

粗晶材料超声检测缺陷信号增强的小波分析法^①

陈岳军 赵海燕 史耀武

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘 要 在超声无损检测中, 粗晶材料(奥氏体钢)的晶粒噪声往往使材料的缺陷信号变得难以识别。在分析晶粒噪声和缺陷信号频谱分布的基础上, 利用小波分析法消除晶粒噪声以实现有效识别缺陷的目标。利用此方法进行实际粗晶材料超声信号分析, 可方便地识别缺陷的存在与否以及缺陷的位置。

关键词 粗晶 超声波 无损检测 小波变换

粗晶奥氏体钢已广泛地应用于核电、石化等工业部门。如钠冷快堆的一次、二次回路系统的许多重要构件就是由粗晶奥氏体钢制成。由于对核反应堆等系统安全性的严格要求, 对这种材料进行可靠的无损检测显得十分必要, 但是材料的粗大晶粒往往使传统的超声探伤仪难以识别其内部的缺陷。因此, 如何提高信噪比, 增加缺陷目标的检出率已成为国内外在此领域里的研究热点。采用双晶片斜探头或聚焦探头可以提高某一深度附近缺陷的检出能力, 但是由于这种方法的局限性, 人们把更多的精力花在超声信号的处理上, 例如空间平均法等, 并已取得了一定的效果。本文在分析晶粒噪声和缺陷信号频谱分布的基础上, 采用具有优良时频局部化能力的小波变换技术进行缺陷信号的增强。结果表明这是一种在粗晶材料超声检测中识别缺陷信号的有效方法。

1 小波变换

1.1 小波函数

傅里叶变换能提供信号的频域信息, 但缺乏时域信息。为解决这一问题, 时频分析技术得到了相当大的发展, 小波变换就是一种优异的时频分析方法^[1]。信号 $f(t) \in L^2$ 的小波变

换可表示如下:

$$T E \quad W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中 $\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi(t-b)/a$,

$$b \in R, \quad a \in R \setminus \{0\} \quad (2)$$

被称为小波函数, a 和 b 分别为小波变换的尺度系数和时间系数, R 表示实数集。设 $\Psi \in L^1 \cap L^2$ 且满足

$$C_\Psi = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

若 $f(t)$ 在 t 处连续, 则 $f(t)$ 可重构为

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \iint_{R^2} W_f(a, b) \Psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} \times da db \quad (4)$$

从信号处理的角度看, 小波函数 $\Psi(t)$ 是一个带通滤波器, 其带宽和中心频率正比于尺度系数 a 。小波变换能够把信号分解到一系列在对数意义上具有相同带宽的频率通道。

1.2 多分辨分析

Mallat 提出的多分辨分析实际上是小波变换在信号处理中的一种快速实现方法。离散小波变换时通常取尺度系数为 2^j , $j \in Z$, Z 为整数集。由文献[2]定义的一组多分辨近似空间 $V_{-\infty} \supset \dots \supset V_2^0 \supset V_2^1 \supset \dots \supset V_{+\infty}$, 可获得 V_2^j 的一组正交补空间 W_2^j :

① 国家教委博士点基金及北京市自然科学基金资助项目
陈岳军, 男, 25岁, 博士研究生

收稿日期: 1996-10-15; 修回日期: 1996-12-18

$$W_{2^j} \perp V_{2^j} \quad W_{2^j} \oplus V_{2^j} = V_{2^{j-1}} \quad (5)$$

可以证明^[3], 对于以上定义的子空间组 V_{2^j} , 存在一个尺度函数 $\Phi(t) \in L^2(R)$, 设: $\Phi_{2^j} = 2^j \Phi(2^j t)$, 则 $2^{-j/2} \Phi_{2^j}(t - 2^{-j}n)$, $n \in Z$ 是空间 V_{2^j} 的正交基。同样, 设: $\Psi_{2^j} = 2^j \Psi(2^j t)$, 则 $2^{-j/2} \Psi_{2^j}(t - 2^{-j}n)$, $n \in Z$ 是空间 W_{2^j} 的正交基, $2^{-j/2} \Psi_{2^j}(t - 2^{-j}n)$, $(n, j) \in Z^2$ 是 $L^2(R)$ 的正交基, 即小波分析中使用的小波基。

要处理的实际信号一般是有限长度的离散序列。可由尺度函数 $\Phi(t)$ 得到一个传递函数为 $H(\omega)$ 的低通滤波器和一个传递函数为 $G(\omega) = e^{-j\omega} \overline{H(\omega + \pi)}$ 的高通滤波器。定义 $A_{2^j}^d f$ 是信号 $f(n)$ 在空间 V_{2^j} 上的正交投影, $D_{2^j}^d f$ 表示从 $A_{2^{j-1}}^d f$ 到 $A_{2^j}^d f$ 函数 f 所损失的细节信息。实际运算可通过图 1 逐级计算信号的多分辨近似, 把信号按频率从高到低分解到各尺度上。图中 $2\downarrow$ 表示只取偶数位置的值。

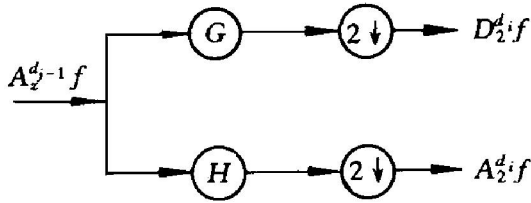


图 1 多分辨分析的逐级计算

2 信噪分离

2.1 噪声和信号的频谱分布

超声检测时, 噪声主要由超声波散射所引起。超声波散射与晶粒尺寸、各向异性程度和超声波频率等有关。通常, 晶粒越粗大, 各向异性越严重, 超声波频率越高, 散射越强烈。散射系数、超声频率、各向异性的程度和晶粒平均直径之间的定量关系可表示如下^[4]:

$$\alpha_s = \begin{cases} c_2 F d^3 f^4 & d \ll \lambda \\ c_3 F d f^2 & d \approx \lambda \\ c_4 F d^{-1} & d \gg \lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中 α_s 为散射系数, c_2 、 c_3 、 c_4 为常数, F 为各向异性因数, d 为晶粒平均直径, f 和 λ

分别为超声波的频率和波长。对于频率为 20 MHz 以下超声波, 散射情况主要由(6)、(7)两式决定。显然, 由散射引起的晶粒噪声具有强烈的频率依赖性, 随着超声频率的降低, 散射系数急剧变小。对于一个含有缺陷反射体(如裂纹)的材料, 超声探伤仪所接收到的目标反射信号类似于一个冲击信号, 其频谱在超声换能器的频带内分布比较均匀, 具有宽谱特征。

2.2 信噪分离原理

超声波在传播过程中遇到缺陷、晶粒等会使超声信号的振幅、频率等发生变化。在分析具有时变特性的超声信号时, 小波变换具有独特的优点。由于缺陷信号具有宽谱的特征, 因此在小波分解时同一时刻的不同尺度上均有缺陷信息存在。与此相反, 由于晶粒噪声对频率的依赖, 并不具备这种在不同尺度之间信息传播的特性, 随着尺度的增加, 晶粒噪声的幅度很快减小。可见, 对小波分解得到的信息, 可以通过保留在不同尺度之间具有传播性的信息而抑制不具传播性的信息来消除粗晶材料的晶粒噪声。对于消除了晶粒噪声的信息进行小波重构, 信噪比将得到极大的提高。

3 实验结果

本研究中试样所采用的材料为具有粗大晶粒的奥氏体不锈钢。探伤采用自发自收的 A 扫描方式, 由超声探伤仪激发并接收中心频率为 5 MHz 的宽带、窄脉冲超声信号, 该信号经采样频率为 20 MHz 的信号采集板数字化后存于微机。图 2(a) 为对试样进行探伤时所采集的 A 扫描信号, 其中缺陷回波是由直径 1 mm、深 35 mm 的圆柱形横孔产生的。从图 2(a) 的回波信号很难判断缺陷的存在与否。而据信号和噪声频谱分布差异, 利用本文所描述的信噪分离原理去除粗晶材料的晶粒噪声, 超声回波信能从其号(图 2(b)) 很容易判断缺陷的存在及其位置。

对无缺陷的粗晶奥氏体不锈钢进行超声探伤, 所采集的信号如图 3(a) 所示。用相同的信

噪分离算法去除晶粒噪声, 结果如图 3(b)。显然, 在上下底面回波之间没有缺陷回波存在。

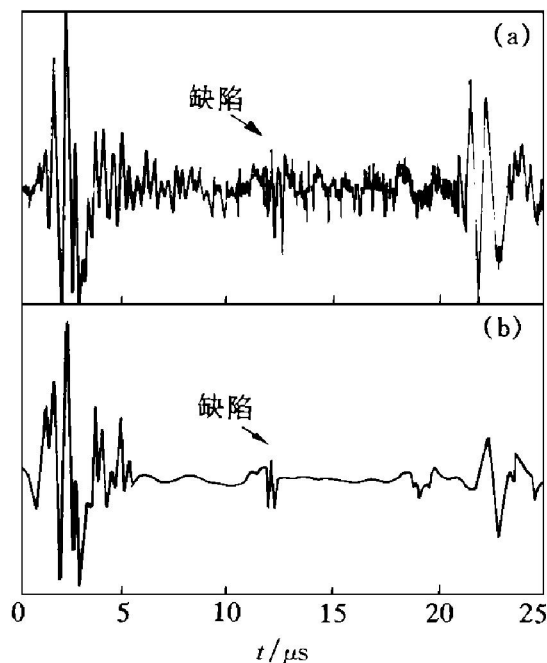


图 2 含缺陷试样的超声回波信号

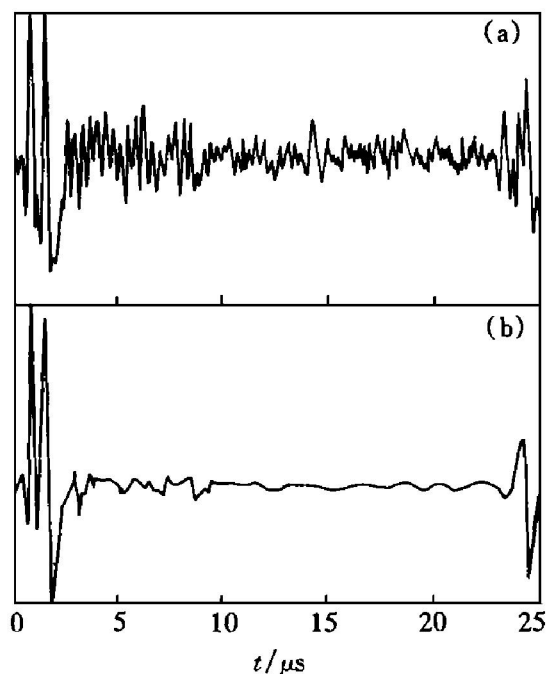


图 3 无缺陷试样的超声回波信号

从去除噪声后的信号可以方便地识别缺陷的存在与否以及缺陷的位置。

4 结论

本文分析了粗晶材料超声无损检测时晶粒噪声和缺陷信号的频谱分布, 并提出一种基于小波变换的信噪分离算法。利用此算法对粗晶奥氏体不锈钢材料超声检测信号的分析表明, 晶粒噪声得到极大的抑制, 信噪比明显提高,

参考文献

- 1 崔锦泰[美]著, 程正兴译. 小波分析导论. 西安: 西安交通大学出版社, 1995, 10- 55.
- 2 Mallat S. IEEE Trans PAMI, 1989, 7: 674- 693.
- 3 Mallat S. Trans Amer Math Soc, 1989, 1: 69- 87.
- 4 《超声波探伤》编写组. 超声波探伤. 北京: 电力工业出版社, 1980, 43- 47.

ENHANCEMENT OF ULTRASONIC DEFECT SIGNALS OF COARSE GRAINED MATERIALS USING WAVELET ANALYSIS METHOD

Chen Yuejun, Zhao Haiyan, Shi Yaowu

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

ABSTRACT It was difficult to identify the ultrasonic defect signals of coarse grained materials, so a wavelet analysis method was applied to reduce the grained noise based on the discussion of the frequency spectrum distribution of the defect signals and grained noise. The experimental results show that the SNR can be improved highly by this method.

Key words coarse grain ultrasound nondestructive testing wavelet transform

(编辑 黄劲松)