DOI: 10.3901/JME.2019.12.044

基于声压反射系数幅度谱特征的涂层脱粘 超声 C 扫描成像检测研究*

孙珞茗 林 莉 马志远

(大连理工大学无损检测研究所 大连 116024)

摘要: 涂层脱粘常采用超声 C 扫描成像技术进行定量检测,但涂层厚度过小或探头频率较低均可使顺序界面回波混叠而无法直接采用 C 扫描方法有效表征脱粘。基于声压反射系数幅度谱特征,通过分析幅度谱极值与谐振频率随粘结界面反射系数的变化规律,提取幅值波动范围、谐振频率阶数两个幅度谱特征重构 C 扫描图像。采用该方法对厚度 0.3 mm 环氧树脂基涂层/5 mm 铝板构成的含 10×10 mm 界面脱粘试样进行定量表征,重构 C 扫描图像定量的脱粘尺寸相对误差分别为 4.9%和 1.0%。该技术可以克服传统超声 C 扫描成像的局限性,提高涂层脱粘尺寸定量精度。

关键词: 涂层; 界面脱粘; 超声 C 扫描成像; 幅度谱; 谐振频率

中图分类号: TG156

Measurement of the Coatings Debonding Using Ultrasonic C-scan Imaging Based on Reflection Coefficient Amplitude Spectrum Characterizations

SUN Luoming LIN Li MA Zhiyuan

(NDT&E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Conventional ultrasonic C-scan imaging is suitable for quantitatively determining the debonding of engineering components. However, this method using low-frequency transducer fails to detect the thin coatings due to the overlap of the echoes from the sequential coating surfaces. A new ultrasonic C-scan imaging method based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum (URCAS) is proposed for determining the coating debonding. The URCAS extremum and resonant frequency dependence of the reflection coefficient at the debonding interface between coating and substrate is investigated. Two URCAS characters: amplitude fluctuation ΔR and resonant frequency order n are extracted to reconstruct the C-scan images. An ultrasonic experiment is conducted on an epoxy coating specimen with the thickness of 0.3 mm. A debonding with a size of 10 mm×10 mm is embedded between the epoxy and aluminum substrate. The measured relative error of the debonding area through the C-scan images reconstructed by ΔR and n are 4.9% and 1.0%, respectively. The proposed ultrasonic method is valid for nondestructive characterization of the debonding of the coatings.

Key words: coatings; interface debonding; ultrasonic C-scan imaging; amplitude spectrum; resonant frequency

0 前言

涂层技术将性能更优良的薄层材料涂覆在基体表面来强化整体隔热、耐磨、抗氧化以及吸波等性能^[1-2],涂层/基体界面脱粘会导致工件综合性能降低、过早老化失效,威胁其可靠性与使用寿命^[3]。因此,发展一种有效的涂层部件脱粘缺陷无损表征方法具有重要意义。

超声 C 扫描成像通过获取回波幅值信息来反映界面结合质量,从而广泛应用于涂层部件脱粘检测中。航空航天用涂层厚度大都在几十到几百微米范围,引起涂层顺序界面超声回波混叠,导致幅值信息难以获取^[4]。大量研究采用具有高时域分辨力的高频探头解决混叠问题,如 ALIG 等^[5]应用 150 MHz 探头对厚度 50 μm 聚氨酯/铁基试样进行超声扫描成像,观察不同风化腐蚀时间隐藏脱粘缺陷大小、分布的变化。徐春广等^[6]使用高频率(10 MHz~2 GHz)探头检测,将时域可分的界面回波借助 FFT 分解,提取频域幅值最大值重构 C 扫描图像,但高

* 国家自然科学基金资助项目(51675083, 51805072)。20181127 收到初稿,20190109 收到修改稿

频率探头通常由于衰减较大, 导致信噪比较差。也有研究通过频谱分析获得声压反射系数谱特征识别涂层部件脱粘缺陷, 如 LIU^[7]采用标称频率 2.5 MHz 探头, 根据超声波在层状结构中共振频率 f_0 与层间厚度 d 的关系 $f_0=c/2d$, 提取幅度谱幅值最高谱峰处频率的特征表征厚度 6 mm 复合材料内分层缺陷深度具有很好的定量效果, 该方法借助幅度谱表征脱粘纵向位置, 尚不能对脱粘尺寸进行定量。PEI 等^[8]采用频率 3.1 MHz 电磁超声激励长脉冲, 提取频谱峰值特征对厚度 3.0 mm 与 2.0 mm 人工粘合 Al 板试样进行超声 C 扫描成像, 图像脱粘区信噪比显著优于传统 C 扫描图像, 该方法验证了频谱分析技术在解决涂层脱粘 C 扫描成像问题上的可行性。

为解决上述问题, 一种基于声压反射系数幅度谱特征的涂层脱粘超声 C 扫描成像检测方法被提出。通过分析声压反射系数幅度谱幅值波动范围、谐振频率阶数与粘结界面声阻抗匹配关系, 提取这两个特征在混叠信号中获取脱粘信息并重构 C 扫描图像, 提高定量表征脱粘尺寸的精度, 最后通过试验验证该方法的可行性。

1 理论基础

声压反射系数幅度谱是解决超声表征薄层结构混叠问题的常用手段, 当超声波垂直入射耦合介质 1/涂层 2/基体 3 构成的三介质二界面结构时, 其表达式为^[9-11]

$$R(f) = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} = \left[\frac{(r_{12} + r_{23} \exp(-2\alpha d))^2 - 4r_{12}r_{23} \exp(-2\alpha d) \sin^2\left(\frac{2\pi f d}{c}\right)}{(1 + r_{12}r_{23} \exp(-2\alpha d))^2 - 4r_{12}r_{23} \exp(-2\alpha d) \sin^2\left(\frac{2\pi f d}{c}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, r_{12} 与 r_{23} 分别为两界面的声压反射系数, $r_{ij} = (Z_j - Z_i) / (Z_j + Z_i)$ 且 $r_{ij} \in [-1, 1]$, α 为涂层衰减系数, d 为涂层厚度, c 为超声波在介质中传播的纵波声速, f 为谐振频率。当式(1)的频率满足^[12-15] $f_n = nc/4d$ (n 为自然数), 幅度谱幅值在对应频率处产生极值。其中, f_n 和 n 分别为谐振频率和其对应的阶数。 $R(f)$ 的极大值和极小值表达式如下

$$\begin{cases} R(f)_{\min} = \frac{r_{12} - r_{23} \exp[-2\alpha(f)d]}{1 - r_{12}r_{23} \exp[-2\alpha(f)d]} \\ R(f)_{\max} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp[-2\alpha(f)d]}{1 + r_{12}r_{23} \exp[-2\alpha(f)d]} \end{cases} \quad (2)$$

当涂层中的衰减系数 α 值极小, 且涂层厚度 d 为微量级, 则式(2)中 $\exp[-2\alpha(f)d] \approx 1$ 。将 $R(f)_{\max}$ 与 $R(f)_{\min}$ 作差得到 ΔR , 定义其为幅度谱幅值波动范围, 表达式为

$$\Delta R = R(f)_{\max} - R(f)_{\min} = \frac{2r_{23}(1 - r_{12}^2)}{1 - r_{12}^2 r_{23}^2} = f(r_{23}) \quad (3)$$

若涂层粘结界面质量发生变化, 如由粘合良好变为脱粘时, Z_3 突变导致 r_{23} 变化进一步影响 ΔR 。为讨论 ΔR 的单调性和奇偶性, 将 ΔR 对 r_{23} 求导。求得其导数 $\Delta R'$ 的表达式为

$$\Delta R' = \frac{1 - r_{12}^2}{(1 + r_{12}r_{23})^2} - \frac{r_{12}^2 - 1}{(1 - r_{12}r_{23})^2} = f'(r_{23}) \quad (4)$$

观察式(4), 发现 $f(r_{23}) \geq 0$ 在 $r_{23} \in [-1, 1]$ 上恒成立, $f(r_{23}) = -f(-r_{23})$ 且 $f(0)=0$, 可知 ΔR 在声压反射系数 r_{23} 有意义的范围内单调递增, 且图像关于原点成中心对称, 见图 1。图像表明, ΔR 随着界面声阻抗 r_{23} 单调变化, 由于 r_{23} 与界面粘结状态直接相关, 因此采用 ΔR 可表征界面粘接质量。据此提取 ΔR 为频域重构 C 扫描图像的幅度谱特征 1。

图 1 ΔR 与 r_{23} 之间的函数曲线

任意相邻两个极大值或者极小值对应谐振频率的差值定义为谐振频率间隔 Δf , 表达式为

$$\Delta f = f_{n+2} - f_n = c/2d \quad (5)$$

对 $Z_1 < Z_2 < Z_3$ 与 $Z_1 < Z_2$ 且 $Z_3' < Z_2$ 两种声阻抗匹配情况对应的幅度谱进行讨论, 可以发现如下^[3]。

(1) 如果涂层中未出现脱粘, 即 $Z_1 < Z_2 < Z_3$, 随着 f 的增加, 幅度谱 $R(f)$ 最先出现极小值, 随后出现极大值, 即极小值对应奇数阶 f_n , 极大值对应偶数阶 f_n 。

(2) 如果涂层中出现脱粘, 声阻抗匹配关系变为 $Z_1 < Z_2$ 、 $Z_3' < Z_2$, 随着 f 的增加, 幅度谱 $R(f)$ 极值出现规律与(1)相反, 即极小值对应偶数阶 f_n' 极大值对应奇数阶 f_n 。

鉴于以上所述, 幅度谱中脱粘与粘结良好处第

n 个极大(小)值频率位置相差 $\Delta f/2$ 。但 f_n 与谐振频率阶数 n 和厚度 d 两个变量相关, 为控制变量唯一, 规避厚度 d 在 f_n 表征脱粘过程中的影响, 据此提取谐振频率阶数 $n=2f_n/\Delta f$ 为频域重构 C 扫描图像的幅度谱特征 2。

2 涂层界面脱粘超声 C 扫描成像试验

2.1 试验样品

试验采用含脱粘缺陷的环氧树脂涂层试样, 使用厚度 5 mm 的铝薄板作为金属基体, 在金属基体上涂覆 10 mm×10 mm 的超薄脱模剂作为脱粘区域, 再整体喷涂环氧树脂覆盖表面。其中涂层、铝基体、水、空气的声学参数和密度如表 1 所示, 铝基体、涂层的声速由水浸脉冲反射回波法测得, 密度采用阿基米德法测得, 声阻抗由公式 $Z=\rho c$ 计算得到。

表 1 材料声学参数及厚度

材料种类	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	声速 $c/(\text{m}/\text{s})$	声阻抗 $Z/(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$
水	1.0	1 500	1 500
环氧树脂涂层	1.5	2 050	3 075
空气	0	340	0
铝基体	2.7	6 300	17 010

2.2 试验仪器与参数

试验采用 SM-J3B-300 水浸超声 C 扫描检测系统, 由数字操作设备与三维步进装置构成。选择 Olympus V382(标称 7.5 MHz)/V320(标称 3.5 MHz) 脉冲水浸聚焦探头进行发射和接收信号, 该检测系统可将所有扫描位置的超声回波数据采集、导入到计算机中。图 2a、2b 分别给出标称 7.5 MHz 与 3.5 MHz 探头的始发脉冲时域波形。

计算获得它们的脉冲持续时间分别为 0.36 μs 与 0.69 μs , 表明标称 7.5 MHz 探头在时域比 3.5 MHz 具有更高的分辨力。

图 2 不同标称频率探头始发脉冲波形

图 3a、3b 分别给出了 2 个探头的始发脉冲幅度谱。通过 -6 dB 法^[16]分析得到有效频带分别为 4.02~9.15 MHz 与 2.02~4.95 MHz。

图 3 不同标称频率探头的始发脉冲幅度谱

2.3 试验结果及分析

试验采用传统超声 C 扫描方法, 设置一定宽度闸门获取闸门回波幅值的最大值。

标称 7.5 MHz 探头检测的涂层表面回波与界面回波时域可分, 闸门覆盖单一涂层/基体界面回波, 见图 4a。标称 3.5 MHz 探头检测的表面回波与界面回波混叠, 闸门覆盖范围包含有界面信息的混叠回波, 见图 4b。

图 4 不同标称频率探头闸门设置

标称 7.5 MHz 探头超声 C 扫描成像结果见图 5。从表 1 可知, 样品粘结良好处声阻抗关系满足: $Z_1 < Z_2 < Z_3$ 。试验过程中, 幅值最高增益设置为满屏的 80%, 则实测声压反射率大小为 $|r_{23}| \times 0.8 = 0.55$; 若发生脱粘, 声阻抗关系变为 $Z_1 < Z_2$ 、 $Z_3 < Z_2$, 同理得 $|r_{23}| \times 0.8 = 0.8$ 。该规律与图 5 一致, 故可判定幅值大于 0.68 的区域为涂层的脱粘区域。使用 Adobe PS 对区域进行尺寸定量, 在 x 、 y 方向上各随机选择三条线段测定其像素点的数量, 每个像素点的长、宽均为 0.2 mm。求平均得到脱粘尺寸: $l = 9.60$ mm, $w = 8.93$ mm, $S = 85.72$ mm², 误差 $\delta = 14.3\%$ 。

图 5 标称频率 7.5 MHz 探头超声 C 扫描时域成像结果

3 幅度谱特征提取与 C 扫描图像重构

标称 3.5 MHz 探头超声 C 扫描成像结果见图 6, 由于无法显示脱粘区域, 采集扫描区域共 5 200 组 A 扫描信号提取频域特征用于重构成像。

图 6 标称频率 3.5 MHz 探头超声 C 扫描时域成像结果

3.1 幅度谱特征与 C 扫描图像重构结果

3.1.1 幅值波动范围的 C 扫描图像重构

将采集的所有 A 扫描信号处理得归一化幅度谱, 见图 7a。将有效频带范围内所有极大值和极小值分别求平均再作差, 得 ΔR 并进行归一化重构 C 扫描图像, 见图 7b。由理论分析可知, 若涂层发生脱粘, r_{23} 由 0.69 变为 -1.0, 引起归一化 ΔR 由 0.68 变为 1.0。测定幅值大于 0.84 的区域尺寸为 9.7 mm $\times$ 9.8 mm, $S = 95.06$ mm², 定量相对误差为 4.9%。

图 7 归一化幅度谱与 ΔR 重构 C 扫描图像

3.1.2 谐振频率阶数 n 的 C 扫描图像重构

幅度谱中谐振频率的阶数与极值出现规律存在对应关系。就这篇文章所用涂层材料而言, 偶数阶 f_n 对应极大值, 奇数阶 f_n 对应极小值。

图 8 谐振频率阶数 $2 \times f_n / \Delta f$ 重构 C 扫描图像

若涂层发生脱粘, 结果则相反。消除厚度对 f_n 的影响, 提取有效频带内第 1 极大值对应的谐振频率与 Δf 作比值, 将结果扩大 2 倍的谐振频率阶数只能近似为自然数 1, 2, ..., 将该特征重构 C 扫描图像, 见图 8。由原理分析可知, 奇数阶谐振频率对应脱粘位置 ($Z_1 < Z_2$ 、 $Z_3' < Z_2$), 偶数阶谐振频率对应粘结好位置 ($Z_1 < Z_2 < Z_3$)。测定奇数阶谐振频率对应区域的尺寸为 $9.9 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$, $S = 99.00 \text{ mm}^2$, 定量相对误差为 1.0%。

3.2 分析及讨论

基于幅度谱特征重构 C 扫描图像解决了上述混叠信号无法使用传统超声 C 扫描方法成像的问题。标称 3.5 MHz 探头超声 C 扫描图像无法清晰分辨脱粘缺陷, 但通过以上 ΔR 和 $2 \times f_n / \Delta f$ 两个幅度谱特征重构 C 扫描图像却有很大改观。相比于标称 7.5 MHz 探头超声 C 扫描图像结果, 使用标称 3.5 MHz 探头频域重构 C 扫描图像可以获得更低的脱粘尺寸定量相对误差。对比两种特征的提取原则可知, 该方法检测涂层脱粘的适用范围如下。

(1) 幅值波动范围 ΔR 特征重构 C 扫描图像适用范围较广。若涂层/基体界面毗邻介质阻抗发生变化, 则幅度谱的极大、极小值均发生变化, 该变化可通过特征 ΔR 体现。故而, 该特征适用于大多数金属、非金属涂层, 即涂层与基体声阻抗匹配关系对其影响较小。

(2) 谐振频率阶数 $n = 2 \times f_n / \Delta f$ 特征重构 C 扫描图像, 仅适用于涂层声阻抗小于基体的情况(如大多数热障涂层、吸波涂层、耐磨涂层)。若涂层声阻抗大于基体(如金属涂层), 粘结良好与脱粘位置对应阻抗匹配关系一致, 该特征则不可行。

4 结论

一种基于声压反射系数幅度谱特征的涂层脱粘超声 C 扫描成像检测方法被提出, 结论如下。

(1) 粘接界面毗邻介质声阻抗发生变化, 即界面由粘接良好变为脱粘时, r_{23} 由 0.69 变为 -1.0, 引起归一化 ΔR 由 0.68 变为 1.0, 该规律适用于所有涂层; 界面由粘接良好变为脱粘时, 幅度谱极值出现规律相反, 脱粘与粘接良好处第 n 个极大(小)值出现阶数相差 1, 该规律仅适用于涂层声阻抗大于基体的情况。

(2) 标称 3.5 MHz 探头无法对 0.3 mm 环氧树脂基涂层进行超声 C 扫描时域成像, 提取幅值波动范围 ΔR 、谐振频率阶数 n 两个幅度谱成像特征, 重构 C 扫描图像定量的脱粘尺寸定量相对误差分别为 4.9%、1.0%。

参 考 文 献

- [1] BULL S J, BERASETEGUI E G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing[J]. Tribology International, 2006, 39(2): 99-114.
- [2] 赵扬, 马志远, 陈建伟, 等. 热障涂层失效的无损检测与评价研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(6): 494-500.
ZHAO Yang, MA Zhiyuan, CHEN Jianwei, et al. Research progress on nondestructive testing of TBC failure[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(6): 494-500.
- [3] PETER M, LEYENS C, SCHULZ U, et al. EB-PVD thermal barrier coatings for aeroengines and gas turbines[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(4): 193-204.
- [4] MA Zhiyuan, ZHAO Yang, LUO Zhongbing, et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum[J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1005-1009.
- [5] ALIG I, TADJBACH S, KRÜGER P, et al. Characterization of coating systems by scanning acoustic microscopy: Debonding, blistering and surface topology[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64(2-3): 112-119.
- [6] 徐春广, 刘中柱, 门伯龙, 等. 超声扫描显微镜的频域成像方法[P]. 中国, CN201110288310.4, 2013-04-03.
XU Chunguang, LIU Zhongzhu, MEN Bolong, et al. A frequency imaging method for ultrasonic scanning microscopy[P]. China, CN 201110288310.4, 2013-04-03.

- [7] LIU Zhenqing. Application of acousto-ultrasonic nondestructive evaluation for interlaminar bond quality in filament-wound fiber reinforced composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(2): 58-63.
- [8] LIU Tianhao, PEI Cuixiang, CHENG Xin, et al. Adhesive debonding inspection with a small EMAT in resonant mode[J]. NDT & E International, 2018, 98: 110-116.
- [9] ZHAO Yang, LI Ximeng, LIN Li, et al. Measurements of coating density using ultrasonic reflection coefficient phase spectrum[J]. Ultrasonics, 2011, 51(5): 596-601.
- [10] HAINES N F, BELL J C, MCINTYRE P J. The application of broadband ultrasonic spectroscopy to the study of layered media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 64(6): 1645-1651.
- [11] 张伟, 马志远, 赫丽华, 等. 基于声压反射系数幅度谱匹配分析的薄层厚度和超声纵波声速双参数反演[J]. 材料工程, 2016, 44(10): 74-79.
- ZHANG Wei, MA Zhiyuan, HE Lihua, et al. Simultaneous inversion of Thickness and ultrasonic longitudinal velocity for thin layered structure based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum matching analysis[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(10): 74-79.
- [12] ZHAO Yang, LIN Li, LI Ximeng, et al. Simultaneous determination of the coating thickness and its longitudinal velocity by ultrasonic nondestructive method[J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2010, (7): 579-585.
- [13] MA Zhiyuan, ZHANG Wei, DU Pengcheng, et al. Nondestructive measurement of elastic modulus for thermally sprayed WC-Ni coatings based on acoustic wave mode conversion by small angle incidence[J]. NDT&E International, 2017, 94: 38-46.
- [14] MA Zhiyuan, LUO Zhongbing, LIN Li, et al. Quantitative characterization of the interfacial roughness and thickness of inhomogeneous coatings based on ultrasonic reflection coefficient phase spectrum[J]. NDT&E International, 2019, 102: 16-25.
- [15] 张伟, 马志远, 高剑英, 等. 考虑孔隙细观特征的热障涂层脱粘缺陷超声检测数值模拟[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 115-121.
- ZHANG Wei, MA Zhiyuan, GAO Jianying, et al. Ultrasonic testing numerical simulation of debonding defect in thermal barrier coatings considering Void microscopic parameters[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 115-121.
- [16] 林莉, 李喜孟. 超声波频谱分析技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- LIN Li, LI Ximeng. Ultrasonic spectrum analysis technology and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

作者简介: 孙珞茗, 男, 1996 年出生。主要研究方向为材料超声无损检测、超声 C 扫描成像。

E-mail: slm_dlut@qq.com

马志远(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为材料超声无损检测、激光超声。

E-mail: zhiyma@dlut.edu.cn