

尿素合成塔内衬 316LMod 不锈钢薄板 背侧缺陷的 Lamb 波检测

王春茂, 祝卫国, 袁 涛, 申孝民

(山东省特种设备检验研究院, 济南 250013)

摘 要:根据 Rayleigh-Lamb 方程, 推导出尿素合成塔内衬 316LMod 不锈钢薄板相速度和群速度的频散曲线。通过对包含人工缺陷的试块回波信号进行二维傅里叶变换, 提取出了背侧裂纹缺陷的主要 Lamb 波模式, 进而确定了 Lamb 波检测参数。通过对试块的缺陷识别, 绘制出了缺陷当量评定图, 实现了对背侧裂纹缺陷的 Lamb 检测的定量评定。最后通过尿素合成塔检测实例验证了该方法的有效性。

关键词:Lamb 波检测; 不锈钢; 频散曲线; 背侧缺陷

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)05-0370-03

Lamb Wave Testing Technique of Backside Defects in 316LMod Stainless Steel Linings of Urea Reactors

WANG Chun-Mao, ZHU Wei-Guo, YUAN Tao, SHEN Xiao-Min

(Shandong Special Equipment Inspection & Research Academy, Jinan 250013, China)

Abstract: According to Rayleigh-Lamb equation, the dispersion curves of phase and group velocities of 316LMod stainless steel linings were derived out. The main Lamb wave mode of backside defect was drawn out through 2D FFT of echo signal of the sample with artificial defects, then, the Lamb wave testing parameters were confirmed. Through the defect recognition of the sample, the defect equivalent evaluation was given, and then, the quantitative Lamb wave testing of backside defects was realized. Finally, the method was verified by examples of urea reactors testing.

Keywords: Lamb wave testing; Stainless steel; Dispersion curves; Backside defect

含强腐蚀介质高压容器为了满足强度要求和抗腐蚀性能同时又降低制造成本, 多采用薄板耐蚀衬里层加强度层的复合结构。如尿素合成塔采用超低碳奥氏体(316LMod)不锈钢内衬层加强度层结构, 生产硝基苯胺和氯化铵的高压反应釜采用 1Cr18Ni9Ti 衬里加强度层的结构等。衬里层的主要失效形式包括失稳、开裂和腐蚀等, 其中开裂失效易造成外部强度层壳体被内部强腐蚀性介质迅速腐蚀破坏, 造成强度层失效而引发恶性事故。

目前对衬里层缺陷的检测方法主要有宏观检测、测厚、金相分析和渗透检测等。此类方法都是针对内衬层内表面(接触反应介质侧)的检测, 对于内衬层背侧(不接触反应介质侧)由于有强度层的遮挡, 很难进行有效检测。

笔者针对尿素合成塔内衬层的 8 mm 厚 316LMod 不锈钢进行了 Lamb 波检测, 并通过现场验证, 取得了较理想的检测效果。

1 Lamb 波检测参数的确定

1.1 Lamb 波频散曲线的绘制

Lamb 波检测的应用难点在于其多模式和频散特性, 即 Lamb 波检测信号中常存在多种模式, 它们相互叠加, 当遇到缺陷或端面时, 可能会发生模式转

收稿日期: 2009-07-30

基金项目: 国家质检总局耐蚀高压容器衬里层快速检测技术研究(2008QK178)

作者简介: 王春茂(1978—), 男, 工程师, 主要从事特种设备检验和研究工作。

换现象,这使得 Lamb 波信号分析变得很复杂。因此,为有效地进行 Lamb 波检测,就必须绘制 Lamb 波理论频散曲线,并根据 Lamb 波的频散特性确定检测参数。

描述 Lamb 波波动特性的 Rayleigh-Lamb 方程^[1]为:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 qph}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 - 2\mu p^2)(k^2 - q^2)} \quad (1)$$

$$\text{其中: } p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad (2)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{c_p} \quad (4)$$

式中 c_p ——Lamb 相速度;

ω ——圆频率;

λ ——波长;

μ ——运动黏滞系数;

h ——板厚。

求解 Rayleigh-Lamb 方程,得到 316LMod 不锈钢相速度频散曲线,如图 1 所示。

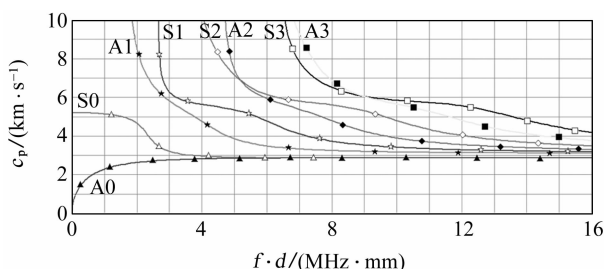


图 1 316LMod 不锈钢相速度频散曲线

由于具有有限带宽的脉冲声波,在薄板波导中将以群速度 c_g 传播,且沿板水平方向的波数 k_0 与相速度 c_p 关系为:

$$c_g = \frac{d\omega}{dk_0} \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_p} \quad (6)$$

因此可以推导出群速度频散曲线,如图 2 所示。

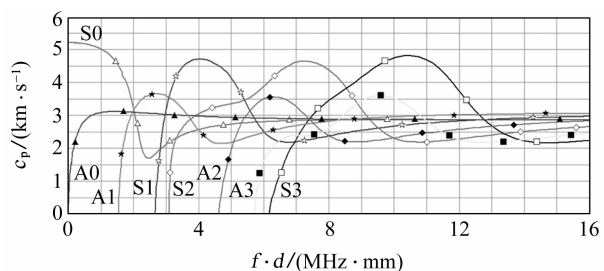


图 2 316LMod 不锈钢群速度频散曲线

1.2 Lamb 波检测参数的确定

由频散曲线知,在任一给定的激发频率下,一般至少存在两种以上的模式,而各模式的相速度又随着频率的改变而发生变化,即频散。不同的 Lamb 模式对不同类型的缺陷检测的灵敏度不同,因此对于特定类型的缺陷,选择合适的 Lamb 波模式是十分必要的。

由于 Lamb 波的频散特性,不同频带 Lamb 波传播速度不同,如果试样尺寸太小,波中的快速分量经边界或端部反射后将与初始信号中的较慢速度分量相混叠,影响信号的分析处理,为此含缺陷试块应尽可能大。笔者制作了 316LMod 材质试块,尺寸为 500 mm × 300 mm × 8 mm,试块含 2 mm 深,10 mm 长背侧裂纹。

试验采用自发自收式探头,对通过缺陷反射后接收到的反射波信号进行二维傅里叶变换,即将接收到的幅度-时间记录转化为各个离散点幅度-波数记录,从而分解出单个 Lamb 波,并对其幅值进行测量^[2-3]。通过变换可得到傅里叶变换的等高线图,然后与理论计算的频散曲线相比较,从而确定检测信号所包含的 Lamb 波模式。通过与无缺陷区域信号的提取和对比,提取出背侧裂纹反射后的主要的 Lamb 波模式。

根据奥氏体不锈钢板的相速度频散曲线,选定 8 mm 厚奥氏体不锈钢板检测频率范围,从横坐标表示的频厚积可查出欲选模式的相速度 c_p (纵坐标),那么,与激励模式相应的入射角 α_p 可根据式(7)算出^[4],从而确定对背侧裂纹检测比较灵敏的 Lamb 波模式的检测频率和入射角度等参数。

$$\alpha_p = \sin^{-1} \frac{c_L}{c_p} \quad (7)$$

式中 c_L 为斜楔中的纵波速度。

2 缺陷评定

目前制约 Lamb 波检测应用的最大瓶颈在于缺陷信号的模式识别和解释。但对于尿素合成塔内衬用超低碳奥氏体不锈钢而言,其材质具有良好的耐腐蚀性等综合性能。目前检测表明其缺陷主要有两大类:一是内衬层内表面的点蚀、刀蚀和均匀腐蚀等;另一种是内衬层背侧裂纹,也是危害最大并且目前其他无损检测方法最难以有效检出的缺陷。

通过选择恰当的频率和入射角度等参数,得到对背侧裂纹较灵敏的 Lamb 波检测模式,可将缺陷信号复杂的多模式 Lamb 波的分离和识别转化为

对缺陷的距离-波幅方式识别。

Lamb 波检测时,信号衰减比普通超声小,但信号在传播过程中的衰减是不可避免的。为了能对背侧裂纹缺陷的位置和深度等进行定量评定,制作了含当量缺陷的试块。材质为 316LMod,尺寸为 $700\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,试块分别含 0.5,1,2,4 和 6 mm 深背侧凹槽和通槽,凹槽长度为 10 mm。

以导波探头距离 0.5 mm 凹槽分别为 10,20,50,100,150 和 500 mm 的背侧缺陷反射接受信号峰值为基准点,绘制 0.5 mm 缺陷的距离-幅值修正曲线(又称 DAC 曲线)。依次类推,分别绘制 1,2,4 和 6 mm 和通槽的距离-幅值曲线。把这些曲线合并在一起,即可得到 8 mm 厚超低碳奥氏体不锈钢背侧裂纹缺陷当量评定图(图 3)。通过该评定图,可以确定检测时背侧裂纹位置和 Lamb 波探头的距离以及背侧裂纹的深度,结合 B 扫查记录,可确定背侧裂纹的长度。

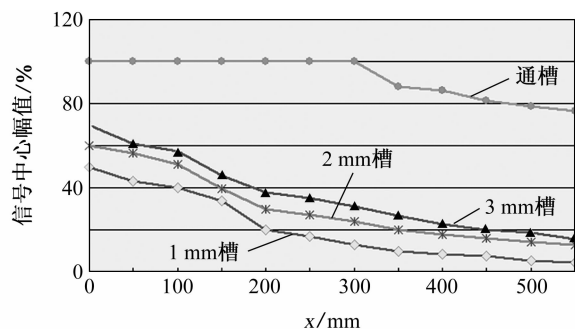


图 3 奥氏体不锈钢背侧缺陷当量评定图

3 检测应用

按照以上试验确定的检测参数和评定标准,以超过 0.5 mm 深背侧裂纹为超标缺陷,进行了 316LMod 不锈钢含天然缺陷试板的实验室检测和在用尿素合成塔内衬层现场检测。

3.1 检测应用 1

山东某尿素合成塔 2006 年 6 月投用,2008 年 6 月发生泄漏,泄漏源为一针孔。为安全起见,对该尿素合成塔进行了背侧缺陷全面检测,发现泄漏区域周围存在多处背侧裂纹。依据检测确定的范围取下该区域 $200\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 内衬层板,发现取下的内衬层背侧遍布裂纹,裂纹方向和位置与检测判定结果一致(图 4)。

3.2 检测应用 2

河北某尿素合成塔 2003 年底投用,2009 年 2



图 4 遍布背侧裂纹的内衬层

月发生泄漏,泄漏源为一细孔状缺陷,内衬层背侧裂纹纵向延伸断续长度超过 1 000 mm,发现多个筒节共 37 处背侧裂纹区域,最严重的几近裂穿内衬层板(图 5),轻微的裂纹开裂深度不到 1 mm(图 6)。

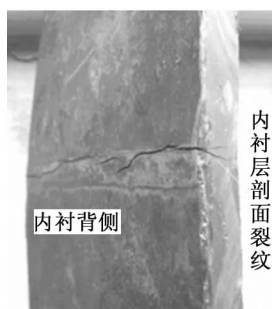


图 5 内衬层背侧严重开裂区域



图 6 内衬层背侧小裂纹区域

4 结论

(1) 根据 Rayleigh-Lamb 方程,推导出了奥氏体不锈钢(316LMod)薄板相速度和群速度的频散曲线,为导波模式的识别和参数的选择奠定了基础。

(2) 通过对人工缺陷试块的导波模式进行二维傅里叶变换,提取出了背侧裂纹缺陷的主要 Lamb 模式,进而确定了 8 mm 厚奥氏体不锈钢背侧裂纹检测的频率和入射角等检测参数。

(3) 通过人工缺陷试块,绘制出了 8 mm 厚超低碳奥氏体不锈钢背侧裂纹缺陷当量评定图,从而实现了背侧裂纹缺陷 Lamb 波检测的定量评定。

(4) 通过尿素合成塔的检测应用实例,证明了 Lamb 波检测不锈钢背侧缺陷的有效性。

参考文献:

- [1] 罗斯 J L 著. 固体中的超声波[M]. 何存富,吴斌,王秀彦,译. 北京:科学出版社,2004:84-91.
- [2] Cohen L. Time-frequency distributions: a review[J]. Proceedings of the IEEE,1989,77(7):941-981.
- [3] Proser W H, Seale M D. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes[J]. J Acoust Soc Am, 1999,105(5):2669-2676.
- [4] 冯占英,周正干,高翌飞. 大型薄板中超声导波的产生与鉴别[J]. 无损探伤,2007,31(5):1-3.