

# 超声导波在管材中的传播特性

他得安, 刘镇清, 田光春

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 文中简要地介绍了近年来超声导波在管中的研究现状, 并对导波在管中的传播特性以及管材内径与壁厚之比变化时, 对导波频散特性的影响进行了分析。结果表明: 管材的内径与壁厚比变化时将影响管中导波的模式行为产生很大的影响。当内径与壁厚之比很大时, 圆管中波的 mode 行为与同厚度板中波的 mode 行为基本相同, 可看作板材中的导波进行近似的分析。

关键词: 管材; 超声导波; 频散特性

中图分类号: O426.2, O422 文献标识码: A

## Propagation characteristics of ultrasonic guided waves in pipes

TA De-an, LIU Zhen-qing, TIAN Guang-chun

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper a brief review on the researchs of ultrasonic guided waves in pipe is made. The characteristics of guided waves in pipe are described and the influence of inner radius varying on dispersion characteristics of guided waves are also analyzed.

**Key words:** pipe; ultrasonic guided wave; dispersion characteristics

### 1 引言

在炼油厂、化工厂和天然气等生产部门中, 管材是很重要的组成部分, 所以必须保证它们在安全的状态下运行, 这样对管材中缺陷的检测就成为相当重要的课题。

典型的、传统的超声检测方法, 是利用换能器在被测物体的整个表面上扫描, 得到的结果通常以 C 扫描的方式显示, 这一过程往往非常费时费事。因此, 人们希望有一种省时的方法, 一种最优的方法就是利用导波 (guided wave), 它在材料中的传播特性依赖于材料性质、结构、形状以及所用的频率, 而且可以传播很长的距离。如果将接收换能器放在试件的另一端, 接收信号中含有发射和接收换能器之间的完整信息。因此, 这是线检测而不是点检测, 可以节省时间。因为导波能在整个管壁内产生应力波, 所以, 就可以探测管壁的整体厚度, 也就是说, 它可以发现管壁内部的缺陷。

本文着重介绍近年来管中超声导波的研究现状, 并对导波在管中的传播特性、管材内径变化对导波频散特性的影响进行了分析。

### 2 管中导波的研究概况

一般情况下, 裂纹和腐蚀等缺陷在管的内、外表面都可能发生。由于在检测过程中不能接近管材的情况所占的比例很大, 如果不移去隔离部分, 即使是外部缺陷也无法用传统的超声无损检测 (NDT) 技术来检测。基于以上情况, 对管子中的缺陷可以利用导波进行检测。由于导波具有频散特性, 在管中会产生多种模式的波, 所以选择特殊模式的导波对检测缺陷是非常重要的。

英国帝国学院力学工程系的学者们发展了超声导波检测技术, 并对工厂中的管子进行了检测。他们的检测方法是用脉冲回波法在管材的单一位置进行检测, 管壁中缺陷的位置和大小用反射波和到达时间来确定。这一方法的优点是它可以进行长管子的快速检测, 并且只需移去放置换能器部分的隔离层就可以检测。他们在进行各种实验的同时建立了有限元模型, 对管中波的反射、透射等进行了分析, 并取得了一定的成果。Cawley 等用  $A_0$  等特殊模式的波对管中的缺陷进行了检测<sup>[1]</sup>。实验结果表明:  $A_0$  模式对管中的缺陷非常灵敏; 研究表明用 Lamb 波对隔离的大结构、长钢管的缺陷或腐蚀的检测很有效。Wanchan 等用有限元法<sup>[2]</sup>, 对阶梯状管中阶梯截面对 Lamb 波的反射和透射系数进行了研究。

收稿日期: 2001-03-01; 修回日期: 2001-04-16

国家自然科学基金资助项目

作者简介: 他得安 (1972-), 男, 甘肃人, 博士研究生, 现主要从事现代数字信号处理及其在超声无损检测和生物医学超声中的应用研究。

Alleyne 等研究了  $L(0, 2)$  轴对称模式在管中裂纹处的反射<sup>[3]</sup>; 并且测量了同一模式在焊点、棱边及管中的反射, 证明了  $L(0, 2)$  模式在干、湿隔离的情况下都能传播。Alleyne 等又报导了焊点、棱边等对反射系数的影响<sup>[4]</sup>。

从他们一系列的文章中看出, 他们主要用了一种数值分析法即有限元法, 两类缺陷即沿周向的裂纹和管内壁的腐蚀 (面积  $> 3T \times 3T$ , 深度为  $T/2$ , 其中  $T$  为壁厚)<sup>[5]</sup>。研究结果表明: (1) 当周向裂纹长度很短时, 导波  $F(1, 3)$  模式与  $L(0, 2)$  模式的反射系数具有相同的强度; (2)  $L(0, 2)$  模式的反射系数几乎是裂纹长度与管周长比的线性函数, 是裂纹深度与壁厚之比的函数; (3) 当深度超过壁厚的 50% 时, 检测灵敏度快速增加。实验结果与有限元模型所得的结果一致。

### 3 导波在管中的传播特性

导波在管中的产生与传播受到实验频率、激励角度及管壁厚度等条件的严格限制。一般使用透声斜楔以纵波入射法在管中激励导波。由于不同模式导波在管壁内引起的质点的振动沿管轴方向的分布各不相同, 对不同深度处缺陷的检测需采用不同模式的导波, 这就存在一个模式选择问题, 给导波检测带来一定的困难。但导波检测速度比传统的纵、横波检测要快得多。

#### 3.1 导波的频散特性

由导波在管中的传播特性可知, 在管中可将导波分 3 类:

(1) 轴对称纵向模式  $L(0, m)$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$

(2) 轴对称扭转模式  $T(0, m)$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$

(3) 非轴对称弯曲模式  $F(n, m)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots; m = 1, 2, 3, \dots$

以上模式中整数  $m$  反映该模式在管厚方向上的振动形态; 而整数  $n$  反映该模式绕管壁螺旋式传播形态。准确描述上述 3 类模式比较困难, 但当管壁较薄, 且半径较大时,  $L(0, m)$  模式对应于板中的 Lamb 波; 而  $T(0, m)$  模式对应于板中的 SH 波<sup>[6, 7]</sup>。

导波是一种频散波, 由声学理论可求得各模式的频散方程<sup>[8]</sup>:

$$|C_{ij}| = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

其中  $C_{ij}$  由附录给出。由上式求得壁厚 1mm、内径 5mm 的钛管中导波的频散曲线如图 1 所示。众所周知, 频散曲线可以用频率-波数-衰减空间来描述。然而, 对于导波的频散特性, 我们也可用许多不同的方法来描述, 如相速度、群速度、入射角和波数等。为使人们更好地理解材料性质, 图 1 用相速度、群速度、入射角和波数 4 种方法对频散曲线进行描述。

从图中可以看出管中导波的频散特性, 其速度随频率的变化而变化, 且对应一个频率点上, 存在多种模式的导波; 当超声波以某一角度入射时, 也会产生不同模式的导波, 这一现象在频率较高时尤为明显。

由于管中导波的频散特性, 其相速度与群速度并不相等。群速度  $G_g$  的表达式为:

$$G_g = d\omega/dk \quad (2)$$

从图 1 可以明显地看出同一模式管中导波的相速度和群速度的差别, 这说明相速度大的模式其群速度不一定就大。

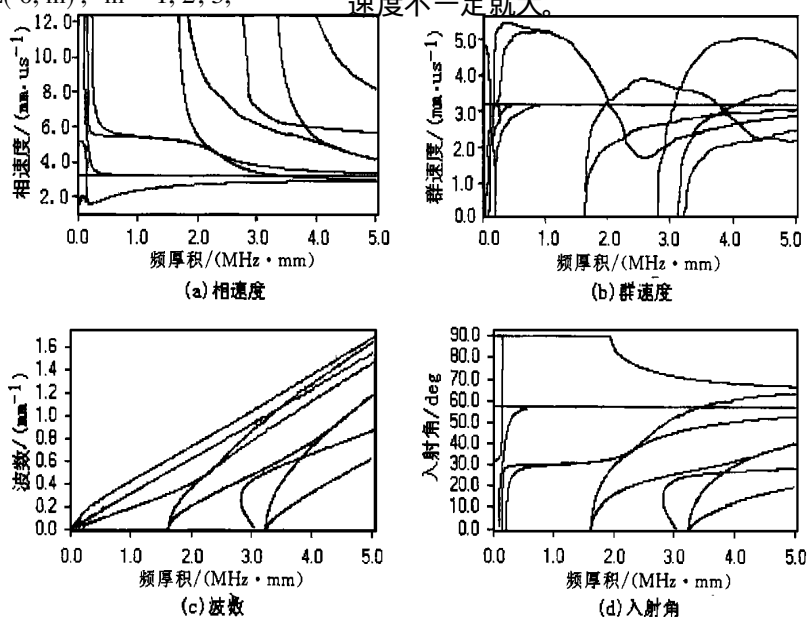


图 1 壁厚为 1mm、内径为 5mm 的钛管的频散曲线

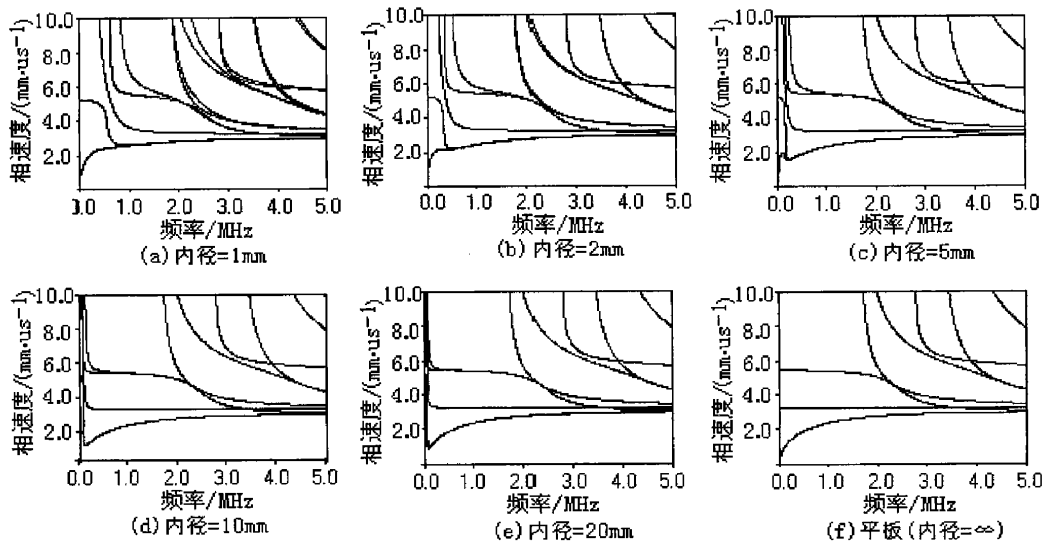


图2 钢管壁厚为1mm,不同内径时的相速度频散曲线

### 3.2 半径变化对频散曲线的影响

管材的内径与壁厚比变化时将对接管中导波的模式行为产生很大的影响。当内径与壁厚比变得很大时,圆管中波的模式行为与同厚度板中波的模式行为基本相同。柱体导波的这一特性,可作为板材中的导波进行近似地分析。

随着管内径与管壁之比的增加,管中波的行为越象板中的波。在真空中钢管壁厚为1mm、内径从1mm到20mm变化时,频散曲线的趋势如图2所示。图中显示了圆周阶次为0和1时的模式。作为比较,对1mm厚的钢板的频散曲线,可以认为管内径为无穷大的情况,如图2(f)所示。在低频情况下(相对于长波长)管中的纯模式最显著,随着频率的增加和波长的减少,它开始显得象板中的波,尤其当半径增大时,这种情况更为明显。当半径是壁厚的10倍时,管和板中导波频散曲线的差别只在低于0.5MHz·mm的频·厚积时才能发现。在这个频厚积以上,柱体波的频散曲线几乎与板中波的频散曲线重合,不管圆周阶次是多少,曲线总是保持一致。

从这个例子中可以得出结论:在高频下工作和大半径时,可以用直角坐标系下的频散曲线来改进计算速度和稳定性。根据跟踪曲线的经验法则表明,等同于平板的最小频率为:

$$f_{\min} = \frac{V_L}{r_{\text{inner}}} \quad (3)$$

其中  $f_{\min}$  为频率的极小值 (MHz);  $r_{\text{inner}}$  是内径 (mm);  $V_L$  是纵波速度 (mm/μs)。因此,如果应用的目标仅是频厚积在 0.25MHz·mm 以上,且半径

与壁厚之比大于 20 时,可用平板代替。

## 4 结束语

传统的 C 扫描方法可以较精确地探测到管内存在的缺陷,但费时过长,无法实现快速检测。因导波引起的质点振动存在于整个管壁范围内,且它能在管中沿管轴方向传播很长一段距离,接收点接收到的回波包含从发射点到接收点之间的全部信息,而不只是某点的信息,使得一次测量得到的信息大于 C 扫描的一次测量所得到的信息,从而提高了检测速度。

由于不同模式导波在管中的位移分布、应力分布和能量分布各不相同,使得不同模式导波对管中不同位置、深度处的缺陷具有不同的灵敏度。所以用导波进行检测时,合理选择检测模式是提高检测可靠性的关键所在<sup>[9]</sup>,应该尽可能地选择那些在缺陷附近能量较为集中的导波模式进行检测。另一方面,管材的内径与壁厚比变化时将对接管中导波的模式行为产生很大的影响,当内径与壁厚比变得很大时,圆管中波的模式行为与同厚度板中波的模式行为基本相同。利用导波的这一特性,分析频厚积在 0.25MHz·mm 以上,且半径与壁厚之比大于 20 的管材时,可看作板材中的导波进行近似的分析。

附录

超声导波在管材中传播的频散方程为:

$$|C_{ij}| = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

其中:  $C_{11} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)a^2]Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$ ,

$(\beta_1 r)$ 和  $K_n(\beta_1 r)$

参考文献:

[1] Cawley P., Alleyne D. N. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures [J]. Ultrasonics, 1996, 34(2): 287-290.

[2] Wanchan C., Cawley P. Guided waves for the detection of defects in welds in plastic pipes [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1995, 14(A): 1537-1544.

[3] Alleyne D. N., Lowe M. J. S., Cawley P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes [J]. Trans. of the ASME J. Appl. Mech., 1998, 65(2): 635-641.

[4] Alleyne D. N., Cawley P., Lank A. M., Mudge P. J. The Lamb wave inspection of chemical plant pipework [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16(A): 1269-1276.

[5] Lowe M. J. S., Alleyne D. N., Cawley P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in pipe [J]. Trans. of the ASME J. Appl. Mech., 1998, 65(2): 649-656.

[6] Silk M. G., Bainton K. F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves [J]. Ultrasonics, 1979, 17(1): 11-19.

[7] 刘镇清. 圆管中的超声导波 [J]. 无损检测, 1999; 21(12): 560-562.

[8] Gazis, D. C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders, I. Analytical foundation [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 568-573.

[9] Ditre J. J., Rose J. L., Chen G. Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1992, 11(B): 2109-2115.

$$C_{12} = 2\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2\xi a(n+1) Z_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{13} = -2n(n-1) Z_n(\beta_1 a) + 2\lambda_1 \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{14} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2) a^2] W_n(\alpha_1 a) +$$

$$2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{15} = 2\lambda_2 \beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2(n+1) \xi a W_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{16} = -2n(n-1) W_n(\beta_1 a) + 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a);$$

$$C_{21} = 2n(n-1) Z_n(\alpha_1 a) - 2\lambda_1 n\alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{22} = -\xi \beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1) Z_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{23} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2] Z_n(\beta_1 a) -$$

$$2\lambda_2 \beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{24} = 2n(n-1) W_n(\alpha_1 a) - 2n\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{25} = -\lambda_2 \xi \beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1) W_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{26} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2] W_n(\beta_1 a) -$$

$$2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a);$$

$$C_{31} = 2n\xi a Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \xi \alpha_1 a^2 Z_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{32} = -n\beta_1 a Z_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2) a^2 Z_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{33} = n\xi a Z_n(\beta_1 a),$$

$$C_{34} = -2n\xi a W_n(\alpha_1 a) + 2\xi \alpha_1 a^2 W_{n+1}(\alpha_1 a),$$

$$C_{35} = -\lambda_2 n\beta_1 a W_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2) a^2 W_{n+1}(\beta_1 a),$$

$$C_{36} = n\xi a W_n(\beta_1 a) \tag{5}$$

将  $C_{11}$ 到  $C_{36}$ 中的  $a$  换为  $b$ , 就得到  $C_{41}$ 到  $C_{66}$ 的值, 上式中  $n$  表示导波沿周向的阶次,  $\xi$  为波数,  $k$  为角波数。

$$\alpha_1 r = | \alpha r |, \quad \beta_1 r = | \beta r | \tag{6}$$

$$a^2 = \omega^2 / C_L^2 - k^2, \quad \beta^2 = \omega^2 / C_T^2 - k^2 \tag{7}$$

其中  $r$  为半径,  $a$ 、 $b$  分别表示内、外半径。

式(5)中,  $Z_n$  和  $W_n$  表示 Bessel 函数或扩展 Bessel 函数, 当用 Bessel 函数  $J$  和  $Y$  时,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值为 1, 当用扩展 Bessel 函数  $I$  和  $K$  时,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值为 -1。Bessel 函数  $Z_n$  和  $W_n$  选择如下:

①  $C_L < C_P$  或  $\alpha^2, \beta^2 > 0$  时,  $J_n(\alpha r)$  和  $Y_n(\alpha r)$ ,  $J_n(\beta r)$  和  $Y_n(\beta r)$

②  $C_L > C_P > C_T$  或  $\alpha^2 < 0, \beta^2 > 0$  时,  $I_n(\alpha_1 r)$  和  $K_n(\alpha_1 r)$ ,  $J_n(\beta r)$  和  $Y_n(\beta r)$

③  $C_P < C_T$  或  $\alpha^2 < 0, \beta^2 < 0$  时,  $I_n(\alpha_1 r)$  和  $K_n(\alpha_1 r)$ ,  $I_n$

## 江浙沪建筑声学学会互访活动在南京进行

受江苏省声学学会和建筑学会邀请,上海市声学学会和浙江省声学学会代表团一行10人于2001年5月15日~17日在南京进行了访问和学术交流。在宁期间参观了江苏省设计院和南京大学近年来完成的紫金大剧院、江苏省艺术学院音乐厅及扬州大剧院等,举行了《剧场建筑与声学设计》学术报告会。上海现代设计集团章奎生声学研究所介绍了他们近两年完成的20余个文化建筑和体育建筑的声学设计,同济大学王季卿教授做了《古戏台建筑声学设计》学术报告,南京大学孙广荣教授(音乐厅音质设计)、东南大学甄开源教授(檀香山的声环境)和柳孝图教授(城市发展与城市声环境)等分别做了学术报告。通过访问沟通了信息,交流了研究成果,促进了江浙沪同行的友谊,此类活动今后将继续进行。建筑声学和噪声控制设备厂上海申华声学装备有限公司和无锡堰桥噪声控制设备厂同时参加了此次活动。

吕玉恒 章奎生

20卷3期(2001)