

DOI: 10.11973/wsjc201810009

# 基于声压反射系数相位谱的涂层密度和纵波声速双参数反演

高剑英<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 马志远<sup>1</sup>, 赫丽华<sup>2</sup>, 罗文<sup>2</sup>, 林莉<sup>1</sup>, 雷明凯<sup>1</sup>

(1.大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024;

2.中国航空发动机集团 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 提出一种基于声阻抗测量,采用相关系数法对涂层的声压反射系数相位谱二元非线性方程进行双参数反演,同时确定涂层密度和纵波声速的方法。采用超声脉冲回波法,采集厚度为1.929 mm铝板和厚度为0.2~0.5 mm、掺杂质量百分比30%~50%铁粉的环氧树脂涂层的超声回波信号,在有效频带范围内采用相关系数法对试样理论和试验声压反射系数相位谱进行匹配分析,利用声阻抗条件约束相关系数矩阵,约束后的相关系数矩阵最大值对应的密度和纵波声速即为涂层的最优秀征结果,纵波声速和密度的反演误差均在±3.2%以内。

**关键词:** 涂层; 声压反射系数相位谱; 密度; 纵波声速; 反演

中图分类号: TG115.28; TB52

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2018)10-0039-06

## Simultaneous Inversion of Density and Longitudinal Wave Velocity of Coatings Based on Ultrasonic Reflection Coefficient Phase Spectrum Matching Analysis

GAO Jianying<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, MA Zhiyuan<sup>1</sup>, HE Lihua<sup>2</sup>, LUO Wen<sup>2</sup>, LIN Li<sup>1</sup>, LEI Mingkai<sup>1</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.Beijing Institute of Aeronautic Materials, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China)

**Abstract:** An inversion method based on ultrasonic reflection coefficient phase spectrum (URCPS) combined with acoustic impedance constraint was proposed to simultaneously measure density and longitudinal wave velocity of thin coatings. Ultrasonic pulse echo method was employed on aluminum alloy plate with thickness of 1.929 mm and epoxy resin coatings containing 30%—50% iron powder with thickness between 0.2—0.5 mm to obtain ultrasonic signals. Then an inverse algorithm based on the correlation coefficient method was introduced to retrieve the density and longitudinal wave velocity by comparing the theoretical and experimental URCPS and searching maximum in correlation coefficient matrix constrained by acoustic impedance measured by ultrasonic method. The relative errors of the retrieved density and longitudinal wave velocity were less than ±3.2%.

**Key words:** coating; ultrasonic reflection coefficient phase spectrum; density; longitudinal wave velocity; inversion

涂层技术是指利用物理、化学等方法在材料表面

收稿日期:2018-03-31

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51675083);国家自然科学基金重点项目(U1508218)

作者简介:高剑英(1993—),男,硕士研究生,主要从事材料无损检测与评价工作

通信作者:林莉(1970—),女,教授,博士,研究方向为材料无损检测与评价, linli@dlut.edu.cn

制备一层不同于基体材料且具有一定厚度和一定强化、防护或特殊功能的覆盖<sup>[1-2]</sup>,是提高零件性能或赋予零件特殊功能的有效措施。涂层的性能和可靠性取决于其特殊的几何特征与物理特性,包括厚度、界面粗糙度、声速、密度、弹性模量等参数。如密度、厚度适当的吸波涂层才能拓宽和加强零件的吸波性能<sup>[3]</sup>。涂层质量受工艺操作的影响极大,提出准确可靠的涂层几何特征和物理特性无损表征和评定方法

对表面涂层乃至整个零件性能完整性的控制具有重要意义,这已经成为该领域的迫切工程需求。

超声检测由于其适用范围广、检测灵敏度高、成本低和适用于现场检测等优点,广泛应用于涂层结构的无损检测与评价中,其中对涂层的超声检测主要利用激光超声<sup>[4-5]</sup>、超声显微镜<sup>[6-8]</sup>和超声脉冲回波法三种方法。激光超声、超声显微镜方法局限于实验室条件,难以应用于现场检测;超声脉冲回波法适用范围更广,设备较为简便,适用于工程实际检测。20世纪60年代前苏联物理学家BREKHOVSKIKH<sup>[9]</sup>系统地研究了层状介质中的声波传播,提出了声压反射系数相位谱(Ultrasonic Reflection Coefficient Phase Spectrum, URCPS)和幅度谱(Ultrasonic Reflection Coefficient Amplitude Spectrum, URCAS),为超声表征层状介质提供了理论依据;KINRA等<sup>[10]</sup>利用超声传递函数相位谱和幅度谱对铝薄板和Plexiglas(树脂玻璃)的厚度、声速、密度和声衰减系数分别进行了反演计算,得到的厚度、声速结果的误差小于4%,密度的误差小于11%,声衰减的误差不超过13%。以上研究局限于单参数反演,难以实现工程实际涂层参数的准确检测。赵扬等<sup>[11-17]</sup>利用URCAS和URCPS对热障、耐磨、吸波等涂层的声速、厚度、密度、弹性模量以及界面缺陷等参数进行了测量,发展出了适用于工程实际涂层声速、厚度双参数反演方法。

在已有研究的基础上,笔者发展了一种基于声阻抗测量,采用相关系数法对涂层的声压反射系数相位谱二元非线性方程进行双参数反演的方法,解决了声压反射系数谱对密度灵敏度低的问题。文中将涂层参数反演问题转换为优化问题,分析了相位谱对涂层参数的灵敏度,优化检测频率,采用脉冲回波法对涂层试样进行检测,在频域内测量涂层的声阻抗,随后在有效频带范围内对涂层试样理论和试验声压反射系数相位谱进行匹配分析,计算出声阻抗条件约束的相关系数矩阵,实现涂层密度和声速同时反演。

## 1 原理

### 1.1 声压反射系数相位谱目标函数构造

超声在涂层结构的界面处发生反射和透射,涂层的声压反射系数或透射系数可用来描述涂层的材料特性和几何特征<sup>[13-19]</sup>。图1给出了超声垂直入射到薄层介质中的传播模型,该模型假设薄层结构为

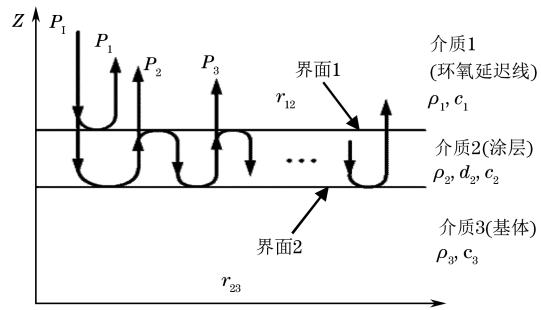


图1 超声垂直入射到层状界面的传播模型

均质、界面平直的层状结构。介质1为耦合介质,将探头的声能耦合到待测样品中,介质2为涂层,介质3为基体。选取表面回波 $P_1$ 与界面回波 $P_2$ 计算声压反射系数 $R$ ,表达式为

$$R = (P_1 + P_2)/P_1 = \{r_{12} + r_{12}r_{23}t_{21}\exp(-2\alpha d) \times [\cos(4\pi f d/c_2) + i \sin(4\pi f d/c_2)]\}/r_{12} \quad (1)$$

式中: $r_{12}$ 和 $r_{23}$ 分别为延迟块/涂层界面和涂层/基体界面的声压反射系数; $\alpha$ 为涂层的衰减系数; $d$ 为涂层的厚度; $c_2$ 为涂层的声速; $f$ 为检测频率。涂层的声压反射系数 $R$ 是复数,其模与相位随频率的变化分别为幅度谱和相位谱。

在单层涂层中相位谱表达式为

$$\phi(f) = \arctan\{r_{23}\exp(-2\alpha d)(1 - r_{12}^2)\sin(4\pi f d/c_2)/[r_{12} + r_{23}\exp(-2\alpha d)(1 - r_{12}^2)\cos(4\pi f d/c_2)]\} \quad (2)$$

实际涂层中,由于制备工艺的影响,涂层的密度、声速、厚度等参数通常未知且存在一定的波动性。若涂层的厚度、衰减系数及延迟块、涂层基体的声学参数已知,则式(2)为以涂层声速 $c_2$ 和密度 $\rho_2$ 为自变量的二元非线性方程,通过双参数反演对此方程求解即可同时得到涂层的声速和密度。

将反演问题转化为目标函数优化问题,即求解涂层参数 $p=(\rho_2, c_2)$ ,使参数 $p$ 代入式(2)计算得到的理论声压反射系数相位谱与试验采集的相位谱最接近,目标函数取到最值,此时的 $p$ 即为反演结果。采用理论与试验相位谱的相关系数和声阻抗约束组成目标函数,表达式为

$$J(\rho_2, c_2) = \text{Corr}[\phi(f; \rho_2, c_2)_{\text{cal}}, \phi(f; \rho_2, c_2)_{\text{obs}}] + \lambda\Omega \quad (3)$$

式中:Corr(•)表示相关系数匹配运算,下标cal和obs分别表示理论与试验的相位谱,相关系数越大表示二者相似程度越高; $\lambda\Omega$ 为约束条件, $\lambda$ 为约束的权重因子, $\Omega$ 为声阻抗约束条件,反演参数不满足该约束条件时,使目标函数取值为零。

当涂层参数 $p$ 的取值使目标函数最大时,该参

数  $p$  即为最佳反演值。

相关系数匹配运算利用两个数据的相关系数作

$$r_p(\rho_2, c_2) = \frac{\sum_{i=1}^N [\phi(f; \rho_2, c_2) - \bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)][\phi(f; \rho_2, c_2)^* - \bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)^*]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\phi(f; \rho_2, c_2) - \bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)]^2} \cdot \sum_{i=1}^N [\phi(f; \rho_2, c_2)^* - \bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)^*]^2} \quad (4)$$

式中:  $N$  为时域信号经 FFT 变换后有效频带范围内的数据点数,下角标  $i$  表示第  $i$  个频率值;  $\phi(f; \rho_2, c_2)$  与  $\phi(f; \rho_2, c_2)^*$  分别为有效频带内实测与理论的声压反射系数相位谱,  $\bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)$  与  $\bar{\phi}(f; \rho_2, c_2)^*$  分别为试验与理论的声压反射系数相位谱的算术平均值。

## 1.2 目标函数灵敏度分析与约束条件构造

式(5)给出了相位谱  $\phi(f; \rho_2, c_2)$  对某一参数  $p$  的灵敏度的计算公式。灵敏度表示单位  $p$  的变化引起相位谱  $\phi(f; \rho_2, c_2)$  变化的量。

$$S_{\phi, p} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \phi}{\Delta p/p} \right) = p \frac{\partial \phi}{\partial p} \quad (5)$$

式中:  $p$  为薄层参数;  $S_{\phi, p}$  为相位谱对参数  $p$  的灵敏度。

当灵敏度趋于零时,较小的测量误差会导致较大的反演误差<sup>[10]</sup>。在超声检测前对相位谱灵敏度进行分析,根据灵敏度曲线选择合适的探头主频,可以减小反演误差。

图 2 给出了相位谱对铝合金板和环氧树脂涂层的密度与纵波声速灵敏度曲线,其中实线和虚线分别为相位谱对声速和密度的灵敏度。由式(5)可知,灵敏度归一化处理后为无量纲量。铝的声速,密度,厚度,衰减系数分别为  $6414 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $1.929 \text{ mm}$ ,  $0.001 \text{ Np} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; 环氧树脂涂层的声速,密度,厚度,衰减系数分别为  $2053 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2214 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $0.347 \text{ mm}$ ,  $\alpha(f) = 1.6 \times 10^{-1} f^2 + 8.4 \times 10^{-5} f^4 \text{ Np} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。分析灵敏度曲线可以得到以下结论:

(1) 在  $0 \sim 20 \text{ MHz}$  范围内,相位谱对声速有较高的灵敏度,而对密度的灵敏度远低于对声速的灵敏度,较小的测量误差会导致较大的密度反演误差。文中将声阻抗约束条件引入目标函数,提高密度的反演准确性。

(2) 当材料衰减很小时(例如铝合金),相位谱对灵敏度的极大值随频率升高而升高,即频率越高,相位谱对微小参数变化的灵敏度越高,提高检测频率可以减小检测误差;当薄层材料有一定衰减时(例如黏弹性的高分子涂层和孔隙率较大的涂层),灵敏

为匹配测度判断两组数据的相似性。式(4)给出了采用的样本相关系数计算公式<sup>[18]</sup>。

度的极大值先增大后减小,在某一频率达到最大值后,高频部分逐渐衰减至零,因此高衰减材料应使用较低频率的探头以保证检测灵敏度。对于厚度  $0.347 \text{ mm}$  的含铁粉环氧树脂涂层,最高灵敏度出现在  $7.38 \text{ MHz}$ 。

选择声阻抗作为式(3)目标函数的约束条件。声阻抗数值上等于声速和密度的乘积,可以通过声压反射系数与声阻抗之间的关系对声阻抗进行测量,表达式为

$$Z_{\text{coating}} = \frac{Z_{\text{coupling}} [1 + A_{\text{coating}}(f) \cdot r_{\text{reference}} / A_{\text{reference}}(f)]}{1 - A_{\text{coating}}(f) \cdot r_{\text{reference}} / A_{\text{reference}}(f)} \quad (6)$$

式中:  $A_{\text{coating}}(f)$  和  $A_{\text{reference}}(f)$  分别为样品和参考材料表面反射信号的频谱;  $Z_{\text{coupling}}$  为耦合介质的声阻抗;  $r_{\text{coating}}$  和  $r_{\text{reference}}$  分别为超声在涂层表面和参考材料的声压反射系数。

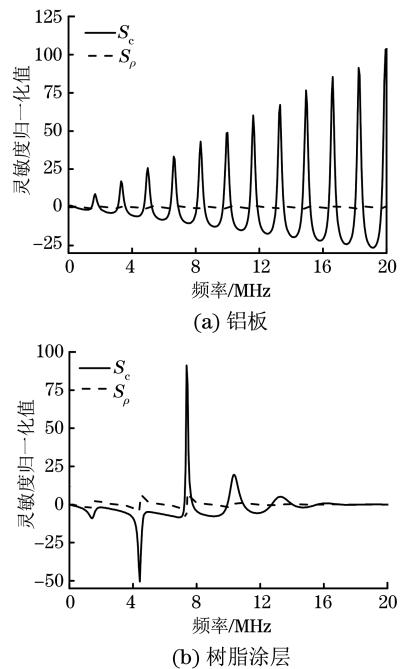


图 2 相位谱在不同材料上对声速和密度的灵敏度

## 2 试验制备

### 2.1 试验系统

试验系统采用 Olympus 5800 超声探伤仪发

射和接收超声信号,DPO 4032 数字示波器以及计算机完成超声信号的采集和反演分析工作。根据灵敏度分析结果,选择实测中心频率为 7.50 MHz 的延迟块探头作为超声信号的收发装置,探头晶片直径为 6 mm,延迟块材料为有机玻璃,纵波声速为  $2330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,密度为  $1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。图 3 给出了选用的超声探头的始发脉冲时域信号及其幅度谱,−6 dB 有效频带范围为 4.44 MHz~11.44 MHz,文中所有试验数据均在有效频带内进行分析。

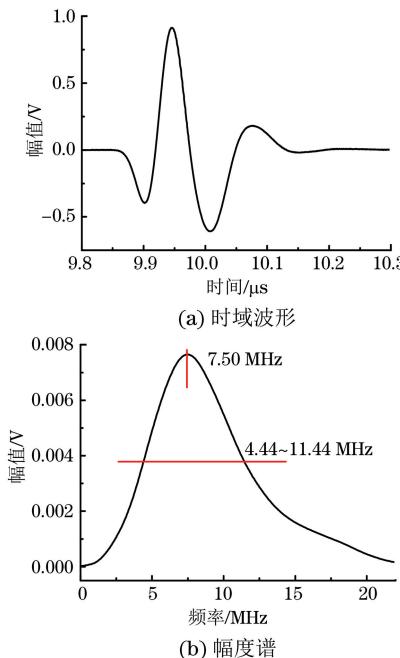


图 3 超声探头的时域信号及其幅度谱

## 2.2 试验样品

选择空气喷涂法制备的含铁粉环氧树脂涂层进行试验,铁粉质量百分数分别为 30%, 40% 和 50%, 基体材料为铝合金板。表 1 给出了试样的厚度与声学参数,其中厚度用千分尺测量,密度用阿基米德法测量,声速采用脉冲回波法测量,衰减系数采用最小二乘法拟合得到。

表 1 超声检测试样的厚度与声学参数

材料	纵波速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	厚度/ mm	衰减系数/ ( $\text{Np} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
涂层	2 000~ 3 000	1 500~ 2 500	0.2~ 0.5	$1.6 \times 10^{-1} f^2 +$ $8.4 \times 10^{-5} f^4$
	6 414± 2	2 680± 10	1.929± 0.001	0.001
铝合金				

## 3 结果与讨论

利用超声试验系统在铁粉含量 30% 涂层样品上

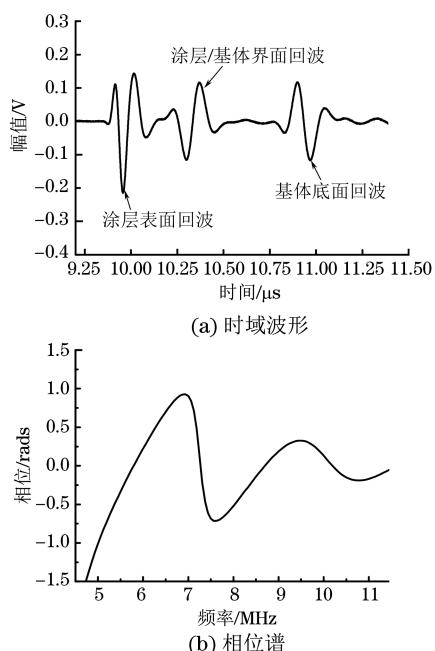


图 4 涂层样品的超声时域信号和相位谱

采集超声时域信号,对采集得到的信号进行频谱分析,选取涂层的上表面回波和界面回波计算得到试验声压反射系数相位谱。图 4 为脉冲回波法检测得到的典型时域信号及其相位谱。如图 4(a)所示,时域中涂层与铝合金板的回波信号区别不明显,难以直接用于反演,通过频谱分析的手段可以提取时域中包含的特征。在频域中,由于环氧树脂涂层的声衰减系数较大,相位谱随频率升高震荡,幅值逐渐减小,如图 4(b)所示。根据式(6),从表面回波中计算涂层声阻抗作为反演目标函数的约束条件,得到涂层的声阻抗为 4.33 MRayl。采用相关系数匹配法对有效频带内的试验声压反射系数相位谱和理论声压反射系数相位谱进行匹配分析,图 5 为匹配分析得到的相关系数矩阵。图 5(a)为未施加声阻抗约束条件的相关系数矩阵,可见目标函数随声速先增大后减小,在  $2155 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处达到最大值,表明此声速值为反演最佳值,相对误差为 −0.54%;而相关系数随密度单调增大,无法得到准确的反演结果。采用声阻抗对目标函数进行约束。图 5(b)为声阻抗条件约束后的相关系数矩阵,可见矩阵被声阻抗约束到一个较窄的范围内,排除了绝大部分干扰解,提高了反演准确性。图 6 给出了密度和声速反演结果代入式(2)得到的理论相位谱与试验采集信号处理得到的相位谱,可见在有效频带范围内两条曲线符合良好。

采用上述方法分别测量三种涂层样品的声速和密度,每个样品上取两个测试点,分别位于试样中心

和距边缘 5 mm 位置。表 2 给出了超声双参数反演法与其他方法测量的实际声速、密度的相对误差, 反演结果相对误差在  $\pm 3.2\%$  内。与中心位置相比, 边缘处涂层的厚度、声速偏大, 而密度偏小, 这可能是

喷涂过程中树脂流动、操作工艺不当使树脂厚度和铁粉分布不均匀造成的。文中提出的双参数反演方法可以较为准确地同时测量非均匀涂层的声速和密度, 为涂层质量评价提供了一定基础。

表 2 环氧树脂涂层参数超声检测结果及相对误差

铁粉质量 百分数/%	厚度/ mm	声阻抗/ MRayl	$c_{2\text{true}} /$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$c_{2\text{inv}} /$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$c_2$ 误差/%	$\rho_{2\text{true}} /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_{2\text{inv}} /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_2$ 误差/%
30	0.348	4.33	2 166.7	2 155.0	-0.54	1 997.3	2 008.0	0.54
	0.461	3.59	2 287.0	2 360.0	3.20	1 569.0	1 520.0	-3.11
40	0.365	4.55	2 159.6	2 122.0	-1.74	2 105.4	2 142.0	1.74
	0.440	3.77	2 378.0	2 370.0	-0.35	1 585.0	1 590.0	0.35
50	0.231	5.63	2 225.0	2 223.0	-0.09	2 531.3	2 533.0	0.07
	0.235	4.03	2 192.0	2 250.0	2.65	1 837.0	1 790.0	-2.56

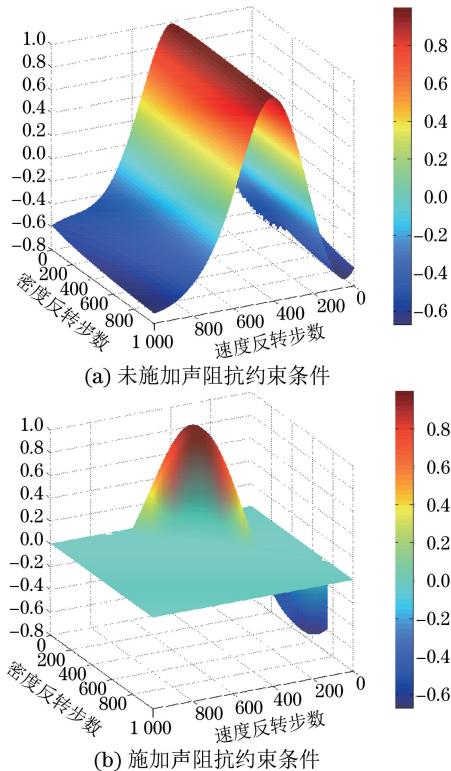


图 5 环氧树脂涂层计算得到的相关系数矩阵

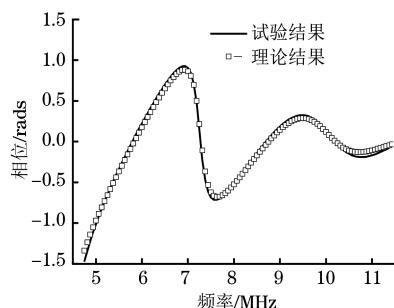


图 6 环氧树脂涂层反演相位谱与试验相位谱比较

## 4 结论

(1) 提出一种基于声阻抗约束, 采用相关系数匹配分析对不同厚度涂层的声压反射系数相位谱二元非线性方程进行双参数反演, 同时确定涂层密度和纵波声速的方法, 提高了声压反射系数谱对密度的灵敏度, 解决了涂层密度和声速难以同时无损测量的问题, 为涂层多参数无损测量与质量评价提供基础。

(2) 分析相位谱对声速和密度的灵敏度, 选择合适的超声检测频率, 采用超声脉冲回波法在铁粉质量百分数 30%, 40%, 50% 的环氧树脂涂层样品上采集超声信号, 利用上述双参数反演方法对信号进行处理, 反演得到涂层样品的纵波声速和密度相对误差在  $\pm 3.2\%$  以内。

(3) 通过声阻抗约束的双参数反演方法实现了涂层的纵波声速和密度的同时测量, 但实际检测过程中, 待测涂层往往多个参数未知, 需继续发展反问题求解方法, 提出多参数同时表征的反演方法。

## 参考文献:

- [1] 宣天鹏. 材料表面功能镀覆层及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 胡传忻, 宋幼慧. 涂层技术原理及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 侯进, 陈国华. 吸波剂含量和涂层厚度对微波吸收性能的影响 [J]. 功能材料, 2007, 38(7): 1064-1066.
- [4] ZHANG F F, KRISHNASWAMY S, FEI D, et al. Ultrasonic characterization of mechanical properties of Cr- and W-doped diamond-like carbon hard

- coatings[J]. Thin Solid Films, 2006, 503(1/2): 250-258.
- [5] HESS P. Laser diagnostics of mechanical and elastic properties of silicon and carbon films[J]. Applied Surface Science, 1996, 106(1): 429-437.
- [6] 龚裕, 谭博涛, 宋国荣, 等.  $V(f,z)$ 分析方法在小尺寸材料弹性常数测量中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(9): 1298-1301.
- [7] 陈剑. 基于超声显微镜的薄层材料多参量一体化定征关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] BESCOND C, KRUGER S E, LÉVESQUE D, et al. In-situ simultaneous measurement of thickness, elastic moduli and density of thermal sprayed WC-Co coatings by laser-ultrasonics[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(2): 238-244.
- [9] BREKHOVSKIKH L. Waves in layered media[M]. New York: McGraw-Hill, 1957.
- [10] KINRA V K, IYER V R. Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part II: the inverse problem[J]. Ultrasonics, 1995, 33(2): 111-122.
- [11] ZHAO Y, LI X M, LIN L, et al. Measurements of coating density using ultrasonic reflection coefficient phase spectrum[J]. Ultrasonics, 2011, 51(5): 596-601.
- [12] ZHAO Y, LIN L, LI X M, et al. Simultaneous determination of the coating thickness and its longitudinal velocity by ultrasonic nondestructive method[J]. NDT & E International, 2010, 43(7): 579-585.
- [13] MA Z Y, ZHAO Y, LUO Z B, et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum[J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1005-1009.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] MA Z Y, ZHANG W, DU P C, 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.
- [17] MA Z Y, ZHANG W, GAO J Y, et al. Characterization of the interface roughness of coatings based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum[C]// Atlanta: AIP Publishing, 2017.
- [18] 朱永松, 国澄明. 基于相关系数的相关匹配算法的研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 531-534.

(上接第 28 页)

(2) 识别能力测试: 将定位器安装在蒸汽发生器管板模拟体上, 使用采集电脑随机控制探头定位器运动, 测试过程中观察蒸汽发生器管板模拟体上探头定位器的实际位置, 与机器视觉识别定位软件上显示的行列号是否一致;

(3) 整体稳定性测试: 将定位器安装在蒸汽发生器管板模拟体上, 连接系统各部件(光源、相机、电控箱以及电脑), 进行整体稳定性测试。测试过程重点关注系统硬件以及软件的稳定性和可靠性。

通过对各系统模块以及整体稳定性的测试, 结果表明, 该系统稳定性和可靠性均满足相关技术要求, 其性能能够满足现场的应用要求。

### 3.2 实际应用效果

在宁德核电站 3 号机组 N302 大修蒸汽发生器传热管的涡流检测中, 该系统首次应用于实际检测。从实际使用情况来看, 该设备性能良好, 准确性、可靠性以及稳定性均满足技术规范要求, 在连续 5 d 的工作中, 圆满完成了管板爬行器的机器视觉定位工作。

### 4 结语

视觉定位系统采用动态识别算法, 独立于涡流检测的控制系统, 视觉定位系统和设备控制系统的位信息可以互相验证。其远程可调光源和高性能工业相机为该系统提供了坚实的硬件基础; 软件算法稳定高效, 满足大于  $100 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$  的实时处理要求。经过实验室以及现场测试、使用, 视觉定位系统全程运行稳定, 操作简便, 可靠性高。在使用过程中, 能辅助采集人员进行定位, 增加了额外的位置信息, 使得蒸汽发生器传热管涡流检测工作更加便捷、可靠。一系列的测试证明, 该系统能满足现场使用要求, 可胜任涡流探头定位器的辅助定位工作。

### 参考文献:

- [1] 刘振宇. 机器视觉技术在工件分拣中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(11): 87-91.
- [2] 孙亦南. 一种用于圆检测的改进 Hough 变换方法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 20: 35-37.