

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2503

基于声发射的盐岩变形破坏过程的分形与损伤特征研究

向 高¹, 刘建锋¹, 李天一², 徐杨梦迪¹, 邓朝福¹, 吴 池¹

(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. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610000)

摘 要:为研究盐岩变形破坏过程中损伤变量和分形维数之间的关系,对取自某地的纯盐岩开展了单轴压缩和三轴压缩试验。在基于声发射振铃计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。研究表明:在盐岩变形破坏过程中,盐岩分形维数逐渐降低,损伤变量逐渐增加,且分形维数下降的各个阶段与损伤变量增加的各个阶段相对应;盐岩变形破坏前分形维数不再明显下降,且不同应力状态下,盐岩变形破坏前分形维数不同;随着围压增大,盐岩变形破坏前分形维数逐渐降低,其中单轴压缩和三轴压缩应力状态时,分形维数分别低于 2.42 和 2.31、2.20 时,预示着试件内部损伤开始汇集,逐渐形成宏观破裂面,导致试件变形破坏;围压对盐岩声发射活动有明显的抑制作用,随着围压的增大,盐岩变形破坏过程中声发射活动逐渐减少,且在此过程中可以发现:在应力加载初期,盐岩分形维数快速下降时所对应的应力百分比逐渐增大,在应力加载后期,当盐岩分形维数不再明显减小时对应的应力百分比逐渐增大;在盐岩变形破坏的加载初期,损伤变量较小,能量释放较少;盐岩变形破坏前损伤变量增加较快,能量快速释放。

关 键 词: 盐岩变形破坏; 声发射; 分形维数; 损伤变量; 能量

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-2905-08

Study of fractal and damage characteristic in the deformation and failure process of salt rack based on acoustic emission

XIANG Gao¹, LIU Jian-feng¹, LI Tian-yi², XU-YANG Meng-di¹, DENG Chao-fu¹, WU Chi¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Uniaxial and triaxial compression tests have been carried out on pure salt rock to study the relationship between damage variable and fractal dimension of salt rock in the deformation and failure process. The damage variable and fractal dimension in the deformation and failure process of salt rock have been studied by using the damage model based on acoustic emission ringing count and fractal dimension calculation based on the spatial distribution of acoustic emission event. The results showed that the fractal dimension of salt rock gradually reduced and the damage variable slowly increased in the deformation and failure process of salt rock. Moreover, each stage of the declined fractal dimension were corresponding to each stage of the increased damage variable. Before the failure of salt rock, the fractal dimension of salt rock was not significantly reduced and was different under different stress states. With the increase of confining pressure, the fractal dimension of salt rock gradually reduced. Under stress states of uniaxial compression and triaxial compression, the fractal dimension of specimen below to 2.42, 2.31 and 2.20 respectively indicated that the internal damage of specimen gathered together to form a macroscopic fracture surface, leading to the specimen deformation and failure. The confining pressure had obvious inhibitory effect on acoustic emission activities. With the increase of confining pressure, there were less acoustic emission activities in the deformation and failure process of salt rock. When the stress state of rock changed from the uniaxial compression process to triaxial compression process, it was found that in the initial loading period, the percentage of stress gradually increased when the fractal dimension of salt rock decreased rapidly. However, in the late loading period, the percentage of stress gradually increased when the fractal dimension of salt rock reduced slightly. In addition, the damage variable

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 四川省青年基金 (No. 2017JQ0003); 国家自然科学基金(No. 51374148, No.51641405)。

This work was supported by the Sichuan Youth Fund (2017JQ0003) and the National Natural Science Foundation of China(51374148, 51641405).

第一作者简介: 向高, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: 597308785@qq.com

通信作者: 刘建锋, 男, 1979 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: liujf@scu.edu.cn

was small and energy releasing was less at the early loading time of the deformation and failure process of salt rock. While the damage variable fast increased and energy quickly released before the failure of salt rock.

Keywords: the deformation and failure of salt rock; acoustic emission; fractal dimension; damage variable; energy

1 引 言

盐岩,因为其良好的致密性和损伤自愈合性质,被国际上公认为石油、天然气等能源地下储备的理想介质,同时也是我国能源地下储备的主要建库场所^[1]。然而,在储气库的运营过程中,由于储气库内压强、温度等的改变,必然会对盐岩储气库造成一定的损伤^[2]。因此,对于盐岩储气库损伤的检测和损伤模型的建立就显得相当重要。声发射检测技术作为一种动态无损评价程序已经被广泛而且成熟地应用于岩土工程、地震预测和岩体破坏预测^[3]。

目前,国内外对岩石声发射特征进行了大量的研究。其中,在岩石声发射与损伤方面: Otto^[4]、Ohtsu^[5]运用速率过程理论将声发射用于混凝土的损伤评估中,认为声发射活性与材料中裂纹多少成正相关。Heiple^[6]和 Wadley^[7]等通过大量试验表明,声发射振铃计数更能反映材料内部损伤的演化过程。Tang 等^[8]采用连续损伤力学的方法,从细观角度出发,得到了单轴应力状态下岩石基于声发射的损伤模型。刘保县等^[9]对单轴应力状态下煤岩的损伤演化规律和声发射特征进行了研究,建立基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型,得出煤岩的损伤演化曲线和方程。高保彬等^[10]在单轴压缩下煤样损伤模型基本原理的基础上,推导出了基于声发射参量的煤样损伤模型。周志威等^[11]对单轴应力状态下盐岩进行了损伤和声发射研究认为,振铃计数比能量更能反映盐岩损伤演化过程。刘迪等^[12]对盐岩进行了长期力学行为研究,建立了基于声发射累积事件数的损伤本构模型。

在岩石声发射与分形维数方面国内外也进行了大量的研究。其中, Xie 等^[13]认为,岩爆发生时,矿山微震事件的空间分布具有分形特征。Grassberger 等^[14]根据嵌入理论和重构相空间思想,提出了从时间序列直接计算关联维数的 G-P 算法。Yuan 等^[15]对花岗岩、大理岩和砂岩进行了损伤演化研究认为,随着应力的增加,岩石的分形维数呈现逐渐降低的趋势。秦四清等^[16]介绍了分形几何的基本概念,导出了声发射事件在空间上的分维模型,并运用此模型研究了灰岩的分维特征。高峰等^[17]通过岩石单轴压缩声发射试验,发现岩石声发射关联维数的变化反映了岩石内部损伤演化情况,分形维数的降低意

味着主断裂或破坏的发生。尹贤刚等^[18]通过岩石加载的室内试验方法,分析认为,在应力较低时分形维数随着应力的增加而增加,当应力为峰值应力的 40%时,分形维数随着应力的继续增加而开始降低。Maystre^[19]和谢和平^[20]等认为,岩石材料的声发射序列不仅在时域上是分形分布的,而且在空间分布上也具有分形特征。裴建良等^[21]对单轴应力下花岗岩声发射事件的空间分布进行了分形研究,得出不同应力状态下花岗岩声发射事件的空间分布的分形维数的规律。

以上研究均为试验过程中,关于岩石的声发射特征对岩石损伤或者分形维数进行的研究。目前,对不同应力状态下,盐岩变形破坏过程中的分形维数研究较少。且对岩石破坏进程中基于声发射振铃计数而建立的损伤模型和基于声发射定位点空间演化所建立的分形维数模型之间的研究较少。本文旨在不同应力状态下,对盐岩变形破坏过程中分形维数进行研究,且在已有损伤模型的基础上,对不同应力状态下盐岩变形破坏过程中的分形维数与损伤变量之间的联系进行探索。

2 试件制备与试验方案

2.1 试件制备与试验设备

为了尽可能降低非本文探讨因数对试验结果的影响,此批盐岩样品均取自国外某盐矿盐岩,其品位大于 99%。鉴于盐岩易溶于水,故参照《工程岩体试验方法标准》^[22],利用车床干车加工标准试件,尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

本次试验利用四川大学水利水电学院 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统完成,具体试验声发射传感器见图 1。

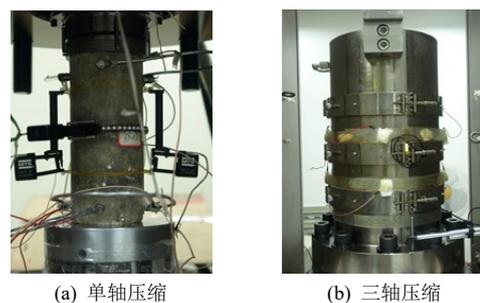


图 1 声发射设备装置示意图

Fig.1 Diagram of acoustic emission equipment

该设备轴向荷载最大为 4 600 kN, 三轴横向引伸计量程为 +15~-2.5 mm, 围压为 140 MPa, 温度为室温~200 ℃; 各传感器的测控精度均为 5‰RO。单轴声发射监测采用 8 个传感器对称分布于试件柱面上下两端, 每端 4 个, 三轴声发射监测采用 8 个传感器对称分布于三轴室外, 上下各 4 个 (详细见图 1), 传感器频率为 100 kHz。为保证传感器接收声波效果, 在二者接触部位涂凡士林。

2.2 试验方案

为探究在不同应力状态下盐岩变形破坏过程中的声发射特征, 以及依据声发射特征值的损伤模型和依据声发射定位点空间演化的分形维数之间的关系, 本试验选取单轴应力状态下和三轴应力状态下 (低围压和高围压) 盐岩变形破坏过程中的声发射为基础, 分别对不同应力状态下的分形维数和损伤变量进行研究。其中, 单轴应力状态下和三轴应力状态下 (低围压和高围压) 试验各做两组, 试验结果随机从中选取其中一组进行分析。此处围压的大小依据盐岩破坏特征来区分, 依据刘江等^[23]研究表明, 当围压低于 5 MPa 时, 盐岩发生剪切破坏, 当围压大于 10 MPa 时, 盐岩发生鼓状大变形破坏。

3 模型介绍

3.1 基于声发射振铃计数的损伤模型

由文献^[11]可知, 盐岩在单轴应力状态下, 基于声发射振铃计数得到的损伤模型可知: 此时假定断面微缺陷面积达到 A 时的累积声发射振铃计数为 N ; 断面面积 A 完全破坏时, 即岩石发生破坏时的声发射累积振铃计数为 N_m , 取盐岩峰值应力所对应的声发射振铃计数为 N_m , 那么当截面损伤破坏面积达到 A_d 时, 这一时刻的声发射累计振铃计数即为

$$N = \frac{N_m}{A} A_d \quad (1)$$

此时, 可以认为岩石内部的损伤变量 D 为

$$D = \frac{N}{N_m} \quad (2)$$

即可得出应力-应变与声发射参数之间的相关关系方程:

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 - \frac{N}{N_m} \right) \quad (3)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量。

又在刘建锋^[24]对破坏后盐岩进行 CT 扫描的研究基础上, 认为破坏后的盐岩并不是整个断面全部破坏, 所以取损伤修正系数为 (0.80~0.85), 本文研究中修正系数均取 0.85。

3.2 基于声发射空间演化的分形维数计算

Xie 等^[25]对圆柱形岩样的声发射空间演化分维数进行计算时, 可以发现球体覆盖的缺陷, 即不能完全体现试件内部的损伤空间分布, 并在此基础上, 提出了圆柱形覆盖法, 对盐岩声发射空间演化过程中的分形维数进行了计算。具体计算方法如图 2 所示。

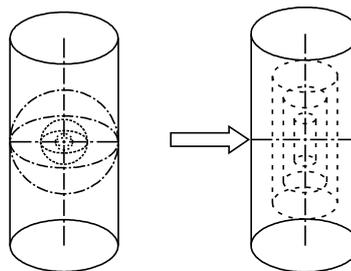


图 2 球、柱覆盖法

Fig.2 Ball-covering and cylinder-covering methods

声发射定位点空间演化服从体分布, 则有

$$M(r) \propto r^3 \quad (4)$$

则圆柱覆盖法可表示为

$$M(r) \propto r^2 H \quad (5)$$

式中: H 为覆盖柱的高度 (其变化比与 r 的变化一致)。

根据分形基本理论, 可将声发射事件分布的数-半径关系表示为

$$M(r) = Cr^D \quad (6)$$

式中: C 为材料常数。

所以, 声发射定位点空间分布的柱覆盖法的分形表达式可用式 (5) 表示, 并可依据式 (7) 求得相应的分形维数。

对式 (6) 中两边取对数, 可得

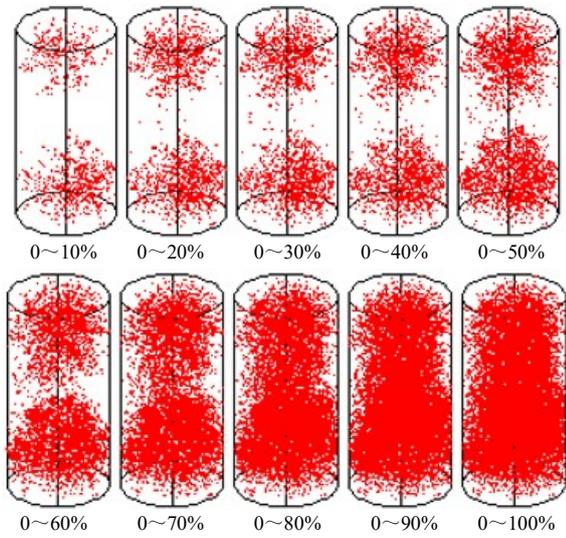
$$\lg M(r) = \lg C + D \lg r \quad (7)$$

对每一个给定的半径 r , 均可由式 (7) 得到一个 $M(r)$, 在双对数坐标系中绘制多个 ($\lg r, \lg M(r)$) 点, 对这些点进行数据拟合, 若结果为直线, 则表明声发射事件空间分布在给定的尺度范围内具有分形特征, 直线的斜率就是声发射事件空间分布的柱覆盖容量维数。

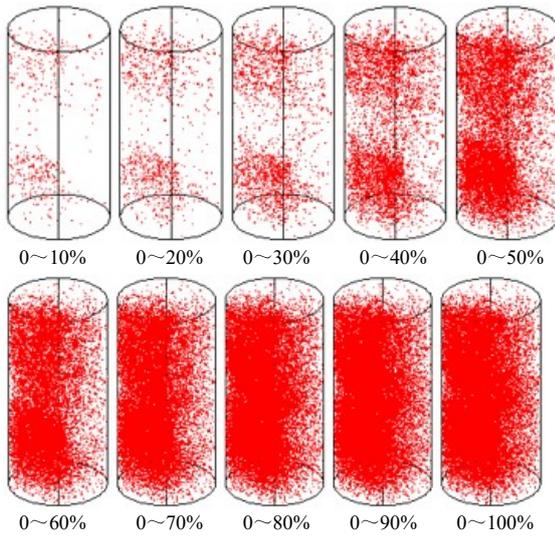
4 试验结果及分析

为更为直观地观察盐岩变形破坏过程中声发射定位点的空间演化, 图 3 分别为不同应力状态下,

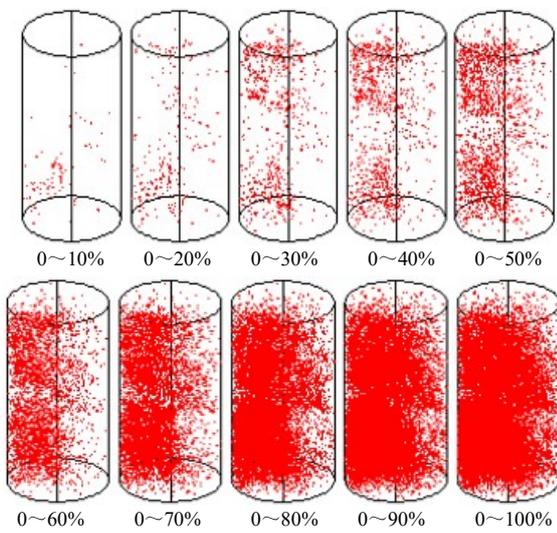
声发射定位点的空间演化特征图。



(a) 单轴压缩应力状态下



(b) $\sigma_3=5\text{ MPa}$



(c) $\sigma_3=20\text{ MPa}$

图3 不同应力状态下声发射定位点空间演化特征
Fig.3 The spatial evolution characteristics of acoustic emission localisation points under different stress states

4.1 单轴应力状态

通过对单轴应力状态下，盐岩变形破坏全过程声发射监测可以得到单轴压缩全过程的声发射振铃计数随时间的变化关系和声发射定位点的空间演化规律。

再依据声发射损伤模型和声发射分形维数的计算模型可以分别计算出不同应力百分比时的损伤变量和分形维数。具体见图4。

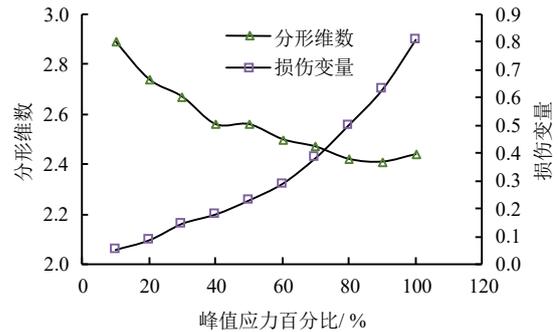


图4 加载应力比和分形维数及损伤变量之间关系图
Fig.4 The relationship of fractal dimension and damage variable with the increase of load stress ratio

再依据谢和平^[20]提出的分形与能量之间的关系，可以相应地得出不同分形维数时所释放的能量，具体见图5。

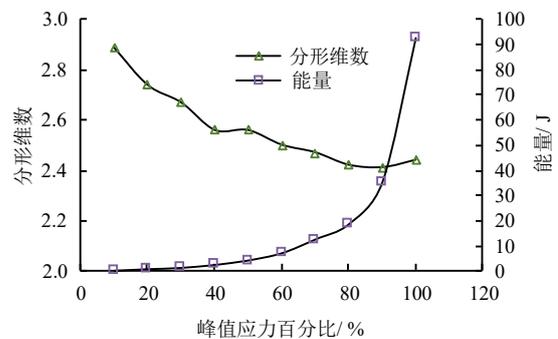


图5 加载应力比和分形维数及能量释放之间关系图
Fig.5 The relationship of fractal dimension and energy releasing with the increase of load stress ratio

依据不同应力百分比时刻所得到的分形维数与损伤变量之间的关系和分形维数与能量释放之间的关系，可以得出在应力百分比逐渐增大的过程中损伤变量与能量释放之间的关系，见图6。

由图4可知，随着应力百分比的逐渐增大，单轴应力状态下盐岩的分形维数呈现逐渐降低的趋势，与此同时盐岩的损伤变量逐渐增大，且损伤变量增加的速度逐渐加快。当分形维数降低到2.42左右时不再明显地继续下降，而此后盐岩损伤变量快

速增大。分析认为,随着荷载应力百分比的增大,盐岩内部损伤和声发射信号点增多,损伤逐渐在试件破坏部位集聚,形成宏观裂纹,当荷载达到峰值应力之前,此时试件内部微裂纹逐渐演变为宏观裂纹,此过程中分形维数达到相对固定值,而损伤变量迅速增大。由图 5 可知,随着分形维数的降低,能量释放逐渐增大,且当分形维数不再明显降低的同时,盐岩能量释放快速增加,此过程中试件内部损伤发生聚集。即试件由微裂纹逐渐向宏观裂纹演变的过程中,此过程伴随着能量的急剧释放。同时,由图 4、5 分形维数和损伤变量与能量释放之间的关系,可以发现:能量释放与损伤变量之间存在较好的对应关系,即损伤变量的增加,伴随着能量的释放,且能量释放的速率与损伤变量增加的速率有较好的对应关系。由图 6 可知,加载初期损伤变量小且密集,能量释放较少;随着荷载增加,损伤变量逐渐增大,且分布变得稀疏,即将达到峰值时损伤变量快速增大且能量释放量突然增大。这一点说明在盐岩变形破坏后期,相同轴向应力的增加,会对盐岩造成更大的损伤,并且此时对盐岩造成相同损伤会释放更多能量。

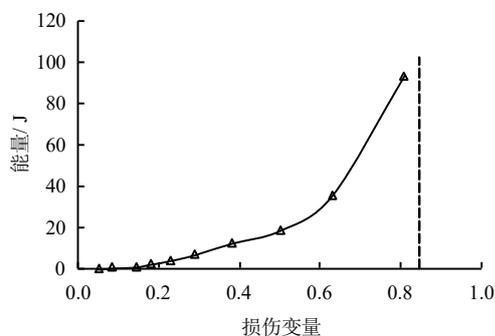


图 6 损伤变量和能量释放之间关系图
Fig.6 The relationship between damage variable and energy releasing

4.2 三轴应力状态

同单轴应力状态下盐岩变形破坏全过程中数据的采集与模型的建立一样,在三轴应力状态下,依据声发射振铃计数的损伤模型和依据声发射定位点空间演化的分形维数计算模型可以分别得出低围压 ($\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$) 和高围压 ($\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$) 的损伤变量和分形维数。图 7 为随着应力百分比逐渐增大过程中,不同围压状态下,盐岩分形维数与损伤变量变化图,其中由于盐岩变形能力较强,在计算盐岩应力百分比时,所有数据均采用刘建峰等^[26]提出的对数修正手段。

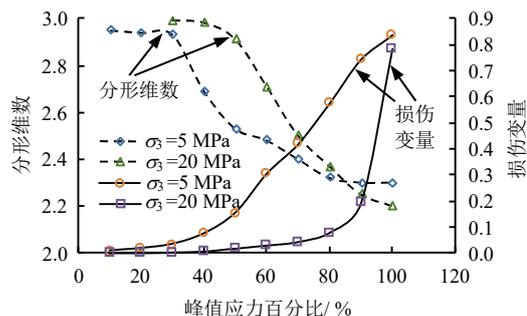


图 7 不同加载应力比与分形维数、损伤变量之间关系图
Fig.7 The relationship of fractal dimension and damage variable with the increase of load stress ratio

根据分形维数与能量释放之间的关系,可以依次计算出不同应力百分比时分形维数、能量释放之间的关系,见图 8。

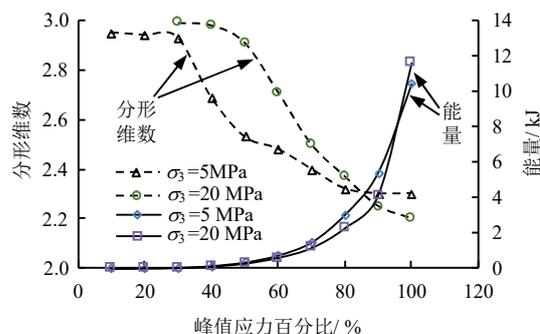


图 8 不同加载应力比与分形维数、能量释放之间关系图
Fig.8 The relationship of fractal dimension and energy releasing with the increase of load stress ratio

由图 7、8 可知,三轴应力状态下,盐岩分形维数与损伤变量变化趋势与单轴应力状态下类似,即盐岩变形破坏进程中,盐岩分形维数呈现逐渐降低的趋势,损伤变量呈现逐渐增大的趋势,且当分形维数下降速度明显降低时,损伤变量快速增大。同时,盐岩变形破坏过程中伴随着能量的释放,能量释放的规律与单轴应力状态下类似。

5 分析与讨论

为分析探讨盐岩在不同应力状态时,其分形维数变化特征和分形维数与损伤变量之间的关系,现取不同应力状态下,随着应力百分比逐渐增大的同时其分形维数变化特征进行研究(见图 9)。

由图可知:3 种应力状态下,盐岩变形破坏过程中,声发射定位点空间演化的分形维数均是由 3.0 到 2.0,且整体呈现逐渐减小的趋势。这一点说明盐岩变形破坏过程中试件内部声发射活动的相似性,即盐岩变形破坏过程中内部声发射定位点均是从有

序→无序→有序之间的转换,这一点和文献[27]得出的结论相类似。当盐岩应力状态由单轴压缩→低围压三轴→高围压三轴的变化过程中,加载初期的分形维数呈现直接降低→先稳定、再下降→先无法计算、再稳定、最后下降的趋势。其中,当 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 时,分形维数开始明显下降时对应的应力百分比为 30%;当 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 时,分形维数开始明显下降时对应的应力百分比为 40%。由此可以得出围压对盐岩声发射活动的抑制作用,即在围压的作用下,由于静水压力的压密作用会阻碍裂隙的形成和扩展,轴向荷载施加初期声发射信号较少,导致其分布不能很好地反映分形特征,所以有 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 时,加载初期无法测得其分形维数,文献[28]也说明了围压对声发射活动的抑制作用。

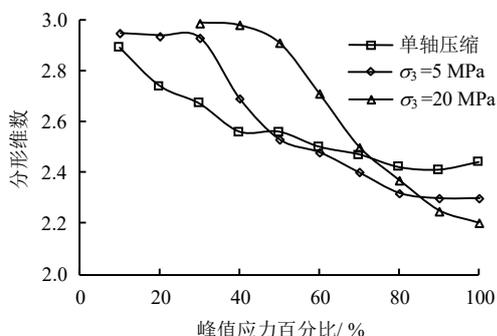


图9 盐岩变形破坏过程中分形维数变化规律
Fig.9 The regulation of fractal dimension in the failure process of salt rock

由图9可以得出:不同应力状态下,盐岩变形破坏前其分形维数具有相似的特征,即分形维数在盐岩变形破坏之前的下降速度均会减小,文献[25]也说明了这个问题。如图9所示,单轴压缩时,盐岩分形维数降低到2.42左右,下降速度减慢,此时对应于盐岩峰值应力80%;当 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 时,盐岩分形维数降低到2.31左右,下降速度减慢,此时对应于盐岩峰值应力80%;当 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 时,盐岩分形维数降低到2.2左右,下降速度减慢,此时对应于盐岩峰值应力90%。同时,文献[25]也认为,在岩石试件破坏前,其声发射空间定位空间演化分形维数有其相应的最小值。本次试验中,在单轴应力状态下,认为当分形维数为2.42时可以作为盐岩变形破坏前兆;三轴应力状态下,当 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 时,可以分别取分形维数为2.31和2.20作为盐岩变形破坏的前兆。此后,盐岩分形维数不再明显降低,而此时盐岩内部微裂纹逐渐向宏观大裂纹转变,其宏观变为盐岩损伤变量快速增加和能

量的迅速释放。

根据图4和图7可以得出,不同应力状态下,盐岩变形破坏全过程中分形维数与损伤变量之间的关系,见图10。

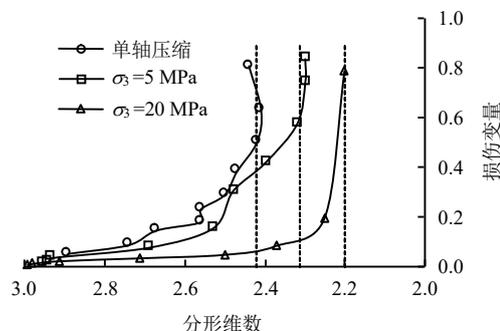


图10 盐岩变形破坏过程中分形维数与损伤变量关系图
Fig.10 The relationship between fractal dimension and damage variable in the failure process of salt rock

由图10可知:随着分形维数的降低,盐岩损伤变量同步增加,且当分形维数趋于稳定时,损伤变量快速增大。但不同应力状态下损伤变量的变化趋势有所不同。由图可知,单轴应力状态下,盐岩损伤变量随着分形维数减小而有比较明显的增大,即在分形维数刚开始减小的一段时间内(轴向应力加载初期),损伤变量就较为明显的增大。对三轴低围压($\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)和三轴高围压($\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$)而言,在分形维数刚开始减小的一段时间内(轴向应力加载初期),损伤变量没有明显的增加;当分形维数下降较快时(轴向加载的中期),三轴低围压状态下损伤变量开始明显增大,三轴高围压损伤变量依然没有明显增加;当分形维数下降速度减缓时(轴向加载峰值前),无论是单轴应力状态还是三轴应力状态,盐岩损伤变量均呈现快速增长的趋势,此阶段预示盐岩即将变形破坏。而且,随着盐岩由单轴压缩→三轴低围压($\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)→三轴高围压($\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$)的转变,盐岩在变形破坏前损伤变量的增幅逐渐明显。由盐岩损伤变量随分形维数变化的规律,说明了围压对盐岩变形破坏的抑制作用,同时,也说明盐岩变形破坏过程中损伤变量增加的阶段和分形维数降低的阶段相对应。

图11为盐岩损伤变量与能量释放之间的关系。由图可以得出:盐岩变形破坏全过程中,单轴压缩应力状态下,盐岩释放的能量最少,三轴高围压应力状态下,释放的能量最多。盐岩变形破坏初期释放能量较少,盐岩变形破坏之前,能量会突然释放;且围压越高,能量释放越迅速。

由图 10 可知, 当分形维数不再明显下降时, 盐岩损伤变量迅速增大。且由图 11 可知, 在盐岩变形破坏后期, 损伤变量快速增大的同时, 伴随着能量的迅速释放。这说明当分形维数不再明显降低时, 盐岩损伤变量快速增大, 且过程中伴随着能量的迅速释放, 预示着盐岩即将出现失稳破坏。

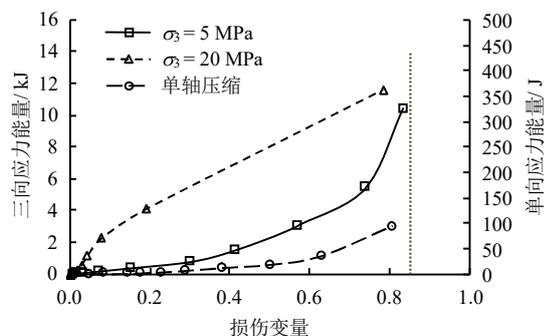


图 11 损伤变量和能量释放之间关系图

Fig.11 The relationship between damage variable and energy releasing

6 结 论

本文通过对不同应力状态下盐岩变形破坏全过程中声发射监测, 依据基于声发射振铃计数的损伤演化模型和基于声发射定位点空间演化的分形维数计算模型, 对盐岩不同应力状态下, 变形破坏过程中分形维数和损伤变量进行了探究, 得到结论如下:

(1) 在盐岩变形破坏过程中, 基于声发射定位点空间演化的分形维数逐渐降低, 及声发射振铃计数的损伤变量逐渐增大, 且当分形维数不再明显降低时, 损伤变量快速增大, 同时, 分形维数下降的各个阶段和损伤变量增加的各个阶段相对应。

(2) 分形维数的降低表明, 声发射事件数开始在某一空间聚集, 预示着损伤的发生。单轴压缩和三轴压缩 ($\sigma_3 = 5$ MPa、 $\sigma_3 = 20$ MPa) 应力状态下, 试件分形维数分别低于 2.42、2.31 和 2.2 时, 预示着试件内部损伤开始汇集, 逐渐形成宏观破裂面, 导致试件变形破坏。

(3) 围压对盐岩内部声发射活动起到抑制的作用; 随着盐岩应力状态由单轴压缩 \rightarrow 三轴低围压 ($\sigma_3 = 5$ MPa) \rightarrow 三轴高围压 ($\sigma_3 = 20$ MPa) 变化过程中, 盐岩分形维数快速下降时和分形维数不再明显下降时所对应的应力百分比均逐渐增大。

(4) 在盐岩变形破坏过程中, 轴向荷载加载初期和中期, 损伤变量较小, 且能量释放较少; 盐岩变形破坏前损伤变量迅速增加, 能量快速释放。

参 考 文 献

- [1] CONSENZA P H, GHOREYCHI M, BAZARGAN SABET B, et al. In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 24(1): 509–526.
- [2] YAN L, BYRNE P M. Lateral pile response to monotonic pile head loading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(6): 955–970.
- [3] 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(2): 82–85.
WU Gang, ZHAO Zhen-yang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(2): 82–85.
- [4] OTTO SCHULZE, TILL POPP, HARTMUT KERN. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(2–3): 163–180.
- [5] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application[J]. *Acoustic Emission*, 1987, 6(2): 99–108.
- [6] HEIPLE C R, CARPENTER S H. Acoustic emission from dislocation motion[C]//Acoustic Emission. New York: Gordon and Breach Publ, 1983.
- [7] WADLEY H N G, SCRUBY C B, SPEAKE J H. Acoustic emission for physical examination of metals[J]. *Metallurgical Reviews*, 2013, 25(1): 41–64.
- [8] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. *Journal of Seismological Research*, 1990, 13(2): 203–213.
- [9] 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征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊1): 3234–3238.
LIU Biao-xian, HUANG Jing-lin, WANG Ze-yun, 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(Supp.1): 3234–3238.
- [10] 高保彬, 李回贵. 基于声发射参量的煤样损伤模型研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2014, 34(1): 101–106.
GAO Bao-bin, LI Hui-gui. Research on coal samples damage model based on acoustic emission parameters[J]. *Journal of Disasters Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(1): 101–106.
- [11] 周志威, 刘建锋, 邹航, 等. 单轴压缩盐岩声发射特征及损伤演化探讨[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(5): 63–68.
ZHOU Zhi-wei, LIU Jian-feng, ZOU Hang, et al. Study on acoustic emission character and damage evolution of

- rock salt under uniaxial compression[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2016, 33(5): 63–68.
- [12] 刘迪, 周宏伟, 赵阳, 等. 基于声发射特征的盐岩蠕变本构模型研究[J]. **岩土力学**, 2017, 38(7): 1951–1958.
LIU Di, ZHOU Hong-wei, ZHAO Yang, et al. Study of creep constitutive model of rock salt based on acoustic emission characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1951–1958.
- [13] XIE H, PARISEAU W G. Studies on mechanism of rock bursts-associated seismicity mines by using fractals and damage mechanics[C]//Proceedings of the 33th US Rock Mechanics Symposium. Santa Fe, NM: [s. n.], 1992.
- [14] GRASSBERGER P, PROCACCI I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, 1983, 9: 189–208.
- [15] YUAN R F, LI Y H. Fractal analysis on the spatial distribution of acoustic emission in the failure process of rock specimens[J]. **International Journal of Minerals Metallurgy and Materials**, 2009, 16(1): 19–26.
- [16] 秦四清, 李造鼎. 岩石发射事件在空间上的分形分布研究[J]. **应用声学**, 1992, 11(4): 19–21.
QIN Si-qing, LI Zao-ding. Fractal study on spatial distribution of acoustic emission events of rock[J]. **Applied Acoustics**, 1992, 11(4): 19–21.
- [17] 高峰, 李建军, 李肖音, 等. 岩石声发射特征的分形分析[J]. **武汉理工大学学报**, 2005, 27(7): 67–69.
GAO Feng, LI Jian-jun, LI Xiao-yin, et al. Fractal analysis of the characteristics of acoustic emission of rock[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2005, 27(7): 67–69.
- [18] 尹贤刚, 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): 3512–3516.
YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan. 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.
- [19] MAYSTRE D, ROSSI J P. Implementation of a rigorous vector theory of speckle for two dimensional microrough surface[J]. **Journal of the Optical Society of America A**, 1986, 3(8): 1276–1282.
- [20] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
XIE He-ping. Introduction to fractal-rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [21] 裴建良, 刘建锋, 张茹, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声发射事件空间分布的分维特征研究[J]. **四川大学学报: 工程科学版**, 2010, 42(6): 51–55.
PEI Jian-liang, LIU Jian-feng, ZHANG Ru, et al. Fractal study on spatial distribution of acoustic emission events of granite specimens under uniaxial compression[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2010, 42(6): 51–55.
- [22] 原中华人民共和国电力工业部. GB/T50266–99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The Ministry of Electric Power of the People's Republic of China. GB/T50266–99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [23] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(增刊1): 3104–3109.
LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of rock salts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 3104–3109.
- [24] 刘建锋. 中国层状盐岩基本力学特性及损伤演化研究[D]. 成都: 四川大学, 2008: 11.
LIU Jian-feng. Research on the fundamental mechanics properties and damage evolution of Chinese bedded rock salt[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008: 11.
- [25] 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(1): 1344–1351.
- [26] 刘建锋, 边宇, 郑得文, 等. 三轴应力状态下盐岩强度分析探讨[J]. **岩土力学**, 2014, 35(4): 919–925.
LIU Jian-feng, BIAN Yu, ZHENG De-wen, et al. Discussion on strength analysis of salt rock under triaxial compressive stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 919–925.
- [27] 陈颢. 地震预报中几个科学问题的讨论[J]. **中国地震**, 1988, 4(2): 1–8.
CHEN Yong. Discussion on some scientific issues in earth-quake prediction[J]. **Earthquake Research in China**, 1988, 4(2): 1–8.
- [28] 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(增刊1): 114–120.
ZHUO Yue, LIU Jian-feng, LI Tian-yi, et al. Research on the acoustic emission of rock salt under triaxial compression[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2016, 48(Supp.1): 114–120.