

## 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\*

张锐 万明习

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

Cao Wenwu

(Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)

**摘要** 提出结合衍射渡越时间方法和脉冲回波方法的超声波焊缝裂纹原位检测方法,对裂纹缺陷的位置与尺寸参数进行了定量无损估计。克服了衍射渡越时间方法难以对近焊件表面裂纹缺陷进行检测的弱点,也避免了为估计裂纹位置而进行的 $x$ 轴扫描,提高了对焊缝的检测效率。分析了影响方法分辨率和准确度的各种因素,并采用中心频率为15 MHz的检测超声波对钢板焊缝中不同位置和尺寸的裂纹进行了检测,试验结果证实该方法能够准确估计尺寸小到2 mm的焊接裂纹。

**关键词:** 焊接 超声波 定量无损估计 裂纹 衍射—渡越时间方法

**中图分类号:** T455

### 0 前言

长期以来,对由于疲劳、焊接操作等原因造成的焊缝裂纹的位置和尺寸的无损检测一直是焊接领域的一个重要研究课题。目前最常用的检测方法包括X射线方法、电磁检测方法和超声波检测方法。受方法原理的限制,X射线检测方法对于微小裂纹缺陷的检测不很灵敏,而电磁检测方法极大地受到检测深度的限制。超声波方法是一种方便、价廉且具有应用潜力的检测方法,而且由于不必象传统的X射线方法那样在检测时要求人员撤离,因而在出厂检查和原位检测时不影响生产的连续进行,极大提高了检测效率和应用范围。但是由于传统的反射式超声波受主观因素影响很大,对于裂纹位置和尺寸的估计也不够精确。尤其是在裂纹缺陷的方法几乎垂直于检测表面的情况下,反射式超声波方法难以精确检测裂纹的位置和尺寸<sup>[1,2]</sup>。

随着超声波换能器技术、超声波焊接检测理论和现代信息处理技术的发展和运用,针对不同的问题产生了许多新的超声波检测方法和新技术,目前部分已达到定量检测的水平。超声衍射渡越时间方法即是其中的一种,可以对垂直于被测表面的层状缺陷和裂缝进行检测,并可精确确定缺陷高度,同时使得可检出率大大提高<sup>[3-6]</sup>。从这一点上看,超声衍

射渡越时间方法优于X射线方法其他传统脉冲回波法。并且,对于厚度在25 mm以上的工件,检测速度和费用远低于X射线方法。即使在野外或200℃以上的高温下仍可正常工作。该方法的主要不足在于对接近材料表面的缺陷不敏感,而且为确定裂纹位置,采用 $x$ 方向的扫描,降低了检测效率。

针对这些问题,本文提出结合脉冲回波方法和衍射渡越时间方法的超声原位检测方法对钢板焊缝中的裂纹进行了定量估计,可以免去以往使用衍射渡越时间方法时采用的 $x$ 轴扫描,大大节省了检测时间,并克服了该方法对接近材料表面的缺陷不敏感的缺点。试验结果与理论符合得非常好。

### 1 方法

#### 1.1 衍射渡越时间方法

图1为超声衍射渡越时间方法的示意图。图2中, $T_1$ 和 $T_2$ 分别是用作发射脉冲超声波和接收回波信号的斜楔式超声波换能器。斜入射的超声波激励被测焊件并在焊件是传播,如果焊件焊接良好,接收换能器将接收到沿焊件表面方向传播的直达波和从焊件底面反射的超声波。而当焊件中存在裂纹缺陷时,在直达波和反射波传播的同时,入射超声波与裂纹作用,将向四周发射几种不同类型的超声波。图中2号波和1号波分别是入射和反射超声波,同时入射超声波在裂纹尖端会发生衍射现象,产生如图所示的3号波和5号波,4号波是在裂纹另一侧由3号波和5号波合成产生的透射波,不同于传统意义上的超

\* 国家自然科学基金和美国 Office of Naval Research (Grant: N00014-93-1-0340)资助项目。19990517收到初稿,19990726收到修改稿

声透射波。这种非常微弱的衍射波信号经过放大、滤波等预处理,可以进一步分析,得到裂纹的位置和尺寸信息。从时间域上来看,由于直达波的传播路径最短,所以最先到达,底面反射波恰恰相反,而3号和5号衍射波必定在这两种波之间到达。



图1 超声波衍射渡越时间方法示意简图

### 1.2 x轴方向扫描裂纹位置及尺寸定征方法

为确定裂纹的位置和尺寸,必须得到裂纹上端和下端的位置信息。图2所示为裂纹位置及尺寸定征方法示意图。图2中 $d_1$ 、 $d_2$ 分别为裂纹尖端和两换能器之间距离。

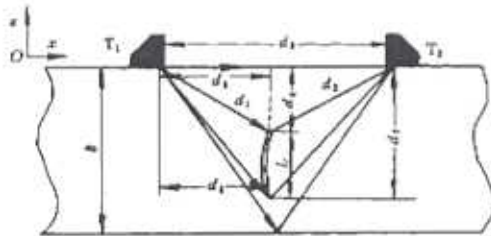


图2 裂纹位置及尺寸定征方法示意图

由图2,直达波、底面反射波和3号衍射波的到达时间分别由下式决定

$$t_1 = \frac{d_3}{c} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{\delta^2 + (d_3/2)^2}}{c} \quad (2)$$

$$t_3 = \frac{\sqrt{d_1^2 + d_2^2} + \sqrt{d_1^2 + (d_3 - d_2)^2}}{c} \quad (3)$$

式中  $d_3$ ——两换能器之间距离且保持不变  
 $\delta$ ——焊件厚度  
 $d_4$ ——裂纹上尖端和焊件上表面的距离  
 $d_5$ ——裂纹上尖端垂直位置离 $T_1$ 换能器的距离  
 $c$ ——超声波速度

经过简单的推导,可以知道在裂纹尖端深度一定的前提下,当 $d_5$ 等于 $d_3$ 的一半时, $d_1 + d_2$ 取得最小值,即意味着3号波的到达时间最小。基于这一分析,在检测裂纹位置时,可以沿正 $x$ 或负 $x$ 方向平移 $T_1$ 和 $T_2$ 两换能器,选择的依据是使3号波到达时间变小,当3号波到达时间最小时,就意味着裂纹尖端

正好处于两换能器的中间位置。由这时3号波到达的时间 $t_3$ ,可以决定裂纹尖端的深度

$$h = \sqrt{(ct_3/2)^2 - (d_3/2)^2} \quad (4)$$

同样地,可以使用上述方法确定裂纹下尖端的位置。这样,裂纹的尺寸可由下式表达

$$L = \sqrt{(d_6 - d_5)^2 + (d_7 - d_4)^2} \quad (5)$$

式中  $d_6$ ——裂纹下尖端垂直位置离 $T_1$ 换能器的距离

$d_7$ ——裂纹下尖端和焊件上表面的距离

### 1.3 结合脉冲回波法的裂纹位置及尺寸定征方法

上述利用在 $x$ 轴方向扫描换能器确定裂纹位置和尺寸的方法的主要缺点在于需要一套精密 $x$ 轴方向扫描机械装置。而且在使用渡越时间方法对在 $y$ 方向上焊接的焊件进行扫描检测的时候,为确定裂纹位置和尺寸进行的 $x$ 轴扫描将在很大程度上延缓检测时间,降低检测效率。为解决此问题,本文提出采用结合脉冲回波方法的改进渡越时间方法对裂纹的位置和尺寸进行定征,无需两个超声波换能器沿 $x$ 轴进行扫描。

仍然沿用图2的示意图,采用常规渡越时间方法可以获得 $t_1$ 和 $t_3$ ,进一步由式(1)和式(3)可以求得 $d_3$ 和 $d_1 + d_2$ 的长度。如果 $T_1$ 超声波换能器是发射接收式换能器,便可以由下式同时确定 $d_1$ 的长度

$$d_1 = ct_4/2 \quad (6)$$

式中  $t_4$ ——裂纹尖端的衍射回波到达时间

结合式(1)和式(3),可以解出 $d_5$ 和 $d_4$ ,如下式所示

$$d_5 = (d_1^2 + d_3^2 - d_2^2)/2d_3 \quad (7)$$

$$d_4 = \sqrt{d_1^2 - d_5^2} \quad (8)$$

## 2 试验

### 2.1 试验系统和样品

试验测量系统如图3所示。将一对精密匹配、中心频率为15 MHz的纵波宽带斜楔式压电换能器 $T_1$ 和 $T_2$ 放置于待测焊件的表面并位于焊缝的两侧,换能器与试件之间用超声耦合剂耦合。两个换能器之间的距离保持不变,并由一套精密机械控制装置控制,可以沿平行于焊缝的 $y$ 轴方向进行扫描。测量系统在计算机的控制下,触发脉冲发生器CTS—5产生尖脉冲激励发射换能器,CTS—5将接收换能器收到的信号和发射换能器接收的回波信号经内部放大器预放后送至TDS—724C型数字示波器进行采样,示波器的采样频率 $f_s = 100$  MHz是预先设定的。

为了减小随机噪声对试验结果的影响,数字示波器进行持续 5 min 的多次采样,并且一边采样,一边将采样信号进行平均。最后,平均后的采样信号通过 GPIB(IEEE-488)总线送入计算机进行分析。为避免温度变化对声波信号的影响,整个试验在恒温环境中进行,温度控制在  $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

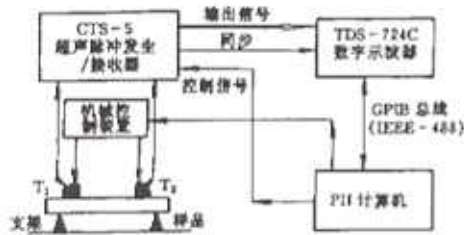


图3 试验测量系统原理框图

试验的测试样品由美国宾夕法尼亚州立大学材

料研究实验室制作,采用本文方法进行了测试。测试样品为钢质焊件,焊缝处特意制作了不同位置与尺寸的裂纹,其形状如图4所示。在使用本文方法对中样品测试之后,对样品进行破坏性检测,以获取样品中裂纹位置和尺寸的参考值,如表1所示。



图4 焊件形态结构图

- $l$ ——样品长度
- $b$ ——样品宽度
- $h$ ——样品高度
- $d_4$ ——裂纹上尖端与样品长度方向上中点之间的距离
- $d_5$ ——裂纹下尖端与样品长度方向上中点之间的距离
- $d_6$ ——裂纹下尖端与样品宽度方向上一边之间的距离

表1 试验样品各参数值参考值

样品号	$l/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$d_4/\text{mm}$	$d_5/\text{mm}$	$d_6/\text{mm}$	$d_7/\text{mm}$	$d_8/\text{mm}$
1	300.0	150.0	20.0	10.4	15.1	15.0	14.0	90.0
2	300.0	150.0	30.0	10.0	20.0	23.0	16.0	90.0
3	400.2	200.0	40.0	15.5	30.0	33.5	22.1	100.0

## 2.2 结果与讨论

如图5所示为对样品1检测时,由接收换能器

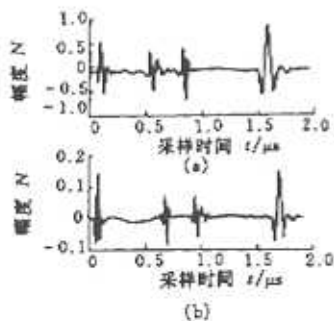


图5 接收换能器接收到的信号和发射换能器接收的脉冲回波信号

接收到的信号和由发射换能器接收的脉冲回波信

表2 衍射一回波方法与  $x$  轴扫描方法测量结果对比

样品号	衍射一回波方法				$x$ 轴扫描方法			
	$d_4/\text{mm}$	$d_5/\text{mm}$	$d_6/\text{mm}$	$d_7/\text{mm}$	$d_4/\text{mm}$	$d_5/\text{mm}$	$d_6/\text{mm}$	$d_7/\text{mm}$
1	10.7	14.7	15.2	14.9	10.6	15.1	15.5	14.4
2	10.5	19.9	23.1	16.2	10.1	20.1	23.5	16.6
3	15.2	30.7	33.1	22.2	15.5	30.4	32.9	22.3

由表2可知,使用衍射一回波方法对裂纹进行定征可以获得与  $x$  轴扫描方法具有近似同样的准确度,而且由于避免了  $x$  轴扫描,可以在很大程度上提高检测效率。另一方面,由于结合了脉冲回波

号,图6所示为对样品1进行  $y$  轴扫描时获得的扫描图像。



图6 一号样品  $y$  轴扫描衍射波越时间方法图像

采用本文方法,对三种样品定征的结果如表2所示,为便于比较,也同时给出同样样品使用  $x$  轴扫描方法测量的结果。

方法,在裂纹接近待测样品表面的情况下,衍射信号淹没在直达信号之中。在这种情况下,可以近似认为  $d \approx d_1$ 。由这种近似所造成的误差直接与衍射波越时间方法的深度定征阈值有关,所以必须研究影

响改进衍射渡越时间方法对裂纹位置和尺寸参数定征的主要因素。

影响改进衍射渡越时间方法对裂纹位置和尺寸参数定征的主要因素有材料衰减,换能器中心频率及带宽,两换能器之间的距离,材料表面粗糙度和材料内部晶粒散射程度,以及裂纹方向等。检测表面的粗糙度使噪声增大,材料衰减使衍射信号减小,导致信噪比减小,从而影响对  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  的判断。两传感器之间的距离越小,材料衰减对衍射信号的影响越小,信噪比越大。但在保证信噪比的前提下,适当增大有利于  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  的分离。换能器中心频率越高,带宽越大,入射信号和接收信号越窄,越有利于对  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  的判断,但带宽过大会降低信噪比。裂纹的反射和透射信号可能影响衍射信号,在裂纹完全垂直材料表面的情况下,它们对衍射信号的影响最小。

为使衍射信号与直达波分离开来,必须满足下面的公式

$$2\sqrt{d_1^2 + (d_3/2)^2} - d_3 > n_c/f \quad (9)$$

式中  $n$ ——接收换能器接收的直达波周期数

对于纵波声速为 5.8 km/s 的钢板,如果中心频率为 15 MHz 的换能器接受的直达波为 5 个周期,两换能器之间距离为 30 mm,那么裂纹的深度必须大于 4 mm。也即意味着当裂纹在离材料表面 4 mm 深度范围以内,距离的测量误差小于 0.8 mm,这一分辨能力可以对弥补焊接裂纹缺陷起到指导性的作用。

### 3 结论

本文提出结合脉冲回波方法和衍射渡越时间方法的超声波原位检测方法,弥补了原有两种方法各自的不足,对钢板焊缝中裂纹缺陷的位置与尺寸参数进行了定量无损估计。克服了衍射渡越时间方法难以对近焊件表面裂纹缺陷进行检测的弱点,也避免了为估计裂纹位置而进行的  $x$  轴扫描,提高了对焊缝的检测效率。文章分析了影响方法分辨率和准确度的各种因素,并采用中心频率为 15 MHz 的检测超声波对钢板焊缝中不同位置和尺寸的裂纹进行了检测,试验结果证实该方法能够准确估计尺寸小到 2 mm 的焊接裂纹。

### 参 考 文 献

- 1 Methods for Ultrasonic Examination of Welds, 1986, BS 3923 Part 1
- 2 Doyle P A, Scata C M. Crack depth measurement by ultrasonia. Ultrasonics, 1978, 16(4): 164 - 169
- 3 Silk M G. The transfer of ultrasonic energy in the diffraction technique for crack sizing. Ultrasonics, 1979, 17(5): 113 - 121
- 4 Ogilvy J A, Temple J A G. Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection. Ultrasonics, 1983, 21(11): 259 - 260
- 5 Silk M G. An evaluation of the performance of the TOFD technique as a means of sizing flaws, with particular reference to flaws with curved profiles. INSIGHT, 1996, 38(4): 280 - 287
- 6 Ismail M P, Muhammad A B. Defect sizing by ultrasonic ANDSCAN. INSIGHT, 1998, 40(11): 769 - 771

### IN SITU QUANTITATIVE NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF THE WELDING CRACK USING ULTRASONIC TIME OF FLIGHT OF DIFFRACTION-ECHO METHOD

Zhang Rui Wan Mingxi

(Xi'an Jiaotong University)

Cao Wenwu

(Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)

**Abstract** In conjunction of the time-of-flight diffraction method and the pulse-echo method, an in-situ ultrasonic method for quantitative non-destructive evaluation of the welding crack's position and sizing is presented. The deficiency of the time-of-flight diffraction method, the poor sensitivity for near-surface crack, is improved by pulse-echo method, and the demand of the  $x$ -axes scan can be omitted. The reason for the error, the factors which influence the resolution and accuracy of the method are analyzed. Using a pair of broadband longitudinal wave with 15MHz center frequency transducers, The position of a crack, with the size of 2 mm of the steel welding plate can be characterized accurately.

**Key words:** Welding Ultrasonic QNDE Crack

Time of flight diffraction (TOFD)

**作者简介** 张锐,男,1973年出生。1999年获博士学位,研究领域包括:超声波检测与成像理论及方法,层状信息、功能与智能复合结构超声导波、散射波传播理论及其声学、力学和界面特性无损定征。