

DOI: 10.11779/CJGE2016S2055

# 岩石拉伸破坏机制与应力波谱特征

张伯虎<sup>1, 2</sup>, 刘玮丰<sup>1</sup>, 邓建辉<sup>2</sup>, 刘建锋<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 岩石材料的受拉性能远不及受压性能好, 其受拉的破坏机制决定着岩石工程的稳定性与安全性。为研究岩石材料受拉损伤破坏机制, 通过振动理论和间接拉伸条件下声发射试验分析花岗岩损伤演化过程, 并通过分形理论以及声发射信号的主频和能量分布特征来获得拉伸破坏机理。从声发射事件分布来看, 当加载应力达到抗拉强度时岩样瞬间破坏, 声发射事件数急剧增大, 反映出明显的脆性性能。声发射事件的分形维数也随着加载应力增大而减小。间接拉伸破坏全过程声发射信号的主频集中在 175~250 kHz 和 50~100 kHz 两个频率范围, 声发射信号的能量集中分布在 0~312.5 kHz 频段, 占信号总能量的 80%以上。其拉伸应力波特征和分形机理能够反映岩石材料的基本力学性能, 对更进一步研究岩石的性能、增强岩石工程的安全性有重要的实验和理论意义。

**关键词:** 岩石; 拉伸; 损伤机制; 应力波; 主频; 能量

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0336-06

作者简介: 张伯虎(1978-), 男, 副教授, 主要从事深部岩土体性能理论及监测研究工作。E-mail: zbh\_cd@126.com。

## Damage mechanism and stress wave spectral characteristics of rock under tension

ZHANG Bo-hu<sup>1,2</sup>, LIU Wei-feng<sup>1</sup>, DENG Jian-hui<sup>2</sup>, LIU Jian-feng<sup>2</sup>

(1. School of Geo-science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The tensile property of rock is much worse than its compression performance, and the damage mechanism under tension determines the stability and safety of rock engineering. To study the tensile damage mechanism of rock, the vibration theory and acoustic emission (AE) signal tests under indirect tensile conditions are used to analyze the damage evolution process of granite. The tensile damage mechanism is obtained by using the fractal theory and the distribution of dominant frequencies and energies of AE signals. Based on the distribution of AE events, damage is instantaneous and the number of AE events sharply increases when the loading stress reaches its ultimate tensile strength (UTS), reflecting apparently brittle performance. The fractal dimension of AE events decreases as the loading stress increases. The dominant frequencies of AE signals at the indirect tensile stage are mainly concentrated at 175~250 kHz and 50~100 kHz. Their energies are intensively distributed in the band width of 0~312.5KHz. The stress wave characteristics and fractal mechanism can reflect the basic mechanical property of rock. They are of important experimental and theoretical significance for further studies on rock performance and enhancing the safety of rock engineering.

**Key words:** rock; tension; damage mechanism; stress wave; dominant frequency; energy

## 0 引言

材料声发射现象自从 J. Kaiser<sup>[1]</sup>发现以来, 很多专家开展了一系列实验来研究岩石的声发射现象和破坏规律, 如单轴压缩<sup>[2-3]</sup>、三轴<sup>[4]</sup>、三点弯曲<sup>[5]</sup>等加载条件下声发射特性, 同时也针对不同强度、尺寸的岩石试样的声发射特性进行了研究<sup>[6]</sup>, Cox 等在研究了砂岩单轴压缩过程中的 AE 事件率、 $b$  值等基本参数特征的基础上, 探讨了 AE 参数同损伤参数间的联系<sup>[7]</sup>。事实上, 由于岩石抗拉强度远低于其抗压强度, 拉伸

也是岩石破坏的一种最常见的类型。岩石在拉应力作用下其内部微元损伤发展, 逐步演化成宏观的破坏<sup>[5, 8]</sup>, 其拉伸破坏机制可以通过实验<sup>[9-10]</sup>、数值分析<sup>[11]</sup>和理论方法来分析<sup>[12]</sup>。Tham 等对板状岩石试样在拉伸时的声发射特性进行了研究, 并模拟分析了破坏过程中声发射的释放特征<sup>[13]</sup>; 国内很多学者也通过直接或间

基金项目: 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金项目(SKHL1424); 博士后基金项目(2015M582768XB)

收稿日期: 2016-05-19

接拉伸实验来观测岩石破坏过程, 并通过声发射事件、能量、源分布等分析其破坏机理<sup>[14-15]</sup>。但多数研究均是针对 AE 参数特征进行的分析, 对声发射信号进行的分析也仅部分应用于岩石压缩实验中<sup>[16-18]</sup>, 对拉伸信号分析得较少。本文将从理论上讨论花岗岩岩石拉伸破坏中应力传递过程, 并通过间接拉伸下的声发射试验分析信号频谱规律, 结合分形理论来探讨岩石拉伸损伤演化过程和破裂机制。

## 1 岩石拉伸应力波释放的理论解

假设单轴拉伸实验中岩样为一端自由、一端固定的圆柱, 长度为  $l$ , 端部受到一个力  $P(x, t)$  的作用(如图 1 所示)。当  $P(x, t)$  产生的拉应力超过岩体单轴抗拉强度时, 岩体破坏, 假定破坏瞬间开始  $t=0$ , 则由此产生弹性波沿  $x$  轴方向传播的位移  $u$  满足下列方程<sup>[19-20]</sup>:

$$u_{tt} - c_\alpha u_{xx} = f(x, t), \quad (1)$$

式中  $u_{tt} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ ,  $u_{xx} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ ,  $f(x, t) = \frac{P(x, t)}{\rho A}$

$\sqrt{\frac{E^*}{\rho}}$ ,  $E^* = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比。

岩石杆件的初始条件为  $u(x, 0) = u_0(x) = \varepsilon_t x$ ,  $\dot{u}(x, 0) = \dot{u}_0(x) = 0$ , 其中  $\varepsilon_t$  为破坏之前瞬间岩石的拉应变,  $\varepsilon_t = \sigma_t/E$ ,  $\sigma_t$  为岩石的单轴抗拉强度。

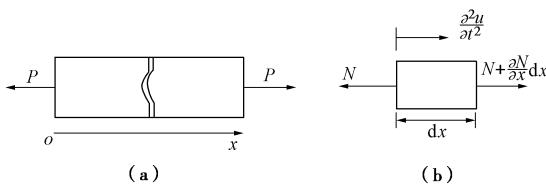


图 1 单轴拉伸岩体受力示意图

Fig. 1 Forces acting on rock mass under uniaxial tensile stress

采用振型叠加法解出岩石内部的自由振动位移为<sup>[21]</sup>

$$u(x, t) = \frac{8\varepsilon_t l}{\pi^2} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^2} \sin \frac{i\pi}{2} \sin \frac{i\pi x}{2l} \cos \frac{i\pi a}{2l} t, \quad (2)$$

式中,  $i=1,3,5,\dots$ ,  $a = \sqrt{E/\rho}$ 。

取长度  $l=100\text{mm}$ , 直径  $d=50\text{mm}$  的圆柱形花岗岩岩体, 其弹性模量  $E=40\text{GPa}$ , 密度  $\rho=2700\text{kg/m}^3$ , 抗拉强度为  $2.84\text{ MPa}$ , 泊松比  $\nu=0.25$ 。图 2 反映的是  $x=90\text{ mm}$  处质点振型图, 岩石破坏瞬间呈弹性振动状态, 振幅没有明显的衰减。由于弹性模量较大, 其振动幅度比较小, 仅达到微米级。其纵向振动通过快速 Fourier 变换获取频率分布如图 3 所示, 振动的频率为  $11\text{ kHz}$ , 呈现比较明显的固定频率。

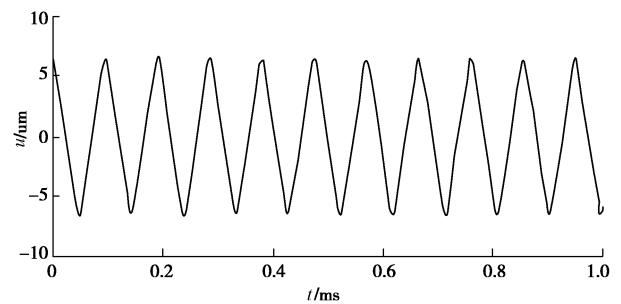


图 2 花岗岩样某点纵向振动图

Fig. 2 Longitudinal vibration in granite samples

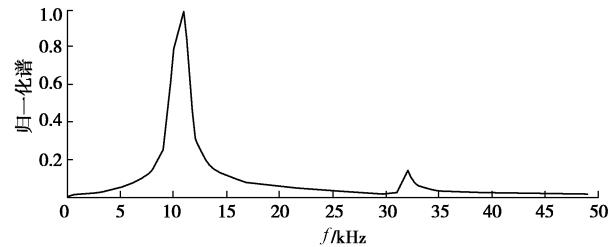


图 3 花岗岩纵向振动频谱

Fig. 3 Longitudinal vibration spectra of granite

从以上分析来看, 当岩体试样在简单拉应力作用下形成纵向振动, 即形成 P 波的传播模式, 引起岩体各点纵向振动, 其振动规律较为明显, 没有明显的信号衰减。

## 2 岩石拉伸损伤的声发射响应及损伤分形机理

试验岩样为采集自大岗山水电站地下厂房的花岗岩试件。本次实验为间接拉伸, 采用巴西劈裂法。试样直径和高分别为  $50\text{ mm}$  和  $25\text{ mm}$ 。采用 MTS815 FlexTest GT 岩石力学试验系统和美国物理声学公司 PCI-II 声发射采集分析系统。

### 2.1 声发射事件与加载关系分析

实验中得到了应力与声发射计数率、应力与累计声发射计数关系曲线, 如图 4。可以看出: 加载开始就逐渐产生声发射事件, 可能是加载初期岩样受压板压力引起的; 随着加载应力增大, 声发射事件率也逐渐增大, 出现稳定期和裂纹快速发展期, 在应力达到峰值应力前, 声发射事件数急剧增长, 岩块瞬间破坏, 呈现较明显的脆性破坏特征。

### 2.2 花岗岩的 AE 源分布

图 5 反映了花岗岩 ZS1 试样在间接拉伸试验中 AE 源分布点。在荷载逐步增加过程中, 试样在竖直线逐渐出现 AE 源点, 在荷载达到最大值时, 中间裂纹逐渐贯通而破坏, 这是巴西劈裂法的典型破坏特征, 即在压力作用下, 试样中间承受拉应力而破坏。从最大峰值应力到试验结束, 声发射点源没有明显的增长,

表明劈裂试验中的拉破坏是一个脆性破坏。

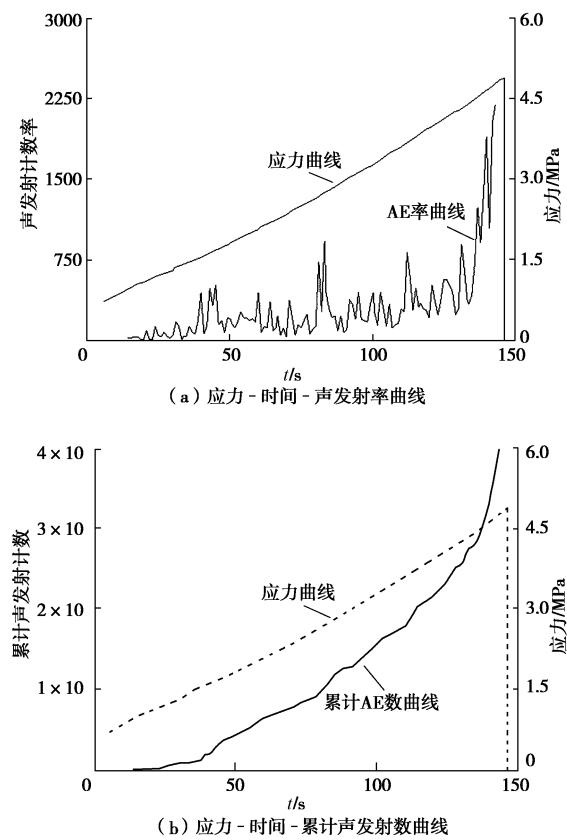


图 4 声发射事件 - 应力关系曲线 (ZS1)

Fig. 4 AE event stress relation curves in splitting tests

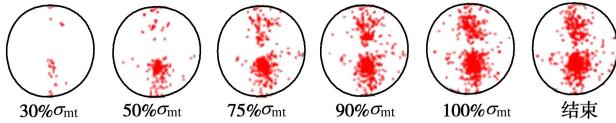


图 5 声发射点源分布 (ZS1)

Fig. 5 Distribution of AE sources in splitting tests

### 2.3 拉伸损伤的分形机理

采用下式来讨论从 A 阶段到 C 阶段的 AE 源分布变化<sup>[22]</sup>:

$$C(r) = 2 \frac{N_r}{N(N-1)}, \quad (3)$$

式中,  $N$  为 AE 源总数,  $N_r$  为两点间距离小于  $r$  的所有 AE 源对的个数。

如果 AE 源分布具有分形构造, 则有如下式成立:

$$C(r) \propto r^D. \quad (4)$$

对上式两边取对数, 有

$$\lg C(r) \approx A + D \lg r, \quad (5)$$

式中,  $A$  为常数,  $D$  为分形维数。

在双对数坐标上绘出距离  $r$  与  $C(r)$  的关系图, 则具有分形特征的部分即满足式 (5) 的部分应为直线, 而且其斜率是维数  $D$ 。图 6 中 A、B、C 分别对应于间接拉伸试验中加载应力达到峰值应力的 90%~

95%、95%~97.5% 和 97.5%~100% 三个阶段, 由于  $C(r)$  和  $r$  之间的关系满足式 (5) 所示关系, 表明 AE 源具有分形特征。而三个阶段 AE 源分布的分形维数分别为 1.465、1.343、1.290, 表明随着破坏的加剧, 分形维数减小。分形维数的变化意味着伴随 AE 的发生, 微破裂之间的相互作用强弱发生变化。分形维数减小表明微破裂相互作用增强导致破裂的聚集, 使岩石处于非稳定的状态。

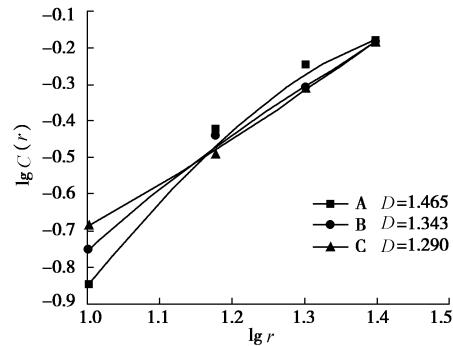


图 6 AE 源分布的分维数变化

Fig. 6 Variation in fractal dimension of distribution of AE sources

## 3 拉伸应力波频谱特征分析

### 3.1 应力波主频特征分析

通过快速 Fourier 变换对试验过程中的声发射信号进行频谱分析, 可以得到每一个声发射信号的主频。选取拉伸试验 ZS-1 岩样进行分析, 统计开始加载至峰值应力之间的所有声发射信号的主频, 得到如图 7 所示的间接拉伸试验声发射主频分布特征图。从图 7 中看出, 加载过程中声发射信号的主频明显呈带状分布, 主要集中在 175~250 kHz 和 50~100 kHz 两个频率范围, 其中主频处于高频范围的声发射信号占总信号数量的 75% 左右, 约 20% 的声发射信号主频处于 50~100 kHz 频率范围, 少量信号主频弥散分布于其它频率范围。主频处于两个频率范围, 跟劈裂破坏机理有关。试件顶部受压, 出现局部破坏, 产生低频信号; 而试样中部出现拉裂应力后, 岩体中微裂纹大量萌生, 产生高主频信号, 同时微裂纹贯通形成大裂纹, 产生低主频信号。

### 3.2 应力波能谱特征分析

对拉伸过程中岩石声发射信号进行小波包分解时, 本次试验 AE 信号的采样频率为 1 MHz, 则其奈奎斯特频率为 500 kHz, 可将信号分解到第 3 层, 共 8 个重构信号, 对应的最低频段是 0~62.5 kHz。将由小波树节点  $(3, i)$  重构得到的信号记为  $S_{3,i}$ , 其所对应的能量为记为  $E_{3,i}$ , 则有<sup>[23]</sup>

$$E_{3,i} = \int |S_{3,i}(t)|^2 dt = \sum_{n=1}^N |x_{i,n}|^2, \quad (6)$$

式中  $N$  为重构信号  $S_{3,i}$  的采样长度;  $x_{i,n}$  为重构信号各采样点的幅值;  $i=0, 1, 2, 3, \dots, 7$ 。

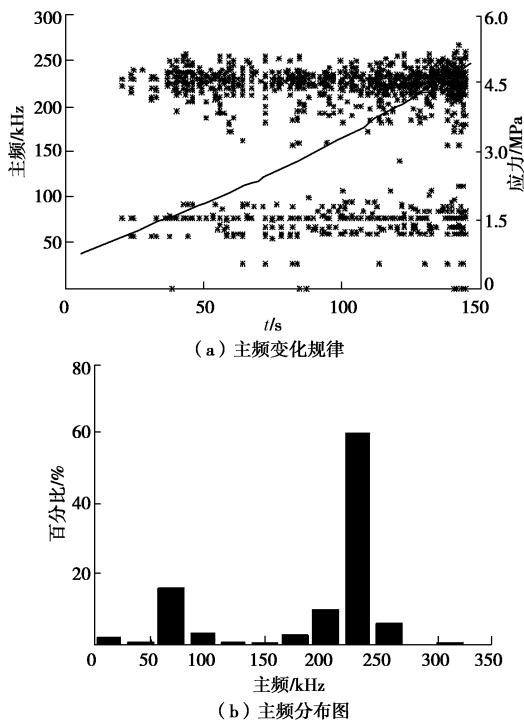


图 7 间接拉伸试验声发射主频分布特征

Fig. 7 Distribution of AE dominant frequency in splitting tests

将被分析信号的总能量记为  $E_0$ , 则可得

$$E_0 = \sum_{i=0}^7 E_{3,i}. \quad (7)$$

即得到各节点重构信号能量占被分析信号总能量的百分比为

$$E_i = \frac{E_{3,i}}{E_0} \times 100\%. \quad (8)$$

基于式(6)、式(7)、式(8)并结合 MATLAB 编程实现对 ZS-1 岩样采集到的所有声发射波进行以 db4 为小波基的 3 层小波包分解, 并统计声发射波在各频段的能量分布特征。图 8 为拉伸破坏全过程声发射波各频段的能量分布特征演化图。

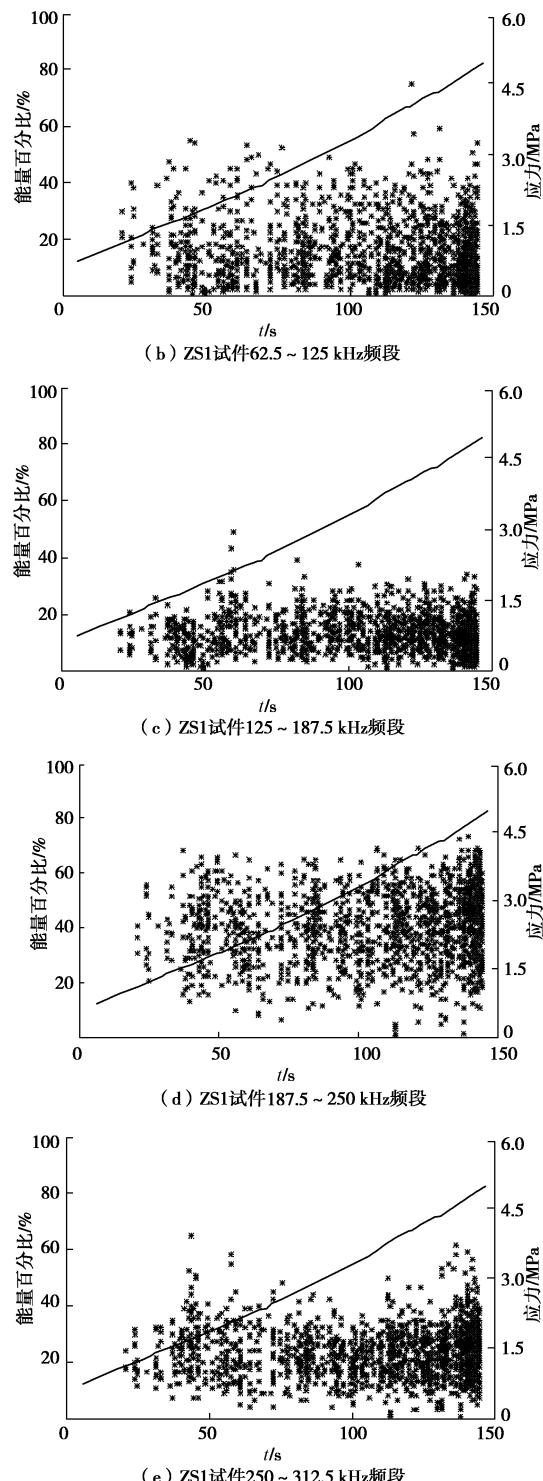
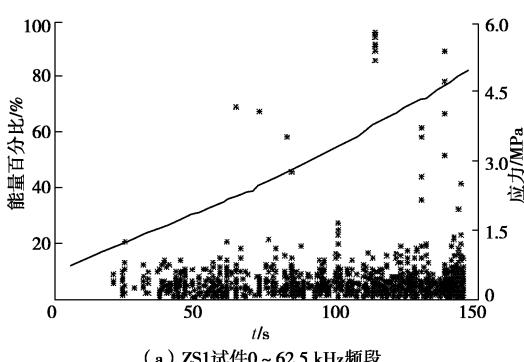


图 8 声发射波各频段能量分布特征

Fig. 8 Distribution of AE energy in splitting tests

由图 8 可知, 声发射信号在频段 0~312.5 kHz 间的能量占原始信号总能量的 80%以上, 在 312.5~500 kHz 之间的高频部分所占的能量百分比极小, 表明间接拉伸试验 AE 信号的有效成份主要集中于 0~312.5 kHz 间。

其中在 187.5~250 kHz 频段内所占的能量百分比约为 40%, 相比其它频段所占的能量百分比更高, 表

明 AE 信号在 0~312.5 kHz 范围内的能量分布虽然比较分散, 但其频率响应仍主要集中在 187.5~250 kHz。

## 4 结 论

通过花岗岩拉伸损伤演化和破坏过程中应力波释放和信号特征的研究, 得到了以下结论:

(1) 从理论上分析了岩样拉伸破坏后振动传递规律, 获得了 P 波的传递规律和信号特征。

(2) 通过岩石劈裂破坏的声发射实验来获得岩石损伤过程中声发射事件的分布规律, 得到了应力、声发射计数、能量之间的关系曲线。

(3) 通过岩石间接拉伸破坏中释放的声发射信号分析, 获得拉伸破坏岩石声发射波的主频特征和能量分布特征。

(4) 通过分形理论获得了岩石损伤演化和破坏的机制。随着加载应力的增大, 特别是接近峰值应力时, 其分形维数逐步降低, 反应了岩石的损伤演化发展和微破裂的产生过程。

## 参 考 文 献:

- [1] KAISER J. A study of acoustic phenomena in tensile tests[D]. Technische Hochschule Münched, FRG, 1950.
- [2] MOGI K. Study of elastic cracks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1962, **40**: 125 ~ 173.
- [3] RUDADEV 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**(4): 699 ~ 704.
- [4] PESTMAN B J, VAN MUNSTER J G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1996, **33**(6): 585 ~ 593.
- [5] 勝山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996. (KATSUYAMA K. Application of AE techniques[M]. FENG Xia-ting, tran. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [6] DAI S T, LABUZ J F. Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 1997, **9**(4): 200 ~ 205.
- [7] COX S J D, MEREDITH P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993, **30**(1): 11 ~ 24.
- [8] 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. (QIN Si-qing, LI Zao-ding, ZHANG Zhuo-yuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rocks[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993. (In Chinese))
- [9] 张志雄. 岩石直接拉伸与压缩变形特性的试验研究[D]. 昆明理工大学, 2008. (ZHANG Zhi-xiong. Experimental research on deformation behavior of rocks in direct tension and compression[D]. Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [10] 喻 勇, 张宗贤, 俞 洁, 等. 岩石直接拉伸破坏中的能量耗散及损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(4): 38 ~ 44. (YU Yong, ZHANG Zong-xian, YU Jie, et al. Energy dissipation and damage characters in rock direct tensile destruction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(4): 38 ~ 44. (in Chinese))
- [11] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石直接拉伸破坏过程及其分形特征的三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(7): 1402 ~ 1410. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, et al. Three-dimensional numerical study of direct tensile fracture of rock and associated fractal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1402 ~ 1410. (in Chinese))
- [12] 周小平, 张永兴, 哈秋龄, 等. 单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石变形局部化分析及其应力-应变全过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(1): 1 ~ 6. (ZHOU Xiao-ping, ZHANG Yong-xing, HA Qiu-ling, et al. Analyses on strain localization and complete stress-strain relation of mesoscopic rock under uniaxial tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(1): 1 ~ 6. (in Chinese))
- [13] 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 Engng, 2005, **38**(1): 1 ~ 19.
- [14] 付军辉, 黄炳香, 刘长友, 等. 煤试样巴西劈裂的声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, **39**(4): 25 ~ 28. (FU Jun-hui, HUANG Bing-xiang, LIU Chang-you, et al. Study on acoustic emission features of coal sample in Brazilian splitting[J]. Coal Science and Technology, 2011, **39**(4): 25 ~ 28. (in Chinese))
- [15] 刘建锋, 徐进, 杨春和, 等. 盐岩拉伸破坏力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 580 ~ 586. (LIU Jian-feng, XU Jin, YANG Chun-he, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 580 - 586.  
(in Chinese))
- [16] 周瑶琪, 王爱国, 陈勇, 等. 岩石压裂过程中的声发射信号研究[J]. 中国矿业, 2008, **17**(2): 94 - 97. (ZHOU Yao-qi, WANG Ai-guo, CHEN Yong, et al. Research on acoustic emission of rock fracture[J]. China Mining Magazine, 2008, **17**(2): 94 - 97. (in Chinese))
- [17] 刘新平, 刘英, 陈顥. 单轴压缩条件下岩石样品声发射信号的频谱分析[J]. 声学学报, 1986, **11**(2): 80 - 87. (LIU xin-ping, LIU Ying, CHEN Yong. Spectral analysis of acoustic emissions of rock specimen during uniaxial compression[J]. Acta Acustica, 1986, **11**(2): 80 - 87. (in Chinese))
- [18] 刘建伟, 吴贤振, 刘祥鑫, 等. 不同岩石脆性破坏声发射时频特性及信号识别[J]. 有色金属科学与工程, 2013, **4**(6): 73 - 77. (LIU Jian-wei, WU Xian-zhen, LIU Xiang-xin, et al. Time -frequency characteristic and signal recognition of acoustic emission generated from different rock brittle failure[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013, **4**(6): 73 - 77. (in Chinese))
- [19] 牛滨华, 孙春岩. 半空间介质与地震波传播[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. (NIU Bin-hua, SUN Chun-yan. Half-space medium and seismic wave propagation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [20] 李建功. 应力波在弹塑性煤岩体中传播衰减规律研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2008. (LI Jian-gong. Study on the stress wave propagation attenuation laws in the elastoplastic coal rock[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [21] 刘习军, 贾启芬, 张文德. 工程振动与测试技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999. (LIU Xi-jun, JIA Qi-fen, ZHANG Wen-de. Engineering vibration and testing techniques[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese))
- [22] HITATA T, SATOH T, ITO K. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock[J]. Geophysical Journal International-Geophys Jint, 1987, **90**(2): 369 - 374.
- [23] 凌同华, 李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1117 - 1122. (LING Tong-hua, LI Xi-bing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1117 - 1122. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)