复合材料学报 第20卷 第6期 12月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 6 December 2003

文章编号: 1000-3851(2003)06-0130-07

复合管状结构中超声导波的位移分布

他得安[1], 刘镇清[2], 贺鹏飞[3]
(1. 复旦大学 电子工程系, 上海 200433; 2. 同济大学 声学研究所, 上海 200092; 3. 同济大学 工程力学系, 上海 200092)

摘 要: 对超声纵向导波在复合管状结构中的传播特性进行了分析。然后分析了系统中的位移分布, 以此确定了各模式检测管材的最佳频厚积范围和检测的最佳位置。结果表明, 各模式的径向和轴向位移在管内壁上的值较大, 而在管壁中间和管外壁上的值较小; 当频厚积增大到一特定值后, 管壁中间和管外壁上的径向和轴向位移都近似为零, 此特定值随模式阶次的提高而增加。选取各模式检测的频厚积时, 应尽可能的选径向位移较小而轴向位移较大的频厚积点。

关键词: 复合管材; 纵向导波; 位移分布; 超声检测
中图分类号: TG115.28; TB533; O426.2 **文献标识码**: A

DISPLACEMENT DISTRIBUTION OF LONGITUDINAL GUIDED WAVES IN COMPOSITE PIPES

TA Dean[1], LIU Zhenqing[2], HE Pengfei[3]
(1. Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Department of Engineering Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The propagation characteristic of ultrasonic longitudinal guided waves in composite pipes is investigated. The dispersion characteristics were computed on the assumption that the frequency is a real number and the wavenumber is a complex number. The displacement amplitude component distributions were analyzed in a two-layer system. The optimal location, optimal mode and its frequency-thickness products of testing were chosen by the displacement amplitude component distributions. The results show that the values of the radial and axial displacements of guided waves are larger at the inner wall than those at the middle and outer walls of a two-layer composite pipe. When frequency-thickness products increase to a certain value, which will increase with the increasing of the order of mode, the radial and axial displacements approach zero. It should be the choice of frequency-thickness products where there are smaller radial displacement and larger axial displacement in testing of guided wave modes.

Key words: composite pipes; longitudinal guided waves; displacement distribution; ultrasonic testing

金属-塑料复合管是20世纪末开发的一种新型的流体输送管道, 它是以金属管为骨架, 管内表面牢牢地包覆有一定厚度的聚乙烯或交联聚乙烯层。其特点是耐腐蚀、重量轻、气密性好、耐高压、抗振动、易弯曲且不反弹、施工简便、使用寿命长等, 可被广泛应用于各类工程设施和液化汽的输送以及石油化工等工业部门的特种液体输送。它的问世意味着管材制造的一次革命, 是各种金属管和塑料管的更新换代产品。近两年, 随着金属-塑料复合管在我国开发成功, 其应用也越来越广泛。但在制造过程中, 由

收稿日期: 2002-08-05; **收修改稿日期**: 2002-12-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10074050); 上海市博士后科学基金资助项目
通讯作者: 他得安, 博士, 主要从事超声波及其在工业检测和生物医学方面的基础和应用研究 E-mail: tda@fudan.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于复合不紧密, 焊接不牢或漏焊时, 在使用过程中常发生泄漏; 另一方面, 如果用作高热流体管长期使用时, 由于热胀冷缩会造成管壁错位以致造成渗漏。因此, 用超声导波的方法检测这类复合结构的质量受到各个部门的高度重视, 而超声检测的核心问题之一是对超声导波模式在复合结构中的传播特性及它们与复合结构之间关系的认识。

由于壳体中波传播的复杂性, 对波在复合圆柱壳中传播的研究很少, Markus 等[1]和 Yuan 等[2]用解析法研究了波在自由复合圆柱壳中的传播; Xi 等[3]用半解析法研究了复合圆柱壳中分别是真空和充液体的情况下波的传播问题; 然后 Xi 等[4]又在三维弹性理论的框架下, 用数值-解析法的半解析法对各向异性圆柱壳中波的传播特性进行了研究, 在分析中他们将径向位移以有限元来模拟, 而将周向和轴向位移扩展为复指数的形式, 但忽略了体积力的存在。Huang 等[5]应用数值-解析法研究了波在复合圆柱壳中的频散特性; Datta 在文献[6]中对波在复合圆柱和壳中传播的理论研究进行了详细的综述。在以上列举的分析中, 所考虑的都是实波数和实频率或复频率的情况。另外, 席文君等[7]对不锈钢内衬复合钢管中的残余热应力进行了分析, 并分析了复合钢管内产生裂纹的原因; 杜光升等[8]采用柱状分层结构中轴对称声导波的波动方程和界面"弹簧"模型, 导出了具有弱界面的双层复合结构中轴对称声导波的广义散射方程。研究结果表明, 对于界面为刚性联接或滑移联接时, 其相应的双层柱状复合结构中轴对称声导波的频散特性有明显的差异。

本文作者在计算频散特性时, 考虑了实频率和复波数的情况, 对纵向轴对称模式导波在复合管状结构中的传播特性进行了分析; 然后考虑了管壁是两层的情况, 分析了系统中的位移分布, 以此来确定各模式检测管状结构的最佳频厚积范围和检测的最佳位置, 为复合管状结构超声检测中导波模式及频厚积的选择提供一定的理论依据。

1 复合管状结构中导波的频散方程

1.1 频散方程

假设复合管状结构轴对称且无限长; 材料特性是均匀的、横向各向同性的线弹性体。并假设导波是连续的、具有实频的能量有限信号。能量有限的假设意味着外部能量不能附加进去, 所求出的也只是沿轴向传播的导波的解。其一般的弹性动力学运动方程为

$$(\lambda+2\mu)\nabla(\nabla\cdot\vec{U})+\mu\nabla\times(\nabla\times\vec{U})=\rho(\partial^2\vec{U}/\partial t^2) \tag{1}$$

其中: $\vec{U}$ 为位移矢量, ρ 为材料密度, λ 和 μ 为拉梅常数, 上式左边第一项表示膨胀(压缩)部分, 第二项表示旋转(等体积)部分。

用 Helmholtz 分解, 时间谐振位移矢量 $\vec{U}$ 可用压缩标量势 Φ 和等体积矢量势 $\vec{\Psi}$ 表示为

$$\vec{U}=\nabla\Phi+\nabla\times\vec{\Psi} \tag{2}$$

其中: $\Phi=\phi e^{i(\xi z-\omega t)}$, $\vec{\Psi}=\varphi e^{i(\xi z-\omega t)}$, 轴向波数 $\xi=\omega/c_p$, c_p 为相速度。

将式(2)代入式(1)得

$$c_l^2\nabla^2\Phi=\partial^2\Phi/\partial t^2 \tag{3a}$$

$$c_t^2\nabla^2\vec{\Psi}=\partial^2\vec{\Psi}/\partial t^2 \tag{3b}$$

其中: $c_l^2=(\lambda+2\mu)/\rho$ 为材料中的纵波速度, $c_t^2=\mu/\rho$ 为材料中的横波速度。

则对于沿轴向传播的导波有

$$\Phi=f(r)\cos(n\theta)e^{i(\xi z-\omega t)} \tag{4a}$$

$$\Psi_r=-ig_r(r)\sin(n\theta)e^{i(\xi z-\omega t)} \tag{4b}$$

$$\Psi_\theta=-ig_\theta(r)\cos(n\theta)e^{i(\xi z-\omega t)} \tag{4c}$$

$$\Psi_z=g_3(r)\sin(n\theta)e^{i(\xi z-\omega t)} \tag{4d}$$

其中: Ψ_r、Ψ_θ、Ψ_z 为矢量势 $\vec{\Psi}$ 在 r、θ、z 方向的分量。

将式(4a)～(4d)代入式(3a)和式(3b), 然后用标准 Bessel 函数微分算子来表示, 最后得

$$B_{n,k_l r}[f]=0 \tag{5a}$$

$$B_{n+1,k_t r}[g_r-g_\theta]=0 \tag{5b}$$

$$B_{n-1,k_t r}[g_r+g_\theta]=0 \tag{5c}$$

$$B_{n,k_t r}[g_3]=0 \tag{5d}$$

其中: $k_l^2=\omega^2/c_l^2-\xi^2$, $k_t^2=\omega^2/c_t^2-\xi^2$。

根据 Bessel 函数解的表达式, 式(5)的一般解表示为

$$\begin{cases} f=AZ_n(k_l r)+BW_n(k_l r) \\ g_3=A_3Z_n(k_t r)+B_3W_n(k_t r) \\ 2g_1=g_r-g_\theta=2A_1Z_{n+1}(k_t r)+2B_1W_{n+1}(k_t r) \\ 2g_2=g_r+g_\theta=2A_2Z_{n-1}(k_t r)+2B_2W_{n-1}(k_t r) \end{cases} \tag{6}$$

其中 Z_n、W_n 表示 Bessel 函数。

由规范不变式(Gauge invariance)可知, 可以将其中一个势函数 $g_i(i=1,2,3)$ 设为零, 而不失一般性。换句话说, 相当于一个等体积势函数的位移场可以从另外两个等体积势联立解出。因此, 假设 $g_2=0$, 则

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$g_r = -g_\theta = g_1 \tag{7}$$

对于复合管材中各层内的纵向轴对称导波模式, 即当 $n = 0$ 时, 式(6)可写为

$$\begin{cases} f_m = A_m Z_0(k_l^{(m)} r) + B_m W_0(k_l^{(m)} r) \\ g_m = C_m Z_1(k_t^{(m)} r) + D_m W_1(k_t^{(m)} r) \end{cases} \tag{8}$$

其中: $(k_l^{(m)})^2 = \omega^2/(c_l^{(m)})^2 - \xi^2$, $(k_t^{(m)})^2 = \omega^2/(c_t^{(m)})^2 - \xi^2$。$m = 1, 2, \ldots$ 表示复合管壁的层号。$c_l^{(m)}$、$c_t^{(m)}$ 分别为各层的纵波速度和横波速度。

利用已知解的信息计算复合管壁内任意点的位移和应力。从式(2)和柱坐标系中的矢量算法, 得到当 $n = 0$ 时, 在 r、z 方向的位移分量为

$$\begin{cases} u_r^{(m)} = (f_m' + \xi g_m) e^{i(\xi z - \omega t)} \\ u_z^{(m)} = i(\xi f_m + \frac{1}{r} g_m + g_m') e^{i(\xi z - \omega t)} \end{cases} \tag{9}$$

复合管壁各层内纵向导波模式的应力可写为

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{(m)} = \mu_m \left\{ -\frac{\lambda_m}{\mu_m} [(k_l^{(m)})^2 + \xi^2] f_m + 2 f_m'' + 2\xi g_m' \right\} e^{i(\xi z - \omega t)} \\ \sigma_{rz}^{(m)} = i\mu_m \{ 2\xi f_m' + [\xi^2 - (k_t^{(m)})^2] g_m \} e^{i(\xi z - \omega t)} \\ \sigma_{zz}^{(m)} = \mu_m \left\{ -\frac{\lambda_m}{\mu_m} [(k_l^{(m)})^2 + \xi^2 + \frac{2\mu_m \xi^2}{\lambda_m}] f_m - 2\xi \frac{1}{r} g_m - 2\xi g_m' \right\} e^{i(\xi z - \omega t)} \end{cases} \tag{10}$$

其中 μ_m 和 λ_m 为管壁各层材料的拉梅常数。

若考虑复合管状结构为两层的情况, 即 $m = 2$ 的情况。由于管壁的内外层都为固体, 所以边界条件可写为

在复合管内表面上:

$$\sigma_{rr}^{(1)} = \sigma_{rz}^{(1)} = 0 \tag{11a}$$

在管壁内外层耦合处:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(1)} &= \sigma_{rr}^{(2)}; \quad \sigma_{rz}^{(1)} = \sigma_{rz}^{(2)} \\ u_r^{(1)} &= u_r^{(2)}; \quad u_z^{(1)} = u_z^{(2)} \end{aligned} \tag{11b}$$

在复合管外表面上:

$$\sigma_{rr}^{(2)} = \sigma_{rz}^{(2)} = 0 \tag{11c}$$

其中: 上标 1 和 2 分别表示复合管壁的内层和外层。

将式(9)和式(10)依次代入边界条件式(11), 产生一组特征方程, 形成以幅度 A_m、B_m、C_m、D_m 的矩阵形式

$$[M_{ij}] \cdot [N] = 0, \quad i, j = 1, 2, \cdots 8 \tag{12}$$

其中 $N = [A_m \quad B_m \quad C_m \quad D_m]^T$, M_{ij} 为系数矩阵。为使上式有非零解, 其系数行列式必须为零, 即

$$|M_{ij}| = 0 \tag{13}$$

上式就是复合管状结构中纵向轴对称导波的频散方程。

1.2　Bessel 函数的选择

在 M_{ij} 的表达式中含有一系列 Bessel 函数。所以, 选取合适的 Bessel 函数对方程(13)中解的稳定性非常重要。因为 Bessel 函数 J_n 和 Y_n 沿虚轴以指数形式增加, 向内和向外传播的波的影响不能清楚的分开, 因此当变元增大时, 解变得不稳定, 这一问题类似于板中大频厚积的情况[9], 对大半径管材尤其重要; 然而随变元逐渐增大, Bessel 函数 $I_n(z)$ 增大, 而 $k_n(z)$ 减小[10], 使修正 Bessel 函数分离, 导致解更加稳定。

根据函数及其它参量的取值, 由式(12)中可以解出 A_m、B_m、C_m、D_m 的值。然后将这些值分别代入式(9)和式(10), 解得 $u_r^{(m)}$ 和 $u_z^{(m)}$ 以及 $\sigma_{rr}^{(m)}$、$\sigma_{zz}^{(m)}$ 和 $\sigma_{rz}^{(m)}$。由于推导中涉及 Z_n、W_n、$k_l^{(m)}$、$k_t^{(m)}$ 及 γ_1 和 γ_2 的取值, 而且非常复杂, 此处不再给出。Bessel 函数及各参数的选择见表 1。

1.3　复合管材中纵向导波的频散曲线

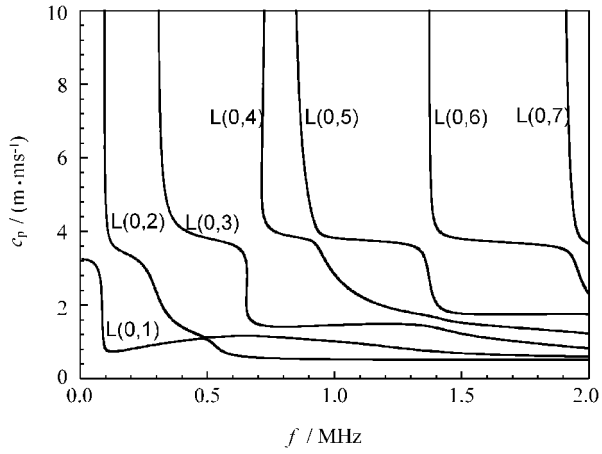
由式(13)可得复合管材中导波的相速度(c_p)和群速度(c_g)频散曲线为图 1(a)和图 1(b)。管材为壁

表 1　Bessel 函数及各参数的选择

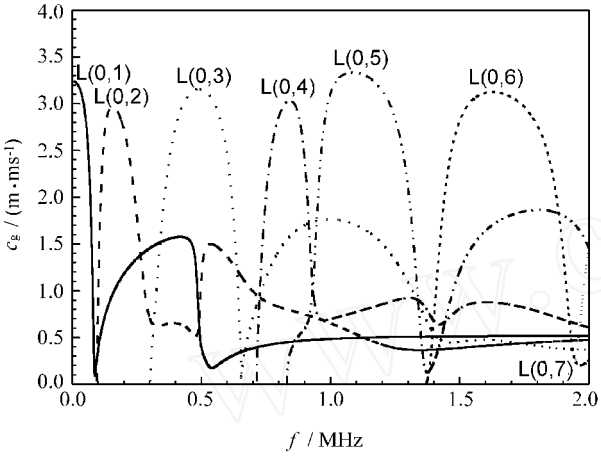
Table 1　The selection of the type of Bessel functions and parameters used for the composites cylindrical layer matrix

$k_l^2, k_t^2 > 0$ or $c_p > c_l$	$k_l^2 < 0, k_t^2 > 0$ or $c_l > c_p > c_t$	$k_l^2 < 0, k_t^2 < 0$ or $c_l > c_t > c_p$
$k_l = \sqrt{k_l^2}$	$k_l = \sqrt{-k_l^2}$	$k_l = \sqrt{-k_l^2}$
$k_t = \sqrt{k_t^2}$	$k_t = \sqrt{k_t^2}$	$k_t = \sqrt{-k_t^2}$
$\gamma_1 = 1$	$\gamma_1 = -1$	$\gamma_1 = -1$
$\gamma_2 = 1$	$\gamma_2 = 1$	$\gamma_2 = -1$
$Z_n(k_l r) = J_n(k_l r)$	$Z_n(k_l r) = I_n(k_l r)$	$Z_n(k_l r) = I_n(k_l r)$
$W_n(k_l r) = Y_n(k_l r)$	$W_n(k_l r) = K_n(k_l r)$	$W_n(k_l r) = K_n(k_l r)$
$Z_n(k_t r) = J_n(k_t r)$	$Z_n(k_t r) = J_n(k_t r)$	$Z_n(k_t r) = I_n(k_t r)$
$W_n(k_t r) = Y_n(k_t r)$	$W_n(k_t r) = Y_n(k_t r)$	$W_n(k_t r) = K_n(k_t r)$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) Phase velocity



(b) Group velocity

图 1 内半径为 10 mm、塑料层(内层)壁厚为 1 mm、铜管(外层)厚为 1 mm 的频散曲线

Fig. 1 Phase and group velocity dispersion curves of longitudinal guided waves for a composite pipe (20 mm inner diameter with inner layer thickness of 1 mm and outer layer thickness of 1 mm)

厚 2 mm (其中管内层为聚乙烯, 厚 1 mm; 管外层为铜, 厚 1 mm), 内半径为 10 mm 的复合管, 铜的密度为 8.4 g/cm^3, 纵波速度为 4.4 m/ms, 横波速度为 2.2 m/ms; 聚乙烯的密度为 2.2 g/cm^3, 纵波速度为 1.35 m/ms, 横波速度为 0.55 m/ms。

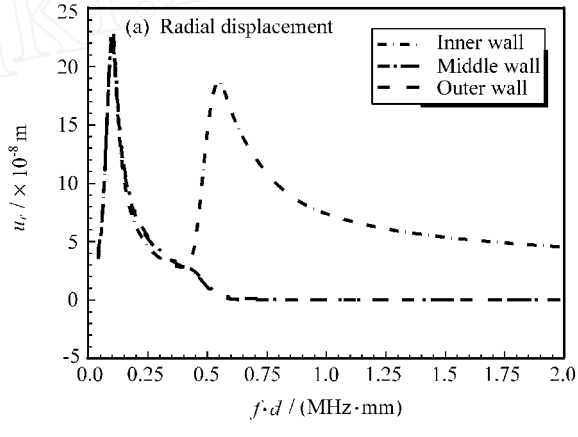
2 纵向轴对称较低阶模式的位移分布曲线

研究导波的频散曲线及振动位移分布情况, 对于模式选择、激励频率、能量泄漏以及特定模式对缺陷灵敏度的研究都有指导意义, 对导波无损检测的有效性影响很大。

由式(9)可得各较低阶模式的位移分布曲线。

图 2 为 L (0, 1) 模式在管壁内外表面和管壁中间的位移分布曲线, 横坐标 $f \cdot d$ 表示频厚积。其中图 2(a) 和 2(b) 分别为径向位移和轴向位移分布曲线。由于两层之间的径向位移和轴向位移是连续的, 因此, 在分析时只给出两层耦合处的值, 即管壁中间的值(以下同)。

从图上看出, L (0, 1) 模式的径向位移在管壁内外表面和管壁中间的值随频厚积的增大而增大, 频厚积在 0.1 MHz·mm 附近时达到最大值, 然后又减小, 最后随频厚积的增加, 管壁中间和管外壁上的值继续减小, 而管内壁上的值在 0.4 MHz·mm 附近达到最小值, 而在 0.55 MHz·mm 附近具有最大值。管壁中间和管外壁上的值在各频厚积上基本相等, 而在 0.4 MHz·mm 以下时, 管内外表面和管壁中间处的径向位移基本相等。当频厚积在 0.6 MHz·mm 以上时, 管壁中间和管外壁上的值近似为零。



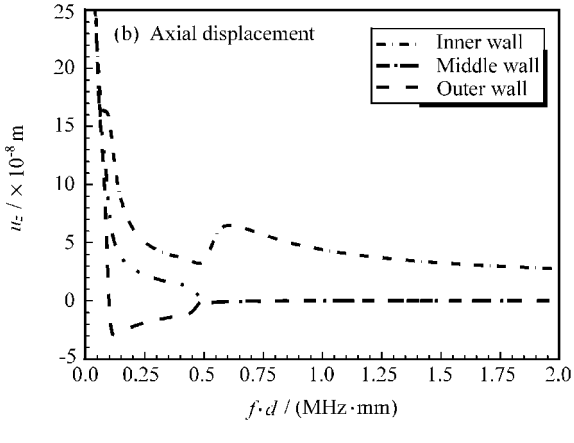


图 2 L (0, 1) 模式在管内壁、管壁中间和管外壁上的位移分布曲线

Fig. 2 Radial and axial displacement distributions of L (0, 1) at inner, middle and outer walls of a composite pipe

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

L (0, 1) 模式的轴向位移在管壁内外表面和管壁中间的值在0.05MHz·mm附近很大, 但随频厚积增加, 轴向位移减小, 管内壁上的轴向位移在0.5MHz·mm附近减到最小值, 在0.6MHz·mm附近具有极大值; 而管外壁上的轴向位移在0.1MHz·mm附近达到零, 然后又反向增加, 在0.13MHz·mm附近达到最大值。当频厚积在0.6MHz·mm以上时, 管壁中间和管外壁上的轴向位移几乎为零。轴向位移分量对于检测周向缺陷的灵敏度起决定作用, 而导波在管内外表面上的径向位移对波在传播过程中能量的泄漏起决定作用[11], 所以, 如果用L (0, 1) 模式来检测时, 选取的最佳频厚积应在0.05MHz·mm 附近或以下。

图3为L (0, 2) 模式在管壁内外表面和管壁中间的位移分布曲线。其中图3(a)为径向位移分布曲线, 图3(b)为轴向位移分布曲线。

从图上看出, L (0, 2) 模式的径向位移在管壁各处的值在0.1MHz·mm 附近时很大, 但随频厚积的增大, 径向位移迅速减小, 管内壁上的值在0.2MHz·mm附近最小。在各频厚积上, 管壁中间和管外表面上的径向位移都基本相等, 当频厚积在0.8MHz·mm以上时, 其值近似为零。另一方面, L (0, 2) 模式的轴向位移在管壁各处的值在0.1MHz·mm附近时相对较小, 但随频厚积的增大, 管内表面上的轴向位移增大, 在0.3MHz·mm附近达到最大值, 然后又有几个极大值和极小值; 而管壁中间和管外表面上的值减小, 除频厚积在0.45～1.0MHz·mm之间外, 管壁中间和管外表面上的值基本相等, 在1.0MHz·mm 以上, 其值近似为零。因此, 如果用L (0, 2) 模式来检测管内壁时, 选取的最佳频厚积应在0.15～1.0MHz·mm 之间, 如果检测管壁中间和管外表面时, 频厚积范围应当在

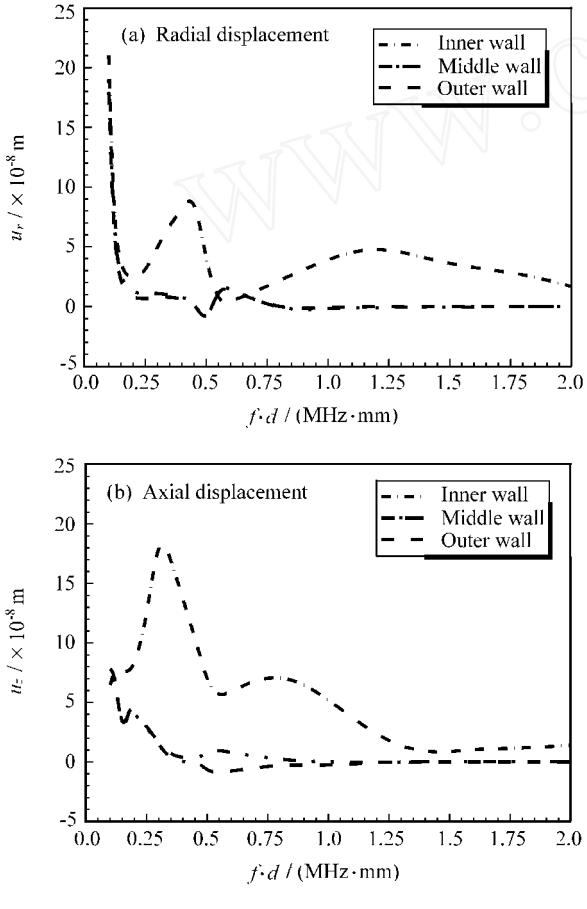


图3　L (0, 2) 模式在管内壁, 管壁中间和管外壁上的位移分布曲线

Fig. 3　Radial and axial displacement distributions of L (0, 2) at inner, middle and outer walls of a composite pipe

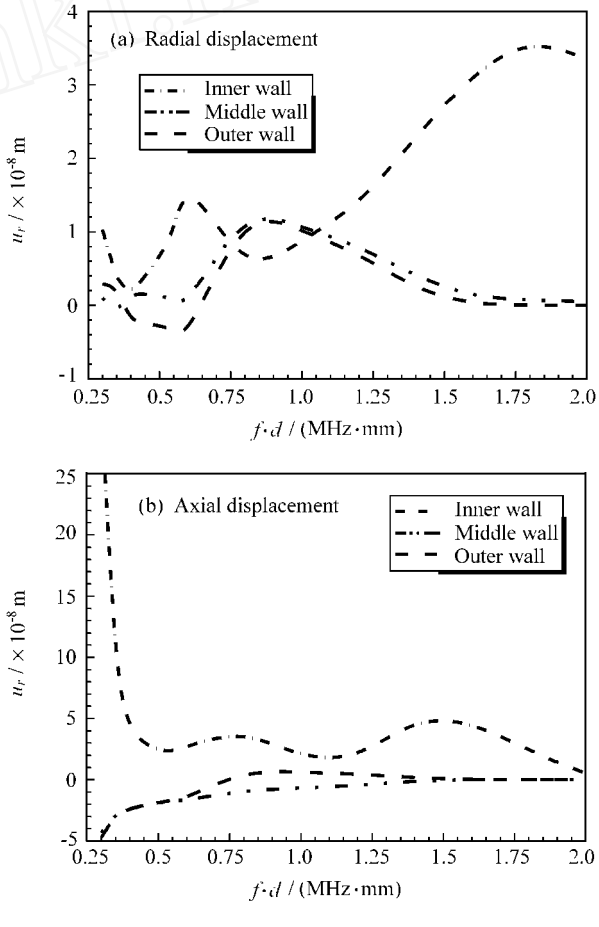


图4　L (0, 3) 模式在管内壁, 管壁中间和管外壁上的位移分布曲线

Fig. 4　Radial and axial displacement distributions of L (0, 3) at inner, middle and outer walls of a composite pipe

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.15～0.3MHz·mm 之间。

图 4 为 L(0,3) 模式在管壁内外表面和管壁中间的位移分布曲线。其中图 4(a) 为径向位移分布曲线, 图 4(b) 为轴向位移分布曲线。

从图上看出, L(0,3) 模式的径向位移在管壁内外表面和管壁中间的值在各频厚积下都不同, 随频厚积的增加, 管内表面上的径向位移波浪式的增加, 在 0.4 和 0.85MHz·mm 附近具有最小值和极小值, 在 0.6 和 1.8MHz·mm 附近具有极大值和最大值; 而管壁中间和管外表面上的径向位移在 0.85MHz·mm 附近具有最大值。当频厚积在 1.8MHz·mm 以上时, 管壁间和管外表面上的径向位移近似为零。另一方面, L(0,3) 模式的轴向位移在管壁各处的值在 0.3MHz·mm 附近很大, 尤其是管内表面上的值; 但管壁中间和管外表面上的轴向位移是反向的。随频厚积的增加, 管壁各处的轴向位移减小, 管内表面上的值在 0.55MHz·mm 附近达到极小值后, 又有几个极大值和极小值, 而管壁中间和管壁外表面上的轴向位移在 1.5MHz·mm 以上近似为零, 除 0.6～1.5MHz·mm 之间外, 管壁中间和管壁外表面上的轴向位移近似相等。因此, 如果用 L(0,3) 模式来检测管内壁时, 选取的最佳频厚积应在 0.3～1.1MHz·mm 之间, 如果检测管壁中间和管外表面时, 频厚积范围应当在 0.3～0.6MHz·mm 之间。

图 5 为 L(0,4) 模式在管壁内外表面和管壁中间的位移分布曲线。其中图 5(a) 和 5(b) 分别为径向位移和轴向位移分布曲线。

对于 L(0,4) 模式的径向位移, 从图 5(a) 中看出, 当频厚积很小时, 在管内表面上的值是正向的, 而在管壁中间和管外表面上的径向位移是反向的。随频厚积的增加, 管壁各处的径向位移减小, 管内表面上的值在 0.85MHz·mm 附近达到极小值, 而在 0.98MHz·mm 附近达到最大值。在 0.96MHz·mm 以上, 管壁中间和管外表面上的值基本相等。另一方面, 对于 L(0,4) 模式的轴向位移, 当频厚积很小时, 管壁各处的值都较大。随频厚积的增加, 各处的轴向位移减小, 在 0.84MHz·mm 附近, 管内表面上的轴向位移减到最小值, 然后有几个极大值和极小值; 而在 0.82MHz·mm 附近管壁中间和管外表面上的值达到零, 然后又反向增加, 在 0.88MHz·mm 附近达到最大值, 除 0.88～1.9MHz·mm 之间外, 各频厚积上, 管壁中间和管外表面上的轴向位移几乎是相等的。因此, 如果用 L(0,4) 模式来检测管内表面时, 应在 1.2MHz·mm 以后检测, 但检测的频厚积不能太高, 因为频厚积太高时管中传播的导波模式太多, 使检测变得复杂; 如果是检测管壁间和管外表面, 应在 0.88MHz·mm 附近检测。

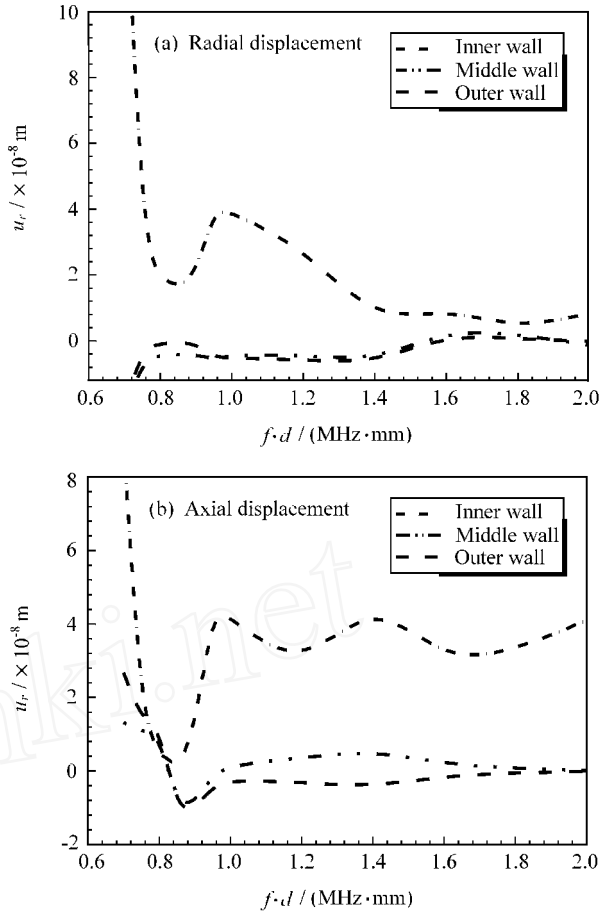


图 5 L(0,4) 模式在管内壁、管壁中间和管外壁上的位移分布曲线

Fig. 5 Radial and axial displacement distributions of L(0,4) at inner, middle and outer walls of a composite pipe

3 结 论

本文中在计算频散特性时考虑了实频率和复波数的情况, 对纵向轴对称模式导波在复合管状结构中的传播特性进行了分析。然后考虑了管壁是两层的情况, 分析了系统中的位移分布。最后分析了用各模式检测两层复合管材的最佳频厚积范围和检测的最佳位置。分析结果表明:

(1) 用 L(0,1) 模式检测时, 选取的最佳频厚积应在 0.05MHz·mm 附近或以下, 此时, L(0,1) 模式对管内外表面和管壁中央的缺陷都较灵敏。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 用L (0, 2) 模式来检测管内壁时, 选取的最佳频厚积应在 0. 15～1. 0MHz·mm 之间, 如果检测管壁中间和管外表面时, 频厚积范围应当在 0. 15～0. 3MHz·mm 之间。

(3) 用L (0, 3) 模式来检测管内壁时, 选取的最佳频厚积应在 0. 3～1. 1MHz·mm 之间, 如果检测管壁中间和管外表面时, 频厚积范围应当在 0. 3～0. 6MHz·mm 之间。

(4) 用L (0, 4) 模式来检测管内的表面时, 应在 1. 2MHz·mm 以上检测, 如果是检测管壁中间和管外表面, 应在 0. 88MHz·mm 附近检测。

分析结果还表明: (1) 各模式的径向位移和轴向位移在管内表面上的值较大, 而在管壁中间和管外表面上的值较小; (2) L (0, 1) 和L (0, 2) 模式的径向位移在管壁中间和管外表面上的值基本相等, 而L (0, 3) 和L (0, 4) 模式的值不相等; (3) 当频厚积增大到一特定值后, 管壁中间和管外表面上的径向位移和轴向位移都近似为零, 此特定值随模式阶次的提高而增加; (4) 各模式的径向位移和轴向位移在管内表面上的值有几个极大值和极小值, 选取检测的频厚积时, 应尽可能的选径向位移较小而轴向位移较大的频厚积点。

本文得到复旦大学电子工程系王威琪院士、汪源源教授和余建国教授的指导, 在此表示感谢。

参考文献:

[1] Markus S, Mead D J. Wave motion in a 3-layered, orthotropic isotropic orthotropic shell [J]. *J Sound Vib*, 1995, 181: 149 - 167.

[2] Yuan F G, Hsieh C C. Three dimensional wave propagation in composite cylindrical shell [J]. *Compos Struct*, 1998, 42: 153 - 167.

[3] Xi Z C, Liu G R, Lam K Y, *et al*. Strip element method for analyzing wave scattering by a crack in a laminated composite cylinder [J]. *ASME J Appl Mech*, 2000, 67: 427- 429.

[4] Xi Z C, Liu G R, Lam K Y, *et al*. Dispersion and characteristic surfaces of waves in laminated composite circular cylindrical shells [J]. *J Acoust Soc Am*, 2000, 108(5): 2179- 2186.

[5] Huang K H, Dong S B. Propagating waves and edge vibrations in anisotropic composite cylinders [J]. *J Sound Vib*, 1984, 96: 363- 379.

[6] Datta S K. Wave propagation in composite plates and shells [A]. In: Chou T W, ed. Comprehensive Composite Materials, Vol1 [C]. Oxford: Elsevier Science Publishers, 2000. 511- 557.

[7] 席文君, 殷　声, 赖和怡. 铝热-离心法制备的不锈钢内衬复合钢管不锈钢层裂纹成因分析 [J]. 复合材料学报, 2002, 19 (1): 37- 40.

[8] 杜光升, 王耀俊, 袁忆丰, 等. 具有弱界面的柱状复合结构中轴对称声导波 [J]. 物理学报, 1998, 47(1): 27- 34.

[9] Lowe M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media [J]. *IEEE UFFC*, 1995, 42: 525- 542.

[10] 奚定平. 贝塞尔函数 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

[11] Rose J L, Ditri J J, Pilarski A, *et al*. A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing [J]. *NDT & E Int*, 1994, 27(6): 307- 310.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net