

超声波探测斜探头的折射角测量方法

杨学博 赵羽佳

(北京邮电大学 理学院, 北京 100876)

摘要: 在超声波探测中, 斜探头的折射角是影响测量结果的一个重要参数。本文设计和讨论了斜探头折射角的测量方法, 并进行了实验。

关键词: 超声波 斜探头 折射角

超声波是自然界最重要的波动形式之一, 其频率范围为 $2 \times 10^4 \text{Hz} \sim 2 \times 10^{12} \text{Hz}$, 具有方向性好、穿透力强、易于产生和接收等特点, 能够在所有弹性介质中传播。作为信息的载体, 超声波是探测介质内部特性与结构的重要手段。在实际生活中, 超声波广泛应用在探伤、测距、医学诊断和成像等方面。

1. 问题的提出

超声波探测实验是大学物理的一个综合性实验。主要了解超声波的产生方法、传播规律和探测原理, 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应用的实用技术。目前普遍利用压电效应制成的探头来产生和接收超声波。超声波探头按波束传播方向一般可分为直探头, 斜探头, 可变探头等。斜探头波束传播方向与垂线有一定的角度, 这个角度就是斜探头的折射角, 如图 1 所示。折射角 β 的值作为斜探头的参数之一, 在超声探伤中必不可少。在实验中, 利用斜探头探测是本实验的难点。本文主要讨论斜探头折射角的测量方法。

(1) 斜探头定位原理

利用斜探头探测内部不可见的缺陷, 与直探头相比, 斜探头不仅可以测量深度, 还能测量缺陷的横向距离。利用斜探头定位就是确定缺陷深度 H_c 与水平距离 X_c (如图 1 所示)。通过对入射点到缺陷的距离 D_c 和折射角 β 的测量, 得到具体关系为:

$$\begin{aligned} X_c &= D_c \sin \beta + X_{c0} - L' \\ H_c &= D_c \cos \beta \\ D_c &= v(t - t_0) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 v 为超声波声速, t 为缺陷一次回波时间, t_0 为探头延迟时间, L' 为入射点位置。从测量公式可以看出如果折射角 β 误差过大, 对定位的准确性产生很大影响。

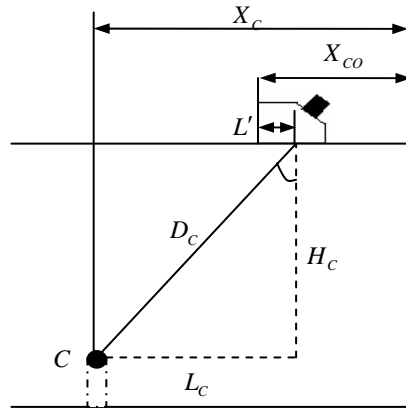


图 1 斜探头定位原理图

在实验中采用 JDUT-2 型超声波实验仪，信号采集利用 TDS2002 型数字式示波器。测量工件为铝试块，如图 2 所示。试块内部有三个缺陷，其中 A,B 为两个细孔，前后贯通,C 为内部缺陷,只从底面可见。其中 $R_1 = 30\text{ mm}$, $R_2 = 60\text{ mm}$, $H = 60\text{ mm}$, $H_b = 50\text{ mm}$, $X_b = 50\text{ mm}$, $H_a = 20\text{ mm}$, $X_a = 20\text{ mm}$ 。

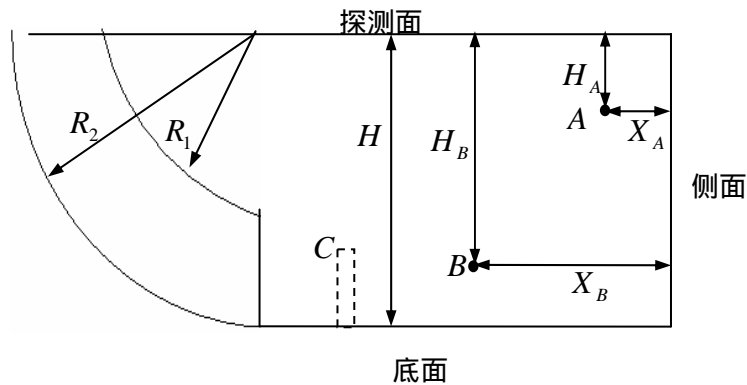


图 2 铝试块尺寸图

(2) 物理实验中测量折射角的方法

在物理实验中测量角普遍应用的方法是利用已知缺陷A和B的位置^[1]，通过寻找A,B两孔反射回波，测量斜探头到侧面距离 X_{AO} 和 X_{BO} 。利用几何关系得到

$$\beta = \text{tg}^{-1} \frac{X_{BO} - X_{AO} - (X_B - X_A)}{H_{AB}} \quad (2)$$

从公式可以看出判定缺陷 A 和 B 的准确位置 X_{AO} 和 X_{BO} 是保证测量结果准确的关键。在具体实验中发现由于 B 孔的位置很深，它的反射回波幅度很小，再加上缺陷 B 和 C 在深度上又很接近，所以实验中准确确定 B 孔的回波位置会很困难。为了克服上述困难，在实验中我们探索了几种测量角的方法，在此介绍以下两种测量方法。

2. 测量角的方法

方法 1：利用底棱回波测量角

实验中发现，铝块的底棱（即底面与侧面的交线）有很大的反射回波，很容易观测。通过测量底棱回波最大的位置 X_e 和一次回波时间 t_e ，利用三角关系（见图 3）得到如下测量公式：

$$\beta = \tan^{-1} \frac{L' + X_e}{H} \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{2H}{D_e} = \cos^{-1} \frac{2H}{v(t_e - t_0)} \quad (4)$$

实验中可以利用两个圆弧面 R_1 和 R_2 测量入射点位置 L' 、超声波波速 v 和延迟时间 t_0 。

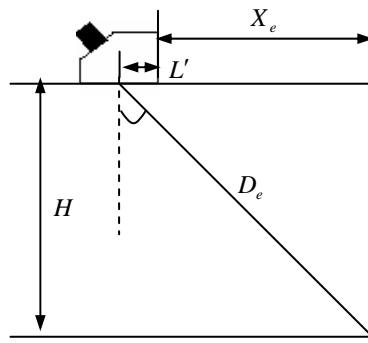


图 3 利用底棱回波测量角原理图

方法 2：利用斜探头的发散角测量折射角

实验中有这样一个现象：当移动斜探头寻找底棱回波时，回波在一段范围内都存在，而且在某位置回波振幅值最大，同时反射回波的时间也会因探头位置不同而不同。造成这一现象的原因是探头有一定的发散角（如图 4 所示）。当探头处于位置 1 时，恰好刚开始能接受到反射回波，即上边缘的超声波开始反射回波。随着探头向右运动（从位置 1 到位置 2），反射的超声波能量增多，回波幅度逐渐增大。当运动到位置 2 时，此时反射回波幅度达到极大值。再继续移动探头，从位置 2 到位置 3，回波幅度减小，直到位置 3，恰好回波刚消失。

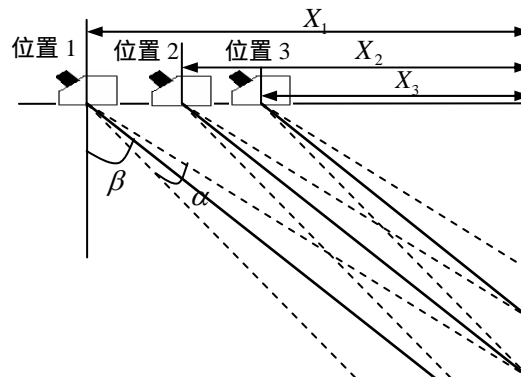


图 4 利用斜探头的发散角测量折射角

如果记下位置 1，位置 2，位置 3 的一次反射回波时间 t_1 ， t_2 ， t_3 ，就可利用回波存在的反射时间范围 (t_3 ， t_1) 和最大峰值的回波时间 t_2 ($t_1 > t_2 > t_3$) 之间的关系推导出折射角 β 的三角关系式。根据几何关系有

$$\cos(\beta + \frac{\alpha}{2}) = \frac{2H}{v(t_1 - t_0)} \quad (5)$$

$$\cos \beta = \frac{2H}{v(t_2 - t_0)} \quad (6)$$

$$\cos(\beta - \frac{\alpha}{2}) = \frac{2H}{v(t_3 - t_0)} \quad (7)$$

令 $T_1 = t_1 - t_0$ ， $T_2 = t_2 - t_0$ ， $T_3 = t_3 - t_0$ ，并使(5)和(7)式子相加、相减得

$$\cos \beta \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{H}{v} (\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_1}) \quad (8)$$

$$\sin \beta \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{H}{v} (\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}) \quad (9)$$

将(6)带入(8)得

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{(T_1 + T_3)T_2}{2T_1T_3} \quad (10)$$

由(8)和(9)式可得

$$\tan \beta = \frac{T_1 - T_3}{T_1 + T_3} \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{(T_1 - T_3)T_2}{\sqrt{(2T_1T_3)^2 - (T_1 + T_3)^2 T_2^2}} \quad (11)$$

另外，可以推导出折射角 β 与探头位置 X_1 ， X_2 ， X_3 的关系：

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{X_2(2X_2 - X_1 - X_3)}{2X_1X_3 - (X_1 + X_3)X_2}} \quad (12)$$

3. 测量结果和讨论

在实验中我们分别采用上述两种方法对折射角进行测量，各测量值均取六次测量均值。

方法 1：

测量 $L' = 17.28\text{mm}$ ， $X_e = 43.8\text{mm}$ 。代入公式(3)， $\beta = 45.5^\circ$ 。

测量 $t_e = 60.06\mu\text{s}$ ， $v = 3136.4\text{m/s}$ ， $t_0 = 5.53\mu\text{s}$ 。代入公式(4)， $\beta = 45.4^\circ$ 。

方法 2：

测量 $t_1 = 76.13\mu\text{s}$ ， $t_2 = 59.67\mu\text{s}$ ， $t_3 = 51.07\mu\text{s}$ ， $t_0 = 5.53\mu\text{s}$ 。代入公式(11)和(12)， $\beta = 45.2^\circ$ ，

$$\alpha = 24.2^\circ$$

本文我们介绍了分别利用工件的底棱和斜探头的发散角测量折射角 的两种方法。与实验中原有的方法相比，方法 1 几何关系简单，易于理解。但在实验中需要对波速、延迟时间和入射点位置的测量，如果这三点的测量不准确，将导致折射角 不准确。所以说，该方法对实验的测量准确度提出了更高的要求。

方法 2 从斜探头发散角入手得出测量折射角的方法，开阔了思路，而且可以附加得到发散角的值。在实验过程中从示波器上准确读出回波出现和消失的准确时间 t_1, t_3 是个难点，因为回波峰值很小时会混到杂波中，难以分辨。

在实验中我们还实验了其他方法，比如用回波强度大的底棱代替原测量方法中的缺陷 B 等。实验中除了不同的实验方法影响测量结果，在具体操作中，比如直尺测量探头位置，以及对探头微小的扰动造成回波幅度的变化等都会对测量结果产生影响。

参考文献：

- [1]肖井华，蒋达娅，陈以方，董淑香.大学物理实验教程[M].北京:北京邮电大学出版社,2005.
- [2]张连芳，柯伟平.超声波波形转换与表面波的检测[J].物理实验,2006,26(2):8-10.
- [3]张三慧.大学物理学(第四册 波动与光学)[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4]杨述武.普通物理实验[M].北京:高等教育出版社,2000.

Measuring the refractive angle of oblique probe on the ultrasonic detection

Yang Xue-bo, Zhao Yu-jia

(School of Sciences, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876, China)

Abstract: In the ultrasonic detections by use of oblique probe, the value of refraction angle of oblique probe affects the results of detection. In this article, we designed and experimented measuring methods of refraction angle of oblique probe.

Key words: ultrasonic wave, oblique probe, refractive angle

作者简介：杨学博和赵羽佳北京邮电大学电信工程学院 2004 级本科学生。