

超声波特性及探伤实验报告

物理系 基地班 饶昀萱 201711140205

一、实验目的：

1. 了解固体中弹性波及其传播规律；
2. 了解超声波产生与探测的原理；
3. 掌握利用示波器测量固体中三种弹性波波速的方法；
4. 了解超声波探伤的原理和方法；
5. 设计、搭建利用超声波探测物理量的实验。

二、实验仪器：

JDUT-2 型超声波实验仪、示波器、测试 Al 块和耦合剂水。

三、实验原理：

1. 各向同性固体中的弹性波：

我们把固体看成由无数微元相互耦合形成的多自由度力学体系。当各处微元位移不同时物体内部将发生形变，导致材料产生回复力，反过来影响各处微元的位移，从而使固体中的形变以弹性波的方式传播。

对于各向同性的材料，通常用 3 个常数表征其弹性：杨氏模量 E 、剪切模量 G 和泊松比 σ 。

这 3 个量并不独立，他们之间满足关系：

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (1)$$

根据弹性理论，各向同性固体中的弹性波方程为[5]

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = G \Delta \vec{u} + \frac{G}{1-2\sigma} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) \quad (2)$$

其中 ρ 为材料的密度。对于线性波动方程，总可以设解有行波的形式

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{a} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (3)$$

其中振幅 \vec{a} 为一常矢量，代入方程可得两类解：

- (1) 纵波： $\vec{a} \parallel \vec{k}$ ，且有

$$\rho \omega^2 = \left(G + \frac{G}{1-2\sigma}\right) k^2 = \frac{2(1-\sigma)G}{1-2\sigma} k^2 = \frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} k^2 \quad (4)$$

由此可得纵波声速：

$$v_l = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}} \quad (5)$$

- (2) 横波： $\vec{a} \cdot \vec{k} = 0$ ，且有 $\rho \omega^2 = G$ 。由此可得横波声速

$$v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\sigma)\rho}} \quad (6)$$

如果已知材料的密度与弹性波速，则可以计算材料的弹性参数，比如：

$$G = \rho v_t^2, \quad \sigma = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}, \quad E = \rho v_t^2 \frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \quad (8)$$

其中 $\gamma = v_l/v_t$ 。

2. 超声波的产生和探测

超声波的产生和探测方法有多种，目前最常见的是利用晶体的压电效应和逆压电效应来探测和发射超声波

当给压电晶片两极施加一个电压脉冲时，由于逆压电效应，晶片将发生弹性形变而产生弹性振荡。

超声波在材料内部传播时，与被检对象相互作用发生散射，散射波被同一压电换能器接受，由于正压电效应，震荡的晶片在两极产生振荡的电压，电压信号被放大之后可以用示波器显示、检测。

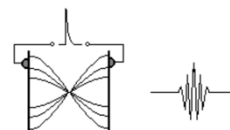


图 2. 超声脉冲波示意图

3. 超声波探伤与成像原理

超声探伤或成像都是通过测量反射波来获得物体内部的信息。

设 X 的位置为原点，A 点到中心位置的坐标为 1，'点的为 2，则直探头的扩散角为：

设 X 的位置为原点，A 点到中心位置的坐标

为 x_1 ，A' 点的为 x_2 ，则直探头的扩散角为：

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{|x_1 - x_2|}{2H_B} \right) \quad (12)$$

斜探头的扩散角为：

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{|x_1 - x_2|}{2H_B} \right) \cos^2 \beta \quad (13)$$

其中 H_B 为小孔的深度， β 为折射角。

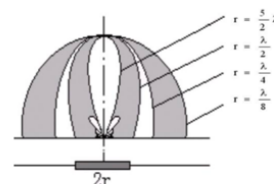


图 7. 超声探头发射能量指向性与超声波长和探头几何尺寸关系示意图

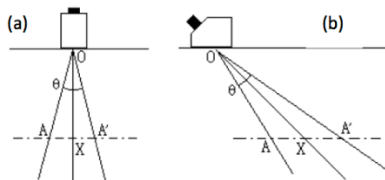


图 8 超声波探头的指向性 (a)直探头(b)斜探头

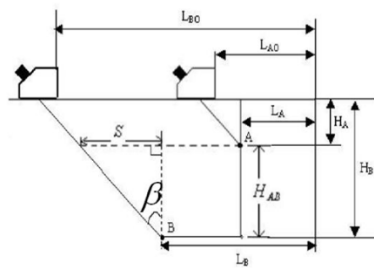


图 9 折射角测量示意图

对于斜探头，通过回波时间只能确定缺陷距离探头的直线距离，在实验中对缺陷的准确定位，需要确定折射角。通常采用如图 9 所示的不同深度、不同水平位置

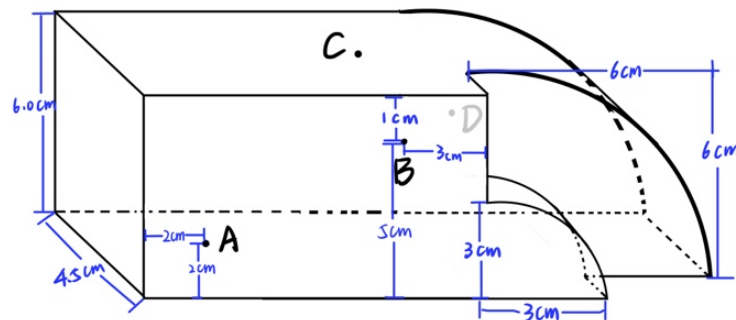
的两个缺陷 A、B 对声波的反射来测量折射角。

四、 实验内容：

1. 超声纵波主要性能表征及 AI 块缺陷深度的定位；
 - (1) 观察直探头超声脉冲波形，测量超声频率；
 - (2) 测量直探头延迟时间、AI 块中纵波声速；
 - (3) 定位 AI 中不同缺陷的深度；
 - (4) 借助一个缺陷，测量直探头的扩散角；（选作）
2. 超声横波主要性能及 AI 块缺陷的定位
 - (1) 观察斜探头（45 度）的超声脉冲波形，测量超声频率；
 - (2) 采用斜探头，利用工件的同心大小圆弧测量斜探头的延迟时间、横波声速；
 - (3) 测量 AI 块对超声波的折射角；
 - (4) 借助一个缺陷，测量斜探头的扩散角；（选作）
3. 采用可变角探头观察表面波，并测量表面波的声速（选作）
4. 计算 AI 的弹性模量
5. 超声成像：探测塑料板中的图形像（选作）

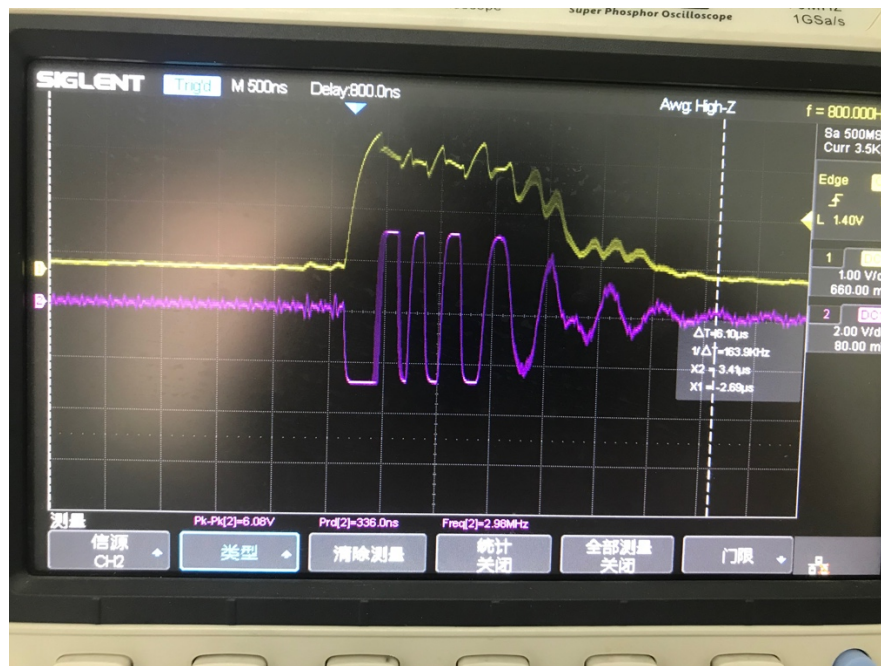
五、 实验数据处理和实验结果

0. AI 块基本参数：



1. 超声纵波性能表征及 AI 块缺陷深度的定位

- (1) 观察直探头超声脉冲波形，测量超声频率
 - a. 波形：



b. 根据示波器图像可知超声频率：2.98MHz

(2) 测量直探头延迟时间，AI 块中纵波声速

让超声脉冲在距离 H 的平行界面之间多次反射，测量第一次回波时间 t_1 和第二次回波时间 t_2 ，则根据

$$t_1 - t_0 = \frac{2H}{C} + t$$

$$t = 2t_1 - t_2$$

测得 $t_1=19.00\mu s$, $t_2=37.80\mu s$

可以计算纵波声速： $C=2H/(t_2-t_1)=6382.98m/s$

直探头延迟时间： $t=2\times 10^{-7}s$

(3) 定位 AI 中不同缺陷的深度(点 D)

将探测器放在 D 孔的背面的对应位置，得到稳定的图像后：

根据示波器图像：射入信号和收回信号的时间差： $\Delta t=8.9\mu s$

所以声波在 AI 块中传播的距离： $\Delta l=1/2 (C\times \Delta t)=2.84\times 10^{-2}m$

又测得 AI 块厚度为 $H=4.5\times 10^{-2}m$

所以 D 孔的深度： $h_d=(H-\Delta l)=1.6596\times 10^{-2}m$

(4) 测量直探头的扩散角

$$H_B=3.0\times 10^{-2}m$$

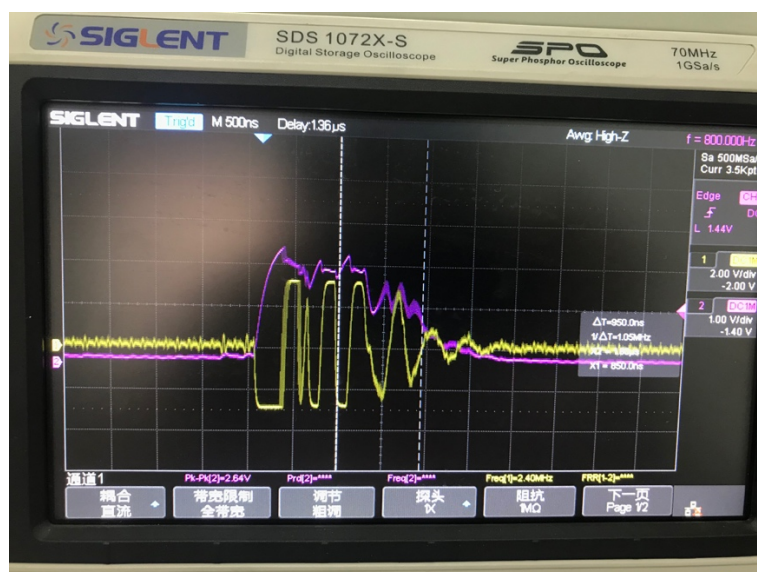
$$x_1-x_2=1.5\times 10^{-2}m$$

$$\theta=2\arctan(|x_1-x_2|/2H_B) \approx 30^\circ$$

2. 超声横波主要性能表征及 AI 块缺陷深度的定位

01. 观察斜探头超声脉冲波形，测量超声频率

a. 波形：



b. 根据示波器图像可知超声频率：2.40MHz

02. 采用斜探头，利用工件的同心大小圆弧测量斜探头的延迟时间、横波声速；

移动斜探头，使两个圆弧的回波同时达到最大值，测量起始波时间 t_0 回波时间 t_1 和 t_2 ，则根据

$$t_1 = \frac{2R_1}{C} + t$$

$$t_2 = \frac{2R_2}{C} + t$$

测得： $t_1=22.40 \mu s$ ， $t_2=41.10 \mu s$

可以计算横波声速： $C=2(R_2-R_1)/(t_2-t_1)=3208.56m/s$

斜探头延迟时间： $t=3.7 \mu s$

03. 测量 AI 块对超声波的折射角

测量得：

$$H_B=3.0 \times 10^{-2}m$$

$$L_{B0}-L_{A0}=5.8 \times 10^{-2}m$$

$$H_B-H_A=3.0 \times 10^{-2}m$$

$$L_B-L_A=3.0 \times 10^{-2}m$$

$$\beta = \arctan[(L_{B0}-L_{A0}) - (L_B-L_A) / (H_B-H_A)] \approx 43^\circ$$

04 测量斜探头的扩散角

测得 $|x_1-x_2|=1.6 \times 10^{-2}m$

$$\text{所以 } \theta = 2\arctan(|x_1-x_2|/2H_B)\cos^2 \beta \approx 17^\circ$$

3、计算 AI 的弹性模量

$$\rho_{\text{铝}}=2.7\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$$

$$\gamma=v_l/v_t\approx 1.98940$$

$$\text{所以 } E=\rho_{\text{铝}}v_t^2(3\gamma^2-4)/(\gamma^2-1)\approx 7.3\times 10^{10}\text{Pa}$$

六、 思考题：

1. 实验中是如何产生和探测超声波的？

答：利用晶体的压电效应和逆压电效应。超声波探头通过保护膜或斜楔向外发射超声波，超声波在材料内部传播时，与被检对象相互作用发生散射，散射波被同一压电换能器接受，由于正压电效应，震荡的晶片在两极产生振荡的电压，电压信号被放大之后可以用示波器显示、检测。

2. 超声波在固体中的传播与在空气中有什么主要区别？

答：1、横波、纵波、表面波都能在固体中传播，但是空气中只能传播纵波。

2、速度不同。

3. 直探头和斜探头发射的超声波有什么区别？

答：直探头产生纵波，斜探头产生横波或表面波。斜探头的延迟比直探头大。

4. 简述超声探伤的原理。

答：超声探伤是通过测量反射波来获得物体内部信息的。

在进行缺陷定位时，首先找到缺陷反射回波最大的位置，然后测量缺陷反射回波对应的时间，根据被测材料的声速可以计算出缺陷到探头入射点的垂直深度 H 或水平距离 L 。在超声成像时，探头在试块顶部二维扫描，得到来自试块内部缺陷深度的分布，再利用计算机进行图像重建，就可以得到试块内部缺陷的立体图像。

5. 如何测量固体的弹性模量？

答：测量材料的密度和弹性波速，根据公式（8）计算。

七、 误差分析

1. 因为衍射的存在，超声波有一定的发散性，导致测量结果不够准确。

2. 示波器分辨率有限，在界定波峰的时候存在误差。

3. AI 块本身有磨损，可能导致测量结果不准确。

4. 在测量扩散角时，直探头的中心位置只能大概估计，得出的 $|x_1-x_2|$ 不准确。

附：实验数据记录

一、直探头：

11). 超声频率 = 2.55 MHz

陈 09/13

12). 设第一次回波时间为 t_1 , 第二次回波时间为 t_2 .

根据 $t_1 - t_0 = \frac{2H}{C} + t_d$, $t_2 - t_0 = \frac{4H}{C} + t_d$.

得出纵波波速: $C = 2H / (t_2 - t_1)$

直探头延迟时间: $t_d = 2t_1 - t_2$

$t_1 = 19.00 \mu s$, $t_2 = 37.80 \mu s$

$\therefore C = 2H / (t_2 - t_1) = 6321.98 \text{ m/s}$

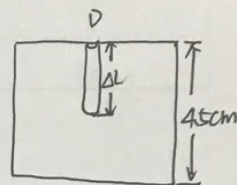
$t_d = 2 \times 10^{-7} \text{ s}$

13) 定位AL中缺陷的深度(点D)

$\Delta t = 8.9 \mu s$.

$\therefore \Delta L = (8.9 \times 10^{-6} \times 6321.98) \times \frac{1}{2} = 2.84 \times 10^{-2} \text{ m}$.

$\therefore D \text{ 的深度} = (4.5 \times 10^{-2} - \Delta L) \text{ m} = 1.6596 \times 10^{-2} \text{ m}$.



14) 测量直探头的打散角

$H_B = 2.8 \times 10^{-2} \text{ m}$.

$x_1 - x_2 = 2 \times 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}$

$\theta = 2 \arctan\left(\frac{|x_1 - x_2|}{2H_B}\right) \approx 30^\circ$.

二、斜探头

11). 超声频率 = 2.07 MHz

12). 设第一次回波时间为 t_1 , 第二次回波时间为 t_2 .

根据: $t_1 = 2R_1/C + t_d$, $t_2 = 2R_2/C + t_d$.

得出波速 $C = 2(R_2 - R_1) / (t_2 - t_1)$

探头延迟时间: $t_d = (R_2 t_1 - R_1 t_2) / (R_2 - R_1) - t_0$

测得: $t_1 = 22.40 \mu s$, $t_2 = 41.10 \mu s$

$\therefore C = 2 \times \frac{3 \times 10^{-2}}{(41.1 - 22.4) \times 10^{-6}} = 3208.56 \text{ m/s}$

$t_d = \frac{(6 \times 22.4 - 3 \times 41.1) \times 10^{-8}}{3 \times 10^{-2}} = 3.7 \mu s$

13). 测量AL块对超声波的折射角.

$$H_B = 2\text{cm}, \angle B_0 - \angle A_0 = 5.8 \times 10^{-2}\text{m}, H_B - H_A = 3 \times 10^{-2}\text{m}, \angle B - \angle A = 3 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$\therefore \beta = \arctan \frac{(\angle B_0 - \angle A_0) - (\angle B - \angle A)}{H_B - H_A} \approx \arctan(0.1337) \approx 43^\circ$$

14) 测量斜探头的打散角.

$$\text{测得 } |x_1 - x_2| = 1.6 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$\therefore \theta = 2 \arctan \left(\frac{|x_1 - x_2|}{2 H_B} \right) \cos^2 \beta \approx 17^\circ$$

三、计算AL的弹性模量.

$$\rho_{\text{铝}} = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \sigma = \frac{v_l}{v_t} \approx 1.9894$$

$$\therefore E = \rho v_t^2 \frac{3\sigma^2 + 4}{\sigma^2 - 1} \approx 7.7 \times 10^{10} \text{ Pa.}$$