



武汉理工大学
Wuhan University of Technology

无损检测技术

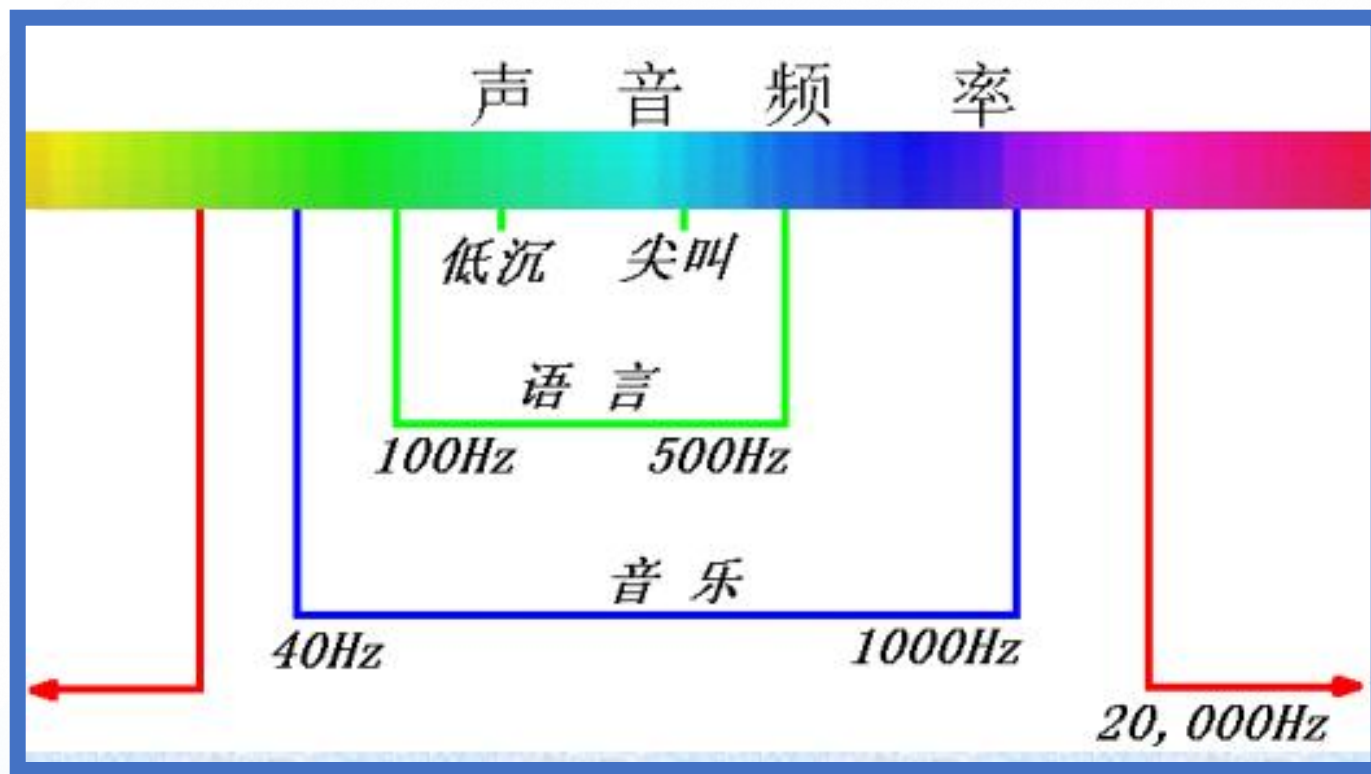
超声检测技术

机电工程学院测控系

主讲人：魏莉

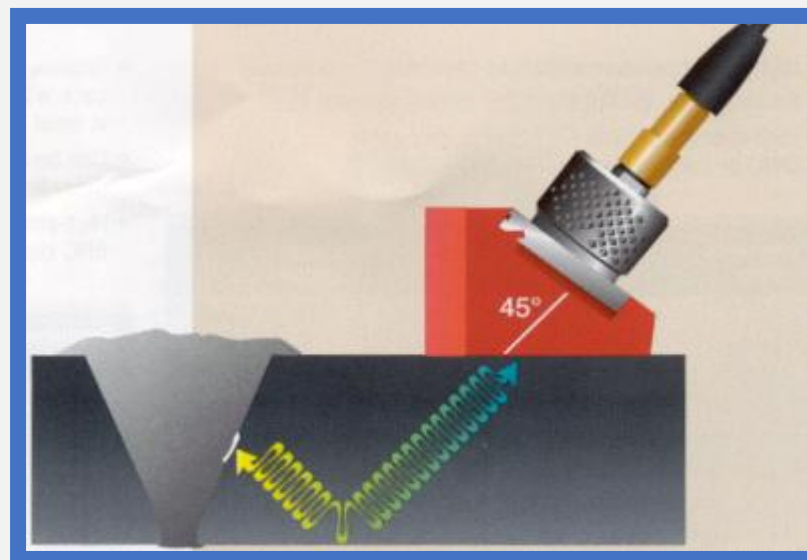
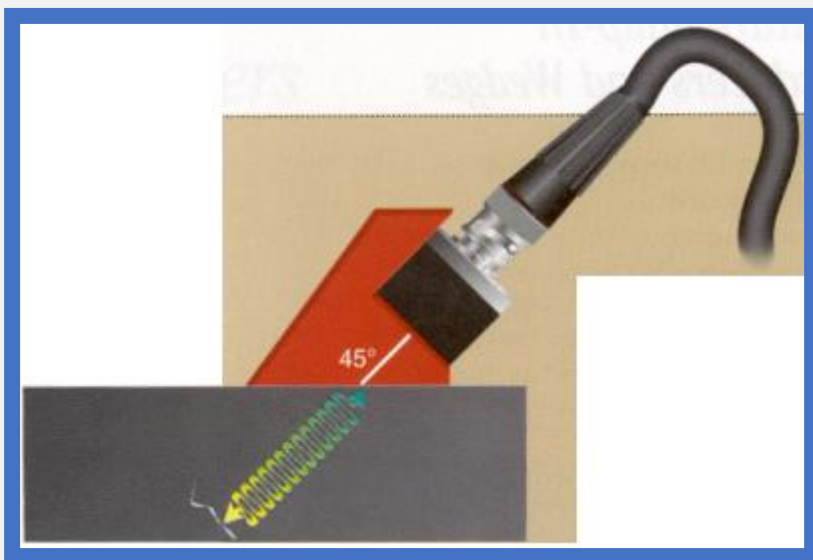
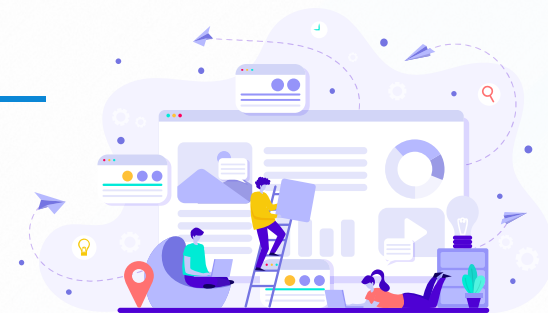
1 超声检测的基础知识

一. 什么是超声波



1 超声检测的基础知识

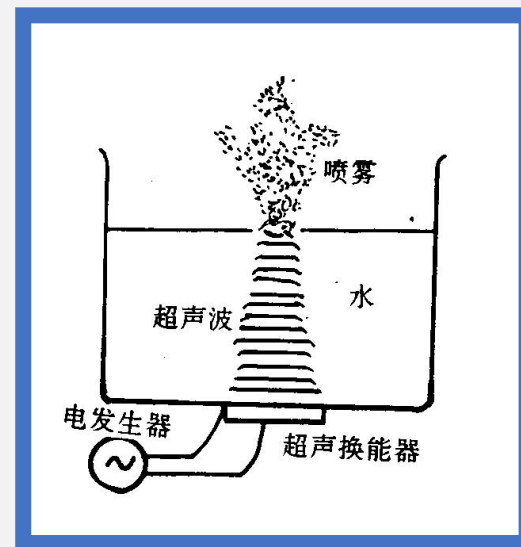
无损探伤



测流量 测液位 测浓度 测距离 测厚度

1 超声检测的基础知识

超声雾化

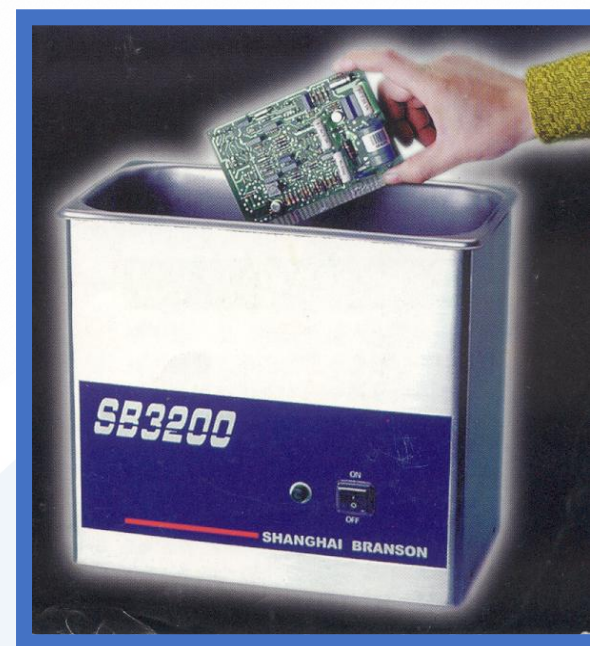
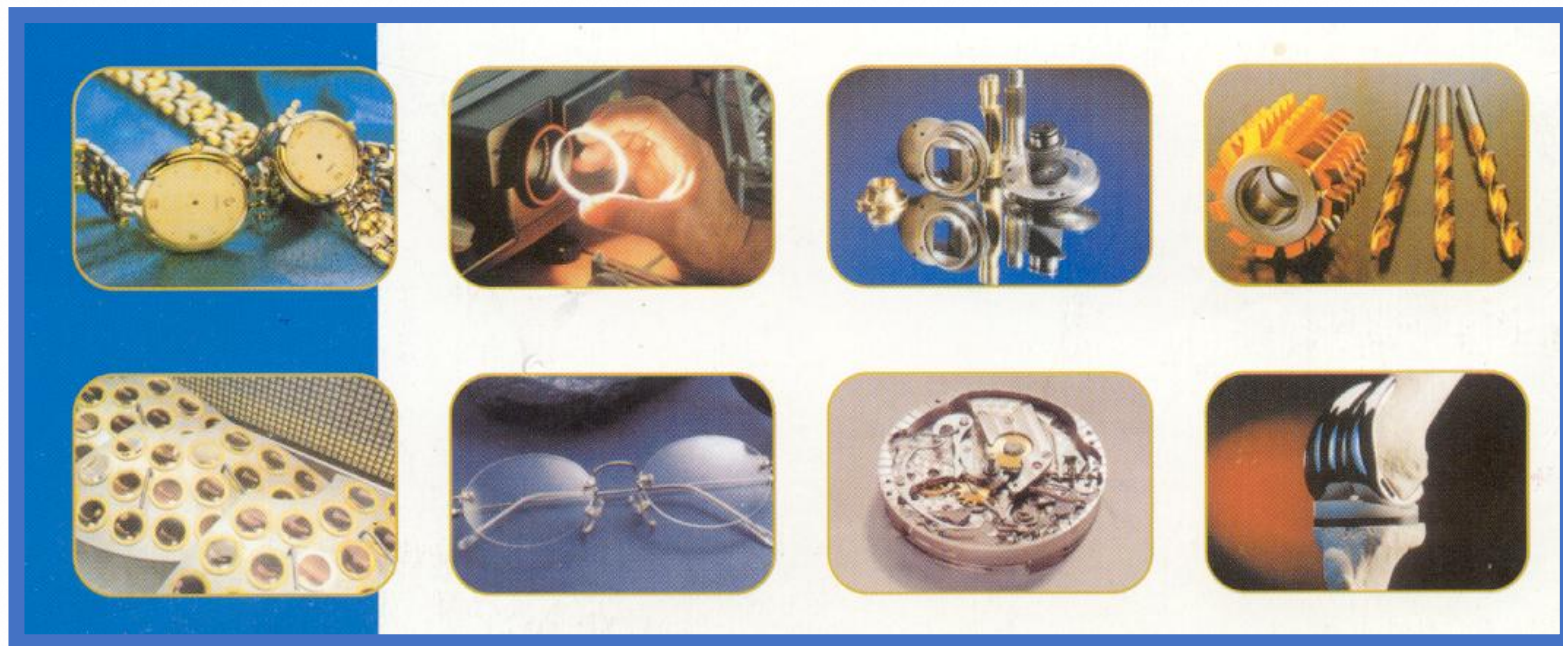
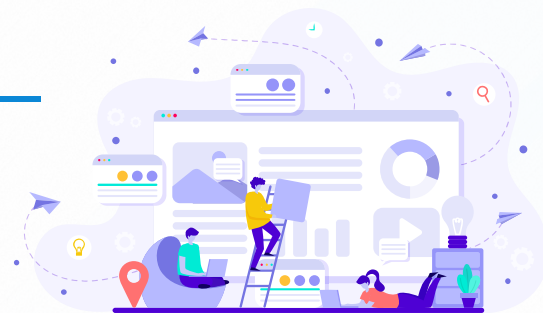


利用**超声能量**改变材料的**形态、性质**简称为**超声处理**



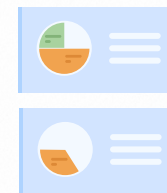
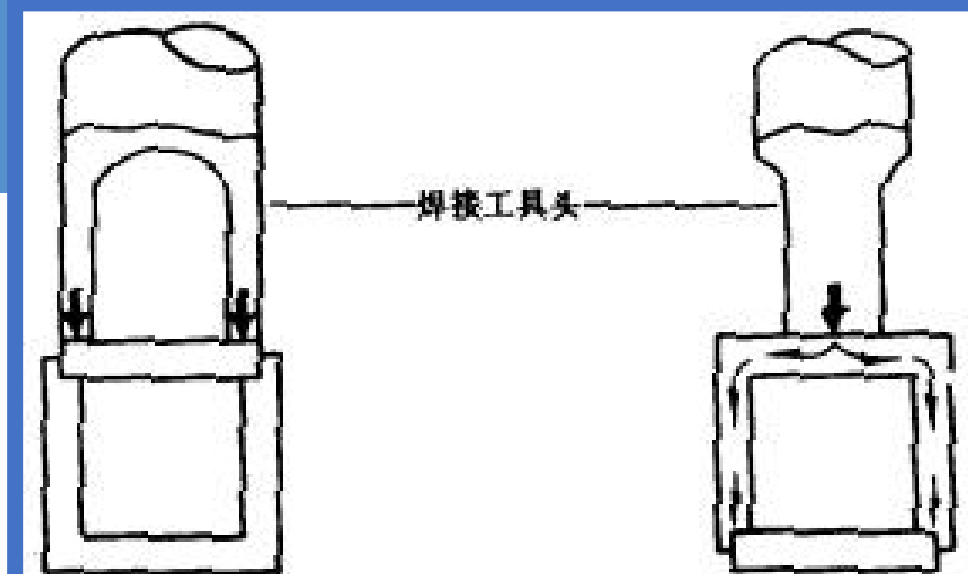
1 超声检测的基础知识

超声清洗



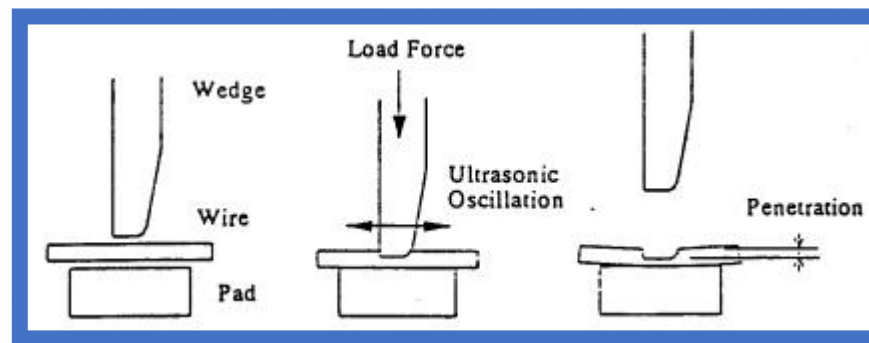
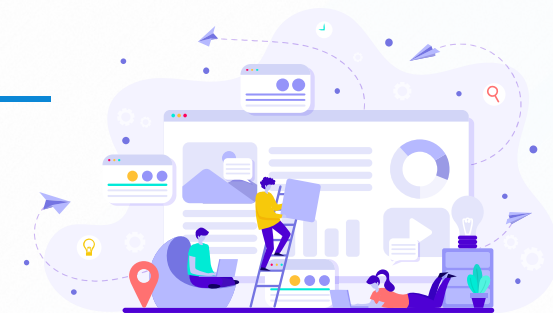
1 超声检测的基础知识

超声塑料焊接



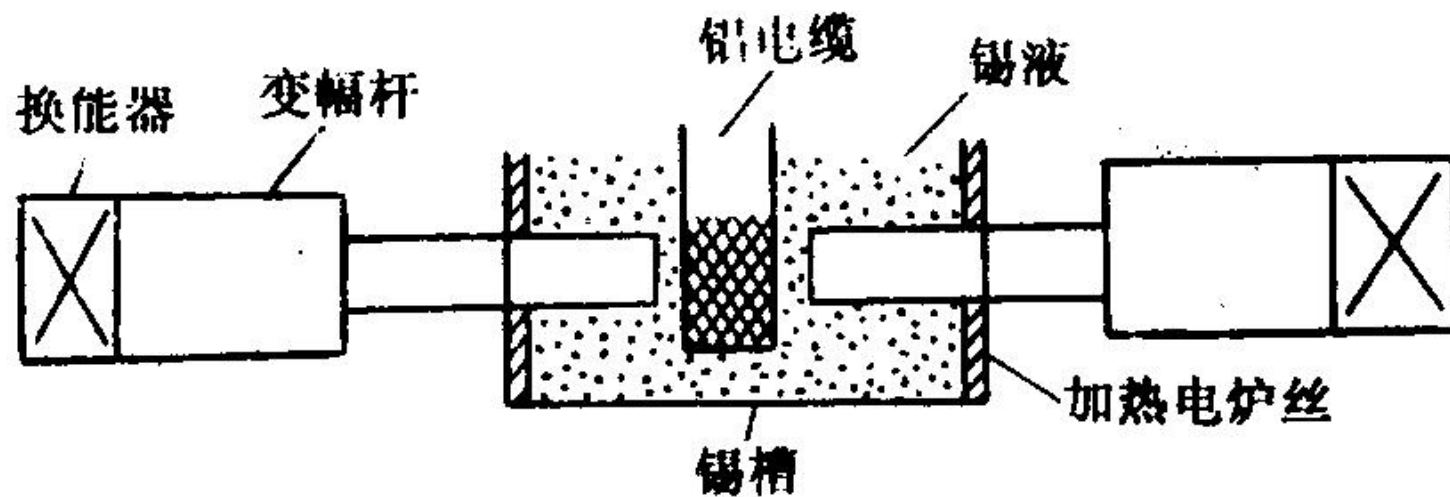
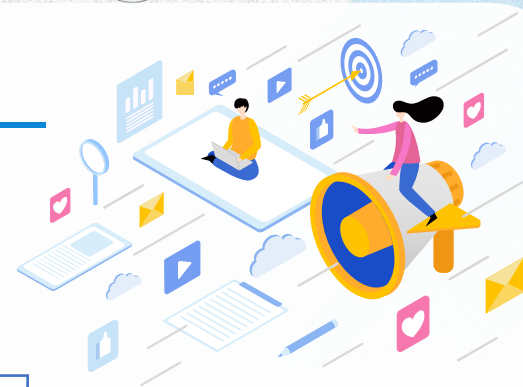
1 超声检测的基础知识

超声金属焊接



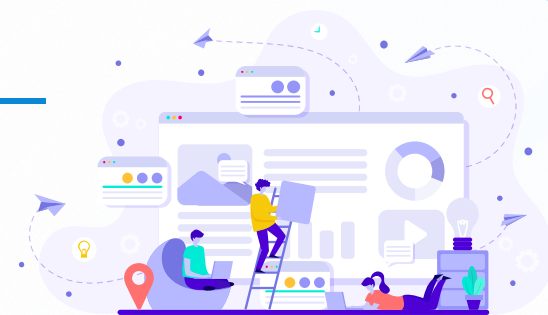
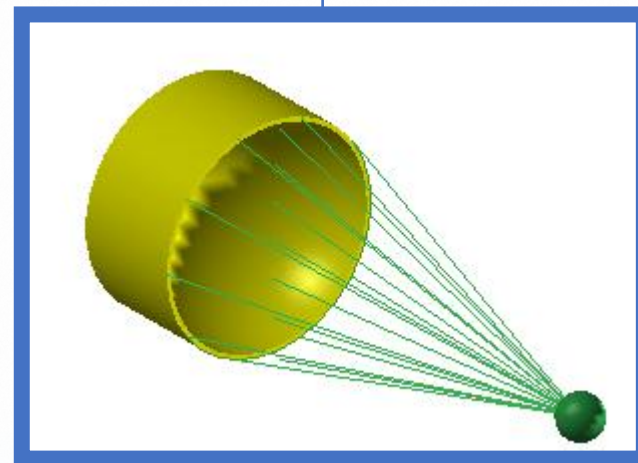
1 超声检测的基础知识

超声搪锡



1 超声检测的基础知识

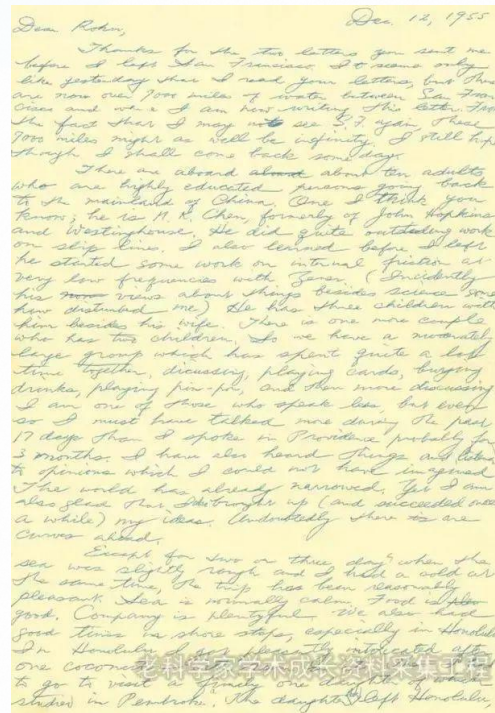
超声聚焦刀



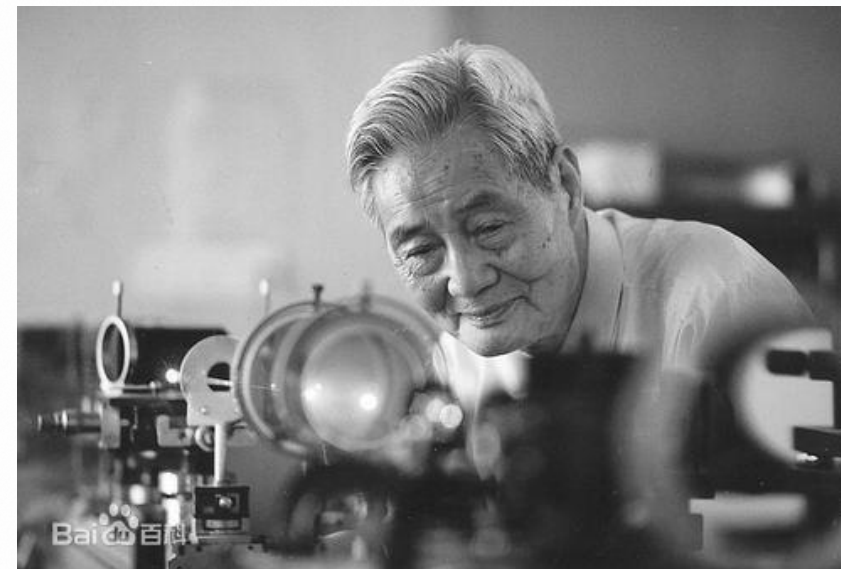
1 超声检测的基础知识



中国科学院院士
应崇福



著名物理学家
超声学研究奠基人
声学领域著名教育家



中国超声学研究和检测超声等诸多超声应用的开创者

1 超声检测的基础知识

二. 描述超声波的基本物理量

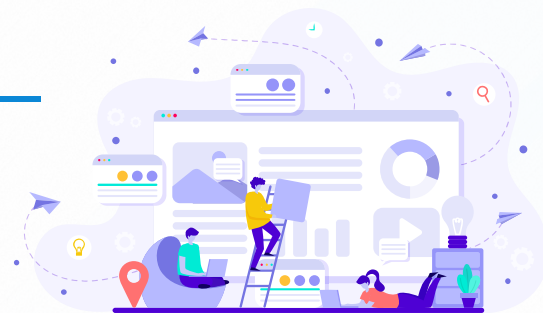
超声波的产生依赖于做高频机械振动的“声源”和传播机械振动的弹性介质，所以**机械振动和波动是超声检测的物理基础**。描述超声波波动特性的基本物理量有：声速 c 、频率 f 、波长 λ 、周期 T 、角频率 ω 。其中频率和周期是由波源决定的，声速与传声介质的特性和波型有关。这些量之间的关系如下：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{c}$$



1 超声检测的基础知识

三. 超声波的特点



超声波波长很短，这决定了超声波具有一些重要特性，使其能广泛应用于无损检测。

- 1) 方向性好 超声波具有像光波一样定向束射的特性。
- 2) 穿透能力强 对于大多数介质而言，它具有较强的穿透能力。例如在一些金属材料中，其穿透能力可达数米。
- 3) 能量高 超声检测的工作频率远高于声波的频率，超声波的能量远大于声波的能量。
- 4) 遇有界面时，将产生反射、折射和波型的转换。利用超声波在介质中传播时这些物理现象，经过巧妙的设计，使超声检测工作的灵活性、精确度得以大幅度提高。

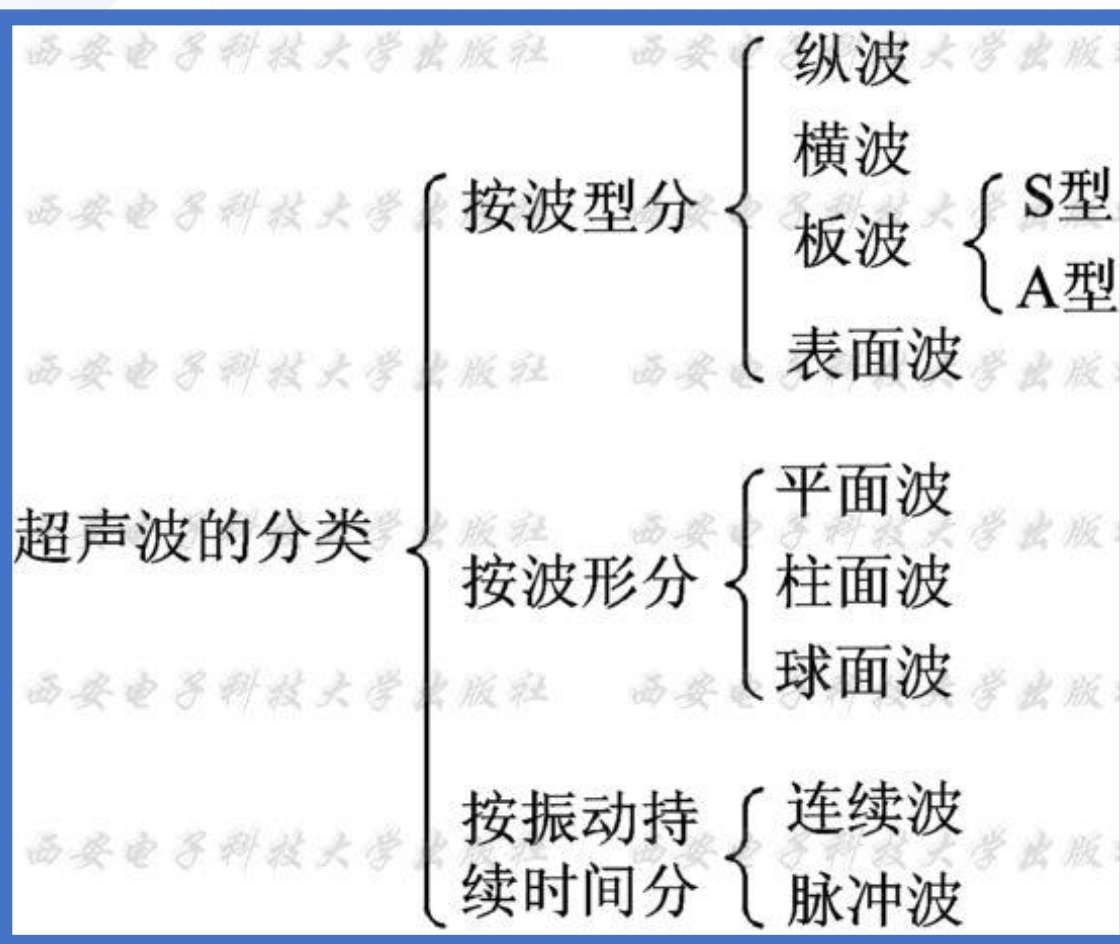
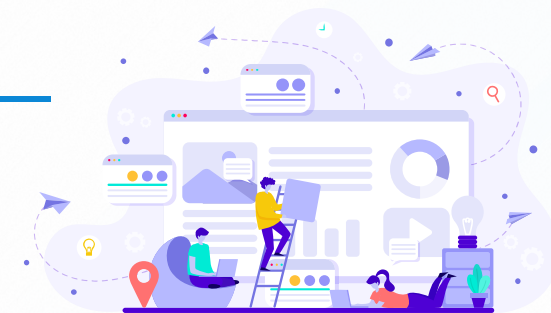
1 超声检测的基础知识

四. 超声波的分类

超声波的分类方法很多，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。



1 超声检测的基础知识



1 超声检测的基础知识

1. 超声波的波型

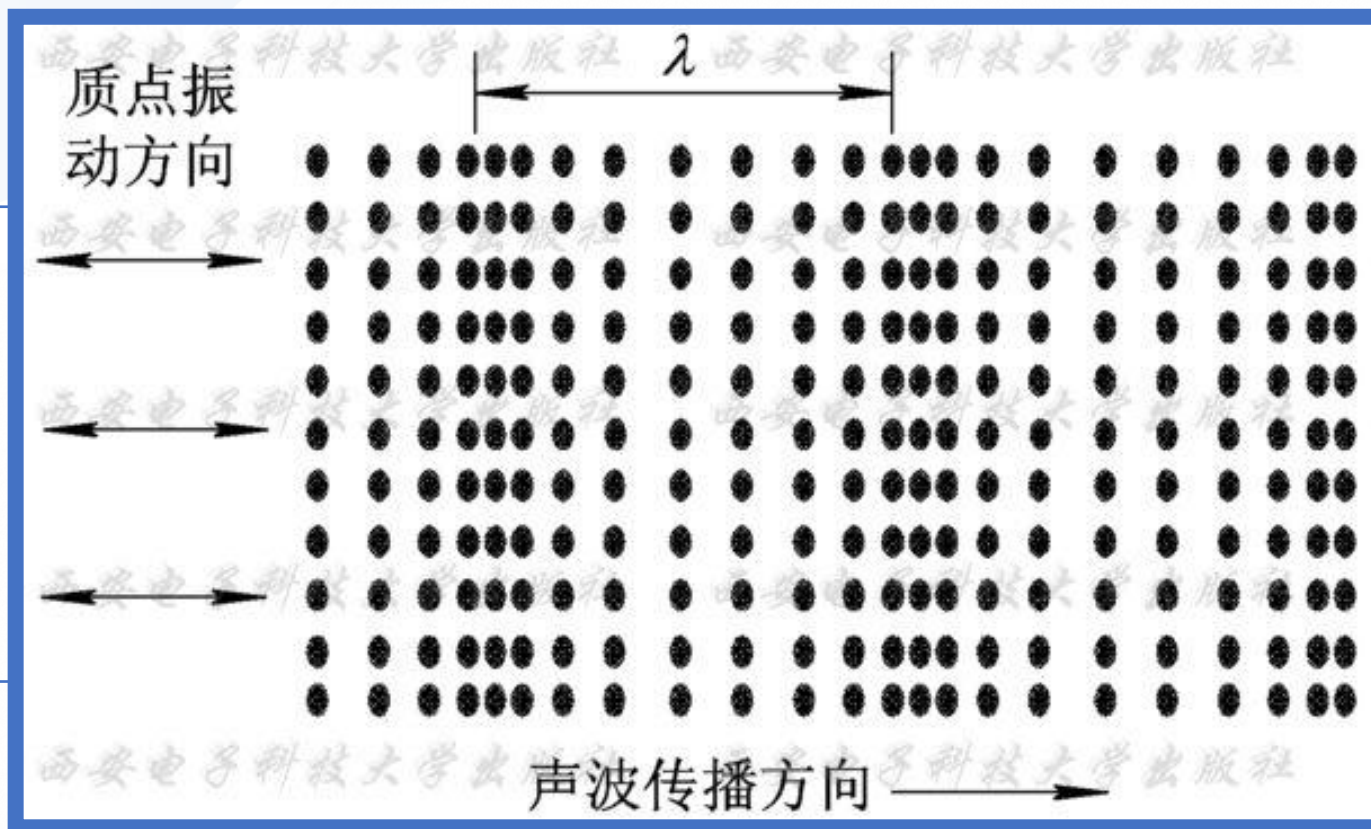
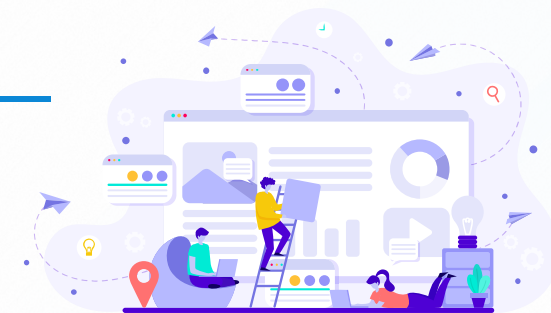


超声波的波型指的是介质质点的振动方向与波的传播方向的关系。按波型可分为纵波、横波、表面波和板波等。

01 纵波

介质中质点的振动方向与波的传播方向相同的波叫纵波，用L表示。介质质点在交变拉压应力的作用下，质点之间产生相应的伸缩变形，从而形成了纵波。纵波传播时，介质的质点疏密相间，所以纵波有时又称为压缩波或疏密波。

1 超声检测的基础知识



纵波

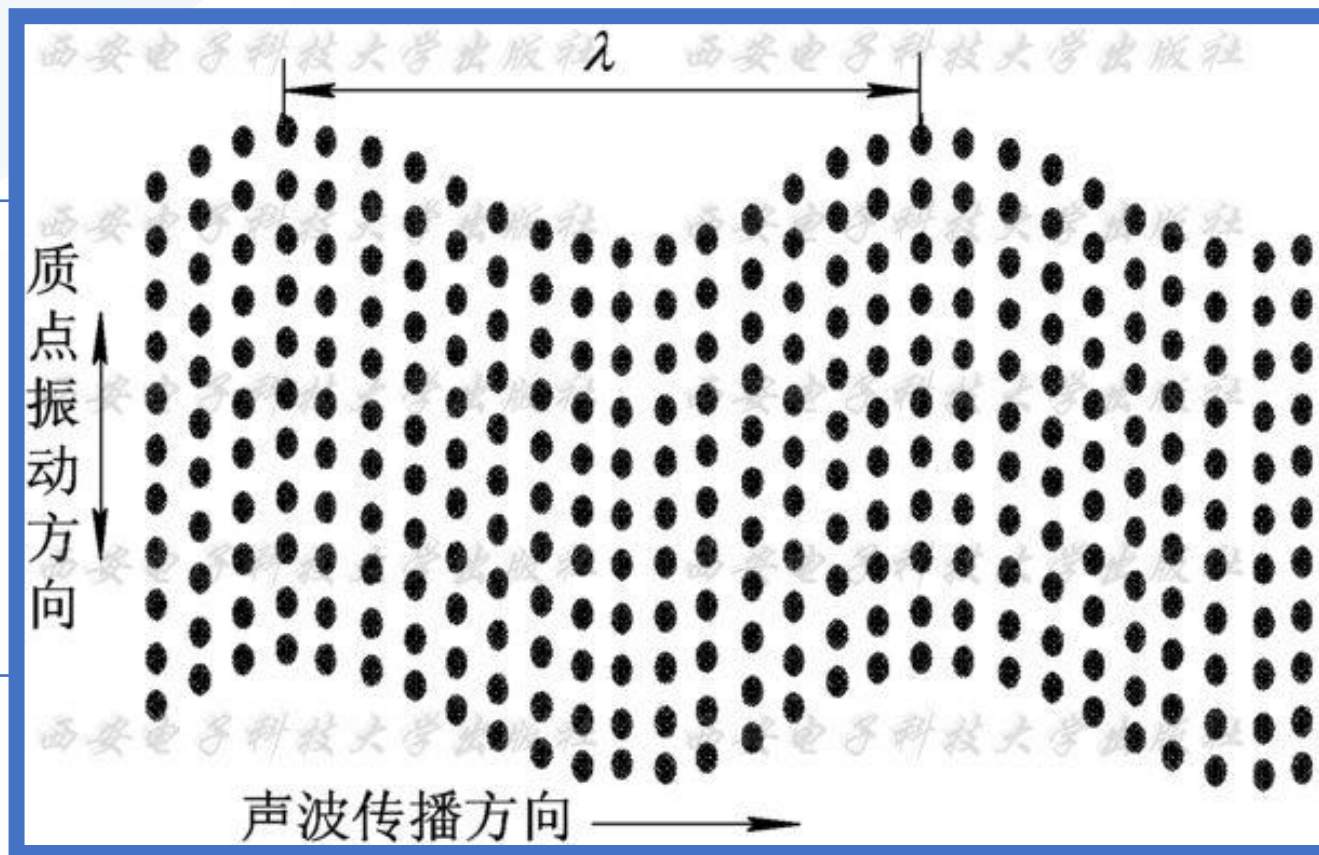
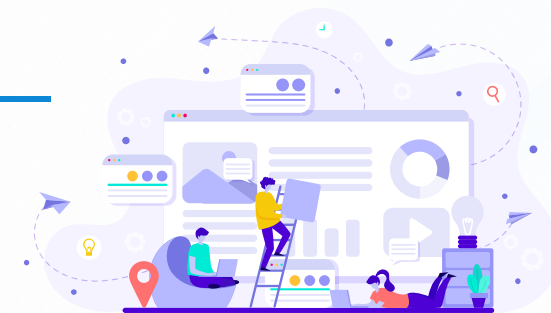
1 超声检测的基础知识

02 横波

介质中质点的振动方向垂直于波的传播方向的波叫横波，用S或T表示。横波的形成是由于介质质点受到交变切应力作用时，产生了切变形变，所以横波又叫做切变波。液体和气体介质不能承受切应力，只有固体介质能够承受切应力，因而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。



1 超声检测的基础知识



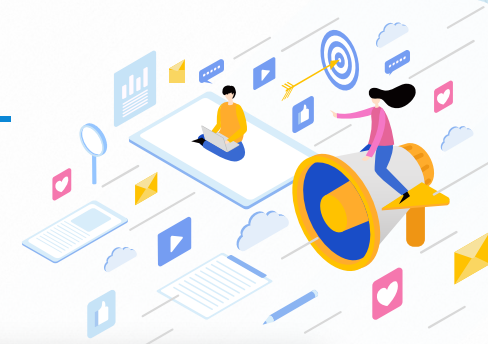
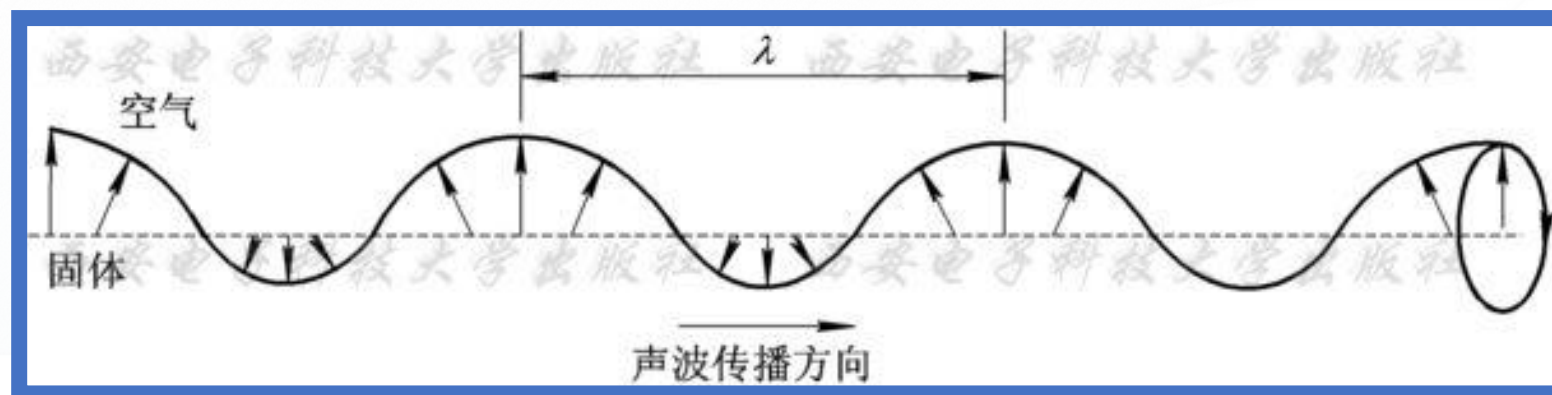
横波

1 超声检测的基础知识

03 表面波（瑞利波）

当超声波在固体介质中传播时，对于有限介质而言，有一种沿介质表面传播的波即表面波。瑞利首先对这种波给予了理论上的说明，因此表面波又称为瑞利波，常用R表示。

表面波



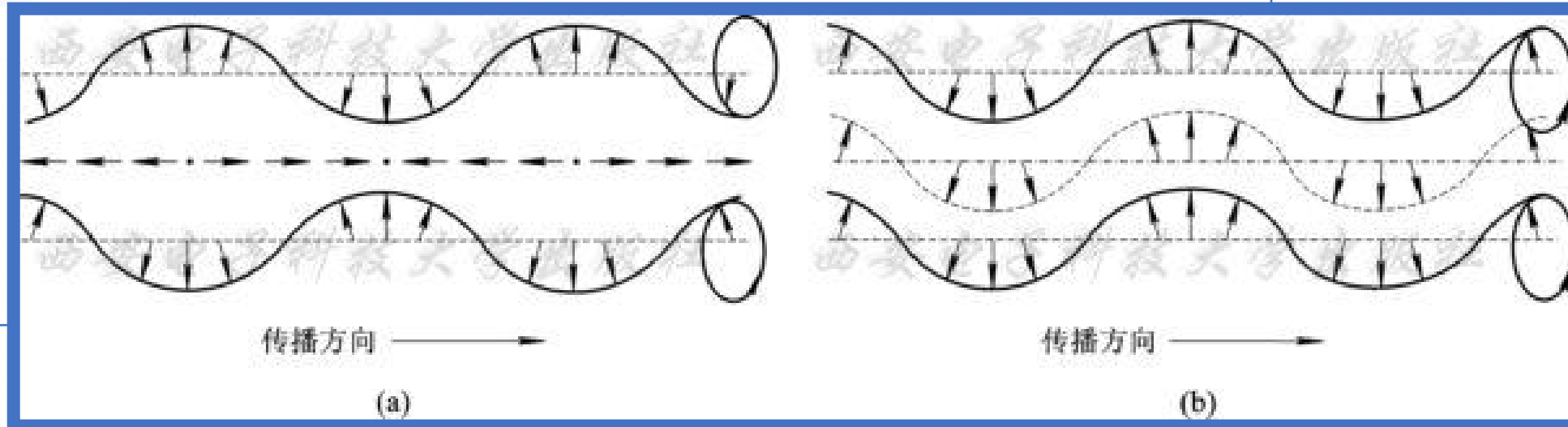
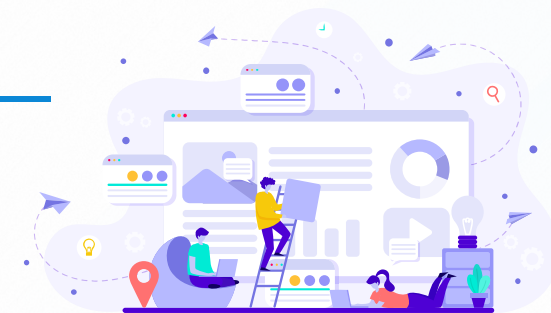
1 超声检测的基础知识

04 板波（兰姆波）



在板厚和波长相当的弹性薄板中传播的超声波叫板波(或兰姆波)。板波传播时声场遍及整个板的厚度。薄板两表面质点的振动为纵波和横波的组合，质点振动的轨迹为一椭圆，在薄板的中间也有超声波传播。板波按其传播方式又可分为对称型（S型）和非对称型（A型）两种，这是由质点相对于板的中间层作对称型还是非对称型运动来决定的。

1 超声检测的基础知识



(a) 对称型;

板波

(b) 非对称型

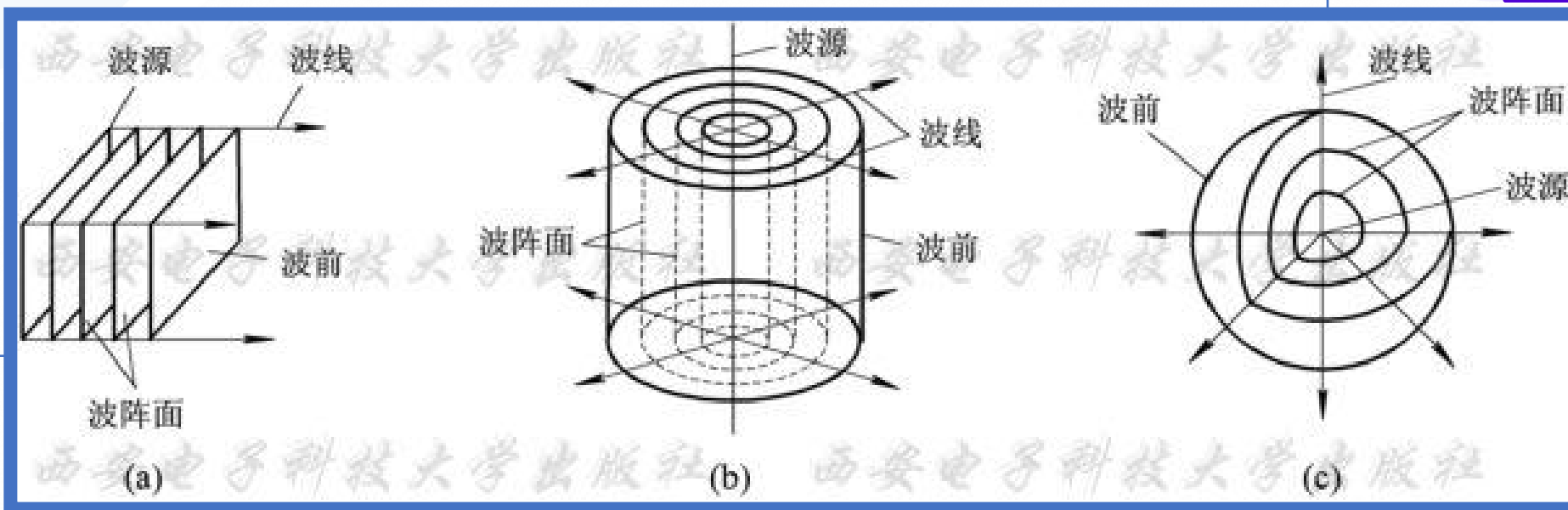
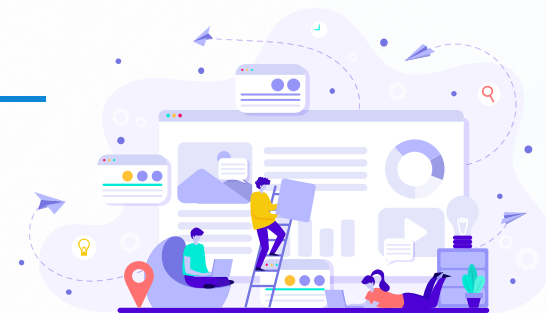
1 超声检测的基础知识

2. 超声波的波形

超声波由声源向周围传播的过程可用波阵面进行描述。在无限大且各向同性的介质中，振动向各方向传播，用波线表示传播的方向；将同一时刻介质中振动相位相同的所有质点所连成的面称为波阵面；某一时刻振动传播到达的距声源最远的各点所连成的面称为波前。在各向同性介质中波线垂直于波阵面。在任何时刻，波前总是距声源最远的一个波阵面。波前只有一个，而波阵面可以有任意多个。



1 超声检测的基础知识



波线、波前与波阵面

(a) 平面波;

(b) 柱面波;

(c) 球面波

1 超声检测的基础知识

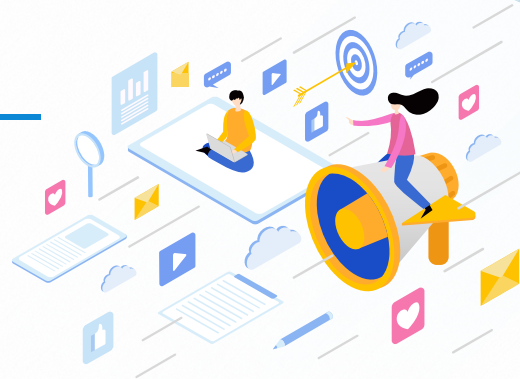
根据波阵面的形状(波形), 可将超声波分为平面波、柱面波和球面波等。

平面波即波阵面为平面的波, 而柱面波的波阵面为同轴圆柱面, 球面波的波阵面为同心球面, 如图所示。当声源是一个点时, 在各向同性介质中的波阵面为以声源为中心的球面。可以证明, 球面波中质点的振动幅度与距声源的距离成反比。当声源的尺寸远小于测量点距声源的距离时, 可以把超声波看成是球面波。球面波的波动方程为

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

1 超声检测的基础知识

3. 连续波与脉冲波



连续波是介质中各质点振动时间为无穷时的波。脉冲波是质点振动时间很短的波，超声检测中最常用的是脉冲波。对脉冲波进行频谱分析，可知它并非单一频率，而是包括多种频率成分。其中人们关心的频谱特征量主要有峰值频率、频带宽度和中心频率。

2 超声场及介质的声参量简介

一. 超声场的物理量



01 声压

当介质中有超声波传播时，由于介质质点振动，使介质中压强交替变化。超声场中某一点在某一瞬时所具有的压强 P_1 与没有超声波存在时同一点的静态压强 P_0 之差称为该点的声压，用 P 表示，即

$$P = P_1 - P_0 \quad (\text{Pa})$$

2 超声场及介质的声参量简介

对于平面余弦波，可以证明：

$$P = P_m \sin \omega(t - \frac{x}{c}) = \rho c V_m \sin \omega(t - \frac{x}{c}) = \rho c A \omega \sin \omega(t - \frac{x}{c}) = \rho c V$$

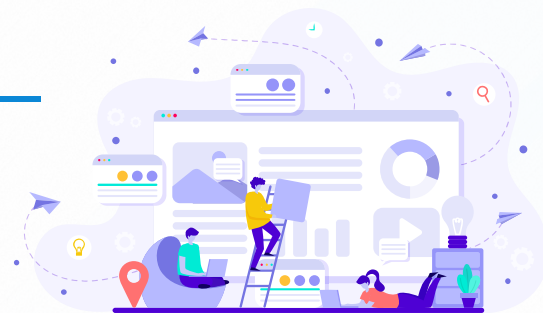
式中： ρ 为介质的密度； c 为介质中的声速； ω 为介质质点的振幅； V 为介质质点振动的角频率； $V_m = A\omega$ 为质点振动速度的幅值； t 为时间； x 为质点距声源的距离； $P_m = \rho c A \omega$ 为声压幅值。

由上式可知：超声场中某一点的声压幅值 P_m 与角频率成正比，也就与频率成正比。由于超声波的频率很高，远大于声波的频率，故超声波的声压一般也远大于声波的声压。



2 超声场及介质的声参量简介

02 声强



单位时间内垂直通过单位面积的声能，称为声强，用 I 表示。对于平面纵波，其声强 I 为

$$I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} Z V_m^2 = \frac{1}{2} \frac{P_m^2}{Z}$$

由上式可知，超声场中，声强与角频率平方成正比。由于超声波的频率很高，故超声波的声强很大，这是超声波能用于探伤的重要依据。

2 超声场及介质的声参量简介

03 分贝的概念



实际探伤中，将声强 I_1 与 I_2 之比取对数的10倍得到二者相差的数量级，这时单位为分贝，用dB表示，即

$$\Delta = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{dB})$$

$$\text{有} \quad \Delta = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 20 \lg \frac{P_{m1}}{P_{m2}}$$

式中： P_{m1} 、 P_{m2} 分别为声强 I_1 、 I_2 对应的声压幅值。

2 超声场及介质的声参量简介



对于线性良好的超声波探伤仪，示波屏上波高与声压成正比，即任意两波高 H_1 、 H_2 之比等于相应的声压 P_{m1} 、 P_{m2} 之比，即

$$\Delta = 20 \lg \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = 20 \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (\text{dB})$$

2 超声场及介质的声参量简介

二. 介质的声参量

1. 声速

声速表示声波在介质中传播的速度，它与超声波的波型有关，但更依赖于传声介质自身的特性。因此，声速又是一个表征介质声学特性的参量。了解受检材料的声速，对于缺陷的定位和定量分析都有重要的意义。

声速又可分为相速度和群速度。相速度是指声波传播到介质的某一选定相位点时在传播方向上的声速。群速度是指传播声波的包络上具有某种特征（如幅值最大）的点上沿传播方向上的声速。群速度是波群的能量传播速度。



2 超声场及介质的声参量简介

01 纵波、横波和表面波的声速

纵波、横波和表面波的声速主要是由介质的弹性性质、密度和泊松比决定的，而与频率无关，即它们各自的相速度和群速度相同，因此一般说到它们的声速都是指相速度。不同材料声速值有较大的差异。在给定的材料中，频率越高，波长越短。

同一固体介质中，纵波声速 c_l 大于横波声速 c_s ，横波声速 c_s 又大于瑞利波声速 c_r 。对于钢材， $c_l \approx 1.8c_s$ ， $c_s \approx 1.1c_r$ 。

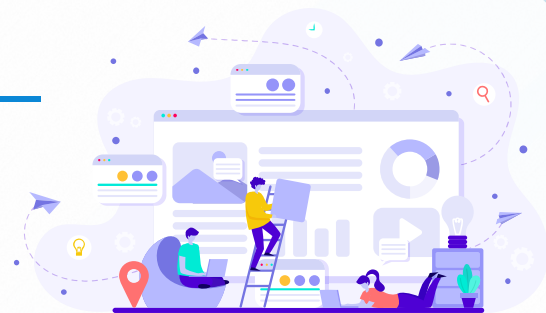
02 板波的声速

板波的声速与其他波型不同，其相速度随频率变化而变化。相速度随频率变化而变化的现象被称为频散。



2 超声场及介质的声参量简介

2. 声阻抗



介质中某一点的声压幅值 P_m 与该处质点振动速度幅值 V_m 之比，称为声阻抗，常用 Z 表示。在同一声压下，声阻抗 Z 愈大，质点的振动速度就愈小。声阻抗表示超声场中介质对质点振动的阻碍作用。

$$Z = \frac{P_m}{V_m} = \rho c$$

2 超声场及介质的声参量简介

3. 声衰减系数



超声波的衰减指的是超声波在材料中传播时，声压或声能随距离的增大逐渐减小的现象。引起衰减的原因主要有三个方面：一是声束的扩散；二是由于材料中的晶粒或其他微小颗粒引起声波的散射；三是介质的吸收。

在超声检测中，谈到超声波在材料中的衰减时，通常关心的是散射衰减和吸收衰减，而不包括扩散衰减。对于平面波来说，声压幅值衰减规律可用下式表示：

$$p = p_0 e^{-\alpha x}$$

2 超声场及介质的声参量简介

介质中超声波的衰减系数 α 与超声波的频率关系密切，通常情况下，衰减系数随频率的增高而增大。

将上式两边取对数可转换为以下关系式：

$$\alpha = \frac{1}{x} 20 \lg \frac{p_0}{p} \quad (\text{dB/mm})$$

此时 α 的单位为dB / mm(分贝 / 毫米)。

在超声检测中，直接可测量的量是两个声压比值的分贝数。因此衰减系数可通过超声波穿过一定厚度（ Δx ）材料后声压衰减的分贝（ ΔdB ）数进行测量，将衰减量（ ΔdB ）除以厚度即为衰减系数 α 。



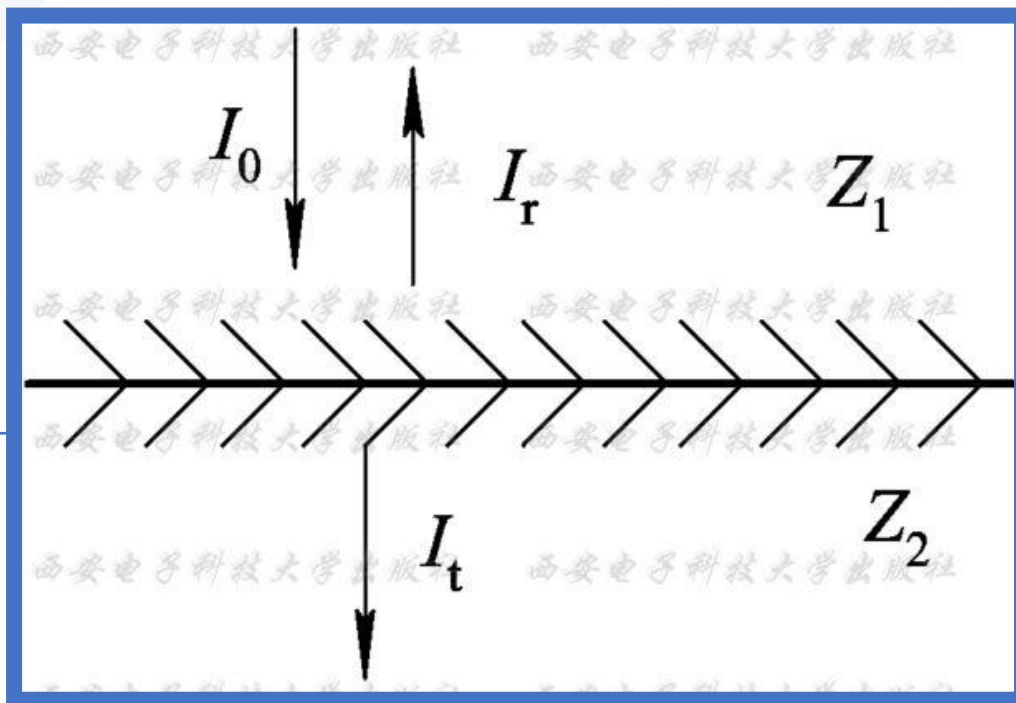
3 超声波在介质中的传播特性



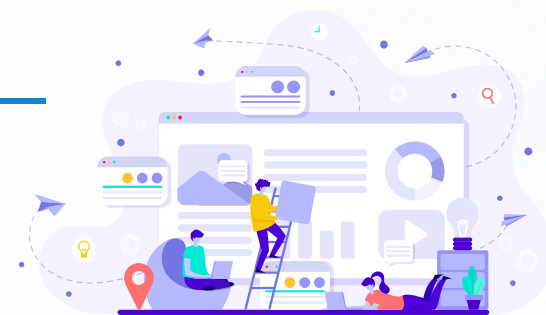
一. 超声波垂直入射到平界面上的反射和透射

当超声波垂直入射到两种介质的界面时，一部分能量透过界面进入第二种介质，成为透射波(声强为 I_t)，波的传播方向不变；另一部分能量则被界面反射回来，沿与入射波相反的方向传播，成为反射波(声强为 I_r)。声波的这一性质是超声波检测缺陷的物理基础。

3 超声波在介质中的传播特性



超声波垂直入射于平界面的反射与透射



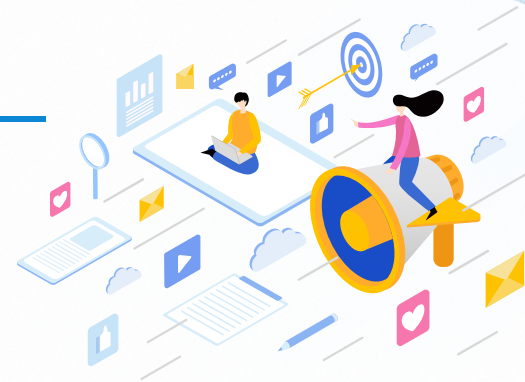
3 超声波在介质中的传播特性

通常将反射波声压 P_r 与入射波声压 P_0 的比值称为声压反射率 r ，将透射波声压 P_t 和 P_0 的比值称为声压透射率 t 。可以证明， r 和 t 的数学表达式为：

$$r = \frac{p_r}{p_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

式中： Z_1 为第一种介质的声阻抗； Z_2 为第二种介质的声阻抗。



3 超声波在介质中的传播特性

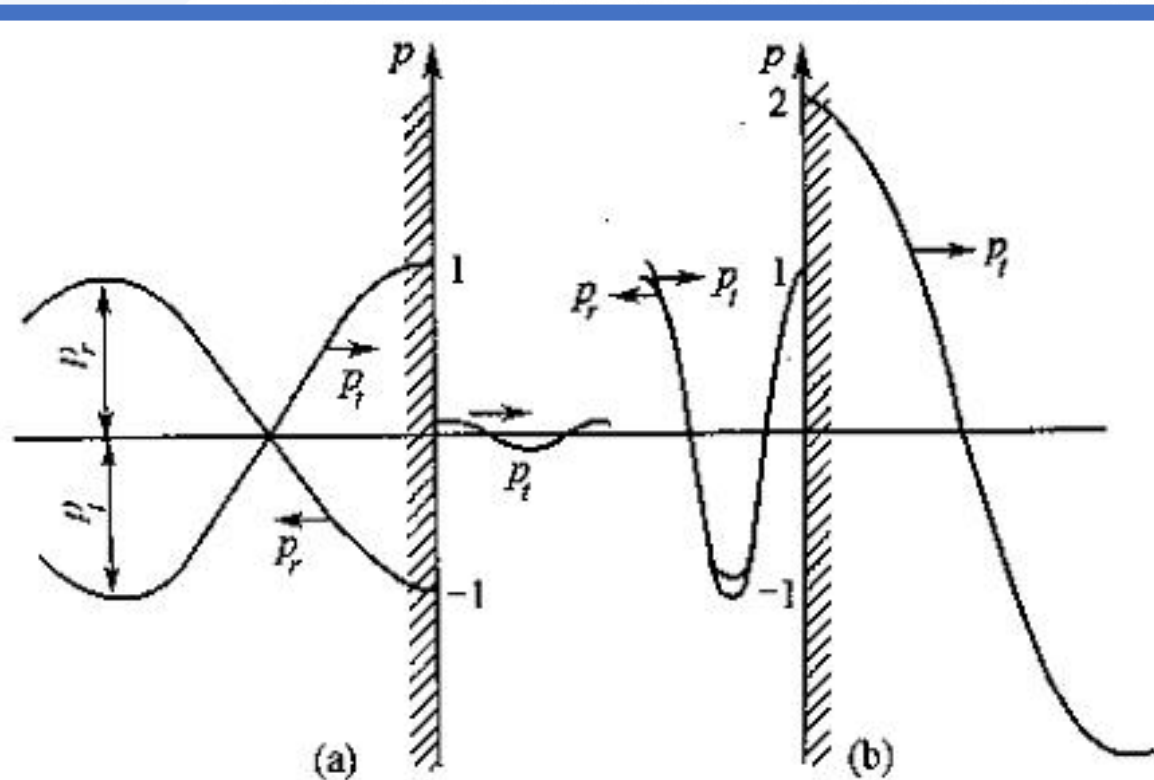
为了研究反射波和透射波的能量关系，引入声强反射率 R 和声强透射率 T 两个量。 R 为反射波声强(I_r)和入射波声强(I_0)之比； T 为透射波声强(I_t)和入射波声强(I_0)之比。

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

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



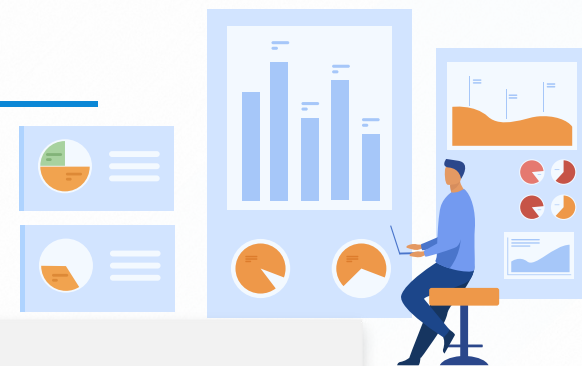
3 超声波在介质中的传播特性



声波在水-钢界面上的反射和透射声压值
(a) 钢-水入射; (b) 水-钢入射。



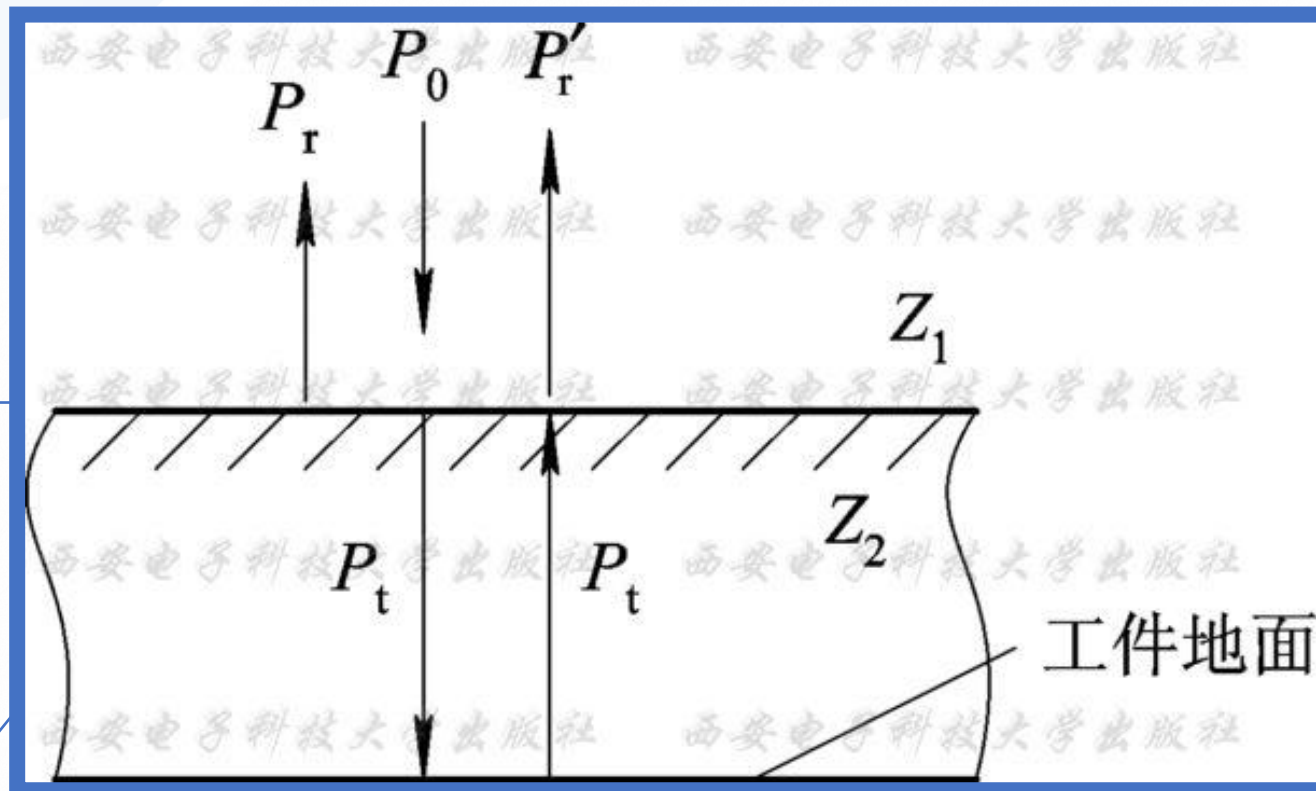
3 超声波在介质中的传播特性



对于脉冲反射技术来说，还有一个有意义的量是声压往返透过率，如图所示。通常入射声压经过两种介质的界面透射到试件中后，均需经过相反的路径（假设在工件底面的反射为全反射）再次穿过界面到第一介质中才被探头所接收。两次穿透界面时透射率的大小，决定着接收信号的强弱。因此，将声压沿相反方向两次穿过界面时总的透射率称为声压往返透过率(t_p)，其数值等于两次穿透界面的透射率的乘积

$$t_p = t_1 \cdot t_2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

3 超声波在介质中的传播特性

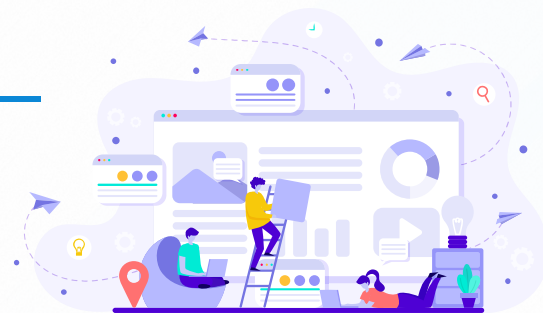


声压往返透过率



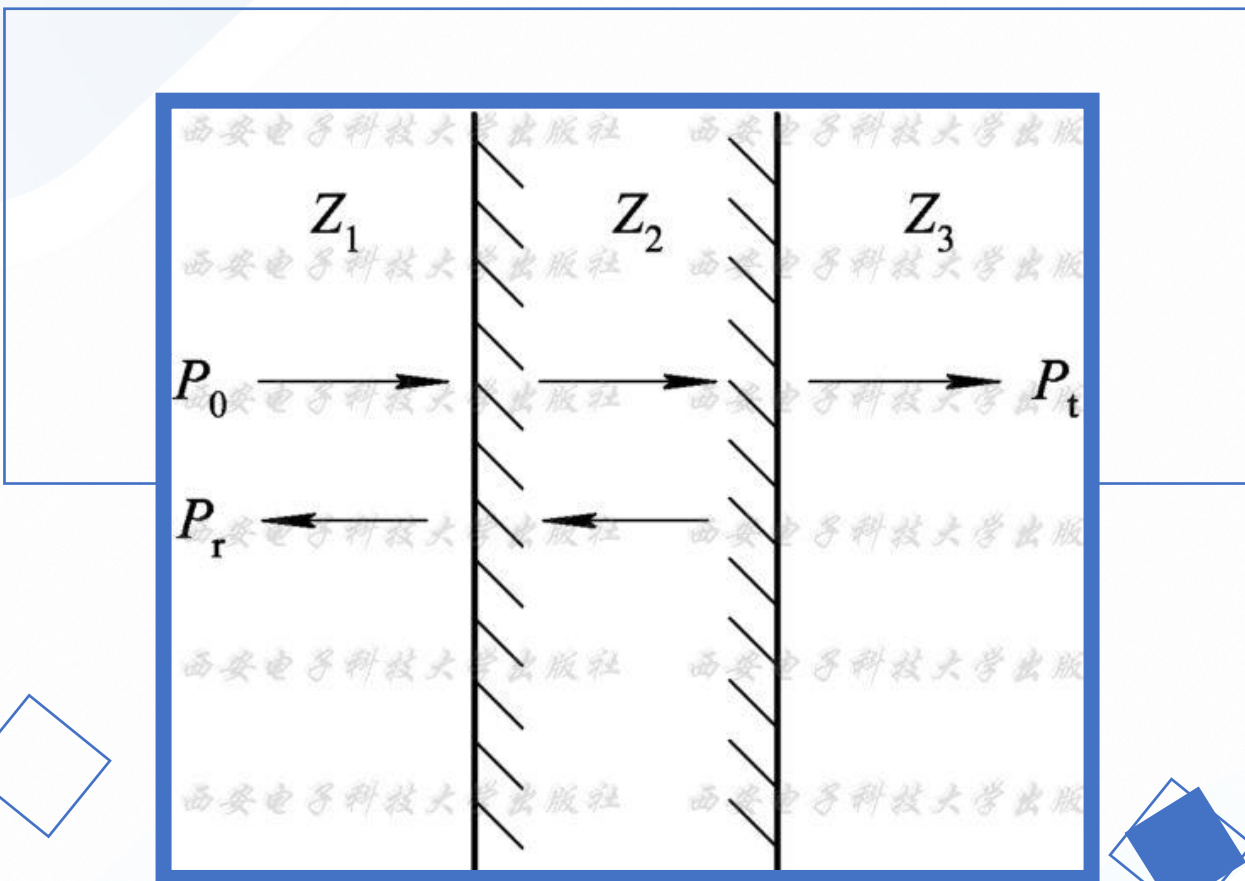
3 超声波在介质中的传播特性

二. 超声波垂直入射到薄层界面上时的反射和透射



在超声检测中经常遇到超声波进入第二种介质后，穿过第二种介质再进入第三种介质的情况。当超声波从介质1（声阻抗为 Z_1 ）中垂直入射到介质1和介质2（声阻抗为 Z_2 ）的界面上时，一部分声能被反射，另一部分透射到介质2中；当透射的声波到达介质2和介质3（声阻抗为 Z_3 ）的界面时，再次发生反射与透射，其反射波部分在介质2中传播至介质2与介质1的界面，则又会发生同样的过程。如此不断地继续下去，则在两个界面的两侧，产生一系列的反射波与透射波。

3 超声波在介质中的传播特性



在两个界面上的反射和透射



3 超声波在介质中的传播特性

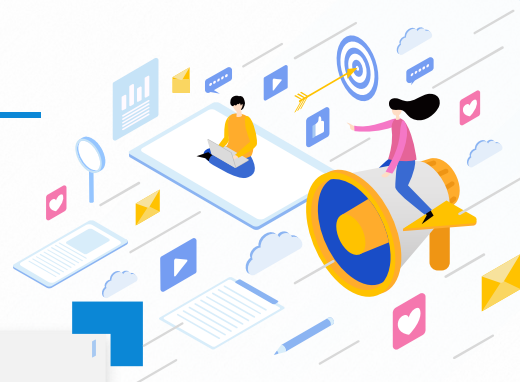
当 $Z_1 = Z_3$ 时

$$r = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \left(\sin \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} \right)^2}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \left(\sin \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} \right)^2}}$$
$$t = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \left(\sin \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} \right)^2}}$$

其中: $m = \frac{Z_1}{Z_2}$



3 超声波在介质中的传播特性



$$d_2 = n \cdot \frac{\lambda_2}{2}, \quad r \approx 0, \quad t \approx 1。$$

$$d_2 = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda_2}{4}, \quad r \text{最大}, \quad t \rightarrow 0。$$

$$d_2 < \frac{\lambda_2}{4}, \quad d_2 \downarrow, \quad r \downarrow, \quad t \uparrow。$$

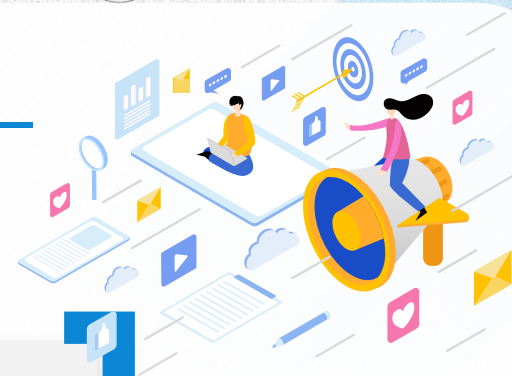
3 超声波在介质中的传播特性



当 $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ 时

$$t_p = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} + \left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2 \left(\sin \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}\right)^2}$$

3 超声波在介质中的传播特性



$$d_2 = n \cdot \frac{\lambda_2}{2}, \quad t_p = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2}。$$

$$d_2 = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda_2}{4}, \quad \text{且 } Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3}, \quad t_p = 1。$$

$$d_2 < \frac{\lambda_2}{4}, \quad d_2 \downarrow, \quad t_p \uparrow。$$

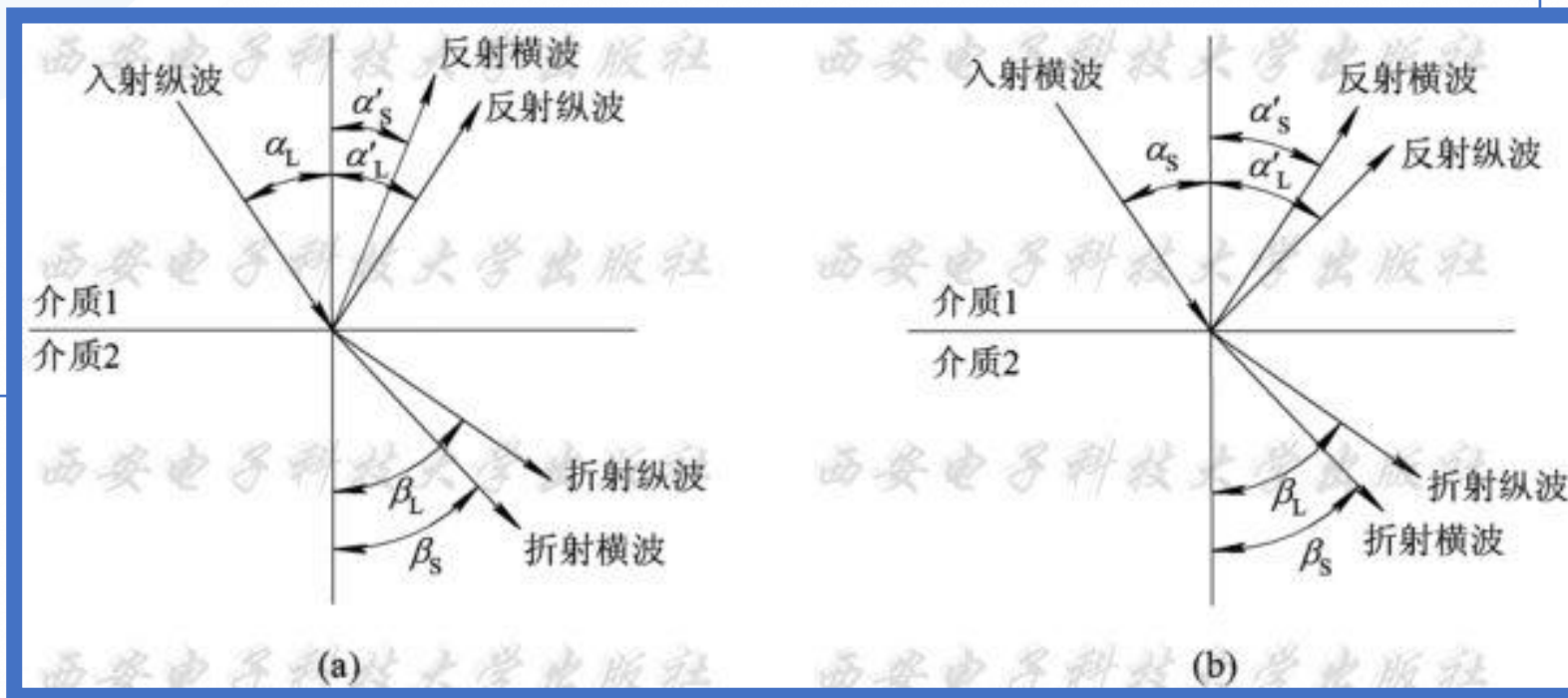
3 超声波在介质中的传播特性

三. 超声波倾斜入射到平界面上的反射、折射和波型变换

当超声波相对于界面入射点法线以一定的角度倾斜入射到两种不同介质的界面上时，在界面上会产生反射、折射和波型转换现象。入射声波与入射点法线之间的夹角称为入射角。



3 超声波在介质中的传播特性



超声波倾斜入射到平界面上的反射、折射和波型变换

(a) 纵波入射;

(b) 横波入射

3 超声波在介质中的传播特性

1. 反射

如图所示，当纵波以入射角 α_L 倾斜入射到异质界面上时，将会在介质1中于入射点法线的另一侧产生与法线成一定夹角 α_L' 的反射纵波。反射波与入射点法线之间的夹角称为反射角。入射纵波与反射纵波之间的关系符合几何光学的反射定律，即 $\alpha_L = \alpha_L'$ 。

与光的反射不同的是，当介质1为固体时，界面上既产生反射纵波，同时又发生波型转换并产生反射横波，即反射后同时产生纵波与横波两种波型。这时，横波反射角 α_s' 与纵波入射角之间的关系与光学中的斯奈尔定律相同，为

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_s'}{c_{S1}}$$



3 超声波在介质中的传播特性



若入射声波为横波，也会产生同样的现象，见图 (b)，这时横波入射角 α_s 与横波反射角 α_s' 相等。介质1为固体时纵波反射角与横波入射角之间的关系为

$$\frac{\sin \alpha_s}{c_{s1}} = \frac{\sin \alpha'_L}{c_{L1}}$$

由于固体中纵波声速总是大于横波声速，因此，无论是纵波入射还是横波入射，均有 $\alpha'_L > \alpha'_s$ 。当介质1为液体或气体时，则入射波和反射波只能为纵波。

3 超声波在介质中的传播特性

2. 折射



当两种介质声速不同时，透射部分的声波会发生传播方向的改变，称为折射。

不论是纵波入射还是横波入射，只要介质2为固体，则介质2中除有与入射波相同波型的折射波外，均可因在界面发生波型转换而产生与入射波不同波型的折射波。

这时，介质2中可能同时存在纵波与横波。折射角与入射角之间的关系符合斯奈尔定律。

折射角相对于入射角的大小和折射波声速与入射波声速的比率有关。同时，由于纵波声速总是大于横波声速，因此纵波折射角 β_L 要大于横波折射角 β_S 。

3 超声波在介质中的传播特性

3. 临界角

当第二种介质中的折射波型的声速比第一种介质中入射波型的声速大时，折射角大于入射角。此时，存在一个临界入射角，在这个角度下，折射角等于 90° 。大于这一角度时，第二种介质中不再有相应波型的折射波。

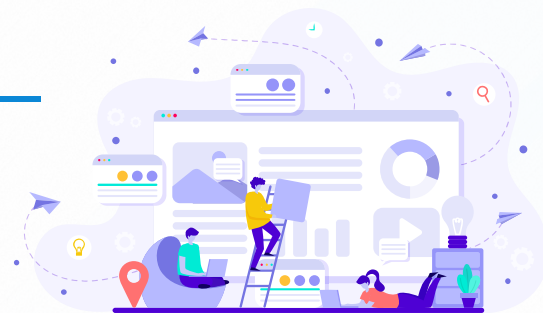
01 第一临界角

当入射波为纵波，且 $c_{L2} > c_{L1}$ 时，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。



3 超声波在介质中的传播特性

02 第二临界角



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。

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。

3 超声波在介质中的传播特性



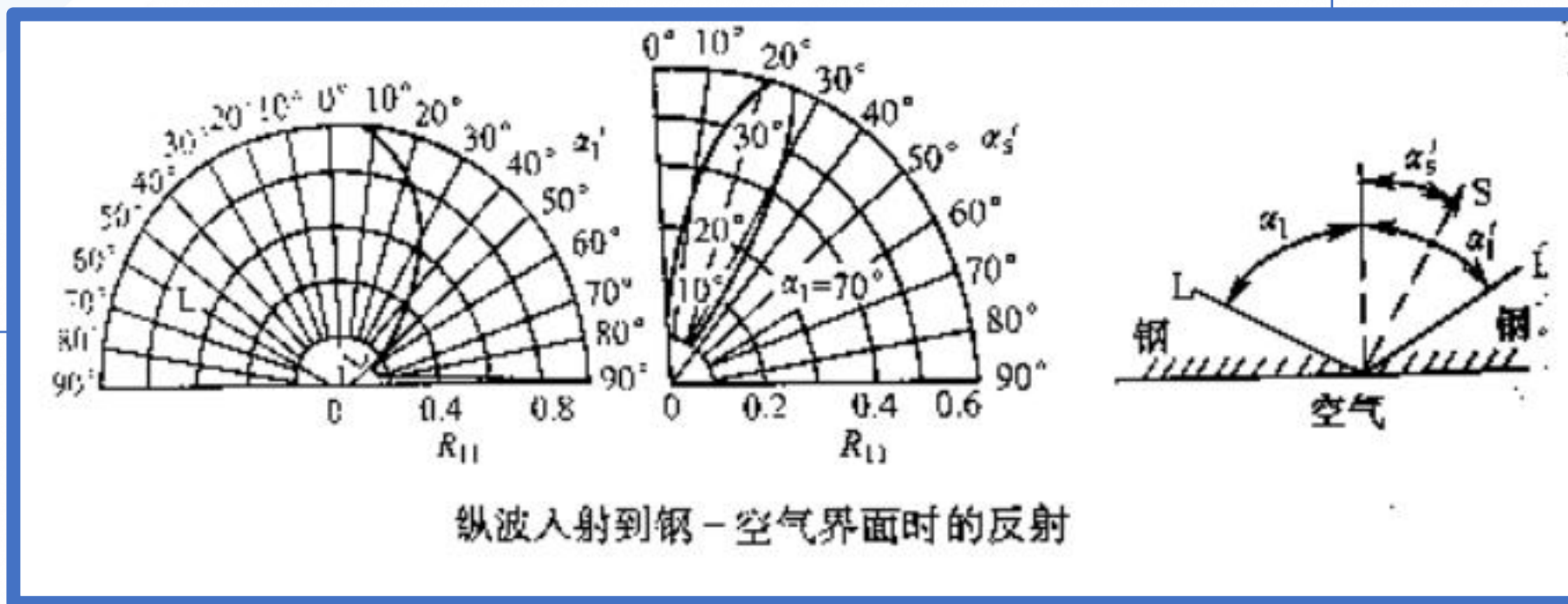
03 第三临界角

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 α_{III} 表示。

04 斜入射时的声压反射率和透射率

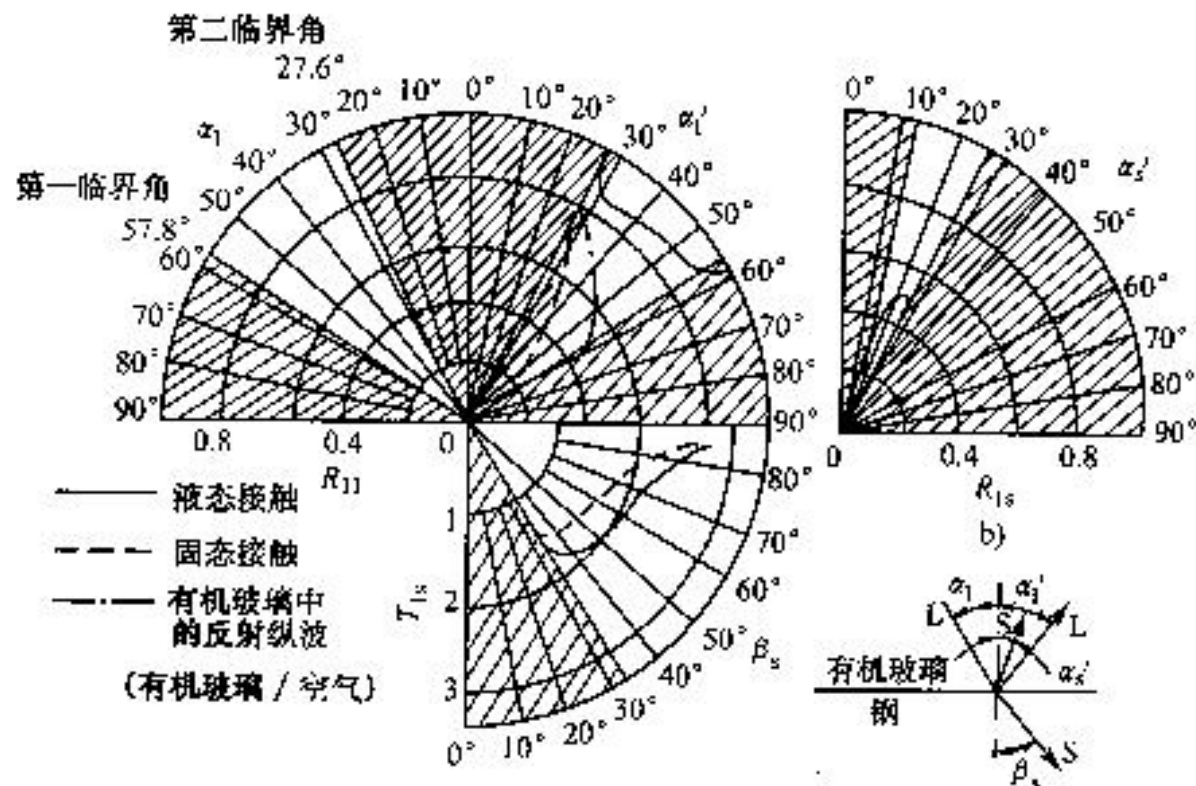
斜入射时反射波和透射波的声压关系较为复杂。但在超声检测中，关心的是斜入射的反射率和透射率随入射角度的变化。对脉冲反射法，更关心的是声压往返透过率随入射角度的变化。

3 超声波在介质中的传播特性



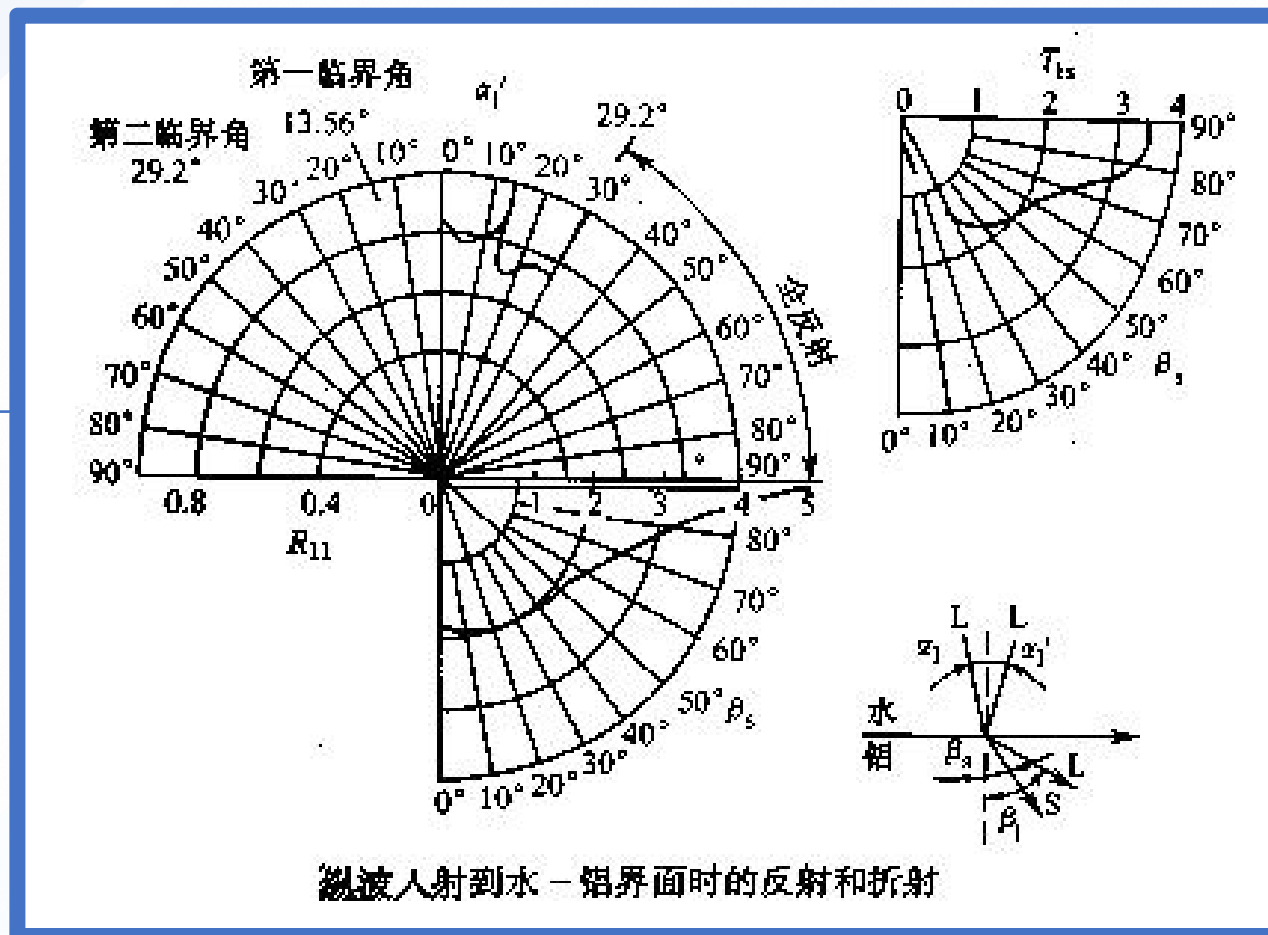
纵波入射到钢-空气界面时的反射

3 超声波在介质中的传播特性



纵波入射到有机玻璃-钢界面时的反射和折射

3 超声波在介质中的传播特性



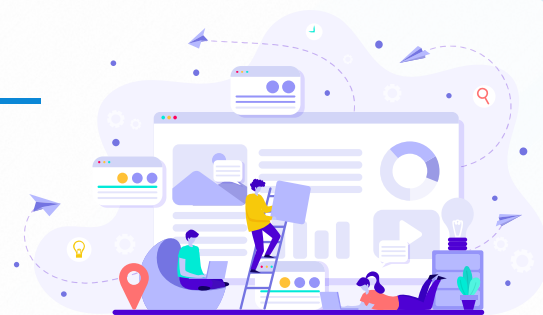
3 超声波在介质中的传播特性

四. 超声波入射到曲界面上的反射和透射

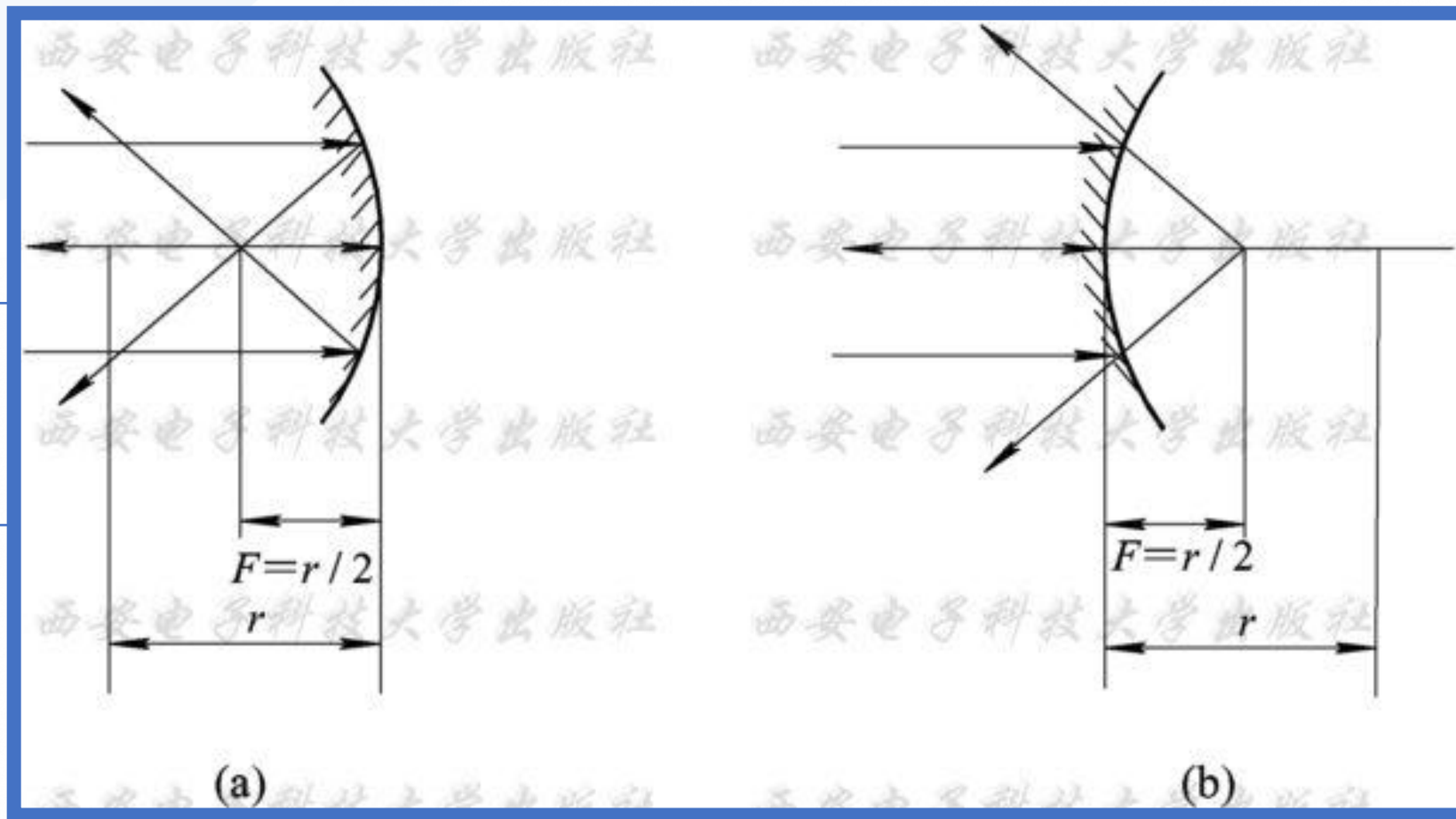
1. 平面波入射到曲界面上的反射

平面波入射到曲界面上时的情况如图所示。平面波束与曲面上各入射点的法线成不同的夹角：入射角为 0° 的声线沿原方向返回，称为声轴；其余声线的反射角则随着距声轴距离的增大而增大。当曲面是球面时，反射线或其延长线汇聚于一个焦点上；反射面为圆柱面时，反射线或其延长线汇聚于一条焦线上。此时，焦距 F 与曲面曲率半径 r 的关系为

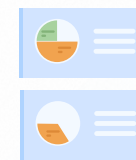
$$F = \frac{r}{2}$$



3 超声波在介质中的传播特性



平面波入射至曲面时的反射



3 超声波在介质中的传播特性

2. 平面波在曲面上的折射

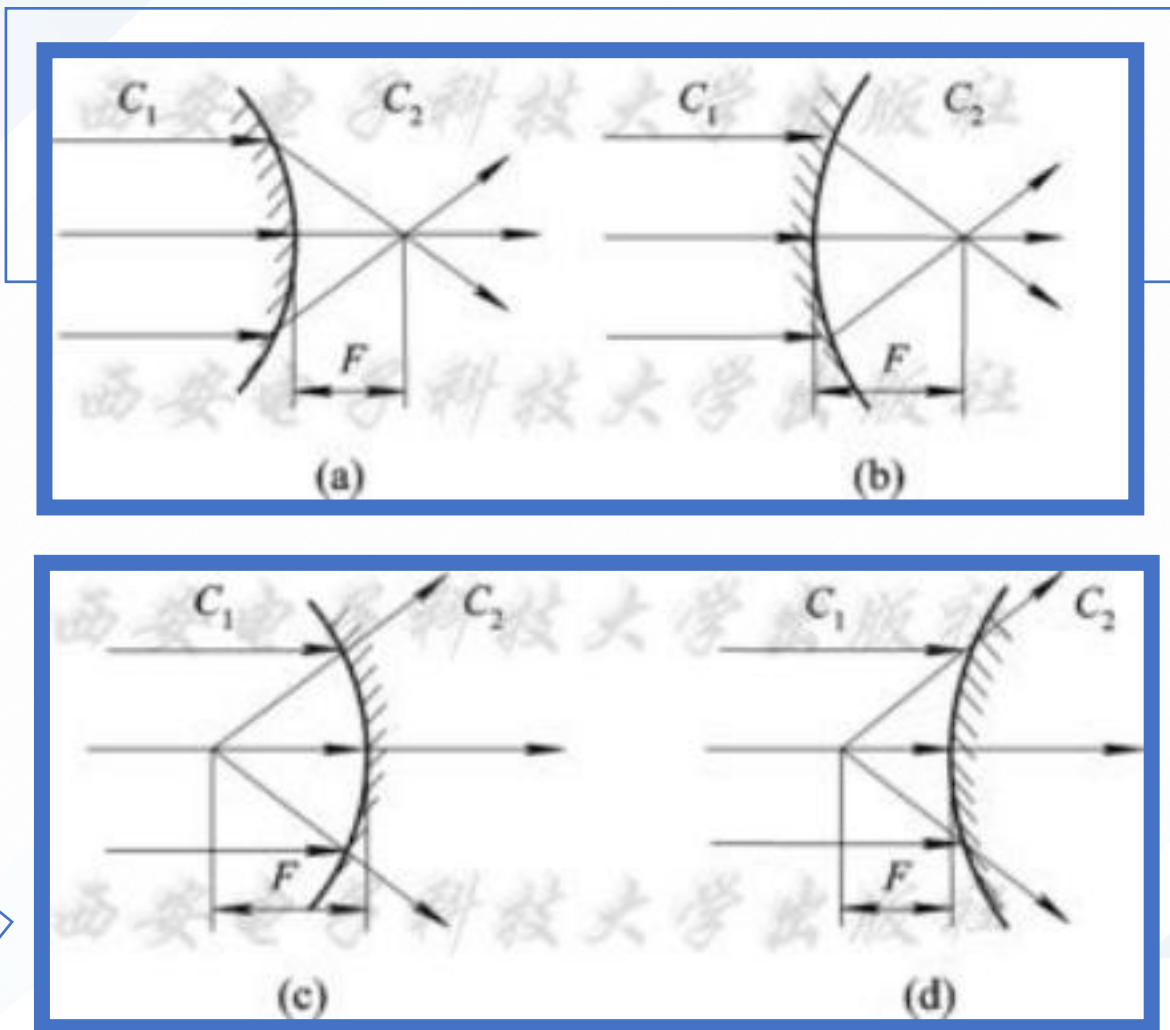


平面波入射到曲面上时，其折射波也将发生聚焦或发散。这时折射波的聚焦或发散不仅与曲面的凹凸有关，而且与界面两侧介质的声速有关。对于凹面， $c_1 < c_2$ 时聚焦， $c_1 > c_2$ 时发散；对于凸面， $c_1 > c_2$ 时聚焦， $c_1 < c_2$ 时发散。

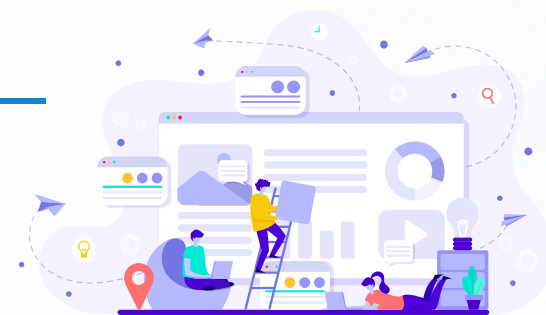
折射后的焦距 F 为

$$F = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}}$$

3 超声波在介质中的传播特性



平面波在曲面上的折射



4 由圆形压电晶片产生的声场简介

一. 圆形压电晶片声源的声场



理想的圆盘声源是指圆形平面的声振动源，当它沿平面法线方向振动时，其面上各点的振动速度幅值和相位都相同，发射的波称为活塞波。

圆盘声源发出的声场，由于声源尺寸有限，必然在其边缘发生衍射效应使声束向周围空间扩散，形成一个随距离增大而波阵面面积不断扩大的扩散声束。另一方面，声源上各点发出的声波相互干涉又使得声压的空间分布不是随距离单调变化的。因此，对圆盘声源声场中声压分布的描述非常复杂。从圆盘声源的对称性来分析，通过圆盘中心且垂直于盘面的直线应是声场的对称轴，称为圆盘声源轴线。讨论圆盘声源的声场将从声压沿轴线的分布以及声束扩散的特性着手。

4 由圆形压电晶片产生的声场简介

01 圆盘声源轴线上的声压分布

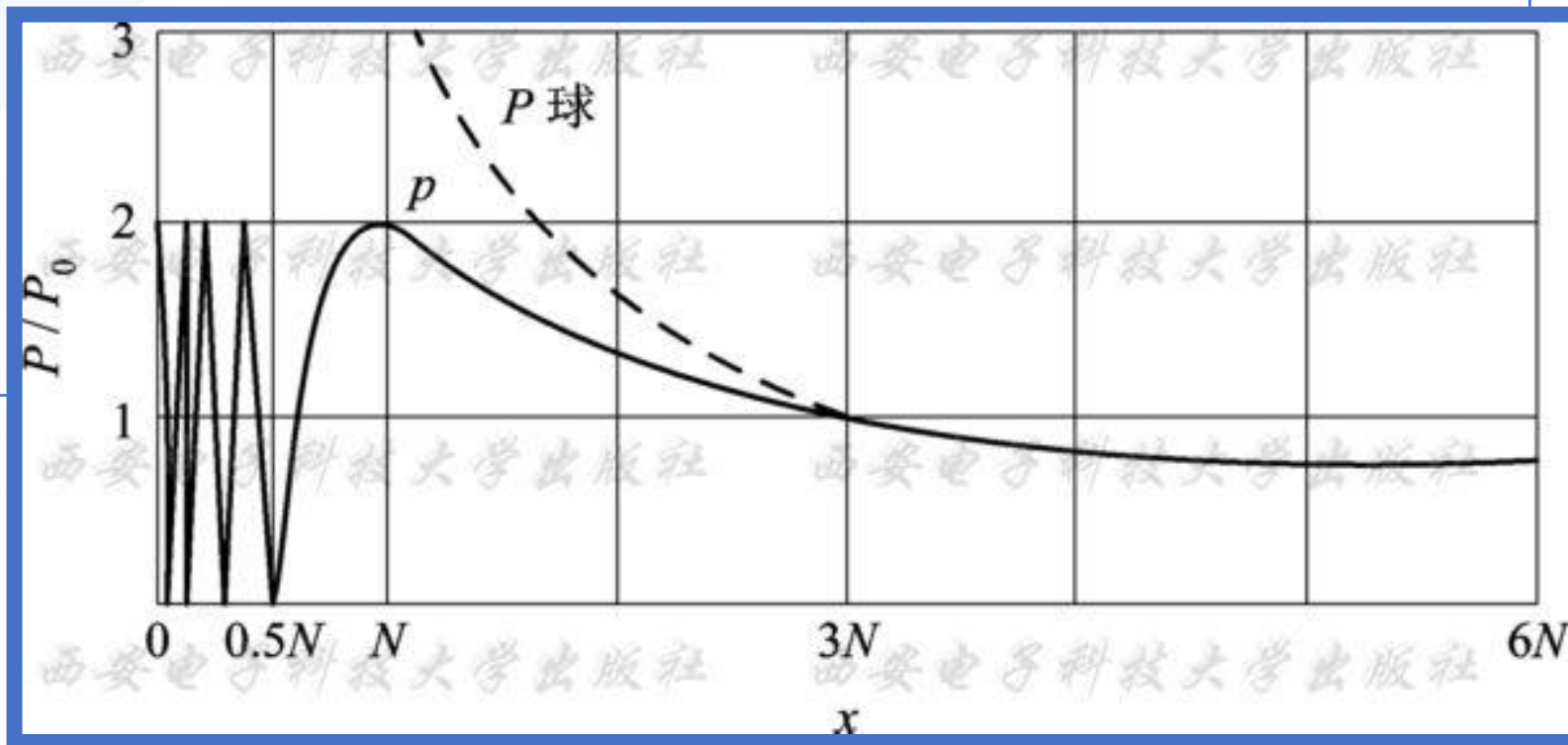
根据叠加原理，圆盘声源轴线上任何一点处的声压等于声源上各点辐射的声压在该点的叠加。如果声源发出的波为连续简谐波，并假定介质为无衰减的液体介质，则可推出声源轴上声压幅值 P 的分布符合下式：

$$P = 2P_0 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{D^2}{4} + x^2} - x \right) \right]$$

式中： P_0 为声源的起始声压； D 为圆盘声源的直径； λ 为传声介质中声波的波长； x 为圆盘声源轴线上某一点距声源的距离。



4 由圆形压电晶片产生的声场简介



圆盘声源轴线上的声压分布

4 由圆形压电晶片产生的声场简介

经数学推导，可以得到最后一个声压极大值点距声源距离的表达式：

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} - \frac{\lambda}{4}$$

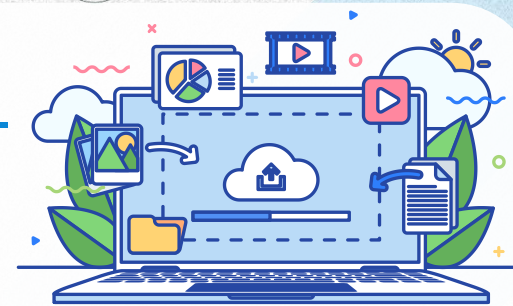
当 $D \gg \lambda$ 时， $\lambda/4$ 可以忽略，从而得到近场长度的简化计算公式如下，可用于实际工作中近场长度的估算：

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

再看图中远场区部分的特点，图中标有“P球”的虚线为球面波声压随距离的变化曲线，可以看出，距离大于 $3N$ 以后，圆盘声源声轴上的声压幅值变化与球面波的曲线非常接近。



4 由圆形压电晶片产生的声场简介



当 $4\lambda x/D^2 > 3$ ，也就是 $x > 3N$ 时，有

$$P = P_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda x} = P_0 \frac{S}{\lambda x}$$

式中： $S = \pi D^2/4$ 为圆盘声源的面积。声压幅值与距声源的距离成反比，正是球面波的声压幅值的变化规律。

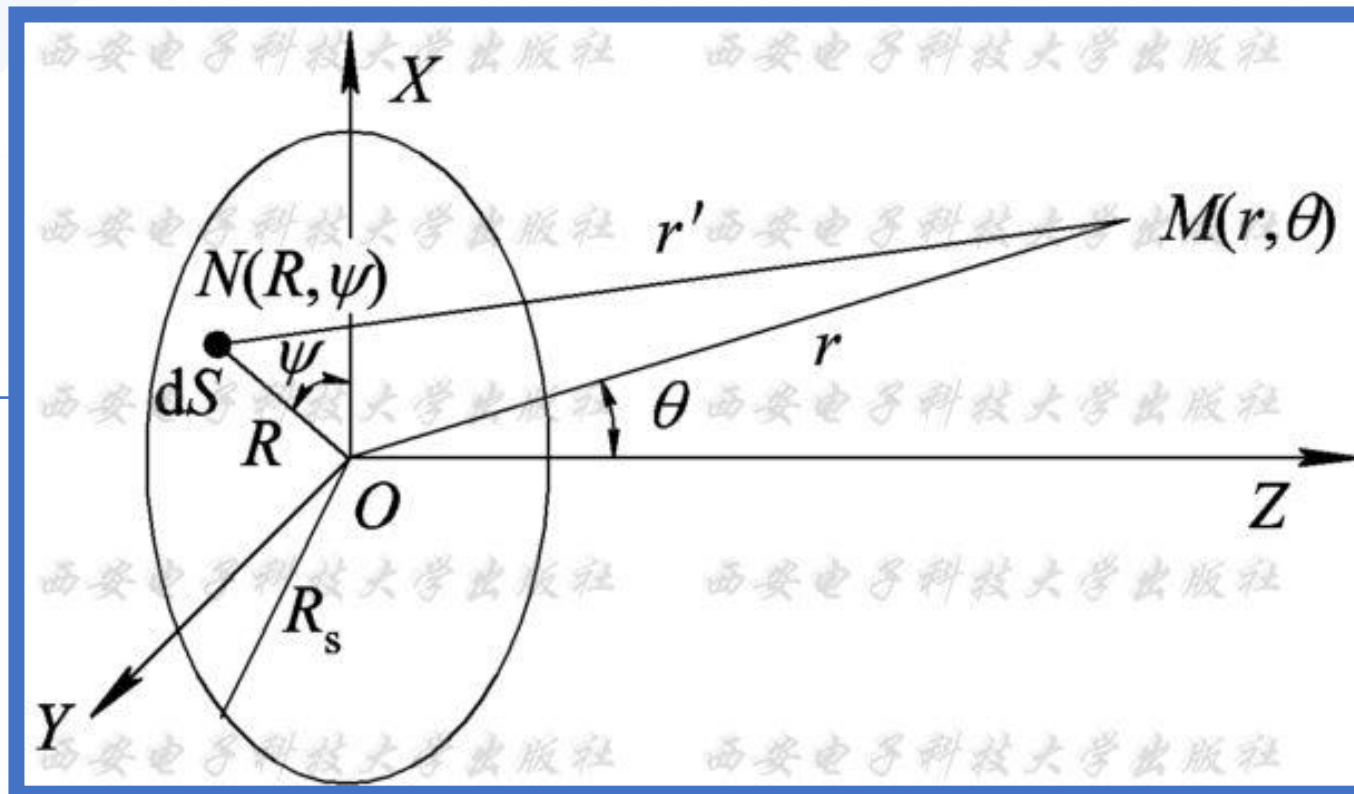
4 由圆形压电晶片产生的声场简介

02 指向性与扩散角

指向性与扩散角研究的是声束在空间扩散的规律。同样根据叠加原理，可将在空间中距声源有一定距离的任一点的声压，看做是声源上各点的辐射声压的叠加，从而得到声场内声压幅值的分布情况，如图所示。

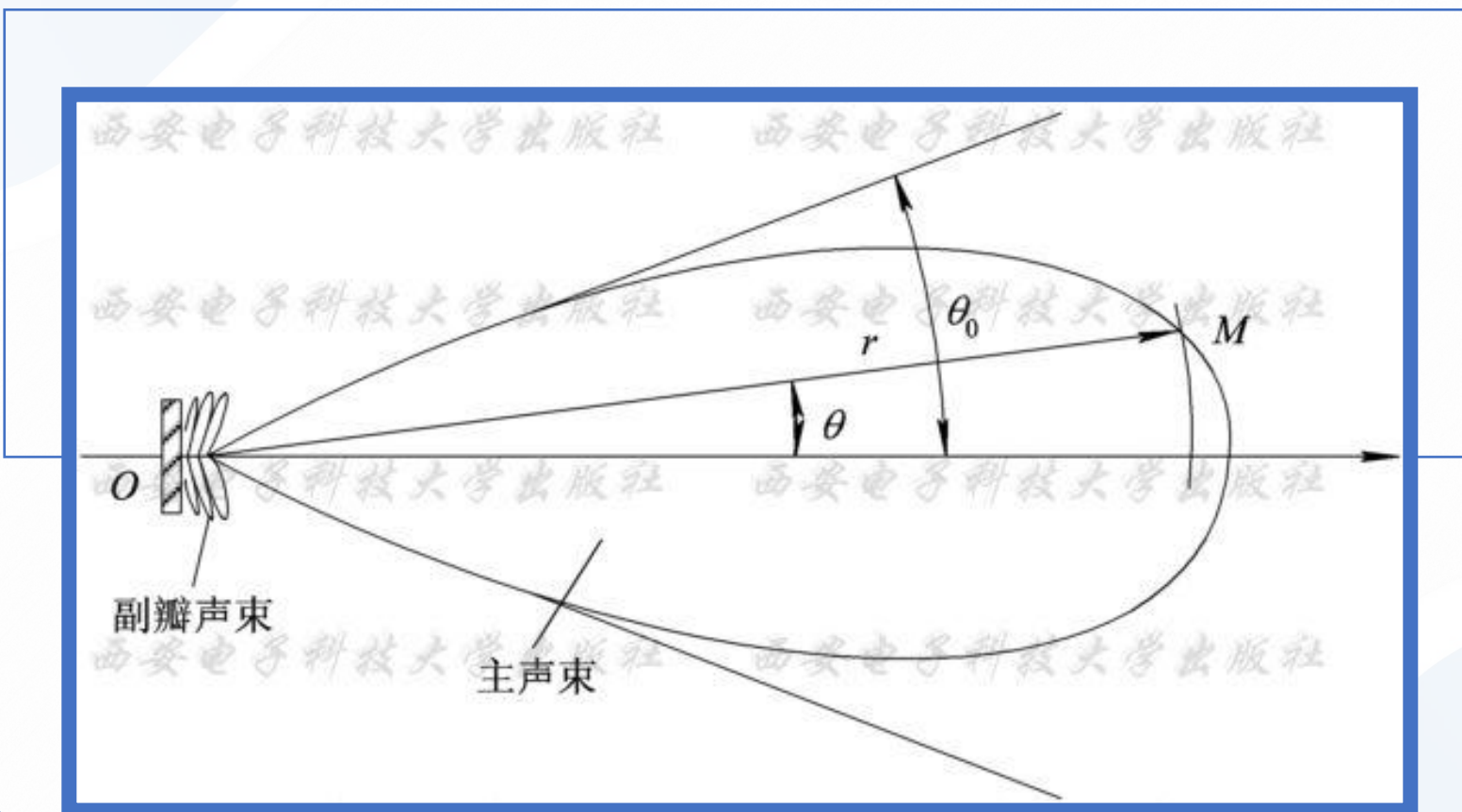


4 由圆形压电晶片产生的声场简介

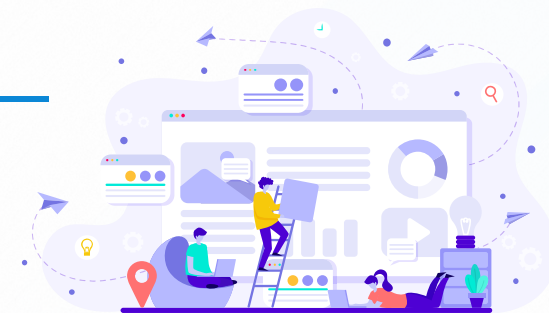


圆盘声源远场中任一点的声压推导

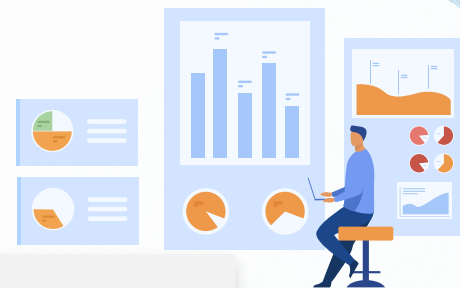
4 由圆形压电晶片产生的声场简介



圆盘声源声场指向性示意图



4 由圆形压电晶片产生的声场简介



超声场中超声波的能量主要集中于以声轴为中心的某一角度范围内，这一范围称为主声束。这种声束集中向一个方向辐射的性质叫做声场的指向性。在主声束角度范围以外还存在一些能量很低的、只分布于声源附近的副瓣声束。

主声束所包含的角度范围可由距声源充分远处的声压分布得到。设 R_s 为圆形声源的半径， r 为空间任一点 M 到声源中心的距离， θ 为 M 点与声源中心的连线与声源轴线的夹角。当满足条件 $r > 3R_s^2/\lambda$ ，也就是 $r > 3N$ 时，声压幅值的表达式为

$$P(r, \theta) = \frac{P_0 S}{\lambda r} \left[\frac{2 J_1(k R_s \sin \theta)}{k R_s \sin \theta} \right]$$

式中： J_1 为第一类第一阶贝塞尔函数； S 为声源面积。

4 由圆形压电晶片产生的声场简介

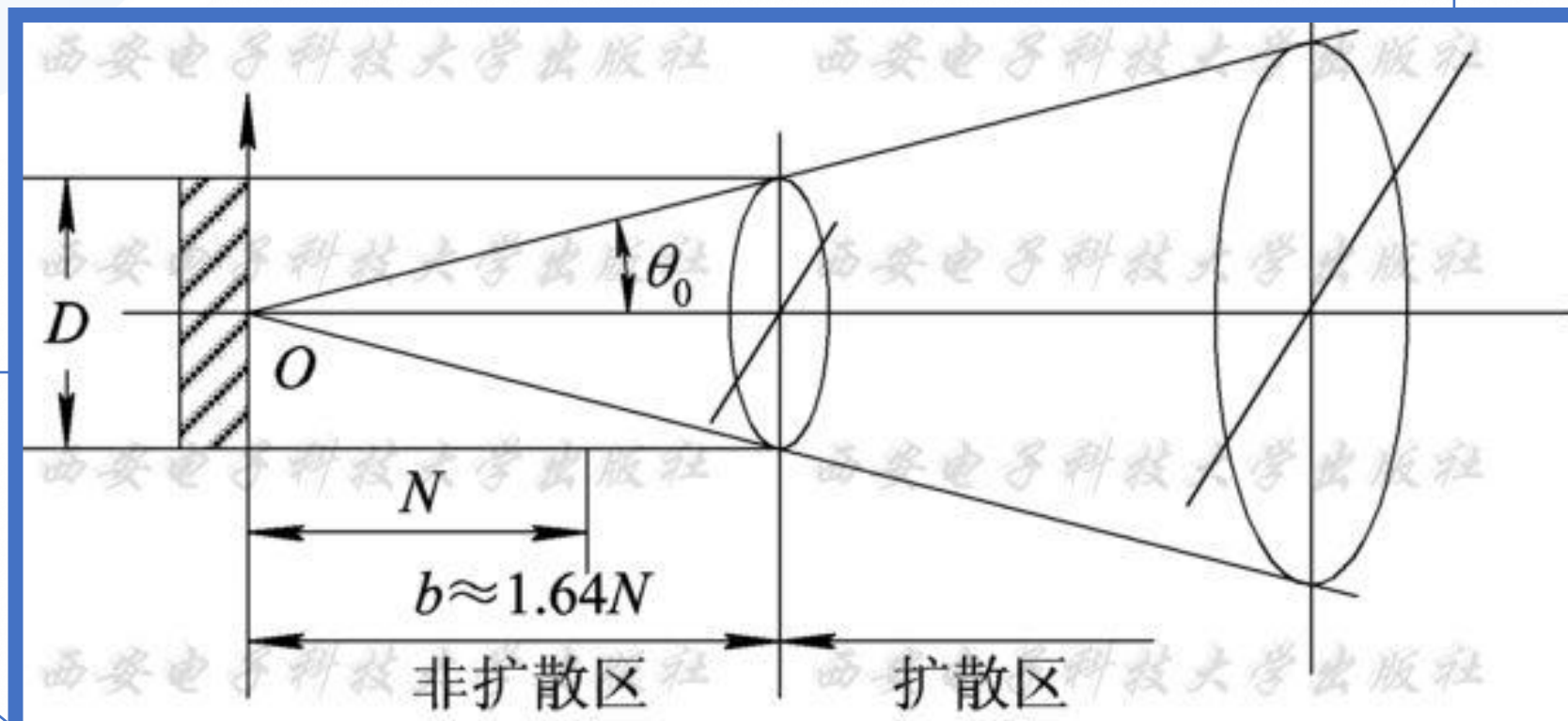
根据上式可知，距声源充分远处的任一横截面上，以声源轴线上的声压为最高。这是超声检测中对缺陷定位的依据。同时，存在偏离轴线的若干个角度 θ 上的声压的幅值为零。将远场中第一个声压为零的角度，称为指向角或半扩散角，以 θ_0 表示为

$$\sin \theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

指向角是代表主声束范围的角度，反映了声束的定向集中程度，也反映了声束随距离扩散的快慢。指向角越大，则声束指向性越差，声束扩散越快。由上式可看出，声源的直径越大，波长越短，则声束指向角越小，指向性越好。

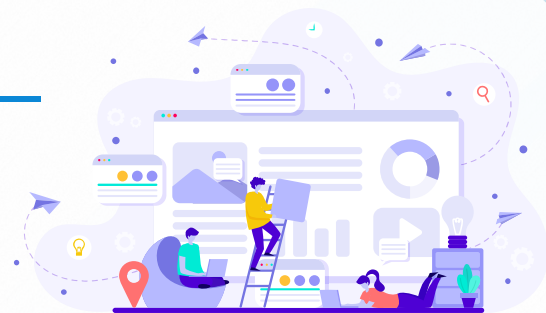


4 由圆形压电晶片产生的声场简介



圆盘声源非扩散区示意图

4 由圆形压电晶片产生的声场简介



当 $\lambda \ll D$ 时，上式可简化为

$$\theta_0 \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{rad})$$

由于超声能量主要集中于主声束，对于圆形晶片，可以认为在距声源一定距离内，超声能量未逸出以晶片直径所约束的范围，声束直径小于晶片直径。这一距离之内就称为非扩散区，如图所示。非扩散区之外，则称为扩散区。按几何关系，可得到非扩散区的长度 b 为 $b \approx 1.64N$

4 由圆形压电晶片产生的声场简介

03 实际声源的声场

简化计算时假定声源是均匀、连续激发的，而实际探头多是非均匀激发的脉冲波源；简化计算时假定介质是液体介质，实际检测对象多为固体介质。对实际声场的研究表明，实际声场与简化计算结果的差别主要在于近场区的声压分布。简化计算结果中近场区声压变化剧烈，可有多处极大值和极小值。而实际声场近场区声压分布比较均匀，幅度变化小，极值点的数量也明显减少。

尽管实际声场与简化分析结果有所差异，但在远场区是基本符合的。因此，可以应用简化推导得出的结果，进行实际检测中的近似计算。

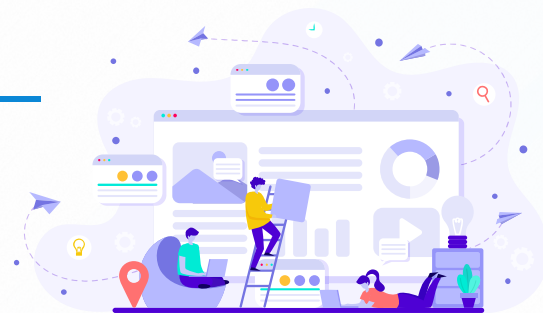


4 由圆形压电晶片产生的声场简介

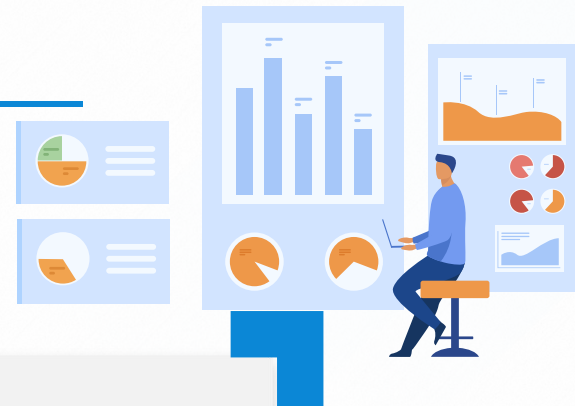
二. 规则反射体回波声压与AVG曲线

01 规则反射体回波声压

超声检测用于发现材料中缺陷的最常用的技术是脉冲反射法，是根据接收到的反射波的位置、幅度等信息判断材料内部存在缺陷的情况。因此，研究声场中存在反射界面时反射波的声压对于缺陷的检出和缺陷的评价是十分重要的。实际中总是结合圆盘声源声场规律，讨论在圆盘声场远场中，介质衰减可以忽略且界面声压反射率为1时，不同形状反射体反射声压的变化规律。



4 由圆形压电晶片产生的声场简介



由于实际缺陷形状是各种各样的，甚至可能是不规则的，在进行理论分析时，采用几种简化的规则形状模型来进行计算。有些形状可在试样上人工制作，从而可作为人工模拟反射体，用于仪器的调整和缺陷的评价。规则形状反射体主要包括大平面、圆形或方形平面、球形反射体和圆柱形反射体。具体的规则反射体回波声压公式可查阅有关资料。当对实际缺陷大小进行计算时，往往得到的是该缺陷相当于多大的规则反射体，把这个大小称为缺陷的当量尺寸。

4 由圆形压电晶片产生的声场简介

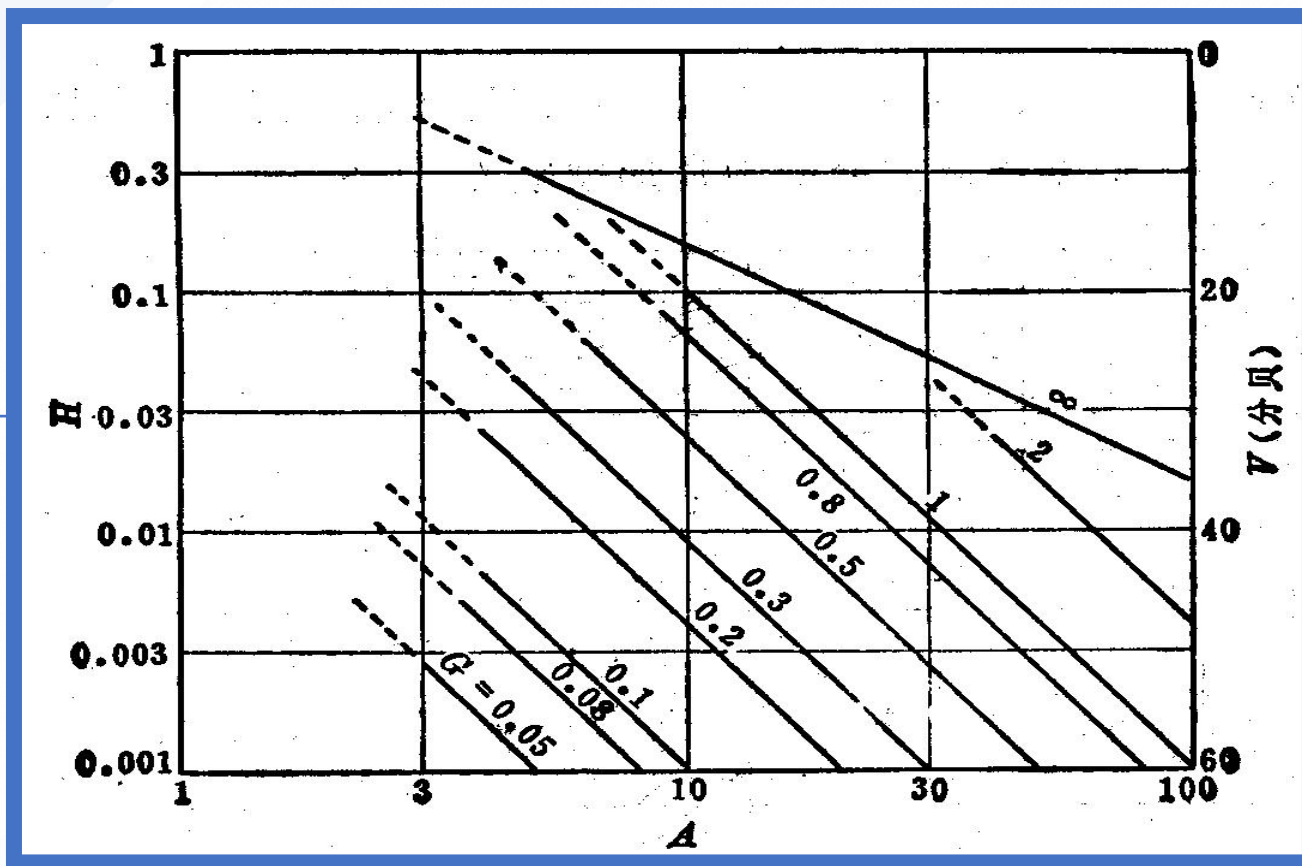
02 AVG曲线

所谓AVG曲线，是描述规则反射体距声源的距离(A)、回波高度(V)、当量尺寸(G)三者之间关系的曲线。A、V、G是德文距离、增益和大小三词的字头。利用AVG曲线，可以进行缺陷当量的评定。

AVG曲线有多种类型，有纵波AVG曲线和横波AVG曲线、平底孔AVG曲线和横孔AVG曲线、通用AVG曲线和实用AVG曲线等。通用AVG曲线和实用AVG曲线都可以用于调整检测灵敏度和对缺陷进行定量。

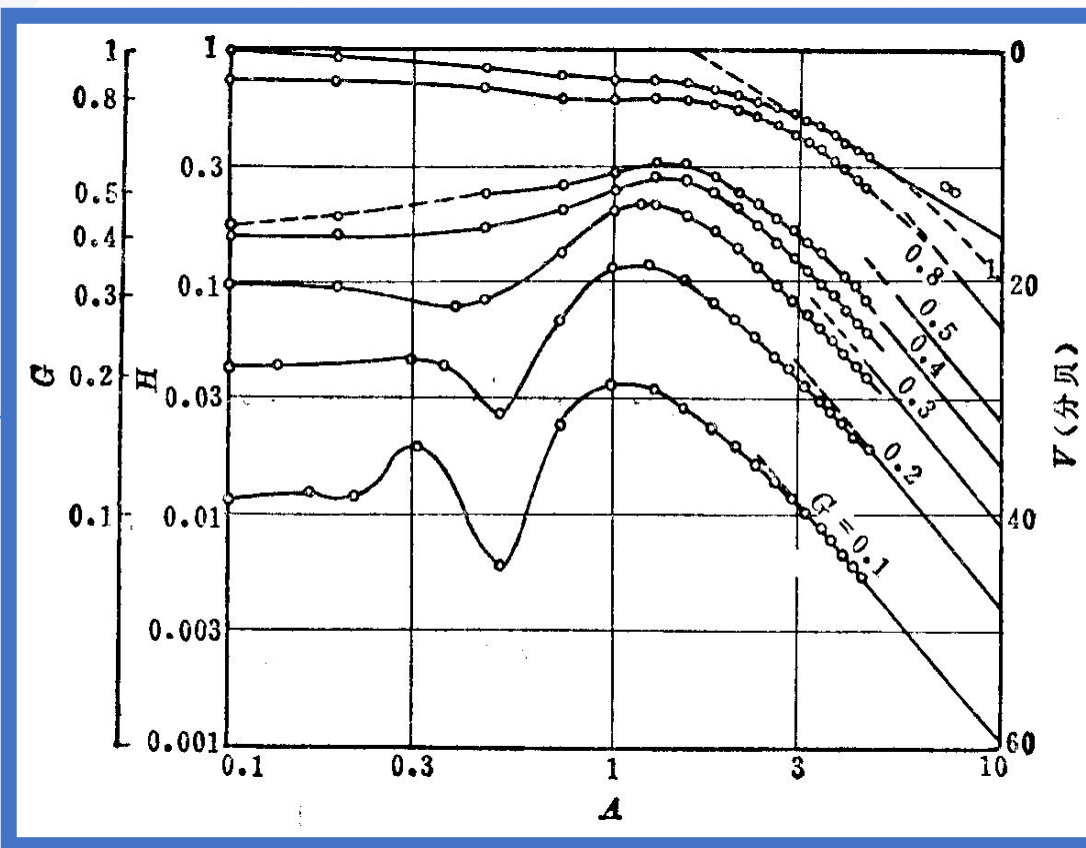


4 由圆形压电晶片产生的声场简介

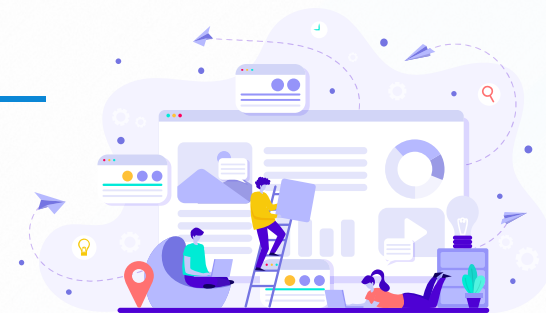


$A \geq 3$ 按计算得出的通用AVG图

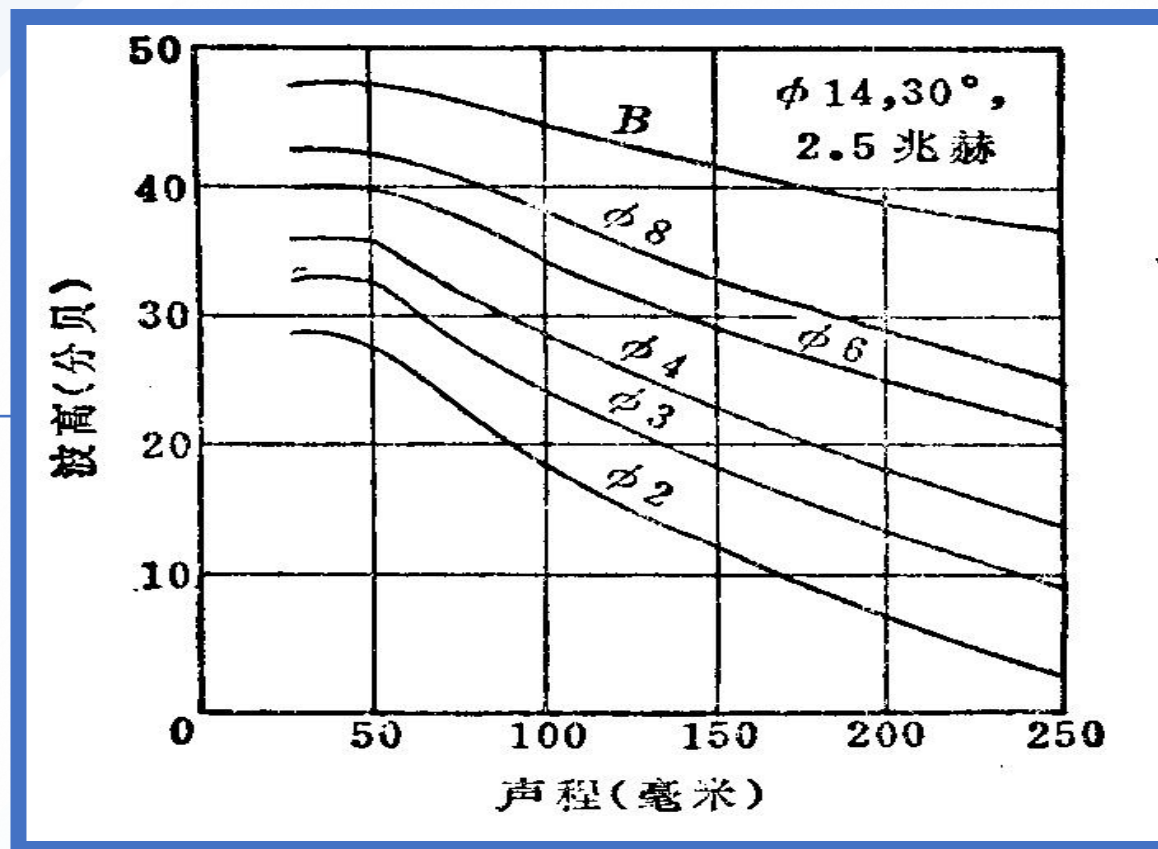
4 由圆形压电晶片产生的声场简介



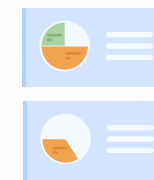
按实验数据得出的 $A < 3$ 通用AVG图



4 由圆形压电晶片产生的声场简介



横波斜探头实用AVG图



5 超声波检测方法

一. 超声检测设备和器材



超声检测设备和器材包括超声波检测仪、探头、试块、耦合剂和机械扫查装置等。超声检测仪和探头对超声检测系统的性能起着关键性的作用，是产生超声波并对经材料中传播后的超声波信号进行接收、处理、显示的部分。由这些设备组成一个综合的超声检测系统，系统的总体性能不仅受到各个分设备的影响，还在很大程度上取决于它们之间的配合。随着工业生产自动化程度的提高，对检测的可靠性、速度提出了更高的要求，以往的手工检测越来越多地被自动检测系统取代。

5 超声波检测方法

1. 超声波检测仪

超声波检测仪是超声检测的主体设备，是专门用于超声检测的一种电子仪器。

01

超声波检测仪的作用

它的作用是产生电振荡并加于换能器——探头，激励探头发射超声波，同时将探头送回的电信号进行放大处理后以一定方式显示出来，从而得到被探测工件内部有无缺陷及缺陷的位置和大小等信息。



5 超声波检测方法

02 超声波检测仪的分类

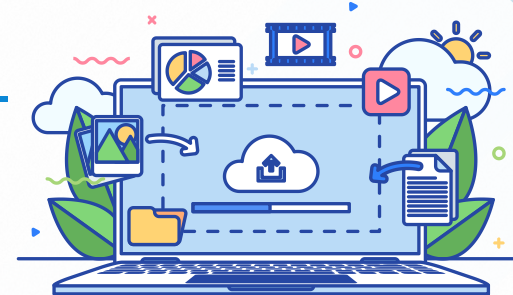
① 按缺陷显示方式分类：

脉冲式检测仪按回波信号的显示方式又可分为

A型显示、**B型显示**和**C型显示**三种类型。



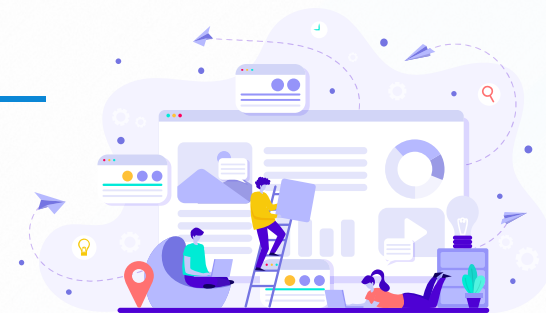
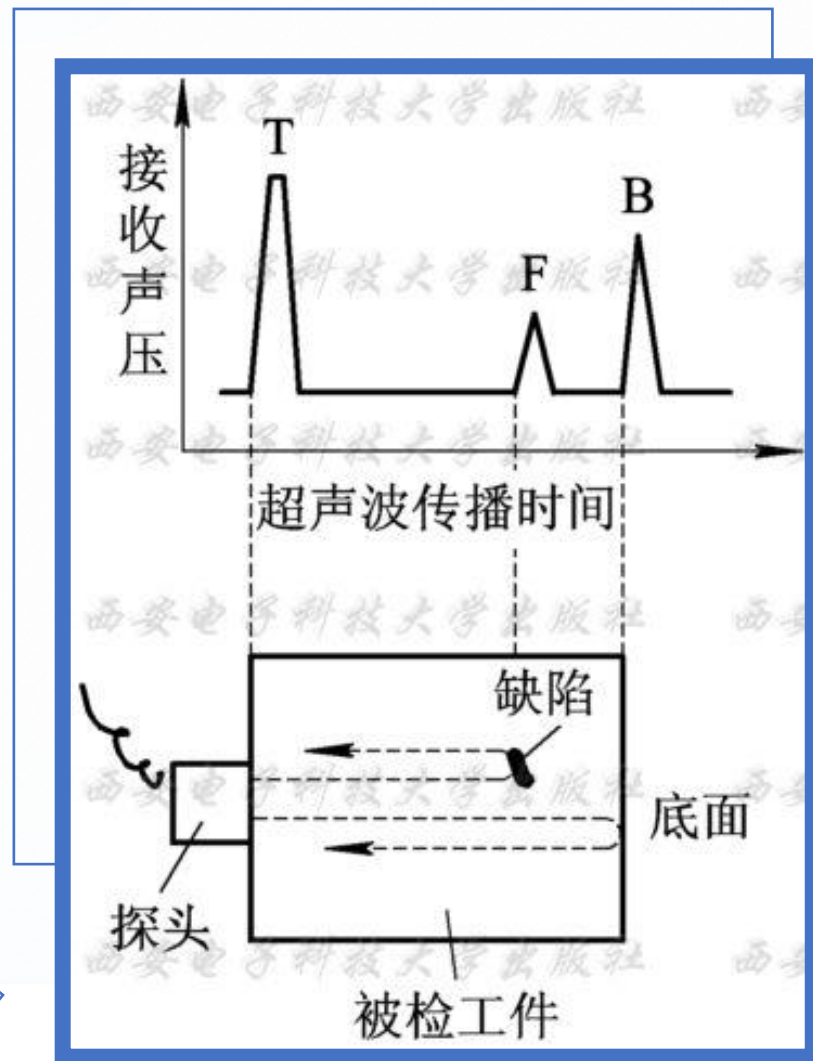
5 超声波检测方法



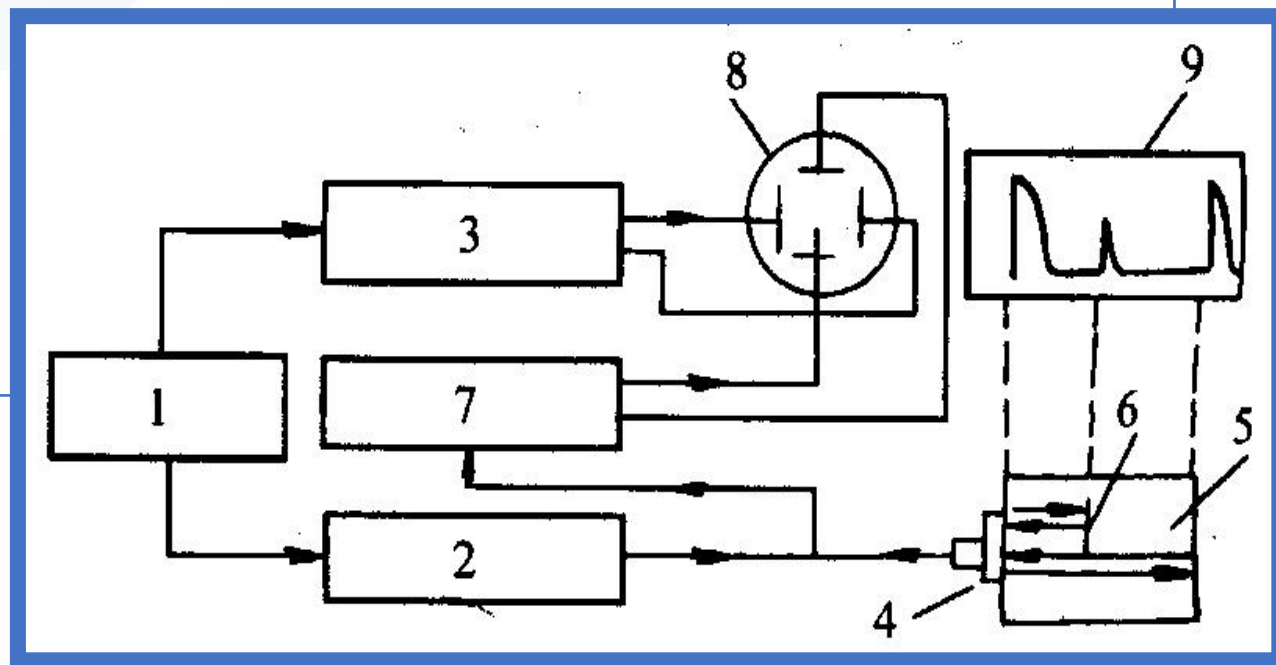
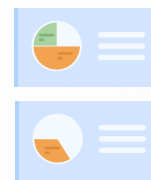
A型显示是一种波形显示，屏幕的横坐标代表声波的传播时间（或距离），纵坐标代表反射波的声压幅度。可以认为该方式显示的是沿探头发射声束方向上一条线上的不同点的回波信息。图中，T表示发射脉冲，F表示来自缺陷的回波，B表示底面回波。

5 超声波检测方法

A型显示原理图



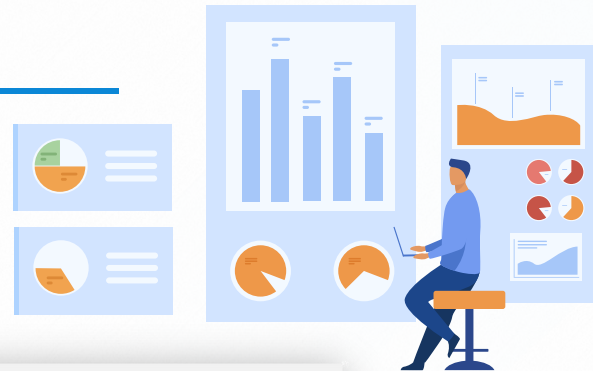
5 超声波检测方法



A型显示超声仪基本电路框图

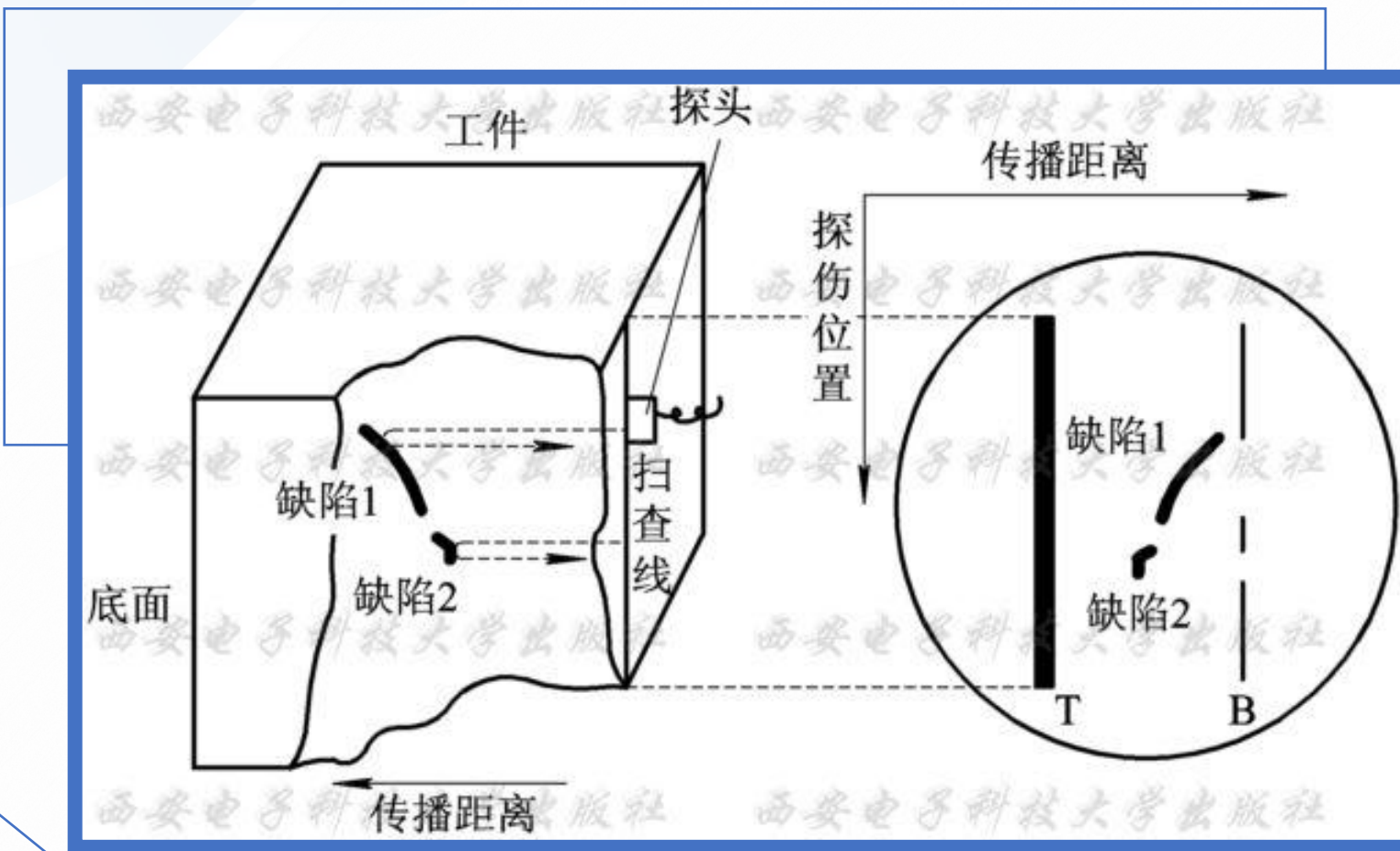
- 1—同步电路;
- 2—发射电路;
- 3 - 时基电路
- 4 - 探头(换能器);
- 5 - 试件;
- 6 - 缺陷;
- 7 - 接收放大电路;
- 8 - 示波屏;
- 9 - 波形显示示意

5 超声波检测方法



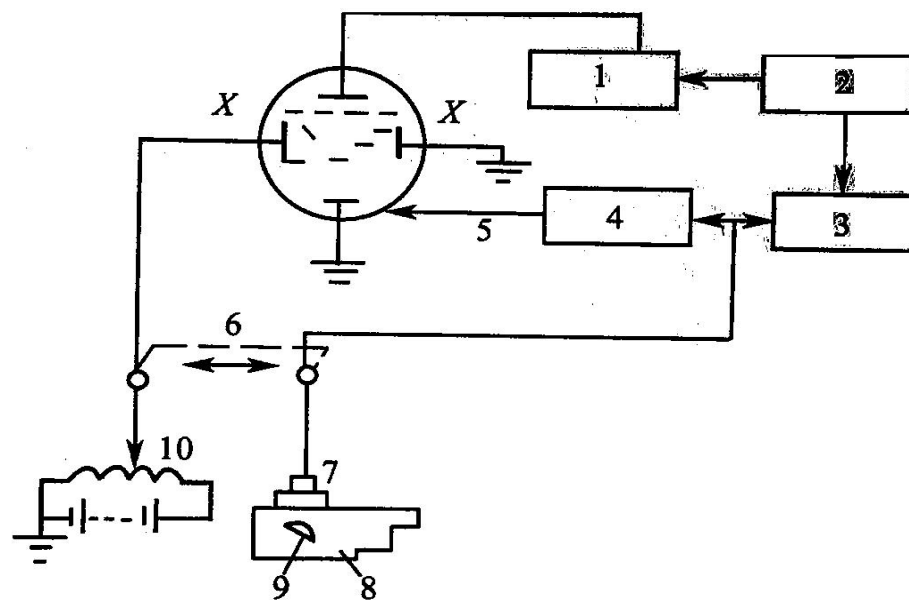
B型显示显示的是试件的一个二维截面图，屏幕纵坐标代表探头在探测面上沿一直线移动扫查的位置坐标，横坐标是声传播的时间（或距离）。该方式可以直观地显示出被探工件任一纵截面上缺陷的分布及缺陷的深度等信息。

5 超声波检测方法



B型显示原理图

5 超声波检测方法



B 型显示系统框图

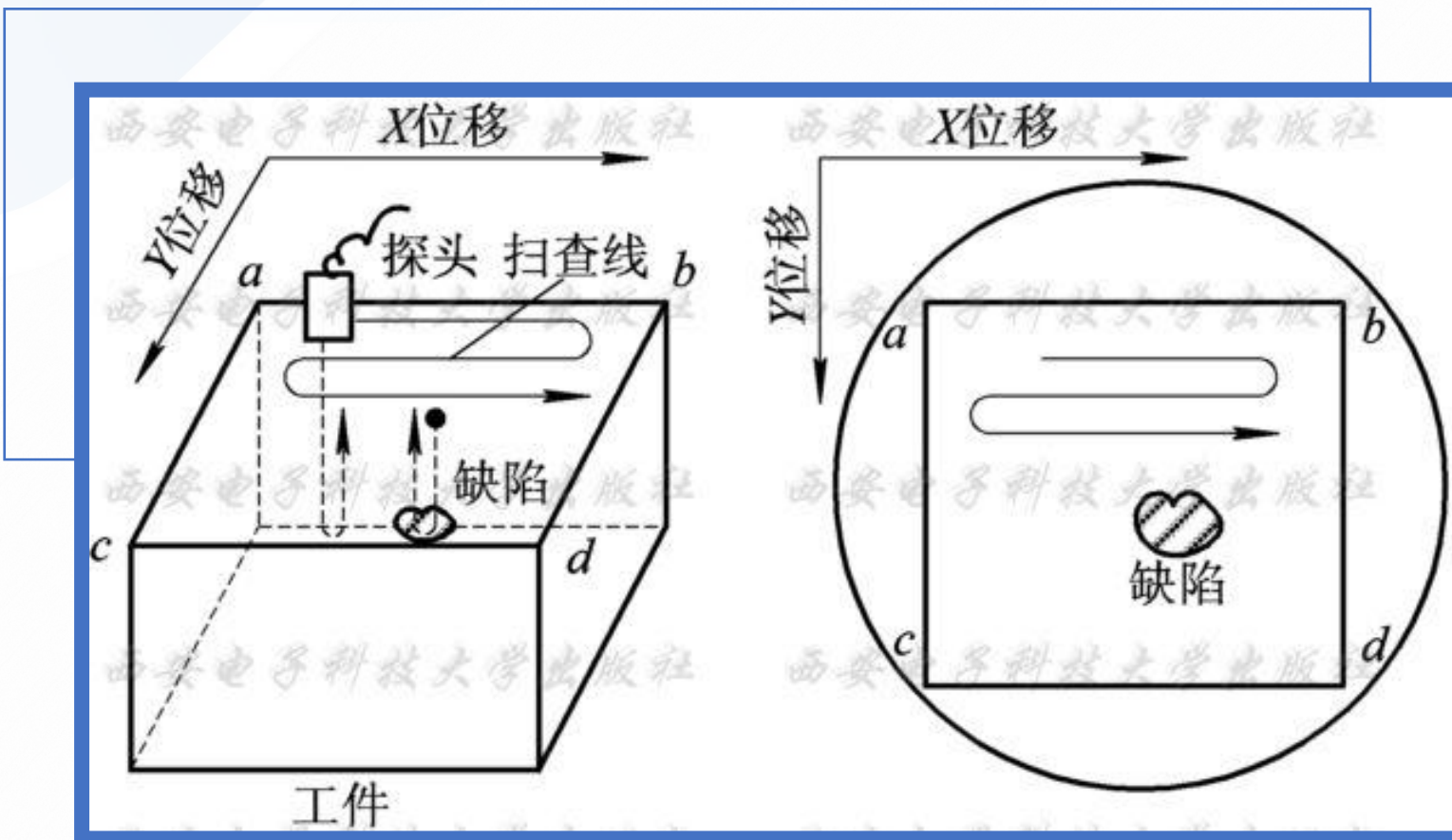
1—Y 轴扫描电路；2—同步电路；3—发射电路；4—放大电路；5—电子束强度调制
 6—机械连接；7—探头；8—工件；9—缺陷；10—X 轴位置。

5 超声波检测方法

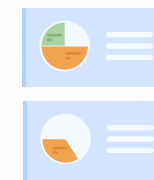


C型显示显示的是试件的一个平面投影图，探头在试件表面做二维扫查，屏幕的二维坐标对应探头的扫查位置。探头在每一位置接收的信号幅度以光点辉度表示。该方式可形象地显示工件内部缺陷的平面投影图像，但不能显示缺陷的深度。

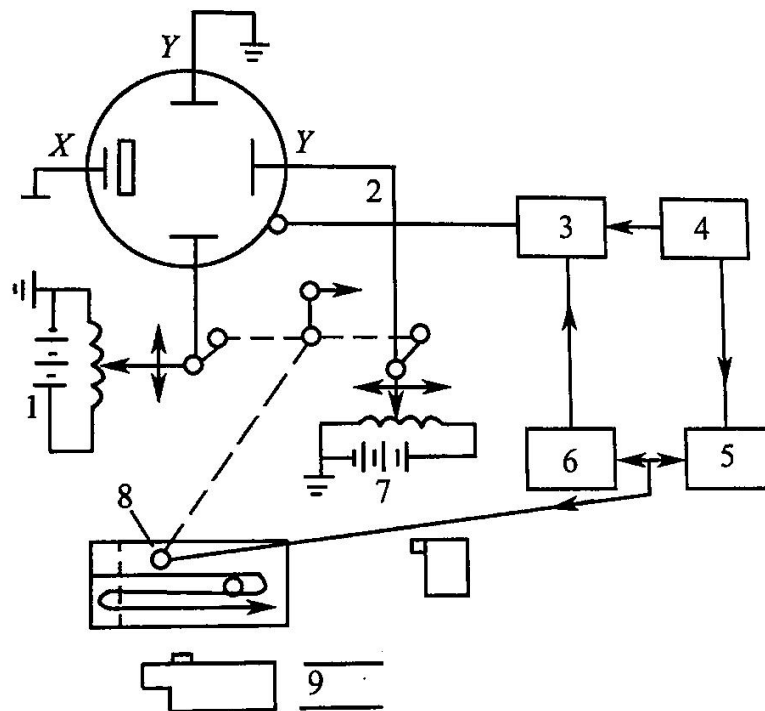
5 超声波检测方法



C型显示原理图



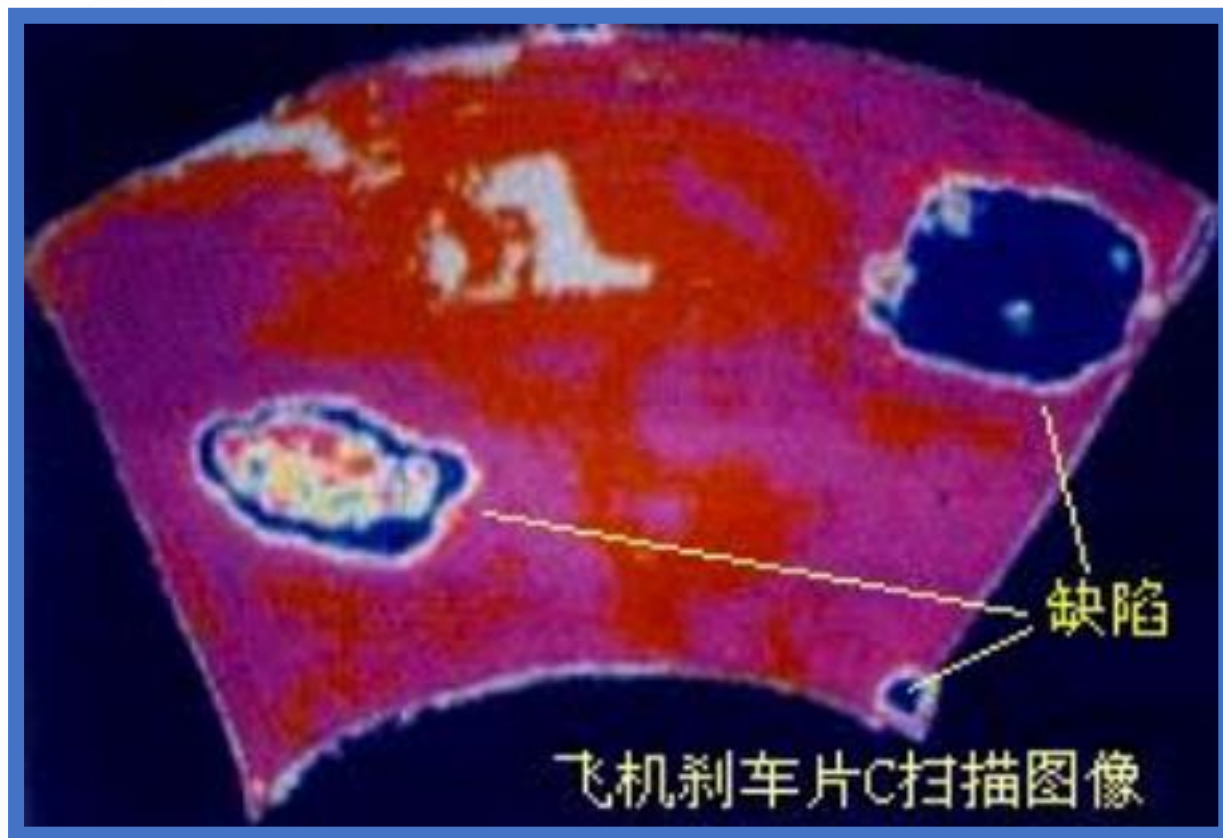
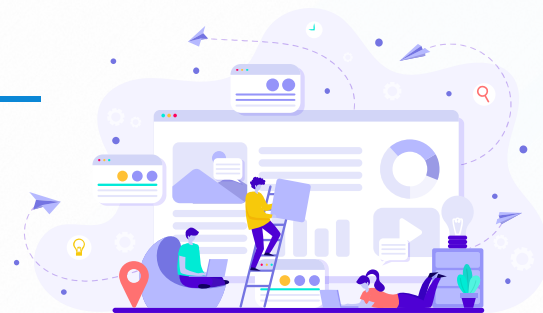
5 超声波检测方法



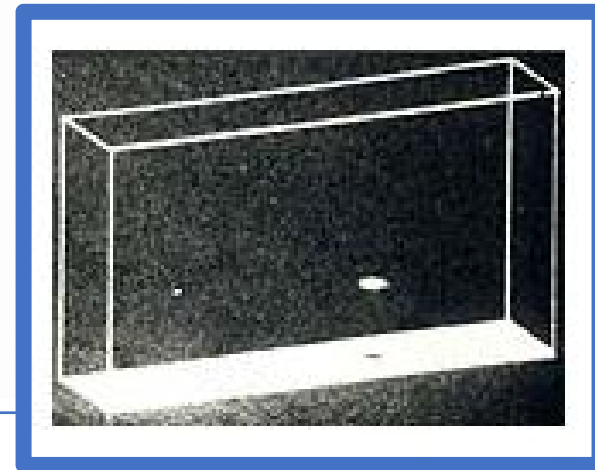
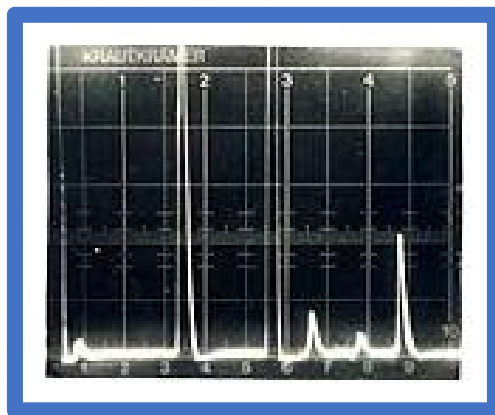
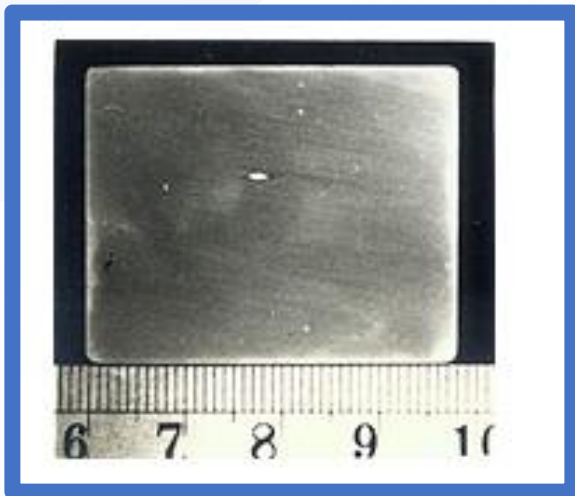
C型显示系统框图

1—Y 轴位置；2—电子束强度调制；3—电子深度门；4—同步电路；5—发射电路；
 6—放大电路；7—X 轴位置；8—探头；9—检查深度。

5 超声波检测方法



5 超声波检测方法



BT9钛合金锻制饼坯超声检测中发现的高密度夹杂物（钼夹杂）的解剖显示照片（横向低倍）

5 超声波检测方法

② 按超声波的通道分类：

可分为单通道和多通道检测仪。

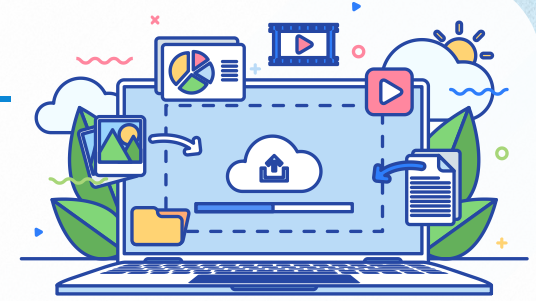
③ 按是否数字化分类：

可分为数字式超声波检测仪和模拟式超声波检测仪所谓数字式主要指发射、接收电路的参数控制和接收信号的处理、显示均采用数字方式的仪器。数字式超声检测仪是计算机技术和传统超声检测技术相结合的产物。它具有传统模拟式检测仪的基本功能，同时又增加了数字化带来的先进功能，即实现了仪器功能的精确、自动控制，信号获取和处理的数字化和自动化，检测结果的可记录性和可再现性。

以上分类中，模拟式和数字式A型脉冲反射式超声波检测仪在工程实际中应用最为广泛，其型号有CTS-22、CTS-21、JTS-5、CST-3等。



5 超声波检测方法

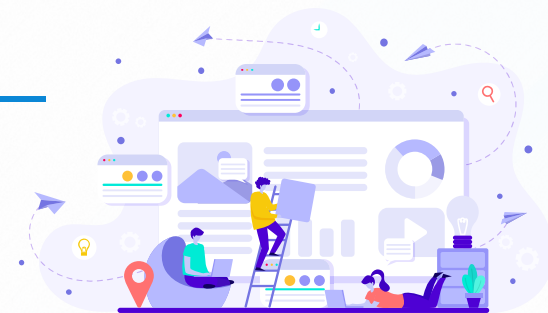


5 超声波检测方法

钢轨探伤车



滑板式探头

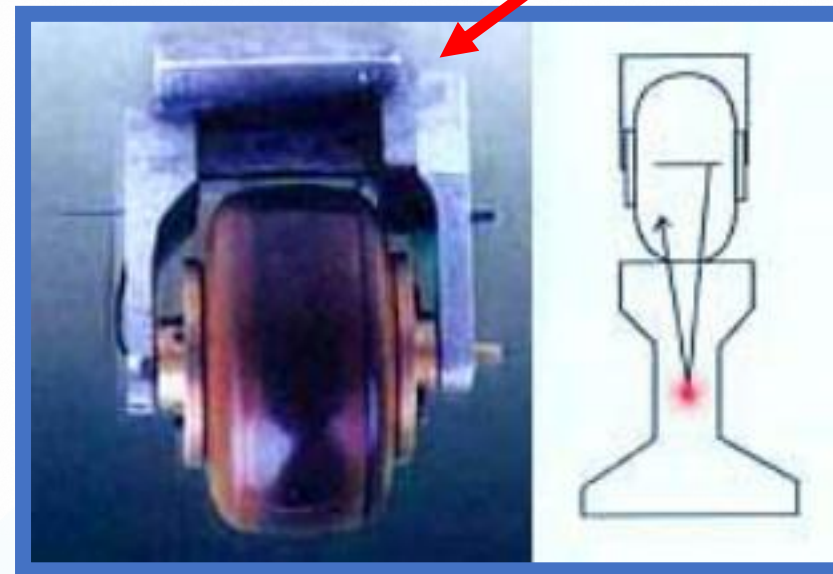


5 超声波检测方法

高速钢轨探伤车



铁路钢轨探测用的滚轴式探头
(也称做轮式探头)

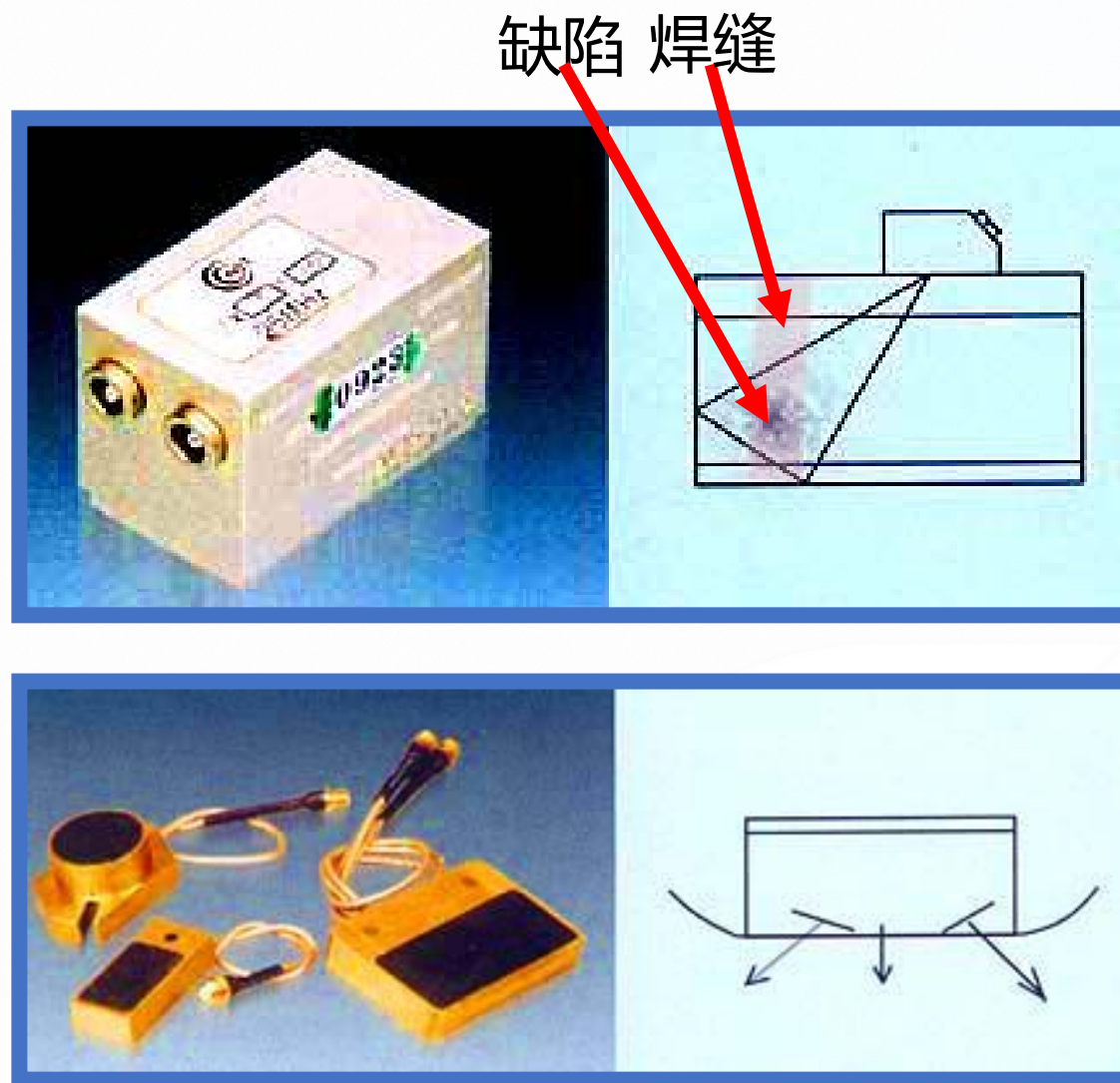


5 超声波检测方法

铁路钢轨探头

铁路钢轨对接焊缝探测用探头

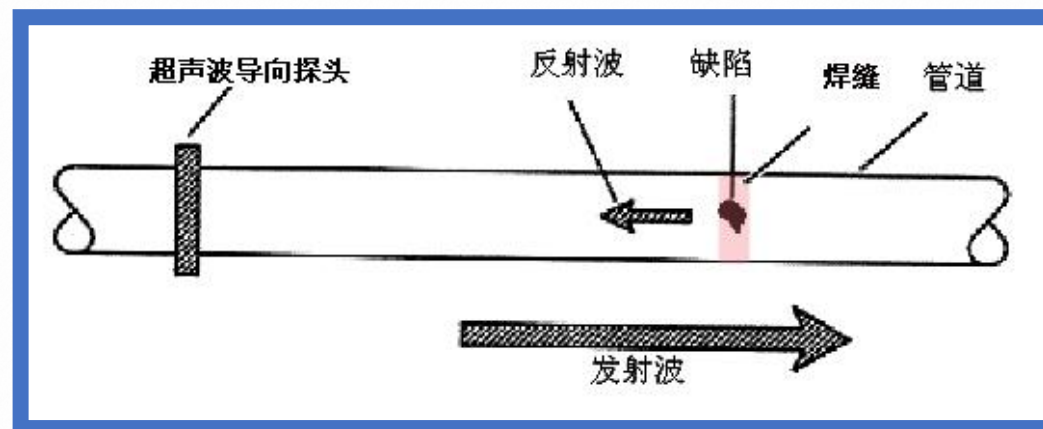
铁路钢轨探伤用滑板式探头



5 超声波检测方法



管道环焊缝
超声波检测装置



管道环焊缝超声波检测
装置原理

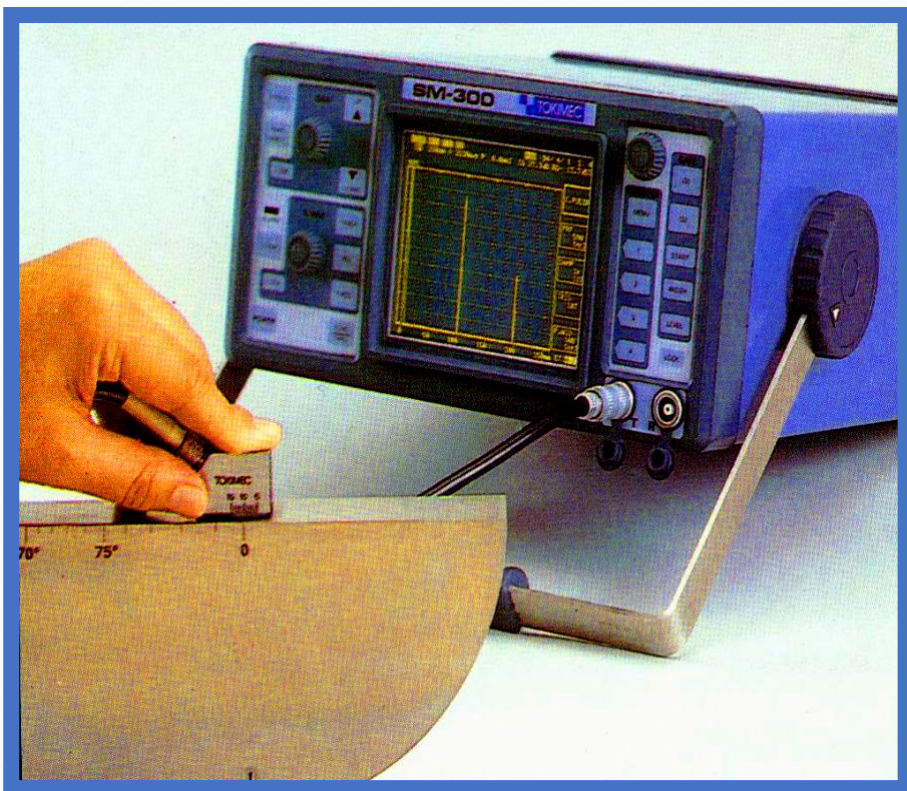
5 超声波检测方法

超声探伤仪



5 超声波检测方法

构件的超声探伤



5 超声波检测方法



5 超声波检测方法

2. 超声波探头

01

超声波检测仪的作用

超声波探头用于实现声能和电能的互相转换。它是利用压电晶体的正、逆压电效应进行换能的。探头是组成检测系统的最重要的组件，其性能的好坏直接影响超声检测的效果。

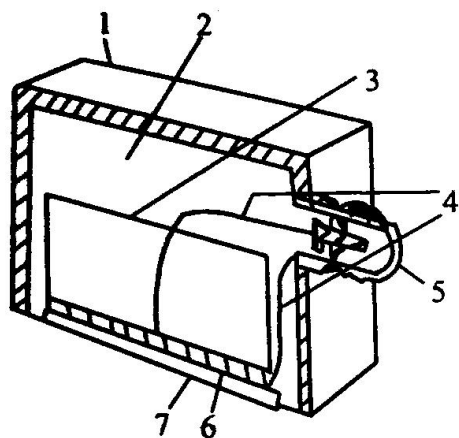
02

常用超声波探头的类型

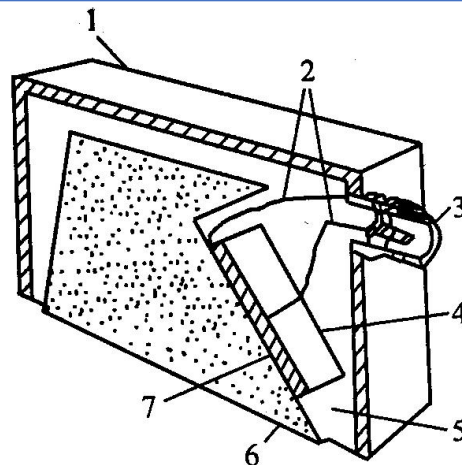
常用超声波探头的类型。超声波检测中由于被探测工件的形状和材质、探测的目的、探测的条件不同，因而要使用各种不同形式的探头。其中最常用的是接触式纵波直探头、接触式横波斜探头、双晶探头、水浸探头与聚焦探头等。一般横波斜探头的晶片为方形，纵波直探头的晶片为圆形，而聚焦声源的圆形晶片为声透镜。所以声场就有圆盘源声场、聚焦声源声场和斜探头发射的横波声场。



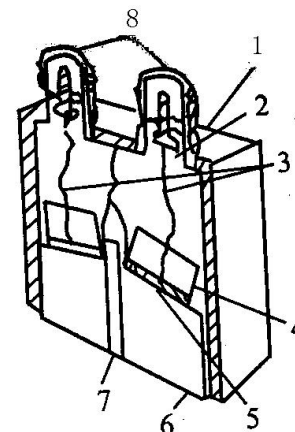
5 超声波检测方法



直射声束(纵波)
 接触型压电换能器
 探头典型结构
 1—外壳; 2—环氧树脂;
 3—背衬材料; 4—电连接;
 5—同轴连接器; 6—压电元件;
 8—耐磨面板。



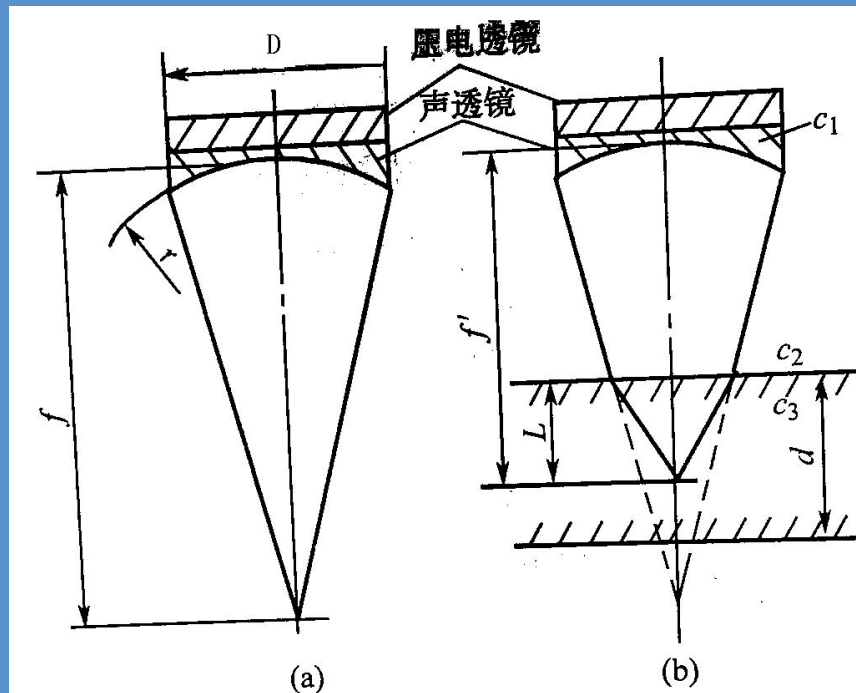
斜射声束(横波)
 接触型压电换能器探头
 典型结构示意图
 1—外壳; 2—电连接; 3—同轴连接
 器; 4—背衬材料; 5—环氧树脂;
 6—塑料斜楔; 7—压电元件。



双晶接触
 型压电换能器探
 头典型结构示意图
 1—外壳; 2—环氧树脂;
 3—电连接; 4—背衬
 材料; 5—压电元件;
 6—塑料斜楔; 7—声屏
 蔽; 8—同轴连接器。

5 超声波检测方法

在液浸平探头的晶片平面上加上声透镜，探伤时以水作耦合剂，将声能传入试件，由于探头不直接与试件接触，晶片不易损坏。在聚焦区内超声束宽度可被减小，而声强被增大，从而提高信噪比和检测灵敏度。



声透镜聚集作用原理

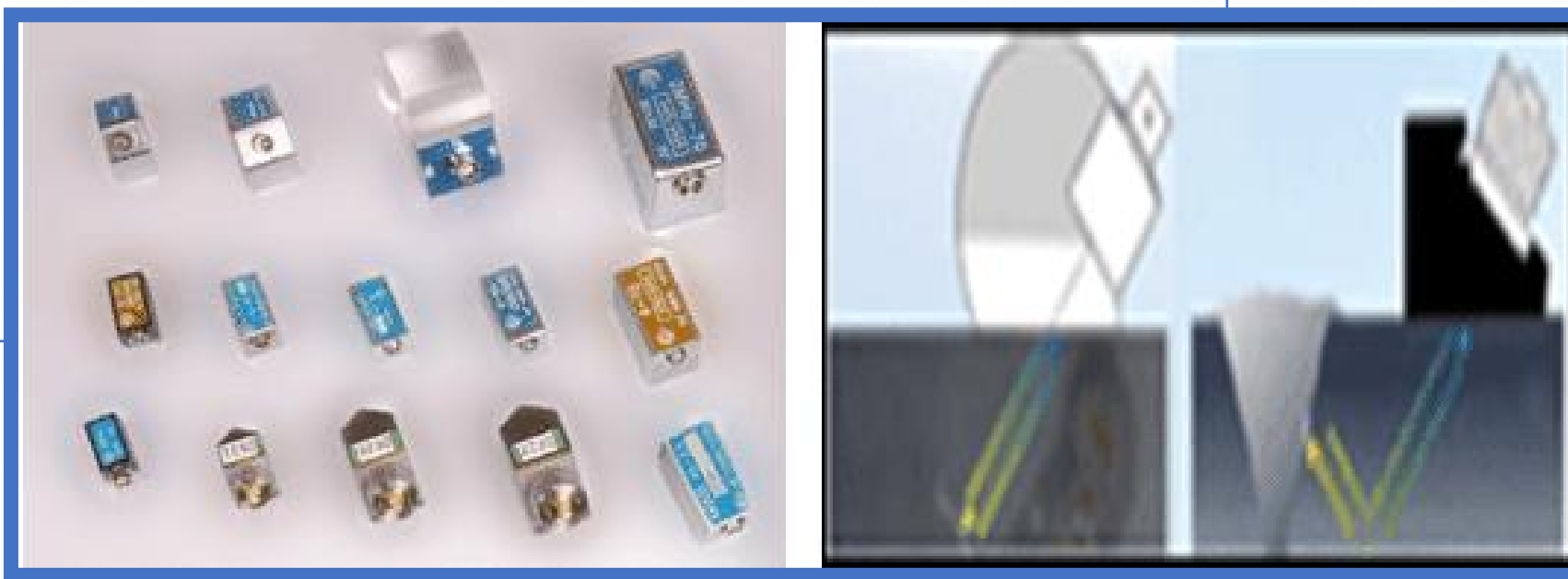
(a) 水中无工件；(b) 水中有工件。

5 超声波检测方法



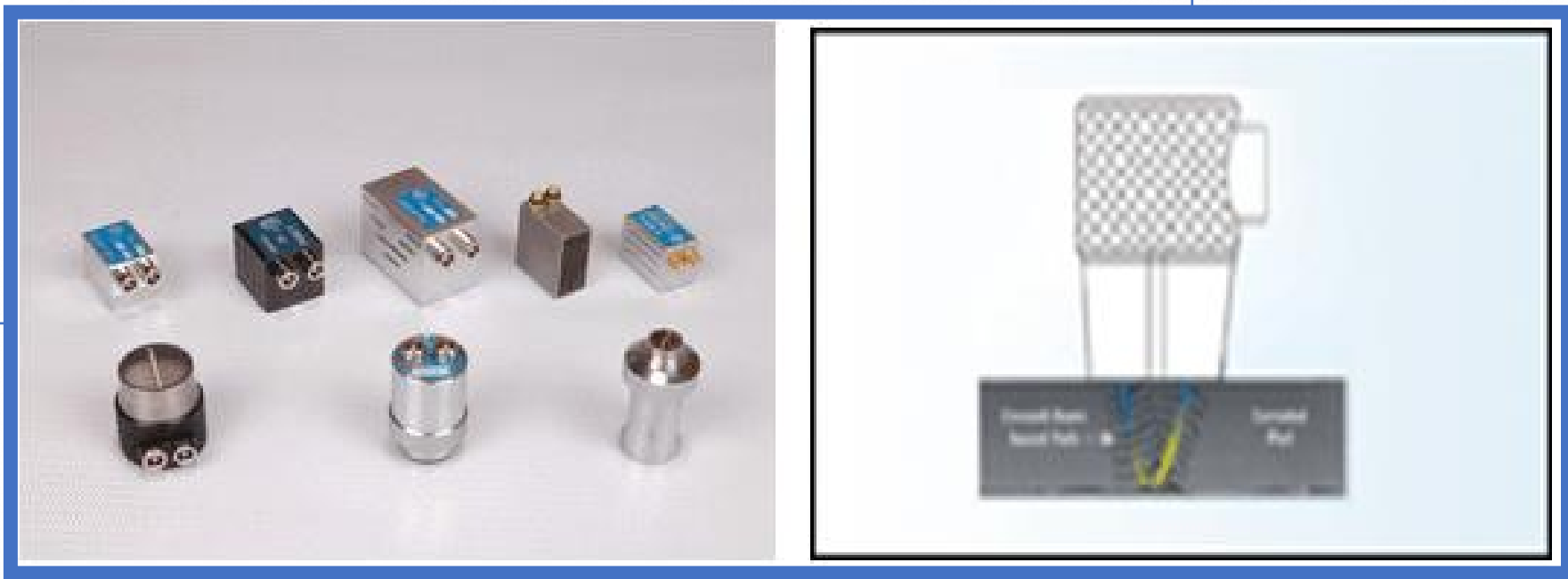
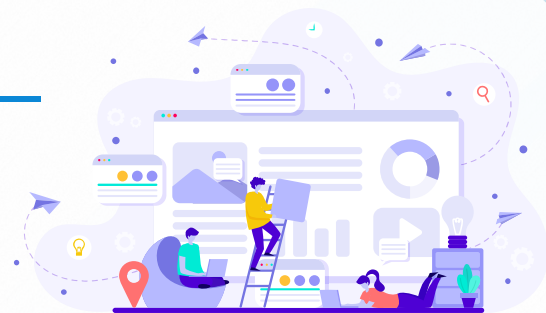
纵波直探头

5 超声波检测方法



横波斜探头

5 超声波检测方法



双晶探头

5 超声波检测方法

水浸探头

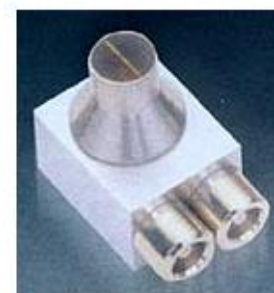
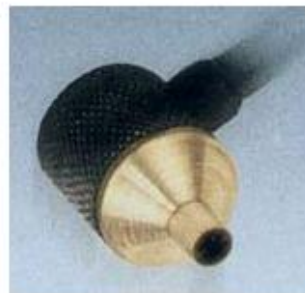
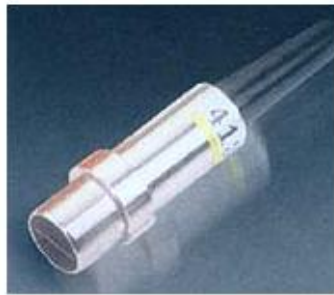


水浸聚焦探头



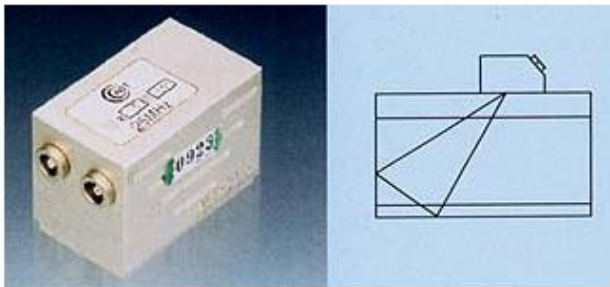
5 超声波检测方法

测厚探头

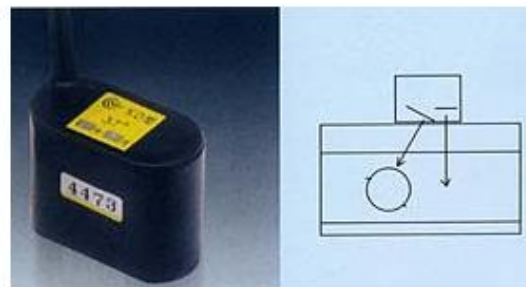


5 超声波检测方法

铁路钢轨对接焊缝探测用探头



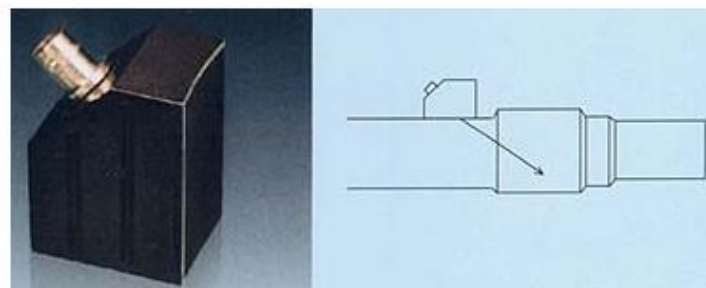
铁路钢轨螺孔、轮缘、轨腰和轨底探测用探头



铁路钢轨探测用的滚轴式探头（也称做轮式探头）

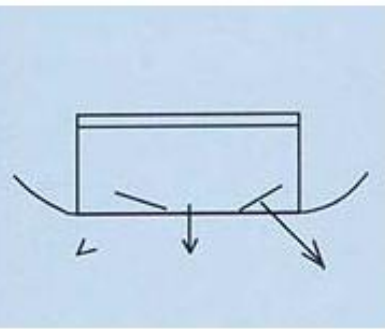


铁路车辆车轴镶入部内外侧手工探测用探头

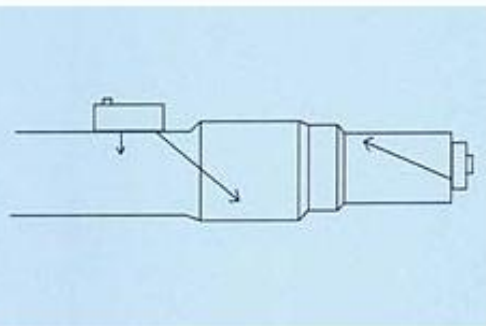


铁路车辆车轴卸荷槽手工探测用探头

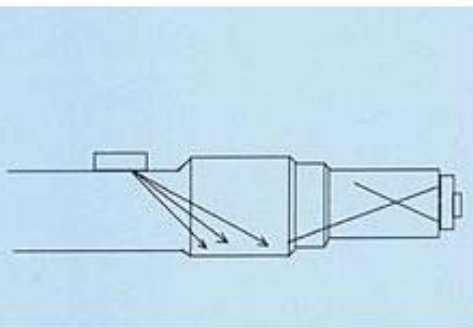
5 超声波检测方法



铁路钢轨探伤用滑板式探头



铁路车辆车轴微机自动探伤用探头



铁路车辆车轴微机成像检测用探头

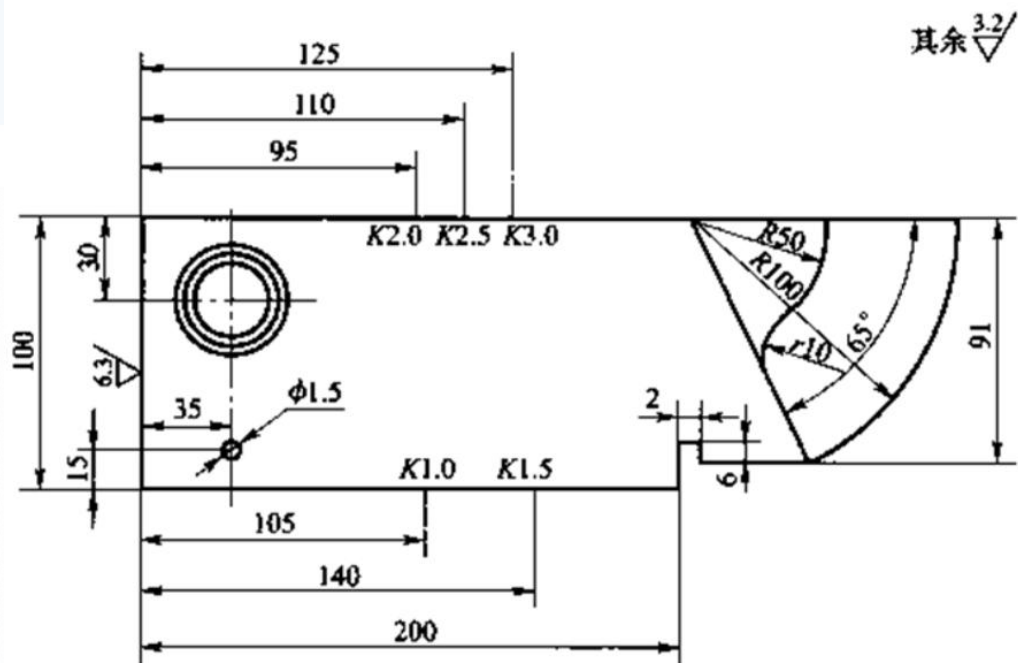
5 超声波检测方法

3. 试块与耦合剂

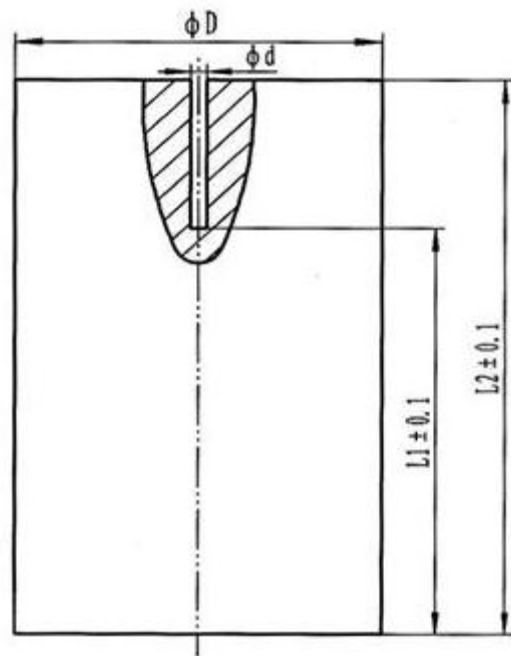
与一般的测量过程一样，为了保证检测结果的准确性与重复性、可比性，必须用一个具有已知固定特性的试样(试块)对检测系统进行校准。这种按一定的用途设计制作的具有简单形状人工反射体的试件即称为试块。超声检测用试块通常分为两种类型，即标准试块(校准试块)和对比试块(参考试块)。



5 超声波检测方法



5 超声波检测方法

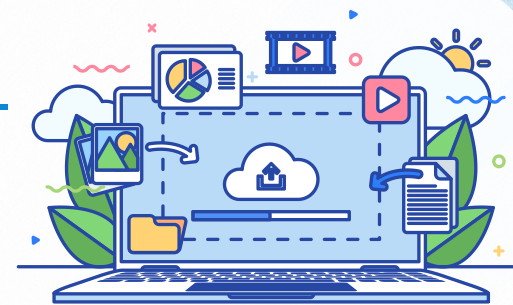


CS2剖析图



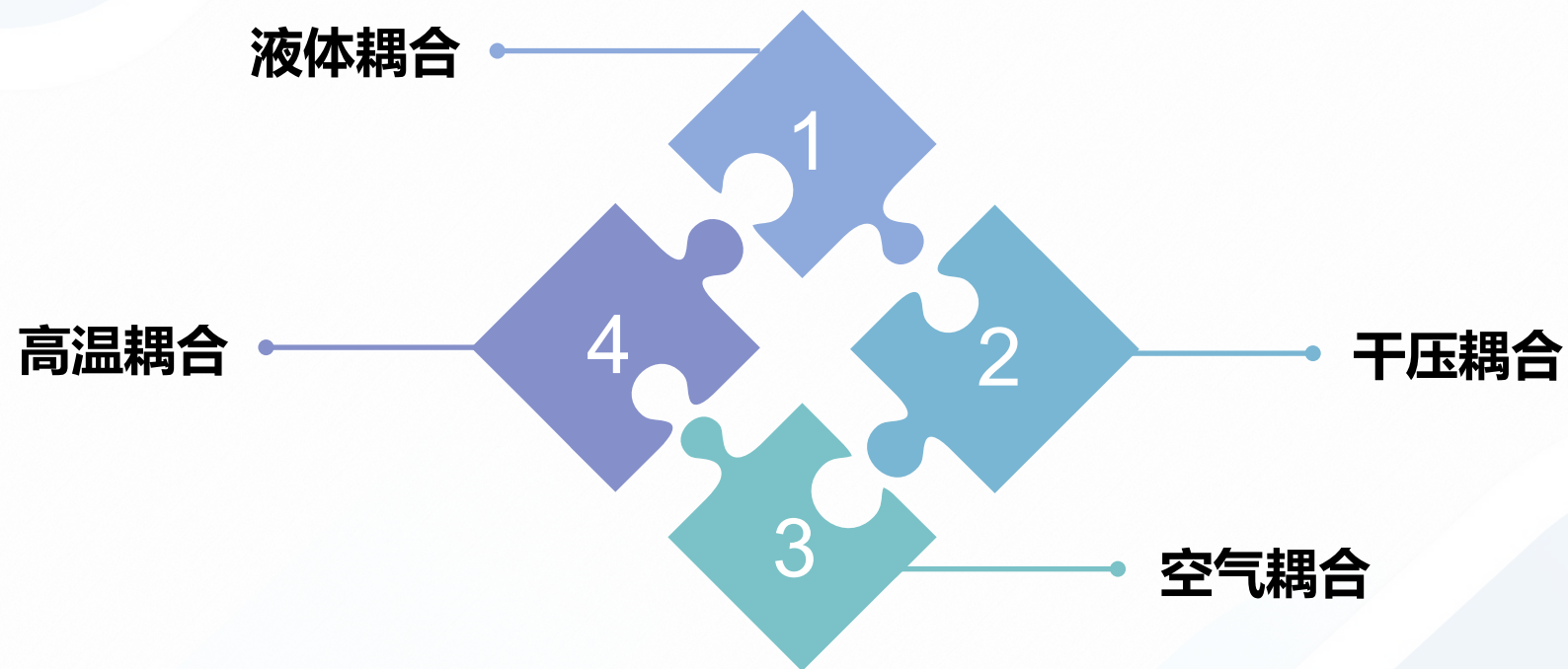
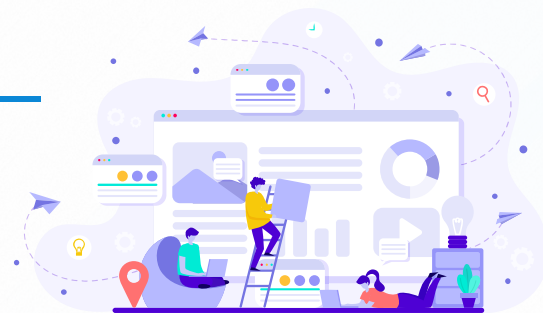
CS2实体拍摄

5 超声波检测方法

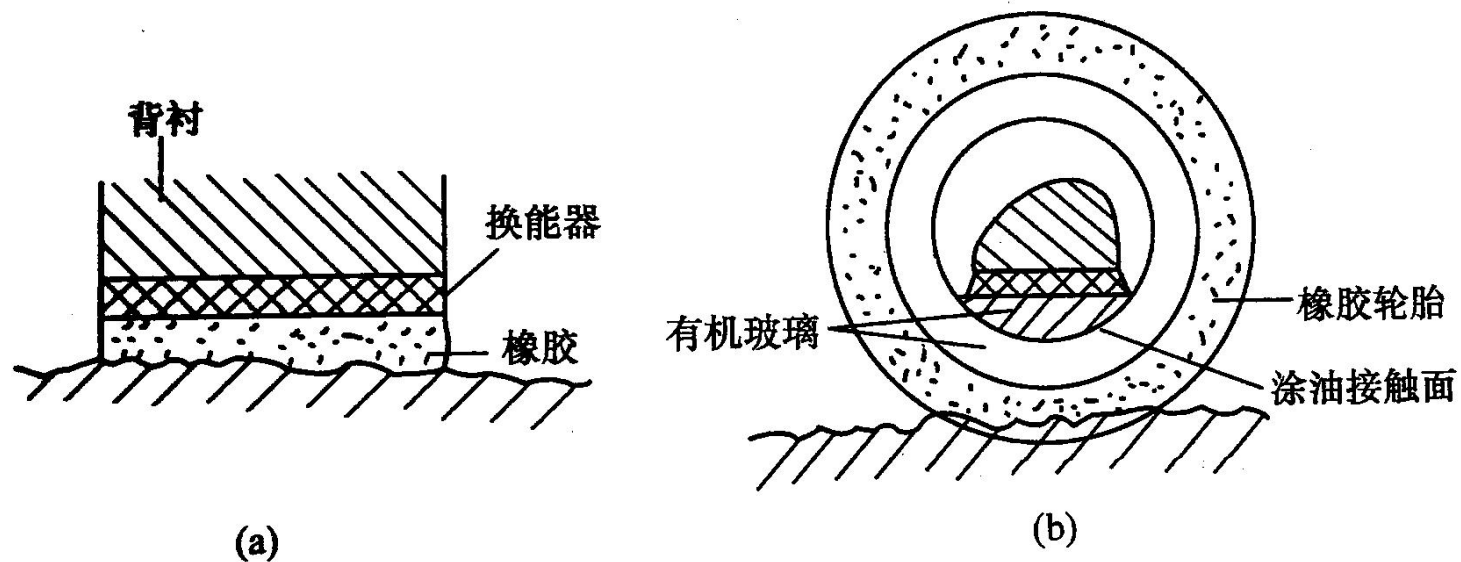


当探头和试件之间有一层空气时，超声波的反射率几乎为100%，即使很薄的一层空气也可以阻止超声波传入试件。因此，排除探头和试件之间的空气非常重要。耦合剂就是为了改善探头和试件间声能的传递而加在探头和检测面之间的液体薄层。耦合剂可以填充探头与试件间的空气间隙，使超声波能够传入试件，这是使用耦合剂的主要目的。除此之外，耦合剂有润滑作用，可以减少探头和试件之间的摩擦，防止试件表面磨损探头，并使探头便于移动。在液浸法检测中，通过液体实现耦合，此时液体也是耦合剂。常用的耦合剂有水、甘油、变压器油、化学浆糊等。

5 超声波检测方法

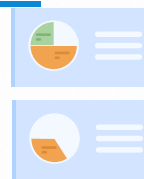


5 超声波检测方法

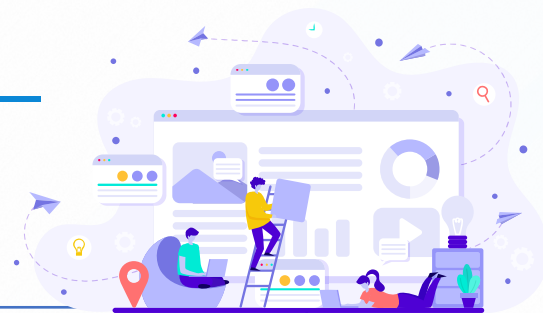


干压耦合示意图

(a) 用软橡胶或塑料垫作耦合剂；(b) 用软轮胎压向工件。



5 超声波检测方法



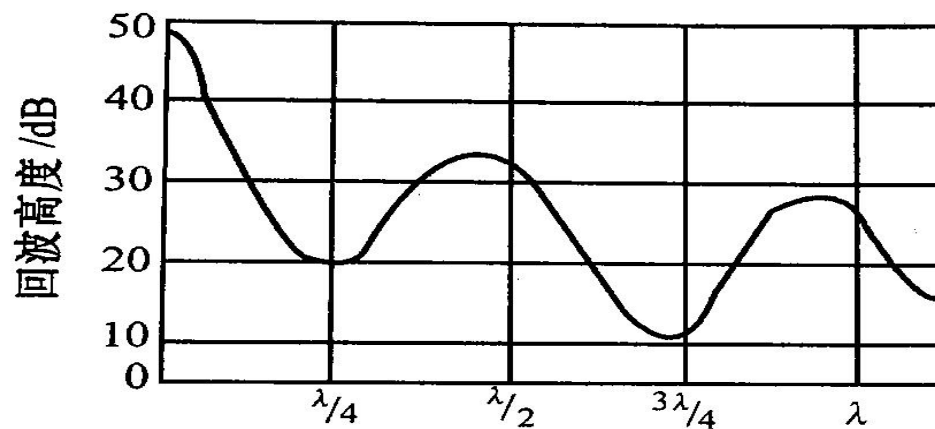
影响耦合的因素

耦合层厚度

表面粗糙度

声阻抗

工件表面形状



耦合层厚度 T

耦合层厚度 T 对耦合的影响

5 超声波检测方法

4.超声波检测系统性能

01

超声波检测仪器的主要性能

垂直线性：仪器示波屏上的波高与探头接收的信号之间成正比的程度，常以垂直线性误差来表示。

动态范围：仪器示波屏从垂直满刻度至0刻度之间容纳信号大小（dB值）的能力，不小于26dB。

水平线性：仪器示波屏上时基线显示的水平刻度值与实际声程间成正比的程度，用水平线性误差来表示。



5 超声波检测方法

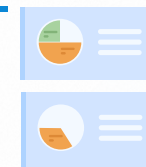
02 探头的主要性能

主声束偏斜：探头实际主声束与其理论几何中心轴线的偏离程度称为主声束的偏离，用偏离角 θ 来表示。

双峰：平行移动探头，同一反射体产生两个波峰的现象称为双峰，这是波束分叉引起的。

斜探头前沿长度：斜探头主声束轴线与探测面的交点称为入射点。斜探头入射点至探头前边沿的距离称为斜探头的前沿长度。测定探头的入射点和前沿长度是为了便于对缺陷定位和测定斜探头折射角(K 值)。

斜探头折射角(K 值)



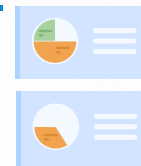
5 超声波检测方法

03

超声波检测仪器和探头组合的主要性能

仪器与探头组合的分辨力：仪器与探头组合的分辨力是指在示波屏上区分相邻两缺陷的能力。能区分的相邻两缺陷的距离愈小，分辨力就愈高。

仪器与探头组合的灵敏度余量：超声波检测中灵敏度广义的含意是指整个探伤系统(仪器与探头)发现最小缺陷的能力。发现的缺陷愈小，灵敏度就愈高。仪器与探头组合的灵敏度常用灵敏度余量来衡量。灵敏度余量是指仪器最大输出时(增益、发射强度最大，衰减和抑制为0)，使规定反射体回波达到基准波高所需衰减总量。灵敏度余量大，说明仪器与探头的灵敏度高。灵敏度余量与仪器和探头组合的综性能有关，因此又叫仪器与探头的综合灵敏度



5 超声波检测方法



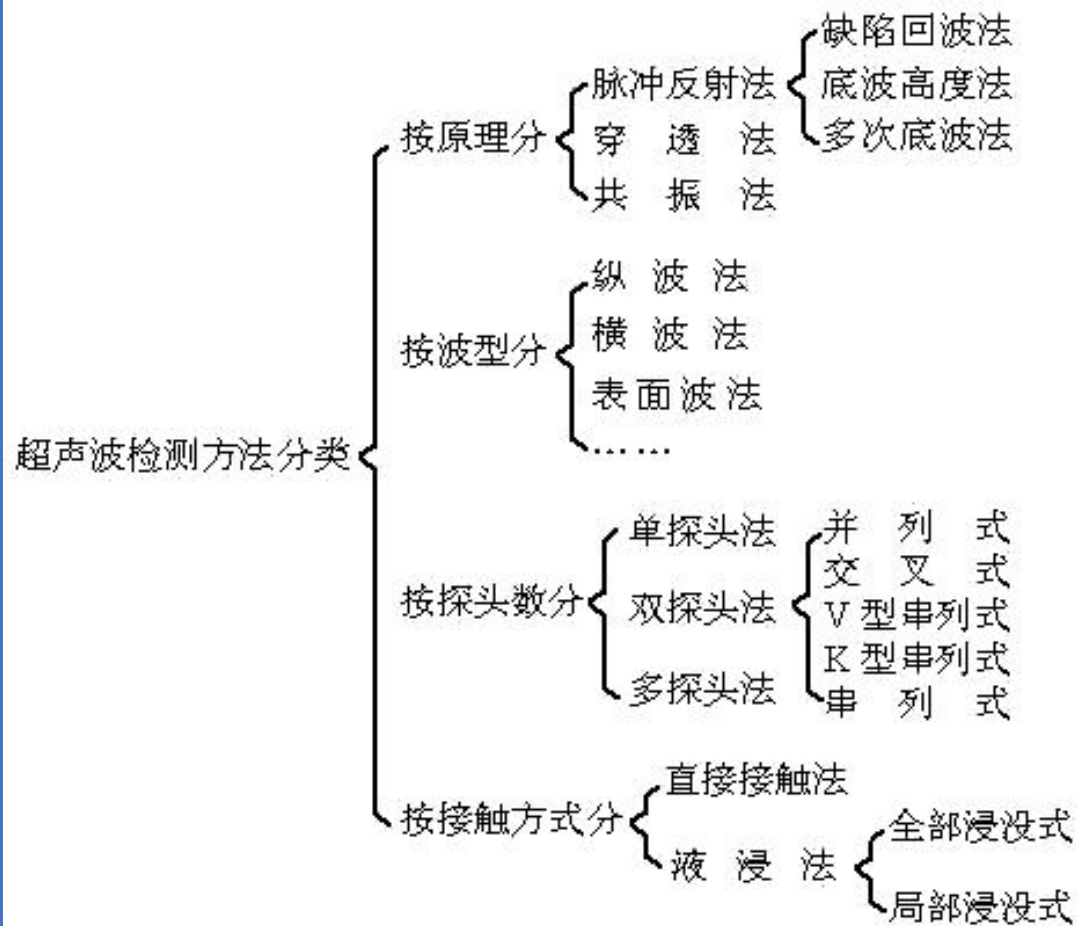
始脉冲占宽：在一定的灵敏度下，示波屏上高度超过垂直满幅度20%时的始脉冲延续长度。

盲区：盲区是指从探测面到能够发现缺陷的最小距离。盲区内灵敏度很低，难于发现缺陷。

信噪比：指示波屏上有用的最小缺陷信号幅度与无用的噪声杂波幅度之比。信噪比高，杂波少，对探伤有利。信噪比太低，容易引起漏检或误判，严重时甚至无法进行探伤。一般以200 / φ1平试孔反射回波 $H_{\text{信}}$ 与噪声杂波高 $H_{\text{噪}}$ 之间的分贝差来表示信噪比的大小。

5 超声波检测方法

二. 超声检测方法



5 超声波检测方法

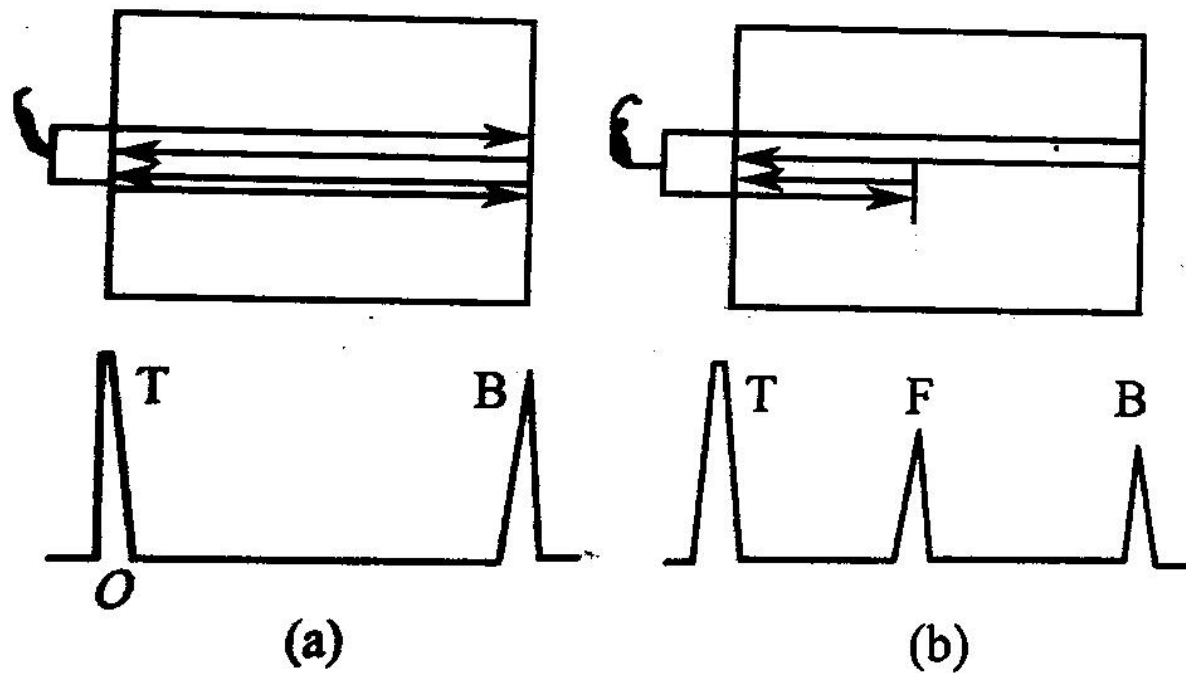
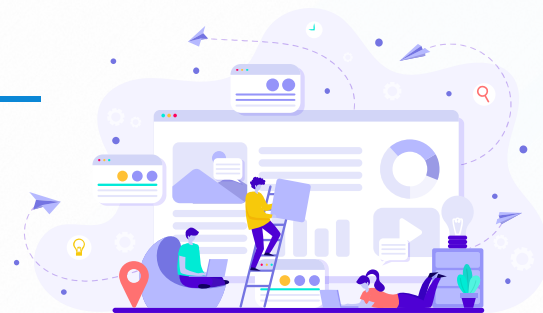
1.按原理分类:有脉冲反射法、穿透法和共振法。



01 脉冲反射法

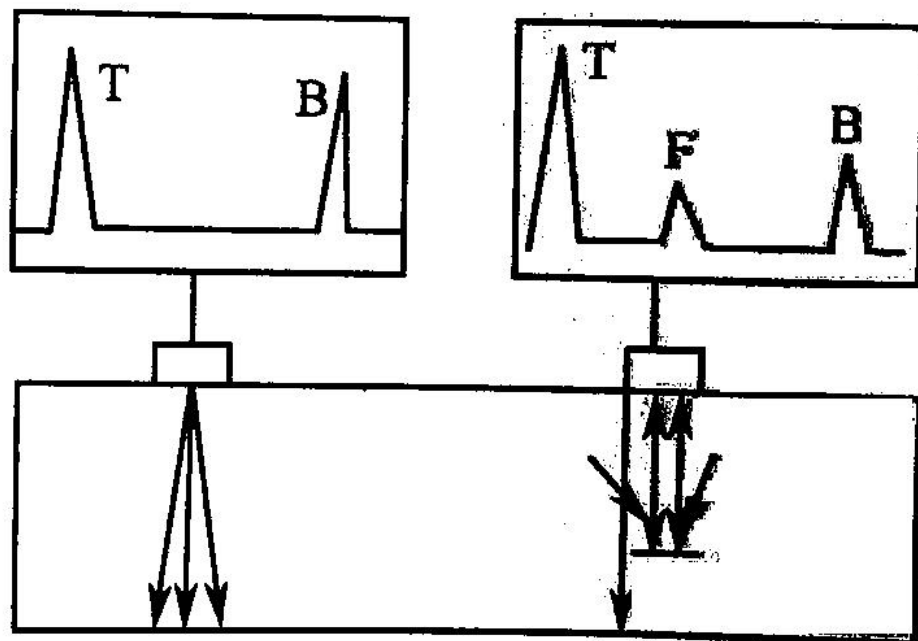
脉冲反射法是由超声波探头发射脉冲波到试件内部，通过观察来自内部缺陷或试件底面的反射波的情况来对试件进行检测的方法。

5 超声波检测方法



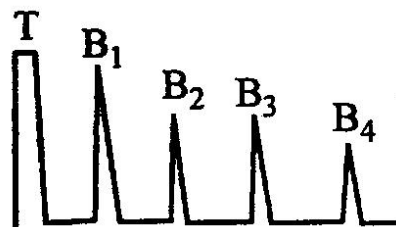
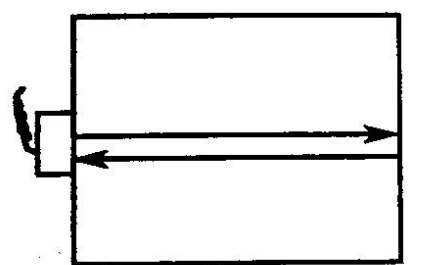
缺陷回波法示意图

5 超声波检测方法

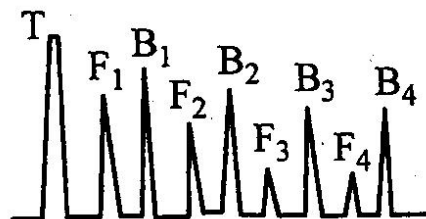
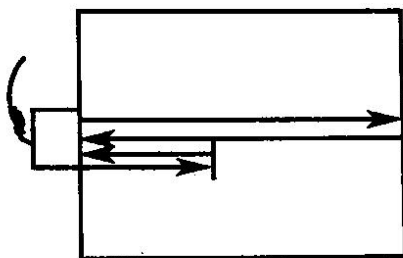


底波高度法示意图

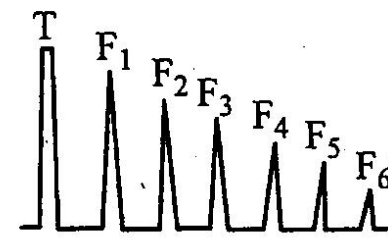
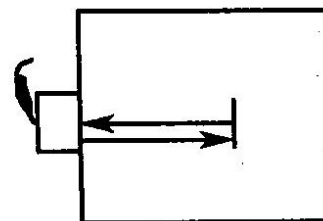
5 超声波检测方法



(a)



(b)



(c)

多次底波法示意图

(a) 无缺陷；(b) 小缺陷；(c) 大缺陷。

5 超声波检测方法

脉冲反射法的优点

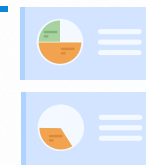
灵敏度高：只要缺陷的反射声压 P_r 达到晶片起始声压 P_0 的1%时，就能被仪器检出。

因而，能发现很小的缺陷；

缺陷定位精度高：它是利用缺陷波的传播时间，通过调节扫描速度，即调节时基轴与声程的比例来对缺陷定位的。因此，只要仪器的水平线性好，缺陷定位精度就高；

适应范围广：配以不同的探头，就能实现纵波探伤、横波探伤、表面波探伤和板波探伤；改变耦合方式，又能实现接触法探伤和液浸法探伤；

探伤操作方式灵活：脉冲反射法不要专用扫查装置，为各种场合下的探伤作业带来了极大的方便和灵活性。



5 超声波检测方法

脉冲反射法的不足

- 存在一定的盲区，对表面和近表面缺陷的检出能力差，对薄壁工件探伤难度较大；
- 对与声束轴线不垂直的缺陷反射面，探头往往收不到缺陷回波信号，易造成缺陷的漏检；
- 声波要走过往复声程，对于高衰减材料和粗晶材料的检测较不适宜。

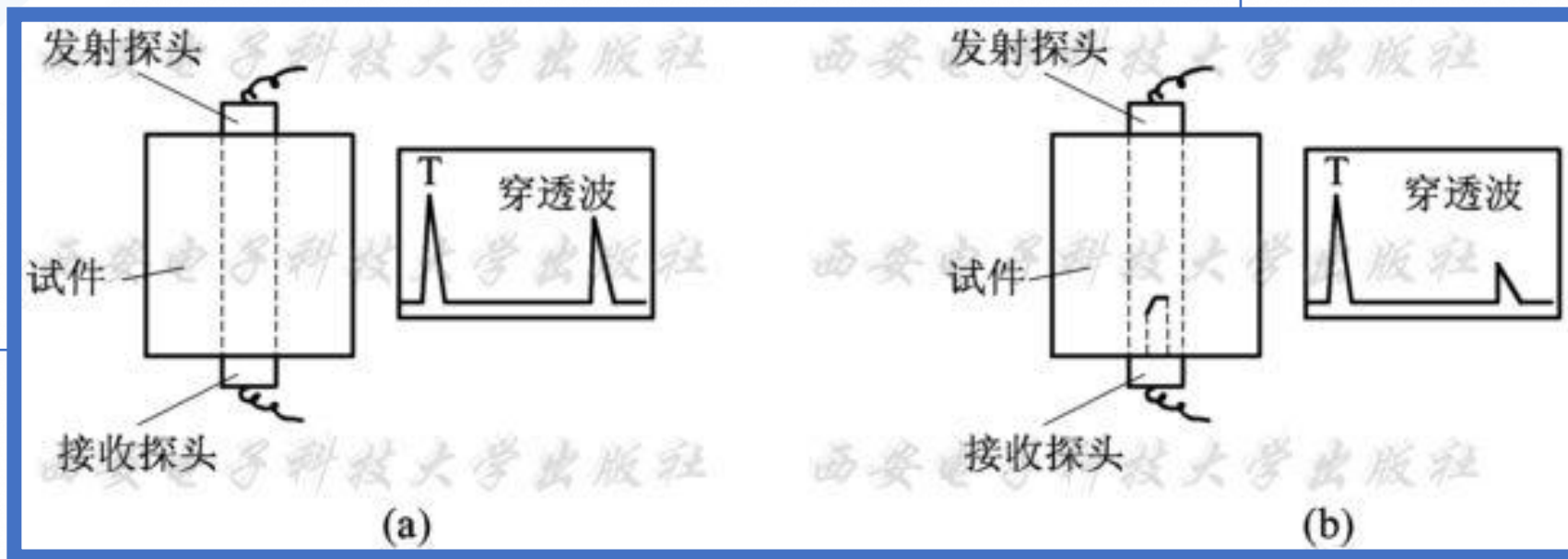
5 超声波检测方法

02 穿透法

穿透法通常采用两个探头，分别放置在试件两侧，一个将脉冲波发射到试件中，另一个接收穿透试件后的脉冲信号，依据脉冲波穿透试件后幅值的变化来判断内部缺陷的情况。



5 超声波检测方法



直射声束穿透法

(a) 无缺陷;

(b) 有缺陷

5 超声波检测方法

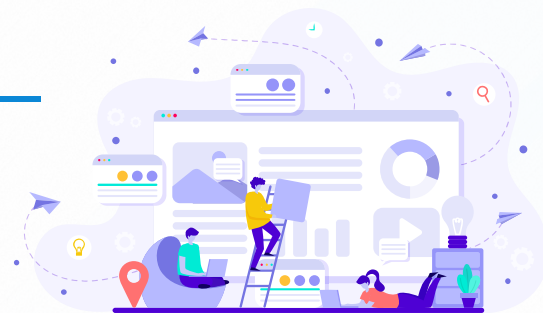
03 共振法



若频率可调的连续超声波在被检工件内传播，当试件的厚度为超声波的半波长的整数倍时，将引起共振，仪器显示出共振频率，用相邻的两个共振频率之差可算出试件厚度。当试件内存在缺陷或工件厚度发生变化时，将改变试件的共振频率。依据试件的共振特性，来判断缺陷情况和工件厚度变化的方法称为共振法。共振法常用于试件测厚。

5 超声波检测方法

2.按波型分类，有纵波法、横波法、表面波法和板波法；



01 使用直探头发射纵波，进行探伤的方法，称为纵波法。

此法波束垂直入射至试件探测面，以不变的波型和方向透入试件，所以又称为垂直入射法，简称垂直法。垂直法分为单晶探头反射法、双晶探头反射法和穿透法。常用的是单晶探头反射法。垂直法主要用于铸造、锻压、轧材及其制品的探伤。

5 超声波检测方法

纵波法的优点

- a. 垂直入射，对与探测面平行的缺陷检出效果最佳。
- b. 对于同一介质，纵波传播速度大于其它波型的速度，对相同频率而言波长最长，因而穿透能力强，可探测工件的厚度是所有波型中最大的；晶界反射或散射的敏感性较差，可用于粗晶材料的探伤。
- c. 纵波法探伤时，波型和传播方向不变，所以缺陷定位比较方便。

纵波法的缺点

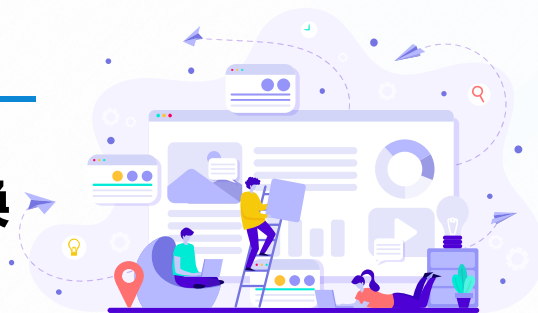
- a. 难于发现垂直于或接近垂直于探测面的缺陷。
- b. 由于盲区和分辨力的限制，其中反射法只能发现试件内部离探测面一定距离以外的缺陷。



5 超声波检测方法

02

将纵波通过楔块、水等介质倾斜入射至试件探测面，利用波型转换得到横波进行探伤的方法，称为横波法。



由于透入试件的横波束与探测面成锐角，所以又称斜射法。此方法主要用于管材、焊缝的探伤。其它试件探伤时，则作为一种有效的辅助手段，用以发现垂直探伤法不易发现的缺陷。

横波法的优点

- a. 倾斜入射，能探测垂直于或接近垂直于探测面的缺陷。
- b. 同一介质中同一频率的超声波波长较短，灵敏度相对较高。

横波法的缺点

- a. 正因为波长较短，在介质中的衰减较大，探测距离较短。
- b. 倾斜入射，缺陷定位相对较复杂。

5 超声波检测方法

03

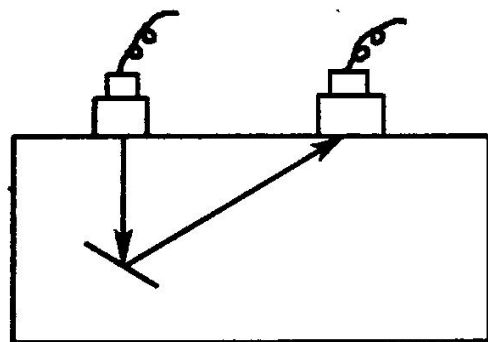
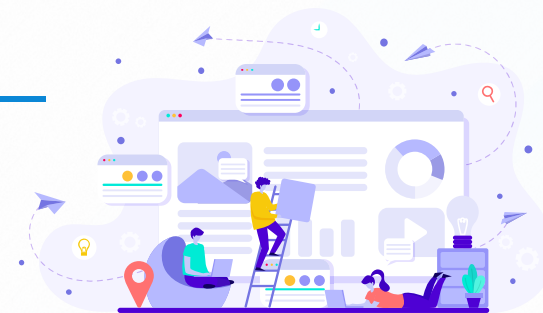
使用表面波进行探伤的方法，称为表面波法。

这种方法主要用于表面光滑的试件。表面波波长比横波波长还短，因此衰减也大于横波。同时，它仅沿表面传播，对于表面上的复层、油污、不光洁等，反应敏感，并被大量地衰减。利用此特点可以通过手沾油在声束传播方向上进行触摸并观察缺陷回波高度的变化，对缺陷定位。

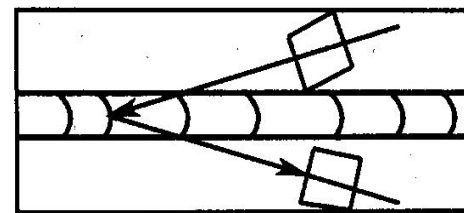


5 超声波检测方法

3.按探头数目分类，有单探头法、双探头法和多探头法；

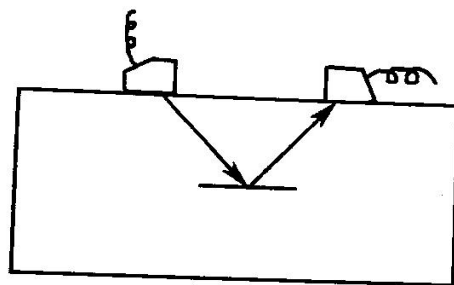


并列式双探头法示意图

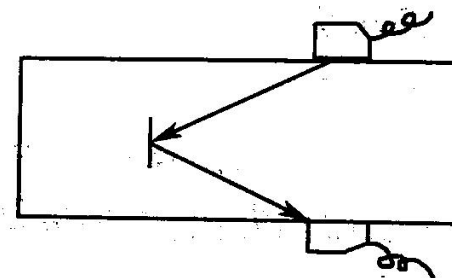


交叉式双探头法示意图

5 超声波检测方法

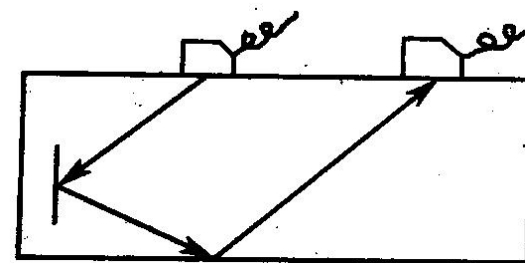


V 型串联式双探头法示意图

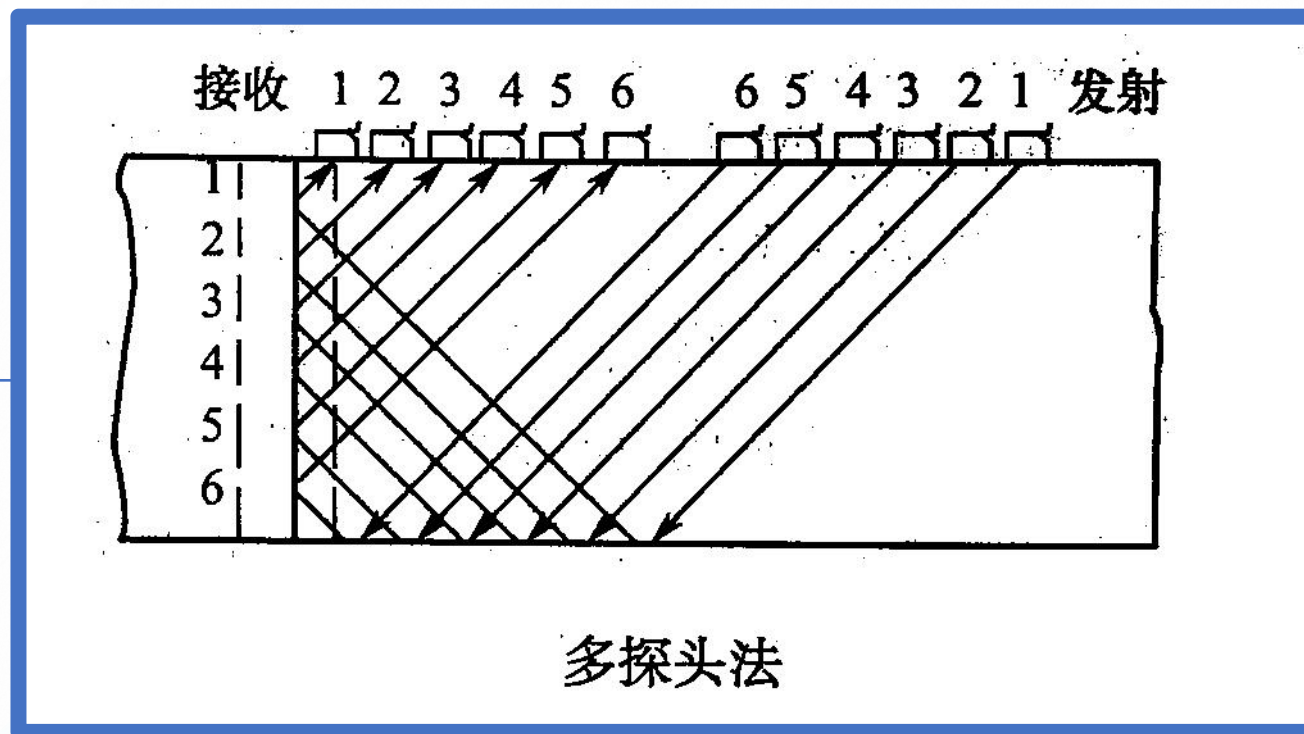
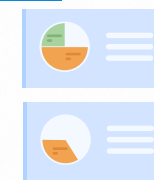


K 型串联式双探头法示意图

串联式探头法示意图



5 超声波检测方法



5 超声波检测方法

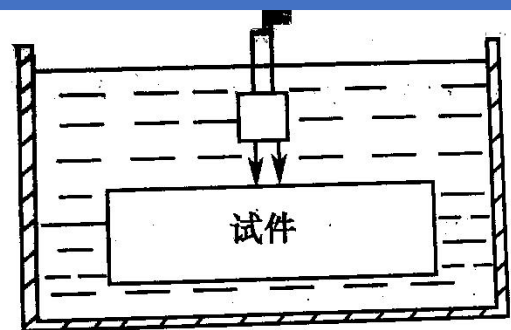
4.按耦合方式分类，有接触法和液浸法



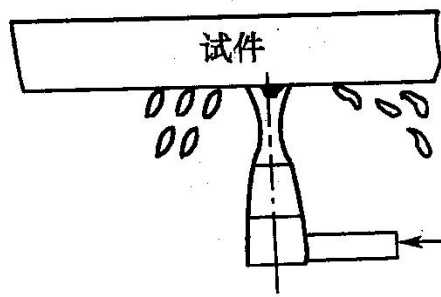
探头与试件探测面之间，涂有很薄的耦合剂层，因此可以看作两者直接接触，这种探伤方法称为直接接触法。此方法操作方便，探伤图形较简单，判断容易，检出缺陷灵敏度高，是实际探伤中用得最多的方法。但是，直接接触法探伤的试件，要求探测面光洁度较高。

液浸法是在探头与试件之间填充一定厚度的液体介质作耦合剂，使声波首先经过液体耦合剂，而后再入射到试件中，探头与试件并不直接接触。

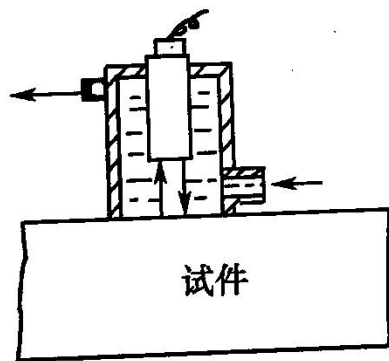
5 超声波检测方法



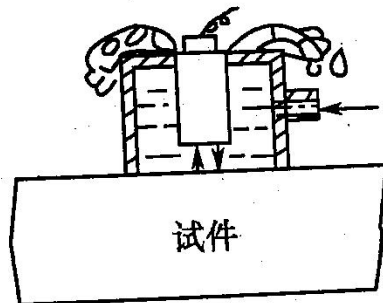
(a)



(b)



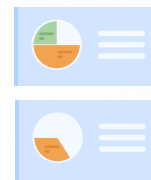
(c)



(d)

液浸法示意图

(a) 全浸没式；(b) 喷液式局部浸没；(c) 通水式局部浸没；(d) 满溢式局部浸没。



5 超声波检测方法

液浸法的优点

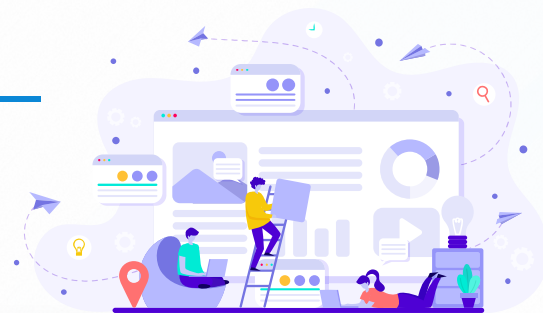
- 液浸检测有良好的适应性，例如，在大多数接触耦合应用中都可以使用液浸耦合方法。
- 液浸法还提供均匀的良好耦合并且无须更换换能器即能方便地改变声透射角。
- 使用中换能器不易受到磨损。
- 液浸法易于实现自动化检测。
- 液浸法检测对复合材料可提供良好的声阻抗匹配。

液浸法的缺点

- 由于液浸法检测系统需要配备供液装置，自动探伤系统还需专门的扫查装置，成本相对较高。
- 液浸法不适用于检测易于腐蚀的被检物；

5 超声波检测方法

三. 超声检测通用技术



超声检测方法可采用多种检测技术，每种检测技术在实施过程中，都有其需要考虑的特殊问题，其检测过程也各有特点。但各种超声检测技术又都存在着通用的技术问题。例如，检测的过程都可归纳为以下几个步骤：

- ① 试件的准备。
- ② 检测条件的确定，包括超声波检测仪、探头、试块等的选择。
- ③ 检测仪器的调整。
- ④ 扫查。
- ⑤ 缺陷的评定。
- ⑥ 结果记录与报告的编写。



5 超声波检测方法

1. 超声波检测仪的选择



一般市场上出售的A型脉冲反射式超声波检测仪已具备一些基本功能，其基本性能参数(垂直线性、水平线性等)也能满足通常超声检测的要求。对于给定的任务，在选择超声波检测仪时，主要考虑的是该任务的特殊要求，可从以下几方面进行考虑：

- (1) 所需采用的超声频率特别高或特别低时，应注意频带宽度。
- (2) 对薄试件检测和近表面缺陷检测时，应注意发射脉冲是否可调为窄脉冲。
- (3) 检测大厚度试件或高衰减材料时，选择发射功率大、增益范围大、电噪声低的超声波检测仪，有助于提高穿透能力和小缺陷显示能力。

5 超声波检测方法



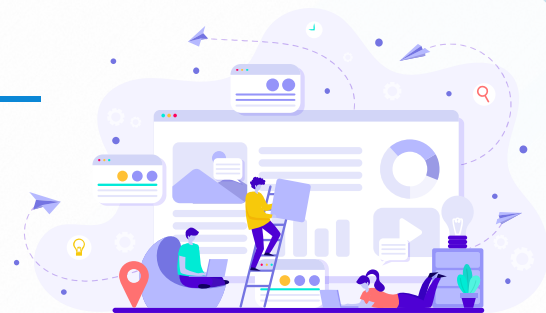
- (4) 对衰减小或厚度大的试件，选用重复频率可调为较低数值的超声波检测仪，可避免幻象波的干扰。
- (5) 室外现场检测时，应选择重量轻，荧光屏亮度好，抗干扰能力强的便携式超声波检测仪。
- (6) 自动快速扫查时应选择最高重复频率高的超声波检测仪。

5 超声波检测方法

2. 探头的选择

01 频率

超声波的频率在很大程度上决定了其对缺陷的探测能力。频率的选择可以这样考虑：对于小缺陷、近表面缺陷或薄件的检测，可以选择较高频率；对于大厚度试件、高衰减材料，应选择较低频率。在灵敏度满足要求的情况下，选择宽带探头可提高分辨力和信噪比。针对具体对象，适用的频率需在上述考虑当中取得一个最佳的平衡，既要保证所需尺寸缺陷的检出，并满足分辨力的要求，也要保证在整个检测范围内具有足够的灵敏度与信噪比。



5 超声波检测方法



由于波的绕射，使超声波检测灵敏度大约为 $\lambda / 2$ ，因此提高频率，有利于发现更小的缺陷。

频率高，脉冲宽度小，分辨力高，有利于区分相邻缺陷。

由 $\theta = \arcsin 1.22\lambda / D$ 可知，频率高，波长短，则半扩散角小，声束指向性好，能量集中，有利于发现缺陷并对缺陷定位。

由 $N = D^2 / \lambda$ 可知，频率高，波长短，近场区长度大，对探伤不利。

频率增加，衰减急剧增加，对探伤不利。

5 超声波检测方法

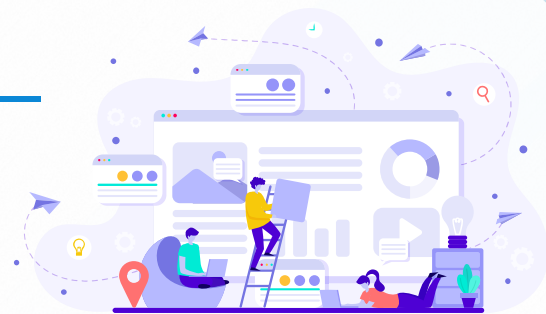
02 晶片尺寸



探头晶片尺寸对检测的影响主要是通过其对声场特性的影响体现出来的。

多数情况下，检测大厚度的试件时，采用大直径探头较为有利；检测厚度较小的试件时，则采用小直径探头较为合理。应根据具体情况，选择满足检测要求的探头。

5 超声波检测方法



由 $\theta = \arcsin 1.22\lambda / D$ 可知，晶片尺寸增加，半扩散角减少，波束指向性变好，超声波能量集中，对探伤有利。

由 $N = D^2 / \lambda$ 可知，晶片尺寸增加，近场区长度迅速增加，对探伤不利。

晶片尺寸大，辐射的超声波能量大，探头未扩散区扫查范围大，远距离扫查范围相对变小，发现远距离缺陷能力增强。

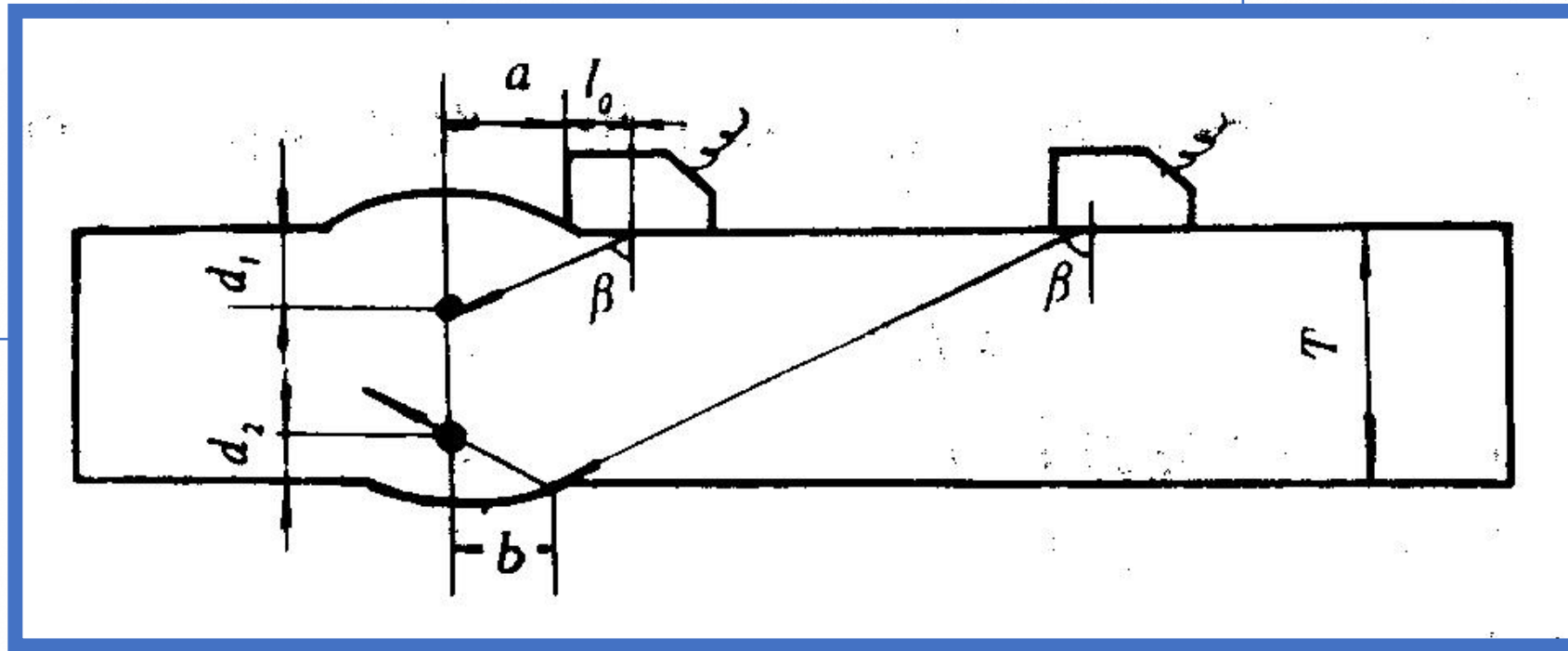
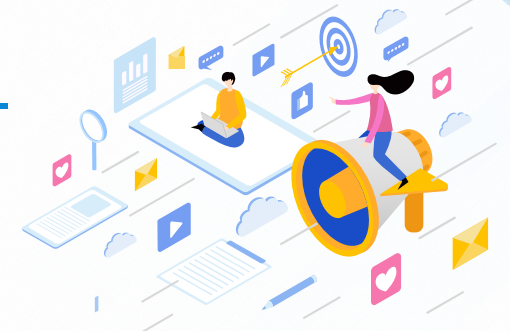
5 超声波检测方法

03 折射角(K 值)的选择



对于探测除焊缝以外的工件（例如锻件、钢管等），宜采用折射角为 40° 左右的横波斜探头，因为用有机玻璃斜探头探伤钢制工件， $\beta_s = 40^\circ (K = 0.84)$ 左右时，声压往复透射率最高，即探伤灵敏度最高；缺陷距探测面深度相同的情况下，折射角小，声程短，有利于缺陷的探测。

5 超声波检测方法



5 超声波检测方法

3. 耦合剂的选择

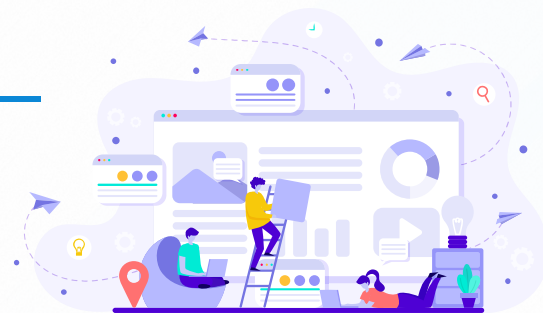
选择耦合剂主要考虑以下几方面的要求：

- 透声性能好。声阻抗尽量和被探测材料的声阻抗相近。
- 有足够的润湿性、适当的附着力和粘度。
- 对试件无腐蚀，对人体无损害，对环境无污染。
- 容易清除，不易变质，价格便宜，来源方便。



5 超声波检测方法

4. 试块的选择

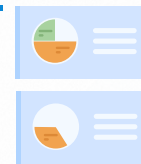


试块的种类因方法和标准而异，但其人工反射体类型不外乎是平底孔、长横孔、短横孔、平底槽、V型槽和柱孔等，把它们作为检测对象中缺陷的比较基准。

5 超声波检测方法

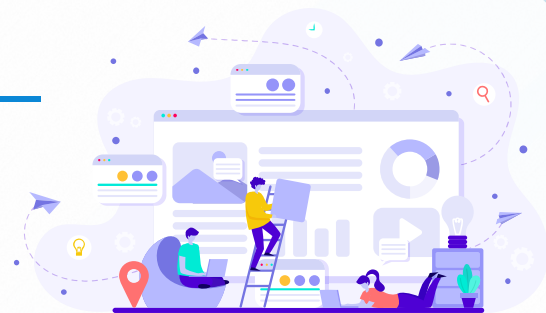
01 平底孔

在远场时，平底孔返回声压随其孔径和距探头距离变化的规律性较好，因此在纵波直探头探伤中几乎都用平底孔作为评价基准和参考反射体孔型。前述AVC定量原理就是基于平底孔及其反射规律建立起来的。平底孔适用于小于声束截面且在声束垂直方向上有一定投影面积的片状或体积状缺陷的定量，即所谓定缺陷的平底孔当量尺寸。“缺陷的平底孔当量尺寸”是指在相同探测条件下缺陷的反射波与同声程平底孔回波高度相等时，所对应的平底孔的尺寸。平底孔的制作要求较高，孔的尺寸要精确，孔的垂直度偏差要很小，平底面的光洁度要求很高。



5 超声波检测方法

02 长横孔



孔长大于声束直径的圆柱孔称为长横孔。当长横孔贯通孔试块时又可称为横通孔。长横孔通广泛于焊缝的超声波探伤，主要因为焊缝中出现的缺陷多为长条形，长横孔的反射规律与其接近；圆柱面具有各向对称性，能适应不同角度的斜探头；长横孔反射声压的规律性较好，利用长横孔反射波所作的距离—波幅曲线较为光顺。

5 超声波检测方法

03 短横孔

孔长大于孔径，但小于声束直径的圆柱孔称为短横孔。它的反射声压变化规律在近场时类似于长横孔，在远场时接近于平底孔。它也能适应不同角度的斜探头，故有的焊缝超声波探伤标准中采用了这种孔型作为评价基准和参考反射体。短横孔加工难度相对较大，为克服边界效应，在试块的侧面还要加工一个半圆弧（实际上也只能部分消除边界效应）。

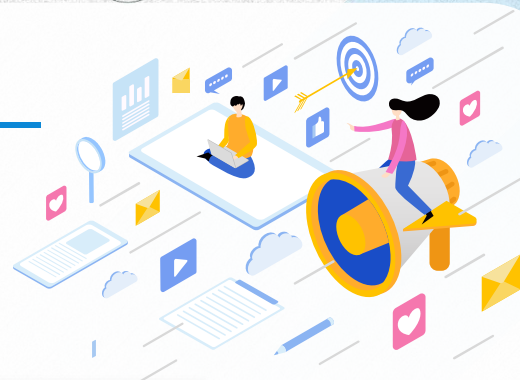
04 V型槽

钢管超声波探伤时一般采用V型槽作为调整灵敏度和判伤的基准。通常是从被探钢管上截取一段，在管子的内外壁各加工一个V型槽，其张角为60°，深度为管子壁厚的一定百分比（例如管壁厚度的5%）。



5 超声波检测方法

05 扫查



在进行超声波检测时，探伤面上探头与试件的相对运动称为扫查。扫查一般考虑两个原则，

- 一是保证试件的整个检查区有足够的声束覆盖以避免漏检；
- 二是扫查过程中声束入射方向始终符合所规定的要求。

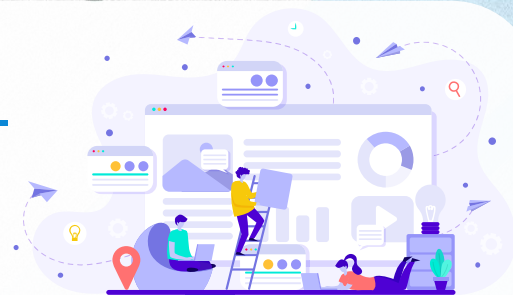
5 超声波检测方法

(1) 扫查速度

为使缺陷回波能充分地探头接收，并在示波屏上有明显的显示或在记录装置上能得到明确的记录，扫查速度 V 应当适当。通常，这取决于探头有效尺寸和仪器重复频率。探头有效直径 D 愈大，重复频率 f 愈高，扫查速度 V 可以相应高一些。一般标准都规定扫查速度不得大于 $150\text{mm} / \text{s}$ 。

(2) 保持探头移动平稳

扫查过程中应给探头以适当的和一致的压力(指直接接触而言)；否则，耦合液厚度会发生变化，使探伤灵敏度不稳定。



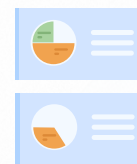
5 超声波检测方法

(3) 方向性和覆盖率

扫查过程中，探头的方向应严格按照扫查方式的规定(斜射探头尤应注意)。因为探头移动方向的改变对于单探头探伤，将因入射波的方向改变而使缺陷检出灵敏度变化；对于双探头法探伤，则可使反射或透射波不能为另一探头接收，故保持一定的方向非常重要。为免漏检，每次扫查应有一定比例的声束覆盖率。

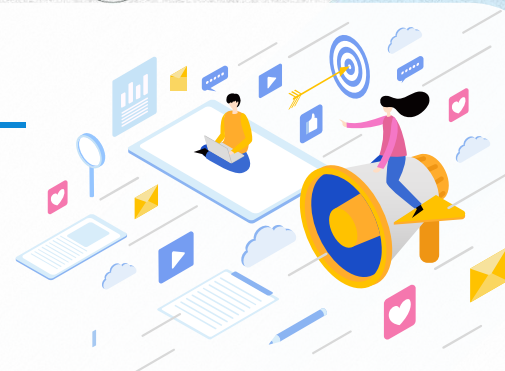
(4) 同步与协调

双探头法探伤时，不管是纵波法或是横波法，两探头的相对移动必须同步或协调，才能使缺陷回波为另一探头所接收。



5 超声波检测方法

06 缺陷评价



(1) 定位

(2) 定量

当缺陷小于声束直径时，通常采用规则人工反射体的尺寸来定量缺陷的尺寸。在相同探测条件下缺陷的反射波与规则人工反射体回波高度相等时，所对应的规则反射体的尺寸，称为“缺陷当量尺寸”。采用缺陷当量尺寸来定量缺陷尺寸的方法称为当量法，又分为试块法、计算法和AVG法。

5 超声波检测方法



(3) 定性

实际探伤中常常是根据经验结合工件的加工工艺、缺陷的特征、缺陷波形和底波情况来综合分析估计缺陷的性质。

a. 考虑加工工艺的因素

工件内所形成的各种缺陷与加工工艺密切相关。例如焊接过程中可能产生气孔、夹渣、未熔合、未焊透和裂纹等缺陷。铸造过程中可能产生气孔、缩孔、疏松和裂纹等缺陷。锻造过程中可能产生夹层、折迭、白点和裂纹等缺陷。在探伤以前应查阅有关工件的图纸资料，了解工件的材料、结构和加工工艺，这对于正确估计缺陷的性质是十分有益的。

5 超声波检测方法

b.考虑缺陷特征的因素

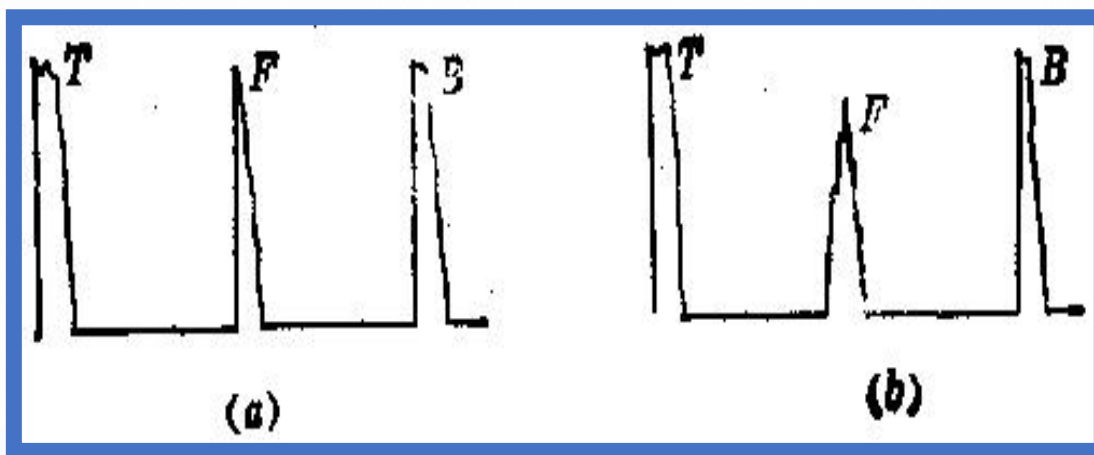
- 缺陷特征是指缺陷的形状、大小和密集程度等。
- 当在不同的探测面上探测，其缺陷回波高度显著不同时，例如平行于缺陷的探测面上探测，缺陷回波高。在垂直于缺陷的探测面上探测，缺陷回波很低，甚至无缺陷波，反映的是平面形缺陷特征，一般可判为裂纹、夹层等缺陷。
- 当在不同的探测面上探测，缺陷回波无明显变化时，反映的是点状缺陷的特征，一般可判为气孔、小夹渣等点状缺陷。
- 当在示波屏上显示出密集缺陷反射波，且随探头移动，此起彼伏，在不同方向探测情况类似，这是密集型缺陷的特征。一般可判为疏松、白点、密集小气孔、密集夹渣等密集缺陷



5 超声波检测方法

c. 根据缺陷波形的分析

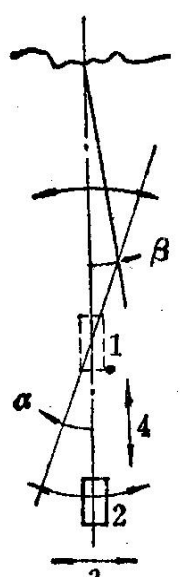
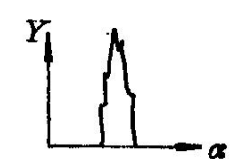
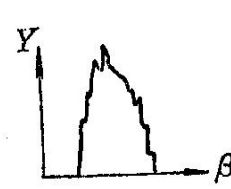
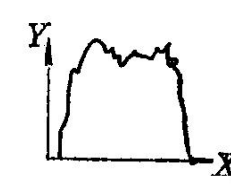

缺陷波形分为静态波形和动态波形，静态波形是指探头不动时的缺陷波的高度、形状和密集程度。动态波形是指探头在移动过程中，缺陷波的变化情况。



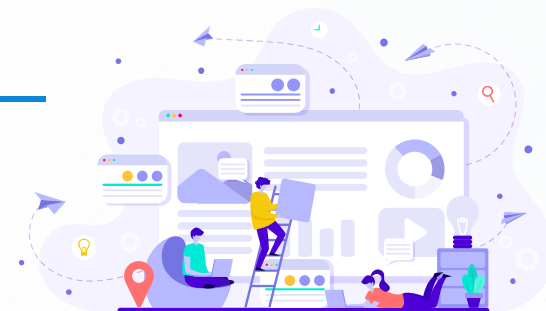
气孔和夹渣的波形



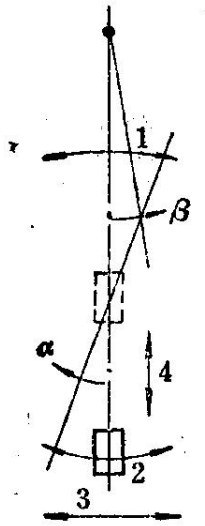
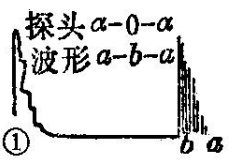
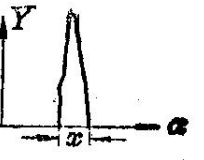
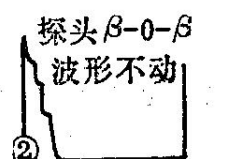
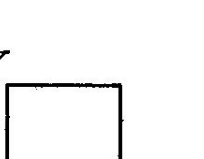
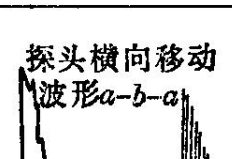

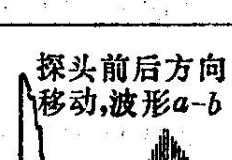

5 超声波检测方法

缺陷形状	MA显示*图形	特征包络线	备 注
	探头 α -0- α 波形 a - b - a ①		包络线尖端处的下凹是由于声波在裂纹的凹凸处衍射而损失能量后形成的
	探头 β -0- β 波形 a - b - a ②		包络线呈凹凸状，象是塌了顶部的三角形
	探头横向移动， 波形仅少许 移动 ③		包络线与缺陷位置有关。回波波高的起伏是由于探头至缺陷的距离变化造成的。由 x 值可决定缺陷的横向尺寸
	探头前后方向 移动 波形 b - a ④		当声束的前边缘碰到缺陷后，随着探头向前推进，回波波高迅速增加，然后又迅速减少。 x 值与缺陷高度(缺陷在深度方向的投影尺寸)及探头入射角有关

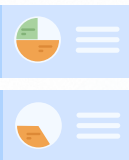
凹凸状缺陷(裂纹)的动态波形



5 超声波检测方法

缺陷形状	MA显示图形	特征包络线	备注
<p>单个气孔或圆形夹渣</p> 	<p>探头α-0-α 波形a-b-a</p> <p>①</p> 		包络线尖锐，消失迅速。 x 值由缺陷大小决定。回波波高不规则不是由于缺陷表面不平整，而是由于缺陷的凹凸形状。
	<p>探头β-0-β 波形不动</p> <p>②</p> 		缺陷回波波高是恒定的，不消失。包络线是正方形的
	<p>探头横向移动 波形a-b-a</p> <p>③</p> 		包络线与①的形状类似，但端部是圆的，底部要比①的宽
	<p>探头前后方向移动，波形a-b</p> <p>④</p> 		当声束前边缘碰到缺陷后，随着探头的前移，回波波高是迅速增加，随后又缓慢增高，回波的消失速度也较快

单个气孔或圆形夹渣的动态波形



5 超声波检测方法

d.根据底波变化的分析

工件内部存在缺陷时，超声波被缺陷反射，使达到工件底面的声能减少，底波高度降低，甚至消失。当缺陷波与底波共存时，可认为是点状缺陷，如气孔、夹渣等或面积较小的其他缺陷。当示波屏上出现此起彼伏的缺陷波，底波明显下降时，可认为是密集性夹杂物或白点，当缺陷波和底波都很低，或者两者都没有时，可能是疏松或者内部晶粒粗大或者有大而倾斜的缺陷。



6 超声检测技术的应用

一. 典型构件的超声探伤技术

1. 锻件检测

锻件的种类和规格很多，常见的类型有：**饼盘件**、**环形件**、**轴类件**和**筒形件**等。锻件中的缺陷多呈现面积形或长条形的特征。由于超声检测技术对面积型缺陷检测最为有利，因此锻件是超声检测实际应用的主要对象。



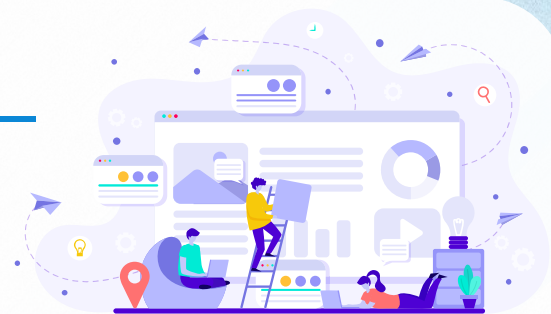
6 超声检测技术的应用

01 锻件中的常见缺陷

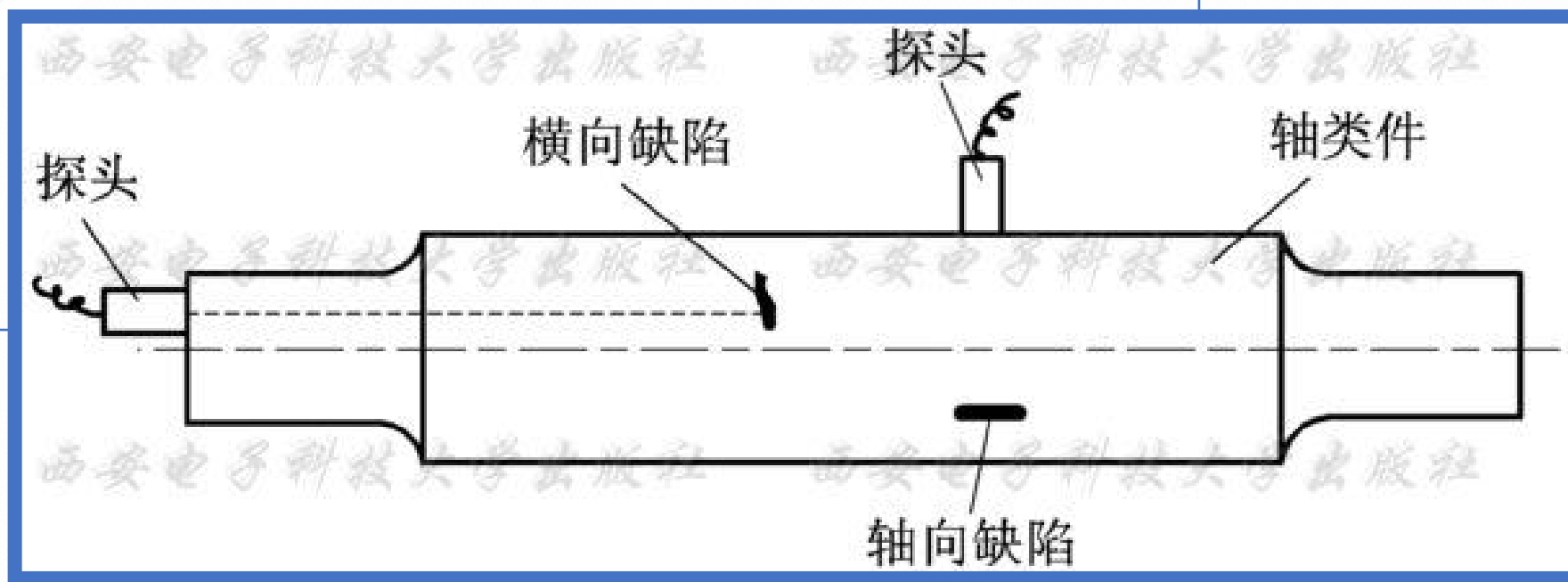
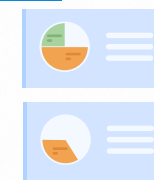
锻件中的缺陷主要来源于两个方面：**材料锻造过程中形成的缩孔、缩松、夹杂及偏析等；热处理中产生的白点、裂纹和晶粒粗大等。**

02 锻件超声检测的特点

锻件可采用**接触法**或**液浸法**进行检测。锻件的组织很细，由此引起的声波衰减和散射影响相对较小。因此，锻件上有时可以应用较高的检测频率(如10 MHz以上)，以满足高分辨力检测的要求，以及实现较小尺寸缺陷检测的目的。



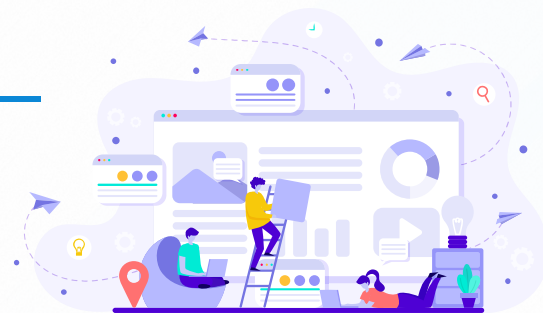
6 超声检测技术的应用



轴类件径向和轴向检测示意图

6 超声检测技术的应用

2. 铸件检测



铸件具有组织不均匀、组织不致密、表面粗糙和形状复杂等特点，因此常见缺陷有**孔洞类**（包括缩孔、缩松、疏松、气孔等）、**裂纹冷隔类**（冷裂、热裂、白带、冷隔和热处理裂纹）、**夹杂类**以及**成分类**（如偏析）等。

铸件的上述特点，形成了铸件超声检测的特殊性和局限性。检测时一般选用较低的超声频率，如0.5 ~ 2 MHz，因此检测灵敏度也低，杂波干扰严重，缺陷检测要求较低。

铸件检测常采用的超声检测方法有**直接接触法**、**液浸法**、**反射法**和**底波衰减法**。

6 超声检测技术的应用

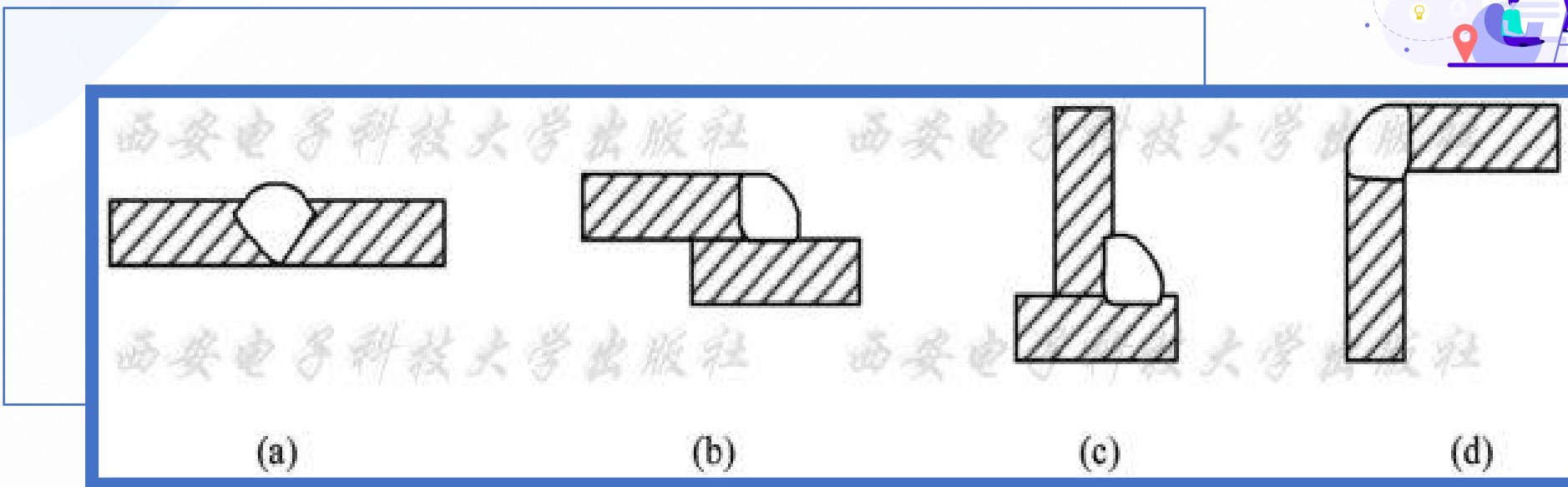
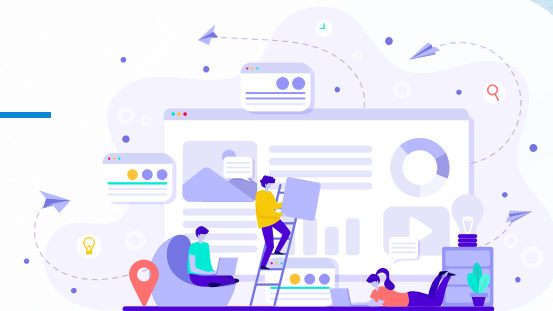
3. 焊接接头检测



许多金属结构件都采用**焊接**的方法制造。**超声检测**是对焊接接头质量进行评价的重要检测手段之一。焊缝形式有**对接**、**搭接**、**T型接**、**角接**等，如图所示。焊缝超声检测的常见缺陷有气孔、夹渣、未熔合、未焊透和焊接裂纹等。

焊缝探伤一般采用**斜射横波接触法**，在焊缝两侧进行扫查。探头频率通常为2.5 ~ 5.0 MHz。发现缺陷后，即可采用三角法对其进行定位计算。仪器灵敏度的调整和探头性能测试应在相应的标准试块或自制试块上进行。

6 超声检测技术的应用



焊接接头形式

(a) 对接接头;

(b) 搭接接头;

(c) T型接头;

(d) 角接头

6 超声检测技术的应用

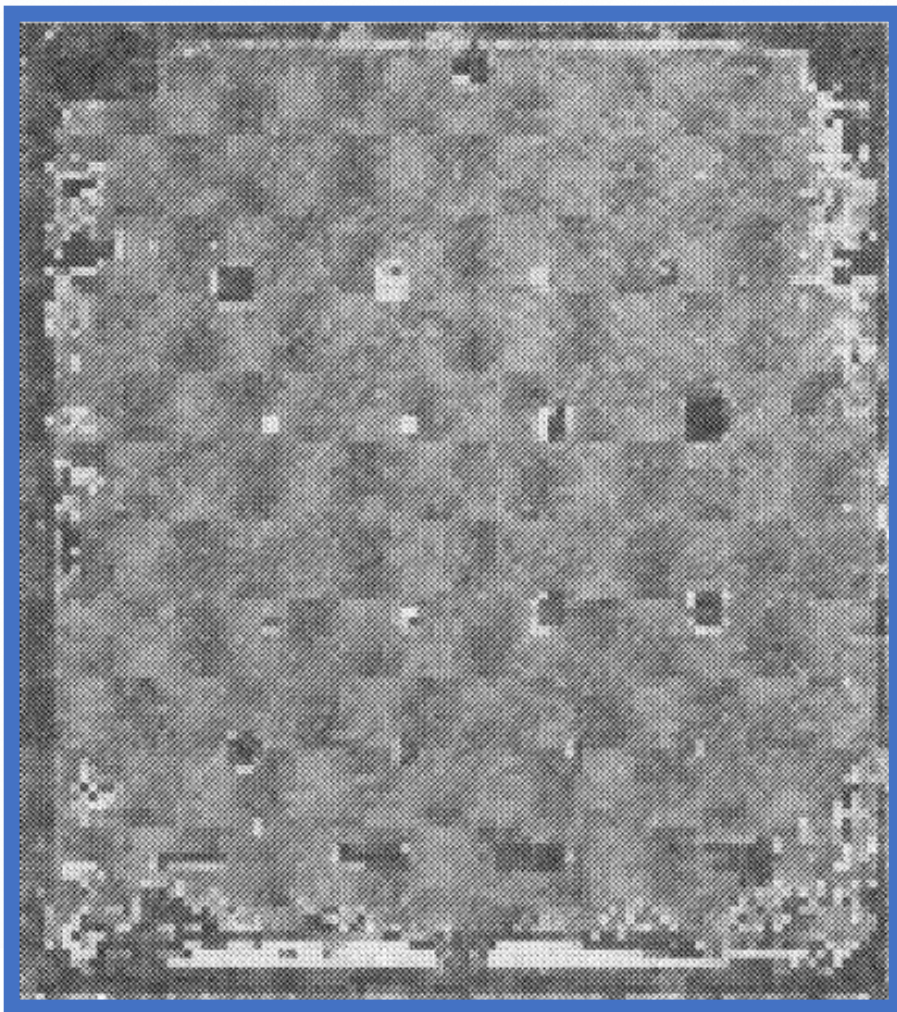
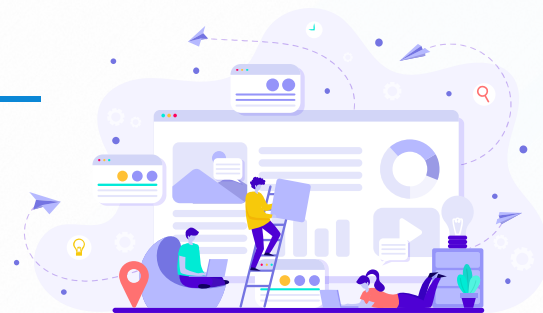
4. 复合材料检测

复合材料是由两种或多种性质不同的材料轧制或粘合在一起制成的。其粘合质量的检测主要有接触式脉冲反射法、脉冲穿透法和共振法。

脉冲反射法适用于复合材料是由两层材料复合而成，粘合层中的分层多数与板材表面平行的情况。用纵波检测时，粘合质量好的，产生的界面波会很低，而底波幅度会较高；当粘合不良时，则相反。



6 超声检测技术的应用



复合材料的C扫描图



6 超声检测技术的应用

5. 非金属材料的检测

超声波在非金属材料（木材、混凝土、有机玻璃、陶瓷、橡胶、塑料、砂轮、炸药药饼等）中的衰减一般比在金属中的大，多采用低频率检测。一般为20 ~ 200 kHz，也有用2 ~ 5 MHz 的。为了获得较窄的声束，需采用晶片尺寸较大的探头。

塑料零件的探测一般采用纵波脉冲反射法；陶瓷材料可用纵波和横波探测；橡胶检测频率较低，可用穿透法检测。





武汉理工大学
Wuhan University of Technology

谢谢观看！

机电工程学院测控系

主讲人：魏莉

一、选择题

- 制作凹曲面的聚焦透镜时，若透镜材料声速为C1，第二透声介质声速为C2，则两者材料应满足如下关系（ ）
A.C1>C2 B.C1<C2 C.C1=C2 D.Z1=Z2
- A型扫描显示中，从荧光屏上直接可获得的信息是（ ）
A.缺陷的性质和大小
B.缺陷的形状和取向
C.缺陷回波的大小和超声传播的时间
D.以上都是
- 如果超声波频率增加而晶片直径不变，则声束扩散角将（ ）
A.减小 B.保持不变 C.增大 D.随声速均匀变化
- 下列材料中声速最高的是()
A.空气 B.水 C.铝 D.不锈钢
- 超声波在液体介质中的衰减主要原因是（ ）
A.声束扩散 B.散射 C.吸收 D.以上都是
- 关于超声声速说法错误的是（ ）
A.在同种介质中，纵波声速大于横波声速
B.铝中声速大于水中声速
C.声速与介质的密度无关
D.不同波型的超声波具有不同的声速

二、超声波垂直入射到界面时的反射和透射声压与什么因素有关？

三、超声检测工艺中 频率选择与哪些因素 有关？

课堂作业

复合材料的
扫描图