

A7 超声波无损探伤实验

【实验目的】

1. 了解超声波探伤仪的工作原理及使用方法；
2. 了解超声波的产生、特点及传播规律；
3. 理解超声波探头的指向性；
4. 掌握超声波探伤原理和定位方法。

【实验原理】

超声波是一种机械波，指的是频率高于 $2 \times 10^4 \text{Hz}$ 的声波。人耳听觉频率范围为 $20 \text{Hz} \sim 2 \times 10^4 \text{Hz}$ 。因而，超声波的频率下限比人类的听觉频率上限还要高，人类在自然状态下是无法听到或者感受到这种高频率声波的，因此这种高频率声波被命名为“超声波”。超声波频率高，波长短，因而具有很强的穿透力，传播中在相当长的距离内直线传播，方向性和束射性好。这些特殊性能使得超声波在许多方面都具有不可替代的作用，如医学诊断、海洋探查与开发以及材料的无损检测和探伤。本实验通过学习超声波的产生方法、传播规律和测试原理，应用超声波实验仪对超声波在测试方面的应用；通过对试块尺寸的测量和人工反射体的定位了解超声波在材料无损探伤方面的应用。

1. 超声波的产生及特点

某些固体物质，沿一定方向受压力（或拉力）作用时会产生变形，从而使物体内部正、负电荷中心不重合产生电偶极矩而极化。同时，在物体相对的表面上会出现正、负束缚电荷。当撤掉外力时，物体变形消失而回复原来的形状，极化也随之消失。这种现象称为压电效应。与材料的压电效应相反，如果对具有压电效应的材料在其极化方向上施加电场作用时，物体内部正、负电荷中心在电场作用下会发生偏移，从而使晶体发生变形，这种因施加电场而引起材料结构变形的现象，称为逆压电效应。因此，当交变电压作用于此类具有压电效应和逆压电效应的材料时，材料形变会发生周期性的变化，从而产生机械振动和机械波。压电陶瓷就是一类典型的具有压电效应的电子陶瓷材料，利用压电陶瓷的压电效应可实现电能和机械能的相互转换。因此，压电陶瓷是产生和检测超声波的常用材料。

本实验所使用的探头内超声波换能部分即为压电陶瓷材料。

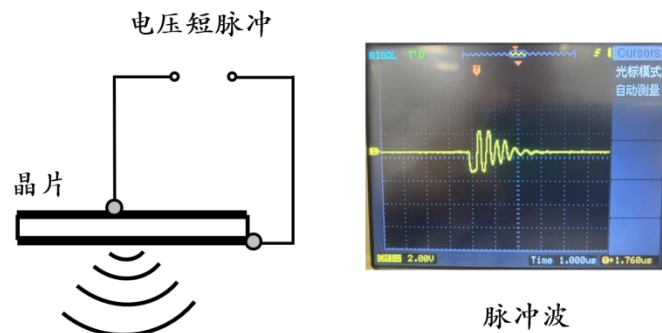


图1 脉冲超声波的产生

如图1所示，探头内用作实现电能机械能转换的压电陶瓷被加工成图中所示的薄片，在压电陶瓷薄片两外表面分别镀以金属层作为电极材料，形成一个压电晶片。如果对此压电晶片施加以一电压短脉冲，由于此压电陶瓷晶片具有逆压电效应，晶片自身将因受到电压作用而产生弹性变形而产生弹性振荡。弹性振荡的频率和压电晶片的声速、电极情况和晶片的厚度等因素有关。其中，压电晶片的厚度对振荡频率的影响最大，选择合适厚度的压电晶片可获得适当的频率范围从而产生超声波。随着压电晶片的振动，振动振幅因能量损耗和减少逐渐变小，所以振动发出的超声波为脉冲波，如图1所示。超声波经探头，通过耦合剂的作用降低空气与固态试块间的声阻抗差，使其可透过材料表面在其内部传播。传播过程中，遇到材料内部缺陷等反射体时，超声波与反射体会发生相互作用而散射，散射回波透过固体材料表面被同一探头及压电晶片接收，此时将发生正压电效应，发生弹性震荡的晶片会在晶片的两极产生电压并通过示波器放大显示在示波器屏幕上。

2. 超声换能器及其种类

实际应用中，把电能与其他不同形式能量进行转换的装置称为换能器。本实验中，超声波的产生是利用压电晶片的逆压电效应实现电能和机械能的转换，产生装置称为超声波换能器，即超声波探头。超声波探头可发射和接受高频脉冲超声波。超声波探头的结构通常由外壳、压电晶片，保护膜，匹配电感，吸收背衬等组成。超声弹性振动产生于压电晶片，探头通过保护膜或斜楔向外发射超声波；匹配电感可调整脉冲波波形，吸收背衬用来吸收晶片向背面发射的声波来减少杂波。根据超声探头的结构和适用情况，超声波探头可分为直探头、斜探头、

表面波探头和可变角探头等。实验中，常用的超声波探头有直探头和斜探头两种，其结构如图 2 所示。

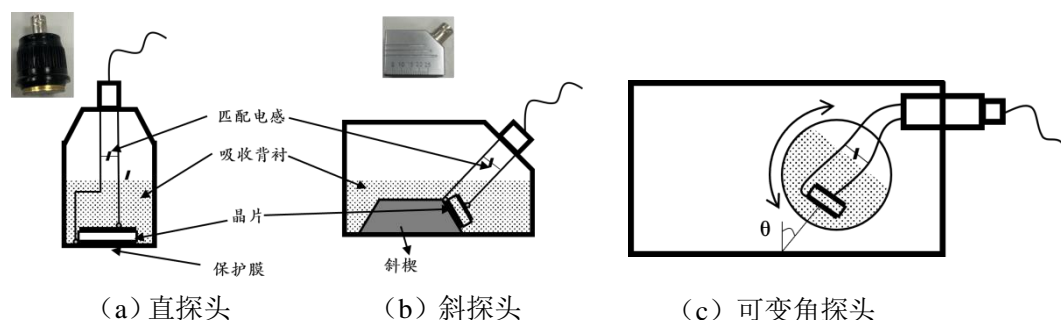


图 2 常用探头的基本结构

(1) 直探头

直探头又称为平探头，发射和接收超声纵波。直探头结构如图 2 (a) 所示，其结构主要由压电晶片、吸收背衬、匹配电感及保护膜组成。

(2) 斜探头

斜探头可产生横波。斜探头结构如图 2 (b) 所示。与直探头相比，其结构除压电晶片、吸收背衬、匹配电感及保护膜之外，斜探头内置有一有机玻璃材质的斜楔，超声波可通过斜楔倾斜地入射到检测的界面，同时斜楔可使多次反射的超声波不再返回晶片，以免出现杂波。在斜探头中，压电晶片产生纵波，纵波经斜楔实现超声波倾斜入射并折射到被测量工件内部。

(3) 可变角探头

可变角探头结构如图 2 (c) 所示。探头内探头芯可以旋转，以此来改变探头发射的超声波位向得到不同折射角的斜探头。当 $\theta=0$ 时，可变角探头相当于直探头。可变角探头可用于观察超声波传播中波型的转换。

3. 超声探头的指向性

超声波频率高，波长短（毫米数量级），在弹性介质中几乎成束状直线向前传播，具有很好的指向性，也称束射性。

超声探头的指向性与超声波的波长、频率和探头内压电晶片的尺寸有关。一般来讲，频率越高、波长越小，超声波探头发射能量的指向性越好；压电晶片尺寸越大，指向性越好。图 3 为超声波探头的指向性与压电晶片尺寸和超声波波长关系示意图，图中 r 为圆形压电晶片的半径， λ 为超声波的波长。

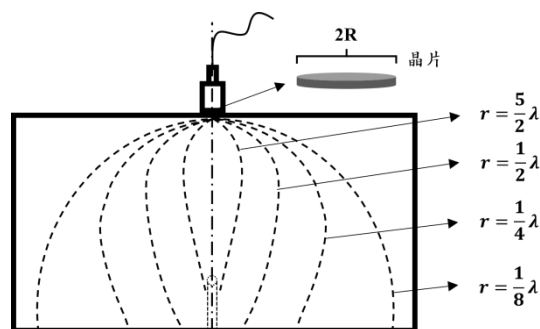


图3 超声探头的指向性

声束是超声波在介质中传播时能量所能达到的空间，也称为超声波的声场。声束扩散角的大小是表征超声波指向性的重要指标，可用公式表示为：

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

θ 为超声探头的声束扩散角， D 为探头内压电晶片的直径。由公式可以看出，对于确定的指向性要求的超声探头，采用较高的频率可相应使减小探头尺寸。因为频率高，波长越小，而波长和压电晶片的直径成正比。

在实际测量中，对于介质同一深度，超声波传播中心轴上能量最大，在此深度定义偏离声束中心轴且振幅降低为中心轴处振幅一半位置处为声束的边界。如图4所示，超声波传播中心轴上能量最大，在偏离中线先同一深度位置A、A'时，能量减小至中心轴处的一半。声束扩散角 θ 越小，超声探头的方指向性越好，测量中对反射体的定位精准度越高。

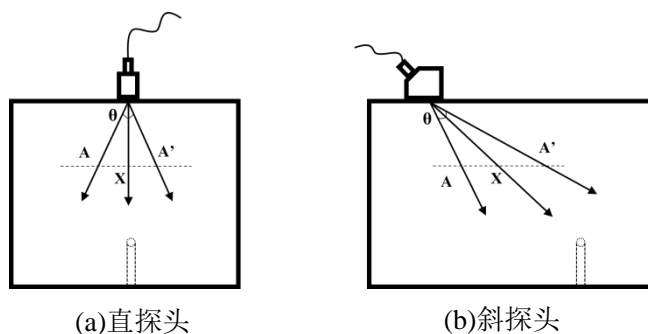


图4 超声探头的指向性

需要注意的是，由于超声波存在声束扩散角，只有中心轴上的能量值最大。因此，在实际测量时，须使反射体位于超声探头的中心轴上，此时观测到反射回波最大。此时通过示波器测量出反射回波对应的时间，就可以根据待测试块的声速算出缺陷到探头入射点的相对深度和水平距离。

4. 超声波的传播、波型和波型转换

超声波为机械波，可在任何具有弹性特性的介质中传播。超声波频率高，波长短（毫米数量级），在弹性介质中能像光线一样进行直线传播，并遵循几何光的传播定律，具有界面反射、折射性和散射等特点。根据超声波传播时介质中质点的振动方向和波的传播方向的位向关系，可将超声波分为不同的波形。在超声波检测中，最常用到的为以下三种：

超声纵波：超声波在介质中传播时，介质中质点的振动方向与波的传播方向一致的波，为超声纵波。纵波可在气体、液体、固体中传播。

超声横波：超声波在介质中传播时，其传播方向与介质中质点的振动方向垂直时，则为横波。根据定义，横波传播时，介质中质点受剪切作用而产生切变形变。因此，横波只能在具有切变弹性的介质中传播，即横波只能在固体中传播。

超声表面波：超声波在介质中传播时，能量主要集中在介质表面或者两种介质的分界面的波称为表面波。表面波传播过程中，介质质点的振动轨迹为椭圆，椭圆的长轴和短轴分别垂直和平行于超声波的传播方向，因此，表面波是具有纵波和横波的双重性质的波。

实际上，超声波在介质界面时发生发射和折射时可发生波形转换，纵波可折射和反射为横波，横波也可以折射和反射为纵波，如图 5 所示。超声波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：

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

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

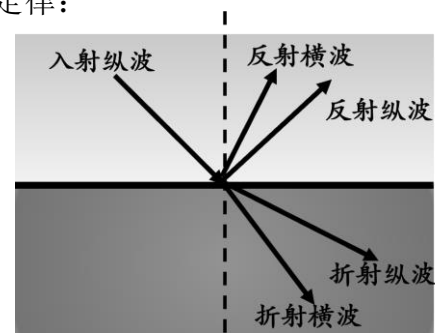


图 5 超声波的反射、折射和波型转换

其中， 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。

6. 超声声速的测量

1) 直接测量法

可利用人工反射体（界面或缺陷）测超声波声速，如下图 6 所示， t_0 为超声探头的延迟，即超声波在探头内部的传播时间。超声探头的延迟与被测试块无关，只与探头本身相关。超声声速的直接测量即用超声波探头内的延迟时间和探头测量的人工反射体回波时间，结合超声波的传播距离计算声速。

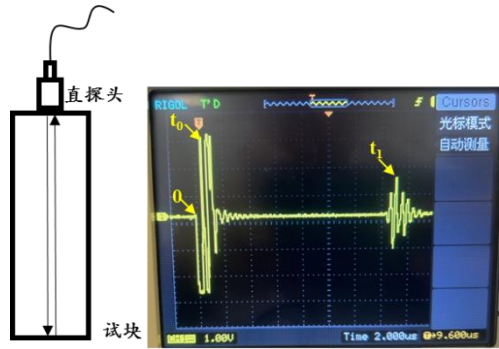


图 6 超声纵波延迟

2) 相对测量法

超声波在试块内经两次反射，测量两次反射回波的时间差，结合超声波的传播距离，即可计算试块的声速。这种测量声速方法称为间接测量法。

对于直探头，可利用均匀厚度的底面的任意两次反射回波进行测量。

对于斜探头，利用 CSK-IB 试块的两个半径不等的圆弧面的回波进行测量。

【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。

【实验内容】

1. 参照下图连接超声波实验仪和示波器，实验仪射频输出连接示波器第 1 通道、触发连接示波器外触发，示波器采用外触发方式，超声波实验仪连接超声探头。适当设置超声波实验仪衰减器的数值并调整示波器的电压范围与时间范围使超声波形出现在示波器屏幕中央，准备开始实验。

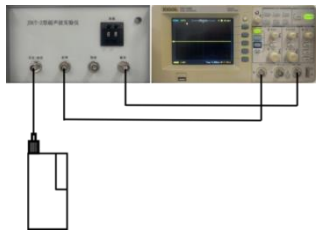


图 7 JDUT-2 型超声波实验仪接线图

2. 利用直探头测量脉冲超声纵波频率和波长

利用直探头的回波进行测量。调节示波器的时间位置并选择合适的幅度，使待测铝试块对直探头的 1 次底面回波显示在示波器屏幕中央。可知，一次回波内两相邻波峰或相邻波谷的时间间隔，即为脉冲波的一个周期。为了实验读数准确，此处要求测量一次回波内四个周期的时间间隔 t ，则可知超声波的频率 f 即为 $f=4/t$ ，此时在待测铝试块中的超声纵波波长为 $\lambda = c/f$ 。实验中，请利用 CSK-IB 试块 45 毫米厚度的 1 次回波进行多次测量，求平均值。

3. 直探头的延迟和用间接测量方法测量试块纵波声速

如下图 8，S 为始波，此处 t_0 为电信号施加于压电晶片的瞬时刻，可视为发射超声波的初始时刻。 B_1 、 B_2 为试块底面的 1 次和 2 次反射回波， t_1 、 t_2 为 B_1 、 B_2 回波在试块内往复传播所需要的时间。依次还可有 3 次、4 次等多次底面反射回波。调整实验仪上的衰减器数值和示波器的时间电压显示，读出 t_1 和 t_2 ，此处注意读取不同级次回波时间时要选取两次回波相对应的峰值。则直探头的延迟为：



图 8 直探头延迟和声速的间接测量

$$t = 2t_1 - t_2 \quad (4)$$

相对测量法计算试块纵波声速为：

$$c_L = \frac{2L}{t_2 - t_1} \quad (5) \quad (L \text{ 为试块厚度})$$

4. 斜探头延迟测量和间接测量方法测试块横波声速

超声试验仪连接斜探头。如图 9 将探头放在试块上方靠近试块前面，对准圆弧面，微调探头位置使探头的斜射声速能够同时入射到 R_1 和 R_2 圆弧面上。调整实验仪上的衰减器数值和示波器的时间电压显示。待在示波器上观测到两圆弧面回波都能最大值时。测量记录回波对应时间 t_1 和 t_2 。则斜探头的延迟为：

$$t = 2 \cdot t_1 - t_2 \quad (6)$$

$$\text{相对测量法测量试块横波声速为 } c_s = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

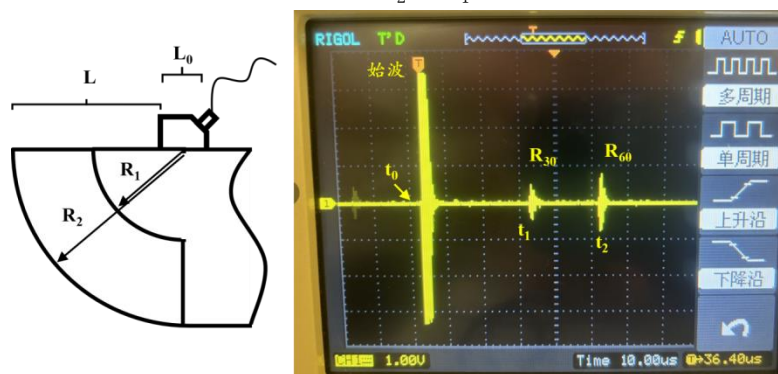


图 9 斜探头延迟和试入射点的测量

5.斜探头入射点的测量

测量中通常需要知道斜探头的入射点。如图 9 所示，斜探头的入射点为斜探头的声束与待测试块表面的交点。实际测量中通常用探头的前沿到入射点的水平距离表示，如图 9 所示 L_0 ，称为前沿距离。

如图 9，使斜探头的声束入射在圆弧面 R_2 上，微调探头位置使弧面反射回波最大，此时声束正对圆弧面（穿过弧面圆心）。用直尺测量此时探头的前沿到试块最左端的距离，记为 L ，则斜探头的前沿距离为：

$$L_0 = R_2 - L \quad (8)$$

6.斜探头折射角的测量

如图 10，分别是斜探头声束正对（回波幅度最大）待测试块上的横孔 A 和 B，用直尺分别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 。则斜探头的折射角为：

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

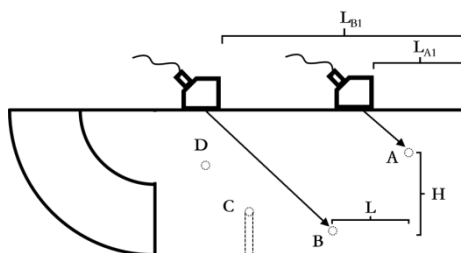


图 10 斜探头折射角的测量

5. 直探头和斜探头声束扩散角的测量

1) 直探头声束扩散角：如图 11，首先使直探头声束正对 B 孔，微调斜探头位置是反射回波最大，记录此时直探头声束轴线位置 x_0 和示波器上回波的最大幅度。然后分别向 x_0 左右移动直探头，记录回波幅度被分别降至最大幅度一半时左右两侧的位置 x_1 、 x_2 ，按下式 (10) 计算直探头的声束扩散角并画出声束图形：

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

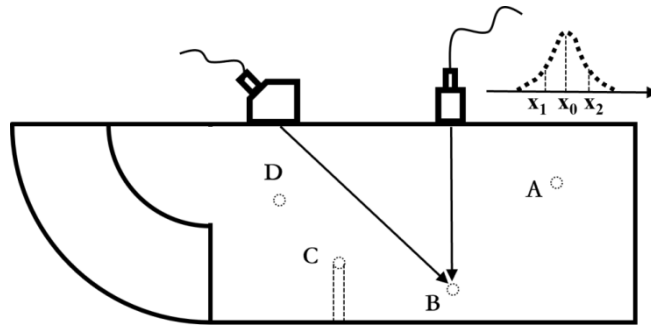


图 11 超声探头声束扩散角的测量

对于斜探头，首先使探头正对 B 孔回波幅度最大，用同样的方法测量并记录斜探头反射回波降至最大幅度一半时左右两侧的位置 x_1 、 x_2 ，按下式 (11) 计算直探头的声束扩散角并画出声束图形：

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

式 (10)、(11) 中 L 指所测横孔与试件表面的距离（孔深）。

6. 使用直探头探测缺陷深度

如图 12 探头的放置和反射回波。 B_1 、 B_2 为待测试件底面的反射回波。

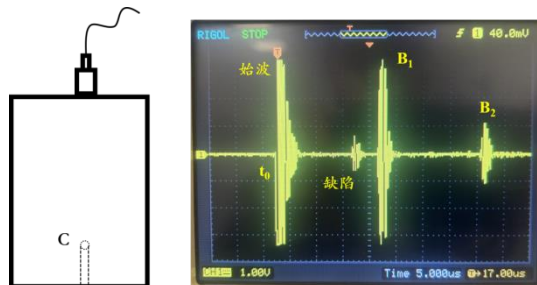


图 12 直探头探测缺陷深度

由图 13 可知，缺陷深度可直接测量为：

$$H_c = C_L \frac{t_c - t_0}{2} \quad (12)$$

其中 C_L 为实验内容 2 所测量的直探头入射声波在试块中的纵波声速。 t_c 为缺陷 C 空的反射回波， t_0 为直探头内的时间延迟。

也可以使用相对测量方法测量缺陷深度，具体方法请参看实验内容 2（直探头延迟和声速的相对测量方法）。

7. 使用斜探头探测待测试块内部缺陷位置

利用斜探头进行缺陷测量时，若能测量出超声波在试块中的传播距离 M （通过测量超声波在试块内的声速和延迟测量 M ），并已知斜探头的折射角 β ，就可以根据超声波的传播求出缺陷的垂直深度 H 和水平位置 L 。也就是说，采用斜探头对试块内缺陷位置的测量，需要测量斜探头的延迟、超声波在试块内的声速、入射点，折射角。对这些参数的测量，除可以按前述步骤依次测量外，通常还可以利用待测试块内的其他两个不同深度的横孔或者同材质的其他试块内的不同横孔来测得这些参量。例如，在本实验所采用的待测试块中，存在两不同深度的横孔 A、B，如图 13 所示，利用横孔 A、B，可测出所使用的斜探头的延迟、声速、入射点，折射角。A、B 横孔距试块侧边沿距离分别为 L_A 、 L_B ，A、B 两横孔水平距离为 L_{AB} 。测量中，为直观显示，假设将 B 孔平移至 A 孔正下方。此处注意，在实际计算横空间水平距离时须需要重新计入 L_{AB} 。然后，让斜探头依次正对（回波最大）横孔 A、B，测量此时两回波时间 t_A 、 t_B ，探头前沿到试块侧边沿的水平距离 x_A 、 x_B ，用直尺测量横孔 A、B 的深度 H_A 、 H_B ，则可计算如下：

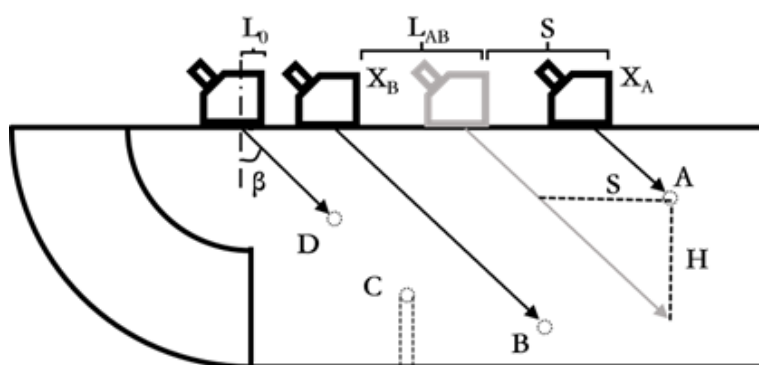


图 13 斜探头探伤测量

$$S = x_B - x_A - L_{AB} \quad (13)$$

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

斜探头的折射角为: $\beta = \arctan\left(\frac{S}{H}\right) \quad (15)$

试块内超声声速为: $c = \frac{2H}{(t_B - t_A) \cos(\beta)} \quad (16)$

探头延迟为: $t_0 = t_B - \frac{2H_B}{c \cdot \cos(\beta)} \quad (17)$

前沿距离为: $L_0 = H_B \cdot \tan(\beta) - (X_B - L_B) \quad (18)$

根据测量结果, 计算所使用斜探头的延迟、斜探头产生超声波在试块中的声速、斜探头入射点和折射角。之后把斜探头对准待测缺陷 D 孔, 找到缺陷的最大反射回波, 测量 X_D 、 t_D , 则缺陷 D 的垂直深度和距试块侧边沿的水平距离分别可计算:

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

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

【注意事项】

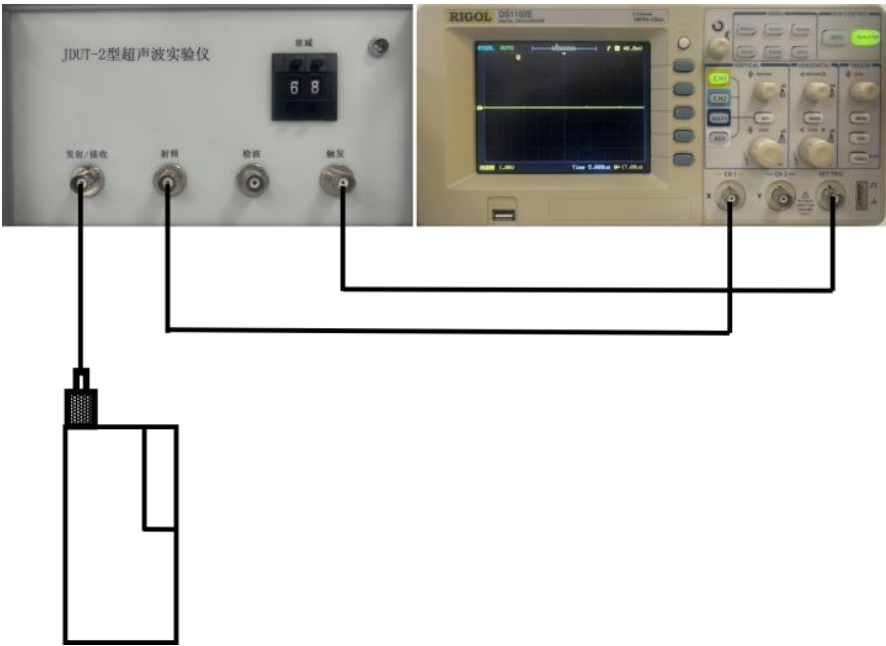
1. 时间记录时, 取脉冲波的极大值或者极小值, 要求对应一致, 即对应正极大到正极大或负极大到负极大;
2. 实验过程中, 适当调节示波器电压幅度适中, 确保示波器屏幕内可以显示出脉冲波的极大值;
3. 在利用斜探头的反射回波进行测量时, 必须确认检测到的是最大反射回波, 确保反射点在探头中轴线上。

【思考题】

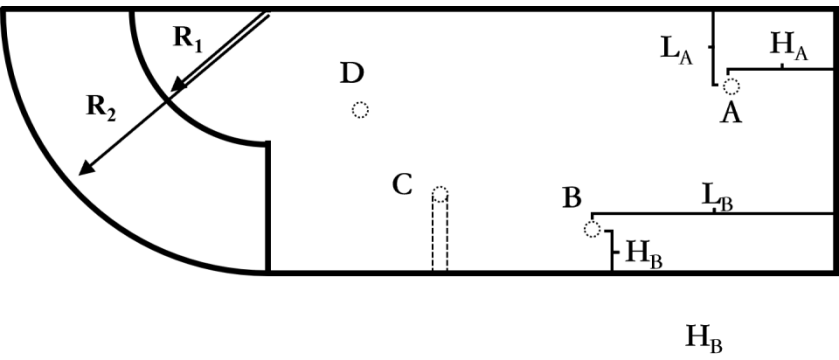
1. 测量斜探头延迟和横波声速的时候, 为什么斜探头打在圆弧面上, 只有超声横波?
2. 如果将待测试块从铝试块更换为钢试块, 对同一斜探头测量到的延迟和入射点是否一样? 为什么?

附录：

1.JDUT-2 型超声波实验仪接线图



2. CSK-IB 铝试块尺寸图和材质参数



单位：毫米；尺寸：R₁=30，R₂=60，L_A=20，H_A=20，L_B=50，H_B=10。

材质参数表（仅供参考）

纵波声速 (铝)	6.27 mm/us	横波声速	3.20 mm/us	表面波声 速	2.90 mm/us
杨氏模量	6.94*10 ¹⁰ Nm ⁻²	泊松系数	0.33	材质密度	2.7g/cm ³