

第五章 超声波检测 (UT)

5.1 超声检测的物理基础

补充概念知识：

振动与波

- 物体或质点在某一平衡位置附近作往复运动，这种运动状态就叫做**机械振动**，简称振动。
- 如果物体或质点作周期性直线振动，它离开平衡位置的距离与时间可以用正弦或余弦函数表示，称为**简谐振动**。
- **波动**是振动在物体或空间中的传播；
- 振动是产生波动的根源，**波动**是振动的结果；

机械波与电磁波的区别

- 波动可分称两大类，一类是机械波，另一类是电磁波。
- 两者有很大的本质区别，不可混淆。
- 机械波是机械振动在弹性介质中引起的波动过程。例如水波、声波、超声波等。
- 电磁波则是电磁振荡所产生的变化电场和变化磁场在物体中或空间(如真空)的传播过程，如无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线等。

机械波的产生与传播

- **产生机械波的两个基本条件**
 - (1) 要有作机械振动的**波源**。
 - (2) 要有能传播机械振动的**弹性介质**

- **机械振动与机械波的关系**

互相关联，振动是产生机械波的根源，机械波是振动状态的传播。波动中介质各质点并不随波前进，而是按照与波源相同的振动频率在各自的平衡位置上振动，并将能量传递给周围的质点。因此，机械波的传播不是物质的传播，而是振动状态和能量的传播。

声波的产生

PS:什么是扰动?

简单地说，扰动是指在空气、固体和液体中密度、压力或者是速度的一个微小变化，这个变化在连续的弹性体中就会传播出去，值得注意的是，传播出去的是能量，弹性物质本身并不会传播，也就是说声音是能量的传递。

哪些是机械振动的声源？哪些是气流扰动的声源？

演奏打击乐器时的鼓皮等的振动

演奏管乐器时号嘴的气流扰动

声波只能在空气中传播吗？

声波可以在气体、液体和固体中传播，在不同的介质中传播的速度是不同的。

为了产生声音，声源的振动一定很剧烈！

通常声源的振动的幅度是很小的，在繁华的大街上，我们听到很嘈杂的声音，其空气质点的振动速度仅约 0.24cm/s ，与一般的机械振动相比，声波只是一种微扰动。

声波的产生

- 声音的本质是波动。受作用得空气发生振动，当震动频率在20–20000Hz时，作用于人的耳鼓膜而产生的感觉称为声音。声源可以是固体、也可以是流体（液体和气体）的振动。声音的传媒介质有空气。水和固体，它们分别称为空气声、水声和固体声等。

描述声波的物理量

◆ 声波的速度、波长、频率和波阵面

声速：

声波在弹性媒质中的传播速度称为声波，记作 c ，单位是m/s。

声速不是质点的振动速度而是振动传播的速度，它的大小与振源的特性无关，而与介质的弹性、密度以及温度有关。

声速与温度的关系

声速的两面性

描述声波的物理量

◆ 声波的速度、波长、频率和波阵面

波长：在传播路径上，两相邻同相位质点之间的距离称为波长，记作 λ ，单位是m。

周期：声波传播了一个波长，也表明一个质点振动了一个周期T，单位为s。

频率：质点在单位时间内振动的周期数，称为频率，用f表示，单位为Hz。

在一定介质中声速是确定的，频率、波长、周期和声速有如下关系：

$$c = f\lambda \text{ 或 } c = \lambda/T$$

次声波、声波和超声波

- **声波** 一般意义上的声波，是指能引起人的听觉、频率在 **20 ~ 20 000 Hz** 的机械波，又称声音或声。

- 次声波 ($10^{-4} \sim 16$ Hz) : 频率 < 20 Hz 人耳听不到；
- 声波：频率在 $20 \sim 20000$ Hz 之间，人耳可闻
- 超声波 ($20\ 000 \sim 5 \times 10^8$ Hz) : 频率 > 20000 Hz, 人耳不可闻
- 特超声波 ($5 \times 10^8 \sim 10^{12}$ Hz) : 人耳不可闻
- 对钢等金属材料的检测，常用的频率为 $0.5 \sim 10$ MHz

次声波的特点

- 次声波的传播速度和可闻声波相同。
- 频率低于1Hz的次声波，可以传到几千以至上万千米以外的地方。
- 次声波具有极强的穿透力，穿透大气、海水、土壤，而且还能穿透坚固的钢筋水泥构成的建筑物，坦克、军舰、潜艇和飞机。
- 1883年8月，南苏门答腊岛和爪哇岛之间的克拉卡托火山爆发，产生的次声波绕地球三圈，全长十多万公里，历时108小时。
- 1961年，苏联在北极圈内新地岛进行核试验激起的次声波绕地球转了5圈。
- 7000Hz的声波用一张纸即可阻挡，而7Hz的次声波可以穿透十几米厚的钢筋混凝土。
- 地震或核爆炸所产生的次声波可将岸上的房屋摧毁。次声如果和周围物体发生共振，能放出相当大的能量。
- 人体内脏固有的振动频率和次声频率相近似（0.01-20赫），倘若外来的次声频率与体内脏的振动频率相似或相同，就会引起人体内脏的“共振”，从而使人产生上面提到的头晕、烦躁、耳鸣、恶心等等一系列症状。马六甲海峡的那桩惨案，就是因为这艘货船在驶近该海峡时，恰遇上海上起了风暴，风暴与海浪摩擦，产生了次声波。次声波使人的心脏及其它内脏剧烈抖动、狂跳，以致血管破裂，最后促使死亡。

特超声的特点

- 该频段的超声频率，已高到可与电磁波的微波频率相比拟，而具有超声自身的许多优越特性，在固体物理领域中已得到广泛应用。该频段的低端，在现代电子技术、激光技术、信息处理和集成光学等领域有重要的应用。频率高于500MHz 的特超声的波长已可与晶格尺寸相比拟，是研究物质结构的一种重要的新手段。

超声波特点

- 方向性好
- 能量高
- 能在界面上产生反射、折射、衍射和波型转换
- 穿透能力强

5. 2 超声检测的定义和作用

- 使超声波与试件相互作用，就反射、透射和散射的波进行研究，对试件进行宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的检测和表征，并进而对其特定应用性进行评价的技术。
- 特种设备行业，通常指宏观缺陷检测和材料厚度测量。
- 作用：质量控制、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率。

5. 2. 1超声脉冲反射法检测工作原理

- **脉冲反射法：**

声源产生的脉冲波进入到试件中——超声波在试件中以一定方向和速度向前传播——遇到两侧声阻抗有差异的界面时部分声波被反射——检测设备接收和显示——分析声波幅度和位置等信息，评估缺陷是否存在或存在缺陷的大小、位置等。

- 通常用来发现和对缺陷进行评估的基本信息为：

- 1、是否存在来自缺陷的超声波信号及其幅度；
- 2、入射声波与接收声波之间的传播时间；
- 3、超声波通过材料以后能量的衰减。

超声波无损检测的优点：

- (1) 探测的厚度大；
- (2) 成本低，速度快；
- (3) 对人体无害；
- (4) 对危害较大的平面型缺陷的探测灵敏度高。

2) 超声波的缺点:

- (1) 记录性差;
- (2) 效果和可靠程度, 主要取决于操作人员的责任性, 工作时的精神状态和技术高低。

超声波的特性

束射特性:因为超声波频率较高，波长较短，声束指向性较好，可使超声能量向一个确定的方向集中辐射，所以利用超声波可在被检工件内部发现缺陷，又便于缺陷定位；

- **反射特性:**超声波在弹性介质中传播时，遇到异质界面时会产生反射、透射或折射。超声脉冲反射法的基本原理就是利用超声波在缺陷与材料间异质界面的反射来发现缺陷的。
- **传播特性:**超声波在弹性介质中传播时，质点振动位移小、振速高，强度与频率的平方成正比，其声压和声强远大于声波，使得超声检测具有很强的穿透能力。在一些金属材料中检测范围可达**数米**。
- **波型转换特性 :**超声波斜入射在两个声速不同的异质界面上容易实现波型转换。纵波、横波、板波、表面波都可以通过压电晶片产生的纵波在异质界面实现不同波型的转换。

(2) 超声波的分类

超声波的分类方法很多，如图 5.1 所示。主要有：按介质质点的振动方向与波的传播方向之间的关系分类，即按波型分类；按波振面的形状分类，即按波形分；按振动的持续时间分类等。其中，按波型是研究超声波在介质中传播规律的重要理论依据，将着重讨论

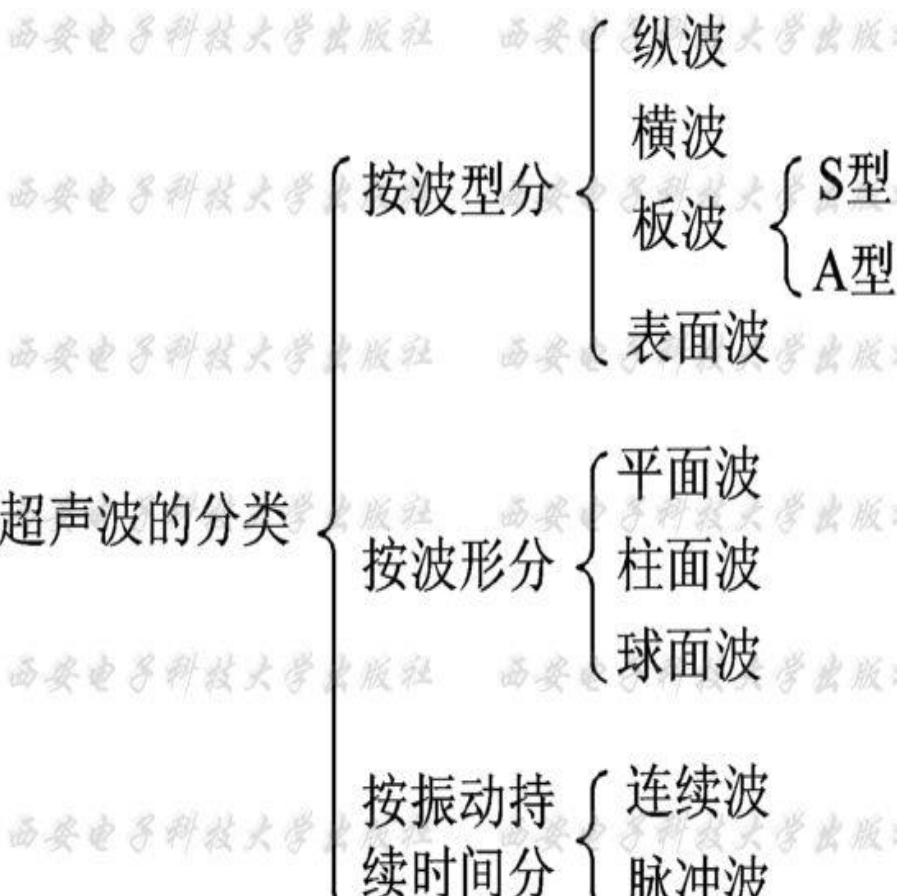


图 5-1 超声波的分类

补充知识：

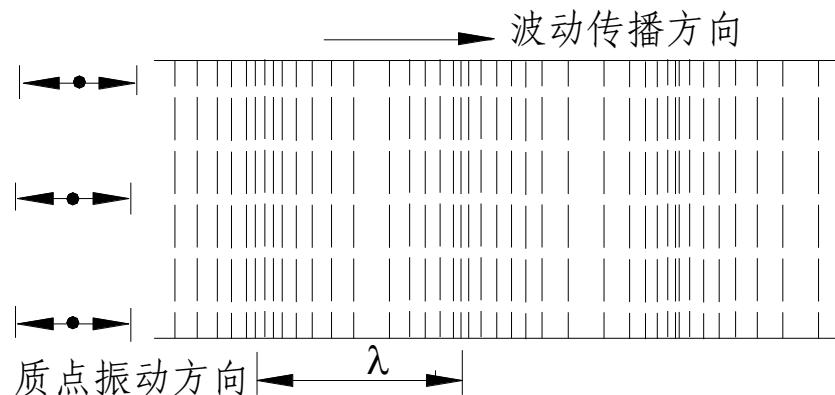
波的类型

- 1) 根据波动传播时介质质点的振动方向相对于波的传播方向的不同，可将波动分为多种波型，在超声检测中主要应用的波型有纵波、横波、表面波和板波等。
- 2) 据波阵面形状不同，可以把不同波源发出的波分为平面波、柱面波和球面波。
- 3) 波源振动的持续时间长短，分为连续波和脉冲波

波的类型——纵波L

1、定义：介质中质点的振动方向与波的传播方向互相平行的波，称为纵波，用L表示。

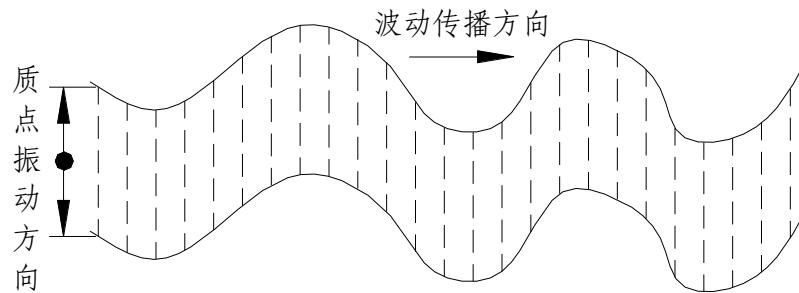
- 纵波中介质质点受到交变拉压应力作用并产生伸缩形变，故纵波亦称为压缩波。而且，由于纵波中的质点疏密相间，故又称为疏密波。
- 凡能承受拉伸或压缩应力的介质都能传播纵波。固体介质能承受拉伸或压缩应力，因此固体介质可以传播纵波。液体和气体虽然不能承受拉伸应力，但能承受压应力产生容积变化，因此液体和气体介质也可以传播纵波。



波的类型——横波

横波S (T)

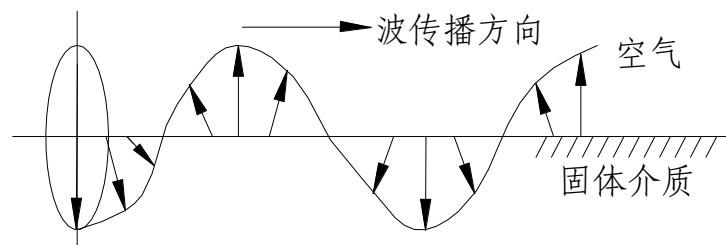
- 定义介质中质点的**振动方向与波的传播方向互相垂直**的波，称为横波，用S或T表示。
- 横波中介质质点受到交变的剪切应力作用并产生切变形变，故横波又称为切变波。
- 只有固体介质才能承受剪切应力，液体和气体介质不能承受剪切应力，故横波只能在固体介质中传播，不能在液体和气体介质中传播。



横波演示图

波的类型——表面波

- 定义：当介质表面受到交变应力作用时，产生沿介质表面传播的波，称为表面波，常用R表示，表面波是瑞利1887年首先提出来的，因此表面波又称瑞利波。也可以认为表面波就是当交变的表面张力作用于固体表面时，产生沿介质表面传播的波
- 表面波在介质表面传播时，介质表面质点作椭圆运动，椭圆长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于波的传播方向。椭圆运动可视为纵向振动与横向振动的合成，即纵波与横波的合成。因此表面波同横波一样只能在固体介质中传播，不能在液体或气体介质中传播。
- 表面波只能在固体表面传播。表面波的能量随传播深度增加而迅速减弱。当传播深度超过两倍波长时，质点的振幅就已经很小了。因此，一般认为，表面波检测只能发现距工件表面两倍波长深度内的缺陷。



波的类型——板波

定义：在板厚与波长相当的薄板中传播的波，称为板波。

根据质点的振动方向不同可将板波分为SH波和兰姆波。

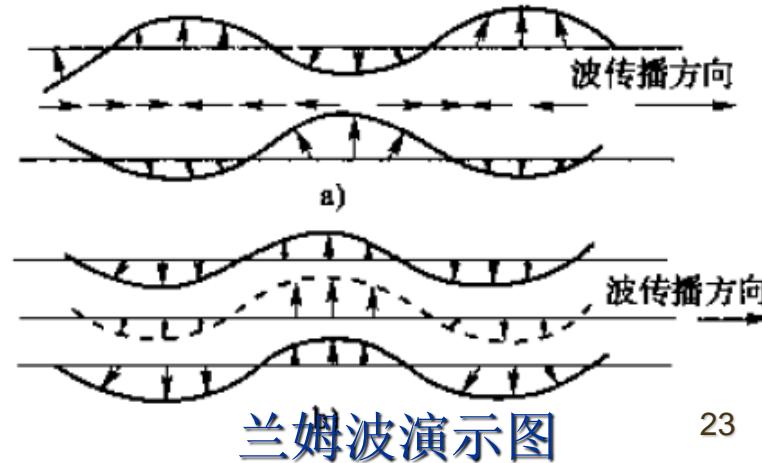
- (1) SH波：**SH波是水平偏振的横波在薄板中传播的波**。薄板中各质点的振动方向垂直于波的传播方向，相当于固体介质表面中的横波。
- (2) 兰姆波：**兰姆波又分为对称型（S型）和非对称型（A型），如图1.9所示。**

对称型（S型）：薄板中心质点作纵向振动，上下表面质点作椭圆运动、振动相位相反并对称于中心。

非对称型（A型）：薄板中心质点作横向振动，上下表面质点作椭圆运动、相位相同，不对称。



SH波



兰姆波演示图

超声检测中常用的波型总结

波的类型	质点振动特点	传播介质	应用
纵波	质点振动方向平行于波传播方向	固、液、气体	钢板、锻件检测等
横波	质点振动方向垂直于波传播方向	固体、特别粘的薄液层	焊缝、钢管检测等
表面波	质点作椭圆运动，椭圆长轴垂直波传播方向，短轴平行于波传播方向	固体表面，且固体的厚度远大于波长	钢管检测等
板波	对称型(S型)	上下表面：椭圆运动，中心：纵向振动	板厚为6mm以下
	非对称型(A型)	上下表面：椭圆运动，中心：横向振动	

按波形分类——定义

- 波的形状（波形）是指波阵面的形状。
- 波阵面：同一时刻，介质中振动相位相同的所有质点所联成的面称为波阵面。
- 波前：某一时刻，波动所到达的空间各点所联成的面称为波前。

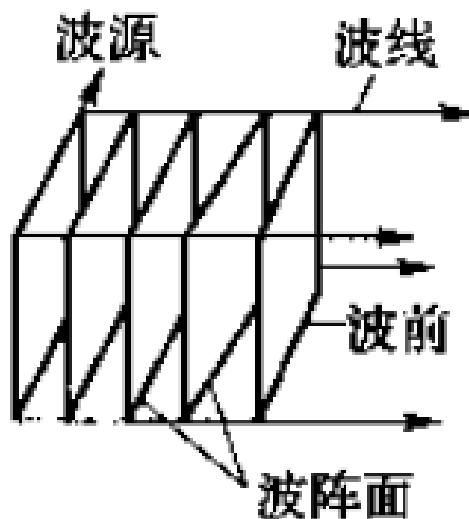
波前是最前面的波阵面，是波阵面的特例。任意时刻，波前只有一个，而波阵面却有很多。

- 波线：波的传播方向称为波线。
在各向同性的介质中，波线恒垂直于波阵面或波前

按波形分类——平面波

- 定义：波阵面为互相平行的平面波，具有相互平行平面状波阵面的超声波为平面波。平面波可以看成为一个无限大的平面声源，在各向同性的弹性介质中作简谐振动所传播的波动。平面波的波阵面与声源平面平行，且沿直线传播时具有良好的方向性。若无吸收，声压不随距离变化。理想的平面波是不存在的，但如果声源截面尺寸比它所产生的波长大得多时，该声源发射的声波可近似地看作是指向一个方向的平面波。

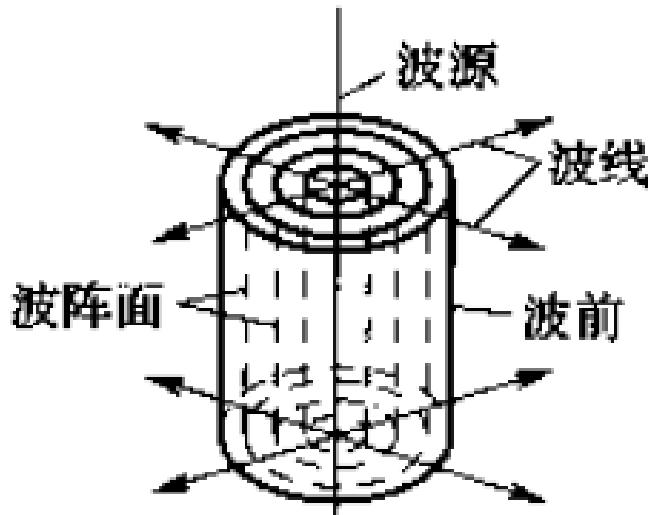
平面波声压随波源距离的变化而变



$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

按波形分类——柱面波

- 波阵面为同轴圆柱面的波，波束四周扩散，各质点振幅与距离的平方根成反比。

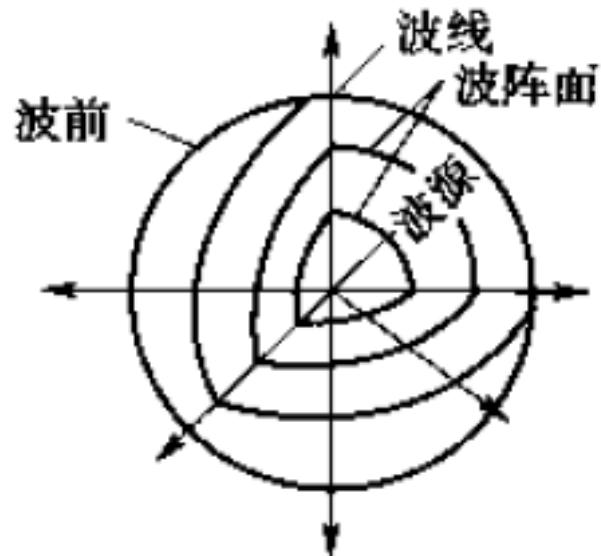


柱面波的波动方程：

$$y = \frac{A}{\sqrt{x}} \cos \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

按波形分类——球面波

- 球面波：波阵面为同心球面的波，波束四面八方扩散，各质点振幅与距离的成反比



球面波的波动方程：

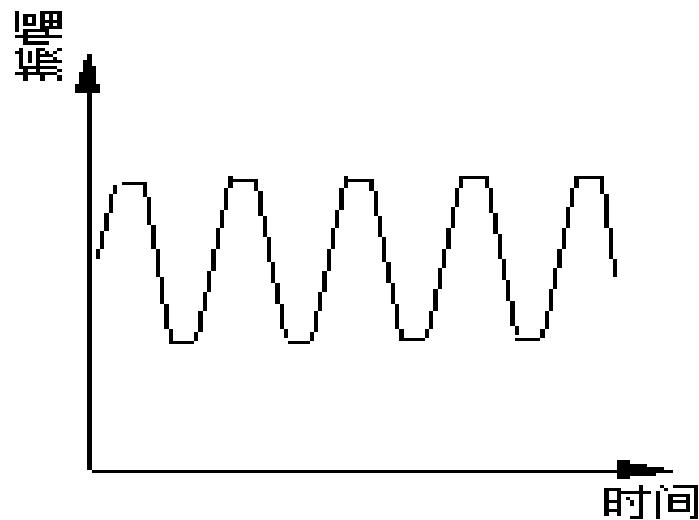
$$y = \frac{A}{x} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

按振动的持续时间分类——连续波

波源振动的持续时间长短，分为连续波/脉冲波

连续波

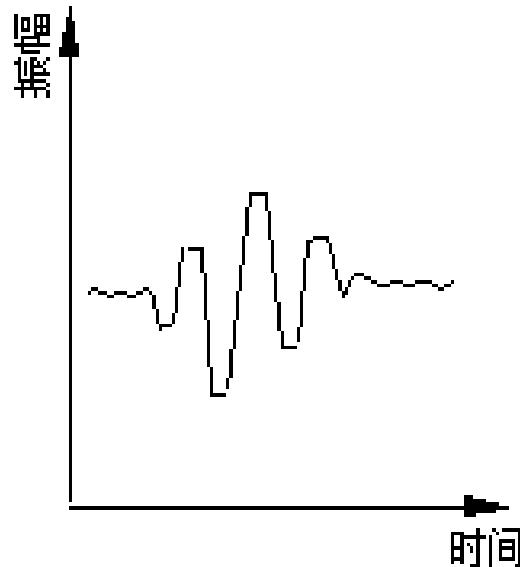
波源持续不断地振动所辐射的波称为连续波，超声波穿透法检测常采用连续波。



按振动的持续时间分类——脉冲波

脉冲波

- 波源振动持续时间很短
(通常是微秒数量级),
间歇辐射的波称为脉冲波。
目前超声检测中广泛采用
的就是脉冲波。



补充知识：

波的叠加、干涉及驻波

- 1、波的叠加现象
- 在一个介质中某一点有几个声波在同一时刻到达时，该点的振动是各个声波在该点所引起振动的合成，任一时刻该质点的位移是各个声波在这一质点上引起位移的矢量和，这是声波叠加原理。
- 各列波相遇之后，每一个波仍保持自己原有的特性（频率、波长、振动方向等）不变，并按自己传播的方向继续前进，如同在各自的传播过途中没有遇到其他波一样，这说明波传播的独立性。因此，又称波的独立性原理。

波的叠加、干涉及驻波

2、波的干涉

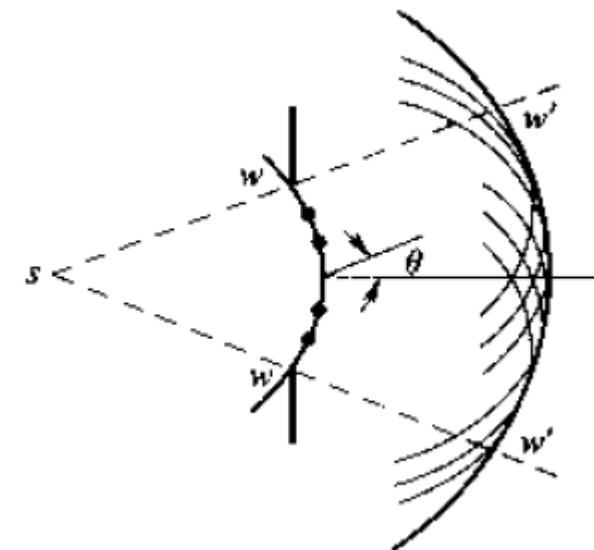
- 当两列频率相同、振动方向相同、相位差恒定（特殊情况是相位相同）的波动在介质某些点相遇后，因为波动的叠加，会使一些点处的振动始终加强，而在另一些点处的振动始终减弱甚至完全抵消，这称为波的干涉现象。能够产生干涉现象的波称为相干波，其波源称为相干波源。

3、驻波

- 两个振幅相同的相干波在同一直线上沿相反方向传播叠加而成的波，称为驻波。
- 驻波是波的干涉的特例。
- 驻波中振幅最大的点称为波腹，振幅为零处称为波节。相邻波腹和波节出现的位置取决于介质的声阻抗。
- 超声波的传播方向上的介质厚度恰为二分之一波长整数倍时，就能产生驻波现象

惠更斯原理

- 1、惠更斯原理
- 1690年惠更斯在波动起源和波动在弹性介质中传播的规律研究基础上，得出通过障碍物上小孔所形成新的波动与孔前的波动状态有关的结论。
- 著名的惠更斯原理：介质中波动传到的各点都可以看作是发射子波的波源，在其后的每一时刻，这些子波的包络就决定了新的波阵面。利用该原理，通过作图的方式来确定波前的几何形状和不同波源辐射的超声波的传播方向。（见图）

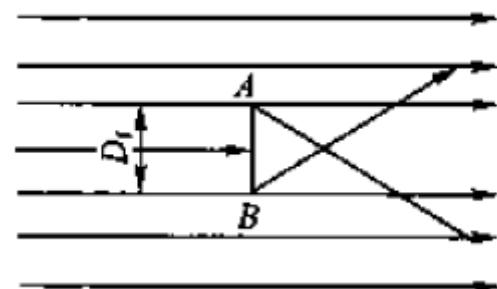


波的衍射

波的衍射（绕射）

- 1, 波在传播过程中遇到与波长相当的障碍物时，能绕过障碍物边缘改变方向继续前进的现象，称为波的衍射或波的绕射。
- 2, 根据惠更斯原理，缺陷边缘可看作是发射子波的波源，改变波的传播方向，从而使缺陷背后的声影缩小，反射波降低。当障碍物尺寸小于波长时，波的绕射强，反射弱，缺陷回波很低，容易漏检。反之，障碍物尺寸大于波长，则反射强，绕射弱，声波几乎全反射。波的绕射和障碍物尺寸及波长的大小有关。当 $D_f \ll \lambda$ 时，波的绕射强，反射弱，因此超声波检测灵敏度约为 $\lambda/2$ 。当 $D_f \gg \lambda$ 时，波的反射强，绕射弱。
- 3, 对探伤是有利：波的绕射使超声波能顺利地绕过晶粒在介质中传播。
- 4, 不利：会使小缺陷回波显著下降，易漏检。

超声波检测灵敏度约为 $\lambda/2$



- 不均匀材料含有声阻抗急剧变化的界面，在这两种物质的界面上，将产生声波的反射、折射和波型转换现象。必然导致声能的降低。
- 通常，超声检测多晶材料时，对频率的选择都注意要使波长远大于材料的平均晶粒度尺寸。

5. 3 超声波的传播——**声速**

- 超声波传播的速度就是波动在单位时间内的传播的距离，在声学中又称声速。
- 声速与传播介质的密度和弹性模量有关。
- 在超声波检测中，声速是缺陷定位的基础。不同的波型具有不同的声速。
- 无限大固体介质定义：
当介质尺寸远远大于超声波波长时，该传播介质就可以看成是无限大介质。

5.3.1 固体介质中的声速

1. 在无限大的固体介质中，纵波声速为：

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

2. 在无限大的固体介质中，横波声速为：

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

3. 在无限大的固体介质中，表面波声速为：

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1+\sigma} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

式中 E ——介质的杨氏弹性模量；

G ——介质的剪切弹性模量；

ρ ——介质的密度；

σ ——介质的泊松比，所有固体介质的泊松比 σ 都在 0~0.5 之间。

5.3.1 固体介质中的声速

总结：

(1) 固体介质中的声速与介质的密度和弹性模量等有关，不同的介质，声速不同；介质的弹性模量愈大，密度愈小，则声速愈大。

(2) 声速还与波的类型有关，在同一固体介质中，纵波、横波和表面波的声速各不相同，并且相互之间有以下关系：

$$C_L > C_S > C_R$$

在同一种固体材料中，纵波声速大于横波声速，横波声速又大于表面波声速。

对于钢材1.8: 1: 0.9

提问：已知声波的频率 $f=2.5\text{MHz}$ ，超声波在钢中的纵波波速 $C_L=5900\text{m/s}$ ，横波波速 $C_S=3230\text{m/s}$ 。求钢中纵波和横波波长各为

5. 3. 1 固体介质中的声速

固体介质中声速与温度、应力、均匀性的关系

- 固体介质中的声速与介质温度、应力、均匀性有关。一般固体中的声速随介质温度升高而降低。
- 固体介质的应力状况对声速有一定影响，一般应力增加，声速增加，但增加缓慢。
- 固体材料组织均匀性对声速的影响在铸铁中表现较为突出。铸铁表面与中心，由于冷却速度不同而具有不同的组织，表面冷却快，晶粒细，声速大；中心冷却慢，晶粒粗，声速小。此外，铸铁中石墨含量和尺寸对声速也有影响，石墨含量和尺寸增加，声速减少。

5. 3. 2 液体介质、气体介质的声速

1. 液体、气体中声速公式

由于液体和气体只能承受压应力，不能承受剪切应力，因此液体和气体介质中只能传播纵波，不能传播横波和表面波。液体和气体中的纵波波速为：

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

B是液体或气体的体变弹性模量， ρ 为质量密度

5.3.3 声速的测量

1. 超声检测仪器测量法

对检测人员来说，用检测仪器测量声速是最简便的。用这种方法测量，可用单探头反射法，也可用双探头穿透法。可用于测量纵波声速，也可用于测量横波声速。

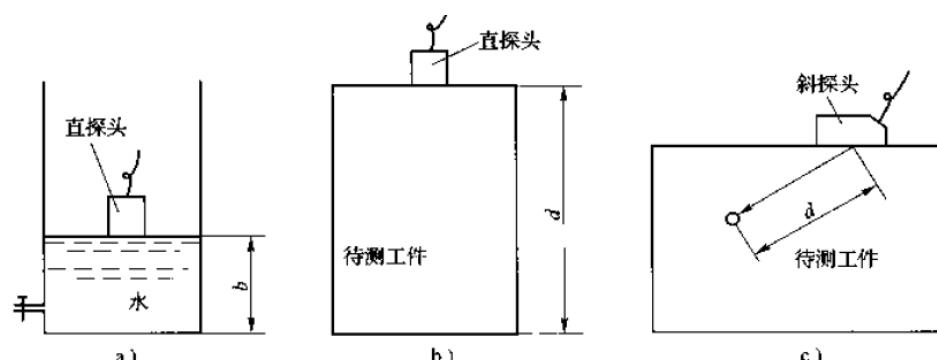
(1) 检测仪按时间刻度：反射法 $c = \frac{2d}{t}$ 直射法 $c = \frac{d}{t}$

(2) 检测仪按深度刻度：对于按深度刻度的检测仪，不能直接从示波屏上读出时间，这时需要采用对比法来测声速；方法如下图

方法：1) 测试时，先把探头对准待测工件的底面，调节仪器使底面回波对准某一刻度 t ，这时超声波通过工作的时间为： $t = \frac{2d}{c_1}$

2) 然后将探头放在水中，调节探头位置使水层底面回波对准同一刻度 t ，这时超声波通过水层的时间为 $t = \frac{2b}{c_2}$ ：由于二者所对刻度相同，即时间相同。

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{d}{b} \text{ 即 } c_1 = c_2 \frac{d}{b}$$



习题

- 某测量员是这样利用回声来测距离的：他站在两座平直峭壁间的某一位置鸣枪，并利用秒表记录了听到回声的时间，他发现在经过了1s后听到了第一次回声，又经过0.5s再次听到了回声，已知常温下空气中的声速约为340m/s，求：则两峭壁间的距离为多少？

解答：（1） \because 枪响后经1s听到一边峭壁的回声；

\therefore 这边峭壁到测量员所经历的时间为：

$$t_1 = \frac{1}{2} \times 1\text{s} = 0.5\text{s},$$

$$s_1 = vt_1 = 340\text{m/s} \times 0.5\text{s} = 170\text{m};$$

（2）同理，再经0.5s听到另一边峭壁的回声，则人到另一边峭壁的单程所用的时间为：

$$t_2 = \frac{1}{2} (1\text{s} + 0.5\text{s}) = 0.75\text{s},$$

$$s_2 = vt_2 = 340\text{m/s} \times 0.75\text{s} = 255\text{m},$$

（3）两峭壁间的距离：

$$s = s_1 + s_2 = 170\text{m} + 255\text{m} = 425\text{m}.$$

答：两峭壁间的距离为425m.

5. 4 超声场的特征

- **超声场：**
超声波及其在传播过程中所占据的空间称为超声场。
- **超声场的特征值：**声压、声强和声阻抗等。

超声场的特征——**声压**

- 1) 在介质中，无超声波传播时介质质点也会有压强。如比重为 γ 的液体介质中，液面下 h 处，会有压强 $P_0 = h\gamma$ 。这称为静压强。
- 2) **声压是声波传播过程中介质质点在交变振动的某一瞬时所受压强 P_1 与静压强 P_0 之差即 $P = P_1 - P_0$**
- 3) 声压是声波传播过程中所形成的附加压强，它相对于无超声波传播时介质质点的静压强而言。声压的单位是**帕斯卡**。
- 4) 通常把**声压振幅**简称为“**声压**”，并使它与A型脉冲反射式探伤仪示波屏上回波高度建立一定的线性关系，通过比较不同反射体的回波高度比较其声压。
- 5) 由 $P = \rho c v$ 可知，介质中某点的**声压幅值**与介质密度、声速和质点振动速度 v 成正比。

超声场的特征——声压级

声压级：人耳能听到的声压范围很大，直接用声压来描述声音的强弱很不方便，也给仪器测量带来困难。实验证明，人耳对声压强弱的感觉是与声压的对数成正比的（韦伯定律）。因此引入声压级的概念，用 L_p 表示，其定义为

$$L_p = 20 \cdot \lg (p/p_r)$$

其中， p 为声压， p_r 为参考声压，规定取1kHz纯音的可闻阈声压，即 $p_r = 2 \times 10^{-4} \mu \text{ bar}$ 。声压级的单位是分贝（dB）。

因此，人耳的可闻阈声压级为0dB（1kHz），痛阈声压级为（120~140）dB。

超声场的特征——**声阻抗**

- 超声场中任一点的声压与该处质点振动速度之比称为声阻，常用 $Z = \rho c$ 表示。
- 在声压的表达式 $P = \rho c v = Z v$ 中，若同一声压， ρc 越大，则 v 越小；反之，声阻抗越小，质点振动速度越大。 ρc 称为介质声阻抗，是介质本身的性质，表示介质对质点振动的阻碍作用，用“Z”表示。声阻抗能直接表示介质的声学特性，不同介质的声阻抗相差很大。
- 超声波在不同介质的分界处的行为与相关介质的声阻抗有密切的关系。
- 气体、液体、金属之间特性阻抗之比接近于1：3000：8000。

常用固体的声速与声阻抗

种类	ρ (g/cm ³)	σ	细长棒中的 纵波声速	纵波声速	横波声速	声阻抗 z
铝	2.7	0.34	5040	6260	3080	1.69
铁	7.7	0.28	5180	5850~5900	3230	4.50
铸铁	6.9~7.3			3500~5600	2200~3200	2.5~4.2
钢	7.8	0.28		5880~5950	3230	4.53
铜	8.9	0.35	3710	4700	2260	4.18
有机玻璃	1.18	0.324		2730	1460	0.32
聚苯乙烯	1.05	0.341		2340~2350	1150	0.25
环氧树脂	1.1~1.25			2400~2900	1100	0.27~0.36
尼龙	1.1~1.2			1800~2200		0.198~0.264

超声场的特征——声强

声强：是指单位时间内通过制定方向垂直的媒质单位面积的能量称为声强，用 I 表示。对自由平面声波或球面波，声强与声压的平方成正比，与声阻率成反比，即

$$I = p^2 / \rho c$$

声强的单位是 W/m^2 （瓦/米²），空气的声阻率为 $420 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ；人耳从听阈到痛阈的声强范围是 $10^{-12} \text{ W/m}^2 \sim 10^2 \text{ W/m}^2$ 。

- 其中 ρ -介质密度， c -声速

超声场的特征——声强级

声强级：某一处的声强级，是指该处的声强与参考声强的比值常用对数的值再乘以10，度量它的单位为分贝，符号为dB。参考声强是 10^{-12} 瓦/米²。

$$L_I = 10 \cdot \lg (I/I_r)$$

请问：声压级的单位是分贝，声强级的单位也是分贝。两者会不会弄混呢？

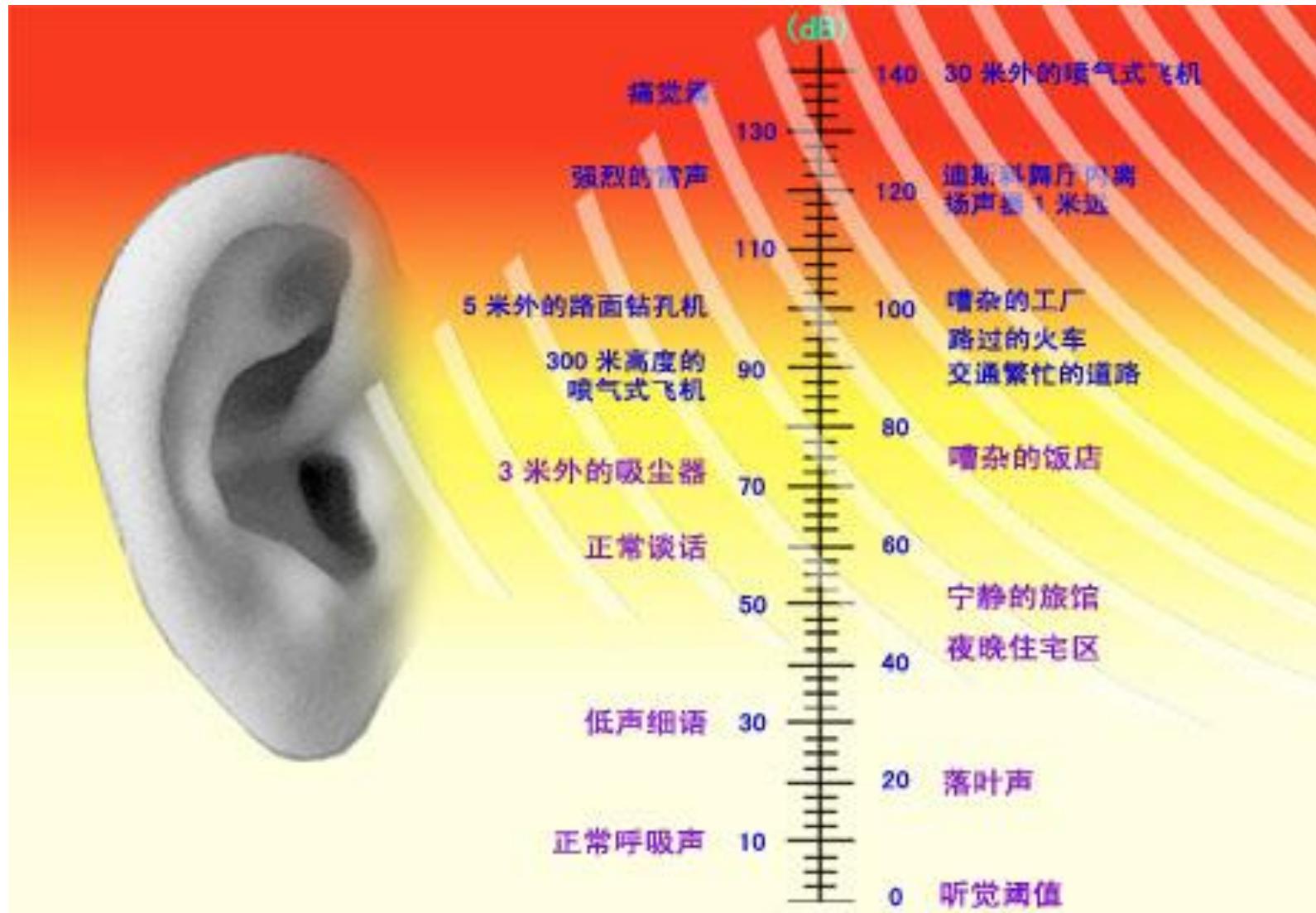
因为 $I = p^2 / \rho c$

$$\begin{aligned} \text{所以 } L_I &= 10 \cdot \lg (I/I_r) = 10 \cdot \lg (p^2/p_r^2) \\ &= 20 \cdot \lg (p/p_r) \\ &= L_P \end{aligned}$$

由此可以看出，声强级在数值上等于声压级。

当我们说声强是20dB时，就是说 $I : I_r = 100$

分贝



总结：声强（I）和声压（P）

- 声强是指单位时间内，声波通过垂直于传播方向单位面积的声能量。单位为 W / s²。
- 声压是由于声波的存在而引起的压力增值。单位为Pa。声波在空气中传播时形成压缩和稀疏交替变化，所以压力增值是正负交替的。
- 声压与声强的关系是： $I = P^2 / \rho c$
- 式中：ρ - 空气密度，如以标准大气压与20°C的空气密度和声速代入，得到 $\rho \cdot c = 408$ 国际单位值，也叫瑞利。称为空气对声波的特性阻抗。
- 声压与声阻抗的关系， $P = \rho c v$; $Z = \rho c$ $Z = \frac{P}{V}$

总结：声强级和声压级

- 声强级

$\Delta = 10 \lg(I/I_r)$ 式中： Δ —— 声强级 (dB)；

I ：声强 (W/m^2)； I_r —— 基准声强，为 10^{-12} W/m^2

- 声压级

$\Delta = 20 \lg(P/P_0)$

式中： Δ ：声压级 (dB)； P —— 声压 (Pa)； P_0 —— 基准声压，为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，该值是对1000HZ声音人耳刚能听到的最低声压

回波声压和波高

- 当超声波探伤仪具有较好的放大线性(垂直线性)时, 两个反射体的回波声压和与它们各自在示波屏上形成的回波高度成正比。

$$\Delta = 20\lg(P_2/P_1) = 20\lg(H_2/H_1)(\text{dB})$$

当 $H_2/H_1=1$ 时, $\Delta=0$ dB, 说明两波高相等时, 二者的分贝差为零。

当 $H_2/H_1=2$ 时, $\Delta=6$ dB, 说明 H_2 为 H_1 的 2 倍时, H_2 比 H_1 高 6 dB。

当 $H_2/H_1=1/2$ 时, $\Delta=-6$ dB, 说明 H_2 为 H_1 的 1/2 时, H_2 比 H_1 低 6 dB。

- 常用声压比(波高比)对应的dB值见下图

表 2—5

常用声压比(波高比)对应的dB值

P_2/P_1 或 H_2/H_1	10	4	2	1	$1/2$	$1/4$	$1/10$
dB	20	12	6	0	-6	-12	-20

分贝及其应用分贝

- 奈培是两个同量纲的量之比值取e为底自然对数(分贝则以10为底的常用对数)后的单位，以Np表示。即 $\Delta = \ln(P_2/P_1) = \ln(H_2/H_1)$ (1-)
- 分贝和奈培的换算关系为
 - $1\text{Np}=8.68\text{dB}$ $1\text{dB}=0.115\text{Np}$
- 例示：示波屏上一波高80mm，另一波高20mm，问前者比后者高多少分贝和奈培？
- 解： $\Delta = 20 \lg(H_2/H_1) = 20 \lg(80/20) = 12(\text{dB})$ ；
- 则 $\Delta = 0.115 \times 12 = 1.38(\text{Np})$ 。

5.5 超声波垂直入射单一平面界面

- (一) 超声平面波在大平界面垂直入射
- 超声波在异质界面上的反射、透射和折射规律是超声波探伤的重要物理基础。
- 当超声波垂直入射于两种介质的分界面时，一部分能量反射回第一种介质内部，形成反射波，不考虑能量的损耗时，可认为其余的能量穿透分界面进入第二种介质继续传播，称为透射波。反射波和透射波声能的分配由两种介质的声阻抗决定。见图

在界面上声能（声压、声强）的分配和传播方向的变化都将遵循一定的规律。

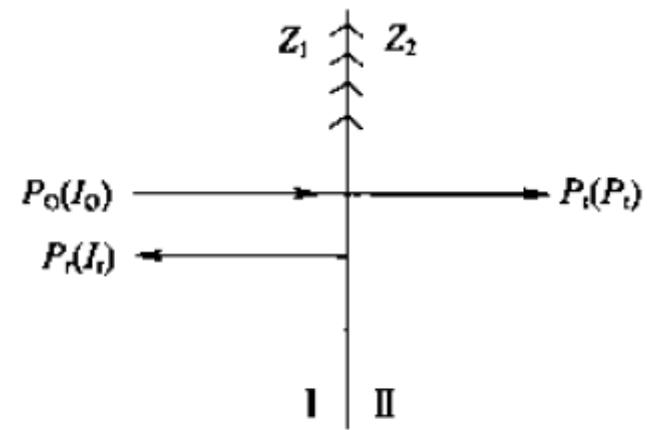


图 2-33 垂直入射到单一平界面

5. 5. 1 单一平界面的反射率与透射率

- 1) 设入射波的声压为 P_0 （声强为 I_0 ）、反射波的声压为 P_r （声强为 I_r ）、透射波的声压为 P_t （声强为 I_t ）。
- 2) 界面上反射波声压 P 与入射波声压 P_0 之比称为界面的声压反射率，用 r 表示，即 $r=P_r/P_0$ 。
- 3) 界面上透射波声压 P_t 与入射波声压 P_0 之比称为界面的声压透射率，用 t 表示，即 $t=P_t/P_0$

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

- 在界面两侧的声波，必须符合下列两个条件：
 - (1) 界面两侧的总声压相等
 $p_0 + p_r = p_t$ 。（相位关系，力平衡）
 - (2) 界面两侧质点振动速度幅值相等
 $(p_0 - p_r) / Z_1 = p_t / Z_2$ （能量平衡）

由上述两边界条件和声压反射率、透射率定义得：

$$\begin{cases} 1 + r = t \\ (1 - r)/Z_1 = t/Z_2 \end{cases}$$

解上述联立方程得**声压反射率 r 和透射率 t** 分别为：

$$\begin{cases} r = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ t = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \end{cases}$$

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

1) 界面上反射波声强 I_r 与入射波声强 I_0 之比称为**声强反射率**, 用 R 表示。

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{\frac{P_r^2}{2Z_1}}{\frac{P_0^2}{2Z_1}} = \frac{P_r^2}{P_0^2} = r^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

2) 界面上透射波声强 I_t 与入射波声强 I_0 之比称为**声强透射率**, 用 T 表示。

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{\frac{P_t^2}{2Z_2}}{\frac{P_0^2}{2Z_1}} = \frac{Z_1}{Z_2} \times \frac{P_t^2}{P_0^2} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

3) 超声波垂直入射到平界面上时, 声压或声强的分配比例仅与界面两侧介质的声阻抗有关。由以上几式可以导出:

$$T + R = 1 \quad t - r = 1$$

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

• 讨论几种常见界面上的声压、声强反射和透射情况一：

(1) 当 $Z_2 > Z_1$ 时, $r = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} > 0$, 反射波声压 P_r 与入射波声压 P_0 同相位。界面上反射波与入射波叠加类似驻波, 合成声压振幅增大为 $P_0 + P_r$, 例如超声波平面波垂直入射到水/钢界面, 如图 2-34 所示。 $Z_1 = 0.15 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, $Z_2 = 4.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, 则:

$$r = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{4.5 - 0.15}{4.5 + 0.15} = 0.935$$

$$t = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 4.5}{4.5 + 0.15} = 1.935$$

$$R = r^2 = 0.935^2 = 0.875$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{4 \times 0.15 \times 4.5}{(4.5 + 0.15)^2} = 0.125$$

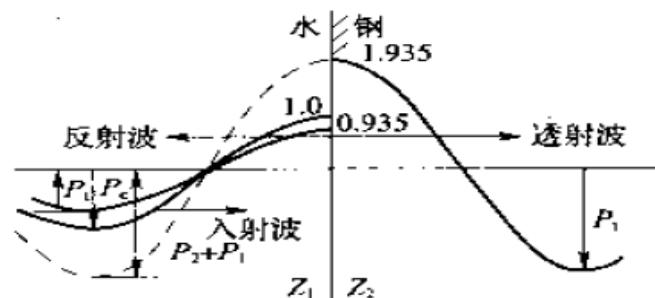


图 2-34 平面波垂直到
水/钢界面 ($Z_2 > Z_1$)

以上计算表明, 超声波垂直入射到水/钢界面时, 其声压反射率 $r=0.935$, 声压透射率 $t=1.935$ 。粗略地看, $t>1$, 似乎违反能量守恒, 其实不然, 因为声压是力的概念, 而力只会平衡 ($P_0 + P_r = P_t$), 不会守恒, 只有能量才会守恒。事实上, 从声强方面看, $R+T=0.875+0.125=1$, 说明符合能量守恒。

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

- 讨论几种常见界面上的声压、声强反射和透射情况二：

(2) 当 $Z_1 > Z_2$ 时, $r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} < 0$, 即反射波声压 P_r 与入射波声压 P_i 相位相反, 反射波与入射波合成声压振幅减小。例如超声波平面波垂直入射到钢/水界面。如图 2-35 所示。

$$Z_1 = 4.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}, Z_2 = 0.15 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}, \text{则:}$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0.15 - 4.5}{0.15 + 4.5} = -0.935$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 0.15}{0.15 + 4.5} = 0.065$$

$$R = r^2 = 0.935^2 = 0.875$$

$$T = 1 - R = 1 - 0.875 = 0.125$$

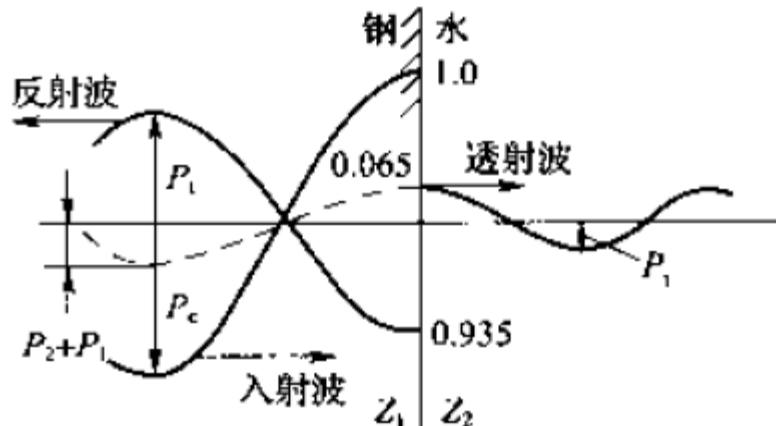


图 2-35 平面波垂直入射
钢/水界面 ($Z_1 > Z_2$)

以上计算表明, 超声波垂直入射到钢/水界面时, 声压透射率很低, 声压反射率很高。声强反射率与透射率与超声波垂直入射到水/钢界面相同。由此可见, 超声波垂直入射到某界面时的声强反射率与透射率与从何种介质入射无关。

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

• 讨论几种常见界面上的声压、声强反射和透射情况三：

(3) 当 $Z_1 \gg Z_2$ 时, (如钢/空气界面), $Z_1 = 4.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$, $Z_2 = 0.000 04 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$,

$$r = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0.000 04 - 4.5}{0.000 04 + 4.5} \approx -1$$

$$t = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2 \times 0.000 04}{0.000 04 + 4.5} \approx 0$$

$$R = r^2 = (-1)^2 \approx 1 \quad T = 1 - R = 1 - 1 = 0$$

计算表明, 当入射波介质声阻抗远大于透射波介质声阻抗时, 声压反射率趋于-1, 透射率趋于0, 即声压几乎全反射, 无透射, 只是反射波声压与入射波声压有 180° 相位变化。

检测中, 探头和工件间如不施加耦合剂, 则形成固(晶片)/气界面, 超声波将无法进入工件。

5.5.1 单一平界面的反射率与透射率

- 讨论几种常见界面上的声压、声强反射和透射情况四：

(4) 当 $Z_1 \approx Z_2$ 时，即界面两侧介质的声阻抗近似相等时， $r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx 0$ ； $t \approx 1$ 。如钢的淬火部分与非淬火部分及普通碳钢焊缝的母材与填充金属之间的声阻抗相差很小，一般为 1% 左右。设 $Z_1 = 1$ ， $Z_2 = 0.99$ ，则：

$$r = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{0.99 - 1.00}{0.99 + 1.00} = -0.005$$

$$t = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 0.99}{0.99 + 1.00} \approx 0.995$$

$$R = r^2 = (-0.005)^2 = 2.5 \times 10^{-5} \approx 0$$

$$T = 1 - R = 0.999975 \approx 1$$

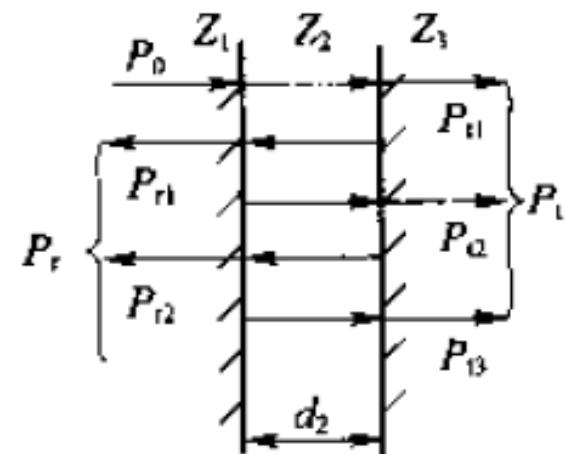
这说明超声波垂直入射到两种声阻抗相差很小的介质组成的界面时，几乎全透射，无反射。因此在焊缝检测中，若母材与填充金属结合面没有任何缺陷，是不会产生界面回波的。

5.5.2 薄层界面的反射率与透射率

- 超声检测时，经常遇到耦合层和缺陷薄层等问题，这些都可归结为超声波在薄层界面的反射和透射问题。此时，超声波是由声阻抗为 Z_1 的第一介质入射到 Z_1 和 Z_2 界面，然后通过声阻抗为 Z_2 的第二介质薄层射到 Z_2 和 Z_3 界面，最后进入声阻抗为 Z_3 的第三介质。
- 超声波通过一定厚度的异质薄层时，反射和透射情况与单一的平界面不同。异质薄层很薄，进入薄层内的超声波会在薄层两侧界面引起多次反射和透射，形成一系列的反射波和透射波

薄层界面反射透射示意图

超声波通过异质薄层时的声压反射率和透射率不仅与介质声阻抗和薄层声阻抗有关，而且与薄层厚度同其波长之比 d_2/λ_2 有关



a)

5.5.2 薄层界面的反射率与透射率

1. 均匀介质中的异质薄层 ($Z_1=Z_3 \neq Z_2$) 如裂纹. 分层, 夹杂等

(1) 当 $d_2 = n \times \frac{\lambda_2}{2}$ (n 为整数) $r \approx 0, t \approx 1$ 。

这说明当薄层两侧介质声阻抗相等, 薄层厚度为其半波长的整数倍时, 超声波全透射, 几乎无反射, 好象不存在异质薄层一样。这种透声层常称为半波透声层。

(2) $d_2 = (2n+1) \times \frac{\lambda_2}{4}$ (n 为整数) 时, 即异质薄层厚度等于其四分之一波长的奇数倍时 $d < \frac{\lambda_2}{4}$, 声压透射率最低, 声压反射率最高。

(3) 当 $d \ll \lambda_2$ 时, 或 $Z_1 \approx Z_2$ 时, $R \approx 0, T \approx 1$, 薄层厚度越小, 透射率越大, 反射率越小。

(4) 这说明当薄层厚度非常小时, 超声波也是几乎不反射而全部透射; 另外, 当两种介质声阻抗很接近时, 声波也几乎全部透射。

5.5.2 薄层界面的反射率与透射率

2. 薄层两侧介质不同的双界面

$$Z_1 \neq Z_3 \neq Z_2$$

薄层与两侧介质均不相同，与探头晶片与试件间存在保护膜或耦合剂情况相当。

(1) 当 $d_2 = n \times \frac{\lambda_2}{2}$ (n 为整数) 时, $T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2}$ 。这说明超声波垂直入射到两侧介质声阻抗不同的薄层时, 若薄层厚度等于半波长的整数倍, 则通过薄层的声强透射率与薄层的性质无关, 好象不存在薄层一样

(2) $d_2 = (2n+1) \frac{\lambda_2}{4}$ (n 为整数) 时, 且 $Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3}$

时, 此时 $T=1$, 即声强透射率等于1, 超声波全透射, 这对直探头保护膜的设计具有重要指导意义

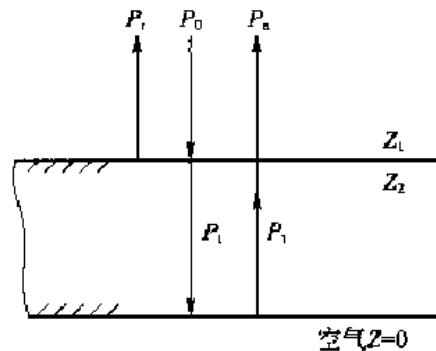
(3) 当 $d < \frac{\lambda_2}{4}$ 时, 薄层越薄, 声压透射率越大。

(4) 当 $d \ll \lambda_2$ 时, 同样有 $T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_3 + Z_1)^2}$

透射声强与薄层性质无关, 因此若试件表面较为平整, 应尽量少涂耦合剂, 并施加一定压力, 使耦合层厚度很薄, 以保证信号幅度的稳定性。

5. 5. 3 声压往复透射率

- 在超声波单探头检测中，探头兼作发射和接收超声波。探头发出去的超声波透过界面进入工件，在固/气底面产生全反射后再次通过同一界面被探头接收



这时探头接收到的回波声压与入射波声压之比，称为声压往复透射率 $T_{往}$
$$T_{往} = \frac{P_a}{P_0} = \frac{P_t}{P_0} \times \frac{P_a}{P_t} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

声压往复透射率与界面两侧介质的声阻抗有关，与从何种介质入射到界面无关。界面两侧介质的声阻抗相差愈小，声压往复透射率就愈高，反之就愈低。

往复透射率高低直接影响检测灵敏度高低，往复透射率高，检测灵敏度高。反之，检测灵敏度低

5. 5. 3声压往复透射率—应用

例如，用 PZT - 5 晶片 ($Z_1 = 3.37 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$) 对钢制工件 ($Z_2 = 4.50 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$) 检测时，若耦合剂中声压全透射，钢制工件底面声压全反射，则其声压往复透射率为：

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{4 \times 3.37 \times 4.5}{(3.37 + 4.50)^2} = 97.8\%$$

又如水浸法检测钢制工件时，水中声阻抗 $Z_1 = 0.15 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，钢中声阻抗 $Z_2 = 4.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，若底面全反射，则超声波在水/钢界面的声压往复透射率为：

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{4 \times 0.15 \times 4.5}{(4.5 + 0.15)^2} = 12.5\%$$

5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

1. 波型转换与反射、折射定律

当超声波倾斜入射到界面时，除产生同种类型的反射和折射波外，还会产生不同类型的反射和折射波，这种现象称为波型转换。

2. 当超声波垂直入射到光滑平界面时，将在第一介质中产生一个与入射波方向相反的反射波，在第二介质中产生一个与入射波方向相同的透射波（见图）

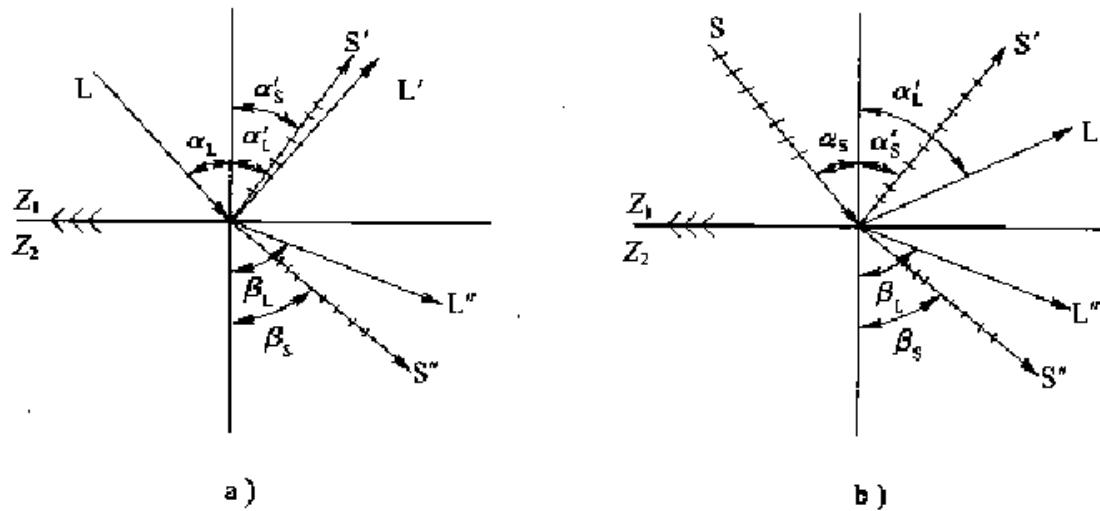


图 2-40 倾斜入射
a) 纵波入射 b) 横波入射

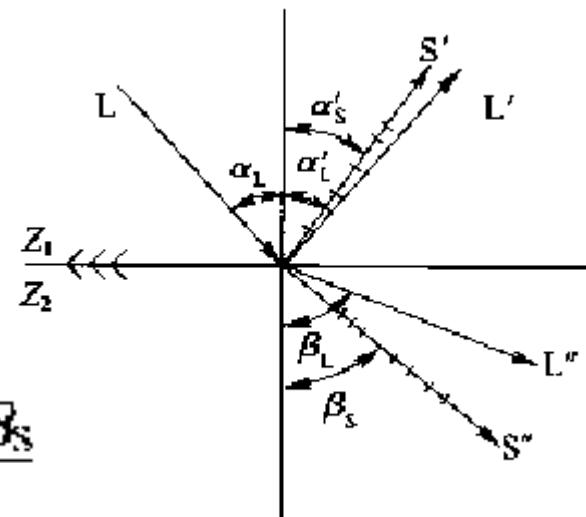
5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

1. 纵波斜入射

当纵波L倾斜入射到界面时，除产生反射纵波L' 和折射纵波L'' 外，还会产生反射横波S' 和折射横波S'' 。各种反射波和折射波方向符合反射、折射定律：

斯涅耳定律：

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha'_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha'_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{S2}}$$



由于在同一介质中纵波波速不变，因此 $\alpha'_L = \alpha_L$ 。又由于在同一介质中纵波波速大于横波波速，因此

$$\alpha'_L > \alpha'_S, \beta_L > \beta_S.$$

5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

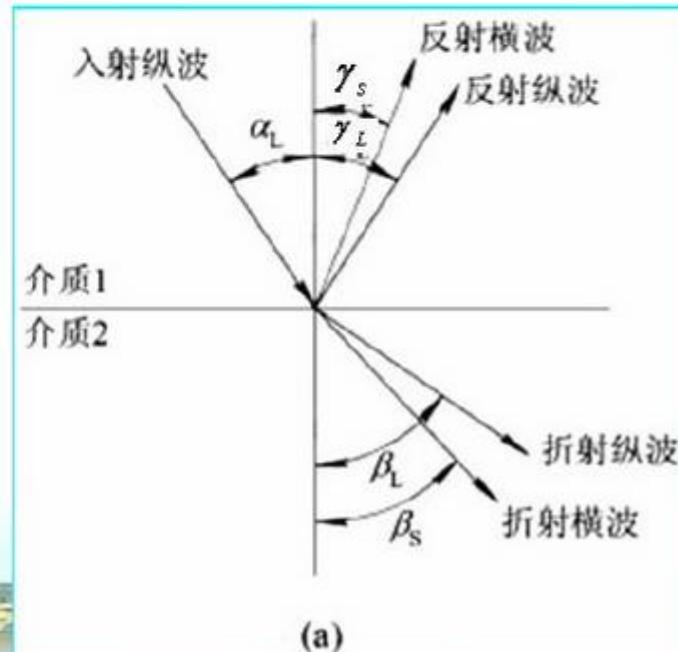
3、临界角

(1) 第一临界角 α_I 。当入射波为纵波，且 $c_{L2} > c_{L1}$ 时，折射角大于入射角，使纵波折射角达到 90° 的纵波入射角称为第一临界角，用符号 α_I 表示。

当纵波入射角大于第一临界角时，第二介质中不再有折射纵波，只有折射横波。

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L2}}$$

$$\rightarrow \alpha_I = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}}$$

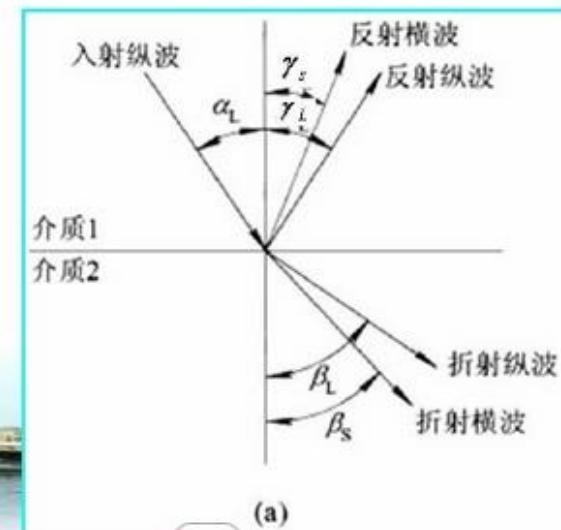


5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

(2) 第二临界角 α_{II} 。当入射波为纵波，第二介质为固体，且 $c_{S2} > c_{L1}$ 时，使横波折射角达到 90° 的纵波入射角为第二临界角，用符号 α_{II} 表示。（ $\beta_s \geq 90^\circ$ 时，介质2中波的情况？？）

通常在超声检测中，临界角主要应用于第二介质为固体，而第一介质为固体或液体的情况。这种情况下，可利用入射角在第一临界角和第二临界角之间的范围，在固体中产生一定角度范围内的纯横波，对试件进行检测。或：第二介质中既无折射纵波，又无折射横波，介质的表面将产生表面波。

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta_s}{c_{S2}} \rightarrow \alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{S2}}$$



5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

表3-1 几种材料的声学特性

材料	C_L (m/s)	C_s (m/s)	λ_L (mm)		
			1.25MHz	2.5MHz	5MHz
钢	5880-5950	3230	4.7	2.36	1.18
铝	6260	3080	5.0	2.53	1.26
有机玻璃	2720	1460	2.18	1.09	0.55
空气	344				
钢中横波波长 λ_c (mm)			2.58	1.29	0.65

5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

若 I 是有机玻璃， II 是钢，则有

$$\begin{aligned}\alpha_{1m} &= \arcsin(C_{L1} \sin\gamma_L / C_{L2}) \\ &= \arcsin(2730 * \sin 90 / 5900) \\ &= 27.6^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_{2m} &= \arcsin(C_{L1} \sin\gamma_S / C_{S2}) \\ &= \arcsin(2730 * \sin 90 / 3230) \\ &= 57.7^\circ\end{aligned}$$

5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

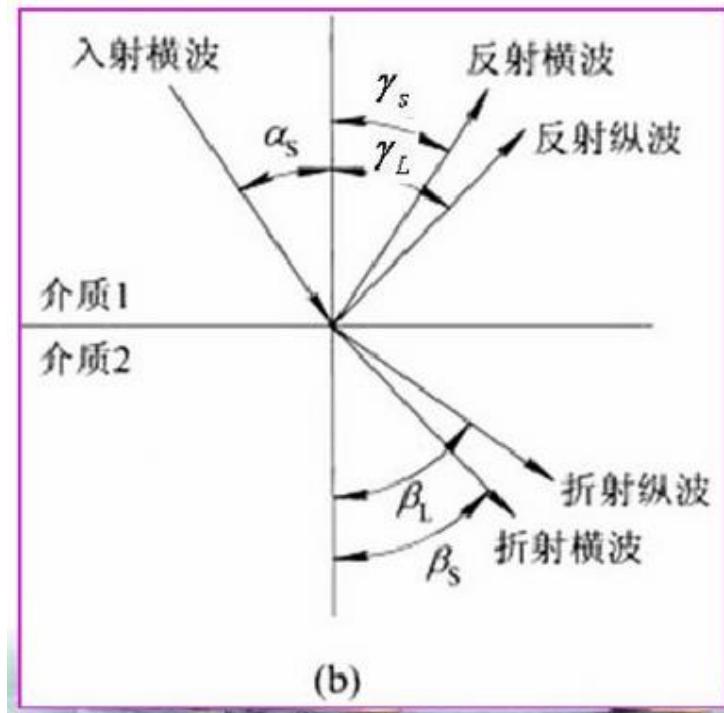
α_{1m}, α_{2m} 物理意义：

- ① $\alpha < \alpha_{1m}$ ， II 中有纵、横波，不采用
- ② $\alpha = \alpha_{1m} - \alpha_{2m}$ ， II 中仅有横波，斜探头设计原理。
- ③ $\alpha > \alpha_{2m}$ ， II 中无纵、横波，表面探头设计原理。

5.6 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射

2. 横波斜入射

(3) 第三临界角 α_{III} 。第三临界角是在**固体介质**与另一种介质的界面上，用横波作为入射波时产生的。使纵波反射角达到 90° 时的横波入射角称为第三临界角，用表示 α_{III} 。此时，介质1中只存在反射横波。



$$\frac{\sin \alpha_s}{c_{S1}} = \frac{\sin \gamma_L}{c_{L1}}$$

$$\alpha_{III} = \arcsin \frac{c_{S1}}{c_{L1}}$$

5.7 超声波检测设备与器材

- 超声检测设备与器材包括超声检测仪、探头、试块、耦合剂和机械扫查装置等，其中仪器和探头对超声检测系统的能力起关键性作用。了解其原理、构造和作用及其主要性能，是正确选择检测设备与器材并进行有效检测的保证。
- 超声检测仪

超声检测仪是超声检测的主体设备，它的作用是产生电振荡并施加于换能器（探头）上：激励探头发射超声波，同时接收来自于探头的电信号，将其放大后以一定方式显示出来，从而得到被检工件中有关缺陷的信息

5. 7. 1超声检测仪的分类

按超声波的连续性分类

脉冲波
连续波
调频波

按显示方式分类

A型显示
B型显示
C型显示

按通道分类

单通道
多通道

5. 7. 1超声检测仪的分类

- A型显示是一种波形显示，是将超声信号的幅度与传播时间的关系以直角坐标的形式显示出来，如图4-1所示。横坐标代表声波的传播时间，纵坐标代表信号幅度。如果超声波在均质材料中传播，声速是恒定的，则传播时间可转变为传播距离。从声波的传播时间可以确定缺陷位置，由回波幅度可以估算缺陷当量尺寸。

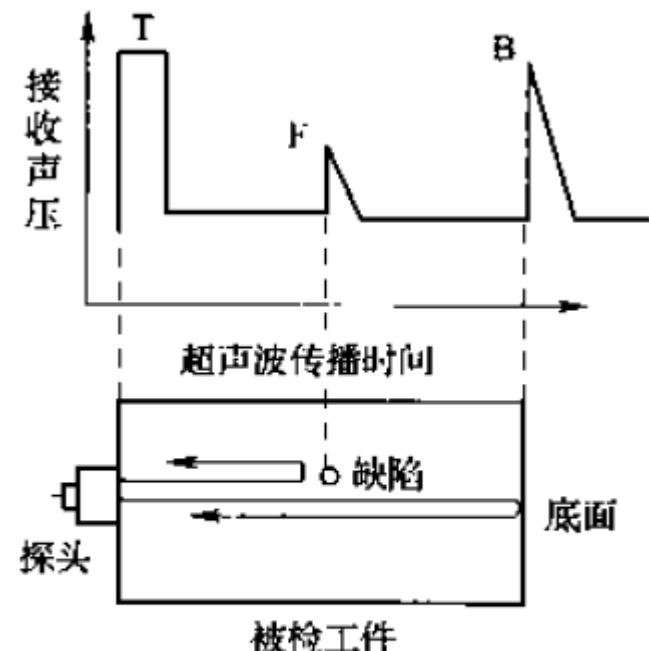


图 4-1 A 型显示原理

T--始波 F 缺陷波 B--底波

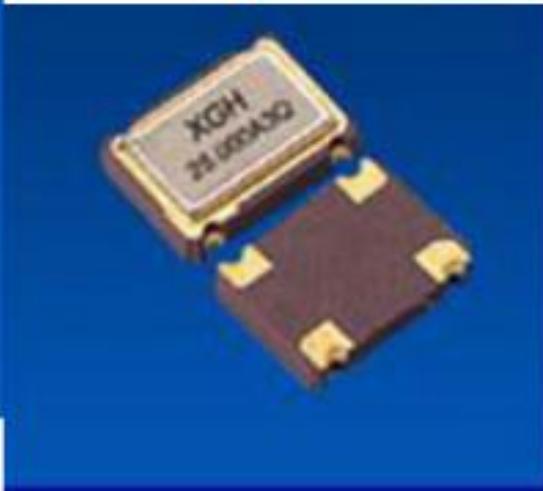
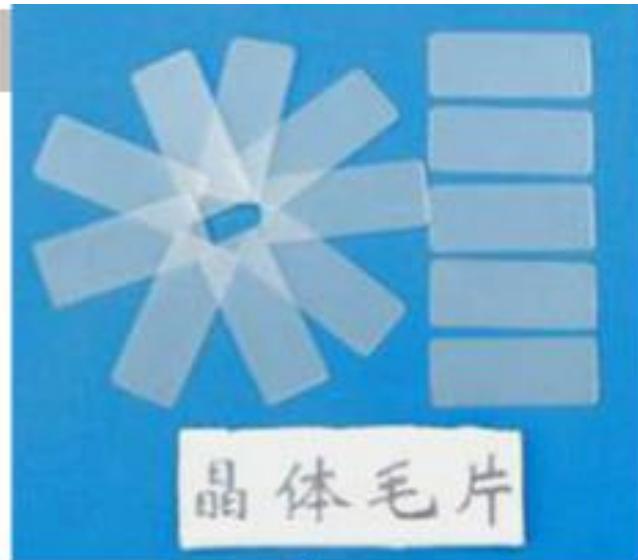
5.7.2 超声波换能器

- 超声波换能器俗称探头，主要由压电晶片组成，可发射和接收超声波。
- 探头因其结构和使用的波型不同可分为直探头、斜探头、表面波探头、兰姆波探头、可变角探头、双晶探头、聚焦探头、水浸探头、喷水探头和专用探头等。

5.7.2 超声波换能器

石英晶体切片及封装

石英晶体薄片



双面镀银
及封装

5.7.2 超声波换能器

1. 变换原理: 压电效应

某些物质，如石英，受到外力作用时，不仅几何尺寸会发生变化，而且内部会被极化，表面产生电荷；当外力去掉时，又重新回到原来的状态，这种现象称为压电效应。

逆压电效应：如果将这些物质(物体)置于电场中，其几何尺寸也会发生变化，这种由外电场作用导致物质(物体)产生机械变形的现象，称之为**逆压电效应**，或称之为电致伸缩效应。

5.7.2 超声波换能器

压电材料的分类

压电材料或元件的分类



单晶压电晶体(如石英晶体)——天然存在。最稳定，居里点为 573°C

极化的多晶压电陶瓷，如钛酸钡、铌镁酸铅、锆钛酸铅等——人工制造。

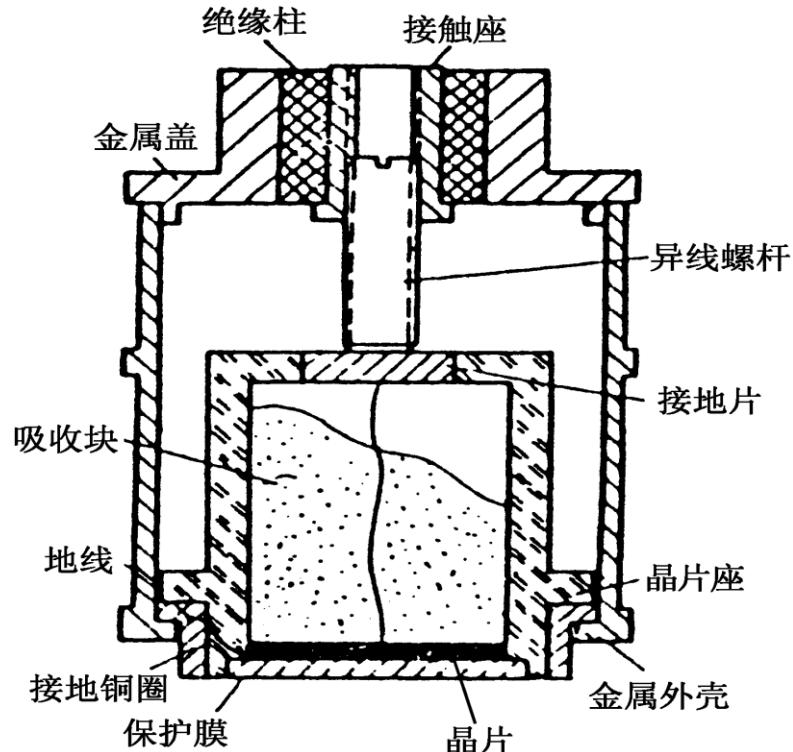
高分子压电材料——近年来发展的新型材料。灵敏度最高。

5.7.2 超声波换能器

- **直探头：**
- 可发射和接收纵波，主要由压电晶片、吸收块和保护膜组成。基本结构如图4—9所示。
- 压电晶片多为圆片形，其厚度与超声频率成反比，直径与半扩散角成反比。



5.7.2 超声波换能器



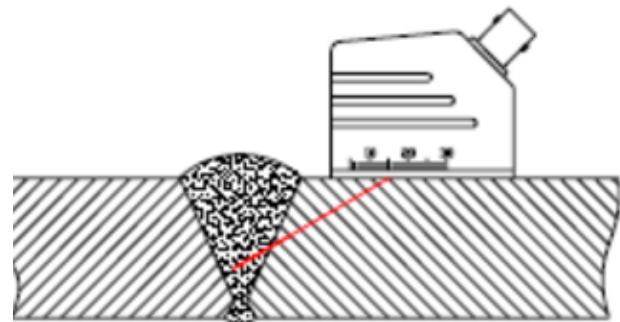
- 晶片的两面敷有银层，作为导电极板。为避免晶片磨损，通常粘有硬质材料作为保护膜。吸收块用钨粉、环氧树脂和固化剂等浇注，可吸收声能，降低机械品质因素，从而可限制脉冲宽度、减小盲区和提高分辩力。

直探头的结构

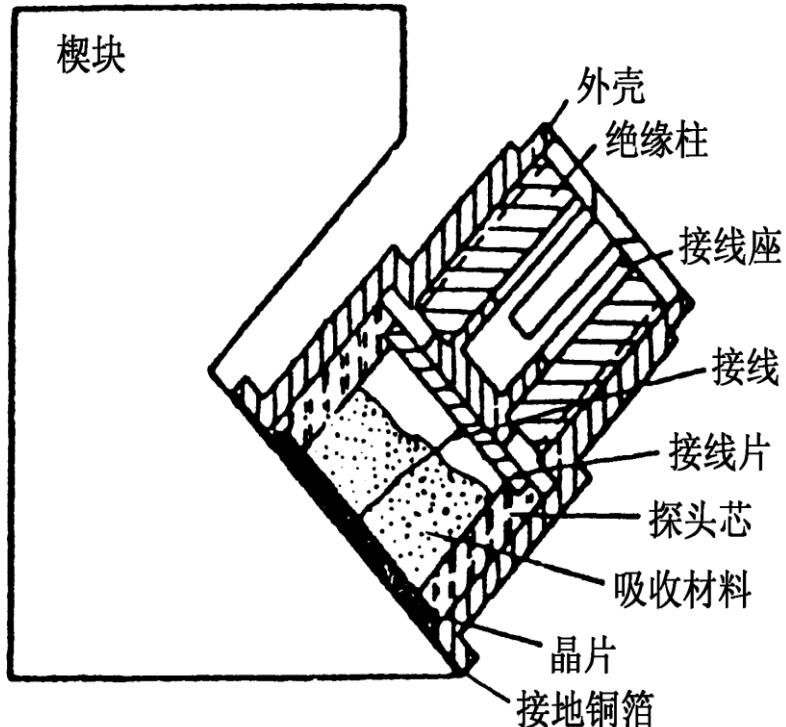
5.7.2 超声波换能器

斜探头：

- 可发射和接收横波，主要由压电晶片、吸收块和斜楔块组成，其结构如图4—10所示的形式。
- 晶片产生纵波，经斜楔倾斜入射到被检工件中转换为横波。若斜楔为有机玻璃，工件为钢，斜探头的入射角在 28° — 61° 之间时，在钢中可产生横波。斜楔形状的设计应使超声在斜楔中传播时不得返回晶片，以免出现杂波。



5.7.2 超声波换能器



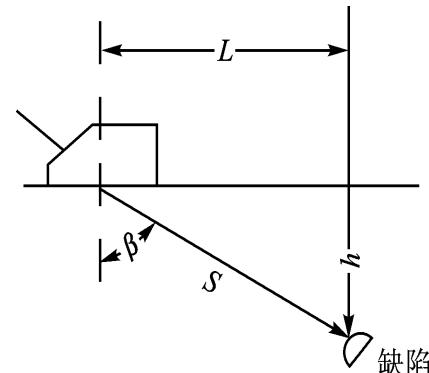
- 可发射和接收横波，主要由压电晶片、吸收块和斜楔块组成，其结构如图所示

斜探头的结构

5.7.2 超声波换能器

(2) 斜探头

- 入射声束与被探工件平面法线之间形成一个夹角，且 $\alpha_{1m} \leq \alpha \leq \alpha_{2m}$
- 工件内折射波为横波，主要用于探测与探测面垂直或成一定角度的缺陷
- 斜探头折射角标称： $\gamma=40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$
- 斜探头折射角正切值标称： $K=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$



5.7.2 超声波换能器

表面波探头：

- 可发射和接收表面波。它是斜探头的一个特例。即当入射角达到横波临界角时，在工件中便产生表面波。
- 直探头在液体中倾斜入射工件时，在特定角度下也能产生表面波。

5.7.2 超声波换能器

(4) 双晶探头

- 双晶探头有两块压电晶片，一块用于发射超声波，一块用于接收超声波，中间用隔声层分开
- 有双晶纵波探头 ($\alpha < \alpha_{1m}$) 和双晶横波探头 ($\alpha_{1m} \leq \alpha \leq \alpha_{2m}$)
- 双晶探头主要用于探伤近表面的缺陷
- 双晶性能不同，灵敏度高，杂波、盲区小

5.7.2 超声波换能器

双晶探头

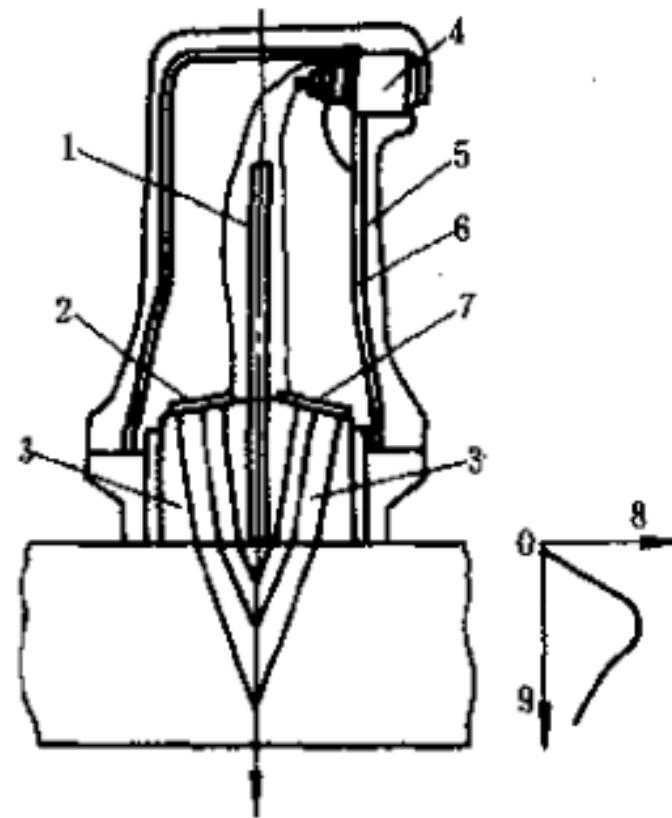
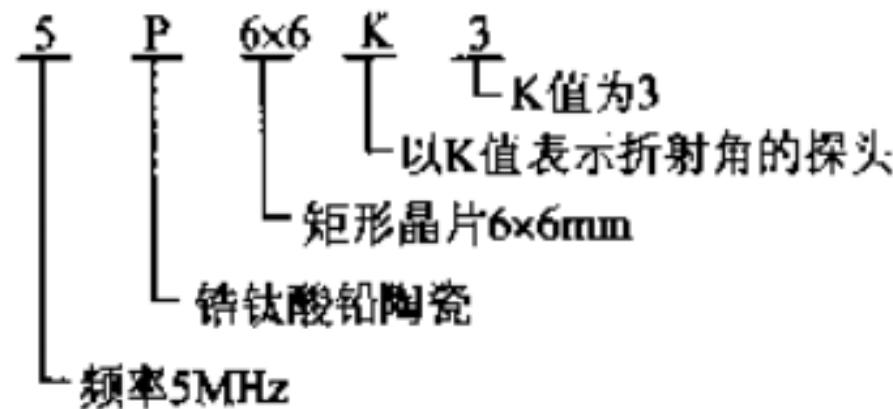


图 2-14 纵波联合双探头结构示意图

1—隔离层 2—发射晶片 3—延迟块 4—接头 5—外壳
6—屏蔽 7—接收晶片 8—声压 9—深度

5.7.2 超声波换能器

- 斜探头利用K值在探伤中进行缺陷定位、定量计算十分简便。
- 直探头在液体中倾斜入射工件时，在一定的角度下，也能产生横波。在水浸法横波探伤中，常利用此方法来产生横波。



5. 7. 3耦合剂

- 超声耦合是指超声波在检测面上的声强透射率。声强透射率高，超声耦合好。为了改善探头与工件间声能的传递，而加在探头和检测面之间的液体薄层称为耦合剂。在液浸法检测中，通过液体实现耦合，此时液体也是耦合剂。
- 当探头和工件之间有一层空气时，超声波的反射率几乎为100%，即使很薄的一层空气也可以阻止超声波传入工件。因此，排除探头和工件之间的空气非常重要。耦合剂可以填充探头与工件间的空气间隙，使超声波能够传入工件，这是使用耦合剂的主要目的。除此之外，耦合剂有润滑作用，可以减小探头和工件之间的摩擦，防止工件表面磨损探头，并使探头便于移动。

5.7.3 常用耦合剂

- 常用耦合剂有水、甘油、机油、变压器油、化学糨糊等
- 水的优点是来源方便，缺点是容易流失，容易使工件生锈，有时不易润湿工件。液浸检测中最常使用水作耦合剂，使用时可加入润湿剂和防腐剂等
- 甘油的优点是声阻抗大，耦合效果好，缺点是要用水稀释，容易使工件形成腐蚀坑，价格较贵。
- 机油和变压器油的附着力、黏度、润湿性都较适当，也无腐蚀性，价格又不贵，因此是最常用的耦合剂
- 化学糨糊的耦合效果比较好，也是一种常用的耦合剂。

5.7.4 试块

- 与一般的测量方式一样，为了保证检测结果的准确性、可重复性和可比性，必须用一个具有已知固定特性的试样对检测系统进行校准。这种按一定用途设计制作的具有简单几何形状人工反射体或模拟缺陷的试样，通常称为试块。试块和仪器、探头一样，是超声检测中的重要器材。

5.8 按探头接触方式分类的超声检测方法

1, 直接接触法：探头与工件检测面之间，涂有很薄的耦合剂层，因此可以看作为两者直接接触，这种检测方法称为直接接触法，或简称接触法

2, 液浸法检测：将探头和工件浸于液体中以液体作耦合剂进行检测的方法，称为液浸法。**耦合剂可以是水，也可以是油。**当以水为耦合剂时，称为水浸法。探头不直接接触工件，所以此方法**适用于表面粗糙的工件，探头也不易磨损，耦合稳定，检测结果重复性好，便于实现自动化检测**

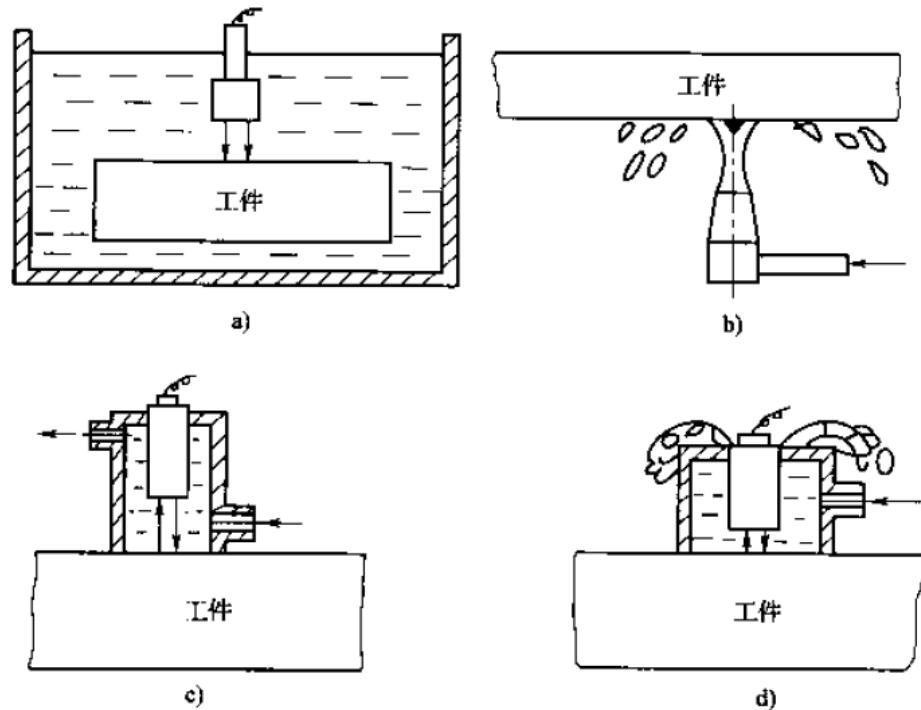


图 5-51 液浸法
a) 全浸没式 b) 喷液式 c) 通水式 d) 满溢式

垂直入射法

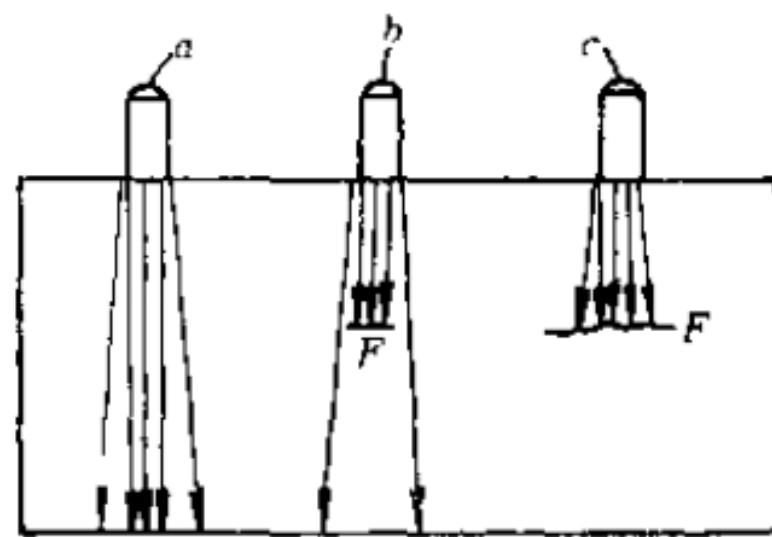


图4-27 垂直法探伤
a)无缺陷 b)小缺陷 c)大缺陷

斜角探伤法

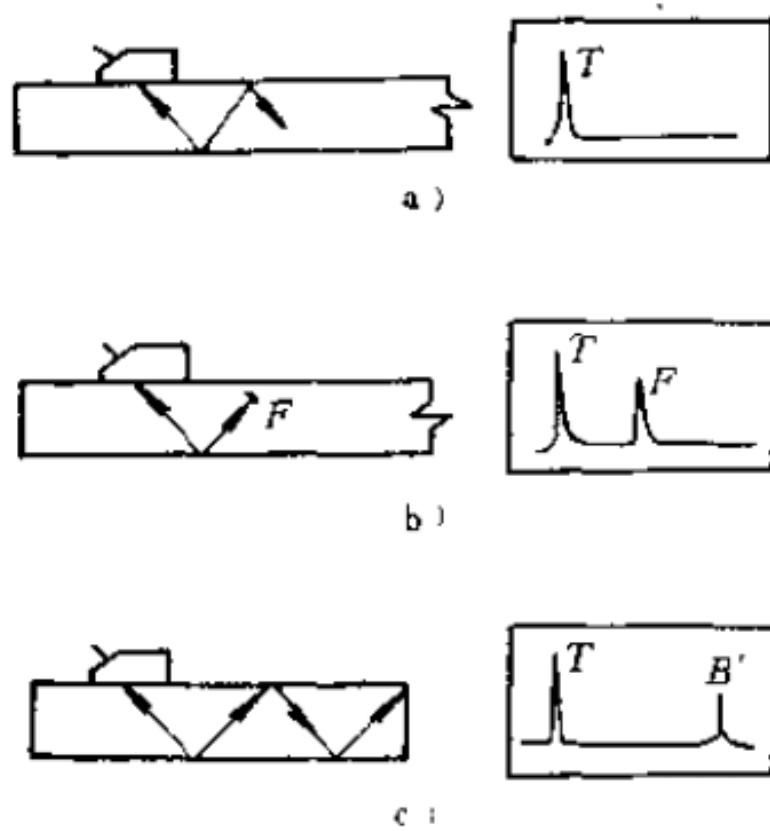


图4-28 斜射法探伤
a)无缺陷 b)有缺陷 c)接近板端

5.8 按探头接触方式分类的超声检测方法

- 由于水中声速是钢中声速的 $1/4$ ，声波从水中入射钢件时，产生折射后波束变宽。为了提高检测灵敏度，常用聚焦探头。
- 液浸法还适用于横波、表面波和板波检测。由于探头不直接与工件接触，因而易于实现自动化检测，也适宜检测表面粗糙的工件。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

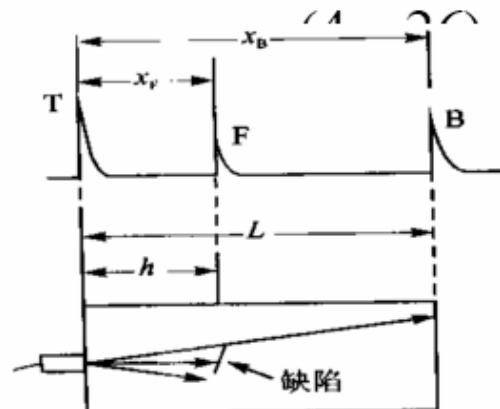
缺陷的定位

- 超声仪荧光屏上通常有两根扫描线，其中一根为距离标志波。在纵波探伤中，发射波、缺陷波和底波的距离，可由标志波直接读出。

图像比较法——若工件长为 L ，缺陷波和底波距发射波分别为 x_F 和 x_B ，则缺陷距探测面为：

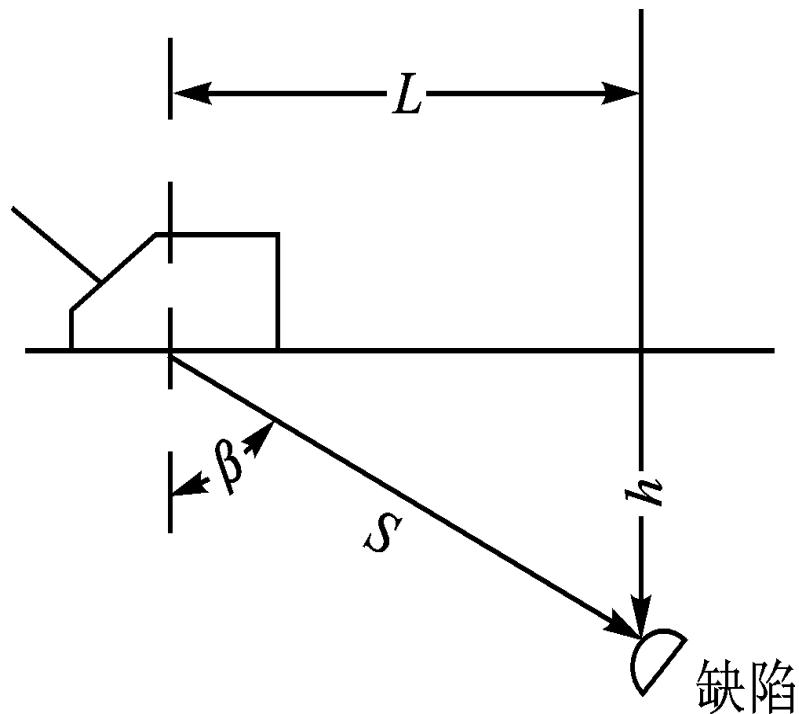
$$h = (x_F / x_B) \cdot L$$

如下图所示：



5.9 缺陷的定位、定量和定性

- 在横波探伤中，缺陷定位要求出缺陷距探头中心的水平距离 L 和距探测面的垂直距离 h ，如图所示。



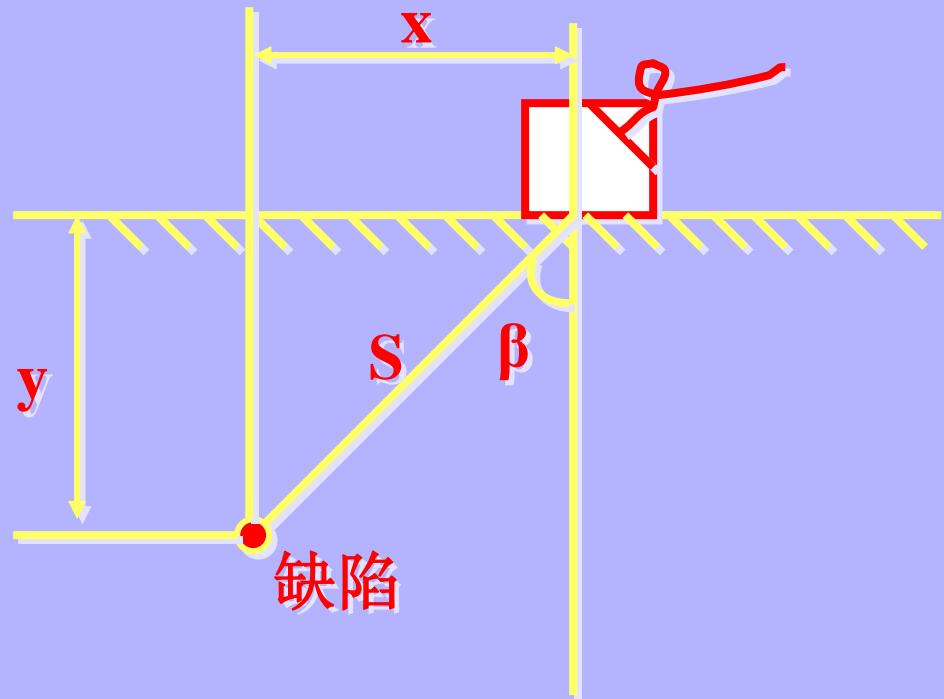
若探头中心至缺陷的声程为 s ，探头折射角为 β ，则

$$\begin{cases} h = s \cdot \cos \beta \\ l = s \cdot \sin \beta \end{cases}$$

$$x = tg\beta = Ky$$

$$y = \frac{S}{\sqrt{1 + K^2}}$$

$$x = \frac{KS}{\sqrt{1 + K^2}}$$



5.9 缺陷的定位、定量和定性

缺陷的定量

- 测定缺陷的大小和数量，缺陷大小包括缺陷的面积、长度和深度。
- 常用方法：当量法、测长法、底波高度法。

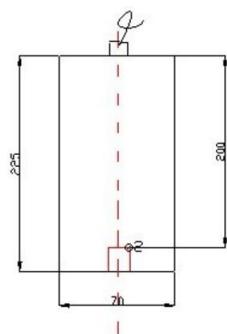
当量法缺陷定量

当量法缺陷定量是以对比试块上人工缺陷（如平底孔）来衡量缺陷大小，即实际缺陷相当于多大面积的人工缺陷。

(1) 试块比较法

在相同的探测条件下，将工件中缺陷小组高度、位置与材质相同的试块上人工缺陷（平底孔或横通孔）反射波进行比较，当两者位置相同、高度相等或相近时，则**工件中缺陷大小相当于该人工缺陷的直径大小，称作当量直径。**

直探头探伤常以平底孔试块比较，斜探头以横通孔试块比较。



5.9 缺陷的定位、定量和定性

(2) “距离-波幅”曲线和“面积-波幅”曲线当量法

缺陷波幅度高低与缺陷的面积（大小）和距离（深度）有关。

距离探头相等的缺陷，面积愈大，反射波愈高；

面积相等的缺陷，距探头愈远，反射波愈低。

据此，可通过数组距离相同、面积不同和距离不同、面积相同的人工缺陷试块作出“面积一波幅”曲线和“距离一波幅”曲线。

探伤时根据缺陷波的高度及缺陷波在时间扫描线上的位置通过曲线确定缺陷大小。

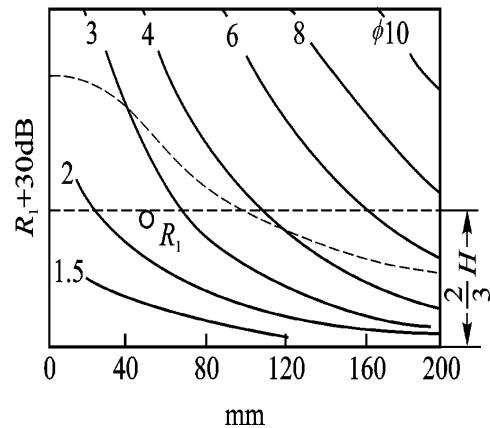


图4.30 面积—振幅曲线

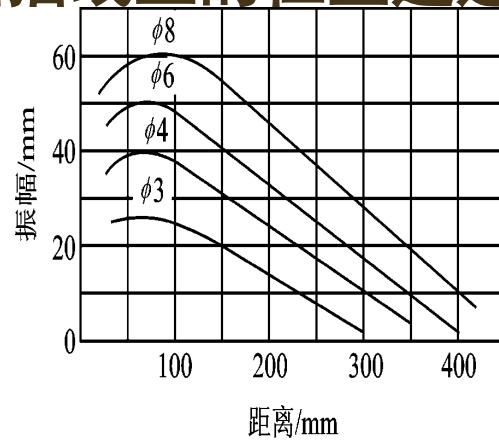


图4.31 距离—振幅曲线

(3) 当量计算法（以纵波为例说明平底孔当量的计算方法）

$$P_f = p_0 \frac{S_A}{\lambda^2} \frac{S_f}{\chi^2} \quad (1)$$

$$P_B = p_0 \frac{S_A}{2\lambda\chi} \quad (2)$$

式中: p_f ---- 缺陷的反射声压

p_B ---- 底面反射声压

P_0 ---- 换能器起始声压

S_A ---- 压电晶片面积

S_f ---- 缺陷面积

λ ---- 超声波波长

χ ---- 缺陷深度或工件厚度,

设有两个缺陷:

实际探伤过程中发现的缺陷 f_f , 其深度为 χ_f , 面积为 S_f ;

定起始当量的假想平底孔 f_b , 其深度为 χ_b , 面积为 S_b ; 其声压发射比值为:

$$\frac{P_{ff}}{P_{fb}} = \frac{\frac{P_0}{\lambda^2} S_f}{\frac{P_0}{\lambda^2} S_b} = \frac{S_f}{S_b} \bullet \frac{\chi_b^2}{\chi_f^2} = \frac{\frac{\pi \phi_f^2}{4}}{\frac{\pi \phi_b^2}{4}} \bullet \frac{\chi_b^2}{\chi_f^2} = \frac{\phi_f^2}{\phi_b^2} \bullet \frac{\chi_b^2}{\chi_f^2}$$

若缺陷发射声压比假想平底孔反射声压高 β dB,

求深度为 χ_f , β 分贝的场当量计算公式

$$\Phi_f = jk\Phi_b \quad (3)$$

式中: $j = 10^{\frac{\beta}{40}}$ 称为分贝系数

(3) 式为起始当量是 ϕ_b

$k = \frac{\chi_f}{\chi_b}$ 称为深度系数

例 3: 平顶盖厚 350mm, $\Phi 4$ 起始灵敏度, 在 200mm 深, 发现一个 27db 的缺陷, 求其当量?

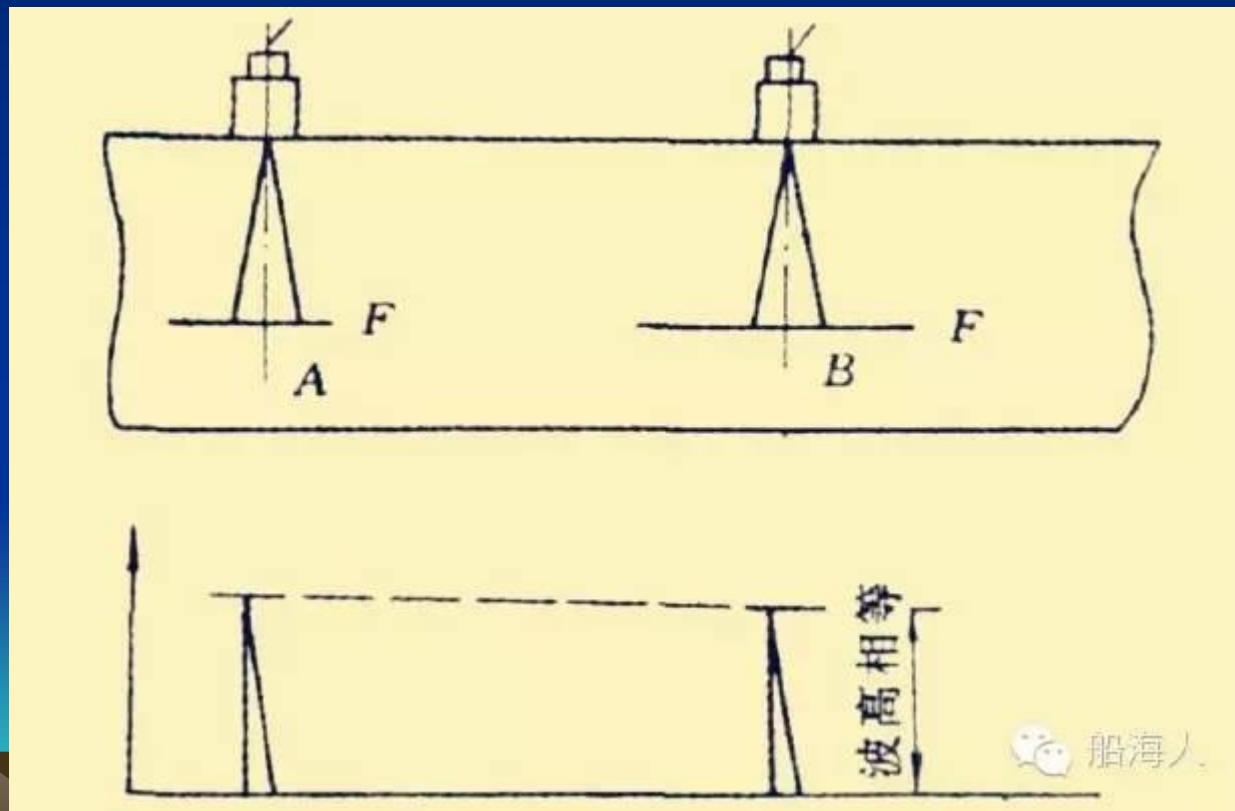
解:

$$\Phi_f = jk\Phi_b = 10^{\frac{27}{40}} \bullet \frac{200}{350} \bullet 4 = 4 \bullet \frac{6}{5} \bullet 2 \bullet 3 = 11mm$$

5.9 缺陷的定位、定量和定性

以波束指向性为基础的定量法

当缺陷面积大于声束面积时，无法用当量法判断缺陷大小（即无法根据反射波高低判断缺陷大小），如图所示。



5.9 缺陷的定位、定量和定性

以波束指向性为基础的定量法

- 虽然A、B两缺陷大小不同，但缺陷反射波高度却相同，这是由于**缺陷面积大于声束面积后**，随着缺陷面积的增大，缺陷反射波不再增高的缘故，因此无法根据波高判断其大小。无法用当量法判断缺陷大小。
- 此时可以用**波束指向性为基础的定量法**，是通过**移动探头探测大缺陷的边缘**（根据荧光屏上缺陷波高度变化）确定缺陷大小的一种方法，当探头声束中心位于缺陷中心时，缺陷波最高；当声束中心偏离缺陷中心时，缺陷波降低；当声束不与缺陷相遇时，缺陷波消失。
- 具体有半波高度法和全波消失法。

1. 2 以波束指向性为基础的定量法

半波高度法(6dB法)：

无论纵波探伤还是横波探伤，发现缺陷后首先找出最高波的探头位置，然后移动探头，直至声束中心恰好在缺陷的边缘（声束只有一半射在缺陷上），此时反射波高度降低为原来的一半(6dB)，此时探头中心之间的距离为**b**即为缺陷在该方向的尺寸。

再将探头沿不同方向重复上述操作，由探头中心各位置构成的轨迹所围面积，即为缺陷的指示大小。由于受缺陷的取向、形状及表面状态等因素影响，指示大小和缺陷的真实大小往往有一定误差。横波探伤用半波高度法测定缺陷长度与之相同。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

半波高度法(6dB法)

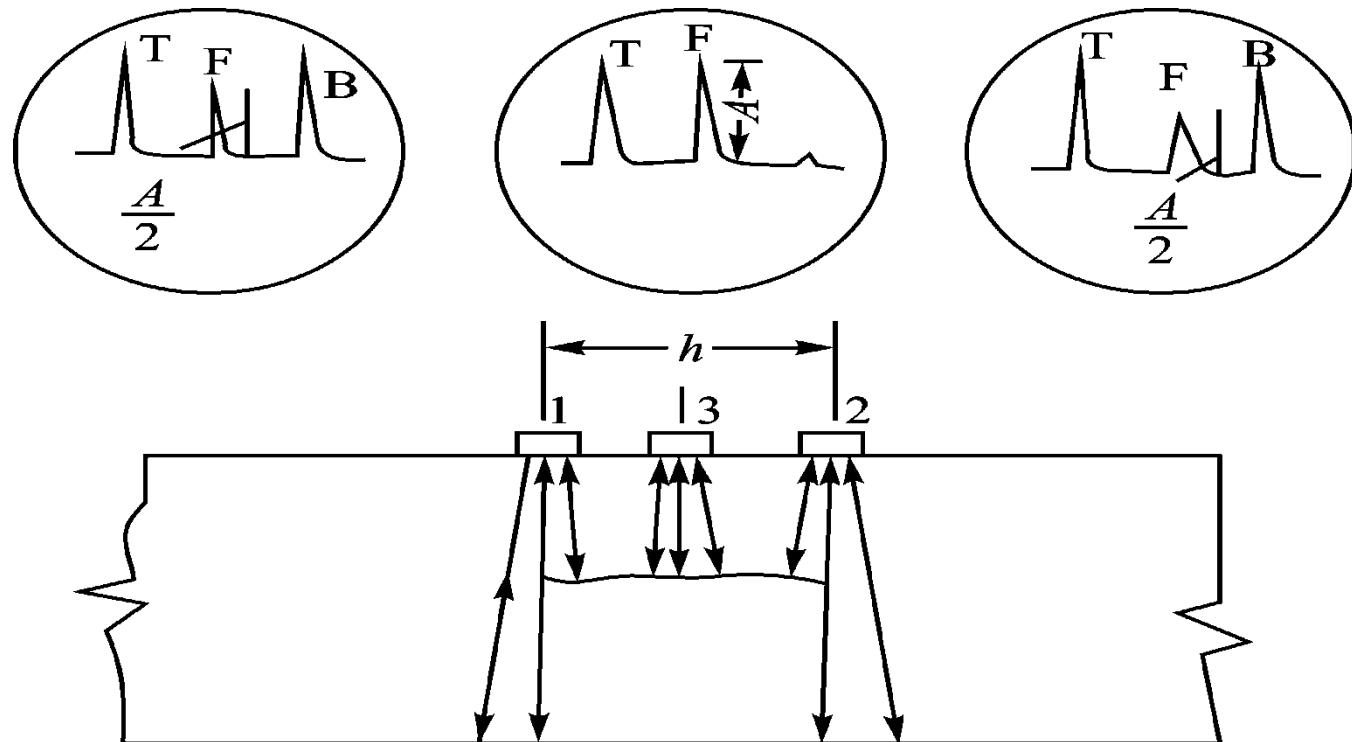
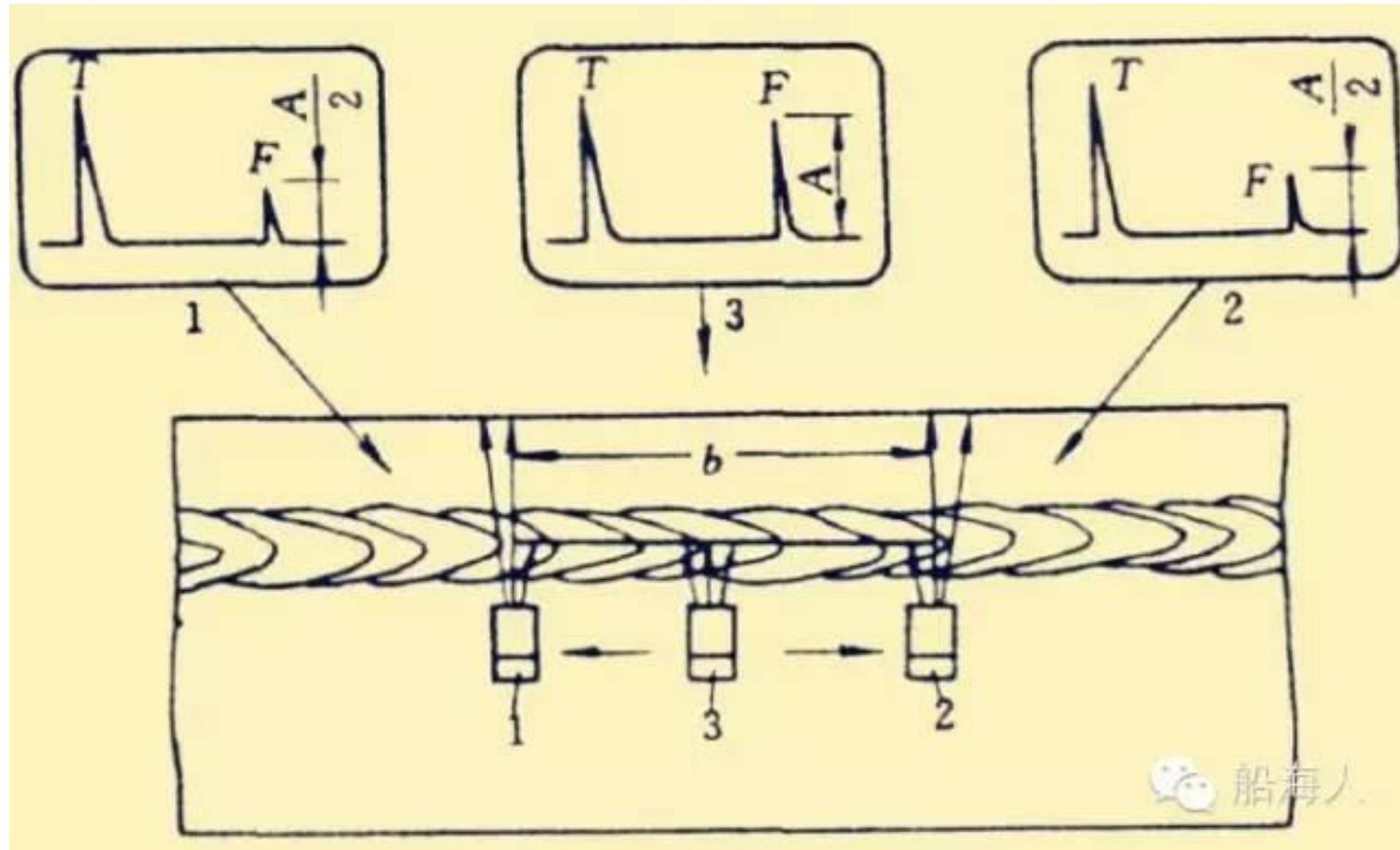


图4.33 半波高度法

半波高度法(6dB法)



斜探头测定缺陷大小

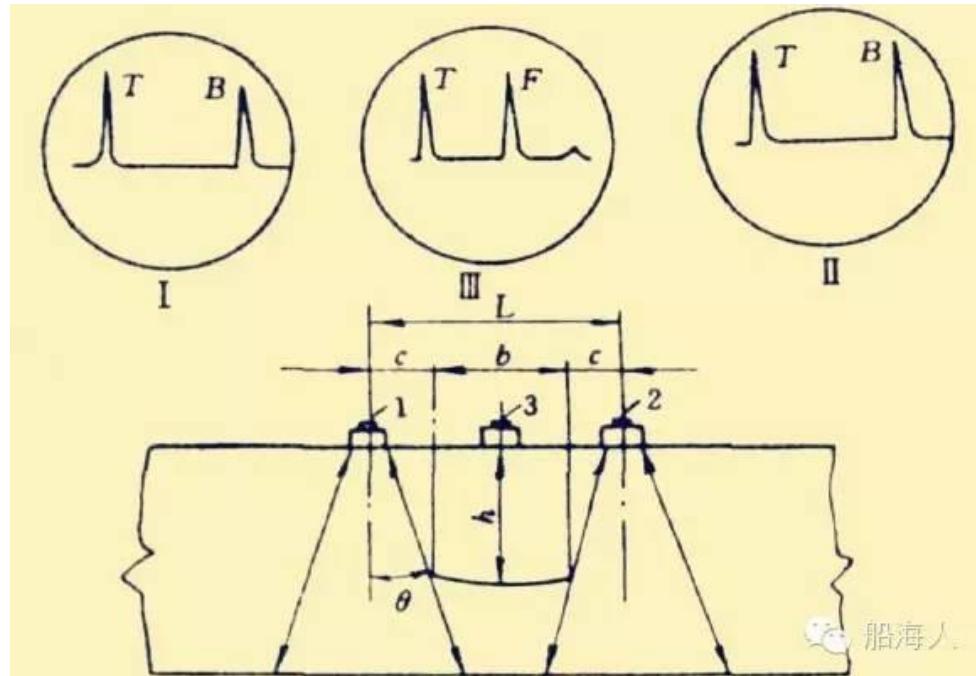
1.2 以波束指向性为基础的定量法

全波消失法

- 探伤发现缺陷后，由缺陷波量最高位置向各方向移动探头，分别记下缺陷波刚刚消失时探头的中心位置，这些探头中心位置围成的面积为缺陷的大致范围，再经简单计算可得缺陷大小。如图5所示，探头在位置3时缺陷波最高，位置1、2时缺陷波刚刚消失。

全波消失法

- 设1、2位置探头中心间距离为L，探头半扩散角为 θ ，缺陷深度h，缺陷长度b，探头半径为r，则：
- $b = L - 2c = L - 2(r + h \operatorname{tg} \theta) = L - 2r \operatorname{htg} \theta$
- $\theta = \arcsin 1.22 \lambda / D$
- 式中 λ ：波长；D：探头直径。



以底波强度为基础的定量法

- 底波高度法（底波百分比法）：它是以底波高度为基准，用缺陷波高度与底波高度之比，表示缺陷相对大小的方法。这种方法不能得到缺陷的真实尺寸。
- 声压比法：缺陷波和底波高度与缺陷反射声压P及底面反射声压 P_0 成正比，而声压比可用分贝值dB表示，
 - $$dB = 20 \log(P / P_0) = 20 \log P - 20 \log P_0$$
- 即分贝值为两声压对数值之差。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

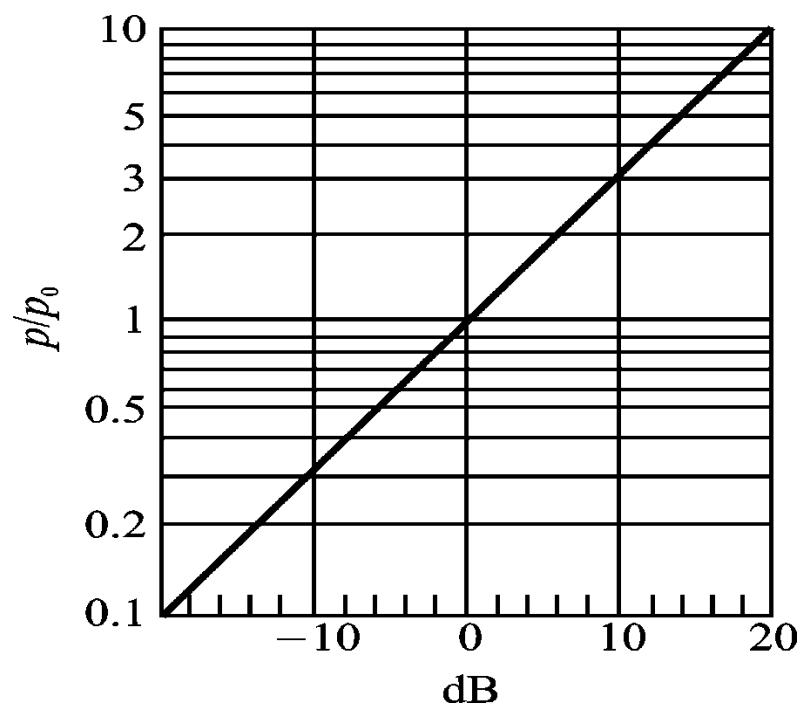


图4-32 分贝与 p/p_0 换算表

- 当测知底波和缺陷波的相对分贝值，并求出两者之差后，根据图4—32的曲线换算出声压比值，即以此值表示缺陷的大小。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

- 超声波探伤除确定缺陷位置及大小外，还必须确定缺陷的性质，即定性。为了定性准确，探伤前必须对工件的结构、材质、组织状态、加工工艺及制造过程中容易产生的缺陷有所了解。主要可从以下几方面考虑：

1. 根据缺陷的大小、形状判断

单个较小体积缺陷多为气孔、夹渣；密集分布的较小点状缺陷多为白点、气泡；尺寸较大的线性或条状缺陷多为裂纹、未焊透；尺寸较大、形状不规则的缺陷多为孔、疏松、夹渣等。

2. 根据缺陷所处位置判断

缩孔、缩松、气泡、砂眼等多位于铸件的浇冒口处，未焊透多在焊缝中或根部；未熔合在母材与焊缝交界处；裂纹多在应力较大部位；气孔、夹渣可存在于焊缝中各部位。

3. 根据缺陷波波形特征判断

缺陷波波高能够表明，缺陷密度与工件材料密度相关愈大，其反射波愈高。如气孔、裂纹、未焊透、缩孔、白点等反射波较高，而非金属夹杂物、夹渣等反射波较低。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

1. 缺陷波的形状对气孔、未焊透、未熔合等缺陷波形的形状有影响，其尖锐、陡直、波根部清晰；裂纹的波形尖锐，陡峭，且有波形交错；夹渣、疏松等波形较宽、波浅，有明显树枝状。
2. 缺陷波的敏感性，对白点，气孔等单个缺陷，探头平行移动或转动时缺陷波迅速消失，而探头绕缺陷转动时，缺陷波变化不大；对裂纹，探头平行移动时缺陷波波形会发生一定变化，探头移动到一定程度缺陷波才逐渐减幅直至消失，而转动探头是缺陷波会迅速降低甚至消失，很敏感；对不规则的疏松、夹渣等探头平行移动和转动时缺陷波变化都较迟缓。
3. 缺陷波的清晰度表明，白点、气孔、裂纹等缺陷小且清晰度较好，而非金属夹杂物，疏松等波形较宽，高低不同的波峰彼此相连，清晰度差。

5.9 缺陷的定位、定量和定性

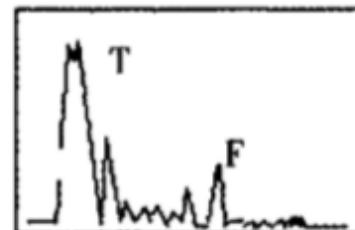
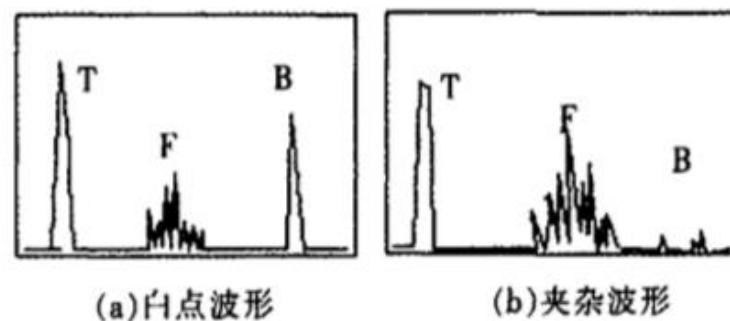
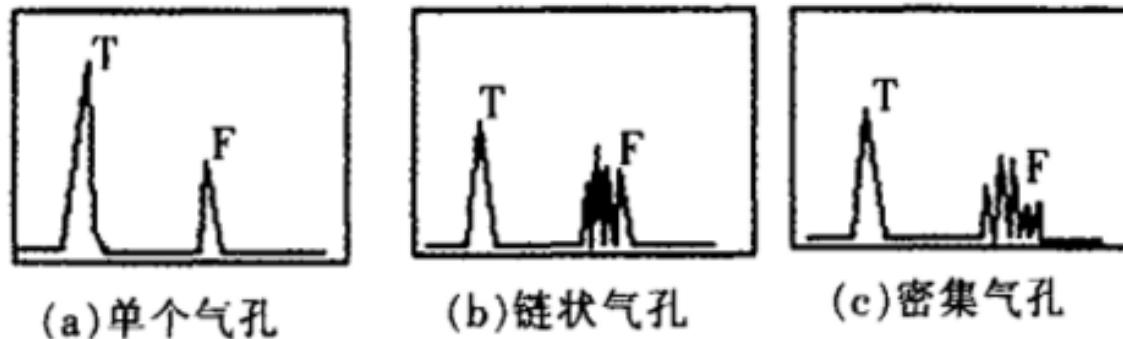


图 4 疏松波形

超声波检测特点

- 超声波检测比磁粉检测和渗透检测灵敏度低，但是超声波可以检测表面裂纹的深度。
- 超声波法可以无损检测厚度、材料硬度、淬硬层深度、晶粒度、液位和流量、残余应力和胶接强度等。

举例：超声检测法步骤，以横波为例

焊缝横波检测

焊缝的检测多采用横波检测，主要是因为焊缝都有加强高，焊道表面不平整，使得采用直探头时耦合较为困难，更重要的是焊缝内部缺陷如裂纹、未焊透、未熔合等的取向多与检测面垂直或存在一定角度，采用横波检测有利于发现这些缺陷。

焊缝横波检测的一般步骤

- 1 检测条件确定
- 2 调整仪器，使其处于正常工作状态
- 3 测定斜探头的前沿长度
- 4 测定斜探头的K值(折射率)
- 5 定标
- 6 检测灵敏度调整
- 7 耦合扫查
- 8 缺陷评定
- 9 记录与报告

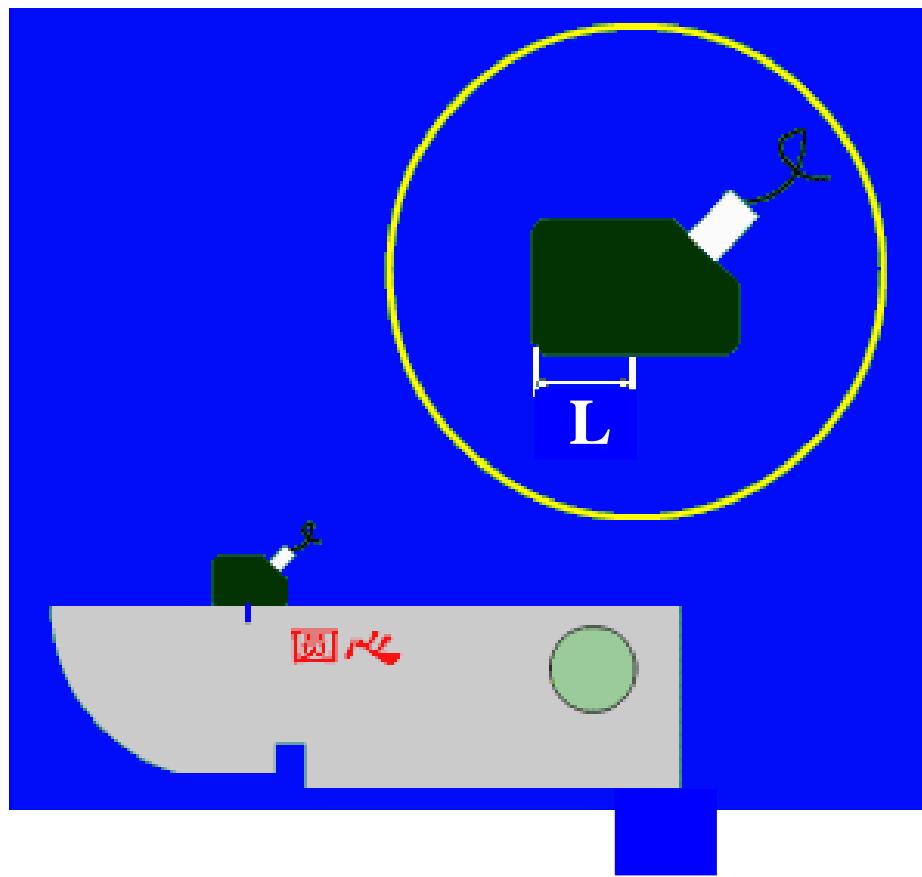
调整仪器处于要求的工作状态

测定斜探头前沿长度

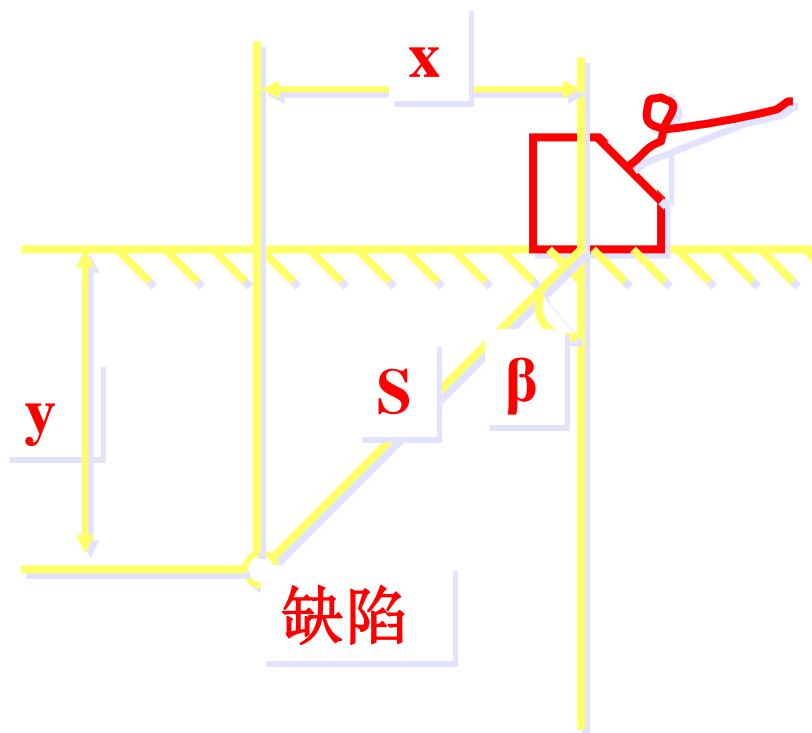
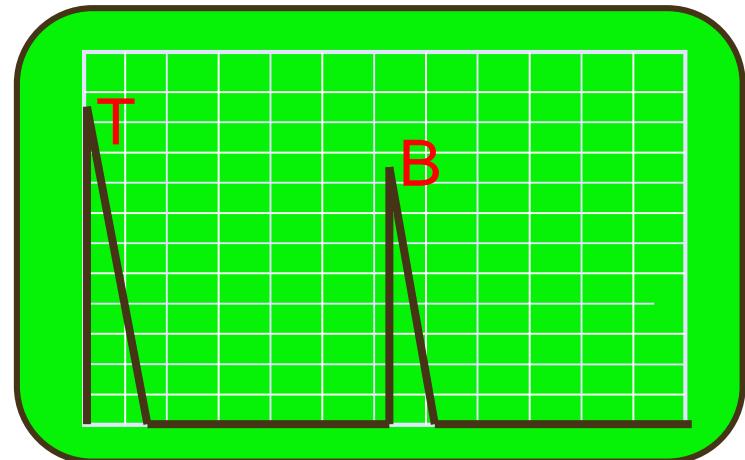
检测中，斜探头所标志的入射点位置未必就是实际的声轴线入射点，而使用过的探头则更会因磨损改变入射点的位置，因此应在检测前或定期校验入射点的位置，以保证对缺陷的准确定位。

入射点的校验一般以探头前沿长度的测量来进行。

主要采用有一定半径圆弧面的试块，找到探头在圆弧面的最大回波高度时，探头的入射点正好位于圆心上，此时量出探头端面距离试块边缘的距离就可计算出前沿长度。



前沿距离 L



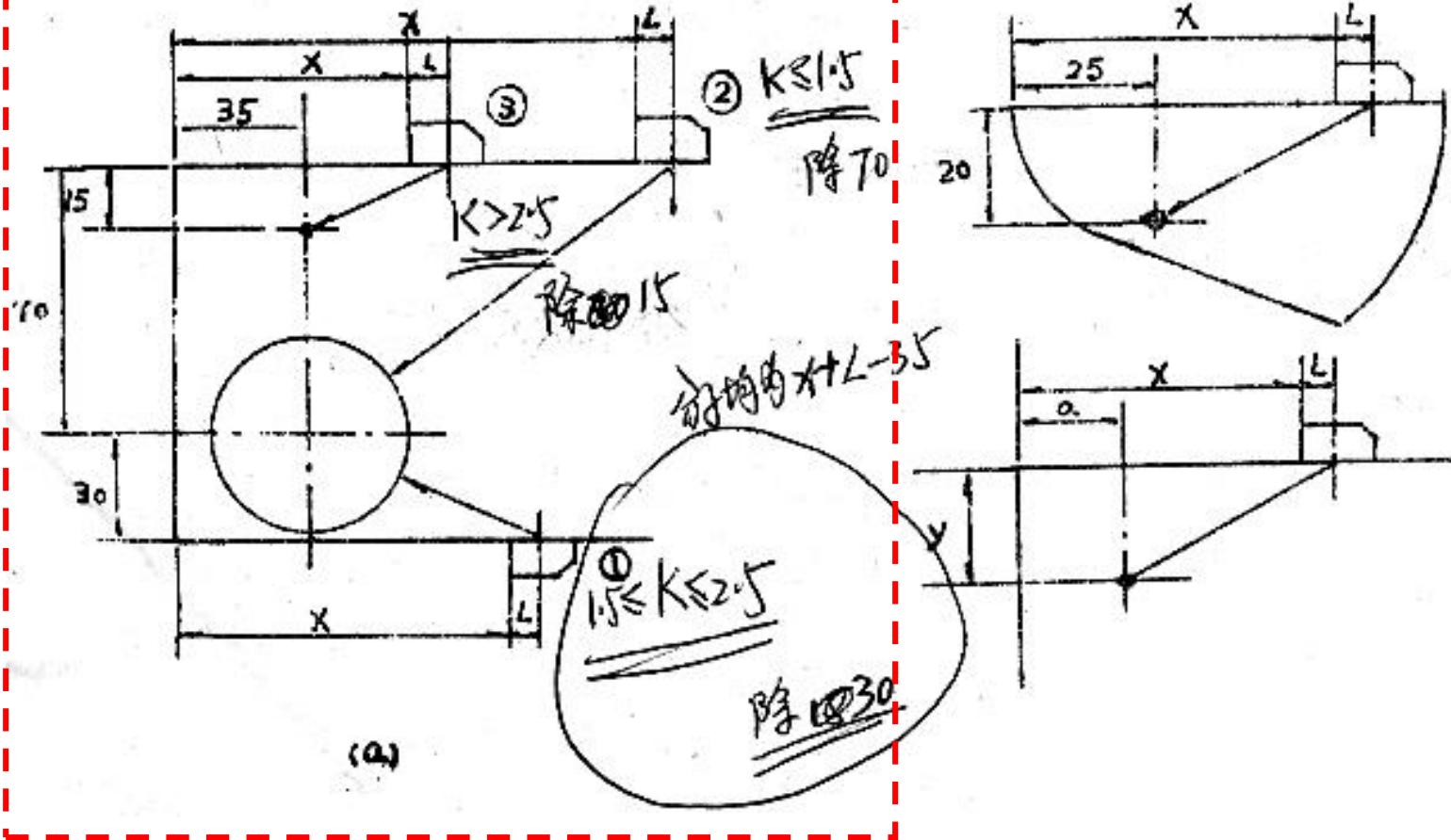
测定斜探头的K值（折射率）

斜探头折射角的选择原则：应能使声轴线直射、一次反射或二次反射后声束能够覆盖整个焊缝截面或被检测截面并尽可能与主要的危险性缺陷延伸方向相垂直，保证足够的检测灵敏度。

与测量前沿长度类似，由于误差或使用磨损等原因，斜探头的折射角也会发生改变，在检测前必须测定斜探头的K值（折射率），确保在对缺陷进行定位计算时的准确性。

1. 斜探头K值与角度的对应关系

NO.	K值	对应角度
1	K1	对应45度
2	K1.5	对应56.3度
3	K2	对应63.4度
4	K2.5	对应68.2度
5	K3	对应71.6度



标称K值 ≤ 1.5 在位置②处测试：

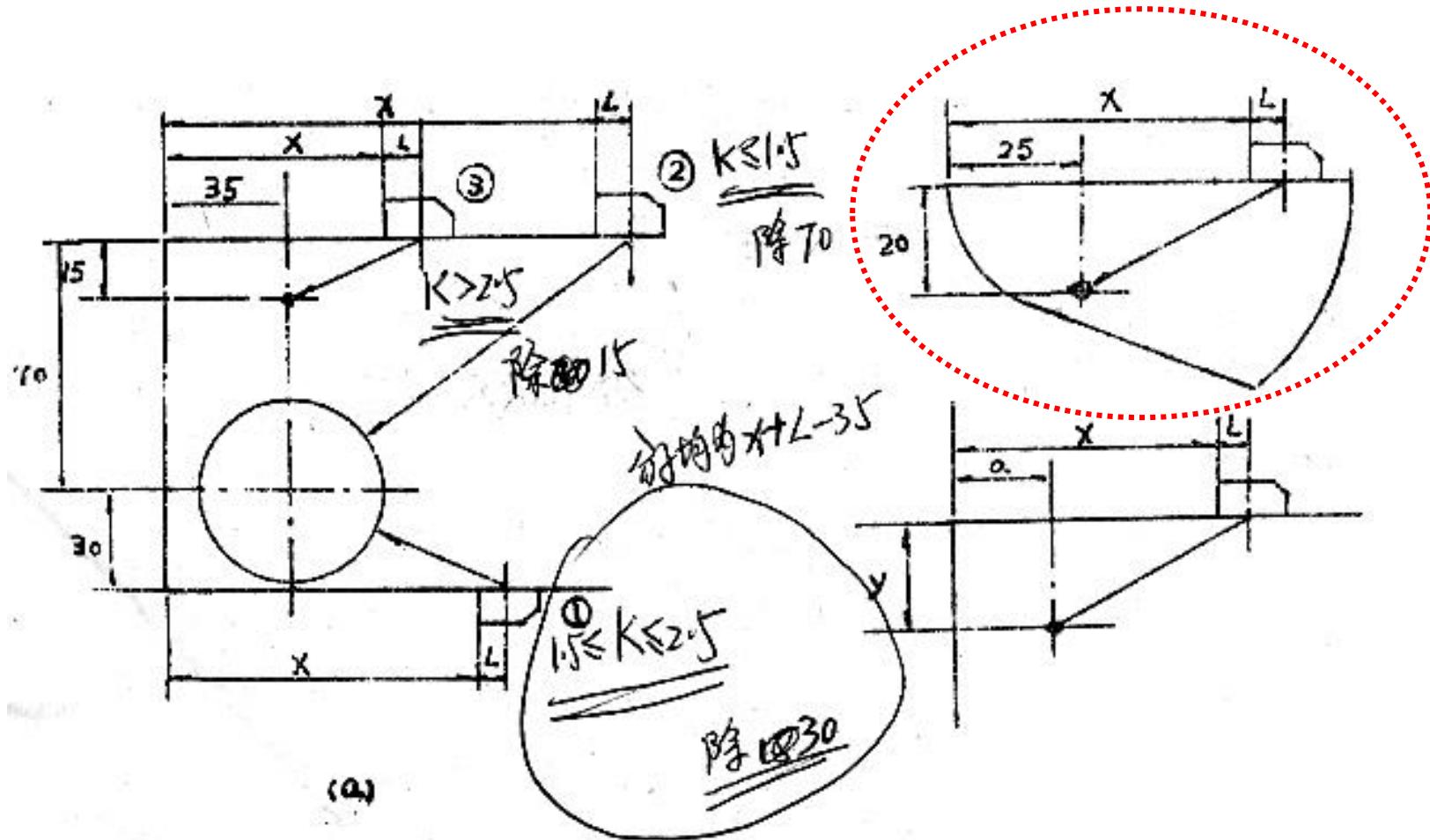
$$K = \frac{x + L - 35}{70}$$

1.5 \leq 标称K值 ≤ 2.5 在位置①处测试：

$$K = \frac{x + L - 35}{30}$$

标称K值 > 2.5 在位置③处测试：

$$K = \frac{x + L - 35}{15}$$



IIW2试块，以Φ5mm横孔为反射体，则适用于
1.5≤标称K值≤2.5的探头K值测试：

$$K = \frac{x + L - 25}{20}$$

定标

定标过程实际是对时基线零位校正的过程，即把斜楔中的声程移出时基线外，使时基线的零点真正代表检测面上的入射点，定标后的水平时基线刻度将与横波在工件中的传播时间或距离成线性关系。

定标的目的：都是为了便于直接从波形显示位置得出缺陷的实际位置。

定标方法：

- 1、水平定标
- 2、深度定标
- 3、声程定标

定标时应注意找到反射体的最大回波并用回波前沿对准相应的水平刻度。最好在检测灵敏度下进行定标，因为灵敏度不同时，脉冲回波占宽不同。

起始灵敏度调整

焊缝横波检测中，通常是在特定的探头与仪器组合条件下，采用对比试块预先实测绘制成孔回波的距离—振幅曲线用于确定起始灵敏度以及检测过程中对缺陷的定量评定。

距离—振幅曲线的制作：

以相同波高为基准，不同埋藏深度的长横孔的回波高度分贝值（衰减器或定量增益上的读数）为纵坐标，长横孔埋藏深度为横坐标，绘出的实测线作为基础，按验收标准要求而相应增益一定的分贝构成的一组曲线。

曲线只适合于检测时使用的特定探头与仪器的组合条件。长横孔用来模拟焊缝中的条状夹渣、未焊透或未熔合。

耦合扫查

扫查范围按照所使用标准或规范中的具体要求确定。
扫查分为单面双侧和双面双侧进行。

具体的扫查方式可依据采用标准或规范的要求执行。

缺陷评定

包括定位、定量和定性三个方面。

1、定位

- (1) 水平位置和埋藏深度的确定；
- (2) 缺陷高度的确定。

2、定量

- (1) 对比试块法
- (2) 计算法

利用距离—振幅曲线进行。

缺陷长度测量：半波高度法（也称6dB法）

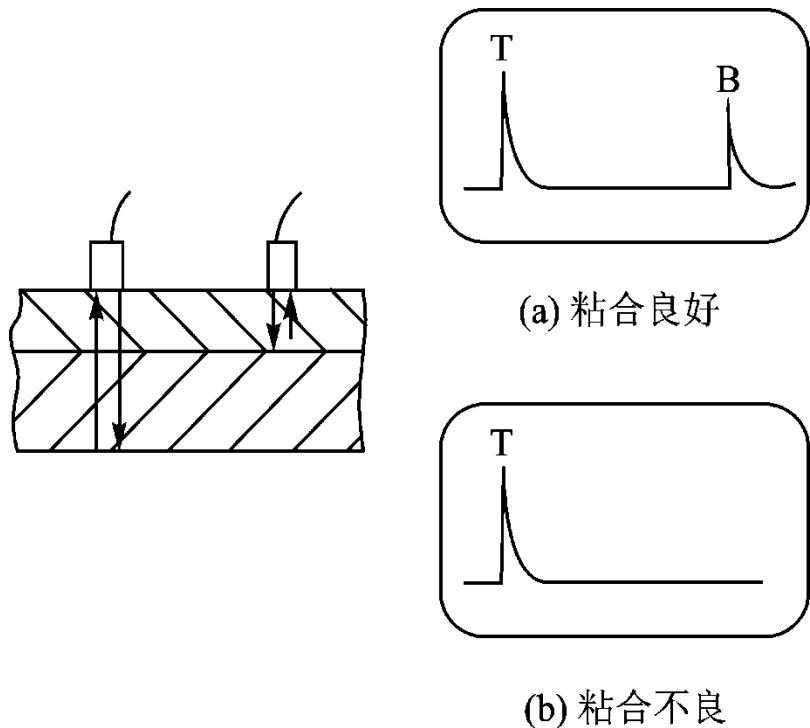
超声检测应用实例

- 复合材料检测
- 某些结构件是将两种材料粘合在一起形成的复合材料。
- 复合材料粘合质量的检测，主要有脉冲反射法、脉冲穿透法和共振法。
- 两层材料复合时，粘合层中的分层(粘合不良)多与板材表面平行，用脉冲反射法检测是一种有效的方法。

7 超声检测应用实例

- 用纵波检测时，若两种材料声阻抗相同或相近，且粘合质量良好，产生的界面波很低，底波幅度较高。
- 当粘合不良时，界面波较高，而底波较低或消失。
- 若两种材料的声阻相差较大，在复合良好时界面波较高，底波较低。当粘合不良时，界面波更高，底波很低或消失。

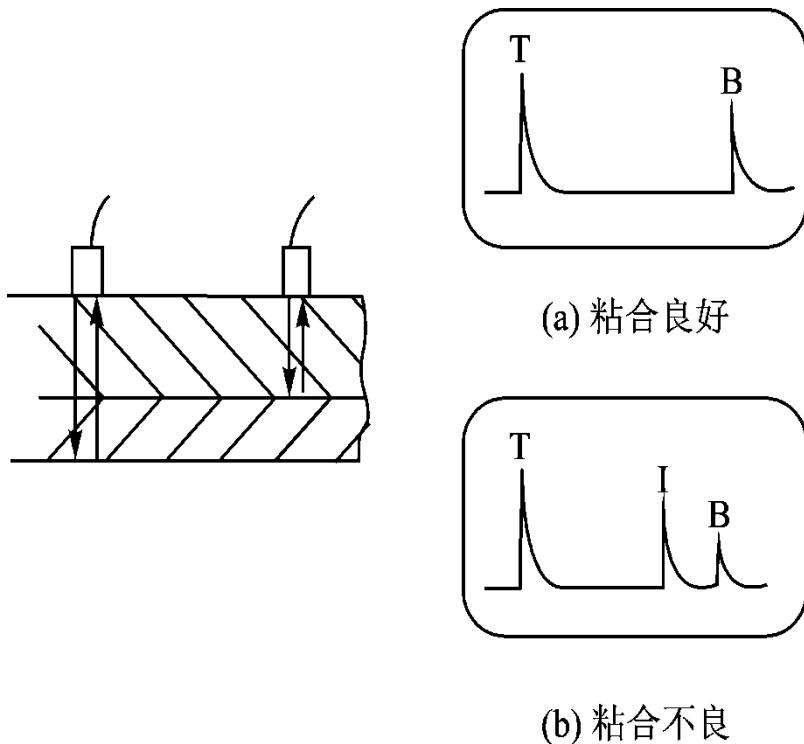
超声检测应用实例



- 当第一层复合材料很薄，在仪器盲区范围内时，界面波不能显示。这时粘合质量的好坏主要用底波判别。一般说来粘合良好时有底波遇粘合不良时无底波，但第二层材料对超声衰减大时，也可能无底波。
- 如图4—44所示。

图 4.44第一层较薄时的检测

超声检测应用实例



- 当第二层复合材料很薄时，界面波(I)与底波相邻或重合，如图4—45所示。
- 对于很薄的复合材料，也可用双探头法检测。如用横波检测，可用两个斜探头一发一收，调整两探头的位置，使接收探头能收到粘合不良的界面波。

图4.45第二层较薄时的检测