

# 基于 Marr 小波分析的薄层超声检测

## Ultrasonic Testing of Thin Layered Structure Based on Marr Wavelet Analysis

林 莉, 聂 颖, 李喜孟  
(大连理工大学, 辽宁 大连 116023)  
LIN Li, NIE Ying, LI Xi-meng  
(Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

摘要: 薄层结构超声测厚过程中, 薄层上下界面回波叠加导致信号难以区分。针对该难点本研究采用基于 Marr 小波的小波变换模极大值法对 250~ 350 m 的 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层进行了厚度测量。所得结果与金相法测量结果相符。  
关键词: Marr 小波; 小波变换模极大值; 薄层测厚; 超声检测  
中图分类号: TG115.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)02-0039-03

**Abstract:** It is difficult to recognize the overlapping signal of the front and bottom echoes from the thin layer structure. In order to measure the thickness of the thin layer, wavelet transform modulus maxima method based on Marr wavelet is utilized for the ZrO<sub>2</sub> ceramic coating with the thickness ranging from 250 m to 350 m. The results of ultrasonic method accords with that of metallographical results.  
**Key words:** Marr wavelet; wavelet transform modulus maxima; thin layer depth measuring; ultrasonic testing

陶瓷涂层具有耐高温、化学稳定性好、硬度高、适应性强等优点, 目前已经成功应用于航空、航天、机械、电子等领域, 有着十分广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。提出能有效表征与评价薄层厚度的技术和方法, 对陶瓷涂层的广泛应用将起到巨大的推动作用。超声检测是利用超声的传播和信息载体的特性, 检查材料的缺陷, 测量几何尺寸、物理化学性能的方法与技术<sup>[2]</sup>。超声波在薄层介质中传播时, 由于不同界面的超声回波相互叠加, 使获得的回波信号具有较高的非平稳特性。小波变换具有对信号的自适应处理及良好的时频分析能力, 特别适用于非平稳信号的检测。本研究在对 Marr 小波及其变换特性分析的基础上, 结合小波变换模极大值方法, 对不锈钢表面厚度范围为 250~ 350 m 的 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度进行测量。超声检测与金相分析结果相符, 验证了该方法的有效性。

### 1 Marr 小波变换及突变信号检测原理

#### 1.1 Marr 小波特性分析

利用小波分析方法对非平稳信号进行分析时, 小波基函数的选取对分析结果的精度有很大影响<sup>[3]</sup>。作为高斯函数二阶导数的 Marr 小波, 精确满足小波允许条件。由于其具有良好的时频正则性, 在局部性聚

焦分析中具有很多优点, 特别适用于突变信号的检测。Marr 小波的基本小波定义为:  
$$\psi(t) = (1 - t^2)e^{-t^2/2}$$
  
(1)  
式中  $t$  为时间。  
其频域形式为:

$$\hat{\psi}(\omega) = \sqrt{2} \omega^2 e^{-\omega^2/2}$$
  
(2)  
式中  $\omega$  为频率。在  $\omega = 0$  处,  $\hat{\psi}(\omega)$  有二阶零点, 满足容许条件, 而且小波系数随  $|\omega|$  衰减较快, 满足小波的特性。该小波的基本形状见图 1。

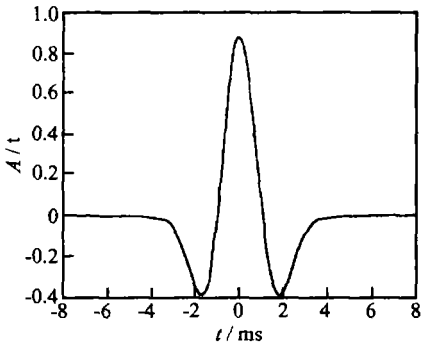


图 1 Marr 小波时域波形图  
Fig. 1 Time domain waveform of Marr wavelet

子小波由母小波伸缩和平移生成, 时域形式为

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$
  
(3)

式中:  $a>0$ , 为尺度因子;  $b$  为位移因子; 其值可正可负。Marr 小波的基本小波函数  $(t)$  满足约束条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{f}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{4}$$

式中:  $\hat{f}(\omega)$  为  $f(t)$  的傅里叶变换。

1.2 小波变换用于信号突变检测的原理

连续小波变换的频域计算公式为:

$$W(a,b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \hat{f}(\frac{\omega}{a}) e^{j\omega b} d\omega \tag{5}$$

式中:  $F(\omega)$ ,  $\hat{f}(\omega)$  分别为超声回波信号和子小波的傅里叶变换。

当  $f(t)$  为某一光滑函数  $f(t)$  的  $n$  阶导数时, 该光滑函数满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = 1 \text{ 且 } f(t) = O(1/(1+t^2)) \tag{6}$$

此时  $f(t)$  满足约束条件。

定义  $f^{(1)}(t)$  和  $f^{(2)}(t)$  是如下的小波变换

$$f^{(1)}(t) = df(t)/dt \tag{7}$$

$$f^{(2)}(t) = d^2 f(t)/dt^2 \tag{8}$$

记  $m = (t/s)/s$ , 则对于一个实函数  $f(t) \in L^2(R)$ , 有下面的小波变换

$$\begin{aligned} W_{mf}^{(1)}(t) &= W^{(1)}f(s,t) = f * f_m^{(1)}(t) \\ &= f * (s \cdot df_m(t)/dt) \\ &= s \cdot d(f * f_m(t))/dt \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} W_{mf}^{(2)}(t) &= W^{(2)}f(s,t) = f * f_m^{(2)}(t) \\ &= f * (s^2 \cdot d^2 f_m(t)/dt^2) \\ &= s^2 \cdot d^2(f * f_m(t))/dt^2 \end{aligned} \tag{10}$$

可见  $W_{mf}^{(1)}(t)$  和  $W_{mf}^{(2)}(t)$  分别正比于经  $f_m(t)$  磨光后得到的函数的一阶导数和二阶导数。由数学分析可知, 函数一阶导数的极值点对应其二阶导数的零点, 同时也是函数本身的拐点, 且一阶导数绝对值的最大值对应函数的突变, 而最小值(不等于 0)则与函数的缓变相对应。因此,  $W_{mf}^{(1)}(t)$  的幅值极大点对应于  $f(t)$  的突变点,  $W_{mf}^{(2)}(t)$  的零点与  $f * f_m(t)$  的拐点一致<sup>[4]</sup>。

设  $W_{af}(t)$  是函数  $f(t)$  的小波变换。在尺度  $a=a_0$  下, 如果存在一点  $(a_0, t_0)$ , 使得  $W_{a_0}f(t_0)/t = 0$ , 该点称为小波变换极值点, 记为  $W_{mf}(t)$ 。如果存在  $|W_{a_0}f(t)| = |W_{a_0}f(t_0)|$ ,  $t$  为  $t_0$  左、右邻域内的任意点, 跨尺度相应模极大值点坐标的连线称为小波变换模极大值线<sup>[4]</sup>。

基于以上分析, 本研究选择  $f^{(1)}(t)$  为 Marr 小波, 对超声回波信号  $f(t)$  做小波变换, 并取小波变换模极大值(记为  $|W_{mf}(x)|$ ), 则  $|W_{mf}(x)|$  对应超声回波信号  $f(t)$  的突变点。此即为基于 Marr 小波变换的超声回波信号的突变检测原理。

2 实验分析

2.1 试样及实验参数

利用等离子喷涂方法在不锈钢基体上制备  $ZrO_2$  ( $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ , 质量分数) 陶瓷涂层。通过控制喷涂时间, 获得厚度范围分别为 256~288  $\mu m$ , 265~300  $\mu m$ , 280~320  $\mu m$  和 278~330  $\mu m$  的  $ZrO_2$  陶瓷涂层试样, 记作 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>。金相测量结果见图 2。采用超声水浸聚焦脉冲回波方法对  $ZrO_2$  陶瓷涂层试样进行检测。具体实验参数如下: 超声换能器晶片直径 6.4mm、中心频率 20MHz、焦距 146.5mm、焦柱直径 0.47mm、焦柱长度 146.5mm。

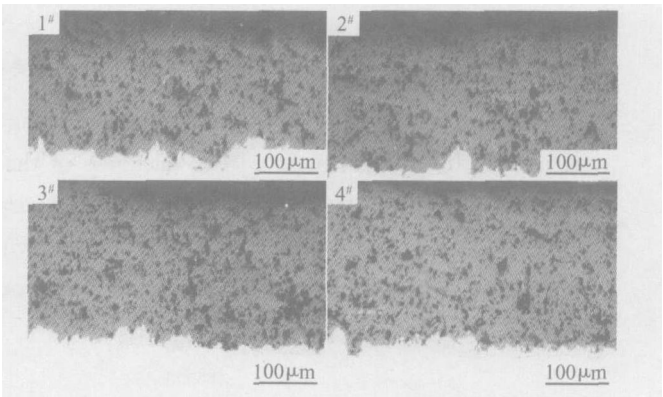


图 2  $ZrO_2$  陶瓷涂层金相显微照片

Fig. 2 Micrographs of  $ZrO_2$  ceramic coatings

2.2 实验结果分析

图 3 所示为 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>  $ZrO_2$  陶瓷涂层的超声波时域波形。观察发现, 超声波在  $ZrO_2$  陶瓷涂层试样中传播时, 水/ $ZrO_2$  陶瓷涂层和  $ZrO_2$  陶瓷涂层/基体的界面回波混叠在一起(见图 3 中的阴影部分), 波形发生明显畸变, 无法将两界面回波区分开。根据不同界面回波的叠加与干涉效应<sup>[5]</sup>, 对  $ZrO_2$  陶瓷涂层时域波形进行小波变换, 并取模极大值, 结果如图 4 所示。 $|W_{mf}(x)|$  对应信号的拐点或奇异点。如果信号在某一时刻发生畸变, 则  $|W_{mf}(x)|$  上极大值连线将在较大尺度范围内变化。从大尺度向小尺度追踪将得到奇异点出现的位置, 推算出相应的时间间隔, 从而对薄层厚度进行检测。从图 4 可以看到, 不同厚度(1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>)  $ZrO_2$  陶瓷涂层的模极大值线形状及出现位置有所不同, 但从整体上看, 跨越大范围尺度的模极大值连线数量较多, 引入较大的工作量。

在信号的畸变点处, 在较大尺度范围内小波系数模将取得极大值, 且极大值能量反映该点奇异性的大小。为了减小单一尺度确定时间点所引起的误差, 对各时间点在所有尺度取平均值, 该平均值的能量反映

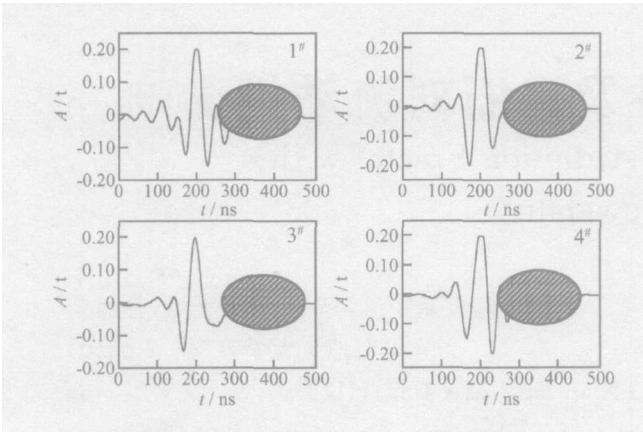


图 3 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层超声时域波形

Fig. 3 Ultrasonic waveform of ZrO<sub>2</sub> ceramic coatings

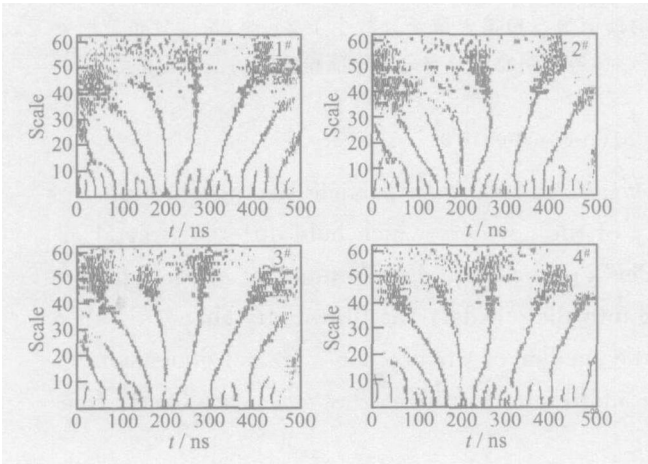


图 4 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层超声信号小波变换模极大值  $|W_{mf}(x)|$

Fig. 4 Wavelet transform modulus maxima  $|W_{mf}(x)|$  of ultrasonic signals of ZrO<sub>2</sub> ceramic coatings

信号在各时间点能量的变化。图 5 即为 1<sup>#</sup> 4<sup>#</sup> 试样超声回波信号的  $|W_{mf}(x)|$  的平均幅值图。由信号突变检测原理可知,在水/ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层和 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层/基体界面处,  $|W_{mf}(t)|$  能量最大。从图 5 可以清楚看到,在 200ns 即  $|W_{max1}f(t)|$  处峰值能量达到最大,证明该处奇异性最大。在 400ns 附近即  $|W_{max2}f(t)|$  处,峰值能量超过其附近模极大值能量,具有较大的奇异性。经判断  $|W_{max1}f(t)|$  及  $|W_{max2}f(t)|$  分别对应水/ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层和 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层/基体界面回波信号到达的时间。图 5 中最大峰值能量  $|W_{max1}f(t)|$  及  $|W_{max2}f(t)|$  出现的位置,可以在图 4 中从大尺度到小尺度进行追踪,从而进行精确定位,找到水/ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层和 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层/基体界面对应的时间点,二者的差值即为超声波在陶瓷涂层中传播时间的 2 倍。取超声波在 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层中的声速为 3000m/s,可计算求得 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度。

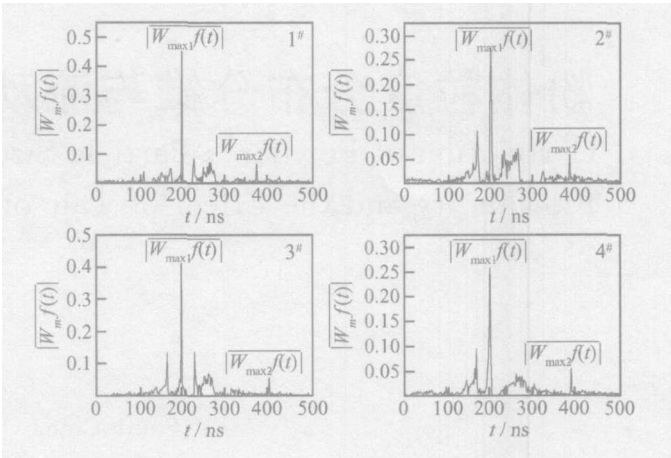


图 5 小波变换模极大值  $|W_{mf}(x)|$  的平均幅值  $|W_{mf}(t)|$

Fig. 5 Average amplitude value  $|W_{mf}(t)|$  of wavelet transform modulus maxima  $|W_{mf}(x)|$

超声测试结果与金相结果进行比较,见图 6。可以发现,2<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 的超声测试结果与金相测量结果符合较好,1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 的超声测试结果与金相结果有一定的偏差。后者可能是由于测试点附近 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度不均匀或金相测量与超声测试位置不一致引起的。从整体上看,二者的厚度测量结果基本处于同一范围,说明利用基于 Marr 小波的方法可用于测量 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度。

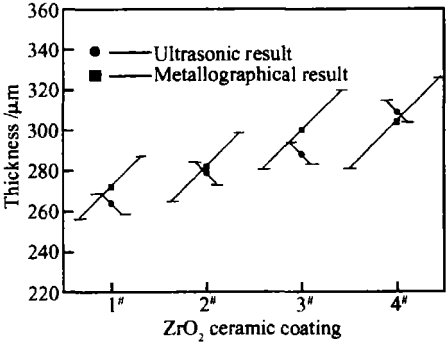


图 6 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度的超声测试及金相测量结果

Fig. 6 The results of ZrO<sub>2</sub> ceramic coatings for thickness measuring using ultrasonic and metallographical methods

3 结论

基于 Marr 小波的  $|W_{mf}(x)|$  法适用于突变信号的检测。超声波在薄层结构中传播时,由于异质界面回波的叠加导致回波信号发生畸变,用  $|W_{mf}(x)|$  法可对畸变信号出现的时刻进行定位,获得薄层材料的厚度。本研究利用  $|W_{mf}(x)|$  法对厚度范围在 250~350 m 的 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷涂层厚度进行了测量,与金相结 (下转第 45 页)

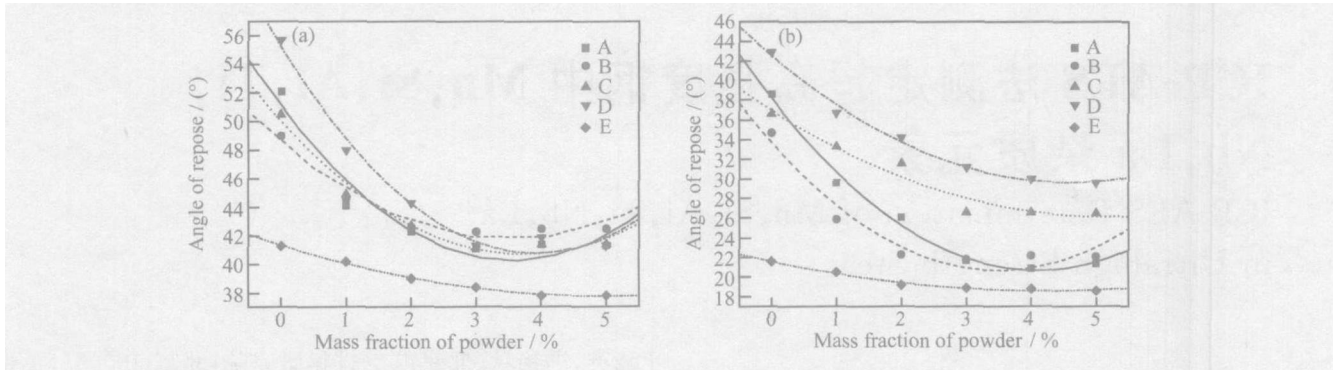


图 4 掺入滑石粉后粉体流动性表征参数的变化关系 (a) 掺入滑石粉后颗粒休止角的变化; (b) 掺入滑石粉后颗粒崩溃角的变化

Fig. 4 The change of the flowability denotation parameters after adulterate talc powder (a) the change of the angle of repose after adulterate talc powder; (b) the change of the angle of collapse after adulterate talc powder

其是颗粒群粒度分布分形维数值越小的粉体颗粒, 其流动性能的改善越显著。

3 结论

(1) 滑石粉对不同粒度分布分形维粉体流动性的改善有较明显的效果, 当滑石粉掺入质量分数 < 2% 时, 粉体颗粒的休止角与崩溃角的减小趋势显著, 粉体流动性得到较大改善; 而随着滑石粉掺入量不断增加, 当滑石粉的掺入质量分数为 3% ~ 5% 时, 粉体颗粒的休止角与崩溃角变化趋于平缓, 粉体流动性增大缓慢, 甚至使效果变差。

(2) 滑石粉对不同粒度分布分形维数值粉体流动性改善程度的关系为: 粒度分布分形维数值越大, 滑石粉对粉体流动性能的影响效果越小, 分形维数值越小的粉体颗粒, 流动性能的改善越显著。

参考文献

[1] CARR R L. Evaluating flow properties of solids[J]. Chem Eng, 1965, 72(1): 163- 167.

[2] KLOUBEK J. Investigation of porous structures using mercury reintrusion and retention[J]. J Cell Interface Sci 1994, 163(2): 10 - 18.

[3] JENIKE A W. Storage and flow of solids[J]. Utah Eng Exp Stn ull, 1964, 123(6): 192- 194.

[4] 奚新国, 张耀金. 粉体流动性能的测试研究[J]. 盐城工学院学报 (自然科学版), 2003, 16(1): 4- 7.

[5] 郁可, 郑中山. 粉体粒度分布的分形研究[J]. 材料科学与工程, 1995, 13(5): 30- 35.

[6] 胡小芳, 胡大为, 吴成宝. 多孔介质粘土颗粒群粒径分布分形维[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, (12): 21- 25.

[7] 胡小芳, 周兴求, 张福根. 定量评价水泥颗粒助磨剂的方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 82- 84.

[8] 胡庆轩, 郑怀玉, 林文娟, 等. 有机粉体流动性的测定[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(5): 11- 14.

[9] MARKUS L, KARL E. A powder on the move[J]. European Coatings Journal, 2002, 34(9): 14- 21.

收稿日期: 2005-12-20; 修订日期: 2006-03-29

作者简介: 胡小芳(1956-), 男, 教授, 博士, 长期从事无机材料及其交叉和边缘学科的理论 and 工程技术研究, 联系地址: 广州市天河区华南理工大学工业装备与控制工程学院粉体实验室(510640)。

(上接第 41 页)

果符合较好。该方法在陶瓷涂层构件的实际应用中具有重要意义。

参考文献

[1] 陈虹, 胡利明, 任卫, 等. ZrO<sub>2</sub> 陶瓷热障涂层的研究[J]. 中国表面工程, 2000, 4(49), 12- 18.

[2] 冯若, 姚锦钟, 关立勋. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.

[3] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 392- 400.

[4] 曹茂森, 任青文, 刘福胜. WTTMM 法在土木工程反射波法无损检

测中的应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11): 91- 96.

[5] 李建平. 小波分析与信号处理- 理论、应用及软件实现[M]. 重庆: 重庆出版社, 1997.

[6] 徐志辉, 林莉, 李喜孟, 等. 基于功率谱分析的表面涂层厚度超声无损测量方法[J]. 中国表面工程, 2004, 69(6): 7- 9.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50401021)

收稿日期: 2006-06-26; 修订日期: 2006-11-20

作者简介: 林莉(1970-), 女, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 目前主要从事材料无损表征与评价研究, 联系地址: 大连理工大学材料学院无损检测研究室(116023)。