

# 非接触空气耦合超声波钢板探伤的应用研究

常俊杰<sup>1,2</sup>, 魏 强<sup>1</sup>, 卢 超<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 日本探头株式会社, 日本横滨 2320033)

**摘 要:** 主要探讨了一种基于兰姆波检测模式的空气耦合超声波无损检测技术。首先介绍了非接触空气耦合超声波检测的基础知识和几种检测方法; 然后通过理论计算分析了超声波在空气中穿透钢板时透射率和频率与板厚乘积的关系、临界角与板厚的关系, 并以钢板检测为例进行了理论与实验的比较, 结果吻合非常好; 最后对钢板损伤进行探伤试验, 对损伤处成像, 并用有限积分法进行了模拟检验, 表明检测结果与有限元分析有良好的一致性。

**关键词:** 空气耦合超声波; 兰姆波; 透射率; 损伤成像

**中图分类号:** TB115.28 **文献标志码:** A

## 0 引 言

超声波在无损检测领域的应用很广, 但传统的超声波检测方法不像 X 射线和电磁检测可以非接触实现无损检测, 需要使用专门的耦合剂或采用水浸法以减少超声波在空气中传播的损失, 这不仅限制了它的适用范围而且很难进行快速检测<sup>[1]</sup>。在超声波检测中, 虽然也有使用电磁超声波探头 (EMAT) 和激光超声波进行非接触测量, 但是由于超声波束的指向性和焦点很难控制, 而且在激励和接收超声波时需要特殊装置, 这增加了超声检测的技术难度。空气耦合式超声波无损检测技术用空气代替水浸法的水, 与水浸法同样可以通过改变入射角, 激励模式变换的横波、表面波及各种导波, 且容易使超声波聚焦。其非接触、非浸入及无损无害的特点很好地弥补了上述的不足, 特别是能容易实现快速在线扫描及原位检测, 具有很好的应用前景。

空气耦合式超声无损检测具有非接触、非浸入等特点, 能够实现快速在线无损扫描<sup>[1]</sup>, 在工程建设、风力发电、航空航天等大型构件的无损检测与评价以及原位探伤中具有良好的应用前景。随着换能器技术和相关检测技术的发展, 空气耦合超声无损

检测技术在各个领域的实际应用得了较大进展<sup>[2]</sup>, 但是并没有突破传统超声波法的技术屏障。目前的空气耦合超声波检测法, 多使用穿透式异侧检测模式 (透射法), 可以用于复合材料、木材、烧结前陶瓷等传统超声波法很难检测的致密度稀的多孔隙材料检测<sup>[3-7]</sup>。

本文在文献<sup>[5]</sup>的基础上, 首先简要介绍了非接触空气耦合超声波检测的特长和检测方法, 通过理论和实验相结合验证了空气耦合超声波检测方法的有效性; 并利用同侧相向检测方法和同侧同向检测方法对钢板进行了开口裂纹检测, C 扫描成像结果显示, 其检测能力为 0.3 mm; 最后对检测结果进行了传播模拟验证。

## 1 空气耦合超声波检测技术的基本原理

### 1.1 超声在气-固界面的能量透射

超声波在不同物质界面处垂直入射时, 其声压往返透射系数  $T_{12}$  可用式 (1) 表示:

$$T_{12} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中  $Z_1$  和  $Z_2$  分别是入射介质进入透射介质 (一般为被检测材料) 的特性声阻抗, 定义为  $Z = \rho v$  ( $\rho$  为材料密度,  $v$  为声波在介质中的传播速度),

单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ , 一般用 Rayl 来表示 ( $1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ )。由于空气和金属材料存在巨大的特性声阻抗差, 使空气耦合超声波检测技术的一直难以进行实际应用。另外, 超声波在介质中传播时能量的吸收衰减和散射衰减与发射频率和传播距离有关, 发射频率越高其衰减就越大, 同时传播距离越远衰减也越大<sup>[3]</sup>。所以, 使用增幅率仅有 60 dB 的传统超声波发射接收器不能实现空气耦合超声波检测。

为此, 日本的 Japan Probe 公司研制了高功率超声波发射接收器 JPR-600C、空气特性声阻抗耦合好的高灵敏度空气耦合超声波探头以及可增幅 60 dB 的高信噪比的带通滤波信号增幅器 PR60-A, 其中 JPR-600C 可以发射电压 600 V、连续发射 300 个波数的矩形脉冲, 内置增幅为 80 dB。这为实现空气耦合超声波检测技术的实际应用提供了有效工具, 具体内容见文献[5]。

## 1.2 空气耦合超声穿透薄板时的能量透射率

当超声向薄板结构内入射时, 由于在薄板内发生共振, 其能量透射率会发生飞跃变化, 比 1.1 节所述(式(1))的两界面的透射率大很多。超声波斜角入射时的反射与透射示意图如图 1 所示, 当超声从空气(密度  $\rho_a$ , 声速  $v_a$ ) 中以入射角  $\theta$ 、频率  $f$  向固体薄板(厚度  $d$ , 密度  $\rho_s$ , 纵波声速  $v_l$ , 横波声速  $v_t$ ) 发射简谐振动时, 在板材中激发兰姆波并在板中向前传播, 同时向空气中产生泄漏波, 该泄漏波的能量透射率  $T$  可由式(2)求得<sup>[8]</sup>:

$$T = \frac{4N^2}{(M^2 - N^2 + 1)^2 + 4N^2} \quad (2)$$

式(2)中,  $N = \frac{Z_l \cos^2(2\theta_l)}{Z \sin k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2(2\theta_l)}{Z \sin k_{ly} d}$ ,

$$M = \frac{Z_l \cos^2(2\theta_l)}{Z \tan k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2(2\theta_l)}{Z \tan k_{ly} d}, Z = \frac{\rho_a v_a}{\cos \theta}, \text{ 其}$$

中:  $Z_l = \frac{\rho_s v_l}{\cos \theta_l}$ ,  $Z_t = \frac{\rho_s v_t}{\cos \theta_t}$ ,  $k_{ly} = \frac{\omega}{v_l} \cos \theta_l$ ,  $k_{ty} = \frac{\omega}{v_t} \cos \theta_t$ ,  $\theta_l = \arcsin\left(\frac{v_l \sin(\theta)}{v_a}\right)$ ,  $\theta_t = \arcsin\left(\frac{v_t \sin(\theta)}{v_a}\right)$ ,  $\omega = 2\pi f$ 。

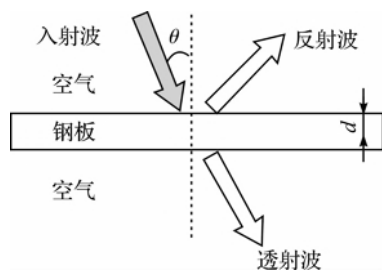


图1 超声波斜角入射时的反射与透射示意图

由式(2)可知, 超声波穿透固体薄板时的能量透射率不仅是两媒质的密度和声速的函数, 同时也是入射角和  $fd$  (频率和板厚的乘积) 的函数。这里  $\theta_l$  是入射角,  $\theta_l$  和  $\theta_t$  分别是入射角为  $\theta_l$  时所对应的纵波和横波的折射角,  $k_{ly}$  和  $k_{ty}$  分别是板厚方向的纵波波数与横波波数,  $Z$ 、 $Z_l$  和  $Z_t$  分别是考虑了入射角的声阻抗,  $\omega$  是超声波的角频率。

以超声波在从没有剪切刚性的媒质空气或水中传播, 穿透钢板为例。首先, 将简谐振动超声波从空气 ( $\rho_a = 1.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $v_a = 340 \text{ m/s}$ ) 或水 ( $\rho_a = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $v_a = 1500 \text{ m/s}$ ) 中向钢板 ( $\rho_s = 7800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $v_l = 5900 \text{ m/s}$ ,  $v_t = 3200 \text{ m/s}$ ) 中垂直入射, 由式(2)可求得能量透射率与  $fd$  的相关性曲线图(如图 2 所示)。从图 2 中可以看到, 两者(空气和水)均在  $2.95 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  (频率  $\times$  板厚) 和  $5.9 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  (频率  $\times$  板厚) 处发生全透射现象并呈现周期性, 可用式(3)表示:

$$fd = n \frac{v_l}{2} \quad (3)$$

这与板厚方向的纵波共振频率相对应。这与当板厚是纵波波长的  $1/2$  的整数倍时, 无论什么材料都与  $100\%$  透射的理论相符合。在媒质为水的情况下, 高透射率领域(面积)要比空气的领域大得多, 这是由于空气与钢的巨大声阻抗差, 使其透射率非常小, 仅为  $-95 \text{ dB}$  (水的情况下为  $-23 \text{ dB}$ ), 而致使能量透射率的半值宽也非常窄。

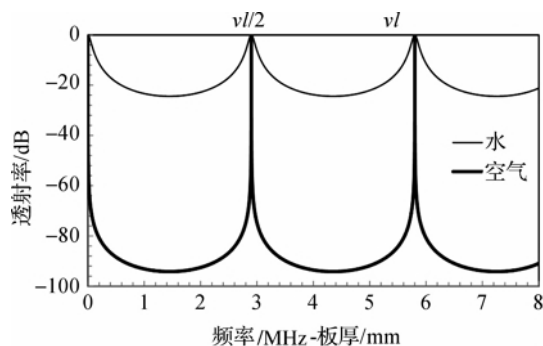


图2 垂直入射时透射率与  $fd$  的(频率  $\times$  板厚)关系

其次, 以  $fd = 1.0 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  的谐振超声波斜入射到上述同一钢板中, 由式(2)可得其能量透射率与入射角的相关性曲线, 如图 3 所示。虽然没有与图 2 一样出现周期性, 但在  $3.6^\circ$  和  $8.4^\circ$  的入射角处发生全透射现象, 这两个角为钢板的固有入射角, 与兰姆波  $A_0$  共振模式和  $S_0$  共振模式的临界角相对应。在  $A_0$  模式临界角和  $S_0$  模式临界角之间, 曲线呈递增趋势, 透射主要是由钢板中传播的横波产生, 其平均能量透射率比垂直入射时高出约 20 dB。这

个特性可以应用于实际检测过程中以提高信噪比,且有利于检测垂直试件表面的缺陷。其实在实际检测工程中,入射波信号并不是单一频率的简谐波,而是有一定范围的频宽,而且超声斜角入射时的入射角也不是单一角度,而是存在一定范围的入射角,且在波束边缘处产生缘波,其传播状态非常复杂。此现象将在后续的传播模拟中解释。所以,在实际检测中不可能发生全透射。总之,如式(3)所示,在垂直入射时透射波在共振频率处透射率变大;而在斜角入射时,透射波在各模式的临界角处透射率变大。

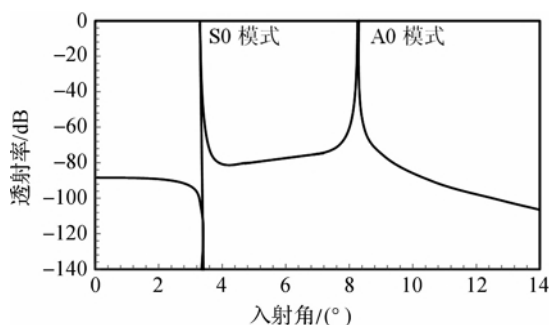


图3 斜入射时透射率与入射角的关系曲线

### 1.3 空气耦合超声波在各种板厚中的能量透射

超声波在空气中传播时吸收衰减是不可忽视的,可以用衰竭距离(信号振幅衰减至其初始值的 $1/e$ 的距离)来表示,其与频率成反比关系,当频率为1 MHz时,大概为5 cm,而到了4 MHz时仅为3.1 mm。所以为了使超声波通过空气穿透钢板且最后接收到有效信号,一般使用的频率限制在0.1 MHz~1 MHz之间。在后续的实验中所使用的空气耦合探头的中心频率为0.4 MHz和0.8 MHz<sup>[9-11]</sup>。

当超声从空气中向薄板中垂直入射时,如果使用的频率已知,根据板厚 $d$ 就可以推测透射率的变化。从空气中向钢板中垂直入射0.4 MHz和0.8 MHz的超声波时,由式(2)可求得透射率与板厚的关系如图4所示,粗实线为0.4 MHz的分析结果,细实线为0.8 MHz的分析结果。在发射0.4 MHz

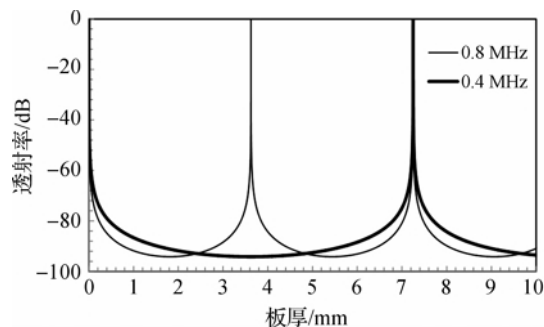


图4 垂直入射透射率与板厚的关系(0.4 MHz)

超声波时,由于在板厚7.25 mm处发生共振出现全透射现象,透射率变为最大;在发射0.8 MHz超声波时,由于在板厚3.625 mm和7.25 mm处发生共振出现全透射现象,透射率变为最大;由此可知,根据所测试的板厚需要选择最佳频率的空气耦合探头。

下面再讨论斜角入射时的临界角与板厚的关系。临界角是板材中传播兰姆波的位相速度与空气的声速求得,而兰姆波的位相速度分散曲线则用板材的声速及板厚等计算的。图5是发射频率0.4 MHz超声波时,板厚与兰姆波各模式临界角的关系曲线图,图中的各曲线与图4中出现透射率最大峰值位置的入射角相对应,是各种板厚的钢板中传播兰姆波的各种模式的临界角,其中A0模式和S0模式,在板厚很宽的范围内存在临界角,所以,利用空气耦合超声波进行钢板的检测时,可检测板厚范围是非常宽的。在实际检测时,要根据不同的板厚考虑入射角及振动模式。

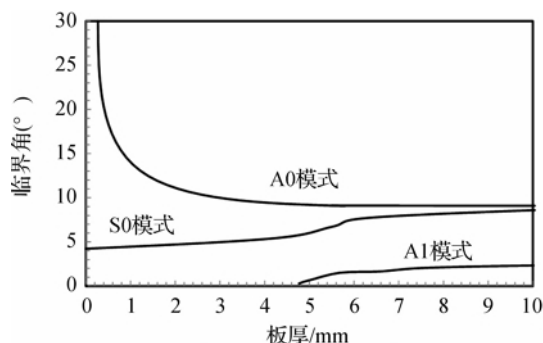


图5 斜角入射的临界角与板厚的关系

## 2 空气耦合超声波透射法的基础实验

### 2.1 试验装置与实验方法

实验装置如图6所示,两个空气耦合超声波探头固定在试件的左右两侧,左侧为发射探头,右侧为接收探头。试件的夹具可自由调节角度。使用的空气耦合探头的公称频率为0.4 MHz(晶片尺寸20 mm×24 mm,最大中心频率0.35 MHz),让超声发射接收器JPR-600C发射电压300 V<sub>p-p</sub>、频率0.35 MHz,内装0.4 MHz或0.8 MHz带通滤波器的外置增幅器发射信号,增幅80dB的高功率超声波发射接收器接收信号并输出波形。钢板厚度为2.3 mm,插入发射接收探头中央,入射角由 $\theta=0^\circ$ 到 $20^\circ$ ,每间隔 $1^\circ$ 采集一次透射波形,发射接收探头的左右方向距离固定在30 mm,上下方向的距离调整在透射波振幅最大处。

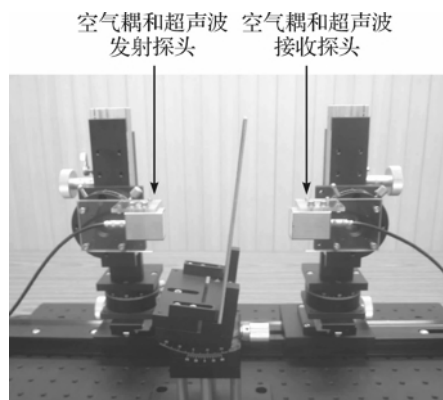


图6 试验装置

## 2.2 实验结果与分析

试验结果与计算结果如图7所示。图7中的曲线实线是将  $fd = 0.35 \text{ (MHz)} \times 2.3 \text{ (mm)} = 0.805 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  代入式(2)计算得到的声压透射率, 曲线为试验得到的钢板透射率, 由图8可以看到, 由试验得到的钢板透射率与理论值非常吻合, A0模式的临界角附近的入射角  $\theta = 13.5^\circ$  时的透射率比垂直入射  $\theta = 0^\circ$  时的透射率大约高 19 dB。在实验时, 虽然很精确的调节了入射角的角度, 但是没有实现在 A0 模式临界角出的全透射及在 S0 模式临界角附近的透射率。这是由于实际发射接收的波形并不是理想的简谐振动, 而是带有一定频宽范围的波形, 而且所使用的空气耦合探头的晶片大小有限, 所产生的声场并不是理想的平面波, 致使试验结果与理论计算的结果出现不一致。

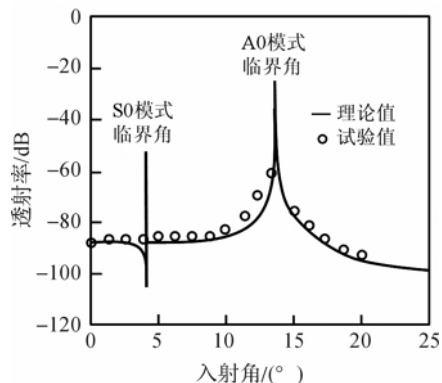


图7 入射角与透射率的关系

## 3 空气耦合扫描系统的钢板检测成像

### 3.1 空气耦合扫描系统

传统的超声波扫描成像装置, 是将试件放在水中, 通过超声波探头沿 XY 轴高速扫描得到超声波振幅分布的方式取得二维成像。这时, X 轴电机或 Y 轴电机脉冲输出作为触发器信号, 进行超声波信号的驱

动及采集, 位置与超声波检测同步取得。日本探头株式会社的空气耦合扫描系统由超高功率超声波发射接收器、高速编码器和安装有空气耦合探头的自动扫描仪、控制系统和存储系统构成, 系统示意图如图8所示。从触发器端口取得触发信号, 由驱动控制器发出的触发信号表示信号的位置信息, 相对于所在的位置检测的超声波振幅的峰值, 取得接收信号的强度分布。该系统可以根据被检工件, 通过改变探头的角度、位置及组合, 可实现表面检测法、穿透式检测法、V 透射检测法、串(并)联式检测法以及各种导波检测。

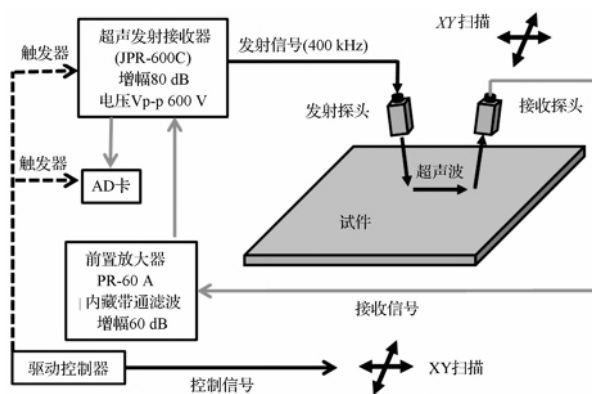


图8 空气耦合超声波扫描成像系统的组成

### 3.2 钢板的开口裂纹成像试验方法及成像

本试验以钢板开口裂纹检测成像为检测目的, 试验方法和成像如图9和图10所示。图9(a)为同侧相向(V透射)检测法, 右侧为发射探头, 左侧为接收探头, 探头发射的超声波在板中激发的板波在传播过程中, 遇到缺陷被缺陷遮断不能继续向前传播, 接收探头不能接收到超声信号, 而其它不存在损伤部位接收到超声信号, 并在接收波形的阀门内出现缺陷波或端面波的幅度。在开口裂纹的正上方  $128 \times 80$  的领域进行同侧相向 C 扫描, 扫描成像结果如图9(b)所示, 横轴为 X 方向的扫描距离, 纵轴为 Y 方向的扫描距离, 颜色的浓度表示超声波的强度。深色表示存在开口裂纹部位的透射波, 超声波被开口裂纹遮挡不能透射, 如上方的箭头线所示, 在阀门内没有出现透射波, 阀门后面的波形是超声波绕过裂纹后到达的波形, 或由于开口裂纹的存在, 产生的边缘波。颜色随开口裂纹由深变浅, 由蓝变黄, 说明透射波的能量由弱变强, 深度 0.1 mm 的开口裂纹处几乎没有呈现深色, 可知检测能力为 0.3 mm。周围浅色部分是没有开口裂纹部位的透射波, 如下方的箭头线所示, 在阀门内出现的波形振幅较大, 透射的能量较强。图10(a)为同侧同向(串联式)检测法, 右侧为发射探头, 左侧为接收探头, 探头发射的超声波在板中激发的板波在传播过

程中,遇到缺陷或端面而产生发射波,被传感器接收后在接收波形的阀门内出现缺陷波或端面波的幅度。利用这些超声信号波形振幅的峰值进行色谱成像。试验材料与3.1节所用试件相同,是厚度为15 mm的钢板,在钢板表面上加工了长度为10 mm,宽度为0.25 mm,深度分别为0.1、0.3、0.5、0.7 mm和1.0 mm的5个人工开口裂纹。空气耦合探头的公称频率为0.8 MHz,晶片大小为 $16 \times 20$ 的四方形平板探头。施加电压为300 V的矩形脉冲。本试验采用A0模式板波,入射角为 $7^\circ$ 。发射和接收两探头距离保持不变,纵向与横向的扫描间距均为0.5 mm,扫描速度为200 mm/s。为反映试验效果的真实性,接收波形不做任何处理均为原始波形。在开口裂纹的偏离斜上方 $170 \times 110$ 的领域进行同侧同向C扫描,扫描成像结果如图10(b)所示。横轴为X方向的扫描距离,纵轴为Y方向的扫描距离,颜色的浓度表示超声波的强度。从图10(b)的扫描结果可知,左侧较深的浅色,是试样左端端面的回波,如上方的箭头线所示,在阀门内出现的波形振幅较大(见图10(c)上部),透射的能量较强。右侧四个椭圆浅色是开口裂纹的回波,1.0 mm开口裂纹处颜色最深,如下方的箭头线所示,在阀门内出现的波形振幅也较大(见图10(c)下部),颜色随开口裂纹由深变浅,由黄变蓝,说明透射波的能量由强变弱,深度0.1 mm的开口裂纹处几乎没有呈现浅色,可知检测能力为0.3 mm。其他部位没有回波。

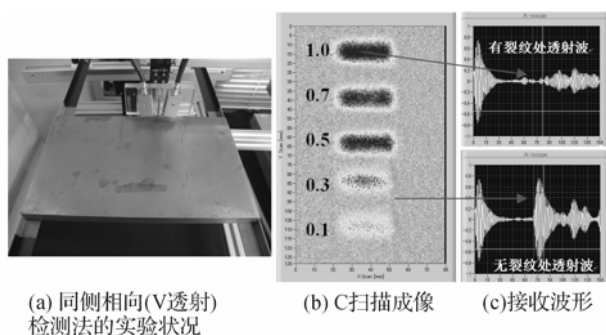


图9 同侧相向(V透射)检测法的钢板开口裂纹成像

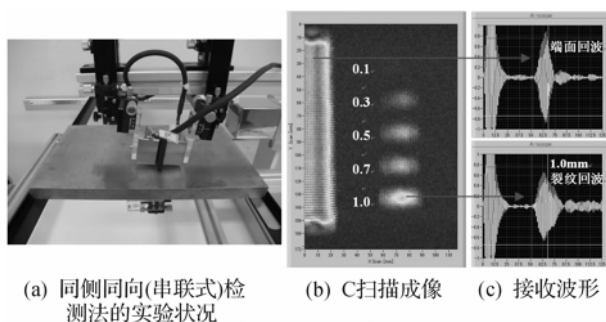


图10 同侧同向(串联式)检测法的钢板开口裂纹成像

#### 4 空气耦合超声波在钢板中的传播模拟

为了验证上节的实验结果,利用有限积分法超声波传播模拟分析软件,进行了超声波传播模拟分析。与前节的实验试样相同,分析模型是厚度为15 mm的钢板,其上部设有表面开口裂纹,裂纹的深度为1.0 mm,宽度为0.3 mm,右侧为发射探头,发射频率与前节的实验相同为0.8 MHz,左侧为接收探头,两探头的晶片大小为20 mm中心距离为40 mm,从超声模拟过程中,可以清楚地看到,由右侧空气耦合探头发射的超声波在钢板中激发了A0模式的板波,板波在钢板中传播的同时向空气中产生泄漏,在19.4 s时到达裂纹处,由于裂纹的存在,向空气中的泄漏波被分离,之后绕过裂纹在裂纹的边缘处产生边缘波,作为第二次波源继续向空气中泄漏传播。图11为右侧发射探头激发22.2 s后的传播状况图,从图中可以清楚地看到向空气中的泄漏波被裂纹分离的状态。图12为左侧探头接收到的波形,细实线是没有裂纹状态下的透射波,粗实线是存在裂纹状态下的透射波,与试验结果相同,在存在裂纹状态下,向空气中的泄漏波比不存在裂纹时的振幅大,这是由于一部分能量被裂纹遮断的原因。同时,在存在裂纹状态下的接收波形中,在透射波的后面,还有一个小的波形出现,就是如前所述的,在裂纹的边缘处产生边缘波,作为第二次波源继续向空气中泄漏传播后到达接收探头的波形。

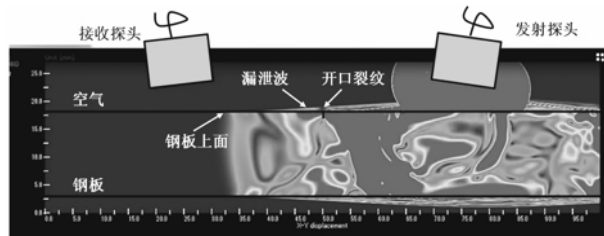


图11 空气耦合超声波在钢板中的传播模拟

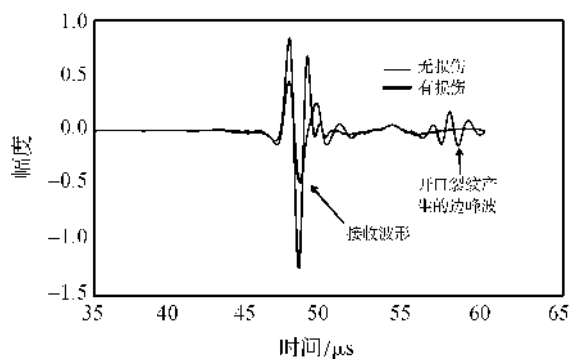


图12 开口裂纹对接收波形的影响

## 5 结 语

通过理论和实验研究,探讨了非接触空气耦合超声波在钢铁行业检测应用的可能性。对空气耦合超声波在钢板中的透射率与入射角的关系进行了理论计算和实验分析并进行了比较,实验结果发现两者非常吻合。通过两轴扫描仪和超声波激发及采集同步驱动,用同侧向检测法和同侧同向检测法对存在不同开口裂纹的钢板进行了二维扫描,取得了检测波形分布,其成像结果与裂纹存在位置及深度完全吻合。用有限积分法对空气耦合超声波在钢板中激发板波的传播状况进行模拟分析表明,与实验检测基本一致。

### 参考文献:

- [1] 周正干,魏 东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报,2008,44(6): 10-14.
- [2] 林书玉. 超声换能器的原理与设计[M]. 北京: 科学出版社,2004.
- [3] 常俊杰,小倉幸夫,川嶋絃一郎. 空气耦合超声波的非破坏检查及成像处理[C]//全球华人无损检测高峰论坛. 厦门,2011: 157-164.
- [4] Chang J, Lu C, Kawashima K. Development of non-contact air coupled ultrasonic testing system for reinforced concrete structure [C]//Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application (FENDT), 2013 Far East Forum on. IEEE, Nanchang, 2013: 197-200.
- [5] 常俊杰,卢 超,川嶋絃一郎. 非接触空气耦合超声波的材料无损评价与检测[J]. 浙江理工大学学报,2015,33(4), 532-536.
- [6] 常俊杰,卢 超,小倉幸夫. 非接触空气耦合超声检测原理及应用研究[J]. 无损探伤,2013,37(4): 6-11.
- [7] Chang J. Development of high sensitive non-contact air coupled ultrasonic testing and its application[C]//2012 International Symposium Development of Electromagnetic and Ultrasonic Testing Technology, Nanchang, 2012:191-198.
- [8] Nishino H, Masuda S, Yoshida K, et al. Theoretical and experimental investigations of transmission coefficients of longitudinal waves through metal plates immersed in air for uses of air coupled ultrasounds[J]. Materials Transactions, 2008, 49(12):2861-2867.
- [9] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. 无损检测. 1999, 21(9): 409-413.
- [10] 周正干,魏 东,向 上. 空气耦和超声检测中衰减因素的研究[J]. 中国机械工程. 2010, 21(19): 2350-2354.
- [11] Blomme E, Bulcaen D, Declercq F. Air-coupled ultrasonic NDE: experiments in the frequency range 750kHz - 2MHz[J]. NDT & E International, 2002, 35(7): 417-426.

## Research of Non-Contact Air Coupled Ultrasonic Crack Detection Testing and Imaging

CHANG Jun-jie<sup>1,2</sup>, WEI Qiang<sup>1</sup>, LU Chao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Japan Probe Co., Ltd., Yokohama 2320033, Japan)

**Abstract:** This paper mainly discusses the method of non-destructive detection technology by non-contact air-coupled ultrasonic based on the lamb wave detection mode. Firstly, the basic principle and several test methods of the air-coupled ultrasonic detection were described. Then, the relationship between the transmittivity when ultrasonic penetrating steel plate in the air and the product of frequency and the thickness of steel plate, and the relationship between the critical angle and thickness of steel plate were analyzed by theoretical calculation. The theoretical and experimental comparison of the steel plate crack detection as a case has carried on, and both fitted very well. Finally, the experiment of crack detection was carried on steel plate, and the cracks were imaged. and simulated by finite integration theory. The experimental results agreed well with that of simulation by finite element analysis.

**Key words:** air-coupled ultrasonics; lamb wave; transmittance; damage imaging.

(责任编辑: 康 锋)