

混凝土材料断裂的声发射自相似性识别特征^{*}

纪洪广 蔡美峰

(北京科技大学资源工程学院 北京 100083)

摘要 将对材料声发射的研究,力学过程的研究,同对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。给出定量考察声发射过程的自相似性特征函数。并在此基础上,根据混凝土试块的三点弯曲试验,确定出了混凝土试块断裂的声发射自相似性识别特征。

关键词 混凝土材料, 断裂, 声发射过程, 自相似性, 识别特征

分类号 TU453

1 引言

实验结果表明,象混凝土这类多裂隙、多相变复合材料,其受力后的声发射往往是同时有多个声发射源产生,这样,所测得的声发射信号是多个声发射源信号的叠加。因此,用信号分析的方法来建立力学过程同声发射参数间的关系非常困难^[1],对于原信号的捕捉和追踪则近乎不可能。所以,至今为止,声发射同力学过程间的关系的研究仍只停留在定性分析的水平上。

混凝土内部同时含有许多不同性质的缺陷、裂纹及微观构造上的不均匀性,混凝土材料的断裂过程实质上是一个由原生裂隙到微裂纹扩展,最后出现宏观断裂的连续过程。而断裂力学是以主裂纹的开裂作为材料断裂的判别依据,因此,当采用断裂力学理论解决混凝土的断裂问题时,一个很重要的问题,就是如何确定临界条件,即在上述连续过程中取哪一状态为开裂的临界状态。

本文一改仅仅把声发射视为信号来分析的做法,在给出声发射过程定义的基础上,提出从非线性的角度来寻找力学过程同声发射参数间的关系。给出了自相似特征函数。并通过试验,分析了混凝土试块在三点弯曲过程中声发射过程自相似性的演化规律,进而得出了混凝土断裂临界状态的声发射自相似性识别特征。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,为混凝土材料的断裂机理研究提供一条新的思路,为声发射技术在混凝土结构的稳定性评价及破坏预报方面的应用提供定量依据。

2 声发射过程的概念

图1为混凝土试块(规格为7 cm × 7 cm × 7 cm,配合比为水泥 砂 石 水 = 1 1.6 3.2 0.6,最大骨料粒径1 cm)在单轴压缩时测得的声发射率及声发射释能率两个参数的试验结果。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。

材料的声发射过程,通常表现为声发射参数的序列。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 ——声发射参数;

e ——与状态 t 相对应的概率值, $0 \leq e \leq 1$;

T ——过程总延续时间;

Ω ——概率空间;

t ——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。

就混凝土材料而言,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

1997年6月18日收到初稿,1997年10月27日收到修改稿。

* 教育部博士点基金资助项目。

作者 纪洪广 简介:男,35岁,博士,1984年毕业于山东矿业学院土木系,1997年在东北大学获博士学位,现任教授,主要从事岩石、混凝土材料的断裂、损伤力学、地压监测与控制技术、声发射技术等方面的研究与工程应用工作。

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

式中： m ——材料本身的特性参数；

t ——温度；

h ——湿度；

c ——实验条件，等等。

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，或者根本是不可能的。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，我们可以根据材料的结构特点，通过材料的力学试验，从非线性学科的角度来考察和探讨声发射过程的非线性特征。下面根据试验，对混凝土材料声发射过程的自相似性进行讨论。

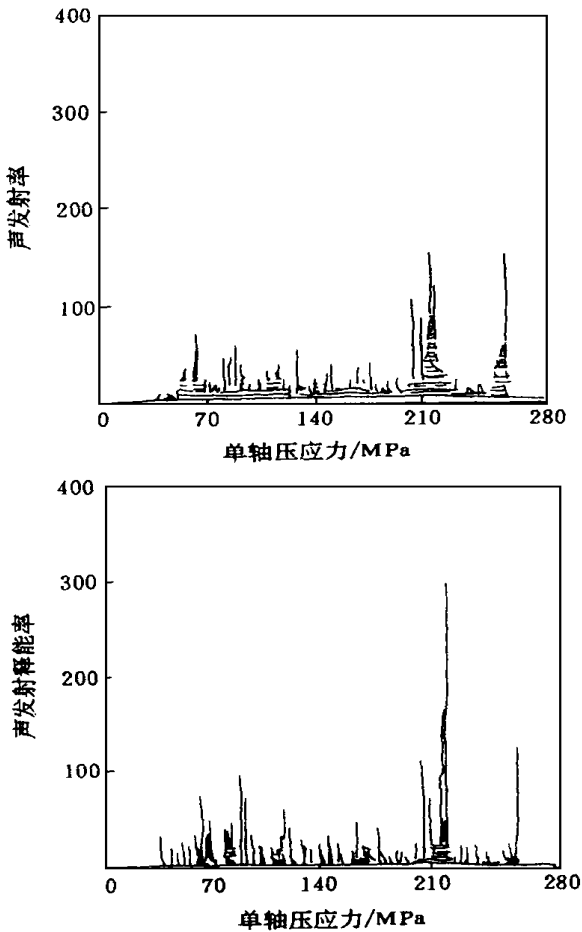


图1 混凝土立方体试块在单轴压缩时的声发射

Fig.1 Acoustic emission of cubic sample of concrete under uniaxial compression

3 声发射过程的自相似特征函数

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“相象”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1可以看出，不同声发射过程或同一过程不同状态下，不同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^[2,3]，而且声发射事件在空间上的分布也具有分形特征^[4]，具有分形特征也就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，需先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 $m(m > n)$ 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，随时间推移，每推移一个数据得一个矢量，这样可求出所有的矢量 z_k ：

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

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 $i, j = 1, 2, \dots, k$ 。给定自相似比 $1 = 1/h$ ，

为给定的标度，计算有多少个点之间的距离小于 $1/h$ ，并求出这些点对占总点对的比例 c 。这样不断改变 $1/h$ 值，可计算出介于 0 和 1 之间的若干组 $c(1/h)$ 值，则可计算出自相似系数 μ_s 。对于 h 个 $j, j = 1, 2, \dots, h$ ，则定义^[5]

$$\mu_s = \frac{\ln \sum_{j=1}^h c_j}{h \ln \sum_{j=1}^h c_j} \cdot \left[\frac{(\ln j)^2 - \frac{1}{h(\ln j)^2}}{(\ln c_j)^2 - \frac{1}{h(\ln c_j)^2}} \right] \quad (6)$$

式中： $\sum_{j=1}^h$ 表示从 $j = 1$ 到 $j = h$ 求和；

$$c = c(1/h) = \frac{1}{h^2} \sum_{i,j} \mu(1/h - d_{ij})$$

其中， μ 为 Heavside 函数，其定义为

$$\mu(1/h - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & - d_{ij} \geq 0 \\ 0 & - d_{ij} < 0 \end{cases}$$

这样，可根据 μ_s 的大小来判断两个过程或两个状态的相似程度。

图2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。因此,若选取适当的 r 和 s , 可使自相似系数成为声发射状态出现异常的识别特征。

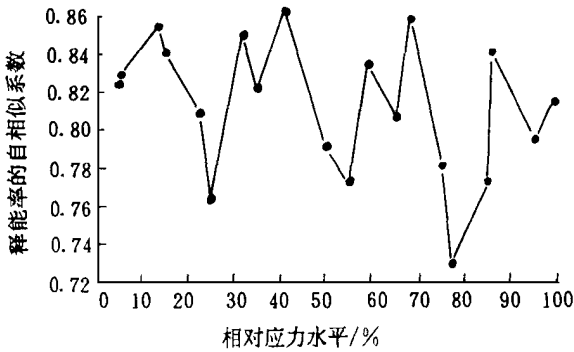


图 2 混凝土试块在单轴压缩情况下声发射自相似系数随相对应力水平的变化

Fig. 2 Variation of self-similar coefficient of AE process with stress level of concrete under uniaxial compression

4 混凝土材料断裂过程中声发射过程自相似性的变化特征

为了研究混凝土断裂过程中的声发射自相似特征,进行了中间有切口的混凝土梁的三点弯曲实验。

试件尺寸为 4 cm × 8 cm × 28 cm, 配合比为水泥 砂 石子 水 = 1 1.35 3.15 0.55, 试块成型后 24 h 脱模, 之后在 20 °C 的水中浸泡 7 d, 而后放置在标准养护室中养护至 28 d。试块中部预制有深 4 cm 的切口, 实验前用钢锯将切口端部锯尖, 采用连续加载的方式。试验过程中, 在进行声发射检测的同时, 用千分表测出梁中心点处的竖向位移。声发射检测设置总增益 100 dB, 其中前放 40 dB, 主放 60 dB, 设置阈值 32 dB。实验系统如图 3 所示。

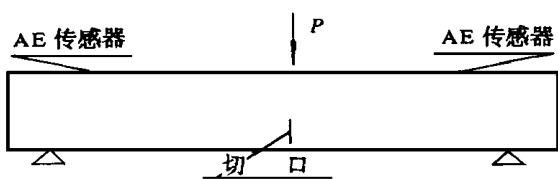


图 3 混凝土切口试块三点弯曲实验示意图

Fig. 3 Notched concrete sample for three point bending experiment

图 4 为试验中测得的声发射率曲线和 $P-\Delta$ 曲线 (荷载-位移曲线)。

图 5 为在同一个三点弯曲试验过程中在不同应力水平下, 声发射率、声发射事件率和声发射释能率 3 个声发射参数序列自相似系数的变化曲线。

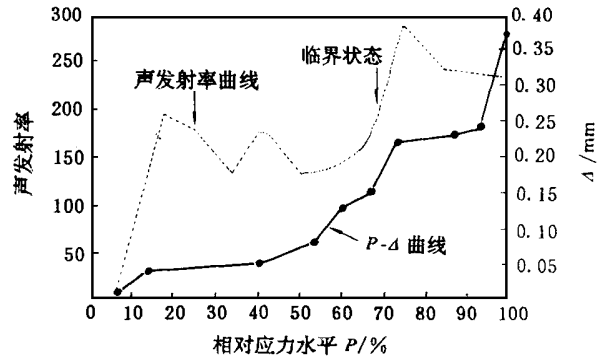
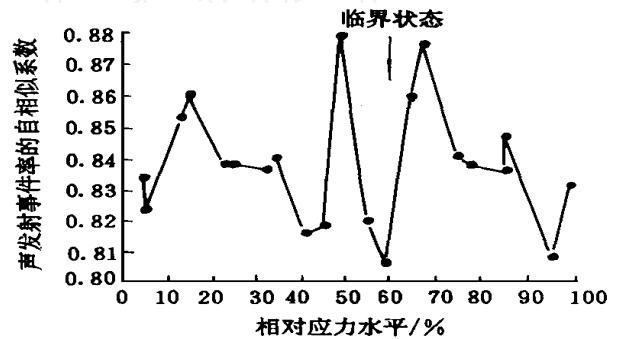
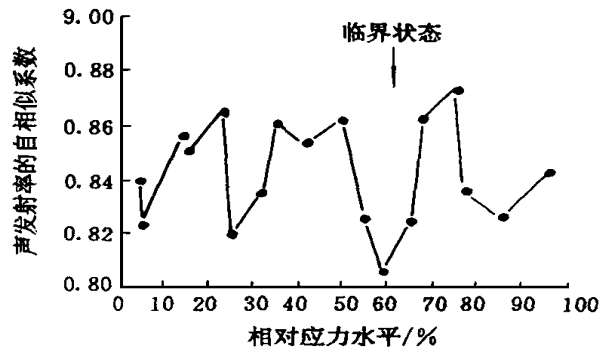


图 4 混凝土试块三点弯曲试验 $P-\Delta$ 曲线

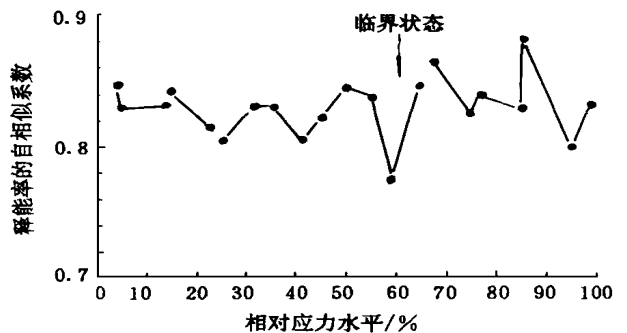
Fig. 4 P curve of concrete sample in three point bending experiment



(a)



(b)



(c)

图 5 混凝土中间切口试块在三点弯曲试验过程中不同声发射参数在不同应力水平下自相似系数的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of self-similar coefficient with different AE parameters under different stress levels in three point bending experiment of notched concrete sample

从图 4 可看出,当相应力水平达到 65%左右时,声发射事件计数曲线突然上升,位移急剧增大,此时,试块达到断裂的临界状态^[6]。从图 5 则可以看出来,在该应力水平上自相似系数出现最小值,之后又逐渐回升。试块的临界断裂就发生在从最小值向上回升的过程当中。因此,声发射过程自相似系数的最小值,预示着宏观断裂的来临。我们把材料在临界断裂状态下所表现出的声发射自相似性模式表达为“最小-回升”型。

5 结 论

(1) 可以认为材料所受的力学过程及材料内部结构的演化过程,是遵循着同一种演化机制的非线性过程,并可以用声发射来研究。

(2) 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。

(3) 试验结果表明,混凝土试块在三点弯曲过

程中,相应声发射过程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。声发射过程自相似系数的最小值,预示着宏观断裂的来临。所以,混凝土试块在临界断裂状态下所表现出的声发射自相似性识别模式为“最小-回升”型。

参 考 文 献

- 1 卢文韬. 岩石声发射实验的衰减排噪法. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 187~192
- 2 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): 39~45
- 3 朱传镇, 王林英. 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): 81~83
- 4 纪洪广. 混凝土材料声发射技术研究与应用[博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 1996
- 5 Takayuki Hirata. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock. Geophysics J. R. Austr. Sco., 1987, 90: 369~374
- 6 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): 455~462
- 7 姜福田. 混凝土力学性能与测定. 北京: 中国铁道出版社, 1989

RECOGNITION CHARACTERIZATION OF ACOUSTIC EMISSION SELF-SIMILARITY IN CONCRETE FRACTURING

Ji Hongguang Cai Meifeng

(College of Resources Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract In combination of studies on AE and mechanical process with that of fracture and damage of material, the concept of AE process is proposed. A self-similar characteristic function is provided to quantitatively investigate self-similarity of AE process. Based on the study, the recognition characteristics of AE self-similarity is provided at critical fracturing of concrete under three point bending experiments.

Key words concrete material, fracture, acoustic emission process, self-similarity, recognition characterization

新书简介

《深基坑工程设计施工手册》一书由龚晓南主编,高有潮副主编,中国建筑工业出版社 1998 年 7 月出版,16 开本,134.4 万字,定价 71 元。

该书全面系统地总结、介绍了我国各地应用深基坑工程的各种围护型式、设计计算方法和施工技术。全国各地 80 多位专家参加本书编写和审阅。该书既有系统的设计计算理论又有计算方法和施工技术介绍,并附有较多的工程实例可供参考。该书共设 15 章,分别为:总论、设计计算理论与分析方法、放坡开挖基坑工程、悬臂式围护结构、水泥土重力式围护结构、内撑式围护结构、拉锚式围护结构、土钉墙、基坑围护的其他型式、深基坑工程施工、地下连续墙技术、逆作法技术、深基坑工程环境效应与对策、深基坑工程监测和控制、动态设计及信息化施工技术。书后附有索引。

该书可供从事基坑工程设计、施工、监理、监测和管理人员应用,也可供土木工程设计、研究单位的技术人员和大专院校土木工程专业师生参考。