

# 基于超声散射法的微小缺陷 及近表面缺陷的检测

王少军, 俞厚德, 钱耀洲, 王继锋

(上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062)

**摘要:**针对常规超声检测法存在对  $\phi 1.0$  mm 以下的微小缺陷漏检及近表面检测存在盲区的问题, 提出一种超声垂直发射背向散射的检测方法。分析了散射模式的声场传播特性, 阐明了该模式的检测原理。通过对不同类型和尺寸的人工缺陷检测, 分析了该散射方法的检测信号、检测灵敏度及成像图形; 通过有限元分析, 对散射波声场分布的可靠性进行了验证。结果表明, 超声散射法能够识别常规超声检测方法容易漏检的微小缺陷及无法辨别的近表面缺陷, 可有效检测  $\phi 0.4$  mm 的微小缺陷及埋藏深度 1.0 mm 的近表面缺陷。

**关键词:** 超声散射法; 有限元分析; 微小缺陷; 近表面盲区

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)01-0049-05

## The Detection of Tinny Defect and Near Surface Defect Based on Ultrasound Scattering Technique

WANG Shao-jun, YU Hou-de, QIAN Yao-zhou, WANG Ji-feng

(Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of undetected tinny defect of  $\phi 1.0$  mm and near surface dead zone, a scattering-based ultrasonic testing method of vertical launch ultrasonic and backscattering was proposed in the paper, which analyzed the characteristics of sound distribution and illustrated testing principle. Through the artificial defect testing, the feature of tested signal, sensibility and image are recognized. The reliability of scattering wave sound field distribution is tested by finite element analysis. The experimental results show that ultrasonic scattering test can identify the near surface defect and tinny defect that can not be distinguished by conventional ultrasonic test, and the near surface defect with buried depth 1.0mm and  $\phi 0.4$  mm can be effectively detected.

**Keywords:** Ultrasound scattering technique; FEM method; Tinny defect; Near surface dead zone

超声脉冲反射法具有检测速度快、检测成本低等优点, 适合于危险性大的裂纹、夹层等面状缺陷的量化测量。在一些特殊焊接方法中, 如电子束、摩擦搅拌焊件中, 容易出现一些  $\phi 1.0$  mm 以下的微小缺陷, 如钉尖、冷隔和凝固线等, 这些微小缺陷是焊接接头的最大危害。常规的超声反射法由于自身的技术特点, 如由于检测灵敏度的限制, 难以对这些

微小缺陷达到检出效果<sup>[1-2]</sup>; 由于检测盲区的存在, 该方法难以对表面及近表面的缺陷进行有效地识别。为了解决这一问题, 万明习等人提出了一种超声 TOFD 法和脉冲反射法相结合的检测技术<sup>[3]</sup>。该技术弥补了盲区的缺点, 但对于微小缺陷的检测灵敏度不高, 同时增加了对检测系统硬件的要求。

散射一直以来都是声学研究中的一个重要问题。Ying 和 Truel<sup>[4]</sup>等人系统地研究了固体中球形散射体对简谐平面波的散射问题, 分析了入射纵波在不同边界条件下的散射截面; White<sup>[5]</sup>研究了柱形散射体对平面简谐波的散射, 并进行了试验观察; 应崇福<sup>[6]</sup>等人首次发表了半无限平面裂缝对超声波

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家质检总局公益资助项目(2012-51); 上海市“启明星”资助项目(11QB1405300)

作者简介: 王少军 (1982—), 男, 助理工程师, 主要从事特种设备的超声无损检测与研究工作。

的散射的光弹试验结果,开始用光弹方法作散射问题的试验研究。

研究者对散射的原理和介质散射体的散射问题研究较多,对超声散射的检测方法研究相对较少。为了检测微小缺陷及克服近表面缺陷难于识别的问题,笔者研究了一种超声散射检测方法,利用散射波对微小缺陷及近表面缺陷进行有效的检测。

## 1 超声散射检测原理

在无限均匀的弹性介质中,弹性波以一定的速度沿着固定的方向传播。当其遇到障碍物之后,弹性波的传播路线发生改变。将沿直线传播的弹性波称为入射波,当它遇到障碍物之后,将与障碍物发生作用,这种相互作用的结果使得障碍物表面上的任何一点都可被看成是一个新的波源,可把这些新的波源当成二次波源,它将向各个方向发出所谓“散射波”<sup>[7]</sup>,并且散射波的能量较弱,利用这些近似球面辐射信号来发现缺陷。当遇到一些大缺陷时,散射波的方向具有一定的指向性,而遇到一些小缺陷时,散射波的方向近似于扇状分布,因此更容易检测到微小缺陷。

## 2 试样设计及试验方法

### 2.1 试样设计

采用电火花技术,在厚度为 4,8 mm 的高强铝合金板上分别加工不同深度的垂直表面窄槽和侧孔,如图 1 所示。4 mm 铝板上垂直表面的窄槽尺寸相同,埋深依次为 1,1.5,2,3 mm;8 mm 铝板上 3 个侧孔的尺寸和埋深分别为  $\phi 0.4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,  $\phi 0.8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ;  $\phi 1.0 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。



图 1 试块实物

### 2.2 试验方法

超声散射检测试验中,缺陷作为二次波源将向各个方向发出散射波,缺陷信号可以从一系列不同方向接收。该散射方法具有垂直发射背向散射的特性,通过接收背向散射波实现对缺陷的检测,原理如图 2 所示。

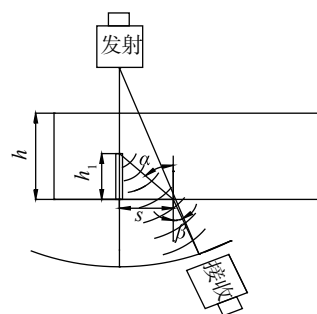


图 2 垂直发射背向散射图

试验采用水浸法,由于散射原理和工件较薄的因素,探头选用一对高分辨力纵波聚焦探头,探头中心频率为 10 MHz。发射探头垂直对着缺陷,接收探头角度根据散射波信号来调整,以便接收较强散射波。探头水距根据探头标称焦距以及工件厚度的不同选择。试验根据接收背向散射信号波的特性,来观察 A 扫描信号,目的是为了找到合适的接收探头的角度、频率等影响因素,以尽可能地检测出缺陷。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 散射特性 A 显示波形图结果与分析

发射探头垂直对准试样完好处,接收探头与垂直线偏移角度为  $10^\circ$ ,距离发射声轴 10 mm,如图 2 所示。超声脉冲发生接收器 5077PR 上增益调为 29 dB,PRF 为 100 Hz,PULSER 为 200 V,TRA 为 10 MHz,示波器上 CH1 调为 500 mV $\Omega$ ,M 为 1.00  $\mu\text{s}$ 。接收探头接收到直达波和其它波形,如图 3(a)。其中第一个信号波为直达穿透波,第二个信号波为一次反射纵波,比第一个信号波延迟了  $\Delta t = 1.27 \mu\text{s}$ 。第三个信号波为前界面转换的横波,比第二个信号延迟了  $\Delta t = 0.7 \mu\text{s}$ 。第四个信号波为二次反射纵波,比第二个信号波延迟了  $\Delta t = 1.27 \mu\text{s}$ 。

发射探头对准刻槽处时,在直达穿透波和一次反射纵波之间出现一个信号波,这个波为缺陷散射波。图 2 中, $s = 10 \text{ mm}$ 。在图 3(b)中缺陷散射波比直达穿透波延迟了  $\Delta t = 880 \text{ ns}$ ,根据声程和时间的关系,缺陷深度为  $h_1 = 1 \text{ mm}$ ,由三角关系:

$$L = \sqrt{s^2 + h_1^2} = \sqrt{101} (\text{mm}) \quad (1)$$

缺陷波总时间为:

$$T_1 = \left( \frac{3 \times 10^{-3}}{6260} + \frac{\sqrt{101} \times 10^{-3}}{3080} \right) \times 10^6 = 3.752 (\mu\text{s})$$

同理,发射探头对准埋深 2 mm 槽,缺陷波总时

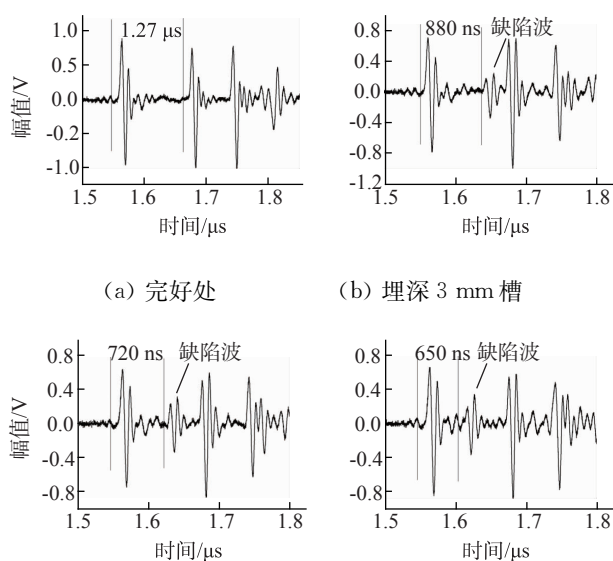


图 3 厚 4 mm 铝不同埋深槽 A 显散射波形

间为:

$$T_2 = \left( \frac{2 \times 10^{-3}}{6260} + \frac{\sqrt{10^2 + 2^2} \times 10^{-3}}{3080} \right) \times 10^6 = 3.620(\mu s)$$

同理,发射探头对准埋深 1 mm 槽,缺陷波总时间为:

$$T_3 = \left( \frac{1 \times 10^{-3}}{6260} + \frac{\sqrt{10^2 + 3^2} \times 10^{-3}}{3080} \right) \times 10^6 = 3.549(\mu s)$$

埋深 3 mm 槽与埋深 2 mm 槽缺陷散射波延迟为:

$$\Delta t = T_1 - T_2 = 132.6(\text{ns})$$

埋深 2 mm 槽与埋深 1 mm 槽缺陷散射波延迟为:

$$\Delta t = T_2 - T_3 = 71.3(\text{ns})$$

以上数据基本和试验数据相吻合。

同理,发射探头对准厚 8 mm 的高强铝合金板上的  $\phi 0.4$  mm 侧孔时, A 显散射波形图如图 4 所示。

从图 3 可知,超声散射法能够识别埋藏深度 1 mm 的近表面缺陷,克服了盲区的影响;图 4 说明该方法能够有效检测到  $\phi 0.4$  mm 的微小缺陷,达到了预期的效果。

同时从图 3 中可得知:埋深 1 mm 槽,散射波比直达穿透波延迟  $\Delta t = 650$  ns;埋深 2 mm 槽,散射波比直达穿透波延迟  $\Delta t = 720$  ns;埋深 3 mm 槽,散射波比直达穿透波延迟  $\Delta t = 880$  ns。可知,散射波和

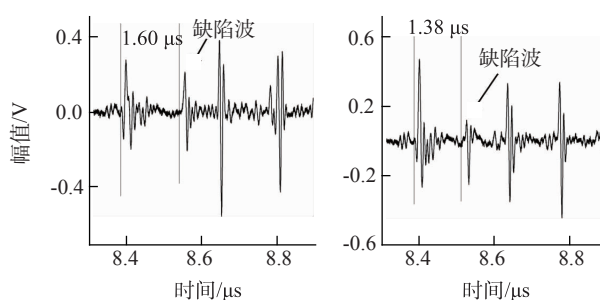


图 4 厚 8 mm 铝侧孔的 A 显散射波形

直达波的延迟时间与缺陷的埋深有关,埋深越大,延迟时间越大,在数学上近似呈递增关系,结果见图 5 所示。

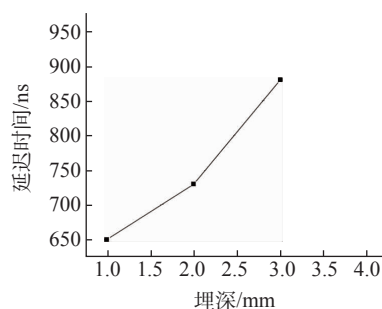


图 5 刻槽缺陷埋深与延迟时间的关系曲线

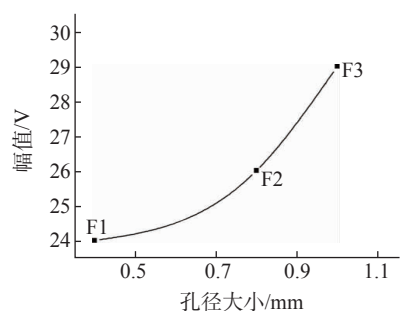
通过对铝合金试样上的人工缺陷检测,笔者分析了缺陷的尺寸、类型和散射波幅值之间的关系,如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,相同埋深的不同孔径的侧孔,随着孔径尺寸的变大,散射信号幅值也越大。图 6(b)表明,相同埋深的不同类型缺陷散射波幅值会有明显的不同,其中刻槽的散射信号幅值比侧孔的散射信号幅值强。这说明了散射信号和缺陷的类型形状有关,槽形缺陷形状不规则,比较尖锐,散射波强度大;圆孔缺陷边界比较圆滑,散射信号波幅值较弱,符合散射的原理特性。

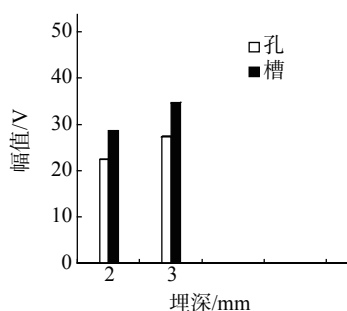
### 3.2 有限元分析

为了更好地分析不同类型缺陷的散射声场情况,对不同类型缺陷进行了有限元模拟,初步得到了固体中的声场分布情况,同时验证了散射波声场分布的可靠性。用 Abaqus 软件瞬态动力学模块进行模拟,模型尺寸为  $150 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,模型的中间放有缺陷。缺陷埋深为 2 mm,孔洞缺陷直径为 0.4 mm。模型材料选为铝,声波传播的纵波速度为  $v_p = 6260 \text{ m/s}$ 。材料参数为:杨氏模量  $E = 72 \text{ GPa}$ ,密度  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比  $\nu = 0.33$ 。划





(a) 同埋深不同孔径



(b) 不同类型缺陷

图6 不同缺陷尺寸及类型的散射波幅值

分的网格为四边形,边长为 0.02 mm。模拟结果如图 7 和 8 所示。

从图 7 和 8 可以发现,声波经过未熔合处会产生反射和散射现象。图 7 可明显发现有反射纵波、透射波、模式转换的横波和纵波掠入射转换的横波

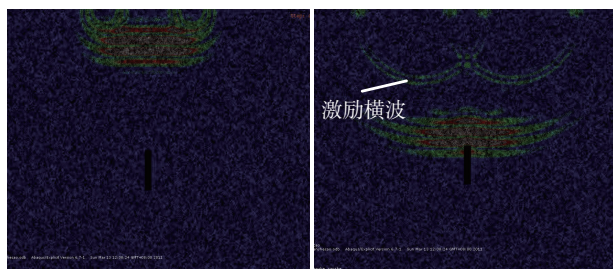
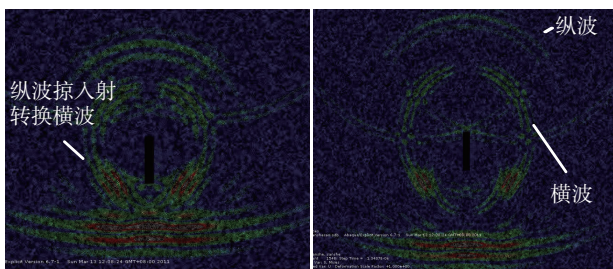
(a) 1.35  $\mu\text{s}$ (b) 1.68  $\mu\text{s}$ (c) 2.24  $\mu\text{s}$ (d) 2.47  $\mu\text{s}$ 

图7 未熔合缺陷不同时刻波形场快照示意图

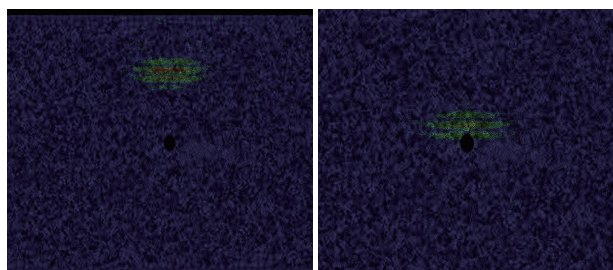
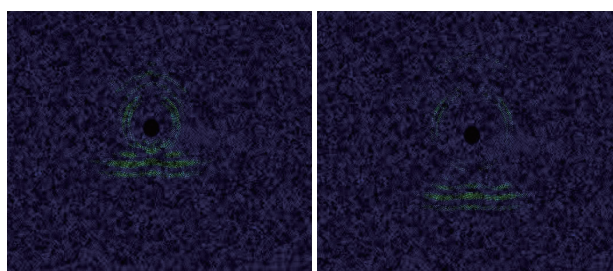
(a) 1.52  $\mu\text{s}$ (b) 1.73  $\mu\text{s}$ (c) 2.30  $\mu\text{s}$ (d) 2.48  $\mu\text{s}$ 

图8 孔洞缺陷不同时刻波形场快照示意图

等。从图 8 可以看出,当入射波经过圆孔缺陷时,同样会有反射波和散射波,其中就有模式转换的横波。验证了试验分析中散射波形的正确性和可靠性。

#### 4 试验成像结果

图 9 为采用超声散射检测法对厚 4 mm 铝刻槽的扫描图像。图 9 显示了对应于垂直于入射面的埋深为 1.5, 2, 3 mm 的刻槽图像。可见,该方法可很好地识别出近表面缺陷,克服了盲区的影响。

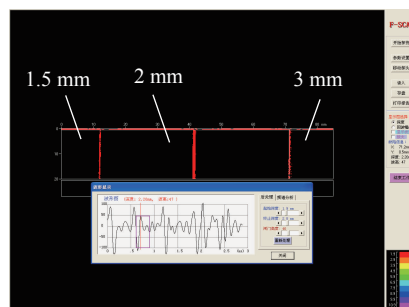


图9 厚 4 mm 铝刻槽超声散射图

图 10 为厚 8 mm 铝上  $\phi 0.4$  mm 和  $\phi 0.8$  mm 侧孔的超声散射图。通过图形能够很容易地识别出  $\phi 0.4$  mm 当量孔,也能很容易识别出埋深只有 1 mm 的  $\phi 0.8$  mm 当量孔,以及  $\phi 0.4$  mm 微小缺陷,克服了盲区和缺陷尺寸的影响,达到了预期的效果。

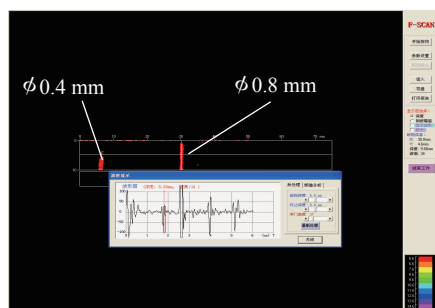


图 10 厚 8 mm 铝  $\phi 0.4$  mm 和  $\phi 0.8$  mm 侧孔超声散射图

## 5 结论

(1) 缺陷的类型、尺寸会影响散射信号波的幅值。同埋深的不同孔径的侧孔,随着孔径尺寸的变大,散射波信号幅值也越大;同埋深的不同刻槽,随着刻槽宽度的变大,散射波信号幅值也越大。散射信号还和缺陷的类型有关,槽形缺陷形状不规则,比较尖锐,散射强度大;而圆孔缺陷比较圆滑,散射信号较弱。

(2) 超声散射法能够识别常规超声检测方法下容易漏检的微小缺陷及无法辨别的近表面缺陷,可

有效检测到  $\phi 0.4$  mm 的微小缺陷及埋藏深度 1.0 mm 的近表面缺陷。故超声散射检测方法比起常规的超声检测技术有两大优势:一是适合于检测近表面的缺陷(常规超声检测法存在盲区);二是对微小缺陷有较高的灵敏度。

## 参考文献:

- [1] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:19.
- [2] 冯若,姚锦钟,关立勋. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,2001:44-47.
- [3] 张锐,万明习,CAO W W. 超声衍射-回波渡越时间方法焊缝原位定量无损估计[J]. 机械工程学报,2000,36(5):54-57.
- [4] YING C F, TRUELL R. Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid[J]. J Appl- Phys,1956,27(9):1086-1097.
- [5] WHITE R M. Elastic wave scattering at a cylindrical discontinuity in a solid[J]. Acoust Soc Am,1958(30):771-785.
- [6] 应崇福,张守玉. 超声在固体中的散射[M]. 北京:国防工业出版社,1994:88-93.
- [7] 王春霞,马俊. 孔隙介质柱面边界上声波散射的理论与数值研究[D]. 吉林:吉林大学,2008.
- [8] 王春霞,马俊. 基于超声散射法的微小缺陷及近表面缺陷的检测[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2011:133.
- [9] AVDELIDIS N P, HAWTIN B C, ALMOND D P. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites[J]. NDT Int,2003,36(6):433-439.
- [10] LAVERS J D. State of the art of numerical modeling for induction processes[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering,2008,27(2):335-349.
- [11] PETER P S, RONALD L F. Finite Elements for Electrical Engineers[M]. NY: Cambridge University Press, Cambridge,1996:3rd ed.
- [12] YANG S, TIAN G Y, ABIDIN I Z, et al. Simulation of edge cracks using pulsed eddy current stimulated thermography[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2011:133.
- [13] LAAIDI S B N, ELBALOUTTI A. Thermal and thermographical modeling of the rust effect in oil conduits[C]. ECNDT Moskow,2010.
- [14] WILSON J, TIAN G Y, ABIDIN I Z, et al. Pulsed eddy current thermography: system development and evaluation[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,2010,52(2):87-90.
- [15] TIAN G Y, WILSON J, CHENG L, et al. Pulsed Eddy Current Thermography and Applications[M]. New Developments in Sensing: Technology for Structural Health Monitoring. Berlin: Springer-Verlag, 2011,205-231.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告