

三点弯曲试验条件下的岩石声发射演化特征

赵慧子^{1,2}, 梁正召^{1,2}, 刘祥鑫³

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024;

3. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 开展16个辉绿岩试样在三点弯曲加载条件下的声发射试验, 得到含有不同切口位置的应力-应变曲线、断裂模式与声发射特征参数, 研究在不同拉-剪应力条件下的岩石声发射特性, 基于归一化方法研究试样损伤演化规律, 运用分形分析方法计算声发射信号的关联维数 D , 研究不同拉伸与剪切共同作用下试样的分形前兆特征。结果表明: 三点弯曲条件下, 试样以微破裂为主, 发生张拉脆性断裂。随着预制裂纹距离左端支撑距离 d 的增加, 岩石抗弯强度降低, 断裂能耗逐渐降低。由声发射参数表征的脆性岩石损伤前兆特征显现时间先后顺序为: 事件率前兆时间 < 振铃计数前兆时间 < 能量计数前兆时间。随着试样弯曲应力增加, 关联维数变化模式呈“降-升-降”的变化规律, 与单轴压缩的“波动-持续下降”具有明显不同。关联维数的二次降低预示岩石最终失稳破裂即将发生, 可以作为岩石失稳的前兆信息。

关键词: 三点弯曲; 分形特征; 损伤演化; 声发射; 前兆信息

中图分类号: TU453

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0006-07

Acoustic Emission Evolution Characteristics of Rock Under Three-point Bending Tests

ZHAO Huizi^{1,2}, LIANG Zhengzhao^{1,2}, LIU Xiangxin³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Center of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: Stress-strain curves, fracture modes and acoustic emission characteristic parameters of 16 diabase samples containing different notch positions were obtained under three-point bending loading conditions monitored by acoustic emission system to analyze acoustic emission characteristics of rocks under different tensile-shear stress conditions. Based on the normalization method, the damage evolution law of the sample was investigated. The fractal analysis method was used to calculate the correlation dimension D of the acoustic emission signal. The characteristics of the fractal precursor of the sample under the action of different tensile-shear stress were discussed. The results are as follows. Under the three-point bending condition, microcracks dominate and the tensile brittle fracture occurs. As the offset notch distance from the left-end support distance d increases, the bending strength decreases and the fracture energy consumption of the rock gradually decreases. Damage precursor occurrence time characterized by acoustic emission parameters: event rate < ringing count < energy count. As the stress of diabase increases, the correlation dimension changing mode is “down-up-down”, which is significantly different from the “fluctuation-continuous descent” of uniaxial compression. The second decrease of correlation dimension indicates that the failure is about to occur, which can be used as precursor information for rock failure.

Keywords: three-point bending; correlation dimension; damage evolution; acoustic emission; precursor information

岩石材料受到外部作用或温度变化内部产生微裂隙导致损伤,并以弹性波的形式释放储存的应变能的过程称为声发射(AE)^[1]。声发射监测仪能够实时连续感知试样内部微裂纹出现、演化直至贯通破坏的全过程,蕴含丰富的破裂信息。通过分析声发射各阶段特征能够为以声发射为监测技术的岩石灾害问题提供一定的技术支撑。

分形学作为一门新兴学科,发展历程不长。1975年 Mandelbrot 正式提出分形理论并建立现代分形学^[2]。1991年国内学者谢和平^[3]融合岩石损伤力学与分形学开创了分形-岩石力学新领域。分形学创建 40 多年,在岩石领域取得一系列进展。室内试验结果表明:单轴受力条件下,脆性破坏与塑性破坏在时间分布上均具有明显的分形特征^[4-5]。分形维数没有统一的分布规律,根据分形维数有无上升趋势,可以概括为:“波动-下降^[6]”、“波动-上升-下降^[7]”两大类。多轴加载模式下,声发射参数同样具有分形特征^[8-9]。分形维数分布规律多样性导致岩石破裂前兆信息多样化。吴贤振等^[6]和 Li 等^[9]以声发射分形维数降低为破裂前兆信息。张昕^[7]认为关联维数波动变化可以作为破坏的前兆信息。王泽鹏等^[10]将分形维数首次突降作为三种不同粒径单轴受力岩样的破坏前兆。分形维数的分布与前兆信息的分类不是一一对应关系,即使分形维数的分布相同,前兆信息的判定也可能不同。

声发射参数与岩石破裂过程有必然联系,因此可以用声发射参数表征岩石破裂损伤情况。学者从声发射参数和时空分布两方面对岩石损伤过程进行阐述。在声发射参数方面:杨永杰等^[11]、吴贤振等^[12]、张国凯等^[13]基于不同方法都对损伤演化模型进行推导得出相应的损伤公式,发现不同参数表征损伤的差异。在时空分布方面,数值模拟是热门技术手段,徐涛等^[14]、龚斌等^[15]采用 RFPA 进行压缩破坏模式的数值模拟,取得一定成果。

国内外学者对声发射特征开展了大量试验,但是目前研究大多以单轴或多轴压缩条件为主,研究拉伸或拉-剪条件下的声发射特性及其前兆规律的试验研究并不多见。众所周知,岩石具有更低的拉伸强度,往往更易发生拉伸或拉剪破坏,在不同拉-剪应力条件下的岩石声发射特性及破裂前兆规律的研究还不够深入。此外,单轴压缩条件下的分形维数变化形式多样,是否有适用于拉伸或拉-剪条件的前兆规律还不得而知。分析比较表征岩石损伤情

况的声发射参数,有望揭示各参数的优先级问题。鉴于此,本文利用岩石电液伺服控制试验机和声发射监测仪,选取岩石三点弯曲物理力学试验,通过改变预制切口位置,来研究不同拉-剪条件下的岩石断裂破坏过程与声发射信息特征,通过分形理论来探索岩石失稳前兆规律。

1 试验方案

三点弯曲试验用 TAW-3000 伺服试验机对辉绿岩试样进行 0.002 mm/s 的位移控制加载,预加载 2 kN,利用美国 PAC 公司生产的 Express 8 型 16 通道的声发射系统进行声发射同步监测(见图 1)。试样质地均匀,呈暗灰色,尺寸:长×宽×高为 250 mm×50 mm×50 mm,跨径 200 mm,每个试样含一条预制裂纹,长 10 mm,宽 2 mm,距离左端支撑的距离 d 分别为 25 mm、50 mm、75 mm 和 100 mm,四种距离代表四种工况,同一工况制备 4 个试样。需要注意的是,试验中切口位置变化,因此加载点与预制切口不在一条直线上,导致切口附近的应力状态发生改变,岩石的断裂破坏模式不同。

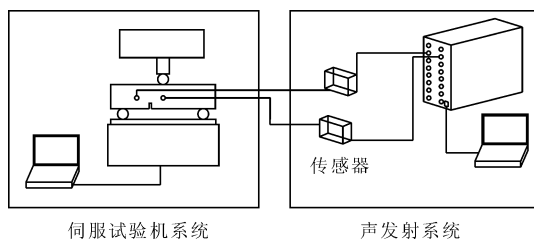


图 1 试验装置简图

声发射设置阈值 45 dB,消除噪声影响,前置放大增益 40 dB, PDT(峰值定义时间)、HDT(撞击定义时间)、HLT(撞击闭锁时间)分别为 50 μ s、150 μ s、300 μ s,采样率 2MSPS。4 个高灵敏度的 R6 α 谐振式传感器分别布置在试样两个端面中央及预制裂纹两侧各 30 mm 处。在传感器和试样接触处均匀涂抹一层真空脂,起润滑作用,提高耦合效果。实验室预留固定试验人员,试验过程中禁止人员走动,保证实验室环境安静。设备导线接地,试验机和声发射监测系统同时开始记录。

2 试验结果

图 2 为四种工况的应力-应变关系曲线。由于岩石内部存在空隙,在加载初期应力-应变曲线出现较小的向下弯曲,预制切口处受拉,出现向下弯曲

也可能是出现未贯通的微小裂纹,少数辉绿岩没有下凹的第一阶段,主要是因为预制切口尖端附近颗粒坚硬。随着距离 d 的增加,岩石抗弯强度降低,破坏所需时间越短,破坏时的竖向位移越小。辉绿岩呈脆性破坏特征,试样破坏断面平滑无碎屑,破坏瞬间伴随巨大响声。

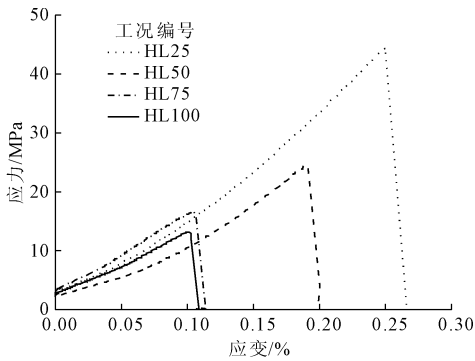


图2 应力与应变的关系

图3展示四种工况的破裂图像,试样编号 HL25-4 代表辉绿岩距离左端支撑距离 $d = 25 \text{ mm}$ 的第四个试样。 $d = 25 \text{ mm}$ 和 100 mm ,宏观裂纹位于试样中央断面,不同的是 $d = 100 \text{ mm}$ 试样裂纹起始于预制切口尖端; $d = 50 \text{ mm}$ 和 75 mm ,裂纹始于预制切口尖端,以近似斜线向加载点扩展,但最终距离加载点有一定距离, $d = 50 \text{ mm}$ 的距离较大。预制切口的位置对试样破裂形态有一定影响, $d = 25 \text{ mm}$ 和 50 mm 中间一定存在一个临界位置,使得起始破裂位置由试样中央向预制切口尖端转变。

为探究预制切口距离对三点弯曲试验断裂性能的影响,绘制四种工况的偏移影响系数随偏移比变化的数据点(见图4)。偏移影响系数 δ 为断裂能耗平均值与 $d = 100 \text{ mm}$ 的断裂能耗的比值,为无量纲量。断裂能耗指荷载达到峰值所做的功,偏移量为预制切口与左端支撑的距离 d ,偏移比 C 为偏移量与跨径 200 mm 的比值。经过多项式拟合发现,偏移影响系数与偏移比呈二次多项式关系,相关系数 $R^2 = 0.98415$,两者相关程度很高。随着偏移量 d 增加,断裂能耗减小,同一工况的断裂能耗离散性越小。对原始数据点进行拟合,偏移影响系数 δ 与预制切口偏移比 C 之间的关系:

$$\delta = -59.71538C + 67.77408C^2 + 14.0044 \quad (1)$$

进而可以得出各个偏移比的辉绿岩三点弯曲断裂能耗 W_d :

$$W_d = W_0 \delta = W_0 (-59.71538C + 67.77408C^2 +$$

14.0044) \quad (2)

式中: W_d 为三点弯曲试验断裂能耗, J; W_0 初始能耗, 为预制切口在试样中点对应的断裂能耗, J; C 为偏移比, 无量纲。

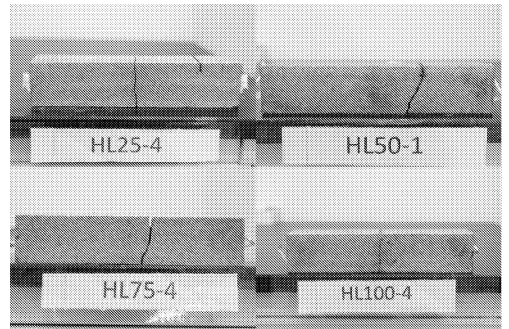


图3 试样破裂图

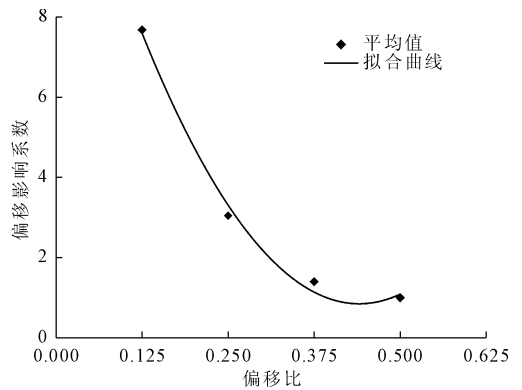


图4 偏移影响系数随偏移比的变化关系

当 $d = 25 \text{ mm}$ 增加到 $d = 50 \text{ mm}$ 时,试样的破裂形态改变,断裂能耗降低迅速,而 $d = 50 \text{ mm}$ 、 75 mm 和 100 mm 破裂形态相近,断裂能耗变化缓慢。左建平^[16]研究小尺度偏置缺口对玄武岩断裂的影响,得出 C 在 $0.2 \sim 0.5$ 之间断裂能耗与偏移量存在线性关系。本文扩大 C 的研究范围,从 $0.125 \sim 0.500$,发现 C 减小后,断裂能耗变化速率加快,线性拟合偏差较大已不再适用,用二次多项式拟合更准确。

幅值反映声发射信号的大小。岩石破坏过程中低幅值为主对应微破裂而高幅值为主对应大尺度破裂^[17]。试验设置门槛值 45 dB ,幅值曲线从 45 dB 起始。从图5可知,幅值数据点稀疏,信号少,且以小于 70 dB 的低幅值为主,在峰值荷载前产生大于 70 dB 的高幅值,信号密集,试样破裂瞬间出现最大幅值 99 dB ,应力达到峰值瞬间突降至零,丧失承载能力,说明三点弯曲条件下,试样以微破裂为主,发生张拉脆断,仅在峰值荷载附近迅速贯通,形成宏观主裂纹。

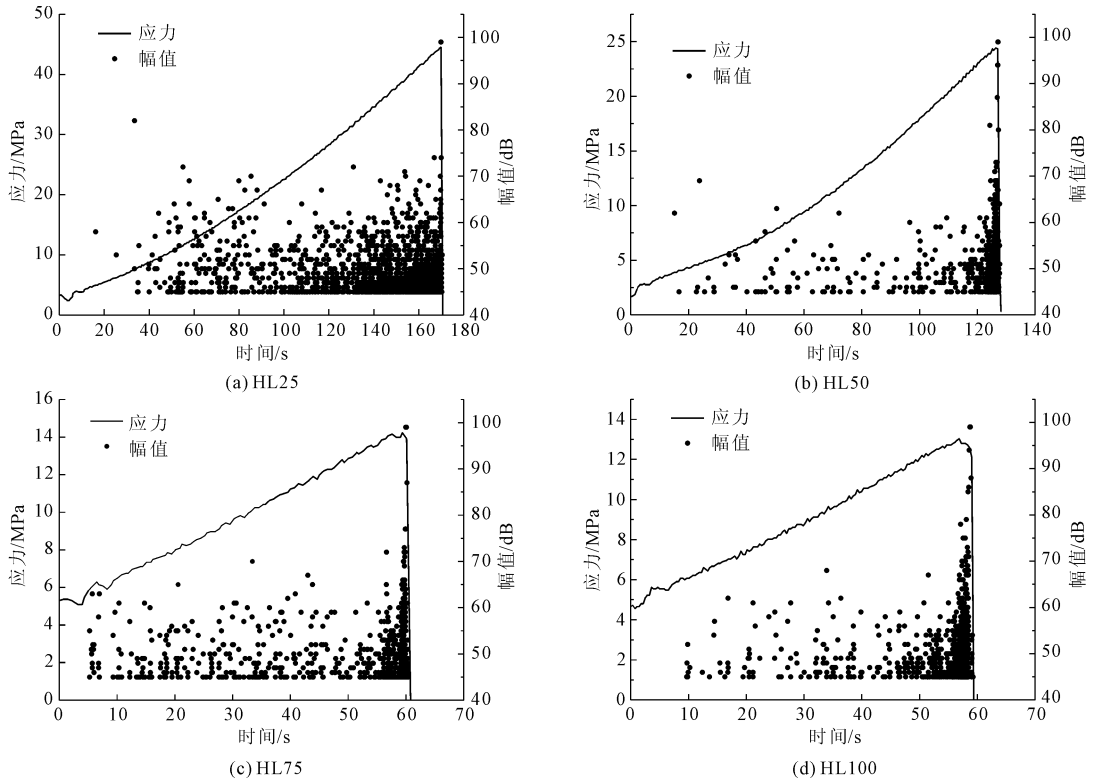


图 5 幅值随时间分布图

3 声发射表征的损伤分析

脆性岩石的不可逆变形通常与材料内部的损伤程度密切相关。AE 参数能很好地反映岩石内部裂纹扩展情况,因此可以被用来表征试样的损伤情况。通常研究中利用声发射振铃计数来探究试样损伤基本规律,具有一定局限性。本研究用声发射事件率、振铃计数和能量计数来描述试样损伤情况。选用最简单直观的归一化方法计算损伤值,认为声发射参数与损伤呈线性发展,试样最终破坏的损伤值 $D = 1$,建立损伤与归一化声发射变量关系:

$$D = \frac{N_t}{N_m} \quad (3)$$

式中: N_t 为声发射变量从 0 到 t 时刻的累计值; N_m 为试样破坏时的累计声发射变量值。

由公式(3)绘制归一化后的应力、声发射参数随时间的变化关系曲线(见图 6)。三点弯曲试验岩石损伤演化分三个阶段:损伤初显现作为第一阶段和第二阶段的分界线,损伤曲线斜率快速增长的起始点作为划分第二和第三阶段的依据。第一阶段为初始损伤阶段 I,对应试样压密阶段,损伤曲线近乎水平,几乎没有新裂纹产生,振铃计数、能量计数和事件率表征的损伤都很小可以忽略。第二阶段为损

伤显现阶段 II,与岩石压密阶段后期和弹性变形前期对应,试样内部裂纹萌生、扩展,声发射活动逐渐活跃,由事件率表征的损伤 D 的增速明显快于振铃计数和能量计数表征的损伤增速。第三阶段为损伤失稳前兆阶段 III,对应试样弹性变形后期和破坏阶段。声发射事件率、振铃计数和能量计数表征的损伤曲线变化趋势相同,区别是第三阶段损伤迅速增加明显大于前两阶段,能量计数表征的损伤曲线在破坏前瞬间近乎垂直增长,大部分损伤均发生在这一阶段。这是由于岩石颗粒之间胶结相对牢固,结构稳定,只有局部应力超过胶结力才产生微破裂,前两个阶段微破裂少,试样局部破坏时间接近峰值应力,峰值应力前声发射信号大量生成,岩石试样内部微裂纹快速汇聚,单一声发射事件释放的能量远远高于前两个阶段。声发射事件率通常在损伤值 0.8 时斜率陡增,工况 HL50 和 HL75 由于破坏裂纹长,声发射信号多,声发射前兆出现时间早,在破坏前 10 s ~ 20 s 事件率表征的损伤 D 就开始出现陡增,工况 HL25 增长相对平缓,陡增不明显。对于脆性岩石,声发射参数表征的损伤前兆出现时间:事件率 < 振铃计数 < 能量计数,预制切口偏移量 d 增加,三种前兆出现时间差先增加后减小,这是因为 $d = 50$ mm 和 75 mm 的裂纹较长,信号异常出现时间更早。

AE 事件率表征的损伤最先开始积累,以事件率为损伤表征量能很好的反映岩石内部裂纹萌生、演化直至出现宏观裂纹而破坏的全过程。

至出现宏观裂纹而破坏的全过程。

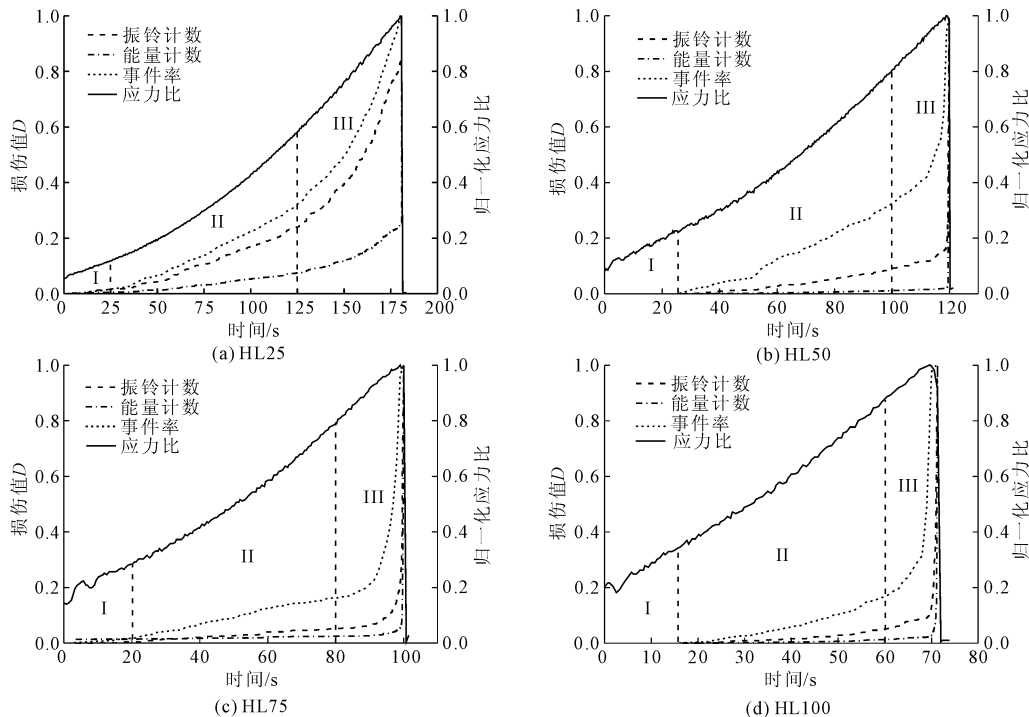


图 6 归一化应力及声发射参数随时间的变化关系曲线

4 声发射分形特征

分形维数的确定方法有很多,包括容量维 D_c 、信息维 D_i 、盒维数 D_b 和关联维数 D 等。关联维数 D 是最常用的分形维数之一。基于 G - P 算法,以四种工况的声发射振铃计数时间序列为目标对象,每个序列与一个容量为 n 的序列集对应,运用振铃计数序列集进行 m 维相空间重构。首先取连续的 m ($m < n$) 个数据点作为 m 维相空间的第一个相点 $X_1 = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_m\}$, 然后去掉 x_1 , 再取连续 m 个数据点构成第二相点, 以此类推, 可构建 $N = n - m + 1$ 个相点。关联函数相关计算公式^[6]:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad (4)$$

$$D = \lim_{\ln r} \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (5)$$

式中: $H(x)$ 为 Heavjicide 函数, r 为两相点之间距离。在 $\ln C(r)$ 和 $\ln(r)$ 双对数坐标系下绘制样本数据点并对数据进行线性拟合, 所得拟合直线的斜率即为关联维数。

相空间维数 m 取值不同, 得到的关联维数 D 亦不同。采用相空间几何不变量法确定三点弯曲试验的相空间维数。以工况 HL25 的振铃计数时间序列为例, 绘制分形维数 D 随相空间维数 m 的变化关系

如图 7 所示。相空间维数 m 取值范围 2 ~ 9, 其中 m 在 2 ~ 6 时线性增加, 在 7 ~ 9 趋于一个稳定值, 因此本研究取 $m = 7$ 。

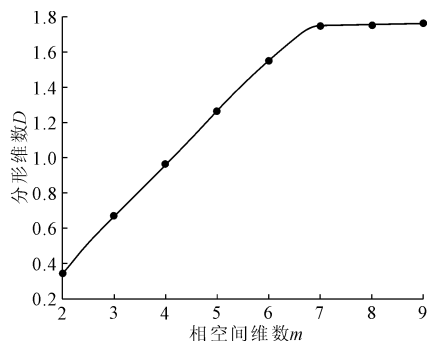


图 7 关联维数 - 相空间维数曲线

声发射活动与岩石破裂过程有必然联系, 因而可以用关联维数表示岩石内部裂纹扩展规律。各应力比下的声发射振铃计数的相关系数均达到 0.98 以上, 拟合直线与原始数据曲线有很好的相关性。因此在三点弯曲下声发射振铃计数具有明显的分形特征, 与其他学者得到的结论一致^[7]。

利用 MATLAB 计算四种工况声发射振铃计数的关联维数 D , 绘制 D 随应力比的变化曲线如图 8 所示。由于预加载偏大, 导致工况 HL75 和工况 HL100 的起始应力比为 0.2。四种工况在应力比

0.2以后,关联维数均呈现较大值,试样以微破裂为主,随后关联维数均出现“降-升-降”规律。关联维数在单轴受力和三点弯曲受力条件下具有一定的通用性,借鉴关联维数在单轴压缩受力条件下的规律:关联维数能客观反映试样微损伤的统计规律。关联维数上升代表产生的裂纹以小尺度为主;关联维数降低代表大尺度破裂的裂纹明显增多^[18],说明损伤从无序向有序转变,因此关联维数 D 的降低是岩石破裂出现的有效衡量标准。关联维数降低说明

试样内部出现大尺度破裂,一段时间后 D 值上升试样内部又恢复为以产生微破裂为主,应力比达到0.9时,关联维数 D 降低,大尺度破裂逐渐贯通形成宏观裂纹,因此可以将分形维数 D 值的二次降低作为辉绿岩三点弯曲试验的破坏前兆。预制切口位置不同,关联维数二次降低对应的应力比不同。随着距离的增加,整个破坏过程持续时间越短,关联维数前兆对应的应力比增加。四种工况破坏阶段关联维数依次为 1.40、1.48、1.20、1.09,较为接近。

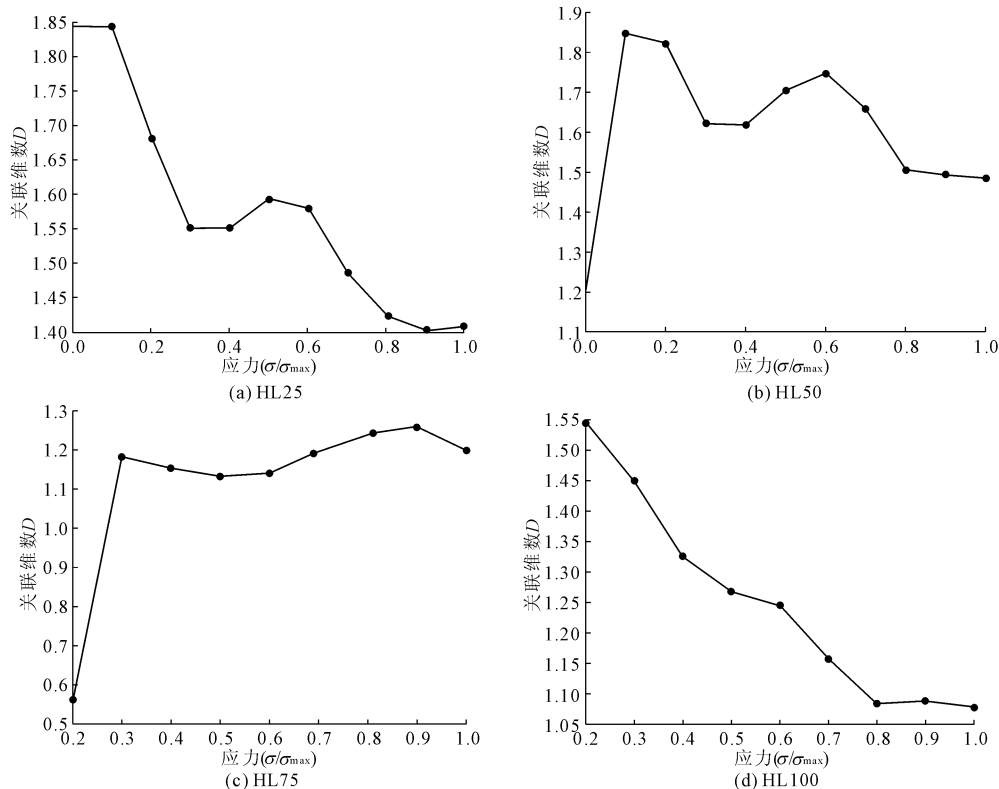


图 8 不同工况的关联维数

5 岩石声发射分形规律的讨论

本文研究了三点弯曲试验条件下的岩石损伤断裂、声发射前兆与分形特征。由于试验中切口位置不断变化,预制切口区的应力状态也不停变化。随着切口位置 d 从大到小,切口附近的应力状态由拉伸逐渐转变为拉剪复合应力状态,拉伸应力逐渐减小而剪切应力逐渐增加,因此岩石的断裂破坏模式会发生改变。

(1) 在岩石损伤破坏的阶段方面,岩石破坏过程分几个阶段与岩石的类型和加载方式有关。本文中的辉绿岩具有高脆性且在三点弯曲条件下发生脆性断裂,因此三点弯曲过程主要呈现三个阶段,没有残余变形阶段,在开裂瞬间即发生失稳,破坏后几乎

没有残余承载能力。

(2) 在岩石断裂前兆方面,岩石类型不同,声发射表征参数的表现形式不同。脆性岩石的三点弯曲与单轴压缩下的声发射参数表征的损伤前兆出现时间顺序基本一致(事件率 < 振铃计数 < 能量计数)。这说明事件率在两种受力条件下都较为敏感,采用事件率作为前兆信息来判断或预测岩石的断裂失稳最为有效。

(3) 在岩石加载过程中的分形维数变化方面,单轴压缩关联维数与拉伸、拉-剪应力条件下的关联维数变化规律具有较大差异。单轴压缩关联维数变化模式多样,总体可以归为“波动-持续下降”、“波动-上升-有起伏的整体下降”两大类,而三点弯曲试验的关联维数在应力较低时即达到较高值,

之后呈现“降 - 升 - 降”的变化模式。在单轴压缩破坏模式下,试样在加载过程中一直有微破裂产生, D 值波动上升,直至整体破坏时,大尺度破坏发生, D 值出现突降;三点弯曲模式, D 值在应力比约 0.2 时达到近乎峰值,这是因为在应力比 0.2 之后试样即将损伤突增,试样在应力比 0.2 前产生微裂纹,在 0.2 附近产生一次大尺度裂纹, D 值降低,之后 D 值恢复平稳上升,以小尺度微裂纹为主,破裂前突降,大尺度裂纹形成宏观主裂纹导致最终破坏。两种加载方式的 D 值随应力比分布不同的根本原因是加载过程断裂损伤模式不同。岩石在单轴压缩过程中的损伤均匀变化,大多发生延性破坏,而岩石试样在三点弯曲条件下前期损伤不明显,后期损伤陡增,发生脆性破坏。

6 结 论

通过单裂纹辉绿岩三点弯曲试验,研究岩石破裂损伤过程及分形特征,得到以下结论:

(1) 声发射损伤规律和分形特征可以进行岩石断裂预警。危性岩石在三点弯曲条件下的声发射参数表征的损伤前兆出现时间顺序为:事件率 < 振铃计数 < 能量计数,与单轴压缩条件下的损伤前兆出现时间顺序一致。以事件率表征损伤能很好反映岩石内部裂纹变化的全过程。

(2) 声发射关联维数 D 变化模式与单轴压缩不同,呈“降 - 升 - 降”变化模式,关联维数的二次降低预示破裂即将发生,可以作为岩石破裂失稳的前兆信息。

参考文献:

- [1] 杨永杰,王德超,李 博,等. 煤岩三轴压缩损伤破坏声发射特征[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(1):127-135.
- [2] 赵 健,雷 蕾,蒲小勤. 分形理论及其在信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008:1-10.
- [3] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社,1996:136-137.
- [4] 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.
- [5] 高保彬,李回贵,李化敏. 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.
- [6] 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.
- [7] 张 昕,付小敏,沈 忠,等. 单轴压缩下砂岩声发射及分形特征研究[J]. 中国测试,2017,43(2):13-19.
- [8] 严伟洋,赵其华,韩 刚. 常规三轴压缩下斜长花岗岩声发射分维特征分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):140-144,173.
- [9] Li D X, Wang E Y, Kong X G, et al. Fractal characteristics of acoustic emissions from coal under multi-stage true-triaxial compression [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(5):2021-2032.
- [10] 王泽鹏,顾义磊,耿文博,等. 不同粒度砂岩声发射分形特征研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S2):594-599.
- [11] 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.
- [12] 吴贤振,刘建伟,刘祥鑫,等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(1):28-34,41.
- [13] 张国凯,李海波,王明洋,等. 岩石单轴压缩下损伤表征及演化规律对比研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(6):1074-1082.
- [14] 徐 涛,杨天鸿,唐春安,等. 孔隙压力作用下煤岩破裂及声发射特性的数值模拟[J]. 岩土力学,2004,25(10):1560-1565,1574.
- [15] 龚 斌,唐春安. 马蹄形隧道围岩非线性变形破坏的数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):28-32,54.
- [16] 左建平,黄亚明,刘连峰. 含偏置缺口玄武岩原位三点弯曲细观断裂研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(4):740-746.
- [17] 闫召富. 基于声发射的花岗岩拉剪破裂识别方法研究[D]. 南宁:广西大学,2018:16-18.
- [18] 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,2008,28(S2):3383-3390.