



无损检测中的超声兰姆波*

刘镇清

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要 介绍板中兰姆波及其特性, 并给出了兰姆波的激发方法及兰姆波在板厚范围内的振动位移变化等, 为该波型在无损检测中有效应用奠定基础。

主题词 超声检验 钢板 铝板

ULTRASONIC LAMB WAVES IN NONDESTRUCTIVE TESTING

Liu Zhenqing

(Institute of Acoustics, Tongji University)

Abstract Ultrasonic Lamb wave propagation in plates and its characteristics are presented. Methods of exciting Lamb waves, and the variation of vibration displacement of Lamb waves across the plate thickness are given for efficient use in NDT.

Keywords Ultrasonic testing Steel plate Aluminum plate

兰姆波是超声无损检测中最常用的一种导波形式, 由本世纪初兰姆先生(H. Lamb)研究无限大板中正弦波问题而得名。人们通常还将其称为板波。

由于用超声波(纵波和横波)检测薄板有时会遇到较大困难, 因而薄板的无损检测成为超声兰姆波(以下简称兰姆波)最初的一个成功应用。尽管金属薄板的兰姆波探伤研究已有三四十年历史, 至今仍有不一致的观点和未解决的问题。国外有些大型钢铁公司曾在板材生产线上采用兰姆波自动探伤, 但效果不明显。这些都是对兰姆波的认识不很成熟所致, 这种现象可能在今后一段时期还会存在。兰姆波不仅可用于薄板探伤, 还可用于各种新型传感器, 用于设计成全新概念的超声延迟线。另外, 当体波测量构件弹性系数不便时, 兰姆波还可从单侧来获得精确的弹性系数, 由此对构件的预期寿命进行评估, 这也是兰姆波具潜力的应用之一。

为了在超声波检测中能有效地应用兰姆波, 必须了解其基本原理和特性, 本文主要介绍兰姆波的基本特征方程及其来源、如何获得和接收兰姆波(针对无损检测场合)以及如何在超声无损检测中合理运用等。

* 本文部分工作得到国家自然科学基金与国家教委跨世纪优秀人才培养计划的支持。

1 兰姆波的特征方程及意义

一般而言, 可以将某矢量场分解为梯度场与旋度场之和, 无损检测中的纵波只有梯度场, 即它是无旋波; 而横波则可认为是旋转波。前者可由位移的标量势 ϕ 表示, 后者可由位移的矢量势 Ψ 表示^[1]。假设有一块各向同性的均匀固体板(图1), 其厚度为 $2b$, 上下两界面分别为 $y=+b, y=-b$, x 及 z 方向都是延伸至无限远处, 假设兰姆波沿 z 轴方向传播, 我们知道, 兰姆波是纵波与横波在板中相互耦合形成的一种特殊形式导波, 当固体板处在真空或气体中时, 其势函数为

$$\begin{aligned}\phi &= (Ae^{-ky} + Be^{ky})e^{i(kz - \omega t)} \\ \Psi &= (Ce^{-\delta y} + De^{\delta y})e^{i(kz - \omega t)}\end{aligned}\quad (1)$$

式中 A, B, C, D ——待定常数

$$\epsilon^2 = 1 - (c^2/c_1^2)$$

$$\delta^2 = 1 - (c^2/c_2^2)$$

c_1 ——固体板材的纵波速度

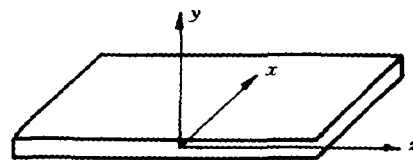


图1 板材示意

c_1 ——固体板材的横波速度
 c ——固体波导的兰姆波相速度
 ω ——角频率
 $k=\omega/c$

由于板的两表面为自由状态,因此这时的边界条件为板表面两侧($y=\pm b$ 处)的法向与切向应力均为零。

当固体板浸没在液体中时,其势函数表达如下
 上半无限液体

$$\phi_1 = B_1 e^{\xi k y} e^{i(kz - \omega t)} \quad \Psi_1 = 0$$

固体板

$$\begin{aligned} \phi &= (A e^{-\xi k y} + B e^{\xi k y}) e^{i(kz - \omega t)} \\ \Psi &= (C e^{-\xi k y} + D e^{\xi k y}) e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (2)$$

下半无限液体

$$\phi_2 = A_2 e^{-\xi k y} e^{i(kz - \omega t)} \quad \Psi_2 = 0$$

式中 $\xi^2 = 1 - (c^2/c_L^2)$

c_L ——浸液的纵波声速

B_1, A_2 ——待定常数

由于液体中只存在纵波,所以 $\Psi_1 = \Psi_2 = 0$,固体板两表面的边界条件这时可表示为两表面的法向应力和位移在界面处连续,切向应力在界面处为零。

满足方程(1)的导波一般简称为兰姆波(Lamb Wave),满足方程(2)的导波则称为漏兰姆波(Leaky Lamb Wave)。漏兰姆波在传播过程中能量将泄漏到上下半无限液体中去,且向无穷远处传播,没有反射回来。漏兰姆波常在实验室研究中被使用,工业现场超声无损检测则大多采用两侧面空气状态的兰姆波形式,因此,漏兰姆波在此不详细讨论。

从方程(1)可知,标量势 ϕ 与矢量势 Ψ 中均有 $e^{i(kz - \omega t)}$ 因子,这表明板内导波的纵波与横波分量沿 z 轴方向的波数相等,并组成以传播常数 k 沿 z 轴传播的行波,在板的厚度方向,即 y 轴方向由纵波与横波形成共振驻波场。由式(1),结合板表面自由态边界条件可得以下特征方程

$$\frac{\tan \beta b}{\tan \alpha b} = -\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad (3a)$$

$$\frac{\tan \beta b}{\tan \alpha b} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \quad (3b)$$

式中 $\alpha^2 = (\omega^2/c_1^2) - k^2$

$\beta^2 = (\omega^2/c^2) - k^2$

α, β 可理解为兰姆波中纵波和横波波数分别在 y 轴上的分量。这组方程常称为 Rayleigh-Lamb 频率方程,其中式(3a)表征兰姆波对称模式,式(3b)表征兰姆波反对称模式。由于 $k=\omega/c$,由式(3)可解出兰姆波相速度 c 与频率 ω 的关系。

2 兰姆波频散特性

根据式(3)可算出兰姆波对称模式与反对称模式的相速度频散曲线。人们一般不用 ω 作为 c 的自变量,而常用 $b\omega/\pi$ 作为自变量。 $b\omega/\pi$ 称为频厚积,可以认为它是包含了板厚 $2b$ 的归一化频率。由于式(3)中有板材纵波波速与横波波速因子,因此兰姆波相速度频散曲线依赖于板材的纵波速度与横波速度。另外, $\tan \alpha b$ 与 $\tan \beta b$ 都是多值的,所以对称模式与反对称模式均为多次的,一般用 s_0, s_1, s_2, \dots 表示对称型兰姆波的 $0, 1, 2, \dots$ 模式;用 a_0, a_1, a_2, \dots 表示反对称型兰姆波的 $0, 1, 2, \dots$ 模式。

图2和图3分别是钢板与铝板的兰姆波相速度频散曲线,其中铝板参数取 $c_1=6400\text{m/s}$, $c_L=3170\text{m/s}$;钢板参数取 $c_1=5790\text{m/s}$, $c_L=3200\text{m/s}$ 。从两图可以看出,尽管铝板与钢板的纵、横波速度相差不大,但它们的相速度频散曲线还是有差别的,即使是同类材料的板,也会因不同牌号材料的纵波和横波速度变化而造成其板材的兰姆波频散曲线的不同,这点在实际工作中要引起重视。从图2和图3可知,除 s_0, a_0 模式外,其它所有模式的兰姆波都有截止现象。在截止频率以上 k 有实数值,表明在此频率下该模式兰姆波是可以传播的;在截止频率以下 k 是虚数,表明在此频率下该模式是迅速衰减的,即这里的兰姆波模式是不能传播的。

由于兰姆波具有频散现象,因此它实际上以群速度传播。群速度 c_g 与相速度 c 的关系为

$$c_g = \frac{c}{1 - \frac{\omega}{c} \cdot \frac{dc}{d\omega}} \quad (4)$$

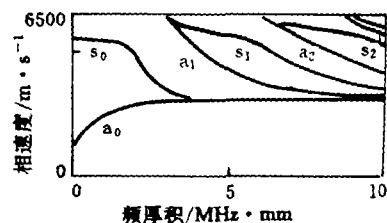


图2 钢板相速度曲线

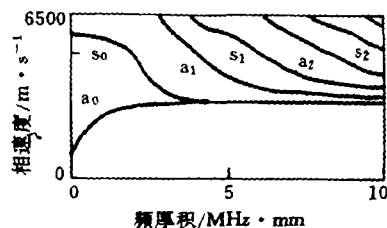


图3 铝板相速度曲线

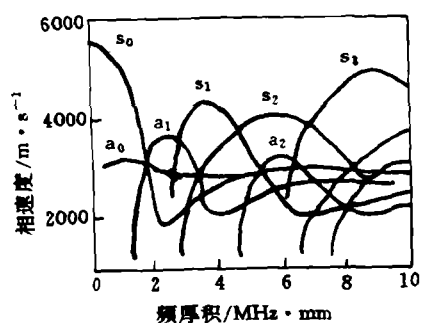


图4 铝板兰姆波群速度曲线

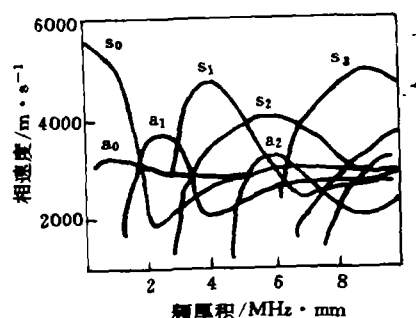


图5 钢板兰姆波群速度曲线

由图2和图3的相速度频散曲线,根据式(4)可得图4和图5所示的铝板和钢板群速度曲线。

群速度快意味着该成分在板中实际的传播速度快。若一次激发出多种模式的兰姆波,且在同一点接收之,则群速度快的部分出现在接收信号时间轴的前端,群速度慢的部分出现在时间轴的后端。工程上用兰姆波进行无损检测时,激励信号常为一窄脉冲,很少使用连续波,由于激发出的兰姆波各模式一般是宽频带的(或有一定的带宽),根据图4或图5可以看出,在一定的带宽范围内不同模式的兰姆波可以有相同(或相近)的群速度,这就会引起多模式兰姆波传播时各模式的混叠现象,所以工程中一般尽可能激发较纯的某一模式。从另一角度看,对各模式兰姆波自身而言,其群速度随频厚积的不同有显著的变化,也就是说,某一模式的宽带兰姆波接收信号在时域上也会占据较宽的时间轴。相速度快慢表示超声波信号的等相位点的速度快慢,当相速度十分快

时,移动发射换能器与接收换能器的距离,会发现该接收信号的等相位点在时间轴上几乎不动(或移动很少)。

兰姆波的频散特性使其接收信号比较复杂,有时需进一步的信号处理才能提取特定的信号部分。另一方面,兰姆波的多模式及其频散特性又造成它的激励与接收十分特别,这些都与普通的超声探伤大不一样,工程检测应用时要引起注意。

3 兰姆波的激发与接收

从理论上讲,兰姆波的激发方式有板表面激励和板的一端激励两大类。工程检测中往往只采用前一类,因此本文也限于讨论该类。超声检测中激发兰姆波的换能器一般有两种^[2],一种是梳状换能器,另一种是楔形换能器。

梳状换能器由体波(一般是纵波)换能器粘贴在一梳状结构上形成(图6),让梳状结构的周期间隔等于欲激发兰姆波的波长即可。还有一种类似表面波换能器的梳状结构,它将金属电极制成叉指状(图7),在电信号的激励下相邻的电极产生相反的振动,若将此结构粘贴在固体板表面也可激发相应的兰姆波模式,应注意,此结构电极间距离等于欲激发兰姆波波长的半,即半个波长。

楔形换能器由一纵波换能器贴在一楔块上构成(图8),当发射的超声波传到楔块与被测板交界处时,可在固体板中激发兰姆波。设 c_0 为楔状固体材料的纵波速度, c 为板中待激发兰姆波模式的相速度,则它与入射角 θ 之间的关系为

$$\sin\theta = \frac{c_0}{c} \quad (5)$$

显然,由于兰姆波各模式的相速度是频散的,因此在不同频率点激发不同模式兰姆波的入射角都是不同的,且从总体上讲,楔状材料的声速要影响入射角的大小。设楔状材料纵波声速 $c_0=2700\text{m/s}$,则铝板各模式兰姆波入射角与频厚积的关系曲线见图9。

图9显示了激发兰姆波的入射角变化范围很大,在具体工作中要仔细分析,根据被测件相速度频散曲线与楔状材料纵波声速算出入射角。一般来说,



图6 梳状换能器



图7 叉指状换能器

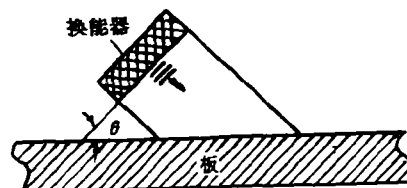


图8 楔形换能器

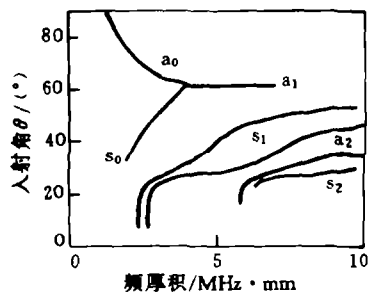


图9 入射角与频厚积关系曲线

被激发兰姆波模式群速度变化剧烈的频厚附近,其接收信号随传播距离增大占据的时间域变宽(因频散效应),从这一角度考虑,工程检测激发兰姆波选择在该模式群速度极大或极小点附近是合适的。因为群速度极值点的群速度变化率为零,在这些点附近的该模式兰姆波可以几乎一致的速度向前传播,这样,兰姆波信号传播较长距离后仍不会在时间轴上散得很开,由此可提高无损检测的空间分辨力。

从图9可知,有时激发兰姆波的入射角需要很大,无损检测工作中大的入射角容易激发出表面波,但这只是对半无限空间而言的。由于我们现在面对的是一板材,只有当板厚较大时其中传播的兰姆波才可能呈现出类似表面波的形态,其中 a_0 和 s_0 模式兰姆波在频厚积较大时的相速度与群速度都趋近表面波速度便是一佐证。若板材较薄(相对入射超声波波长),则板中一般以兰姆波为主。需指出的是,图9所示的入射角在假定超声波换能器指向性十分好且波型单纯时成立,在实际工作中楔块的角度严格按照理论公式设置可以得到能量相对较大的(或较纯的)所需模式,其它模式兰姆波同样可能被激发,只是能量会相对小些。文献[3]中图3所示的信号包含了 a_0 和 s_0 两个模式兰姆波,它是由普通超声波直探头垂直耦合在铝板上激发出来的,这些是由于超声波换能器本身声场的复杂性所致。另外,工程上常用脉冲超声换能器,且脉冲愈窄所含频带愈宽,因而得到的不是单一频率点信号,而是一宽频范围的信号,这也是造成在某一选定角度上可激发多个模式兰姆波的原因之一。同样道理,脉冲激光在薄板内也能激发出多模式的兰姆波[4]。

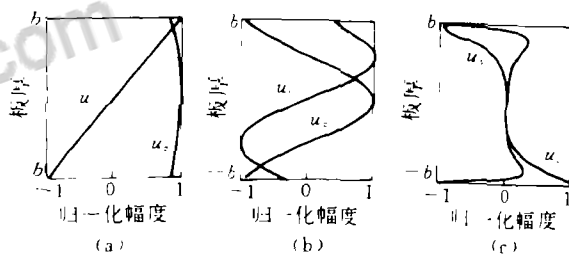
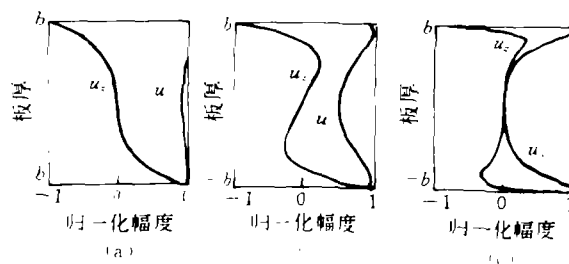
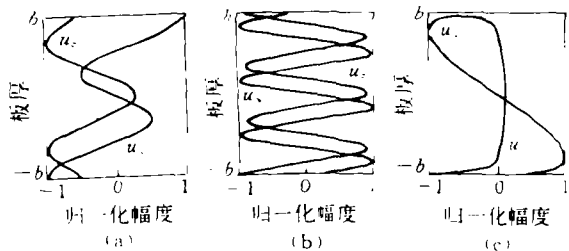
近期一些非金属新型材料在工程上得到越来越多的应用,由于有些材料的纵、横波声速都较小,使其板材中的各模式兰姆波相速度普遍较低,根据式(4)可知,要得到较纯的兰姆波必须使楔块的纵波声速小于所需兰姆波相速度,这样有时就很难找到合适的材料作楔块,在此情况下人们更乐意用梳状结

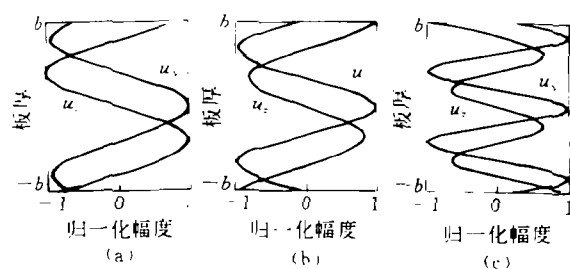
构在板材中激发较低声速的兰姆波。一般来讲,上述激发兰姆波的换能器形式(脉冲激光除外)同样适用于接收,且仍能保持类似的特性。

4 振动位移及能流分布

兰姆波根据其波动位移的形态分成对称模式与反对称模式两大类,所谓对称模式是指凡与图1中 $y=0$ 平面相对称的点都有相同的 z 方向位移(水平位移),但有反相的 y 方向位移(垂直位移);反对称模式指凡与 $y=0$ 平面相对称点都有相同的 y 方向位移和反相的 z 方向位移。鉴于对称与反对称兰姆波模式的位移形态,有时人们将对称模式兰姆波写成板中的纵波群,将反对称模式兰姆波写成弯曲波群,这里要注意,它们并不是真正的纯纵波或横波。

有关兰姆波位移的表达式可查阅相应的文献[1~2],限于篇幅本文不再复述。位移分布对兰姆波无损检测有效性的影响较大,因此在不同频厚积条件下选择合适的模式的重要依据之一是其板中的位移分布形态。图10和图11给出了铝板中 s_0 与 a_0 模式兰姆波的水平位移 u_x 及垂直位移 u_y 分布,其中

图10 铝板中 s_0 模式的位移图11 铝板中 a_0 模式的位移图12 铝板中 s_1 模式的位移

图13 铝板中 a_1 模式的位移

的图 a, b 和 c 分别代表频厚积在 0.54, 2.0 和 6.5 MHz·mm 时的曲线。图 12 和图 13 给出了铝板中 s_1 与 a_1 模式兰姆波的水平位移 u_x 及垂直位移 u_y 分布, 其中的图 a, b 和 c 分别代表频厚积在 2.9, 8.3 和 13.6 MHz·mm 时的曲线。从这些图中可清楚地了解到不同模式兰姆波在不同频厚积条件下的位移形态都是完全不同的。无损检测工作中要选择所需部位位移幅度相对大些的兰姆波模式。有关该问题还会在系列讲座中作进一步介绍, 这里不再展开。图 10~13 则是为了形象化举例说明对称和反对称兰姆波的位移形态。

在一般的板材无损检测中要参考兰姆波的水平位移或垂直位移有时会显得较杂乱, 可以用能流密度来简化这一问题^[5]。板中兰姆波在 z 轴方向的能流密度 P_z 定义如下

$$P_z = -\frac{\hat{v}_x \tau_{xz} + \hat{v}_y \tau_{yz}}{2} \quad (6)$$

式中 v_x, v_y ——质点在 z 轴与 y 轴方向上的振动位移速度

——取共轭

(上接第 398 页)

序号	缺陷性质	缺陷长度	缺陷深度	评定级别	备注
17	气孔		5	II	
18	裂纹	11mm		IV	
主页面28行续前					
检测结果					
共抽片18张; 其中IV级片7张; 裂纹片5张; III级片5张; II级片3张; I级片3张; 单个缺陷的最大长度为12.5mm, 合格片占总片数的33%					
27	评片:	1996年2月17日	审核:	1996年3月7日	
39	39行到110行删除有二页附页。				

图7

3 结语

NDTS 以很小的硬盘空间, 便能够实现上述强大功能, 其原因是 NDTS 通过 V. Basic 语言编程及域更新等方法, 调用和变换了 Windows 操作系统和 Office 办公平台的可利用功能, 即使用了它们已占

τ_{xz}, τ_{yz} ——兰姆波传播方向上 (z 轴方向) 的正应力与剪切应力

兰姆波质点的振动位移速度可将对应模式的位移对时间求导得出。图 14 给出了与图 10 和图 11 相对应的能流密度曲线, 图 15 则对应图 12 和图 13 所代表模式的各频厚积条件。图 14 和图 15 给出的兰

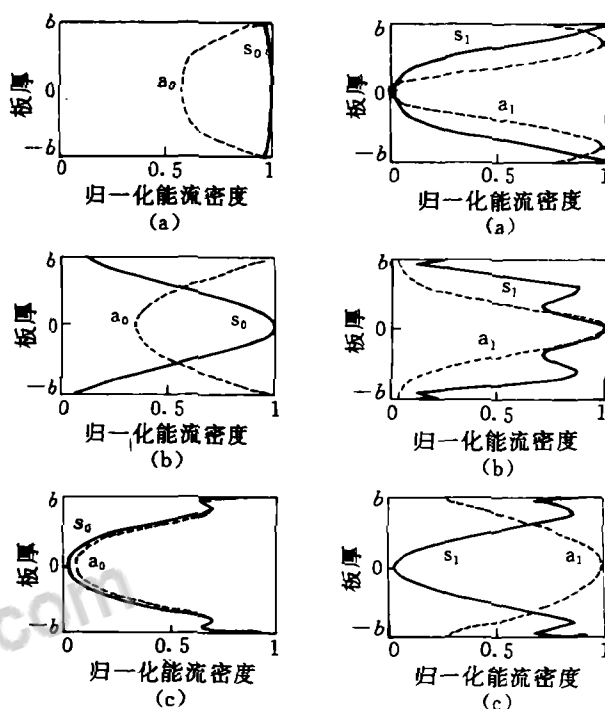


图14 与图10和11对应的兰姆波能流密度分布图

图15 与图12和13对应的兰姆波能流密度分布图

(下转第 423 页)

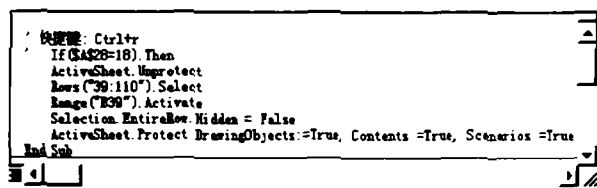


图8

用的硬盘空间, 由于 Windows 操作系统和 Office 办公平台的垄断地位, 笔者尚未见过 586 以上机种使用其它系统, 因此, NDTS 具有广泛的实用性。

参 考 文 献

- 1 JB 4730-94 压力容器无损检测
- 2 GB 150-98 钢制压力容器

收稿日期: 1999-05-24

根部未熔合在底片上看,根部间隙处呈较亮区域,说明焊缝金属超过母材,焊道背面焊透,再仔细观察,可发现焊缝坡口钝边处沿焊缝纵向显现出规则细长黑直线(图 10)。

而根部未焊透,由于焊缝根部没有完全焊透,根部焊缝金属全部或局部未超过母材,钝边尚存在,因而在底片上沿焊缝纵向根部间隙处形成一规则的整齐黑带(图 11)。

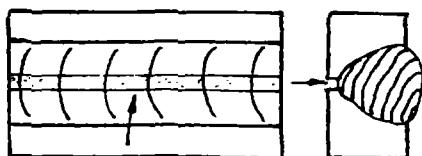


图 11 根部未焊透

由上面分析可知,有单面焊根部未熔合的焊缝,焊缝根部是焊透的,但焊缝金属与根部母材金属之间没有发生晶内结合。

4 结束语

(1) 几年的实践证明,我们在乙烯裂解炉上的

(上接第 413 页)

姆波能流密度也只是几个具体例子。总体来讲, a_0 模式的能流密度在整个板厚内一般都能保持较大的值,只是当频厚积大到一定程度后该模式能量集中于板的两表面(趋近于表面波特性),因此人们一般喜欢采用 a_0 模式进行无损检测。其它模式的能流密度变化较复杂些,须具体问题具体分析。实验证明,对体积性缺陷(如孔洞等)作兰姆波探伤时回波大小与板中能流密度大小有直接的对应关系。

还应该指出,在进行超声脉冲式无损检测时一般慎用群速度较慢的兰姆波模式,因兰姆波的复杂性(模式不纯或模式转换等)可能导致在所需模式到达前产生附加的干扰信号,造成误判。

5 结束语

兰姆波作为无损检测中导波的一种重要类型,由于其复杂特性,在实际工程应用中远未发挥应有的作用。人们有时将常用的超声纵波或横波的某些性质套用在兰姆波上,而得出无法解释的结论,以至于对这种独特波型产生怀疑。本文通过介绍兰姆波的一些基本性质及其由来,分析若干特别现象,并针对超声检测中的疑点作了具体评论,以此建立兰姆波超声无损检测的基本框架。

从以上分析知,兰姆波的特性随不同材料及几

射线探伤是成功的,没有因为底片缺陷影象的错评或漏评而发生设备事故,保证了装置的正常运行。

(2) 透照参数直接关系到缺陷的检出灵敏度,而影响灵敏度的因素很多,本文仅针对乙烯裂解炉管而定,对其它管类焊缝射线探伤也具有一定的指导意义。

(3) 当透照角大于一定值时,裂纹检出率下降,而超声波探伤对裂纹检出能力较强,但粗晶奥氏体的超声探伤在国外尚属研究摸索阶段,上海核工业无损检测中心会同我公司设备处共同研制了乙烯裂解炉辐射段弯头的超声探伤系统,实际效果不错。今后有条件的话,我们可以研究开发炉管焊缝超声波探伤技术。

(4) 当裂解炉非计划停车抢修时,炉管根部未熔合与根部未焊透影象的正确识别,可以为设备处、烯烃厂及检修公司三家会鉴超标准应用提供依据。如果根部未焊透,短期内可以带缺陷运行,待下一周期的计划停车时,再行处理。

收稿日期:1998-07-20

何尺寸而有所变化,不同模式兰姆波又有其独自特性,因此在无损检测中要根据兰姆波的基本原理,具体问题具体分析,寻找最佳解决方案,不能轻率地将其它具体应用例子不加分析地应用于不同场合。超声兰姆波无损检测还有一个在理论指导下的经验积累过程,只有不断实践才能获得兰姆波无损检测必备基础。另外,由于兰姆波表现出的复杂性,今后在此问题上会更多地运用先进的信号处理手段,充分、准确地提取所需特性,促进并发展兰姆波工程检测技术。

参 考 文 献

- 1 Mason WP. Physical Acoustics; Principles and Methods (Vol. 1) New York and London: Academic Press, 1964. 112-169
- 2 Viktorov IA. Ultrasonic Lamb wave. Soviet Physics — Acoustics, 1965, 11(1): 1-13
- 3 刘镇清. 超声无损检测中的导波技术. 无损检测, 1999, 21(8): 367-369
- 4 Pierce SG et al. Broadband Lamb wave measurements in aluminium and carbon/glass fiber reinforced composite materials using non-contacting laser generation and detection. Ultrasonics, 1997, 35(2): 105-114
- 5 黄瑞菊, 刘镇清. 兰姆波无损检测有效性分析. 声学技术, 1999, 18(3): 115-116

收稿日期:1999-07-12

论文降重，论文修改，论文代写加微信:18086619247或QQ:516639237

论文免费查重，论文格式一键规范，参考文献规范扫二维码：



[相关推荐：](#)

[无损检测中的超声兰姆波](#)

[超声检测中的兰姆波层析成像](#)

[超声无损检测中的导波技术](#)

[兰姆波在单板顺纹弹性模量无损检测中的应用](#)

[用Lamb波检测钻井液含气量的技术](#)

[基于齿轮的质量自动检测系统控制技术研究](#)

[激光超声与无损检测](#)

[兰姆波在薄钢板无损检测中的应用研究](#)

[超声无损检测中的谱分析技术](#)

[小口径管道腐蚀状况无损检测](#)