



文章编号:1671-251X(2017)07-0037-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.07.008

基于重标极差分析的受载砂岩声发射特征研究

魏洋^{1,3}, 李忠辉^{1,2,3}, 张志博^{1,3}, 孔艳慧^{1,3}, 殷山^{1,3}, 刘帅杰^{1,3}, 程富起^{1,3}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了研究砂岩破坏过程中时间序列各个阶段声发射信号的响应规律,开展了砂岩单轴压缩试验。基于重标极差时间序列分析,得出了砂岩破坏过程中声发射计数时间序列的 Hurst 指数和分形维数。试验及分析结果表明,声发射信号与砂岩内部裂纹演化有很好的对应性;砂岩破坏的声发射信号时间序列遵循重标极差统计规律及分形规律,在时间序列的各个子区间内, Hurst 指数值均大于 1/2,呈现持久性,即随着时间的增加,产生的声发射信号呈现增长趋势;分形维数具有下降-上升-下降的特点,并在砂岩破坏时达到最低,这种变化趋势与砂岩内部微裂纹的发展情况一致。

关键词:砂岩; 声发射; 单轴压缩试验; 时间序列; 重标极差分析; 分形维数

中图分类号:TD315 文献标志码:A 网络出版时间:2017-06-27 16:19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170627.1619.008.html>

Research on acoustic emission characteristics of loaded sandstone based on R/S analysis

WEI Yang^{1,3}, LI Zhonghui^{1,2,3}, ZHANG Zhibo^{1,3}, KONG Yanhui^{1,3},

YIN Shan^{1,3}, LIU Shuaijie^{1,3}, CHENG Fuqi^{1,3}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to research response law of acoustic emission signal in various stages of time series during destruction process of sandstone, the uniaxial compression test of sandstone was carried out. The Hurst exponent and fractal dimension of the acoustic emission counting time series were obtained based on the R/S time series analysis. The results of test and analysis show that the acoustic emission signal has a good correspondence with the internal crack evolution of the sandstone. The time series of the acoustic emission signal of sandstone failure follows the R/S statistical law and fractal law. In the subintervals of

收稿日期:2017-03-09;修回日期:2017-05-26;责任编辑:胡娴。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0801404);国家自然科学基金项目(51674254)。

作者简介:魏洋(1992—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为煤矿动力灾害,E-mail:1624158369@qq.com。通信作者:李忠辉(1978—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,从事矿山安全、煤矿动力灾害监测预报技术等方面的科研与教学工作,E-mail:leezhonghui@163.com。

引用格式:魏洋,李忠辉,张志博,等. 基于重标极差分析的受载砂岩声发射特征研究[J]. 工矿自动化,2017,43(7):37-42.

WEI Yang, LI Zhonghui, ZHANG Zhibo, et al. Research on acoustic emission characteristics of loaded sandstone based on R/S analysis[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 37-42.

the time series, the Hurst exponent is more than $1/2$, showing persistent, that is, the resulting acoustic emission signal shows an increasing trend with the increase of time. The fractal dimension has the characteristics of falling-rising-falling and reaches the lowest at the time of sandstone failure. This trend is consistent with the development of micro-cracks in sandstone.

Key words: sandstone; acoustic emission; uniaxial compression test; time series; R/S analysis; fractal dimension

0 引言

岩石、混凝土等含有空隙的材料在外部载荷作用下,内部会发生裂纹闭合、发展及贯通,直至破坏,在这个过程中会产生声发射现象。砂岩作为一种多孔介质材料,在外载荷作用发生破坏的过程中也会产生声发射现象。前人对岩石破裂过程中所产生的声发射特性已做了不少研究。陈依珂等^[1]对砂岩在单轴压缩过程中产生的声发射信号进行了研究,发现声发射信号变化和力学参数具有很好的一致性;姜永东等^[2]通过砂岩单轴压缩试验得出,砂岩在加载破坏过程中产生的声发射信号具有分形和混沌特征;李博等^[3]研究了砂岩在单轴压缩过程中声发射信号关联维数与应力之间的关系,得出关联维数随应力增加而降低的结论;张黎明等^[4]通过对大理岩三轴加压试验发现在岩样破坏前塑性阶段存在平静期;陈宇龙等^[5]通过砂岩单轴压缩试验得出了全应力-应变曲线4个阶段中的声发射特征;尹贤刚等^[6]研究了岩石加载过程中分形维数特征,得出了分形维数在声发射平静期阶段达到最低,预示着岩石破坏的发生。虽然声发射技术在岩体监测方面的应用已取得不少成果,但相对于整个破坏过程而言,时间序列各个阶段声发射特征的响应规律与砂岩破坏演化过程的关系却尚未进行详细研究。深入研究砂岩破坏演化过程,分析演化过程时间序列各个阶段声发射信号的响应规律,对于提高砂岩相关工程预警准确性有着非常重要的理论和现实意义。

本文进行了砂岩单轴压缩声发射试验,获得了声发射计数时间序列及应力-应变曲线。基于重标极差(Rescaled Range, R/S)分析原理,对砂岩破坏过程中的Hurst指数及分形维数在时间序列各个阶段的变化规律进行了研究。运用Matlab编制的相关程序,得到了各个阶段分形维数 D_f 值随加载呈现出下降-上升-下降的规律,与砂岩内部微裂纹发展情况一致,这可以为砂岩相关工程监测预警进一步提供理论上的依据。

1 砂岩声发射试验

通过试验对常规状态砂岩进行单轴加载声发射

特征研究,为了避免试验现象的偶然性,共采用10组常规状态直径为50 mm、高为100 mm的圆柱体标准砂岩试样,试样两端平行度满足试验要求。

试验采用YAW4306微机控制电液伺服压力机,其最大负荷为3 MN,试验力示值分辨率(FS)为 $1/300\,000$,试验力示值相对误差为 $\pm 1\%$,加载速率为 $0.6\sim 60\text{ kN/s}$,加载速率精度为 $\pm 1\%$,可以采用力、位移2种控制方式进行单轴压缩、拉伸、循环加载、蠕变等力学试验。

试验采用CTA-1型声发射动态数据采集系统,该系统能同时高速采集8个通道的声发射信号。采用的探头型号均为NANO-30,其峰值频率为300 kHz。

试验加载方式为力控加载,加载速率为 200 N/s 。试验开始之前首先对各仪器进行调试,试验装置如图1所示。

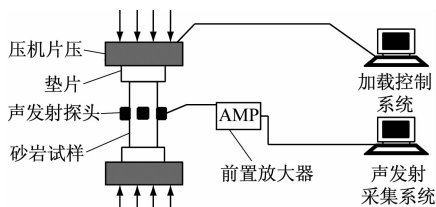


图1 砂岩声发射试验装置

Fig. 1 Acoustic emission test device for sandstone

2 试验结果及分析

对10组砂岩试样进行单轴压缩直至破坏,得到应力-应变曲线及砂岩破坏过程中声发射计数时间序列。运用Matlab软件编制的相关程序对砂岩破坏过程中产生的声发射计数时间序列进行R/S分析,得出Hurst指数 H 值及分形维数随时间的变化规律。限于篇幅,本文对其中2组试验结果进行分析,其余各组试样产生的声发射现象及特征规律与所列2组试样基本一致,破坏的砂岩实物如图2所示。

2.1 砂岩破坏过程中的声发射特征分析

图3、图4分别为2号、3号组砂岩破坏过程的应力-应变曲线及声发射计数时间柱状图。从图3、

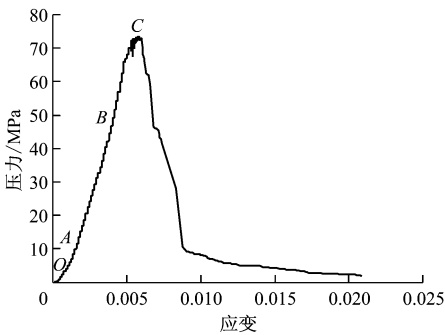


图2 破坏的砂岩实物

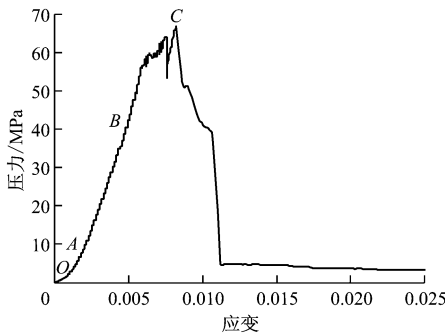
Fig. 2 Physical pictures of destroyed sandstone

图4中可以看出,OA段为原始压密阶段(2号试样0~63 s,3号试样0~28 s),在外部载荷作用下,砂岩中的原始孔隙和裂隙逐渐压密变实,此时期声发射信号强度较弱。AB段为弹性阶段(2号试样63~319 s,3号试样28~185 s),随着外部载荷的逐渐增大,砂岩内部裂纹稳定发展,应力-应变曲线呈直线上升状,此阶段中砂岩声发射信号较前一时期较为

活跃。其中2号试样在189,318 s,应力峰值的41.7%,70%处,3号试样在136,163 s,应力峰值的52.5%,63.1%处,分别发生了一次微破裂,相应的声发射计数也各出现了极大值。BC阶段为塑性阶段(2号试样319~448 s,3号试样185~250 s),曲线增长速度减缓,此时内部裂纹逐渐扩张直至强度峰值,试样遭到破坏,声发射信号强度在此期间也发展到最强,并且在2号试样391,408,434 s,应力峰值的87.1%,89.5%,96.6%处及3号试样198,219,228 s,应力峰值的75.7%,83.4%,84%处都发生了较大破裂,同时,声发射计数值也再次得到了响应,达到了极值。C点以后为峰后破坏阶段,试样起初仍有一定的承载能力,但随着应力的增大,承载能力逐渐丧失,伴随产生的声发射信号也逐渐变弱。综上所述,可以看出在砂岩加载破坏过程中产生的声发射信号与砂岩内部裂纹的闭合、产生及发展有很好的对应关系。



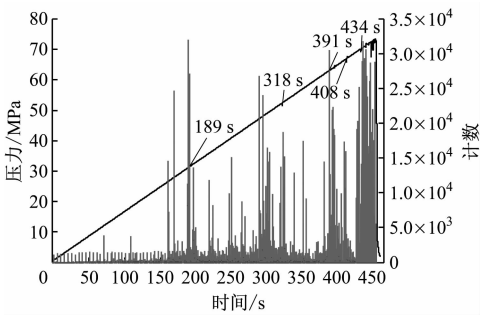
(a) 2号试样应力-应变曲线



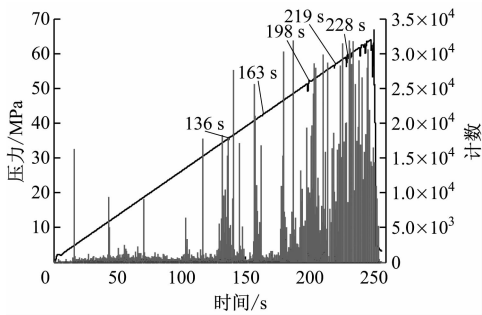
(b) 3号试样应力-应变曲线

图3 单轴压缩下砂岩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of sandstone under uniaxial compression



(a) 2号试样声发射计数及应力时间图



(b) 3号试样声发射计数及应力时间图

图4 2号、3号试样声发射计数及应力时间图

Fig. 4 Acoustic emission count and stress time chart of No. 2 and No. 3 groups

2.2 砂岩破坏声发射 R/S 特征分析

Hurst 指数最早由英国水文学家 H. E. Hurst 提出,通常采用 R/S 分析法计算 Hurst 指数。R/S

分析法应用在很多领域,大多与时间有关的序列都可以使用 R/S 分析法。其主要思想是通过改变研究对象时间尺度的大小来研究时间序列的统计性特

征规律^[7-10]。设 t 为时间标度,砂岩破坏过程中声发射计数时间记录序列为

$$\{x(t)\}, t = 1, 2, \dots \tag{1}$$

将时间记录序列分割为长度为 n 的多个连续子区间(最后一个子区间长度可能小于 n),每个子区间的极差为 R ,标准差为 S 。Hurst 分析的经验关系式为

$$\frac{R}{S} \sim (n)^H \tag{2}$$

Mandelbrot^[11-12]得出 $\lg(R/S)$ 与 $\lg n$ 存在线性关系:

$$\lg(R/S)_n = b + H \lg n \tag{3}$$

对 n 和 R/S 进行双对数回归,得到一条直线,该直线的斜率即 Hurst 指数值 H 。式(3)中 b 为直线的截距。当 $H=1/2$ 时,时间序列 $\{x(t)\}$ 是相互独立的随机序列;当 $H>1/2$ 时,研究的时间序列具有持久性,用平均的观点看就是过去呈现增长趋势,未来的发展也呈现增长趋势,反之亦然;当 $H<1/2$ 时,意味着反持久性,即过去呈现增长趋势,则以后呈现降低趋势,反之亦然。

上面的时间序列变化被证明是符合分形规律的,并且分形维数 D_f 值为^[7,13]

$$D_f = 2 - H \tag{4}$$

为了研究砂岩在加载过程不同阶段内部结构损伤演化情况与 H 值、分形维数 D_f 的关系,本文设 2 号砂岩以 45 s 作为一个时间尺度,3 号砂岩以 25 s 作为一个时间尺度,运用 Matlab 编制的相关程序对声发射计数时间序列进行上述过程的计算,得出了各个时间尺度内的 Hurst 指数值 H 和分形维数 D_f 值。每组各个时间尺度内 Hurst 指数值及分形维数 D_f 见表 1、表 2。

表 1 2 号砂岩试样 Hurst 指数值及分形维数 D_f 值
Table 1 Sandstone sample Hurst exponent value and fractal dimension D_f of No. 2 group

时间段/s	Hurst 指数	分形维数 D_f	拟合相关系数
0~45	0.510 71	1.489 29	0.945 90
45~90	0.620 22	1.379 78	0.980 88
90~135	0.676 12	1.323 88	0.926 75
135~180	0.592 36	1.407 64	0.907 93
180~225	0.855 68	1.144 32	0.975 29
225~270	0.787 27	1.212 73	0.966 38
270~315	0.923 55	1.076 45	0.985 94
315~360	0.873 74	1.126 26	0.986 22
360~405	0.870 96	1.129 04	0.969 99
405~450	0.859 89	1.140 11	0.982 54

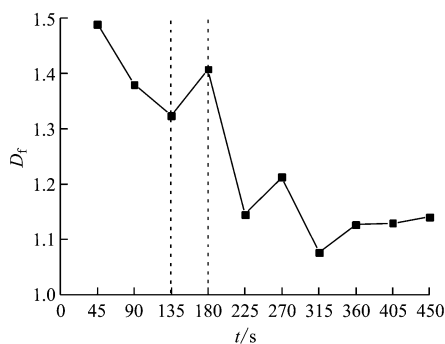
表 2 3 号砂岩试样 Hurst 指数值及分形维数 D_f 值
Table 2 Sandstone sample Hurst exponent value and fractal dimension D_f of No. 3 group

时间段/s	Hurst 指数	分形维数 D_f	拟合相关系数
0~25	0.712 84	1.287 16	0.934 96
25~50	0.850 93	1.149 07	0.985 56
50~75	0.907 97	1.092 03	0.976 65
75~100	0.769 46	1.230 54	0.962 49
100~125	0.756 11	1.243 89	0.995 42
125~150	0.724 86	1.275 14	0.995 78
150~175	0.863 42	1.136 58	0.974 82
175~200	0.897 76	1.102 24	0.987 06
200~225	0.854 57	1.145 43	0.983 78
225~257	0.957 45	1.042 55	0.986 92

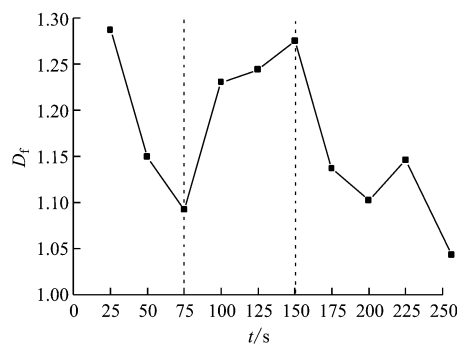
由表 1、表 2 可以看出,Hurst 指数值均大于 1/2,拟合相关系数均大于 0.90,说明砂岩破坏过程中的声发射计数时间序列符合 R/S 统计规律,并呈现持久性,即从平均的观点看,在砂岩破坏前,随着加载的进行,砂岩破坏产生的声发射信号整体上呈现增长趋势。

通过得出的 Hurst 指数值进一步计算出分形维数 D_f 值,2 组砂岩破坏声发射信号的分形维数在 1~1.5 之间,数值上虽然有所差别,中间过程出现波动,但整体上分形维数随时间的变化趋势一致。2 号、3 号试样声发射计数分形维数 D_f 值曲线如图 5 所示。图 5 反映了砂岩加载破坏不同时间尺度上的分形维数值变化情况,可看出 2 号试样在 0~135 s 时,应力峰值的 0~30.6%处,3 号试样在 0~75 s 时,应力峰值的 0~29.8%处, D_f 值下降,此阶段中,砂岩内部原始孔隙、裂隙在外载荷作用下逐渐压实变密,微裂纹减少;2 号试样在 135~180 s 时,应力峰值的 30.6%~40.6%处及 3 号试样在 75~150 s 时,应力峰值的 29.8%~58.4%处,分形维数 D_f 值上升,且 2 号试样持续时间较 3 号试样时间短,这一阶段中,砂岩试样中的原始孔隙、裂隙在压实变密之后,在外载荷的进一步作用下,开始产生新的微裂纹,并稳定发展,微裂纹数量呈现增长态势;2 号试样在 180~450 s 及 3 号试样在 150~257 s 期间, D_f 值在经历些许波动后(可能与新产生的微裂纹在外载荷作用下发展形成局部不均的较大裂纹造成)降到最低,同时砂岩在外载荷作用下遭到破坏,在这一阶段,微裂纹数量减少,新产生的微裂纹发展成与主应力方向相同的大裂纹并逐渐贯通,最终导致了砂岩的破坏。通过以上分析得出,基于 R/S 分

析法,通过 Hurst 指数计算出的砂岩声发射计数时间序列的分形维数 D_f 值的变化与砂岩破坏过程微裂纹的发展情况基本一致,两者都经历了下降-上升-下降的过程,并且在砂岩破坏时,微裂纹彻底发展,形成了与主应力方向相同的大裂纹,分形维数 D_f 值也下降到了最低值。



(a) 2号试样声发射分形维数 D_f 值曲线



(b) 3号试样声发射分形维数 D_f 值曲线

图5 2号、3号试样声发射计数分形维数 D_f 值曲线

Fig. 5 Fractal dimension D_f curve of acoustic emission count of No. 2 and No. 3 groups

3 结论

基于 R/S 时间序列分析法,运用 Matlab 编制的相关程序对砂岩破坏过程中时间序列各个阶段的声发射信号进行处理,得到了 Hurst 指数值随时间变化的分形维数,对试验结果进行分析,得出以下结论:

(1) 将砂岩加载过程产生的声发射信号与砂岩破坏不同阶段内部裂纹演化情况进行对比,可以看出,声发射信号与砂岩加载过程中产生的破裂具有很好的对应关系。

(2) 砂岩破坏过程中产生的声发射信号时间序列遵循 R/S 统计规律及分形规律,并且 Hurst 指数值在每个时间段内均大于 1/2,拟合相关系数均大于 0.90,说明此时间序列呈持久性,即随着砂岩试样加载的进行,产生的声发射信号整体上呈增长趋势。

(3) 通过 Hurst 指数值计算出的各个时间阶段分形维数 D_f 值呈现下降-上升-下降的特点,并在砂岩破坏时达到最低,这与砂岩内部微裂纹的发展是一致的。

参考文献(References):

[1] 陈依珂,胡淑婷,周家俊,等.单轴压缩条件下砂岩声发射特性研究[J].工程与试验,2016,56(2):19-22.
CHEN Yike, HU Shuting, ZHOU Jiajun, et al. Experimental research on acoustic emission characteristics of sandstone on the condition of uniaxial compression[J]. Engineering & Test, 2016, 56(2): 19-22.

[2] 姜永东,鲜学福,尹光志,等.岩石应力应变全过程的声发射及分形与混沌特征[J].岩土力学,2010,31(8):2413-2418.
JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, YIN Guangzhi, et al. Acoustic emission, fractal and chaos characters in rock stress-strain procedure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2413-2418.
[3] 李博.单轴加载砂岩声发射特性研究[D].兰州:兰州大学,2014.
[4] 张黎明,马绍琼,任明远,等.不同围压下岩石破坏过程的声发射频率及 b 值特征[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2057-2063.
ZHANG Liming, MA Shaoqiong, REN Mingyuan, et al. Acoustic emission frequency and b value characteristics in rock failure process under various confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2057-2063.
[5] 陈宇龙,魏作安,许江,等.单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J].煤炭学报,2011,36(增刊2):237-240.
CHEN Yulong, WEI Zuoan, XU Jiang, et al. Experimental research on the acoustic emission characteristics of rock under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 237-240.
[6] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等.岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3383-3390.
YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3383-3390.

- [7] 王恩元,何学秋,刘贞堂.煤岩变形及破裂电磁辐射信号的 R/S 统计规律[J].中国矿业大学学报,1998,27(4):19-21.
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang. R/S statistic rule of EME during deformation and fracture of coal and rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(4): 19-21.
- [8] 李忠辉.受载煤体变形破裂表面电位效应及其机理的研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):153-154.
LI Zhonghui. Study on surface potential effect and its mechanism of coal during deformatoin and fracture under load[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 153-154.
- [9] 李业学,刘建锋.基于 R/S 分析法与分形理论的围岩变形特征研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(3):43-48.
LI Yexue, LIU Jianfeng. Study on deformation characteristic of surrounding rock by R/S method and fractal theory[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 43-48.
- [10] 金友渔,孟宪国.地质时间空间序列定量分析[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
- [11] MANDELBROT B. 分形对象:形、机遇和维数[M].文志英,苏虹,译.北京:世界图书出版公司,1999.
- [12] 孙霞,吴自勤,黄昀.分形原理及应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [13] TURCOTTE D L. 分形与混沌在地质学与地球物理学中的应用[M].陈颙,郑捷,李颖,译.北京:地震出版社,1993.