基于导波的储罐底板缺陷横波检测研究[*1]

赵钰龙[1], 王小刚[1,2], 于 灏[1]

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司焦化厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章针对储罐探伤中存在的问题, 提出使用横波探头激励超声导波对储罐底板进行无损检测。超声导波作为一种新型无损检测方法, 很大程度上解决了我国在储罐缺陷检测上存在的困难。文章解释了导波的基本概念, 分析了使用横波探头激励导波检测储罐底板的可行性, 确定了使用横波探头激励导波的参数和特性, 应用ANSYS做了导波储罐底板缺陷检测的有限元仿真模拟, 得出了使用横波探头可以激励出SH0模态导波, 并可以检测缺陷的结论。

关键词: 无损检测; 超声导波; 有限元分析
中图分类号: TG115.28 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2017)06-0055-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.06.019

Research on Shear Wave Detection of Tank Floor Defects Based on Guided Wave

ZHAO Yu-long[1], *WANG Xiao-gang*[1,2], *YU Hao*[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
2. *Coking Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: In the paper, aiming at the problems existing in the tank floor flaw detection, it is proposed to take nondestructive testing for tank floor by using shear wave probe exciting ultrasonic guided-wave. Ultrasonic guided wave as a new nondestructive testing method, has solved the difficulties in the detection of tank floor defects in China to a great extent. The paper explains the basic concept of guided waves, analyzes the feasibility of nondestructive flaw detection for tank floor by using shear wave probe exciting ultrasonic guided-wave, and determines the parameters and characteristics of using shear wave probe exciting ultrasonic guided-wave. ANSYS is used to make fem simulation of guided wave tank floor defect detection, and the conclusion that SH0 mode guided wave can be excited by using shear wave probe and the defect can be detected are obtained.

Key words: nondestructive testing; ultrasonic guided wave; finite element analysis

在现代工业领域, 石油、天然气是极为重要的能源, 是我国经济、工业的有力支撑。用来存储原油、燃气的大型石油、燃气储罐在工业生产和国家战略能源储备中应用广泛。国内石油、化工、航空、港口

* **收稿日期**: 2017-04-16
作者简介: 赵钰龙(1990-), 男, 北京市人, 在读硕士, 主要研究方向为无损检测。

中国知网 https://www.cnki.net

等企业拥有的容量为 5 000 m^3 以上的大型储罐数量超过 2 万台。在长时间的服役中，大型储罐受到所在地环境的影响以及罐内介质的冲刷容易产生腐蚀缺陷，进而导致结构失效，产生泄漏。储罐储存的物料多为易燃易爆有毒品，十分危险，其一旦失效往往会造成火灾、爆炸等事故，不仅会给传统能源产业带来不可估量的经济损失，而且可能会造成严重的人身伤亡事故和环境污染，威胁生产安全和生态和谐[1]。而且储罐体积大表面积大，传统检测成本需要几十万至数百万元，工期数十天至数月，价高效低，吞噬产业效益，阻碍行业发展。超声导波无损检测在满足检测精度和可靠性要求的前提下，可以进行在线检测，检测范围也大大提升，还可以做到不开罐检测储罐底板缺陷，大幅提高效率，保护了行业利益，更为重要的是保障了生命安全。

1 导波的基本概念

1.1 群速度与相速度

群速度 C_g 和相速度 C_p 是导波理论中的重要概念。群速度是指波包上具有某种特性的点的传播速度，是波群能量的传播速度[2]。相速度 C_p 是指波包上相位固定的一点传播方向的传播速度。群速度 C_g 和相速度 C_p 的意义可以通过波的叠加引出，方程表示成式(1)。

$$u = A\cos(kx - \omega t) \tag{1}$$

其中：u 为质点振动的位移；A 为振幅；k 为波数，$k = 2\pi/\lambda$，λ 为波长；ω 为振动的角频率；x 为波传播的位置矢量；t 为时间变量。

导波是一系列谐波的叠加，为了引出群速度 C_g 和相速度 C_p 的概念，所以这里只考虑两个谐波的叠加[3]，如式(2)：

$$u = A_1\cos(k_1\omega_1 t) + A_2\cos(k_2 x - \omega_2 t) \tag{2}$$

利用三角恒等式变换式(2)可以得到(3)。

$$u = 2A\cos\left(\frac{1}{2}\Delta k x - \frac{1}{2}\Delta\omega t\right)\cos(kx - \omega t) \tag{3}$$

其中：$\Delta k = k_2 - k_1$；$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$；$k = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$；$\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$。

式(3)表示调制波包的传播，它定义了两个速度，如式(4)与式(5)所示：

$$c_p = \frac{\omega}{k} \tag{4}$$

$$c_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk} \tag{5}$$

其中：c_p 为不同谐波的相位传播速度，称为导波的相速度；c_g 为谐波叠加后的波群传播的速度，称为导波的群速度。

超声导波是以群速度传播的，但是实际应用中往往只能得到导波的相速度，所以可通过式(6)得到导波的群速度。

$$c_g = \frac{c_p^2}{c_p^2 - (fd)\dfrac{dc_p}{d(fd)}} \tag{6}$$

其中：f 为导波频率；d 为板壁厚或板的厚度。

1.2 频散特性

频散是导波的一个重要特性。导波频散是指其相速度随频率变化而发生变化的特有现象。直观来看，频散使导波波包在时域上被拉长，在频域上被扩散。频散现象导致导波的能量分散在各个频率上，降低了主瓣频率的振幅，并且由于波速发生变化，使得波形相互叠加，给分析数据带来困难。在实际检测中，选择激励信号中心频率的理论依据是频散曲线。频散方程是超越方程，这类方程除去极少数情形外，都需要通过数值方法计算得出。通常根据实际检测的边界条件建立导波的特征方程，建立波数与频率间的关系。根据相速度、角频率与波数三者的关系，即可绘制出超声导波的频散曲线，如式(7)。

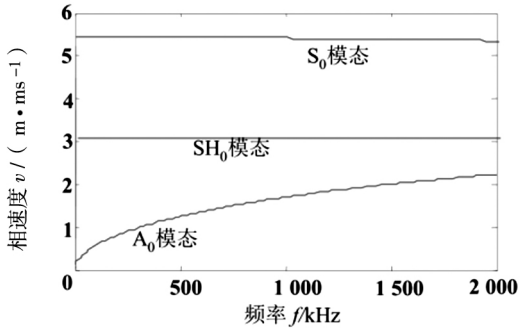
$$k = \frac{\omega}{c_p} = \frac{2\pi f}{c_p} \tag{7}$$

由式(4)可以看出，同一模态导波的相速度只与频率相关，相速度和群速度相关，而群速度是导波检测定位缺陷的关键。针对不同的检测范围和不同尺寸的板，应选用合适的导波模态和激励频率。导波的激发信号常具有一定的带宽，其中存在频散现象，也就是说导波信号的包络线将随传播距离的增加而变宽。并且如果对应模态导波频散现象越严重，那么激发信号的包络线也越容易变宽，同时信号峰值幅度衰减也更快，大大影响导波的检测的距离。从而对实际应用造成三个不利的结果—减小分辨率、减小幅度和减小检测距离。当用导波进行板检测时，由于板中导波模态比较复杂。因此为了尽量保持导波波包包络线不变，必须选用频散最小的中心频率模态导波，因此恰当的选择检测导波模态和激发频率是导波板检测中的重中之重。

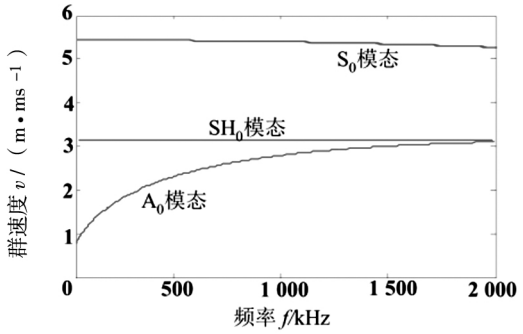
中国知网 https://www.cnki.net

2　确定导波激励参数

2.1　激励模态和频率的选择



（a）相速度



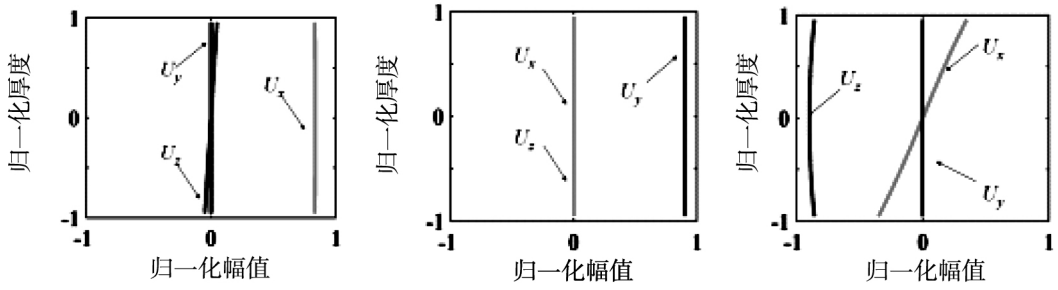
（b）群速度

图 1　群速度与相速度

如图 1 所示，由铝板的导波频散曲线可以看到，在 0 ~2 000 kHz 范围内有 SH 波与 S_0 波和 A_0 波，且在此频段的 SH 波只存在 SH_0 模态，其频散曲线基本为一条水平线，这就说明 SH_0 模态在此范围内几乎没有频散[4]。在此频率范围内 Lamb 波存在 S_0 模态与 A_0 模态。S_0 模态的频散曲线相对平缓，频散较小。而 A_0 模态的频散曲线在 0 ~1 500 kHz 范围内频散较大。频率为 500 kHz 时 SH_0 模态与 S_0 模态的频散极其微弱，这两种模态的波包在长距离传播过程中将保持其原有的形状。本文所模拟的横波直探头中心频率为 500 kHz。综上所述，横波直探头所激励出的信号可以满足检测储罐底板的基本要求。拟选择频率 500 kHz 作为激励频率。在 500 kHz 频率下，SH_0 模态理论群速度为 3 129.86 m/s，S_0 模态理论群速度为 5 427.18 m/s。

2.2　导波的波结构

为了验证 500 kHz，SH_0 模态适宜作为检测的频率与模态，对比如图 2 表示在 500 kHz 频率下 S_0 模态、SH_0 模态与 A_0 模态波结构图可以看出，横波直探头在板中可激励出 S_0 模态与 SH_0 模态，而很难激励出 A_0 模态[5]。由于 S_0 模态以 Ux 为主，所以当横波直探头偏振方向（与横波直探头接线头方向一致）沿 x 方向时，则可以在 x 方向上激励出 S_0 模态[6]，如图 3a；由于 SH_0 模态以 U_y 为主，当横波直探头偏振方向沿 y 方向时，则可以在 x 方向激励出 SH_0 模态，如图 3b。对比三幅图可以看到，500 kHz，SH_0 模态导波仅有 U_y 位移，其指向性好，且位移幅值较高，适宜检测缺陷[7]。



（a）S0 模态　　（b）SH0 模态　　（c）A0 模态

图 2　波结构

3　缺陷定位仿真

所使用的有限元仿真软件为 ANSYS，此软件具有用途广泛、灵活、易用等特性，并且经历数十年的市场验证，模拟具有较高准确性和可信度。利用 ANSYS 进行有限元分析的过程中需要模型设计、建模计算和信号处理三个步骤，如图 3 所示。

中国知网　https://www.cnki.net

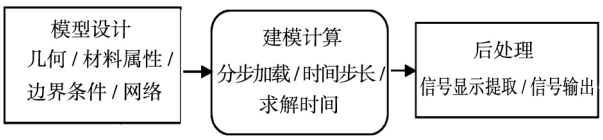


图3 有限元仿真流程

3.1 建立模型

仿真材料为铝板,属性设置为密度2 700 kg/m^3、杨氏模量70 GPa、泊松比0.33。铝板长度与宽度均为500 mm,厚度1 mm。左侧为激励端,右侧为固定端,形心处有一直径为25 mm的圆通孔缺陷。为防止回波过多导致信号复杂难以进行信号分析,设置铝板上端面与下端面为非反射边界。

仿真过程中采用点加载的方式模拟横波直探头在铝板中激励导波,共采用5个点源,中心激励点位置设置在铝板左端面。其余4个激励点沿x方向与中心激励点每隔2 mm对称设置。激励信号为10周期汉宁窗调制的正弦波信号,并且使5个点源振动方向沿y轴方向,所以给5个点源加载沿y方向的位移载荷,x方向无加载,激励频率为500 kHz,激励周期数为10,如式(8)所示:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = \sin(2\pi ft) \times \left[0.5 - 0.5\cos\left(\dfrac{2\pi ft}{n}\right)\right] \end{cases} \tag{8}$$

式中f为激励频率,n为信号周期数。

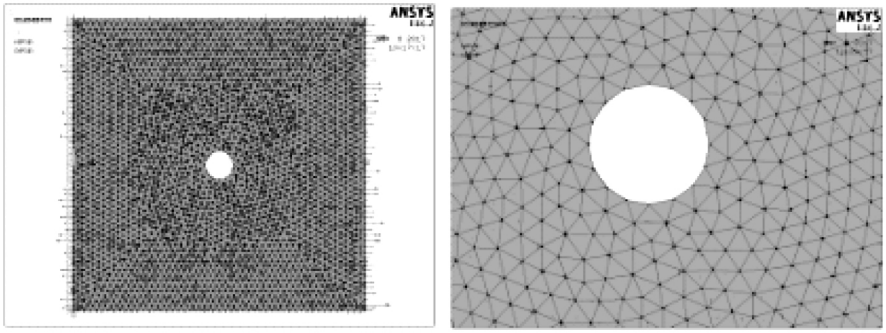
3.2 建模的条件

为了保证有限元仿真的正确性与准确性,仿真过程中网格的划分与时间步长的设置,需要满足一定的条件。首先在进行网格划分时,网格过大会导致仿真结果不准确,但是网格划分过小,则会耗费大量的计算时间。所以在仿真超声波传播过程时,网格尺寸l_e与超声波的波长应满足式(9):

$$l_e \leqslant \frac{\lambda_{\min}}{10} \tag{9}$$

式中$\lambda_{\min}$为计算中的超声波中最小的波长。

本文仿真过程中所选取的激励频率为500 kHz,此频率下SH_0模态理论群速度为3 129.86 m/s。经过计算,SH_0模态的波长为6.3 mm。选择波长较小的模态,即SH_0模态,根据式(9),网格尺寸应满足小于等于0.63 mm。在对铝板模型进行网格划分时,采用自由剖分三角形网格如图4所示。



(a)整体网格 (b)局部网格

图4 网格划分

其次,为了保证仿真过程稳定,且计算结果准确,时间步长Δt应满足式(10):

$$\Delta t \leqslant \frac{l_e}{v_{\max}} \tag{10}$$

式中l_e为网格尺寸;$v_{\max}$为声波成分中传播最快的模态的波速。

本文的有限元仿真中,网格尺寸为0.6 mm,S_0模态在频率500 kHz时S_0模态理论群速度为5 427.18 m/s,所以时间步长应以最大波速,小步长为准,即小于等于0.11 μs,时间步长选取0.1 μs。

4 信号分析

当模型计算完成后,选取信号接收点,在此铝板的有限元仿真中,选取的信号接收点为点源激励的中心点,以模拟实验中自激自收的实验方法提取信号数据,绘制位移时程图。在对仿真信号进行处理的过程中,需要通过对各个波包的波速进行求解,并与相应导波模态的理论群速度进行对比。可以用距

中国知网 https://www.cnki.net

离差 Δs 和其对应的时间 Δt 表示为式(11):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{11}$$

使用飞行时间法,可通过边界的反射波来确定群速度,通过缺陷的反射波来对通孔缺陷定位。超声导波在板中传播时,在板的不连续处(缺陷或边界),发生反射和透射现象,末端边界产生反射波[8]。回波时间取两波峰之间的时间差即激励信号与底端回波信号的时间差,可以计算该波群速度为 3 201.57 m/s。根据分析导波信号的基本原理和算法,可以计算出缺陷的具体位置:

$$x_1 = \frac{t \times C}{2} = \frac{1.64 \times 10^{-5} \times 3\ 201.57}{2}$$

$$= 0.026\ 2\ \text{m}$$

有限元模型中,通孔缺陷位于板的形心处,计算结果与实际缺陷位置吻合较好。计算中发现反射波返回的时间与孔的大小无关,而与孔的位置和板的材料参数有关,与理论基本一致。

5　结论

(1) 应用横波直探头可以在平板上定向激励出 SH_0 导波,经过对比有限元仿真和频散曲线的计算结果,SH_0 模态导波在 500 kHz 频率下的仿真波速为 3 201.57 m/s,理论波速为 3 129.86 m/s,误差为 2.23%。

(2) 激励出的 SH_0 模态,500 kHz 频率导波可以应用于储油罐底板缺陷的检测,在有限元模拟中定位误差为 2.72%。

参　考　文　献

[1] 牟彦春,金南辉,王其波. 电站锅炉厚壁管道的 TOFD 检验[J]. 无损检测,2009,12:1005 – 1008.

[2] 焦敬品,何存富,吴斌,等. 管道超声导波技术研究进展[J]. 实验力学,2002,17(1):1 – 9.

[3] 刘镇清. 超声无损检测中的导波技术[J]. 无损检测,1999,21(8): 367 – 375.

[4] Riichi Murayama. Non – contact stress measurement during tensile testing using an EMAT for SH0 – plate wave and Lamb wave[J]. Journal of Sensor Technology, 2011, 1(3): 65 – 70.

[5] 杨理践,臧慧,高松巍. 电磁超声换能器在金属板厚度检测中的优化[J]. 沈阳工业大学学报,2013,35(5): 535 – 540.

[6] 刘增华,王娜,何存富,等. 基于压电陶瓷片的 Lamb 波单模态激励及缺陷检测的实验研究[J]. 北京工业大学学报,2011,37(10):1453 – 1458.

[7] 吴迪,李明轩,王小民,等. 横波直探头的暂态辐射声场[J]. 声学学报,2007,(04):304 – 309.

[8] Rose J L 著. 何存富,吴斌,王秀彦,译. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社,2004.

广　　告

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.06.020

现有 2009—2016 年《包钢科技》部分余刊,价格优惠,有需要者请与《包钢科技》编辑部联系。

联系电话: 0472 – 2186065

联系人: 康晓虹

《包钢科技》编辑部

中国知网　https://www.cnki.net