

实验 38 超声原理与应用

超声学是声学的一个分支,它主要研究超声的产生方法和探测技术、超声在介质中的传播规律、超声与物质的相互作用(包括在微观尺度的相互作用)以及超声的众多应用。超声波测试分析是利用超声波在介质中传播及与介质相互作用的特性,获得介质内部的信息,从而达到对介质的某些物理量和性质进行测试和分析的目的。

本实验的目的是了解超声波产生与检测的原理、纵波探头和横波探头的结构及其原理;学习超声的传播规律及其声场特性,掌握用超声法测量固体介质弹性参数的方法及超声扫描成像技术的应用。

【思考题】

1. 超声检测和功率超声中产生超声波的方法相同吗?本实验中超声波是如何产生的?
2. 第一临界角、第二临界角有什么实际应用?如何通过波型转换得到超声波横波?
3. 横波(斜)探头的延迟和折射角对声速的准确测量有什么影响?其值与哪些因素有关?
4. 测量纵波和横波声速时,如何正确判断每个信号来自哪个人工反射体?
5. 测量时在超声探头和试块之间加机油的作用是什么?利用声波在两种介质界面上的透射关系解释探头与被测材料间隙中的气体对声波透射的影响。
6. 测量波速时如何减小测量误差?
7. 对超声波的应用你还了解哪些?这些应用对应的原理是什么?

【引言】

超声是指频率高于 20 kHz 的声音。超声学是声学的一个分支,它主要研究超声的产生方法和探测技术、超声在介质中的传播规律、超声与物质的相互作用,包括在微观尺度的相互作用以及超声的众多应用。超声波是一种弹性波,对它的描述有两个物理量:一个是振幅,另一个是频率,根据应用方向的不同,人们在频率、振幅这两个方面作了大量的研究工作,形成了超声检测学、功率超声学、表面波电子学器件学科等领域。

在国防和国民经济中,超声的用途主要可分为两大类,一类是利用它的能量来改变材料的某些状态,为此需要产生相当大或比较大能量的超声,这类用途的超声通常称为功率超声,如超声加湿、超声清洗、超声焊接、超声手术刀、超声马达;另一类是利用它来采集信息,超声波测试分析包括对材料和工件进行检验和测量,由于检测的对象和目的不同,具体的技术和措施也是不同的,因而产生了名称各异的超声检测项目,如超声测厚、超声激发声发射、超声测硬度、测应力、测金属材料的晶粒度及超声探伤等。

超声波与电磁波不同,它是弹性波,不论材料的导电性、导磁性、导热性、导光性如何,只

要是弹性材料,它都可以传播进去,并且它的传播与材料的弹性有关,如果弹性材料发生变化,超声波的传播就会受到扰动,根据这个扰动,就可了解材料的弹性或弹性变化的特征,这样超声就可以很好地检测到材料特别是材料内部的信息,对某些其他辐射能量不能穿透的材料,超声更显示出了这方面的实用性。与 X 射线、 γ 射线相比,超声的穿透本领并不优越,但由于它对人体的伤害较小,使得它的应用仍然很广泛。超声波测试分析是利用超声波在介质中传播和与介质相互作用的特性,获得介质内部的信息,从而达到对介质的某些物理量和性质进行测试和分析的目的。本实验就是利用超声法来研究固体介质中的几个常用的参数。

本实验的目的是了解超声波产生和发射的机理、超声换能器的结构及作用;学习超声的传播规律及其声场特性,掌握用超声法测量固体介质常用参数的方法及超声扫描成像技术的应用。

【实验原理】

1. 超声波的发射和接收

应用超声波进行探测,首先要解决的问题就是如何发射和接收超声波。如果不计固体里的晶格热振动,那么在自然界里很少有超声,特别是为人类(而不是为其他动物)应用的超声,而人类的耳朵又不能听到超声,因此需要人为地设计仪器来产生、察觉、测量或显示超声,这些问题都可以通过使用超声波换能器来解决。超声波换能器可使其他形式的能量转换成超声能量(称发射换能器)或使超声能量转换成其他易于检测的能量(称接收换能器),其中应用最多的是声电、电声换能器:当一个电脉冲作用到探头上时,探头就发射超声脉冲,反之,当一个超声脉冲作用到探头上时,探头就产生一个电脉冲。有了探头,再配上电信号的产生和接收等装置,就构成了整套超声波检测系统。

产生超声波的方法有很多种,如热学法、力学法、静电法、电磁法、磁致伸缩法、激光法以及压电法等,但应用得最普遍的方法是压电法。

1.1 压电效应

某些介电体在机械压力的作用下会发生形变,使得介电体内正负电荷中心产生相对位移以致介电体两端表面出现符号相反的束缚电荷,其电荷密度与压力成正比,这种由“压力”产生“电”的现象称为正压电效应,如图 38.1(a)所示。

反之,如果将具有压电效应的介电体置于外电场中,电场会使介质内部正负电荷中心发生位移,从而导致介电体产生形变,这种由“电”产生“机械形变”的现象称为逆压电效应,如图 38.1(b)所示。逆压电效应只产生于介电体,形变与外电场成线性关系,且随外电场反向而改变符号。晶体是否具有压电效应,是由晶体结构的对称性所决定的。压电效应仅存在于无对称中心的电介质离子性晶体中。

压电体的正压电效应与逆压电效应统称为压电效应。如果对具有压电效应的材料施加交变电压,那么它在交变电场的作用下将发生交替的压缩和拉伸形变,由此而产生了振动,并且振动的频率与所施加的交变电压的频率相同,若所施加的电频率在超声波频率范围内,则所产生的振动是超声频率的振动,即超声波的产生。我们把这种振动耦合到弹性介质中去,那么在弹性介质中传播的波即为超声波,这利用的是逆压电效应。若利用正压电效应可将超声能转变成电能,这样就可实现超声波的接收。另外,还可以利用电压激励压电晶片,使

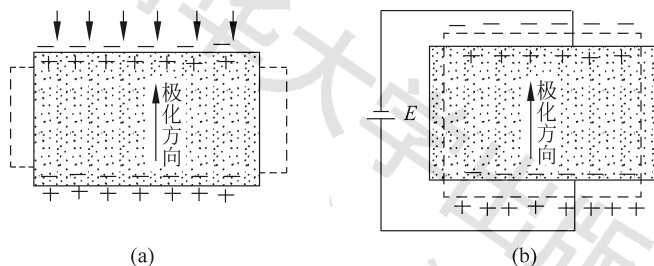


图 38.1 压电效应示意图

(a) 正压电效应; (b) 逆压电效应

其按固有频率振动的方式产生超声。两种不同方式产生的声波应用领域也不同。压电效应广泛应用于声呐系统、气象探测、家用电器、精密仪器和机械控制、微电子技术、生物工程等领域。

1.2 压电材料

压电材料分为两类。一类是天然的或人工制造的压电单晶：如石英、酒石酸钾钠、双氢磷酸铵、硫酸锂、碘酸锂、铌酸锂等。石英是最早使用的压电材料，它是透明的晶体而且又非常坚硬，居里点高，适合在较高温度下使用，它的抗腐蚀性能很好，但压电转换性能比较差。

另一类是多晶压电陶瓷材料：对于多晶材料，每个多晶颗粒由随机取向的电畴组成，宏观上并不具有压电效应。若在一定温度下施加强直流电场，这些电畴沿外电场方向规则排列（极化），并在撤销外电场后保持很强的剩余极化强度，从而在一定的温度范围内表现出宏观压电性。如锆钛酸钡、锆钛酸铅、锆钛锡酸铅、钛酸铅等。

由于压电陶瓷具有烧制方便，易于成型，机械强度高，能耐温耐湿以及经济等，并且具有比石英高得多的机电耦合系数，为了获得同样大的声压，施加在压电陶瓷上的电压仅为石英的数十分之一，因此压电陶瓷在超声中应用得相当广泛。

选择压电材料，我们不只考虑它的力学性质，还要考虑它的电学性质，而且要进一步考虑电学和力学相互耦合的性质，这些分别涉及弹性常数、介电常数和独特的压电常数。

1.3 超声换能器（探头）

把其他形式的能量转换为声能的器件称为超声波换能器，亦称超声探头。在超声波分析测试中常用的换能器既能发射声波，又能接收声波。超声波有纵波和横波两种波型：当介质中质点振动方向与超声波的传播方向一致时，称为纵波；当介质中质点的振动方向与超声波传播方向相垂直时，称为横波。在实际应用中要根据需要使用不同类型的探头，主要有：直探头（纵波），斜探头（横波），水浸式聚焦探头，轮式探头，微型表面波探头，双晶片探头及其他型式的组合探头等。这里只简单介绍最常用的几种。

1) 直探头

直探头也称平探头，用于发射和接收纵波，其结构如图 38.2 所示。下面简单介绍它的几个重要元件。

(1) 压电晶片

根据所需材料和所需声场的不同要求，压电晶片可以做成不同尺寸，大部分晶片都做成圆片状。其厚

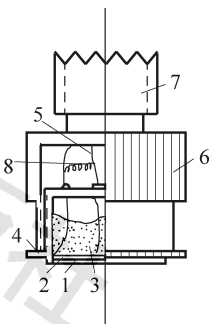


图 38.2 纵波直探头的结构

1—保护膜；2—晶片；3—吸收块；4—内套；5—接线；6—外套；7—接插件；8—匹配电感

度决定了振动频率,并且厚度和振动频率的乘积为一常数,称为频率常数。脉冲超声中有两个频率概念,一是工作频率即脉冲包络线内超声波的频率,这是大家熟悉的标称频率、中心频率等术语,一般在兆赫数量级。二是重复频率,即每秒发射超声脉冲的次数,又叫脉冲频率、扫描频率。

(2) 保护膜

为了使直探头中的压电晶片免于与工件直接接触磨损而覆盖在晶片上的保护层,一般需选用耐磨材料。选用保护膜的另一个原则是使声能有尽可能大的穿透率。

(3) 吸收块

它是用来提高探头分辨力的。一片振动的压电晶片在除去外力后仍要经过多次振动才会停止,这就会使超声波的脉冲变宽,从而有损探头的分辨力,因此要在晶片背面装上兼作支撑体、吸收噪声能量的阻尼块。吸收块材料的选择还需要考虑吸收块与压电晶片之间的声耦合匹配问题。

2) 斜探头

由于产生纵波最为容易,而且转换效率也高,因此,在超声波分析测试中需要其他波型时,大都考虑首先获得纵波,然后再利用波型转换来得到其他波型。斜探头即是考虑了斜楔对波型转换的作用原理后,利用纵波在斜楔与工件界面上的波型转换而在工件中产生所需波型的一种探头。其结构如图 38.3 所示。

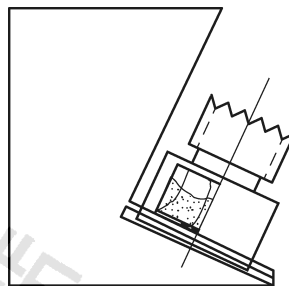


图 38.3 斜探头结构

对于斜探头,主要应考虑两个方面。其一是使工件获得所需的波型及足够的声能;其二是不应由于斜楔的存在使杂波增加而影响超声波的测试分析。对于后者必须很好地设计斜楔的形状,使斜楔中由界面反射回来的声能不回到压电晶片上来。

3) 水浸式探头

探头采用水浸形式可以获得稳定的声耦合,由于用水做耦合,无需与工件相接触,可不用保护膜。但由于晶片与水直接接触,而且二者的声阻抗又相差极大,因此只有 17% 的能量传入水中,为了提高水浸探头辐射到水中的声能,可以考虑在压电晶片前面覆盖一层匹配介质。

2. 超声波的传播规律及其声场特性

2.1 超声波的反射与折射

我们仅限于讨论幅度足够小和波长足够大的超声波,振幅足够小的含义是,声波强度不是很大,因此,声波中的扰动量是小量,远小于某个标准;波长足够大的含义是,声波的频率不是极高,因此声波的波长远大于组成介质的微观粒子(如原子、分子)间的距离,这些微观粒子于是以大集团做整体的运动,从而介质宏观上可以看作是连续的。

超声波是一种弹性波,它遵从波传播的普遍规律。在各向同性的固体材料中,根据应力和应变满足的胡克定律,可以求得超声波传播的特征方程

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (38.1)$$

其中, Φ 为势函数, c 为超声波传播速度。

超声波从一个媒质传播到另一个媒质时,在两种媒质的分界面上,一部分能量反射回原媒质内,称为反射波;另一部分能量透过界面在另一种媒质内传播,称透射波或折射波。反射波和折射波的传播方向(类似于光波一样)由反射、折射定律(又称斯涅尔定律, Snell's law)来确定,即

$$\frac{\sin \alpha_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \gamma_L}{c_{L1}} = \frac{\sin \gamma_S}{c_{S1}} = \frac{\sin \beta_L}{c_{L2}} = \frac{\sin \beta_S}{c_{S2}} \quad (38.2)$$

式中, α_L 表示纵波入射角; γ_L 表示纵波反射角; γ_S 表示横波反射角; β_L 表示纵波折射角; β_S 表示横波折射角, c_{L1} 表示第一媒质中的纵波声速; c_{S1} 表示第一媒质中的横波声速; c_{L2} 表示第二媒质中的纵波声速; c_{S2} 表示第二媒质中的横波声速,如图 38.4 所示。

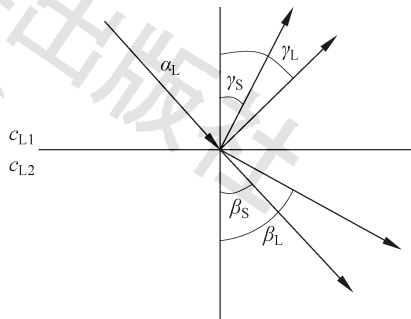


图 38.4 超声波的反射与折射

2.2 临界角、波型转换及全反射

根据声波反射和折射的正弦定律,入射声波存在一些特征角,即第一、第二临界角。

(1) 第一临界角

超声波纵波倾斜入射到界面上,若第二介质纵波波速 c_{L2} 大于第一种介质中纵波波速 c_{L1} ,则纵波折射角大于纵波入射角,即 $\beta_L > \alpha_L$ 。当纵波折射角为 90° 时的纵波入射角定义为第一临界角 α_{1m} 。

$$\alpha_{1m} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad (38.3)$$

显然当入射角 $\alpha_L \leq \alpha_{1m}$ 时,折射介质中既有纵波又有横波,如图 38.5(a)所示。

(2) 第二临界角

若第二介质横波波速 c_{S2} 大于第一种介质中纵波波速 c_{L1} ,即 $c_{S2} > c_{L1}$,则横波折射角大于纵波入射角,即 $\beta_S > \alpha_L$ 。当横波折射角为 90° 时的纵波入射角定义为第二临界角 α_{2m} 。

$$\alpha_{2m} = \arcsin \frac{c_{L1}}{c_{S2}} \quad (38.4)$$

当入射角 $\alpha_{1m} < \alpha_L < \alpha_{2m}$ 时,折射介质中只有横波存在而无纵波存在,如图 38.5(b)所示。当入射角 $\alpha_L > \alpha_{2m}$ 时,折射介质中既无纵波也无横波,此时在第二介质的表面上就会产生声表面波,如图 38.5(c)所示。

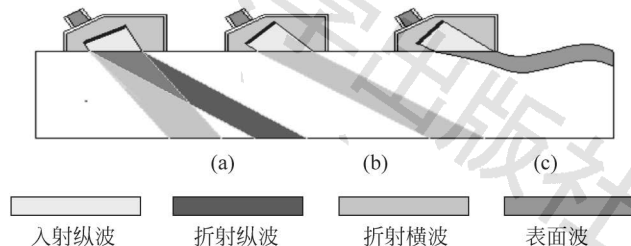


图 38.5 斜探头中纵波入射角大小与折射波型的关系

(a) $\alpha_L \leq \alpha_{1m}$; (b) $\alpha_{1m} < \alpha_L < \alpha_{2m}$; (c) $\alpha_L \geq \alpha_{2m}$

由斯涅尔定律知道,当纵波倾斜入射到异质界面时,除了产生与入射波同类型的反射波和折射波以外,还会产生与入射波不同类型的反射波和折射波,这种现象称为波型转换。波型转换现象只发生在斜入射的场合,而且与界面两侧媒质的状态有关。

由于气体和液体没有剪切弹性,只有体积弹性,因而在液体、气体媒质中只能传播纵波,只有固体媒质才能同时传播纵波和横波,因此波型转换只可能在固体中产生。同时还应指出,尽管气体媒质理论上可以传播纵波,但由于气体特性阻抗远远小于固体或液体的特性阻抗(声阻抗 $z = \rho v$, ρ 、 v 分别为材料的密度和在材料中的声速),使得声波在固/气或液/气界面上产生全反射,因此可以认为声波难以从固体或液体中进入气体。

2.3 超声声场及其衰减

超声在各种媒质中的传播问题,实际上是声场问题。在超声的研究和应用中,声场都是由换能器产生的,多数换能器产生的是有限束声场。声场特征常用声压、声强等特征值来描述。声压(p)是指超声波在媒质中传播时,媒质中空间各点受到扰动而产生的压强。声压的大小反映了声波的强弱,一般是时间和空间的函数,其单位为 Pa(帕斯卡)。在声场中的某点,在与指定方向垂直的单位面积上,单位时间内通过的平均声能,称为声强度,以 I 表示。

声波在媒质中传播时,其强度随传播距离的增加而逐渐减弱的现象,通称为声衰减。按照引起超声强弱的不同原因,把超声衰减分为三种类型:吸收衰减、散射衰减和扩散衰减。前两类衰减取决于媒质的性质,后一类衰减则由声源特性引起。声学理论证明,吸收衰减和散射衰减都遵从指数衰减规律。对沿 x 方向传播的平面波而言,声压 p 和声强 I 随传播距离 x 的变化分别表示为

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (38.5)$$

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (38.6)$$

式中, α 为衰减系数, x 为传播距离。 α 与波的频率以及媒质性质有关。频率越高,衰减得越厉害,传播的距离也越短。水中超声波的衰减系数比在空气中小得多,与电磁波刚好相反,再加上超声波波长短,因此可用于在水中探测或搜索鱼群,探测海深以至搜索水雷和潜艇等军事目标。超声波在软组织和肌肉中衰减系数也较小,故可用于医学上探测体内病变。

超声检测时测得的信号强度与声压成正比。图 38.6 为圆形晶片中心轴线上的声压分布。声压分布分为两个区域,近场区和远场区。当 $x < N$ 时,称为近场区;当 $x > N$ 时称为远场区, N 为近场区长度。由于近场区中波的干涉使声压的起伏很大,在工件探伤时近场区内难以探测到缺陷,也称为盲区。

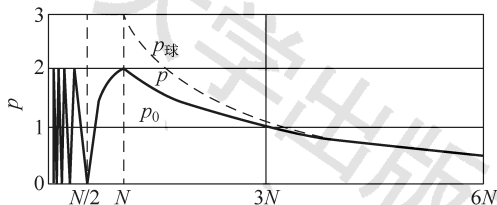


图 38.6 圆形晶片轴线上的声压分布

近场区长度 N 取决于声源的尺寸和声波波长,当 $D/2 \gg \lambda$ 时, N 值可用式(38.7)获得

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \quad (38.7)$$

从中可以看出,压电晶片的直径 D 越大、频率越高(波长 λ 越短),则近场长度 N 也越长。

当 $x > 3N$ 时,远场区的声压分布可由式(38.8)计算

$$p = p_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda} \frac{1}{x} \quad (38.8)$$

远场区中心轴线上的声压与晶片面积和起始声压成正比,而与波长和声程成反比。声场中的声压不但随距离 x 、时间 t 而变,同时还随声束的半扩散角 θ 而变。半扩散角直接反映声场中声能集中的程度和几何边界。其计算公式为

$$\theta = \arcsin(1.22\lambda/D) \quad (38.9)$$

半扩散角 θ 取决于晶片直径 D 和波长 λ 。提高频率和加大晶片尺寸,均可改善超声的指向性。探头发射的超声波能量的 80% 以上集中在主瓣的声束上,副瓣的能量小,传播距离短,因此可以认为副瓣束集中在近场区,如图 38.7 所示。

超声检测大多采用脉冲波,由于脉冲波是持续时间很短的波动,所以它们可能不产生干涉或只产生不完全干涉。脉冲波中脉冲个数对近场区内的声压分布影响极大。当脉冲个数小于或等于 6 时,近场区声压明显变得简单,副瓣数目和尺寸均减小。

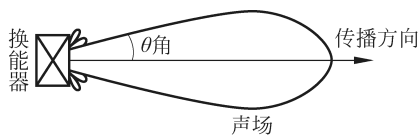


图 38.7 探头发射声场的扩散和衰减

3. 探头的延迟、声速及弹性参数的测定

3.1 超声探头的延迟和折射角

在本实验中,用斜探头产生横波超声波,用直探头产生纵波超声波。

沿超声波传播路径声波传播的距离称为声程,超声波沿某一声程的传播时间称为声时。

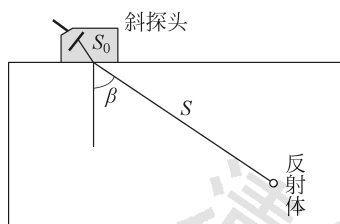


图 38.8 斜探头的延迟和折射角

在利用超声探头进行测试中,超声源产生超声波并不是直接进入被测材料的,而是先在探头内部产生超声波,再通过一定的媒介使超声波进入被测材料内部,因此超声波产生后在介质中传播的声程包括探头内部的声程 S_0 和被测材料中的声程 S ,如图 38.8 所示,其中 S_0 定义为超声探头的延迟,单位可用毫米(声程)或微秒(声时)表示。理论上讲,直探头和斜探头都有延迟,只是直探头的延迟通常较小而被忽略。

对于斜探头,我们定义晶片中心法线与探测面的交点为探头的入射点,定义在被测材料内部声束线与探测面法线的夹角为探头在该材料中的折射角 β ,一般情况下,斜探头的标称角度是指该探头用于某一特定材料(如钢,声速约 5900 m/s)情况下声束的折射角度。对于不同材料,该折射角不同。

3.2 声速与弹性常数的测量

声波在弹性媒质中传播的速度,称为声速。声波的传播只是扰动形式和能量的传递,并不把在各自平衡位置附近振动的媒质质点传走。声速的量值与媒质的性质和形状有关。

在固体介质内部,超声波可以按纵波或横波两种波型传播,对于同一种材料,其纵波波速和横波波速的大小一般是不一样的,但是,它们都是由弹性介质的密度、弹性模量和泊松比等弹性参数决定,即影响这些物理常数的因素都对声速有影响。无限大各向同性均匀固

体中,纵波声速公式为

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (38.10)$$

横波声速为

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (38.11)$$

式中, E 为杨氏模量, σ 为泊松比, ρ 是介质的密度。由此可知,固体媒质的弹性性能越强,密度越小,声速就越高。而且可以导出纵波声速与横波声速之间的关系

$$\frac{c_L}{c_S} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (38.12)$$

对一般固体, σ 在 0.33 左右, $c_L/c_S \approx 2$,因此,在同一种介质中,纵波波速约为横波波速的两倍。

固体在外力的作用下,其长度沿着力的方向产生变形,变形时应力与应变之比就定义为杨氏模量,一般用 E 表示。

固体在应力作用下,若沿纵向有一正应变(伸长),沿横向就将有一个负应变(缩短),横向应变与纵向应变之比被定义为泊松比,记作 σ ,它也是表示材料弹性性质的一个物理量。

固体在应力作用下还将产生体积的变化,应力与体应变 $\Delta V/V$ 之比定义为体弹性模量,记作 κ 。

由式(38.10)、式(38.11)、式(38.12)可以将材料的弹性常数表示为声速的函数

$$E = \frac{\rho c_S^2 (3T^2 - 4)}{T^2 - 1} \quad (38.13)$$

$$\sigma = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)} \quad (38.14)$$

$$\kappa = \rho c_S^2 (T^2 - 4/3) \quad (38.15)$$

其中

$$T = \frac{c_L}{c_S} \quad (38.16)$$

因此利用测量超声波速度的方法可以测量材料有关的弹性常数。无论纵波还是横波,其速度 c 都可以表示为

$$c = \frac{d}{t} \quad (38.17)$$

其中, d 为声波传播距离, t 为声波传播时间。

4. 超声波扫描成像

在超声水槽内,利用丝杠移动水浸式聚焦探头改变其位置,可对试块进行二维扫描式测量,将逐点的测量值传输给计算机,用色彩表示不同的深度等,应用相应的程序作出图像,这样就可对试块直观地进行观测。

扫描观测的对象不同,成像的原理也不完全相同,在本实验中,成像分为以下三种方式。

4.1 水下地貌测绘

超声波在水下传播时,被水下地面反射,通过该反射波可以计算探头到地面的距离,利用该距离进行成像。

4.2 水下地壳扫描

超声波传播透过水层进入地下,被地下地质分层反射,通过该反射波和地面反射波可以计算地质分层到地面的距离,利用该距离进行成像。

4.3 水下地藏勘测

超声波传播透过水层进入地下,如果地下有石油储藏,则石油的上下层将反射超声波,通过这两层的反射波可以计算出石油的厚度,利用该厚度进行成像。

【实验仪器】

本实验使用的是一台数字智能化的超声波分析测试仪。它主要由主机、超声波发射接收卡、A/D 转换卡和超声波换能器(探头)组成。超声波卡和 A/D 卡在使用时,是插在微机 ISA 插槽中。

超声波分析测试仪工作原理示意图如图 38.9 所示。主机是一台微处理机,它是整个系统的枢纽,由它完成系统的控制操作、数据采集、数据存储和数据的分析处理。超声卡实现超声波发射和接收功能,发射功能可以产生 100~400 V 高压电脉冲,激励探头上的压电晶片发出超声波;接收功能可以把经探头声电转换而得到的微弱电信号,经三级频带放大和视频放大输至 A/D 卡输入接口。A/D 卡或 A/D 转换器就是一个编码器,它对输入模拟量进行二进制编码,输出一个与模拟量大小成一定比例关系的数字量。A/D 转换实现了超声波接收信号的数字化。利用计算机强大的控制功能和高速运算功能对数字信号进行数字处理可以实现超声波分析测试智能化。

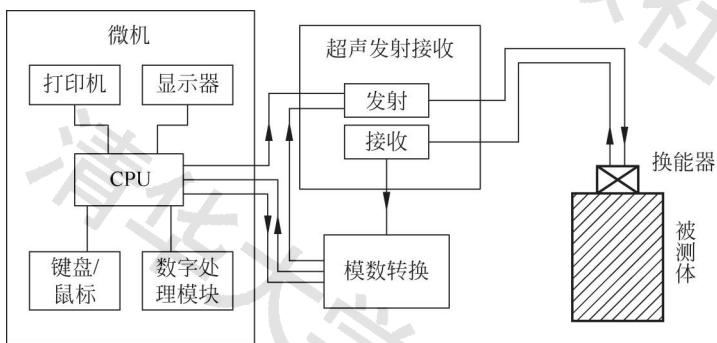


图 38.9 超声波分析测试仪工作原理

本实验所用的探头为纵波直探头、横波斜探头、水浸式聚焦探头。测试试块为钻有 6 个直径为 1 mm 的横通孔的钢试块和铝试块各一块,其尺寸如图 38.10 所示。

超声测量水槽和若干扫描成像试块用于模拟水下地貌测绘、水下地壳扫描、水下地藏勘测。探头和试块之间所用耦合剂为机油。

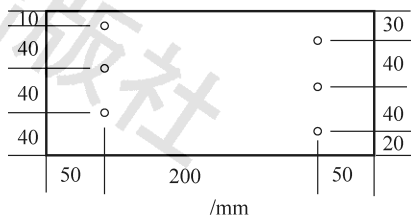


图 38.10 试块的尺寸

在实验中,利用脉冲反射方法进行测量,仪器首先产生一个高压负脉冲激励超声波换能器,换能器则产生一个有一定周期的波包,该波包在材料中传播遇到缺陷或障碍物时发生反射,反射波被同一个换能器接收,通过仪器显示在示波器上,如图 38.11 所示。在示波器上显示的波包的振幅正比于接收到声波的声压,而波包的波峰对应的时间为超声波从发射到被接收在探头内部和材料中的传播时间。

在实验中,由于探头声源的尺寸(晶片大小)相对于实验采用的超声波波长不是足够大,因此探头发射的超声波不是严格的平面波,并且声束呈发散状,如图 38.12 所示,因此在声波传播方向上,声压随声程的增大而减小;而在垂直声波传播方向上,声束中心轴线上声压最大。当声程足够大时,声波可以看成按球面波规律传播,在分析测试中,声程由反射回波波幅的最大点对应的声程确定。

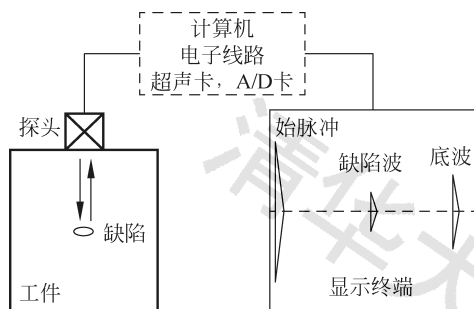


图 38.11 测量声速及探伤原理示意图

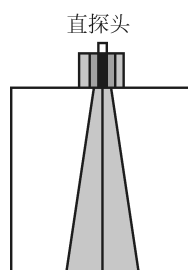


图 38.12 探头的扩散和衰减

本仪器是基于微型计算机的分析测试设备,其操作使用是通过软件界面实现的。软件界面的操作和使用请参考仪器的操作说明。

【实验内容】

1. 了解仪器的软件操作界面和界面中各个功能的意义;利用超声探伤的原理探测试块中的横孔位置,分析示波器界面上各回波对应试块中反射面的位置。
2. 了解探头结构及直探头和斜探头的异同;测量直探头和斜探头的延迟及斜探头在不同材质中的折射角。

实验中可以采用横孔人工反射体测量探头的延迟及折射角。设探头的延迟为 t_0 , 两个横孔的深度(已知)分别是 H_1 和 H_2 , 在示波器上可以测得两波对应的声时分别为 t_1 和 t_2 , 它们里面都包含有探头延迟 t_0 , 通过联立方程计算, 可以得到探头延迟。

注意: 由于斜探头上并未标明超声波入射点的位置, 因此要得到折射角, 必须测量如图 38.13 所示的 l 值。请考虑为什么及如何测量?

3. 测量钢、铝两种材质中超声纵波速度和横波速度; 并分别计算钢、铝两种固体材料的杨氏模量、体弹性模量和泊松比。

4. 改变“探头和试块设置”中系统的频率, 测量直探头发射的超声波的中心频率, 探究

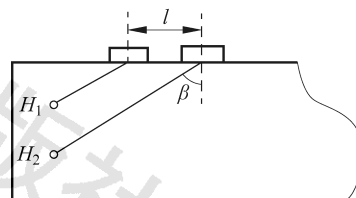


图 38.13 斜探头折射角测量

本实验中超声发射的机理和决定探头振动频率的主要因素。利用测量到的频率计算纵波在铝和钢中的波长。

5. 测量重复频率,分析重复频率对检测的影响及它和工作频率的差别。

6. 利用超声扫描成像进行水下模拟观测,了解超声技术在水中探测和医疗领域的应用原理。

7. (选做)设计实验,测量探头的近场区长度和发散角,并分析它们对实验测量的影响。

8. (选做)设计实验,测量较薄样品的厚度,分析超声波包宽度对薄样品厚度测量的影响。

9. (选做)设计实验,分析超声波型转换对测量和探伤的影响。

10. (选做)纵波测量时试块底面的两次回波信号之间是一系列衰减的波包,通过实验分析其产生原因和影响因素。

【注意事项】

1. 测量声速和延迟时注意正确判断示波器界面的各个回波信号与试块中各反射面对应关系。

2. 本实验是通过测量声波对人工反射体反射回波的传播时间进而测定声波在固体材料中传播的速度,最后计算出材料的弹性常数,因此在测量过程中,以下因素可能带来测量误差:试块的加工精度及其材质的均匀度;人工反射体的几何尺寸;探头延迟;斜探头折射角和声束宽度;A/D采集卡的采样速度;同步信号的触发精度。

根据上述可能产生误差的各种情况,可以利用下列方法来提高测量精度:

(1) 多次平均法,如利用直探头测量纵波声速时,选多个测量位置,取其平均值;

(2) 增大测量声程,如利用多次反射回波进行测量;

(3) 相对测量法,如利用不同深度反射体回波声程的差进行测量可以消除延迟的影响。

3. 超声扫描成像时注意闸门宽度要选择适当。闸门太窄会丢失测量信息,太宽则影响颜色分辨率。

【参考文献】

- [1] 何元金,马兴坤. 近代物理实验[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 应崇福. 超声学[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [3] 北京市技术交流站. 超声波探伤原理及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [4] 郑中兴,藤永平. 超声检测技术[M]. 北京:北京交通大学出版社,1998.
- [5] 沙振舜,黄润生. 近代物理实验[M]. 南京:南京大学出版社,2001.
- [6] 罗斯 J L. 固体中的超声波[M]. 何存富,吴斌,王秀彦,译. 北京:科学出版社,2004.
- [7] 冯若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999.
- [8] 超声波探伤编写组. 超声波探伤[M]. 北京:电力工业出版社,1980.

【附录】

1. 压电晶片的参数

压电晶片除了具有介电常量、弹性系数和压电常量外,还有一些其他参数如:谐振频率、介质损耗(或称介电损耗或损耗因素)、品质因数和机电耦合系数等。

1.1 介电常量 ϵ

根据电磁学理论,电位移 \mathbf{D} 与电场的强度 \mathbf{E} 的关系为

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (38.18)$$

式中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, 是真空中介电常量, ϵ_r 为相对介电常量, 介质的介电常量 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, 上式写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (38.19)$$

介电常量是表征压电体的介电性质或极化性质的一个参数。

1.2 压电常量 d

根据压电理论,在正压电效应,压电体的电位移矢量与应力 \mathbf{T} 成正比,即 $\mathbf{D} = d\mathbf{T}$,用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & \cdots & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (38.20)$$

比例系数 d 称为压电常量,在逆压电效应中,压电体应变 \mathbf{S} 与电场 \mathbf{E} 的关系为

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (38.21)$$

1.3 谐振频率

压电振子本身是弹性体,具有固有振动频率 f_r ,当施加于压电振子上的激励信号频率等于压电振子的固有频率 f_r 时,压电振子由于逆压电效应而产生机械谐振,这种机械谐振子又借助于压电效应而输出电信号。

压电振子谐振时,它的弹性最大,输出的振幅和电流达到最大值。相应于振子的阻抗为最小值时的频率称为最小阻抗频率(或称为最大导纳频率),以 f_m 表示。当信号频率继续增大,振子的输出电流减小,阻抗最大的频率称为最大阻抗频率(或称为最小导纳频率),以 f_n 表示。通常称阻抗最小的频率为谐振频率,阻抗最大的频率为反谐振频率。如继续提高输入信号的频率,还将规律地出现一系列次最大值和次最小值,其相应的频率组合 f_{n1} , f_{m1} , f_{n2} , f_{m2} , \cdots , f_n 和 f_m 称为基音频率, f_{n1} 和 f_{m1} , f_{n2} 和 f_{m2} , 则分别称为一次泛音频率和二次泛音频率。

1.4 介质损耗

压电振子一般总有耗损,介电体在电场作用下,由发热而导致的能量损耗称为介质损耗,介质损耗用损耗正切 $\tan\delta$ 来表示。

1.5 品质因数

介质耗损 $\tan\delta$ 的倒数 Q_e 称为电学品质因数。

机械品质因数 Q_m 表示压电谐振时,因克服内摩擦而耗损的能量,是衡量材料性能的一个重要参数,它与压电振子谐振时储存的机械能 W_1 与一个周期内耗损的机械能 W_2 的关系为

$$Q_m = \frac{2\pi W_1}{W_2} \quad (38.22)$$

1.6 机电耦合系数 K

反映压电材料的机械能与电能之间相互耦合程度的参数

$$K = \frac{U_1}{\sqrt{U_M U_E}} \quad (38.23)$$

式中, U_1 为压电体输出的机械能和电能相互作用的能量密度, U_M 为压电体储存的机械能密度, U_E 为压电体储存的静电能密度。

2. 一些材料的声速和密度

一些多晶或非晶固体材料、流体及气体的声速和密度见表 38.1、表 38.2 和表 38.3。

表 38.1 一些多晶或非晶固体材料在室温下的声速和密度(频率为 1 MHz 时)

材料	$C_L/$ (10^3 m/s)	$C_S/$ (10^3 m/s)	$\rho/$ (10^3 kg/m ³)	材料	$C_L/$ (10^3 m/s)	$C_S/$ (10^3 m/s)	$\rho/$ (10^3 kg/m ³)
金	3.24	1.20	19.8	铅	2.16	0.7	11.4
铁	5.85	3.23	7.7	银	3.60	1.59	10.5
不锈钢	5.79	3.10	7.9	火石	4.26	2.56	3.6
铝	6.26	3.08	2.7	冕牌	5.66	3.42	2.5
铜	4.70	2.26	8.9	派热克斯	2.67	1.12	1.18
镍	5.63	2.96	8.8	有机玻璃	2.73	1.46	1.18
钨	5.46	2.62	19.1	聚乙烯	1.95	0.54	0.9
钛	5.99	2.96	4.54	聚苯乙烯	2.35	1.12	1.06

表 38.2 一些流体的声速和密度

液 体	温度/°C	$C_L/(10^3$ m/s)	$\rho/(10^3$ kg/m ³)
水	4	1.4216	1.00
	10	1.4472	1.00
	20	1.4823	0.998
	20	1.15	0.79
乙醇	20	1.15	0.79
蓖麻油	20	1.54	0.95
甘油	20	1.98	1.26
汽油	20	1.14	0.706
水银	20	1.45	13.6

表 38.3 大气压下一些气体的声速和密度

液 体	温度/°C	$C_L/(m/s)$	$\rho/(kg/m^3)$
空气	0	331.6	1.293
	20	343	1.21
氧	0	317.2	1.41
氮	20	349	1.25
氢	0	1209.5	0.09
二氧化碳	0	258(低频)	1.98
		269(高频)	

3. 功率超声的应用

超声除了可用来做检测超声外,还有另一大类用途——功率超声,它是利用超声振动形式的能量使物质的一些物理、化学和生物特性或状态发生改变,从而对物质进行处理、加工的方法。功率超声已经在工业、农业、国防和医药卫生、环境保护等部门得到了广泛的应用,它提高了处理产品的能力,并能完成一般技术不能完成的处理工作。功率超声最常用的频率范围是从几千赫兹到几十千赫兹,而功率则由几瓦到几万瓦。在这里我们对功率超声的应用作一些简单的介绍。

3.1 超声清洗

空化是液体中的一种物理现象,在液体中由于涡流或超声的物理作用,液体的某一区域会形成局部的暂时负压区,于是在液体中产生空穴或气泡,这些充有蒸气或空气的气泡迅速膨胀,然后突然闭合,这时会产生激波,因而在局部微小区域有很大的压强,可达上千大气压,局部温度可达 5000 K。这种膨胀、闭合、振荡等一系列动力学过程称为声空化。超声清洗是利用换能器通过槽壁向盛在槽中的清洗液辐射声波,由于超声空化的力学效应以及洗液池中清洗液的充分搅拌作用,使浸在液体中的零部件的表面污物迅速被除去。超声清洗具有速度快、质量高、易于实现自动化的特点,特别是其他方法难以进入的小孔、微缝中的污垢,声波一到即刻除掉。

3.2 超声粉碎

超声在传播过程中,会引起介质的压缩和伸张,从而构成压力的变化,这种压力的变化将引起机械效应。由于超声的频率较高,使得介质质点的运动速度虽然不太大,但其加速度却很大(有时超过重力加速度数万倍),因而造成了对介质的强大机械效应甚至达到破坏介质的作用。我们巧妙地利用超声技术就可以对食品工业中的可可粉、咖啡粉、巧克力粉等进行粉碎,还可对矿山矿粉、碎性药品、上浆淀粉、化学日用品等的粉碎以及生物细胞的破碎都有效果。

3.3 超声焊接

超声波作用于介质中被介质吸收,使介质产生强烈的高频振荡,介质之间因互相摩擦而发热,这种能量可使液体、固体温度升高。超声在穿透两种不同介质的界面时,温度升高会更大,这就是超声热学效应。超声焊接金属或塑料时不需要外部加热,将焊件置于反射声极上,焊接时在焊件上施加一定的压力,当超声焊头以每秒几万次的高频做切向振动时,会产生局部高温,接触面迅速熔化,在一定的压力作用下两介质片即焊上。超声焊接的特点是不

需要焊剂和外部加热,不因受热而变形,没有残余应力,不但同类金属,而且异类金属之间也可以焊接在一起,现在还发展超声焊接塑料等工艺,具有高效、优质、美观、节能的优越性。

3.4 超声加工

超声加工是指利用加工工具做超声振动并通过磨料冲击被加工工件来碎除材料的技术,包括钻孔、切割、套料、振动切削、研磨、抛光等。加工时,工具以一定静压力压在工件上,在工具和工件之间加上磨料悬浮液,工具做超声纵向振动时,对磨料进行周期性的锤击,通过磨料的冲击把加工区的材料粉碎成细粒而从材料上脱落下来,这样就可在工作件上形成与工具形状相同的孔穴。超声加工的特点是被加工材料不受导电的限制,可以加工各种复杂形状的型孔、型腔、深孔等,加工精度和表面光洁度较高,已被广泛应用于非导电硬脆材料的加工、套料、切割和雕刻等。

3.5 超声金属成型

20 世纪 50 年代 Blaha 和 Langenecker 在用锌单晶加超声振动做拉伸实验时,发现张应力下降的“软化”现象,人们把它用于工业上帮助冷拔金属材料,就称为超声金属成型。它的特点是:降低拉拔力,减小破裂,能够拔出复杂形状的管子,以及可以延长工具寿命等。

3.6 超声悬浮

超声悬浮是在重力或微重力空间利用强驻波声场中的辐射压力与固体、液体微粒或生物细胞的重力相平衡,而使其稳定悬浮在声场中或在空中移动的技术。利用这种新技术可以用较少的设备实现一种无明显机械接触的理想实验环境来研究液体和生物媒质的力学性质,也可实现无容器的熔化和固化材料,消除容器对所制备材料的污染,得到纯度很高的材料,这一技术已在航天飞机的太空实验中得到应用。声悬浮技术还可以实现非接触的物体传输等。

3.7 超声电机

它是一种新型电机,主要是由压电材料或电致伸缩材料制成。当利用逆压电效应或电致伸缩效应在弹性体中激发某种类型的超声频振动和波动时,弹性体的表面借助于摩擦力推动与其接触的物体运动,若物体转动则称之为旋转超声电机,若物体作直线运动则称为直线超声电机。超声电机与电磁电机相比具有下列优点:①低转速高转矩,不需要减速机构;②不受磁场和放射线的影响,也不产生磁干扰;③体积小,响应快,能适应以计算机为代表的现代电子技术的需要。所以超声电机被认为在机器人、计算机、机动车和仪器仪表、宇航等领域有广阔的应用前景。但是超声电机是靠摩擦驱动,它的功率还比不上电磁电机。

4. 超声在医学中的应用

在生物学、医学领域,人们研究超声波与生物组织(主要指人体组织)的相互作用机理、规律及其应用,它主要包括两大方面:超声诊断和超声治疗。超声诊断研究如何利用各种组织声学特性的差异来区分不同组织,特别是区分正常和病变组织。超声治疗则研究如何利用超声波的生物效应(超声波照射引起的组织结构、功能和生物过程的变化)来治疗某些疾病。

4.1 超声诊断

生物组织既不同于固体介质,也不同于液体介质,它的结构很不均匀,这就造成了超声在生物组织中传播问题的复杂性。要精确描述生物组织的声学特性及超声波在生物组织中

的传播规律是不现实的,解决这一问题的方法是根据特定的目的寻求有足够精度的近似描述,也就是说,首先要找到一个适当的声学模型,这个模型的声学参量及空间分布规律描述了某生物组织的声学性能,然后建立这个模型的波动方程,根据已知声源,求解声波在模型中的传播规律,即得到声波在该组织中的传播规律。通常我们认为生物组织(指活体组织)的声学特性是不随时间变化的,这对于短时间的观察是适用的。

显然,在讨论不同问题时对模型的近似程度的要求是不一样的,最粗略的近似是把骨骼看成各向同性的均匀固体,而软组织和各脏器则被视为均匀液体,上述模型可用来检测不同组织间的界面上的声学行为。若要观察生物组织的细微结构,则必须利用组织的微弱散射信号,而声散射的形成是由于组织的非均匀性,这要求建立较好的声学模型。

超声诊断是以超声波为信息载波,将超声波探测得到的信息以某种方式显示出来由医生观察,作出诊断。下面介绍几种常用的超声信息显示方法。

(1) A 型显示

A 型显示是一维显示,它只用一个换能器发射一束脉冲声波至体内,并接收散射(或反射)回来的声波,转换为电压信号,在示波器屏幕上显示。纵轴表示散射或反射信号的大小,横轴表示到达时间,亦即散射源或反射界面与体表的距离。A 型显示可以进行病变和内脏器官的定位和估计大小。

(2) M 型显示

M 型显示是运动器官或界面的一种动态显示方法。与 A 型一样,用一个换能器发射一束脉冲声波进入体内,但其接收到的散射(或反射)回波信号被用来调制荧光屏上光点的亮度,光点的纵坐标代表回波信号相应点到体表的距离,横坐标则表示不同时刻。这种显示方式最适用于观察运动器官的工作情况。

(3) 二维图像显示

二维图像显示是目前超声诊断中最常用的显示方法,它所显示的图像与体内某一断层相对应,光点的亮度对应于该位置回声信号的强度。其主要有 B 扫描和 C 扫描。

B 扫描:显示的是与声束方向平行的断层图像,声束沿 z 方向向生物体内传播,我们沿 x 方向扫描,逐次照射物体的不同区域,并接收声束所达区域内物体的散射声信号,将声信号幅度调制荧光屏上相应位置的光点亮度,从而获得声束扫描断面内与声散射信号幅度对应的图像。光点的纵坐标表示回收信号相应点离体表的距离,横坐标对应横向位置。

B 型扫描图像在超声诊断中已得到了广泛的应用,因为它具有真实性强、直观性好、容易掌握、诊断迅速等优点,并且它还能给出实时动态图像,因而也可以观察某些运动器官如心脏、血管等的运动情况,从而判断某些疾病。

C 扫描:显示的是与声束垂直的断面。在 C 型成像中,声束不仅要沿 x 方向扫描,而且还要沿 y 方向扫描,即为面扫描。为获得某个与声束垂直的断面的清晰图像,扫描声束应聚焦于该平面。

(4) 三维图像显示

由于荧光屏本身是平面显示器,真正的三维显示是难以实现的。所谓三维图像显示通常是指按照立体投影原理,在一个平面上获得有立体感的三维物体的图像显示。为此,首先要得到物体在一个空间内的三维图像信息,或者得到若干个相邻断层内的二维图像信息,然后按照投影原理,组成一个有立体感的图像。三维图像显示的目的在于使图像更加直观,便

于作出诊断。

(5) 彩色编码显示

上述的图像显示方法均为黑白灰阶显示,由于人眼对灰阶的分辨能力远不如对不同颜色的分辨能力,且对于有不同背景亮度的灰阶信号,人眼的判断会有不同,而对在不同颜色背景下的同一颜色,人眼却可以给出客观评价。鉴于这种情况,彩色显示对图像细节的鉴别会有好处。彩色编码显示就是指将图像信号的强弱人为地译成不同的颜色来显示,这样所得到的图像的颜色是伪彩色,它由信号的强弱和彩色编码方式来决定,而与物体本身的颜色无关。

4.2 超声治疗

超声治疗可分为超声理疗和超声手术两种。

(1) 超声理疗

超声理疗是利用强度较低的超声波(每平方厘米数瓦以下)的热效应、机械效应等对疾病部位进行“加热”和机械刺激来治疗疾病,主要包括超声按摩、超声针灸及超声热疗。

(2) 超声手术

超声手术是利用较强的超声波的剧烈作用,来切断、破坏某些组织,包括超声碎石和超声手术刀两种。

超声碎石是利用聚焦的有相当高强度(每平方厘米数十至数百瓦)的声波的空化作用以及机械效应使体内结石碎裂,从而自行排出体外。

超声手术刀主要是将超声通过变幅杆聚焦于刀端,通过刀的强烈振动打碎某些软组织等。

(王合英 张慧云)