

超声波特性及超声探伤

201711140236 物理系基地班 李励玮

【实验目的】

1. 了解固体中的弹性波及其传播的规律。
2. 了解超声波产生与探测的原理。
3. 掌握利用示波器测量固体中3种弹性波波速的方法。
4. 了解超声波探伤的原理和方法。
5. 设计、搭建利用超声波探测物理量的实验

【实验仪器】

JDUT-2 型超声波实验仪，示波器、测试A1块和耦合剂水。

【引言】

超声波指的是频率高于 2×10^4 Hz的声波，人耳无法感知超声波。但是，许多动物可以发出和分辨超声波，例如：蝙蝠、老鼠、海豚、鲸鱼等动物的叫声中含有超声成分，蝙蝠还可以利用超声进行导航和觅食。在科学实验和工业生产中，人们用机械声效应、电磁声效应、晶体的电致伸缩效应（逆压电效应）等原理来产生超声波。人工超声波发生器的研制可以追溯到十九世纪30年代，法国物理学家Félix Savart在Hooke轮子的基础上，制作了直径82cm、具有720个齿轮的黄铜轮子，用它产生了24kHz的超声波[1-2]，被认为是第一个人工超声波发生器。1940密西根大学的Floyd Firestone博士将超声波技术发展成为实用的探测技术[3]，可用于探测金属中的缺陷或裂痕等。到了六十年代，人们发展了非线性超声探测技术，来表征材料疲劳和蠕变早期的微观结构特性[4]。超声波由于其穿透性深，灵敏度高，对探测物体没有破坏性、对操作者以及周围的设备和材料没有伤害和干扰，还可以用去估计缺陷的几何性质（大小，走向与形状）与力学性质，目前超声波技术除了用于无损检测与评价之外，在医学诊断与治疗、海洋探查与开发、地形地貌测绘、地质勘探等领域发挥着不可取代的作用。此外，超声波还可作为一种高频振动能量的应用化学合成、工业加工等领域。超声技术还广泛应用了我们日常生活中，如超声清洗器、超声雾化器、加湿器和超声牙刷等。

在本实验中将学习超声波的产生和探测技术、超声波的传播规律和振型的演变特征，掌握超声波探伤与成像的原理与技术；通过对试块中声速的测量、人工反射体的定位及对非透明试块中图形的成像，了解超声波技术在声速测量、缺陷探测和成像技术方面的应用，通过对固体弹性常数的测量，了解利用超声波的传播特征及其在物理量测试方面的应用特点。通过本实验，系统学习利用声波的物理特性研究物理规律、探测物理量和探索其应用领域的方法。

【实验原理】

1. 各向同性固体中的弹性波

我们把固体看成由无数微元相互耦合形成的多自由度力学体系。设 t 时刻初始平衡位置 \vec{r} 处的微元移动到了 $\vec{r} + \vec{u}$ 处， $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t)$ 。如果各处微元位移不同，则物体内部将发生挤压、扭曲等形变。形变导致材料产生回复力，反过来影响各处微元的位移。这个过程导致固体中的形变以弹性波的方式传播。显然弹性波的性质与材料的弹性性质密切相关。对于各向同性的材料，通常用3个常数表征其弹性：杨氏模量 E 、剪切模量 G 和泊松比 σ 。有趣的是这3个量并不独立，他们之间满足关系：

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (1)$$

根据弹性理论，各向同性固体中的弹性波方程为[5]

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = G \Delta \vec{u} + \frac{G}{1-2\sigma} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) \quad (2)$$

其中 ρ 为材料的密度。对于线性波动方程，总可以设解有行波的形式

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{a} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (3)$$

其中振幅 \vec{a} 为一常矢量，代入方程可得两类解：

(1) 纵波： $\vec{a} \parallel \vec{k}$ ，且有

$$\rho \omega^2 = (G + \frac{G}{1-2\sigma}) k^2 = \frac{2(1-\sigma)G}{1-2\sigma} k^2 = \frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} k^2 \quad (4)$$

由此可得纵波声速：

$$v_l = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{(1-\sigma)E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}} \quad (5)$$

(2) 横波： $\vec{a} \cdot \vec{k} = 0$ ，且有 $\rho \omega^2 = G$ 。由此可得横波声速

$$v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\sigma)\rho}} \quad (6)$$

此外，还存在一种表面波，它是横波与纵波的叠加，而且横波和纵波的波矢量 \vec{k} 有两个分量是相等的，而另一个分量都是纯虚数。表面波只能在固体的在界面上传播，其波速 v_s 与横波声速 v_T 、纵波声速 v_L 之间满足关系：

$$1 - \frac{v_s^2}{2v_t^2} = (1 - \frac{v_s^2}{v_l^2})^{1/4} (1 - \frac{v_s^2}{v_t^2})^{1/4} \quad (7)$$

如果已知材料的密度与弹性波速，则可以根据前面的关系计算材料的弹性参数，比如：

$$G = \rho v_t^2, \quad \sigma = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}, \quad E = \rho v_t^2 \frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \quad (8)$$

其中 $\gamma = v_l/v_t$ 。

2. 超声波的产生及探测

超声波的产生和探测方法有多种，目前最常见的是利用晶体的压电效应和逆压电效应来探测和发射超声波。压电效应是1880年P. Curie和J. Curie兄弟发现的，并与次年通过实

验证了逆压电效应[6, 7]。某些不具有中心对称的晶体，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。例如石英晶体，其成分是 SiO_2 ，可以看成由Si正离子O负离子排列形成的六角结构，在（002）面中，离子排列结构如图1所示，三个正离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，三对负离子（六个负离子）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，整个晶体是电中性的。

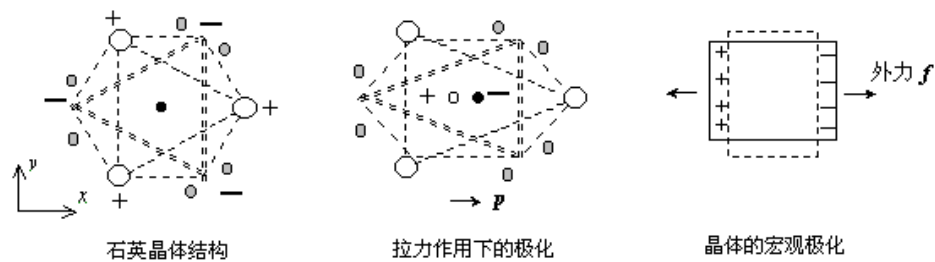


图 1.石英晶体的压电效应示意图

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，这时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。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）。同样的原因，当晶体沿y方向受拉力，或沿x方向受压力，正离子三角形和负离子三角形都被压扁，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与晶体的各向异性有关。

还有一类晶体，如钛酸钡（ BaTiO_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，它们大多数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。

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金属层作为电极，这样的片被称为压电晶片。当给压电晶片两极施加一个电压脉冲时，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超声频率范围的弹性波，即超声波。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2所示。

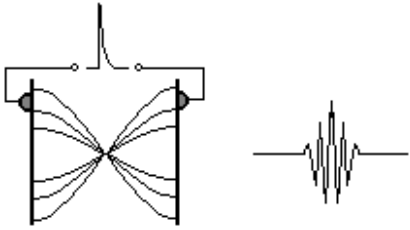


图 2. 超声脉冲波示意图

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，电压信号被放大后可以用示波器显示，检测。

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3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形状。

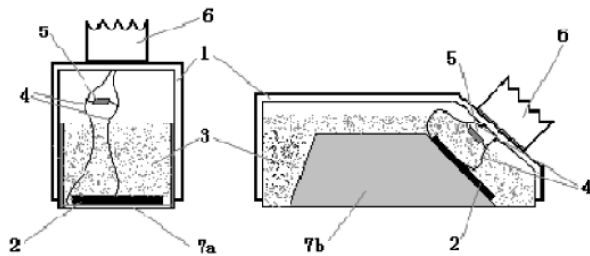


图3 直探头和斜探头的基本结构(1-外壳 2-晶片 3-吸收背衬 4-电极接线 5-匹配电感 6-接插头 7a-保护膜 7b-斜楔)

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。

3. 超声波的振型及界面的反射与折射

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纵波。超声波在介质中传播可以有不同的振型，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。通常有如下三种情形：

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。

与所有的波一样，超声波在两种固体界面上会发生折射和反射。特别地，当超声波要从波速较慢的介质进入波速较快的介质时，还可能发生全反射。超声波在界面传播的一个有趣的现象是振型转换：当一种特定类型的波入射时，反射和折射波中可以包含

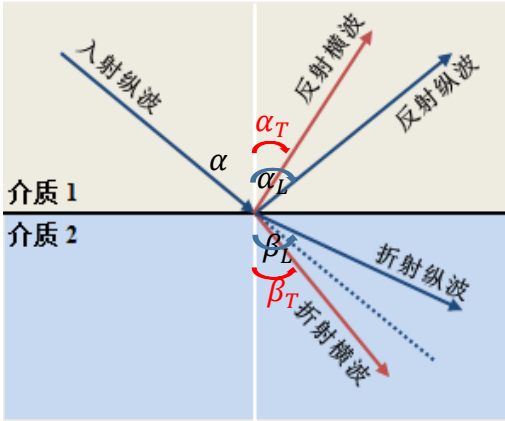


图5. 超声波在界面上的反射、折射和振型转换

另外类型波的成分。波型转换在应用上有很重要的意义。比如，虽然压电材料产生的都是纵波，由于纵波的速度比横波快，纵波发生全反射的临界角要比横波的小。利用这个特点，使用斜探头让纵波以合适的角度斜入射样品，让纵波产生全反射无法进入，从而保证进入探测材料中的只有横波。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振型转换，其图解如图 5 所示。

超声波在介质界面上的反射、折射需要满足如下Sneel定律：

反射：

$$\frac{\sin\alpha}{v} = \frac{\sin\alpha_l}{v_{1l}} = \frac{\sin\alpha_t}{v_{1t}} \quad (9)$$

折射：

$$\frac{\sin\alpha}{v} = \frac{\sin\beta_l}{v_{2l}} = \frac{\sin\beta_t}{v_{2t}} \quad (10)$$

其中 α 为超声波的入射角和声速， α_l 和 α_t 分别是纵波反射角和横波反射角； β_l 和 β_t 分别为纵波折射角和横波折射角； v_{1l} 和 v_{1t} 分别是第1种介质中纵波声速和横波声速； v_{2l} 和 v_{2t} 分别是第2种介质的纵波声速和横波声速。

采用如图6所示的可变角探头，其中探头芯可以旋转，通过改变探头的入射角可以得到不同折射角的斜探头。当入射角为 0° 时就是成为直探头。

在斜探头或可变角探头中，如果介质1的声速小于介质2的横波声速，而横波声速又小于纵波声速，根据公式（2），存在两个临界入射角 α_{\max} ：

$$\alpha_{\max1} = \arcsin(v/v_{2l}) \quad \text{第一临界角}$$

$$\alpha_{\max2} = \arcsin(v/v_{2t}) \quad \text{第二临界角}$$

当 $\alpha < \alpha_{\max1}$ 时，介质2中存在横波和纵波；当 $\alpha_{\max1} < \alpha < \alpha_{\max2}$ ，只有横波，当 $\alpha > \alpha_{\max2}$ 时，即无纵波，也无横波，会出现表面波。

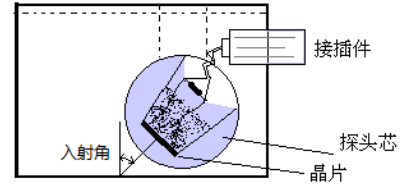


图 6. 可变角探头示意图

4. 超声波探伤与成像原理

超声探伤或成像都是通过测量反射波来获得物体内部的信息。在进行缺陷定位时，首先找到缺陷反射回波最大的位置，然后测量缺陷反射回波对应的时间 t ，根据被测材料的声速 v 可以计算出缺陷到探头入射点的垂直深度 H 或水平距离 L 。在超声成像时，探头在试块顶部二维扫描，得到来自试块内部缺陷深度的分布，再利用计算机进行图像重建，就可以得到试块内部缺陷的立体图像。

由于衍射的存在，实际的超声波总有一定的发散性。超声探头发射能量的指向性与探头的几何尺寸和波长有关，如图7所示。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，具体关系可以用公式表示如下：

$$\theta = 2\sin^{-1}(1.22\frac{\lambda}{D}) \quad (11)$$

通常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8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。

设X的位置为原点，A点到中心位置的坐标为 x_1 ，A'点的为 x_2 ，则直探头的扩散角为：

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{|x_1 - x_2|}{2H_B}\right) \quad (12)$$

斜探头的扩散角为：

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{|x_1 - x_2|}{2H_B}\right)\cos^2\beta \quad (13)$$

其中 H_B 为小孔的深度， β 为折射角。

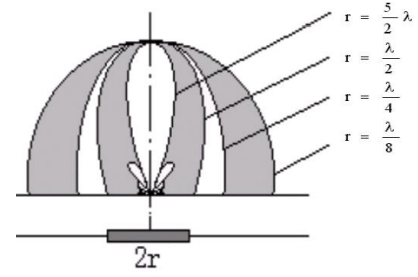


图 7. 超声探头发射能量指向性与超声波长和探头几何尺寸关系示意图

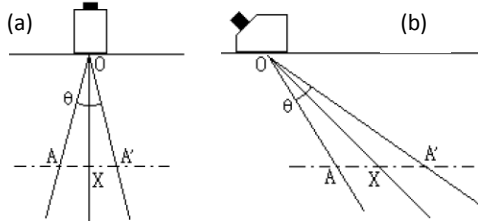


图 8 超声波探头的指向性 (a)直探头(b)斜探头

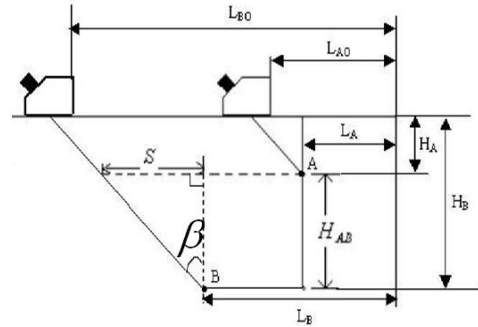


图 9 折射角测量示意图

对于斜探头，通过回波时间只能确定缺陷距离探头的直线距离，在实验中对缺陷的准确定位，需要确定折射角 β 。通常采用如图9所示的不同深度、不同水平位置的两个缺陷A、B对声波的反射来测量折射角。图中 L_A 、 L_B 分别为缺陷A、B具体参考点O的水平距离， H_A 、 H_B 分别为缺陷A、B的距离探测表面的垂直距离， L_{A0} 和 L_{B0} 分别为探头前沿距离参考点O的水平距离，则：

$$\beta = \arctan\frac{(L_{B0} - L_{A0}) - (L_B - L_A)}{H_B - H_A} \quad (14)$$

【实验内容】

1. 超声纵波主要性能的表征及 AI 块缺陷深度的定位
 - (1) 观察直探头超声脉冲波型，测量超声频率；
 - (2) 测量直探头延迟时间、A1块中纵波声速；
 - (3) 定位A1中不同缺陷的深度；
 - (4) 借助于一个缺陷，测量直探头的扩散角（选做）。
2. 超声横波主要性能及 AI 块缺陷的定位
 - (1) 观察斜探头(45°)的超声脉冲波型，测量超声频率；
 - (2) 采用斜探头，利用工件的同心大小圆弧测量斜探头的延迟时间、横波声速；
 - (3) 测量 A1 块对超声波的折射角；
 - (4) 借助于一个缺陷，测量斜探头的扩散角（选做）。
3. 采用可变角探头观察表面波，并测量表面波的声速（选做）。
4. 计算 AI 的弹性模量。
5. 超声成像(选作)：探测塑料板中的图形像

【实验步骤】

1. 将图中超声波实验仪 1 和示波器 7 及所需的超声波探头（3、4、5）按照图 10 所示的方式 10 连接；

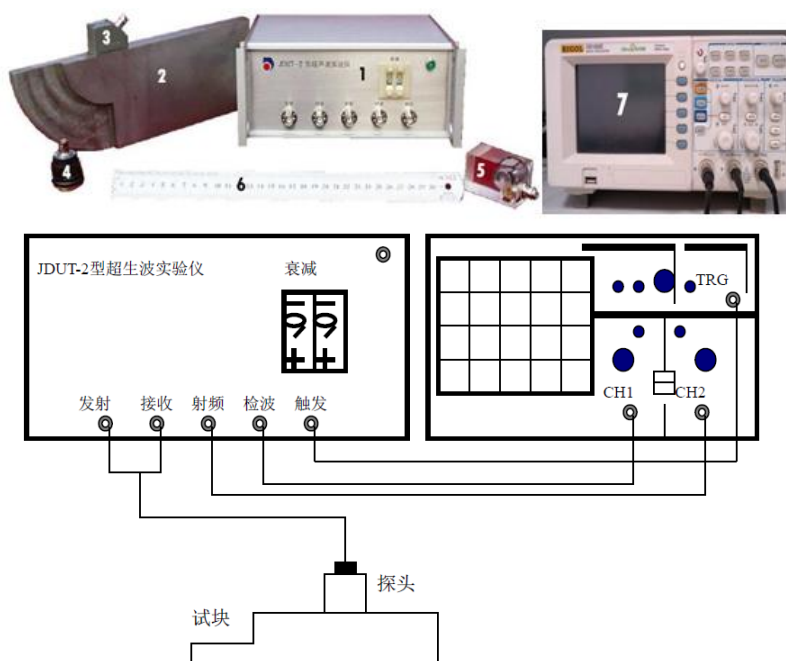


图 10. 超声波实验仪连接示意图

2. 在实验之前在探测AI表面洒上耦合剂一水，在表面形成水的薄层，使超声波能够耦合进入AI块，移动超声波探头，在示波器上观察AI反射的超声波。**注意：无水时不能将探头在AI块表面来回摩擦，以免磨坏探头表面的保护膜。**
3. 调节超声波实验仪上的衰减钮，使得超声波的强度符合要求
4. 移动探头，在示波器上观察声波型号的波形，调节示波器的功能键，使信号显示在尽可能全面的显示在示波器上，记录超声波初始信号及反射回波信号，按照要求完成相关实验测量。注意：在探测超声反射波时，一般用检波信号的前沿位置来定标信号。

【思考题】

1. 实验中是如何产生和探测超声波的？
2. 超声波在固体中的传播与在空气中有什么主要区别？
3. 直探头和斜探头发射的超声波有什么区别？
5. 简述超声探伤的原理。
6. 如何测量固体的弹性模量？

参考文献

- [1] Ampel, Frederick J; Uzzle, Ted (March 1993). *The History of Audio and Sound Measurement* (PDF). Audio Engineering Society: AES Convention Papers Forum.
- [2] Graff, Karl F (2012) [originally published 1981]. "A History of Ultrasonics". In Warren P. Mason. *Principles and Methods. Physical Acoustics. Volume XV*. New York: Elsevier. pp. 4–5. ISBN 978-0-323-15251-8.
- [3] Ultrasonic testing, https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing.
- [4] Matlack, K. H.; Kim, J.Y.; Jacobs, L. J.; Qu, J. (2015-03-01). "Review of Second Harmonic Generation Measurement Techniques for Material State Determination in Metals". *Journal of Nondestructive Evaluation*. 34 (1): 273.
- [5] Landau L.D. and Lifshitz, Course of Theoretical Physics, Volume 7: Theory of Elasticity (Third edition) World Scientific
- [6] Curie, Jacques and Curie, Pierre (1880), Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces, *Bulletin de la Societe de Minerologique de France*, 3: 90-93.
- [7] Curie, Jacques, and Curie, Pierre (1881), Contractions and expansions produced by voltages in hemihedral crystals with inclined faces, *Comptes Rendus* 93: 1137-1140.