

# 混凝土损伤的声发射特征分形分析

黄新民<sup>1,2</sup> 彭跃社<sup>3</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082) (2. 邵阳职业技术学院机电工程系, 邵阳 422000)

(3. 邵阳学院理学与信息科学系, 邵阳 422000)

**摘要** 针对目前只有少量成熟的方法可用于评估混凝土的损伤破坏, 并对结构的状态不能及时做出判断, 本文提出用声发射技术来监测它的损伤演化. 根据所得的声发射特征参数时间序列分形理论研究了它的损伤演化过程和破坏程度, 得出了水泥砂浆破坏全过程各个应力水平声发射分形特征以及分形维值随实验时间的变化规律. 其结果表明: 在加载初中期, 分形维数忽大忽小, 在临近破坏时, 分形维数出现“最小-最大”变化模式, 利用此模式可为水泥砂浆临界损伤破坏提供一个新的判据.

**关键词** 声发射, 水泥砂浆, 分形模型, 临界断裂

## 引言

近年来建筑行业突发事故频繁, 甚至整座建筑物倒塌, 这些事故的原因往往不是肉眼可见的破损, 而是这些结构还存在内部缺陷, 这些肉眼看不见的潜在缺陷有时更具威胁, 常常造成巨大的经济损失, 为了避免这种灾难性事故的发生, 对结构的维修和诊断提供足够多的信息, 无损检测与评价在这里发挥了重要作用. 因此, 如何通过一定的监测手段就可以分析判断结构有无缺陷, 它们可能在什么位置发生就成为当前国际上的一个研究热点<sup>[1]</sup>. 现有大量的混凝土结构, 由于化学反应、应力和疲劳荷载作用, 混凝土将产生裂缝和缺陷, 目前只有少量成熟的方法可用于评估混凝土的损伤破坏, 尤其对服役结构常采用现场取样进行力学实验分析来评价结构的状态, 这样将消耗大量的时间, 而且对结构的状态不能及时做出判断, 无法实时为实际工程服务<sup>[2,3]</sup>. 混凝土结构产生裂缝和缺陷时, 它将释放能量, 这种能量以弹性波的形式传播, 该现象称为声发射 (acoustic emission, AE)<sup>[4]</sup>. 它是无损检测中唯一的被动检测技术, 只要多布置些传感器就能对整个结构实时进行监测与评价, 准确反映结构内部变化. 然而, 如何根据声发射信号特征准确、快速定量评价混凝土的临界损伤破坏, 目前仍处于探索阶段.

通过对混凝土损伤声发射信号特征的大量调查分析, 发现不同的声发射过程或同一过程的不同状态下, 声发射的测试结果具有某种程度的相似性, 表明其生成的物理机制中可能存在分形过程, 而作为这一过程的伴生现象, 声发射参数序列就有可能存在分形特征. 因此, 我们可以将描述时间序列分形特征的分形维数引入到水泥砂浆失效的声发射监测中来, 以便更进一步分析水泥砂浆损伤演化过程.

## 1 实验方案与加载装置

实验采用的试件为水泥砂浆梁, 砂浆的水灰比为 0.5, 灰砂比为 1:3, 试件的尺寸为 40mm × 40mm × 160mm. 浇注后, 在标准养护条件下养护至 28 天, 在 INSTRON8501 万能试验机上进行三点弯曲试验, 加载装置如图 1 所示.

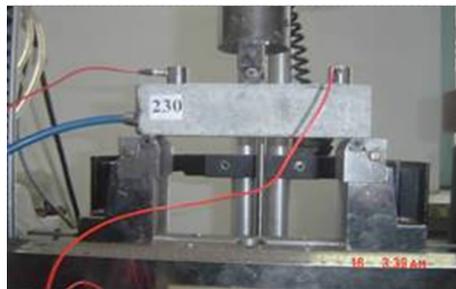


图1 水泥砂浆三点弯曲实验声发射测试装置

Fig. 1 Acoustic emission testing device of cement mortar three-point bending experiment

加载速度为0.025mm/min. 换能器放置在离梁左右两端各20mm处, 首先不加载, 测试环境噪声水平, 实验发现环境噪声都在55dB以下, 故阈值选为55dB, 使用断铅实验, 调整两个换能器有相同的灵敏度并测量水泥砂浆的声速. 前置放大器的增益为40dB, 主放大器的增益为20dB.

## 2 声发射参数时间序列分形理论预测水泥砂浆的损伤演化

### 2.1 水泥砂浆损伤声发射过程的分形特征

为了考察水泥砂浆损伤声发射过程在自相似意义下是否具有分形特征, 首先引入声发射参数的分形维数概念. 运用 Higuchi 算法来计算声发射参数时间序列的分形维数<sup>[5]</sup>. 这种算法主要着眼于计算时间序列的路径长度, 从而计算时间序列的分形维数. 对于时间序列  $X(j)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), Higuchi 算法首先计算这个时间序列图的部分路径长度.

$$L_m(k) = \left\{ \left( \sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \right) \frac{N-1}{[(N-m)/k]k} \right\} / k \quad (1)$$

其中,  $k$  为时间序列分块大小,  $m = 1, 2, \dots, k$ ,  $[a]$  表示  $a$  的整数部分,  $N$  表示时间序列的长度. 然后再计算时间序列图的归一化长度:

$$L(k) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \left\{ \frac{N-1}{k^2} \left( \frac{1}{[(N-m)/k]} \sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} |X(m+ik) - X(m+(i-1)k)| \right) \right\} \quad (2)$$

式中符号意义同(1)式, 具体推导过程见文献[5].

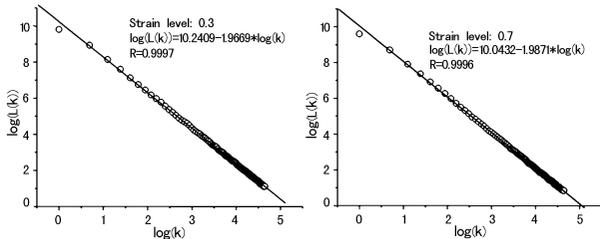


图2 不同应变水平下水泥砂浆损伤声发射分形特征及维数

Fig.2 Cement mortar damage AE fractal

characteristic and dimension under different strains

通过(2)式可知, 对于每给定一个, 可求出一个, 对于给定个值, 在双对数坐标中可得到个坐标点. 对个点采用最小二乘法进行拟合, 如果拟合成直线, 则说明声发射参数时间序列在给定的尺度范围内具有分形特征, 拟合直线的负斜率即为声发射时间参数序列的分形维数. 图2为水泥砂浆损伤过

程中声发射计数在应变水平为0.3和0.7倍破坏应变时分形维数线性拟合图.

从图2可以看出线性回归的相关系数都大于0.99, 这表明声发射参数时间序列具有明显的分形特征. 由该图还发现在不同应变水平状态下, 分形维数值不等, 说明不同应变状态下声发射过程具有不同的自相似程度.

### 2.2 水泥砂浆损伤演化声发射过程的分形分析

根据上述分析, 水泥砂浆损伤过程中所得到的声发射参数时间序列具有很好的分形特征, 且在不同的应变状态下具有不同的分形维数值. 那么能否利用分形维数值的变化规律来揭示水泥砂浆损伤演化过程呢? 利用上面的实验得到的声发射计数时间序列, 我们分别计算出不同应变状态下声发射过程的分形维数. 分形维数变化曲线如图3所示.

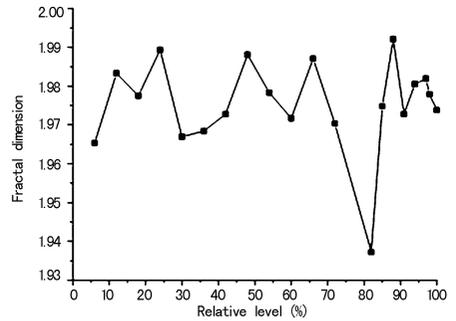


图3 水泥砂浆损伤过程中声发射分形维数变化曲线

Fig.3 Curve of AE fractal dimension during cement mortar experiment

从图3可以看出, 在加载初中期声发射计数时间序列的分形维数忽大忽小, 不稳定但变化规律不明显, 而在加载后期, 分形维数值变化非常剧烈, 尤其在0.85倍破坏应力处, 出现一个“最小-最大”变化模式, 这说明该时刻是裂纹进入快速扩展的转折时刻, 表明其物理变化机制中存在突变的成分, 而声发射计数时间序列分形维数的“最小-最大”模式正是这一物理机制的外部反应. 因此, 我们可以将此模式作为水泥砂浆临界损伤破坏的判断依据, 从而进行水泥砂浆失效预警.

需要指出的是, 由于水泥砂浆材料自身结构的特点, 在受力过程中, 声发射参数会由于试块上的局部剥落而产生突发性, 但这种变化并不意味着试块的断裂. 因此, 直接使用声发射参数识别临界状态将会存在一定的困难. 而分形特征函数是建立在声发射过程自相似意义下尺度不变性的特征之上, 因而, 声发射过程的分形维数具有相对稳定性, 不

会由于声发射信号的突发性跳跃而发生显著的变化<sup>[6]</sup>.

### 3 结论

本文通过水泥砂浆梁三点弯曲试验的声发射监测,对它破坏全过程的声发射特征与损伤演化过程进行了分形分析,取得主要结论如下:

- 1) 水泥砂浆、混凝土等这类脆性材料损伤的声发射特征信号具有明显的分形特征.
- 2) 分形维数随着应力状态的变化而变化.
- 3) 根据水泥砂浆裂纹进入快速扩展阶段分形维数出现的“最小-最大”变化模式,我们提出将此模式作为水泥砂浆、混凝土等脆性材料临界损伤破坏的判据,进行失效预警.

### 参 考 文 献

- 1 陈长征,罗跃纲,白秉三等. 结构损伤监测与智能诊断. 北京: 科学出版社, 2001: 1 ~ 3 (Chen Changzhen, Luo Yuegang and Bai binsan. Structure damage monitor and intelligent diagnosis. BeiJing: Science Press, 2001: 1 ~ 3 (in

- Chinese))
- 2 Ohtsu M. Rate process analysis of acoustic emission activity in core test of concrete. *Concrete Libr JSCE*, 1992, 20: 143 ~ 153
- 3 Ishibashi A, Hidaka E, Farahat AM et al. Deterioration evaluation by AE in concrete samples. Proc 6th Int Conf Structural Faults and Repair, London: Engineering Technics Press, 1995, 2: 69 ~ 74
- 4 陈兵, 张立信, 刘娟育. 混凝土梁三点弯曲负荷下声发射特性研究. 无损检测, 2000, 22 (3): 109 ~ 111 (Chen Bing, Zhang Lixin, Liu Juanyu. Study on the acoustic emission characteristics of the concrete beams under three-point bending load. *Non-Destructive Technology*, 2000, 22 (3): 109 ~ 111 (in Chinese))
- 5 Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Phys D*, 1988, 31: 277 ~ 283
- 6 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. 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. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20 (6): 801 ~ 804 (in Chinese))

## FRactal Analysis on the Characteristics of Acoustic Emission of Concrete

Huang Xinmin<sup>1,2</sup> Peng Yueshe<sup>3</sup>

(1. College of electrical and information engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2. Department of mechanical and electric, Shaoyang professional-technology college, Shaoyang 422000, China)

(3. Department of science and information, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

**Abstract** Only a few mature techniques can estimate the mechanical damage of concrete, but they cannot offer a real-time judgement for structural state, acoustic emission (AE) technology was presented to monitor its damage evolution under three point bending testing. The cement mortar damage evolution law was studied applying the AE characteristic parameter time series fractal theory. The acoustic emission fractal features of all stress levels in the whole cement mortar failure and the changing rules of fractal value were studied. The results show that, in the initial and middle stage of loading, the fractal value of cement mortar is unsteady; When the cement mortar crack begins its fast propagation, the fractal dimension appears the “increase-decrease” pattern, which can be used to identify the cement mortar critical failure.

**Key words** acoustic emission, cement mortar, fractal modal, critical failure