

信号处理  
专题综述

# 声发射信号的谱分析和相关分析

陈玉华, 刘时风, 耿荣生<sup>1)</sup>, 沈功田<sup>2)</sup>  
(清华大学 机械系, 北京 100084)

**摘要:** 主要阐述谱分析方法和相关分析方法在声发射信号分析中的应用, 给出了谱分析和相关分析的基本原理, 并分别举例作了分析讨论。

**关键词:** 声发射检验; 频谱分析; 信号处理

中图分类号: TG115.28      文献标识码: A      文章编号: 1000-6656(2002)09-0395-05

## SPECTRAL AND CORRELATION ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

CHEN Yu-hua LIU Shi-feng GENG Rong-sheng<sup>1)</sup>, SHEN Gong-tian<sup>2)</sup>  
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The principles of spectral and correlation analyses and their applications to acoustic emission signal analysis were described. Also, examples were given.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Spectral analysis; Signal processing

材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应变能的现象称声发射, 图1为典型声发射信号。实际应用中, 由于外界干扰及声发射接收系统的原因(传感器的频率特性等), 接收的声发射信号除含特征信息外, 还存在大量干扰和噪声信号。因此, 要想从复杂的信号中提取出需要的特征声发射信号, 就需对信号进行处理<sup>[1]</sup>。

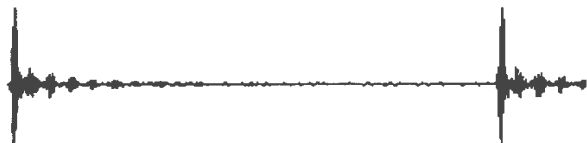


图1 典型声发射信号

图2所示的参数式声发射信号处理方法已得到广泛应用, 但由于波形特征参数的信息量少, 在干扰源强、源种类较多的情况下往往难以得到声发射源特征描述。随着通信技术、电子技术、计算机技术的飞速发展及数字信号处理理论不断丰富和完善, 各种新算法、新理论不断被提出并广泛应用于声发

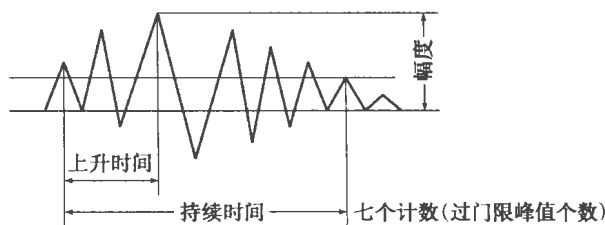


图2 声发射信号参数分析

射信号分析中。如谱分析、小波分析、人工神经网络和模式识别以及相关分析等<sup>[2,3]</sup>。

谱分析方法可获得信号的谱特征。谱分析可分为经典谱和现代谱分析。经典谱分析以傅里叶变换为基础, 主要包括相关图法和周期图法以及在此基础上的改进方法。其中最基本和最重要的方法就是快速傅里叶变换(FFT)。现代谱分析方法以非傅里叶分析为基础, 大致可分为参数模型法和非参数模型法两大类。参数模型法包括有理参数模型和特殊参数模型。有理参数模型可用有理系统函数表示, 包括自回归(AR)模型, 滑动平均(MA)模型和自回归滑动平均(ARMA)模型。特殊参数模型即指数模型, 它把信号定义为一些指数信号的线性组合。非参数模型法包括不需建立参数模型的以基于自相关矩阵或数据矩阵进行特征分离为主的其它现代谱分

收稿日期: 2002-05-13

1) 北京航空工程技术研究中心 北京 100076

2) 国家质量技术监督检验检疫总局 锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013

析方法, 主要有最小方差法、迭代滤波法、皮萨年科法等<sup>[4-5]</sup>。

对两个信号作相关分析可以了解它们之间的相似程度, 在声发射中, 为实现对一个或多个信号延迟后的检测、识别与提取, 相关方法必不可少, 如同频域里的谱分析一样, 时域里的相关分析在信号处理领域里有广泛应用。快速相关是在相关技术基础上, 结合 FFT 所实现的技术, 可加快运算的速度。

在上述方法中, 频域的谱分析技术以其相对简单及实用性被广泛应用于声发射信号的研究并作为重要的辅助分析手段。如小波分析前可应用谱分析方法作预处理<sup>[6,7]</sup>, 人工神经网络也如此。而更为普遍应用的就是以 FFT 为主的谱分析方法。FFT 算法将时域的数字信号迅速地变换为它所对应的谱, 从谱中便可以得到关于信号的各种特征, 经典谱估计速度快、简便。而时域的相关技术以其同样的简单和实用被广泛采用作分析信号的手段。下面结合实例阐述基于 FFT 和相关技术的应用。

## 1 基于 FFT 的分析方法的原理<sup>[8,9]</sup>

### 1.1 FFT 原理

离散傅里叶变换(DFT)的定义为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{+j2\pi nk/N}$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中  $X(k)$ ——离散频谱的第  $k$  个值

$x(n)$ ——时域采样的第  $n$  个值

直接的 DFT 运算, 对  $N$  个采样点要作  $N^2$  次运算。FFT 算法把  $N^2$  步运算减少为  $(N/2) \log_2 N$  步, 极大地提高了运算速度, 给数字信号处理带来了革命的进步, 而精度没有任何损失。

由于离散傅里叶变换是对有限的时间间隔(称为时间窗)里的采样数据的变换, 这有限的时间窗即是 DFT 的前提, 同时又会在变换中引起某些不希望出现的结果, 即谱泄漏和栅栏效应。

### 1.2 窗函数的加权

消除谱泄漏最理想的方法是选择时间窗长度使它正好等于周期性信号的整数倍, 然后作 DFT, 但实际上不可能做到。实际做法是把时间窗用函数加权, 使采样数据经窗函数处理再作变换。其中加权函数称窗函数或窗。在加权的概念下, 时间窗就可

看作一个加了相等权的窗函数, 即时间窗本身的作用相当于宽度与它相等的一个矩形窗函数的加权。

选择窗函数的简单原则是使信号在窗的边缘为零, 这样就减少了截断所产生的不连续的效应; 信号经过窗函数加权处理后, 不应该丢失太多的信息。

基于上述分析, 在声发射信号处理中, 通常在进行 FFT 时, 将窗函数作为预处理方法, 以实现信号的谱连续性。

## 2 基于 FFT 分析方法的应用

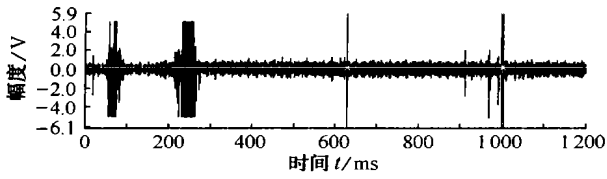
谱分析的特点是在频域上提取声发射信号的各种特征, 其中, 谱分析技术中最基本、最主要的方法就是 FFT, 从应用来看, 适用范围非常广, 下面以合成绝缘子为例来介绍其应用。

合成绝缘子由于具有优良的防污与机电性能, 较好地克服瓷绝缘子的不足之处<sup>[10,11]</sup>。合成绝缘子性能优异, 但也偶有事故发生, 原因主要有两点, 一是端部金具连接不可靠, 二是护套不可靠或接头密封不好。而根本原因在于端部连接方式不可靠, 接头结构的质量好坏直接影响合成绝缘子的力学性能。接头的生产是一个很重要的环节<sup>[10]</sup>, 其工艺有楔接式和压接式两种。在早期阶段, 大部分都采用内楔式接头。现在国外多采用液压同轴压接工艺, 不仅具有较好的负荷-时间特性和更好的耐动态负荷性能, 而且生产过程方便快速。

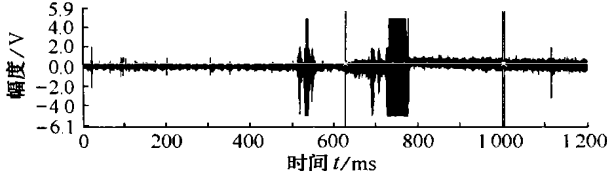
压接式接头的生产对压接工艺要求很高。如果金具的塑性变形和(或)心棒的弹性变形太小, 不能产生足够的预压力(称为欠压), 加载时, 不能产生足够的轴向摩擦力和轴向剪切力, 就会在额定或低于额定机械负荷的情况下出现端部金具滑移。如果金具的塑性变形和(或)心棒的弹性变形太大, 将可能导致心棒发生塑性变形乃至断裂(分别称为过压和断裂)。这三种绝缘子都属于不合格产品, 应通过一定的检测手段将其筛选出来, 重新处理。

应用声发射手段, 经过对大量不同状态(欠压、正常、过压以及断裂)的研究, 发现压接时的信号具有一定的规律。图 3 为各种不同模式下 160kN 级绝缘子压接声发射信号, 可清楚地分辨出处于欠压和过压状态时信号的不同点。对绝缘子不同状况, 波包出现的时间有相当明显的差别。欠压时, 波包出现最早; 正常时, 波包出现较晚; 而过压和断裂时, 波包出现得最晚。这主要和压力上升速度有关。

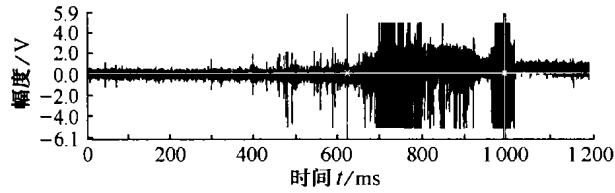
但是, 这里出现一个问题, 即过压和断裂的信号



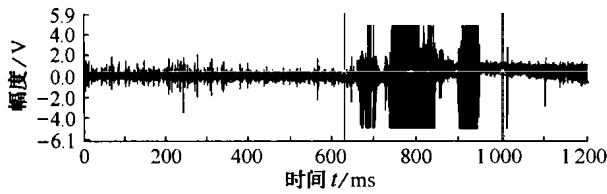
(a) 欠压模式信号



(b) 正常模式信号



(c) 过压模式信号



(d) 断裂模式信号

图3 各种模式下的绝缘子压接声发射信号

没有明显的界限, 只从时域上无法分辨。这时候就要用 FFT 分析手段, 从频域找出两者的特征来。

图4为两种模式(过压和断裂)下的频谱图(预处理方法是矩形窗), 仔细观察后两种信号的频谱, 能量随频率的分布是有明显差别的, 断裂信号中高频成分和低频成分的能量比有了明显的提高。

做大量重复性实验并经过反复观察和计算分析, 提出可以通过选取频段范围为 140~160kHz 和 40~60kHz 两个同等带宽的能量比是否大于某个预先设定的域值来判断过压和断裂模式。通过实验确定一个合适的比值作为分界, 凡是超过该值即损坏, 没有超过就只是过压状态。

### 3 声发射信号的相关分析

#### 3.1 相关定义<sup>[8,9]</sup>

$x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关函数 $r_{xy}(m)$ 为

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n+m) \quad (3)$$

实际工作中, 信号 $x(n)$ ,  $y(n)$ 总是有限长, 并且是数字信号。对于这样的信号, 互相关公式为

$$r_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+m) \quad (4)$$

自相关的公式就是将 $y(n)$ 替换为 $x(n)$ 。 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相关系数 $\rho_{xy}$ 为

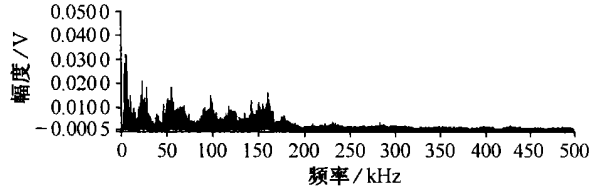
$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[ \sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

由许瓦兹(Schwartz)不等式, 有 $|\rho_{xy}| \leq 1$ 。分析式(5)可知, 当 $x(n)=y(n)$ 时,  $\rho_{xy}=1$ , 两信号完全相关(相等), 这时 $r_{xy}$ 取得最大值; 当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 完全无关时,  $\rho_{xy}=0$ ,  $r_{xy}=0$ ; 当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 有某种程度相似时,  $r_{xy} \neq 0$ ,  $|\rho_{xy}|$ 在0和1中间取值。因此 $r_{xy}$ 和 $\rho_{xy}$ 可用来描述 $x(n)$ 和 $y(n)$ 间的相似程度。

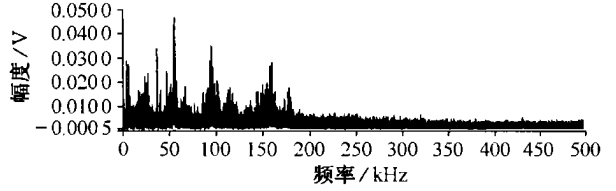
#### 3.2 相关分析方法的理论与实例

相关方法在声发射领域有着广泛的应用, 下面以管道泄漏检测为例来说明。管道在运送液体和气体方面具有优势。然而, 由于质量问题、管龄增长以及不可避免的腐蚀、磨损等自然或人为损坏, 管道事故不断发生。城市煤气管道大都处于人口稠密的居民生活区之内, 一旦发生泄漏事故, 后果严重。声发射用于管道泄漏检测非常广泛<sup>[12~14]</sup>。

泄漏的声发射信号具有如下特点<sup>[15,16]</sup>, ①在某些情形下, 泄漏所激发的应力波频谱具有很陡的尖峰(如阀门泄漏), 为检测泄漏提供了有利的抗干扰条件, 信号很容易从噪声中分离出来。②泄漏所



(a) 过压信号的频谱



(b) 断裂信号的频谱

图4 两种模式声发射信号的频谱

产生的声发射信号比较大, 且大小与泄漏速率成正比。③ 泄漏所激发的应力波是连续型信号。

提出应用相关分析来实现对泄漏点的准确定位, 图 5 中 A, B 为两个声发射传感器, 其中泄漏点位于两个传感器之间。将 A, B 两个传感器接收到的信号作互相关, 得出信号传到 A, B 两个位置时的时间差  $\Delta t$ , 从而得到公式

$$x = \frac{D - V\Delta t}{2} \quad (6)$$

式中  $x$  —— 泄漏点距参考传感器 A 的距离  
 $D$  —— 两个传感器之间的距离  
 $V$  —— 声波传播的速度

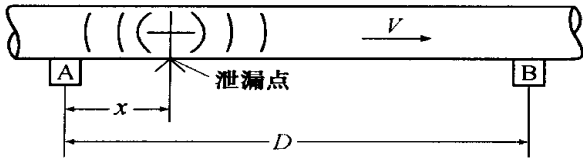


图 5 泄漏测量方法

关键问题是时间差  $\Delta t$  的获得。泄漏声信号在管道中传播速度  $V$  由相关的工程手册获得。由于泄漏点位置未知, 为确保两个传感器都能接收到同一时间发出的信号, 需要选择合适的采样长度。考虑极端情况, 泄漏点位于其中一个传感器的位置上, 为保证另外一个传感器能够收到同一时间泄漏点发出的信号, 最少应该保证采样长度  $t = D/V$ , 实际考虑, 选择  $2t$  作为采样长度, 并选择固定的采样频率  $f$ 。将传感器 A 接收到的信号  $A(n)$  一分为二, 选取前半部分  $A_1$ , 使用式(4)将传感器 B 接收到的信号  $B(n)$  的前半部分  $B_1$  (从信号中间截断) 与  $A_1$  相关, 得出  $r_1$ , 然后逐点平移传感器 B 接收的信号, 用等同的长度继续与  $A_1$  做相关, 得到  $r_2, r_3 \dots$ 。

$$r_{AB}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A(n)B(n+m) \quad (7)$$

$N$  取  $A(n)$  数据点数的一半, 等于  $B(n)$  数据点数的一半。  $m$  从 0 到  $N-1$ 。

由于  $A_1$  至少应该含有一部分泄漏信号  $L$  (因为采样长度为  $2t$ ), 在做相关时  $B(n)$  中至少有一段信号会含有与  $A_1$  信号相同的泄漏信号  $L$ , 可认为是对泄漏信号  $L$  做的自相关, 自相关结果  $r_L(i)$  为

$$r_L(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} L(n)L(n+i) \quad (8)$$

$i=0$  时, 相关结果最大, 可由自相关函数的性质得出。假定相关结果最大时对应为  $m_{\max}$  (也可认为是  $m_{\max}$  个采样点), 此时与  $A_1$  做相关的对应相

关信号为  $B_{\max}$ , 在泄漏信号  $L$  到达传感器 A 之后, 延迟了一段时间才到达传感器 B。我们可认为已找出了所需要泄漏信号到达传感器的时间差  $\Delta t$ 。因为采样频率  $f$  已知, 这时可得出

$$\Delta t = \frac{m_{\max}}{f} \quad (9)$$

这样就可找到位于传感器 A, B 间的泄漏点位置了。

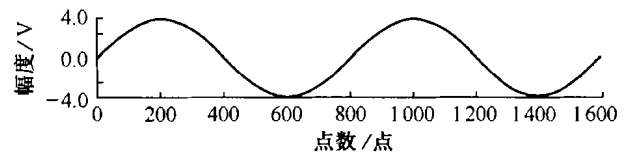
应用相关分析作为声发射信号的分析方法时, 噪声信号的干扰可能会导致相关函数值并不能真正反映出两个信号的相似性。实际检测中, 引入相关系数的算法, 可以排除信号幅度的影响, 使相关运算的结果真正反映信号之间的相似性。主要思想同上, 只是计算公式改为

$$\rho_{xy}(m) = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n+m)}{\left[ \sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n+m) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

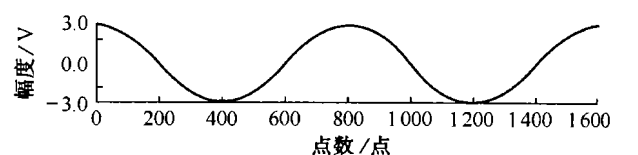
$N$  取  $A(n)$  数据点数的一半, 等于  $B(n)$  数据点数的一半;  $m$  从 0 到  $N-1$ 。

应用相关分析的关键在于  $m_{\max}$  (相关值最大时对应的采样点数) 的获取。在实验室中, 选用式(10)作为相关定位的依据, 用软件产生传感器 A 和 B 的数据(图 6)。传感器 A 为正弦信号, 传感器 B 为余弦信号, 两传感器被认为是分别接收了泄漏点发出的信号。从图 6 可见, 传感器 B 信号取到从横坐标 600 开始的一段信号时的相关值应该是最大(根据相关的理论可知), 图 7 为应用相关公式(10)作为分析手段得出的结果, 相关最大值对应的点数为 601。由图 7 可以看出, 跟预想的结果是一样的。

上述分析基于只存在泄漏信号而没有噪声信号。而实际检测中, 噪声信号不可避免。经分析认



(a) 传感器 A



(b) 传感器 B

图 6 传感器 A 和 B 的信号

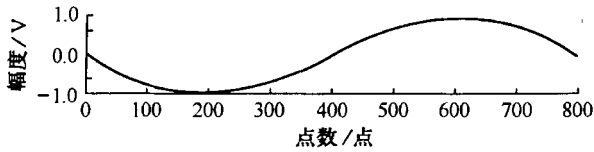
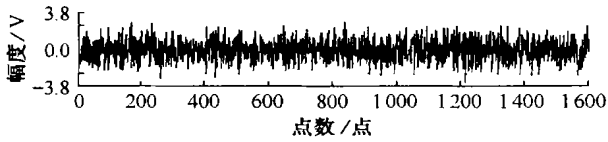
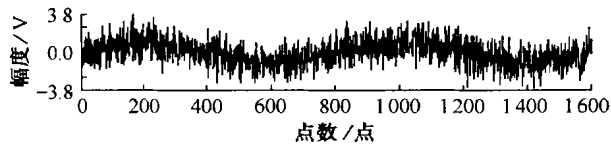


图7 相关结果图

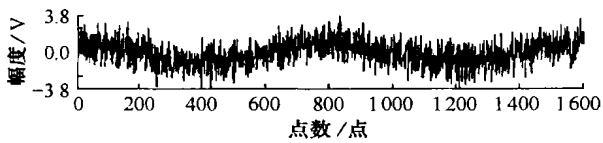
为管道检测中的噪声是周期存在的白噪声信号。因此,用程序产生一个噪声信号,然后与传感器 A 和 B 的信号相加,作为实际检测信号的模拟(图 8)。



(a) 噪声信号



(b) 传感器 A 信号(加噪声)



(c) 传感器 B 信号(加噪声)

图8 模拟实际信号

在图 8 中,由于噪声信号的干扰,传感器 A 和 B 接收的信号已经不很清晰,也不能直观作出判断。应用相同的分析程序,得出图 9,最大相关值对应的点数为 599。可见,利用公式(10),仍得出了正确的结果(两个点的偏差在工程上应可完全忽略)。

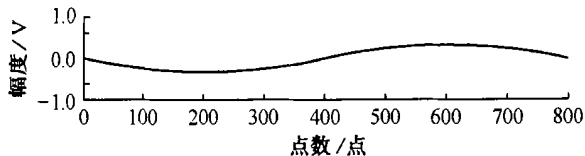


图9 包含噪声信号的相关结果

由以上的模拟分析可以看出,应用相关分析的手段,可以很容易作出判断,实现最终的定位。

#### 4 结束语

介绍了声发射信号频域和时域中常用的两种分析方法,即基于 FFT 的谱分析方法和相关分析,分别结合两个事例阐述了它们在声发射信号分析中的

应用。其中 FFT 方法已经在实践中取得了很好的效果。能很清楚地看出它们所具有的巨大潜力。

#### 参考文献:

- [1] 刘时风. 焊接缺陷声发射检测信号谱估计及人工神经网络模式识别研究[D]. 北京: 清华大学, 1996. 1—20.
- [2] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(4): 164—167.
- [3] Qi Gang. Wavelet-based AE characterization of composite materials[J]. NDT & E International, 2000, 33: 133—144.
- [4] 刘镇清, 陈广. 超声无损检测中的谱分析技术[J]. 无损检测, 2001, 23(2): 85—88.
- [5] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [6] 耿荣生. 新千年的无损检测技术——从罗马会议看无损检测技术的发展方向[J]. 无损检测, 2001, 23(1): 2—5.
- [7] 沈功田, 段庆儒, 周裕峰, 等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 144—146.
- [8] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [9] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] 李铁. 合成绝缘子声发射检测技术及监测系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2001. 1—10.
- [11] Grosse G, Reinhardt H. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques[J]. NDT & E International, 1997, 30(4): 223—230.
- [12] Rajtar JM, Muthiah R. Pipeline leak detection system for oil and gas flowlines[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119: 105—109.
- [13] Kalynasundaram P, Baldev Raj. Leak detection in pressurised heavy water reactor by acoustic emission technique[J]. British Journal of NDT, 1992, 34(11): 539—543.
- [14] Fantozzi Marco, Fontana Emilio. Acoustic emission technique the optimum solution for leakage detection and location on water pipelines[A]. 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing[M/C.D], Rome, 2000.
- [15] 李铁. 管道泄漏声发射检测技术研究[D]. 北京: 清华大学, 1998. 1—8.
- [16] 崔建. 管道泄漏声发射检测方法及其检测系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2000. 1—11.