

基于超声 Lamb 波技术的储罐底板缺陷检测

黄志强¹, 王明波¹, 王维斌², 康叶伟², 李琴¹, 周已¹

1. 西南石油大学石油天然气装备教育部重点实验室, 成都 610500
2. 中油管道科技研究中心, 河北廊坊 065000

摘要 针对储油罐底板长期服役过程中罐底边缘板常发生腐蚀的情况, 研发出一种超声 Lamb 波检测技术, 开展了相关实验研究并设计了一套储罐检测自动化装置。对 14mm 大厚度钢板进行了仿真分析, 计算出激发角度曲线, 得出其 A0 模式 Lamb 波最佳激发角度为 70°。设计加工了某 2 万 m³ 成品油储罐底板 1:1 实验模型, 并使用设计的 UT350 平板导波检测系统在该模型板上开展了实验, 当激励信号频率为 490kHz 时检测结果最佳。实验结果表明 Lamb 波 A0 模式的低频脉冲信号能实现对大型钢板的缺陷检测, 具有较好的缺陷识别能力。设计了一套能紧贴储油罐壁自动行走的储罐底板自动化检测装置, 该装置可根据储罐边缘板自动调节传感器角度和压紧力, 能根据检测效果调节行走速度。实现了对储罐底板缺陷连续、高效、稳定的在线检测过程。研究结果和设计装置实现了对储油罐底板缺陷检测, 为储罐安全运行提供了保障。

关键词 超声 Lamb 波; 储罐底板; 自动化; 无损检测

中图分类号 TE988

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.010

Defect Detection for the Bottom Plate of Oil Tank Based on Ultrasonic Lamb Waves

HUANG Zhiqiang¹, WANG Mingbo¹, WANG Weibin², KANG Yewei², LI Qin¹, ZHOU Yi¹

1. MOE Key Laboratory of Equipment for the Oil and Gas, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Petrochina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, Hebei Province China

Abstract Aiming at the situation that the bottom edge plates of oil tank often corrode in the process of long-term service, a kind of detection technology based on ultrasonic lamb wave had been developed. Relevant experimental study is carried out. The equipment for auto-testing tank is designed. Simulation analysis on the steel plate with the thickness of 14mm is conducted; the curve of excitation angle is calculated. The result is that for the lamb wave of A0 mode, optimum excitation angle is 70°. The experimental model with the ratio of one to one for refined oil tank bottom plate of 20000m³ is designed and processed. By using designed UT350 flat guided wave testing system, the experiment is developed on the model plate, the best test results is obtained while the excitation signal frequency is 490 kHz. The result of experiment indicates that low frequency pulse signal of A0 mode lamb wave is able to detect the defects of large-sized plates. The tank bottom automatically detection device that walks close to the storage tank wall is designed; the device is able to realize the continuous, high efficiency, and stability online detection process for the defect of oil tank bottom plate. The research results and designed device achieve the defect detection for the bottom plate of oil tank. The technique provides security for the safe operation of the storage tank.

Keywords ultrasonic lamb waves; bottom plate of oil tank; automation; nondestructive testing

0 引言

随着石油工业的发展, 储罐的应用也不断地增加。由于盛装介质均为易燃易爆液体, 这些储罐在长期服役过程中,

大型储罐底板受诸多因素影响容易发生腐蚀, 导致介质泄漏和结构失效。据有关资料统计分析, 在储罐的腐蚀失效中, 底板腐蚀占 80%左右, 其中, 罐底边缘板的腐蚀约占 60%^[1-3]。

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司资助项目(油气 20090303)

作者简介: 黄志强, 教授, 研究方向为石油天然气装备设计和测试控制技术, 电子邮箱: wmb110119@yahoo.com.cn

目前,国外主要从结构监测入手,结合外部检测和清罐检测来实现对储罐的安全管理。相比之下,国内目前还是主要采用清罐检测的方式定期对大罐进行全面检测,通过大量地定期检测结果发现,这种方式不能很好地实现经济高效的储罐完整性管理。随着科技的不断发展,储罐的检测也由离线向在线检查转变,常用的储油罐底板缺陷检测技术有:超声导波检测、漏磁检测、磁致伸缩、C-扫描、渗透等。常规检测技术效率低、成本高,需要进行离线、开罐检测,检测前储油罐都必须清空、清洁^[4-7]。超声导波检测技术具有传播距离远、速度快的特点,可在不开罐清理,不影响储罐正常运行的情况下,实现对储罐内外壁和底板的在线 100%的直接评估检测,极大降低了储罐全面检测的费用。

近年来,中国也开展了对立式储罐在线检测技术的研究。但还停留在实验室研究阶段,未形成整套研究技术。检测中传感器还需人工安装,降低了检测效率,提高了检测成本。

1 超声 Lamb 波检测原理

当超声波被局限在板状、管状或棒状材料的边界内时,声波在介质中的不连续界面间产生多次往复反射,并进一步产生复杂干涉和几何弥散形成的一种波形,这样就形成了新的超声波类型——导波^[8,9]。在固体板中传播的导波类型主要有 Lamb 波和 SH 板波(水平剪切波)。板中导波主要采用 Lamb 波进行检测,Lamb 波检测具有快速便捷、传播距离远、检测精度不受储罐内部液体影响的特点,非常适合储罐底板和罐壁的大面积在线无损检测^[10]。

如图 1 所示,传感器激励出 Lamb 脉冲波信号,脉冲波信号在底板上下表面来回反射后沿着板面方向传播,当遇到板中缺陷和板底端面时脉冲信号会发生反射。反射回来的信号由同一传感器接收,接收的信号经设备处理后显示二维缺陷图像。这样就实现了板中缺陷定位定量检测。Lamb 脉冲波信号在壁板、中幅板接触位置同时具有反射和折射现象。



图 1 储罐底板缺陷超声导波检测

Fig. 1 Ultrasonic guided wave detection of tank bottom defects

Lamb 波是指在自由边界固体板中传播的弹性振动波。当 Lamb 波在板中传播时,板中质点的振动轨迹是椭圆形,此时质点的振动可以分解为水平振动和垂直振动。

$$\frac{\tan k_0 b}{\tan k_0 b} = -\frac{4k_0^2 k_0 k_0}{(k_0^2 - k_0^2)^2} \quad (1)$$

$$\frac{\tan k_0 b}{\tan k_0 b} = -\frac{(k_0^2 - k_0^2)^2}{4k_0^2 k_0 k_0} \quad (2)$$

式(1)和式(2)就是著名的瑞利-兰姆(Rayleigh-Lamb)方程,它们分别代表对称模式和反对称模式。 k_0 为沿板水平方向的波数, b 为 1/2 板厚, $k_0^2 = (\omega/c_1)^2 - k_0^2$, $k_0^2 = (\omega/c_s)^2 - k_0^2$, ω 为角速度, c_1 为纵波速度, c_s 为横波速度。Lamb 波的对称模式有 S0, S1, S2, ..., 反对称模式有 A0, A1, A2, ...^[11]。Lamb 波在不同厚度板及不同激发频率下会产生不同的传播模式,而不同的传播模式对不同的缺陷会有不同的敏感性。通常在检测中选择低阶导波模式,因为低阶模式的导波在材料中的衰减较小,且检测波形易于分析。但为获得低阶模式的导波,需要控制频厚积在较小的范围内。对于一定的板厚,就意味着要选择尽量低的频率。而频率降低使得超声波对小缺陷的分辨率下降,从而影响检测效果,这是超声导波检测中存在的主要矛盾。

以 2 万 m³ 储罐为例,底板为 14mm 的 Q235 钢板。在计算中纵波速度 $c_1=5940\text{m/s}$, 横波速度 $c_s=3240\text{m/s}$, 频厚积 $fd=0.35\text{MHz}\cdot\text{cm}$ ^[12],其中 f 为频率, d 为板厚。利用 Matlab 仿真软件绘制出 Q235 钢板的激发角度曲线(图 2),图中红色曲线表示对称模式 Lamb 波频厚积与激发角度的关系,蓝色曲线表示反对称模式 Lamb 波频厚积与激发角度的关系。为了激发出低阶 A0 模式 Lamb 波,画出频厚积 $fd=0.35\text{MHz}\cdot\text{cm}$ 的铅垂线 L ,使其分别与 A0, S0 模式激发角度曲线相交,其交点横坐标即为最佳激发角度。通过楔块调节探头激发角度为 70°,就可激发出 A0 模式的 Lamb 波。

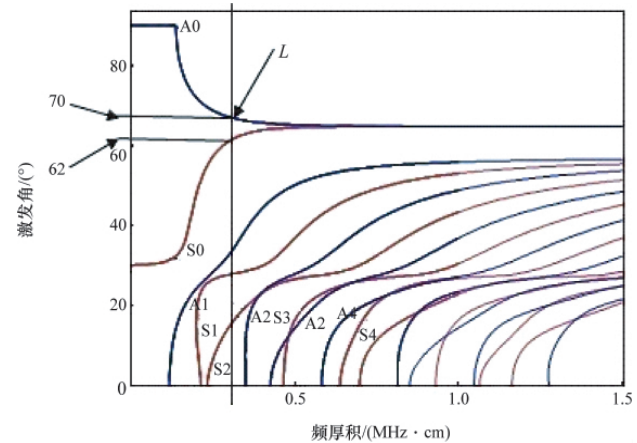


图 2 Q235 钢板的激发角度曲线

Fig. 2 Curve of Q235 steel plate excitation angle

2 实验研究

由于压电式超声波探头具有频带宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠和重量轻,特别是方向性好等优点^[13],在实验中选择了压电式超声波探头,探头中心频率为 0.5MHz。储油罐底板具有大尺寸高厚度,因而检测难度非常大,传感器需要激发出足够能量的激励信号才能检测出底板缺陷情况。

2.1 实验系统组成

整套实验装置如图 3 所示,主要由计算机、Ultratek-

UT350 数字超声发射接收仪、压电传感器、变角度楔块、模型钢板组成。根据现场工况,本实验装置设计的是单探头自发自收模式。计算机上安装 UT350 示波软件,通过示波软件调节激发信号并对接收信号进行滤波分析。UT350 数字超声发射接收仪是将超声波脉冲发射接收和高速模数转换都集成在一张板卡上并采用 USB 接口与计算机连接的设备。它具有宽频带、多脉冲周期、小巧便携等优点。采用特制低频超声导波探头,楔块信号激发角度可调,实验采用水基耦合方式。根据某 2 万 m^3 成品油储罐结构设计了 1:1 模型。该模型边缘板尺寸 2150mm \times 500mm \times 14mm,壁板尺寸 200mm \times 500mm \times 16mm,中幅板尺寸 300mm \times 500mm \times 10mm,在距离搭接位置 150mm 的地方钻有 ϕ 15mm 的通孔,如图 4 所示。

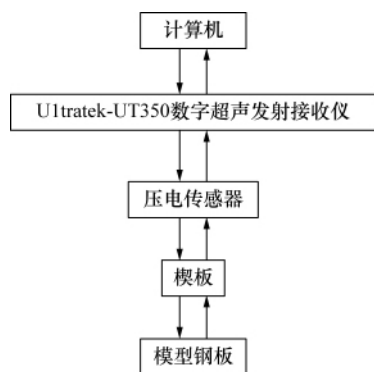


图 3 UT350 实验系统

Fig. 3 UT350 experimental system

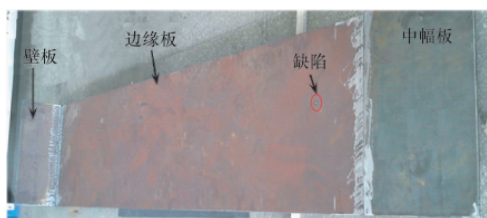


图 4 储罐底板模型

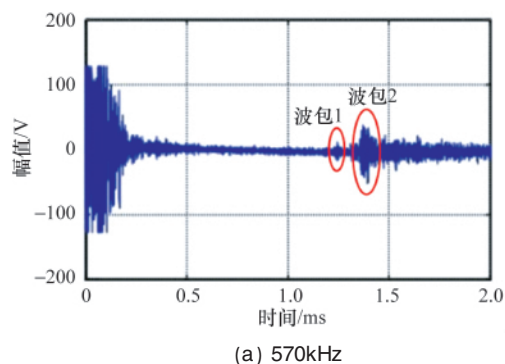
Fig. 4 Tank floor model

为使被激励的信号在传播过程中频散现象尽可能低,使激励能量能集中于频带较窄范围内,原则上激励信号应选取单音频信号。但是严格的单音频信号很难产生,所以在此选用 5 个震荡周期加窗函数(Hanning 窗)的正弦信号作为激励信号。

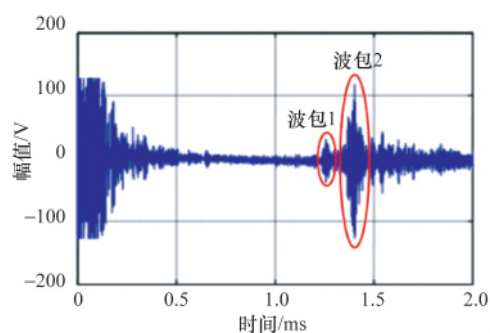
2.2 结果与分析

由于本探头的激发中心频率为 500kHz,所以在此中心频率附近实验该检测系统。激励信号频率从 600kHz 起每 10kHz 检测 1 次,570kHz 时能看到比较明显的缺陷回波信号和储罐底板的端面回波信号,如图 5(a)所示的波包 1 和波包 2。激励信号频率继续减小时,回波信号的幅值更大更明显。当激励信号频率减小到 490kHz 时回波信号幅值达到最大,能看到清晰的缺陷回波信号和储罐底板的端面回波信号,如图 5(b)所示的波包 1 和波包 2。当频率继续减少时回波信号幅值又

再次减小,直到信号无法识别。由此说明本检测系统的最佳激励信号频率为 490kHz。



(a) 570kHz



(b) 490kHz

图 5 检测信号时域波形

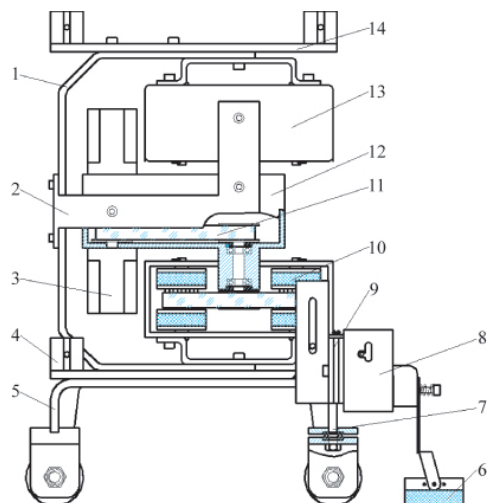
Fig. 5 Detection signal of time domain waveform

3 储罐检测自动化装置设计

当前,在储罐底板缺陷的平板导波检测应用中,存在检测效率低的突出问题。主要原因是传感器的扫描方式不够高效,往往采取人工移动方式,非连续自动行进方式,即每完成一段距离的底板检测,人工拆除外边缘上的传感器换新的检测点,从而影响了检测的效率。在此设计了一种储罐检测自动化装置。该装置能实现连续检测、传感器角度可自适应调整、行走速度可控制、提高检测效率的目的。

本装置主要由两部分组成:机电控制箱和传感器夹持行走架。如图 6 所示,传感器夹持行走架主要由支撑机构、驱动机构、吸附机构、传感器夹持机构组成。支撑机构是为使驱动机构、吸附机构、传感器夹持机构安装在一起,并使整个机构立在储罐外边缘板上;驱动机构主要是为整个装置提供行走动力;吸附机构是通过永磁轮使该装置紧紧吸附在储罐外边缘上。传感器夹持机构是固定传感器,并使传感器能在一定范围内自动根据储罐外边缘板情况调整倾斜角度,并提供给传感器一定的压紧力,调整传感器信号发射方向。

机电控制箱主要实现对传感器夹持行走架上安装的两个步进电机的速度调节和过载保护。机电控制箱面板上设置有控制电机正反旋转按钮、电源开关按钮、两个固定速度按钮、电机报警复位开关按钮、电机无级调速器、电机转速显示器、指示灯等器件,如图 7(a)所示。



1—L型架;2—中部支撑架;3—步进电机;4—探头固定架;5—行走支撑架;6—传感器;7—转向机构;8—传感器预紧机构;9—传感器摆动机构;10—吸附轮;11—齿轮带;12—变速箱;13—吸附运动箱体;14—罐壁检测传感器安装架

图6 传感器夹持行走架示意

Fig. 6 Scheme of sensor clamp walking frame



(a) 机电控制箱

(b) 传感器夹持行走架

(a) Mechanotronic control box (b) Sensor holder walking frame

图7 储罐检测自动化装置

Fig. 7 Automation device for tank detection

本装置针对性强,不仅适用于单探头储罐底板缺陷超声导波检测技术,也可用于携带多探头的相控阵检测技术,以及携带超声测厚传感器实现外边缘板的超声扫描测厚。装置工作效率高,可实现检测传感器的连续运动,检测期间不需要人为干预传感器的运动,提高了效率,降低了检测成本。

4 结论

(1) 阐述了储罐底板缺陷超声导波检测原理。设计的UT350平板导波检测系统结合储罐检测自动化装置可实现对储罐底板缺陷在线连续检测。形成了一套储罐底板缺陷在线超声导波检测技术,为储罐安全运行提供保障。

(2) 为获得低阶模式的导波,需要控制频厚积在较小的范围内。用仿真软件计算出大厚度实验底板的信号激发角度曲线,得出激发低阶模式A0模式的Lamb波最佳信号激发角度为 70° 。

(3) 设计加工了某 2万 m^3 成品油储罐底板1:1模型,在该模型上开展了UT350平板导波检测系统实验研究。实验结果表明UT350平板导波检测系统能检测出模型钢板上直径为15mm的通孔。当激励信号频率为490kHz时,检测回波信号最为明显,能比较清晰的分辨出缺陷孔信号和底板端面回波信号。得出系统的最佳激励频率与传感器中心频率相关。

(4) 设计的罐底板超声导波检测自动化装置解决了现有储罐底板缺陷平板导波检测技术效率低的问题。提供了一种连续、高效、稳定的储罐底板缺陷在线检测技术,很大程度上节约了成本,降低了工作人员的劳动强度。

参考文献 (References)

- [1] 中国石油管道公司. 油气管道检测与修复技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
China Petroleum Pipeline Corporation. Detection and repair of oil and gas pipelines [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [2] 高广健, 邓明晰. 超声兰姆波在储罐底部传播的数值模拟研究 [J]. 后勤工程学院学报, 2011, 27(5): 84-87.
Gao Guangjian, Deng Mingxi. Logistical Engineering University. 2011, 27(5): 84-87.
- [3] 刘广文, 陈次昌. 立式储罐在线检测技术与研究进展 [J]. 油气储运, 2009, 28(9): 1-4.
Liu Guangwen, Chen Cichang. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(9): 1-4.
- [4] Raišutis R, Kažys R, Mažeika L, et al. Application of the ultrasonic transmission tomography for inspection of the petroleum tank floor [J]. Ultrasound, 2007, 62: 26-32.
- [5] 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.
Xu Yanting, Liu Fujun, Wang Yadong, et al. Non-destructive Testing, 2007, 29(8): 482-485.
- [6] 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.
Xiao Xianjun, Liu Lichuan, Liu Zihou, et al. Non-destructive Testing, 2008, 30(1): 6-8.
- [7] 冯展军, 王维斌, 王禹钦, 等. 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 [J]. 无损检测, 2011, 33(4): 36-38.
Feng Zhanjun, Wang Weibin, Wang Yuqin, et al. Non-destructive Testing, 2011, 33(4): 36-38.
- [8] Rayleigh J W S. The theory of sound: vol 1,3 [M]. New York: Dover Publications, 1945.
- [9] Rose J L. Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2000, 47(3): 575-582.
- [10] Rose J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(3): 273-282.
- [11] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
Ying Chongfu, Zhang Shouyu, Shen Jianzhong. The scattering of ultrasound in solids [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.
- [12] 罗斯 J L. 固体中的超声波 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Rose J L. Solid ultrasonic [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [13] 连红运, 齐峥, 王书双. 20MHz 超声聚焦换能器的设计及其应用 [J]. 科技导报, 2009, 27(2): 66-69.
Lian Hongyun, Qi Zheng, Wang Shushuang. Science & Technology Review, 2009, 27(2): 66-69.

(责任编辑 侯澄芝)