

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.016

基于变型波的超声 TOFD 近表面检测新方法*

林乃昌

(厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361004)

摘要: 为了解决传统衍射时差法超声检测技术(TOFD)法对埋藏在近表面的缺陷波无法辨识及近表面区域的测量误差大、深度分辨力差等近表面盲区问题,提出了一种新的近表面检测方法。该方法利用变型波波速较慢的特点,通过计算变型波、直通波及底面反射波,得出了变型波在纵波检测窗口出现的条件,并利用变型波对缺陷进行检测,以减小测量误差并提高检测分辨力,有效地解决了 TOFD 近表面盲区问题。在 10 个不同深度的人工缺陷中,对采用基于变型波的检测方法和传统检测方法的实验结果进行了比较和分析,并分别计算了其测量误差及检测分辨力。实验结果表明,该方法能够识别传统方法无法辨识的近表面缺陷,可有效检测到埋藏深度 2.0 mm 的人工缺陷,同时,该方法具有较高的测量精度和分辨力。

关键词: 衍射时差法超声检测技术; 盲区; 变型波

中图分类号: TH878; TG115.28 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)08-0967-04

New near surface detection method of ultrasonic TOFD based on transformed wave

LIN Nai-chang

(Xiamen Inspection Institute of Special Equipments, Xiamen 361004, China)

Abstract: Aiming at the problem of near surface dead zone in ultrasonic time of flight diffraction(TOFD) such as the near surface defect that cannot be distinguished by using conventional methods and low quantitative accuracy and the low resolving power of detection, a new near surface detection method was proposed. The characteristic of distortion wave whose velocity is slow has been used, the condition that transformed wave appears in the windows of lengthways wave detection was obtained by means of calculating transformed wave, through wave and reflected wave of undersurface. To solve the problem of near surface dead zone in ultrasonic TOFD, the defect was detected by transformed wave to reduce the measurement error and to enhance the resolving power of detection. The result of experiment has been compared and analyzed by the measurement error and the resolving power of detection has been calculated by the method based on transformed wave and conventional methods respectively in the ten artificial defects with different buried depth. The results indicate that the method can identify the near surface defect that cannot be distinguished by using conventional methods, and the artificial defect with buried depth of 2.0 mm can be detected effectively. The method has a high quantitative accuracy and a high resolving power.

Key words: ultrasonic time of flight diffraction technique(TOFD); dead zone; transformed wave

0 引 言

超声 TOFD(time of flight diffraction technique)是一种基于衍射信号实施的检测技术,与常规脉冲回波超声检测技术相比,其具有检测可靠性好、定量精度

高、检测简便快捷等优点,适合于中厚板焊缝的无损检测,尤其适合危险性大的裂纹及未融合等面状缺陷,是其它检测方法无法比拟的^[1-4]。但是该方法也存在自身的技术缺陷问题,主要是对近表面的缺陷检测可靠性不够,近表面检测有两个主要的问题:①直通

收稿日期: 2013-05-30

基金项目: 福建省质量技术监督局科技资助项目(FJQI2012028)

作者简介: 林乃昌(1982-),男,福建长汀人,博士研究生,工程师,检验师,主要从事无损检测、特种设备检验方面的研究。E-mail:nchlin@126.com

波的存在影响缺陷信号显示,产生检测的上表面盲区,对检测的可靠性的影响很大;②由于近表面区域的时间测量不准确导致深度分辨力很差,严重影响缺陷测定的准确性^[5]。

为了解决近表面检测问题,张锐等人^[6]提出了一种超声 TOFD 法和脉冲反射法相结合的检测技术,该方法采用超声反射法有效弥补了超声 TOFD 法对表面及近表面缺陷不敏感的缺点,但是该方法加大了检测工作量且对硬件要求较高。迟大钊等人^[7]从图像处理角度试图提高混叠在近表面的缺陷波,提出了一种图像能量分布法,该方法在一定程度上提高了近表面缺陷的辨识能力,但受待处理图像的成像质量影响很大,迟大钊等人^[8]又从检测方法角度,提出了一种基于 TOFDW 模式的检测方法,该方法进一步提高了近表面缺陷的辨识能力,但该方法实际为 TOFD 法二次波检测方法,在解决近表面盲区问题上仍有一定的局限性。

为了从根本上解决 TOFD 表面盲区问题,本研究从检测方法角度,提出一种基于 TOFD 变型波的表面检测新方法,通过计算变型波、直通波及底面反射波,得出变型波在纵波检测窗口出现的条件,并利用变型波对缺陷进行检测,以减小测量误差并提高检测分辨力。

1 盲区的深度测量误差及分辨力

扫描面附近的内部缺陷信号可能隐藏在直通波之下,导致无法识别,因此上表面盲区就是直通波信号所覆盖的深度范围。

如果声速为 c ,探头中心距为 p ,直通波的传输时间是 T_L ,直通波的脉冲时间宽度为 T_p ,则盲区的深度公式如下:

$$D_z = \left[\left(\frac{c}{2} \right)^2 (T_L + T_p)^2 - \left(\frac{p}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

TOFD 技术的测量包括缺陷在工件中位置(深度)的测量和缺陷尺寸的测量,而缺陷尺寸的测量又包括缺陷的高度和长度的测量,因此测量误差也包括了位置(深度)的测量误差以及缺陷高度和长度尺寸误差。TOFD 技术的深度测量误差随着接近表面而迅速增大,由于在近表面区域内衍射波传输路径接近水平路径,深度上一个较大的变化只会引起时间上一个很小的变化,因此近表面深度测量不准,分辨力比较差。

根据缺陷深度 h 计算公式,假定缺陷尖端处于两个探头中间的对称位置,则时间 t 由下列公式得出:

$$t = 2 \sqrt{(p/2)^2 + h^2} / c \quad (2)$$

整理后,尖端深度为:

$$h = \sqrt{\left(\frac{ct}{2} \right)^2 - \left(\frac{p}{2} \right)^2} \quad (3)$$

两边平方得:

$$h^2 = (c/2)^2 t^2 - \left(\frac{p}{2} \right)^2 \quad (4)$$

对上式关于 h 和 t 进行微分,深度误差 δh 可以由时间误差 δt 来表示,即:

$$2h\delta h = \left(\frac{c}{2} \right)^2 2t\delta t \quad (5)$$

将式(2)代入上式得:

$$\delta h = c \sqrt{s^2 + hh^2} \delta t / 2h \quad (6)$$

对于近表面, h 远小于 s ,则公式可以简化为:

$$\delta h = cs\delta t / 2h \quad (7)$$

从上式中不难看出,随着深度 h 的减少,误差 δh 迅速增加。因此缺陷越接近上表面,测量越不准。而从上述公式中也能看出,通过减少探头中心距有助于减小测量误差。

空间分辨力是指两个信号之间最小分辨距离。为了获得上、下端点能区分的反射体的最小尺寸,其量值用声学脉冲的长度来确定。

如果 t_p 是声学脉冲长度的时间, t_h 是深度为 h 的衍射信号的传输时间,则空间分辨力 R 可以按照下式计算:

$$R = \sqrt{\left[\frac{c(t_p + t_h)}{2} \right]^2 - \left(\frac{p}{2} \right)^2} - h \quad (8)$$

分辨力随着深度的增加而提高,减少探头中心距则可以改善分辨力。

2 基于变型波的检测方法

由于 TOFD 检测是以超声波信号传输时差来确定缺陷深度的,而超声波的传输时间和其传播的距离和声速有关,TOFD 探头发出横波,其角度大约是纵波角度的一半,由于探头发出的纵波在钢中会发生折射、反射和衍射,在折射、反射和衍射过程中会产生纵波变横波或者横波变纵波的波型转换,在某些特殊情况下,转换出来的变型波信号有可能比底面纵波信号先到达接收探头。这些变型波对上表面附近的缺陷判断特别有用,因为这些缺陷的纵波信号隐藏在直通波中,而横波波速较慢,使得信号出现时间稍晚并且分辨力较好,能有效减小盲区范围和提高分辨力^[9-10]。

本研究用 c 代表纵波声速,用 s 代表横波声速,用 CC 代表纵波直通波,用 CSF 代表折射纵波在缺陷 F

处产生反射变型波,用 CCD 代表底面纵波。TOFD 检测示意图如图 1 所示。

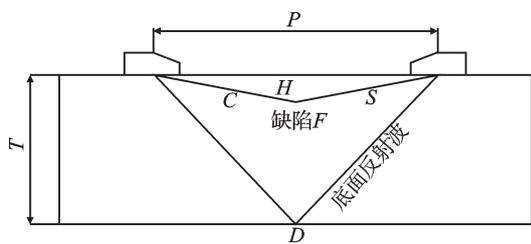


图1 TOFD检测示意图

p —探头中心距; h —缺陷的深度; T —工件厚度

各信号传输时间表达如下:

$$t_{CC} = p/c \tag{9}$$

$$t_{CCD} = 2 \sqrt{T^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2} / c \tag{10}$$

$$t_{SS} = p/s \tag{11}$$

$$t_{CSF} = \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}}{c} + \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}}{s} \tag{12}$$

其中,纵波声速为 5 930 m/s,横波声速为 3 230 m/s。

当 $t_{SS} < t_{CCD}$ 时,即直通横波在底面纵波之前出现,是变型波出现在纵波窗口的前提,则有:

$$p/s < 2 \sqrt{T^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2} / c \tag{13}$$

将横波、纵波声速代入,化简得:

$$p < 1.3T \tag{14}$$

当 $t_{CSF} < t_{CCD}$ 时,即变型波在底面纵波之前出现,则有:

$$\frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}}{c} + \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}}{s} < \frac{2 \sqrt{T^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2}}{c} \tag{15}$$

将横波、纵波声速代入,化简得:

$$h < \sqrt{0.5T^2 - 0.125p^2} \tag{16}$$

将式(14)代入得:

$$h < 0.196 85T \tag{17}$$

上式说明在探头中心距取 $1.3T$ 时,在缺陷深度约距离表面 $0.2T$ 范围内均可出现变型波,如探头中心距小于 $1.3T$ 时,变型波出现范围将更大。而盲区范围一般不超过检测厚度的 20%,因此基于变型波的检测方法是能满足表面盲区范围内的检测方法。

基于变型波检测方法可通过读取纵向直通波时间及纵向直通波与变型波之间的时差,并根据探头间距及纵波声速计算获取。

令 $t_{CC} = p/c$, 则:

$$\Delta t = t_{CSF} - t_{CC} \tag{18}$$

根据缺陷的几何关系,有:

$$\Delta t + t_{CC} = \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{Pp}{2}\right)^2}}{c} + \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{pP}{2}\right)^2}}{s} \tag{19}$$

整理得缺陷的埋藏深度为:

$$h = \sqrt{\left[(\Delta t + t_{CC}) \frac{cs}{c+s} \right]^2 - \left(\frac{p}{2}\right)^2} \tag{20}$$

3 实验结果与分析

本研究采用电火花技术,在厚度为 40 mm 的试块上加工人工缺陷距检测面不同深度依次为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 mm 的线切割槽。采用一对宽带窄脉冲探头(晶片尺寸 $\Phi 6$ mm,中心频率 5 MHz,探头角度为 60°),以水为耦合剂,对各人工缺陷采用传统 TOFD 和基于变型波方法的检测,传统 TOFD 方法采用中心距 $p = 100$ mm,在此计算的上表面盲区 $D_z = 9.4$ mm。采用基于变型波方法探头中心距 $p = 50$ mm,取样间隔为 $0.04 \mu s$ 。

两种方法的检测结果如表 1 所示。

表1 两种方法的检测结果

人工缺陷深度 /mm	传统 TOFD 检测方法结果	本研究方法结果
1.0	否	否
2.0	否	能
3.0	否	能
4.0	否	能
5.0	否	能
6.0	否	能
7.0	否	能
8.0	否	能
9.0	能	能
10.0	能	能

测量误差比较图如图 2 所示。

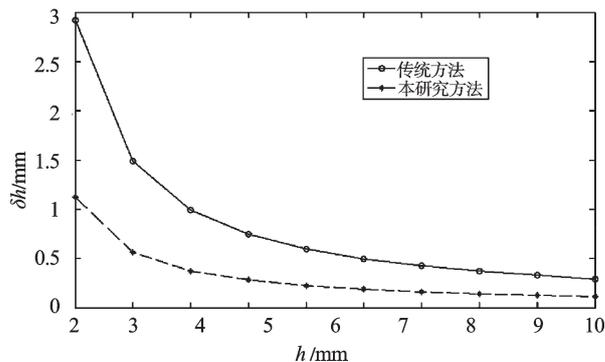


图2 测量误差比较图

分辨力比较图如图 3 所示。

实验结果表明,采用本研究方法能有效检测到埋

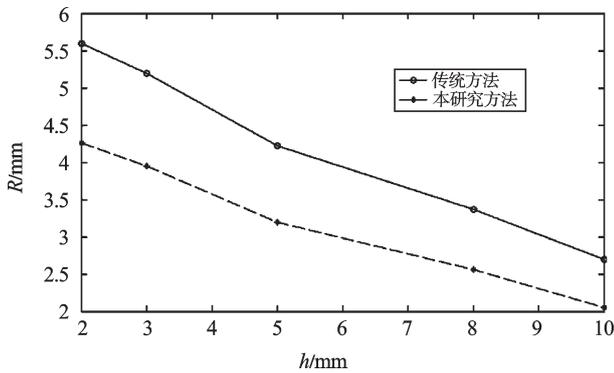


图3 分辨力比较图

藏深度 2.0 mm 的缺陷,而传统方法在计算盲区范围内则基本无法检测到缺陷,图 1 及图 2 也说明,本研究方法在检测过程中,测量误差及分辨力均更优于传统方法。

4 结束语

为了解决传统 TOFD 法对埋藏在近表面的缺陷波无法辨识等近表面盲区问题,本研究提出了一种新的近表面检测方法。通过理论分析和实验比较可知,与传统 TOFD 检测方法相比,基于变型波的方法能有效地检测到埋藏深度 2.0 mm 的缺陷,并有效地解决 TOFD 近表面盲区问题;该方法通过改变探头中心距和采用变型波检测方法能有效减小测量误差并提高盲区的分辨力;虽然提出的基于变型波的检测方法能有效解决表面盲区的问题,但是由于在波的传播过程中有纵波直通波、底面反射波及变型波等波型,较为复杂,目前要通过人工方法来首先调整探头中心距和

人工判断变型波的位置,而智能判别将是下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] GANG Tie, CHI Da-zhao. Novel approach to the enhancement of ultrasonic TOFD B-scan image for the measurement of weld crack[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(1): 87-93.
- [2] CHARLESWORTH J P, TEMPLE J. Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction[M]. 2nd ed. US: Research Studies Press Ltd., 2001.
- [3] 迟大钊, 刚 铁, 姚学英. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. *焊接学报*, 2011, 32(2): 25-29.
- [4] 盛朝阳, 钢 铁, 迟大钊. 基于分水岭的超声 TOFD 检测图像分割[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 35-40.
- [5] 强天鹏. TOFD 技术的检测盲区计算和分析[J]. *无损检测*, 2008, 30(10): 738-741.
- [6] 张 锐, 万明习. 超声衍射一回波渡越时间方法焊缝裂纹原位定量无损估计[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(5): 54-57.
- [7] CHI Da-zhao, GANG Tie, GAO Shuang-sheng. Background removal and weld defect detection based on energy distribution of image[J]. *China Welding*, 2007, 16(1): 14-18.
- [8] 迟大钊, 钢 铁, 姚英学, 等. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. *焊接学报*, 2011, 32(2): 25-28.
- [9] BASKARAN G. Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique[J]. *NDT&E International*, 2006(39): 458-467.
- [10] 孙忠波, 郑红霞, 张 平. TOFD 检测中借助变型波确定缺陷偏心距及缺陷精确深度的探讨[J]. *无损检测*, 2010, 32(7): 500-508.

[编辑: 洪炜娜]

(上接第 958 页)

参考文献(References):

- [1] 张和明, 柯映林, 程耀东. 参数曲面与平面求交的一种新方法[J]. *工程图学学报*, 1995(2): 31-37.
- [2] 张和明, 张玉云, 熊光楞, 等. 参数曲面与平面的精确求交及其应用[J]. *机械工程学报*, 1997, 33(5): 31-36.
- [3] 吕晓倩, 赵玉刚, 周海安. 空间曲面与平面交线的一种插补算法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2008(3): 13-15.
- [4] ROY U, DASARI R. Implementation of polygonal algorithm for surface-surface intersections[J]. *Computers Industry Engineering*, 1998, 34(2): 399-412.
- [5] 马 翔, 周儒荣. 自由曲面与平面的一种分割、跟踪求交方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 1994, 26(1): 75-79.
- [6] 郑立垠, 张 丽, 张云鹏. 细分曲面求交线计算方法的研究[J]. *微计算机应用*, 2008, 29(1): 78-81.
- [7] 余正生, 李启炎, 肖少拥, 等. 一种直线与隐式曲面求交的方法[J]. *工程图学学报*, 2000, 21(3): 20-23.
- [8] ROTH S D. Ray casting for modeling solid[J]. *Computer Graphics & Image Process*, 1982, 18(2): 109-144.
- [9] 余正生, 楚广琳. 一种跟踪隐式曲面交线的算法[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(7): 2235-2237.
- [10] 宋宏勋, 韩 毅, 吴初娜. 一种基于等值线法的 NURBS 曲面与平面的求交算法[J]. *数字技术与应用*, 2011(7): 103-105.
- [11] 孙殿柱, 孙永伟, 田中朝, 等. 三角网格曲面模型快速求交算法[J]. *北京工业大学学报*, 2012, 38(8): 1121-1124.
- [12] 孙殿柱, 康新才, 李延瑞, 等. 三角 Bézier 曲面快速求交算法[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 89-94.
- [13] PIEGL L. On NURBS: a survey [J]. *IEEE Computer Graphics & Application*, 1991, 11(1): 55-71.
- [14] 隆 强, 谢延敏, 杨 川. 基于 Foleg 参数法反算三次 NURBS 曲线的算法研究[J]. *机械*, 2012, 39(7): 5-8, 40.

[编辑: 洪炜娜]