

基于时间反转法的水平剪切导波 对梁结构缺陷的检测

刘增华, 魏 茹, 李子明, 何存富, 吴 斌

(北京工业大学 机械工程与应用电子学院, 北京 100124)

摘 要: 采用最低阶水平剪切模态 SH_0 对梁结构进行检测, 并用时间反转法对信号重构, 计算出不同深度刻槽下损伤指数, 对梁结构的损伤程度进行表征。试验采用厚度剪切式压电传感器激励接收 SH_0 模态, 对不同深度尺寸的槽型缺陷进行了检测, 并将接收信号进行时间反转得到重构信号。通过重构信号与激励信号的对比得到损伤指数。结果表明: 随着缺陷深度的增加, 损伤指数呈指数单调上升趋势, 基于时间反转法的水平剪切导波技术对梁结构缺陷检测具有一定潜力。

关键词: 水平剪切导波; 时间反转; 损伤指数; 槽型缺陷

中图分类号: TG115.28; TB551

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2015)04-0028-05

Experimental Research on Damage Detection in Beams by Using Shear Horizontal Guided Waves Based on Time Reversal Method

LIU Zeng-hua, WEI Ru, LI Zi-ming, HE Cun-fu, WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Application Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The fundamental shear horizontal mode SH_0 was used for beam detection and time reversal method was applied to signal reconstruction. Under the condition of the notch with different depths, damage index(DI) was calculated and used to characterize damage levels of beam structures. In the experiment, thickness-shear piezoelectric transducers were used for the excitation and reception of SH_0 mode and the notch with different depths was detected. Captured signals were time-reversed and reconstruction signal was obtained. Damage index can be calculated by the comparison between reconstruction signals and excitation signal. The result showed the value of DI increased monotonically with the increase of damage depth. The research demonstrates there is a certain potential to detect defects in beams by using shear horizontal guided wave method based on time reversal method.

Keywords: Shear horizontal guided waves; Time reversal; Damage index; Notch

与传统超声波相比, 超声导波具有衰减小、传播距离远的特点, 适合在板、梁和管等结构中进行长距离大范围的无损检测^[1-3]。在板结构中, 超声导波分为 Lamb 波和水平剪切波。其中, 水平剪切波的质点振动方向与其传播方向相垂直^[4]。最低阶

水平剪切模态 SH_0 不频散, 在缺陷检测中具有较大的应用潜力。目前, 多采用电磁声传感器用于单一 SH_0 模态的激励和接收^[5-7]。

时间反转法是指将接收信号在时域上翻转后在对传感器重新加载的过程, 是声互易性原理的应用之一, 可以使能量在空间、时间上聚焦, 并实现对声源位置信号的重构^[8-9]。目前时间反转法已应用于板、管等结构的超声导波检测^[10-11]。时间反转重构是一个导波波包在传播过程中发生变形, 又由于时间反转而恢复原貌的现象。

ING 和 FINK^[12-14] 研究了时间反转法在超声

收稿日期: 2014-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975006, 11272021); 北京市自然科学基金资助项目(1122005); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划资助项目(CIT&TCD201304048)

作者简介: 刘增华(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事超声无损检测与结构健康监测研究工作。

导波检测中的应用,表明时间反转法在导波检测中具有巨大潜力。WANG 等^[15]从信号系统学角度给出了超声导波时间反转法的数学推导过程。SOHN 等^[16]对 Lamb 波在传播过程中非线性损伤导致的时间反转重构失效现象进行了研究,并提出基于时间反转重构理论,实现了板中缺陷的免参考检测。MUSTRAPHA 等^[17]对混凝土包覆的管结构中 $T(0,1)$ 模态进行时间反转重构,并用定义的损伤指数(Damage index, DI)对损伤程度进行了表征。目前,对水平剪切导波的时间反转检测研究较少。

笔者采用厚度剪切式压电传感器激励接收 SH_0 模态,对带有槽型缺陷的梁结构进行检测,并将时间反转后的重构信号与激励信号差异进行对比,用损伤指数 DI 对缺陷损伤程度进行表征。

1 板中的超声导波时间反转技术

超声导波时间反转过程如图 1 所示。传感器 A 作为驱动元件,在结构中输入激励信号 $I(\omega)$,传感器 B 接收到结构在驱动下的响应信号 $V_{p2}(\omega)$ 。假设激励信号中心频率为 ω ,则响应信号如下^[18-20]:

$$V_{p2}(\omega) = I(\omega)K_{p1}(\omega)K_{p2}(\omega)G(r, \omega) \quad (1)$$

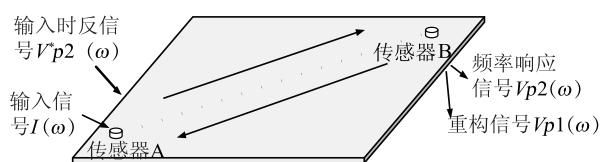


图 1 板中超声导波时间反转过程
于时间反转而恢复原貌的现象

其中, $G(r, \omega)$ 为波在结构中传播时的频率响应函数, $K_{p1}(\omega)$ 和 $K_{p2}(\omega)$ 分别为传感器 A 和传感器 B 的机电耦合系数。将响应信号 $V_{p2}(\omega)$ 在时域上进行反转。时域反转相当于频域内的共轭,因此反转后的信号为:

$$V_{p2}^*(\omega) = I^*(\omega)K_{p1}^*(\omega)K_{p2}^*(\omega)G^*(r, \omega) \quad (2)$$

将 $V_{p2}^*(\omega)$ 由激励传感器 A 再次在结构中激发。按照声波传播互易原理,两者位置可以互易且频率响应函数相同^[21],此时接收传感器 A 接收到的结构响应信号 $V_{p1}(\omega)$ 为:

$$\begin{aligned} V_{p1}(\omega) &= V_{p2}^*(\omega)K_{p1}(\omega)K_{p2}(\omega)G(r, \omega) \\ &= I^*(\omega)K_{p1}^*(\omega)K_{p1}(\omega)K_{p2}^*(\omega)K_{p2}(\omega)G^*(r, \omega)G^*(r, \omega) \\ &= I^*(\omega)K_{p12}^*(\omega)K_{p12}(\omega)G^*(r, \omega)G(r, \omega) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $G^*(r, \omega)G(r, \omega)$ 为共轭复数相乘, K_{p12}

(ω) 为 $K_{p1}(\omega)$ 和 $K_{p2}(\omega)$ 的乘积, $K_{p12}^*(\omega)K_{p12}(\omega)$ 是一个实数。

如果在传感器 A, B 之间的传播路径上无缺陷,即介质为线弹性板,频率响应函数 $G(r, \omega)$ 是标量,归一化后 $V_{p1}(\omega)$ 与 $I(\omega)$ 完全一致。如果传播路径中存在缺陷,那么缺陷将会导致传递介质非线性, $G^*(r, \omega)G(r, \omega)$ 为非实数,即可判断重构信号较激励信号产生了畸变,畸变程度越大,表明传播路径上的损伤越严重。

2 缺陷损伤指数

缺陷损伤指数 DI 是基于时域信号分析结果所定义,用以表征结构损伤程度。通过比较激励信号 $I(t)$ 与重构信号 $V_{p1}(t)$ 的相似度,提取特定传播路径下的 DI 值。假设 $I(t)$ 为 (a_1, a_2, \dots, a_n) , $V_{p1}(t)$ 为 (b_1, b_2, \dots, b_n) ,则两信号的相似度可以用两者相关系数 $\rho_{a,b}(t)$ 进行表征:

$$\rho_{a,b}(t) = \frac{n \sum a_i b_i - \sum a_i \sum b_i}{\sqrt{[n \sum a_i^2 - (\sum a_i)^2]} \sqrt{[n \sum b_i^2 - (\sum b_i)^2]}} \quad (4)$$

因此 DI 可以表示为:

$$DI = 1 - \rho_{a,b}(t) \quad (5)$$

计算 DI 值之前,需要将相比较的两个信号分别进行归一化,从而补偿传播路径的能量衰减。由式(4)可知,当两信号完全一致时, $\rho_{a,b}(t) = 1$, $DI = 0$ 。其中,截取窗宽的位置选择对损伤指数的计算具有非常重要的影响。传统的时间反转法主要采用峰值对齐法^[17]。峰值对齐法指分别确定两对比信号峰值点,再以峰值点位置为基准,依照激励信号峰值点前后所占采样点数,对二次接收信号进行截取。不同于传统信号对齐法,笔者采用窗宽对齐法进行对齐。根据 LIU 等^[22]对时间反转法的研究可知,重构信号 $V_{p1}(t)$ 的右边界会与时间反转窗的右边界位置重合。因此,以触发零点为起点,时间反转窗右边界为终点,将这一时间范围内的激励信号进行水平反转。若传播路径上无缺陷,该反转信号将会与重构信号 $V_{p1}(t)$ 重合。这一步骤的目的是将两对比信号以时间反转窗为右边界进行对齐;之后以该边界为基准,向左延伸 5 个周期的时间长度(激励信号为 5 周期汉宁窗调制的正弦波),将此作为截取的左边界,截得重构信号 $V_{p1}(t)$,并将其与激励信号进行对比。由于缺陷的存在,重构信号在相位上会发生变化,若采用峰值对齐法计算 DI 值,忽略了重

构信号的相位信息,对损伤信息的评估带来较大误差。另外,对于某些峰值信息不易确定的信号,峰值对齐法会造成操作困难和一定误差。而窗宽对齐法消除了这种误差,使得计算结果更准确。但是,该方法需要具备独立的触发通道,从而保证两次激励时触发时间的一致性;还需要提供时间反转窗的准确位置,从而保证右边界基准的准确性。

3 试验过程

试验装置如图2所示,由函数发生器AFG3021B、示波器DPO4054、计算机、压电传感器以及试样铝梁构成。铝梁尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,弹性模量为 70.753 GPa ,泊松比为 0.33 ,密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$ 。为了消除由于试验对象不同带来的误差影响,试验在同一铝梁的同一部位分别多次加工不同深度的刻槽缺陷,刻槽缺陷的宽度不变,深度逐渐增大。试验中采用的压电传感器为厚度剪切式压电片^[23]。通过该压电片的剪切振动可以激励出单一的 SH_0 模态。该压电片尺寸为 $25\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。在铝梁左端面并排粘贴两个压电片作为激励传感器T,在距离铝梁左端面 600 mm 处的中间位置粘贴一个压电片作为接收传感器R。

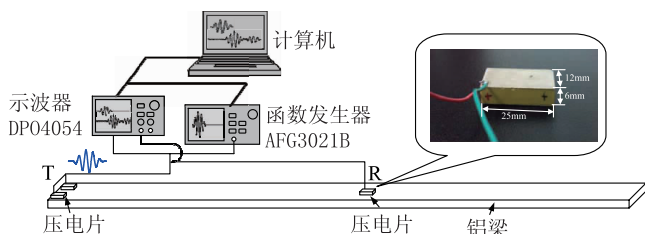


图2 试验装置

需要说明的是,试验中所采用的激励频率为 50 kHz ,是在 $20\sim 200\text{ kHz}$ 频段内进行扫频后优化选取的结果。图3为最佳频率点 50 kHz 时接收的直达波信号。经计算,直达波波速为 $3\,110\text{ m/s}$,与理论值 $3\,130\text{ m/s}$ 一致。在之后的缺陷检测试验中,均选用 50 kHz 作为激励频率。

图4为在无缺陷铝梁中时间反转过程中激励和

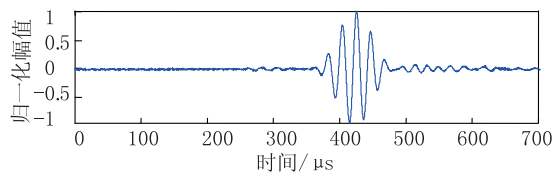


图3 频率 50 kHz 时接收的直达波信号

接收到的导波信号。图4(a),(b)分别为一次激励信号和一次接收信号。时间窗宽左侧为 283.21 μs ,右侧为 533.58 μs 。试验采用了自行开发的时间反转Lamb波检测系统程控软件^[22]。通过该软件实现示波器和函数发生器的控制以及时间反转操作。将一次接收信号按时间窗截取,在时域上反转之后再激励,如图4(c)所示。通过独立稳定的触发通道,保证了两次激励信号触发零点一致。因此,如图4(d)所示,二次接收信号右边界与时间反转窗右边界重合。采集无缺陷条件下接收信号作为参考。图5给出了传感器和槽型缺陷在铝梁中的位置,槽型缺陷距离梁的左端面 500 mm ,宽度 W 为 10 mm ,深度 L 可变。在相同的试验条件下,保持宽度 W 不变,增加深度 L ,对带缺陷的铝梁进行检测。深度 L 从 0 mm 增加到 2.1 mm ,步长 0.3 mm ,深度变化数为8。

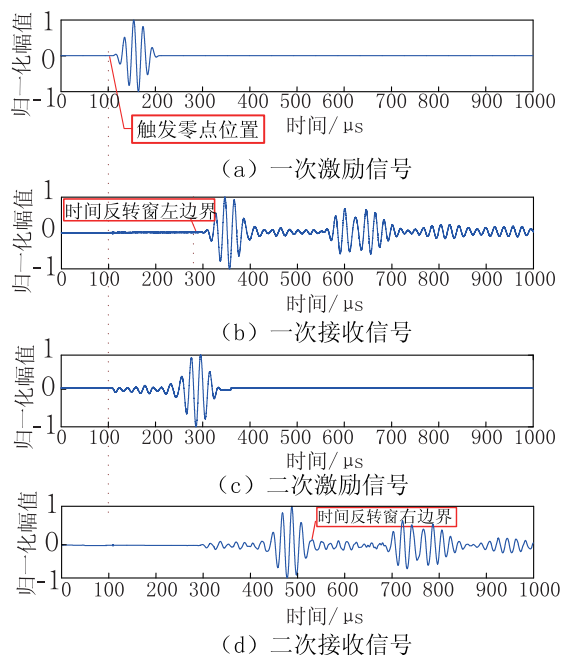


图4 在无缺陷铝梁中时间反转过程中激励和接收到的导波信号

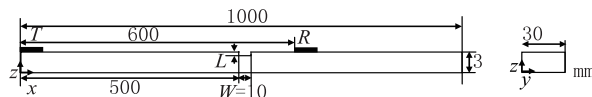


图5 传感器和槽型缺陷在铝梁中的位置

4 试验结果与分析

图6(a)为无缺陷时激励信号与二次接收信号对比图。依据窗宽对齐法的截取原则,将二次接收信号以窗宽右侧为基准,向右截取5周期时间宽度,

截出采样点数为 10 000 的重构信号,并与激励信号进行对比,截取放大后的对比结果如图 6(b)所示。采用式(4)和(5)中损伤指数计算方法,可得无缺陷

时损伤指数为 0.0096。依次类推,分别算得缺陷深度 L 从 0 mm 变化至 2.1 mm 时八组试验的重构结果,如图 7 所示。

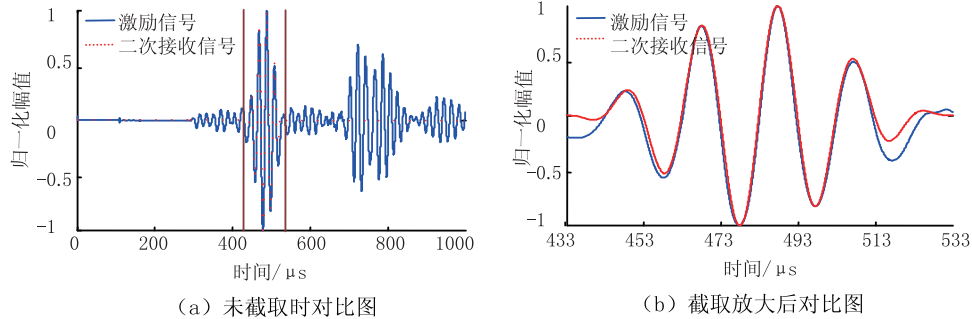


图 6 无缺陷时激励信号与二次接收信号对比图

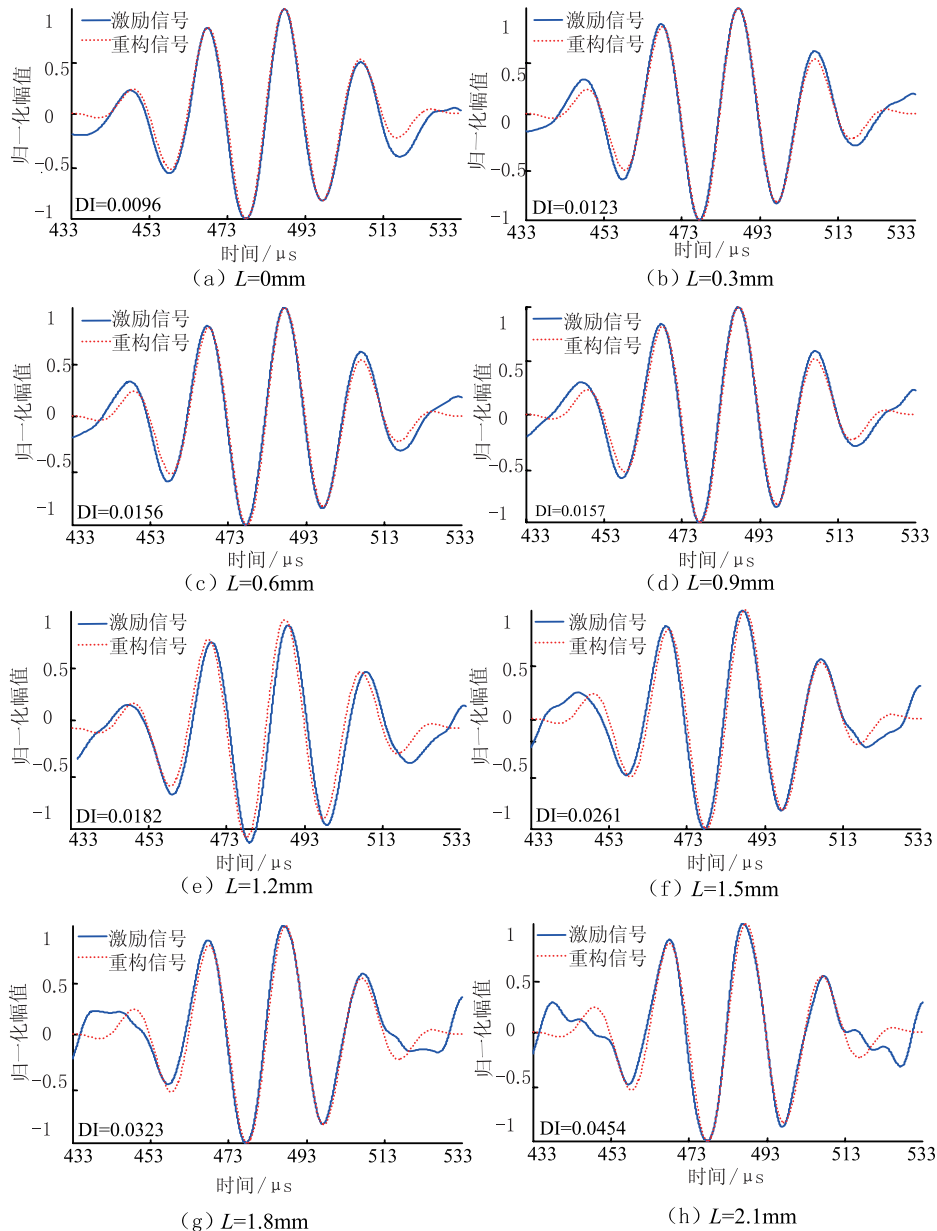


图 7 槽型缺陷深度 L 不同时,激励信号重构信号对比

试验得到的缺陷深度与损伤指数之间的关系如图 8 所示,图中给出了分别采用峰值对齐法和窗宽对齐法得到的损伤指数。从图 8 中可以看出,采用峰值对齐法时,由于忽略了激励信号与重构信号的相位信息,得到的无缺陷情况损伤指数大于多个有缺陷情况下的损伤指数,该异常现象说明峰值对齐法在时间反转过程中存在一定的局限性。采样窗宽对齐法时,损伤指数随着缺陷深度增加单调增大,经数值拟合得到图 8 的拟合曲线,可以看出缺陷深度与损伤指数之间呈指数增长趋势。这也说明,随着缺陷深度 L 增大,重构信号与激励信号的相似度减小,信号畸变程度增大,损伤指数也随之增大。

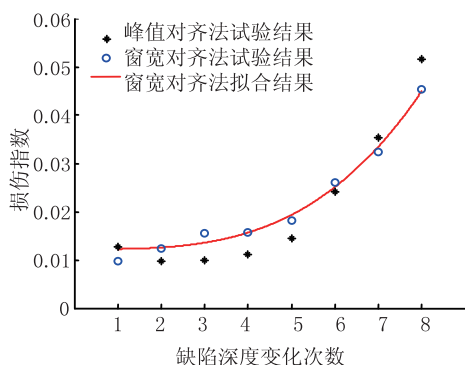


图 8 试验得到的缺陷深度与操作指数之间的关系

5 结语

采用最低阶水平剪切导波模态 SH_0 用于梁结构的损伤检测,并基于时间反转法,通过时间反转重构信号与激励信号的对比,得到不同深度槽型缺陷时的损伤指数,实现了对结构损伤程度的评估。随着结构损伤程度的增加,损伤指数也随之增大,这为缺陷的定量检测奠定了基础。试验表明:基于时间反转法的水平剪切波技术对梁结构缺陷检测具有一定应用潜力。

参考文献:

- [1] ZHOU W J, ICHHOU M N, MENCIK J M. Analysis of wave propagation in cylindrical pipes with local inhomogeneities[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1): 335-354.
- [2] 何存富,王学浦,王秀彦,等.基于导波技术的高速公路护栏立柱埋深检测[J].中国公路学报,2008,21(6): 37-42.
- [3] WILCOX P, LOWE M, CAWLEY P. The effect of

- dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves[J]. NDT&E International, 2001, 34(1):1-9.
- [4] SU Z Q, Yang C H, PAN N, et al. Assessment of delamination in composite beams using shear horizontal (SH) wave mode[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(2): 244-251.
- [5] 焦敬品,刘文华,曾宪超,等.周向一致兰姆波电磁超声换能器设计与实现[J].仪器仪表学报,2010,31(6): 1387-1393.
- [6] 杨雅洁,周丽.基于磁致伸缩效应的超声应力波传感器设计与优化[J].仪器仪表学报,2010,31(11): 2474-2480.
- [7] CLARKE T, SIMONETTIF, ROHKLIN S, et al. Development of a low-frequency high purity A_0 mode transducer for SHM applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(7): 1457-1468.
- [8] 邓菲.基于时间反转的单通道管道导波检测新方法[J].机械工程学报,2011,47(6):17-21.
- [9] 邓菲,吴斌,何存富.基于时反导波检测的管道缺陷圆周定位研究[J].声学学报,2008,33(1): 28-34.
- [10] 周进节,何存富,郑阳,等.基于非轴对称激励的管道裂纹时反导波检测研究[J].机械工程学报,2012,48(16):14-20.
- [11] 苗晓婷,李富才,孟光.结合时间逆转的兰姆波与加权分布成像算法对多损伤识别的研究[J].机械工程学报,2011,47(16):1-8.
- [12] ING R K, FINK M. Self-focusing and time recompression of Lamb waves using a time reversal mirror[J]. Ultrasonics,1998,36(1-5): 179-186.
- [13] ING R K, FINK M. Time recompression of dispersive Lamb waves using a time reversal mirror-application to flaw detection in thin plates[C]// Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, [S. l]:[s. n],1996: 659-663.
- [14] ING R K, FINK M. Time-reversed Lamb waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998,45(4):1032-1043.
- [15] WANG C H, ROSE J T, CHANG F K. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(2): 415-423.
- [16] SOHN H, PARK H W, LAW K H, et al. Damage detection in composite plates by using an enhanced time reversal method[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2007, 20(3): 141-151.

(下转第 50 页)

法比较,TOFD 检测方法在现场应用时更具有优势,可通过直通波位置的变化,检测材料的声速变化,进而判断氢腐蚀的程度。

3.6 辅助方法

3.6.1 金相检验

无论金属发生氢腐蚀的宏观形貌是怎样的,微观组织的特征是相同的,都表现为金属组织的晶间裂纹与珠光体组织的破坏;因此,通过金相检测法,对氢腐蚀后材料中的珠光体组织与正常材料进行对比观察,可确定氢腐蚀是否发生。

3.6.2 硬度测试

氢腐蚀前期,氢与钢材表面中的碳发生反应生成甲烷,此时所生成的甲烷会很快离开钢材表面,不会使钢材产生鼓泡和裂纹,但会引起钢材表面脱碳。另外,由于温度的作用,钢中珠光体会发生球化。表面脱碳和珠光体球化都会引起钢材的强度和硬度下降。所以,通过硬度的变化可以间接地判断氢腐蚀的发生。

此外,氢腐蚀的孔洞或微裂隙对声发射信号有一定的影响^[8],带有氢腐蚀的低碳钢在拉应力作用下的声发射特征与正常碳钢相比,会有明显的改变。氢腐蚀产生的甲烷气泡和显微裂纹在拉应力弹性变形阶段会大大降低声发射的行为,所以,声发射行为会随着氢腐蚀的增加而减弱,因此声发射技术可用来在线监测氢腐蚀的程度。国外已经开始对氢腐蚀的超声波 A 扫描数据建立数据库^[9]。

4 结语

目前,对氢腐蚀出现宏观裂纹的离线检测已经发展得比较成熟,但对于早期氢腐蚀的研究却并不深入,特别是各种材料氢腐蚀孕育期的测算方面,大部分的

数据都是建立在经验的基础上。对早期氢腐蚀的检测监测方法还不够完善,数据积累也比较贫乏。

就氢腐蚀的检测或监测来说,是技术性、综合性很强,难度很大的工作,仅靠一种检测方法是难以确切定论的,必须几种检验方法相互配合。目前比较成熟的超声检测技术是超声测厚法、超声声速比法、超声衰减法、超声背散射法,辅以金相检验、硬度测试可以判断氢腐蚀程度;TOFD 法、声发射法和超声相控阵法判断氢腐蚀仍处于起步阶段。

参考文献:

- [1] 李晓刚. 高温高压临氢腐蚀研究回顾与展望[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2000, 17(3): 5-10.
- [2] 任凌波, 任晓蕾. 压力容器腐蚀与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 487-519.
- [3] API 941—2004 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants[S].
- [4] 金鹰, 董超芳, 付冬梅, 等. 用神经网络算法预测氢腐蚀孕育期[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(6): 368-373.
- [5] 李丽菲, 沈功田, 王芳, 等. 压力容器氢损伤的监测与检测方法[J]. 压力容器, 2006, 123(12): 37-41.
- [6] 张伟, 关卫和. 高温高压条件下早期氢腐蚀的超声波检测[J]. 无损检测, 2013, 53(2): 49-53.
- [7] BIRRING A S, BARLETT M L, KAWANO K. 钢中氢腐蚀的超声波检查[J]. 无损探伤, 1991(3): 34-38.
- [8] LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, LI Ming, et al. Effect of attack on acoustic emission behavior of low carbon steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 9(2): 130-134.
- [9] AHMED Y. A cost effective development of an ultrasonic A-scans database for high-temperature hydrogen attack[J]. NDT&E International, 2008, 41: 163-168.
- [10] 王强, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于时间反转理论的结构损伤图像表征方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1816-1821.
- [11] LIU Z H, XU Q L, GONG Y, et al. A new multi-channel time reversal focusing method for circumferential Lamb waves and its applications for defect detection in thick-walled pipe with large-diameter[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1967-1976.
- [12] LIU Z H, WU B, HE C F, et al. A new type transducer for torsional guided wave generation and its application to defect detection in pipes[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, 49(1): 41-43.
- [13] MUSTAPHA S, LU Y, LI J C, et al. Damage detection in rebar-reinforced concrete beams based on time reversal of guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(4): 347-358.
- [14] 生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 时间反转镜用于被动监测技术的研究[J]. 应用声学, 2005, 24(6): 351-358.
- [15] PARK H W, SOHN H, LAW K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(1/2): 50-66.
- [16] SANTONI G B, YU L Y, XU B L, et al. Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Journal of Vibra-

(上接第 32 页)