

实验 A7 超声波的产生与传播及材料超声探伤应用

超声波是频率在 $2 \times 10^4 \text{Hz} \sim 10^{12} \text{Hz}$ 的声波。超声广泛存在于自然界和日常生活中，如老鼠、海豚的叫声中含有超声成分，蝙蝠利用超声导航和觅食，金属片撞击和小孔漏气也能发出超声。

人们研究超声始于 1830 年，F. Savart 曾用一个多齿轮，第一次人工产生了频率为 $2.4 \times 10^4 \text{Hz}$ 的超声；1912 年 Titanic 客轮事件后，科学家提出利用超声预测冰山；1916 年第一次世界大战期间，P. Langevin 领导的研究小组开展了水下潜艇超声侦察的研究，为声纳技术奠定了基础；1927 年，R. W. Wood 和 A. E. Loomis 发表超声能量作用实验报告，奠定功率超声基础；1929 年俄国学者 Sokolov 提出利用超声波良好穿透性来检测不透明材料体内部缺陷，之后美国科学家 Firestone 使超声波无损检测成为一种实用技术。

超声波测试把超声波作为一种信息载体，它已在海洋探查与开发、无损检测与评价、医学诊断等领域发挥着不可取代的独特作用。例如，在海洋应用中，超声波可以用来探测鱼群或冰山、潜艇导航或传送信息、地形地貌测绘和地质勘探等。在检测中，利用超声波检验固体材料内部的缺陷、材料尺寸测量、物理参数测量等。在医学中，可以利用超声波进行人体内部器官的组织结构扫描（B 超诊断）和血流速度的测量（彩超诊断）等。

本实验通过学习超声波的产生方法、传播规律和测试原理，应用超声波对固体弹性常数的测量了解超声波在测试方面应用的特点；通过对试块尺寸的测量和人工反射体定位了解超声波在检验和探测方面的应用。

【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；之后须固定示波器“Scale”，调节信号显示只能不断调节超声波实验仪上的“衰减”按钮，不可再通过示波器“Scale”旋钮调节幅度。

实验内容一 超声波的产生与传播

能够产生超声波的方法很多，常用的有压电效应方法、磁致伸缩效应方法、静电效应方法和电磁效应方法等。我们把能够实现超声能量与其他形式能量相互转换的器件称为超声波换能器。一般情况下，超声波换能器既能用于发射又能用于接收。

本实验中，我们采用压电效应实现超声波信号与电信号的转换，即压电换能器，它是利用压电材料的压电效应实现超声波的发射和接收。

【实验目的】

1. 了解超声波产生和接收方法及原理；
2. 认识超声脉冲波及其特点；
3. 初步掌握超声波声速测量的方法；
4. 掌握超声波试验仪和示波器的调节使用方法。

【实验原理】

1. 压电效应

某些固体物质，在压力（或拉力）的作用下产生变形，从而使物质本身极化，在物体相对的表面出现正、负束缚电荷，这一效应称为压电效应。

物质的压电效应与其内部的结构有关。如石英晶体的化学成分是 SiO_2 ，它可以看成由+4价的Si离子和-2价O离子组成。晶体内，两种离子形成有规律的六角形排列，如图ZZ-1所示。其中三个正原子组成一个向右的正三角形，正电中心在三角形的重心处。类似，三个负原子对（六个负原子）组成一个向左的三角形，其负电中心也在这个三角形的重心处。晶体不受力时，两个三角形重心重合，六角形单元是电中性的。整个晶体由许多这样的六角形构成，也是电中性的。

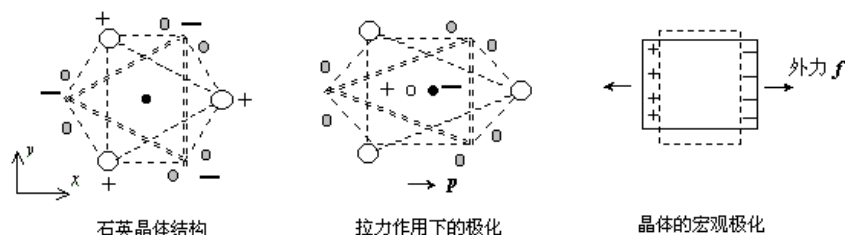


图 1.1 石英晶体的压电效应

当晶体沿 x 方向受一拉力,或沿 y 方向受一压力,上述六角形沿 x 方向拉长,使得正、负电中心不重合。尽管这是六角形单元仍然是电中性的,但是正负电中心不重合,产生电偶极矩 p 。整个晶体中有许多这样的电偶极矩排列,使得晶体极化,左右表面出现束缚电荷。当外力去掉,晶体恢复原来的形状,极化也消失。(许多大学物理教材都有关于电极化理论的介绍)由于同样的原因,当晶体沿 y 方向受拉力,或沿 x 方向受压力,正原子三角形和负原子三角形都被压扁,也造成正、负电中心不重合。但是这时电偶极矩的方向与 x 方向受拉力时相反,晶体的极化方向也相反。这就是压电效应产生的原因。

当外力沿 z 轴方向(垂直于图 1.1 中的纸面方向),由于不造成正负电中心的相对位移,所以不产生压电效应。由此可见,石英晶体的压电效应是有方向性的。

当一个不受外力的石英晶体受电场作用,其正负离子向相反的方向移动,于是产生了晶体的变形。这一效应是逆压电效应。

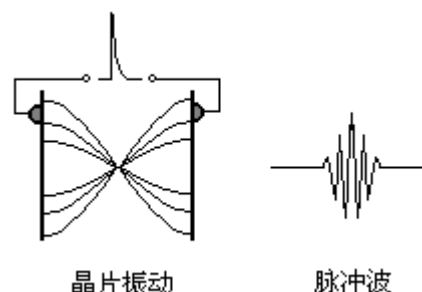
还有一类晶体,如钛酸钡(BaTiCO_3),在室温下即使不受外力作用,正负电中心也不重合,具有自发极化现象。这类晶体也具有压电效应和逆压电效应,它们多是由人工制成的陶瓷材料,又叫压电陶瓷。本实验中超声波换能器采用的压电材料为压电陶瓷。

2. 脉冲超声波的产生及其特点

用作超声波换能器的压电陶瓷被加工成平面状,并在正反两面分别镀上银层作为电极,这样被称为压电晶片。当给压电晶片两极施加一个电压短脉冲时,由于逆压电效应,晶片将发生弹性形变而产生弹性振荡,振荡频率与晶片的声速和厚度有

关,适当选择晶片的厚度可以得到满足超声频率范围的弹性波,即产生超声波。在晶片的振动过程中,由于能量的减少,其振幅也逐渐减小,因此它发射出的是一个超声波波包,通常称为**脉冲波**,如图 1.2 所示。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收,由于正压电效应,振荡的晶片在两极产生振荡的电压,电压被放大后可以用示波器显示。

图 1.3(a)为超声波在试块中传播的示意图,图 1.3(b)为示波器接收得到的超声波信号。图中, t_0 为电脉冲施加在压电晶片的时刻, t_1 是超声波传播到试块底面,



又反射回来，被同一个探头接收的时刻。因此，超声波在试块中的传播到底面的时间为

$$t = (t_1 - t_0) / 2 \quad (1.1)$$

如果试块材质均匀，超声波声速 c 一定，则超声波在试块中的传播距离为

$$S = c \cdot t \quad (1.2)$$

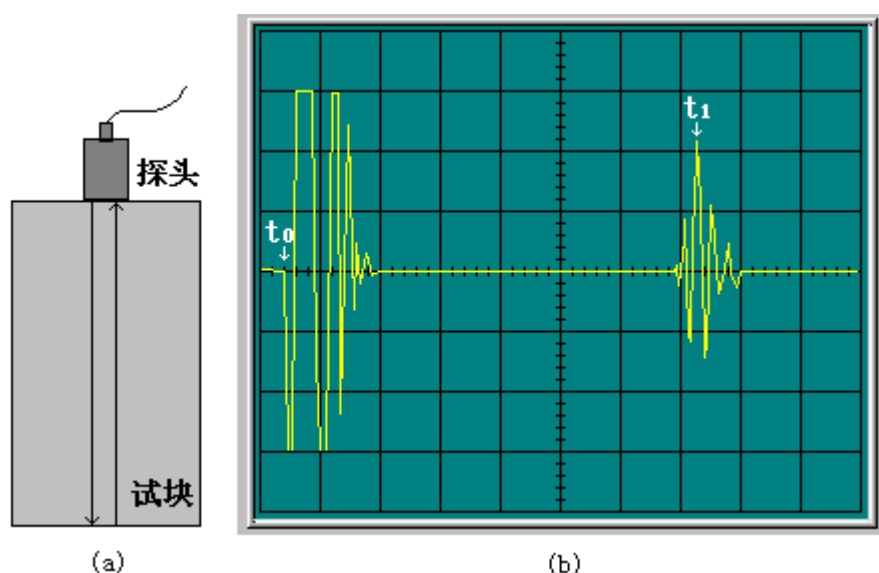


图 1.3 脉冲超声波在试块中的传播及示波器的接收信号

3. 超声波波型

如果晶片内部质点的振动方向垂直于晶片平面，那么晶片向外发射的就是超声波。超声波在介质中传播可以有不同的波型，它取决于介质可以承受何种作用力以及如何对介质激发超声波。通常有如下三种：

纵波波型：当介质中质点振动方向与超声波的传播方向一致时，此超声波为纵波波型。任何固体介质当其体积发生交替变化时均能产生纵波。

横波波型：当介质中质点的振动方向与超声波的传播方向相垂直时，此种超声波为横波波型。由于固体介质除了能承受体积变形外，还能承受切变变形，因此，当有剪切力交替作用于固体介质时均能产生横波。横波只能在固体介质中传播。

表面波波型：是沿着固体表面传播的具有纵波和横波的双重性质的波。表面波可以看成是由平行于表面的纵波和垂直于表面的横波合成，振动质点的轨迹为一椭圆，在距表面 $1/4$ 波长深处振幅最强，随着深度的增加很快衰减，实际上

离表面一个波长以上的地方，质点振动的振幅已经很微弱了。

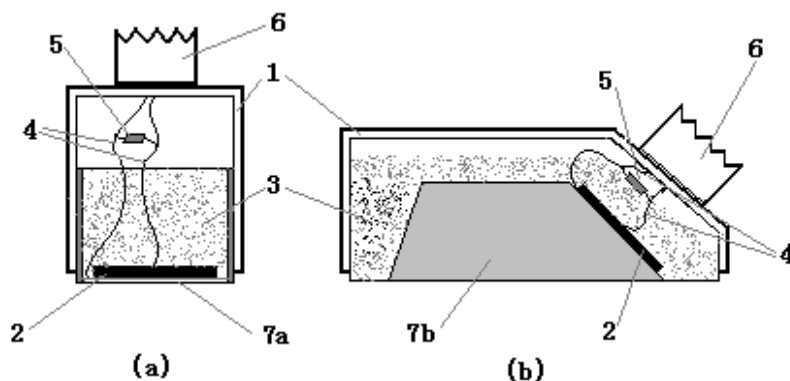


图 1.4 直探头和斜探头的基本结构：(a)直探头 (b)斜探头
1-外壳 2-晶片 3-吸收背衬 4-电极接线 5-匹配电感 6-接插头 7a-保护膜 7b-斜楔

4. 换能器种类

在实际应用中，我们经常把超声波换能器称为超声波探头。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 1.4 所示。探头通过保护膜或斜楔向外发射超声波；吸收背衬的作用是吸收晶片向背面发射的声波，以减少杂波；匹配电感的作用是调整脉冲波的波的形状。

一般情况下，采用直探头产生纵波，斜探头产生横波或表面波。对于斜探头，晶片受激发产生超声波后，声波首先在探头内部传播一段时间后，才到达试块的表面，这段时间我们称为探头的**延迟**。对于直探头，一般延迟较小，在测量精度要求不高的情况下，可以忽略不计。

5. 超声波的反射、折射与波型转换

在斜探头中，从晶片产生的超声波为纵波，它通过斜楔使超声波折射到试块内部，同时可以使纵波转换为横波。实际上，超声波在两种固体界面上发生折射和反射时，纵波可以折射和反射为横波，横波也可以折射和发射为纵波。超声波的这种现象称为波型转换，其图解如图 1.5 所示。

超声波在界面上的反射、折射和波型转换满足如下**斯特令折射定律**：

$$\text{反射: } \frac{\sin \alpha}{C} = \frac{\sin \alpha_L}{C_{1L}} = \frac{\sin \alpha_S}{C_{1S}} \quad (1.3a)$$

$$\text{折射: } \frac{\sin \alpha}{C} = \frac{\sin \beta_L}{C_{2L}} = \frac{\sin \beta_S}{C_{2S}} \quad (1.3b)$$

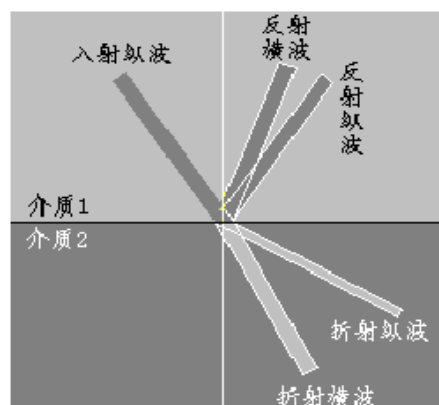


图 1.5 超声波的反射、折射和波型转换

其中, α_L 和 α_S 分别是纵波反射角和横波反射角; β_L 和 β_S 分别是纵波折射角和横波折射角; C_{1L} 和 C_{1S} 分别是第 1 种介质的纵波声速和横波声速; C_{2L} 和 C_{2S} 分别是第 2 种介质的纵波声速和横波声速。

超声波实验中, 还可能使用了一种**可变角探头**, 如图 1.6 所示。其中探头芯可以旋转, 通过改变探头的入射角 θ 得到不同

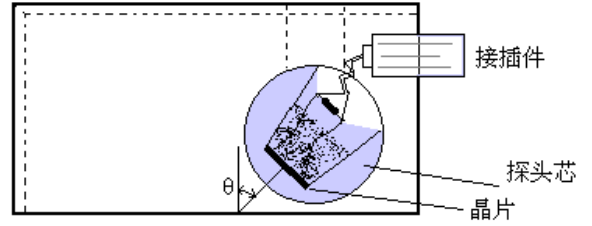


图 1.6 可变角探头示意图

同折射角的斜探头。当 $\theta=0$ 时成为直探头。可以利用该探头观察波型转换的过程。

在斜探头或可变角探头中, 有机玻璃斜块或有机玻璃探头芯的声速 C 小于铝中横波声速 C_S , 而横波声速 C_S 又小于纵波声速 C_L 。因此, 根据公式 (2.1b), 当 α 大于:

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{C}{C_L}\right) \quad (1.4)$$

时, 铝介质中只有折射横波; 而当 α 大于:

$$\alpha_2 = \sin^{-1}\left(\frac{C}{C_S}\right) \quad (1.5)$$

时, 铝介质中既无纵波折射, 又无横波折射。我们把 α_1 称为有机玻璃入射到有机玻璃-铝界面上的**第一临界角**; α_2 称为**第二临界角**。

【实验仪器】

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

【实验内容】

1. 直探头延迟和试块纵波声速的测量

参照附录 A 连接 JDUT-2 型超声波实验仪和示波器。超声波实验仪接上直探头, 并把探头放在 CSK-IB 试块的正面, 仪器的射频

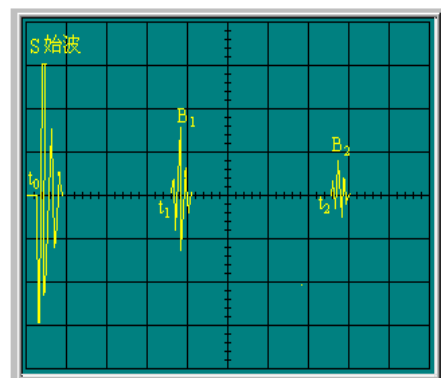


图 1.7 直探头延迟的测量

输出与示波器第 1 通道相连, 触发与示波器外触发相连, 示波器采用外触发方式, 适当设置超声波实验仪衰减器的数值和示波器的电压范围与时间范围, 使示波器上看到的波形如图 1.7 所示。

在图 1.7 中, S 称为始波, t_0 对应于发射超声波的初始时刻; B_1 称为试块的 1 次底面回波, t_1 对应于超声波传播到试块底面, 并被发射回来后, 被超声波探头接收到的时刻, 因此 t_1 对应于超声波在试块内往复传播的时间; B_2 称为试块的 2 次底面回波, 它对应于超声波在试块内往复传播到试块的上表面后, 部分超声波被上表面反射, 并被试块底面再次反射, 即在试块内部往复传播两次后被接收到的超声波。依次类推, 有 3 次、4 次和多次底面反射回波。

从示波器上读出传播 t_1 和 t_2 , 则直探头的延迟为

$$t = 2t_1 - t_2 - t_0 \quad (1.6)$$

$$\text{试块纵波声速为 } c_L = \frac{2L}{t_2 - t_1} \quad (1.7)$$

2. 斜探头测量和试块横波声速的测量

超声波试验仪接上斜探头, 探头放在 CSK-IB 试块的上方靠近试块前面, 对准圆弧面, 使探头的斜射声速能够同时入射在 R_1 和 R_2 圆弧面上, 斜探头放置如图 1.8 所示。适当设置超声波实验仪衰减器的数值和示波器的电压范围与时间范围。在示波器上同时观测到两个弧面的回波 B_1 和 B_2 。测量它们对应的时间 t_1 和 t_2 。由于 $R_2=2R_1$, 因此斜探头的延迟为:

$$t_d = \frac{(R_2 t_1 - R_1 t_2)}{(R_2 - R_1)} - t_0 \quad (1.8)$$

$$\text{试块横波声速为 } c_s = \frac{2(R_2 - R_1)}{t_2 - t_1} \quad (1.9)$$

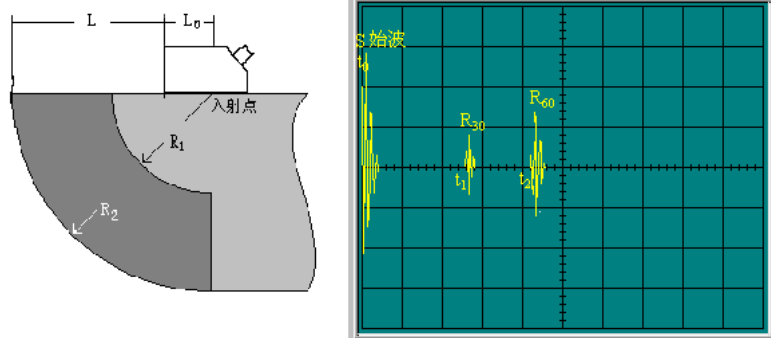


图 1.8 斜探头延迟和试块横波声速的测量

3. 声速的直接测量和相对测量法

(a) 声速的直接测量方法

当利用确定反射体（界面或人工反射体）测量声速时，我们只需要测量该反射体的回波时间，就可以计算得到声速。而对于单个的反射体，得到的反射波如下图所示 1.9 所示。能够直接测量的时间包含了超声波在探头内部的传播时间 t_0 ，即探头的延迟。对于任何一种探头，其延迟只与探头本身有关，而与被测的材料无关。因此，首先需要测量探头的延迟，然后才能利用该探头直接测量反射体回波时间。

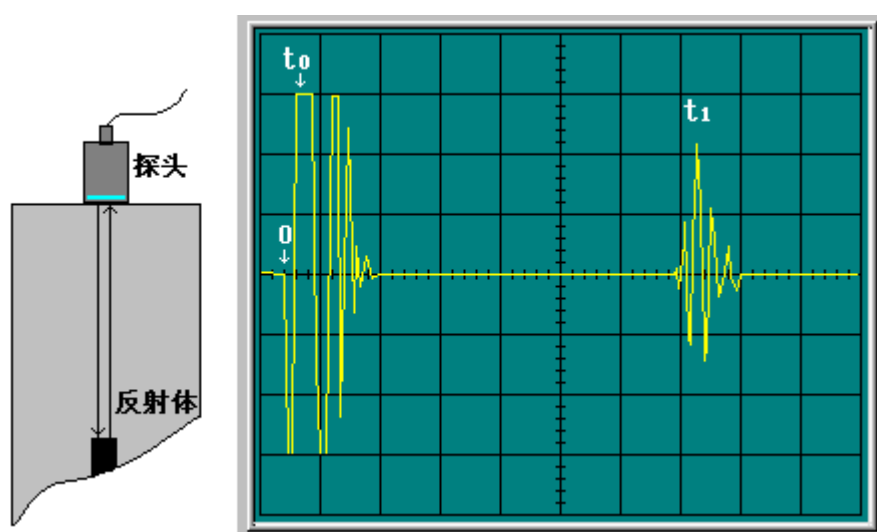


图 1.9 纵波延迟测量

(b) 声速的相对测量方法

如果被测试块有两个确定的反射体，那么通过测量两个反射体回波对应的时间差，再计算出试块的声速。这种方法称为声速的相对测量方法。

对于直探头，可以利用均匀厚度底面的多次反射回波中的任意两个回波进行测量。

对于斜探头，则利用 CSK-IB 试块的两个圆弧面的回波进行测量。

4. 脉冲波频率和波长的测量

对直探头和斜探头，分别调节示波器时间位置，使试块的 1 次底面回波出现在示波屏的中央，幅度为满屏的 80% 上下。测量两个振动波峰之间的时间间隔，则得到一个脉冲周期的振动时间。实验为了读数准确，要求测量四个周期的时间间隔 t ，此时脉冲波的频率 $f=4/t$ ，利用实验得到的纵波、横波声速，计算脉冲波

在铝试块中的波长 $\lambda = c/f$ 。

【实验过程与要求】

1. 采用相对测量法测量直探头延迟和铝试块的纵波声速

使用 CSK-IB 试块 60 毫米厚度，利用均匀厚度底面的底面反射回波测量直探头延迟，多次测量，求平均值。

2. 采用相对测量法测量斜探头延迟和铝试块的横波声速

斜探头：利用 R_1 、 R_2 圆弧面的回波测量斜探头延迟，多次测量，求平均值。

3. 利用直探头测量脉冲超声波频率和波长

利用 CSK-IB 试块 45 毫米厚度的 1 次回波进行测量；测量脉冲波 4 个振动周期的时间 t ，求其频率和波长。多次测量，求平均值。

【数据记录及处理】

原始数据记录

(1) 利用 CSK-IB 试块 60 毫米厚度，采用相对测量方法测量直探头延迟，并利用相对法测量铝试块的纵波声速

表 1.

项目 \ 次数	1	2	3	4	5	平均值
$t_1 (\mu s)$						
$t_2 (\mu s)$						

(2) 利用 R_1 、 R_2 圆弧面，采用相对测量方法测量斜探头延迟并利用相对法测量铝试块的横波声速 ($R_1=30mm$, $R_2=60mm$)

表 2.

项目 \ 次数	1	2	3	4	5	平均值
$t_1' (\mu s)$						
$t_2' (\mu s)$						

3. 利用 CSK-IB 试块 45 毫米厚度的一次回波用直探头测量脉冲波频率和波长

表 3.

项目 \ 次数	1	2	3	4	5	平均值
$t_1'' (\mu s)$						
$t_2'' (\mu s)$						
4 个脉冲波振动周期(μs)						

实验内容二 固体弹性常数的测量

超声波是一种弹性波，它在所有弹性材料中传播。其传播的特性与材料的弹性有关，如果弹性材料发生变化，超声的传播就会受到扰动，根据这个扰动，就可了解材料的弹性或弹性变化的特征。超声波测试就是利用超声波的传播特性与弹性材料物理特性之间的关系，通过测量超声波的传播特性参量，达到测量弹性材料物理参数的目的。在实际应用中，由于测试的对象和目的不同，具体的技术和措施是不同的，因而产生了一系列的超声测试项目，例如超声测厚、超声测硬度、超声测应力、超声测金属材料的晶粒度、超声测量弹性常数等。

本实验通过研究固体中超声波的传播特性，从而进一步确定固体介质中几个常用的弹性常参数。

【实验目的】

1. 理解超声波声速与固体弹性常数的关系；
2. 掌握超声波声速测量的方法；
3. 了解声速测量在超声波应用中的重要性。

【实验原理】

1. 斜探头入射点测量

在确定斜探头的传播距离时，通常还要知道斜探头的入射点，即声束与被测试块表面的相交点，用探头前沿到该点的距离表示，又称前沿距离。

参照图 2.1 把斜探头放在试块上，并使探头靠近试块背面，使探头的斜射声束入射在 R_2 圆弧面上，左右移动探头，使回波幅度最大（声束通过弧面的圆心）。这时，用钢板尺测量探头前沿到试块左端的距离 L ，则前沿距离为：

$$L_0 = R_2 - L \quad (2.1)$$

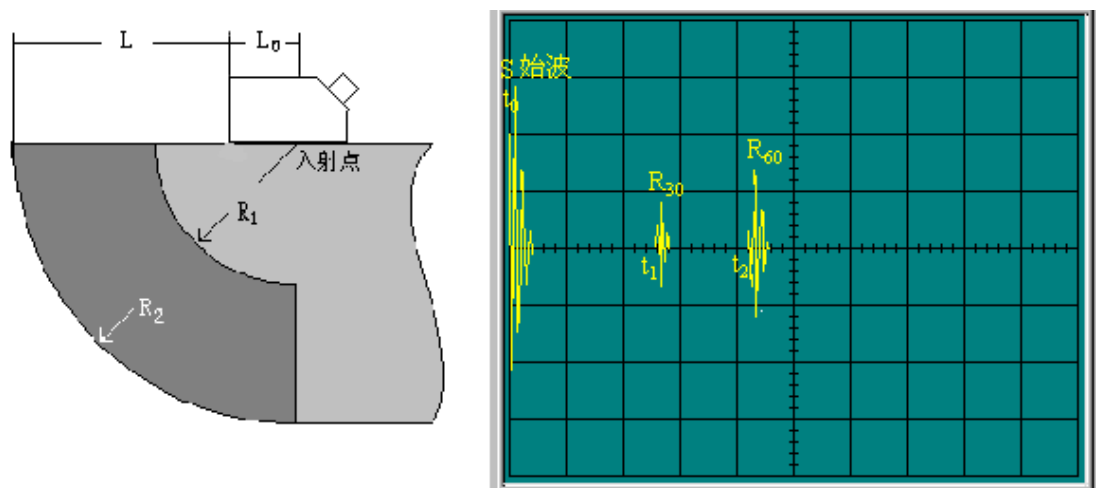


图 2.1 斜探头延迟和入射点测量

2. 斜探头折射角的测量

参照图 2.2 首先让把把探头的纵波声束对正（回波幅度最大时为正对位置）CSK-IB 试块上的横孔 A，用钢板尺测量正对时探头的前沿到试块右边沿的距离 L_{A1} ；然后向左移动探头，再让纵波声束对正横孔 B，并测量距离 L_{B1} 。测量 A 和 B 的水平距离 L 和垂直距离 H，则探头的折射角为：

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{L_{B1} - L_{A1} - L}{H} \right) \quad (2.2)$$

同样的方法可以测量横波的折射角 β_2 。

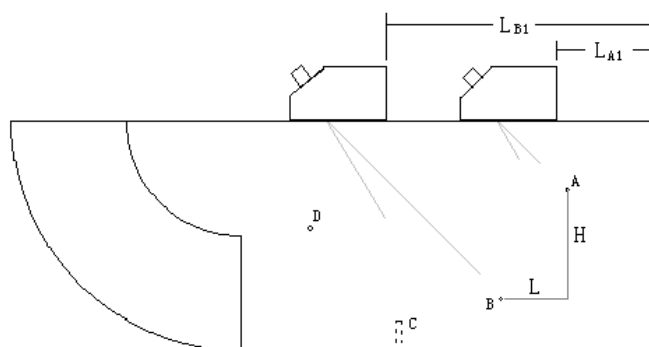


图 2.2 斜探头折射角的测量

3. 利用可变角探头实现波型转换的观察与测量 (选做)

在超声波实验仪换上可变角探头,参照图 2.3 把探头放在试块上,并使探头靠近试块背面,使探头的斜射声束只打在 R_2 圆弧

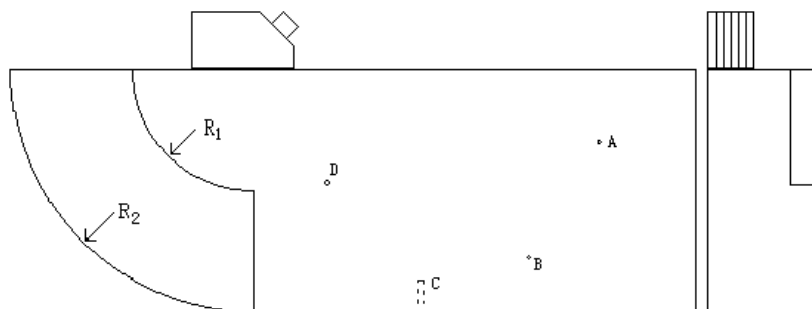


图 2.3 观察波形转换现象

面上。适当设置超声波实验仪衰减器的数值和示波器的电压范围与时间范围。改变探头的入射角,并在改变的过程中适当移动探头的位置,使每一个入射角对应的 R_2 圆弧面的反射回波最大。则在探头入射角由小变大的过程中,我们可以先后观察到反射回波 B_1 、 B_2 和 B_3 ; 它们分别对应于纵波反射回波、横波反射回波和表面波反射回波。

再让探头靠近试块背面,通过调节入射角调,使能够同时观测到回波 B_1 和 B_2 (如图 2.4),且它们的幅度基本相等;再让探头逐步靠近试块正面,则又会在 B_1 前面观测到一个回波 b_1 , 参照附录 B 给出铝试块的纵波声速与横波声速,通过简单测量和计算,可以确定 b_1 、 B_1 和 B_2 对应的波型和反射面。

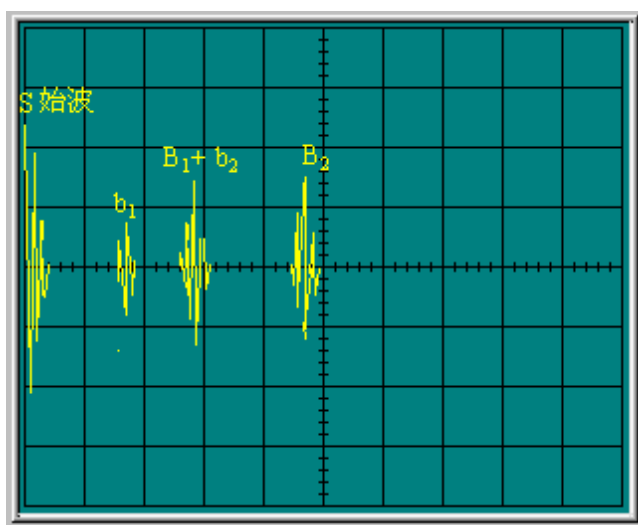


图 2.4 横波和纵波的测量

4. 计算铝块的杨氏模量和泊松系数

在各向同性的固体材料中,根据应力和应变满足的虎克定律,可以求得超声波传播的特征方程:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

其中 Φ 为势函数, c 为超声波传播速度。

当介质中质点振动方向与超声波的传播方向一致时,称为纵波;当介质中质点的

振动方向与超声波的传播方向相垂直时，称为横波。在气体介质中，声波只是纵波。在固体介质内部，超声波可以按纵波或横波两种波型传播。无论是材料中的纵波还是横波，其速度可表示为：

$$c = \frac{d}{t} \quad (2.4)$$

其中, d 为 声波传播距离, t 为声波传播时间。

对于同一种材料，其纵波波速和横波波速的大小一般不一样，但是它们都由弹性介质的密度、杨氏模量和泊松比等弹性参数决定，即影响这些物理常数的因素都对声速有影响。相反，利用测量超声波速度的方法可以测量材料有关的弹性常数。

固体在外力作用下，其长度沿力的方向产生变形。变形时的应力与应变之比就定义为杨氏模量，一般用 E 表示。（在本书杨氏模量测量的实验中有介绍）

固体在应力作用下。沿纵向有一正应变（伸长），沿横向就将有一个负应变（缩短），横向应变与纵向应变之比被定义为泊松比，记做 σ ，它也是表示材料弹性性质的一个物理量。

在各向同性固体介质中，各种波型的超声波声速为：

$$\text{纵波声速: } C_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (2.5)$$

$$\text{横波声速: } C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (2.6)$$

其中 E 为杨氏模量， σ 为泊松系数， ρ 为材料密度。

相应地，通过测量介质的纵波声速和横波声速，利用以上公式可以计算介质的弹性常数。计算公式如下：

$$\text{杨氏模量: } E = \frac{\rho c_s^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} \quad (2.7)$$

$$\text{泊松系数: } \sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} \quad (2.8)$$

其中： $T = \frac{c_L}{c_s}$ ， c_L 为介质中纵波声速， c_s 为介质中横波声速， ρ 为介质的密度。

【实验仪器】

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

【实验过程与要求】**1. 测量斜探头的前沿距离**

利用 CSK-IB 试块 R_2 圆弧面进行测量，多次测量，求平均值。（此处注意探头靠近试块正面，即 R_2 那一面，使探头的斜射声束能够入射在 R_2 圆弧面上）

2. 测量斜探头相对于铝试块的折射横波

（1）把探头分别对准 A、B 两孔，找到最大反射回波，测 L_{B1} 、 L_{A1} ，并测量 A、B 两孔之间的横向距离 L 和纵向距离 H

（2）求斜探头折射角 β_s

（3）通过 $\frac{\sin \alpha}{C} = \frac{\sin \beta_s}{C_s}$ ，求入射纵波的入射角 α

（4）由 $\alpha_1 = \sin^{-1}(\frac{C}{C_L})$ ， $\alpha_2 = \sin^{-1}(\frac{C}{C_s})$ ，求 α_1 、 α_2 ，并比较 α 与 α_1 、 α_2

(C 为 2.74 mm/us)

3. 计算铝试块的杨氏模量和泊松系数。与理论值（见附录 A）比较，分析误差产生原因。

【数据记录及处理】

原始数据记录

(1) 测量斜探头的前沿距离 L_0 ($R_2=60\text{mm}$)

表 1.

次数 项目	1	2	3	4	5	平均值
探头前沿到试块左端的距离 L						
前沿距离 $L_0(\text{mm})$						

(2) 测量探头的前沿到试块右边沿的距离 L_{A1} 、 L_{B1} 以及 A 和 B 的水平距离 L 和垂直距离 H

表 2.

次数 项目	1	2	3	4	5	平均值
$L_{A1}(\text{mm})$						
$L_{B1}(\text{mm})$						
$L(\text{mm})$						
$H(\text{mm})$						

实验内容三 超声波探伤

光波只能穿过透明介质；电磁波只能穿过非导电介质；超声波是一种弹性波，能够在弹性介质中传播，而所有物质都可视为弹性介质，因此超声波对所有介质都是“透明”的。一般情况下，超声在液体和固体中传播的距离比气体中的传播距离要远得多；例如在海洋探测中，可以用超声波来探测数千米的目标。这也是超声被广泛应用于探测的主要原因之一。

利用超声波进行探测的另一个原因是超声探头发射的能量具有较强的指向性。指向性是指超声波探头发射声束扩散角的大小。扩散角越小，则指向性越好，对目标定位的准确性越高。在固体材料的尺寸测量、无损检测、超声诊断、潜艇导航等超声应用中，都利用了超声波的这一特点。

本实验在了解超声波探头指向性的基础上，学习超声波用于材料内部无损探伤的基本方法。

【实验目的】

1. 理解和观察超声波的反射、折射和波型转换；
2. 理解超声波探头的指向性；
3. 掌握超声波探测原理和定位方法。

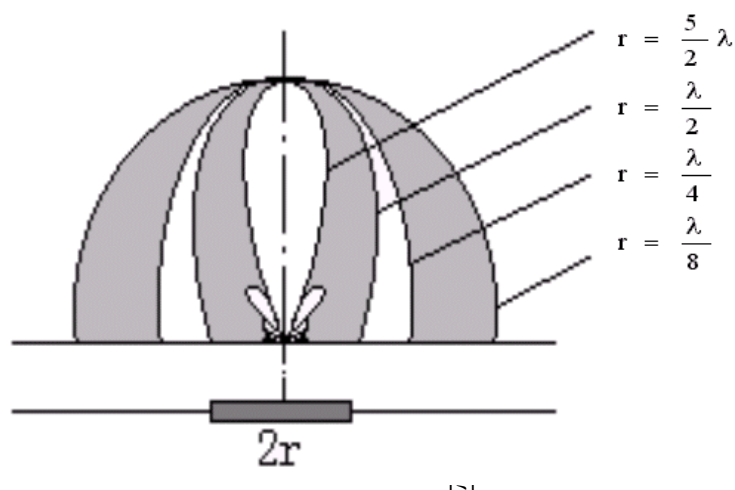
【实验原理】

1. 超声探头的指向性

超声探头发射能量的指向性与探头的几何尺寸和波长有直接的关系。一般来讲，波长越小，频率越高，指向性越好；尺寸越大，指向性越好。可以用公式表示如下：

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (3.1)$$

图 3.1 是超声波探头的指向性与其尺寸和波长关系的示意图。 R 为圆形压电晶片的半径， λ 为超声波波长。对具有一定指向性要求的超声波探头，采用较高的频率可以使探头的尺寸变小，因为频率高，波长即小，而晶片半径与波长是正比关系。



3.1 超声探头的指向性

在实际应用中，通常我们用偏离中心轴线后振幅减小一半的位置表示声束的边界。如图 3.2 所示，在同一深度位置，中心轴线上的能量最大，当偏离中线到位置 A、A' 时，能量减小到最大值的一半。其中 θ 角定义为探头的扩散角。 θ 越小，探头方向性越好，定位精度越高。

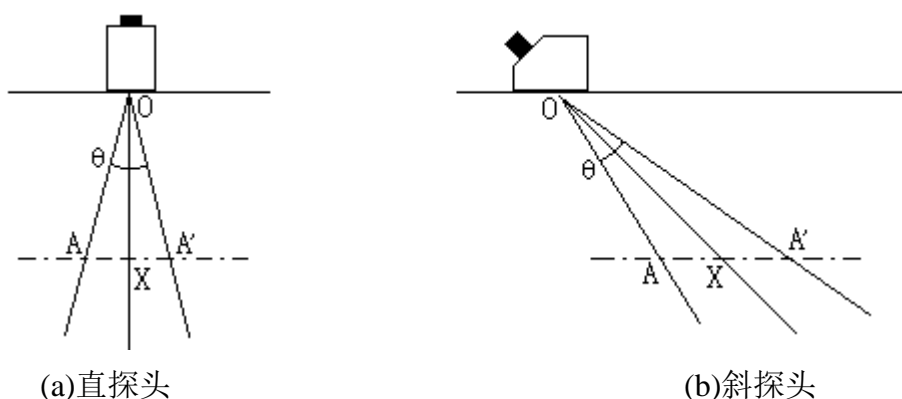


图 3.2 超声波探头的指向性

在进行工件内部缺陷定位时，必须找到缺陷反射回波最大的位置，使得被测缺陷处于探头的中心轴线上，然后测量缺陷反射回波对应的时间，根据工件的声速可以计算出缺陷到探头入射点的垂直深度或水平距离。

【实验仪器】

JDUT-2 型超声波检测仪、DS1102E 双通示波器（100MHz）、CSK-IB 试块、钢板尺、耦合剂等。

【实验内容】

1. 声束扩散角的测量 (选做)

如图 3.3 所示, 利用直探头分别找到 B 通孔对应的回波, 移动探头使回波幅度最大, 并记录该点的位置 x_0 及对应回波的幅度; 然后向左边移动探头使回波幅度减小到最大振幅的一半, 并记录该点的位置 x_1 ; 同样的方法记录下探头右移时回波幅度下降到最大振幅一半对应点的位置 x_2 ; 则直探头扩散角为:

$$\theta = 2\text{tg}^{-1} \frac{|x_2 - x_1|}{2L} \quad (3.2)$$

L 为小孔的深度。

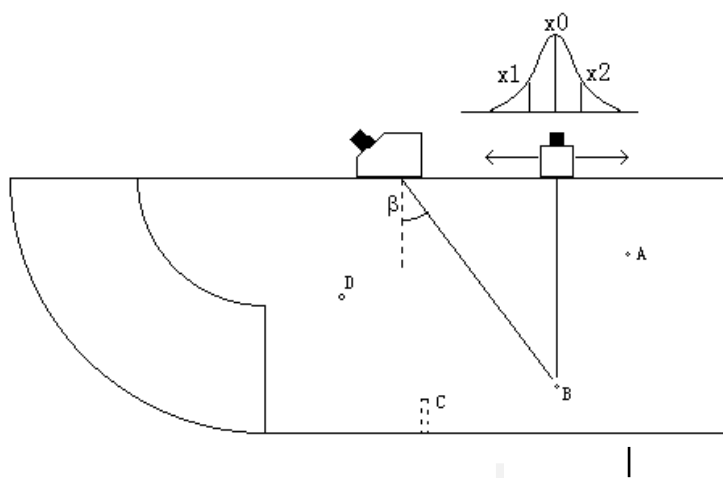


图 3.3 探头扩散角的测量

对于斜探头, 首先必须测量出探头的折射角 β , 然后利用测量直探头同样的方法, 按下式计算斜探头的扩散角近似为:

$$\theta = 2\text{tg}^{-1} \left[\frac{|x_2 - x_1|}{2L} \cos^2 \beta \right] \quad (3.3)$$

L 为小孔的深度, β 为斜探头的折射角。

2. 直探头探测缺陷深度 (选做)

在超声波探测中, 可以利用直探头来探测较厚工件内部缺陷的位置和当量大小。把探头按图 3.4 位置放置, 观察其波形。其中底波是工件底面的反射回波。

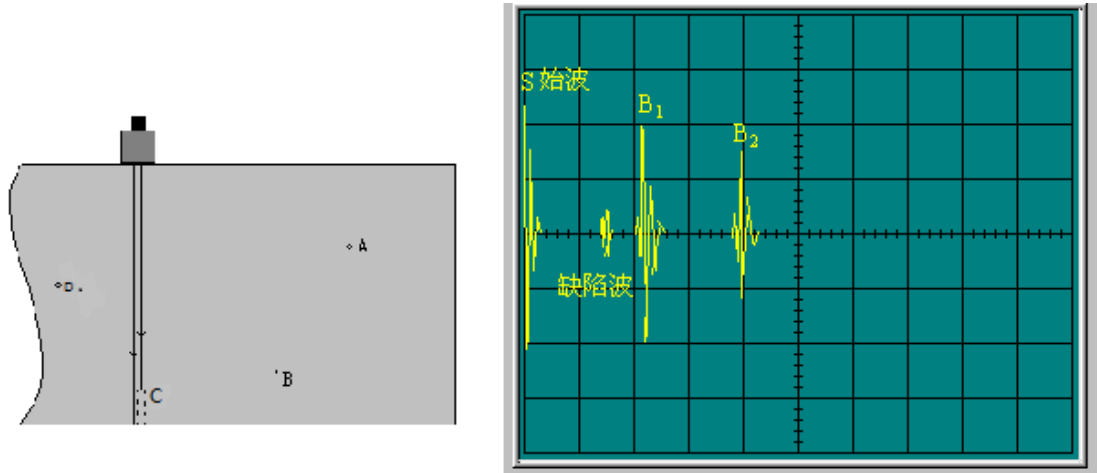


图 3.4 直探头探测缺陷深度

对底面回波和缺陷波对应时间（深度）的测量，可以采用绝对测量方法，也可以采用相对测量方法。利用绝对测量方法时，必须首先测量（或已知）探头的延迟和被测材料的声速，具体方法请参看实验二直探头延迟和声速的绝对测量方法。利用相对测量方法时，必须有与被测材料同材质试块，并已知该试块的厚度，具体方法请参看实验二直探头延迟和声速的相对测量方法。

$$\text{绝对测量时深度为: } H_C = C_L \frac{t_c - t_0 - t_d}{2} \quad (3.4)$$

其中 C_L 为纵波声速， t_c 为缺陷 C 回波， t_d 为直探头延迟。

3. 斜探头测量缺陷的深度和水平距离

利用斜探头进行探测时，如果测量得到超声波在材料中传播的距离为 S ，则相应超声波的传播深度 H 和水平距离 L 为：

$$H = S \cos\beta \quad (3.5)$$

$$L = S \sin\beta \quad (3.6)$$

其中 β 是斜探头在被测材料中的折射角。

要实现对缺陷进行定位，除了必须测量（或已知）探头的延迟、入射点外，还必须测量（或已知）探头在该材质中的折射角和声速。通常我们利用与被测材料同材质的试块中两个不同深度的横孔对斜探头的延迟、入射点、折射角和声速进行测量。

A、B 为试块中的两个横孔，距试块边沿分别为 L_A 、 L_B ，为了直观显示，将 B 孔水平位置移至 A 孔正下方，故 $L = S \sin\beta$ 实际计算时须计及 AB 孔间水平距离 L_{AB} 。让斜探头先后对正 A 和 B，找到最大回波，测量得到它们的回波时间

t_A 、 t_B ,

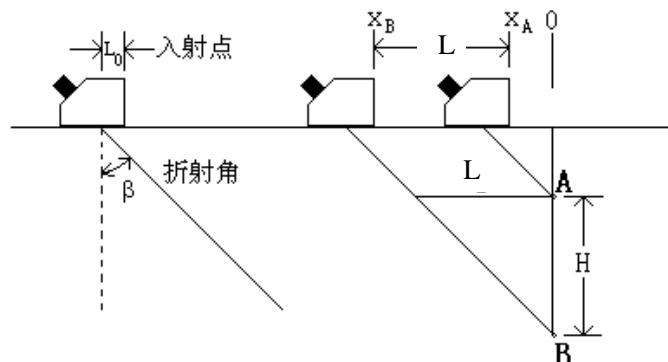


图 3.5 斜探头参数测量

探头前沿到试块边沿的水平距离分别为 x_A 、 x_B ，已知它们的深度为 H_A 、 H_B ，则有：

$$L = X_B - X_A - L_{AB} \quad (3.7)$$

$$H = H_B - H_A \quad (3.8)$$

折射角： $\beta = \arctan\left(\frac{S}{H}\right) \quad (3.9)$

声速： $c = \frac{2H}{(t_B - t_A) \cos(\beta)} \quad (3.10)$

延迟： $t_0 = t_B - \frac{2H_B}{c \cdot \cos(\beta)} \quad (3.11)$

前沿距离： $L_0 = H_B \cdot \tan(\beta) - (X_B - L_B) \quad (3.12)$

接着把探头对准 D 孔，找到最大反射回波，测量 X_D 、 t_D ，则有

$$H_D = \frac{c(t_D - t_0) \cos(\beta)}{2} \quad (\text{D 孔深度})$$

$$L_D = X_D + L_0 - H_D \cdot \tan(\beta) \quad (\text{D 孔离试块边沿水平距离})$$

【实验过程及要求】

1. 测量直探头和斜探头的声速扩散角并画出声束图形（选做）

利用 CSK-IB 试块横孔 A 测量直探头扩散角、横孔 B 测量斜探头扩散角，画

出声束图形。

2.探测 CSK-IB 试块中缺陷 C 的深度 (选做)

利用直探头, 采用绝对测量方法测量; 多次测量, 求平均值。

3.探测 CSK-IB 试块中缺陷 D 的深度和距试块右边沿的距离

先测量斜探头的延迟、入射点、折射角和声速, 再探测缺陷。

【思考题】

1.在利用斜探头探测中, 如果能够得到与被测材料同材质的试块, 并且已知该试块中两个不同深度的横孔的深度, 那么我们不必测量斜探头的延迟、入射点、折射角和声速就可以确定缺陷的深度。试说明该方法具体探测过程?

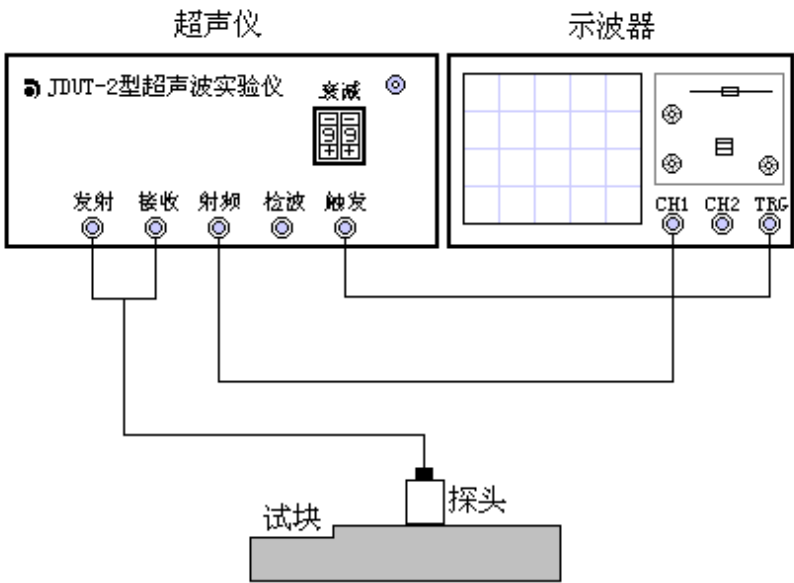
【数据记录与处理】

原始数据记录

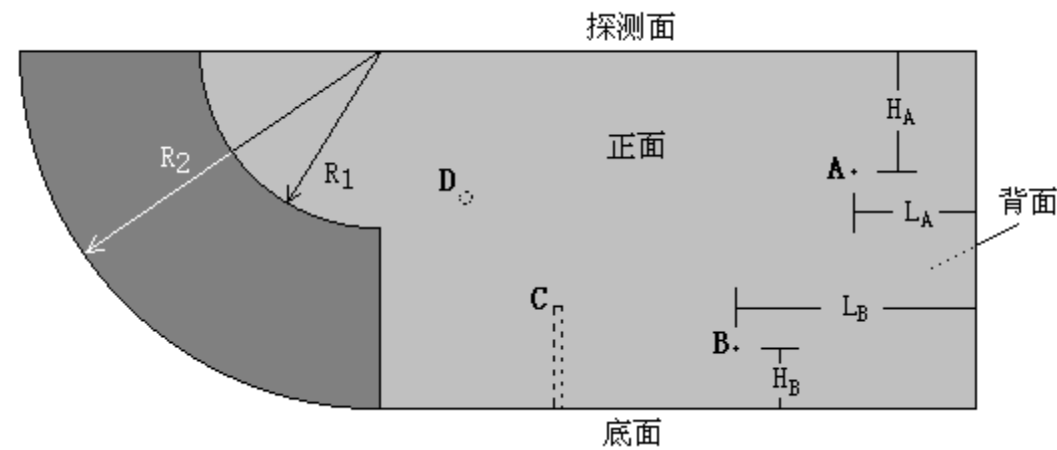
(3) 探测 CSK-IB 试块中缺陷 D 的深度和距试块右边沿的距离.

次数 项目	1	2	3	4	5	平均值
X_A (mm)						
t_A (μs)						
X_B (mm)						
t_B (μs)						
X_D (mm)						
t_D (μs)						
H_A (mm)						
H_B (mm)						

附录 A JDUT-2 型超声波实验仪接线图



附录 B CSK-IB 铝试块尺寸图和材质参数



单位：毫米；尺寸： $R_1=30$ ， $R_2=60$ ， $L_A=20$ ， $H_A=20$ ， $L_B=50$ ， $H_B=10$ 。

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	$6.94 \times 10^{10} \text{Nm}^{-2}$	泊松系数	0.33	材质密度	2.7g/cm^3