶段的重要信息,这些参数显示出了稳定的前兆特征。李庶林等^[11]对单轴压缩下岩石的声发射研究表明,在弹性阶段的初期和后期,随着应力水平的提高岩石声发射显著增加,特别在弹塑性高应力阶段,岩石声发射增长迅速;岩样在实验接近峰值强度时,单位时间内的应力增长速度减小,声发射事件率出现明显下降,即出现相对平静阶段;声发射事件率在不同应力水平变化很大,峰值强度后的声发射现象仍然明显,其声发射特征随岩样破坏形式的不同而不同。Tham等人^[12]通过实验和数值模拟研究发现,单轴拉伸下岩石声发射特征可分为三个阶段:(1)随机分布的声发射信号;(2)破裂带的出现;(3)主破裂的发生,并且花岗岩的微破裂聚结现象比大理岩更加明显,非均质性的差异是导致拉应力下岩石声发射特征不同的主要原因。张流等^[13]的研究结果表明,低围压易于产生张性破裂,张性破裂会伴随较高的声发射率,主破裂后声发射很少;随着围压的提高,剪切破裂占主导地位,使得声发射率降低,但破裂后声发射率保持较高的水平。

以上这些研究,基本上是基于材料受静应力时产生的声发射,虽然也有一些研究者考虑了不同围压

^{*} 收稿日期:2012-02-28; 修订日期:2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(编号:50490274),广东省高校优秀青年创新培育项目(LYM09126),梅州市科学技术局自然科学基金项目(2011KJY02)

通讯作者: 万国香(1979-),女,博士,副教授,现主要从事岩石破裂的电磁辐射和声发射研究。E-mail: wrm324@126.com

下材料的声发射^[14-20],但都没有进行应力波作用下岩石的声发射研究。到目前为止,对于冲击载荷作用下岩石破坏声发射的实验研究鲜有文献报道,这严重制约了声发射技术的发展和运用。本文在 SHPB 实验系统上进行了冲击载荷作用下岩石破坏的声发射实验,对声发射能量规律进行了系统深入的分析。

1 应力波下岩石声发射实验

图 1 为冲击载荷声发射实验系统,由 SHPB 冲击系统和声发射采集系统共同组成。声发射采集系统 AEwin 使用美国物理声学(PAC)公司生产的 PCI-2 型声发射仪,采样率 40MHz,阈值 22db(背景噪声为 22db)。传感器的型号为 SR800,大小为 $\Phi 19\text{mm} \times 15\text{mm}$,其工作环境为 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$,外壳材料为不锈钢,工作频率为 $80 \sim 1100\text{kHz}$ 。将声发射传感器的接触面涂上黄油,让传感器紧贴被测岩石,并用透明胶带将其固定在岩石上。施加冲击载荷后,应变仪和声发射采集系统自动触发并采集信号、存盘。在实验中,岩石完成一次冲击所需的时间大致为 $100 \sim 200\mu\text{s}$,我们所选择的声发射仪采样频率为 40MHz,能够满足采集精度。

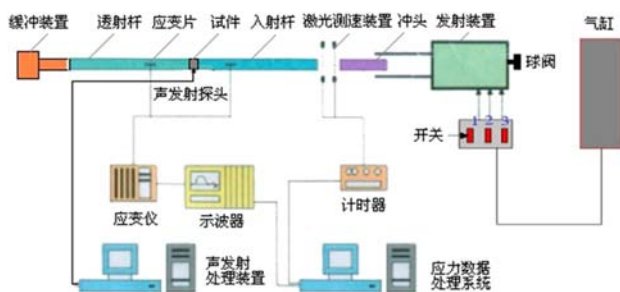


图 1 冲击载荷下声发射实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of AE test device of rock under dynamic load

在上述实验装置上,进行冲击载荷下声发射实验。实验步骤如下:

(1) 确定一冲击动载水平,采用半正弦波作为加载波形;

(2) 参照试样纯动态实验强度值,选定冲击气压和冲头冲击速度;

(3) 将声发射探头安装在试件上,做好探头与试件间的润滑;

(4) 放置试样于应力传递装置的两个弹性杆之间,做好试样与弹性杆间的润滑,放好应力传递装置框架端部的挡片;

(5) 检查实验系统两弹性杆与试样的平行度与接触情况,若平行度不够或接触条件不好,则回到第(4)步,启动声发射采集系统;

(6) 启动冲头发射机构,冲击气压达到预定值;

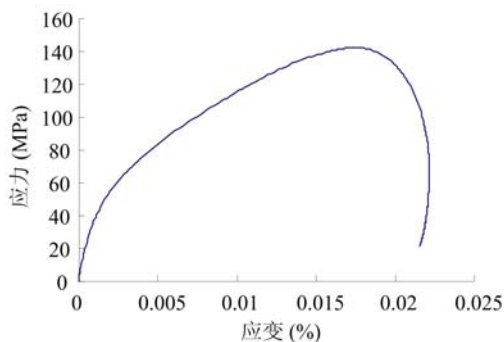
(7) 发射冲头,声发射和应变仪数据采集系统采集信号、存盘。

完成一次实验,根据需要进入下一轮,重复(1)~(7)。

试样的设计尺寸为:直径 50mm,长径比 0.5。每个试样端面和圆周都进行仔细研磨,两端不平行度小于 0.02mm,圆周与端面的不垂直度小于 0.02mm(图 2(b))。对直径差异进行严格控制,同组试样的直径偏差在 0.01mm 以内。其试样和动态应力应变关系如图 2 所示。



(a)



(b)

图 2 试样及常规动态应力应变关系

Fig. 2 Samples and Stress-strain under normal dynamic load

2 应力波下岩石声发射能量特征

图3为花岗岩在动载(SHPB冲击)下声发射能量和应力随时间的变化曲线。从该图可以看出在加载应力的最高点有一个很大声发射能量出现,在这个最大值(峰值)之前大的声发射信号几乎没有,这是由于冲击载荷速度很快,在应力达到最大值时,小裂纹来不及发展,当冲击载荷达到一定值,使得岩石此时产生大的裂纹,声发射探头捕捉到这个信号,就出现了图中的峰值能量。在峰值之后,岩石达到了最大强度值,但并没有完全破坏,还具有一定的承载能力,应力波继续在岩石内部传播,裂纹继续扩展,所以能量峰值后仍不断有声发射信号出现,但声发射能量在减小,逐渐减小到几乎接近零,然后突然出现了一个较大的声发射值,表明此时出现了一个较大的裂纹,这之后岩石完全破裂,不再具有承载力。

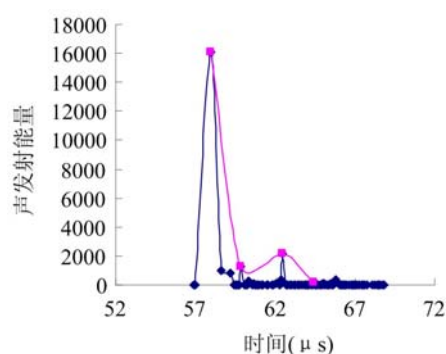


图3 破碎岩石声发射能量随时间的变化

Fig. 3 AE energy variation with time of broken rock

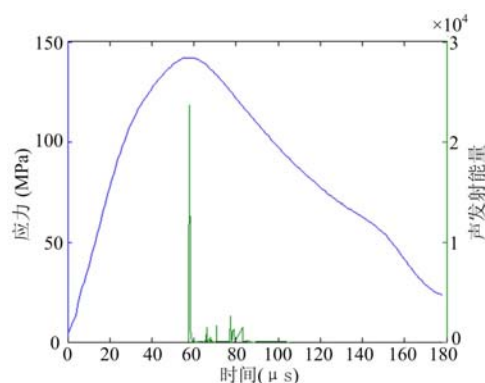


图4 动载下岩石声发射能量与应力随时间的变化

Fig. 4 AE energy and stress variation with time of rock under dynamic load

需要说明的是,尽管 SHPB 力学系统与声发射采集系统两者采样点所对应的时间并不一一对应,但是从信号产生到结束,两者所对应的总时间长是相等的,这样经过计算得到,在应力峰值的附近,声发射能量达到峰值,也就是说,在应力达到最大值时,声发射能量值也基本达到最大值,如图3和图4所示。其次,由于 PCI-2 型声发射仪具有实时 FFT 功能,因此,在图3和图5中声发射能量并不是绝对能量,而是声发射系统自身进行 FFT 处理以后的相对能量,为无量纲量。在相对能量为零处,其绝对能量并不为零,只是所对应的能量值相对较小。

在本实验中,所采用的岩样标本均取自一块完整的花岗岩,在保持其它实验条件一样的情况下,采用了不同的冲击载荷。没有完全破碎时所施加的冲击载荷为 100MPa,完全破碎时的冲击载荷为 300MPa。无论何种加载条件,声发射能量呈现出两种不同的特征。只要岩石发生完全破碎,则其声发射能量呈现 I 型特征;若岩石受载后没有完全破碎,只是出现小裂纹,其声发射能量呈现 II 型特征。I 型特征:在声发射峰值能量后,能量迅速衰减,到了加载的后期,能量有小幅回升,出现了“拐点”(图3);II 型特征:声发射能量达到峰值后,并未立刻衰减到一个很小的值,衰减后的第一个值和峰值属同一量级(10^4),而且之后没有出现所谓“拐点”(图5)。一开始,我们认为这可能是岩石的离散性导致的结果,然而通过对破坏后岩石碎块的块度进行分析后发现,岩石受载后完全破碎,其声发射能量呈现 I 型特征;岩石受载后没有完全破碎,只是出现小裂纹,其声发射能量呈现 II 型特征。这说明岩石在动载作用下声发射能量规律也与岩石破碎程度关系密切。

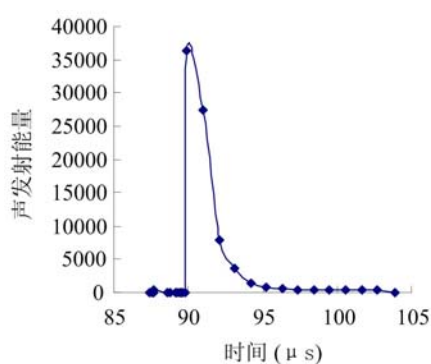


图5 未破碎岩石声发射能量随时间的变化

Fig. 5 AE energy variation with time of unbroken rock

3 声发射峰值能量与岩石破碎关系

岩石破碎受外加载荷和内部结构因素的综合控制,其过程极其复杂,一般从破碎后的块度分布情况来评价岩石破碎效果。通过理论分析以及实验室和现场实验研究,人们提出了各种各样的破碎块度分布统计函数,其中最具有代表性的有 R-R(Rosin-Rammler)分布和 G-G-S(Gate-Gaudin-Schuhmann)分布^[21-23]。

G-G-S 分布的表达式为:

$$y = (r/r_m)^b \quad (1)$$

其中, r_m 为分布参数,当 $r=r_m$ 时筛下量为 100%,即为岩块最大尺寸; b 为岩块分布参数,为 log-log 坐标下函数直线的斜率。

根据 Turcotte 等的研究结果^[24],岩石破碎时,其分形维数 D 可以由碎块的线性特性尺寸 r 和大于该尺寸的碎块个数 N 表示^[23]:

$$N \propto r^{-D} \quad (2)$$

其中,

$$D = 3 - b \quad (3)$$

图 6 为岩石在动载作用下的块度分布,从图中可以看出,随着冲击载荷不断增大,岩石破碎程度也随着不断加剧。图 7 为应力波下岩石破碎的粒度分布。

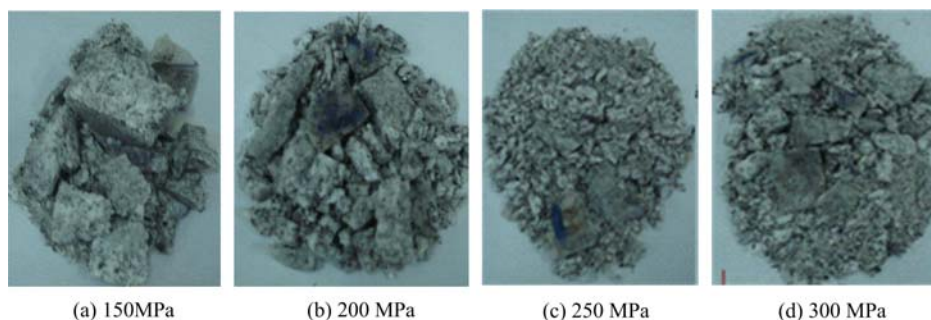


图 6 动载下岩石破碎块度

Fig. 6 Breaking fragment of rock under dynamic load

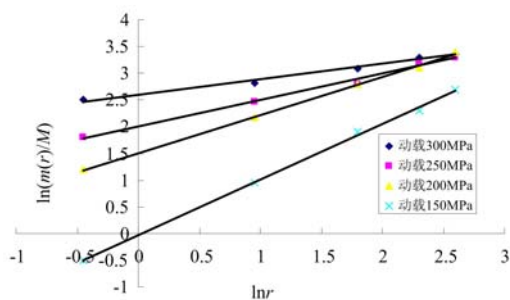


图 7 应力波下岩石破碎粒度分布

Fig. 7 Distribution of crushing rock sizes under stress wave

由式(3)计算得到应力波下岩石破碎破碎分维值及其变化规律如图 8 所示。

图 9 为应力波下声发射峰值能量(能量的最大值)与岩石破碎分维值 D 的关系。从图 9 可以看出,在应力波下,花岗岩破碎分维值 D 越大,声发射峰值能量越小;声发射峰值能量能够反映岩石破碎的程度。如果知道声发射峰值能量的大小,由破碎分维值和声发射峰值能量之间的关系,可以估算出不同加载条件下岩石破碎分维值的大小,从而估计出岩石破碎的程度。

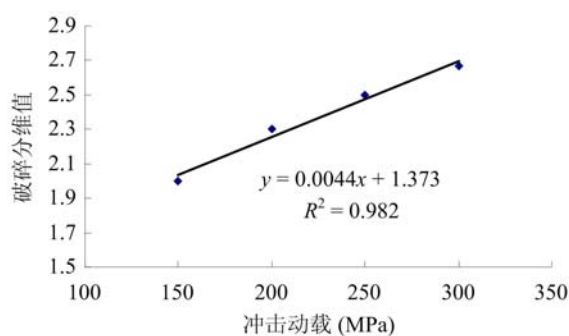


图8 应力波下岩石破碎分维变化

Fig. 8 Fractal dimension variation of crushing rock under stress wave

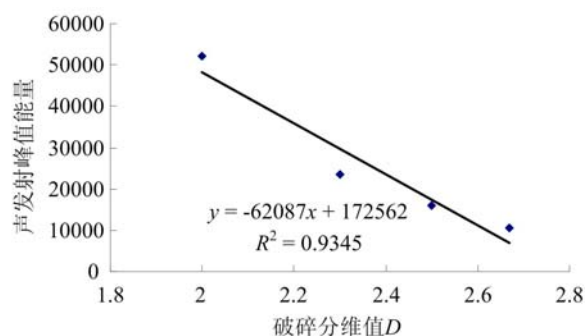


图9 应力波下声发射峰值能量与分维值的关系

Fig. 9 Relation of AE peak energy and fractal dimension under stress wave

4 小结

在 SHPB 冲击系统上进行了动载下岩石的声发射实验,得到了对应的声发射能量特征。结果表明:

(1) 声发射峰值能量前出现的声发射信号较少,这是由于冲击速度太快,小裂纹还来不及发展。

(2) 应力波下岩石的声发射能量规律与岩石破碎的程度密切相关,破碎岩石和未破碎岩石声发射能量随时间的变化分别呈现两种特征。

(3) 声发射峰值能量与岩石破碎程度密切相关,能够反映岩石破碎的程度,岩石破碎分维值 D 越大,声发射峰值能量越小。

参考文献:

- [1] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abst, 1993, 30(7):88—899.
- [2] Rudajev V, Vilhelm J, Kozak J, et al. Statistical precursors of instability of loaded rock samples based on acoustic emission[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abst, 1996, 33(7):743—748.
- [3] SETO M, NAG D K, VUTUKURI V S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999(17): 241—266.
- [4] Backers T, Stanchits S, Dresen G. Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: The effect of loading rate[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2005, 42: 1094—1101.
- [5] 李夕兵, 刘志祥. 岩体声发射混沌与智能辨识研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8):1296—1300 (LI Xi-bing, LIU Zhi-xiang. Research on Chaos and Intelligent Identification of Acoustic Emission in Rock Mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8):1296—1300(in Chinese))
- [6] 杨健, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20):3796—3802 (YANG Jian, WANG Lianjun. Study on Mechanism of Rock Burst by Acoustic Emission Testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20):3796—3802 (in Chinese))
- [7] 蒋海昆, 张流, 周永胜. 地壳不同深度温压条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. 地震学报, 2000, 22(4):395—403 (JIANG Haikun, ZHANG Liu, ZHOU Yongsheng. Granite Deformation and Behavior of Acoustic Emission Sequence under the Temperature and Pressure Condition in Different Crust Depths [J]. Acta Ceismologica Sinica, 2000, 22(4):395—403 (in Chinese))
- [8] 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 Zhenyang. Acoustic Emission Character of Rock Materials Failure during Various Stress States[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2):82—85 (in Chinese))

- [9] 郝晋升, 刘晓红, 李纪汉. 华北地区五种岩石在高压下的破坏特征[J]. 地震学报, 1986, 8(4):404—411 (Hao Jinsheng, LIU Xiaohong, LI Jihan. Failure features of five rocks of North China under high pressure[J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(4):404—411 (in Chinese))
- [10] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2000, 37:699—704.
- [11] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉. 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 (LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia. Studies on acoustic emission characteristic of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2499—2503(in Chinese))
- [12] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On Tension Failure of 2-D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission[J]. Rock Mech Rock Engn, 2005, 38(1):1—19.
- [13] 张流, 许昭永, 陆阳泉. 地震前兆场物理机制实验研究的新进展[J]. 地震, 1995, 增刊: 40—54 (ZhANG Liu, XU Zhaoyong, LU Yangquan, et al. New advances in experimental studies of physics mechanism of seismic precursory field[J]. Earthquake, 1995, Supp. : 40—54 (in Chinese))
- [14] 潘长良, 祝方才, 曹平等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(4):336—338 (PAN Changliang, ZHU Fangcai, CAO Ping, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression[J]. J Cent South Univ Technol, 2001, 32(4):336—338 (in Chinese))
- [15] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬等. 地震临界点理论的实验研究[J]. 地震学报, 2004, 26(增刊):122—130 (YU Huaizhong, YIN Xiangchu, XIA Mengfen, et al. Experimental research on critical point hypothesis[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(Supp.):122—130 (in Chinese))
- [16] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料声发射与应力—应变参量耦合关系及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2):227—231 (JI Hongguang, CAI Meifeng. Coupling constitutive relation between AE parameter and stress-strain and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2):227—231 (in Chinese))
- [17] 马胜利, 蒋海昆, 扈小燕等. 基于声发射实验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, 2004, 26(3):426—435 (MA Shengli, JIANG Haiku, HU Xiaoyan, et al. A discussion on mechanism for seismic quiescence before large earthquakes based on experimental results of acoustic emission[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(3):426—435 (in Chinese))
- [18] Prikryl R, Lokajicek T, Li C, et al. Acoustic Emission Characteristics and Failure of Uniaxially Stressed Granitic Rocks; the Effect of Rock Fabric[J]. Rock Mech Rock Engng, 2003, 36(4):255—270.
- [19] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37:699—704.
- [20] Chang S H, Lee C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under Triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41:1069—1086.
- [21] Grady D E, Kipp M E. Geometric statistics and dynamic fragmentation[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(3): 1210—1222.
- [22] Gaudin A M, Schuhmann J R, Dasher J. Development of extraction process for uranium from South African gold uranium ores[J]. Mining Engineering, 1956, 8(8):802—806.
- [23] Rosin P, Rammler E. Laws governing the fineness of powder coal[J]. Journal of the Institute of Fuel, 1933, 7(31):29—36.
- [24] Turcotte D L, Newman W I, Shcherbakov R. Micro— and macro—scopic models of rock fracture[J]. Geophys J Int, 2002, 152:718—728.

On the Acoustic Emission (AE) Energy Characteristics of Rock Subjected to Stress Waves

WAN Guo-xiang¹, WANG Qi-sheng², LI Xi-bing³

(1. School of Physics and Optic Information Technology, Jiaying University, Meizhou 514015, China;

2. School of Civil Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China;

3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Acoustic emission experiment of rock failure subjected to stress waves was carried out based on SHPB (split Hopkinson pressure bar) experimental system. The variation of acoustic emission energy of granite subjected to this loading was obtained. Experimental results show that the variation of AE energy presents two different features; mode I, energy decays rapidly after peak value, however, at the end of the loading, energy rises and "inflection point" appears; mode II, energy decays slowly after peak value, but no "inflection point" appears. Through analysis of rock fragmentation, relation between the AE peak energy and the fractal dimension value is obtained. Above results may be helpful to both theory and practice for seeking precursory characteristics of AE of rock mass subjected to stress wave.

Keywords: stress waves; acoustic emission (AE); peak energy; fragmentation