

基于 Born 近似法的铝合金构件缺陷的三维反演

顾雯琪 王召巴 陈友兴

中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 随着铝合金材料构件在各个领域的广泛应用,其内部缺陷的存在会导致产品不能正常使用甚至引起重大的安全隐患,所以对构件内部缺陷进行三维(3D)反演并判断缺陷形状日趋重要。以中心圆孔为内部缺陷的铝合金圆柱体作为研究对象,采用探头垂直入射的水浸式超声检测方法,将检测获得的时域信号经傅里叶变换得到频域关系后,依据检测构件缺陷位置和参考构件相同位置信号频域之间的关系,得到缺陷反演所需的散射场幅值的频域和时域数值,通过采用 Born 近似方法对其内部缺陷进行三维反演研究。实验结果表明,尽管反演结果和实际相比,存在一定误差,但 Born 近似方法仍旧能够较好地反演铝合金构件内部缺陷。

关键词 材料;超声检测;铝合金;三维反演;Born 近似

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.111602

Three-Dimensional Inversion of Cylindrical Aluminum Alloy Component Defects Based on Born Approximation Method

Gu Wenqi Wang Zhaoba Chen Youxing

*State Key Laboratory on Electronic Measurement Technology, North University of China,
Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract With the wide application of aluminum alloy components in various fields, its internal defects will lead to the existence that the product cannot be used properly and even causes great potential safety hazard, and therefore three-dimensional (3D) inversion of the component defects to judge the defect shape has become increasingly important. Using an aluminum alloy cylinder with the internal defect of a center hole as the research object, based on the probe perpendicular incident water immersion ultrasonic testing method, after the obtained time domain signal is transformed into frequency domain signal by Fourier transformation, and according to the signal frequency domain relationship between testing component defect position and the same location of the reference component, the frequency domain and time domain data of the scattering field amplitude by Born approximation method required for defect inversion are obtained, and the 3D inversion of internal defects is performed. The experimental results show that there exists some error between the inversion result and the actual defect, but the internal defects of the aluminum alloy component are still better inverted by the Born approximation method.

Key words materials; ultrasonic testing; aluminum alloy; three-dimensional inversion; Born approximation

OCIS codes 160.3900; 280.3375; 100.3190; 000.3870

1 引言

基于强度高、密度小、耐腐蚀等特点,铝合金材料在航天航空、国防军工等领域应用广泛。但是在生产过程中往往由于生产工艺、技术等因素造成产品的表面或者内部出现质量缺陷,导致产品不能正常使用,所以在产品使用前对其进行缺陷检测显得至关重要^[1-2]。

近年来,随着检测要求的不断提高,已不再局限于检测缺陷的有无,对缺陷形状实现三维反演以便更好地

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-06-19; 网络出版日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61201412)、山西省青年科技研究基金(2012021011-5)

作者简介: 顾雯琪(1990—),女,硕士研究生,主要从事信息获取与处理技术方面的研究。E-mail: 785179972@qq.com

导师简介: 王召巴(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事超声无损检测方面的研究。E-mail: wzb_nuc@126.com

对缺陷进行更精准的评估成为了国内外的研究热点。多种缺陷反演方法被提出,例如正则化迭代法、模糊数学反演方法以及 Born 近似方法等^[3-5]。其中正则化迭代法是一种局部收敛的线性化方法,但迭代序列的收敛依赖于初值的选取^[3];模糊数学反演方法难点在于如何将繁多的结构损伤类型表现出结构响应以确定隶属函数和模糊关系矩阵^[4];Born 近似反演方法是一种基于弹性波理论的线性化反演方法,针对小尺寸缺陷,在低频范围内进行反演,有学者将该方法应用于水泥柱和混凝土的柱体上进行实验,重构效果良好^[6]。

本文根据 Born 近似法在水泥柱体中的良好重构效果,将该方法应用到铝合金材料的缺陷检测中,对产品中的缺陷进行反演。本文选用工业中常见的铝合金圆柱形构件作为研究对象,对检测构件进行超声检测实验获取超声回波信号后,依据推导出的散射体体积型积分表达式以及 Born 近似反演方法^[7-8]对构件内缺陷形状进行反演。

2 原理分析

2.1 Born 近似方法

缺陷散射场体积型积分表达式^[9]

$$q_i(\mathbf{x}) = \Gamma(\mathbf{x}) \left[\delta\rho\omega^2 u_i(\mathbf{x}) - \delta C_{ijkl} u_{k,l}(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x_j} \right], \quad (1)$$

式中 $\Gamma(\mathbf{x})$ 表示构件内缺陷的特征函数, ρ 为构件基质的密度, $\rho + \delta\rho$ 为缺陷处的密度, ω 为入射波 u_i^0 的角频率。可以利用 Born 近似方法将缺陷处的位移场 $u_i(\mathbf{x})$ 用入射波 $u_i^0(\mathbf{x})$ 来近似代替。其表达式为

$$\mathbf{u}^0(\mathbf{x}) = -\mathbf{u}^0 \hat{\mathbf{y}} \exp(-ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}), \quad (2)$$

式中 u^0 为振幅, k_L 为纵波波数^[10-11]。针对空穴缺陷,其弹性常数和介质密度分别为 $\delta C_{ijkl} = -C_{ijkl}$, $\delta\rho = -\rho$ 。代入(1)式后,得到特征函数 $\Gamma(\mathbf{x})$ 为

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \frac{\hat{\mathbf{y}}_m}{u^0} A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}}) \exp(2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}) 4dk_L d\Omega(\hat{\mathbf{y}}). \quad (3)$$

为了得到缺陷形状的反演结果,需要对(3)式进行进一步变换,(3)式中 $\Omega(\hat{\mathbf{y}})$ 表示在单位球上的积分,则

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{\hat{\mathbf{y}}_m}{u^0} A_m(k_L, \theta, \varphi) \exp(2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}) 4dk_L d\theta d\varphi. \quad (4)$$

在球坐标系中,方向角 θ 的变化范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$,而在实际测量中,超声探头在圆柱体截面圆周的某一点沿径向进行激励,即 $\theta = 90^\circ$,可得到化简后的三维 Born 近似方法重构结构中缺陷形状的公式为

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \int_0^\pi \frac{4}{u^0} \hat{\mathbf{y}}_m A_m \left(k_L, \frac{\pi}{2}, \varphi \right) \exp[2ik_L(x_1 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi)] dk_L d\varphi. \quad (5)$$

缺陷反演正是利用(5)式来进行。(5)式中 $\hat{\mathbf{y}}_m A_m(k_L, \frac{\pi}{2}, \varphi)$ 所表示的缺陷散射幅值包含了关于缺陷的全部信息^[12-13],针对不同形状、不同类型的缺陷,其缺陷散射幅值会有不同的变化。而缺陷散射幅值需要依据实验获取的超声回波信号,通过相关量的等量关系进行代换后得到。

2.2 缺陷散射幅值的获取

测试试件中缺陷回波波形在频域中可表示为

$$Y_D(f) = X(f)H_T(f)H_C(f)H_{CS}(f)E_{SC}(f)H_{SC}(f)H_R(f), \quad (6)$$

式中 $X(f)$ 为输入信号, $H_T(f)$ 、 $H_C(f)$ 、 $H_{CS}(f)$ 、 $H_{SC}(f)$ 、 $H_R(f)$ 分别为超声探头的激励与接收、水以及水与试件的相互影响所产生的效果的频域值, $E_{SC}(f)$ 表示试件中缺陷所产生的散射效果。为了获得 $E_{SC}(f)$,从而最终得到缺陷的散射幅值,采用参考信号比较法,引入一个参考信号。

作为参考试件,需要含有一个自由平面,则参考试件缺陷回波波形在频域中可表示为

$$Y_{ref}(f) = X(f)H_T(f)H_C(f)H_{CS}(f)E_{ref}H_{SC}(f)H_R(f), \quad (7)$$

式中 E_{ref} 为参考试件中自由平面的反射系数。

从(6)式和(7)式中可以看出,在频域中,测试试件与参考试件的相同区域信号的频谱区别在于 $E_{SC}(f)$ 和 E_{ref} 的不同,而且由于 E_{ref} 表示参考试件中自由平面的反射系数,不依赖于频率,所以得出散射幅值的近似关系式为

$$\hat{y}_m A_m(k_L, \frac{\pi}{2}, \varphi) \approx E_{sc}(f) = E_{ref} \frac{Y_D(f)}{Y_{ref}(f)}, \quad (8)$$

式中 $Y_D(f)$ 和 $Y_{ref}(f)$ 分别为测试试件和参考试件的频谱, 可以由实验测得的时域回波信号转换到频域中获得。通过(8)式可以近似得到(5)式中的缺陷散射幅值 $\hat{y}_m A_m(k_L, \frac{\pi}{2}, \varphi)$, 进而可以通过(5)式对构件的缺陷进行三维重构。

3 超声检测方法

实验采用探头垂直入射的水浸式超声检测方法, 水浸式检测方法和传统的接触式检测方法相比, 因其非接触检测, 探头不会因为和构件接触产生摩擦而使灵敏度降低, 因此, 超声波的发射和接收都是稳定的, 但其不足之处是, 超声波在水中传播会发生散射, 探头接收到的反射波会有一些损失。试件在检测装置上的检测过程如图1所示。超声信号的获取通过两部分完成: 1) 探头处于固定的起始位置, 试件在实验装置上以固定角度转动, 直至旋转一周完成确定位置的圆周扫描。2) 试件完成圆周扫描之后, 探头沿着构件的轴线方向进行一定距离的移动, 移动的过程中探头不对试件进行检测; 在探头完成移动后, 重新对试件进行旋转, 依次往复, 使探头每移动一次, 试件旋转进行一次圆周扫描, 直至完成对构件的全部扫描。探头的移动和构件的转动通过步进电机来进行控制, 通过安装在主动轮上的编码器可以获得步进电机的旋转角度。

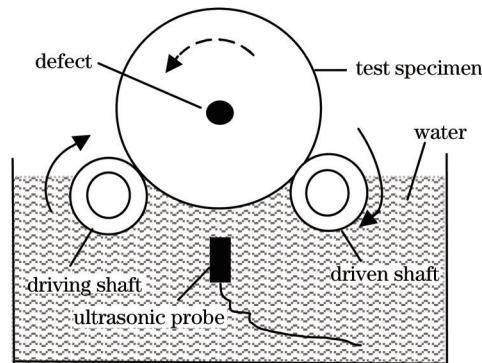


图1 构件检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of component test

4 实验结果分析

实验选用两个高为 200 mm、底面半径为 50 mm 的铝合金圆柱体试件作为研究对象, 其中一个为测试试件, 在构件底面的中心位置含有半径为 4 mm 的圆柱形空穴缺陷, 如图2所示; 另一个为参考试件, 圆柱体尺寸同上, 在底面的中心有一条光滑的长为 100 mm、宽为 3 mm 的凹槽, 作为参考试件中所需的自由平面, 如图3所示。

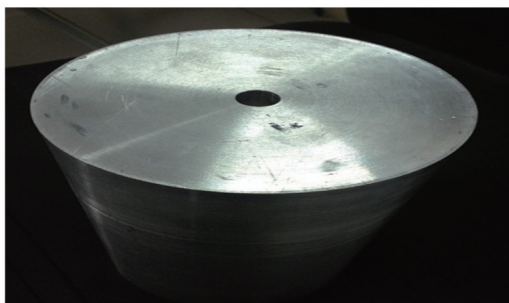


图2 测试试件图

Fig.2 Specimen for test

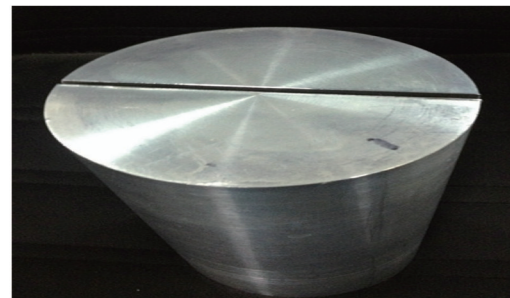


图3 参考试件图

Fig.3 Specimen for reference

使用图1所示的超声检测方法, 在相同条件下, 分别对两个试件进行了超声信号采集, 得到了这两个试件的时域波形, 依据公式 $t = 2l/v$, 计算得到构件上下表面回波出现的时间点, 缺陷回波会出现在两波之

间。式中 l 为超声波传播的距离, t 为探头接收到反射回波的时间, v 为超声波传播的速度。测试试件缺陷处的时域波形如图 4 所示;对测试试件的缺陷回波信号进行傅里叶变换,得到其频域变化情况,如图 5 所示。

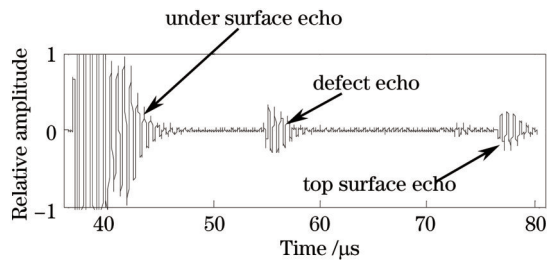


图 4 测试试件缺陷处回波时域图

Fig.4 Echo time domain of defect in the test specimen

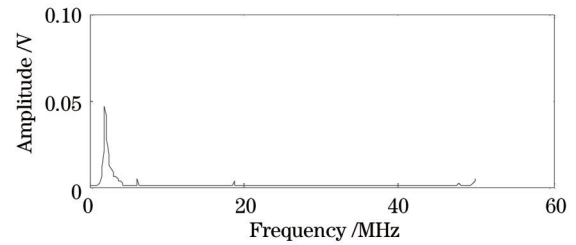


图 5 测试试件缺陷处回波频谱图

Fig.5 Echo spectrum of defect in the test specimen

参考试件同样区域的时域信号波形如图 6 所示;对参考试件同区域内的时域信号进行相同的处理,得到其频域变化情况,如图 7 所示。

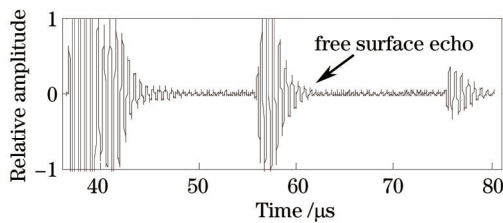


图 6 参考试件同区域回波时域图

Fig.6 Echo time domain of the reference specimen in the same area

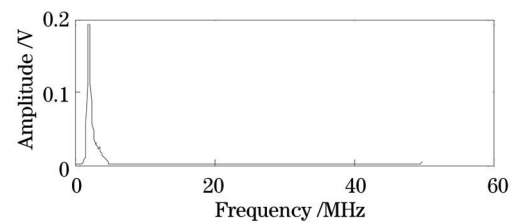
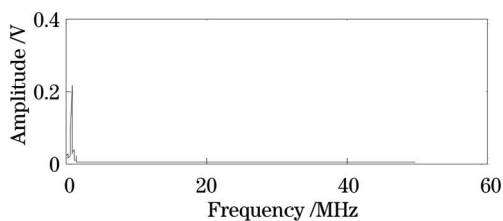
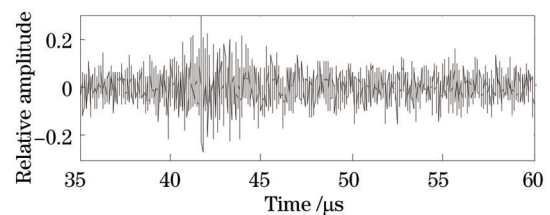


图 7 参考试件同区域回波频谱图

Fig.7 Echo spectrum of the reference specimen in the same area

对比图 4~7 可以看出,相同区域内,缺陷信号的时、频域变化与无缺陷时有明显的不同。依据图 5 和图 7 所获得的测试试件和参考试件的频谱,可由(8)式中的近似关系式得到缺陷散射幅值 $\hat{y}_m A_m(k_L, \frac{\pi}{2}, \varphi)$, 其中(8)式中表示参考试件中自由平面的反射系数 E_{ref} 为铝合金材料和空穴缺陷界面上的纵波声压反射系数,即 $E_{ref} = 1$ 。其中一组测试信号与参考信号在频域内相除得到的缺陷散射幅值如图 8 所示。在依据(5)式对缺陷进行三维反演前,将在频域中获得的缺陷散射幅值转换到时域中,得到时域中的缺陷散射信号,其中单组信号在时域中的缺陷散射信号如图 9 所示。

图 8 单组信号的缺陷散射幅值
Fig.8 A single set of the defect scattering amplitude signal of a single set图 9 时域中的缺陷散射信号
Fig.9 Defect scattering signal in time domain

在计算机反演的过程中,为减少计算量,取含有缺陷的正方形区域内进行计算。三维反演结果如图 10 所示,圆柱形空穴缺陷的平面图如图 11 所示。

依据图 10、图 11,可以得出反演后的缺陷的半径及深度大小,和实际构件内缺陷相比较,得出反演后的误差率,如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,尽管反演后的缺陷结果和实际构件相比有一定的误差,但误差率不大,缺陷半径的误差是由于探头移动位置不精确导致,而超声波在水中的散射可能会导致缺陷孔的深度产生误差。图 10、图 11 是用三维 Born 近似方法反演的结果,可以看出反演结果反映了缺陷的内部特征,从而证明前面理论推导可用于铝合金构件的缺陷反演。

表1 反演结果和实际相比较

Table 1 Comparison of the inversion results and the actual defect

	Bottom radius/mm	Depth of the defect/mm
Actual defect	4.00	20.00
Inversion results	3.88	17.88
Absolute error	0.12	2.12
Relative error	3%	10.6%

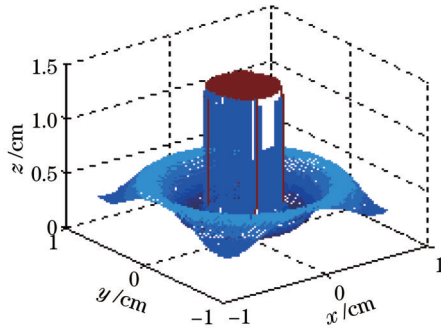


图10 圆柱形空穴缺陷三维重构图

Fig.10 3D inversion of cylindrical defect

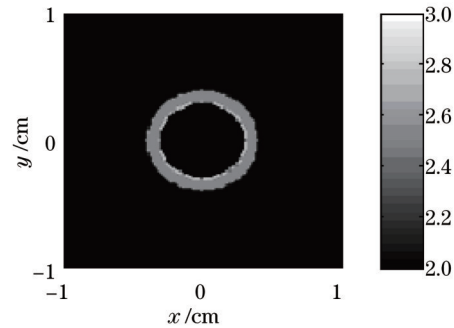


图11 圆柱形空穴缺陷平面显示图

Fig.11 Plane figure of cylindrical defect

5 结 论

由缺陷三维反演图10、图11与图2的实际试件图相比较可以看出,针对选用的铝合金圆柱体试件,通过实验获得超声信号,经过数据处理后利用三维Born近似反演方法得到构件内部缺陷的三维形状,实验证明,尽管反演后存在一定误差,但反演效果良好,表明Born近似反演方法可用于铝合金构件的空穴缺陷反演,并在实际检测中反演效果良好。

参 考 文 献

- 1 王战武, 韦艳琴. 铝合金材料检测技术探析[J]. 中国科技博览, 2011, (36): 451.
- 2 Kosmatka B J, James M R. Damage detection in structures by model vibration characterization [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 12(12):1384-1392.
- 3 Zhu Sirong, Li Zhuoqi. Identification in structures with various-point damages [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(7): 21-23.
朱四荣, 李卓球. 多处损伤结构的损伤诊断[J]. 武汉理工大学学报, 2000, 22(7): 21-23.
- 4 Zhang Jianwen, Xu Yunzhi. Application of fuzzy math in fault diagnosis [J]. Design of Coal, 1998, 11: 33-36.
张建文, 许允之. 模糊数学在故障诊断中的应用研究[J]. 煤矿设计, 1998, 11: 33-36.
- 5 Zhang Qing, Xu Guanghua. Incipient fault diagnosis based on moving probabilistic neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9): 1036-1040.
张庆, 徐光华. 基于滑动概率神经网络的早期故障诊断[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1036-1040.
- 6 Yamada M, Kitahara M. Shape reconstruction of three-dimensional flaw by the measurement from the side of cylindrical specimen [J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2004, 23: 1027-1034.
- 7 Rose J H, Opsal J L. Inversion of ultrasonic scattering data [C]. Review of Progress in QNDE, 1984. 187-195.
- 8 Rose J H, Gray T A, Thompson R B. Progress on ultrasonic flaw sizing in turbine engine rotor components: Bore and Web geometrics [C]. Review of Progress in QNDE, 1983, 2A: 1065-1096.
- 9 Kitahara M, Hirose S, Achenbach J D. Shape Reconstruction of Defects in an Elastic Solid [M] // Thompson RB. The First US-Japan Symposium on Advances in NDT. Columbus: The American Society for Nondestructive Testing, Inc., 1996. 187-192.
- 10 Zhu Jin. Research of Born Approximation Method and the Elastic Wave Inverse Problem [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1987.

- 朱 瑾. Born 近似方法和弹性波反问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1987.
- 11 Kitahara M, Kazuyuki N, Hirose S. Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws [J]. Wave Motion, 2002, 36: 443-455.
- 12 Yang Guitong, Zhang Shanyuan. Elastic Dynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing house, 1988.
杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- 13 Huang Kezhi, Xue Mingde, Lu Wanming. Tensor Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
黄克智, 薛明德, 陆万明. 张量分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.