



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

郭海峰,宋大钊,何学秋,等.冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):38-46. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.006

GUO Haifeng, SONG Dazhao, HE Xueqiu, et al. Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (9): 38 - 46. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.09.006

## 冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

郭海峰<sup>1</sup>,宋大钊<sup>1</sup>,何学秋<sup>1,2,3</sup>,娄全<sup>4</sup>,邱黎明<sup>1</sup>

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083;2.School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW 2522, Australia;3.中安安全工程研究院,北京 100083;4.河南城建学院 市政与环境工程学院,河南 平顶山 467036)

**摘要:**为研究冲击倾向性煤单轴压缩过程中不同损伤程度声发射分形特征,对冲击倾向性煤进行了单轴压缩试验,基于声发射振铃次数损伤模型和声发射参数时间序列分形维数计算模型,对煤样破坏过程中的损伤演化 and 不同损伤程度分形维数进行了研究。研究表明:煤样有大破裂产生时,声发射会出现阶段性增高的现象,较大振铃次数的产生是裂纹扩展、集聚过程中能量释放的结果,冲击煤声发射活动频发大都发生在应力应变全过程的后期;煤样的损伤应变过程可分为 3 个阶段:初始损伤阶段、损伤演化阶段、损伤持续增长阶段,各阶段的声发射振铃次数占比分别为 1.61%、14.83%、83.56%,冲击煤损伤持续增长阶段的时间占比少,但声发射振铃多。随着煤样损伤程度的增加,声发射分形维数先增大,当煤样损伤程度达到 30% 后突然下降,然后保持波动上升,在煤样损伤程度达到 80% 时,达到局部峰值后,发生突降,整体变化趋势呈现倾斜的“M”型。分形维数达到峰值后发生突降的现象可作为煤样失稳破坏的前兆信息。

**关键词:**冲击倾向性;振铃次数;损伤程度;声发射;分形维数

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0038-09

## Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal

GUO Haifeng<sup>1</sup>, SONG Dazhao<sup>1</sup>, HE Xueqiu<sup>1,2,3</sup>, LOU Quan<sup>4</sup>, QIU Liming<sup>1</sup>

(1.School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW 2522, Australia; 3. Zhong-an Academy of Safety Engineering, Beijing 100083, China; 4.School of Municipal and Environmental Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

**Abstract:** In order to study the fractal characteristics of acoustic emission with different damage degrees in the uniaxial compression process of coal samples with impact tendency, the uniaxial compression test is carried out on the impact-prone coal. the damage model of acoustic emission ringing count and the fractal dimension calculation model of the time series of acoustic emission parameters are used to study the damage evolution in the process of coal sample failure and the fractal dimension of different damage degrees. The research shows that whenever there is a large rupture of coal samples, the acoustic emission will increase gradually. The generation of large ringing count is the result of energy release during crack propagation and aggregation. Most of the frequent acoustic emission phenomena of impact coal occur in the later stage of the whole process of stress-strain; the damage strain process of coal samples can be divided into three stages: initial damage stage, damage evolution stage, and continuous damage growth stage. The acoustic emission ringing counts of each stage are 1.61%, 14.83%, and 83.56% respectively. The duration of the sustained growth stage of the coal impact damage is less, but the acoustic emission ringing is more; as the degree of coal sample damage increases, the fractal dimension of acoustic emission increases first. When the damage of coal sample reaches 30%, it suddenly drops, and then keeps fluctuating. When it reaches 80%, after reaching the local peak, a sudden drop occurred and the overall trend showed a tilted "M" shape. The phenomenon that the fractal dimension reaches a peak and then a sudden drop can be used as a precursor to the instability of the coal sample.

**Key words:** impact tendency; ringing count; damage degree; acoustic emission; fractal dimension

收稿日期:2020-12-25;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774023, 51634001);中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-TP-18-007C1)

作者简介:郭海峰(1994—),男,河南平顶山人,硕士。E-mail:guohaifeng326@126.com

## 0 引言

随着煤炭开采的持续进行,我国煤炭进入深部开采阶段,冲击地压灾害的强度尤为猛烈,特别是具有冲击倾向性的煤层,在破裂时释放大量能量,对煤炭的安全开采构成了极大的威胁<sup>[1-2]</sup>。冲击地压的发生,本质上是煤岩体破裂的宏观表现和失稳破坏。大量试验测试、数值模拟和现场测试结果表明煤岩变形破裂过程能够产生声发射信号,且信号强度与煤岩体的损伤程度有关。煤岩声发射参数能够表征材料内部损伤的程度,与煤岩体内部缺陷的演化直接相关<sup>[3]</sup>。因此,声发射能较好地反映煤岩破裂,为监测冲击地压提供理论和技术依据。

前人在煤岩体损伤演化声发射特征方面进行了大量的研究。TANG等<sup>[4]</sup>通过对岩石单轴压缩声发射试验,基于连续损伤力学的方法从细观角度得到了单轴应力状态下岩石基于声发射的损伤模型。杨永杰等<sup>[5-6]</sup>基于利用声发射参数,分析三轴压缩条件下岩石的损伤演化特征,建立基于声发射累计振铃次数的岩石三轴压缩损伤演化模型。王云飞等<sup>[7]</sup>对煤岩进行单轴压缩试验,分析了煤岩破坏过程的声发射和应变能变化规律,并从煤岩损伤萌生、成核、扩展和贯通的过程研究了损伤演化机制。刘保县等<sup>[8]</sup>对单轴压缩煤岩的损伤演化及声发射特性进行试验研究,提出基于“归一化”累积声发射振铃次数的损伤变量,建立基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型。WANG等<sup>[9]</sup>基于声发射的内部裂缝损伤演化研究,得到声发射响应规律及裂缝演化特征的研究能够很好地反映煤岩体的变形、应力、裂缝发育规律。

煤层赋存环境复杂,冲击地压等动力灾害的预测比较困难,分形理论作为现代非线性科学研究中一个重要的分支,是研究非线性系统的有效工具,分形维数具有更好的稳定性和直观性<sup>[10]</sup>,对于声发射特征分析具有良好的效果,因此,可以采用分形理论对声发射进行处理,提高冲击地压预测的准确率。自20世纪70年代分形理论创立以来<sup>[11]</sup>,众多学者进行了大量的研究,谢和平<sup>[12]</sup>将损伤力学与分形几何相结合,开辟了岩石分形理论研究的新领域。吴贤振等<sup>[13]</sup>通过对不同岩性的岩石进行单轴压缩声发射试,对比了不同岩石的力学性质、岩石声发射序列的时域特征和声发射序列的分形特征。姜永东等<sup>[14]</sup>研究了岩石应力-应变全过程的声发射特征,得到其损伤的发展具有分形特征和统计自相似性。高保彬等<sup>[15-16]</sup>对不同煤岩进行了单轴压缩声发射

及分形特征研究,得到分形维数在煤岩破坏前会出现突降现象。李元辉等<sup>[17]</sup>在单轴压缩下计算了声发射的 $b$ 值,并且分析了声发射序列的分形特征,认为声发射 $b$ 值和声发射分形维数的变化趋势相似。刘京红等<sup>[18]</sup>通过对单轴压缩声发射试验信号进行分形特征研究,运用分形理论建立了声发射参数分形维数计算模型;张黎明等<sup>[19]</sup>对大理岩卸围压变形破坏全过程的声发射进行分形维数的计算,发现分形维数在应力达到峰值强度的80%附近出现陡增,破坏时分形维数又出现大幅降低。李庶林等<sup>[20]</sup>通过对3种岩石试样进行单轴循环加载试验,利用G-P算法求得事件率和能量率关联分维,得到声发射事件率、能量率和空间分布都具有分形特性。向高等<sup>[21]</sup>在基于声发射振铃次数的损伤模型和基于声发射定位点空间演化的分形维数计算的基础上,对盐岩变化破坏过程中的损伤变量和分形维数进行了研究。

以上关于煤岩体破裂与声发射特征和声发射分形特征的研究促进了人们对于煤岩体破裂声发射分形特征的认识。但是关于冲击倾向性煤样不同损伤程度声发射分形特征的相关研究还较少。煤体破裂产生声发射,其实是煤体内部损伤演化的结果,煤岩失稳破坏发生动力灾害的过程,本质上是内部缺陷损伤演化到大规模宏观破坏的过程,因此,从损伤的角度研究煤体破裂声发射分形特征就显得尤为重要。利用声发射分形特征反映煤体损伤程度能定量揭示煤体失稳破坏过程,深刻理解煤体破坏机制,为声发射监测动力灾害提供依据。大同某矿为冲击地压矿井,其开采过程中深受冲击地压灾害的影响,严重制约着矿井的安全生产。基于此,通过对冲击倾向性煤体进行单轴压缩试验,研究不同阶段煤体损伤声发射特征,对煤体损伤的声发射分形特征进行探索,旨在研究煤岩体失稳破坏前兆信息,为预防煤岩动力灾害提供参考依据。

## 1 声发射试样制备与试验系统

为测试冲击倾向性煤损伤声发射特征,从大同煤业集团某冲击倾向性煤层取大块煤样进行加工,其煤层为典型的弱冲击倾向性煤层,按照GB/T 23561.2—2009《煤岩和岩石物理力学性质测定方法》将煤样加工为直径50 mm、高100 mm、两端平行度小于0.05 mm的标准煤样。为防止试验过程中煤样局部破裂导致声发射传感器掉落,保证数据的可靠性,使用3个声发射传感器,传感器之间在平面投影上的角度为120°,煤样上部2个,下部1个。为

保证声发射传感器与煤样充分接触,信号接收良好,在声发射传感器和煤样之间涂抹凡士林。

试验系统包括压力机、传感器、前置放大器、声发射仪和计算机等(图1)。压力机采用北京科技大学 YAW-600 微机控制电液伺服压力试验机,该试验机具备力、位移、变形 3 种控制方式,可实现长时间保载、保载精度高,可设定复杂的压缩试验程序,如位移控制和载荷控制循环加卸载等。试验机主机刚度 $>5\,000\text{ kN/mm}$ ,最大试验力 $600\text{ kN}$ ,载荷分辨率 $3\text{ N}$ ,位移分辨率 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,控制器采样频率 $1\,000\text{ Hz}$ ,

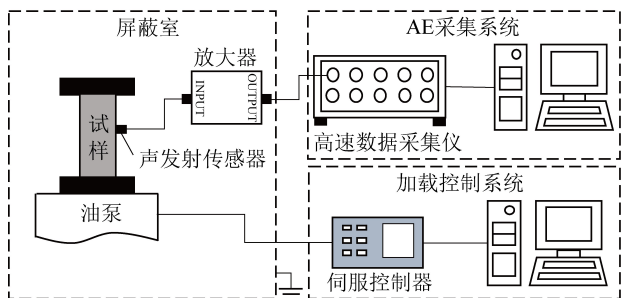


图1 试验系统示意

Fig.1 Diagram of experimental system

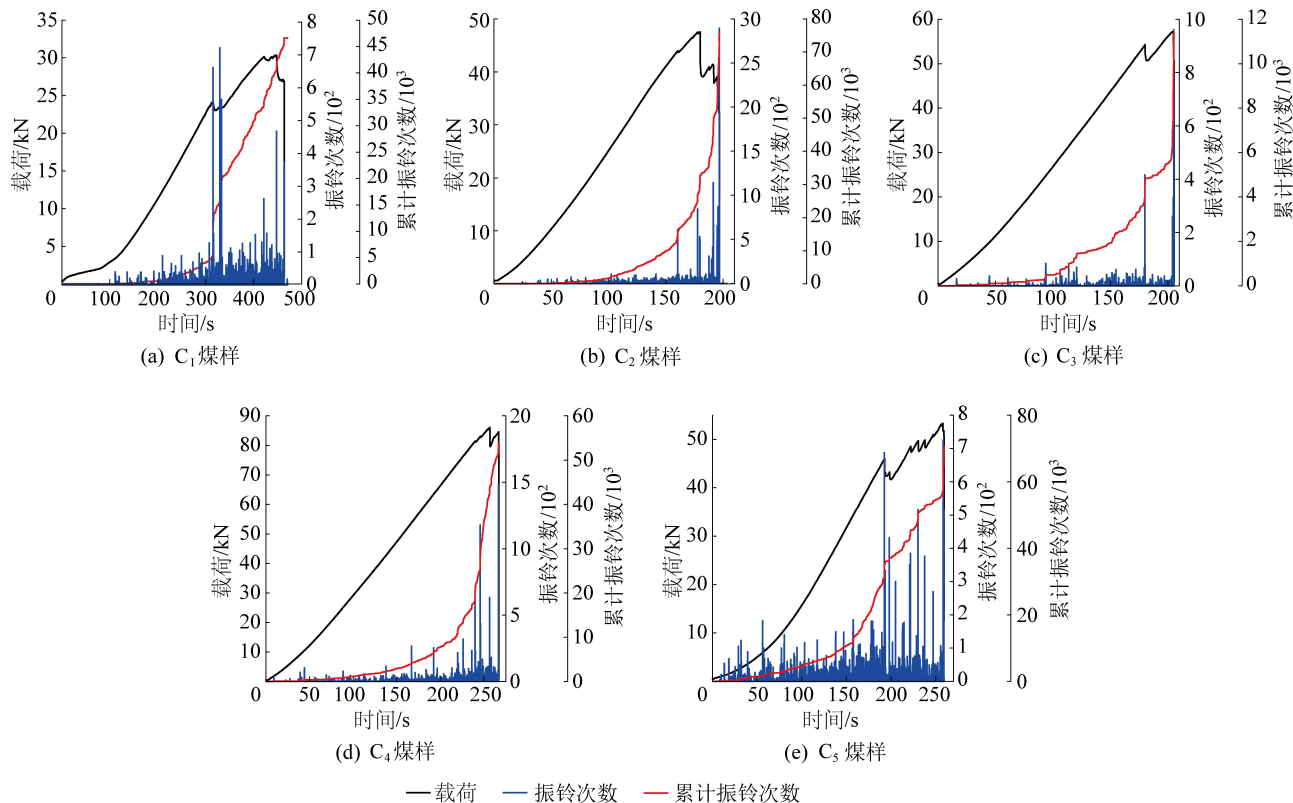


图2 载荷、实时和累计振铃与时间的关系

Fig.2 Relationship of load, real-time and cumulative ringing and time

由图2可知,试样加载初期,声发射振铃次数少量产生,处于阵发阶段。随着载荷的增加,声发射振铃次数也持续增加,当载荷达到一定程度时,煤体发

引伸计分辨率 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ ,光栅尺分辨率 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。与之匹配的软件系统具有自动采集存储试验数据,实时显示试验状态,同时绘制多种试验曲线(应力-应变、力-时间、力-位移、力-变形、位移-时间、变形-时间等曲线),并且可以在试验过程中任意切换等。

采集系统主要由高速数据采集仪和数据存储与分析计算机组成。高速数据采集仪拥有12个数据采集通道,信号同步触发,最高采频 $10\text{ MHz}$ ,A/D转换精度16-bits,输入信号电压范围 $\pm 5\text{ V}$ ,输入阻抗为 $50\text{ }\Omega$ 。该系统可同时对声发射信号进行全波形、实时、同步采集。声发射传感器响应频率 $50\sim 400\text{ kHz}$ ,与之匹配的前置放大器放大倍数20、40、60 dB可调,内置滤波器频带 $20\text{ kHz}\sim 1.5\text{ MHz}$ ,输入阻抗 $>10\text{ M}\Omega$ ,输出阻抗 $50\text{ }\Omega$ 。试验加载方式选择位移控制,加载速率为 $0.002\text{ mm/s}$ 。

## 2 声发射试验结果及分析

试验过程中采集了煤样的应力应变参数和声发射特征参数,得到载荷、声发射振铃次数及累计声发射振铃次数与时间的关系曲线如图2所示。

生小规模破裂,此时声发射振铃次数显著增加,达到局部最高值,之后又显著降低,但声发射振铃次数始终保持一定水平,当达到峰值载荷时,伴随着试件的



破裂,声发射振铃次数达到峰值。纵观煤样受载破坏全过程,每当煤样产生大的破裂,声发射就会出现阶段性增高的现象,声发射振铃次数的增长不一定是连续的,也可能是跳跃性的,出现较大的振铃次数是裂纹扩展、集聚过程中能量释放的结果,声发射与煤样破坏有很好的对应关系。

以  $C_5$  煤样为例,分析冲击倾向性煤样在单轴压缩情况下的声发射特征。煤样加载初期(0~75 s),此阶段声发射累计振铃次数为 2 615,占应力应变全过程的 3.71%,由于煤样处在地下复杂的地质环境中,其内部已产生各种微裂缝和孔隙,随着载荷的增加,内部微裂缝开始闭合,故此时有少量振铃次数相对较高的声发射事件产生。第 2 阶段(75~157 s),此阶段声发射累计振铃次数为 11 652,占应力应变全过程的 12.81%,当微裂缝、孔隙被压实,煤样开始储存弹性能,发生弹性变形,此阶段后期煤样内部原有裂缝开始扩展,且有少量的晶体滑动,微裂纹开始萌生,故声发射振铃次数较小,基本无较大振铃次数声发射,处于相对平静阶段。第 3 阶段(157~260 s),此阶段声发射累计振铃次数为 58 893,占应力应变全过程的 83.48%,煤体达到塑性阶段,随着载荷的持续增加,当煤体内部强度不足以承受较大载荷时,煤体发生宏观破裂,此时声发射振铃次数达到历史最大值,煤体内部已产生大量裂缝,各种裂缝相互贯通、汇合,集聚的能量大量释放,导致煤样声发射事件进入活跃阶段,产生较大振铃次数的声发射事件,直至煤样达到峰值强度,声发射振铃次数也达到峰值,煤样发生主破裂,瞬间失稳破坏,没有产生残余强度,表现出冲击倾向性煤样特有的脆性破坏。冲击倾向性煤在试验前期声发射信号相对较少,宏观上表现为煤样内部的细微破裂或不破裂,在试验后期,声发射信号异常活跃,每当应力降低,就会产生大量声发射信号,整体表现为前期少,后期多的特征;而非冲击煤在试验全过程都存在大量声发射信号,在宏观上表现为煤样的缓慢逐渐破裂,如图 3 所示。

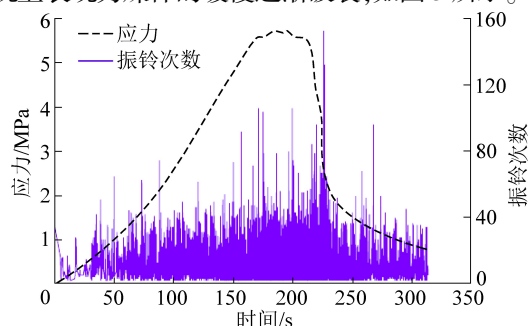


图 3 非冲击煤声发射<sup>[16]</sup>

Fig.3 Acoustic emission of non impact coal<sup>[16]</sup>

### 3 煤样损伤声发射分形特征

#### 3.1 煤样声发射损伤特征

煤岩材料内部构造极不均匀,微元内所含的缺陷程度不等,微元强度也将各异,可能存在许多薄弱环节。在外载的作用下,煤岩内部细观结构将发生变化,诸如微孔隙、微裂缝之类的各种原有微缺陷将进一步发展,而同时还会有新的微缺陷产生,因此煤岩微裂纹的萌生、扩展和演化,体积元的破裂,宏观裂纹的形成,裂纹稳定发展和失稳破坏的过程就是损伤演化的过程<sup>[22]</sup>。

损伤力学起源于 KACHANOV 提出的连续性因子和有效应力的概念<sup>[23]</sup>,RABOTNOV<sup>[24]</sup>在研究金属蠕变时提出了一个与连续性应变相对应的变量  $D$ ,称为损伤变量,即

$$D = A^* / A \quad (1)$$

式中: $A^*$ 为发生微裂纹、微孔隙等受损材料的损伤面积; $A$ 为无损材料的初始横截面积; $D=0$ 为无损材料状态, $D=1$ 为材料完全破坏的状态, $0 < D < 1$ 为材料不同损伤程度的状态。

假设无损材料的整个截面完全破坏时产生的声发射累计振铃为  $N_m$ ,则单位面积微元破坏时产生的声发射振铃为  $N_0$ 为

$$N_0 = N_m / A \quad (2)$$

当截面损伤面积为  $A_d$ ,此时声发射累计振铃次数  $N_d$  为

$$N_d = N_0 A_d = N_m A_d / A \quad (3)$$

则由式(1)和式(3)得

$$D = N_d / N_m \quad (4)$$

由式(4)可得到煤样应力、损伤变量与应变的关系如图 4 所示。煤样损伤应变过程可分为 3 个阶段:初始损伤阶段、损伤演化阶段、损伤持续增长阶段。各阶段声发射振铃次数占比见表 1。

由表 1 可得,煤样单轴压缩过程不同损伤阶段的时间和声发射占比有较大差异,在初始损伤阶段声发射振铃次数占比较低,在损伤持续增长阶段声发射振铃次数占比较高,这与煤样本身的性质有关。初始损伤阶段煤样在天然赋存状态下受到应力与地质构造的作用,内部存在少量原始微裂缝,在煤样受载过程中微裂缝逐渐开始闭合,但在宏观层面上并未表现出破裂的萌生,表现出声发射振铃次数的响应,虽然此阶段持续时间较长,占单轴压缩全过程的 34.91%,但声发射振铃次数只占 1.61%,煤样损伤程度较小;随着载荷的持续增加,煤样进入损伤演化阶段,此阶段包括典型应力-应变曲线的弹性阶段,煤

样内部孔隙裂缝闭合,储存大量的弹性能,在此阶段的中后期,伴随着较高的载荷,煤样内部新的微裂缝开始萌生、演化和发展,当邻近峰值应力的 80%,煤样内部裂缝逐渐趋于贯通,此时煤样处于不稳定的平衡状态,此阶段时间占单轴压缩全过程的 37.53%。由于新裂缝的萌生、演化和发展,故有一定量的声发射产生,占 14.83%,此时煤样已有一定程度的损伤;进入损伤持续增长阶段,煤样内部各种裂缝贯通,内部损伤程度较为严重,储存的弹性能大量释放,在宏观程度上表现为煤样局部破裂的产生,

对应的声发射振铃次数较多,此阶段占全过程的 27.56%,但声发射振铃次数占全过程的 83.56%。每当发生应力降,煤样的损伤程度就会出现直线或跳跃式增加,说明在煤样变形破坏后期,相同轴向应力的增加,会对煤样造成更大的损伤,而非冲击倾向性煤在全过程的声发射均相对稳定增长,其损伤程度也相对稳定增长。在应力应变后期相同时间内,冲击煤产生的声发射更多,这是因为冲击倾向性煤脆性大,在前期只有少量损伤,并储存大量弹性能,而在后期突然释放,表现为煤样的局部破裂或整体破坏。

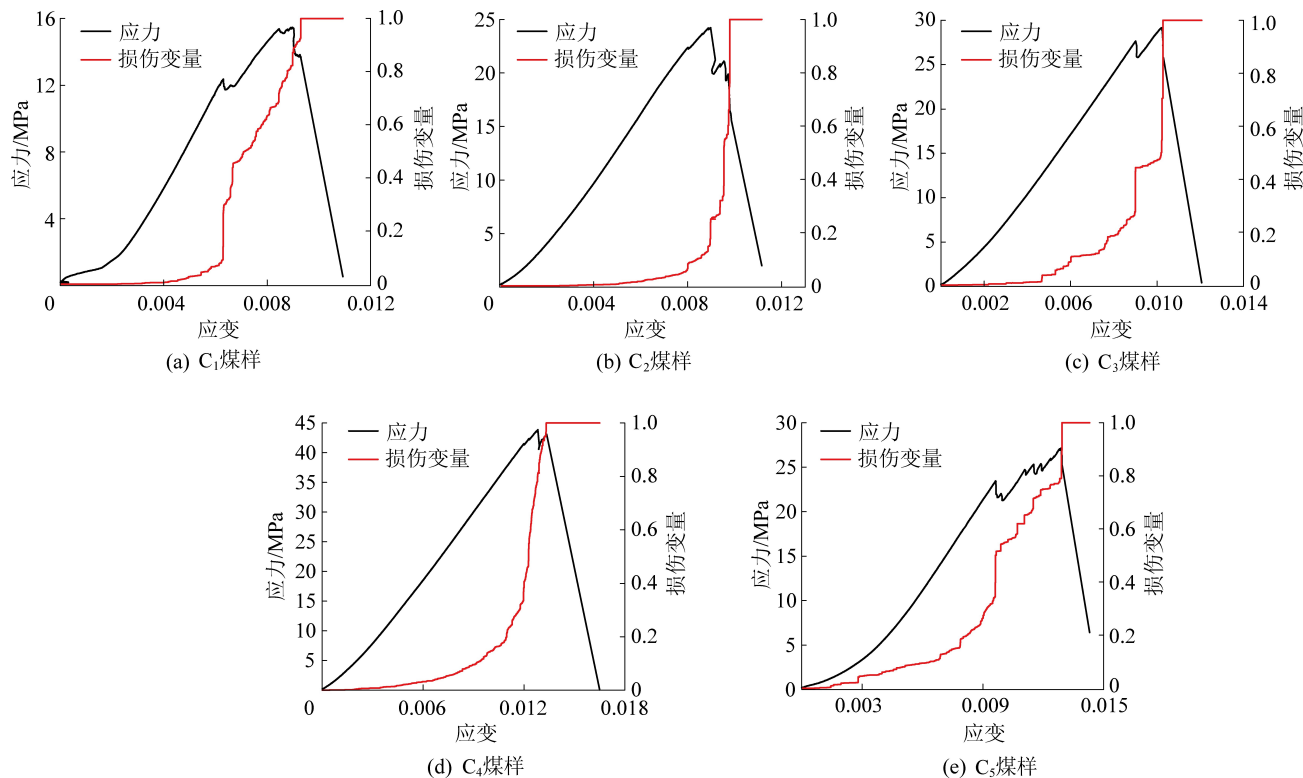


图 4 应力、损伤变量与应变的关系

Fig.4 Relationship of stress, damage variable and strain

表 1 声发射各个阶段占比

Table 1 Accounting of AE signals at different loading stages

煤样	初始损伤阶段占比/%		损伤演化阶段占比/%		损伤持续增长阶段占比/%	
	时间	振铃	时间	振铃	时间	振铃
C <sub>1</sub>	34.04	0.61	32.96	10.95	32.00	88.44
C <sub>2</sub>	40.35	1.16	39.49	16.51	20.16	82.33
C <sub>3</sub>	44.94	2.41	28.71	15.18	26.35	82.41
C <sub>4</sub>	33.90	1.72	47.85	16.97	18.25	81.31
C <sub>5</sub>	21.33	2.15	38.66	14.55	40.01	83.30
平均	34.91	1.61	37.53	14.83	27.56	83.56

### 3.2 煤样声发射分形特征

分形理论是现代非线性科学研究中十分活跃的一个数学分支,在物理、地质、材料科学以及工程技

术中都有着广泛的应用。分形维数是定量刻画分形特征的参数,表征分形体的复杂程度。采用关联维数描述冲击倾向性煤变形破坏过程中声发射分形特征,常用的关联维数计算方法为 G-P 算法。G-P 算法是将声发射参数序列作为研究对象,每一声发射基本参数序列对应于一个容量为  $n$  的序列集  $X_n$

$$X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (5)$$

其中,  $x_i$  为声发射基本参数,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。由式(5)可构成一个  $m$  维的向量空间,先取其中  $m$  个数作为  $m$  维空间的一个向量,记为

$$X_1 = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (6)$$

然后向后移动一个数据再取  $m$  个,构成第 2 个空间向量,以此类推,共构成  $N = n - m + 1$  个向量。相应的关联函数  $W(r)$  为

$$W(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (7)$$

其中; $H$  为 Heaviside 函数; $X_i$ 、 $X_j$  为第  $i$ 、 $j$  个向量; $r$  为给定的尺度,为避免分散性, $r$  的取值如下:

$$r = k \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \|X_i - X_j\| \quad (8)$$

其中; $k$  为系数。对于给定的  $r$ , 总有相应的关联函数  $W(r)$  与之对应, 将对应的值描绘在双对数坐标系中, 得到  $(\lg W(r), \lg r)$ , 分别取不同的  $k$ , 在双对数坐标系中得到多组坐标值, 将得到的坐标值进行一元线性回归, 回归函数的斜率即为分形维数。

研究表明不同的相空间维数  $m$  对关联分维值有一定的影响, 在计算过程中为准确体现出声发射参数的分形特征, 应采用相同的相空间维数  $m$ 。C<sub>1</sub> 煤样的关联维数随  $m$  的变化如图 5 所示, 由图 5 可知, 当相空间维数  $m$  从 2 增加到 6 时, 随着相空间维数的增大, 关联维数也随之增大, 但当相空间维数为 7 时, 关联维数的增长趋势逐渐趋于平缓, 根据前人的研究结果, 采用几何不变量法确定相空间维数, 选用  $m=7$  进行声发射分形特征分析。

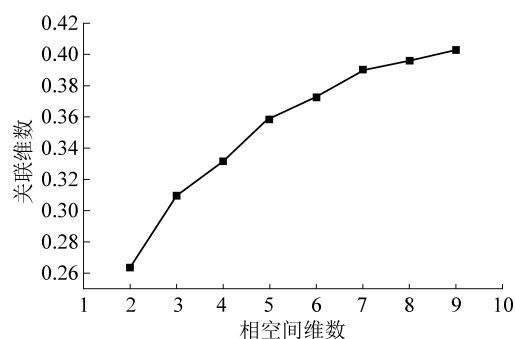


图 5 关联维数与相空间维数的关系

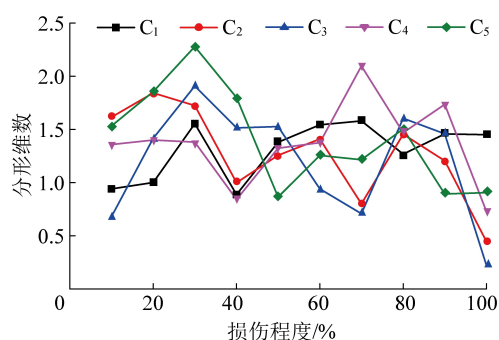
Fig.5 Relationship between correlation dimension and phase space dimension

将声发射振铃次数时间序列作为研究对象, 根据式(4)声发射损伤模型对单个煤样的累计声发射振铃次数进行处理, 得到煤样单轴压缩过程中不同时刻的损伤程度; 将煤样不同损伤程度的声发射实时振铃次数按照声发射分形维数计算模型进行 G-P 算法的处理, 通过取  $k=0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4$ , 对应得到不同的声发射分形维数, 然后进行一元线性回归, 得到不同损伤程度的分形维数, 见表 2, 声发射分形特征如图 6 所示。

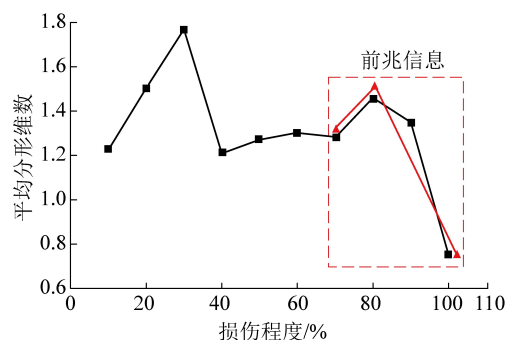
表 2 不同损伤程度煤样分形维数

Table 2 Fractal dimension values of coal samples in different damage levels

煤样	不同损伤程度分形维数									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
C <sub>1</sub>	0.94	1.00	1.55	0.89	1.38	1.54	1.58	1.27	1.46	1.45
C <sub>2</sub>	1.62	1.84	1.72	1.00	1.26	1.41	0.80	1.46	1.21	0.45
C <sub>3</sub>	0.68	1.42	1.91	1.52	1.53	0.94	0.71	1.60	1.46	0.22
C <sub>4</sub>	1.36	1.40	1.38	0.84	1.33	1.38	2.10	1.47	1.74	0.73
C <sub>5</sub>	1.53	1.86	2.28	1.80	0.87	1.26	1.22	1.50	0.89	0.91
平均	1.23	1.50	1.77	1.21	1.27	1.31	1.28	1.46	1.35	0.75



(a) 不同煤样分形维数



(b) 平均分形维数

图 6 不同损伤程度声发射分形特征

Fig.6 Fractal characteristics of acoustic emission in different damage levels

由图 6a 可知, 冲击倾向性煤样单轴压缩过程中不同损伤程度声发射的分形维数也不相同, 整体的变化趋势为随着煤样加载的进行, 试件损伤持续发

生, 声发射振铃次数分形维数出现先增大的趋势, 当煤样损伤达到程度 30% 时, 声发射分形维数达到一个峰值, 随着损伤的继续演化, 声发射分形维数出现



突降的趋势,然后保持波动上升,在煤样损伤程度达到 80% 时,分形维数达到另一峰值,随后随着煤样损伤程度达到 100%,即煤样破坏时,分形维数持续下降,达到历史最低点。纵观 5 组冲击倾向性煤样单轴压缩不同损伤程度声发射分形维数变化过程,整体变化趋势呈现倾斜的“M”型。

为更加准确分析煤样声发射分形维数的变化规律,将 5 组煤样不同损伤程度的分形维数进行平均得到不同损伤程度的平均分形维数。由图 6b 可知,煤样不同损伤程度声发射分形维数的变化趋势整体呈现一个倾斜的“M”型。煤样初期加载阶段,分形维数由 1.23 增加至 1.77,增长率为 43.9%,这是因为煤样在加载初期裂缝闭合,之后有一段时间的弹性变形。从 3.1 节可知,冲击煤的声发射大多发生在损伤持续增长阶段,前期声发射活动相对平静,故煤样损伤程度达到 30% 之前,分形维数处于增加的趋势。煤样进入损伤持续增长阶段,由于冲击煤的脆性较大,当载荷发生稍降,煤样产生较大的裂纹或发生局部破坏,声发射活动频繁,此时的分形维数发生突降达到 1.21,降低率为 30.51%,但煤样还未达到峰值强度。随着载荷的增加,煤样内部各种裂缝孔隙产生,损伤程度不断增加,声发射活动频繁。在达到峰值应力之前,伴随着煤样损伤的持续发展,声发射分形维数处于不断增长的趋势。当煤样损伤程度达到 80%,声发射分形维数增加到 1.46,增长率为 20.66%,达到另一个峰值,此时煤样达到峰值强度,煤样内部裂缝全面贯通,宏观程度上表现为裂纹的扩大,煤样局部和整体的失稳,声发射分形维数表现为连续的突降。当损伤程度为 100%,即煤样完全破坏时,分形维数达到历史最低点 0.75,降低率为 49.32%。由于冲击煤特有的脆性,这一过程在较短的时间内完成。因此,冲击倾向性煤样在单轴压缩过程中不同损伤程度声发射的变化规律表现出倾斜的“M”型,声发射振铃次数的分形维数会在损伤程度为 80% 附近出现最大值,并且之后会出现突降现象。

## 4 讨 论

### 4.1 煤样声发射分形演化规律

材料或结构受力作用时会发生变形或断裂,其以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射(acoustic emission, AE)。同其他材料一样,受力的岩石和煤样因储存在其结构内部的应变能的释放而诱发产生脉冲,这种脉冲以弹性波的形式出现<sup>[25]</sup>。因此,声发射参数能表示煤岩破裂的产生,而煤岩体破

裂是煤岩体内部材料损伤演化的结果,故声发射参数能表示煤岩体内部损伤的演化和发展。大量研究表明,煤岩在失稳破坏过程中声发射时间序列具有分形的特征。从上述分析研究中可以看出,冲击倾向性煤样声发射具有分形特征,在煤样受载初期,分形维数先增大到最大值,然后出现突降,随后波动上升到局部最大值,最后在煤样完全破坏前分形维数急剧下降到最小值。分形维数是煤体系统混乱的度量,能够较好的表示煤体内部损伤的发生和发展过程,在煤岩稳定的初始加载阶段,声发射的分形维数先增大,煤样内部各种裂缝闭合,损伤逐渐开始发生发展;随着载荷的持续增加,煤样内部损伤开始快速增加并逐渐产生较大破裂;当载荷达到峰值强度,煤体声发射振铃次数由于煤体局部大尺度的破裂而增大,在声发射分形特征上表现为分形维数的急剧下降,直到煤样发生完全破坏,分形维数降到最低值。谢和平<sup>[12]</sup>在研究中发现岩石在破坏过程中是一个有序降维、能量耗散的过程,高保彬等<sup>[26]</sup>、刘京红等<sup>[18]</sup>在试验中进一步证实了该观点。

### 4.2 煤样破坏声发射分形前兆信息

当煤体损伤达到一定程度,发生破裂引发灾害,声发射信号的分形维数可以准确的体现这一前兆信息。通过上述研究可以发现当煤样损伤程度达到 80%,声发射振铃次数分形维数突然开始下降,随着煤样损伤程度的持续增加,直到煤样完全失去承载能力,分形维数降到最低。声发射分形能较好地揭示煤样失稳破裂过程,可将煤样声发射分形维数达到峰值突然急剧下降的现象作为煤样失稳破坏的前兆信息,用来预测冲击地压等煤岩动力灾害,如图 6b 所示。考虑到声发射参数特征与煤样自身的性质和微裂缝的尺度相关<sup>[27-28]</sup>。由于煤在生成过程中,经过泥炭化阶段和煤化阶段的作用,其在复杂的赋存状态下,内部生成各种裂缝和孔隙,自身性质表现出一定的差异,当煤体失稳发生破坏或者产生动力灾害时,声发射参数特征的前兆信息就会受到影响。因此,为准确预防煤岩动力灾害的发生,需结合电磁辐射、扫描电子显微镜等其他方法进行研究。随着矿井采深的增加,煤层赋存条件越发复杂,冲击倾向性煤对防治冲击地压有重要作用,单一参量或指标已不能满足煤矿安全生产的需要,综合多种参量或指标对煤岩体失稳破坏前兆信息进行监测是深部煤层灾害监测预警的新趋势。

## 5 结 论

1) 冲击倾向性煤样受载破坏全过程中,每当煤



样产生大的破裂,声发射就会阶段性增高,声发射振铃次数的增长不一定是连续的,可能是跳跃性的,每次出现较大的振铃次数都是裂纹扩展、集聚过程中能量释放的结果,声发射与煤样破坏有很好的对应关系。相比非冲击倾向性煤,冲击倾向性煤声发射活动频发大都发生在应力应变全过程的后期。

2)冲击倾向性煤样的损伤应变过程可分为3个阶段:初始损伤阶段、损伤演化阶段、损伤持续增长阶段,各个阶段的时间占比分别为34.91%、37.53%、27.56%,各阶段的声发射振铃次数占比分别为1.61%、14.83%、83.56%。相比非冲击倾向性煤,冲击倾向性煤损伤持续增长阶段的时间占比少,但产生的声发射振铃多。

3)冲击倾向性煤样单轴压缩过程中不同损伤程度声发射的分形维数变化趋势为随着煤样损伤程度的增加,声发射分形维数先增大,当煤样损伤达到程度30%后突然下降,然后保持波动上升,在煤样损伤程度达到80%时,达到局部峰值后,发生突降,整体变化趋势呈现倾斜的“M”型。煤样损伤声发射分形维数达到峰值后发生突降的现象可作为煤样失稳破坏的前兆信息。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报,2012,37(4):535-542.  
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, *et al.* Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 邱黎明,李忠辉,王恩元,等. 煤与瓦斯突出远程智能监测预警系统研究[J]. 工矿自动化,2018,44(1):17-21.  
QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, *et al.* Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 17-21.
- [3] TANG Chunan, XU Xiaohu. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. Journal of Seismological Research, 1990, 13(2): 203-213.
- [4] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993.
- [5] 杨永杰,王德超,郭明福,等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104.  
YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, *et al.* Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104.
- [6] 杨永杰,王德超,王凯,等. 煤岩强度及变形特征的微细观损伤机理[J]. 北京科技大学学报,2011,33(6):653-657.  
YANG Yongjie, WANG Dechao, WANG Kai, *et al.* Micro and meso-
- damage mechanism of coal's strength and deformation characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 653-657.
- [7] 王云飞,黄正均,崔芳. 煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2390-2396.  
WANG Yunfei, HUANG Zhengjun, CUI Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2390-2396.
- [8] 刘保县,黄敬林,王泽云,等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3234-3238.  
LIU Baoxian, HUANG Jinlin, WANG Zeyun, *et al.* Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [9] WANG Xiaoran, LIU Xiaofei, WANG Enyuan, *et al.* Experimental research of the AE responses and fracture evolution characteristics for sand-paraffin similar material[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 446-456.
- [10] 纪洪广,王基才,单晓云,等. 混凝土材料声发射过程分形特征及其在断裂分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):801-804.  
JI Hongguang, WANG Jicai, SHAN Xiaoyun, *et al.* Fractal characteristics of AE process of concrete material and application to the fracture analyses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 801-804.
- [11] MANDELBROT B B. Fractals: forms, chance and dimension[M]. San Francisco: W H Freeman, 1977.
- [12] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [13] 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试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(12):3561-3569.  
WU Xianzhen, LIU Xiangxin, LIANG Zhengzhao, *et al.* Experimental study of fractal dimension of AE serials of different rocks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3561-3569.
- [14] 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.
- [15] 高保彬,李贵贵,刘云鹏,等. 单轴压缩下煤岩声发射及分形特征研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(5):986-991.  
GAO Baobin, LI Huigui, LIU Yunpeng, *et al.* Study of acoustic emission and fractal characteristics of coal rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 986-991.
- [16] 高保彬,李贵贵,李林,等. 同组软硬煤煤样声发射及分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3498-3504.  
GAO Baobin, LI Huigui, LI Lin, *et al.* Study of acoustic emission

- and fractal characteristics of soft and hard coal samples with same group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3498-3504.
- [17] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2559-2563.  
LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, *et al.* Study on b-value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2559-2564.
- [18] 刘京红, 姜耀东, 祝捷, 等. 煤岩单轴压缩声发射试验分形特征分析[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 335-338.  
LIU Jinghong, JIANG Yaodong, ZHU Jie, *et al.* Fractal characteristics of coal uniaxial compression acoustic emission test[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(4): 335-338.
- [19] 张黎明, 任明远, 马绍琼, 等. 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.  
ZHANG Liming, REN Mingyuan, MA Shaoqiong, *et al.* Acoustic emission and fractal characteristics of marble during unloading failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2862-2867.
- [20] 李庶林, 林朝阳, 毛建喜, 等. 单轴多级循环加载岩石声发射分形特性试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 92-99.  
LI Shulin, LIN Chaoyang, MAO Jianxi, *et al.* Experimental study on fractal dimension characteristics of acoustic emission of rock under multilevel uniaxial cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 92-99.
- [21] 向高, 刘建锋, 李天一, 等. 基于声发射的盐岩变形破坏过程的分形与损伤特征研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2905-2912.  
XIANG Gao, LIU Jianfeng, LI Tianyi, *et al.* Study of fractal and damage characteristic in the deformation and failure process of salt rock based on acoustic emission[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2905-2912.
- [22] 秦跃平. 岩石损伤力学模型及其本构方程的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 560-562.  
QIN Yueping. Discussion on damage mechanics model and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 560-562.
- [23] KACHANOV L M. Time of the rupture process under creep conditions[J]. Izvestia Akademii Nauk SSR, Otdelenie Technicheskikh Nauk, 1958, 8: 26-31.
- [24] RABOTNOV Y N. On the equation of state for creep[J]. Progress in Applied Mechanics, 1963: 307-315.
- [25] 张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2584-2588.  
ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, *et al.* Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2006, 25(12): 2584-2588.
- [26] 高保彬, 李回贵, 李化敏, 等. 含水煤样破裂过程中的声发射及分形特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 665-670.  
GAO Baobin, LI Huigui, LI Huamin, *et al.* Acoustic emission and fractal characteristics of saturated coal samples in the failure process[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(4): 665-670.
- [27] SONDERGELD C H, ESTEY L H. Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of Westerly granite[J]. Journal of geophysical research: Solid Earth, 1981, 86(B4): 2915-2924.
- [28] 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: Solid Earth, 1982, 87(B5): 3873-3884.