

《超声波测试实验》实验报告

姓名 张家瑞 学号 2401111734 同组成员 沙铨骏、刘子赫
实验地点 力学楼 111 室 实验日期 2024 年 10 月 18 日

目录

1 实验目的	2
2 实验装置、仪器及器材	2
3 实验测量方法与测量过程	2
3.1 超声波法测量材料动态力学性能的方法	2
3.2 超声波实验测量的过程	4
4 脉冲-回波法测量波速和衰减系数、弹性模量和泊松比	6
4.1 材料密度测量	6
4.2 水的纵波波速	7
4.3 水浸式测量三种材料的纵波波速	9
4.4 水浸式测量三种材料的衰减系数	10
4.5 接触式测量三种材料的横波波速	11
4.6 计算三种材料材料常数	12
5 不同频率探头测量钢、有机玻璃纵波波速，及有机玻璃的衰减系数	13
5.1 接触式测量钢和有机玻璃的纵波波速	13
5.2 接触式测量有机玻璃纵波的衰减系数	15
6 采用脉冲回波法确定焊缝钢板中缺陷的位置及大小	16
6.1 钢板侧面垂直入射	16
6.2 钢板表面斜入射	16
7 结果分析与讨论	17
8 数据误差分析与提高精度的方法	18

1 实验目的

1. 掌握超声波传播基本知识及超声脉冲-回波检测原理。
2. 了解脉冲发射接收仪的操作使用。
3. 掌握超声波实验测波速、材料常数及衰减系数的基本方法。
4. 了解 B-Scan 超声测试方法，以及焊缝缺陷的探测方法。

2 实验装置、仪器及器材

1. 超声脉冲发射接收仪 (Olympus 5077PR Square Wave Pulser/Receiver)。
2. 数字存储示波器 (Tektronix DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope)。
3. 笔记本电脑 (Lenovo Thinkbook 16p Gen 2) 及示波器配套软件。
4. Olympus NDT 5MHz 水浸式超声探头、5MHz 横波探头、5MHz 及 10MHz 纵波探头、1MHz 斜探头。
5. 试件：圆柱状钢制试件、圆柱状铝制试件、板状有机玻璃试件、带焊缝的钢板。
6. 探头线、水盆、酒精、脱脂棉、纵波耦合剂 (SF-CORES 医用超声耦合剂)、横波耦合剂 (Olympus SWC-2 横波耦合剂)。
7. 天平 (BSM620.3 电子天平)、游标卡尺 (桂林量具刃具有限责任公司制 0-150mm 游标卡尺, 50 分度)、钢制直尺 (Stanley 35-345-23)。

3 实验测量方法与测量过程

3.1 超声波法测量材料动态力学性能的方法

超声波是指振动频率大于 20kHz 以上的声波。由于其每秒的振动次数 (频率) 甚高, 超出了人耳听觉的上限 (20kHz), 人们将这种听不见的声波叫做超声波。超声波和可闻声波本质上是一致的, 都是一种机械振动, 通常以波的方式在弹性介质中传播。其不同点是超声频率高, 波长短, 在一定距离内具有良好的指向性。超声波的波速取决于弹性介质的力学性质。超声波在传播过程中会由于材料非均匀性的散射和吸收导致能量的衰减, 并且, 衰减会随着频率的升高而快速增加。

超声波在材料性能测试、厚度测试及无损检测中具有广泛的应用。常用的脉冲-回波方法的基本原理如图 1 所示, 它是利用超声传感器发射并接收反射回波的信号。如图 1(a) 所示, 当采用超声传感器发射一个脉冲信号, 经过试件的上下表面多次反射, 可得到如图 1(b) 所示的回波信号。

通过对实验测得的数据进行处理, 我们可以获得超声波在材料中的传播速度、衰减系数以及材料常数等一系列物理量, 同时能够进行材料缺陷的检测。以下是各部分的详细介绍。

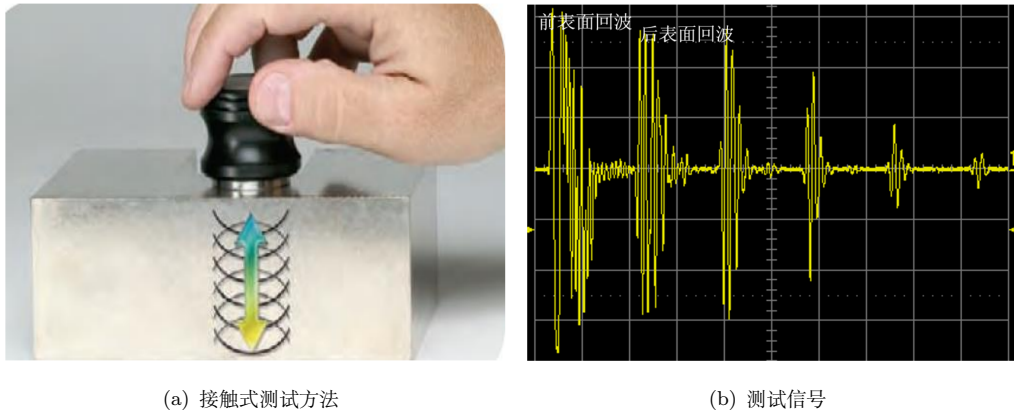


图 1: 脉冲-回波方法

1. 波速

根据图 1(b) 得到的两个回波峰值之间的时间差 Δt ，并已知超声波传播路程 ΔL 为试件厚度 d 的两倍，可计算出超声波的传播速度

$$C = \frac{2d}{\Delta t}. \quad (1)$$

2. 衰减系数

从图 1(b) 可以得到在介质中传播的超声平面波的声压和声强振幅随传播距离 x 的增加呈指数衰减，即

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x}, \quad (2a)$$

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x}. \quad (2b)$$

其中 P 为声压， I 为声强， x 为声波传播的距离， α 为材料的衰减系数（单位为 NP/cm）。根据图 1(b) 得到的多次反射的回波信号，可以计算材料的衰减系数 α 。对于任意两个回波 n, m ($n > m$)，由上式，通过其峰值之间的幅值比可得到

$$\alpha = \frac{1}{2(n-m)d} \ln\left(\frac{P_m}{P_n}\right) \quad (\text{NP/cm}). \quad (3)$$

实际测量中常采用 dB/cm 为单位，则衰减系数为

$$\alpha = \frac{20}{2(n-m)d} \log_{10} \frac{|P_m|}{|P_n|} \quad (\text{dB/cm}). \quad (4)$$

两种单位之间的换算关系为 $1\text{NP/cm} = 8.69\text{dB/cm}$ 。

3. 材料常数（弹性模量和泊松比）

根据无限弹性固体介质中波的传播特性，可得

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (5a)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (5b)$$

通过测得材料中纵波和横波的波速 C_L 和 C_S ，即可得到材料的弹性模量和泊松比，即

$$\nu = \frac{1 - 2(C_S/C_L)^2}{2 - 2(C_S/C_L)^2}, \quad (6a)$$

$$E = 2\rho C_S^2(1 + \nu). \quad (6b)$$

4. 材料缺陷的检测

如果我们知道试件的厚度，则可以通过测试波传播的时间差 Δt 得到波速；反之，如果知道材料的波速，可以通过测试前后表面波传播的时间差 Δt 确定试件的厚度，以及试件内部损伤的大小及位置。如图 2 所示，当超声波传播路径上无缺陷时，在探测信号入射波与底部回波之间不存在缺陷反射回波，如蓝色信号。当超声波传播路径上存在缺陷，且缺陷界面小于探头晶片面积时，则同时存在缺陷反射回波和底部回波。当内部缺陷比较严重时，缺陷界面反射回波往往比较强，导致试件后表面无回波信号。因此，根据这一超声波反射回波特点我们可以对试件内部的缺陷位置及大小进行探测。

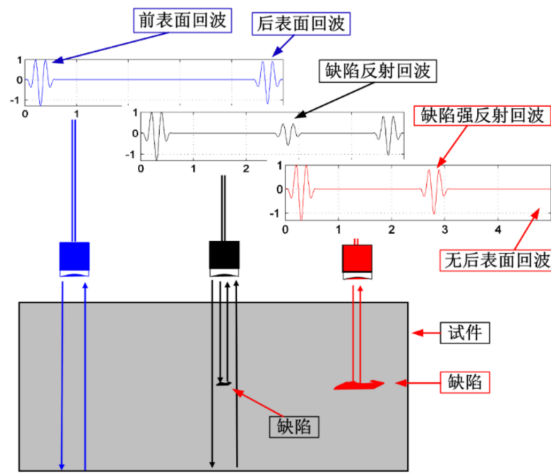


图 2: 有缺陷存在时波形示意图

超声波实验测试系统如图 3 所示。超声脉冲发射接收仪产生脉冲信号，通过超声探头转换为超声纵波或横波垂直入射到被测试件。同一探头接受试件底面反射的回波并转换为电信号，并采用数字存储示波器记录接收的信号进行分析。根据实验的需要，可分别采用水浸式或接触式测试方式。超声纵波的测试两种方式都可以选择，只是需要选择对应的探头。超声横波探头只能采用接触式测量。

3.2 超声波实验测量的过程

1. 材料密度测量

多次测量试件的尺寸、质量，取其平均值，从而确定钢、铝和有机玻璃的密度。

2. 材料纵波波速和衰减系数测量

(1) 实验准备：准备好装有足够的水的水盆，酒精，脱脂棉等，并将水浸式超声探头架设在支架台上并探入水中。采用图 3 水浸式测量方式连接线路。

(2) 超声脉冲发射接收仪参数设置。

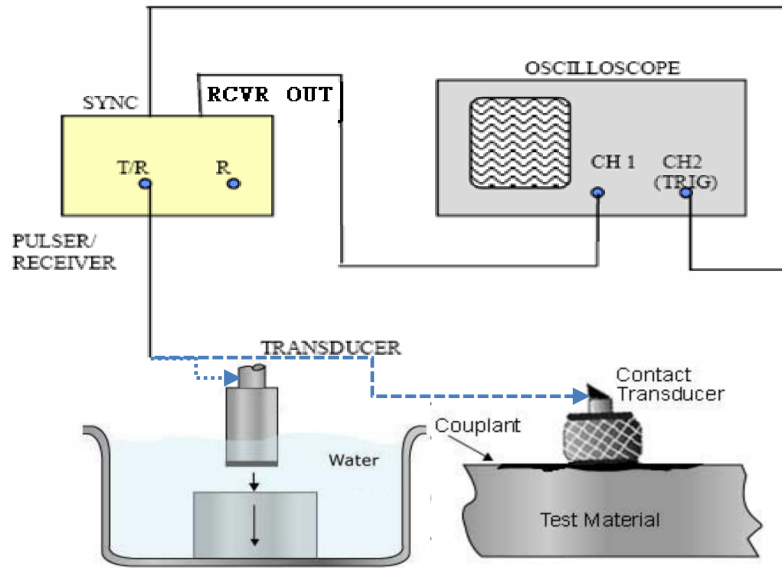


图 3: 实验测试系统示意图

- (3) 调节探头角度，使其垂直入射，测试超声波传播情况。测量探头距离盆底的距离，以便计算水的波速。
- (4) 数字存储示波器参数设置。通过数字存储示波器采集超声探头接收的信号，并将数据及图像保存下来。
- (5) 纵波波速测量。将钢、铝和有机玻璃分别放置于探头下，调整位置，进行测量。
- (6) 数据分析。并重复步骤 (2) – (5)，分析波形数据，得到所测材料的波速，并从多次反射峰值测超声波的衰减系数。
- (7) 不同频率超声探头的纵波波速测量。采用纵波耦合剂接触式的测量方式，分别采用 5MHz 和 10MHz 的超声探头进行钢和有机玻璃的纵波波速测量。
- (8) 不同频率超声探头的纵波衰减系数测量。采用纵波耦合剂接触式的测量方式，分别采用 5MHz 和 10MHz 的超声探头进行有机玻璃纵波的衰减系数测量。

3. 材料横波波速测量

采用图 3 接触式测量方式连接线路，用酒精棉擦拭试件表面，将横波耦合剂涂于超声探头上，然后将横波超声探头与试件紧密接触，待信号稳定后，采集波形信号，并存储相应波形数据。所测试件分别为钢、铝和有机玻璃。

4. 钢板焊缝缺陷超声探测

利用超声波脉冲回波模式，分别采用纵波超声直探头从钢板侧面垂直入射或斜探头从钢板表面斜入射的方式，对含焊缝的钢板进行 B-Scan 超声探测，分析焊缝缺陷的位置及大小。

- (1) 根据图 4 所示建立探测系统，选择探测模式，调节仪器参数。
- (2) 在钢板侧面和表面画好探测路径并标好刻度，涂上纵波耦合剂。
- (3) 在已画好的探测路径上每间隔 0.5cm 或 1cm 进行一次超声探测，利用示波器和计算机进行信号数据的采集存储。
- (4) 通过分析所采集的信号，判断焊缝缺陷的位置和大小。

(5) 在钢板侧面纵波探测结果的基础上，在表面沿着与焊缝平行的方向，采用斜探头进行焊缝损伤的再次检测，并与前面的结果进行比较、分析。

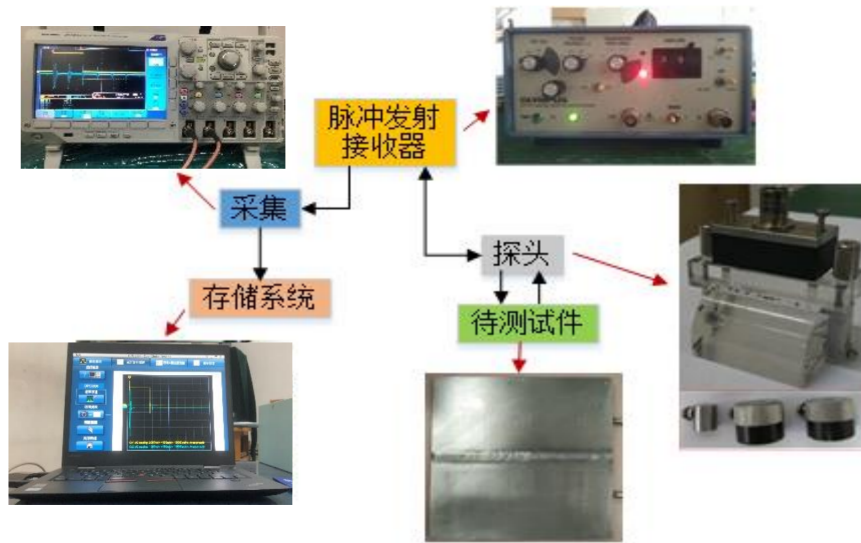


图 4: 钢板焊缝损伤检测

4 脉冲-回波法测量波速和衰减系数、弹性模量和泊松比

4.1 材料密度测量

根据实验原理，我们要测得三种试件的材料特性，我们需要先得到其密度，我们分别多次测量材料质量 m 和几何参数，所得结果如表 1 所示。同时，我们分析实验数据的不确定度，A 类不确定度的计算方法为

$$u_A(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

B 类不确定度来自仪器误差

$$u_B(X) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

合成不确定度为

$$u(X) = \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)}. \quad (9)$$

由此可以计算得，钢的平均密度为

$$\bar{\rho}_{st} = \frac{4\bar{m}_{st}}{\pi \bar{d}_{st}^2 \bar{h}_{st}} = 7.780 \text{g/cm}^3, \quad (10)$$

不确定度

$$u(\rho_{st}) = \bar{\rho}_{st} \times \sqrt{\left[\frac{u(m_{st})}{\bar{m}_{st}}\right]^2 + \left[\frac{2u(d_{st})}{\bar{d}_{st}}\right]^2 + \left[\frac{u(h_{st})}{\bar{h}_{st}}\right]^2} = 0.005 \text{g/cm}^3, \quad (11)$$

测量对象	测量 1	测量 2	测量 3	均值	u_A	u_B	u	
钢	质量 (g)	81.940	81.940	81.941	81.940	0.00041	0.00058	0.00071
	直径 (mm)	29.82	29.80	29.80	29.81	0.0071	0.001	0.0072
	厚度 (mm)	15.08	15.10	15.10	15.09	0.0071	0.001	0.0072
铝	质量 (g)	29.472	29.472	29.471	29.472	0.00041	0.00058	0.00071
	直径 (mm)	30.06	30.10	30.10	30.09	0.014	0.001	0.014
	厚度 (mm)	15.10	15.02	15.08	15.07	0.024	0.001	0.024
有机玻璃	质量 (g)	129.230	129.230	129.225	129.228	0.0017	0.00058	0.0018
	长度 (mm)	97.46	97.52	97.54	97.51	0.024	0.001	0.024
	宽度 (mm)	80.20	80.14	80.30	80.21	0.047	0.001	0.047
	厚度 (mm)	14.20	14.22	14.16	14.19	0.018	0.001	0.018

表 1: 试件质量和尺寸测量结果

因此钢的密度测量结果为

$$\rho_{st} = \bar{\rho}_{st} \pm u(\rho_{st}) = (7.780 \pm 0.005)\text{g/cm}^3. \quad (12)$$

同理，铝的平均密度为

$$\bar{\rho}_{al} = \frac{4\bar{m}_{al}}{\pi\bar{d}_{al}^2\bar{h}_{al}} = 2.750\text{g/cm}^3, \quad (13)$$

不确定度

$$u(\rho_{al}) = \bar{\rho}_{al} \times \sqrt{\left[\frac{u(m_{al})}{\bar{m}_{al}}\right]^2 + \left[\frac{2u(d_{al})}{\bar{d}_{al}}\right]^2 + \left[\frac{u(h_{al})}{\bar{h}_{al}}\right]^2} = 0.005\text{g/cm}^3, \quad (14)$$

因此铝的密度测量结果为

$$\rho_{al} = \bar{\rho}_{al} \pm u(\rho_{al}) = (2.750 \pm 0.005)\text{g/cm}^3. \quad (15)$$

同理，有机玻璃的平均密度为

$$\bar{\rho}_{og} = \frac{\bar{m}_{og}}{\bar{a}_{og}\bar{b}_{og}\bar{h}_{og}} = 1.164\text{g/cm}^3, \quad (16)$$

不确定度

$$u(\rho_{og}) = \bar{\rho}_{og} \times \sqrt{\left[\frac{u(m_{og})}{\bar{m}_{og}}\right]^2 + \left[\frac{u(a_{og})}{\bar{a}_{og}}\right]^2 + \left[\frac{u(b_{og})}{\bar{b}_{og}}\right]^2 + \left[\frac{u(h_{og})}{\bar{h}_{og}}\right]^2} = 0.002\text{g/cm}^3, \quad (17)$$

因此有机玻璃的密度测量结果为

$$\rho_{og} = \bar{\rho}_{og} \pm u(\rho_{og}) = (1.164 \pm 0.002)\text{g/cm}^3. \quad (18)$$

4.2 水的纵波波速

我们将频率为 5MHz 的水浸式超声探头浸入水中并调整角度，使得超声探头垂直入射，选用合适大小的试件固定水浸式探头和盆底的距离，之后取出试件，测量试件的厚度，即为探头与底部的距离 h 。并根据数字存储示波器得到的波形，测量得到入射与反射波之间的时间差 Δt ，根据式 1，我们可以计算得到水中的波速。其中 h 的测量数据如表 2 所示。 Δt 数据如图 5 所示。

测量对象	测量 1	测量 2	测量 3	均值	u_A	u_B	u
距离 (mm)	41.38	41.28	41.50	41.39	0.097	0.001	0.097

表 2: 测量水中纵波波速时探头与水池底部距离

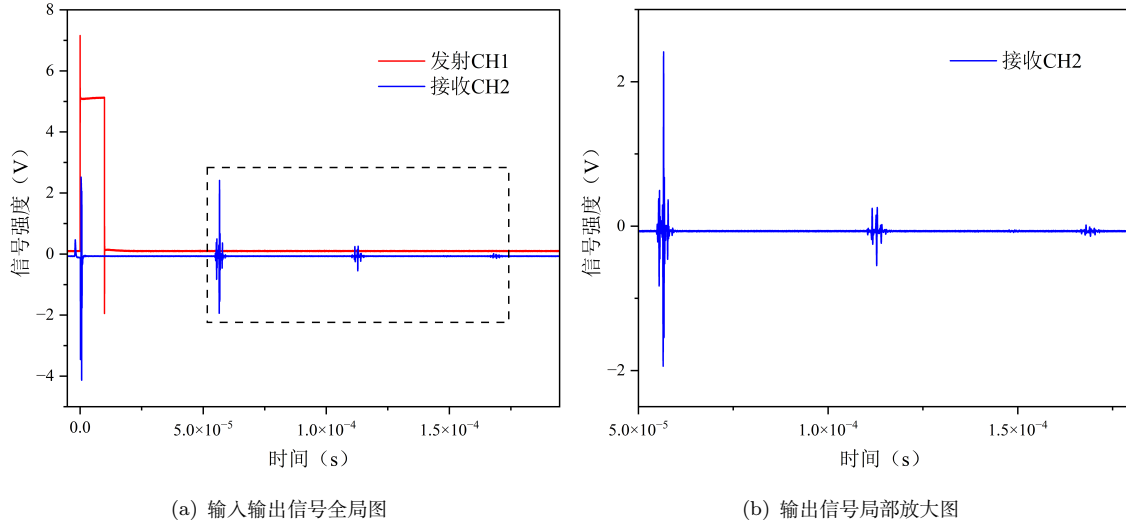


图 5: 5MHz 测量水中纵波波速时信号图

通过将探头接收的信号可视化后判断波峰的时间差。根据水浸探头接收到的图像，可以得到两个波峰之间的时间差如表 3 所示。通过查阅该型号的示波器的相关参数，示波器本身的精度极高，因此来自仪器误差的 B 类不确定度为 $u_B = 0$ 。

于是水中纵波的平均波速为

$$\bar{C}_{\text{water}} = \frac{2h}{\Delta t} = \frac{2 \times 41.38 \times 10^{-3}}{5.617 \times 10^{-5}} \text{m/s} = 1473.38 \text{m/s}, \quad (19)$$

不确定度

$$u(C_{\text{water}}) = \bar{C}_{\text{water}} \times \sqrt{\left[\frac{u(d)}{d}\right]^2 + \left[\frac{u(\Delta t)}{\Delta t}\right]^2} = 5.43 \text{m/s}, \quad (20)$$

则水中波速的测量结果为

$$C_{\text{water}} = \bar{C}_{\text{water}} \pm u(C_{\text{water}}) = (1473.38 \pm 5.43) \text{m/s}. \quad (21)$$

通过查阅资料得知超声波在常温水中的波速为 $C = 1480 \text{m/s}$ ，实验测量得到的平均值与实际值的相对误差为

$$\Delta = \frac{|C_{\text{water}} - C|}{C} \times 100\% = 0.45\%. \quad (22)$$

误差产生的原因可能是在测量探头距盆底的距离时无法保证游标卡尺测量的是两者的垂直距离，并且在取出固定的参照试件时，会导致探头发生垂直微小的垂直方向移动，进而产生一定的误差。但是误差也在可以接受的范围之内，测量结果较为准确。

测量对象	测量 1	测量 2	均值	u_A	u_B	u
Δt (μs)	56.33	56.01	56.17	0.16	0	0.16

表 3: 5MHz 测量水中纵波波速时波峰之间的时间差

4.3 水浸式测量三种材料的纵波波速

利用频率为 5MHz 的水浸式超声探头测量纵波在钢、铝、有机玻璃中的传播速度。将试件依次放入水中，调整水浸探头的方向，使探头垂直于试件表面，待示波器上的信号稳定后记录并导出数据。数字存储示波器所记录的波形数据以及用于计算波速的数据区域分别如图 6、7、8 所示。通过对图中数据进行处理，所得波峰时间差如表 4 所示。

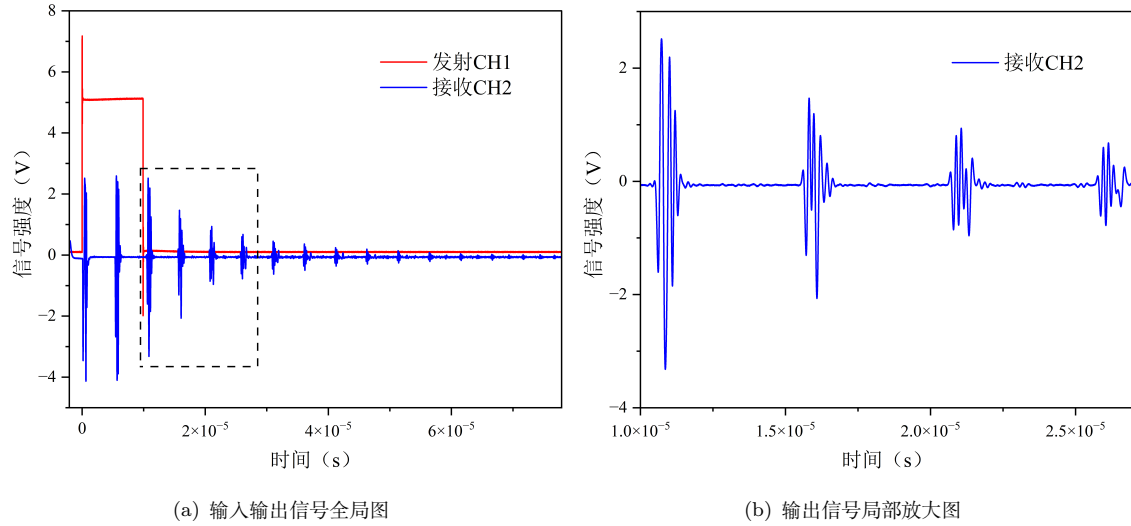


图 6: 5MHz 水浸式测量钢试件纵波波速时信号图

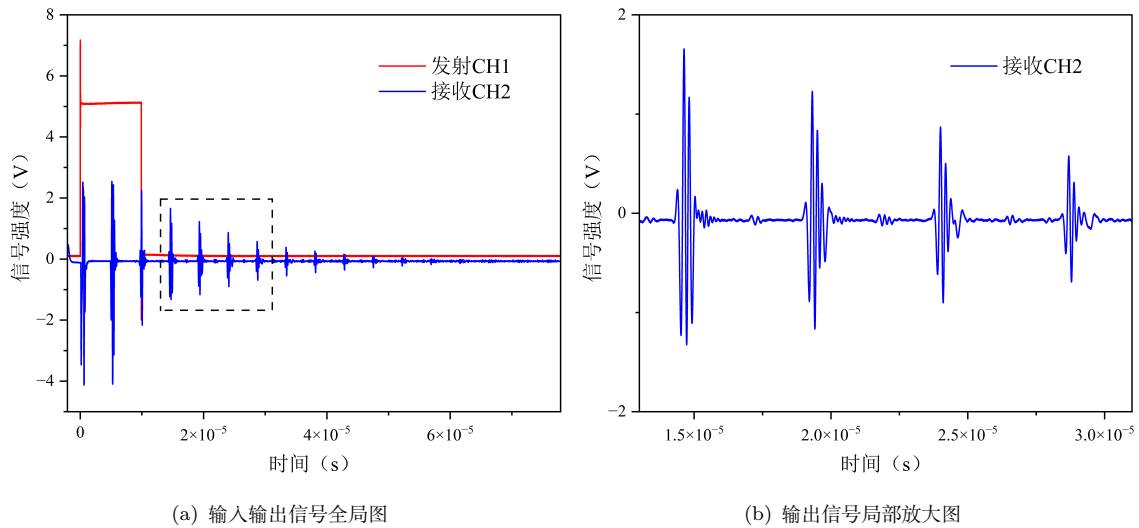


图 7: 5MHz 水浸式测量铝试件纵波波速时信号图

通过表 1 与表 4，计算得到水浸法得到的 5MHz 纵波在三种介质中的波速分别为

$$C_{Lst} = \bar{C}_{Lst} \pm u(C_{Lst}) = (5943.28 \pm 9.07)\text{m/s}, \quad (23a)$$

$$C_{Lal} = \bar{C}_{Lal} \pm u(C_{Lal}) = (6431.92 \pm 10.44)\text{m/s}, \quad (23b)$$

$$C_{Log} = \bar{C}_{Log} \pm u(C_{Log}) = (2662.29 \pm 4.44)\text{m/s}. \quad (23c)$$

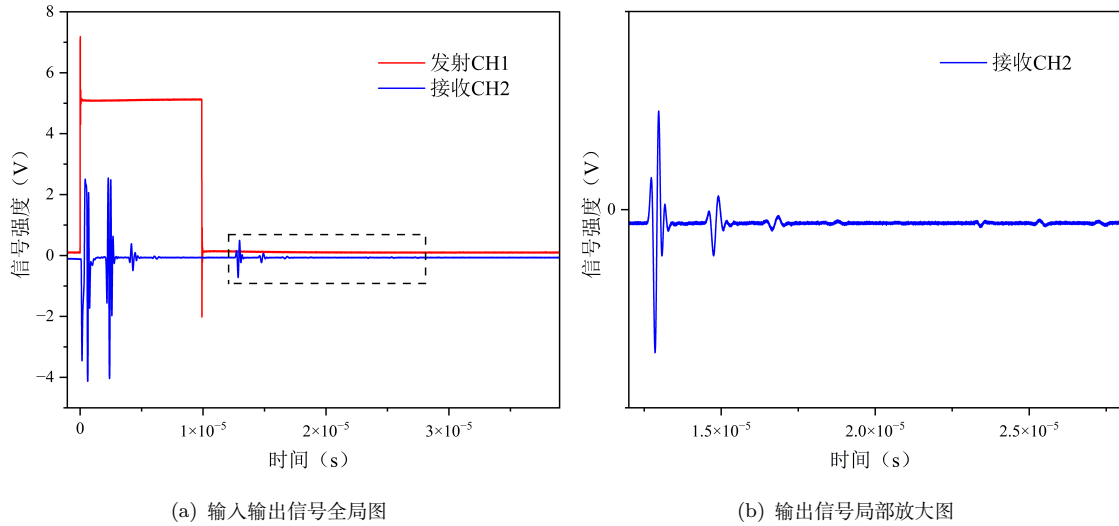


图 8: 5MHz 水浸式测量有机玻璃试件纵波波速时信号图

测量对象	测量 1	测量 2	测量 3	均值	u_A	u_B	u
钢 Δt (μs)	5.093	5.070	5.072	5.078	7.360×10^{-3}	0	7.360×10^{-3}
铝 Δt (μs)	4.686	4.683	4.688	4.686	1.453×10^{-3}	0	1.453×10^{-3}
有机玻璃 Δt (μs)	10.64	10.66	10.68	10.66	1.155×10^{-2}	0	1.155×10^{-2}

表 4: 5MHz 水浸式测量三种介质中纵波波峰时间差

通过查阅相关资料，得到钢的纵波波速为 5900m/s，铝的纵波波速为 6300m/s，有机玻璃的纵波波速为 2730m/s，误差

$$\Delta_{st} = \frac{|C_{st} - C|}{C} \times 100\% = 0.73\%, \quad (24a)$$

$$\Delta_{al} = \frac{|C_{al} - C|}{C} \times 100\% = 2.09\%, \quad (24b)$$

$$\Delta_{og} = \frac{|C_{og} - C|}{C} \times 100\% = 2.48\%, \quad (24c)$$

其中有机玻璃的波速误差略大，可能源于材料本身的非均匀性。并且有机玻璃的信号强度整体偏弱，在判断波峰之间时间差时也会产生一定的误差，在测量波速时可以通过增加增益效益来解决这一问题。总体而言，误差都在可接受范围以内。

4.4 水浸式测量三种材料的衰减系数

利用试件上下表面反射波振幅的关系，可以得到纵波在不同介质中的衰减系数。同样基于图 6、7、8，我们可以得到不同时间下的波峰数值，在这里我们认为波峰幅值的测量是准确的，其不确定度不纳入我们的考虑范围。将所得波峰幅值数据代入公式 4，结合表 1 中的数据，所得结果如表 5 所示。

可以得到纵波在钢、铝、有机玻璃中的平均耗散系数分别为

$$\alpha_{Lst} = \bar{\alpha}_{Lst} \pm u(\alpha_{Lst}) = (1.377 \pm 0.0007)\text{dB/cm}, \quad (25a)$$

$$\alpha_{Lal} = \bar{\alpha}_{Lal} \pm u(\alpha_{Lal}) = (1.015 \pm 0.0016)\text{dB/cm}, \quad (25b)$$

$$\alpha_{Log} = \bar{\alpha}_{Log} \pm u(\alpha_{Log}) = (6.372 \pm 0.0080)\text{dB/cm}. \quad (25c)$$

测量对象	P_m (V)	P_n (V)	$\bar{\alpha}$ (dB/cm)	$u(\alpha)$ (dB/cm)
钢	2.5136 ($m = 1$)	0.5986 ($n = 4$)	1.377	0.0007
铝	1.6569 ($m = 1$)	0.5758 ($n = 4$)	1.015	0.0016
有机玻璃	0.7219 ($m = 1$)	0.0900 ($n = 2$)	6.372	0.0080

表 5: 5MHz 水浸式测量三种介质中纵波波峰以及衰减系数

其中有机玻璃衰减系数较高，表明纵波在有机玻璃材料中的能量损失更为显著。但由于有机玻璃的信号强度整体偏弱，在测量与计算时也会产生较大的误差。

4.5 接触式测量三种材料的横波波速

使用频率为 5MHz 的横波超声探头进行接触式测量，数字存储示波器所记录的波形数据以及用于计算波速的数据区域分别如图 9、10、11所示，对于三种材料均增加了 10dB 的增益效益。通过对图中数据进行处理，所得波峰时间差如表 6所示。

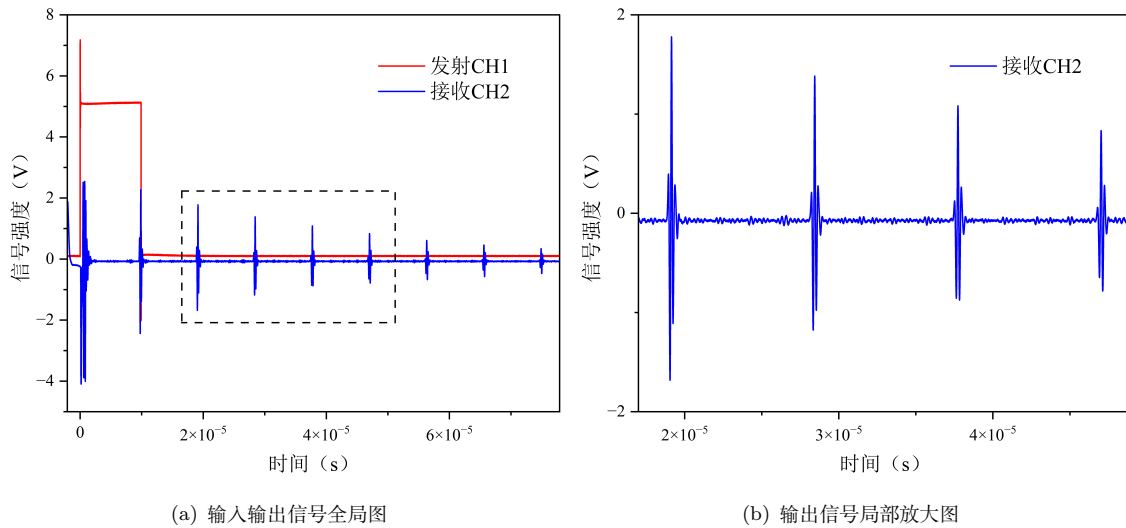


图 9: 5MHz 接触式测量钢试件横波波速时信号图 (10dB gain)

测量对象	测量 1	测量 2	测量 3	均值	u_A	u_B	u
钢 Δt (μs)	9.292	9.295	9.288	9.292	2.028×10^{-3}	0	2.028×10^{-3}
铝 Δt (μs)	9.607	9.608	9.606	9.607	5.774×10^{-4}	0	5.774×10^{-4}
有机玻璃 Δt (μs)	20.900	-	-	20.900	-	-	-

表 6: 5MHz 接触式测量三种介质中横波波峰时间差

通过表 1与表 6，计算得到接触法得到的 5MHz 横波在三种介质中的波速分别为

$$C_{Sst} = \bar{C}_{Sst} \pm u(C_{Sst}) = (3247.96 \pm 1.70)m/s, \quad (26a)$$

$$C_{Sal} = \bar{C}_{Sal} \pm u(C_{Sal}) = (3137.30 \pm 5.00)m/s, \quad (26b)$$

$$C_{Sog} = \bar{C}_{Sog} \pm u(C_{Sog}) = (1357.89 \pm 4.44)m/s. \quad (26c)$$

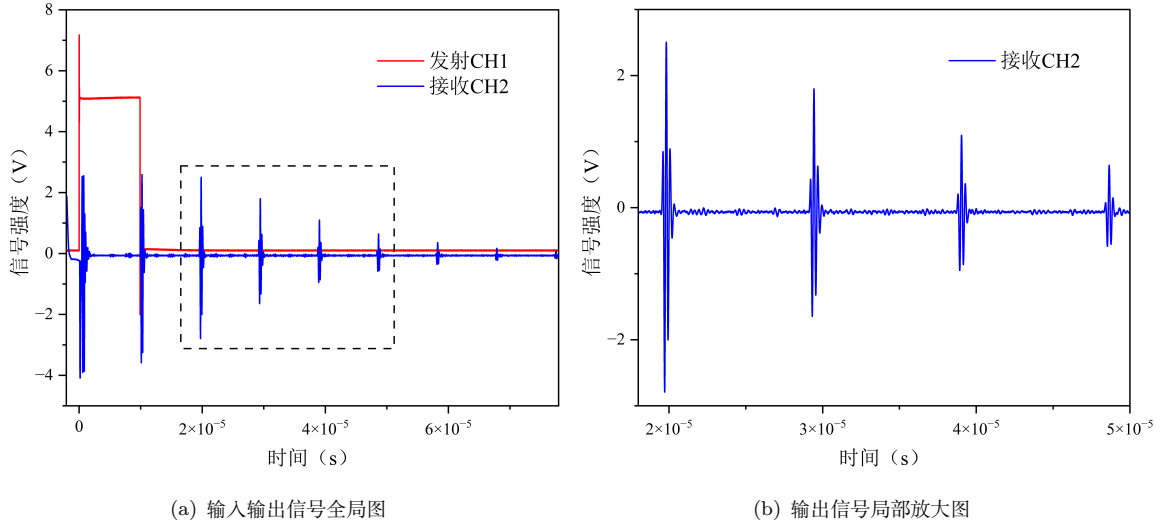


图 10: 5MHz 接触式测量铝试件横波波速时信号图 (10dB gain)

通过查阅相关资料，得到钢的横波波速为 3230m/s，铝的横波波速为 3080m/s，有机玻璃的横波波速为 1300m/s，误差

$$\Delta_{st} = \frac{|C_{st} - C|}{C} \times 100\% = 0.56\%, \quad (27a)$$

$$\Delta_{al} = \frac{|C_{al} - C|}{C} \times 100\% = 1.86\%, \quad (27b)$$

$$\Delta_{og} = \frac{|C_{og} - C|}{C} \times 100\% = 4.45\%, \quad (27c)$$

其中有机玻璃的波速误差略大，可能源于材料本身的非均匀性，以及探头与试件的贴合程度。并且在有机玻璃中，回波的能量较小，只能通过发射信号以内的接收波与第一个接受波进行计算速度，会产生一定的误差。在测量波速时候可以尝试增加增益效益来解决这一问题。

4.6 计算三种材料的材料常数

通过前面的小节计算，得到了三种材料中频率为 5MHz 的纵波与横波的波速，根据公式 6，可以计算得到材料常数。其中计算的不确定度计算方式如下。

$$u(\nu) = \sqrt{\left(\frac{\partial \nu}{\partial C_S}\right)^2 u^2(C_S) + \left(\frac{\partial \nu}{\partial C_L}\right)^2 u^2(C_L)} = \frac{\bar{C}_L \bar{C}_S}{(\bar{C}_L^2 - \bar{C}_S^2)^2} \sqrt{\bar{C}_L^2 u^2(C_S) + \bar{C}_S^2 u^2(C_L)}, \quad (28a)$$

$$u(E) = E \times \sqrt{\left[\frac{u(\rho)}{\bar{\rho}}\right]^2 + \left[\frac{2u(C_S)}{\bar{C}_S}\right]^2 + \left[\frac{u(\nu)}{1 + \nu}\right]^2}. \quad (28b)$$

代入数据得到

$$\nu_{st} = 0.2871 \pm 0.0003, \quad (29a)$$

$$\nu_{al} = 0.3439 \pm 0.0004, \quad (29b)$$

$$\nu_{og} = 0.3242 \pm 0.0006. \quad (29c)$$

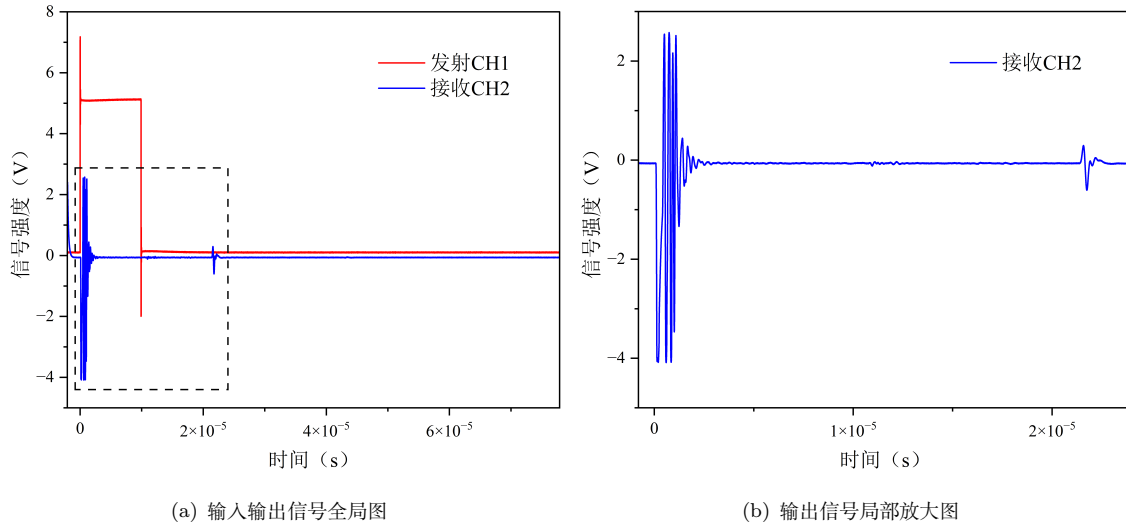


图 11: 5MHz 接触式测量有机玻璃试件横波波速时信号图 (10dB gain)

$$E_{st} = (211.27 \pm 0.30) \text{GPa}, \quad (30a)$$

$$E_{al} = (72.75 \pm 0.27) \text{GPa}, \quad (30b)$$

$$E_{og} = (5.68 \pm 0.02) \text{GPa}. \quad (30c)$$

过查阅资料发现钢的弹性模量为 207GPa, 泊松比为 0.29, 铝的弹性模量为 72GPa, 泊松比为 0.33, 有机玻璃的弹性模量为 3.16GPa, 泊松比为 0.32, 误差分别为

$$\Delta_{E_{st}} = \frac{|E_{st} - E|}{E} \times 100\% = 2.06\%, \quad (31a)$$

$$\Delta_{E_{al}} = \frac{|E_{al} - E|}{E} \times 100\% = 0.35\%, \quad (31b)$$

$$\Delta_{E_{og}} = \frac{|E_{og} - E|}{E} \times 100\% = 79.75\%, \quad (31c)$$

$$\Delta_{\nu_{st}} = \frac{|\nu_{st} - \nu|}{\nu} \times 100\% = 1.00\%, \quad (31d)$$

$$\Delta_{\nu_{al}} = \frac{|\nu_{al} - \nu|}{\nu} \times 100\% = 4.21\%, \quad (31e)$$

$$\Delta_{\nu_{og}} = \frac{|\nu_{og} - \nu|}{\nu} \times 100\% = 1.31\%, \quad (31f)$$

其中有机玻璃的弹性模量误差较大, 由于前面的有机玻璃纵波与横波误差都相对较小, 这种结果可能是由于有机玻璃的品类有很多种, 无法具体确定为哪种有机玻璃。

5 不同频率探头测量钢、有机玻璃纵波波速, 及有机玻璃的衰减系数

5.1 接触式测量钢和有机玻璃的纵波波速

使用频率为 5MHz 与 10MHz 的纵波超声探头进行接触式测量, 数字存储示波器所记录的波形数据以及用于计算波速的数据区域分别如图 12、13、14、15 所示。通过对图中数据进行处理, 所得波峰时间差如表 7 所示。

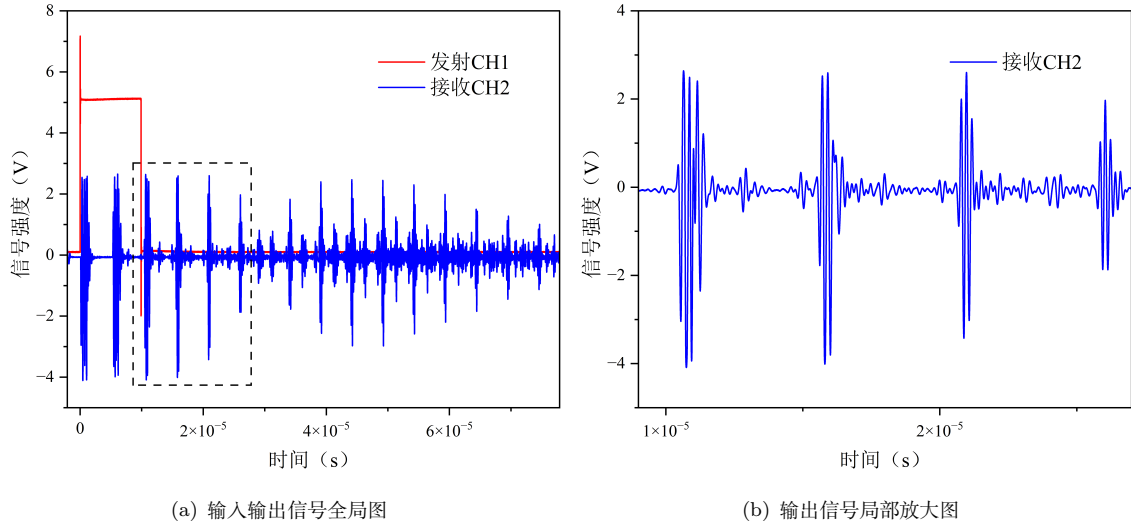


图 12: 5MHz 接触式测量钢试件纵波波速时信号图

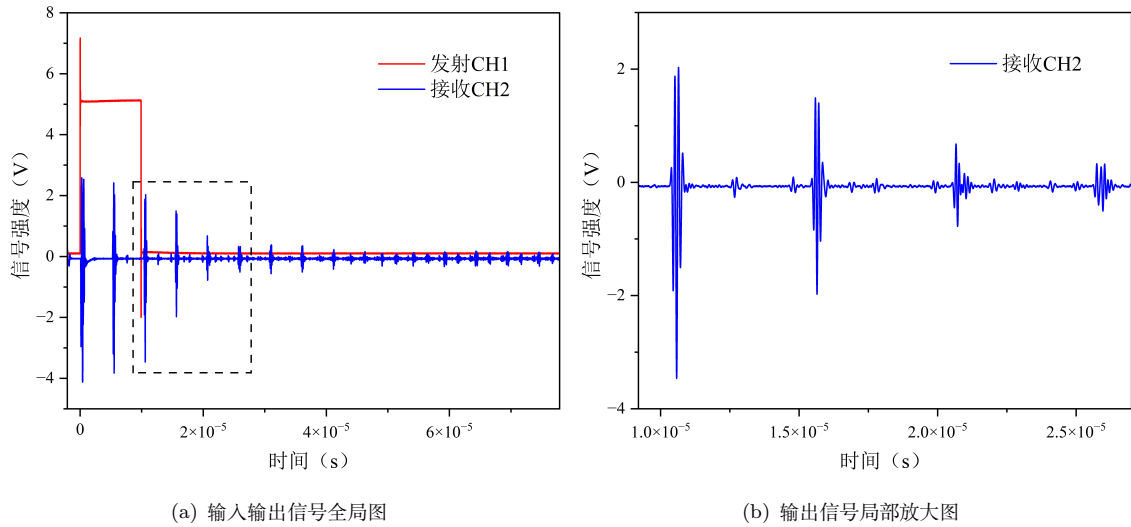


图 13: 10MHz 接触式测量钢试件纵波波速时信号图

通过表 1 与表 7，计算得到 5MHz 与 10MHz 接触式测量钢和有机玻璃中纵波的波速分别为

$$C_{Lst5MHz} = \bar{C}_{Lst5MHz} \pm u(C_{Lst5MHz}) = (5966.79 \pm 7.64)\text{m/s}, \quad (32a)$$

$$C_{Lst10MHz} = \bar{C}_{Lst10MHz} \pm u(C_{Lst10MHz}) = (5945.63 \pm 5.26)\text{m/s}, \quad (32b)$$

$$C_{Log5MHz} = \bar{C}_{Log5MHz} \pm u(C_{Log5MHz}) = (2708.02 \pm 3.44)\text{m/s}, \quad (32c)$$

$$C_{Log10MHz} = \bar{C}_{Log10MHz} \pm u(C_{Log10MHz}) = (2686.42 \pm 3.41)\text{m/s}. \quad (32d)$$

在本节中测试所得结果与通过水浸法得到的速度式 23 相比，结果相差很小，两种频率的探头对于纵波波速的测量结果影响不大，但相比之下高频的测量会有更少的杂波，能获得更高的测量精度。总体而言，通过不同方法测得的纵波速度是准确的。

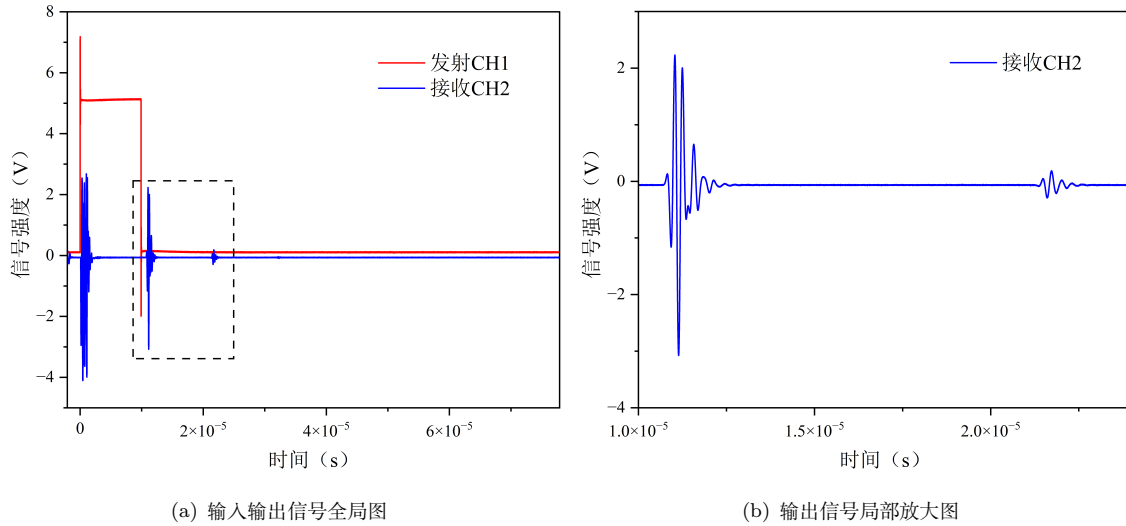


图 14: 5MHz 接触式测量有机玻璃试件纵波波速时信号图

测量对象	频率	测量 1	测量 2	测量 3	均值	u_A	u_B	u
钢 Δt (μs)	5MHz	5.046	5.061	5.066	5.058	6.009×10^{-3}	0	6.009×10^{-3}
钢 Δt (μs)	10MHz	5.069	5.077	5.082	5.076	3.786×10^{-3}	0	3.786×10^{-3}
有机玻璃 Δt (μs)	5MHz	10.48	-	-	10.48	-	-	-
有机玻璃 Δt (μs)	10MHz	10.58	-	-	10.58	-	-	-

表 7: 5MHz 与 10MHz 接触式测量钢和有机玻璃中纵波波峰时间差

5.2 接触式测量有机玻璃纵波的衰减系数

利用试件上下表面反射波振幅的关系,可以得到纵波在不同介质中的衰减系数。同样基于图 14、15,我们可以得到不同时间下的波峰数值,在这里我们认为波峰幅值的测量是准确的,其不确定度不纳入我们的考虑范围。将所得波峰幅值数据代入公式 4,结合表 1 中的数据,所得结果如表 8 所示。

测量对象及频率	P_m (V)	P_n (V)	$\bar{\alpha}$ (dB/cm)	$u(\alpha)$ (dB/cm)
有机玻璃 5MHz	2.2306 ($m = 1$)	0.1834 ($n = 2$)	7.646	0.0097
有机玻璃 10MHz	0.4600 ($m = 1$)	0.0389 ($n = 2$)	7.560	0.0096

表 8: 5MHz 与 10MHz 接触式测量有机玻璃中纵波波峰以及衰减系数

可以得到 5MHz 与 10MHz 纵波在有机玻璃中的平均耗散系数分别为

$$\alpha_{\text{Log5MHz}} = \bar{\alpha}_{\text{Log5MHz}} \pm u(\alpha_{\text{Log5MHz}}) = (7.646 \pm 0.0097)\text{dB/cm}, \quad (33a)$$

$$\alpha_{\text{Log10MHz}} = \bar{\alpha}_{\text{Log10MHz}} \pm u(\alpha_{\text{Log10MHz}}) = (7.560 \pm 0.0096)\text{dB/cm}. \quad (33b)$$

在本节中测试所得结果与通过水浸法得到的耗散系数式 25 相比,结果偏差较大,这是因为本身有机玻璃中的耗散效果很明显,而靠后的波峰能量非常小,就导致在取值时会产生较大误差;且靠后的波峰能量取值更容易受到非零的背景波的影响。在本文中均选择了发射波产生后的接受波,对于第二个接收波的能量就非常小了,因此选择合适的波峰也非常重要。并且得到的结果与认知的不相符,一般情况下,高频探头的耗散系数会更大一些,这也是因为能量太低的情况下计算产生的误

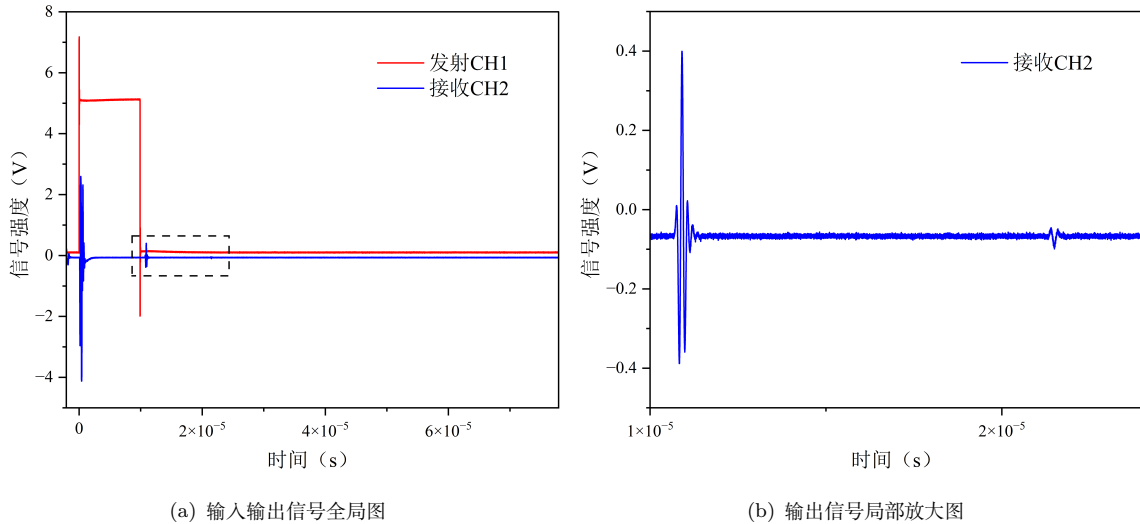


图 15: 10MHz 接触式测量有机玻璃试件纵波波速时信号图

差，也可能是因为耦合剂涂抹不均匀造成的。可以尝试合适的数据处理方式规避背景波的影响，以及选择更合适的波峰进行计算。

6 采用脉冲回波法确定焊缝钢板中缺陷的位置及大小

实验给出的钢板尺寸为 $30 \times 30\text{cm}^2$ ，首先在钢板的表面绘制网格线，便于探头扫描点的定位。在钢板表面涂抹适量纵波耦合剂，每次间隔 1cm 进行 B-Scan，为提高精度，当扫描结果显示存在缺陷时改为每隔 0.5cm 扫描一次并记录结果。

6.1 钢板侧面垂直入射

第一部分是从钢板没有焊缝的侧面采用 5MHz 纵波探头进行探测，此部分施加了 20dB 信号增益。当扫描路径上存在缺陷时，探头激励的超声波将提前被缺陷反射，在波形图中将产生一个异常的回波信号，如图 16(a) 所示。通过观察，缺陷反射一般发生在 $3 \times 10^{-5} - 9 \times 10^{-5}\text{s}$ ，因此在该区间取反射波形波峰和波谷对应信号强度绝对值中的最大值作为该位置缺陷大小的度量，将缺陷大小随位置的变化图线绘制在图 16(b) 中。由直探头测得的结果显示，钢板焊缝中在 $3 - 5.5\text{cm}$ 处存在一个长度约为 2.5cm 的较小的缺陷，而在 $14 - 24.5\text{cm}$ 处存在一个尺寸约为 10.5cm 的长缺陷，且长缺陷呈现出两边大，中间小的特征。

6.2 钢板表面斜入射

第二部分是在钢板有焊缝的表面采用 1MHz 斜探头进行探测，此部分施加了 30dB 信号增益，根据测试，当斜探头的倾角为 30 度时，示波器接收到的回波信号最为明显。信号如图 17(a) 所示。通过观察，缺陷反射一般发生在 $3.5 \times 10^{-5} - 8 \times 10^{-5}\text{s}$ ，因此在该区间取反射波形波峰和波谷对应信号强度绝对值中的最大值作为该位置缺陷大小的度量，将缺陷大小随位置的变化图线绘制在图 17(b) 中。由斜探头测得的结果显示，钢板焊缝中在 $3 - 6\text{cm}$ 处存在一个长度约为 3cm 的较小的缺陷，而在 $12 - 24\text{cm}$ 处存在一个尺寸约为 12cm 的长缺陷。且通过观察，可以发现两种探头在同一个裂纹

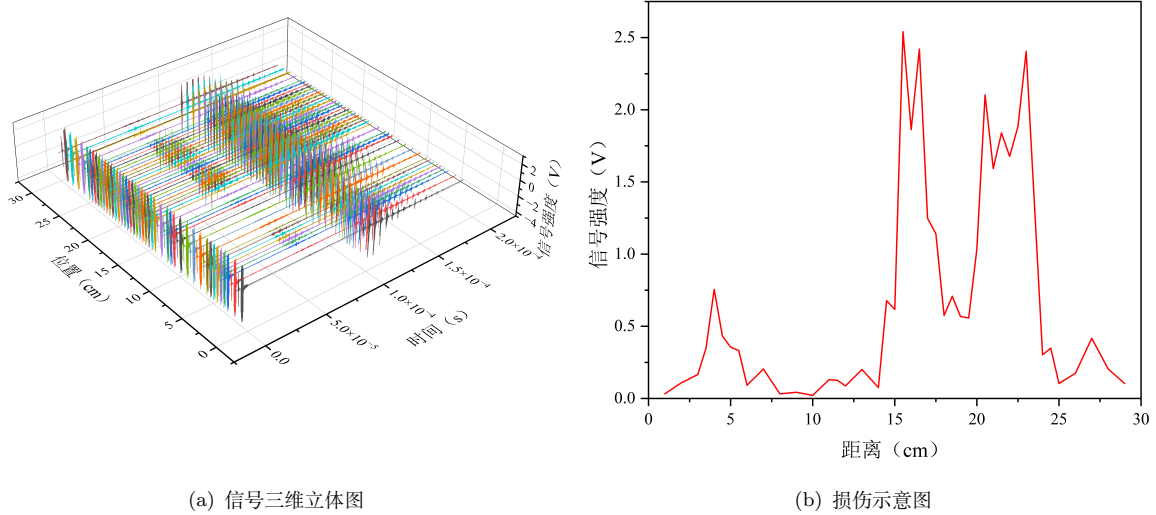


图 16: 5MHz 接触式纵波直探头测钢板焊缝 (20dB gain)

处所得的相对反射能量也是不同的，可根据这一点来大致推断出裂纹的形状。总体上，斜探头与直探头所得结果差距较小。

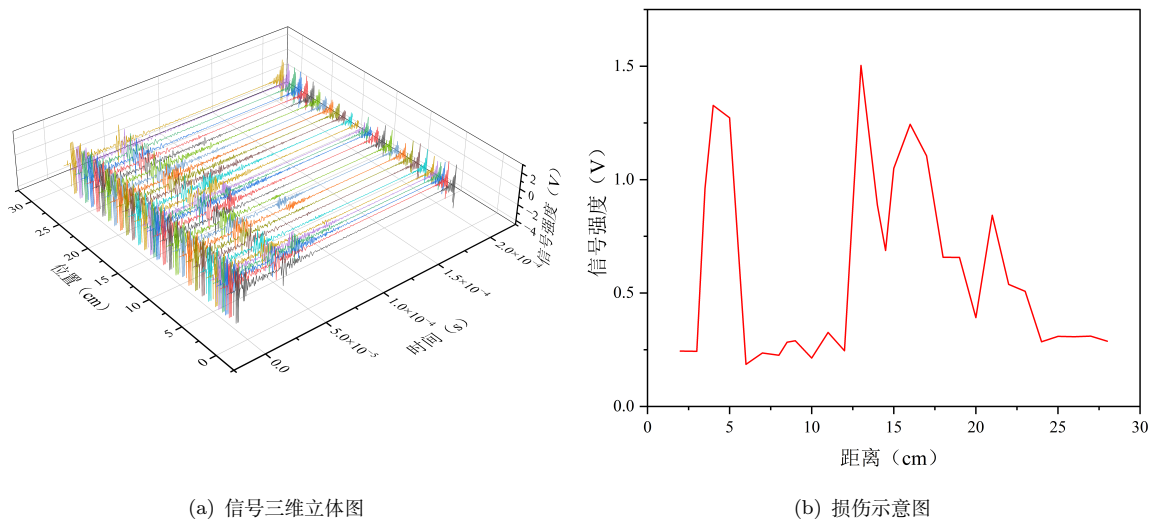


图 17: 1MHz 接触式纵波斜探头测钢板焊缝 (30dB gain)

7 结果分析与讨论

1. 在正文中处理数据时，蓝色文字部分对结果以及误差进行了分析和讨论，在此进行总结。在三种试件中，铝的纵波波速最大且纵波衰减系数最小，有机玻璃的纵波波速最小且纵波衰减系数最大，钢的横波波速最大，有机玻璃中横波速度最小。这是因为，声波在固体材料中传播时，其传播速度和能量传递效率与材料的微观结构密切相关。金属材料如钢和铝在微观上主要由紧密

排列的金属离子组成，周围有大量自由电子运动，这一结构赋予金属较高的密度和刚度。根据振动力学理论，较高的密度和刚度通常会提升声波传播速度，并增强能量传递效率。相比之下，有机高分子材料由于分子间作用力较弱、密度较低、刚度较小，其分子链具有较强的柔性，微观结构周期性弱。这导致波在传播过程中发生更大的能量耗散，使其宏观表现出更低的波速和更大的衰减系数。

2. 不同频率的超声探头各自具有优势与不足。频率较高的探头有利于发现更小的缺陷，且脉冲宽度小，分辨力高，有利于区分相邻缺陷。其波长短，则半扩散角小，声束指向性好，能量集中，有利于发现缺陷并对缺陷定位。但是也有一些不利因素，比如近场区长度大，对检测不利。且随着频率增加，衰减急剧增加。并且对材料的非均质性较为敏感。因此，探头的选择应当根据具体的实验需求，一般在保证检测灵敏度的前提下尽可能选用较低的频率。
3. 在使用水浸法测量有机玻璃时，波形图中出现了较多非上下表面的回波，推测为探头没有做到完全垂直入射，导致部分波经过水面和底面反射造成噪音。
4. 使用接触法测量金属试件时，所得的波形图中存在类似波包的结构，推测原因是理想探测的工况为无限大板，但是由于实验室使用的是圆柱体，可能在边界处发生了波的反射，甚至发生共振。
5. 在缺陷探测中，可以发现两种探头在同一个裂纹处所得的相对反射能量也是不同的，因为两者对于缺陷的探测角度也是不同的，可根据这一点来大致推断出裂纹的形状。总体上，斜探头与直探头所得结果差距较小。

8 数据误差分析与提高精度的方法

1. 在测量纵波与横波速度时候，其中有机玻璃的波速误差略大，可能源于材料本身的非均匀性，以及探头与试件的贴合程度。并且有机玻璃的信号强度整体偏弱，在判断波峰之间时间差时也会产生一定的误差，在测量波速时可以通过增加增益效益来解决这一问题。
2. 而通过不同的方法（水浸法与接触法）测量钢和有机玻璃的纵波速度，通过对比发现结果相差很小，两种频率的探头对于纵波波速的测量结果影响不大，但相比之下高频的测量会有更少的杂波，能获得更高的测量精度。而对于有机玻璃的衰减系数相差比较大，这是因为本身有机玻璃中的耗散效果很明显，而靠后的波峰能量非常小，就导致在取值时会产生较大误差；且靠后的波峰能量取值更容易受到非零的背景波的影响。在本文中均选择了发射波产生后的接受波，对于第二个接收波的能量就非常小了，因此选择合适的波峰也非常重要。并且得到的结果与认知的不相符，一般情况下，高频探头的耗散系数会更大一些，这也是因为能量太低的情况下计算产生的误差，也可能是因为耦合剂涂抹不均匀造成的。可以尝试合适的数据处理方式规避背景波的影响，以及选择更合适的波峰进行计算。
3. 此外，在进行衰减系数的计算时，本文采用的考虑了两个时刻的波峰进行计算的，因为考虑的点较少，容易产生较大的误差。为了提高精度，可以通过对原始公式取对数，进而拟合出直线，通过斜率计算衰减系数。
4. 剩余部分的误差主要来源于多次测量的读数误差以及仪器的固有误差，可以通过提高测量精度、优化实验操作来减小误差。