

# 全波形声发射技术用于混凝土材料损伤监测研究

王余刚, 骆 英, 柳祖亭  
(江苏大学 理学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 在研究了混凝土材料三点弯曲试验下声发射累积能量随载荷变化关系曲线的基础上, 提取了混凝土材料不同破坏阶段的全波形声发射信号并分析了其频谱特性, 并且通过与参数分析结果比较, 发现全波形声发射信号能够实时反映混凝土材料在载荷作用下破坏过程的特征信息。

**关键词:** 建筑材料; 全波形; 声发射信号; 参数分析

**中图分类号:** TU 528.07

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)05-0803-05

## STUDY ON WAVEFORM ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE FOR MONITORING BREAKAGE IN CONCRETE MATERIALS

WANG Yu-gang, LUO Ying, LIU Zu-ting  
(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Based on results of the three-point-bending experiments on concrete materials, the relationship between the cumulative energy of acoustic emission and load is studied, and waveform acoustic emission signal of different destruction states is picked up. Spectrum analysis is carried out, the results of which are compared with those of parameter analysis. The comparison shows that waveform acoustic emission signal can be used to disclose the characteristics of the concrete materials under loading in real time.

**Key words:** building material; waveform; acoustic emission signal; parameter analysis

## 1 引 言

声发射(acoustic emission, AE)是指物体内部缺陷在外力或残余应力作用下, 本身能动地释放出应力波的现象。而声发射技术则是借助电子技术、计算机技术以及信号处理手段将这一现象转化为人们可以利用和认识的信号, 据此来解释结构内部的缺陷变化并判断声发射源的位置以及所处的状态的专门技术, 是一种评价材料或构件损伤的动态无损检测技术。声发射技术可以获得材料或构件内部裂纹等缺陷的产生与扩展信息, 而这一优势是其他无损检测(non-destructive testing, NDT)技术无法实现的。然而由于材料或构件在外载荷作用下内部发出的弹

性波延续的时间非常短, 有时甚至是 ns 级的<sup>[1]</sup>, 这就使得声发射采集的数据量非常的大, 而且处理起来也很困难。于是伴随现代电子技术、计算机技术以及信号处理技术的迅速发展, 全波形声发射采集和分析技术应运而生。

传统声发射技术常用参数分析法来处理信号, 并且也取得了很大成功<sup>[2, 3]</sup>, 但它们只是对波形的简单表述, 而全波形声发射信号则揭示了信号在时域状态下所蕴涵的信息, 它能够提供更全面更详尽的声发射信号特征信息<sup>[4]</sup>。声发射信号波形分析技术指根据所记录的时域波形(及与其相关联的频谱、相关函数等)来分析声发射源信息的一种方法。由于不同声发射源机制产生的声波性质不尽相同, 如固体内部裂纹的形成和扩展、晶格位错、塑性变形、

收稿日期: 2003-09-27; 修回日期: 2003-12-31

基金项目: 江苏省自然科学基金重点资助项目(BK2001213)

作者简介: 王余刚(1977-), 男, 2001年毕业于东北大学城镇建设专业, 现为硕士研究生, 主要从事声发射技术及应用、结构损伤检测方面的研究工作。E-mail: aonisha@163.com.

复合材料的纤维断裂等都会产生声发射，只有对材料的破坏机理有所了解，才能有效地进行波形分析。因此本文首先进行了材料破坏的力学分析，阐述了它的破坏机理，并分析了能量参数，在此基础上对全波形声发射信号及其频谱进行了分析，将其与参数分析进行比较发现全波形声发射信号能够实时有效地反映构件破坏过程的特征信息，这一结果为声发射技术在混凝土材料破坏过程中的检测提供了一个新的判断依据。

## 2 试验研究方法

本试验采用 C15 的普通无筋混凝土，配比为：水泥 砂 石 水=1 1.98 3.25 0.63，试件尺寸为 60 cm×40 cm×10 cm，龄期为 28 d，试验采用 wav2000 全波形声发射仪对混凝土构件进行三点弯曲<sup>[5-8]</sup>试验，8 个中心频率 150 kHz 的压电传感器中，4 个如图 1 方式布置，另外 4 个背面对应放置，用硅胶作耦合剂，前放增益 40 dB，利用 Kaiser 效应去除加载机与构件间的摩擦噪声干扰。

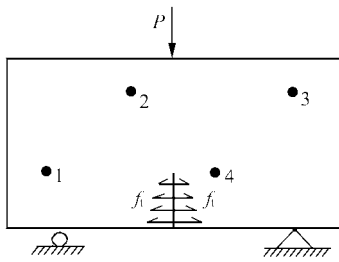


图 1 传感器布置及力学分析

Fig.1 Sensors emplacement and mechanics analysis

## 3 试验结果分析

### 3.1 力学分析

混凝土是由骨料颗粒和水泥浆基体构成的复合材料，在承受载荷之前，内部就存在有微孔穴、微裂纹，加载后原微裂纹扩大，新的微裂纹形成，合并成宏观裂纹，而后宏观裂纹扩展断裂<sup>[9]</sup>，这是混凝土材料的断裂机理。结合上述机理和 Hillerborg<sup>[10]</sup>的粘合裂纹模型，可把裂纹尖端存在的破裂带看成一个破裂面，当载荷  $P$  逐渐增加时，拉应力  $f_t$  逐渐增加(图 1)，裂面将从梁中底面沿直线向上扩展。随着载荷逐步增加，裂面将逐步扩大，直到载荷构件破坏。

### 3.2 声发射能量 载荷关系曲线与能量参数图

图 2 为声发射累积能量随载荷变化关系曲线，破坏载荷 56 kN。图中有两段较为明显的上升阶段，分别处在 36, 43 kN 附近，且曲线成近似折线段： $AB, CD, EF$  段斜率基本相同，约为 0.5 J/kN； $BC, DE$  段斜率也基本一致，约为 2.5 J/kN；而  $FG$  段则非常短，斜率约为 6 J/kN。图 3 为声发射能量参数图，从图中看到： $BC, DE, FG$  段分别与图 2 中相应分段有明显的对应关系，在  $DE$  段内显然声发射的活动性很强，而  $FG$  段突然释放的能量则是由于构件的突然断裂造成。根据以上分析可得以下结论：

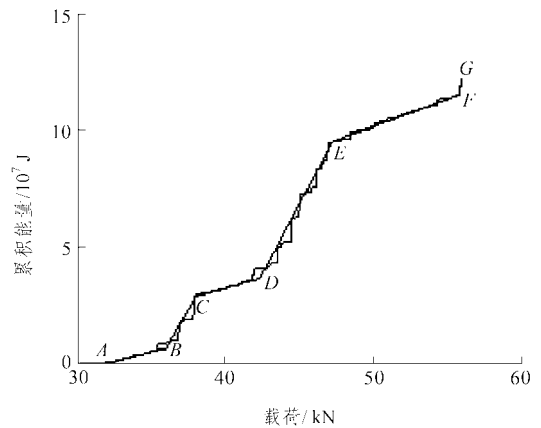


图 2 声发射累积能量随载荷变化曲线

Fig.2 Curves of AE cumulative energy with load

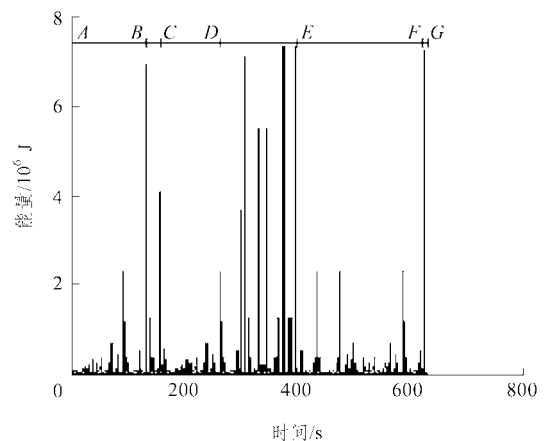


图 3 能量参数图

Fig.3 Figure of energy parameter

- (1) 图 2 中低斜率段意味着混凝土裂纹处于缓慢增长段，而高斜率则表示裂纹处于快速增长段；
- (2) 低斜率段与高斜率段交叉出现，反映了能量积聚、释放的过程；
- (3) 材料破坏前没有明显征兆，反映了混凝土材料的脆性破坏特性；
- (4) 斜率大小只反映裂纹扩展速度，与裂缝大

小有无直接关系有待进一步的研究验证。

### 3.3 声发射信号波形分析及其频谱

图 4 为加载初期(AB 段)采集的信号及其频谱特征图,从图中可以看到信号很微弱,频率成分较窄,集中在 10 ~ 50 kHz 频率段且峰值较低。

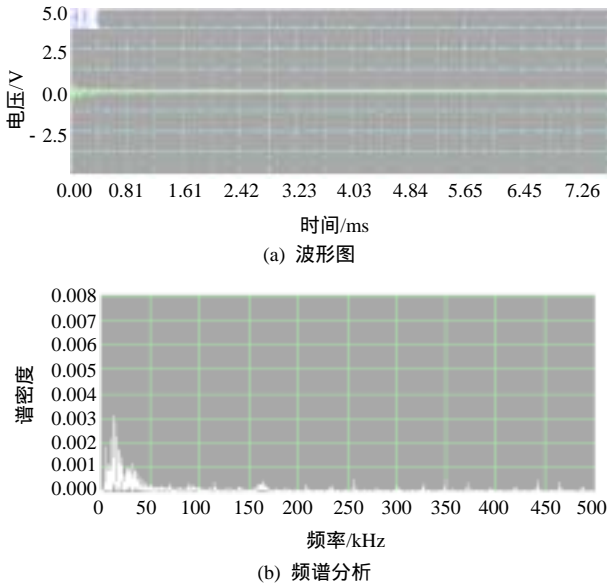


图 4 初期声发射信号及其频谱分析

Fig.4 Initial AE signal and spectrum analysis

图 5 为加载到 37 kN(BC 段)时采集到的信号,时域信号有明显的二次波包出现,且幅值大大增加;从频谱图中可见其在 165 kHz 频率附近激发了一个明显的峰值,同时 30 kHz 附近的峰值也增大了许多。根据前面的分析可知此时微缺陷因出现尖端应力集中而开裂,微裂缝开始出现,应变能随之释放。

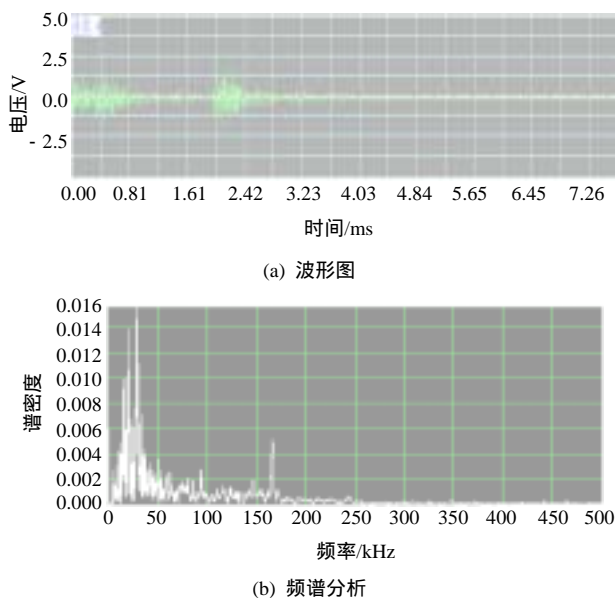


图 5 微裂缝声发射信号及其频谱分析

Fig.5 Tiny crack AE signal and its spectrum analysis

图 6 是 43.2 kN(DE 段)时采集到的信号及其频谱图,时域图中可以看到二次波包时间延迟;频谱图中在 10 ~ 165 kHz 的频宽范围峰值都有所增加,裂纹活动性大大增强,继续向高频成分扩展。

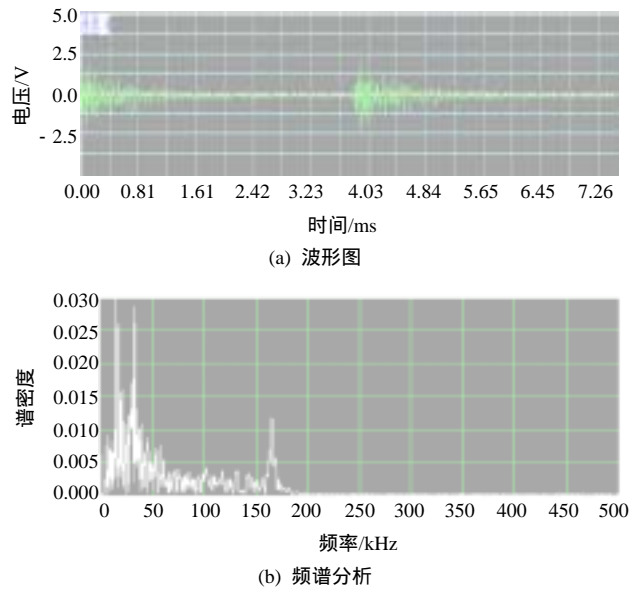


图 6 裂纹扩展信号及其频谱分析

Fig.6 Signal of crack expansion and spectrum analysis

图 7 为载荷 51 kN(EF 段)时的典型信号及其频谱图。时域信号幅值明显增加且延续时间相对很长;频谱很窄,主频集中在 15 kHz 左右,且峰值很高,约为图 6 峰值的 10 倍,反映了材料破坏形式发生了变化,该信号预示宏观裂纹出现。而宏观裂纹的出现必将导致骨料之间摩擦和各缺陷之间相互作用力的加强以及活动频率向低频扩展,因此可以认为构件处于破坏前期,即为破坏前兆。

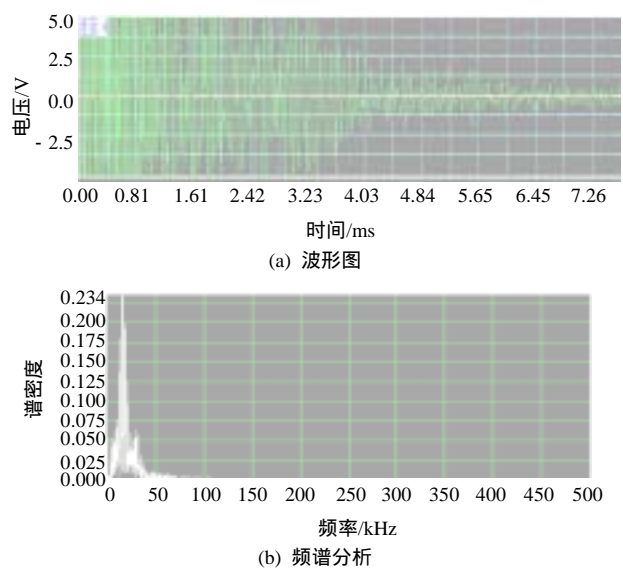


图 7 宏观裂纹信号及其频谱分析

Fig.7 Macroscopic crack signal and spectrum analysis

图 8 为构件破坏前(*FG* 段)时域信号及其频谱。时域信号在一个撞击定义时间内出现三次波包，每次波包出现的时间相对缩短，反映了缺陷的迅速出现与扩展；而频谱图中频谱范围变宽，覆盖了 10 ~ 165 kHz 的频宽范围，且该范围内频率成分非常复杂，表明声发射活动性很强，因此可以认为构件已接近或已经破坏。

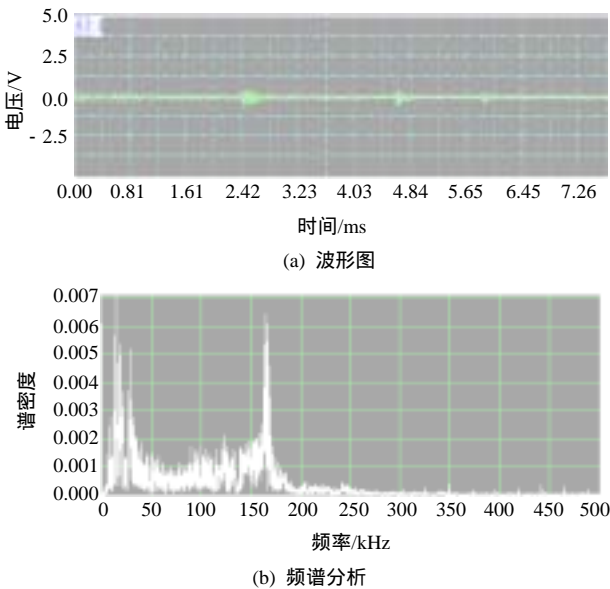


图 8 断裂前 AE 信号及其频谱图

Fig.8 AE signal before breakage and spectrum analysis

表 1 列出了不同载荷阶段频谱及能量分布主要特征，从中看出整个破坏过程频谱基本是由低频到高频变化的，只在 *EF* 段有所不同，由前面分析可以知道此段中有特殊信号出现，峰值很大，同时 *EF* 段所占能量也很大，约占总能量的 17%，据此可以判断构件接近或已经破坏。

表 1 不同载荷阶段频谱及能量分布

Table 1 Spectrum analysis and energy distributes in different load stages

载荷/kN	频谱范围/kHz	能量百分比/%
30 ~ 36( <i>AB</i> )	5 ~ 45	13.80
36 ~ 38( <i>BC</i> )	5 ~ 165	10.34
38 ~ 43( <i>CD</i> )	5 ~ 165	9.38
43 ~ 47( <i>DE</i> )	5 ~ 165	43.79
47 ~ 55( <i>EF</i> )	5 ~ 60	16.68
55 ~ 56( <i>FG</i> )	5 ~ 165	6.01

### 3.4 参数与波形分析比较

参数分析法必须获得大量的参数数据，它是建立在数据处理基础上的分析方法，它所反映的信息只能是事后的，不能实时反映构件的损伤信息，而波形信号则不仅包含了参数分析所需要的数据信息，而且更多地蕴涵了时域和频域的信息，通过对波形的分析，人们可以直接从波形信号中获得构件的损伤信息，结合频谱分析以及相关函数等信号处理手段，就可以获得更多的精确信息，这是参数分析法没法实现的。

## 4 结 论

(1) 全波形声发射信号有效记录了混凝土材料在外载荷作用下整个破坏过程的特征信息，能够实时反映构件的破坏情况；从其频谱可以看到整个破坏过程频率由低频向高频扩展，破坏主频约为 165 kHz。

(2) 能量参数分析法可以事后分析声发射的活动特征，但却不能实时发现微裂纹等缺陷的出现，也不能反映出材料破坏的频率特性。

(3) 在试验过程中，对应图 8 信号出现的现象是信号连续出现，时间间隔很短，且在一个信号间隔时间内有 2 个或 2 个以上的波包，因此这可以用来初步判定构件的完整性。

(4) 宏观裂纹出现前频谱峰值逐渐增加，当宏观裂纹出现时频谱峰值急剧增加，约为其他信号峰值的 10 倍，同时频率很低，之后虽然频谱较宽，但峰值要小很多，此特征可以作为混凝土构件破坏的一条判据。

(5) 整个试验过程中信号的频率不断变化，可以推断频率的变化不仅与缺陷类型有关而且应该与材料的性质有关，也就是说不同材料在破坏或出现损伤时的频率应该有所区别，这在后续研究中将有表述。

### 参考文献(References)：

[1] Krzysztof J. Some aspects of acoustic emission signal pre-processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(3) : 242 – 247.

[2] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2) : 72 – 77.(Shen Gongtian, Geng Rongsheng, Liu

- Shifeng. Parameter analysis of acoustic emission signals[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(2): 72–77.(in Chinese))
- [3] 纪洪广, 张天森, 张智勇等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价[J]. 无损检测, 2001, 23(7): 289–291.(Ji Hongguang, Zhang Tiansen, Zhang Zhiyong, et al. Analysis on the acoustic emission parameters for nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2001, 23(7): 289–291.(in Chinese))
- [4] 刘时风, 王 勇. 全波形声发射测试技术研究[A]. 见: 中国第九届声发射学术研讨会论文集[C]. 成都: [s. n. ], 2001. 32–38.(Liu Shifeng, Wang Yong. Study on waveform AE inspection[A]. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> AE Technology Symposium of China[C]. Chengdu: [s. n. ], 2001. 32–38.(in Chinese))
- [5] 陈 兵, 张立新, 刘娟育. 混凝土梁三点弯曲负荷下的发射特性研究[J]. 无损检测, 2000, 22(3): 109–111.(Chen Bing, Zhang Lixing, Liu Juanyu. Study on the acoustic emission characteristics of the concrete beams under three-point bending Load[J]. Nondestructive Testing, 2000, 22(3): 109–111.(in Chinese))
- [6] 陈 兵, 姚 武, 吴科如. 声发射技术在混凝土研究中的应用[J]. 无损检测, 2000, 22(9): 387–390.(Chen Bing, Yao Wu, Wu Keru. Application of acoustic emission technique to the study of concrete[J]. Nondestructive Testing, 2000, 22(9): 387–390.(in Chinese))
- [7] 纪洪广, 裴广文, 单晓云. 混凝土材料声发射技术研究综述[J]. 应用声学, 2002, 21(4): 1–5.(Ji Hongguang, Pei Guangwen, Shan Xiaoyun. Technique of acoustic emission for concrete material[J]. Applied Acoustics, 2002, 21(4): 1–5.(in Chinese))
- [8] 陈 兵, 张 东, 吴科如. 混凝土梁声发射特性实验研究[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(4): 315–319.(Chen Bing, Zhang Dong, Wu Keru. Experimental study on the AE characteristics of concrete beams[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(4): 315–319.(in Chinese))
- [9] 蔡四维, 蔡 敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.(Cai Siwei, Cai Min. Damage and Rupture of Concrete[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.(in Chinese))
- [10] Maszars J. A description of micronics and macroscale damage of concrete structure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5/6): 729–737.(in Chinese))

## 新书简介

《中国的保护地》一书由解 焱编著, 清华大学出版社 2004 年 10 月出版, 定价 128.00 元。

该书是中国环境与发展国际合作委员会保护地课题组最新研究成果的体现。全书共分 6 章, 中英文对照。第 1 章为保护地课题组提交给中国环境与发展国际合作委员会的建议, 第 2 章对中国的保护地问题进行了分析及综述, 第 3 章介绍了保护地体系及立法情况, 第 4 章分析了保护地相关的贫困、经济、补偿及财政问题, 第 5 章论述了保护地体系规划, 第 6 章阐述了保护地能力建设问题。全书由国内外多学科的著名专家合撰, 体系完备, 内容新颖、实用。

该书可供从事保护地研究的林业、环保、生物等多个学科的研究人员参考。

《环境生物技术原理与应用》一书由 Bruce E. Rittman 著, 文湘华, 王建龙译, 清华大学出版社 2004 年 8 月出版, 定价 68.00 元。

该书介绍了用于保护和改善环境的微生物过程的基本原理及其实际应用。书中不仅涉及了环境生物技术的传统应用, 如活性污泥法和厌氧消化, 还介绍了新兴的应用, 如有害化合物的脱毒、生物修复、饮用水的生物过滤等。书中提供了大量的图、表, 各章后均列有习题, 以帮助读者理解和掌握基本概念和原理, 还给出了丰富的实例, 以利于读者正确地分析、设计和解决实际环境问题。

该书可以作为高等院校环境类专业的教材, 也可供环境、生物等领域的科技人员参考。