

材料科学基础实验报告

实验名称: 超声波无损探伤实验

学 号: 22301079 姓 名: 张展铭 班 级: 22 材化

合作者: ____ 桌 号:

指导教师:

实验日期:

实验考核

项目	实验预习	实验过程	分析与讨论	总评
评价				

【实验目的】

1. 学习超声波的产生原理及特点，了解超声波探伤仪的工作原理及使用方法；
2. 学习超声探头指向性原理及其实际应用；
3. 认识超声换能器及超声波探头的不同种类；
4. 了解超声波的传播、波型和波型转换原理及超声波声速的测量方法。

【实验原理】

1. 超声波是频率高于 20kHz 的机械波，具有穿透力强、传播方向性好等特点，实验所用探头通过压电晶片的逆压电效应，将电能转为机械能以产生脉冲超声波。超声波探头结构复杂，包括压电晶片、保护膜、匹配电感等部分，根据不同结构和应用情况可分为直探头、斜探头和可变角探头。

2. 超声波的指向性是指探头发射的声束扩散角大小，与波长、频率及探头内压电晶片尺寸有关。声束扩散角越小，指向性越好，测量精度越高。指向性大小可用公式表示：

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (1)$$

【注】 θ 为超声探头的声束扩散角， D 为探头内压电晶片的直径

3. 超声波根据波形可分为超声纵波、超声横波和超声表面波三种，在介质界面发生反射、折射和波形转换时需满足斯特令定律：

$$\text{反射: } \frac{\sin \alpha}{c} = \frac{\sin \alpha_L}{c_{1L}} = \frac{\sin \alpha_S}{c_{1S}} \quad (2)$$

$$\text{折射: } \frac{\sin \alpha}{c} = \frac{\sin \beta_L}{c_{2L}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{2S}} \quad (3)$$

【注】 α_L 、 c_{1L} 分别为反射纵波的反射角和在介质 1 中的纵波声速， α_S 、 c_{1S} 分别为横波反射角和在第 1 种介质中的横波声速； β_L 、 c_{2L} 分别为纵波折射角和在第 2 种介质中的纵波声速， β_S 、 c_{2S} 分别横波折射角和第 2 种介质的横波声速

4. 测量超声波声速可采用直接或相对测量法。直接测量法利用超声波探头内部延迟时间和探头测量的人工反射体回波时间计算声速；相对测量法则通过测量两次反射回波的时间差来计算声速。

【实验仪器】

JDUT-2 型超声波试验仪、DS1102E 双通示波器 (100MHz)、直探头、斜探头、CSK-IB 试块、耦合剂等。

【实验过程】

1. 组装实验仪器

2. 利用直探头测量脉冲超声纵波频率和波长

多次测量 CSK-IB 试块 45 毫米厚度的 1 次回波内四个周期的时间 t ，求出平均值 \bar{t} ，则有：超声波的频率 $f = \frac{4}{\bar{t}}$ ，超声纵波波长 $\lambda = \frac{c}{f}$ ；

3. 测量直探头延迟和间接测量法测量试块纵波声速

连接仪器，调整衰减器数值和示波器时间电压显示，选取第 1、2 次回波相对应的峰值，读出回波往复传播所需时间 t_1 、 t_2 。则有：

$$\text{直探头延迟: } t = 2t_1 - t_2 \quad (4)$$

$$\text{纵波声速: } c_L = \frac{2L}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

【注】 L 为试块厚度

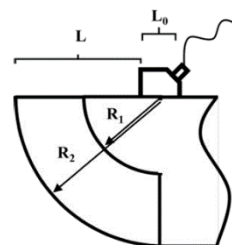
4. 测量斜探头延迟、入射点和间接测量法测试块横波声速

连接斜探头，调整角度、衰减器数值和示波器时间电压显示，选取第 1、2 次回波相对应的峰值，读出回波往复传播所需时间 t_1 、 t_2 ，测量并记录探头前沿到试块最左端距离 L ，则有：

$$\text{斜探头延迟: } t = 2t_1 - t_2 \quad (6)$$

$$\text{横波声速: } c_S = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

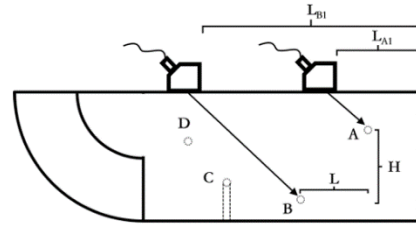
$$\text{斜探头前沿距离: } L_0 = R_2 - L \quad (8)$$



5. 测量斜探头的折射角

测量并记录声束正对横孔 A 和 B 时斜探头前沿到试块右边沿的距离 L_{A1} 、 L_{B1} 。测量横孔 A 和 B 的水平距离 L 和垂直距离 H 。则斜探头的折射角：

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{L_{B1} - L_{A1} - L}{H} \right) \quad (9)$$



6. 测量直探头和斜探头的声束扩散角

直探头的声束扩散角:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{|x_2 - x_1|}{2L} \quad (10)$$

斜探头的声束扩散角:

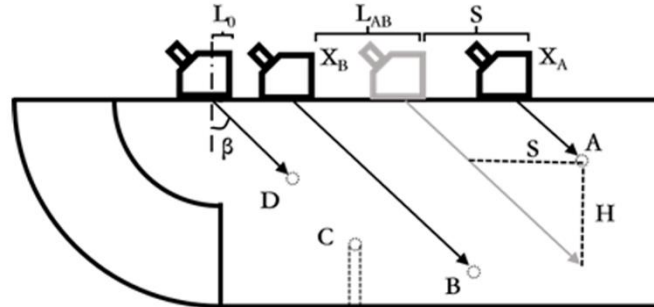
$$\theta = 2 \tan^{-1} \left[\frac{|x_2 - x_1|}{2L} \cos^2 \beta \right] \quad (11)$$

7. 使用直探头探测缺陷深度

缺陷深度:

$$H_C = C_L \frac{t_C - t_0}{2} \quad (12)$$

8. 使用斜探头探测待测试块内部缺陷位置



$$S = X_B - X_A - L_{AB} \quad (13)$$

$$H = H_B - H_A \quad (14)$$

斜探头的折射角:

$$\beta = \arctan \left(\frac{S}{H} \right) \quad (15)$$

试块内超声声速:

$$c = \frac{2H}{(t_B - t_A) \cos(\beta)} \quad (16)$$

探头延迟:

$$t_0 = t_B - \frac{2H_B}{c \cos(\beta)} \quad (17)$$

前沿距离为:

$$L_0 = H_B \cdot \tan(\beta) - (x_B - L_B) \quad (18)$$

将斜探头对准待测缺陷 D 孔, 测量 x_D 、 t_D , 缺陷 D 的垂直深度:

$$H_D = \frac{c(t_D - t_0) \cos(\beta)}{2} \quad (19)$$

缺陷 D 距试块侧边沿的水平距离:

$$L_D = x_D + L_0 - H_D \cdot \tan(\beta) \quad (20)$$

【实验数据】

1. 组装实验仪器

2. 利用直探头测量脉冲超声纵波频率和波长

	1	2	3	4	5	平均值
时间 $t/\mu s$	1.396	1.468	1.400	1.420	1.376	1.412

3. 测量直探头延迟和间接测量法测量试块纵波声速

	1	2	3	4	5	平均值
时间 $t_1/\mu s$	14.64	14.60	14.61	14.58	14.60	14.606
时间 $t_2/\mu s$	28.88	29.04	28.76	29.04	29.04	28.952

4. 测量斜探头延迟、入射点和间接测量法测试块横波声速

	1	2	3	4	5	平均值
时间 $t_1/\mu s$	23.70	25.36	25.32	22.96	22.54	24.176
时间 $t_2/\mu s$	43.80	43.88	42.26	41.94	41.78	42.932
L/mm	42.9	43	43.5	43.1	42.5	43.00

5. 测量斜探头的折射角

	1	2	3	平均值
L_{A1}/mm	28.0	27.9	27.9	27.93
L_{B1}/mm	85.9	86.1	86.3	86.10
L/mm	30.1	30.1	30	30.07
H/mm	29.6	29.5	29.6	29.57

6. 测量直探头和斜探头的声束扩散角

直探头	1	2	3	平均值
x_1/mm	44.1	43.8	44.6	44.17
x_2/mm	54.1	54	54.4	54.17

斜探头	1	2	3	平均值
X_3/mm	81	80.9	81.2	81.03
X_4/mm	90.6	90.4	90.9	90.63

7. 使用直探头探测缺陷深度

	1	2	3	平均值
$t_0/\mu\text{s}$	0	0	0	0
$t_1/\mu\text{s}$	14.4	14.4	14.4	14.4

8. 使用斜探头探测待测试块内部缺陷位置

	1	2	3	4	5	平均值
X_A/mm	28.0	27.9	27.9	/	/	27.93
$t_A/\mu\text{s}$	24.20	24.28	24.24	24.40	24.16	24.256
X_B/mm	85.9	86.1	86.3	/	/	86.10
$t_B/\mu\text{s}$	50.13	50.42	50.10	50.23	50.38	50.252
X_D/mm	110.0	109.8	110.5	110.4	110.4	110.22
$t_D/\mu\text{s}$	33.08	32.88	33.76	33.76	33.72	33.44
H_A/mm	20.0	20.1	20.0	20.0	20.0	20.00

H _B /mm	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.00
L _A /mm	19.9	20.0	20.0	20.1	20.0	20.00
L _B /mm	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.00

【数据处理】

1. 实验数据处理

(1) 直探头延迟、超声波频率和纵波波长、声速的计算

由实验数据可知: $\bar{t} = 1.412\mu s$ $t_1 = 14.606\mu s$ $t_2 = 28.952\mu s$

故可以计算:

超声波的频率: $f = \frac{4}{\bar{t}} = 2.833\mu s^{-1} = 2.833 \times 10^6 Hz$

直探头延迟: $t = 2t_1 - t_2 = 2 \times 14.606\mu s - 28.952\mu s = 0.26\mu s$

纵波声速: $C_L = \frac{2L}{t_2 - t_1} = \frac{2 \times 45mm}{28.952\mu s - 14.606\mu s} = 6.2735mm/\mu s$

纵波波长: $\lambda = \frac{C_L}{f} = \frac{6.2735mm/\mu s}{2.833\mu s^{-1}} = 2.2146mm$

(2) 斜探头延迟、入射点和横波波长、声速的计算

由实验数据可知: $t_1 = 24.176\mu s$ $t_2 = 42.932\mu s$ $\bar{L} = 43.00mm$

斜探头延迟: $t = 2t_1 - t_2 = 2 \times 22.976\mu s - 41.932\mu s = 5.42\mu s$

横波声速: $C_S = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} = \frac{2(60mm - 30mm)}{42.932\mu s - 24.176\mu s} = 3.1990mm/\mu s$

横波波长: $\lambda = \frac{C_S}{f} = \frac{3.1990mm/\mu s}{2.833\mu s^{-1}} = 1.1292mm$

斜探头前沿距离: $L_0 = R_2 - \bar{L} = 60mm - 43.00mm = 17mm$

(3) 斜探头的折射角计算

由实验数据可知: $L_{A1} = 27.93mm$ $L_{B1} = 86.10mm$ $L = 30.07mm$ $H = 29.57mm$

斜探头的折射角:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{L_{B1} - L_{A1} - L}{H} \right) = 43.54^\circ$$

(4) 直探头和斜探头的声束扩散角的计算

由实验数据可知: $x_1=44.17\text{mm}$ $x_2=54.17\text{mm}$ $x_3=81.03\text{mm}$ $x_4=90.63\text{mm}$

直探头的声束扩散角: $\theta = 2\tan^{-1}\frac{|x_2-x_1|}{2L} = 11.42^\circ$

斜探头的声束扩散角: $\theta = 2\tan^{-1}\left[\frac{|x_4-x_3|}{2L}\cos^2\beta\right] = 5.78^\circ$

(5) 直探头探测缺陷深度的计算

由(1)知: $C_L=6.2735\text{mm/us}$, 由实验数据知: $t_0=0$ $t_c=14.4\text{us}$

缺陷深度: $H_c = C_L \frac{t_c-t_0}{2} = 45.1694\text{mm}$

(6) 待测试块内部缺陷位置的计算

由(3)知: 斜探头的折射角 $\beta=43.54^\circ$, 由实验数据知: $H=50\text{mm}-20\text{mm}=30\text{mm}$

试块内超声声速:

$$c = \frac{2H}{(t_B - t_A) \cos(\beta)} = \frac{2 \times 30\text{mm}}{(50.252\text{us} - 24.256\text{us}) \times \cos 43.54^\circ} = 3.1820\text{mm/us}$$

探头延迟:

$$t_0 = t_B - \frac{2H_B}{c \cdot \cos(\beta)} = 50.852\text{us} - \frac{2 \times 50\text{mm}}{3.1840\text{mm/us} \times \cos 43.54^\circ} = 6.89643\text{us}$$

前沿距离为:

$$\begin{aligned} L_0 &= H_B \cdot \tan(\beta) - (x_B - L_B) \\ &= 50.0\text{mm} \times 0.9504 - (86.10\text{mm} - 50.00\text{mm}) = 11.4197\text{mm} \end{aligned}$$

缺陷 D 的垂直深度:

$$H_D = \frac{c(t_D - t_0) \cos(\beta)}{2} = \frac{3.1840\text{mm/us} \times (33.44\text{us} - 6.93\text{us}) \times \cos 43.54^\circ}{2} = 30.6115\text{mm}$$

缺陷 D 距试块侧边沿的水平距离:

$$L_D = x_D + L_0 - H_D \cdot \tan(\beta) = 110.22\text{mm} + 11.42\text{mm} - 30.59\text{mm} \times 0.9503 = 92.5467\text{mm}$$

2. 不确定度计算

将实验数据代入不确定度计算公式得:

A 类不确定度:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

不确定度传递公式:

$$U_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u}{\partial x_i} \right)^2 U_i^2}$$

不确定度:

$$U_x = \sqrt{(U_A)^2 + (U_B)^2}$$

3. 数据统计

综上所述，数据总结如下:

	计算结果	A 类不确定度	B 类不确定度	不确定度
超声波频率(Hz)	2.833×10^6	0.03139×10^6	0.001×10^6	0.03141×10^6
直探头延迟(us)	0.26	0.06040	0.003	0.060474
斜探头延迟(us)	5.42	1.261	0.003	1.261004
纵波声速(mm/us)	6.2735	0.02535	0.001	0.025370
横波声速(mm/us)	3.1990	0.1271	0.001	0.127104
纵波波长(mm)	2.2146	0.02612	0.003	0.026292
横波波长(mm)	1.1292	0.04658	0.003	0.046677
直探头声束扩散角(°)	11.42	0.2978	0.03	0.299307
斜探头声束扩散角(°)	5.78	0.1051	0.03	0.109298
缺陷深度(mm)	45.1694	0.1825	0.003	0.182525
试块内超声声速(mm/us)	3.1820	0.01183	0.001	0.011872
探头延迟(us)	6.89643	0.08606	0.003	0.086112
前沿距离(mm)	11.4197	0.2464	0.003	0.246418
缺陷 D 垂直深度(mm)	30.6115	0.2238	0.003	0.223820
缺陷 D 水平距离(mm)	92.5467	0.2901	0.003	0.290116

以上不确定度计算均用编程模拟，附部分截图如下：

```
In[40]:= EP = Function[{f, param},  $\sqrt{\text{Total}[(\partial_x f u_x)^2 / @ \text{param}][;;, 1]} /. \text{Thread}[\text{param}][;;, 1] \rightarrow \text{param}][;;, 2]] - \text{Join} - \text{Thread}[(u_x \&) / @ \text{param}][;;, 1] \rightarrow \text{param}][;;, 3]]];$ 
```

(+param 以{参数名, 参数值, 参数不确定度}, ...}格式给出*)

```
EPF = Function[{f, param},  $\sqrt{\text{Total}[(\partial_x f u_x)^2 / @ \text{param}]}$ ];
```

(+param 以{参数名, ...}格式给出*)

```
MSD = Function[{List},  $\frac{\text{StandardDeviation}[List]}{\sqrt{\text{Length}[List]}}$ ]
```

```
EPA = Function[{f, param}, With[{name = param[;;, 1], mean = Mean / @ param[;;, 2], msd = MSD / @ param[;;, 2]},
```

{f, $\sqrt{\text{Total}[(\partial_x f u_x)^2 / @ \text{name}]}$ } /. Thread[name → mean] - Join - Thread[(u_x &) / @ name → msd]]];

(+param 以{参数名, {测量列}}, ...}格式给出, 输出{测量结果, A类不确定度}*)

```
In[ ]:= EPF[ $\frac{n R T}{V}$  (*P*), {n, V, R, T}]
```

$$\text{Out[]:= } \sqrt{\frac{R^2 T^2 u_n^2}{V^2} + \frac{n^2 T^2 u_V^2}{V^2} + \frac{n^2 R^2 u_T^2}{V^2} + \frac{n^2 R^2 T^2 u_V^2}{V^4}}$$

【结果分析】

1. 数据分析

①超声波频率、波长

查阅讲义可知：超声波的频率一般大于 $2 \times 10^5 \text{Hz}$ ，波长一般小于 20mm。

本次实验数据计算得出的超声波频率为 $(2.833 \pm 0.031) \times 10^6 \text{Hz}$ ，纵波波长为 $(2.2146 \pm 0.0263) \text{mm}$ ，横波波长为 $(1.1292 \pm 0.0467) \text{mm}$ ，与讲义和事实相符。

②探头延迟

查阅资料可知：斜探头发射声波的角度不同，导致声波传播路径较长，因此相对于直探头可能会引入一些额外的延迟。

本次实验数据计算得出的直探头延迟为 $(0.26 \pm 0.06) \mu\text{s}$ ，斜探头延迟为 $(5.42 \pm 1.26) \mu\text{s}$ ，与资料和事实相符。

③超声波声速

查阅讲义得知：铝中纵波的声速参考值为 $6.27 \text{mm}/\mu\text{s}$ ，横波的声速参考值为 $3.20 \text{mm}/\mu\text{s}$ 。

本次实验数据计算得出的纵波声速为 $(6.2735 \pm 0.0254) \text{mm}/\mu\text{s}$ ，横波声速为 $(3.1990 \pm 0.1271) \text{mm}/\mu\text{s}$ ，与参考值 $3.20 \text{mm}/\mu\text{s}$ 十分接近。通过计算可知，纵波和横波相对误差分别为：0.06%和 0.03%。由此可见，本次实验操作严谨，测量准确。

④声束扩散角

查阅资料得知：超声波探头的声束扩散角取决于多种因素，包括探头的设计、

频率、尺寸、材料以及超声波在介质中的传播速度等。对于焦深相对较小的超声波探头（如压电探头），其声束扩散角度可能在几度到十几度之间。这种探头可以产生较为集中的声束，有助于提高检测的分辨率和灵敏度。

本次实验数据计算得出的直探头声束扩散角为 $(11.42 \pm 0.30)^\circ$ ，斜探头声束扩散角为 $(5.78 \pm 0.11)^\circ$ ，处于资料指出的压电探头的声束扩散角度范围之内，符合事实。

⑤缺陷深度

本次实验数据计算得出的缺陷 C 的深度为 $(45.1694 \pm 0.1825) \text{ mm}$ ，而试样的缺陷 C 深度约为 45mm，与实验计算结果十分接近。

⑥缺陷内超声声速和探头延迟

在最后一个实验中计算得到的声速为 $(3.1820 \pm 0.0119) \text{ mm/us}$ ，探头延迟为 $(6.90 \pm 0.09) \text{ us}$ ，与之前实验测得的横波声速 $(3.1990 \pm 0.1271) \text{ mm/us}$ ，探头延迟 $(5.42 \pm 1.26) \text{ us}$ 差距不大。并且声速也十分接近参考值 3.20 mm/us 。

两次实验所测得的数据存在差距的原因可能在于第二次实验是通过折射角间接计算声速和延迟的，在测量和计算过程中不确定度的传递使得误差较大，因而存在略微差异。

⑦前沿距离、缺陷 D 的垂直深度和水平距离

本次实验数据计算得出的探头的前沿距离为 $(11.42 \pm 0.25) \text{ mm}$ ，缺陷 D 的垂直深度为 $(30.61 \pm 0.22) \text{ mm}$ ，水平距离为 $(92.55 \pm 0.29) \text{ mm}$ 。

2. 误差分析

(1) 系统误差

①环境：实验当天的温度、湿度所带来的误差。查阅资料得知，温度、湿度会在一定程度下影响超声波的传播速度，进而影响实验测量。

②仪器：刻度尺、示波器和探头所带来的误差。其中，示波器发射和接收器之间的驻波场可能并不是严格的驻波场，可能会使信号衰减和失真：导致一部分超声波信号在传播过程中被反射或散射，而不是完全被接收，使接收的信号强度降低，影响检测灵敏度和可靠性；也可能导致信号形状的改变、波形的扭曲或者信号的重叠，影响信号的正确读取和分析。

③试样：不同的试样中的组成成分差异带来的误差。查阅资料得知，当试样中

的杂质和结构产生差异的时候，超声波的声速也会发生改变。不同试样内部的杂质和缝隙等不致密因素的不同，使所测量的超声声速与参考值产生一定的差异。

（2）偶然误差

①读数：在用刻度尺测量各个长度时，可能会由于估读而产生读取数据的误差。测量声束扩散角的实验中需要找到极大值和振幅减小一半的位置，可能会由于选取示波器上波形的位置而产生主观的读数误差。

②计算：在对数据进行处理分析时，可能会由于四舍五入而产生计算的误差。

（3）有关减小误差的改进方案

①环境：可以通过测量当天的温度、湿度，并引入温度、湿度的修正系数来减小环境对声速所带来的误差。

②仪器：可以使用测量精度更高的仪器来减小仪器所带来的测量误差。

③试样：可以使用制作工艺更加细致、差异化更小的试样来减小不同试样内部的杂质和缝隙等不致密因素不同所带来的测量误差。

④读数：本实验通过多次测量后求平均值的方法，减小了由于实验人员读数所带来的偶然误差。

⑤计算：本实验在数据处理过程中，尽可能用测量数据直接代入总计算式进行整体运算，减小了对中间数据四舍五入所带来的误差。

【思考题】

1. 测量斜探头延迟和横波声速的时候，为什么斜探头打在圆弧面上，只有超声横波？

答：超声波的传播受到声阻抗和材料性质的影响。当超声波从一个介质进入另一介质时，根据声阻抗匹配原理，超声波可能会发生折射和反射。斯涅尔定律描述了声波从一个介质传播到另一个介质时发生折射的规律，是光学中折射定律的声学对应。斯涅尔定律指出，对于两个介质界面，入射角（入射声波与法线的夹角）与折射角（折射声波与法线的夹角）的正弦之比，等于两个介质中声速的比值。而当入射角大于第一临界角时，折射角会大于 90 度，这意味着纵波不会进入第二个介质，所以斜探头接收不到超声纵波。

2. 如果将待测试块从铝试块更换为钢试块，对同一斜探头测量到的延迟和入射点是否一样？为什么？

答：一样。延迟本质上是超声波在探头内传播的时间，主要取决于探头本身的特性，入射点也是如此。而在测量时使用的是同一探头，因此延迟和入射点应该是一样的，以下是对影响延迟因素的分析：

①探头设计和制造：探头的设计、制造和校准对延迟的测量有重要影响。探头的内部构造、材料、尺寸和形状等因素会影响发射的声波传播到试样表面的时间，从而影响延迟的大小。

②声速：虽然不同材料具有不同的声速，但只要声速差距不是过于大的时，通常不会直接影响探头测量到的延迟。延迟的测量主要受探头本身设计的影响。

由此可见，当将待测试块从铝换成钢时，探头测量到的延迟通常不会改变，除非更换后的材料对声波的传播速度产生了显著影响。探头测量到的延迟和探头的入射点主要取决于探头本身的特性，而不是由被测物体的材料类型决定的。