

脱粘缺陷对粘接结构频散特性的影响

常新龙 尼涛[†] 艾春安 赵文才

(第二炮兵工程学院 西安 710025)

摘要 采用全局矩阵理论,通过引入内聚强度弱化模型和弹簧模型,计算了脱粘缺陷对粘接结构频散特性的影响。分析了内聚强度缺陷、界面缺陷及混合缺陷等因素对粘接结构频散特性的影响,发现频散曲线的演化规律与材料声学性质密切相关。不同材料和不同组合,其规律有很大不同。针对各向同性粘接结构,可能通过考察特定频率段内频散模态的变化,实现对脱粘缺陷的检测。

关键词 粘接结构,内聚强度弱化,弹簧模型,脱粘,频散曲线

Influences of disbond defects on the dispersion property of adhesive bonding structure

CHANG Xin-Long NI Tao AI Chun-An ZHAO Wen-Cai
(The Second Artillery Project Institute, Xi'an 710025)

Abstract For assessing the influences of disbond defects on the dispersion property of adhesive bonding structure, an improved global matrix method is introduced, and the defects are described by the cohesive strength degradation mode and the spring mode. In this paper, cohesive strength failure, interface failure and the mixed failure are analyzed. The evolution regularity of dispersive curves strongly depends on the acoustic properties of the material, which maybe distinct for different materials and plying manners. For the adhesive bonding of isotropic materials, the disbond defects may be detected by measuring the variety of the dispersive modes in a special frequency band.

Key words Adhesive bonding, Cohesive strength degradation, Spring mode, Disbond, Dispersive curve

1 引言

粘接结构由于其比强度和比模量高,疲劳性、成型工艺好、便于修理等优点,在航空、航天部门得到了迅速的发展,有些大型客机

的粘接结构占全机总面积超过了 90%^[1]。毫无疑问,粘接结构的质量对产品的安全性和可靠性具有重大的意义。

有许多学者对这一问题进行了深入的研究,按照所使用的方法有射线法、光学法、

2009-02-24 收稿; 2009-07-08 定稿

作者简介:常新龙(1965-),男,汉族,河南南阳人,教授,博士生导师,研究方向为火箭发动机失效物理与可靠性,复合材料无损检测。

尼涛(1981-),男,博士研究生。

艾春安(1964-),男,教授,博士生导师。

赵文才(1982-),男,硕士研究生。

[†]通讯作者:尼涛, E-mail:nitao_77@163.com

热波法、声学法等, 其中声学法被认为是最有希望解决这一问题的无损检测技术。在国内, 中科院声学所的毛捷、简晓明、李明轩等采用谐波法和脉冲回波法进行研究, 发现了简谐共振频率向低频方向移动和存在超声波“透声窗”的现象, 并提出了自适应滤波、同态解卷积、余弦变换等信号处理方法^[2-6]; 同济大学声学所刘镇清等则重点研究了分离谱技术、Lamb 波检测和边界元方法, 对此进行了有益的探索^[7,8]; 华北工学院的张吉堂、路宏年等则研究了采用横波和板波的双模式检测, 开发了基于双模式的扫描成像系统^[9]。

从以上论述可以看出, 当前粘接质量声学检测的研究主要集中在实验和信号处理方面, 而理论上粘接缺陷对结构声学性质的影响则较少有学者研究。众所周知, 当超声波传播并遇到界面时会与之发生复杂的相互作用, 界面特性会影响波的传播特性, 因此有必要研究脱粘缺陷对于超声波传播特性的影响。本文采用全局矩阵建模技术, 通过弹簧模型和内聚强度弱化模型将脱粘缺陷引入, 重点从理论上分析了内聚强度缺陷、界面缺陷及混合缺陷等因素对于粘接结构频散特性的影响。

2 矩阵建模理论

研究多层结构中超声波的传播问题, 有两种重要理论: 传递矩阵方法和全局矩阵方法。传递矩阵法由 Thomson 和 Haskell 提出^[10,11], 利用各层对应的传递矩阵以及相邻层之间的边界条件, 通过各层传递矩阵相乘, 消去中间层变量, 从而得到层结构上下面的矩阵表达式, 最后利用边界条件给出特征方程。该法优点是矩阵阶数不依赖层数, 但是对于大频厚积问题, 传递矩阵变成病态矩

阵^[12], 频散方程解出现不稳定。全局矩阵法由 Knopoff 提出, 并由 Lowe 进行了改进^[10,13], 通过同时满足所有界面上的边界条件, 得到单一矩阵方程, 相应解可以给出所有层中波的性质, 可以有效解决数值解不稳定问题。因此本文采用改进后的全局矩阵建模技术, 求解多层结构的频散曲线。

2.1 全局矩阵理论

对于如图 1 所示的 n 层结构中的任一层, 其声场都可以使用 6 个子波表示, 包括 3 个“从上向下”传播的“下行波”和 3 个“从下向上”传播的“上行波”, 对每层结构建立局部坐标系, 将原点设定在各子波“进入”该层的位置处。这样, 3 个“下行波”的原点在该层顶部, 而 3 个“上行波”的原点在该层底部。

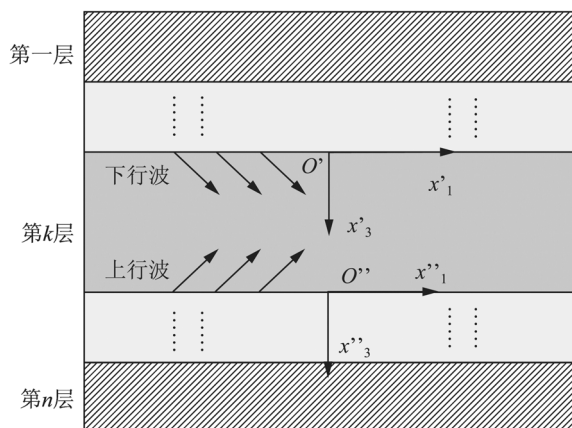


图 1 n 层结构及坐标轴定义

声场的位移分量可以用 6 个子波的线性叠加表示:

$$(u_1, u_2, u_3) = \sum_{q=1}^6 (1, V_q, W_q) U_{1q} \exp(i\xi(x_1 + \alpha_q x_3 - ct)) \quad (1)$$

式中, $q(q=1,2,\dots,6)$ 代表第 q 个子波; α 为波矢量 x_3 方向分量与 x_1 方向分量的比值; c 为层中子波沿 x_1 方向的相速度; U_1 为 u_1 的振幅, V 和 W 分别为 u_2 、 u_3 对 u_1 的比值。

代入 Christoffel 方程, 得到位移分量满

足的线性方程组

$$\begin{cases} k_{11}(\alpha)u_1 + k_{12}(\alpha)u_2 + k_{13}(\alpha)u_3 = 0 \\ k_{12}(\alpha)u_1 + k_{22}(\alpha)u_2 + k_{23}(\alpha)u_3 = 0 \\ k_{13}(\alpha)u_1 + k_{23}(\alpha)u_2 + k_{33}(\alpha)u_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $K(\alpha)$ 为对称矩阵。

为使式 (2) 中位移矢量不为零, 其行列式值必须等于零, 从而得到一个以 α 为变量的六阶多项式方程, 求解该方程可得到 6 个

子波的 α 值。由式 (1) 得到位移比率 $V_q = U_{2q}/U_{1q}$ 和 $W_q = U_{3q}/U_{1q}$, 分别表示为:

$$\begin{aligned} V_q &= \frac{k_{11}(\alpha_q)k_{23}(\alpha_q) - k_{13}(\alpha_q)k_{12}(\alpha_q)}{k_{13}(\alpha_q)k_{22}(\alpha_q) - k_{12}(\alpha_q)k_{23}(\alpha_q)} \\ W_q &= \frac{k_{11}(\alpha_q)k_{23}(\alpha_q) - k_{13}(\alpha_q)k_{12}(\alpha_q)}{k_{12}(\alpha_q)k_{33}(\alpha_q) - k_{23}(\alpha_q)k_{13}(\alpha_q)} \end{aligned} \quad (3)$$

使用 Hook 定律, 与式 (1) 形式相同, 可将应力分量用 6 个子波表示为:

$$(\sigma_{33}^*, \sigma_{13}^*, \sigma_{23}^*) = \sum_{q=1}^6 (D_{1q}, D_{2q}, D_{3q}) U_{1q} \exp(i\xi(x_1 + \alpha_q x_3 - ct)) \quad (4)$$

式中, $\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} / i\xi$ 。

综合式 (1) 和式 (4), 考虑参数之间的关系, 得到第 k 层结构中位移和应力的形式解:

$$P_k = D_k A_k \quad (5)$$

式中,

$$P_k = [u_1, u_2, u_3, \sigma_{33}^*, \sigma_{13}^*, \sigma_{23}^*]^T \quad (6)$$

$$A_k = [U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{16}]^T \quad (7)$$

$U_{11}U_{13}U_{15}$ 分别表示 3 个“下行波”在 x_1 方向上的位移; U_{12}, U_{14}, U_{16} 分别表示 3 个“上行波”在 x_1 方向的位移。而传递矩阵 D 对于该层顶部和底部有不同表达形式, 分别为:

$$D_t = \begin{bmatrix} 1 & 1/E_2 & 1 & 1/E_4 & 1 & 1/E_6 \\ V_1 & V_1/E_2 & V_3 & V_3/E_4 & V_5 & V_5/E_6 \\ W_1 & -W_1/E_2 & W_3 & -W_3/E_4 & W_5 & -W_5/E_6 \\ D_{11} & D_{11}/E_2 & D_{13} & D_{13}/E_4 & D_{15} & D_{15}/E_6 \\ D_{21} & -D_{21}/E_2 & D_{23} & -D_{23}/E_4 & -D_{25} & -D_{25}/E_6 \\ D_{31} & -D_{31}/E_2 & D_{33} & -D_{33}/E_4 & -D_{35} & -D_{35}/E_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D_b = \begin{bmatrix} E_1 & 1 & E_3 & 1 & E_5 & 1 \\ V_1 E_1 & V_1 & V_3 E_3 & V_3 & V_5 E_5 & V_5 \\ W_1 E_1 & -W_1 & W_3 E_3 & -W_3 & W_5 E_5 & -W_5 \\ D_{11} E_1 & D_{11} & D_{13} E_3 & D_{13} & D_{15} E_5 & D_{15} \\ D_{21} E_1 & -D_{21} & D_{23} E_3 & -D_{23} & D_{25} E_5 & -D_{25} \\ D_{31} E_1 & -D_{31} & D_{33} E_3 & -D_{33} & D_{35} E_5 & -D_{35} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$E_q = \exp(i\xi\alpha_q x_3), q=1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

对于第 k 层和 $k+1$ 层之间的粘接界面, 应用位移和应力的连续性条件, 有:

$$\begin{bmatrix} D_{kb} & -D_{(k+1)t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k \\ A_{k+1} \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

将各层中的式 (11) 写出, 对于一个 n 层结构, 可写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} D_{1b} & -D_{2t} & & & & \\ & D_{2b} & -D_{3t} & & & \\ & & \dots & \dots & & \\ & & & D_{(n-2)b} & -D_{(n-1)t} & \\ & & & & D_{(n-1)b} & -D_{nt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ \dots \\ A_{n-1} \\ A_n \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

容易看出, 该矩阵方程有 $6(n-1)$ 个方程, 却有 $6n$ 个未知数, 所以还需要加上层状结构上下表面的边界条件。对于大多数情况, 可以认为是真空条件, 这样, 上下表面处的应力为零。边界条件的矩阵形式为:

$$D_{1t} A_1 = \begin{bmatrix} D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} A_1 = 0 \quad (13)$$

$$D_{nb} A_n = \begin{bmatrix} D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} A_n = 0 \quad (14)$$

代入式 (12), 最终形式为:

$$\begin{bmatrix} D_{1t} & & & & & \\ D_{1b} & -D_{2t} & & & & \\ & D_{2b} & -D_{3t} & & & \\ & & \dots & \dots & & \\ & & & D_{(n-2)b} & -D_{(n-1)t} & \\ & & & & D_{(n-1)b} & -D_{nt} \\ & & & & & D_{nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ \dots \\ A_{n-1} \\ A_n \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

此时特征方程即为 Lamb 波的频散方程。对于各向同性介质, 可作为一般各向异性介质的退化情况处理。

2.2 脱粘模型

如何将脱粘结构引入全局矩阵是计算脱粘缺陷对粘接结构影响的关键步骤。由粘接

理论可知, 粘接强度由两方面作用力构成, 一是粘接剂内部产生的内聚力; 二是粘接界面两方由于分子力产生的界面力。两者中任意一种力达不到设计所需强度时都会产生脱粘。因此脱粘缺陷有 3 种形式: 内聚强度弱化、界面脱粘和同时出现两种缺陷所形成的

混合脱粘。从超声波传播的角度看, 不良接触面可以看作是弹性模量和密度较小的独立一层, 由此可以预测不同质量的粘接界面对频散曲线的影响^[11]。此模型可以模拟脱粘中的内聚强度弱化, 但不能描述紧贴型脱粘, 因此并不适合所有的情况。针对这一情况, 国内外学者进行了深入的研究^[12,14], 最为重要的界面模型为弹簧模型。该模型是将层厚度退化至零, 忽略了耦合和惯性分量后得到的^[15]。本文采用这两种模型, 分别描述界面的内聚强度弱化和界面脱粘, 混合脱粘则可以通过两种模型的组合进行模拟。

2.2.1 内聚强度弱化模型

如上所述, 从超声波传播的角度来看, 粘接弱化界面可以看作是粘接层的弹性模量和密度较小的一层, 通过纵横波速的公式计算, 可将弹性模量与密度值的变化转化为声速值的变化, 从而确定在粘接质量变化时对应的声速参数值。由此可以根据弹性模量和密度变化情况求解其频散特性。

根据纵横波速度的定义, 有:

$$\begin{aligned} C_L^2 &= (\lambda + 2\mu) / \rho \\ C_T^2 &= \mu / \rho \end{aligned} \quad (16)$$

由弹性力学理论:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (17)$$

式中, E 为杨氏弹性模量, ν 为泊松比。

定义弹性模量变化的百分比表征胶层内聚强度变化。完好胶层的参数为 (E_0, ρ_0, C_{T0}) , 内聚强度弱化胶层的参数为 (E, ρ, C_T) , 则:

$$\eta = E / E_0 = C_T^2 \rho / C_{T0}^2 \rho_0 \quad (18)$$

根据粘接胶层质量的变化, 定义不同 η 值, 从而反算出内聚强度弱化胶层相应的纵横波速和密度的参数值。

2.2.2 弹簧层界面模型

界面脱粘依照严重程度的增强可分为紧贴脱粘和完全脱粘。紧贴脱粘时粘接界面两方虽仍贴合, 但已无界面力, 所以也称为滑移脱粘; 完全脱粘时粘接界面两方已经相互分离, 这时界面之间的空隙一般认为是空气, 所以也称为空气脱粘。

从力学角度看, 理想界面处弹性波对应的应力和位移分别连续; 滑移脱粘界面法向应力和位移连续, 而切向应力为零, 切向位移不连续; 空气脱粘界面法向和切向应力都为零, 位移都不连续。弹簧模型使用一个法向劲度常数 k_{33} 和两个切向劲度常数 k_{13} 、 k_{23} 来描述弹簧层顶部与底部力学量之间的关系:

$$\begin{aligned} u_{1t} - u_{1b} &= -\sigma_{13} / k_{13} \\ u_{2t} - u_{2b} &= -\sigma_{23} / k_{23} \\ u_{3t} - u_{3b} &= -\sigma_{33} / k_{33} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, 方向 3 是界面层的法线方向, 向下方向为正; 方向 1 是波的传播方向; 方向 2 是右手坐标系中与方向 1 和方向 3 垂直的方向。其顶部和底部的场矩阵方程表示为:

$$D_t = \begin{bmatrix} 1 & & & -1/k_{13} & & \\ & 1 & & & & -1/k_{23} \\ & & 1 & -1/k_{33} & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$D_b = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

由式(19)可得, 令 $k_{13} \rightarrow \infty$, $k_{23} \rightarrow \infty$, $k_{33} \rightarrow \infty$, 即为完好粘接界面; 令 $k_{13} \rightarrow 0$, $k_{23} \rightarrow 0$, $k_{33} \rightarrow \infty$, 即为滑移脱粘界面; 令 $k_{13} \rightarrow 0$, $k_{23} \rightarrow 0$, $k_{33} \rightarrow 0$, 即为空气脱粘。对于各向同性介质, 可作为一般各向异性介质的退化情况处理。

3 数值计算结果和讨论

本文以火箭发动机中经常使用的钢壳体/胶层/绝热层结构为对象, 分别计算了界面脱粘、内聚强度弱化以及混合脱粘等因素对粘接结构频散特性的影响。

3.1 界面脱粘对粘接结构频散特性的影响

考虑界面脱粘的影响之前, 首先考虑胶层对于频散曲线的影响, 分别计算钢壳体/绝热层和钢壳体/胶层/绝热层模型, 各层介质参数如表 1 所示。

表 1 各层参数值

介质层	纵波速度 (km/s)	横波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	厚度 (mm)
钢壳体	5.950	3.260	7.8	5
完好胶层	2.463	1.173	1.3	0.1
绝热层	2.610	1.200	1.6	1

图 2 为考虑胶层和不考虑胶层两种情况得到的频散曲线, 图中“胶层(100%)”表示内聚强度弱化参数 η 为 100%, 其它图中表示与此类似。由图 2 可以看出, 当把胶层作为独立一层加入多层结构后, 结构频散曲线形态并未发生明显变化, 这表明未发生模式转换; 但是加入胶层之后, 频散曲线向低频方向移动, 移动量由胶层厚度决定。对于精确计算, 应考虑胶层造成的影响, 对于胶层厚度远小于其他层厚度的情况, 为计算简便, 可以不考虑胶层。

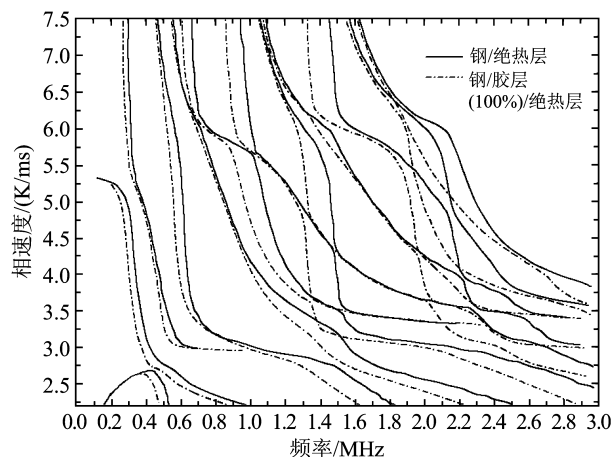


图 2 胶层对频散模式的影响

以钢壳体/绝热层双层模型为基础, 考虑弹簧层的影响。分别计算完好界面、滑移脱粘和空气脱粘 3 种情况, 结果如图 3 所示。可以看出, 随着界面出现滑移脱粘, 频散曲线发生巨大变化, 如图 3(a)所示, 粘接界面从完好状态向滑移脱粘发展过程中, 各阶模态向高频方向移动, 阶数越高, 偏移量越大。随着频率增加, 各模态趋近于原来相邻的高阶模态。在这一发展过程中, 低阶模态频散曲线的形态变化较小, 而对于高阶模态, 频散曲线形态变化较大。当界面出现空气脱粘时, 如图 3(b)和图 3(c)所示, 频散曲线向高频方向移动的情况更加明显。为进一步理解脱粘对频散曲线变化的含义, 将空气脱粘时频散曲线与钢壳体单层与绝热层单层频散曲线进行比较, 如图 3(d), 发现空气脱粘时的模态即是两个单层模态的综合。文献[16,17]发现, 各向异性层状结构在滑移脱粘情况下, 低阶模态发生分裂, 分别与完好粘接和空气脱粘状态时低阶模态重合。同时低阶模态相速度大大降低, 脱粘越严重, 相速度越低。显然, 这与本文得到的结果相反, 可见脱粘对模态变化的影响与材料声学性质密切相关, 不同材料不同组合, 其变化规律有很大不同。

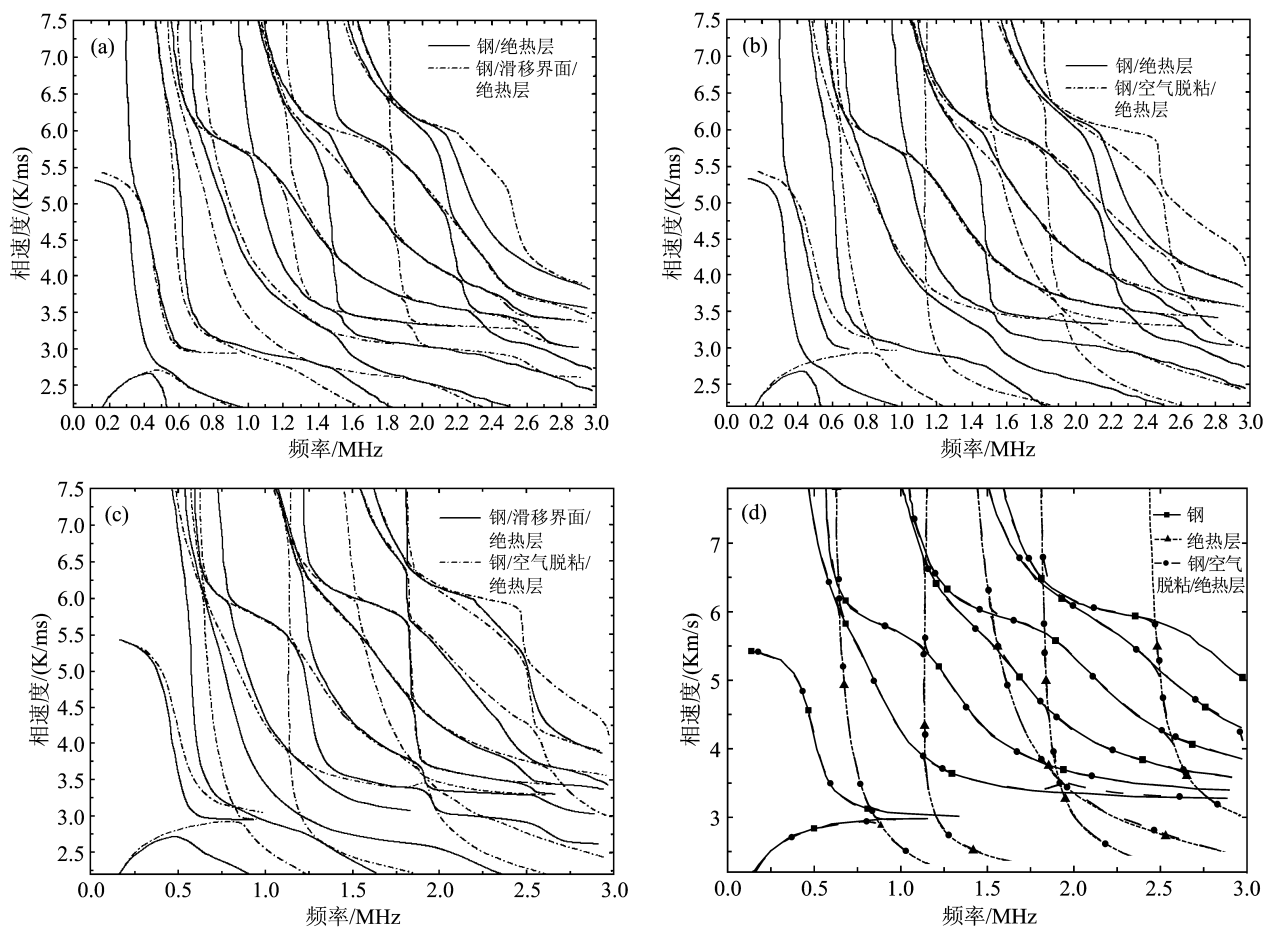


图 3 界面脱粘对频散模态的影响

3.2 内聚强度弱化对粘接结构频散特性的影响

在钢壳体/弹簧层/绝热层三层模型基础上加入胶层，研究胶层内聚强度弱化对频散特性的影响。首先考虑弹簧层相对于胶层位置对频散特性是否影响。结果如图 4 所示，发现弹簧层从胶层上方改为胶层下方时频散曲线向高频方向移动，由于实际发生界面脱粘时，脱粘界面可能是其中任一界面，也有可能是两个界面同时脱粘，因而不能利用频散曲线的移动判断发生界面脱粘的位置。

考虑内聚强度对频散曲线的影响。分别计算 η 为 100%、35%和 10%情况，胶层参数如表 2 所示。发现随着胶层内聚强度变弱，频散曲线形态未发生变化，而是整体向低频方向移动。其中低阶模态偏移量小，高阶模态偏移量大。结果如图 5 所示。

表 2 胶层参数值

η 值	纵波速度 (km/s)	横波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	厚度 (mm)
100%	2.463	1.173	1.3	0.1
35%	2.200	0.800	1.0	0.1
10%	1.800	0.600	0.5	0.1

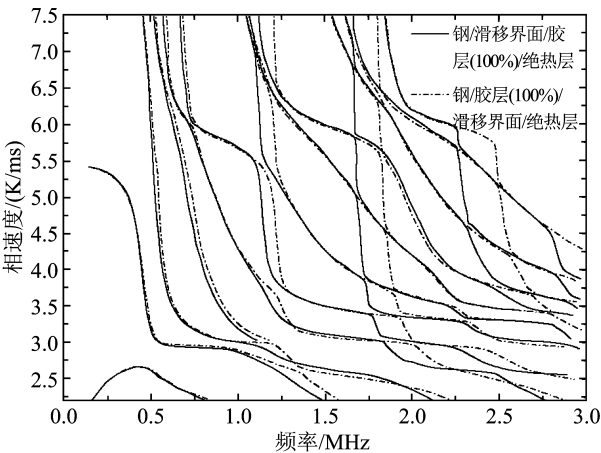


图 4 弹簧层与胶层的相对位置对频散模态的影响

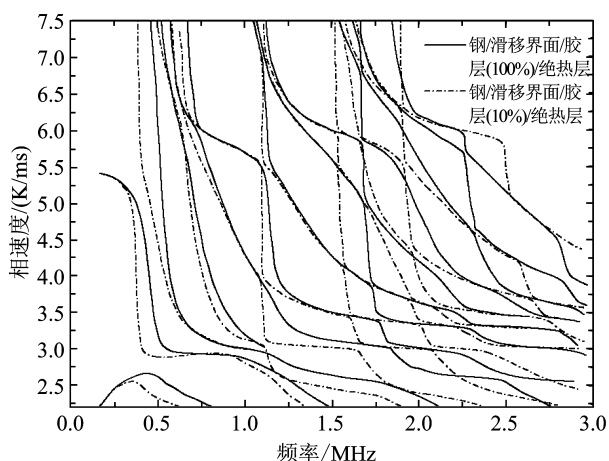


图5 内聚强度弱化对频散模式的影响

由以上分析可知,胶层内聚强度弱化,会使频散曲线向低频方向移动;弹簧层由胶层上方移向胶层下方,会使频散曲线向高频方向移动。现考虑两者的综合影响,比较钢壳体/弹簧层(滑移)/胶层(100%)/绝热层结构和钢壳体/胶层(10%)/弹簧层(滑移)/绝热层结构,如图6所示,发现对于低阶模态,内聚强度弱化影响占优;对于高阶模态,弹簧层位置影响占优;在1~1.5MHz频段内,可以不考虑相对位置的影响。对于高阶模态,有可能出现内聚强度变弱,而频散曲线却向高频方向移动。因此在选择检测模态时,要避免使用高阶模态,而以低阶模态作为评价内聚强度弱化的标准。

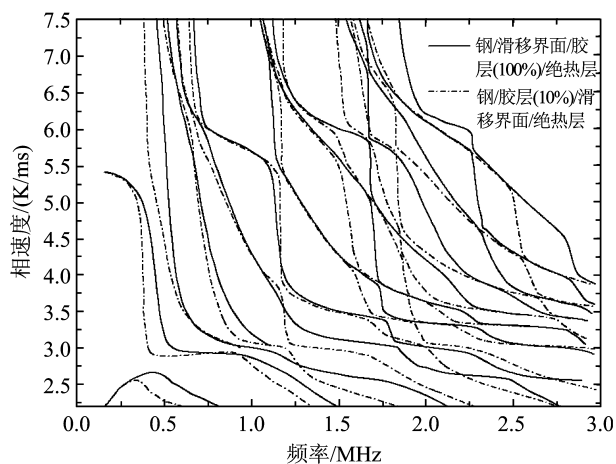


图6 内聚强度和层间相对位置对频散模式的综合影响

3.3 混合脱粘对粘接结构频散特性的影响

综合考虑界面脱粘和内聚强度弱化的影响,比较钢壳体/弹簧层(完好)/胶层(100%)/绝热层结构和钢壳体/弹簧层(空气脱粘)/胶层(10%)/绝热层结构,如图7所示。总体上看,混合脱粘的影响是界面脱粘与内聚强度弱化的综合,其中界面脱粘对频散模式的影响占主要部分,内聚强度弱化的影响很难看出,因此在存在界面脱粘的情况下,很难通过超声方法检测内聚强度的变化。

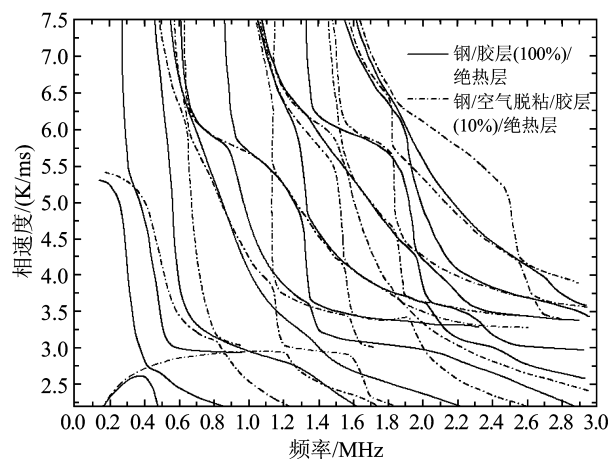


图7 混合脱粘对频散模式的影响

仔细研究发现,随着粘接结构出现脱粘,各模态分量的中间频段越来越向绝热层单层频散模式靠近,其中频率段1MHz~1.5MHz内现象最为明显,且此频率段内内聚强度的变化对于频散曲线演变几乎没有影响,因此这可以作为检测是否出现脱粘缺陷的标准。在没有界面脱粘的情况下,可以利用该频段评价内聚强度产生的脱粘;如存在界面脱粘,该频段可以获得对界面脱粘最好的敏感度。首先利用时频分析技术,获得结构中的频散模式^[18,19],然后将其与绝热层频散模式对比,利用上面总结的规律便可对粘接质量进行评估。

4 结论

本文介绍了粘接结构频散曲线的全局矩阵算法, 提出内聚强度模型和弹簧模型分别描述内聚强度弱化和界面脱粘。研究了各种因素对频散特性的影响。结论如下:

(1) 界面脱粘使频散模态向各单层频散模态退化, 当发生空气脱粘时, 粘接结构频散模态退化为各单层频散模态的综合, 但是并未发生模式转换现象。与各向异性层状结构不同, 未发现模式分裂和相速度降低的现象。

(2) 内聚强度弱化未改变频散曲线形态, 频散曲线整体向低频方向移动, 低阶模态偏移量小, 高阶模态偏移量大。弹簧层相对于胶层位置对频散特性存在影响。弹簧层从胶层上方改为胶层下方, 频散曲线向高频方向移动。综合考虑两者影响, 对于低阶模式, 内聚强度弱化影响占优; 对于高阶模式, 弹簧层位置影响占优。因此在选择检测模态时, 要避免使用高阶模态, 而以低阶模态作为评价内聚强度弱化的标准。

(3) 混合脱粘的影响是界面脱粘与内聚强度弱化的综合, 其中界面脱粘对频散模态的影响占主要部分, 内聚强度弱化的影响很难看出, 因此在存在界面脱粘的情况下, 很难通过超声方法检测内聚强度的变化。

(4) 可以用频率段 1~1.5MHz 内各模态的变化为标准, 判断是否出现脱粘缺陷。在没有界面脱粘的情况下, 可以利用该频段评价内聚强度弱化; 如存在界面脱粘, 该频段可以获得对界面脱粘最好的敏感度。

参 考 文 献

- [1] 李家伟, 陈积懋主编. 无损检测手册. 机械工业出版社, 2002. 01.
- [2] 简晓明, 李明轩. 用自适应滤波解卷积进行缺陷类型识别. 声学学报, 1999, 24(6): 637-644.

- [3] 简晓明, 李明轩, 张建生. 层状介质界面超声检测的理论分析和自适应噪声抵消处理. 声学学报, 2000, 25(4): 351-356.
- [4] 张建生, 李明轩. 多层粘接结构中脱粘界面的人工神经网络余弦变换谱特征识别. 声学学报, 2001, 26(4): 349-354.
- [5] 李明轩. 粘接质量超声检测研究. 应用声学, 2002, 21(1): 7-12.
- [6] 毛捷, 李明轩. 子带自适应滤波在层状介质脱粘超声检测中的应用. 声学学报, 2003, 28(3): 212-216.
- [7] 刘镇清, 景永刚. 增强超声探伤信号的分离谱处理方法. 无损检测, 2001, 23(3): 132-138.
- [8] 刘镇清. 边界元法用于兰姆波与表面缺陷相互作用的研究. 无损检测, 2003, 25(1): 17-20.
- [9] 张吉堂, 路宏年. 火箭发动机多层粘接结构的双模式检测. 固体火箭技术, 2003, 26(4): 79-82.
- [10] 张海燕, 他得安, 刘镇清著. 层状各向异性复合板中的兰姆波. 科学出版社, 2008. 03.
- [11] J.L. 罗斯著, 何存富, 吴斌, 王秀彦译, 固体中的超声波. 科学出版社, 2004. 03.
- [12] 汪越胜, 于桂兰, 章梓茂, 冯仰德. 复杂界面(界面层)条件下的弹性波传播问题研究综述. 力学进展, 2000, 30(3): 378-390.
- [13] M. J. Lowe. Matrix technique for modeling ultrasonic waves in multilayered media. IEEE Trans. Ultrasonic. Freq. Contr. 1992, 42(4): 525-542.
- [14] P. P. Delsanto, M. Scalerandi, A spring model for the simulation of the propagation of ultrasonic pulses through imperfect contact interfaces. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104(5): 2584-2591.
- [15] S. I. Rokhlin, L. Wang, Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: Stiffness matrix method. J. Acoust. Soc. Am., 2002, 112(3): 822-834.
- [16] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用. 复合材料学报, 2004, 21(2): 111-116.
- [17] 张海燕, 刘镇清, 马小松. 界面层对层状各向异性复合结构中 Lamb 波的影响. 物理学报, 2003, 52(10): 2492-2499.
- [18] Robert Seifried, Laurence J. Jacobs, Jianmin Qu, Characterization of adhesive bond properties with Lamb waves, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2001, 20: 1074-1081.
- [19] Robert Seifried, Laurence J. Jacobs, Jianmin Qu, Propagation of guided waves in adhesive bonded components, NDT & E international. 2002, 35: 317-328.