

基于小波变换的声发射模拟信号特性分析

张运强, 牛卫飞¹⁾, 谭 蔚

(天津大学 化工学院, 天津 300072)

摘 要:小波变换作为一种新的信号处理方法, 可对任一时刻、任一频段的声发射信号进行时频分析。通过基于 Gaussian 方程的 Gabor 小波及其 Fourier 变换, 研究了 Q235B 钢板中三种声发射模拟信号的特点及三种信号的区分和识别。试验表明, 基于小波变换的信号处理方法对于研究实际声发射信号的特点、声发射源的特征和定位以及传感器选择有一定的帮助。

关键词:声发射; 小波变换; 信号处理

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)01-0009-03

Analysis of Simulated AE Signal Characters Based on Wavelet Transform

ZHANG Yun-Qiang, NIU Wei-Fei¹⁾, TAN Wei

(School of Chemical Engineering & Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As a kind of new method of signal analysis and processing, the wavelet transform could be used to analyze any time and any frequency of AE signal in the time and frequency domain. The wavelet transform is applied to AE signal processing and it will be helpful to the development and popularization of AE technique. The characters and recognition of simulated AE signals in Q235B were researched by using Gabor wavelet and Fourier transform, which were based on Gaussian function. The experiment showed that it would be helpful to study the characters of AE signal and source and choose the right sensor.

Keywords: Acoustic emission; Wavelet transform; Signal processing

声发射(Acoustic emission, 简称 AE)是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的一种物理现象^[1]。声发射检测是一种动态无损检测技术, 其信号来自缺陷本身。但是, 受声发射源的自身特性、声发射信号的传播路径、环境噪声和声发射测量系统等多种影响, 声发射传感器输出的波形十分复杂, 属于一种非平稳随机信号, 需要利用各种信号处理技术从中提取有效声发射源的信息^[2]。

传统信号分析方法对声发射信号无法解决时间和频率分辨力的矛盾, 而小波变换的方法可使这一问题得到解决^[3-5]。由于声发射信号是由频谱丰富的多组波组成的^[6], 可以利用小波变换把声发射信号和噪声分解到不同的频率通道, 从而在不同的频

带上分析声发射信号中的不同频率成分的特征。

小波变换具有同时在时域和频域表征信号局部特征的能力, 既能刻画某个局部时间段信号的频谱信息, 又可以描述某一频谱信息对应的时域信息。非常适于分析含有瞬态现象的声发射信号, 研究声发射源的特性。

1 小波变换基本原理

文章所采用的小波变换原理是基于 Gaussian 方程的 Gabor 小波及其 Fourier 变换^[7,8]。对于函数 $f(t)$ 的连续小波变换可定义为:

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中 a ——尺度因子, $a > 0$;

b ——时移因子。

上角标 * 表示共轭。对于任意母小波函数 $\psi(t)$, 只要满足式(2), 就可以作为分析小波。

收稿日期: 2006-12-07

作者简介: 张运强(1981—), 男, 硕士研究生。

1) 天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津 300192

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2)$$

式中 $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(\omega)$ 的 Fourier 变换。因为 Gabor 小波在目前所有的小波中具有最佳的时域和频域分辨率^[9], 因此选 Gabor 小波作为分析小波:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 + i\omega_p t \right] \quad (3)$$

式中 γ ——正常数;

ω_p ——中心频率。

其 Fourier 变换为:

$$\psi(\omega) = (2\pi)^{1/2} \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{1/2} \cdot \exp \left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 (\omega - \omega_p)^2 \right] \quad (4)$$

虽然 Gabor 小波不满足式(2), 但若令 $\gamma = \pi \sqrt{2/\ln 2} = 5.336$, 则 Gabor 小波也能满足实际使用要求。Gabor 小波可以看作是中心位于 $t=0$ 的 Gaussian 函数, 其 Fourier 变换的中心位于 $\omega = \omega_p$ 处。函数 $\psi(\frac{t-b}{a})$ 中心位于 $t=b$, 其 Fourier 变换 $[a \exp(-ib\omega) \hat{\psi}(a\omega)]$ 中心位于 $\omega = \omega_p/a$ 。

$WT_f(a, b)$ 表示 $f(t)$ 在 $t=b$ 和 $\omega = \omega_p/a$ 附近的时频系数。若令 $\omega_p = 2\pi$, 则 $f = \omega/2\pi = 1/a$ 。即 $1/a$ 等价于 f , 而 b 等价于时间 t 。所以时域信号 $u(x, t)$ 经过 Gabor 小波变换后, 就可以分析声发射信号同时在时域 b 和频域 $1/a$ 上的分布, 并从时频分析中提取某一频率信号的大致时间分布情况或某一时刻信号的频率情况。声发射信号的时频分析都是基于 Gabor 小波这种具有最佳时频分辨率的时频分析特性来讨论的。

2 试验

2.1 试验过程

在实验室建立声发射试验系统(图1)。采用德国 Vallen 公司生产的 ASMY5 声发射检测仪, 双通道采集声发射信号。各通道对 0.5 mm 的 HB 笔芯

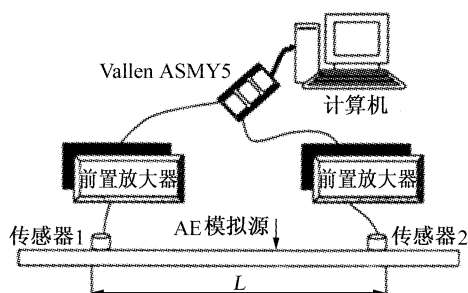


图1 声发射试验系统

模拟源的响应幅度偏差为 ± 2 dB。耦合剂采用高真空硅脂 7501。检测门槛值为 40 dB, 传感器为德国 Vallen 公司生产的 VS900-RIC, 谐振频率为 100~900 kHz。钢板为 Q235B, 尺寸为 400 mm × 300 mm × 10 mm。传感器在钢板中心布置, $L=200$ mm。

为了保证模拟源的重复性, 按照 GB/T 18182—2000《金属压力容器声发射检测及结果评价方法》^[10] 的要求, 声发射标准模拟信号采用断铅信号(图2)。采用直径 0.5 mm 的 HB 笔芯, 其伸长量为 2.5 mm, 笔芯与构件表面夹角为 30° 折断。采用砂纸和海绵在钢板表面以摩擦的方式来模拟杂乱无章的噪声信号。砂纸的材质为刚玉, 粒度为 400#, 海绵为普通海绵。

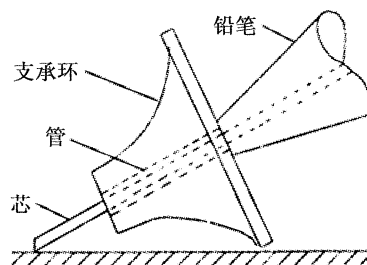


图2 铅笔芯模拟源

分别采集断铅、砂纸和海绵模拟信号各 100 次。试验过程确保不出现人为或意外的撞击、震动和摩擦等影响模拟信号的噪声信号。

2.2 分析

采用 AGU-Vallen Wavelet 小波分析软件对采集到的声发射信号进行分析。图 3~5 分别是断铅、砂纸和海绵模拟信号的分析图, 其中图的上半部分为时幅图, 下半部分为时频图。

比较图 3~5 可见: ① 三种信号的能量分布频率都在 100~150 kHz, 分布时间分别为 20~35 μ s, 65~75 μ s, 75~95 μ s, 在 600~1 000 kHz 范围内几乎无信号产生。② 断铅信号的小波变换系数最大值较大, 是其它两种模拟信号的 170 倍左右。③ 断铅信号作为声发射模拟信号, 其波形的最大振幅较大, 大概是其它两种信号的 150 倍。

另外, 本次试验在距传感器不同距离的位置用断铅产生了大量声发射模拟信号, 并对其进行了小波分析(图6), 发现这些声发射信号的能量分布与图 3~5 几乎相同, 只是小波变换系数略有变化(表1)。试验对另外两种信号也进行了小波分析, 发现都具有类似特点。

由上述可知, 三种信号的波形和能量分布区域

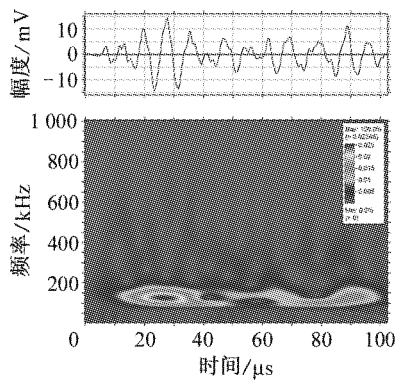


图3 断铅模拟信号分析 a

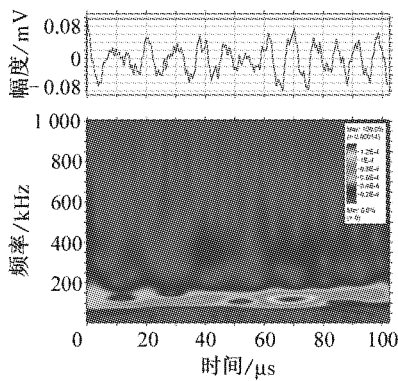


图4 砂纸模拟信号分析

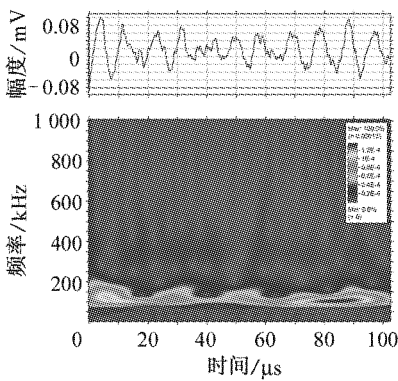


图5 海绵模拟信号分析

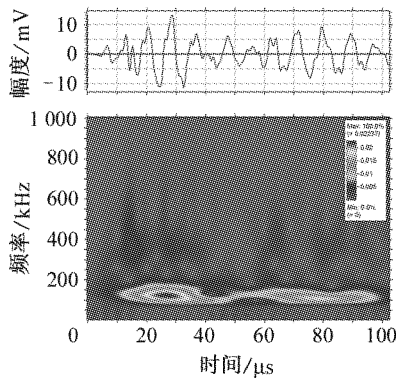


图6 断铅模拟信号分析 b

表1 不同距离的断铅模拟信号的能量分布

AE 源距 离/mm	分布频 率/kHz	分布时 间/ μ s	WT 系数 最大值	分布集 中程度
50	100~150	20~35	0.025	高
100	100~150	20~35	0.022	高
150	100~150	20~40	0.028	高

表2 不同类型 AE 模拟源的能量分布

模拟 源	分布频 率/kHz	分布时 间/ μ s	WT 系数 最大值	分布集 中程度
断铅	100~150	20~35	0.025	高
砂纸	100~150	65~75	0.000 14	中
海绵	100~150	75~95	0.000 13	低

和集中程度的区分较明显(数据见表2)。所以根据能量分布、小波变换系数和振幅就可以将断铅信号和其它两种信号区分开来。

如今对声发射信号的分析主要局限在时域。根据标准 GB/T 18182—2000,判别声发射信号危险与否的主要依据之一为此信号的幅度。然而,由于声发射源距传感器距离的不同,其声发射信号的衰减有很大区别;同时由于被测设备几何形状、金属壁

厚等条件的限制,声发射源信号衰减很难有效补偿。所以时域分析和时差定位具有一定的局限性。而现有的声发射检测分析软件也一般不具备对其进行恰当补偿的功能。小波分析可使此过程简单化,如上所述,即通过对声发射信号的能量分布、小波变换系数和幅值的综合考虑来对声发射源和声发射信号进行分析。

3 结论

(1) 小波分析是近年来发展较迅速的一种新的信号分析处理技术,将小波变换用于声发射信号处理,可对声发射信号的任一时刻、任一频段进行时频分析,提高了声发射信号信噪分离结果的可靠性和稳定性,推动了声发射技术的发展和应

(2) 通过试验得出声发射模拟信号(断铅信号)和噪声信号(砂纸和海绵模拟信号)小波变换的不同主要是因为不同类型的信号在振幅、能量、上升时间、持续时间、振铃计数等声发射参数在时域和频域都有所不同。

(3) 通过基于 Gaussian 方程的 Gabor 小波及其 Fourier 变换,对小波分析技术在声发射信号分析及处理方面的应用进行了基础研究,得出了 Q235B 钢的声发射谐振频率,模拟声发射信号的能量分布及小波变换系数;并据此判断和区分了声发射模拟信号的种类,解决了时域分析和频域分析无法解决的问题,得出小波分析是解决声发射信号问题的方法。同时,文章为如何建立各种材料的声发射信号的资源库提供了一种途径。

(4) 研究了声发射信号的特点、声发射源的特征和定位,对某种材质的设备选择合适的传感器以及带通以提高信噪比具有一定的参考价值。

机械工业上海无损检测培训中心 2008 年培训通知

机械工业上海无损检测培训中心长期承担机械行业无损检测人员资格培训工作,经中心培训的各级无损检测人员已超过两万人。2008 年中心继续采取滚动办学方法,举办各类无损检测方法的初级(I 级)和中级(II 级)培训班。具体办班日期为:

超声探伤

1 月 8 日—1 月 26 日 3 月 11 日—3 月 29 日
5 月 6 日—5 月 24 日 6 月 17 日—7 月 5 日
8 月 12 日—8 月 30 日 10 月 14 日—10 月 31 日
12 月 9 日—12 月 27 日

磁粉探伤

2 月 26 日—3 月 8 日 4 月 1 日—4 月 12 日
5 月 27 日—6 月 7 日 7 月 8 日—7 月 19 日
9 月 2 日—9 月 13 日 11 月 4 日—11 月 15 日

渗透探伤

1 月 22 日—1 月 29 日 4 月 14 日—4 月 19 日
6 月 10 日—6 月 16 日 7 月 21 日—7 月 28 日
9 月 16 日—9 月 23 日 11 月 17 日—11 月 22 日

射线探伤

4 月 15 日—4 月 26 日 7 月 29 日—8 月 9 日
11 月 25 日—12 月 6 日

涡流探伤

6 月 16 日—6 月 20 日 12 月 8 日—12 月 13 日

培训执行 GB 9445—2005《无损检测 人员资格鉴定与认证》标准(等同于 ISO 9712:1999)。该标准规定,一种给定的 NDT 方法应用于一个或多个

工业门类(焊接件、锻件、铸件或管件等),相应考核采取不同的试题和工件。培训方法的工业门类为:

UT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件;④ 管材、管道。

RT:① 焊缝;② 铸件。

MT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件。

PT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件。

请学员结合工作需要和行程安排,根据培训计划提前报名。请来电索取正式培训开班通知函和报名表(报名表上需加盖单位公章和医疗机构视力证明章)。报名时请说明参加的培训方法、工业门类和日期,每种方法需交三张一寸登记照。

培训学员经理论、实践考试合格后,颁发中国机械工程学会无损检测学会的无损检测人员资格证书(新证)。培训中心还可按企业及用户需要,接受合作培训及现场委托培训,欢迎联系接洽。

培训费用:ET 为 1 800 元/期;UT,RT 为 1500 元/期;MT,PT 为 1 300 元/期(含资料)。

考试费用:按工业门类 300 元/项;增加一门考试,增加 100 元/门。

联系人:蔡美珍,丁杰;电话:021-65556775—412;传真:021-55888795;E-mail:dingding_19@163.com;报到地点:机械工业上海无损检测培训中心,上海市邯郸路 99 号 1 楼(上海材料研究所内)。

(机械工业上海无损检测培训中心)

参考文献:

- [1] Miller Ronnie K, McIntire Paul. Nondestructive Testing Handbook • Acoustic Emission Testing [M]. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [2] 李光海,刘时风. 声发射信号分析及进展[A]. 大庆:第十届全国声发射会议论文集[C], 2004:52—62.
- [3] Jeong H. Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform [J]. NDT&E International, 2001, 34(3):185—190.
- [4] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signal from CFRP laminates[J]. NDT&E International, 1999, 32(6):311—322.
- [5] Hyunje Jeong, Young-Su jiang. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminaes [J].

Composite Structure, 2000, 49(4):443—450.

- [6] 刘松平, Gorman M, 陈积懋. 模态声发射检测技术[J]. 无损检测, 2000, 22(1):38—41.
- [7] Suzuki H, Kinjo T, Hayashi Y, et al. Wavelet transform of acoustic emission signals [J]. Journal of Acoustic Emission, 1996, 14(2):69—84.
- [8] Gorman M G, Prosser W H. AE source orientation by plate wave analysis [J]. Acoust Emission, 1990, 9(4):283—288.
- [9] Hyunje Jeong, Young-Su jiang. Fracture source location in thin plates using the wavelet transform of disperse waves [J]. IEEE Transactions on Transonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(3):612—619.
- [10] GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S].