

储罐底板缺陷检测系统中侧面接触换能器的超声导波激励

冯展军¹, 王维斌¹, 王禹钦¹, 林明春¹, 原可义², 韩贊东², 陈以方²

(1. 中石油管道研究中心, 廊坊 065000;

2. 清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:通过动态光弹系统, 观察并分析了侧壁激励时, 超声导波在板中的传播行为。分析了侧壁纵波激励时产生 Lamb 波和串列纵波的转换条件和原因, 超声导波在传播过程中发生的波前能量衰减, 以及各波列之间的能量传递。通过光弹试验以及对比检测试验, 证明了在大尺度板材检测方面, 采用较高频率纵波探头侧壁激励进行检测是一种可行的方法。

关键词:超声导波; 光弹; 储罐底板; 兰姆波

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)04-0036-03

Excitation of Guided Waves in Oil Storage Tank Floor by Edge-Mounted Transducers

FENG Zhan-Jun¹, WANG Wei-Bin¹, WANG Yu-Qin¹, YUAN Ke-Yi², HAN Zan-Dong², CHEN Yi-Fang²

(1. Petrochina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The behavior of ultrasonic wave propagating along plate structures using edge-mounted transducer by dynamic photo-elastic method was presented. The conversion conditions and reasons of series of longitudinal waves and the generation of Lamb wave were also presented. The wave front energy attenuation and the energy transportation between each wave series while the wave being propagating along the plate were revealed also. Through photo-elastic experiment and the comparison test, the employment of higher frequency (2 MHz) longitudinal edge-mounted transducer was verified to be a viable option for large plate structure defect inspection.

Keywords: Ultrasonic guided wave; Photo-elastic; Storage tank floor; Lamb wave

石油储罐是石油化工行业中用于储运的关键设备。大型石油储罐长年在自然环境和液位变化条件下运行, 受到多种不利因素影响, 不可避免地受到各种损伤。特别是环境中的化学腐蚀和电化学腐蚀所引发的腐蚀穿孔、裂纹扩展以及破裂等, 造成介质泄漏, 引起严重灾害和环境污染, 造成财产甚至生命损失。因此, 世界各国均以法律的形式要求必须对储罐进行定期检查, 对于石油储罐的在役质量监测方法也展开了大量的研究^[1-2]。

由于石油储罐的形状特点——罐底为典型的薄

板, 而罐壁为典型的薄壁管, 这两种结构都非常适合使用超声导波进行检测^[3-5]。目前的研究主要集中在如何选择合适的导波模态对石油储罐进行有效的检测。通常在检测中选择低阶导波模态^[6], 这是因为低阶模态的导波在材料中的衰减较小, 而且检测波形易于分析。但是, 为获得低阶模态的导波, 需要控制频厚积在较小的范围内。对于一定的板厚, 这意味着要选择尽量低的频率。而频率降低使超声波对小缺陷的分辨力下降, 从而影响检测效果, 这是导波检测中存在的主要矛盾。

目前, 大多数研究者采用的方法是在被检表面通过合适角度的楔块激励超声导波, 以达到模态选择并优化检测效果的目的。笔者通过动态光弹方法, 研究了在侧壁直接激励兰姆波的方法, 分析了侧

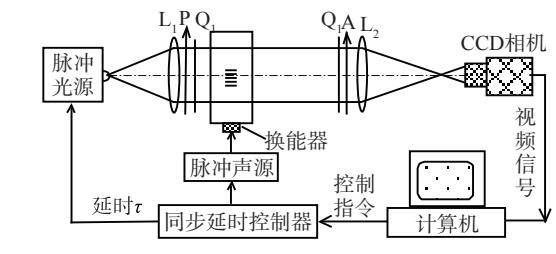
收稿日期: 2010-04-19

作者简介: 冯展军(1977—), 男, 工程师, 博士, 主要从事油气储运行业的无损检测技术研究。

壁激励声波从兰姆波到纵波的变化趋势和条件,以及纵波在传播过程中出现波型转换和能量迁移的现象。通过检测对比试验,证明了侧壁激励纵波可以在一定程度上解决兰姆波检测板时检测距离和检测分辨力的矛盾。

1 动态光弹装置

动态光弹装置是利用透明材料的光弹效应,结合瞬态图像记录装置,对超声波在透明材料的传播行为进行采集和记录的一种动态声场观测设备。文中所使用的动态光弹装置的示意图如图 1 所示。



L₁, L₂—透镜 P, A—偏振片 Q₁, Q₂—1/4 波片

图 1 弹性波波场光学成像系统示意图

其工作原理是:根据编制好的程序,由计算机发出指令,使“声光延时控制器”输出指定重复周期的电脉冲信号。输出分两路,一路为高压脉冲信号,用来激励超声换能器发射声波,产生的声波在固体中传播;一路用来激励 LED 光源,发出很短的光脉冲。这样每个周期产生了一个声脉冲和一个按指定时间延时的光脉冲,CCD 相机上就可以记录下脉冲光照射时刻的瞬态声波图像。计算机通过图像采集卡和 CCD 相机相连,得到相应的瞬态声波图像,并在屏幕上显示出来。改变延时设定就可以看到不同时刻的声波图像,还可以演示声波的传播过程。

图 1 所示系统采用圆偏振光光场,消除了应力方向对光弹图像的影响。分析可知,该系统的透射光强 I 可以表示为:

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光光强; φ 为偏振光通过透明样品。发生应力双折射所形成的两列偏振光的相位差。

设入射声波为一维平面纵波,并可以表示为下述形式:

$$u = u_0 \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

式中 u_0 为振幅; k 为传播方向 x 上的波数; ω 为角频率。则该入射声波产生的相位差 φ 可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi Cd}{\lambda} [-2\mu k u_0 \sin(kx - \omega t)] \quad (3)$$

式中 C 为透明样品的应力光学常数; d 为样品厚度; λ 为所使用偏振光的波长; μ 为样品的拉梅常数。

由上述分析可知,动态光弹记录中的光强分布反映了入射声波的周期性;在小变形的条件下,即满足式(1)处于单调区间时,也能够反映出声场强度随空间和时间的变化。

2 侧壁激励的兰姆波和纵波

图 2 中列出了动态光弹记录的从 3.0~14.0 μ s 各时刻的板中超声波声场。其激励条件为 1.32 MHz 纵波直探头,单脉冲激励,探头布置方式如图 3 所示,所使用的玻璃板厚度为 6 mm,频厚积为 7.92 MHz · mm。

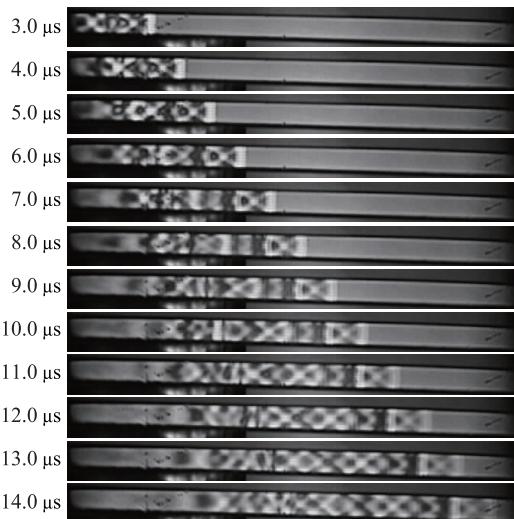


图 2 1.32 MHz × 6 mm 频厚积侧壁激励的 Lamb 波



图 3 侧壁激励板中检测超声波探头布置示意图

观察图 2 所列出的试验结果可以得出:在上述频厚积条件下,产生对称型的 Lamb 波;该 Lamb 波的波列在传播过程中展宽;随着传播距离增加,波前能量衰减增加,并在其后形成能量较强的次级波前;Lamb 传播过程中伴随着其他的低速模态。

图 4 为较大频厚积(44 MHz · mm)条件下,侧壁激励所产生的板中声波的声场光弹记录。选用 4.4 MHz 纵波直探头,布置方式如图 3 所示,采用单脉冲激励。玻璃板厚度约 10 mm。

如图 4 所示,在较大频厚积的条件下,侧壁激励纵波形成纵波串列的机理为(符号含义如图 4 中 18 μ s 图所示):掠入射纵波 1 在表面反射形成临界

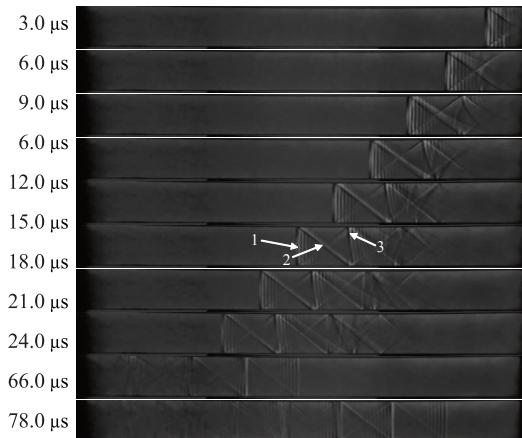


图 4 4.4 MHz·10 mm 频厚积侧壁激励的纵波

角横波 2, 临界角横波在对界面反射形成相同角度的横波和纵波串列 3。如此循环, 即形成纵波串列。

对比图 2 和 4 的试验结果可知: 在频厚积较小的条件下, 略入射纵波与界面作用形成的各次反射波相互之间的相干长度较大, 因此能够形成一个统一的波包向前传播; 而当频厚积较大时, 各反射波之间的相干长度较小, 形成了可区分的各次波包, 以串列的形式向前传播。

此外, 通过对比可知, 在频厚积较小的条件下, 波前衰减较快。如图 2 中 14 μs 处的初始波前衰减严重。在图 4 中, 到 66 μs 时, 超声波已经过一次反射, 才出现相同的衰减状态。因此, 较大频厚积时激励出的纵波在检测距离上具有一定的优势。

3 检测试验

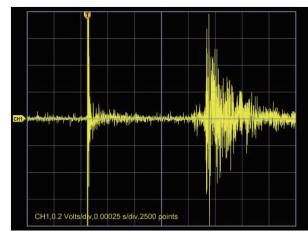
试验试件为尺寸 3 000 mm × 1 000 mm × 9.5 mm 的钢板, 在 2 600 mm 位置加工有直径为 φ 20 mm 的通孔。

分别使用频率为 2 MHz 的纵波直探头在侧壁激励, 以及 0.5 MHz 的导波探头在表面激励, 对比两者的检测效果。检测波形如图 5 所示。波形采集使用的仪器为 TDS2004 型示波器。

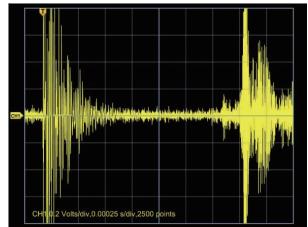
其中纵波侧壁激励选用的放大增益为 30 dB, 导波探头选用的增益为 40 dB。对比两者的检测结果可见, 在较大频厚积时, 使用纵波在侧壁激励, 可以得到略优于表面激励导波的检测效果。因此, 在可行的检测条件下, 使用较高频率的纵波, 以边缘激励方式进行板材的检测是一种可选的检测方法。

4 结论

通过动态光弹系统, 观察并分析了侧壁激励时,



(a) 2 MHz 纵波直探头边缘激励



(b) 0.5 MHz 导波探头表面激励

图 5 侧壁纵波激励和表面导波激励检测效果对比

超声波在板中的传播行为。分析了侧壁纵波激励时产生 Lamb 波和产生串列纵波的转换条件和原因、超声波在传播过程中发生的波前能量衰减, 以及各波列之间的能量传递。

通过光弹试验以及对比检测试验, 证明了在对大尺度板材进行检测时, 采用较高频率纵波探头侧壁激励是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 肖贤军, 刘丽川, 刘子厚, 等. 超声导波技术检测储罐底板缺陷[J]. 无损检测, 2008, 30(1): 6—8.
- [2] 徐彦廷, 刘富君, 王亚东, 等. 大型立式储罐综合检测技术[J]. 无损检测, 2007, 29(8): 482—485.
- [3] Greve D W, Zheng P, Oppenheim I J. Excitation of longitudinal and Lamb waves in plates by edge-mounted transducers[C]. New York: Proc IEEE Ultrasonics Conference, 2007: 1—4.
- [4] Sicard R, Goyette J, Zellouf D. A SAFT algorithm for Lamb wave imaging of isotropic plate-like structures [J]. Ultrasonics, 2002, 39(7): 487—494.
- [5] Giurgiutiu V. Lamb wave generation with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring [C]. Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials 2003: Smart Structures and Integrated Systems, 2003, 5056: 111—122.
- [6] Lowe M J S, Diligent O. Low-frequency reflection characteristics of the S0 Lamb wave from a rectangular notch in a plate[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 111(1): 64—74.