

超声检测

H. J. 瑞德尔 著

余 宪 海 译
宋 植 学 校

湖北省
机械工程学会 无损检测学会

一九八六年六月

译 者 的 话

本书根据Henry, J. Ridder所著“Ultra sonic Inspection of Materials”一书(1982年版权)译成。

该书叙述了超声探伤理论、超声探伤仪器、标准试块、超声探伤方法和各种材料及结构的探伤实例等。

本书可供从事无损检测的工程技术人员和高等院校有关专业的师生参考。

由于时间仓促,译者水平有限,谬误在所难免,恳请读者批评指正为感。

一九八六年五月三十日

目 录

(81)	前言	(1)
(91)	第一章 声学理论	(2)
(91)	1. 超声波的波形	(3)
(91)	1.1 纵波或压缩波	(3)
(91)	1.2 横波或剪切波	(4)
(91)	1.3 雷利波或表面波	(4)
(91)	1.4 板波(复杂的波形)	(5)
(91)	2. 压电现象	(6)
(91)	3. 反射	(7)
(91)	4. 折射	(8)
(91)	5. 干涉	(9)
(91)	6. 声吸收和声阻尼	(10)
(91)	三、仪器和换能器(探头)	(10)
(91)	1. 脉冲发生器	(10)
(91)	2. 高频脉冲放大器(接收器)	(10)
(91)	3. 时基发生器	(12)
(91)	4. 示波管	(13)
(91)	5. 电源	(13)
(91)	6. 电子闸门	(13)
(91)	7. 记录	(13)
(91)	8. 数字读出设备	(13)
(91)	9. 换能器	(13)
(91)	1. 接触直换能器	(14)
(91)	2. 浸渍换能器	(15)
(91)	3. 斜换能器	(15)
(91)	4. 发射器和接受器隔开的分离式换能器	(17)
(91)	四、耦合剂	(17)
(91)	五、基本检查法	(18)
(91)	1. 直接反射法	(18)

2. 吸收法	(18)
3. 衰减法	(19)
4. 大范围下的衰减法	(19)
5. 三角形法 (Δ 法)	(19)
6. 穿透法	(19)
六、对比或校准标准	(20)
1. 按ASTM—E127制造的标准试块	(21)
2. 国际焊接学会对比试块	(21)
3. 现场校准试块	(23)
七、影响屏幕显示的因素	(23)
1. 由于表面波产生的反射	(23)
2. 检查表面	(24)
3. 延迟反射	(24)
4. 工件的形状	(26)
5. 组织	(26)
6. 干扰	(27)
八、实际检查	(28)
1. 大型锻件	(28)
2. 已加工锻件	(28)
3. 厚板和薄板	(28)
4. 杆、管和管系	(30)
5. 挤压件	(31)
6. 铸件	(31)
7. 焊接结构	(32)
8. 粘接结构	(41)
9. 壁厚和腐蚀的测量	(43)
九、附录	(45)
1. 音速表	(45)
2. 在合金钢中的音速	(46)
3. 不同温度下在水中的音速	(46)
4. 折射角表	(47)
5. 反射系数, 按百分比/分贝	(48)
6. 压电材料的特征	(49)
十、参考书目	(50)

一、前言

通常将高于可闻音域的声波称为超声波。大约高于16000Hz以上的频率，人的耳朵就听不到了。超声波是一种机械振动，只能在介质中传播，它与电磁波不同，不能在真空中传播。高于可闻音域的超声波只能在很有限的范围内通过气体（空气）传播，频率越高，这种限制就越大。在无损检测中使用的超声波频率为0.4—25MHz，只局限在液体和固体中探伤。

1. 探伤简史

从前，人们对一只陶瓷杯，一块玻璃或一火车轮轻轻敲一下，听其声音以这样一种“音响”形式进行探伤，此种形式至今仍在使用，不过它所确定的“无缺陷”只是相对的，因它所能探测的缺陷与现代准标对照就显得很粗糙了。此外，此法受检查者的“听力”影响较大。

首先用超声波确定材料缺陷的是苏联科学家索科洛夫(Sokvolov)，他在1929年用石英晶体产生了高频声波，透过一块钢板，并在反面测量其声能，当使用的是一块有层状的板材时，能测量穿透声能的减少，此法直到1942年由于分辨力低而未采用。后来，在1944—1945年美国的菲尔斯通(Firestone)教授和于1946年英国的斯普鲁尔(Sproule)分别的把声纳(Sonar)技术应用于材料的探伤。

随着第二次世界大战中雷达技术、脉冲技术的发展，脉冲型探伤仪得到迅速发展，在与其它无损检验法普及的同时，已成为工业及医学（诊断）领域中所必需的仪器。进而随着晶体管等固体电路的实用，促进探伤仪向小型、轻便化发展，另外，从工业生产速度的提高和减轻劳动强度出发，连续、自动探伤装置也在迅速地发展。

基于超声波共振法的所谓超声厚度计也普及于生产管理与维护方面。

2. 基本探伤法

超声脉冲反射法目前用的最为广泛。其高频发生器把持续时间很短的脉冲施加于压电石英晶体，由它把这种电脉冲转为高频机械振动，并作用于受检查的材料，当遇到该材料的任一界面，比如缺陷或底面时，将产生脉冲反射。

反射声能被同一个或另一分离的压电石英晶体接收，转变成电能，经高频脉冲放大器放大，并在示波管上，沿水平时基呈现垂直偏转。其反射按时间顺序产生并显示，因此，能立即确定界面的位置。

利用脉冲反射法进行超声波探伤，当缺陷尺寸小于声束截面时，声波的一部分被缺陷反射，其余部分传到工件底面后再反射而被换能器接收，因此示波管上既显示缺陷反射回波，又显示工件底面的回波。当缺陷尺寸大于声束截面时，入射声波全被反射而由换能器（探头）接收，因此仪器示波管上只显示缺陷的多次回波，而不显示底波。当缺陷为立体型缺陷时，因缺陷各处的回波声程不一，所以缺陷回波呈草状显示。

由于反射法具有检测灵敏度高，并能对缺陷定位、定量等优点，因此脉冲反射法在超声波探伤中应用最广。

早期使用的连续波法，在某种程度上现已不再使用了。

还有一种共振法探伤，它与脉冲反射法不一样。它不是以超声脉冲而是以连续的超声波射入工件，超声波在检查面与底面之间产生共振。它与前述的声响检查法有密切的关系，只当材料的厚度等于超声波总长之半时，才能引起材料产生共振。

$$t = n \frac{\lambda}{2}$$

式中: t ——材料的厚度;

λ ——波长;

n ——谐波数。

脉冲反射法在大多数情况下对于距检查表面几个波长以内的范围是不能检查的。相反,对于共振法由于具有1/2波长以上的材料厚就可以测量,所以广泛的用于测量材料厚度及腐蚀程度。

共振法

共振法的原理如下:

把可变频率振荡器产生的信号施加于石英晶体,由它将此信号转换为频率不同的机械振动,连续地作用于受检查的材料中,无论何时,只要材料的厚度等于发射波之半或其半波波长的若干倍,就产生了共振。即换能器的共振频率与发射信号一致的时候就产生了共振。这种共振由压电石英晶体测出,并产生一个表示各个共振点的电信号,它可以凭借示波管、闪光灯或可闻单音信号来表示。用示波管时,精确度最高。这种方法局限于测量厚度或者检测叠片的主片或其未耦合区。

为了更好地了解超声波探伤的可能性和局限性,有必要懂得声学理论。1877年洛尔德·雷利(Lord Rayleigh)发表了“声学理论”,这篇论文至今还是很有价值的。

因为声学光学之间存在的相似性,在十七世纪末期由斯内利叶斯(Snellius)和赫金斯(Huygens)发展的基本数学原理也将是适用的。

超声波探伤是无损探伤中的一种主要检测手段。超声波探伤不但可检测大厚度的工件,而且检测灵敏度高、速度快、成本低,并能对缺陷定量定位。因此,得到了人们普遍的重视并在生产实践中得到了广泛的应用。

超声波探伤的基本原理

超声波探伤主要用于检测材料(包括焊接材料)中的缺陷,测定材料的厚度,检测材料的晶粒,配合断裂力学作出使用寿命的评价等。然而超声波探伤不如射线探伤或其它无损探伤法直观,其技术难度较大,易受主客观条件的影响。因此超声探伤人员除了掌握一定的操作技能外,还应具备一定的基础理论。

二、声学理论

超声波是一种机械波。由弹性力相互联系着的质点所组成的物质,称为弹性介质。在弹性介质中,任何一个质点作机械振动(物体沿着直线或曲线在其平衡位置附近作往复周期性的运动称为振动)时,由于该质点与其邻近质点间有弹性力联系着,所以它的振动会传递给邻近的质点,使邻近的质点也产生同样的振动,然后又将振动传给下一个质点,依次类推,这样振动就由近及远地向各个方向并以一定的速度传播出去,从而形成了机械波。因此,机械波的产生必须具备两个条件:一是要有机械振动的波源(即声源),二是要有能够传递机械振动的介质(即弹性介质),两者缺一不可。

机械波的传播只是振动的传播,而不是质点的位移。

使用超声波的主要优点之一是声波束的方向性效应。这使得检查者能够精确确定可能的缺陷。方向性效应产生的原因能以某些日常的例子来说明。一块石头丢入水中,波就从命中点散开,一直增加圈数,彼此分开几吋,没有方向性效应。当一个人站在海岸,能看清有规则

的波以十分整齐的形态向着海岸线滚来，为了激发这种状况，可以在水中放一根棍子并且轻轻地移动它，人们将再次看到没有方向性效应的波动，假如用一块几ft长的木板，在水中前、后移动，这时产生了波浪，并得到了较好的方向性效应。人们将立即发现，在得到方向性效应以前，波之间的距离（波长），一定比木板的长度短。

空气中，可闻声波的波长，从几in到几ft不等，人的喉咙比最短的波长短，因此，讲话时，没有方向性效应。

例如频率为5 MHz的超声波在水中有0.3mm的波长，超声波换能器（探头，下同）的直径是这一波长的若干倍，因此能得到方向性效应。换能器的直径越大，方向性效应越好，即声束的扩散比较小。

超声波的波形

由于声源在介质中施力方向与波在介质中传播方向的不同，所以会产生不同波型的超声波。

纵波或压缩波。当弹性介质受到交替变化的拉应力和压应力作用时，就相应地产生交替变化的伸长和压缩变形，质点产生疏密相间的纵向振动，振动又作用于相邻质点而在介质中传播。此时，介质质点的振动方向和波的传播方向相同，这种波称为纵波。由于纵波在传播过程中会引起质点间的压缩和伸长，因此纵波又称为压缩波。

弹性介质在体积发生变化时，都会产生弹性力，因此纵波能在任何弹性介质中传播（包括固体、液体和气体）。

纵波广泛地用于材料的探伤中，为了理解纵波波型的特性，应研究物质的结构。所有原子，尽管它们用同等力彼此推开，仍然达到一种平衡状态，但是原子或多少或均匀地隔开。

在下面的例子中，我们将设想所有的原子很规则地隔开，如图1所示。

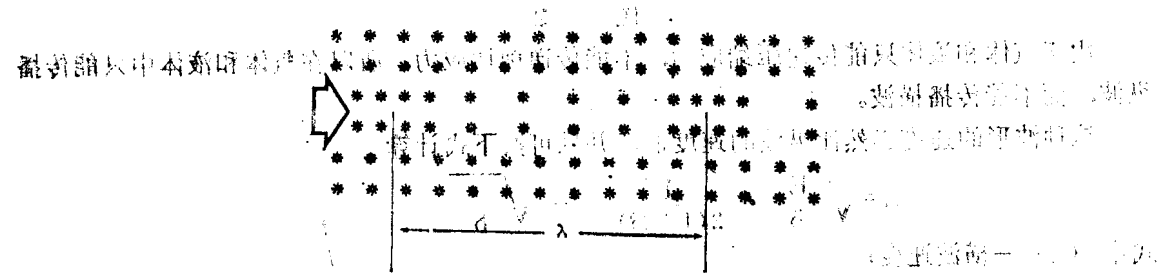


图 1

当在一个方向，向*1原子施加瞬时压力，它便向接近它的邻居*2原子运动，*2原子力图保持它们之间距离相同，开始向靠近它的*3原子运动，*3原子向靠近它的*4原子运动，如此类推。

一旦压力停止，*1原子即返回到它的原始位置，但是它的动量将带着它超过那一点，经一些往返运动之后，才返回到它的原始位置。*2、*3原子都将做类似的运动。当各个原子前后运动时，波本身在压力方向传播此波纹，传播的速度是由波纹的密度和各个原子的大小和前后运动的速度决定的。

在液体中传播的总体速度是由该液体的密度和它的可压缩性决定的，在固体中纵波速度是由固体的密度和它的弹性模数决定的，如下列公式所表述的：

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

式中：E——弹性模数；

δ ——密度；

σ ——泊松比。

当声波通过材料时，如前面例子表示的原子不仅沿压力的方向线运动，而且邻近区域的原子有位移。

例如，当声波通过一根直径接近波长那么大的杆传播时，在轴向拉伸应变的瞬间，杆断面则减小，在轴向压缩应变的瞬间，杆断面则增加。其直径与长度的变化比称泊松比。

当声波通过一较大尺寸的工件时，除传播方向外，其它方向原子的运动都受周围物质的限制，在这种情况下必须考虑泊松比。

2) 横波或剪切波。次于纵波型的横波型也广泛地用于超声波探伤，尤其是检查焊缝。固体介质除有体积弹性外，还有剪切弹性。当固体介质受到交变剪切力作用时，将会相应产生交变的剪切变形。介质质点具有波峰和波谷的横向振动，振动又作用于相邻质点而在介质中传播。此时质点的振动方向和波的传播方向垂直。这种波称为横波或剪切波。如图 2 所示的原子，其振动方向和波传播方向相垂直。这就是横波的特征。

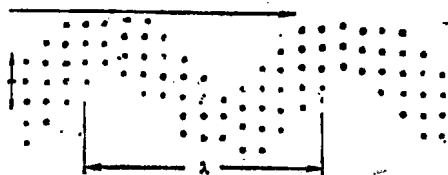


图 2

由于气体和液体只能传递压缩应力，不能传递剪切应力，所以在气体和液体中只能传播纵波，而不能传播横波。

这种波形的速度必然比纵波的速度低，并且可按下式计算：

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\delta}}$$

式中： C_t ——横波速度；

E——弹性模数；

δ ——密度；

σ ——泊松比；

μ ——刚性率。

3) 雷利波或表面波。它是一种沿介质表面传播、其振幅随深度增加迅速减弱的波。原子的运动呈椭圆形，即位移矢量垂直于表面，较小振幅的位移矢量平行于波传播方向，如图 3 所示。



图 3

$$C_s = \frac{0.87 + 1.125}{1 - \sigma} \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1}{2(1 + E)}}$$

式中: C_s ——表面波速度 (m/s);

σ ——泊松比;

E ——弹性模数;

δ ——密度。

这种波形的波长仅产生在工件的表层, 因此只能用于表面的超声波探伤, 实践和理论证明, 当表面波传播的深度等于两个波长时, 质点的振幅已很小, 因此可以认为表面波探伤时, 只能发现距工件表面两个波深度范围内的表面缺陷。这样它的应用就很有有限了。

表面波在传播过程中遇到工件的端面棱角时, 会引起反射。反射回波的大小与棱角的角度的有关, 棱角愈小, 反射回波愈大。棱角大于 90° 后, 反射回波才逐渐降低, 直至棱角大于 170° 时, 棱角的反射回波降为零。

在表面波的传播路程中遇有工件表面的油污或厚层耦合剂时, 由于表面波的垂直分量向耦合层辐射, 使声波能量引起衰减。但进入耦合层的声波垂直分量又会产生反射, 折回后产生干扰回波。因此, 当用表面波进行探测时, 为了减少表面波的衰减, 应消除工作表面的油污及锈蚀。

4) 板波 (复杂波形)。在板、杆和管子中, 可能产生复杂波形, 比如, 鲁夫波和兰姆波。鲁夫波是一种表面波, 当一种材料的几层薄片覆盖在另一种材料表面上时, 就产生了这种波形。至今, 这种波在探伤中没有应用过。

在厚度大约等于波长的板中, 表面波本身是不能存在的, 兰姆研究了这种现象, 并且描述了那些复杂的板波中的两种, 即对称与非对称兰姆波, 第一种波, 质点在板的两表面上的运动是椭圆形的, 这一点就象表面波一样, 但是在板的中轴上存在纵波。

对于非对称波, 板的中轴上, 存在横向波形, 这些波形在超声波探伤应用中用得不够广泛, 因为各种波组成部分的速度不同, 常常难于说明它们。如图 4 a 和 b 所示。

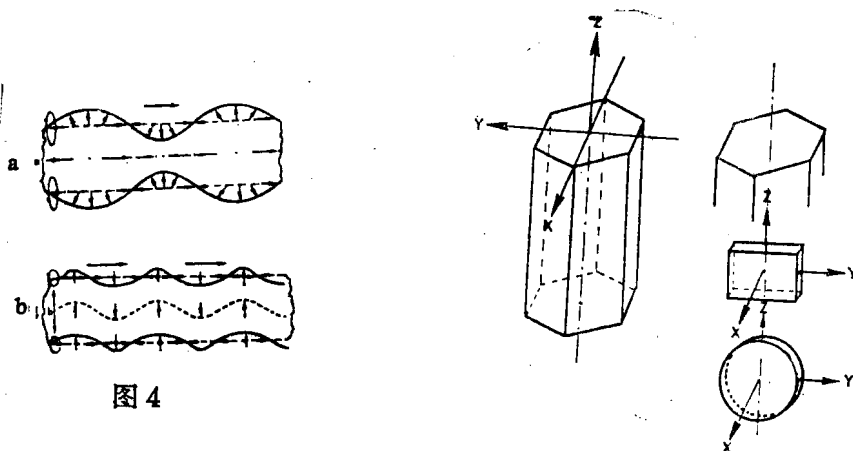


图 4

图 5

无论何时，一个工件的尺寸接近一个波长的话，不管它是杆、还是管、板或其它形状，都可能产生复杂的波形，例如辐射的和扭曲的波形。这些很难用在探伤中。

2. 压电现象

超声波换能器是超声系统中最重要的一部分，即使最好的超声仪，如果换能器不好，仍然不能令人满意地进行探伤。

不论那种超声换能器其主要部分都是压电片（压电晶片）。

1880年，居里（J. & P. Curie）发现当某些晶体被压缩即加应力时，两反面间可测到电位，只要去掉压力，电位就立即消失，如图5所示。

反之亦然，当把电位加于两反面之间，晶体内产生应变，而且当颠倒极性时应变的方向相反，这种应变与石英晶体形状的变化有关，称为反压电效应，如图6所示。

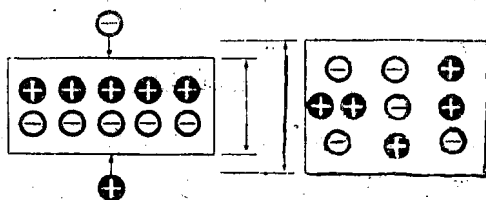


图 6

当把交变电位施加到晶体时，将不断地发生形状变化，两个对立面将交替地接近和离开，而且这种现象与石英的尺寸没有关系，然而应注意，在某些频率下，一给定电位晶体形状的变化远比其它频率下的变化高得多，这种增大发生在晶体呈共振状态，即当晶片厚度等于波长一半时，这种频率是基频。基频的倍数是谐波。基频往往叫做第一谐波，用字母 f_1 表示，然后 f_2 指第二谐波， f_3 指第三谐波等等。基频可用下式计算：

$$f = \frac{C}{2T}$$

式中：f——基频；

C——晶体的音速；

T——晶体的厚度。

首先在其中发现压电现象的晶体是石英（ SiO_2 ）、电石和四水（合）酒石酸甲钠。早期石英广泛地用在超声波探伤中，其它两种材料由于机械强度低，很少应用。尽管石英有优良的机械性能，但它有一个重要的缺点，就是其高声阻抗，这就意味着需要很高的电压驱动它。上述的缺点和它的高成本是石英已不再广泛使用的原因，它的地位已被一种人造晶体硫酸锂（ LiSO_4 ）取代。硫酸锂有优良的超声性能，但机械性能差。故它只是用在浸渍超声探伤中，因为它容易溶解在水中，换能器必须予以完好地密封。

在加热金属氧化物的混合物所制造的某些陶瓷中发现有压电现象以后，超声波换能器出现了重大的进展。它们类似于未上釉的陶器，并以此命名。这些陶瓷是：

钛酸钡（ BaTiO_3 ），

钛锆酸铅（ $\text{PbZrO}_3\text{PbTiO}_3$ ），

铌酸铅（ PbNb_2O_6 ）。

如前所述，压电陶瓷是金属氧化物的混合物，在高温下压制成的。此时，陶瓷的压电性

质不好，于是必须将材料极化。这种方法可以比作磁化一钢件，不过，磁畴完全排列在相同方向（北—南），当把高电压加到晶片的两反面间时压电陶瓷被加热，然后逐步冷却到室温而被极化，随着把工件浸在不导电的油中。所需要的温度和电压将随材料类型而变化，例如，施加于钛酸钡的极化电压，大约每mm厚度为（0.04in）200V和最高120℃温度。

当陶瓷压电材料经长时间的存储时，有退极化的趋势。但直到它们安装在换能器里以前问题还不小，而何况即使重新极化也比较简单，正常使用的换能器不容易退极化，因为由超声仪产生的脉冲一般将阻止这种情况产生，而且退极化时间很长，可能换能器已磨损了，退极的时刻还未到来。

3. 反射

在许多情况下，声波的性能类似于光，当闪光对准反射镜的时候，光将反射，若闪光以一角度对准，光束将以同样地角度反射。同样，超声波也是入射声角等于反射声角。

当声束射入两固体或一固体和一液体之间的界面时，并非所有的声能都被反射，而是一部分声能被反射，另一部分声能进入第二介质。

进入第二介质的能量取决于声阻抗，用字母 Z 表示，它表示材料抵抗声束的总阻力，因此声阻抗称为声阻。

每种材料或液体的声阻抗有一特定值，因为它是声速和密度的乘积。

$$Z = C \cdot \delta$$

式中： Z ——声阻抗，

C ——声速，

δ ——密度。

对按直角（90°）射入界面的声束，反射能可用下式计算，如图7所示。

$$R_e = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

就缺陷探测而言，这个式子说明了一些有利情况，因为固体和气体之间，将产生最大反射。例如，钢的缺陷，在该缺陷处被认为充满了气体。

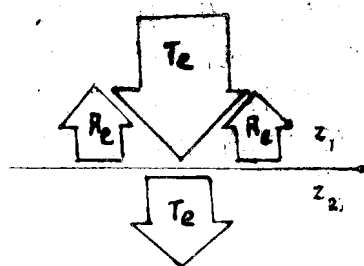


图 7

钢：密度 $\delta = 7.8 \text{ g/cm}^3$ ，

声速 $C_L = 5.94 \text{ km/s}$ ，

声阻抗 $Z = 46.332 \times 10^6$ 。

气体（空气）：密度 $\delta = 0.0013 \text{ g/cm}^3$ ，

声速 $C_L = 0.33 \text{ km/s}$ ，

声阻抗 $Z = 4.29 \times 10^4$ 。

故反射的声能为：

$$\frac{(46.332 \times 10^6 - 4.29 \times 10^4)^2}{(46.332 \times 10^6 + 4.29 \times 10^4)^2} = 1.0019$$

按入射声能的百分数表示：

$$\frac{1}{1.0019} \times 100\% = 99.8\%$$

上述结果表明，从固体和空气之间的界面事实上反射了所有的能量，假定100%是就实用观点而言的。在附录5中给出了不同材料液体和空气之间反射系数表。

当声束以一角度射入界面，反射系数也将不同，并由下式决定（图8）：

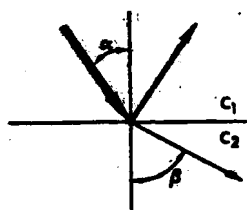


图8 折射

$$R_e = \frac{(Z_1 \cdot \cos \alpha - Z_2 \cdot \cos \beta)^2}{(Z_1 \cdot \cos \alpha + Z_2 \cdot \cos \beta)^2}$$

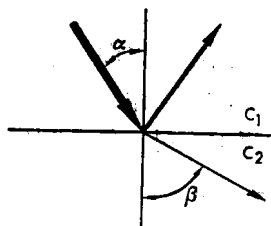


图 9

4. 折射

当声波束以一角度射入界面，声波束的一部分将以一折射角进入第二介质。

这个折射角由入射角和两介质中的声速所决定（图9）：

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_1}{C_2}$$

这个正弦定律称为斯涅尔折射定律。

因为横波有较纵波高的检测力和分辨力，所以斜入射时希望产生横波，而耦合晶片，沿Y轴振动，很难产生横波，因此，在探伤中，使用斜换能器，在此换能器中，以有机玻璃按精确的角度制成透声楔，晶片产生的纵波通过有机玻璃及有机玻璃与固体界面（耦合层），并在耦合层与固体之间接合面上发生波型转换以后，使得材料（固体）中产生全折射横波。

为产生一特定大小的折射角，可用下式确定所需要的入射角：

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_{L1}}{C_{t2}}$$

式中：α——入射角；

β——折射角；

C_{L1} ——纵波速度（第一介质）；

C_{t2} ——横波速度（第二介质）。

例：

在钢中，借助使用有机玻璃楔块的斜换能器，产生60°的折射角（相对法线）所需要的入射角是多少？

有机玻璃的纵波速度：2640m/s；

钢的横波速度: 3240 m/s。

$$\arcsin \alpha = 0.86603 \times \frac{2640}{3240} \quad \alpha = 45^\circ 52'$$

超声波在许多方面的性能象光一样, 通过凹凸镜, 使波束聚焦或散射是可能的。

这些凹凸镜是塑料制成的, 并以图10的法粘到压电圆盘(晶片)上。

当检查具有曲线表面的工件时, 能够得到上述聚焦散射现象, 被检查的工件将象凹凸镜一样起作用。

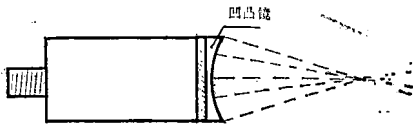


图 10

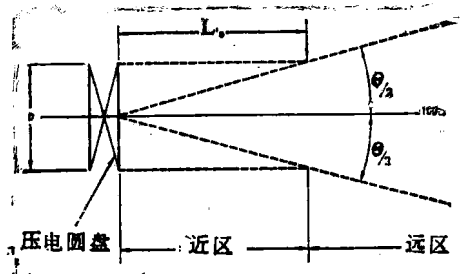


图 11

5. 干涉

从一个压电圆盘(晶片)发射的声束能方便地分成两个区域, 近区或弗雷斯内尔(Fresnell)区和远区或弗罗震福(Fraunhofer)区(图11)。

1) 近区。假如压电圆盘被看作是一些点, 每点发射一个环形波阵面, 那么这些波将在一些预先确定的点相交, 在某些情况下, 这些波将是同相位的, 它有一种叠加的效应; 在另一些情况下, 这些波有 180° 相位差, 则将消除此波。在这些极端值之间什么情况都可能发生。

实际上, 这可能意味着在近区内, 小的缺陷不会产生与其尺寸成正比例的反射。

另一方面, 换能器的质量主要由波束的对称性决定。这是通过扫查一小直径钢球和测量若干高、低能量的区域来实现的。理想的换能器, 这些变化对声束横断面是对称的。不过这种理想的换能器, 还没有制造出来, 因此, 75%的对称性就认为是合格, 近区的长度可由压电圆盘的直径、频率及声速来确定, 按下式计算:

$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \text{ 或 } \frac{D^2 \cdot f}{4C}$$

式中: L_0 ——近区长度;

D ——压电圆盘直径;

f ——频率;

C ——声速;

λ ——波长。

2) 远区。在远区, 发生声束扩散, 这种扩散是声束的自然扩散, 它可由压电圆盘直径、频率及声速来确定, 按下式计算(图12):

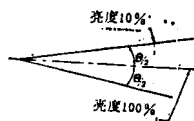


图 12

$$\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{k\lambda}{d} \text{ 或 } \frac{kC}{fD}$$

式中：λ——波长，

D——压电圆盘直径，

θ——扩散角。

声能在波束中心为最大，从中心到外沿逐渐减小直到最小值。为决定扩散角，使用声能减少值达到最大声能的10%，这个百分数用字母K表示，在这种情况下K值是1.08，达到30%、50%和70%时声能减少值分别是0.76、0.56和0.44。

6. 声吸收和声阻尼

声束通过一种材料时，发生能量损失，其原因，本质上可能是不同的，若因材料内部小的不均匀性引起的损失，一般称为吸收。

即使在较好的材料内，由于摩擦或因晶粒边界波束的散射产生的损失也会引起声阻尼。尤其是波长近似于晶粒尺寸时，会发生重大散射，与开亮的信号灯射入雾中相比，光是从水沫中向各个方向散射。

三、仪器和换能器（探头）

一般的超声波仪器包括：

电源、脉冲发生器、高频脉冲放大器、时基发生器、示波管及换能器等。图13所示为这样一台仪器的方框图。

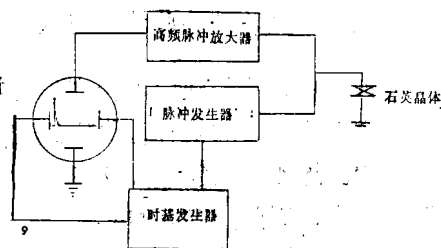


图 13

1. 脉冲发生器

这种脉冲发生器，供应高达800V电压的脉冲，基本的特性是脉冲的升高时间持续很短，一般在小于10ns数量级范围内。

脉冲不应呈现任何振铃波形，因这种振铃波形将降低大多数超声波探伤所要求的分辨力（图14）。

2. 高频脉冲放大器（接收器）

1）宽频带脉冲放大器。宽频带脉冲放大器，在4到15MHz之间的频带范围，一般有平响应，其优点是只用一个换能器就能观测整个频率范围，信号噪声比由于信号变形最小而较高。

2）调谐脉冲放大器。这种放大器对调频有较高的增益，但它不显示任何谐波。美国制造的仪器用下列频率：0.4、1、2.25、5、10、15 MHz，在某些情况下还可提供25MHz频率，欧洲的仪器通常用下列频率：0.4、1、2、4、6、12MHz。

这种脉冲放大器应该能够吸收由脉冲发生器发生的800V脉冲，并且此后能够在几微伏的

数量级范围内将信号放大。

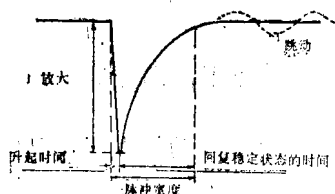


图 14

这需要一个具有极短回复稳定状态时间的高质量设备。此外，放大率应是线性的，以放大从缺陷反射来的信号，并按缺陷的尺寸成正比地显示。

当使用有不同尺寸的平底孔的试块时，放大器的动态范围能直接显示直线性。这些平底孔的直径以1/64in间隔从1/64in到1/8in变化，即从*1到*8孔。

动态范围就是最大孔尺寸的平方。其反射可以在示波管上显示不会饱和，而且从*1孔来的反射仍然可以看见（突破水平迹线）。假如如此确定的最大的孔是*8，那么动态范围是 $8^2 = 64$ 。总是在远区进行这种测量。

在大多数超声波仪器中，使用一个前置放大器，不论是作为增益还是衰减调节均按dB来校准它。脉冲能以几种方法在示波管上显示：

（1）射频显示。这是单纯的接收信号，仅只线性放大，如图15所示。

（2）综合的射频显示。这种射频显示中，信号部分地被整流，其负值部分被截除。信号产生附加放大作用，如图16所示。

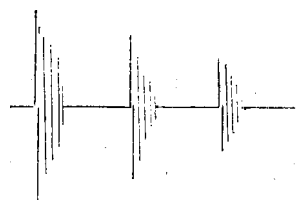


图 15



图 16

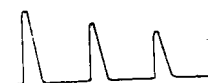


图 17

（3）视频显示。综合的射频显示被进一步整流和放大。呈现出很整齐的外貌的信号，并不再显现任何高频信号，如图17所示。由于使用滤波电路，使脉冲形状得以进一步整形，通常都是为了得到较高的分辨力。

在大多数仪器中，都有剔除调节，这是一种应极仔细地操作的调节，因为它使得放大器非线性；并可调节到按照使得小缺陷放过去，而只显示临界缺陷信号，如图18所示。

下面是影响高频放大器的另一调节的常用的几个名称：

（1）扫描增益调节；

- (2) 灵敏度时间调节;
- (3) 距离振幅调节;
- (4) 衰减补偿调节。

这些调节的目的是改变放大器的增益, 即在同样的振幅条件下, 显示离换能器距离不同而尺寸相同的缺陷。

这显然使放大器呈非线性, 但是在自动检查中, 已建立了剔除水准线, 当缺陷可能在不同深度处发生时, 它是一个基本的方法 (图19)。

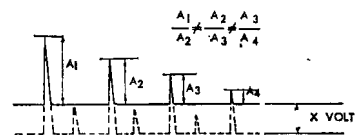


图 18

图19注:

不合格的图形, 即未校正的波形。

合格的图形, 即校正的波形。

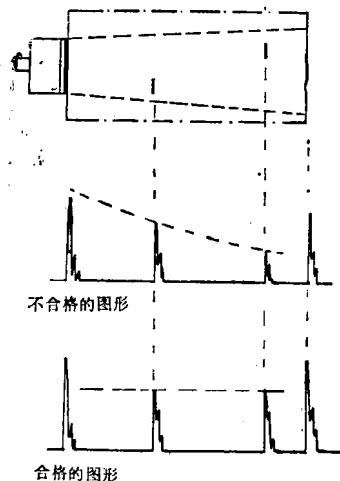


图 19 (注)

3. 时基发生器

时基的开始是由脉冲发生触发的, 脉冲发生器的频率是自动或手动调节的, 脉冲重复频率能从100到5000脉冲/s变化。

当产生脉冲和转化成通过材料的脉冲声波时, 电子束按照与声脉冲同样的速度, 在示波管上绘制一水平迹线。

当界面发生反射时, 水平迹线上显示垂直偏转, 按时间顺序排列, 凭借适当校准, 可立即量出离该界面的距离。

为了能精确的测定一个界面, 显然得有一个线性时基发生器。

为了下次时基触发以前波不被阻尼, 脉冲重复频率不应太高, 否则将引起如图20所示的混乱图形。

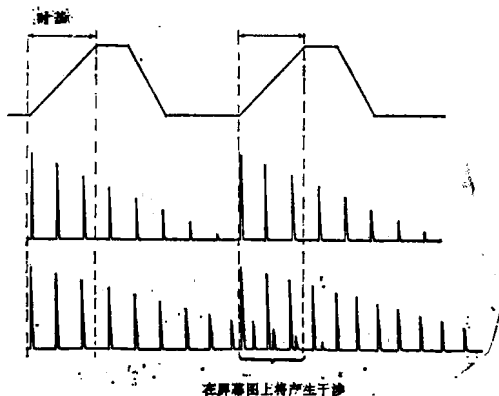


图20 在屏幕上将产生干涉反射

降低脉冲重复频率或增益将改正这种状况。

为了消除声程部分，例如，消除浸渍检查中通过水的那部分，可推迟时基，以使只有有价值的部分显示出来，称为延迟扫描。

4. 示波管

仪器的示波管精确地赋予接收的反射以最后的形状，如同一切示波管的显象一样，明亮急剧地聚焦没有散射。对新型示波管和阴极射线管来说，这应该是不成问题的。

5. 电源

对电池供电而言，主要要求仪器的低电耗，以可得到足够的运行时间，一般应能持续工作6—8 h。

对交流-直流转换器或直接用110V交流电运行的装置，应很好的屏蔽，使之不产生交流干扰，如屏蔽不好，在时基线上将出现强烈的波动。

大多数电源都装有调整电路，在工厂里大型设备最好用稳压变压器。

首先应把仪器和检查中的工件很好地接地。对电池供电来说，当电池功率下降到水准以下时，仪器应自动地断开并还应具有抵抗超载的能力。

6. 电子闸门

为了自动地监测可能存在的缺陷信号，可用一种所谓的“电子闸门”。这种线路监测一部分时基，并且位置和宽度两者都可调节。

闸门区域内任何信号，若超过预定的临界值就将触发警报系统。

电子闸门的起动是由发射脉冲或由水和固体间的界面反射引起的。反射的位置随着水中声程长度而变化，电子闸门将追踪这个界面反射。

7. 记录

上述的超声波信号的图象，称为A扫描。

显示B扫描波形也是可能的，但在工业超声波探伤中用得很少，在这种波形状况下，时基是随着换能器同步地横过示波管，垂直移动，当出现反射，而不是垂直偏转，示波管上扫描迹线的亮度改变了。

在一个长时间保留余辉的阴极射线管上，将示出这部分的横剖面区。这种系统需要多方面自动化，就像C扫描系统一样。在C扫描系统中把工件的所有区域包括缺陷但没有深度标记勾画出。

在这种系统中，超声波换能器的扫描图是电动地或机械地复印在X-Y记录器上。在闸门区域内发生的反射是由振幅控制并成正比地转换成直流电，施加于X-Y记录器的画笔，按这种办法，可绘出有缺陷的工件完整的图形。此法相当慢，但是精度高，并广泛地用在航空和航天工业，例如粘结结构的检查中。

8. 数字读出设备

在壁厚测量，底面反射位置就正好指出声程通过材料的长度，因此就是厚度，示踪这种底面反射的电子闸门用在数字式读出设备中。

正如把反射板用于阴极射线管一样，闸门状态的变化构成了电压的变化。

这一电压能在测量仪（模拟量）上或通过数字式电路作为一种数值显示，通过校准，能使这一电压读出厚度，而不是读出声程的总长度。

9. 换能器