

•深部岩体力学与开采理论•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800112

## 大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探

邓建辉<sup>1,2</sup>, 李林芮<sup>1,2</sup>, 陈菲<sup>3</sup>, 刘建锋<sup>1,2</sup>, 余建<sup>2</sup>

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2.四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;  
3.成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106)

**摘要:**声发射是加载过程中岩石微破裂产生的瞬态弹性能释放现象,在岩石力学测试中得到广泛应用。目前,声发射主要通过参数分析和定位分析描述加载过程中岩石的微破裂演变特征。然而,岩石的微破裂包括张破裂和剪破裂两类,声发射信号能否反映岩石的微破裂形式显然是一个值得探究的课题。选取四川宝兴县大理岩,分别进行直接拉伸试验、巴西圆盘劈裂试验和单轴压缩试验,采集了不同试验方法所有试件的声发射波形信号,采用快速傅里叶变换方法编程实现了声发射波形信号的频谱分析,批量获取了声发射波形信号的主频值。统计分析表明:大理岩破坏的声发射信号均存在明显的、与试验方法无关的双主频特征,反映了大理岩破裂的固有特性;初步力学机制分析表明,双主频可能反映了岩石的两种不同微破裂形式,其中低主频带对应微观拉破裂,高主频带对应微观剪破裂。

**关键词:**大理岩;声发射;双主频特征;拉剪破坏;统计分析

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0012-06

## Twin-peak Frequencies of Acoustic Emission Due to the Fracture of Marble and Their Possible Mechanism

DENG Jianhui<sup>1,2</sup>, LI Linrui<sup>1,2</sup>, CHEN Fei<sup>3</sup>, LIU Jianfeng<sup>1,2</sup>, YU Jian<sup>2</sup>

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 3.School of Architecture and Civil Eng., Chengdu Univ., Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Acoustic emission (AE) is a transient emission of elastic energy due to the micro cracking of rock under loading and is widely used in the various tests of rock mechanics. By now, both parametric analysis and positioning analysis are the most frequently applied techniques in AE to describe the evolution of micro cracking in rock specimen under loading. However, micro cracking can be divided into two types, i.e. shear cracking and tension cracking. It is still an unexplored problem that whether AE signal can reveal the two cracking types. In order to solve this problem, direct tensile test, Brazilian split test and uniaxial compression test were carried out for the Baoxing marble, Sichuan province, China and all the AE waveform signals are recorded for the tests. The waveforms were further analyzed by Fast Fourier Transformation (FFT) to acquire their peak frequencies. Statistics showed that there exist predominant twin-peak frequencies for all the AE waveforms, which are independent of the testing methods and should reflect the inherent cracking property of the marble. Preliminary mechanical analysis indicated that the twin-peak frequencies are most likely the result of the two cracking types, the lower peak frequency is corresponding to the micro tension cracking, while the higher peak frequency to the micro shear cracking.

**Key words:** marble; acoustic emission; twin-peak frequencies; tension or shear cracking; statistical analysis

声发射技术是一种重要的岩石力学测试手段,其中参数分析和定位分析已广泛应用于岩石破坏特征的描述<sup>[1]</sup>。然而,将一个复杂的声发射信号抽象成一系列的特征参数(振铃计数、能级、发生时间与位置等),难免会遗失信号所携带的一些重要信息。既然声发射是岩石微破裂能量快速释放而产生的瞬态

弹性波,那么声发射信号中是否包含反映岩石微破裂特征的信息显然是一个值得深究的课题。

岩石的微破裂包括张破裂和剪破裂两类。本文将从波形频谱分析出发,揭示两类微破裂的频谱特征,以期加深对岩石破坏现象的理解。

利用频谱分析将声发射信号从复杂难懂的时域

收稿日期:2018-01-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600702)

作者简介:邓建辉(1965—),男,教授,博士。研究方向:地质灾害、高地应力条件下的岩石力学问题。E-mail: jhdeng@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-08-30 00:57:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180830.0057.014.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

特征变成物理意义明确的频域特征,并进行统计分析,是研究声发射信号波形特征的有效途径。国外Armstrong<sup>[2]</sup>最早开始了声发射试验的频谱特征研究,发现岩石破裂时声发射的高频成分多;Chugh等<sup>[3]</sup>发现含水岩石的声发射主频相对于干燥岩石向低频方向移动;Read等<sup>[4]</sup>对比研究了砂岩在干燥和饱和条件下的声发射主频特征;Ohnaka等<sup>[5-6]</sup>阐述了统计分析对于声发射波形频谱特征研究的重要性,并发现较大的破坏容易释放高幅值低主频的波形。继刘新平等<sup>[7]</sup>的工作之后,国内陆续开展了岩石声发射频谱特征研究<sup>[8-20]</sup>,发现了一序列的规律性特征:如大理岩在临近破坏时存在向低频移动的趋势<sup>[8]</sup>,荷载增加使声发射主频由低频向高频发展<sup>[9,13]</sup>,双主频现象<sup>[17,20]</sup>等。

但应该指出的是,受计算机技术和传感器设备的限制,早期的声发射信号采集较少,研究多集中于对个别声发射信号主频的描述,统计分析不足;研究多集中于岩石单轴压缩破坏下的声发射主频特征,其他加载条件的研究极少;研究也缺乏声发射主频特征与岩石破坏力学机制的关系。以四川省宝兴大理岩为研究对象,统计分析其在直接拉伸、巴西劈裂、单轴压缩等不同试验方法条件下的声发射主频特征,并尝试揭示声发射主频特征与岩石破坏力学机制的关系。

### 1 试验与数据处理

#### 1.1 试验过程与数据采集简介

试验采用MTS815 Flex Test GT进行。声发射信号采集采用美国物理声学公司(PAC)生产的PCI-2系统;传感器选用Micro30,共8只,布置方式与文献<sup>[21]</sup>一致。控制方式为轴向位移控制,直接拉伸试验的加载速率为0.05 mm/min;巴西圆盘劈裂试验和单轴压缩试验为0.1 mm/min。巴西圆盘劈裂试验采用平板加载方式。

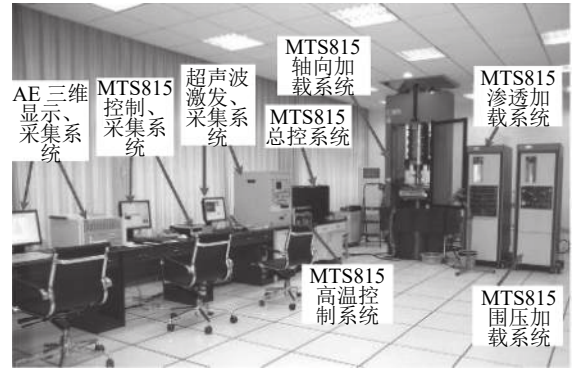
所有试验均保证力学加载系统与声发射采集系统的时间同步。试验装置与试件破坏后的典型形态见图1。

#### 1.2 数据处理

通过MATLAB编程,采用快速傅里叶变换(FFT)获取每个声发射信号的主频参数,结合力学采集系统所记录的时间和应力状态,汇总每个试件的加载时间、应力状态、对应信号的主频和幅值。数据处理流程见图2。

岩石破坏声发射信号的频率一般都低于450 kHz,为更有效地呈现声发射信号的主频特征,将每个试件的声发射主频按照0~10、10~20、...、440~450 kHz

分为45个主频段,大于450 kHz的单独分为一个主频段,共46个主频段。



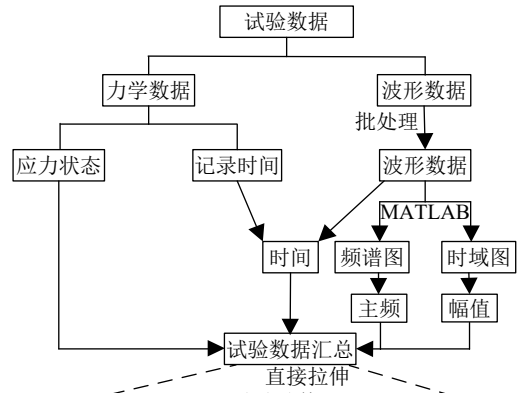
(a) 试验设备



(b) 直接拉伸试验 (c) 巴西圆盘劈裂试验 (d) 单轴压缩试验

图1 试验设备与大理岩破坏后形态

Fig. 1 Testing apparatus and failure patterns of marble



试验数据汇总  
直接拉伸  
试验试件1 (mt1)

	A	B	C	D
1	时间/s	应力状态/( $\sigma$ - $\sigma$ ) <sup>1</sup>	主频/kHz	幅值/dB
2	67.253 713	15.713 484 35	67	0.024 719 24
3	67.253 720	15.713 485 98	25	0.035 095 21
4	67.253 751	15.713 493 22	70	0.029 907 23
5	83.229 973	19.446 255 37	56	0.077 209 47
6	83.229 973	19.446 255 37	64	0.080 261 23
7	83.229 978	19.446 256 54	250	0.021 667 48
8	83.229 984	19.446 257 94	233	0.010 375 98
9	83.229 999	19.446 261 45	73	0.081 176 76
10	83.230 002	19.446 262 15	69	0.066 223 14
11	83.230 006	19.446 263 08	51	0.014 648 44

图2 试验数据处理流程

Fig. 2 Flow chart of datas processing

## 2 声发射信号的双主频特征

直接拉伸试验、巴西圆盘劈裂试验和单轴压缩试验均完成了4个试样的声发射信号采集(分别表示为mt1~4、bm1~4、m1~4),各试样的主频特征统计成果分别见图3~5和表1。

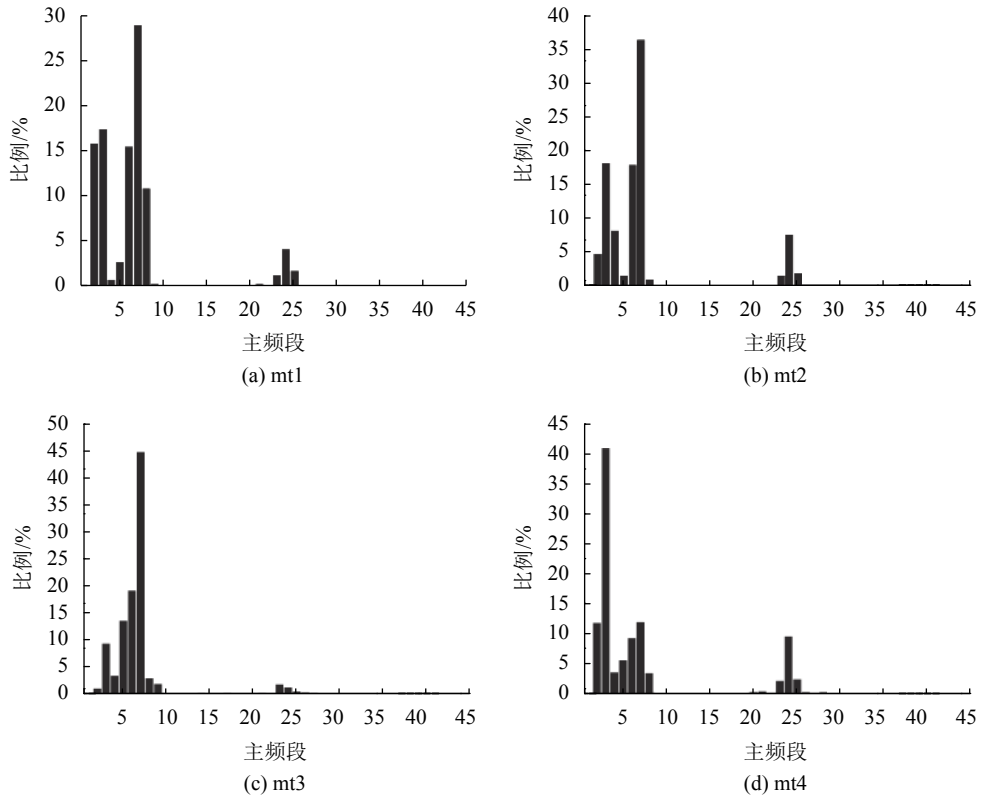


图 3 直接拉伸试验大理岩声发射双主频特征

Fig. 3 Twin-peak frequencies of acoustic emission for marble specimen under direct tensile test

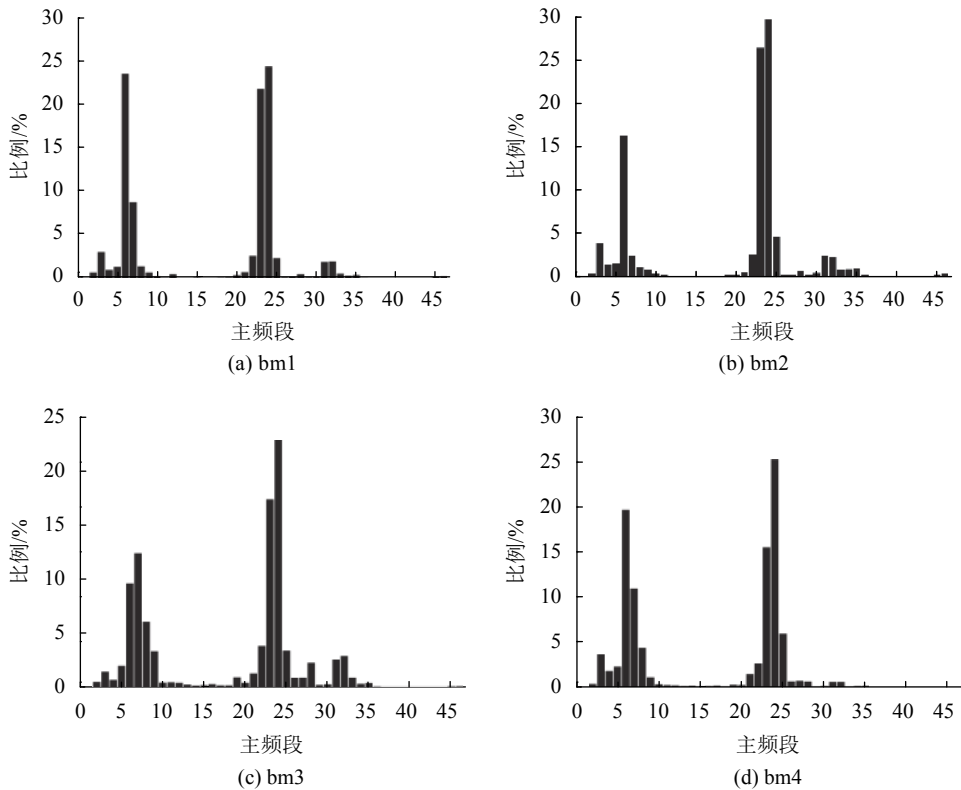


图 4 巴西圆盘劈裂试验大理岩声发射双主频特征

Fig. 4 Twin-peak frequencies of acoustic emission for marble specimen under Brazilian split tests

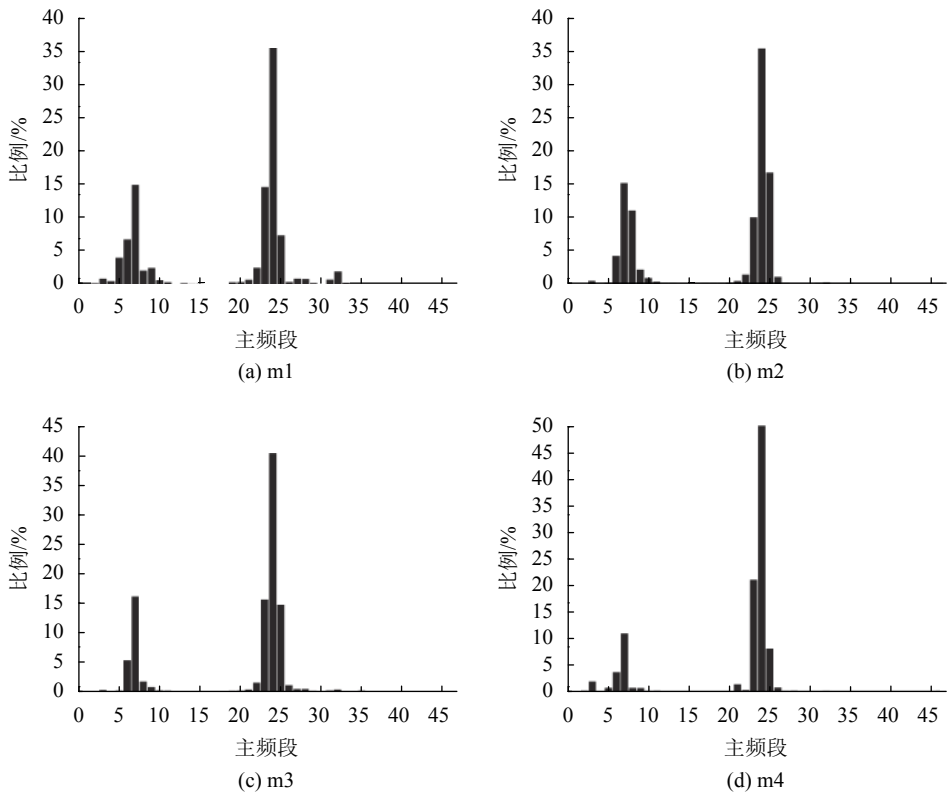


图 5 单轴压缩试验大理岩声发射双主频特征

Fig. 5 Twin-peak frequencies of acoustic emission for marble specimen under uniaxial compression tests

表 1 大理岩声发射主频特征统计

Tab. 1 Statistics of peak frequencies for marbles

试验方法	试样编号	低频带			高频带			波形数
		范围/kHz	波形数占比/%	能量占比/%	范围/kHz	波形数占比/%	能量占比/%	
直接拉伸	mt1	18~80	92.3	97.0	227~250	7.5	3.0	627
	mt2	18~73	88.6	99.9	226~250	11.4	0.1	797
	mt3	18~85	95.9	100.0	221~266	3.9	0.0	1 072
	mt4	18~77	85.6	99.8	225~246	14.4	0.2	787
巴西圆盘劈裂	bm1	13~114	41.1	38.1	191~276	53.2	61.6	8 305
	bm2	18~100	27.5	73.1	204~251	64.8	25.9	5 316
	bm3	18~102	37.2	48.2	183~281	54.7	50.4	5 328
	bm4	17~115	44.9	42.0	182~280	54.8	57.9	12 735
单轴压缩	m1	19~102	32.9	12.0	186~285	63.7	88.0	7 096
	m2	18~111	34.2	25.5	188~270	65.3	74.5	38 649
	m3	18~108	24.5	16.8	188~285	74.7	83.2	26 005
	m4	18~103	18.4	38.9	202~284	81.4	61.1	47 492
全部试验		17~90	38.7	—	210~250	54.6	—	154 209

直接拉伸试验大理岩的声发射主频表现为明显的双主频带特征。其中,低主频带主要聚集于18~80 kHz(第2~8主频段),高主频带主要聚集于221~250 kHz(第23~25主频段)。直接拉伸试验更容易产生低主频的声发射信号,低主频带信号占比大于85.6%。

巴西圆盘劈裂试验大理岩的声发射主频也表现为双主频带特征。其中,低主频带主要聚集在18~90 kHz(第2~9主频段),高主频带主要聚集在201~280 kHz(第21~28主频段)。此外,在300~350 kHz范围内还存在少量的声发射主频分布。相对于直接拉

伸试验,高主频带的数量明显增多,最低占比53.2%,均超过50%。

单轴压缩试验大理岩的声发射主频依然表现为双主频带特征。其中,低主频带主要聚集在21~100 kHz(第3~10主频段),高主频带主要聚集在201~260 kHz(第21~26主频段)。高主频带的数量明显高于低主频带的数量,最低占比63.7%。

虽然3类试验每个试样的高低主频带范围存在一定的波动,但全部试样的高、低主频带范围并无明显的差异。图6统计了全部试验成果的主频分布特征,低频带范围为17~90 kHz,高频带范围为210~250 kHz,与单个试样的主频分布基本一致。可见,双主频带现象是大理岩破坏的一种固有特性,与试验方法无关。

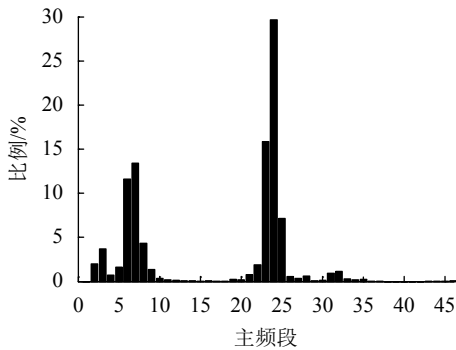


图6 大理岩声发射的双主频特征

Fig. 6 Twin-peak frequencies of acoustic emission for marble

### 3 双主频特征的初步力学机制分析

虽然不同试验大理岩的高、低主频带基本一致,但高、低主频带信号波形数占比的差别却较大。直接拉伸试验的低主频带信号占绝对优势,高主频带信号相对较少;巴西圆盘劈裂试验的高、低主频带信号相当,高主频带信号略多;单轴压缩试验的高主频带信号明显多于低主频带信号。考虑岩石微观破坏形式为拉、剪破坏两类,一种比较直观的推论就是上述两个主频带可能反映了两类破坏形式。

为论证上述推论,对两个主频带所对应的能量占比进行统计分析,结果见表1。直接拉伸试验的低主频带能量占比达到97%~100%,故可认为低主频带反映了岩石的微观拉破坏特征,高主频带反映了剪切特征。虽然直接拉伸试验岩石微破裂主要为拉破坏,但微缺陷或矿物颗粒间还是存在少量剪切破坏现象。巴西圆盘劈裂试验虽为一种间接拉伸试验方法,但从主频带或其能量占比来看,微观上拉伸破坏实际上居于次要地位。这可能是其试验结果高于直接拉伸强度的原因<sup>[22]</sup>。单轴压缩试验的岩石破坏

以剪切为主,拉伸破坏处于次要地位。

## 4 结论

对宝兴大理岩在不同加载条件下的声发射主频特征进行了统计分析,取得的主要认识:

- 1)大理岩破坏的声发射信号存在双主频带现象。
- 2)双主频带与试验方法无关,反映了大理岩破坏的固有特性。
- 3)结合能量占比分析,初步认为双主频带反映了岩石的拉、剪微破裂特征,其中低主频带对应微观拉破裂,高主频带对应微观剪破裂。

岩石破坏声发射信号的双主频带现象是一个共性问题,但本文的力学机制分析很初浅,尚需进一步的理论分析和试验工作论证。

### 参考文献:

- [1] 张茹,艾婷,高明忠,等.岩石声发射基础理论及试验研究[M].成都:四川大学出版社,2017.
- [2] Armstrong B H. Acoustic emission prior to rockbursts and earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59(3): 1259-1279.
- [3] Chugh Y P, Stefanko R. Investigation of the frequency spectrum of microseismic activity in rock under tension[J]. Applied Rock Mechanics, 1968, 20/21/22: 73-113.
- [4] Read M D, Ayling M R, Meredith P G, et al. Micro cracking during triaxial deformation of porous rocks monitored by changes in rock physical properties, II. Pore volumetry and acoustic emission measurements on water-saturated rocks[J]. Tectonophysics, 1995, 245(3/4): 223-235.
- [5] Ohnaka M, Mogi K. Frequency dependence of acoustic emission activity in rocks under incremental, uniaxial compression[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1981, 56(1): 67-89.
- [6] Ohnaka M, Mogi K. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(B5): 3873-3884.
- [7] Liu Xiping, Liu Ying, Chen Yong. Spectral analysis of acoustic emissions of rock specimen during uniaxial compression[J]. Acta Acustica, 1986, 11(2): 80-87. [刘新平, 刘英, 陈颢. 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.]
- [8] Peng Yuan, Zhou Changda. A study of AE characteristics of marble specimens under uniaxial compression-failure prediction[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 1987(2): 9-14. [彭远, 周昌达. 单轴压缩下大理岩试样的声发射特征研究[J]. 昆明工学院学报, 1987(2): 9-14.]
- [9] Pan Changliang, Zhu Fangcai, Cao Ping, et al. Characteristics



- of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression[J].*Journal of Center South University of Technology*,2001,32(4):336–338.[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.]
- [10] Li Junping,Zhou Chuangbing.Experimental research on acoustic emission characteristics of rock mass[J].*Rock and Soil Mechanics*,2004,25(3):374–378.[李俊平,周创兵.岩体的声发射特征实验研究[J].*岩土力学*,2004,25(3):374–378.]
- [11] Li Junping,Yu Zhixiong,Zhou Chuangbing,et al.Experimental study on acoustic emission characteristics of rock concerning hydromechanical coupling[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2006,25(3):492–498.[李俊平,余志雄,周创兵,等.水力耦合下岩石的声发射特征试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(3):492–498.]
- [12] Miao Jinli,He Manchao,Li Dejian,et al.Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2009,28(8):1593–1603.[苗金丽,何满潮,李德建,等.花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(8):1593–1603.]
- [13] Wang Enyuan,He Xueqiu,Liu Zhentang,et al.Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture[J].*Journal of China Coal Society*,2004,29(3):289–292.[王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤体破裂声发射的频谱特征研究[J].*煤炭学报*,2004,29(3):289–292.]
- [14] Li Nan,Wang Enyuan,Zhao Enlai,et al.Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J].*Journal of China Coal Society*,2010,35(7):1099–1103.[李楠,王恩元,赵恩来,等.岩石循环加载和分级加载损伤破坏的声发射实验研究[J].*煤炭学报*,2010,35(7):1099–1103.]
- [15] Zhang Yanbo,Huang Xiaohong,Li Shasha,et al.Spectral character analysis of sandstone under saturation condition in rupture procedure[J].*Rock and Soil Mechanics*,2013,34(6):1574–1578.[张艳博,黄晓红,李莎莎,等.含水砂岩在破坏过程中的频谱特性分析[J].*岩土力学*,2013,34(6):1574–1578.]
- [16] Huang Xiaohong,Li Shasha,Zhang Yanbo,et al.Impact of water on the spectrum characteristics of acoustic emission in rock rupture process[J].*Mining Research & Development*,2013,33(6):38–42.[黄晓红,李莎莎,张艳博,等.水对岩石破裂失稳过程声发射频谱特征的影响[J].*矿业研究与开发*,2013,33(6):38–42.]
- [17] Zhang Yangbo,Liang Peng,Liu Xiangxin,et al.Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2015,34(Supp1):2959–2967.[张艳博,梁鹏,刘祥鑫,等.基于声发射信号主频和熵值得岩石破裂前兆试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(增1):2959–2967.]
- [18] Jia Xuena.Experimental study on acoustic emission eigen-frequency spectrum features of strain bursts[D].Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing),2013.[贾雪娜.应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.]
- [19] He Manchao,Zhao Fei,Zhang Yu,et al.Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J].*Rock and Soil Mechanics*,2015,36(1):1–8.[何满潮,赵菲,张昱,等.瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J].*岩土力学*,2015,36(1):1–8.]
- [20] Zhang Bohu,Liu Weifeng,Deng Jianhui,et al.Damage mechanism and stress wave spectral characteristics of rock under tension[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2016,38(2):336–341.[张伯虎,刘玮丰,邓建辉,等.岩石拉伸破坏机制与应力波谱特征[J].*岩土工程学报*,2016,38(2):336–341.]
- [21] Xie H P,Liu J F,Ju Y,et al.Fractal property of spatial distribution of acoustic emissions during the failure process of bedded rock salt[J].*International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,2011,48(8):1344–1351.
- [22] Liu J F,Chen L,Wang C P,et al.Characterizing the mechanical tensile behavior of Beishan granite with different experimental methods[J].*International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,2014,69(3):50–58.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Deng Jianhui,Li Linrui,Chen Fei,et al.Twin-peak frequencies of acoustic emission due to the fracture of marble and their possible mechanism[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(5):12–17.[邓建辉,李林芮,陈菲,等.大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探[J].*工程科学与技术*,2018,50(5):12–17.]