

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0084

多层黏接结构的阵列超声检测评价方法

周正干^{1,*}, 王俊¹, 李洋², 王飞³, 危荃³

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315800;

3. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘 要: 在金属与橡胶等非金属材料的多层黏接结构的超声检测中, 介质间声阻抗差异和超声衰减显著, 致使脱黏缺陷检测信噪比低, 缺陷识别困难。为了提高多层黏接结构中脱黏缺陷的检出能力, 提出了基于线性阵列超声换能器的超声检测评价方法。分析了声波在黏接界面的传播特性, 得出声波在多介质层系的反射系数频谱关系; 基于多层黏接结构的三维 CAD 检测模型, 建立多层结构的阵列超声声束路径通用计算方法, 依据多层介质的刚度矩阵传递模型, 构建数值仿真分析模型, 实现阵列超声聚焦方案和检测工艺的设计; 分析了不同黏接状态下界面回波信号的幅度谱, 提出采用幅度谱特征进行 C 扫描成像的方法。实验结果表明: 所提阵列超声检测评价方法可有效提升多层黏接结构的检测效率, 提高检测信噪比, 降低脱黏缺陷 C 扫描成像表征的复杂度。

关键词: 无损检测; 阵列超声; 多层结构; 脱黏; 反射系数

中图分类号: V467; TB553

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)12-3207-08

金属-非金属的多层黏接结构具有比强度高、抗疲劳性、耐腐蚀性及隔热性好等诸多优势, 广泛应用于航空航天、核电等领域的重要部件上^[1-2], 对其进行无损检测评价, 能够有效避免因脱黏等缺陷造成的结构和性能失效。当前, 超声检测是黏接结构常用的无损检测方法, 具有检测成本低、结果直观等优势^[3-4]。

金属和非金属介质声阻抗差异显著, 且橡胶等非金属材料具有较高的声衰减系数, 使得超声检测中深层界面的脱黏缺陷回波信号微弱, 缺陷特征难以识别。针对该问题, 王强等^[5]提出了多层橡胶-钢黏接结构的谐振超声编码检测方法, 有效提高了脱黏检测灵敏度。李明轩等^[6]建立了共振匹配理论, 可有效提高深层界面的回波信号强度。Zhou 和 Liu^[7]提出了一种新的基于高斯模型的反卷积方法提取多层黏接界面反射系数。研究表明, 基于超声谐振方法可有效提高声波在多介质结构中的透射系数

和缺陷回波能量。但是, 当前广泛采用的单通道超声检测方法存在检测效率低、缺陷表征成像方法单一等问题。

阵列超声是一种多通道超声检测技术, 通过控制激励延迟时间和激发孔径, 可实现试样内部任意位置的聚焦检测, 提升检测精度^[8]。基于阵列超声检测技术, Anand 等^[9]提出了一种基于多高斯光束模型和递归刚度矩阵法的层状各向异性介质超声信号建模方法。Jin 和 Chen^[10]基于阵列超声全矩阵数据提出了一种用于多层介质实时超声成像的波数域算法。Dolmatov 等^[11]基于矩形阵列超声换能器提出了一种适用于多层介质的频域三维层析图成像算法, 可有效补偿界面的位置和倾角误差。阵列超声检测技术由于其声束控制灵活、检测效率高的特性, 在复杂结构和特殊材料的检测中展示了巨大的潜力, 但针对多层、曲面等特殊结构的检测, 还需对其声学特性和声束控制方案做进一步研究。

收稿日期: 2022-02-22; 录用日期: 2022-04-10; 网络出版时间: 2022-04-25 10:04

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220424.1600.002.html

基金项目: 上海航天科技创新基金 (SAST2019-128)

* 通信作者. E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn

引用格式: 周正干, 王俊, 李洋, 等. 多层黏接结构的阵列超声检测评价方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (12): 3207-3214.

ZHOU Z G, WANG J, LI Y, et al. Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (12): 3207-3214 (in Chinese).

针对多层黏接结构中存在的深层超声回波信号微弱、缺乏有效通用的阵列超声工艺设计方法及缺陷表征方法复杂且单一等问题,本文提出一种适用于多层黏接结构的阵列超声检测评价方法,论述了界面反射系数与入射声波频率的关系,构建了基于三维几何模型的声束路径计算方法和基于刚度矩阵传递模型的数值仿真方法,实现了阵列超声聚焦方案和工艺参数的设计,提出了基于超声回波幅度谱特征的C扫描成像方法,结合预置脱黏缺陷的多层黏接试样实验验证了所提方法的有效性。

1 多层黏接结构的超声反射系数模型

1.1 声波在黏接界面的反射及透射系数

在采用脉冲反射法对黏接界面进行超声检测时,一般通过声波传播至界面后,产生的信号幅值和相位的变化对黏接质量进行评价。平面波垂直入射至界面处会产生反射波和透射波。当界面两侧介质厚度远大于波长时,声波的反射系数和透射系数由介质的声阻抗决定,声压反射系数 $R = P_r/P_i = (Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2)$,声压透射系数 $T = P_t/P_i = 2Z_2/(Z_1 + Z_2)$ 。其中, P_i 、 P_r 、 P_t 分别为入射波声压、反射波声压、透射波声压, $Z_n = \rho_n c_n$ 为介质 n 的声阻抗, ρ_n 和 c_n 分别为介质 n 的密度和声速。

在黏接结构中,2个介质之间存在黏接薄层,若将黏接薄层整体视作界面,则该界面的反射波包含声波在薄层内部的多次反射波,此时黏接面的声压透射系数可以表示为^[12]

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda_2}\right) + \left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda_2}\right)} \quad (1)$$

式中: λ_2 为薄层介质中声波的波长; d_2 为薄层厚度。由于黏接薄层厚度远小于介质波长,即 $d_2/\lambda_2 \approx 0$,此时黏接面的透射系数和反射系数均与双介质界面的情况等价。即在讨论黏接结构的透射系数和反射系数时,可理想化地忽略黏接薄层对界面总体反射、透射特性的影响。

当声束的传播方向与界面具有一定角度时,会在界面处产生波型转换,超声反射系数与超声入射角度相关^[13]。采用阵列超声进行检测时,通过各阵元激发子声波(纵波)的干涉实现合成声束的聚焦,波阵面为弧形,如图1所示。声波主能量传播方向与界面垂直,为简化计算,可近似等效为声波垂直入射的情况进行考虑。

1.2 多介质层系的超声反射系数

对于航空航天领域中典型的金属与非金属黏

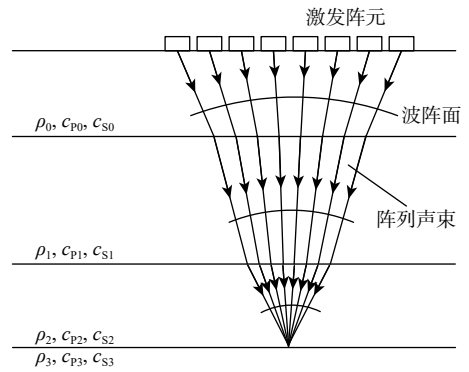


图1 阵列超声在介质中的传播示意

Fig. 1 Propagation schematic of ultrasonic array wave in mediums

接结构,其介质层厚度往往与超声波波长量级相同,声波在通过耦合介质垂直入射至黏接结构后,会在介质层中持续振荡并衰减,结构的反射回波包括耦合界面的反射波 $P_r^{0,1}$ 及各层介质的往复反射波 $\sum P_r^{n,n+1}$ 。

采用平楔块耦合下的检测试样可视作理想化的声学各向同性的多层介质系统,在采用黏接界面的回波信号进行成像时,楔块介质和底层介质理想视为半无穷大介质,第 n 层介质的属性可用密度 ρ_n 、厚度 d_n 及纵波声速 c_n 来定义。

对于2层黏接结构的检测(楔块介质视作介质层0),声波垂直入射情况下的透射和反射示意如图2(a)所示。声波入射至试样中后,会在介质层1内多次反射,并随之产生多次透射波和多次反射波,此时反射回波信号包括耦合面的反射波 $P_r^{0,1}$ 及

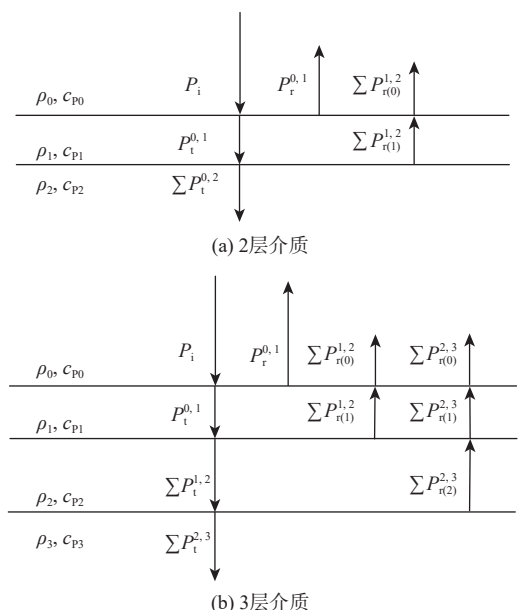


图2 声波在多层介质中的反射及透射

Fig. 2 Reflection and transmission of sound waves in multilayer media

介质层 1 中的往复反射波 $\sum P_r^{1,2}$, 超声反射系数与入射波的频率相关, 可表示为^[14]

$$R(\omega) = \left(P_r^{0,1} + \sum P_r^{1,2} \right) / P_i = R_0 + R_1(\omega) \quad (2)$$

式中: 耦合面声压反射系数 $R_0 = r_{01} = (Z_1 - Z_0) / (Z_1 + Z_0)$; ω 为入射波的角频率; 介质层 1 中往复反射波对应的反射系数 $R_1(\omega)$ 可以表示为

$$R_1(\omega) = \frac{(1 - r_{01}^2) r_{12} e^{j2d_1 k_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{j2d_1 k_1}} \quad (3)$$

其中: $r_{12} = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$; d_1 为介质层 1 的厚度; $k_1 = \omega / c_1$ 为介质 1 中的波数, $c_1 = c_1^0 (1 - j\mu_1)$ 为介质 1 中的复声速, μ_1 为介质 1 的声衰减因子, c_1^0 为不考虑衰减时的介质声速。

对于 3 层黏接结构的检测, 声波的透射和反射示意如图 2(b) 所示。此时系统的反射回波包括耦合面反射波 $P_r^{0,1}$ 、介质层 1 往复反射波 $\sum P_r^{1,2}$ 及介质层 2 往复反射波 $\sum P_r^{2,3}$, 系统的反射系数可以表示为

$$R(\omega) = \left(P_r^{0,1} + \sum P_r^{1,2} + \sum P_r^{2,3} \right) / P_i = R_0 + R_1(\omega) + R_2(\omega) \quad (4)$$

式中: R_0 、 $R_1(\omega)$ 与 2 层黏接结构中反射系数的计算相同; $R_2(\omega)$ 可以表示为

$$R_2(\omega) = (1 - r_{12}^2) r_{23} e^{j2d_1 k_1} / (1 + r_{01} r_{12} e^{j2d_1 k_1} + r_{12} r_{23} e^{j2d_2 k_2} + r_{01} r_{23} e^{j2(d_1 k_1 + d_2 k_2)}) \cdot (1 - r_{01}^2) r_{12} e^{j2d_1 k_1} / (1 + r_{01} r_{12} e^{j2d_1 k_1}) \quad (5)$$

其中: $r_{23} = (Z_3 - Z_2) / (Z_3 + Z_2)$; d_2 和 k_2 分别为介质层 2 的厚度与波数, 计算方式与介质 1 相同。

多层黏接结构中, 每层介质均会对入射声波产生层滤波器效果, 导致不同频率的声波在各层界面处的透射系数和反射系数差异显著。为了在黏接界面质量的超声检测中取得较高的信噪比, 需依据超声反射系数的频谱关系, 选取对应的超声频率, 使得脱黏位置和完好黏接区域的反射系数存在较大差异, 从而增大缺陷回波信号的特征差异, 有利于缺陷的识别。

2 多层介质的阵列超声聚焦方案

2.1 阵列超声检测方案

阵列超声检测技术通过控制阵元晶片的激发/接收延时, 使超声波根据惠更斯原理在介质中发生干涉叠加, 形成具有特定指向性的阵列超声合成声束。界面脱黏通常为面积型缺陷, 在检测时, 合成声束的能量传播方向与缺陷界面垂直。当阵列合成声束聚焦于特定点时, 换能器所接收到的阵列合成 A 型信号 $s(t)$ 可表示为^[15]

$$\begin{cases} s(t) = \sum_{i \in A_T} \sum_{j \in A_R} M_{ij}(t - \Delta t_{Ti} - \Delta t_{Rj}) \\ \Delta t_{Ti} = \max(\{T_{Ti}\}_{i \in A_T}) - t_{Ti} \\ \Delta t_{Rj} = \max(\{T_{Rj}\}_{j \in A_R}) - t_{Rj} \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_T 为发射阵元孔径; A_R 为接收阵元孔径; M_{ij} 为阵元 i 激发阵元 j 所接收的超声信号; Δt_{Ti} 和 Δt_{Rj} 分别为聚焦至该点时阵元 i 的发射和接收延迟时间; t_{Ti} 和 t_{Rj} 分别为针对特定聚焦点时发射阵元 i 和接收阵元 j 对应的声束传播时间; $\{T_{Ti}\}_{i \in A_T}$ 和 $\{T_{Rj}\}_{j \in A_R}$ 分别为所有发射阵元和接收阵元对应的传播时间集合。

针对多层黏接结构的检测, 通过改变阵元孔径位置实现声束的移动, 与机械扫描相配合, 进而实现黏接界面的高效检测, 如图 3 所示。此时发射延时法则 Δt_{Ti} 和接收聚焦法则 Δt_{Rj} 相同。

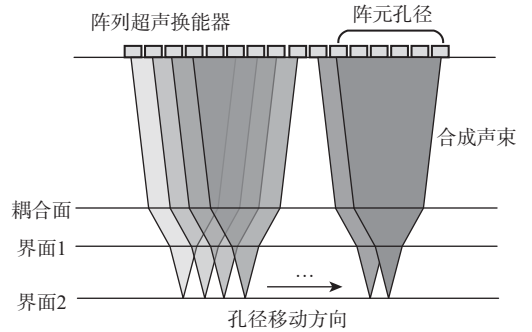


图 3 多层黏接结构的线性扫描方式

Fig. 3 Linear scanning method of multilayer bonding structure

2.2 多层结构的聚焦声束路径计算方法

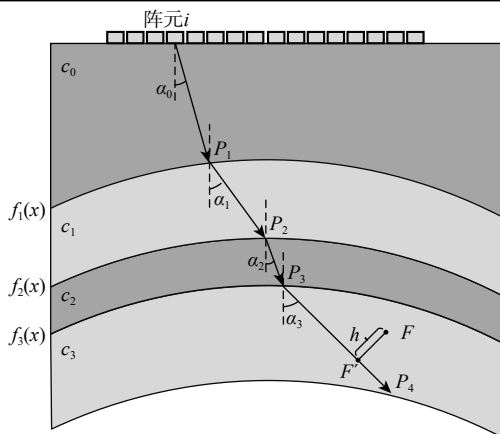
为使声波聚焦至试样中的指定位置, 需计算从各阵元激发传播至聚焦点的声束路径, 进而计算阵列超声的延时聚焦法则。由于工程中的多层黏接试样通常为平直状或弧形, 在计算阵列超声声束路径时考虑一般弯曲边界的情况。假设各界面的形状可由函数 $f_n(x)$ 定义, 当阵元发射的声束以一定的偏角 α_n 入射时, 声波在介质间的传播角度满足斯涅尔定律。考虑界面的斜率, 声束折射角 θ_n 与声束的倾角 α_n (与 z 轴方向的夹角) 存在如下关系:

$$\theta_n = \alpha_n + \arctan(f'_n(x_{p_n})) \quad (7)$$

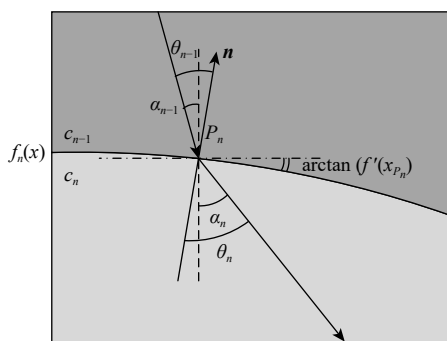
依据斯涅尔定律, 声束在介质间传播过程如图 4 所示, 入射角 α_n 和折射角 α_{n+1} 之间的关系如图 4(b) 所示, 可表示为

$$\alpha_n = \arcsin \left((c_n / c_{n-1}) \sin(\alpha_{n-1} + \arctan(f'(x_{p_n}))) \right) - \arctan(f'(x_{p_n})) \quad (8)$$

当阵元所激发声束的偏转角度 α_0 给定后, 可定义出介质 0 内部的声线路径, 依据声线与试样表面的拓扑关系能够计算界面上入射点的位置, 并依据



(a) 多层介质中声束传播示意



(b) 入射声束与透射声束的几何关系

图4 多层介质的声束路径计算示意

Fig. 4 Calculation schematic of acoustic beam path in multilayer media

式(8)计算折射声线的偏转角度。通过对上述步骤的迭代计算,可唯一确定声束在多层介质中的传播路径。

在依据聚焦点位置 F 逆向求解声束路径时,需先设定声束的初始角度变化范围 (β_0, β_1) , 按一定精度 $\Delta\beta$ 进行离散, 遍历计算所有偏转角度对应的声线路径, 并计算聚焦点 F 与每条声线的距离 h , 如图4(a)所示, 若 h 小于规定的距离精度, 即可认为该条声束经过指定聚焦点。

上述声束路径求解方法涉及大量的迭代和遍历计算, 为实现多层介质的声束路径快速求解, 设计了基于三维几何模型的声线计算方法。首先, 依据被测试样的几何特征, 构建多层介质结构的CAD三维模型, 定义各介质的几何信息、声学特性。其次, 依据阵列超声换能器阵元参数和试样信息, 定义阵列超声声束的几何模型。然后, 基于CAD模型的拓扑计算实现一般化形状的声线迭代计算, 其流程如图5所示。最后, 依据聚焦点位置确定所有阵元对应的声束路径, 并进行三维可视化, 如图6所示。

设某特定聚焦点对应的声线路径集合为 $\{L_{i,n}\}$, i 为对应的发射阵元索引, n 为声线段索引, 则阵元 i 对应的超声延迟激励时间为

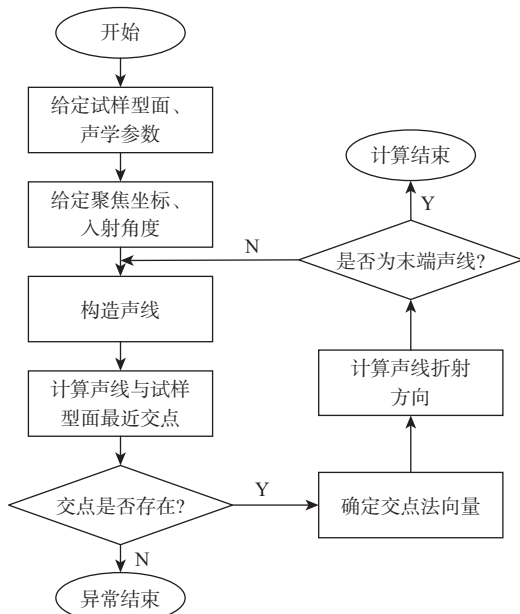


图5 三维聚焦声线路径计算流程

Fig. 5 Calculation process of 3D focused sound ray path

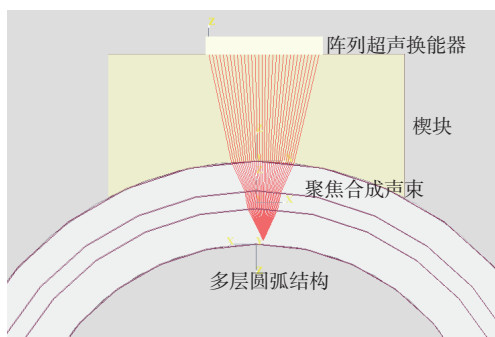


图6 阵列超声聚焦声线计算结果

Fig. 6 Calculation results of ultrasound array focused sound ray

$$\Delta t_i = \max \left\{ \sum_n \frac{L_{i,n}}{c_n} \right\} - \sum_n \frac{L_{i,n}}{c_n} \quad (9)$$

式中: c_n 为该声线段所在介质中的声速。所有阵元的延迟激励时间的集合为延时聚焦法则, 并以此实现阵列超声声束的偏转聚焦。

2.3 多层介质的阵列超声检测仿真模型

依据弹性波动学理论, 声波在均匀各向同性介质中的传播满足一阶偏微分方程^[16]:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = \nabla_j \sigma_{ij}(\mathbf{r}, t) \\ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{C}_{ijkl}(\mathbf{r}) \nabla_l \mathbf{v}_k(\mathbf{r}, t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{r} 为位置矢量; $\rho(\mathbf{r})$ 为介质密度标量场; $\mathbf{v}_i(\mathbf{r}, t)$ 为位移速度矢量; $\sigma_{ij}(\mathbf{r}, t)$ 为二阶应力张量; $\mathbf{C}_{ijkl}(\mathbf{r})$ 为介质的四阶刚度系数矩阵, 由材料的弹性模量和泊松比确定, i, j, k, l 均为 x, y, z 方向索引。

据此, 在已知介质刚度矩阵及边界条件的情况下, 可以通过迭代计算单一均匀介质中特定空间和时间上的位移和速度。

声波在多介质间传播时, 在介质的边界位置应力和位移具有连续性, 这种边界条件可以确定声波在介质边界的传播状态。因此, 采用不同的刚度矩阵来定义各介质层, 可以将不同介质中声波的速度和应力联系起来。为方便通过刚度矩阵对声波在介质间的传递过程进行描述, 采用时域有限差分方法对波动方程进行求解。通常, 阵列超声的传播可以简化为 x - z 平面 (换能器阵元排布方向与声束传播方向所在的平面) 中的二维声传播问题, 将超声的传播区域离散化成矩形网格, 采用刚度矩阵对网格节点进行定义用于标识介质属性, 此时有限差分方程组可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{i,k} \frac{v_{xi-1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi-1/2,k}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{\sigma_{xi,k}^n - \sigma_{xi-1,k}^n}{\Delta h} + \\ \frac{\sigma_{xzi-1/2,k+1/2}^n - \sigma_{xzi-1/2,k-1/2}^n}{\Delta h} \\ \rho_{i,k} \frac{v_{zi,k-1/2}^{n+1/2} - v_{zi,k-1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{\sigma_{xzi+1/2,k-1/2}^n - \sigma_{xzi-1/2,k-1/2}^n}{\Delta h} + \\ \frac{\sigma_{zi,k}^n - \sigma_{zi,k-1}^n}{\Delta h} \\ \frac{\sigma_{xi,k}^{n+1} - \sigma_{xi,k}^n}{\Delta t} = C_{11i,k} \frac{v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta h} + \\ C_{13i,k} \frac{v_{zi,k+1/2}^{n+1/2} - v_{zi,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta h} \\ \frac{\sigma_{zi,k}^{n+1} - \sigma_{zi,k}^n}{\Delta t} = C_{13i,k} \frac{v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta h} + \\ C_{33i,k} \frac{v_{zi,k+1/2}^{n+1/2} - v_{zi,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta h} \\ \frac{\sigma_{xzi-1/2,k-1/2}^{n+1} - \sigma_{xzi-1/2,k-1/2}^n}{\Delta t} = \\ C_{55i,k} \left(\frac{v_{xi-1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi-1/2,k-1}^{n+1/2}}{\Delta h} + \frac{v_{zi,k-1/2}^{n+1/2} - v_{zi-1,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta h} \right) \end{array} \right. \quad (11)$$

式中: Δt 和 Δh 分别为时间和空间离散间隔; (i, k) 为空间网格的索引; n 为离散化时间索引。

在阵元网格节点按照延时聚焦法则施加激发应力作为初始边界条件, 通过迭代计算可模拟阵列超声在多介质结构中的传播。声场的动态传播过程如图 7 所示。通过记录阵元节点的应力变化获取该检测过程对应的超声 A 型信号, 依据超声信号所反映出的信噪比、缺陷信号幅值等信息, 对阵列超声的检测工艺参数 (超声频率、阵元间距、阵元孔径和耦合高度等) 进行设计优化。

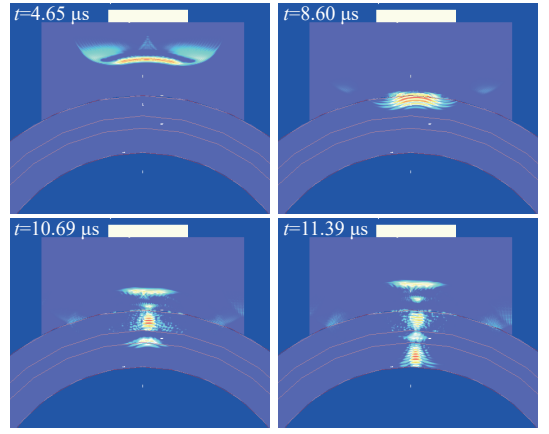


图 7 阵列超声动态声场传播过程

Fig. 7 Propagation process of ultrasonic array dynamic sound field

3 缺陷成像表征方法与实验验证

3.1 基于回波信号幅度谱的缺陷表征

在金属与非金属介质的黏接界面中存在空气间隙 (脱黏) 时, 其超声检测信号相较于完好黏接界面的超声检测信号存在 3 个显著特征: ①脱黏界面回波幅值增强, 且更深层界面回波消失; ②当上层介质声阻抗小于下层介质声阻抗时, 脱黏界面会存在回波相位的反转; ③脱黏缺陷的引入导致多层介质层系的反射系数发生变化, 致使超声回波幅度谱产生变化。在常规超声检测方法中, 对脱黏缺陷的评价通常基于特征①进行成像分析, 但由于表层介质中往复反射波信号的干扰, 往往难以对深层脱黏信号特征准确识别。而回波信号的相位信息由于过于精细, 考虑到试样的厚度变化及噪声的影响, 实际检测中较难直接应用该特征对黏接情况进行判断, 因此, 基于特征③研究超声信号处理和缺陷的表征方法。

多层黏接结构中, 黏接状态的改变会引起界面超声反射系数的变化, 进而影响超声回波信号的能量强度。由式 (3)~式 (5) 可知, 层系的反射系数可以描述为入射波频率的函数, 即层系对不同频率声波所起到的滤波效果存在差异。在实际检测中, 回波信号的幅度谱会呈现与层系反射系数频谱相近的变化规律。

对于首层为高声阻抗介质的多层黏接试样, 以钢层-三元乙丙橡胶-丁羟橡胶的黏接结构为例, 在三元乙丙橡胶和丁羟橡胶间预置有脱黏缺陷, 在声波垂直入射时, 该界面在黏接完好和脱黏状态下, 其声波反射系数与频率的关系如图 8 所示。可见, 当入射波频率为钢层的一次谐波频率 (2 MHz) 时, 脱黏界面具有较高的反射系数, 且与黏接完好状态下的反射系数差异显著。

采用 2.3 节提出的仿真模型对有无脱黏缺陷的钢层-三元乙丙橡胶-丁羟橡胶的黏接结构分别进行超声检测仿真,获得的超声 A 型信号如图 9(a) 所示。对缺陷附近的 A 型信号进行傅里叶变换后得到的频谱信号如图 9(b) 所示。可以看出,采用钢层的一次谐波对应的频率,脱黏缺陷的信号幅值和黏接完好状态下界面的信号幅值存在明显差异。因此,在进行阵列超声 C 扫描成像检测时,可对采集到的超声 A 型数据进行傅里叶变换,依据多层黏接

结构的反射系数频谱,确定黏接状态不同时回波信号幅度谱差异最大时对应的频率,并利用该频率对应的幅值进行 C 扫描成像表征。

3.2 多层黏接结构阵列超声检测实验

为验证基于回波信号幅度谱特征的缺陷表征方法适用于一般情况下的多层黏接结构,采用首层为低声阻抗介质的黏接结构进行实验,以聚氨酯-橡胶-钛合金多层黏接试样为例,在橡胶与钛合金介质之间通过预埋聚四氟乙烯薄膜引起黏接界面的不连续,模拟自然脱黏缺陷界面的声阻抗差异,缺陷分布如图 10 所示。计算试样在完好黏接和脱黏状态下的反射系数,如图 11 所示。据此可推断,在不同黏接状态下,超声回波信号的幅度谱分布存在一定差异,在特定频率下,脱黏区域的反射信号幅值高于黏接完好区域,而在另一些频率范围内,该情况相反。该现象在一定频率范围内交替出现。

采用自动扫查机构带动阵列超声换能器对多层黏接试样进行线性扫描检测,利用 2.2 节中的方

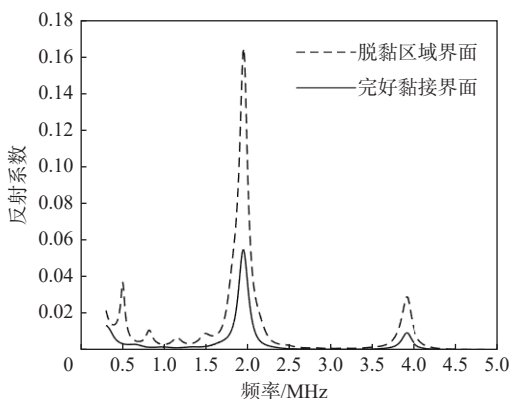
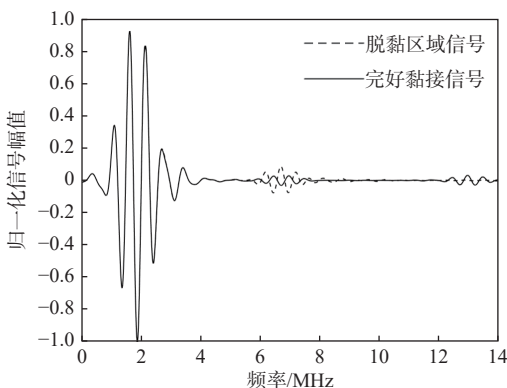
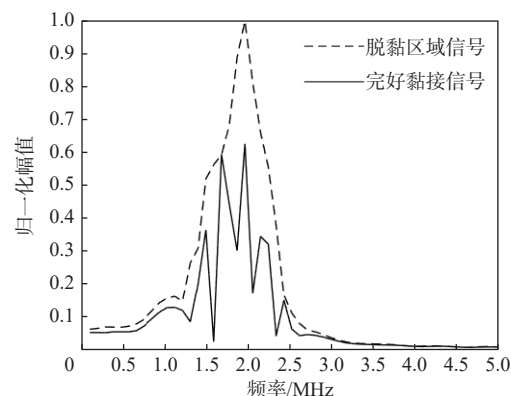


图 8 首层为高声阻抗介质的多层黏接界面反射系数频谱
Fig. 8 Reflection coefficient spectrum of bonding interface with high acoustic impedance medium as the first layer



(a) 超声回波时域信号



(b) 缺陷区域附近回波信号频谱

图 9 多层黏接结构的超声检测仿真信号

Fig. 9 Simulation signal of ultrasonic testing for multi-layer bonding structure

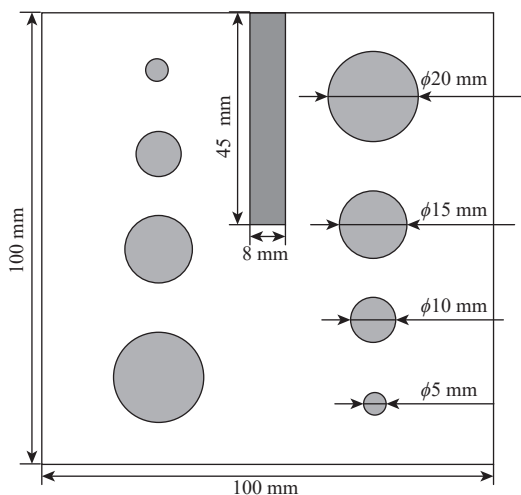


图 10 预置脱黏缺陷的多层黏接试样

Fig. 10 Multilayer bonding sample with preset de-bonding defects

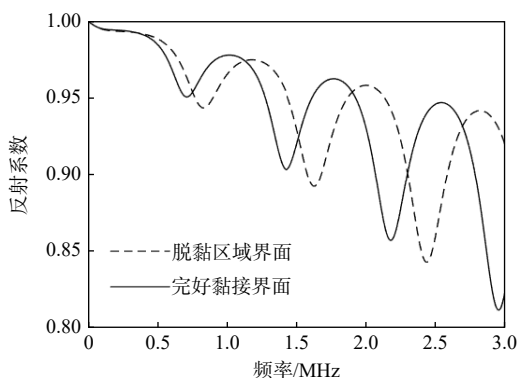


图 11 首层为低声阻抗介质的多层黏接界面反射系数频谱

Fig. 11 Reflection coefficient spectrum of bonding interface with low acoustic impedance medium as the first layer

法计算聚焦于界面位置的阵列超声延时法则, 以此进行声束的发射与接收。记录各扫查位置信息及对应的超声 A 型数据, 对超声数据进行傅里叶变换获得其幅度谱信息。由图 11 可知, 当频率为 1.4 MHz 时, 脱黏缺陷信号幅值高于黏接完好界面的信号幅值, 利用该频率信号幅值形成的 C 扫描图像如图 12(a) 所示。而利用 1.0 MHz 频率信号幅值进行 C 扫描成像, 结果如图 12(b) 所示, 此时黏接完好界面信号强度高于脱黏界面信号。

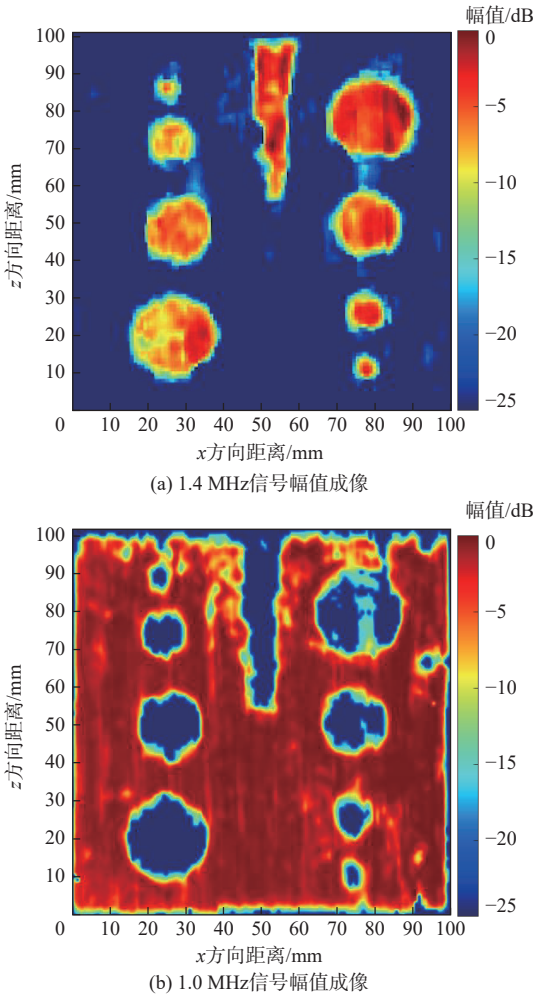


图 12 多层黏接试样的 C 扫描成像结果

Fig. 12 C-scan imaging result of multilayer bonding sample

在采用相同的扫描速度 (15 mm/s) 和扫描精度 (1 mm) 下, 对比常规单通道的超声检测方法 with 阵列超声检测方法的检测效果, 如表 1 所示。2 种方法均能对试样中预置的 $\phi 5$ mm 以上的脱黏缺陷进行有效的检出识别。由于线阵换能器的声场分布特性影响, 其焦斑形状近似矩形, 缺陷的 C 扫描图像存在畸变, 采用图像法进行定量分析时, 存在一定的定量测量误差。但相比于单通道超声检测方法, 阵列超声检测方法所得到的缺陷信号信噪比更高, 且试样检测效率提升 20 倍以上, 可以实现大尺寸

表 1 单通道及阵列超声方法检测效果对比

Table 1 Comparison of detection effect between single-channel ultrasonic and ultrasonic array method

检测方法	检测用时/min	平均信噪比/dB	缺陷定量误差/%
单通道超声检测	12.35	13.77	7.57
阵列超声检测	0.46	15.89	13.64

多层黏接试样的高效率超声检测成像。

4 结 论

1) 本文描述了多介质层系的超声反射系数频谱特征。在金属与非金属的多层黏接结构中, 存在特殊的频率范围, 使脱黏区域与黏接完好区域的超声反射系数存在明显差异。在超声检测工艺设计中, 需结合被测试样结构特征和声学性质, 并依据多层黏接结构的反射系数频谱计算该特征频率, 以该频率进行超声检测, 能够有效提高检测结果信噪比。

2) 建立了基于三维几何特征的阵列超声声束路径计算模型和适用于多层介质的时域有限差分仿真模型, 据此进行阵列超声延时聚焦法则设置和检测方案的验证优化, 可以有效简化阵列超声检测工艺的设计流程。

3) 提出了基于超声信号幅度谱特征的超声扫描成像表征方法, 制备了预置脱黏缺陷的多层黏接试样。检测结果表明, 阵列超声检测方法能够在保障检测信噪比的同时, 大幅提升超声检测成像效率。

参考文献 (References)

[1] 李明轩, 王小民, 安志武. 粘接界面特性的超声检测与评价[J]. 应用声学, 2013, 32(3): 190-198.
LI M X, WANG X M, AN Z W. Ultrasonic testing and evaluation of bonding characteristics[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(3): 190-198(in Chinese).

[2] 姬文苏, 丁玉奎. 火箭发动机多层粘接结构超声检测研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 364-368.
JI W S, DING Y K. Study on ultrasonic testing of multi-layer bonding structure of rocket engine[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 364-368(in Chinese).

[3] 董俊冬. 金属-橡胶多界面粘接质量的超声检测方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
DONG J D. Study on ultrasonic testing method of metal rubber multi interface bonding quality[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019(in Chinese).

[4] 刘嘉同, 金永, 张浩亚, 等. 基于多层界面脱粘的超声检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 58-62.
LIU J T, JIN Y, ZHANG H Y, et al. Research on ultrasonic testing method based on multi-layer interface debonding[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(9): 58-62(in Chinese).

- [5] 王强, 毛捷, 李威, 等. 橡胶-钢粘接结构的谐振超声编码检测方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 36-41.
WANG Q, MAO J, LI W, et al. Resonant ultrasonic code testing method for rubber steel bonded structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 36-41 (in Chinese).
- [6] 周昌智, 李明轩, 毛捷. 利用多阶谐振频率对多层结构背覆薄层厚度的反演[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 1006-1007.
ZHOU C Z, LI M X, MAO J. Inversion of the thickness of overlying thin layer of multi-layer structure by using multi-order resonant frequency[J]. Acoustic Technology, 2007, 26(5): 1006-1007 (in Chinese).
- [7] ZHOU H, LIU G. A model-based ultrasonic quantitative evaluation method for bonding quality of multi-layered material[J]. Measurement, 2012, 45(6): 1414-1423.
- [8] VELICHKO A, WILCOX P D. An analytical comparison of ultrasonic array imaging algorithms[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(4): 2377-2384.
- [9] ANAND C, GROVES R, BENEDICTUS R. A Gaussian beam based recursive stiffness matrix model to simulate ultrasonic array signals from multi-layered media[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4371.
- [10] JIN H, CHEN J. An efficient wavenumber algorithm towards real-time ultrasonic full-matrix imaging of multi-layered medium[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107149.
- [11] DOLMATOV D O, SEDNEV D A, BULAVINOV A N, et al. Applying the algorithm of calculation in the frequency domain to ultrasonic tomography of layered inhomogeneous media using matrix antenna arrays[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(7): 499-506.
- [12] 张海澜. 理论声学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
ZHANG H L. Theoretical acoustics[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2012 (in Chinese).
- [13] SCHMERR L W. Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation[M]. Berlin: Springer, 1998: 121-137.
- [14] BREKHOVSKIKH L M, LIEBERMAN D, BEYER R T, et al. Waves in layered media[J]. Physics Today, 1962, 15(4): 70-74.
- [15] LI Y, ZHOU Z G, WANG J. Analysis of linear non-destructive testing and evaluation methods for thin-walled structure inspection using ultrasonic array[J]. Coatings, 2019, 9(2): 146.
- [16] 徐娜, 李洋, 周正干, 等. FDTD方法的改进及在超声波声场计算中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 78-82.
XU N, LI Y, ZHOU Z G, et al. Improvement of FDTD method and its application in ultrasonic sound field calculation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(1): 78-82 (in Chinese).

Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures

ZHOU Zhenggan^{1,*}, WANG Jun¹, LI Yang², WANG Fei³, WEI Quan³

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Ningbo Innovation Research Institute of Beihang University, Ningbo 315800, China;
3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: In the ultrasonic detection for multi-layer bonding structures of metal and non-metal materials such as rubber, the signal to noise ratio of debonding defect is low, and the defect identification is difficult, due to the significant difference in acoustic impedance between media and large ultrasonic attenuation. In order to improve the detection ability of de-bonding defects in multilayer structures, a novel ultrasonic detection and evaluation method based on linear array ultrasonic transducers is proposed. Firstly, the propagation characteristics of ultrasonic waves at the bonding interface are analyzed, and the spectral relationship of the reflection coefficient in a multilayer system is described. Further, a numerical simulation analysis model is built in accordance with the stiffness matrix transfer model of multilayer medium, which is used to realize the design and calculation of the ultrasonic array focusing scheme and detection process. These methods are based on the 3D CAD inspection model. Finally, by analyzing the amplitude spectrum characteristics of interface echo signals under different bonding states, a C-scan imaging method using amplitude spectrum characteristics is proposed. The experiment results show that the method proposed can effectively improve the detection efficiency of multilayer bonded structures and improve the signal-to-noise ratio of detection results, and reduce the complexity of C-scan imaging characterization of de-bonding defects.

Keywords: non-destructive testing; ultrasonic array; multi-layer structure; de-bonding; reflection coefficient