

文章编号:1674-2869(2014)010-0042-05

# 超声波衍射时差法检测的有限元仿真

陈汉新,杨诗琪,蔡洪涛,刘 岑

武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

**摘 要:**超声波检测是常用的无损检测方法,因超声波传播过程复杂,含有各种噪声信号,使缺陷衍射信号夹杂在大量噪声中难以被辨识出来,导致检测结果抽象.为了更好地应用超声波衍射时差法(TOFD)检测技术,对超声波衍射时差法的机理进行了有限元分析.首先,利用 TOFD 实验检测了带有人工缺陷的焊接钢板,提取了带有噪声的检测信号.其次,用 ANSYS 软件模拟仿真了超声波在工件中的传播过程,建立了焊接钢板和人工缺陷的有限元模型,分析确定了缺陷衍射信号.最后,对比了仿真结果与实验结果,发现仿真结果符合实际检测情况.结果表明超声波有限元仿真方法可以用于缺陷的定量与定位分析,为实际检测复杂的工况提供了可靠的评判依据.

**关键词:**超声波衍射时差法检测;有限元模拟;超声波仿真

**中图分类号:**TB551

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.010.009

## 0 引 言

超声波检测技术最初应用于医疗领域,它的无辐射,零伤害,无负作用对检测人体疾病带来了许多好处<sup>[1]</sup>.超声波 TOFD(Time of Flight Diffraction)技术——衍射时差法是一种依靠从待检试件内部结构(主要是指缺陷)的“端角”和“端点”处得到的衍射能量来检测缺陷的方法,用于缺陷的检测、定量和定位.但是由于 TOFD 技术是最近几年才兴起的一项还不够成熟完善的技术,对于缺陷的定量、定位还存在许多不足之处.所以对于工业中焊缝缺陷的检测,往往在超声波检测之后辅助以射线检测来完成缺陷的最后判定.本文提出了用数值仿真超声波在工件中的传播过程,这样将看不见,摸不着的超声波以具体形式表现出来,有助于检测人员弄明白超声波在工件焊缝中碰到缺陷是如何变化衍射的.如果能将数值仿真作为一种缺陷辅助判定,对缺陷的定量和定位分析会是一个行之有效的方法.

## 1 超声波衍射时差法检测技术原理及焊缝检测实验

### 1.1 超声波的衍射现象

衍射是波在传播过程中与传播介质的交界面

发生作用而产生的一种有别于反射的物理现象<sup>[2]</sup>.当超声波在遇到障碍物的时候,如果此障碍物的大小接近或小于一个波长,超声波就会绕过此障碍物继续前行.在超声波检测中,当超声波遇到工件内的缺陷时,会使工件内的缺陷产生振动,缺陷上的每一点都产生一个球面子波,子波相互叠加,向各个方向传播.这就是衍射现象<sup>[3]</sup>.

### 1.2 超声波 TOFD 技术原理

TOFD 技术作为一种较新的超声检测技术,它不同与以往的常规超声检测利用缺陷的反射波的幅值和位置来判定缺陷的位置和大小的方法,而是依赖于缺陷处产生的衍射波被接收探头检出就能确定缺陷的存在,它是基于超声波衍射原理进行检测的无损探伤方法<sup>[4]</sup>.

TOFD 检测采用两枚频率、尺寸、发射角度都相同的探头,一发一收.当发射探头在工件一侧呈一定角度发射超声波的时候,因为超声波在遇到小于其波长的障碍物的时候都会发生衍射现象,所以当超声波遇到工件内的缺陷时会发生衍射,衍射波被另一侧的接收探头所接收,达到缺陷被检出的目的.使用一发一收式的两组探头是因为这样可以避免镜面反射信号对衍射波信号的干扰,还可以易于大范围扫查,快速接收大量的缺陷

收稿日期:2014-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(61273176)

作者简介:陈汉新(1969-),男,湖北武汉人,教授,博士.研究方向:机械故障诊断、无损检测和系统状态检测.

衍射信号,如图 1 所示.

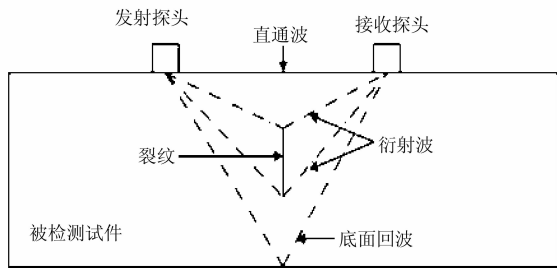


图 1 TOFD 检测原理

Fig. 1 TOFD detection principle

当发射探头发射超声波,最先被接收探头所接收的是沿工件表面传播的直通波,所以在超声波 A 扫波形图和灰度图中,如图 2 所示,最先看到的波应该是直通波.接着,超声波在工件内传播,碰到缺陷后会产生衍射波,如图 1 所示裂纹缺陷上段和下端都会产生衍射波,上端衍射波和下端衍射波依次被接收探头所接收,如图 2 中的 A 扫波形图和灰度图所示.最后,当超声波传播到工件底面产生反射,底面回波最后被接收探头所接收,在 A 扫视图中表现为最后一个波形图.

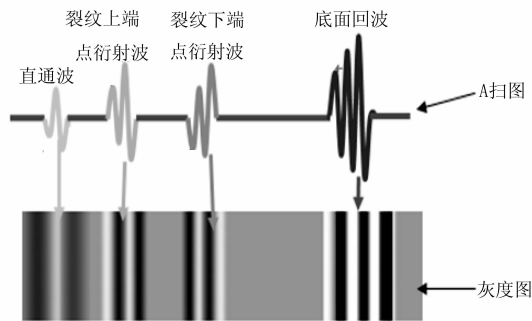


图 2 TOFD 检测结果中的 A 扫视图和灰度图

Fig. 2 A-scan chart and gray scale in TOFD detection results

1.3 焊接钢板的检测实验

实验采用一块材质为 Q235,规格为 300×300×16 的带有人工缺陷的焊接钢板.焊缝中带有长度为 23 mm,深度为 5 mm 的一段夹渣.为了验证超声波 TOFD 技术对于实验选用的被测工件缺陷检出的有效性,分别做了两组实验.

首先用易于明确夹渣位置的相控阵扇形扫查进行检测.实验一选用的 5L64 探头的频率为 5.0 MHz,总共带有 64 个呈线性阵列的压电晶片.调整好设备仪器,进行检测,结果如图 3 所示.

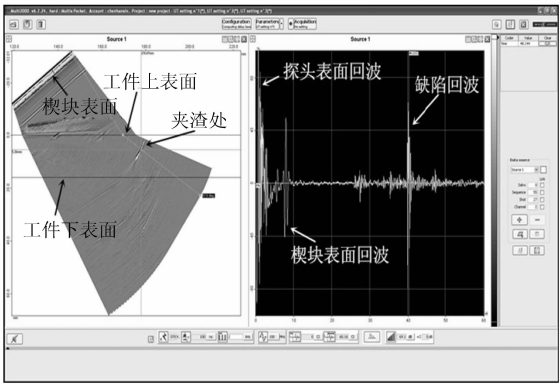
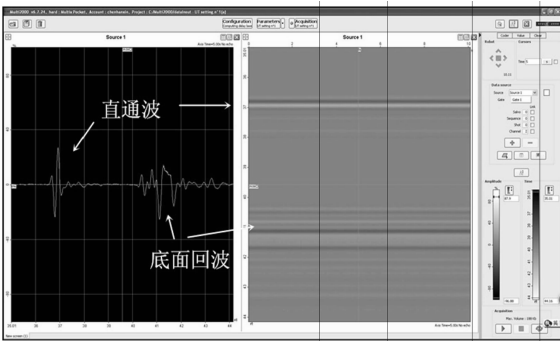


图 3 相控阵扇形扫查结果

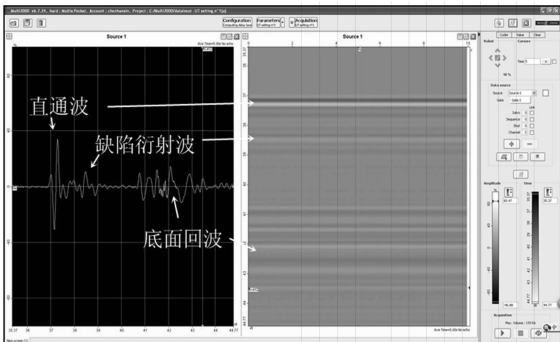
Fig. 3 Phased array sector scan results

图 3 中左边是 B 扫视图,可以清晰地在我被测工件内 5 mm 左右处发现一段缺陷,这正跟人工做出来的 5 mm 深的夹渣缺陷相契合.从右边的 A 扫视图中可以看到 3 处明显起伏的波,拉动指针对应着 B 扫视图可以确定为探头表面回波、楔块表面回波和缺陷回波.除此之外并未发现其它明显起伏的波.至此可以为下面的 TOFD 实验做实验对照:夹渣存在于 5 mm 深的位置,并且此处没有其它缺陷,只可能有单一的反射或衍射波出现.

实验二选用 5L32 探头的频率为 5.0 MHz,总共带有 32 个呈线性阵列的压电晶片.连接仪器设备并设置好系统进行 TOFD 检测.得到的实验 A 扫视图与灰度图(见图 4).



(a)



(b)

图 4 TOFD 扫查结果

Fig. 4 The TOFD scan results

如图 4 所示,在无夹渣处检测,只能在 A 扫图和灰度图中观察到表面直通波和底面回波. 移动探头到有夹渣处检测,会发现在直通波和底面回波之间多出了一小段波形,但是由于缺陷衍射波信号比较微弱,夹杂在一些噪音中难以明确分辨到底哪一段波为缺陷衍射波. 这样使得检测人员对于缺陷的定位、定量分析带来了一定的困扰.

## 2 超声波有限元仿真

为了更进一步确定实验测得的那一段在直通波和底面回波之间产生的波形是缺陷回波. 本文利用 ANSYS 软件模拟超声波在被测工件内的声场.

### 2.1 有限元仿真

所有的物理自然现象都可以凭借与之相关的物理定理,借助相关量的代数方程、微分方程、积分方程等予以描述. 这些控制方程式的推导需要用精确的分析方法对它们进行求解,这时近似方法就很好的解决了这一问题,有限单元法就是用近似解代替原始解的一种近似计算方法<sup>[5]</sup>. 在结构力学中最先运用了有限元方法,后来随着科技的发展,有限元方法慢慢被用于流体运动、工程结构、传热和电磁等连续介质的力学分析. 将求解域离散划分为一个个单元来简化运算,是有限元方法的核心思想. 有限元的核心思想是将区域离散化,划分成为单元格,单元格划分的越细,则离散化的近似程度越好,使有限元仿真模型趋于接近实际结构,让工程结构设计既安全又经济合理,因此,有限单元法是大型复杂结构或多自由多体系分析的有力数学工具<sup>[6]</sup>.

无损检测中的超声波检测就是利用超声波在固体介质中传播的物理规律来达到检测目的. 超声波从本质来说也是属于弹性波,符合弹性波在固体中传播的一般规律,因此有限单元法为解决超声波在固体介质中传播的分析提供了一种有效的工具或方法<sup>[7]</sup>.

### 2.2 超声波在被测工件内的声场仿真

在 TOFD 超声检测实验中激发了 32 组压电晶片中的 8 组,并通过施加特定的时间延迟脉冲来控制发射声束的角度,因此在建模仿真中,为了模拟 70°的声束偏转角度,在 8 处节点上施加相应的延迟时间的载荷.

时间延迟法则是基于惠更斯原理<sup>[8]</sup>,相关的数学关系如方程:

$$\sin\vartheta = \frac{V\Delta t}{d}$$

其中  $\vartheta$  为声束角度,  $V$  为声束速度,  $\Delta t$  为相邻晶片间的时间延迟,  $d$  为相邻晶片的间距. 超声波纵波速为 6 300 m/s. 根据探头里晶片尺寸,由上述公式可以计算出相邻节点处的延迟时间为 0.212  $\mu$ s. 也就是依次延迟 0.212  $\mu$ s 分别在 8 处节点上施加载荷脉冲. 根据相关文献,仿真波形的数学函数式为

$$Y_i(t) = \begin{cases} \cos(2\pi ft)[1 - \cos(\frac{2\pi f}{N}t)], & 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & \end{cases}$$

其中,  $Y$  表示幅值,  $f$  表示探头的频率,  $N$  表示脉冲波所包含的波的个数. 根据实验室衍射探头规格,  $f=5$  MHz,  $N=3$ , 因此数学表达式为

$$Y = \cos(2 \times 5 \times 0.212 \times \pi \times t)[1 - \cos(2\pi \times 5 \times 0.212 \times \frac{t}{3})], 0 < t < 3(5 \times 0.212)$$

第一处脉冲载荷的方程为

$$Y_i = \begin{cases} \cos(2\pi ft)[1 - \cos(\frac{2\pi f}{3}t)], & 0 \leq t \leq 0.6 \mu s \\ 0, & 0.6 \mu s < t < 50 \mu s \end{cases}$$

第二处脉冲载荷的方程为

$$Y_i = \begin{cases} 0, & 0 < t < 0.212 \mu s \\ \cos(2\pi ft)[1 - \cos(\frac{2\pi f}{3}t)], & 0.212 \mu s \leq t \leq (0.6 + 0.212) \mu s \\ 0, & (0.6 + 0.212) \mu s < t < 50 \mu s \end{cases}$$

第三处脉冲载荷的方程为

$$Y_i = \begin{cases} 0, & 0 < t < 0.212 \times 2 \mu s \\ \cos(2\pi ft)[1 - \cos(\frac{2\pi f}{3}t)], & 0.212 \times 2 \mu s \leq t \leq (0.6 + 0.212 \times 2) \mu s \\ 0, & (0.6 + 0.212 \times 2) \mu s < t < 50 \mu s \end{cases}$$

依次类推<sup>[9]</sup>.

由于被测工件内的夹渣呈不规则几何形状,不规则几何形状很难在 ANSYS 中建模,而且计算机速度有限,故将其简化为规格为 1×1 mm 的矩形剖面. 建模完成后施加节点载荷并开始仿真声场,截取了声场走向的 4 个状态,如图 5 所示.

如图 5 所示,白色部分代表的是被测工件的剖面图,中心黑色矩形代表的是夹渣剖面图,绿色波束代表的是超声波在被测工件内的走向. 如图 5(a)可以看到超声波呈半圆状从上表面发射,正要抵达夹渣处. 图 5(b)显示夹渣处产生了衍射回波. 图 5(c)中夹渣处产生的衍射回波正要到达上表面接收探头处. 图 5(d)显示的是超声波正要到达工件底面.

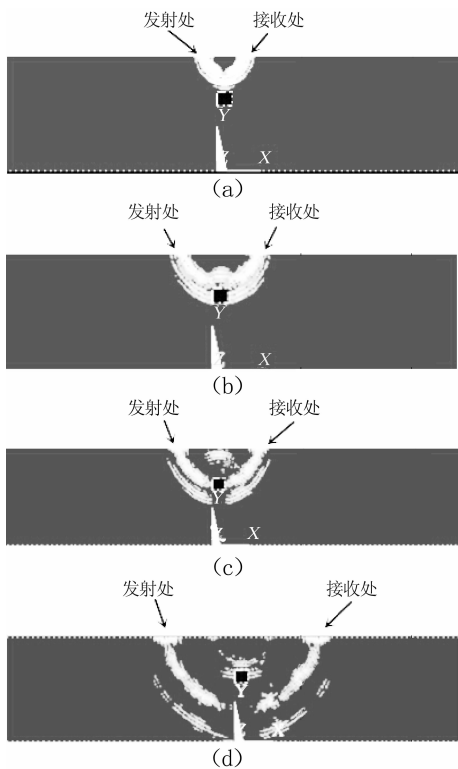


图 5 工件内声场传播过程

Fig. 5 Propagation of the sound field within the sample

3 实验结果与仿真结果的对比分析

提取实验 A 扫视图与仿真 A 扫视图对比,如图 6 所示.

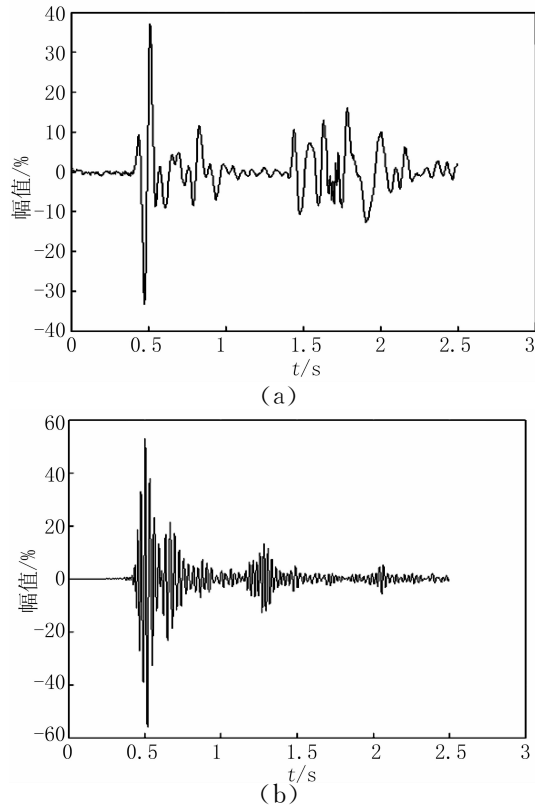


图 6 实验与仿真结果的对比图

Fig. 6 The comparison of the simulation results and the experiment results

通过简单的理论计算,计算了各类波到达接收探头的理论时间值,并归纳仿真、实验数据如表 1 所示<sup>[10]</sup>.

表 1 实验与仿真结果的对比图

Table 1 The experimental and simulation results of the comparison chart

	直通波 / $\mu\text{s}$	误差 /%	缺陷衍 射波/ $\mu\text{s}$	误差 /%
实验值	5.0	8.7	8.2	3.7
仿真值	5.1	10.0	7.5	-5.0
理论值	4.6	—	7.9	—

表 1 中分别就实验值、仿真值和理论值对直通波、衍射波、底面回波这三种波出现的时间进行了归纳并计算其误差,从表中数据可以看出基本误差都在 10% 范围以内. 考虑到有计算误差、试验误差、测量误差等因素的影响,可以认为仿真结果与实验结果较为贴近理论值,证明了实验检测的正确性和仿真方法的可行性. 因此,将有限元仿真作为缺陷检测的一种辅助手段是切实可行的.

4 结 语

通过有限元的仿真辅助于超声波 TOFD 的检测可以有效的帮助辨识 A 扫视图中的各类波形,可以准确地在含有大量噪音的波形图中辨识出不明显的缺陷衍射波. 由于实际工业检测中工况复杂,即使经验丰富的检测人员也可能在检测中出现漏查、误查等现象,有限元仿真可以将声场具体化,可视化. 不仅能够给学习人员提供直观的认识学习,更能够在实际检测中针对复杂的检测工况提供评判佐证,其意义深远.

致 谢

感谢中国国家自然科学基金(61273176),教育部新世纪优秀人才支持计划(201010621237),湖北省教育厅主要项目(Z20101501)和教育部留学回国人员科研启动基金(20091001)相关负责人员的大力支持.

参考文献:

[1] 刘晓睿. 超声相控阵技术检测和评价方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2012.  
LIU Xiao-rui. Ultrasonic phased array technology to detect and evaluation method [D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2012. (in Chinese)

[2] 伊新. TOFD 检测技术基本原理及其应用探讨[J]. 中国化工装备, 2008, 10(2) : 25-28.

- YI Xin. The basic principle of TOFD detection technology and its application [J]. China Chemical Equipment, 2008, 10(2): 25-28. (in Chinese)
- [3] 杨植宗, 段永法, 刘洋, 等. 光的干涉与衍射现象的物理本质[J]. 高斯理科学刊, 2011, 1(31): 57-60.
- YANG Zhi-zong, DUAN Yong-fa, LIU Yang, et al. Physical nature of light interference and diffraction phenomena[J]. Science of Gaussian, 2011, 1(31): 57-60. (in Chinese)
- [4] 迟大钊, 刚铁, 高双胜. 超声 TOFD 法检测信号相位识别技术[J]. 焊接学报, 2011(9): 17-20.
- CHI Da-zao, GANG Tie, GAO Shuang-sheng. Ultrasonic TOFD method to detect the signal phase recognition technology[J]. Welding Journal, 2011(9): 17-20. (in Chinese)
- [5] GINZEL E. Time-of-Flight Diffraction and Pulse Echo Line Scanning[J]. Materials Research Institute etc, 2000(6): 64-68.
- [6] 赵维涛, 陈孝珍. 有限元法基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009.
- ZHAO Wei-tao, CHEN Xiao-zhen. The base of finite element method [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [7] 肖开丰. 超声波在弹性固体传播的数值模拟及动态光弹的实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- XIAO Kai-feng. Experimental study of ultrasound propagation in the numerical simulation of elastic solid and dynamic light bomb [D]. Taiyuan: North University, 2008. (in Chinese)
- [8] KRAUTKRAMER J, KRAUTKRAMER H. Ultrasonic testing of materials[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [9] 陈汉新, 刘岑. 检测与诊断齿轮裂纹故障的一种方法[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(9): 53-58.
- CHEN Han-xin, LIU Cen. A method for detection and diagnosis of gear crack fault[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(9): 53-58. (in Chinese)
- [10] 陈汉新, 余刚, 杨诗琪, 等. 焊缝的超声波检测与有限元仿真[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(5): 53-58.
- CHEN Han-xin, YU Gang, YANG Shi-qi, et al. Ultrasonic detection in weld with finite element analysis[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(5): 53-58. (in Chinese)

## Ultrasonic time of flight diffraction detection by finite element simulation method

CHEN Han-xin, YANG Shi-qi, CAI Hong-tao, LIU Cen

School of Mechanical and Electric Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract:** Ultrasonic testing is a generally used nondestructive testing method, the results of which are abstract because the complex transmission path of ultrasonic contains a variety of noise signals, and the defect signals mixing with a large number of noises are difficult to be identified. We investigated the ultrasonic mechanism of time of flight diffraction(TOFD) by finite element analysis for the better applications of ultrasonic detection technology. Firstly, the welding steel with the artificial defects was detected by TOFD method and the detection signals with the noise were extracted in experiments. Secondly, the propagation of ultrasound in artificial defect test block was simulated by ANSYS software and moreover the model of the finite element analysis was established to identify the defect diffraction signals accurately. Finally, the simulation results were compared with the experimental results, which showed the similarity of the values of simulation and actual detection. The research suggests that ultrasonic wave propagation simulation can be used for quantitative analysis and position to defects, which provides reliable judgment basis for the actual test of complex conditions

**Keywords:** time of flight diffraction detection; finite element model; ultrasonic simulation

本文编辑:陈小平