

m 910905

超声波探伤

无损检测人员考核培训教材

劳动人事出版社

无损检测人员考核培训教材

超 声 波 探 伤

全国锅炉压力容器无损检测人员
资格鉴定考核委员会组织编写

劳 动 人 事 出 版 社

超 声 波 探 伤
全国锅炉压力容器无损检测人员
资格鉴定考核委员会组织编写
责任编辑：任 萍

劳动人事出版社出版

（北京市和平里中街12号）

国防印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 15.75印张 388千字

1989年7月北京第1版 1989年7月北京第1次印刷

印数：10120册

ISBN 7-5045-0337-1/TG·034 定价：5.85元

本书是锅炉压力容器Ⅰ级超声波探伤人员的培训教材。主要包括超声波探伤的物理基础；超声场及超声场中规则形状反射体的回波规律；超声仪器、探头及试块；超声波探伤方法及通用技术；超声波探伤在板材、锻件、管材焊缝、铸钢件等工件上的应用。书中还叙述了6个超声波探伤实验，书中各章后附有习题。

本书是从事锅炉压力容器无损检测初中级技术人员所必需的课本。

前 言

本书是锅炉压力容器Ⅱ级超声波探伤人员的培训教材。书中叙述了超声波探伤的物理基础；超声场及超声场中规则形状反射体的回波规律；超声仪器、探头及试块；超声波探伤方法及通用技术；超声波探伤在板材、锻件、管材、焊缝、铸钢件等工作上的应用。书中还叙述了6个超声波探伤实验，每章后均附有习题。本书是从事锅炉压力容器无损检测初中级技术人员所必需的课本。

本书文字叙述通俗易懂、简明扼要，把一个Ⅱ级超声波检测人员所必需的专业知识作了全面介绍，是Ⅱ级超声波检测人员必须掌握的专业知识。本书也有助于质量管理人员和检查人员了解超声波探伤情况。

本书由全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会组织编写，胡天明、李家鳌、潘荣宝、宋书林、王惠玲、武玉林、周宗麓、张泰参加了编写。1987年由全国考委会秘书处整理后出了试用本，试用本在全国Ⅱ级超声波探伤培训班进行了试用。1987年12月“全国锅炉压力容器Ⅱ级无损检测教材审定会”对试用本进行了详细修改和审定。会后，由胡天明对超声波探伤试用本进行了修改和统稿，最后由全国考委会秘书处康纪黔整理和审定，由劳动人事出版社出版发行。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，请读者指正。

全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会

1988年4月

目 录

第一章 超声波探伤的物理基础	1
§ 1.1 超声波的一般概念	1
§ 1.2 超声场的特征值	11
§ 1.3 超声波垂直入射到平界面上的反射和透射	15
§ 1.4 超声波倾斜入射到平界面上的反射和折射	21
§ 1.5 超声波在曲界面上的反射和透射	30
§ 1.6 超声波的衰减	35
第二章 超声波发射声场与规则反射体的回波声压	42
§ 2.1 纵波发射声场	42
§ 2.2 横波发射声场	48
§ 2.3 规则形状反射体的回波声压	52
§ 2.4 AVG曲线及其应用	58
第三章 仪器、探头和试块	65
§ 3.1 超声波探伤仪	65
§ 3.2 探头	73
§ 3.3 试块	80
§ 3.4 探伤仪和探头的主要性能及其测试	88
第四章 超声波探伤方法和通用探伤技术	102
§ 4.1 超声波探伤方法概述	102
§ 4.2 仪器与探头的选择	107
§ 4.3 耦合与补偿	109
§ 4.4 探伤仪的调节	112
§ 4.5 缺陷位置的测定	113
§ 4.6 缺陷大小的测定	123
§ 4.7 影响超声波探伤结果的因素	128
§ 4.8 缺陷性质的分析	133
§ 4.9 非缺陷回波的判别	136
第五章 超声波探伤的应用	141
§ 5.1 板材探伤	141
§ 5.2 管材探伤	148
§ 5.3 锻件探伤	154
§ 5.4 焊缝探伤	167

§ 5.5 铸钢件探伤	190
第六章 超声波探伤实验	199
实验一 超声波探伤仪的使用和性能测试	199
实验二 纵波实用AVG曲线的测试与锻件探伤	205
实验三 横波距离-波幅曲线的测试与焊缝探伤	209
实验四 钢板探伤	213
实验五 表面声能损失的测定	215
实验六 工件材质衰减系数的测定	217
附录 超声波探伤常用标准	220
附录一 压力容器用钢板超声波探伤标准(JB 1150-73)	220
附录二 高压无缝钢管超声波探伤标准(JB 1151-73)	221
附录三 锅炉和钢制压力容器对接焊缝超声波探伤标准(JB 1152-73)	222
附录四 压力容器锻件超声波探伤标准(JB 3963-85)	232
附录五 锅炉大口径管座角焊缝超声波探伤标准(JB 3144-82)	239

第一章 超声波探伤的物理基础

超声波探伤是目前应用最广泛的无损探伤方法之一。

超声波是一种机械波，机械振动与波动是超声波探伤的物理基础。超声波探伤中，主要涉及到几何声学 and 物理声学中的一些基本定律和概念。如几何声学中的反射、折射定律及波型转换，物理声学中波的叠加、干涉、绕射及惠更斯原理等。深入理解几何声学 and 物理声学中的有关概念，掌握其中的基本定律，对于灵活运用超声波理论去解决实际探伤中的各种问题无疑是十分有益的。

§ 1.1 超声波的一般概念

一、机械振动与机械波

宇宙间的一切物质，大至宏观天体，小至微观粒子都处于一定的运动状态，振动和波动是物质运动的基本形式之一。

1. 机械振动

物体沿着直线或曲线在某一平衡位置附近作往复周期性的运动，称为机械振动。

日常生活中到处可以见到振动现象。如弹簧振子的运动，钟摆的运动和汽缸中活塞运动等都是可以直接觉察到的振动现象。另外，如固体分子的热运动，一切发声物体的运动以及超声波波源的运动等则是人们难以觉察到的振动现象。

物体（或质点）受到一定力的作用，将离开平衡位置，产生一个位移，该力消失后，由于弹性作用，它将回到其平衡位置，并且还要越过平衡位置移动到相反方向的最大位移位置，然后再返回平衡位置。这样一个完整运动过程称为一个“循环”或叫一次“全振动”。

振动是往复、周期性的运动，振动的快慢常用 振动周期 和 振动频率 两个物理量来描述。

周期 T ——振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，用 T 表示。常用单位为秒（s）。

频率 f ——振动物体在单位时间内完成全振动的次数，称为振动频率，用 f 表示。常用单位为赫兹（Hz），1 赫兹表示 1 秒钟内完成 1 次全振动，即 $1 \text{ Hz} = 1 \text{ 次/秒}$ 。此外还有千赫（kHz），兆赫（MHz）。 $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$ ， $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$ 。

由周期和频率的定义可知，二者互为倒数：

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

如某人说话的频率 $f = 1000 \text{ Hz}$ ，表示其声带振动为 1000 次/秒，声带振动周期 $T =$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ 秒}.$$

最简单最基本的直线振动称为谐振动。任何复杂的振动都可视为多个谐振动的合成。

如图 1.1 所示，质点 M 作匀速圆周运动时，其水平投影就是一种水平方向的谐振动。质点 M 的水平位移 y 和时间 t 的关系可用谐振方程来描述。

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.2)$$

式中： A ——振幅，即最大水平位移；

ω ——圆频率，即 1 秒钟内变化的弧度数 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ ；

φ ——初相位，即 $t = 0$ 时质点 M 的相位；

$\omega t + \varphi$ ——质点 M 在 t 时刻的相位。

振动方程描述了振动物体在任一时刻的位移情况。

2. 机械波

振动的传播过程，称为波动。波动分为机械波和电磁波两大类。

机械波——机械振动在弹性介质中的传播过程，称为机械波。如水波、声波、超声波等都是机械波。

电磁波——交变电磁场在空间的传播过程，称为电磁波。如无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。

由于这里研究的超声波是机械波，因此下面只讨论机械波。

弹性介质传播机械波的机理可由图 1.2 加以说明。弹性物体是由许许多多很小的微粒（称为质点）所组成，微粒间由弹性力联系着。因此弹性物体可视为弹性介质模型，质点间恰似由小弹簧联系在一起。

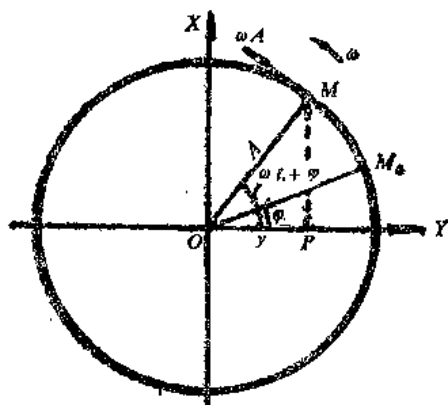


图1.1 质点谐振动参考图

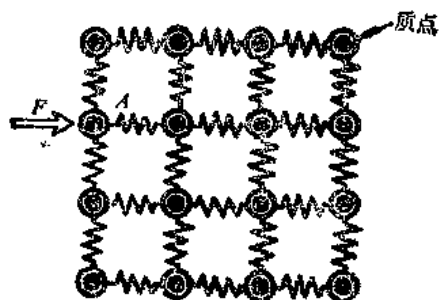


图1.2 物质的弹性模型

当外力 F 作用于质点 A 时， A 就会离开平衡位置，这时 A 周围的质点将对 A 产生弹性力使 A 回到平衡位置。当 A 回到平衡位置时，具有一定的速度，由于惯性 A 不会停在平衡位置，而会继续向前运动，并在相反方向离开平衡位置，这时 A 又会受到反向弹性力，使 A 又回到平衡位置，产生振动。与此同时， A 周围的质点也会受到大小相等方向相反的弹性力的作用，使它们离开平衡位置，并在各自的平衡位置附近振动。这样弹性介质中一个质点的振动就会引起邻近质点的振动，邻近质点的振动又会引起较远质点的

振动,于是振动就以一定的速度由近及远地向各个方向传播开来,从而就形成了机械波。

由此可见,产生机械波必须具备以下两个条件:

(1) 要有作机械振动的波源。

(2) 要有能传播机械振动的弹性介质。

由上可见,振动与波动是互相关联的,振动是产生波动的根源,波动是振动状态的传播。波动中介质各质点并不随波前进,只是以交变的振动速度在各自的平衡位置附近往复运动。

波动过程是振动状态的传播过程,也是振动能量的传播过程。但这种能量的传播,不是靠物质的迁移来实现的,也不是靠相邻质点的弹性碰撞来完成的,而是由各质点的位移连续变化来逐渐传递出去的,犹如人们传递砖块一样。

平面余弦波在理想无吸收的均匀介质中传播时的波动方程为:

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{C} \right) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.3)$$

式中: C ——波速;

x ——波的传播距离;

k ——波数, $k = \frac{\omega}{C} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

波动方程描述了波线上任意一点在任意时刻的位移情况。

3. 波长、频率和波速

(1) 波长 λ

同一波线上相邻两振动相位相同的质点间的距离,称为波长,用 λ 表示。波源或介质中任意一质点完成一次全振动,波正好前进一个波长的距离。波长的常用单位为毫米(mm),米(m)。

(2) 频率 f

波动过程中,任一给定点在1秒钟内所通过的完整波的个数,称为波动频率。波动频率在数值上同振动频率,用 f 表示,单位为 Hz。

(3) 波速 C

波动在弹性介质中,单位时间内所传播的距离称为波速,用 C 表示。常用单位为米/秒(m/s)或千米/秒(km/s)。

由波速,波长和频率的定义可得:

$$C = \lambda f$$

或

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1.4)$$

由(1.4)式可知,波长与波速成正比,与频率成反比。当频率一定时,波速愈大,波长就愈长;当波速一定时,频率愈低,波长就愈长。

4. 次声波、声波和超声波

次声波、声波和超声波都是在弹性介质中传播的机械波,它们的区别主要在于频率不同。

人们日常所听到的各种声音,是由于各种声源的振动通过空气等弹性介质传播到耳膜引起的耳膜振动,牵动听觉神经,产生听觉。但并不是任何频率的机械振动都能引起

听觉,只有当频率在一定的范围内的振动才能引起听觉。人们把能引起听觉的机械波称为声波,频率在 $20\sim 20000\text{ Hz}$ 之间。频率低于 20 Hz 的机械波称为次声波,频率高于 20000 Hz 的机械波称为超声波。次声波、超声波不可闻。

超声探伤所用的频率在 $0.5\sim 10\text{ MHz}$ 之间,对钢等金属材料的检验,常用的频率为 $1\sim 5\text{ MHz}$ 。超声波波长很短,由此决定了超声波具有一些重要特性,使其能广泛用于无损探伤。

(1) 超声波方向性好

超声波是频率很高、波长很短的机械波,在无损探伤中使用的波长为毫米数量级。超声波像光波一样具有良好的方向性,可以定向发射,犹如一束手电筒灯光可以在黑暗中找到所需物品一样在被检材料中发现缺陷。

(2) 超声波能量高

超声波探伤频率远高于声波,而能量(声强)与频率平方成正比。因此超声波的能量远大于声波的能量。如 1 MHz 的超声波的能量相当于 1 kHz 的声波的 10^6 万倍。

(3) 能在界面上产生反射、折射和波型转换

在超声波探伤中,特别是超声波脉冲反射法探伤中,利用了超声波具有几何声学的一些特点,如在介质中直线传播,遇界面产生反射、折射和波型转换等。

(4) 超声波穿透能力强

超声波在大多数介质中传播时,传播能量损失小,传播距离大,穿透能力强,在一些金属材料中其穿透能力可达数米。这是其他探伤手段所无法比拟的。

二、超声波的类型

超声波的分类方法很多,下面简单介绍几种常见的分类方法。

1. 据质点的振动方向分类

根据波动传播时介质质点的振动方向与波的传播方向不同,可将超声波分为纵波、横波、表面波和板波等。

(1) 纵波 L

介质中质点的振动方向与波的传播方向相同的波,称为纵波,用 L 表示。如图1.3所示。

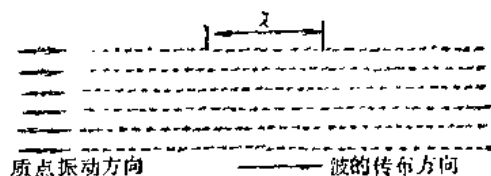


图1.3 纵波

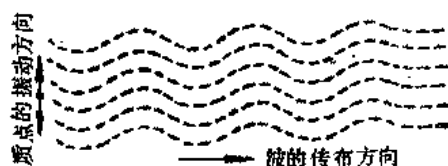


图1.4 横波

当介质质点受到交变拉压应力作用时,质点之间产生相应的伸缩形变,从而形成纵波。这时介质质点疏密相间,故纵波又称为压缩波或疏密波。

凡能承受拉伸或压缩应力的介质都能传播纵波。固体介质能承受拉伸或压缩应力,因此固体介质可以传播纵波。液体和气体虽然不能承受拉伸应力,但能承受压应力产生容积变化,因此液体和气体介质也可以传播纵波。

(2) 横波 $S(T)$

介质中质点的振动方向与波的传播方向互相垂直的波称为横波，用 S 或 T 表示。如图 1.4 所示。

当介质质点受到交变的剪切应力作用时，产生切变形变，从而形成横波。故横波又称为切变波。

只有固体介质才能承受剪切应力，液体和气体介质不能承受剪切应力，因此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。

(3) 表面波 R

当介质表面受到交变应力作用时，产生沿介质表面传播的波，称为表面波，常用 R 表示，如图 1.5 所示。表面波是瑞利 1887 年首先提出来的，因此表面波又称瑞利波。

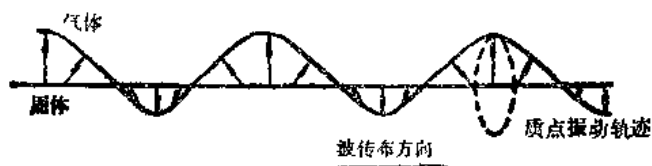


图 1.5 表面波（瑞利波）

表面波在介质表面传播时，介质表面质点作椭圆运动，椭圆长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于波的传播方向。椭圆运动可视为纵向振动与横向振动的合成，即纵波与横波的合成，因此表面波同横波一样只能在固体介质中传播，不能在液体或气体介质中传播。

表面波只能在固体表面传播。表面波的能量随传播深度增加而迅速减弱。当传播深度超过两倍波长时，质点的振幅就已经很小了。因此，一般认为，表面波探伤只能发现距工件表面两倍波长深度内的缺陷。

(4) 板波

在板厚与波长相当的弹性薄板中传播的波，称为板波。

根据质点的振动方向不同可将板波分为 SH 波和兰姆波。

(i) SH 波

如图 1.6 所示， SH 波是水平偏振的横波在薄板中的传播。

薄板中各质点的振动方向平行于板面而垂直于波的传播方向。相当于固体介质表面的横波。

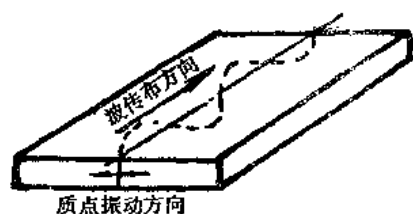


图 1.6 SH 波

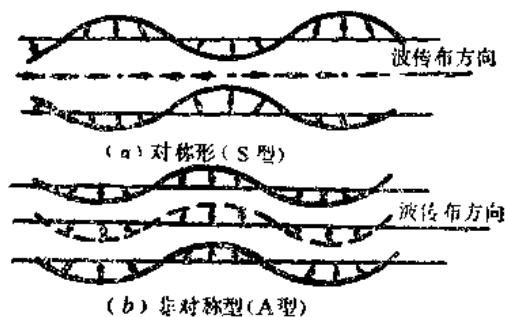


图 1.7 兰姆波

② 兰姆波

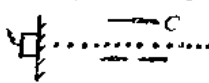
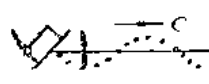
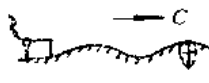
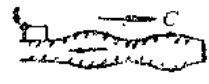
兰姆波又分为对称型 (S型) 和非对称型 (A型), 如图 1.7 所示。

对称型 (S波) 兰姆波的特点是薄板中心质点作纵向振动, 上下表面质点作椭圆运动, 振动相位相反并对称于中心, 如图 1.7 (a) 所示。

非对称型 (A型) 兰姆波特点是薄板中心质点作横向振动, 上下表面质点作椭圆运动, 相位相同, 不对称。如图 1.7 (b) 所示。

各种类型波的比较归纳在表 1.1 中。

表 1.1 各种类型波的比较

波的类型		简 图	质点振动特点	传播介质	应用
纵 波			质点振动方向平行于波的传播方向	固、液、气体介质	钢板、锻件探伤等
横 波			质点振动方向垂直于波传播方向	固体介质	焊缝、钢管探伤等
表面波			质点作椭圆运动, 椭圆长轴垂直波传播方向, 短轴平行于波传播方向	固体介质	钢板、锻件、钢管探伤等
板 波	对称型 (S型)		上下表面: 椭圆运动中心; 纵向振动	固体介质 (厚度与波长相当的薄板)	薄板、薄壁钢管 ($\delta < 6 \text{ mm}$)
	非对称型 (A型)		上下表面: 椭圆运动中心; 横向振动		

注: SH 波应用较少, 未列入表中。

2. 按波的形状分类

波的形状 (波形) 是根据波阵面的形状来区分的。

波阵面——同一时刻, 介质中振动相位相同的所有质点所联成的面称为波阵面。

波前——某一时刻, 波动所到达的空间各点所联成的面称为波前。

波线——波的传播方向称为波线。

由以上定义可知, 波前是最前面的波阵面, 是波阵面的特例。任意时刻, 波前只有一个, 而波阵面却有很多。在各向同性的介质中, 波线恒垂直于波阵面或波前。

据波阵面形状不同, 可以把不同波源发出的波分为平面波、柱面波和球面波。

(1) 平面波

波阵面为互相平行的平面的波称为平面波。平面波的波源为一平面, 如图 1.8 所示。

尺寸远大于波长的刚性平面波源在各向同性的均匀介质中辐射的波可视为平面波。平面波波束不扩散。平面波各质点振幅是一个常数, 不随距离而变化。

平面波的波动方程为:

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{C} \right) \quad (1.5)$$

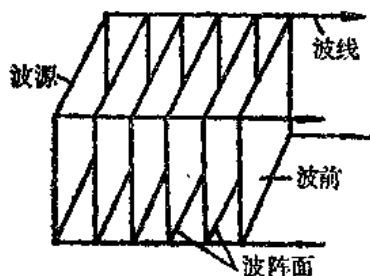


图1.8 平面波

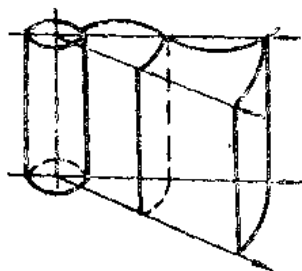
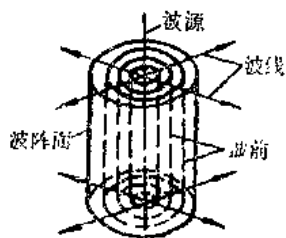


图1.9 柱面波



(2) 柱面波

波阵面为同轴圆柱面的波称为柱面波。柱面波的波源为一条线，如图 1.9 所示。

长度远大于波长的线状波源在各向同性的介质中辐射的波可视为柱面波。柱面波波束向四周扩散。柱面波各质点的振幅与距离平方根成反比。

柱面波的波动方程为：

$$y = \frac{A}{\sqrt{x}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{C} \right) \quad (1.6)$$

(3) 球面波

波阵面为同心球面的波称为球面波。球面波的波源为一点，如图 1.10 所示。

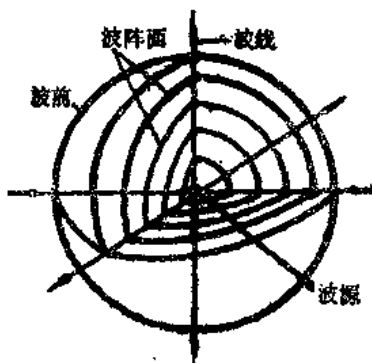


图1.10 球面波

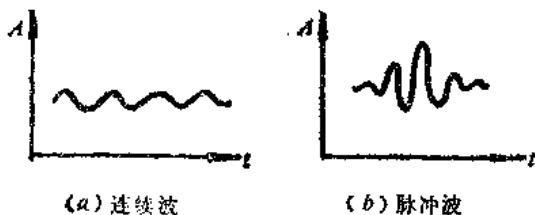


图1.11 连续波与脉冲波

尺寸远小于波长的点波源在各向同性的介质中辐射的波可视为球面波。球面波波束向四面八方扩散。球面波各质点的振幅与距离成反比。

实际应用的超声波探头中的波源近似活塞振动，在各向同性的介质中辐射的波称为活塞波。当距波源的距离足够大时，活塞波类似于球面波。

球面波的波动方程为：

$$y = \frac{A}{x} \cos \omega \left(t - \frac{x}{C} \right) \quad (1.7)$$

3. 按振动的持续时间分类

根据波源振动的持续时间长短，将波动分为连续波和脉冲波。

(1) 连续波

波源持续不断地振动所辐射的波称为连续波。如图 1.11 (a) 所示。超声波穿透法探伤常采用连续波。

(2) 脉冲波

波源振动持续时间很短 (通常是微秒数量级, $1 \text{ 微秒} = 10^{-6} \text{ 秒}$), 间歇辐射的波称为脉冲波。如图 1.11 (b) 所示。

目前超声波探伤中广泛采用的就是脉冲波。

三、超声波的传播速度

超声波在介质中的传播速度与介质的弹性模量和介质的密度有关, 对一定的介质, 弹性模量和密度为常数, 故声速也是常数。不同的介质, 有不同的声速。超声波波型不同时, 介质弹性变形型式不同, 声速也不一样。因此超声波在介质中的传播速度是表征介质声学特性的重要参数。

1. 固体介质中的声速

固体介质不仅能传播纵波, 而且可以传播横波和表面波等, 但它们的声速是不相同的。此外介质尺寸的大小对声速也有一定的影响, 无限大介质与细长棒中的声速也不一样。

(1) 无限大固体介质中的波速

无限大固体介质是相对于波长而言的, 当介质的尺寸远大于波长时, 就可以视为无限大介质。

在无限大的固体介质中, 纵波声速为:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1.8)$$

在无限大的固体介质中, 横波声速为:

$$C_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (1.9)$$

在无限大的固体介质中, 表面波声速为:

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.10)$$

以上公式中:

E —— 介质的杨氏弹性模量, 等于介质承受的拉应力 F/S 与相对伸长 $\frac{\Delta L}{L}$ 之比,

$$\text{即 } E = \frac{F/S}{\Delta L/L};$$

G —— 介质的切变弹性模量, 等于介质承受的切应力 Q/S 与切应变 φ 之比, 即 $G = \frac{Q/S}{\varphi}$,

ρ —— 介质的密度, 等于介质的质量 M 与其体积 V 之比, 即 $\rho = \frac{M}{V}$,

σ —— 介质的泊松比, 等于介质横向相对缩短 $\varepsilon_t = -\frac{\Delta d}{d}$, 与纵向相对伸长 $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$

之比, 即 $\sigma = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon}$ 。

由 (1.8)、(1.9)、(1.10) 三式可知:

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

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

$$\frac{C_L}{C_s} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} > 1$$

即 $C_L > C_s$

$$\frac{C_R}{C_s} = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} < 1$$

即 $C_s > C_R$

所以 $C_L > C_s > C_R$

这表明, 在同一种固体材料中, 纵波声速大于横波声速, 横波声速又大于表面波声速。

对于钢材, σ 约为 0.28, $C_L \approx 1.3C_s$, $C_R \approx 0.9C_s$ 。

(2) 细长棒中的纵波声速 C_{Lb}

在细长棒中 (棒径 $d \leq \lambda$) 轴向传播的纵波波速与无限大介质中纵波声速不同, 细长棒中的纵波声速为:

$$C_{Lb} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.11)$$

常用固体材料中的声速、弹性模量等列于表 1.2。

表 1.2 固体的声速、弹性模量和声阻抗

种类	ρ (克/厘米 ³)	E ($\times 10^{11}$ /厘米 ²)	G ($\times 10^{11}$ /厘米 ²)	σ	C_{Lb} (米/秒)	C_L (米/秒)	C_s (米/秒)	$Z = \rho C_{Lb}$ ($\times 10^6$ 克/厘米 ² ·秒)
铝 Al	2.7	6.85	2.56	0.34	5040	6760	3080	1.69
铁 Fe	7.7	20.6	8.03	0.28	5180	5850~5900	3230	4.50
铸铁	6.9~7.3					3500~5600	2200~3200	2.5~4.2
钢	7.7	20.6	8.03	0.28		5880~5950	3230	4.53
铜 Cu	8.9	12.3	4.55	0.33	3710	4700	2260	4.18
有机玻璃	1.18		0.252	0.321		2730	1460	0.32
聚苯乙烯	1.05		0.128	0.341		2340~2350	1150	0.25
环氧树脂	1.1~1.25					2400~2800	1100	0.27~0.36

2. 液体和气体介质中的纵波声速

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

$$C_L = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1.12)$$

式中： B ——液体、气体介质的容变弹性模量，表示产生单位容积相对变化量所需压强，
 ρ ——液体、气体介质的密度。

由上式可知，液体、气体介质中的纵波声速与其容变弹性模量和密度有关，介质的容变弹性模量愈大、密度愈小，声速就愈大。当介质温度变化时，介质的容变弹性模量和密度也会发生变化，声速也随着变化。

不同温度下水中声速见表1.3。

表1.3 不同温度下的水中声速

温度 $t^{\circ}\text{C}$	10	20	25	30	40	50	60	70	80
声速 (米/秒)	1448	1483	1497	1510	1530	1544	1552	1555	1554

四、超声波的叠加、干涉、绕射和惠更斯原理

1. 波的叠加原理

(1) 当几列波在同一介质中传播并相遇时，相遇处质点的振动是各列波引起的分振动的合成，任一时刻该质点的位移是各列波引起的分位移的矢量和。

(2) 相遇后的各列波仍保持它们各自原有的特性（频率、波长、振幅、振动方向等）不变，并按照自己原来的传播方向继续前进，好象在各自的传播过程中没有遇到其他波一样。

这就是波的叠加原理，它描述了波的独立性，以及质点受到几个波同时作用时的振动叠加性。

2. 波的干涉

波的干涉是波动的重要特征。

两列频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差恒定的波相遇时，由于波叠加的结果，会使某些地方的振动始终互相加强，而另一些地方的振动始终互相减弱或完全抵消，这种现象称为波的干涉现象。产生干涉现象的波称为相干波。产生干涉现象的波源称为相干波源。

波的叠加原理是波干涉现象的基础，干涉现象的产生是相干波传播到空间各点时，波程不同所致。

当波程差等于波长的整数倍时，两列相干波相遇时互相加强，合振幅达最大值。

当波程差等于半波长的奇数倍时，两列相干波相遇时互相减弱，合振幅达最小值。如两波的振幅相同，则互相完全抵消。

两列振幅相同的相干波，在同一直线上沿相反方向传播时互相叠加而成的波，称为驻波。驻波是波的干涉现象的特例。当介质厚度 l 等于半波长的整数倍时，即 $l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 时就会产生驻波。驻波中振幅最大的点称为波腹，振幅为零的点称为波节。

在超声波探头设计中，通常压电晶片厚度 $l = \frac{\lambda}{2}$ ，形成驻波，产生共振，合振幅达最大，这时探头辐射超声波的效率最高。