

基于平底孔反射体的双晶直探头测量模型^{*}

赵新玉¹⁾ 刚 铁^{1)†} 张碧星²⁾

1) 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

2) 中国科学院声学研究所 北京 100080)

(2007 年 12 月 12 日收到 2008 年 2 月 29 日收到修改稿)

双晶探头在无损检测领域有着重要的应用,因而有必要建立一个超声测量模型来深入了解这类换能器的特点. 通过将一个基于传递矩阵的多高斯声束模型和一个基尔霍夫近似方法获得的散射模型有效结合,建立了一个完整的纵波双晶直探头测量模型,用于预测平底孔缺陷体的回波信号. 对比分析了平底孔反射回波信号的模型计算结果与实验测量结果,验证了该测量模型的准确性.

关键词: 超声测量模型, 双晶直探头, 多高斯声束模型

PACC: 4385G, 6265

1. 引 言

通过建立数学模型来预测超声检测系统接收到的缺陷体回波信号,可以使我们更深入地理解超声波在固体中的传播、散射等复杂的物理现象,对定量无损评价有着重要指导意义. 国外在超声测量模型领域的研究比较活跃^[1-4],一个完整的超声测量模型主要包括确定系统影响因子、建立声场模型和散射模型三方面的工作. 系统影响因子是用来描述脉冲发射接收器、电缆、换能器等各个部分对回波信号的影响,可以通过标准反射体实验来确定系统影响因子^[5]. 声场模型和散射模型的选择要针对所研究的具体物理问题,并且还要综合考虑计算精度和计算效率.

双晶换能器通过使用延迟楔块和一发一收的检测方法,使其近表面缺陷探测能力明显优于普通的单晶探头. 双晶聚焦直探头的结构如图 1 所示,图中 L 为延迟楔块高度, F 为焦距, θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角,在工件中声束交叉的 $ABCD$ 菱形区,双晶探头具有较高的检测灵敏度. 另外,平底孔反射体常常作为参考对比信号,广泛地应用于各种超声检

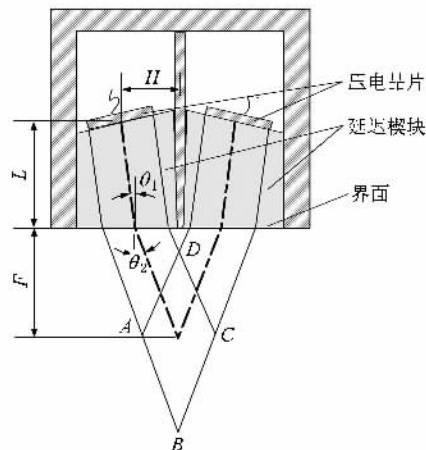


图 1 双晶直探头结构示意图

测过程. 因而建立一个双晶探头的超声测量模型来预测平底孔的回波信号,有着重要的实际应用背景.

针对双晶探头检测系统,本文从一个通用的超声测量模型出发展开讨论,依次确定了相应的声场模型、平底孔缺陷体散射模型以及系统影响因子的测量方法. 进而将上述三个子模型有效结合,建立了一个完整的纵波双晶直探头测量模型. 进一步的平底孔反射回波实验,有效地验证了该测量模型的准确性.

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50775054, 10774158)和科学技术部国际合作计划(批准号 2007DFR70070)资助的课题.

[†] E-mail: gangt@hit.edu.cn

2. 理论模型

2.1. 超声测量模型

Schmerr 在文献 [6] 中依据互易理论建立了一个较为通用的超声测量模型, 将换能器接收到的频域电压回波信号 $V_0(\omega)$ 表达为对两种互易模式时缺陷体表面质点速度场和应力场的积分,

$$V_0(\omega) = \frac{\beta(\omega)}{2\rho_1 c_{pl} S_R v_T^{(a)} v_R^{(b)}} \int_{S_f} [\tau_{ji}^{(a)}(\mathbf{x}, \omega) v_i^{(b)}(\mathbf{x}, \omega) - \tau_{ji}^{(b)}(\mathbf{x}, \omega) v_i^{(a)}(\mathbf{x}, \omega)] n_j(\mathbf{x}) dS, \quad (1)$$

式中 $\beta(\omega)$ 为系统影响因子, $\tau_{ji}^{(m)}$ 和 $v_j^{(m)}$ ($m = a, b$) 分别表示在 a, b 两种互易模式时缺陷表面 $\mathbf{x}(x, y, z)$ 位置的应力和振动速度分量, $n_j(\mathbf{x})$ 是缺陷表面 \mathbf{x} 位置的单位法向量分量, 参数 ρ_1 和 c_{pl} 分别表示介质 1 中的密度和纵波声速, $v_T^{(a)}$, $v_R^{(b)}$ 分别为发射和接收换能器表面的质点振动速度, S_R 表示接收换能器的表面面积, 积分区域 S_f 代表缺陷体的表面. 下面的讨论仍沿用上述张量表示方法, 下标 i, j ($i, j = 1, 2, 3$) 满足爱因斯坦求和约定.

在入射波为准平面波的假设条件下 (1) 式可以进一步简化为一发一收模式的超声测量模型 (详细的推导过程请参见文献 [7]), 即

$$V_0(\omega) = \frac{\beta(\omega)}{-2i\omega\rho_1 c_{pl} S_R S_f} \int_{S_f} [\hat{V}_T^\alpha(z, \omega) \hat{V}_R^\alpha(z, \omega) \times \left[\tilde{\tau}_{ij} d_j + \frac{C_{ijkl}}{c_{a2}} d_k^e e_i^e \tilde{v}_j \right] n_j \exp(ik_{a2} \mathbf{e}^e \cdot \mathbf{x}) dS, \quad (2)$$

式中角标 α ($\alpha = p, s$) 表示纵波 (p 波) 或横波 (s 波); $\hat{V}_T^\alpha(z, \omega)$ 和 $\hat{V}_R^\alpha(z, \omega)$ 为归一化的质点振动速度场, 分别表示发射换能器和接收换能器单独辐射作用下在缺陷体表面形成的质点速度分布; d_j 为质点振动极性分量; C_{ijkl} 为弹性常量; \mathbf{e}^e 为 α ($\alpha = p, s$) 波散射方向的单位矢量.

对于一些体积较小的缺陷, 例如气孔、平底孔等, 其表面的质点速度幅值变化不大, 因而可以将 \hat{V}_T^α , \hat{V}_R^α 提到面积分之外, 剩下的积分项可以表达为缺陷体的远场散射幅度, 即

$$A(\mathbf{x}, \omega) = \frac{1}{4\pi\rho_2 c_{a2}} \int_{S_f} \left[\tilde{\tau}_{ij} d_j + \frac{C_{ijkl}}{c_{a2}} d_k^e e_i^e \tilde{v}_j \right] \times n_j \exp(ik_{a2} \mathbf{e}^e \cdot \mathbf{x}) dS. \quad (3)$$

这样 (2) 式可以简化为

$$V_0(\omega) = \beta(\omega) \hat{V}_T^\alpha(z, \omega) \hat{V}_R^\alpha(z, \omega) \times A(\mathbf{x}, \omega) \left[\frac{-2\pi}{ik_{a2} S_R} \frac{\rho_2 c_{a2}}{\rho_1 c_{pl}} \right]. \quad (4)$$

(4) 式可以用来预测双晶探头对平底孔缺陷体的反射回波. 下面讨论计算其中各项所采用的方法, 包括计算换能器辐射的速度场 \hat{V}_T^α , \hat{V}_R^α 的声场模型及确定系统影响因子 $\beta(\omega)$ 和缺陷体远场散射幅度 $A(\mathbf{x}, \omega)$ 的方法.

2.2. 声场模型

多高斯声束模型具有较高的计算效率, 且计算精度可以满足一般商用换能器的要求, 因而近些年得到了广泛研究 [8-14]. Huang 等 [11] 提出了一个基于传递矩阵的多高斯声束模型, 可以方便地用于计算圆盘源向多层媒质中辐射的速度场. 由于矩形源表面的质点速度分布可以利用两个圆盘源的乘积来表示 [14], 进而可以将高斯叠加方法应用于矩形源. 矩形源向两层媒质中辐射时, 在媒质 2 中的质点速度场可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{v}_2^\gamma}{v_0(\omega)} &= \sum_{r=1}^{10} \sum_{q=1}^{10} A_r A_q \mathbf{d}^\gamma T_{12}^{\alpha, \gamma} \\ &\times \frac{\sqrt{\text{de}[\hat{M}_1^\alpha(s_1)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[\hat{M}_1^\alpha(0)]_{1q}}} \frac{\sqrt{\text{de}[\hat{M}_2^\gamma(s_2)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[\hat{M}_2^\gamma(0)]_{1q}}} \\ &\times \exp\left[i\omega\left(\frac{s_1}{c_1^\alpha} + \frac{s_2}{c_2^\gamma}\right) + i\frac{\omega}{2} \mathbf{y}^\gamma [\hat{M}_2^\gamma(s_2)]_{1q} \mathbf{y}^\gamma\right], \quad (5) \end{aligned}$$

式中 A_r, A_q 为叠加求和系数, $T_{12}^{\alpha, \gamma}$ 表示界面处由 α 波入射引起 γ ($\alpha, \gamma = p, s$) 波折射时的透射系数, c_m^α 表示在第 m ($m = 1, 2$) 层媒质内 α 波的声速, s_m 表示在第 m 层媒质中的声程, $\hat{M}_1^\alpha(0)$ 为声源表面处的初始项, $\hat{M}_2^\gamma(0)$ 表示在两种媒质界面处的透射项, 而 $\hat{M}_1^\alpha(s_1)$ 和 $\hat{M}_2^\gamma(s_2)$ 分别表示在媒质 1 和媒质 2 内的传播项. $\hat{M}_1^\alpha(s_1)$, $\hat{M}_2^\gamma(s_2)$, $\hat{M}_1^\alpha(0)$, $\hat{M}_2^\gamma(0)$ 均为 2×2 矩阵, 它们之间满足如下传递法则:

$$\mathbf{M}(P_{j+1}) = [\mathbf{D}\mathbf{M}(P_j) + \mathbf{C}][\mathbf{B}\mathbf{M}(P_j) + \mathbf{A}]^{-1}, \quad (6)$$

式中 P_j, P_{j+1} 是媒质中传播路径上的两点. 无论是在单一媒质中从 P_j 到 P_{j+1} 点的传播, 还是在界面处毗邻两点 P_j, P_{j+1} 之间的透射, 都满足传递法则 (6) 式. 当在第 m ($m = 1, 2$) 层媒质内传播时, 2×2 的传播矩阵 $\mathbf{A}^p, \mathbf{B}^p, \mathbf{C}^p, \mathbf{D}^p$ 表示如下:

$$\begin{aligned} A_1^p &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ B_1^p &= c_m^a s_m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ C_1^p &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ D_1^p &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

当 P_j, P_{j+1} 为界面处的毗邻两点时,透射矩阵 A^t, B^t, C^t, D^t 可以表示如下:

$$\begin{aligned} A_1^t &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2' & 0 \\ \cos\theta_1' & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ B_1^t &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C_1^t &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ D_1^t &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1' & 0 \\ \cos\theta_2' & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 θ_1 和 θ_2 分别表示入射角和折射角.

声源表面处的初始矩阵可以表示为

$$[M_1^s(0)]_{qj} = \begin{bmatrix} \frac{iB_r}{c_1^a D_{R1}} & 0 \\ 0 & \frac{iB_q}{c_1^a D_{R2}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $D_{R1} = ka_1^2/2, D_{R2} = ka_2^2/2$ 为瑞利距离, $2a_1$ 和 $2a_2$ 分别表示矩形源的长和宽.(5)(9)式中用于叠加求和的系数 A_r, B_r, A_q, B_q 是依据声源表面的质点速度分布来确定的.本文计算时也使用了 Wen 和 Breazeale 提供的 10 个优化的复系数^[8].

2.3. 系统影响因子

系统影响因子可以通过标准反射体试验来确定,一般常用换能器接收到的平面反射信号与相应的理论模型解卷积来确定.由于脉冲信号的频谱在低频或高频部分幅值较低,易受到噪声干扰,使得简单的频域相除过程易出现失真,因而采用维纳滤波来消除这种影响.对于双晶直探头,我们利用试块底面反射信号来计算系统影响因子,其计算公式为

$$\beta(\omega) = \frac{V_{\text{ref}}(\omega)v_{\text{ave}}^*(\omega)}{|v_{\text{ave}}(\omega)|^2 + \varepsilon^2 \max\{|v_{\text{ave}}(\omega)|^2\}}, \quad (10)$$

式中 $V_{\text{ref}}(\omega)$ 为接收到的试块底面反射回波信号, ε

为噪声因子, $v_{\text{ave}}(\omega)$ 为接收晶片表面质点的平均速度,即

$$v_{\text{ave}}(\omega) = \frac{1}{S_R} \int_{S_R} v(\mathbf{y}_s, \omega) dS(\mathbf{y}_s). \quad (11)$$

(11)式中的被积函数 $v(\mathbf{y}_s, \omega)$ 表示接收晶片表面各点的速度场,仍可以用多高斯声束模型计算如下:

$$\begin{aligned} \frac{v(\mathbf{y}_s, \omega)}{v_0(\omega)} &= \sum_{r=1}^{10} \sum_{q=1}^{10} A_r A_q T_1 R_2 T_3 \\ &\times \frac{\sqrt{\text{de}[M_1^s(s_1)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[M_1^s(0)]_{1q}}} \frac{\sqrt{\text{de}[M_2^s(s_2)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[M_2^s(0)]_{1q}}} \\ &\times \frac{\sqrt{\text{de}[M_3^s(s_3)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[M_3^s(0)]_{1q}}} \frac{\sqrt{\text{de}[M_4^s(s_4)]_{1q}}}{\sqrt{\text{de}[M_4^s(0)]_{1q}}} \\ &\times \exp\left[i\omega\left(\frac{s_1 + s_4}{c_1^p} + \frac{s_2 + s_3}{c_2^s}\right.\right. \\ &\left.\left.+ i\frac{\omega}{2} \mathbf{y}_s^T [M_4^s(s_4)]_{1n} \mathbf{y}_s\right)\right], \end{aligned} \quad (12)$$

式中 s_1, s_2, s_3, s_4 表示纵波在有机玻璃楔块和钢中的传播路径,见图 2 所示.

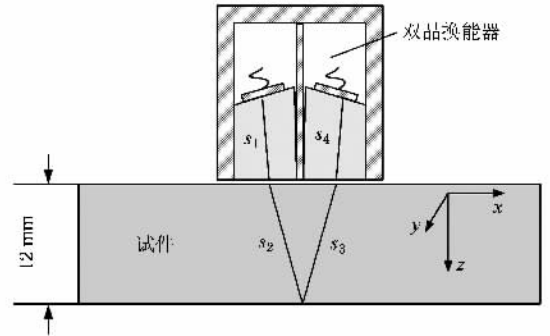


图 2 系统影响因子测量装置示意图

2.4. 远场散射幅度

对于横通孔、平底孔或圆盘状裂纹等缺陷体,其表面满足自由边界条件,则远场散射幅度(3)式可以简化为

$$A(\mathbf{x}, \omega) = \frac{1}{4\pi\rho_2 c_{a2}^2 S_f} \int C_{ijkl} d_k^a e_l^a \tilde{v}_j n_j \exp(ik_{a2} \mathbf{e}^a \cdot \mathbf{x}) dS. \quad (13)$$

平底孔缺陷体对入射纵波引起的远场散射问题,可以采用基尔霍夫近似方法来计算.这时只考虑入射纵波直接作用的上表面的影响,而视其余表面的速度场为零.这样,由入射纵波引起的平底孔上表面质点速度场可以表示为

$$v_j = -i\omega \left(d_j \exp[ik^p(\mathbf{e}_1^p \cdot \mathbf{x})] + \sum_{m=p,s} R_{12}^m d_j^m \exp[ik^m(\mathbf{e}_R^m \cdot \mathbf{x})] \right), \quad (14)$$

式中 $\mathbf{e}_1^p, \mathbf{e}_R^m$ 分别表示入射纵波与反射 m ($m = p, s$) 波的单位方向矢量. 在自由表面处, 相位应满足下列匹配条件:

$$ik^p(\mathbf{e}_1^p \cdot \mathbf{x}) = ik^m(\mathbf{e}_R^m \cdot \mathbf{x}). \quad (15)$$

由(14)和(15)式可得

$$v_j = -i\omega \left(d_j^p + \sum_{m=p,s} R_{12}^m d_j^m \right) \exp[ik^p(\mathbf{e}_1^p \cdot \mathbf{x})]. \quad (16)$$

另外, 由于平底孔缺陷体上表面为平面, 速度的法向分量为常量. 这样, 将(16)式代入(13)式, 整理后可得

$$A(\omega) = -\frac{ik_1}{2\pi} C^{p,p} \int_{S_f} \exp[ik^p(\mathbf{e}_1^p - \mathbf{e}_S^p) \cdot \mathbf{x}] dS(\mathbf{x}), \quad (17)$$

式中 $\mathbf{e}_1^p, \mathbf{e}_S^p$ 分别表示纵波的入射方向和散射方向单位矢量. 积分区域 S_f 为平底孔的上表面, 系数 $C^{p,p}$ 可表示为

$$C^{p,p} = \frac{1}{2\rho c_p^2} C_{ijkl} d_k^p e_l^p n_i \left(d_j^p + \sum_{m=p,s} R_{12}^m d_j^m \right). \quad (18)$$

在文献[15]中, 证明了(18)式等价于入射角余弦, 即

$$\frac{1}{2\rho c_p^2} C_{ijkl} d_k^p e_l^p n_i \left(d_j^p + \sum_{m=p,s} R_{12}^m d_j^m \right) = \mathbf{e}_1^p \cdot \mathbf{n} = -\cos\theta_i. \quad (19)$$

由双晶直探头的结构特点, 决定换能器接收到的散射波与平底孔法向之间的夹角等于入射角. 这样, $\mathbf{e}_1^p - \mathbf{e}_S^p$ 矢量垂直于平底孔的上表面. (17)式中面积分的结果即为平底孔的上表面面积. 综合上述讨论, (17)式可以进一步化简为

$$A(\omega) = \frac{1}{2} ik^p b^2 \cos\theta_i. \quad (20)$$

3. 理论模型预测结果及验证

3.1. 系统影响因子测量试验

首先利用平板底面反射回波来计算系统影响因子(图2), 板厚为 12 mm, 接收到的时域平板底面反射信号如图 3(a)所示. 依据(11)式计算获得的接收晶片表面质点平均速度幅值(归一化结果) $|v_{ave}(\rho c v_0)|$ 如图 3(b)所示. 图 3(c)为频域解卷积后获得的系统影响因子.

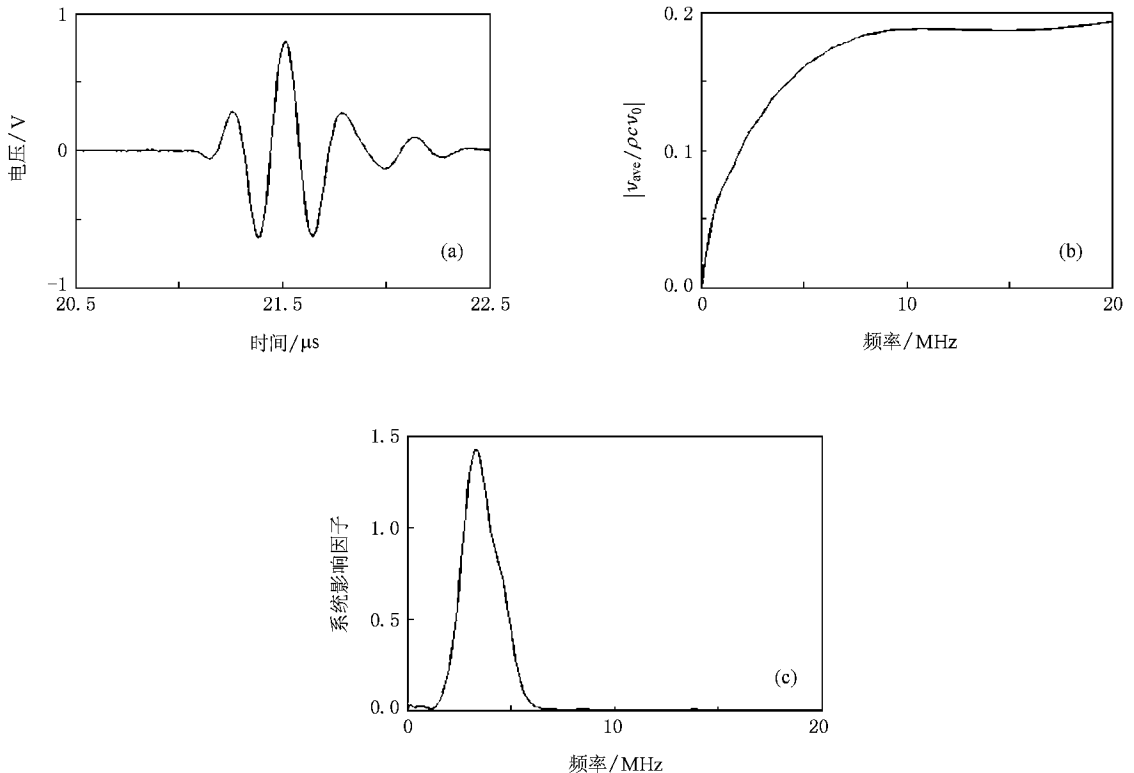


图3 平板底面的测量计算结果 (a) 平板底面回波信号, (b) 接收换能器表面的质点平均速度幅值, (c) 系统影响因子

3.2. 平底孔反射体的模型预测结果与试验测量结果的对比分析

平底孔测量装置如图 4 所示,双晶直探头每个晶片尺寸为 $6\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,有机玻璃延迟楔块中的声程 $L = 24.5\text{ mm}$,在工件钢中的焦距 $F = 12 \pm 2\text{ mm}$.在楔块与钢界面($x-z$ 入射平面内),入射角为 4.5° ,折射角为 10° .直径为 2 mm 的平底孔距工件上表面的距离为 12 mm ,工件中的纵波声速为 5900 m/s .获得系统影响因子后,依据(4)式计算平底孔反射体的频域回波响应,再利用反离散傅里叶变换后得到其时域的回波信号.分别计算了探头位于不同

位置时获得的信号(即 A 扫描信号),重构其沿 y 轴运动时的线性扫描图像(即 B 扫描图像).

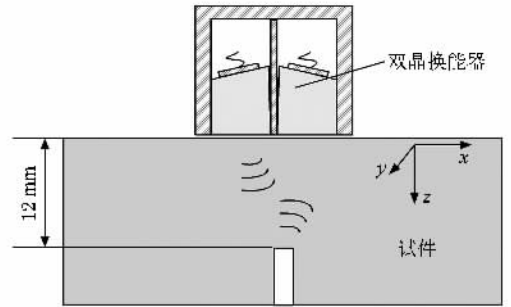


图 4 平底孔测量装置示意图

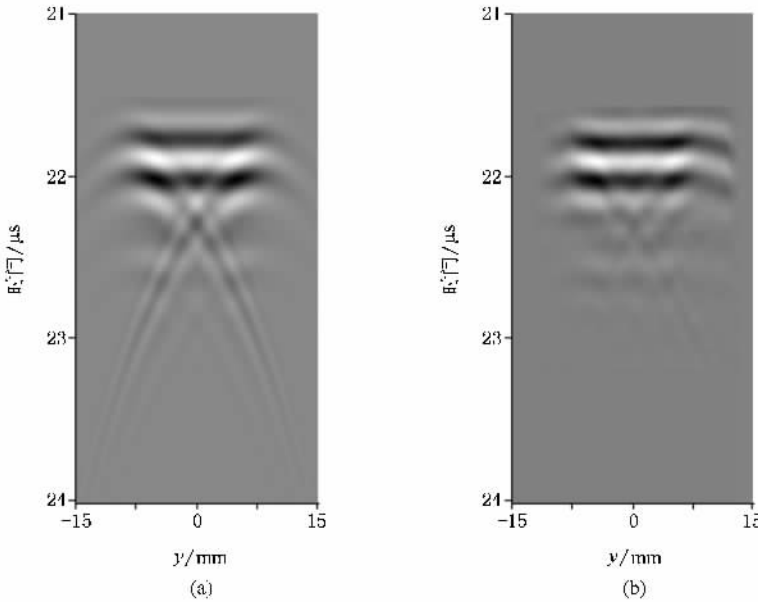


图 5 模型预测和实验测量的 B 扫描图像 (a)模型预测,(b)实验测量

图 5 为换能器在平底孔正上方沿 y 轴 B 扫描的模型预测结果和实验测量结果.图 6 为换能器辐射声场在平底孔上表面($z = 12\text{ mm}$)沿 y 轴的分布.由于入射声压的强弱会直接影响平底孔散射回波幅值的高低,这就使得沿 y 轴的 B 扫描图像出现灰度变化并且在 $y = \pm 5\text{ mm}$ 处的幅值最强.从图 5 可以看出,实验结果所反映出的规律和趋势与模型预测的 B 扫描结果具有较好的一致性.

A 扫描信号可以直观地反映幅度和相位信息,图 7 比较了一些典型位置处的模型预测信号和实验测量结果.从图 7 可以看出,对于信号主要部分的幅值和相位,模型预测与实验测量结果符合较好,而部分细节信息出现一些差异,主要是由于散射模型中采用的基尔霍夫近似方法,欠缺的是缺陷体的前沿响

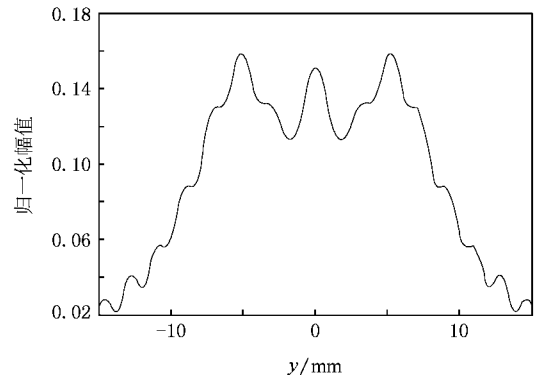


图 6 平底孔上表面($z = 12\text{ mm}$)沿 y 轴的质点速度幅值分布
中心频率 $f = 4\text{ MHz}$

应.一般而言,前沿响应常常包含信号的主要信息,

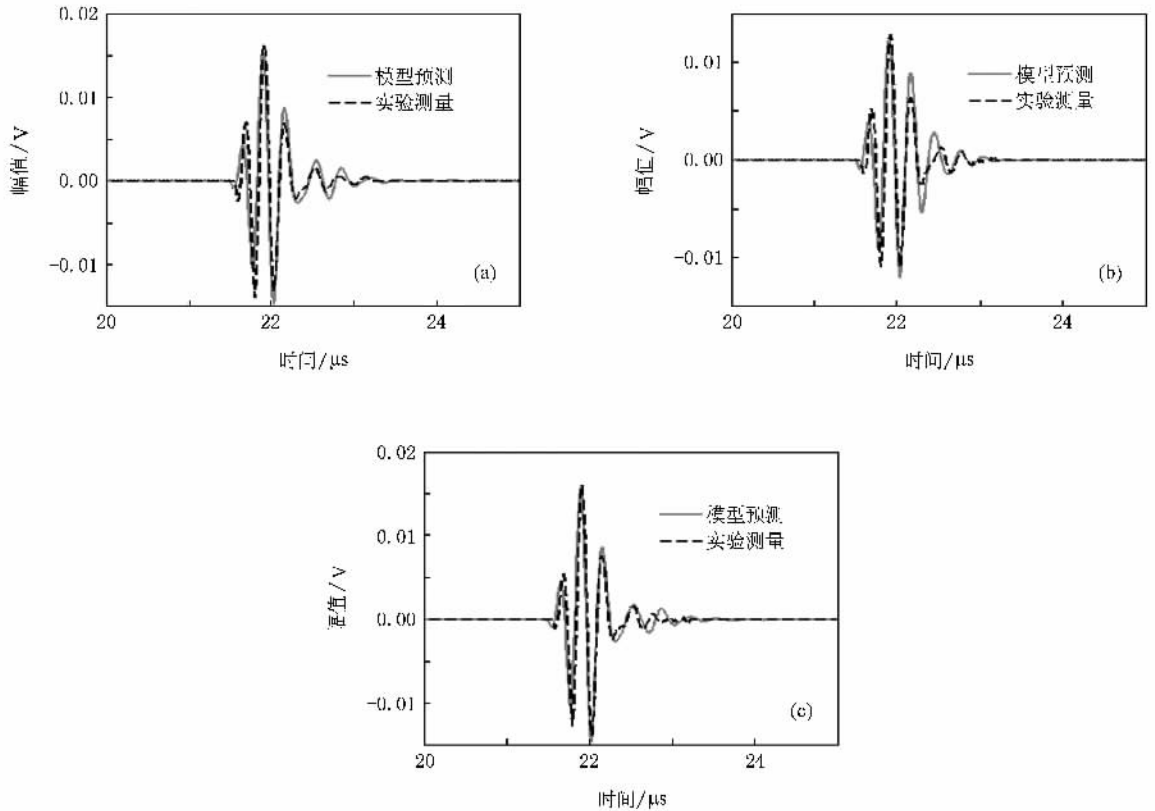


图7 模型预测信号与实验测量信号的对比 (a) $y = -5$, (b) $y = 0$, (c) $y = 5$

如峰值电压等,是无损检测中最为关心的问题。

4. 结 论

本文建立了一个完整的双晶直探头超声测量模型用于预测平底孔缺陷体的回波信号。由于采用了

多高斯声束模型和基尔霍夫近似方法来计算换能器辐射声场和缺陷体散射场,使得该模型具有较高计算效率。通过对比模型预测结果与实验测量结果,验证了该模型具有较好的计算精度。该模型作为一种快速有效的测量模型,可以为许多声学无损评价提供有益的参考。

- [1] Thompson R B 2002 *Review of Progress in QNDE* (Vol. 21) (New York: AIP) pp1917—1924
- [2] Bostrom A, Bovik P 2003 *Int. J. Solids Struct.* **40** 3493
- [3] Kim H J, Song S J, Schmerr L W 2006 *Ultrasonics* **44** 969
- [4] Wang Y H, Guo L X, Wu Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 1755
- [5] Lopez-Sanchez A L, Schmerr L W 2007 *Res. Nondestruct. Eval.* **18** 23
- [6] Schmerr L W 1998 *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation—A Modeling Approach* (New York: Plenum) p414
- [7] Lopez-Sanchez A L, Kim H J, Schmerr L W, Sedov A 2005 *J. Nondestruct. Eval.* **24** 83
- [8] Wen J J, Breazeale M A 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 1752

- [9] Kim H J, Schmerr L W 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **119** 1971
- [10] Huang D H, Breazeale M A 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 1771
- [11] Huang R J, Schmerr L W, Sedov A 2005 *Res. Nondestruct. Eval.* **16** 143
- [12] Yu J, Zhang D, Liu X Z, Gong X F, Song F X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5909 (in Chinese) [于洁、章东、刘晓宙、龚秀芬、宋富先 2007 物理学报 **56** 5909]
- [13] Zhou G Q, Chen L, Chu X X 2007 *Chin. Phys.* **16** 2709
- [14] Ding D, Zhang Y, Liu J 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 3043
- [15] Huang R J, Schmerr L W, Sedov A, Gray T A 2006 *Res. Nondestruct. Eval.* **17** 137



An ultrasonic measurement model to predict the response from flat bottom hole for dual crystal contact probe *

Zhao Xin-Yu¹⁾ Gang Tie^{1)†} Zhang Bi-Xing²⁾

1) *State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2) *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 12 December 2007 ; revised manuscript received 29 February 2008)

Abstract

Dual crystal contact probes play an important role in many practical ultrasonic inspections, so it is essential to develop an ultrasonic measurement model in order to get a thorough understanding of the characteristics of this kind of transducers. By combining the multi-Gaussian beam model and the Kirchhoff approximation scattering model, a complete ultrasonic measurement model is provided to predict testing signals of a flat bottom hole for a dual crystal focused direct contact probe. By comparing with experimental results, the accuracy of predicted signals using this model has been verified.

Keywords : ultrasonic measurement model, dual crystal contact probe, multi-Gaussian beam model

PACC : 4385G, 6265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50775054, 10774158) and the International Cooperation Program of Ministry of Science and Technology, China (Grant No. 2007DFR70070).

† E-mail : gangt@hit.edu.cn