



大学物理实验• 声学

超声波特性及应用

北京师范大学
物理实验教学中心

各向同性固体中的弹性波

声波在固体中的传播模式：

纵波、横波、表面波

声速 v \longrightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{介质的性质} \\ \text{波的类型} \\ v_L > v_T > v_s \end{array} \right.$

对于各向同性的材料，通常用**3**个参量表征其弹性特征，参量之间满足：

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

E : 介质弹性模量

G : 剪切模量

σ : 泊松比

各向同性固体中，设**t**时刻初始平衡位置 \vec{r} 处的微元位移为 \vec{u} ，弹性波方程为：

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

ρ : 介质的密度

设解有行波的形式:

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{a} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad \vec{a} \text{ 为一常矢量}$$

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

$$\begin{aligned} \rho \omega^2 &= \left(G + \frac{G}{1 - 2\sigma} \right) k^2 \\ &= \frac{(1 - \sigma)E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} k^2 \end{aligned}$$

纵波声速:

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

横波： $\vec{a} \cdot \vec{k} = 0$ ，且有 $\rho\omega^2 = E$

横波声速：

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

表面波波速 v_s 与横波声速 v_T 、纵波声速 v_L 之间满足关系：

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

材料的弹性参数可以表示为:

$$G = \rho v_t^2$$

$$E = \rho v_t^2 \frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1}$$

$$\sigma = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}$$

其中: $\gamma = v_l/v_t$

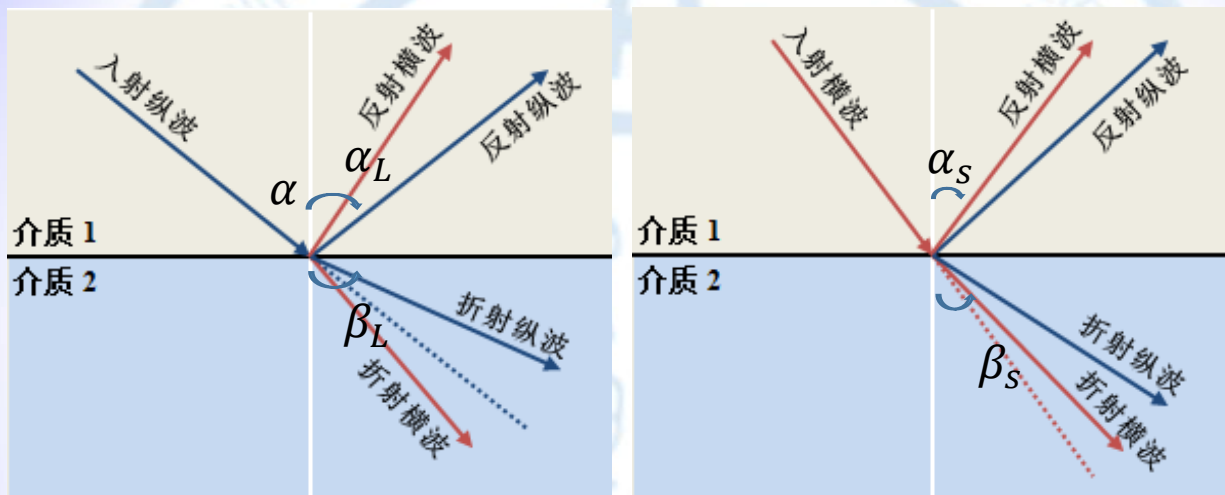
通过测量材料的密度与弹性波速,可以求材料的弹性参数。

超声波技术可以测量非透明截止中的声速。

超声波特点

- 在气体、液体、固体等介质中能中有效传播
- 可传递很强的能量
- 方向性强，能量易于集中、传播距离远
- 超声波会产生反射、折射、干涉和衍射现象

超声波的反射和折射现象



反射:
$$\frac{\sin \alpha}{v} = \frac{\sin \alpha_L}{v_{1L}} = \frac{\sin \alpha_S}{v_{1S}}$$

(Sneel定律)

折射:
$$\frac{\sin \alpha}{v} = \frac{\sin \beta_L}{v_{2L}} = \frac{\sin \beta_S}{v_{2S}}$$

超声波的临界角

第一临界角:

$$\alpha_{\max_1} = \arcsin(v/v_{2L})$$

$\alpha > \alpha_{\max_1}$: 只有横波

第二临界角:

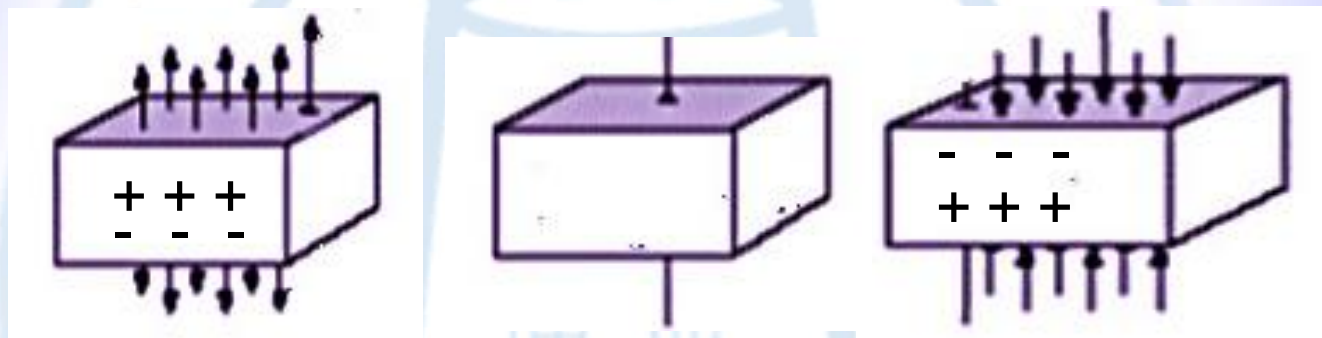
$$\alpha_{\max_2} = \arcsin(v/v_{2T})$$

$\alpha > \alpha_{\max_2}$: 即无纵波, 也无横波

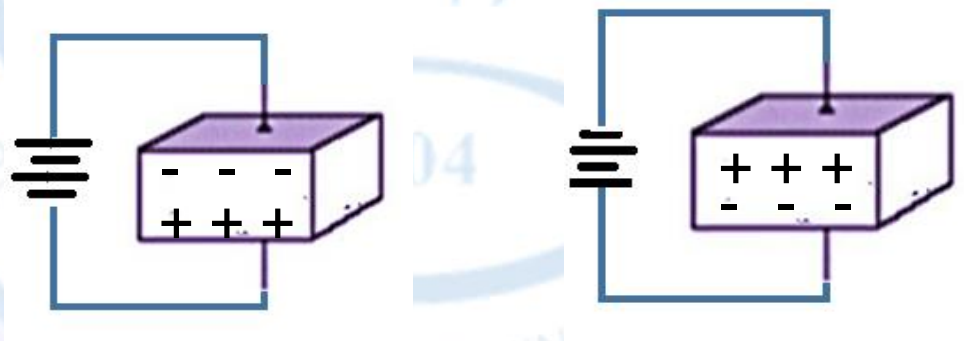
超声波的产生与探测

- 压电效应及其逆效应
 - 磁致伸缩效应
 - 电磁声效应
 - 机械声效应等
- 1834年, F. Savart用轮子首次人工产生了频率为 2.4×10^4 Hz的超声波
- 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

1880年P.Curie和J.Curie兄弟发现了压电效应和
逆压电效应



压电效应



逆压电效应

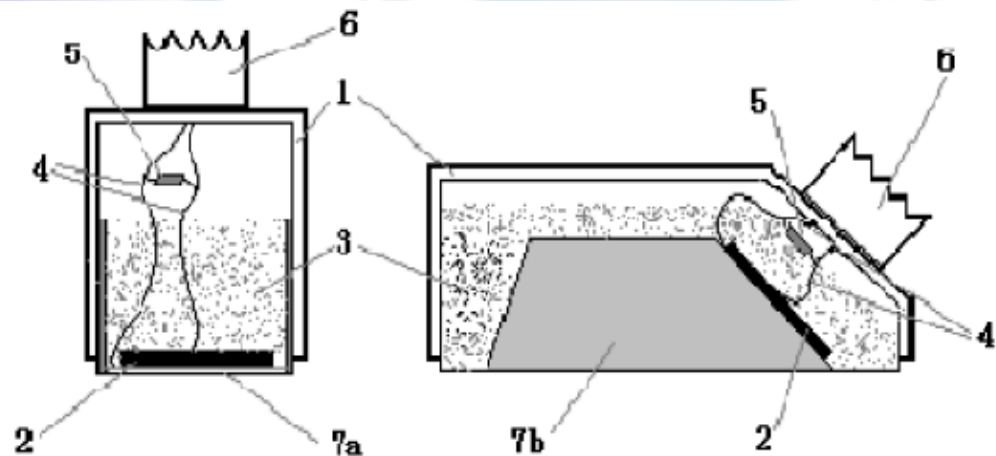
压电材料的类型：

- 压电晶体：石英等
- 压电陶瓷：钛酸钡、磷酸二氢钾等
- 高分子压电材料：聚偏氟乙烯等

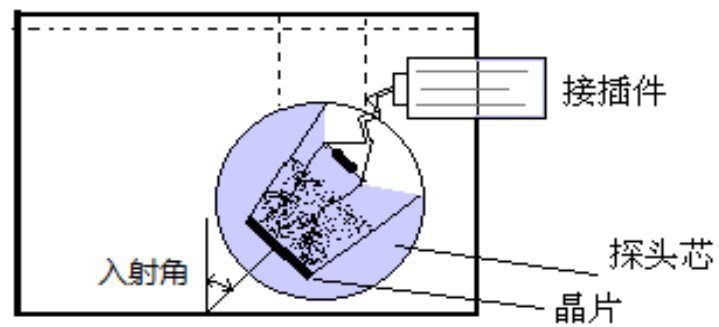
超声换能器：

压电材料 → 压电材料片 → 金属电极

不同探头



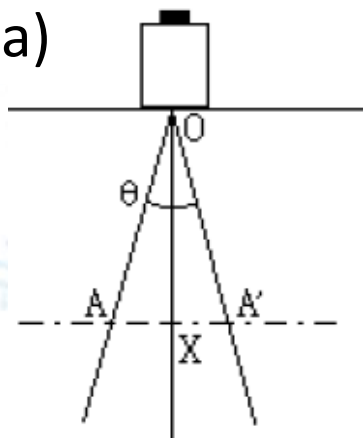
直探头和斜探头的基本结构(1-外壳 2-晶片 3-吸收背衬
4-电极接线 5-匹配电感 6-接插头 7a-保护膜 7b-斜楔)



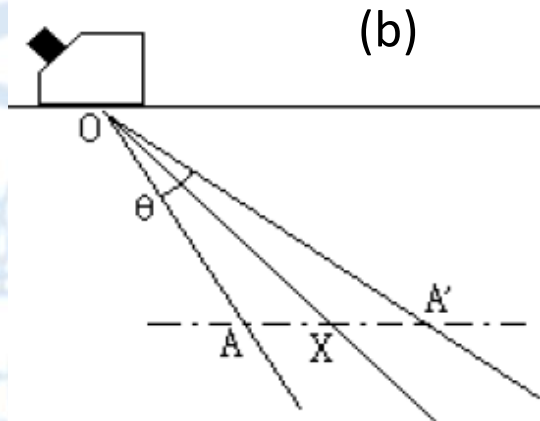
可变角探头示意图

探头的扩散角

(a)



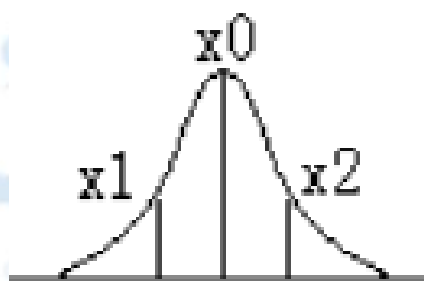
(b)



超声波探头的指向性 (a)直探头(b)斜探头

$$\theta = 2 \arctan \frac{|x_2 - x_1|}{2H_B}$$

$$\theta = 2 \arctan \frac{|x_2 - x_1|}{2H_B} \cos^2 \beta$$



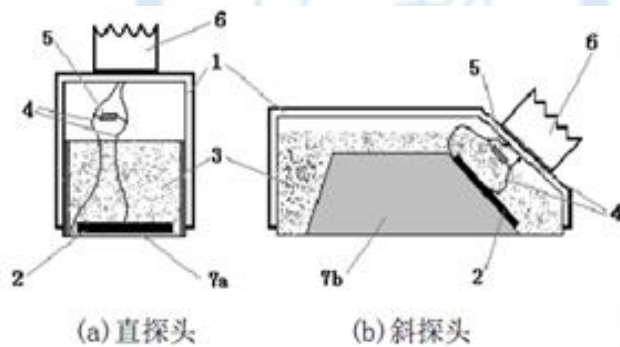
实验内容

- 用直探头测量A1中纵波声速及缺陷深度
- 用斜探头测量A1中横波声速及缺陷位置
- 用可变角探头测量A1块表面波声速
- 计算A1块的弹性常数及相对误差(选做)

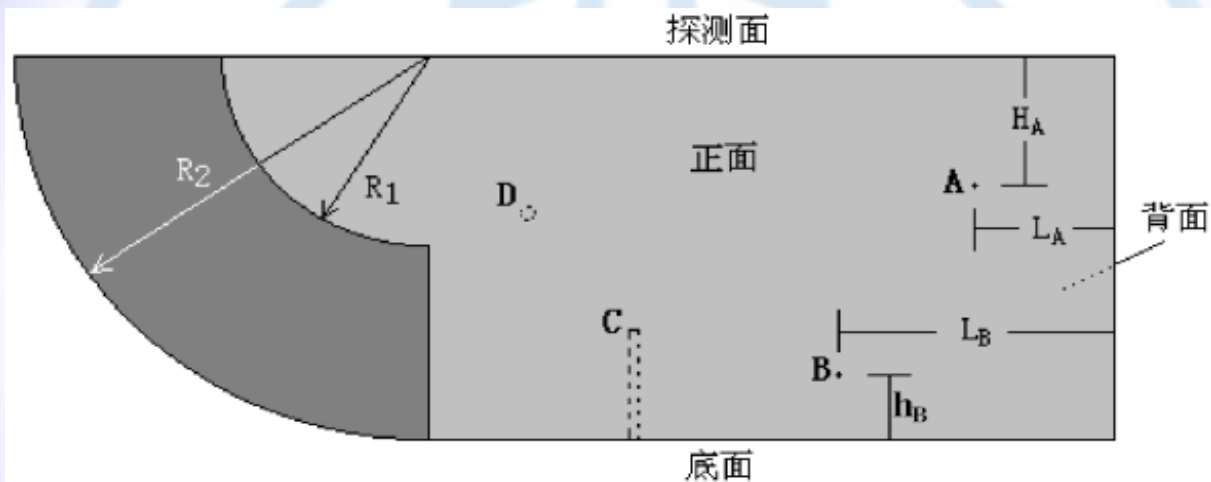
重点：

- 掌握时差法测量声速的方法
- 掌握减小测量误差的方法

实验仪器



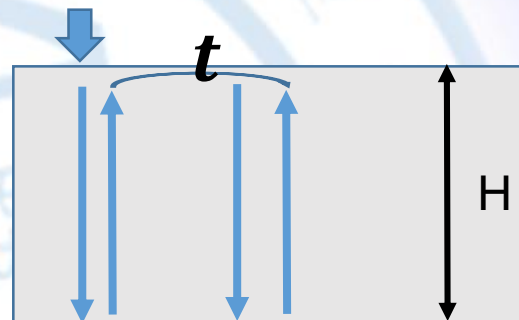
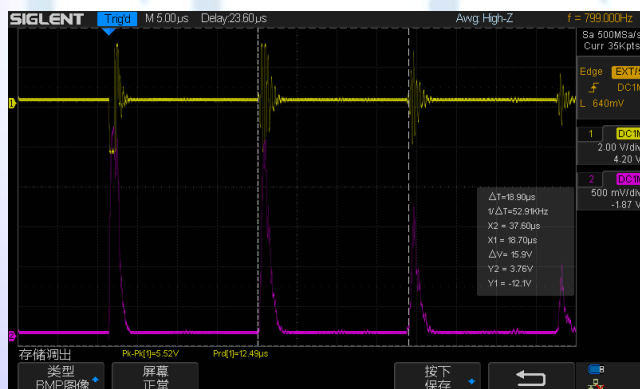
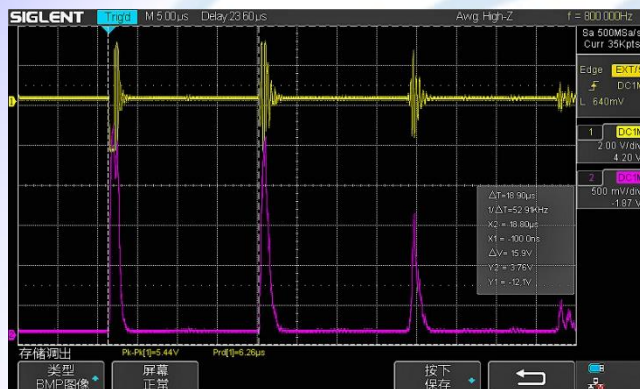
测试块的结构图



$$R_1=30\text{mm}, R_2=60\text{mm}, L_A=20\text{mm}$$

$$H_A=20\text{mm}, L_B=50\text{mm}, h_B=10\text{mm}$$

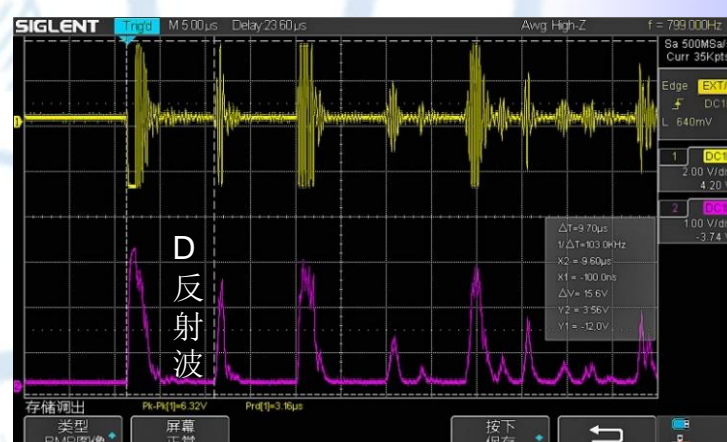
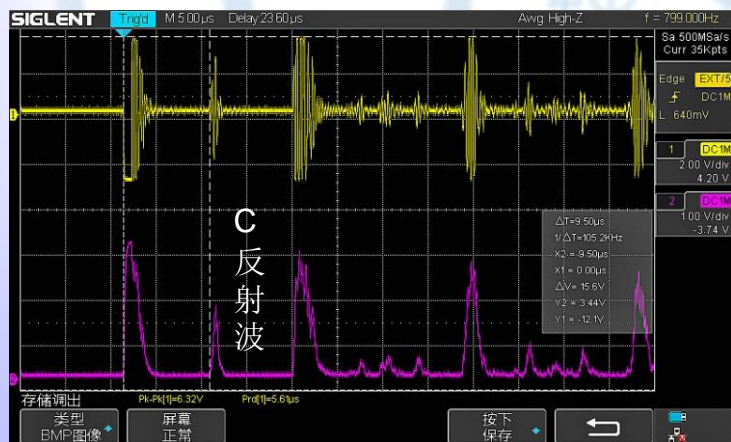
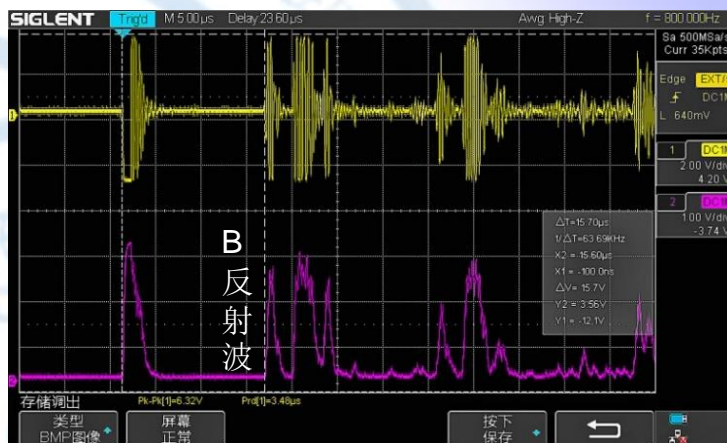
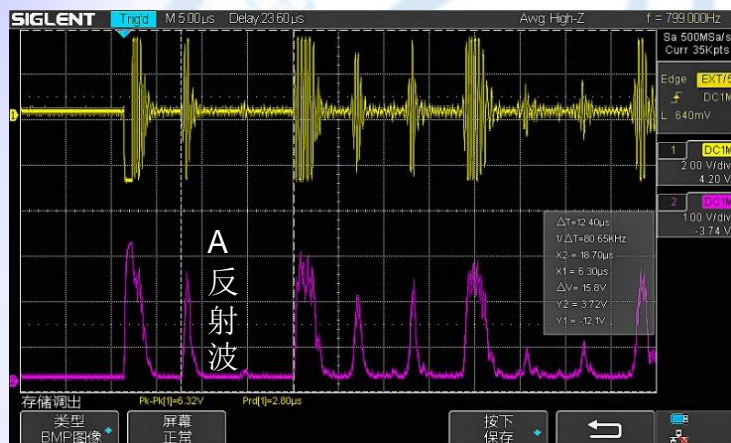
用直探头测量纵波声速:



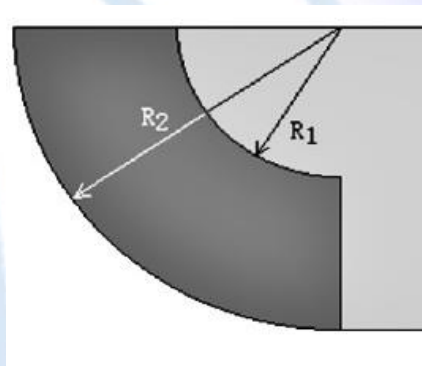
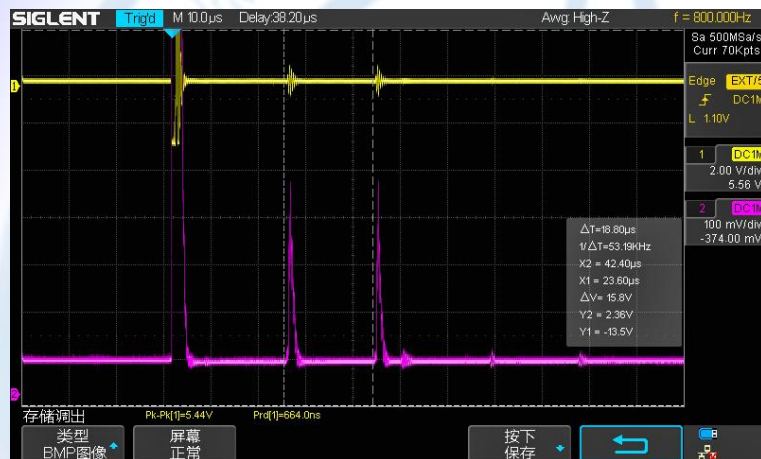
$$v_L = \frac{2H}{t}$$

注意：测量反射回波之间的时间间隔, 排除探头的时间延迟和时间零点选择的误差

用纵波反射回波信号测量缺陷的深度位置



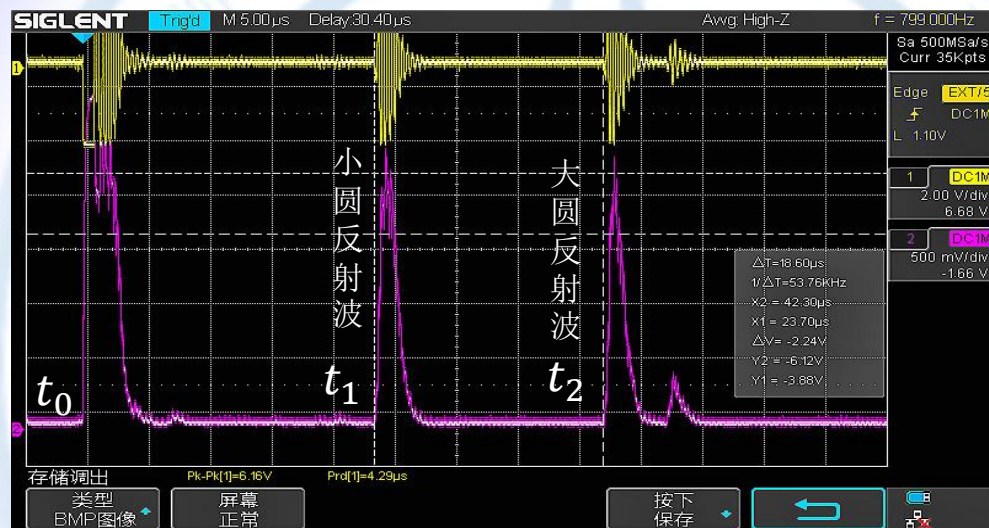
横波声速的测量:



$$v_T = 2(R_2 - R_1)/t$$

注意：测量同心大、小圆弧反射回波的时间间隔，排除探头时间延迟和时间零点选择的误差

斜探头前沿到中心的距离 L_0 及延迟时间 t_d



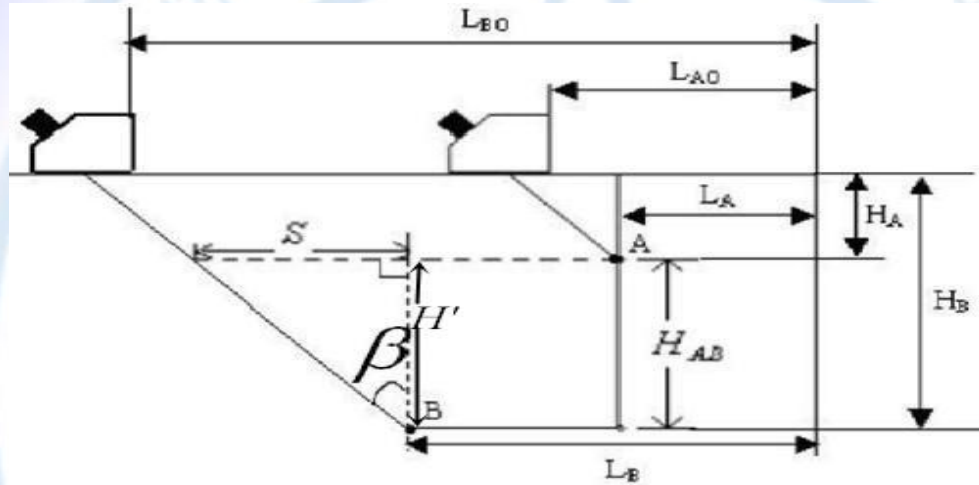
$$t_1 - t_0 = \frac{2R_1}{v_T} + t_d$$

$$t_2 - t_0 = \frac{2R_2}{v_T} + t_d$$

$$t_d = \frac{t_1 R_2 - t_2 R_1}{R_2 - R_1} - t_1$$

$$L_0 = 15 \text{ mm}$$

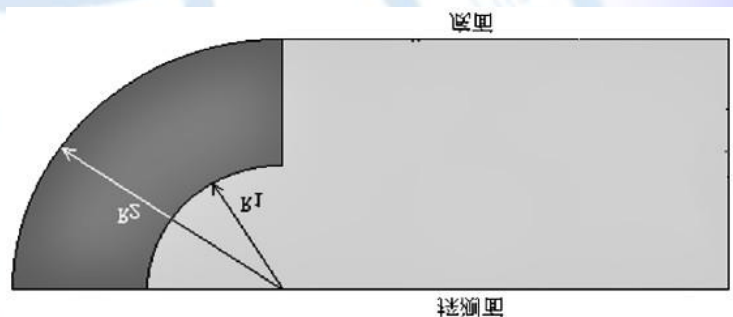
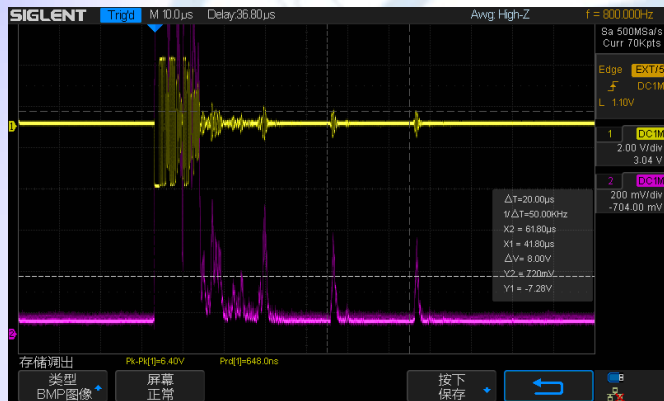
用A、B孔的反射回波信号测量铝块折射角



已知: $L_A=20\text{mm}$, $H_A=20\text{mm}$
 $L_B=50\text{mm}$, $H_B=50\text{mm}$

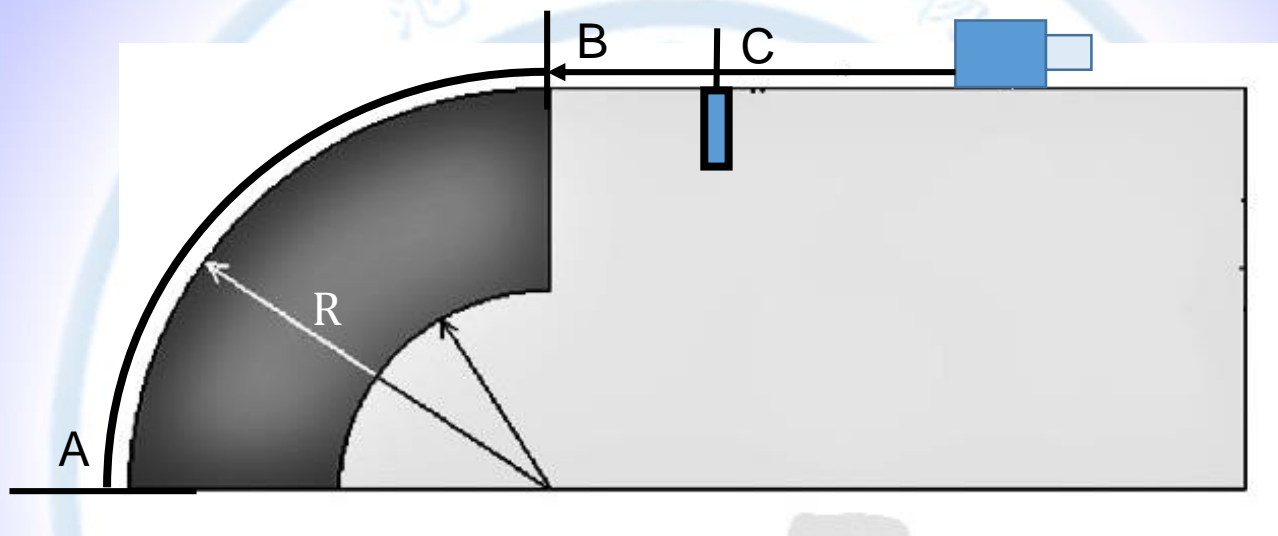
$$\beta = \arctan \frac{(L_{B0} - L_{A0}) - (L_B - L_A)}{L_B - L_A}$$

表面波声速的测量:



注意：测量大圆边界反射回波的时间差随探头移动距离的变化关系，拟合函数求表面波的声速（波反射路程是移动距离的2倍）

表面波声速测量及弧长测量



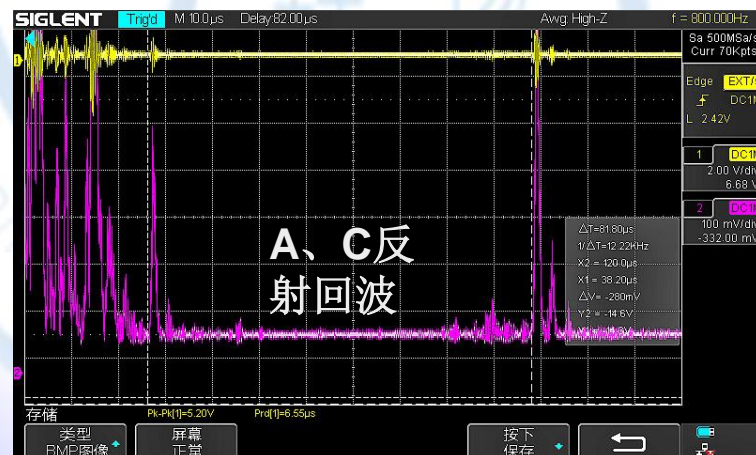
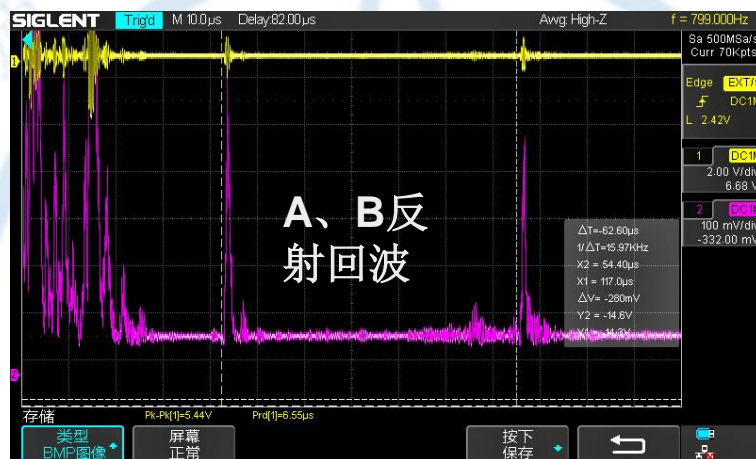
A、B边缘反射回波的时间差: t_{AB}

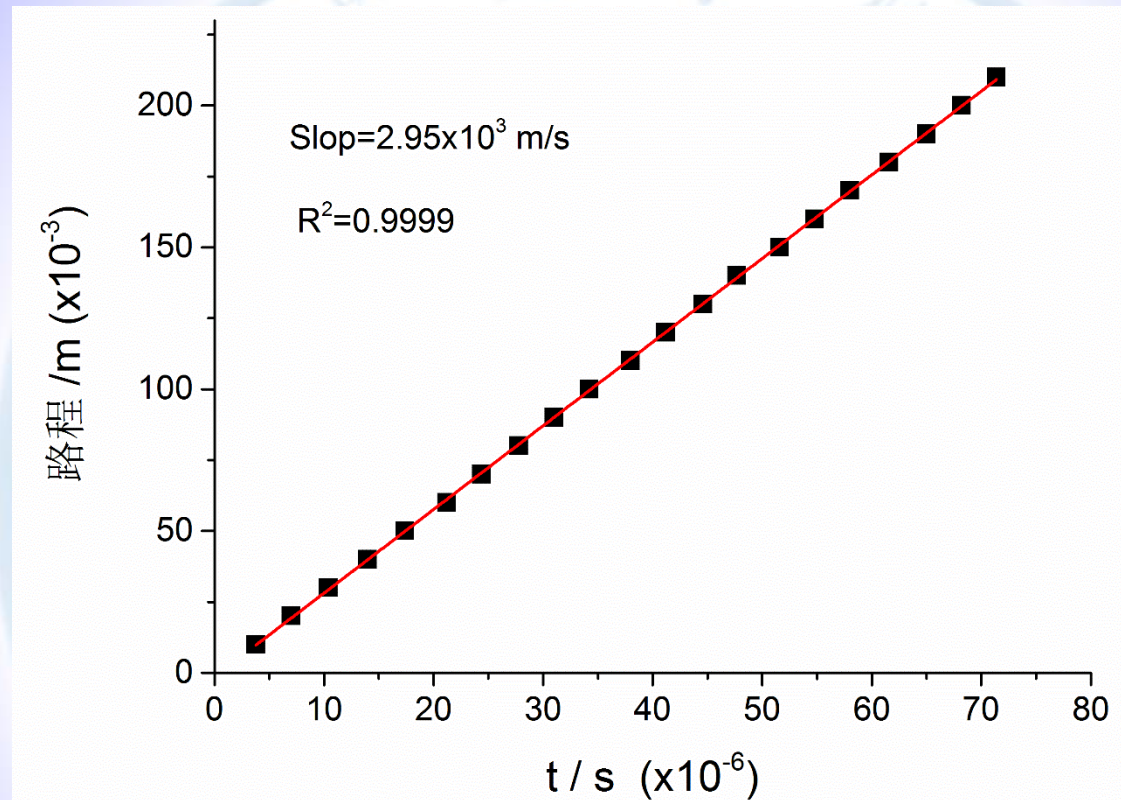
$$l_{AB} = v_S t_{AB} / 2$$

改变 l_{BC} , 测量**A**边缘和 C 孔反射波时差: t_{AC}

$$l_{BC} = v_S t_{AC} / 2 - l_{AB}$$

用表面波测量圆弧长度及表面缺陷的位置





表面波路程变化量与传播时间
增量之间的关系

由测量的声速 v_L 、 v_T 、 v_S 计算 E 、 σ 及相对误差

铝块特性参数

v_L 10^3 m / s	6.27	v_T 10^3 m / s	3.10	v_S 10^3 m / s	2.90
E 10^{10} N/m^2	6.94	σ	0.33	ρ g/cm^3	2.70



学习快乐!