

超声波在固体中的传输 实验报告

姓名：王炜致 学号：2022010542 实验日期：2024.3.26 实验台号：5

1 实验目的

掌握超声波在固体中传播时的波速测量方法，观察超声波不同波型的转换，学习超声波探测的基本原理及应用。

2 实验仪器

超声波测试仪（含直探头、45°斜探头、可变角探头）、示波器、CSK-IB 铝测试样、纯净水耦合剂。

3 数据处理与分析

3.1 声速测量

波型	衰减分贝 (dB)	示波器时间分度值 $M(\mu s/\text{div})$	第一回波峰位 $t_1(\mu s)$	第二回波峰位 $t_2(\mu s)$	高度/半径 (mm)	声速 (m/s)
纵波	83	25.0	20.00	39.00	$H=60.00$	$c_l \approx 6.32 \times 10^3$
横波	72	25.0	31.00	50.00	$R_1 = 30.00, R_2 = 60.00$	$c_s \approx 3.16 \times 10^3$

声速计算： $c_l = \frac{2H}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot 60.00\text{mm}}{39.00\mu s - 20.00\mu s} \approx 6.32 \times 10^3\text{m/s}$, $c_s = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot 30.00\text{mm}}{50.00\mu s - 31.00\mu s} \approx 3.16 \times 10^3\text{m/s}$;

试样（铝）密度： $\rho = 2700\text{kg/m}^3$;

速度比值： $T = \frac{c_l}{c_s} = 2$;

弹性模量： $E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = \frac{2700 \cdot (3.16 \times 10^3)^2 (12 - 4)}{4 - 1}\text{Pa} \approx 71.9\text{GPa}$;

泊松系数： $\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = \frac{1}{3} \approx 0.33$.

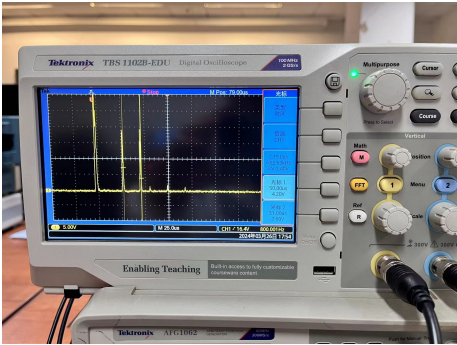


图 1：横波波速测量

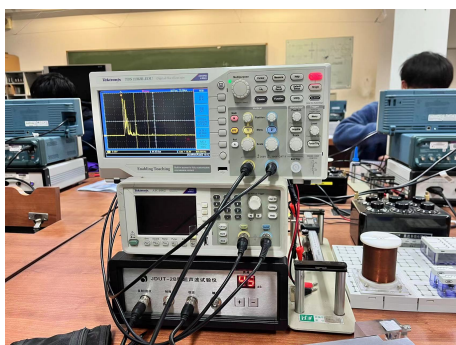


图 2: 使用固定法时确定第一回波

3.2 波型转换观察及表面波测量

3.2.1 回波信号幅度、峰位随入射角的变化现象

初始入射角为 0° 时, 示波器显示幅度较大、峰位等间隔分布的纵波; 入射角为 0° -约 25° 时, 示波器显示纵波, 由于入射点与圆心重合, 波传输距离不随入射角变化 (下同), 纵波峰位基本不变, 幅度随入射角增大而减小, 直至消失; 入射角为约 25° -约 60° 时, 入射角显示两个单峰的横波, 横波幅度随入射角增大而增大, 至约 60° 消失; 入射角在约 65° 时, 出现表面波。

3.2.2 表面波波速

方法	衰减分贝 (dB)	示波器时间分度值 $M(\mu s/div)$	起始波第一回波峰位 $t_1(\mu s)$	第二回波峰位 $t_2(\mu s)$	距离 (mm)	声速 $c_R(m/s)$
固定法	45	25.0	31.00	44.00	$L_{EG}=20.00$	$c_{fixed} \approx 3.08 \times 10^3$
移动法	52	25.0	55.00	62.00	$L_{EI}=10.00$	$c_{mobile} \approx 2.86 \times 10^3$

声速计算: $c_{fixed} = \frac{2L_{EG}}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot 20.00mm}{44.00\mu s - 31.00\mu s} \approx 3.08 \times 10^3 m/s$, $c_{mobile} = \frac{2L_{EI}}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot 10.00mm}{62.00\mu s - 55.00\mu s} \approx 2.86 \times 10^3 m/s$;

注意到, 经两种测量方法测得的表面波波速有所不同, 这可能是示波器测量精度不足、试样刻度精度不足等因素造成的。考虑到移动法测量表面波波速精度较高, c_{mobile} 值应当更可靠。

3.3 超声波探测缺陷

3.3.1 直探头扩散角测量与缺陷深度测量

衰减: 83dB, 示波器: 时间分度值 $M = 25.0\mu s/div$, 幅度分度值 $5.00 \times 10^3 mV/div$

x_0	x_1	x_2	缺陷回波幅值 $U_{max}(V)$	通孔 B 距测试面距离 $H_B(mm)$	扩散角 $\theta(^{\circ})$	缺陷回波峰位 $t_1(\mu s)$	底面回波峰位 $t_2(\mu s)$	竖孔 C 深度 (mm)
5.00cm	4.50cm	5.50cm	11.2	50.00	11.42	15.00	20.00	15.80

计算直探头扩散角 $\theta = 2\tan^{-1}\left(\frac{x_2 - x_1}{2H_B}\right) = 2\tan^{-1}\left(\frac{5.50cm - 4.50cm}{2 \cdot 50.00mm}\right) \approx 11.42^\circ$;

计算竖孔 C 深度 $d_c = \frac{c_L(t_2 - t_1)}{2} = \frac{6.32 \times 10^3 m/s \cdot 5\mu s}{2} \approx 15.80mm$.

3.3.2 45° 斜探头

探头前沿到左边缘距离 $x_A(cm)$	探头前沿到左边缘距离 $x_B(cm)$	$H_A(mm)$	$L_A(mm)$	$H_B(mm)$	$L_B(mm)$	折射角 $\beta(^{\circ})$	扩散角 $\theta(^{\circ})$	入射点到探头前沿 $L_0(mm)$
3.12	9.00	20.00	20.00	50.00	50.00	43.83	5.96	8.00

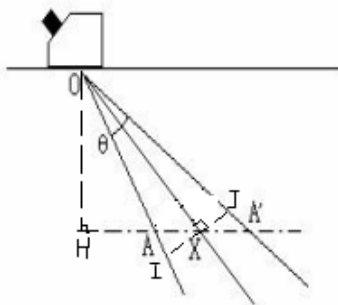


图 3: 斜探头扩散角示意图

据图推导斜探头扩散角表达式。直线 OX 为中心轴线，能量最大；偏离中线到位置 A,A' 时，能量减少到最大值的一半。通过移动斜探头、观察示波器幅度减半处可得 A,A' 相对位置 x_1, x_2 ，经测量 $|AA'| = x_2 - x_1 = 1.00\text{cm}$ 。而 OX 与法线方向夹角为折射角，记为 β ，如图作辅助线，则有

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{|IX|}{|OX|}$$

由扩散角较小，可近似认为 X 为线段 AA' 中点，则 $|AX| = \frac{x_2 - x_1}{2}$ ；同样近似认为 $\angle OIX = 90^\circ$ ，则由角度互余关系容易得到

$$|IX| = \frac{x_2 - x_1}{2} \cos \beta$$

而

$$|OX| = \frac{H_B}{\cos \beta}$$

故

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{x_2 - x_1}{2H_B} \cos^2 \beta$$

即得到斜探头扩散角计算式

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{2H_B} \cos^2 \beta \right)$$

$$\text{计算斜探头折射角 } \beta = \tan^{-1} \left(\frac{(x_B - x_A) - (L_B - L_A)}{H_B - H_A} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{5.88\text{cm} - 30.00\text{mm}}{30.00\text{mm}} \right) \approx 43.83^\circ;$$

$$\text{计算斜探头扩散角 } \theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{2H_B} \cos^2 \beta \right) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1.00\text{cm}}{2 \cdot 50.00\text{mm}} \cos^2(43.83^\circ) \right) \approx 5.96^\circ;$$

$$\text{计算入射点到探头前沿 } L_0 = H_B \tan \beta + L_B - x_B = 50.00\text{mm} \cdot \tan(43.83^\circ) + 50.00\text{mm} - 9.00\text{cm} \approx 8.0\text{mm}.$$

4 实验总结

通过本次实验，我了解了超声波在固体中传播时波速测量的方法，了解了超声波在固体中随入射角度变化波型的转换情况，在实操中领会了超声波探测缺陷的基本思想方法，以及利用已知缺陷测算探头折射角、扩散角的方法。本次实验同时巩固了我对示波器的操作技能。通过声速测量实验，明确了在固体试样中超声波纵波速度较横波、表面波要快（一倍），验证了现实生活中地震来临时先感受到上下震动的纵波、后感受到左右震动的横波的经验事实。通过波形转换观察实验，明确了横波、纵波、表面波存在临界入射角，入射角较小时主要产生纵波，适中时主要产生横波，较大时形成表面波。在实验过程中，由于示波器测量精度等因素，测量误差比较明显，特别反映在用两种方法测量表面波波速中。

5 原始数据记录

2024 存物理实验 B(2)课程资料

附录 2 实验测量数据记录参考表格

实验题目: 超声波在固体中的传播

姓名: 王浩斌, 学号 2022010342, 实验组号: 单二晚 L, 实验台号: 5, 实验日期 2024/3/26

1. 声速测量 (纵波、横波)

波型	衰减分贝 (dB)	示波器时间分度值 M(μs/div)	第 1 回波峰位 t ₁ (μs)	第 2 回波峰位 t ₂ (μs)	高度/半径 (mm)	声速 (m/s)
纵波	83	25.0	1220	37.00	H=60.00	$c_l = \frac{2H}{t_2 - t_1} \approx 6.52 \times 10^3$
横波	72	25.0	46.00	82.00	R ₁ =30.00 R ₂ =60.00	$c_t = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} \approx 3.16 \times 10^3$

试样 (铝) 密度: $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 速度比值: $T = \frac{c_l}{c_t} = 2$

弹性模量: $E = \frac{\rho c_l^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} = 7.19 \times 10^{10}$ 泊松系数: $\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} = \frac{1}{5}$

2. 波型转换现象及表面波测量

回波信号幅度、峰位随入射角的变化现象:

0°-25° 纵波最强, 横波随角度增大而减弱; 25° 左右纵波消失, 横波开始出现; 65° 附近出现表面波, 横波消失。

表面波波速:

方法	衰减分贝 (dB)	示波器时间分度值 M(μs/div)	起始波第 1 回波峰位 t ₁ (μs)	第 2 回波峰位 t ₂ (μs)	距离 (mm)	声速 c _R (m/s)
固定法	82.45	25	31.00	44.00	L _{RS} =20.0	3.08×10^3
移动法	52	25	62.00	55.00	L _{RP} =10.0	2.86×10^3

3. 超声波探测缺陷

直探头——

衰减: 83 dB, 示波器: 时间分度值 M=25.0 μs/div, 幅度分度值 5.0×10^{-3} mV/div

探头相对位置	缺陷回波幅值 U _{max} (V)	通孔 B 测试面距离 H _B (mm)	扩散角 θ (°)	缺陷回波峰位 t ₁ (μs)	底面回波峰位 t ₂ (μs)	竖孔 C 深度 (mm)
x ₀ x ₁ x ₂						
4.5cm 4.5cm 5.5cm	11.2	50.00mm	11.42	15.00	20.00	15.80

5.0° 斜探头——

扩散角测量及缺陷 D 的定位测量数据表自拟。

扩散角测量 (斜探头)

斜探头前沿到各边缘距离

x _A	x _B	H _A	L _A	H _B	L _B	折射角 β	扩散角 θ	入射点斜探头前沿 L ₀
3.12cm	9.00cm	20.00mm	20.00mm	50.00mm	50.00mm	43.83°	5.96°	8mm (8.00mm)

$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{2H_B} \cos^2 \beta \right)$; $\beta = \tan^{-1} \left(\frac{S - (L_B - L_A)}{H_B - H_A} \right)$; $L_0 = H_0 \tan \beta + L_B - x_B$

缺陷位置测量 (斜探头)

11.15cm (86°)