

刀具压入破岩声发射分形特征实验

李玉,赵伏军*,王斌,樊勇,章思平

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:选用一字型刀具对花岗岩进行静力破碎实验,采用 AEwin-USB 型声发射信号采集系统采集声发射信号,应用分形理论分析不同加载速率下声发射分形特性.结果表明,随着加载速率的增加,刀具破岩程度愈显剧烈,且伴随着的声发射信号更强;声发射振铃计数率、能量率曲线能够很好描述刀具破岩过程;刀具破岩过程中声发射参数序列具有分形特征,且分形维数随加载速率的增大而逐渐减小;声发射分形维数随时间变化规律很好地反映了刀具破岩是一个降维有序、耗散结构的过程;刀具破岩声发射序列分维曲线呈一个波动上升→持续降低直到最低的变化规律,可以将分形维数持续降低作为岩石破坏失稳的前兆依据.

关键词:加载速率;声发射;分形维数;刀具破岩

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)01-0010-06

Experimental Research on Fractal Characteristics of Acoustic Emission during Cutter Pressing in Rock Fragmentation

Li Yu, Zhao Fujun, Wang Bin, Fan Yong, Zhang Siping

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

Abstract: The normal cutter was applied to conduct rock static breaking test on granite. Using AEwin-USB type acoustic emission signal acquisition system to collection AE signal, fractal characteristics of AE under different loading rate was analyzed by fractal theory. The results show that the normal cutter crushes rock more intense and accompanied by acoustic emission signal is stronger with the increase of loading rate. Acoustic emission ring count rate, energy rate curve well describe the whole process of rock breaking tool. Acoustic emission parameters sequence during the process of rock breaking tool has fractal characteristics, and the fractal dimension of AE is gradually reduced with the increased loading rate. The fractal dimension of AE reflected the whole process of rock breaking tool which is a dimensionality reduction ordered, dissipative structure process variation with time. The fractal dimension curve of AE sequence is a rising volatility→continue to reduce until the lowest variation. The descent of the fractal dimension can be regarded as the precursor information to predict the collapse of the rock masses.

Keywords: loading rate; acoustic emission (AE); fractal dimension; rock breaking tool

岩石材料受外力作用发生破坏与岩石内部裂纹的生成、扩展及断裂过程具有密切的相关性.在岩石微破裂的形成、闭合和贯通过程会伴随着能量的释放,这一现象即为声发射(Acoustic Emission, AE)^[1].由于岩石破坏过程难以观测到,因此将声发射方法应用到岩石工程领域得到越来越多国内外学者的青睐,并且取得了丰硕的成果^[2-9].分形理论是由 Mandelbrot^[10]在 20 世纪 70 年代提出的,至今应用到岩石力学中已

收稿日期:2016-09-12

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)

*通信作者, E-mail: zfxn@263.net

取得不少的成果^[11-15].Maystre 等^[16]研究了岩石在受载破裂过程中产生的声发射参数在时间上的分布具有分形特征,高保彬,李回贵^[17]发现岩石破坏前分形维数会呈现出突降现象,且塑性破坏突降现象持续时间比脆性破坏长得多;伊贤刚,李庶林等^[18]通过创建声发射强度分维模型,探讨了岩石在不同应力水平阶段声发射分形特征及分形维值随时间变化的规律;李德,李守巨^[19]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则和分形理论,得到了压头作用下岩石的破碎程度分布具有分形特征.然而上述研究成果都是在普通压力试验机上选用标准压头进行的岩石破裂实验而获得的,很少有学者开展刀具静力侵入破碎岩石声发射及其分形特征的实验研究,尤其是不同加载速率下刀具破岩声发射分形特征的研究则更少.因此,研究刀具破岩声发射分形特征以及加载速率对其的影响,对于深入认识刀具作用下的岩石破碎机理具有重要参考价值.

1 实验概况

1.1 实验系统及方案

刀具破岩实验系统由加载系统和声发射信号采集系统组成,如图 1 所示.实验加载系统采用 RMT-150C 压力试验机,以位移控制方式进行一字型刀具静力侵入破碎试验,加载速率分别为 0.001,0.010,0.100 mm/s,采用 AEwin-USB 型声发射检测系统采集加载全过程试样声发射信号.为了减少实验系统误差对声发射信号的影响,将 8 个传感器耦合在试样的表面,传感器与试样加载两端保留约 20 mm 的距离,以减小压力机对声发射信号的干扰,且每一面 2 个传感器对角布置,然后将黄油均匀适量涂抹在传感器和试样之间;实验中声发射系统总增益设为 76 dB(其中前放为 40 dB,主放为 36 dB),门槛值设为 40 dB,采样频率设定为 5 MSPS.

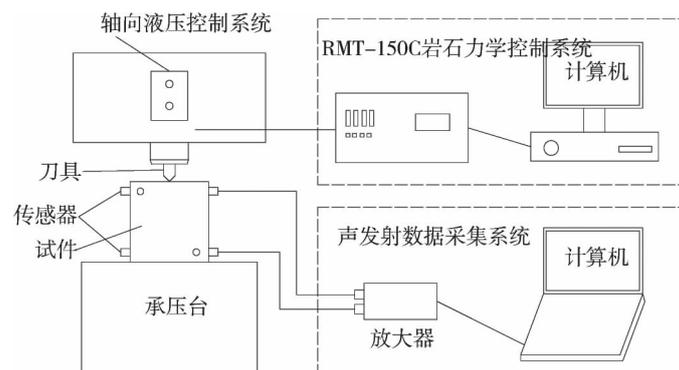


图 1 刀具破岩声发射实验系统

1.2 试样制备

实验所选取的的岩样为脆性岩石花岗岩,按照试验方案设计的尺寸加工成 150 mm×150 mm×150 mm 的正方体试样,并对试样端面进行打磨,保证试样端面符合规范要求.将试样分为 3 组,每组试样的数量为 5 个,其物理力学参数分别为:密度 $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 21.35 \text{ GPa}$,抗压强度 $\sigma_c = 106.46 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.09$,抗拉强度 $\sigma_t = 7.65 \text{ MPa}$.

2 实验结果与分析

本次实验将花岗岩试样分为 3 组,每组实验重复 5 次,选取每组实验数据效果最好的 1 次,以致更好地减少实验系统误差对声发射信号的影响.由声发射系统测试得到 3 种不同加载速率下载荷-时间-声发射关系曲线如图 2 所示.分析图 2 可以看出,一字型刀具破碎岩石会伴随着声发射信号的产生,加载速率为 0.001 mm/s 时初始产生声发射信号时间较其他 2 组加载速率滞后一些,随着加载速率的增加,一字型刀具破碎岩石的破碎程度愈显剧烈,破岩过程中产生的声发射信号也更强,以及岩石破碎时伴随着清脆的“噼啪”声更大,这是由于在较大加载速率下,刀具侵入岩石时间短,岩石内部结构吸收能量愈快,使得岩

石微裂纹生成、扩展速率更快,表明适当提高载荷施加速率能够一定程度上提高刀具破岩效率.以加载速率 0.010 mm/s 为例阐述刀具侵入岩石破碎声发射变化特征,从图 2c 和图 2d 可知,声发射能量率、振铃计数率曲线与刀具侵入载荷曲线具有较好的一致性,很好描述一字型刀具侵入岩石破碎过程.在刀具侵入岩石初期,刀具作用下岩石处于弹性压缩状态,岩石内部原生裂纹闭合,声发射振铃计数率和能量率值都很小;随着刀具侵入岩石,声发射振铃计数率和能量率值呈波浪型逐渐增加;在刀具破岩进行到 70~100 s 时声发射振铃计数率、能量率值出现激增,与刀具侵入岩石载荷曲线中载荷跃进现象相吻合,很好反映刀具侵入岩石中的跃进现象;在刀具侵入载荷加载到峰值强度附近时,刀具下的岩石分布着许多发育程度不同的张性初始裂纹和径向初始裂纹,并且不断扩展最终汇合贯通,此时声发射振铃计数率和能量率值达到最大;随后声发射振铃计数率和能量率值逐渐减小直到岩石破碎时降到最低.

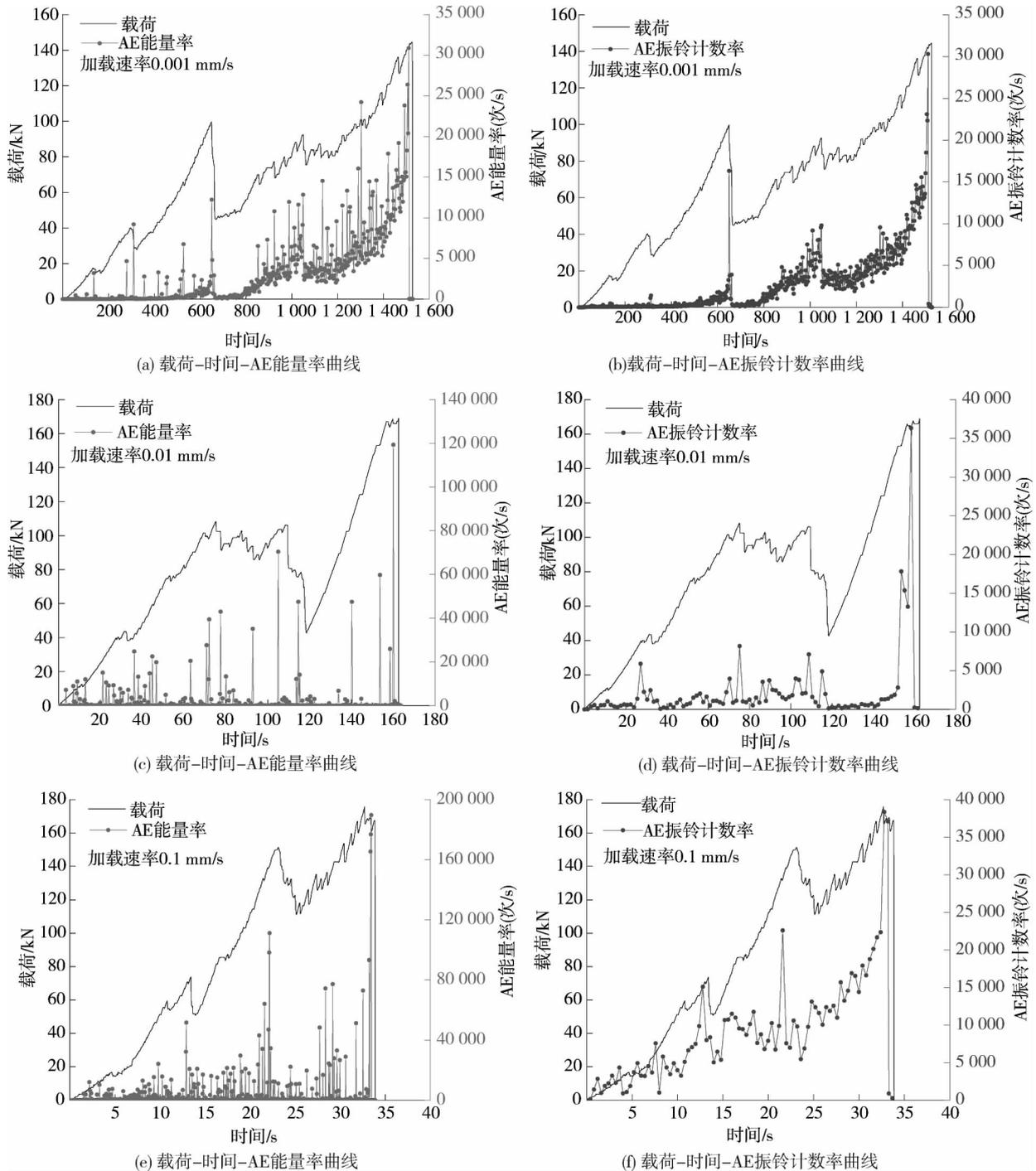


图 2 不同加载速率下花岗岩载荷-时间-声发射关系曲线

3 刀具破岩声发射分形特征

3.1 分形维数计算方法

近年来,对分形维数进行计算的方法很多,而广泛被采用的便是盒维法^[20].因此,本文计算分形维数时借助盒维数的个数-半径法,即确定在不同半径 r 的圆内所包围的声发射信号,之后数出不同半径 r 内所包括声发射事件的个数 $M(r)$,具有分形分布特性时满足:

$$M(r) = Cr^D. \quad (1)$$

式中: C 为受载试样的材料参数; D 为分形维数.

由式(1)可得

$$\lg M(r) = D \lg r + \lg C. \quad (2)$$

由式(2)可知,分形维数 D 就是对 $\lg M(r)$ 和 $\lg r$ 进行拟合之后所得双对数曲线的斜率.

试样受载变形破坏并伴随声发射信号产生,通过声发射信号能够反映试样受载变形破坏全过程的各种动态,声发射事件数所对应的时间就组成一个集合 $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$,每一个采集时间点与一个声发射信号相对应.通过对这个集合进行数据分析和拟合处理可以确定所得声发射参数序列在时间上的分形分布特性.一般情况,实验室试验过程中对试样进行声发射参数序列采集标度 r 取值为

$$r = k\Delta t (k = 1, 2, 3, \dots, m). \quad (3)$$

式中: $\Delta t = r_{i+1} - r_i$,考虑到 Δt 取值要能反映声发射的分形分布特性,一般 Δt 取 5~20 s,且 $k\Delta t$ 小于岩样声发射监测时间.

3.2 不同加载速率下刀具破岩声发射分形特征

利用上述分形维数计数方法,根据花岗岩受载时间和选取点的个数能够反映刀具破岩声发射特征,取 $\Delta t = 10$ s,以开始监测声发射振铃计数率为个数-半径法的圆心,于是标度 $r = 10, 20, 30$ s, ..., 结合实验并通过 Origin 数据分析软件和声发射分形理论基础,运用式(1)~式(3)对不同加载速率下刀具破岩产生的声发射数据进行拟合,其拟合结果如图3所示.

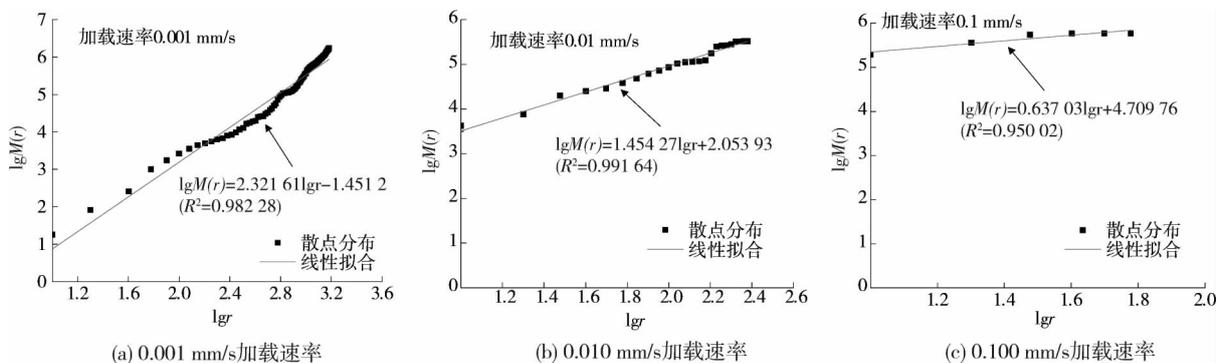


图3 不同加载速率下花岗岩声发射分形维数拟合曲线

由图3可知,不同加载速率下的拟合直线与原始数据的相关系数均大于0.95,说明刀具破岩过程AE振铃计数率在时间上的分布具有很好的分形特征.对比各拟合曲线的斜率可知,当加载速率由0.001 mm/s增加到0.010 mm/s时,声发射分形维数由2.32160降到1.45427,随加载速率增加到0.100 mm/s时,声发射分形维数降到0.63703,说明加载速率对声发射过程的自相似程度是有差异的,且分形维数是一个降维的过程.

3.3 不同加载速率下刀具破岩声发射过程分形特征

为了进一步研究刀具侵入岩石的发展过程及其裂纹生成和扩展规律,下面研究不同加载速率下刀具破岩声发射过程分形特征,其结果如图4所示.

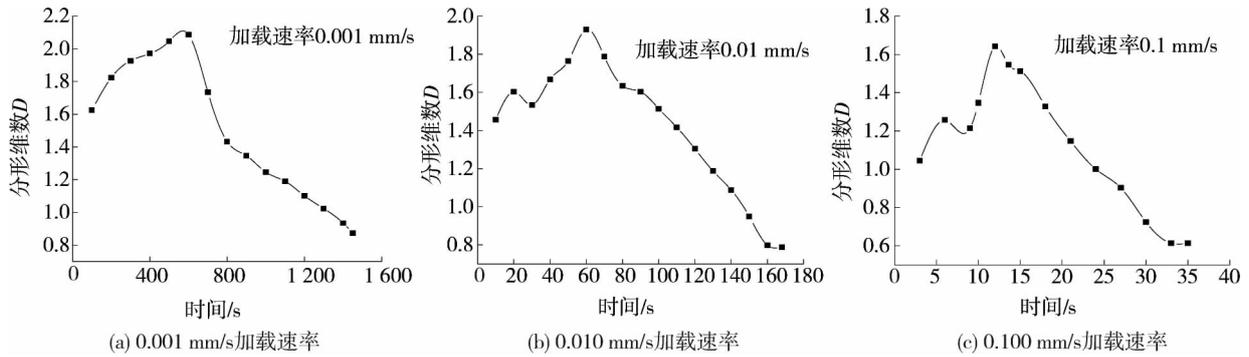


图4 不同加载速率下花岗岩声发射分形维数变化曲线

由图4可知,不同加载速率下刀具侵入岩石破碎过程中的分形特征曲线有差异,但是声发射分形特征曲线的整体变化趋势具有相似性.声发射信号能够检测岩石内部裂纹生成和扩展信息,因而根据声发射参数序列求出的分形维数可以很好的描述刀具侵入岩石内部裂纹发展及演化过程.在刀具静力侵入岩石初期,声发射分形维数出现波动且保持较高的水平,总体呈上升趋势,表明刀具破岩产生的声发射小事件所占的比例较多且有增加的趋势,花岗岩破坏主要以小尺度、微破裂为主;随着刀具侵入岩石,声发射分形维数又开始呈下降趋势,直到岩石破坏前声发射分形维数降到最低水平,这意味着刀具侵入岩石过程中发育了许多大尺度的微裂纹,逐渐向自由面失稳扩展,而最终导致岩石破坏,同时也进一步验证了岩石破坏是一个从无序向有序发展的过程.因此,根据刀具侵入岩石过程中声发射序列分维曲线是一个波动上升→持续降低直到最低的变化规律,可以将分形维数持续降低作为岩石破坏失稳的前兆依据.

4 结论

1) 刀具侵入岩石破碎过程中产生的声发射具有不同特征,可以用声发射来描述刀具侵入岩石微裂纹的和损伤演化特征过程,并且刀具破岩过程中声发射特征曲线与刀具侵入载荷曲线具有很好的一致性.

2) 可以利用盒维法对声发射参数序列分析,得出刀具静力侵入岩石破碎过程的声发射参数具有分形特征;加载速率对声发射分形维数的影响是显著的,且与加载速率呈负相关性.

3) 不同加载速率下刀具破岩过程中声发射参数序列分形特征所反映的损伤演化变化规律是一致的.在刀具侵入岩石初期,声发射分形维数较高且呈上升趋势;随着刀具继续侵入岩石,声发射分形维数会持续降低,直到岩石破坏前分形维数降到最低.因此,可以将分形维数持续降低作为岩石破坏失稳的前兆依据.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宫宇新,何满潮. 岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):787-799.
- [3] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On Tension Failure of 2-D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission [J]. Rock Mechanics Rock Engineering,2005,38(1):1-19.
- [4] 赵伏军,王宏宇,彭云,等. 动静组合载荷破岩声发射能量与破岩效果实验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1363-1368.
- [5] Kim J S, Lee K S, Cho W J, et al. A comparative e-valuation of stress-strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2):495-508.
- [6] 丛宇,冯夏庭,郑颖人,等. 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(7):1193-1201.

- [7] Ishida T, Kanagawa T, Kanaori Y. Source distribution of acoustic emission during an in-situ direct shear test: Implications for an analog model of seismogenic faulting in an inhomogeneous rock mass[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(3):66-76.
- [8] 卓越, 刘建锋, 李天一, 等. 三轴应力下盐岩声发射特征研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(s1):114-120.
- [9] 李果, 艾婷, 于斌, 等. 不同岩性巴西劈裂实验的声发射特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4):870-881.
- [10] Mandelbrot B B. *Fractals: forms, chance and dimension*[M]. San Francisco: W H Freeman, 1997.
- [11] 吴贤振, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 不同岩石破裂全过程的声发射序列分形特征实验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12):3561-3569.
- [12] Yin X G, Li S L, Tang H Y. Study on strength fractal features of acoustic emission in process of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19):3512-3516.
- [13] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂与破碎的分形研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(4):1-9.
- [14] 易顺民, 赵文谦. 单轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5):520-523.
- [15] 张黎明, 任明远. 大理岩卸围压破坏全过程的声发射及分形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(s1):2862-2867.
- [16] Maystre D, Rossi J P. Implementation of a rigorous vector theory of speckle for two-dimensional micro rough surface [J]. *Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 1986, 3(8):1276-1282.
- [17] 高保彬, 李回贵. 不同破坏类型岩石的声发射及分形特征研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(2):358-363.
- [18] 伊贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19):114-118.
- [19] 李德, 李守巨. 压头作用下岩石破碎过程分形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(s2):314-319.
- [20] 谢和平. *分形-岩石力学导论*[M]. 北京:科学出版社, 1996:8-23.