

# 互相关函数步长影响超声波评价 涂层应力的实验研究

Study on Influence of Calculating Length on Evaluation  
Result of Stress by Surface Acoustic Wave for Coating

刘 彬<sup>1,2</sup>, 董世运<sup>2</sup>, 徐滨士<sup>2</sup>, 何 鹏<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

LIU Bin<sup>1,2</sup>, DONG Shi yun<sup>2</sup>, XU Bin shi<sup>2</sup>, HE Peng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2 National Key

Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored

Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**摘要:** 以声弹效应理论为基础, 结合力学拉伸实验, 采用表面超声波法对涂层应力进行评价, 并在互相关函数法的基础上计算应力引起的信号间时间延迟。结果表明: 当涂层试样处于弹性变形范围内时, 随着应力的增加, 表面超声波在涂层中的传播速度逐渐变大, 而当拉伸应力达到一定值使得涂层内部出现微裂纹时, 随着应力的增加, 伴随着裂纹的扩展超声波波速会出现忽大忽小的变化; 互相关步长  $n$  值是影响互相关函数计算结果精度的重要因素, 随着  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟曲线逐渐趋向于线性, 而当  $n$  值达到 1 个周期时, 随着  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟曲线基本重合; 对拉伸应力-时间延迟曲线进行线性拟合。其互相关值与标准差的计算结果也表明, 当  $n$  值为 1 时, 拉伸应力-时间延迟曲线与理论分析结果最接近。

**关键词:** 残余应力; 表面超声波; 互相关函数; 时间延迟

中图分类号: TG115.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0054-04

**Abstract:** Based on the theory of acoustoelastic effect, using mechanical tensile experiment, the residual stress of coating was evaluated by the method of surface acoustic wave. The difference in time of flight among the ultrasonic signals caused by difference tensile stress is calculated on the base of cross-correlation function. The results show that when the tensile stress is less than elastic limit of coating, the velocity of surface acoustic wave is bigger and bigger with tensile stress increasing in coating, and when the tensile stress is bigger than a certain value, microcrack appears and expands gradually with the tensile stress increasing in coating, so the velocity of surface acoustic wave also changes correspondingly. The length of reference signal ( $n$ ) is a vital factor for calculating result of cross-correlation function. The tendency of tensile stress and difference in time of flight is prone to linear increasing with value of  $n$  increasing. And when the value of  $n$  attains one cycle, the calculating result between tensile stress and difference in time of flight is basic similar with tensile stress increasing. By calculating the evaluation parameter of linear fitting result, the result of fitting value of cross-correlation function and root-square error also show that when the length of reference signal is one cycle, the calculating result of cross-correlation function is optimal for the evaluation of tensile stress.

**Key words:** residual stress; surface acoustic wave; cross-correlation function; difference in time of flight

涂层技术是一种重要的现代表面处理技术和材料复合技术, 其中残余应力是影响涂层使用性能及其使用寿命的重要因素之一<sup>[1]</sup>, 因而涂层残余应力的评价

对保证涂层的质量性能就显得极为重要。目前, 涂层应力的评价方法主要有无损检测(如弯曲法<sup>[2]</sup>、钻孔法<sup>[3,4]</sup>等)和无损检测(如超声波法<sup>[5]</sup>、磁记忆法<sup>[6]</sup>等)

两大类,其中由于无损检测是在不破坏工件使用性能的基础上对其进行评价的,因而,在涂层残余应力评价领域得到广泛关注。超声波法是以材料声弹效应<sup>[7]</sup>为理论基础对应力进行评价的一种方法,由于它具有使用方便、安全及适用范围广等优点,因而得到众多学者的关注。根据声弹效应理论可知,超声波法是在建立应力-时间延迟曲线的基础上进而实现应力无损评价的一种方法。因而,不同应力时超声波信号间时间延迟的计算精度就成为保证超声波评价应力精度的重要因素。

目前,信号间时间延迟的计算方法较多,如阈值法、互相关函数法、小波分析法、基于分数低阶协方差法、互功率谱相位法等<sup>[8]</sup>,而由于它们的计算原理不同,因而其适用范围也有所不同。互相关函数法<sup>[9]</sup>是在对比分析波形相似程度的基础上计算信号间时间延迟的一种方法,由于它具有算法简单、抗白噪声干扰能力强等优点,因而在计算信号时间延迟领域得到广泛应用。为了实现超声波无损评价涂层应力,本实验结合力学拉伸实验,采用一收一发模式的表面超声波探头对涂层进行检测,并采用互相关函数法计算不同拉伸应力对应的超声波信号间的时间延迟,进而为超声波无损评价涂层应力提供参考依据。根据互相关函数计算时间延迟原理可知,由于实验信号均为离散信号,因而互相关步长,即参考函数长度,也就成为影响其计算结果精度的一个重要因素,因而如何选择最佳互相关步长对保证涂层应力评价结果就显得非常重要。针对这一问题,本实验计算并对比分析了不同相关步长时,涂层拉伸应力-时间差的计算结果,并在此基础上确定了最佳相关步长。最后,通过不同的拉伸载荷对理论分析结果进行了验证。

## 1 归一化互相关函数计算时间差原理<sup>[9]</sup>

“噪声”<sup>[10,11]</sup>是超声波检测信号中不可避免的干扰信号,因而假设两超声信号分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ ,其模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n_1(t) \\ y(t) = s(t - D) + n_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为不同  $t$  时刻的“噪声”;  $D$  为信号间时间延迟;  $s(t)$  为有用信号。

假定  $x(t)$  和  $y(t)$  间互相关函数为  $R_{xy}(\tau)$ ,则根据互相关函数定义有:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(t) y(t)] =$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{N-1} \{ [s(t) + n_1(t)] [s(t - D) + n_2(t)] \} = R_{ss}(\tau - D) + R_{sn_2} + R_{n_1s}(\tau - D) + R_{n_1n_2} \quad (2)$$

根据信号模型可知,  $R_{sn_2} = 0$ ,  $R_{n_1s}(\tau - D) = 0$  及  $R_{n_1n_2} = 0$ ,因而,由式(2)可知:

$$R_{xy}(\tau) = R_{ss}(\tau - D) \quad (3)$$

根据自相关函数定义可知,对于任意  $\tau$  值,总存在  $|R_{ss}(\tau - D)| \leq R_{ss}(0)$ ,即当  $\tau = D$  时,  $R_{xy}(\tau)$  达到最大值。而由互相关函数计算时间的基本原理可知,互相关函数最大值对应的时间即为两信号之间的时间延迟。但根据式(3)可知,  $R_{xy}(\tau)$  值与两信号本身的取值有关。因而,为了避免信号本身幅值对互相关函数值的影响,将互相关函数作归一化处理,并引入一无量纲函数——归一化互相关函数  $\rho_{xy}(\tau)$ ,对其进行离散化处理,得到离散后的互相关系数函数,如式(4)所示。通过计算式(4)的最大值,即可得到  $x(t)$  和  $y(t)$  之间的时间延迟。

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{n \sum_{t=1}^n x(t)y(t) - (\sum_{t=1}^n x(t))(\sum_{t=1}^n y(t))}{\sqrt{[n \sum_{t=1}^n x^2(t) - (\sum_{t=1}^n x(t))^2][n \sum_{t=1}^n y^2(t) - (\sum_{t=1}^n y(t))^2]}} \quad (4)$$

由式(4)可知,  $\rho_{xy}(\tau)$  值只与互相关步长  $n$  值以及  $x(t)$  和  $y(t)$  本身数值有关,而当待分析信号(即  $x(t)$  和  $y(t)$  数值固定不变)确定时,  $\rho_{xy}(\tau)$  值只由互相关步长  $n$  值决定。因而,本工作分析了互相关步长  $n$  值对互相关函数计算信号间时间延迟结果的影响,并在此基础上评价了互相关步长  $n$  值对涂层应力评价结果的影响,进而为超声波无损评价涂层应力提供参考依据。

## 2 结果及分析

针对涂层残余应力的超声波评价,结合力学拉伸实验,对涂层基体“复合件”进行实验研究。其中拉伸件尺寸按照国家标准进行加工,示意图如图1所示。

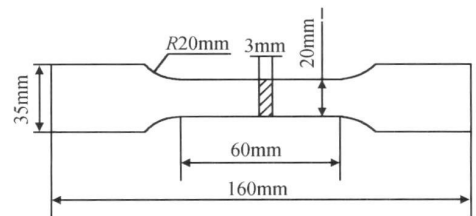


图1 拉伸试件示意图

Fig.1 Sketch of tensile sample

采用中心频率为 5 MHz 的表面超声波探头进行检测, 并采用电刷镀的方法在拉伸件表面制备出厚度为 0.32 mm 的快镍电刷镀层, 其电刷镀层表面超声波检测信号如图 2 所示。

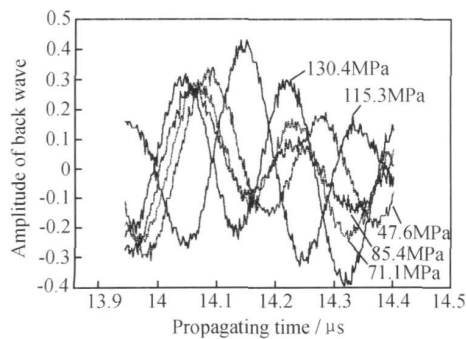


图 2 涂层表面超声波检测信号

Fig. 2 The surface acoustic wave testing signal of coating

图 2 是拉伸应力分别为 47.6、71.1、85.4、115.3 MPa 和 130.4 MPa 时表面超声波信号。根据图 2 可知, 当拉伸应力较小时, 随着拉伸应力的增加, 超声波逐渐向左移动, 而当拉伸应力达到一定值时随着拉伸应力的增加, 超声波信号会发生忽左忽右的“晃动”。而由于实验中检测声程是固定的, 这就说明当应力较小时, 随着应力的增加超声波在涂层中的传播速度逐渐变大, 而当应力达到一定值时, 再随着应力的增加, 超声波在涂层中的传播速度会发生忽大忽小的变化。对其分析认为, 当应力值较小时, 涂层试样仍处于弹性变形阶段, 因而, 随着应力的增加超声波波速逐渐变大, 而当应力达到一定值从而使得涂层在局部区域出现裂纹时, 随着应力的增加裂纹会逐渐扩展, 从而出现应力集中到应力释放再到应力集中这样的循环过程, 出现超声波波速忽大忽小的变化。在此基础上, 本实验以无应力时涂层超声波信号为参考函数, 计算其与不同应力时涂层超声波信号间的时间延迟, 进而建

立涂层拉伸应力-时间延迟的关系曲线。根据互相关函数计算信号间时间延迟原理可知, 互相关函数是在对比分析波形相似程度的基础上计算信号间时间延迟的, 而由于“噪声”的影响, 使得涂层超声波信号在幅值及波形上均发生无规则变化, 同时根据对影响互相关函数计算结果因素的分析, 本工作在互相关函数计算时间差的基础上, 计算并分析了互相关步长  $n$  值不同时, 涂层拉伸应力-时间延迟的关系曲线, 结果如图 3 所示。

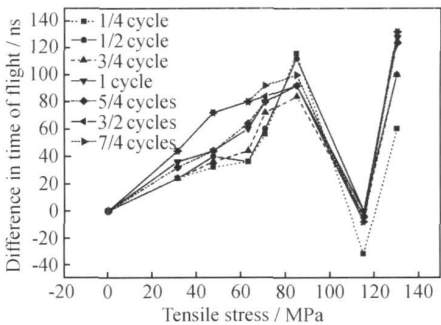


图 3 不同步长时拉伸应力与时间差关系曲线

Fig. 3 The curves of tensile strength and difference in time of flight with different length of reference signal

根据图 3 中曲线变化规律可知, 当拉伸应力较小时, 随着互相关函数步长  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟间的线性变化规律越来越明显, 当互相关步长等于 1 个周期时, 随着  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟曲线基本重合。而根据离散归一化互相关函数计算公式(式(4))可知,  $n$  值越大, 计算量越大, 因而本实验认为当互相关步长为 1 个周期时, 计算效果最合理。

为了验证互相关步长  $n$  值对涂层拉伸应力-时间延迟计算结果的理论分析, 在线性拟合的基础上, 分别计算了互相关步长  $n$  值不同时, 线性拟合结果的相关数值和标准差, 并在此基础上评价了线性拟合结果, 结果如图 4 所示。

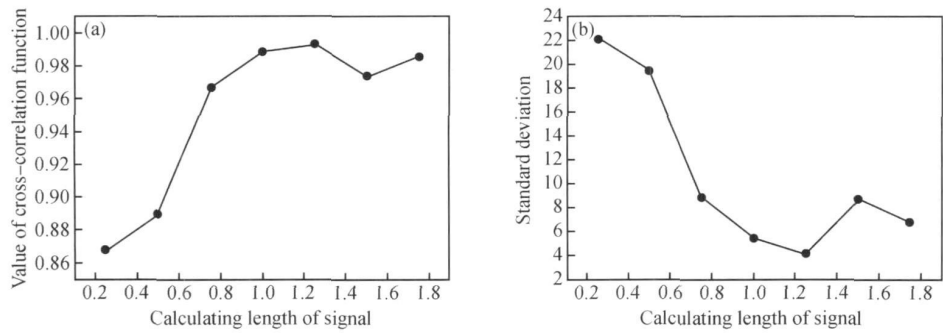


图 4 拟合数值(a)及标准差(b)与互相关步长的关系曲线

Fig. 4 The curves of fitting value (a) and root square error (b) with length of reference signal

图 4(a) 为互相关步长  $n$  值不同时, 线性拟合相关数值的变化曲线。根据其变化规律可知, 随着拟合互相关步长的增加, 其拟合相关数值也逐渐变大, 并且其增加速率也逐渐变大, 而当  $n$  值达到 1 时, 随着互相关步长  $n$  值的增加, 拟合相关数值会有所变小, 但其整体仍呈增加趋势。根据相关函数评价曲线间相似性原理可知, 相关数值越大, 拟合相似性也越大。因而, 这就说明随着互相关步长  $n$  值的增加, 拟合效果也就越佳, 即拉伸应力-时间延迟曲线越接近线性变化。图 4(b) 为互相关步长  $n$  值不同时, 拟合标准差的变化曲线。根据其变化规律可知, 随着拟合互相关步长  $n$  值的增加, 其拟合标准差逐渐变小, 而当互相关步长  $n$  值达到 1 时, 随着  $n$  值的增加, 拟合标准差有所增加, 但其仍呈下降趋势。根据标准差定义可知, 拟合标准差数值越小, 拟合效果越好, 即实际计算得到的拉伸应力-时间延迟曲线越趋向于线性变化。对拟合相关数值和标

准差变化规律分析认为, 由于涂层超声信号中存在大量“噪声”信号, 从而使得有用信号幅值发生无规律变化, 甚至其波形也会在一定程度上发生改变, 而由于互相关函数是在对比分析波形相似程度的基础上计算信号间时间延迟的, 因而, 当互相关步长  $n$  值较小时, 待分析信号中“噪声”对计算结果的影响较大, 而随着  $n$  值的增加, 待分析信号中的有用信号也逐渐变多, 而此时“噪声”对计算结果影响逐渐变小, 这就使得随着互相关步长  $n$  值的增加, 线性拟合相关数值逐渐变大, 而其标准差也就逐渐变小, 并逐渐趋于稳定。综合上述分析认为, 当互相关步长  $n$  值为 1 时, 采用互相关函数评价涂层应力-时间差曲线的效果最佳。

为了验证理论分析结果, 本实验在同一试样的基础上, 测试了拉伸应力为 39.4 MPa 时涂层超声波检测信号, 并采用互相关函数计算了该超声信号与参考信号间的时间延迟, 结果如图 5 所示。

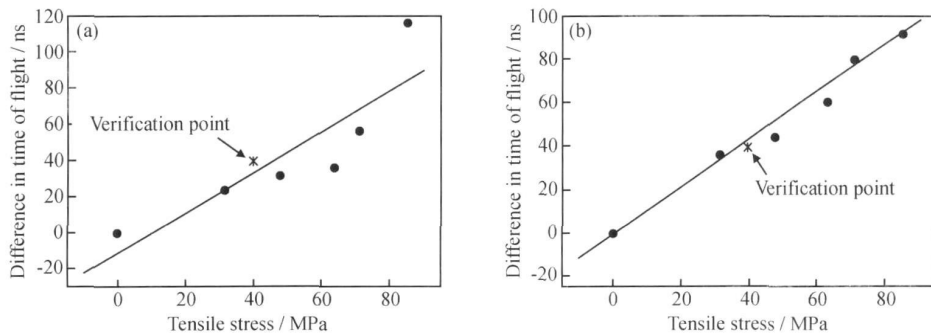


图 5 拉伸应力-时间差线性拟合结果 (a)  $n=0.25$ ; (b)  $n=1$

Fig. 5 The linear fitting results between tensile stress and difference in time of flight (a)  $n=0.25$ ; (b)  $n=1$

图 5(a) 和图 5(b) 分别为互相关步长  $n=0.25$  和  $n=1.0$  时拉伸应力-时间延迟结果及其线性拟合结果, 分别为  $y=1.12052x-11.80183$  和  $y=1.106416x-0.99509$ , 其中,  $x$  为拉伸应力,  $y$  为时间差。根据线性拟合结果可知, 当拉伸应力为 39.4 MPa 时, 其对应的超声波信号与参考信号间时间延迟分别为 32.3 ns 和 42.6 ns, 而互相关函数计算结果为 40 ns, 其相对误差分别为 19.3% 和 6.5%。因而本工作认为当互相关步长  $n$  值为 1 时, 根据互相关函数计算得到的拉伸应力-时间延迟曲线评价涂层应力精度较高, 且该方法是可行的。

### 3 结论

(1) 力学拉伸实验结果表明, 当拉伸应力小于涂层试样弹性极限时, 随着拉伸应力的增加, 表面超声波在涂层中的传播速度逐渐变大, 而当拉伸应力达到一定

值时, 由于涂层中微裂纹的扩展, 随着应力的增加表面超声波在涂层中的传播速度会发生忽大忽小的变化。

(2) 采用互相关函数计算信号间时间延迟时, 互相关步长  $n$  值不同, 计算结果也不同。结果表明, 当拉伸应力小于涂层试样的弹性极限时, 随着互相关步长  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟关系呈线性变化的趋势越加明显, 而当  $n$  值达到 1 时, 随着步长  $n$  值的增加, 拉伸应力-时间延迟计算结果基本相同。

(3) 综合分析认为, 在互相关函数的基础上计算不同应力状态的超声波信号间的时间延迟时, 其参考函数步长为 1 个周期时, 涂层应力评价结果最佳。

### 参考文献

- [1] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 186-226.
- [2] 马维, 潘文霞. 热喷涂涂层中残余应力分析和检测研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 41-56.

(下转第 70 页)

性。因而高温回火使双相钢的屈服强度显著增加,且出现屈服平台。同时,高温回火过程中,作为强化相的马氏体显著分解、碳化物析出、马氏体晶格畸变减小,应力状态发生改变,硬度与强度均会下降,马氏体的弱化也减小了对铁素体的变形阻碍,因而双相钢的抗拉强度也会相应降低。

## 4 结论

(1) 随马氏体体积分数从 0% 增加到约 15%, 双相钢的屈服强度显著降低, 降低值约为 80~100MPa。马氏体体积分数在 15%~35% 之间, 双相钢的屈服强度维持在一个较低的水平。马氏体体积分数大于 35%, 双相钢屈服强度急剧上升。当马氏体体积分数超过 10%, 双相钢表现为连续屈服。随回火温度从 200℃ 升高到 400℃, 双相钢的屈服强度单调增加。回火温度大于 300℃, 双相钢重新出现物理屈服平台。

(2) 马氏体相变体积膨胀而在铁素体中诱发的高密度可动位错与残留应力是双相钢低屈服与连续屈服的主要原因。在两相区高温退火后的快速冷却过程中, 铁素体中溶解的碳、氮化物来不及重新析出以钉扎位错, 自由位错在较低的外加应力下便可以开动, 同时, 由于与残留应力的叠加, 因此使双相钢发生屈服的外加应力较低, 且表现出连续屈服。

(3) 如果双相钢马氏体含量不足, 铁素体中的可动位错密度也相应降低, 因而双相钢的屈服强度上升。当马氏体体积分数过度增加以至马氏体成为双相钢中的主导相, 则马氏体对屈服强度的影响将增大, 因而双相钢的屈服强度将会增加。回火导致铁素体中位错密度降低, 细小沉淀物析出及马氏体的分解, 因而导致双相钢屈

服强度的增加、抗拉强度减小, 且出现物理屈服平台。

## 参考文献

- [1] BHATTACHARYA D. Developments in advanced high strength steels [A]. The Joint International Conference of HSLA Steels 2005 and ISU GS 2005 proceedings [C]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2005. 70-73.
- [2] ROCHA R O, MELO T M F, PERELOMA E V, et al. Microstructure evolution at the initial stages of continuous annealing of cold rolled dual phase steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391(1-2): 296-304.
- [3] ERDOGAN M. Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steel [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(5): 501-506.
- [4] ERDOGAN M, TEKELI S. The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface carburized AISI 8620 steel with a dual phase core microstructure [J]. Materials Characterization, 2002, 49(5): 445-454.
- [5] 蒋俊华, 李俊, 胡文彬. 超高强度低碳 Si-Mn 冷轧双相钢的回火组织和力学性能研究 [J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 14-17.
- [6] 花礼先, 王绪. 连续退火冷轧双相钢板的屈服点延伸 [J]. 北京科技大学学报, 1993, 15(2): 155-158.
- [7] 徐祖耀. 马氏体相变和马氏体 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 87.
- [8] 马鸣图, 吴宝榕. 双相钢——物理和力学冶金 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [9] 张丙, 冯锋, 万晓景. 低碳合金双相钢低温时效机理探讨 [J]. 金属热处理学报, 1994, 15(2): 7-12.

基金项目: 国家 863 资助项目 (2009AA03Z518)

收稿日期: 2010-03-16; 修订日期: 2010-12-28

作者简介: 朱国明 (1974-), 男, 博士, 从事材料加工过程仿真分析及应用, 联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院 (100083), E-mail: zhuguoming345@yahoo.com.cn

(上接第 57 页)

- [3] 李朝弟, 王克鹏. 表面涂层材料的残余应力测量技术 [J]. 力学与实践, 1996, 18(4): 43-45.
- [4] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起. 平面磨削残余应力的测试方法 [J]. 机械制造, 2003, 41(461): 35-37.
- [5] 王彦龙. 残余应力的超声波检测研究 [D]. 西安: 西安科技大学硕士论文, 2005.
- [6] SHI Chang liang, DONG Shi yun, XU Biir shi, et al. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferror magnetic steel under dynamic tension load [J]. NDT & E International, 2010, 43(1): 8-12.
- [7] 西拉德. 超声检测新技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 45-46.
- [8] 李丽芳, 刘庆华. 脉冲噪声下的时间延迟估计方法研究 [J]. 电声技术, 2008, 32(8): 57-59.
- [9] 吴正毅. 测试技术与测试信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

- [10] FEDIM. Localized denoising filtering using the wavelet transform [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(9): 1463-1469.
- [11] PEROV D V, RINKEVICH A B. Wavelet filtering of signals from ultrasonic flaw detector [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2002, 38(12): 869-882.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50975287)

收稿日期: 2010-04-07; 修订日期: 2010-12-05

作者简介: 刘彬 (1983-), 男, 博士研究生, 目前主要从事材料无损检测及质量评估, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号装备再制造国防科技重点实验室 (100072), E-mail: liubindely@163.com  
通讯作者: 何鹏 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为钎焊及扩散焊, E-mail: hepeng@hit.edu.cn