

石油储备基地储油罐腐蚀的激光超声检测

于忠宁, 张 宁

(国家管网集团北方管道有限责任公司沈阳输油气分公司, 铁岭 110300)

摘 要: 为解决储油罐腐蚀造成的石油泄漏问题, 提出基于激光超声技术的石油储备基地储油罐腐蚀无损检测方法。激光超声扫描储油罐时具有的热弹效应以及热蚀效应会生成 Lamb 波, 利用 Lamb 波在储油罐中传播时对称模态和反对称模态的变化情况可对其腐蚀情况进行检测。首先通过激光扫描储油罐, 利用传感器采集超声波信号, 设定正常储罐罐壁的 Lamb 波信号为标准信号; 然后根据信号的时域特征提取腐蚀散射信号, 以确定储油罐是否存在腐蚀损伤, 并引入腐蚀损伤因子对罐体的腐蚀深度进行预测。试验结果表明, 利用激光对被腐蚀的储油罐罐体进行扫描, 未被腐蚀位置处的信号强度较大, 越接近腐蚀中心的扫描位置处的信号强度越弱; 该方法可通过腐蚀损伤因子数值大小判断罐体腐蚀深度, 为罐体更换时间提供了参考。

关键词: 激光超声; 热弹效应; 热蚀效应; Lamb 波; 对称模态; 反对称模态

中图分类号: TP181; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)04-0064-05

Laser ultrasonic corrosion detection of oil tank in petroleum reserve base

YU Zhongning, ZHANG Ning

(Shenyang Oil and Gas Transportation Branch of National Pipeline Network Group North Pipeline Co., Ltd., Tieling 110300, China)

Abstract: To solve the problem of oil leakage caused by corrosion in oil storage tanks, a non-destructive testing method for corrosion of oil storage tanks in oil reserve bases based on laser ultrasound technology was proposed. The thermal elastic effect and thermal corrosion effect generated by laser ultrasonic scanning of oil storage tanks generated Lamb waves, based on the changes in symmetric and antisymmetric modes when Lamb waves propagated in oil storage tanks. According to the structure of the oil tank, sensors were arranged to scan the storage tank with a laser, collected ultrasonic signals using the sensors, and set the Lamb wave signal on the normal tank wall as the standard signal. The corrosion scattering signals were extracted based on the time-domain characteristics of the signal. The presence of corrosion damage in the oil storage tank was determined and a corrosion damage factor was introduced to estimate the corrosion depth of the tank body. The experimental results showed that when using laser to scan the corroded oil storage tank model, the signal intensity was higher in non corroded positions, and the signal intensity was weaker as the scanning position is closer to the corrosion center; This method can determine the corrosion depth of the tank body by the numerical value of the corrosion damage factor, and provide reference opinions for the replacement time of the tank body.

Key words: laser ultrasonic; thermoelastic effect; thermal corrosion effect; Lamb wave; symmetric mode; antisymmetric mode

石油储备基地作为重要的能源战略设施, 在

石油供应和国家安全中发挥着至关重要的作用^[1]。然而, 长期运行和暴露于复杂环境条件下的储油罐容易受到腐蚀而带来安全风险。因此, 研究并开发一种有效的储油罐腐蚀无损检测方法具有重要意义^[2-4]。目前, 常规的储油罐腐蚀检测

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 于忠宁(1980—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为原油管道运输和存储

通信作者: 于忠宁, 15956415333@163.com

方法主要有目视检查、超声检测、X射线检测和磁粉检测等。然而，这些方法存在着各自的局限性，如操作复杂、受限于人力因素、对罐体材料有一定的要求等^[5]。因此，需要开发出更加高效、准确和可靠的储油罐腐蚀无损检测方法，以提高石油储备基地的安全管理水平^[6-8]。周奎等^[9]研究的大型油罐罐壁损伤识别方法，使用有限元对储油罐进行分析，计算出储油罐罐壁的径向模态振型，并以此为基础得出模态曲率，然后通过模态曲率对储油罐的损伤进行判别。朱林等^[10]提出的储罐损伤检测系统，利用飞行器吸附装置、图像采集装置等多种设备，对储油罐进行数据采集并对采集到的图像进行分析，以检测储罐是否存在损伤。上述方法虽然可以完成储油罐的腐蚀损伤检测，但也有一定缺点，如储油罐内存在石油时无法进行内壁检测、储油罐内石油液面改变会导致检测结果不准确、检测易受环境影响等。

激光超声技术具有非接触、波形丰富、超声波频率宽的优点。基于上述优点，笔者提出基于激光超声技术的石油储备基地储油罐腐蚀无损检测方法。利用激光照射时产生的物理效应发射 Lamb 波，对 Lamb 波在储油罐内的传播进行分析，并分离出具有腐蚀特征的散射波形，确定具有损伤的位置，从而完成储油罐的损伤检测。

1 储油罐腐蚀检测原理

1.1 激光超声检测原理

激光超声是由 ASKARYAN 和 WHITE 等发现的^[11]，即高能激光对物体进行照射后会产生超声波^[12]。此后，学者们提出了许多激光超声检测模型，这些模型基本都是基于激光照射到物体后产生的热弹效应和热蚀效应^[13]。

1.1.1 热弹效应

采用高功率激光对储油罐结构进行照射时，储油罐会吸收激光能量，激光照射表面温度迅速升高，由于热胀冷缩效应该区域会快速膨胀，并激发 Lamb 波，热弹效应示意如图 1 所示^[14]。

1.1.2 热蚀效应

采用激光对储油罐进行照射时，激光强大的功率会使储油罐表面的材料在微米级的尺度上迅速烧蚀，形成等离子体，并产生垂直于储油罐表面的强大反冲力，从而形成 lamb 波，热蚀效应示意如图 2 所示。

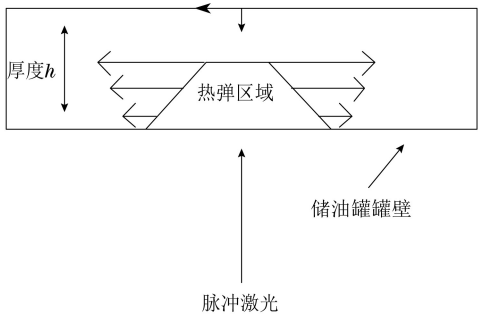


图 1 热弹效应示意

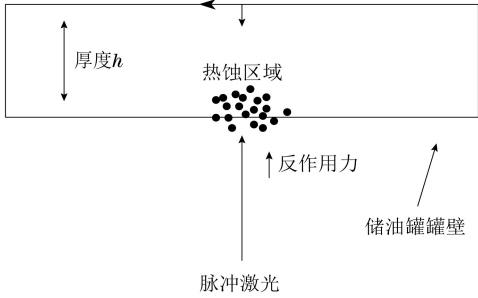


图 2 热蚀效应示意

1.1.3 储油罐腐蚀检测的 Lamb 波传播特性

综上所述，对储油罐发射激光时产生的热弹效应与热蚀效应会导致 Lamb 波的产生^[15]，Lamb 波在储油罐中的传播特性如图 3 所示。

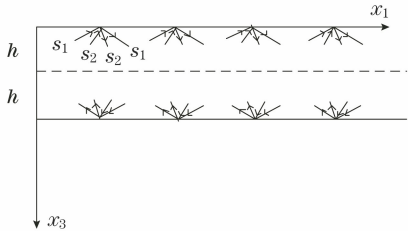


图 3 Lamb 波在储油罐中的传播特性示意

图 3 中 s_1, s_2 分别代表不同入射角度的 Lamb 波，作为一种超声导波，Lamb 波在储油罐传播时，会以材料的厚度为边界，在其中不断反射，纵向形成驻波在 x_3 方向传播，行波在 x_1 方向传播，同时每次反射便会发生一次模态转换，在不断反射的过程中，不同的波叠加会形成十分复杂的波结构，且会分解为对称模态与反对称模态。

1.2 储油罐腐蚀检测

在储油罐体上布置传感器，在一定距离对储油罐发射激光进行扫描，再利用传感器采集超声波信号；经过多次的扫描，通过对比 Lamb 波在未腐蚀点和腐蚀点的信号差异，利用波包分解方法完成损伤的定位和估计，传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数

项目	参数
型号	B-135A
工作频率/kHz	10~20
灵敏度/mm	0.01
分辨率/mm	0.001
测量范围/mm	0.1~100

设正常储油罐的 Lamb 波信号为 $s_h(t)$, 腐蚀储油罐的 Lamb 波信号为 $s_d(t)$, 则存在

$$s_d(t) = s_h(t) + d(t) \tag{1}$$

式中: $d(t)$ 为储油罐腐蚀处的 Lamb 波散射信号。

对于存在腐蚀的储油罐, 散射信号由于传播路径长, 信号产生衰减, 该位置的 Lamb 波信号极其微小, 与正常结构中的 Lamb 波信号相比差距巨大。如果从频域对两信号进行分离会存在巨大的困难, 因为二者的信号是通过窄带激励产生的, 频率特征一致。在 Lamb 波的采集时间、环境设备参数等因素影响下, 直接使用正常结构的 Lamb 波与腐蚀区域的 Lamb 波进行相减则是不可行的。虽然两信号在频域上不易分离, 但两者在时域上却完全不同, 不存在相关性。且储油罐腐蚀处的 Lamb 波信号中正常部分与储油罐未腐蚀处信号时域特征具有相关性, 因此通过时域特征便可以对正常信号和腐蚀损伤信号进行分离。

首先对储油罐正常区域 Lamb 波信号 $s_h(t)$ 进行归一化处理, 并视处理后的信号 $s_{hb}(t)$ 为基准信号, 则有

$$s_{hb}(t) = \frac{s_h(t)}{\max(s_h(t))} \tag{2}$$

求得基准信号后, 对其与腐蚀信号进行运算。腐蚀信号中正常信号浮现的时间 τ_t 为计算结果最大值出现的时间; 在计算出正常信号出现时间后, 对基准信号进行自运算, 腐蚀信号中的正常信号幅值 a_h 为两次运算的比值, 即

$$\begin{cases} \tau_t = \max | \langle s_d(t), s_{hb}(t) \rangle | \\ a_h = | \langle s_d(t), s_{hb}(t) \rangle | / | \langle s_d(t), s_{hb}(t) \rangle | \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\langle \rangle$ 表示相关运算。

用基准信号乘以腐蚀部分中正常信号幅值 a_h 便可得出腐蚀信号中的健康部分 $\hat{s}_h(t)$, 使用腐蚀信号减去该信号便可得出腐蚀散射信号, 即

$$\hat{d}(t) = s_d(t) - \hat{s}_h(t) \tag{4}$$

通过腐蚀散射信号便可以确定储油罐是否存在腐蚀。分离出的腐蚀散射信号幅值越大则表明腐蚀

深度越大, 为了能充分了解腐蚀损伤情况, 引入腐蚀损伤因子 D , 则有

$$D = \sum_{i=N_1}^{i=N_2} d^2(t) \tag{5}$$

式中: N_1, N_2 为数据的选取起止点。

2 腐蚀检测试验

2.1 试验对象及过程

为模拟储油罐的腐蚀检测, 选择与储油罐材料相同的一块钢板, 采用电化学腐蚀方法在钢板上腐蚀出一块矩形区域用于试验。腐蚀后钢板的表面形貌如图 4 所示。



图 4 腐蚀后钢板的表面形貌

以该钢板作为待检测试件, 使用激光超声对其进行扫描, 并进行格栅化处理, 扫描区域格栅化处理如图 5 所示, 扫描试验现场如图 6 所示。

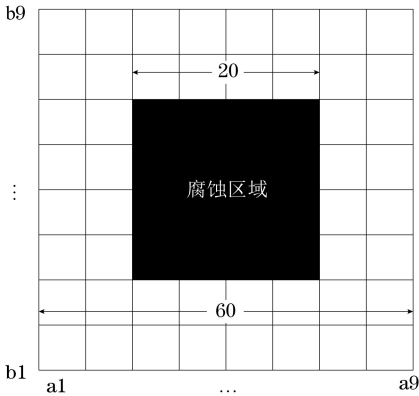


图 5 试件扫描区域格栅化处理示意

2.2 试验数据

在对钢板进行激光超声扫描后, 不同位置采集到的超声信号各不相同, 以其中(a1, b7)和(a8, b4)位置为例, 采集到的超声信号如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 不同位置超声信号中均有两处不同的波信号, 但信号的波形以及幅值的不同, 这可能是激发位置不同所导致。



图 6 扫描试验现场

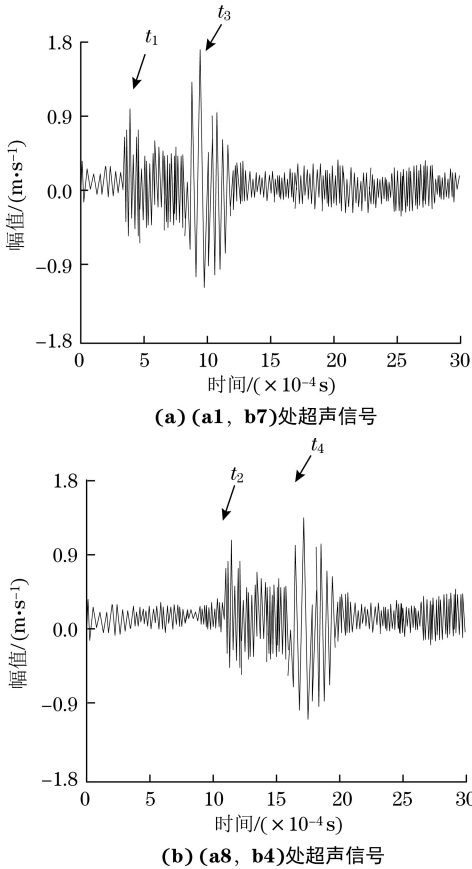


图 7 试件上两个不同位置处的超声信号

为确定两个波信号是否为 Lamb 波的 S0 和 A0 模态,对其进行计算,其结果如表 2 所示。

表 2 波信号计算结果

位置	波数	波峰时间/ s	距离/m	波速/ (m · s ⁻¹)
1	1	4.5×10^{-4}	80	5 000
	2	10×10^{-4}		
2	1	11.2×10^{-4}	80	2 400
	2	17×10^{-4}		

由表 1 和 Lamb 波的不同方向传播速度可知两个波信号中第一个波信号为 S0 模态,另一个为 A0

模态,且由图 7 可知,S0 模态的波形信号较小,容易受干扰,因此选择 A0 模态进行分析,判断钢板是否腐蚀。

现选择(a5,b5),(a4,b4)以及(a8,b8)3 个点进行检测,分别表示完全腐蚀,未完全腐蚀以及未腐蚀 3 种区域,其超声信号波形如图 8 所示。

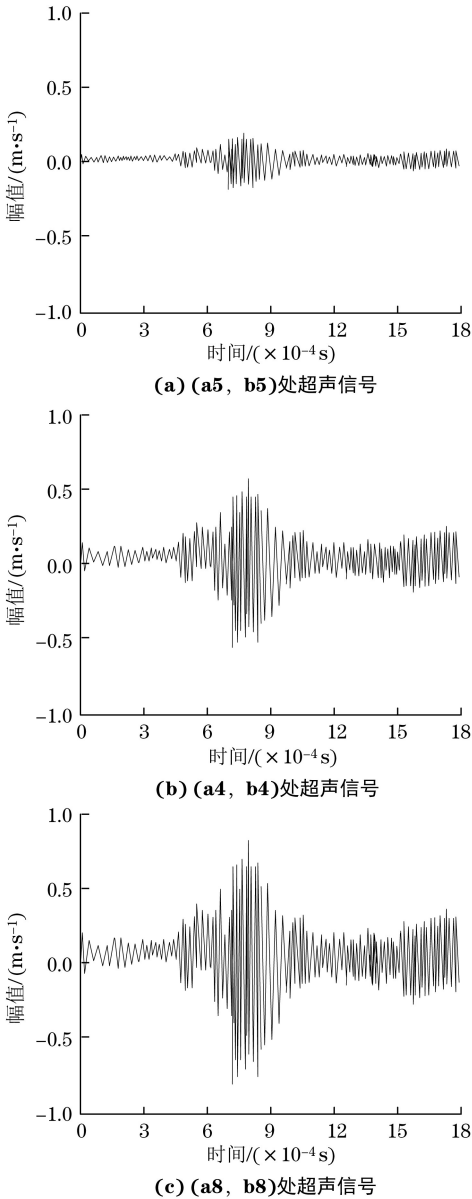


图 8 试件上 3 个不同位置处的超声信号波形

通过图 8 可以看出在腐蚀的边界即(a4,b4)位置,激光超声信号稍强;而在腐蚀的中心即(a5,b5)位置,激光超声信号最弱;在未腐蚀区域(a8,b8)位置则有最强的激光超声信号,其原因是腐蚀区域的激光强度受到了削弱。

在实际的石油存储中,储油罐刚发生腐蚀时,出于成本的考虑不会在第一时间更换储油罐,而是在

石油泄漏前进行更换，因此对腐蚀深度的评估较为重要，储油罐的腐蚀深度与腐蚀损伤因子之间的关系如表 3 所示。

表 3 腐蚀深度与腐蚀损伤因子的关系

腐蚀深度/%	腐蚀等级	腐蚀损伤因子 <i>D</i>
0~15	轻度	0~0.05
15~30	一般	0.05~0.09
30~45	中度	0.09~0.12
45~60	较重	0.12~0.15
60~75	严重	0.15~0.16

储油罐是否需要更换，通常腐蚀等级来决定，判断准则为：在腐蚀等级为中度及以下时可以不考虑更换；腐蚀程度较为严重时，则需要进行多方考虑以决定是否更换；腐蚀程度严重时，需要立刻进行更换，以防止重大石油泄漏事故。

现对某石油储备基地的 300 多个储油罐进行检测，根据腐蚀损伤因子对储油罐的腐蚀情况进行判断，从中随机挑选出 10 个储油罐数据，其腐蚀检测结果如表 4 所示。

表 4 部分储油罐的腐蚀检测结果

储油罐编号	腐蚀损伤因子 <i>D</i>	腐蚀程度	是否需要更换	上次更换距今
10	0.001	轻度	否	6 个月
30	0.122	较重	否	3 年 8 个月
50	0.066	一般	否	1 年整
100	0.107	中度	否	2 年 7 个月
130	0.153	严重	是	4 年 2 个月
150	0.062	一般	否	1 年 5 个月
200	0.085	一般	否	1 年 6 个月
240	0.034	轻度	否	6 个月
310	0.113	中度	否	2 年 7 个月
330	0.143	较重	是	4 年 2 个月

通过表 4 可以看出，随机挑选的 10 个储油罐的腐蚀情况均不相同，其因素腐蚀原因也不一致，既有长时间未更换，也有电化学腐蚀和环境因素等。结合储油罐的更换时间来看，采用所提方法进行腐蚀无损检测，可以判定检测结果较为可靠。

3 结语

通过对含缺陷的金属板进行激光超声检测，并结合实际储罐情况及其损伤表征因子进行验证，可以看出，对腐蚀钢板进行激光扫描后产生的 Lamb 波有 S0 和 A0 两种模态，其中 A0 模态较为明显。对不同区域的超声波信号进行分析能够发现，未被腐蚀区域的信号强度大，随着位置向腐蚀中心靠近，

超声信号的强度也会减小，通过该信号便可判断是否存在腐蚀。腐蚀损伤因子能够对储油罐的腐蚀深度进行判断，通过该因子的值可以一定程度上预测储油罐的使用寿命。

参考文献：

[1] 王越,曾先. 基于演化博弈视角的环境正义下重工业区工业碳排放治理机制[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3195-3204.

[2] 王莉莉,付世博,乔宏宇,等. 立式储罐静力分析的简化有限元模型[J]. 油气储运,2021,40(1):51-57.

[3] 郑明贵,李期. 中国 2020—2030 年石油资源需求情景预测[J]. 地球科学进展,2020,35(3):286-296.

[4] 胡燕. 石油储量升级效益评价方法研究[J]. 石油试验地质,2022,44(3):530-534.

[5] 孙阳,崔利富,孙建刚,等. 基于 SMA 阻尼器的在役立式储罐耗能减震分析[J]. 结构工程师,2021,37(6):64-76.

[6] 程庆利. 原油储罐底部油泥对 Q235B 碳钢腐蚀行为的影响[J]. 电镀与涂饰,2022,41(7):519-526.

[7] 廖鹏毅,常湧,高嘉辰. 接地网在高盐渍土壤环境下的腐蚀检测仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(7):101-104,361.

[8] 吴志平,陈振华,戴联双,等. 油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J]. 油气储运,2020,39(8):851-860.

[9] 周奎,徐晨光,徐宏文. 大型油罐罐壁损伤识别研究[J]. 结构工程师,2020,36(1):26-32.

[10] 朱林,王鹏,陈敏,等. 飞行吸附式储罐表面损伤缺陷检测系统[J]. 机械设计,2021,38(11):19-23.

[11] 闫怡旭,陈友兴,贾鹏飞,等. 板状材料中激光激发超声波的数值模拟[J]. 应用激光,2020,40(1):169-175.

[12] 廖韦韬,王海涛,江奕,等. 基于激光超声体波的轨头内部缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):221-229.

[13] 雷正龙,孙浩然,田泽,等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. 中国激光,2021,48(6):65-74.

[14] 杜园园,孙海,马立强,等. 煤损伤演化过程中的红外辐射响应特征研究[J]. 煤炭科学技术,2022,50(9):67-74.

[15] 徐云飞,孙永顺,丁晓喜,等. 基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(3):24-31.