

采用窄带特征提取方法提高声发射源定位精度

公聪聪, 石立华, 李刚

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对提高声发射源定位精度的需要, 提出了利用小波变换从宽带非平稳声发射信号中提取稳定的窄带响应信息的方法, 可降低环境噪声和波速色散效应的影响; 进一步根据 Hilbert 变换提取窄带信号的包络, 可根据第一个包络峰值正确判定应力波到达时刻。介绍了该方法的实现原理, 组建了应力波源定位实验系统。采用十字定位法确定发射源位置。结果表明, 采用新的窄带特征提取技术后, 定位误差从原来的 15 mm 减少到 4.9 mm。

关键词: 声发射; 信号分析; 小波变换; Hilbert 变换

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A

Enhancement of the Localization Accuracy of AE Source by Using Narrow-band Information Extraction Technology

GONG Cong-cong, SHI Li-hua, LI Gang

(Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: To enhance the measurement accuracy of time of arrival (TOA) of the stress wave, wavelet transform is used to extract the steady and clear narrow-band response from original wide-band non-stationary AE signals. Hilbert transform is further used to get the envelop of the narrow-band signals. The first peak of the envelop is taken as the arrival time of the stress wave. The new method can greatly remove the noise effect and the dispersion effect of stress wave, therefore a clear waveform can be acquired. A test system is setup to verify the effect of the proposed method. Results show the localization error of the simulated stress wave source is reduced from original 15 mm to 4.9 mm.

Key words: acoustic emission; signal analysis; wavelet transform; Hilbert transform

声发射(AE)作为一种材料本身所产生的、因局部能量的快速释放而激发瞬态弹性波的现象, 在无损检测领域获得了广泛应用^[1-2]。根据 AE 信号到达时间(TOA), 可确定声发射源的位置。由于声发射传感器检测到的波形并不一定都有明显的上升前沿, 因此, 以往的阈值电平法有时难以准确判定信号到达时刻。为此, 先后提出了基于信号相关、时频联合分析等一系列措施提高 TOA 的判别精度^[3-5]。从 AE 信号特征的角度考虑, 影响其 TOA 识别的因素有以下几部分:

(1) 声发射源自身产生的信号频带很宽, 可包括数赫兹到数兆赫兹, 而不同频率信号在材料中传播速度可能存在色散现象^[6], 导致各频率成分达到时刻不同, 整个合成波形的到达时刻变得较模糊。

(2) AE 信号幅度较弱, 环境噪声和放大器噪声混叠在最终结果中, 使阈值电平受到扰动, 不能得到精确的到达时刻。为此, 可考虑从检测信号中提取

窄带成分。窄带信号不仅可最大程度地减小波速色散效应的影响, 且可滤除信号中大量的宽带噪声成分。因此, 本文从典型应力波信号中提取窄带信息的方法和应用效果开展研究。

1 声发射定位实验系统

为考核不同信号处理方法的使用效果, 建立了以一块正方形铝板为监测对象的实验系统。铝板尺寸为 600 mm×600 mm×2 mm, 表面粘贴 4 只 PZT 压电陶瓷薄片元件作为监测换能器阵; 压电片呈 200 mm×200 mm 的正方形布置, 在测试区域建立直角坐标系统, 用于声发射源的定位表示。数据采集与处理系统采用四通道 LeCroy Wave Runner 6100A 数字示波器, 该示波器可对采集的信号进行运算和处理。将信号预处理和定位算法编程植入后, 示波器可直接给出定位结果。系统构成如图 1 所示。

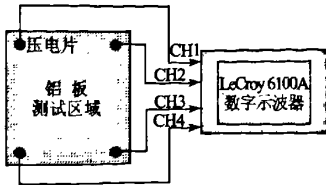


图 1 实验设置示意图

声发射信号采用金属片敲击铝板的方式模拟。4 个压电元件接受到的信号在数字示波器中首先进行信号预处理,主要是提取信号到达时刻;然后采用十字定位法,根据信号到达不同压电元件的时间差,判断声发射源的位置。图 2 为十字定位法坐标示意图,其中 $S_1 \sim S_4$ 为 4 个压电元件的位置。设 $t_1 \sim t_4$ 为冲击信号到达各个压电元件的时间,令 $t_x = t_1 - t_2, t_y = t_1 - t_3$ 分别代表应力波到达 x, y 轴上 2 只传感器的时间差, h 为各压电元件到原点的距离; v 为波速; $P(x, y)$ 为计算得到的发射源位置。定位公式为

$$x = -t_x \cdot \frac{v}{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2 \left(h^2 - \frac{v^2 \cdot t_x^2}{4} \right) + \frac{v^4 \cdot t_y^2 \cdot (t_x^2 - t_y^2)}{16}}{h^4 - \frac{(t_x^2 + t_y^2) \cdot v^2 \cdot h^2}{4}}} \quad (1)$$

$$y = -t_y \cdot \frac{v}{2} \cdot \sqrt{\frac{h^2 \left(h^2 - \frac{v^2 \cdot t_y^2}{4} \right) + \frac{v^4 \cdot t_x^2 \cdot (t_y^2 - t_x^2)}{16}}{h^4 - \frac{(t_x^2 + t_y^2) \cdot v^2 \cdot h^2}{4}}} \quad (2)$$

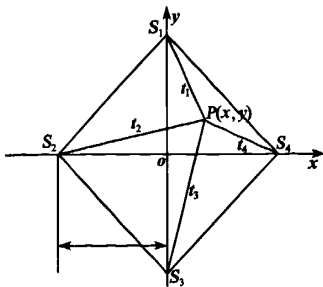


图 2 十字定位法示意图

2 应力波到达时刻的精确提取

图 3 为某次敲击后采集到的一组应力波信号。由于传播路径的差异,各通道采集到的信号波形各有不同,给起始时间的判定带来困难。尤其是波形的起始段含有很多的微小振荡,到底以何时为波形起始点很难确定。造成这一现象的主要原因是声发射信号是大量不同频率的谐波成分的叠加,包含了丰富的频率分量,不同频率成分的传播特征不同,导致最终测量信号难以识别。例如薄板中的板波波速万方数据

就存在明显的色散现象,即使是同一个应力波源发出的信号也会形成多个到达时刻的波包,波包相互重叠导致难以判断。

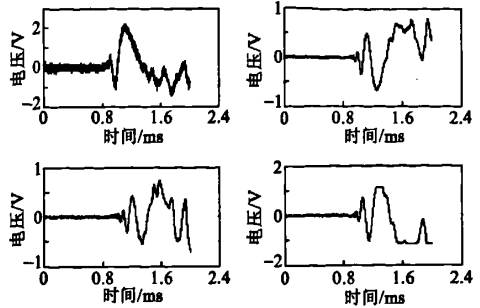


图 3 4 个传感器分别接收到的信号时域波形

为避免不必要的其他频率成份的干扰,不妨采取提取某一关心频段窄带信号的方法。小波变换为实现这一目标提供了有效的手段。小波变换是被分析函数 $f(t)$ 与一个称为小波函数的核函数 $\psi(t)$ 的内积,记为

$$W_\psi f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中 $a > 0$ 为尺度因子; b 为时间因子; $\bar{\psi}(t)$ 为函数 $\psi(t)$ 的复共轭。

通过改变原小波函数

$$g_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}(-t) \quad (4)$$

则小波变换可表达为

$$W_\psi f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g\left(\frac{b-t}{a}\right) dt = f(t) * g_a(t) \quad (5)$$

式中 $*$ 为卷积符号。式(5)表明,小波变换可由卷积实现,小波变换的实质是将信号通过冲激响应为 $g_a(t)$ 的滤波器。图 4 为常用的 Morlet 小波的时域和频域波形,其表达式为

$$g(t) = e^{-a^2} \cos(\omega t) \quad (6)$$

式中 c 为控制波包宽度,即波包有几个周期的一个参数。

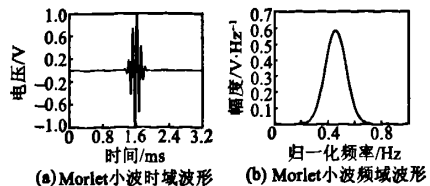


图 4 Morlet 小波时域、频域波形

由图可见,小波函数具有明显的带通特性,可有效地滤除信号中的直流和低频分量,保留某一关心频率周围的局部信息。通过改变尺度因子 a ,可调整滤波器的中心频率为 ω/a 。

从物理过程的角度来说,可对式(6)作如下解释:在材料中瞬间产生的声发射信号可看作许多冲激脉冲 $\delta(t)$ 的叠加,实际测量到的信号则是被测材料及检测通道在 $\delta(t)$ 激励下的响应 $f(t)$ 。如果用 $g_a(t)$ 卷积 $f(t)$,从线性时不变系统的角度来看,则相当于求系统在 $g_a(t)$ 激励下的响应,即系统对中心频率为 ω/a 的高斯包络调制震荡的响应。如此便将宽带声发射信号的响应转换为窄带声发射信号的响应了。

通过式(6)的变换,原始声发射信号去除了直流、噪声和在小波函数通带外的声发射信号分量,因此波形可更清晰。由于我们关心的是信号中不同成分的到达时间,可进一步采用 Hilbert 变换提取信号的轮廓(包络)。时域信号 $x(t)$ 的 Hilbert 连续变换定义为

$$\bar{x}(t) = \frac{x(t)}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

得到的解析信号为

$$W(t) = x(t) + j\bar{x}(t) \quad (8)$$

该信号的振幅 $A(t) = \sqrt{x(t)^2 + [\bar{x}(t)]^2}$ 为原始信号的包络。

采用上述窄带信号变换和包络提取方法,可将图 3 的一组波形变换为图 5 的结果。由图可见,处理后的信号成分清晰,直流分量完全去除、噪声减小,信号特征明显,可用第一个波包的峰值时刻作为到达时刻。

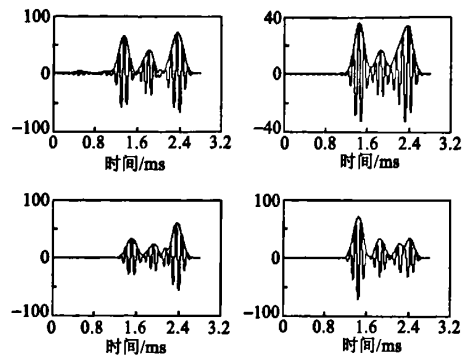


图 5 对 4 组时域波形提取窄带信号并取包络后的波形

表 1 模拟声发射源定位结果

声发射源实际位置 (x_0, y_0)	传统阈值法定位 坐标(x_1, y_1)	传统阈值法 定位误差	窄带信号提取法 定位坐标(x_2, y_2)	窄带信号提取法 定位误差
(-50,100)	(-53.372 0,89.547 0)	10.984	(-52.224 0,104.720 0)	5.218 0
(0,100)	(-22.114 0,97.833 0)	22.220	(2.256 5,106.360 0)	6.744 6
(50,100)	(41.597 0,93.445 0)	10.658	(52.591 0,100.460 0)	2.631 1
(-100,50)	(-102.470 0,36.708 0)	13.519	(-104.450 0,52.546 0)	5.129 1
(-50,50)	(-46.373 0,52.319 0)	4.304 9	(-52.922 0,49.835 0)	2.926 6
(0,50)	(2.613 5,43.702 0)	6.818 7	(2.562 8,53.024 0)	3.964 0
(50,50)	(51.983 0,51.983 0)	2.804 3	(53.368 0,50.531 0)	3.409 1
(100,50)	(106.920 0,36.965 0)	14.759	(107.370 0,52.928 0)	7.9321
(-100,0)	(-96.098 0,18.171 0)	18.586	(-108.510 0,-1.925 1)	8.726 9
(-50,0)	(-40.846 0,0)	9.153 7	(-51.879 0,0)	1.879 2
(0,0)	(3.955 6,31.026 0)	31.277	(-3.203 7,2.059 2)	3.808 4
(50,0)	(50.983 0,3.900 2)	4.022 2	(53.029 0,1.225 6)	3.267 1
(100,0)	(109.090 0,18.505 0)	20.619	(109.910 0,1.135 3)	9.979 3
(-100,-50)	(-82.038 0,-44.078 0)	18.913	(-107.200 0,-52.795 0)	7.721 1
(-50,-50)	(-45.319 0,-45.319 0)	6.620 7	(-50.348 0,-54.482 0)	4.495 5
(0,-50)	(3.932 8,-39.417 0)	11.290	(1.788 0,-48.836 0)	2.133 2
(50,-50)	(66.386 0,-53.937 0)	16.852	(52,-50.971)	2.223 2
(100,-50)	(118.470 0,-24.291 0)	31.655	(103.650 0,-50.876 0)	3.754 7
(-50,-100)	(-48.039 0,-83.230 0)	16.884	(-53.154 0,-107.320 0)	7.970 6
(0,-100)	(-10.432 0,-100.680 0)	10.454	(0.564 7,-106.950 0)	6.971 0
(50,-100)	(52.218 0,-74.328 0)	25.768	(56.264 0,-107.200 0)	9.543 0

3 声发射源模拟定位结果

采用上述方法,在图 1 中给出的铝板材料上进行模拟声发射源定位实验。对 4 只 PZT 围成的正方形区域的 77 个点进行敲击定位测试(除压电元件
万方数据

所在的 4 个顶点外)。采用传统的阈值定位方法和本文改进方法的结果对比如图 6 所示。表 1 只列出了部分测试点的对比结果,其中,以铝板的中心点为坐标原点。将 4 个压电元件的坐标分别定为

(-100, 100)、(100, 100)、(-100, -100)、(100, -100)。改进前, 77个测试点的平均定位偏差为12.8 mm; 改进后平均值减小到4.9 mm, 效果明显。

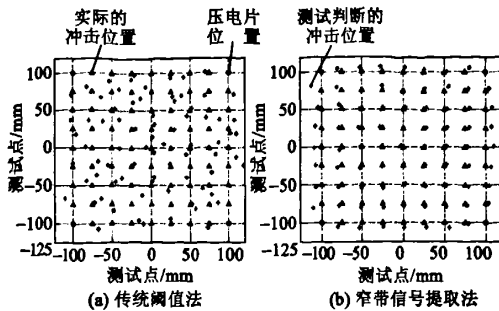


图6 模拟声发射源定位结果

4 结束语

小波变换具有提取信号局部频带内成分的作用。基于这一特点, 本文采用小波变换提取声发射这一宽带信号中的窄带信息, 可有效避免检测信号飘移、检测噪声及应力波传播色散效应对波形到达时刻判别的影响; 通过窄带信号包络的提取还可进一步为到达时刻的判定提供依据。实验结果表明,

此方法可将定位误差减小。目前的无损检测设备正在向着计算机化的方向发展, 上述算法可方便地植入设备程序中, 从而进一步提高设备的检测准确性。

参考文献:

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 244-273.
 - [2] MARTIN G, DIMOPOULOS J. Acoustic emission monitoring as a tool in risk based assessments[C]. New Zealand: 12th A-PCNDT 2006-Asia-Pacific Conference on NDT, 2006.
 - [3] 焦敬品, 吴斌, 何存富, 等. 基于模态声发射和小波变换的薄板中导波传播特性的实验研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(13): 1179-1182.
 - [4] 龚仁荣, 顾建祖, 骆英, 等. Gabor小波时域分析在声发射信号处理中的应用[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 76-79.
 - [5] 张军, 王彪, 计秉玉. 基于小波变换的陶罐金属磁记忆检测信号处理[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 137-140.
 - [6] JEONG H. Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform [J]. NDT&E Int, 2001, 34(3): 185-190.
-
- (上接第291页)
- [4] MARQUES M I. First-principles study of instantaneous and averaged local potential in BaTiO₃ [J]. Phys Rev B, 2005, 71(17): 174116.
 - [5] TINTE S, STACHIOTTI M G, SEPLIARSKY M, et al. Atomistic modeling of BaTiO₃ based on first-principles calculations[J]. J Phys: Condens Matter, 1999, 11(48): 9679-9690.
 - [6] HERZBACH D, MUSER M H. Piezoelectric coefficients by molecular dynamics simulations in the constant stress ensemble: a case study of quartz [J]. Computer Physics Communications, 2006, 174(1): 17-23.
 - [7] TSUNEYUKI S, AOKI H, TSUKADA M. Molecular-dynamics study of the structural phase transition of quartz[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(7): 776-779.
 - [8] TANAKA H, TABATA H, OTA K, et al. Molecular-dynamics prediction of structural anomalies in ferroelectric and dielectric BaTiO₃-SrTiO₃-CaTiO₃ solid solutions [J]. Phys Rev B, 1996, 53(21): 14112-14116.
 - [9] 文玉华, 朱如增, 周富信, 等. 分子动力学模拟的主要技术[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 65-73.
 - [10] NOSE S. A unified formulation of the constant temperature molecular dynamics methods[J]. Chem Phys, 1984, 81(1): 511-519.
 - [11] HOOVER W G. Canonical dynamics: equilibrium phase-space distributions [J]. Physical Review A, 1985, 31(3): 1695-1702.
 - [12] HEERMANN D W. Computer simulation methods in theoretical physics[J]. Applied Optics, 1987, 26(10): 1818-1837.
 - [13] PARK S E, WADA S, CROSS L E, et al. Crystallographically engineered BaTiO₃ single crystals for high-performance piezoelectrics [J]. J Appl Phys, 1999, 86(5): 2746-2750.

采用窄带特征提取方法提高声发射源定位精度

作者: [公聪聪](#), [石立华](#), [李刚](#), [GONG Cong-cong](#), [SHI Li-hua](#), [LI Gang](#)
 作者单位: [解放军理工大学, 工程兵工程学院, 江苏, 南京, 210007](#)
 刊名: [压电与声光](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
 英文刊名: [PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS](#)
 年, 卷(期): 2009, 31(2)
 引用次数: 0次

参考文献(6条)

1. [李家伟, 陈积懋](#) [无损检测手册](#) 2002
2. [MARTIN G. DIMOPOULOS J](#) [Acoustic emission monitoring as a tool in risk based assessments](#) 2006
3. [焦敬品, 吴斌, 何存富](#) [基于模态声发射和小波变换的薄板中导波传播特性的实验研究](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2004(13)
4. [龚仁荣, 顾建祖, 骆英](#) [Gabor小波时域分析在声发射信号处理中的应用](#)[期刊论文]-[中国测试技术](#) 2006(01)
5. [张军, 王彪, 计秉玉](#) [基于小波变换的陶罐金属记忆检测信号处理](#)[期刊论文]-[石油学报](#) 2006(02)
6. [JEONG H](#) [Analysis of plate wave propagation in anisotropic laminates using a wavelet transform](#) 2001(03)

相似文献(10条)

1. 会议论文 [J. Webster](#) [磨削过程的原始声发射波信号分析](#) 1998
 与大多数对磨削的声发射研究不同, 该文主要集中在分析原始声发射波信号而不是均方根信号(RMS), 讨论了在不同磨削过程中, 砂轮与工件接触产生的原始声发射波的瞬态特征。在了解所用传感器的频率响应前提下进行了声发射波的频率分析, 进行了不同的积分时间常数的声发射波均方根的评估, 其目的是用来决定将来产品应用中的合适时间常数。
2. 会议论文 [钱文学, 谢里阳, 尹晓伟, 韩路](#) [2A12铝合金疲劳裂纹声发射信号分析与模式识别](#) 2008
 应用疲劳裂纹的声发射信号分析方法, 分析了2A12铝合金疲劳裂纹在不同阶段声发射信号的特点, 进而应用人工神经网络的非线性映射能力, 利用试验所得样本对疲劳裂纹进行模式识别, 识别裂纹扩展的不同阶段和裂纹大小。实际试验结果表明, 该方法能够检测常规检测方法无法检测的疲劳裂纹, 裂纹模式识别结果具有一定的精度, 有一定的实际工程意义。
3. 期刊论文 [李波, 黄红武](#) [陶瓷材料高速深磨声发射信号分析](#) -[机械制造](#)2006, 44(7)
 通过实验分析了工程陶瓷材料在高速深磨中不同磨削参数与声发射信号的关系, 实验表明: 材料、砂轮速度、工作台速度、切深4个因素与声发射信号有着很好的对应关系, 声发射信号包含了大量有用的信息, 可以利用声发射技术对陶瓷磨削过程进行有效的监测。
4. 期刊论文 [全惠敏, 戴瑜兴, 王鹏人](#) [基于广义S变换的声发射信号分析及定位](#) -[电子学报](#)2010, 38(2)
 针对声发射信号分析和声源定位问题, 提出了基于广义S变换的声发射信号分析方法和三维空间定位方法, 推导出了广义S变换的实现过程, 使用广义S逆变换对信号进行去噪重构, 为保证各传感器时差的准确性, 本文利用广义S变换分析声发射信号, 提取其主频带能量序列曲线上峰值所对应的时间进行时间差计算, 然后结合三维空间定位方法对声发射源进行精确定位。仿真实验结果表明该算法能够实现声发射信号的特征提取和精确定位, 且误差小、可靠性好。
5. 期刊论文 [冯亚东, 王宛山](#) [磨削加工的声发射信号分析](#) -[东北大学学报\(自然科学版\)](#)1998, 19(1)
 对磨削加工中产生的声发射信号进行了分析, 讨论了磨削过程中声发射信号影响因素指出各种声发射信号与其磨削加工状态有着良好的对应关系, 可以用来对磨削加工过程和磨削质量进行监控。
6. 会议论文 [冯亚东, 李虎, 于天彪, 王宛山](#) [精密磨削加工中的声发射信号分析与应用](#) 2005
 本文对精密磨削加工中产生的声发射信号进行了分析, 讨论了精密磨削过程声发射信号影响因素, 指出不同特征参量的声发射信号与其精密磨削加工状态有着良好的对应关系, 可以用来对精密磨削加工过程和磨削质量进行监控。
7. 学位论文 [徐运燕](#) [基于DSP的全数字化声发射及故障源识别技术研究](#) 2002
 该文研究了基于DSP的全数字化声发射软、硬件系统。从计算机硬件上, 完成了基于PC机PCI总线和DSP信号处理卡的四通道声发射系统的开发。在DSP开发环境CCS1.0中编写了声发射特征值提取程序, 从而能够在DSP中实时提取信号的开始时间、上升时间、上升率、下降时间、峰值、振铃计数、振铃计数率、能量、RMS等十种特征值, 并实现了DSP与PC机的通信和数据交换过程。在声发射系统分析软件方面, 建立了数据文件管理、设备管理、通道管理、波形显示等一般声发射检测仪器所必备的各种功能模块。在高级信号分析方法方面, 给出了信号的傅立叶变换、希尔伯特变换、信号相关分析、功率谱分析等现代分析方法。在神经网络声发射源识别方面, 提供了基于MATLAB的BP神经网络分析模块。
8. 期刊论文 [杨璧玲, 张慧萍, 晏雄, YANG Bi-ling, ZHANG Hui-ping, YAN Xiong](#) [模式识别在复合材料声发射信号分析中的应用](#) -[玻璃钢/复合材料](#)2007, ""(2)
 模式识别在复合材料声发射信号分析中的应用已初见成效。本文从信号的除噪与信号源的识别两方面综述了这一领域的研究, 重点论述了特征的选取和模式识别方法的选择, 并提出了目前研究中尚存在的一些问题及其展望。
9. 会议论文 [李光海, 刘时风](#) [声发射信号分析及进展](#) 2004
 针对声发射信号的特点, 介绍了声发射信号目前所用的各种处理和分析方法, 说明了基于波形分析的现代信号处理技术是揭示声发射源及信号传播规律的重要手段。
10. 期刊论文 [龚斌, 金文, 李兆南, 金志浩, Gong Bin, Jin Wen, Li Zhaonan, Jin Zhihao](#) [不同小波基在碳钢材料声发](#)

射信号分析中的应用 - 仪器仪表学报2008, 29(3)

为研究不同小波基对同一声发射信号分析结果之间的可比性,以碳钢在塑性变形和裂纹扩展时产生的声发射信号为研究对象,用db5和sym5两种常用小波基对检测信号进行了分析对比.结果表明,对碳钢在塑性变形和裂纹扩展时产生声发射信号,2种小波变换在信号能量分布趋势上分析结果一致,在主要信号峰值对应频率上分析结果接近,平均相对偏差仅为1.53%,而在各级信号占能量比例的具体值和信号峰值上偏差较大,平均相对偏差在10%左右,可比性较差.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ydysg200902046.aspx

下载时间: 2010年6月2日