

混凝土材料声发射过程及其自相似性的研究

纪洪广¹⁾ 邵永波²⁾ 蔡美峰¹⁾

1)北京科技大学资源工程学院,北京 100083 2)东北大学,沈阳 110006

摘要 将对材料声发射的研究同对力学过程的研究、材料断裂损伤等破坏过程的研究相结合,提出了声发射过程的概念.在此基础上,进一步给出了定量考察声发射过程自相似性的自相似特征函数.测试结果分析表明,混凝土试块在单轴压缩过程中,声发射过程的自相似程度随着应力状态的变化而变化.

关键词 混凝土材料;声发射过程;自相似性

分类号 TB551

大量实验结果证明,材料的声发射性能受到外加的力学过程、变形破坏过程、人为干扰、测试手段等多种因素的影响.它既是所承受的力学过程的结果,又是材料内部结构变化的外部表现.因此,声发射信号可以视为集中包含有关材料的力学过程、变形过程、测试过程等诸多因素信息的全息元.欲通过声发射检测来获取有关材料内部结构变化的信息,仅仅把声发射当作一种信号来分析是不够的,因为它不仅同时包含了力学过程和材料结构演化过程及实验条件等多方面的信息,而且和力学过程及材料内部结构的演化过程遵循着同一种演化秩序——时间(应力水平).因此,必须将声发射也视为一个过程来分析,只有这样,才能使对声发射的研究同对力学过程的研究、同对材料断裂损伤等破坏过程的研究统一起来;也只有从过程的角度,才能够更完整地探讨声发射同力学过程及材料结构演变过程的关系.

本文的工作,旨在使对声发射的研究同对力学过程与材料破坏过程的研究有机地结合起来,为声发射信号中 useful 信息的提取提供基本依据,为材料声发射性能的研究提供一条新的思路.

1 声发射过程的概念

为了研究材料声发射过程的非线性特征,进行了混凝土试块的单轴压缩试验.试块规格为 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$,配合比为:水泥:砂:石子:水 = 1:1.6:3.2:0.6,最大骨料粒径 1 cm.试块成型后 24 h 脱模,然后在 24°C 的水中浸泡养护 1 周,之后在标准养护室内养护至 28 d.

所用加载设备为 15 t 普通压力机,用沈阳计算机研究院生产的 AE-04 型声发射仪进行声发射检测.试验设置总增益 100 dB,其中前置放大器增益 40 dB,主放大器增益 60 dB,设置门槛水平 32 dB.测试系统如图 1 所示.

图2为声发射率及声发射释能率2个参数的试验结果.从图可以看出,不同参数,在不同状态下,其值的大小表现出很大的随机性与离散性.

如果设材料在一个力学过程中,在时刻 t 声发射参数 x 取某一值的概率为 e ,那么,材料的声发射过程可以表示为一个随机过程,即:

$$x = X(e, t) \quad (e \in \Omega, t \in T) \quad (1)$$

式中: x 为声发射参数; e 为与状态 t 相对应的概率值, $0 \leq e \leq 1$; T 为过程总延续时间; Ω 为概率空间; t 为试验时间,也可以是相对应力水平或相对应变水平,当然,此时的 T 便为材料的极限相对应力或极限相对应变.

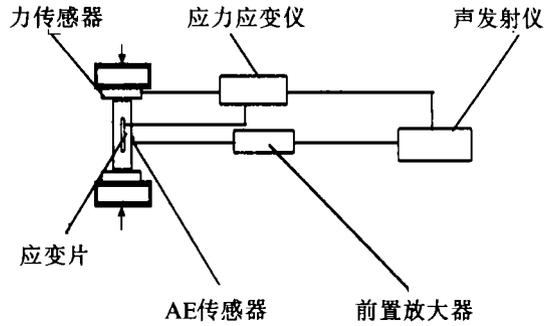


图1 加载及测试系统示意图

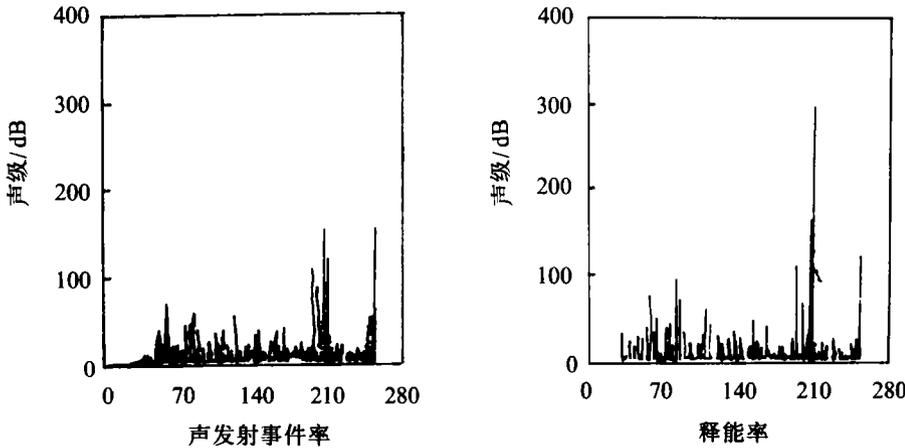


图2 混凝土立方体试块在单轴压缩时的声发射

就混凝土材料而言,配合比、水灰比、水泥种类、骨料大小与品种、施工条件等条件的不同,都会对声发射造成很大的影响.因此,问题的难点在于,在某一状态下声发射参数取某一值的概率 e 同时受到许多因素的影响,即同时是许多随机变量的函数.这里,概率 e 可以表示成:

$$e = f(m, t, h, c, \dots) \quad (2)$$

式中: m 为材料本身的特性参数; t 为温度; h 为湿度; c 为实验条件.

显然,由于这诸因素的多变性、随机性、模糊性以及彼此之间的相关性,欲寻求某一准确的表达式来确定这一概率是很难的,或者是根本不可能的.因此,虽然声发射过程可以表达为一个随机过程,但并不可能利用现有的随机理论来对声发射过程予以准确的描述和分析.然而,作为一种非线性过程,由于是材料在荷载作用下内部结构演化的伴生过程,它就必然同时包含了力学过程和材料演化过程的有关特性,因此,可以根据材料的结构特点,通过材料的力学试验来考察和探讨声发射过程的非线性特征.

2 声发射过程的自相似性及自相似特征函数

自相似性是指事物或现象经过若干步细分变小之后,再将每一部分放大,使其与原事物比较,二者仍然是“相像”的,即指局部与整体在形态、功能和信息等方面是相似的^[1]。

从图 2 可以看出,不同声发射过程或同一过程不同状态下,声发射参数的测试结果既有明显的区别,又有某种相似性.已有实验证明,声发射序列不仅在时域上的分布是分形的^[2],而且声发射事件在空间上的分布也具有分形特征^[3],这说明声发射过程具有自相似特征。

为了定量描述混凝土材料不同声发射过程及声发射过程不同阶段的自相似程度,考察声发射过程自相似性的演变规律,应建立自相似特征函数。

声发射过程或声发射状态之间的自相似程度可以用自相似函数来表示.对于声发射基本参数序列: $X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n$, 可将其按一定的时间间隔(应力水平)划分为 $m (m \leq n)$ 个时间区域,而将每个时间区域里的声发射基本参数序列段所表示的声发射行为,如最大声发射率、最大振幅、平均声发射率、平均振幅、声发射计数等算出,这样就得到一个容量为 m 的样本:

$$Y = \{y_i\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

然后,先取 Y 中的前 r 个元素来构成 r 维的“嵌入空间”,得矢量 z_1 , 即:

$$z_1 = \{y_1, y_2, \dots, y_r\} \quad (4)$$

之后,随时间滑移,每滑移 1 个数据得 1 个矢量,这样可求出所有的矢量 z_k :

$$z_k = \{y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+r-1}\} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

取前 s 个 z_k 值,依次计算出 (z_i, z_j) 之间的距离 d_{ij} , 其中 $i, j = 1, 2, \dots, r$.

给定自相似比 $l=1/\varepsilon$, 其中 ε 为给定的标度,计算有多少个点对之间的距离小于 ε , 并求出这些点对占总点对的比例 c . 这样不断改变 ε 值,可计算出介于 0 和 1 之间的若干组 $c(\varepsilon)$ 值,则可计算出自相似系数 μ_s . 定义^[4]:

$$\mu_s = \frac{\sum \ln \varepsilon_j \cdot \ln c_j - \frac{1}{n \cdot \sum \ln \varepsilon_j \cdot \ln c_j}}{\left\{ \left[\sum (\ln \varepsilon_j)^2 - \frac{1}{n \cdot (\sum \ln \varepsilon_j)^2} \right] \left[\sum (\ln c_j)^2 - \frac{1}{n \cdot (\sum \ln c_j)^2} \right] \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

式中: \sum 表示从 $j = 1$ 到 $j = n$ 求和:

$$c(\varepsilon)(1/n^2) \sum_i \sum_j \mu(\varepsilon - d_{ij}); \quad \mu(\varepsilon - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & \varepsilon - d_{ij} \geq 0 \\ 0 & \varepsilon - d_{ij} < 0 \end{cases}$$

这样,可根据 μ_s 的大小来判断 2 个过程或 2 种状态的相似程度。

图 3 为混凝土试块在单轴压缩情况下声发射过程自相似系数随相对应力水平变化的情况.可以看出:在不同应力水平上,声发射过程的自相似程度是不一样的;用不同声发射参数求得的自相似系数有着不同的灵敏性,这也说明,不同声发射参数对声发射过程的描述作用是不一样的.图 4 为混凝土试块在三点弯曲时在临界断裂状态下自相似性所表现出的临界识别模式,即自相似性系数的“突降—最小—回升”模式.因此,若选取适当的 r 和 μ_s , 可使自相似系数成为声发射状态出现异常的识别特征。

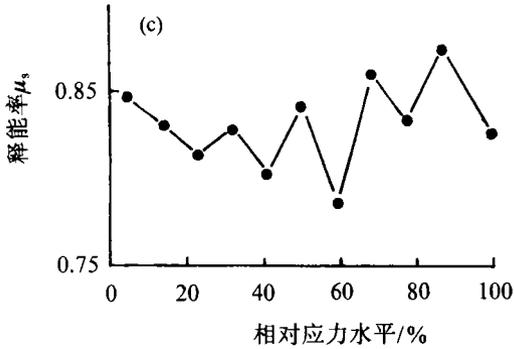
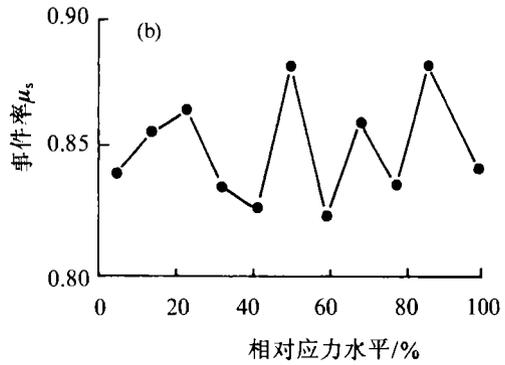
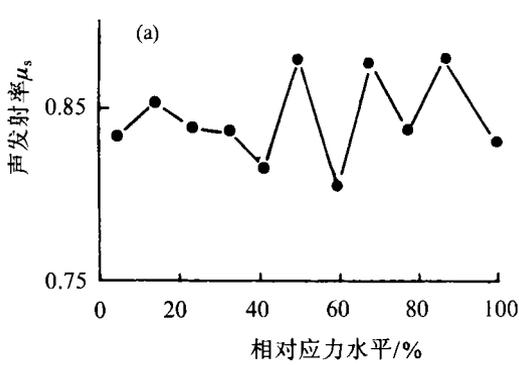


图3 混凝土试块在单轴压缩情况下声发射过程自相似系数随相对应力水平的变化

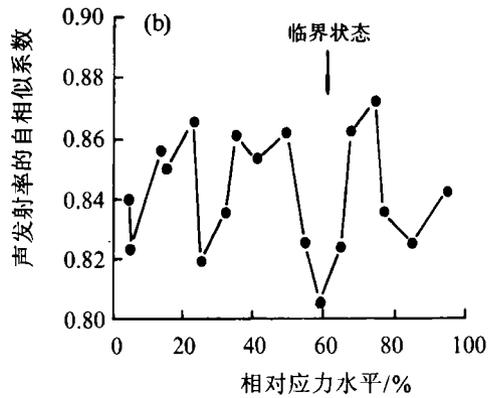
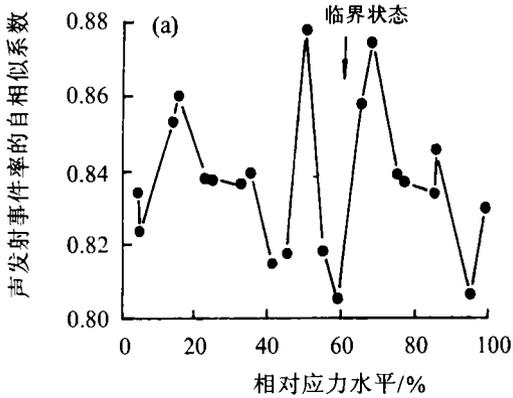


图4 混凝土试块在三点弯曲时在临界断裂状态下的自相似临界识别模式

3 结论

(1) 材料的声发射不仅同时包含了力学过程和材料结构演化过程及实验条件等多方面的信息,而且和力学过程及材料内部结构的演化过程遵循着同一种演化秩序——时间(应力水平).所以,声发射过程同材料所受的力学过程及材料内部结构的演化过程遵循着同一种演化机制. 尽管由于受多种因素所控制,材料的声发射过程往往表现出很大的随机性,但它的某些特性仍然可以通过材料的力学试验来把握.

(2) 试验结果证明,材料的声发射过程具有自相似特征.

(3) 利用所建立的自相似特征函数可以对声发射过程或声发射过程中不同状态的自相似

程度进行定量描述.试验结果表明,混凝土试块在单轴压缩过程中,相应声发射过程中不同状态下的自相似程度是不一样的,即声发射过程的自相似程度随着应力状态的变化而变化.

(4)根据声发射过程的自相似性可以对材料的临界断裂状态进行判别.

参 考 文 献

- 1 刘玉松.分形与分维及其在工程地质中的应用展望.勘查科学技术,1991(1):19
- 2 朱传镇等.地震的分形特征及其在地震预测中的意义.地震研究,1991,14(1):81
- 3 Takayuki Hirata. Fractal Structure of Spatial Distribution of Microfracturing in Rock, Geophysics. J R Austr Sco, 1987, 90: 369
- 4 蒋淳,冯德益.地震序列的自相似性分析及其在地震预报中的应用.地震学报,1993,15(4):11

Experimental Study on Acoustic Emission Process and Its Self-Similarity of Concrete Material

*Ji Hongguang*¹⁾ *Shao Yongbo*²⁾ *Cai Meifeng*¹⁾

1) Resources Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China 2) Northeastern University, Shenyang 110006

ABSTRACT The study on acoustic emission (AE) of concrete material is combined to the studies on mechanical process and fracture damage, and the conception of AE process is put forward. On this basis a quatitative function for analysing the self-similarity of AE process has been developed. The experimental results show that the values of the self-similarity function of the AE process in concrete material vary with the stress state during uniaxial compression.

KEY WORDS concrete material; acoustic emission process; self-similarity