

兰姆波在薄钢板无损检测中的应用研究

王 杜, 郑祥明¹⁾, 唐正连²⁾, 张 春²⁾, 张诗昌, 陈贻宏

(武汉科技大学 材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘 要:通过在钢板上钻制直径不等的孔来模拟钢板中的孔洞类缺陷, 采用线切割加工出不同深度的狭缝来模拟钢板中的分层缺陷。采用一发一收法, 分别在两种厚度的钢板上激励出兰姆波进行检测, 通过对比分析检测到的缺陷前后板中兰姆波信号, 采用时频分析方法识别出板中激发的兰姆波模式以及模态转换现象, 初步确定特定缺陷形态对兰姆波在板中传播的影响。

关键词:无损检测; 兰姆波; 时频分析

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)04-0193-04

Experimental Study for Nondestructive Testing of Steel Sheet by Lamb Waves

WANG Du, ZHENG Xiang-ming¹⁾, TANG Zheng-lian²⁾, ZHANG Chun²⁾, ZHANG Shi-chang, CHEN Yi-hong

(School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The holes with different diameter were drilled in the steel sheet to simulate the hole-class defects, and slots with different depth were cut by WEDM in the steel sheet to simulate the lamination defects. The two types of plates were detected by pitch-catch technique with Lamb waves respectively. Signals which were detected in the defect-free plate and plate with defect were compared. Time-frequency analysis was employed to recognize the Lamb wave modes and mode conversion, and some effect of the given defects on Lamb waves in the steel sheet is determined primarily.

Keywords: Nondestructive testing; Lamb waves; Time-frequency analysis

兰姆波^[1]检测具有快速便捷的特点, 非常适用于板形结构的大面积无损检测。但是由于兰姆波理论及检测机理的复杂性, 金属薄板兰姆波检测技术至今仍存在许多不一致的观点和未解决的问题, 如分层对兰姆波的散射机理、如何选择最佳探伤参数、如何对缺陷进行定性定量分析以及人工缺陷的选型等, 这些都大大限制了其在工业生产中的应用^[2]。美国材料试验学会标准 (ASTM) 及宇航材料规范 (AMS) 均提出对金属薄板探伤可采用兰姆波, 但是对其具体实施方法却未涉及。文献^[3]也只是指出

最佳角与波型往往是用缺陷已知的试件试验时凭经验求出。

由于激励模式的频散特性, 在任一给定的激发频率下, 至少存在两种兰姆波模式, 而各模式的相速度又随着激发频率的改变而发生变化, 即频散。这使得信号中常存在多种模式, 它们相互叠加, 从时域中常常无法识别出各自的模式。

从理论上讲, 当超声波通过被测材料时, 被测部分材料的不连续性或不均匀性信息就已隐藏在超声信号中, 所以兰姆波检测中很重要的一个方面在于精确的信号解释。笔者采用时频分析方法^[4,5] (如短时傅里叶变换, 即 STFT) 对接收到的兰姆波信号进行模式识别和分离, 可以确定信号中是否存在模态转换现象以及频散和衰减, 从而得到缺陷有无以及缺陷分布形态的信息, 初步确定缺陷形态对兰姆波在板中传播的影响。

收稿日期: 2006-11-15

基金项目: 湖北省自然科学基金 (2004ABA019); 湖北省教育厅基金项目 (2004D009); 宁波市自然科学基金 (2006A610025)

作者简介: 王 杜 (1981—), 男, 硕士研究生, 从事超声波无损检测及其信号处理的研究工作。

1) 宁波工程学院 机械工程学院, 宁波 315016

2) 湖北汽车工业学院 材料工程系, 湖北十堰 442002

1 兰姆波的频散特性

描述兰姆波波动特性的方程是瑞利-兰姆(Rayleigh-Lamb)方程^[6],用 Matlab 编程对瑞利-兰姆方程进行数值求解,得到兰姆波在 Q235 热轧钢板中的相速度频散曲线(图 1),计算中取纵波速度 $c_l = 5\,940\text{ m/s}$,横波速度 $c_s = 3\,240\text{ m/s}$ 。

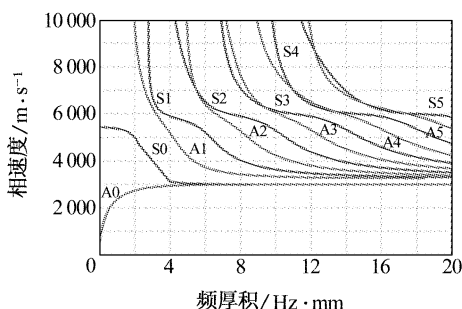


图 1 相速度频散曲线

2 时频分析

由于频散,超声兰姆波是非平稳信号,单独使用时间分析和频率分析都不能充分描述非平稳信号的特性,这就需要对信号进行时-频联合描述。STFT 是研究非平稳信号最广泛使用的方法,其中的概念简单有效、意义明确,许多情况下,给出了与人们直观感知相符很好的时-频构造。它是将信号时域局部化,并将各个局部化的时域信号加窗函数(笔者选用 Hamming 窗)后进行傅里叶变换。兰姆波的群速度频散曲线是在速度-频率空间上描述兰姆波不同模式的能量传播特性。将群速度频散曲线转换到时间-频厚空间,可得到各模式兰姆波的理论时频分布曲线(图 2),其中传播距离为 162 mm。

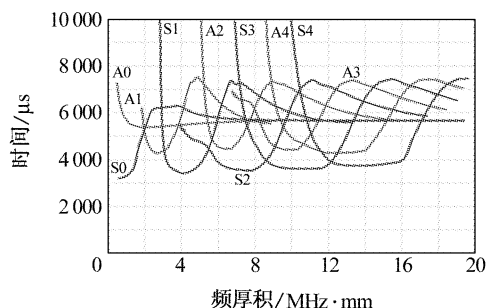


图 2 理论时频分布曲线

3 试验步骤及结果分析

3.1 试验装置

试验装置原理框图见图 3。采用自行开发的

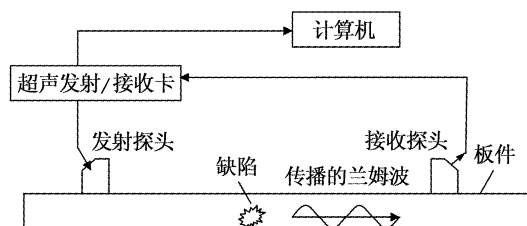


图 3 试验装置示意图

12 位 A/D 100 MHz 采样的超声检测系统作为超声发生/接收设备。采用一发一收法,用中心频率为 2.5 MHz 的斜探头(入射角为 53.2°)分别在厚度为 3.8 mm(尺寸为 $300\text{ mm} \times 120\text{ mm}$)和 4.8 mm(尺寸为 $330\text{ mm} \times 120\text{ mm}$)钢板上激励出兰姆波进行检测。测量时两探头均置于钢板沿长度方向的中心线上,两探头中心距离为 162 mm。

3.2 试验步骤与结果分析

首先记录未制作人工缺陷之前在两种厚度的钢板上所测的波形信号,然后在 1 号 3.8 mm 厚的钢板试件中心位置分别钻制 $\phi 1.5, 3, 4$ 和 5 mm 的通孔,并分别记录测得的波形信号;在 2 号和 3 号 4.8 mm 厚钢板试件中部沿宽度方向采用线切割方法分别切割出深度为 1.2 和 2.4 mm,宽度为 1 mm 的切缝。在 4 号 4.8 mm 厚钢板试件的中部沿板宽度方向切割出宽为 1 mm,长为 70 mm 的横向贯穿切缝。在 5 号 4.8 mm 厚钢板试件的中部沿板长度方向切割出一个宽为 1 mm,长为 50 mm 的纵向贯穿切缝。用线切割方法制作好这些人工作缺陷之后,分别用斜探头测得波形数据。

3.2.1 兰姆波模式识别与分离

图 4 和 5 分别是在 3.8 mm 厚钢板上测得的无缺陷和有 $\phi 4\text{ mm}$ 通孔缺陷时的波形数据(上图)、功率谱图(左下图)和时频分布图(右下图)。

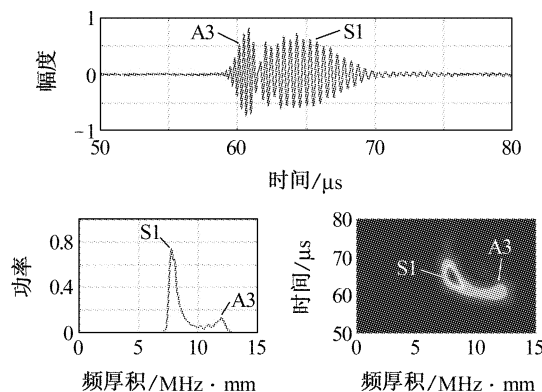
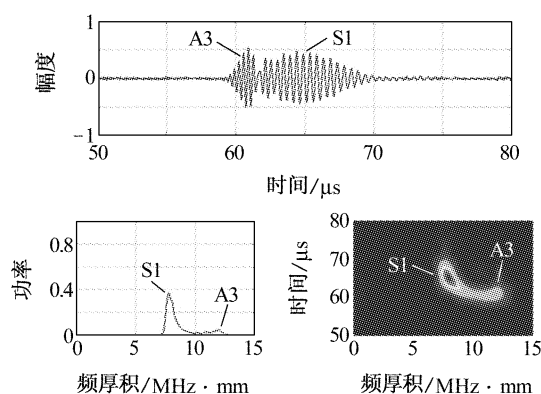


图 4 3.8 mm 板无缺陷时的试验结果

图5 3.8 mm 板 $\phi 4$ mm 通孔缺陷的试验结果

从时域波形图上分析有两个波包,但是无法确定信号中所包含的模式成分。左下图是超声信号的傅里叶变换后的功率谱图,从图中可以得出在信号中存在两种频率成分,且低频部分信号占主要,高频成分次之,但是也不能识别出信号中的兰姆波模式。右下图是超声信号的时频联合分布图,采用的是STFT变换,由图可清楚地读出在 $65 \mu\text{s}$ 处的模式能量最高,为主要成分,其频厚积为 $8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$;在 $61 \mu\text{s}$ 处的模式能量次之,为次要成分,其频厚积为 $12 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 。再对比图2即可得知主要模式为S1模式,次要模式为A3模式。通过时域波形比较和时频分析可知,对于通孔型缺陷,随着孔径的增大,两种兰姆波模式的幅值均单调衰减,但是未发现模式转换。这可能与通孔缺陷的形态有关,因为孔型缺陷的迎波面是通孔的部分柱面,随着孔径的增大,其柱面面积即缺陷反射面积也增大,因而使接收探头收到的兰姆波能量减小,反映在波形上就是幅值衰减。由于幅度是一个对耦合条件比较敏感的量,因此可由信号的功率谱峰值变化来表示信号能量的衰减,结果如图6所示。

图7和8分别表示在4.8 mm厚钢板上测得的

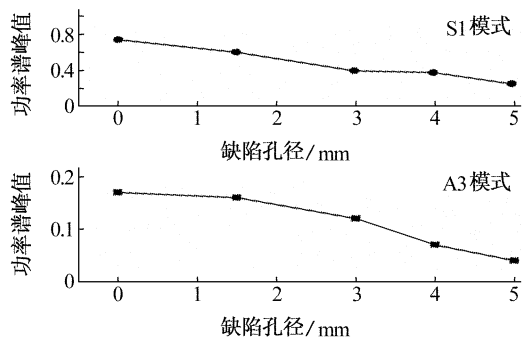


图6 3.8 mm 厚钢板中兰姆波各模式成分的功率谱峰值比较

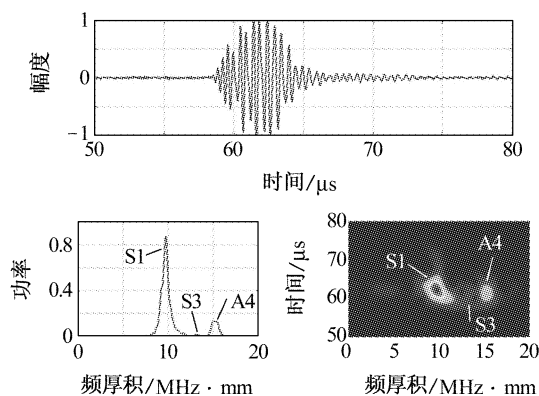


图7 4.8 mm 板无缺陷的试验结果

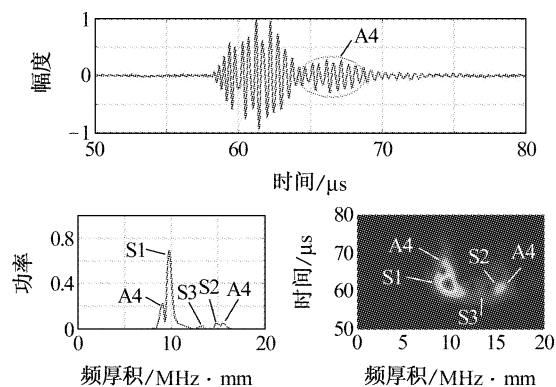


图8 4.8 mm 板 1.2 mm 深切缝缺陷的试验结果

无缺陷和2号缺陷试件的波形数据、功率谱图和时频分布图。

由于激发出的兰姆波模式相互叠加,从时域波形无法判断出信号中所包含的模式成分。从图7和8的功率谱图可以得出在信号中存在多种频率成分,且各种兰姆波模式频谱峰值(即能量)随着缺陷切缝深度的增加出现了明显衰减,同时有模式转换现象。图7和8的时频联合分布图对比图2可知,当板中没有制作缺陷时,有S1, A4和S3三种模式,其中S1模式为主要成分, S3模式所占能量非常小。当板中有1.2 mm深切缝时,波形主要成分发生了模式转换,即信号主要模式S1部分转换为与其频率相近的A4模式,在时域波形图上即为 $65 \sim 70 \mu\text{s}$ 时间出现了波包。高频部分的A4模式也发生了模式转换现象,即A4模式部分转换为S2模式。对信号各成分的功率谱峰值进行比较得出结果见图9。

由图9可知,除了S3模式无明显变化外,其他模式在有缺陷之后以及缺陷切缝深度增加时均出现较大衰减。S1模式在遇到切缝类缺陷时发生了模式变换,产生了低频A4模式,同时幅值发生了较大衰减,可见S1模式在试验中具有较高的敏感性。

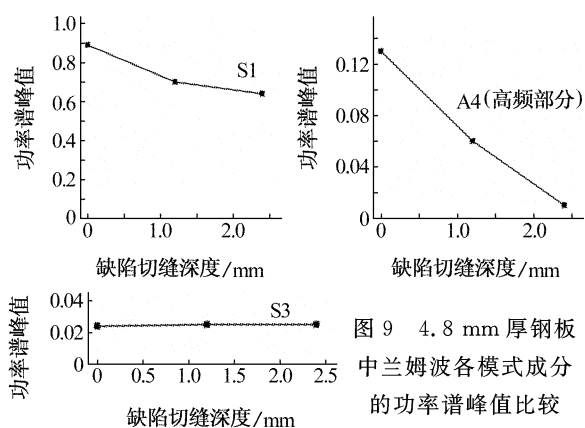


图9 4.8 mm厚钢板
中兰姆波各模式成分
的功率谱峰值比较

A4 模式(高频部分)在信号中虽不是主要模式,但它的能量随着切缝深度的增加发生了非常明显的衰减,同时遇到缺陷时也有模式转换现象,产生了 S2 模式。切缝为贯穿切缝时,对信号各成分的功率谱峰值进行比较得出结果如表 1 所示。由表 1 可知,当缺陷为横向贯穿切缝时,波形幅值衰减非常大,大约为无缺陷时的十分之一。当缺陷为纵向贯穿切缝时,波形幅值衰减却非常小。可见缺陷的取向对兰姆波的传播有很大的影响。

表 1 信号各成分的功率谱峰值

缺陷	各模式的功率谱峰值		
	S1	S3	A4(高频部分)
无	0.890	0.024	0.130
横向贯穿切缝	0.006	0.000 1	0.002
纵向贯穿切缝	0.680	0.015	0.100

4 结论

采用一发一收法,用中心频率为 2.5 MHz 的斜探头分别在不同厚度的钢板上激励出兰姆波检测孔洞类(通孔)和分层类(切缝)缺陷,采用时频分析方法识别出板中激发的兰姆波模式以及模式转换现象,初步确定特定缺陷形态对兰姆波在板中的传播有如下影响:

(1) 采用 STFT 时频分析方法可有效识别出信号中的兰姆波模式。对任一波形数据,均应从时域、频域以及时频联合分布来分析,才能较全面把握信号中包含的有用信息。

(2) 在上述试验条件下激发出的 S1 模式和 A3 模式在 3.8 mm 厚钢板中遇到通孔型缺陷时没有发现模式转换现象,仅是幅值随着孔径的增大发生了单调衰减。

(3) 当板中存在狭长切缝类缺陷时,上述试验条件下激发的 S1 模式和 A4 模式均出现了模式转换现象,同时能量出现较大衰减。其中 A4 模式对切缝类缺陷非常敏感,用其检测钢板中的分层缺陷是适合的。与常规超声检测一样,缺陷的取向对兰姆波在板中的传播影响很大。当狭缝缺陷的取向与兰姆波的传播方向垂直时,信号能量出现较大衰减,同时出现模式转换;当狭缝缺陷的取向与兰姆波的传播方向平行时,信号能量衰减非常小,信号成分也没有明显变化。

(下转第 199 页)

首届全国钢丝绳无损检测技术培训班在京举行

为了促进钢丝绳无损检测技术及检测设备的推广应用,保证特种设备及矿山用重要受力部件钢丝绳的安全使用,由中国特种设备检测研究中心培训部举办的,首届全国钢丝绳无损检测技术培训班于 3 月 12—15 日在北京举行。全国钢丝绳无损检测技术方面的专家及来自十九个省市地区的特检、索道和矿山代表一百余人参加了此次培训。

此次培训班的主要目的在于促进钢丝绳检测新技术的推广应用,提高从业人员的技术水平、理论知

识、实际操作和分析能力。通过培训使学员了解了钢丝绳无损检测技术的难点和现状,以及选择和使用钢丝绳无损检测设备的注意事项。培训班为期四天,对钢丝绳基本知识、钢丝绳电磁无损检测技术、相关标准和钢丝绳无损检测设备进行了系统的讲解。

授课专家的专业知识和丰富的经验使学员们受益匪浅,都希望以后能有更多这样面对面交流的机会。

(于 森)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

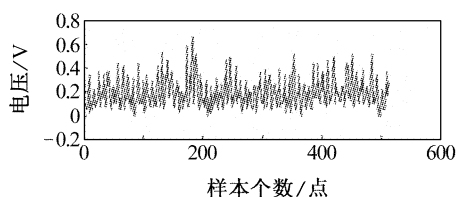


图3 经过小波变换重构后的信号波形

向量作为网络的输入模式向量,加上信号的幅度和宽度两维,则输入模式向量的维数等于 258。输入层的单元数由输入向量的维数决定,因此输入层单元个数为 258。输出为(00),(01),(10)和(11),分别对应四类缺陷(裂纹、腐蚀、内壁磨损和孔洞),所以 RBF 神经网络的结构为 258-36-2。一共采集 100 个样本,裂纹信号每种类型各 25 个,将 100 个样本随机分成两部分,40 个样本用于网络训练,其余 60 个用于网络性能的测试。训练 RBF 网络时,经过了 36 次学习(即隐层 36 个神经元)后,输出均方误差满足要求(设误差目标为 0.01),模糊聚类算法神经网络误差收敛曲线如图 4 所示,RBF 神经网络的测试结果见表 1,可见

RBF 网络训练后对训练样本可以完全识别,对测试检验样本的识别率也较高,总体正确识别率为 88.33%。笔者同时对采用 K 均值算法^[6]计算聚类中心的 RBF 网络进行了研究,得到的识别率只有 80%,所以采用模糊聚类的 RBF 网络比采用 K 均值聚类的 RBF 网络具有更好的识别率,聚类的中心更稳定,分类器的泛化能力更强。

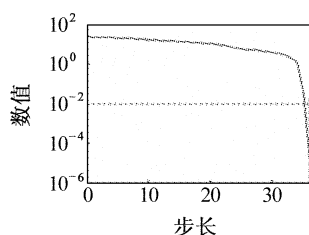


图4 RBF 网络的误差收敛曲线

5 结论

(1) 小波变换提取缺陷信号的特征值,能很好

表1 试验统计结果

缺陷	检验样本数	正确检验样本数	样本的正确识别率/%
裂纹	15	13	86.7
腐蚀	15	14	93.3
内壁磨损	15	12	80.0
孔洞	15	14	93.3

地保留原始信号的高频特性,可将缺陷信号的宽窄及多峰性等表现出来;同时应用小波变换可进行数据压缩,在第 8 层共 25 个数据的压缩率为 50%,有利于信号的传输和存储。

(2) 缺陷信号进行神经网络训练,采用均方小波幅值作为神经网络的输入向量,有效提取了信号的特征。模糊聚类算法寻找基函数的中心,网络收敛速度快,使缺陷的定性分类获得了较高的准确率,有良好的缺陷分类效果,为实现检测系统的自动化和智能化提供了可行性。

参考文献:

- [1] Hwang K, Mandayam S. Application of wavelet basis function neural networks to NDE[J]. IEEE,1997, 0-7803-3636-4197,1420—1423.
- [2] Jun-Youl Lee. Hierarchical rule based classification of MFL signals obtained from atural gas pipeline inspection[J]. IEEE,2000, 0-7695-06 19-4/00, 71-76.
- [3] 何辅云.石油管道的高速检测与缺陷识别[J].无损检测,2000,22(5):206—208.
- [4] 吴 森,张海燕.超声检测缺陷分类的小波分析与神经网络方法[J].中国矿业大学学报,2000,29(3):239.
- [5] 高 隽.人工神经网络原理及仿真实例[M].北京:机械工业出版社,2003:55—63.
- [6] 边肇祺.模式识别[M].北京:清华大学出版社,1999:280—281.

(上接第 196 页)

参考文献:

- [1] 蒋福棠,何双起,沈建中.兰姆波探伤中一些问题的探讨[J].材料工程,1996,41(10):29—31.
- [2] 刘镇清.无损检测中的超声兰姆波[J].无损检测,1999,21(9):409—423.
- [3] Krautkramer J.超声检测技术[M].李 靖,等,译.广

州:广东科技出版社,1984:277.

- [4] Cohen L. Time-frequency distributions: a review[J]. Proceedings of the IEEE,1989,77(7):941—981.
- [5] Proser W H, Seale Michael D. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes[J]. J Acoust Soc Am,1999,105(5):2669—2676.
- [6] [美]阿肯巴赫.弹性固体中波的传播[M].洪锦如,译.上海:同济大学出版社,1992.