

## 培训教材之理论基础

### 第一章 无损检测概述

无损检测包括射线检测 (RT)、超声检测 (UT)、磁粉检测 (MT)、渗透检测 (PT) 和涡流检测 (ET) 等五种检测方法。主要应用于金属材料制造的机械、器件等的原材料、零部件和焊缝, 也可用于玻璃等其它制品。

射线检测适用于碳素钢、低合金钢、铝及铝合金、钛及钛合金材料制机械、器件等的焊缝及钢管对接环缝。射线对人体不利, 应尽量避免射线的直接照射和散射线的影响。

超声检测系指用 A 型脉冲反射超声波探伤仪检测缺陷, 适用于金属制品原材料、零部件和焊缝的超声检测以及超声测厚。

磁粉检测适用于铁磁性材料制品及其零部件表面、近表面缺陷的检测, 包括干磁粉、湿磁粉、荧光和非荧光磁粉检测方法。

渗透检测适用于金属制品及其零部件表面开口缺陷的检测, 包括荧光和着色渗透检测。

涡流检测适用于管材检测, 如圆形无缝钢管及焊接钢管、铝及铝合金拉薄壁管等。

磁粉、渗透和涡流统称为表面检测。

### 第二章 超声波探伤的物理基础

#### 第一节 基本知识

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。

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。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。机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程。超声波就是一种机械波。

机械波主要参数有波长、频率和波速。波长  $\lambda$ : 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, 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, 常用单位为米(m); 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频率, 常用单位为赫兹(Hz); 波速  $C$ : 波动中, 波在单位时间内所传播的距离称为波速, 常用单位为米/秒 (m/s)。

由上述定义可得:  $C = \lambda f$ , 即波长与波速成正比, 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。

次声波、声波和超声波都是在弹性介质中传播的机械波, 在同一介质中的传播速度相同。它们的区别在主要在于频率不同。频率在20~20000Hz 之间的能引起人们听觉的机械波称为声波, 频率低于20Hz 的机械波称为次声波, 频率高于20000Hz 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一般在0.5~10MHz 之间, 对钢等金属材料的检验, 常用的频率为1~5MHz。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. 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级; 超声波象光波一样具有良好的方向性, 可以定向发射, 易于在被检材料中发现缺陷。
2. 能量高: 由于能量 (声强) 与频率平方成正比, 因此超声波的能量远大于一般声波的能量。
3. 能在界面上产生反射、折射和波型转换: 超声波具有几何声学的上一些特点, 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. 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。

## 第二节 波的类型及波速测量

### 一. 波的类型

根据波动传播时介质质点的振动方向相对于波的传播方向的不同，可将波动分为纵波、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互相平行的波，称为纵波，用 L 表示。

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；凡能承受拉伸或压缩应力的介质都能传播纵波。固体介质能承受位伸或压缩应力；液体和气体虽不能承受拉伸应力，但能承受压应力产生容积变化。因此固体、液体和气体都能传播纵波。钢中纵波声速一般为5960m/s。纵波一般应用于钢板、锻件探伤。

#### 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。

当介质质点受到交变的剪切应力作用时，产生剪切形变，从而形成横波；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。钢中横波声速一般为3230m/s。横波一般应用于焊缝、钢管探伤。

#### 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。又称瑞利波。

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，因此表面波只能在固体介质中传播，不能在液体和气体介质中传播。

表面波的能量随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。表面波一般应用于钢管探伤。

#### 4. 板波

在板厚与波长相当的薄板中传播的波，称为板波。根据质点的振动方向不同可将板波分为 S H 波和兰姆波。板波一般应用于薄板、薄壁钢管探伤。

### 二. 超声波声速测量

对探伤人员来说，用探伤仪测量声速是最简便的，用这种方法测声速，可用单探头反射法或双探头穿透法；可用于测纵波声速和横波声速。

#### 1. 反射法测纵波声速

声速按下式计算：

$$\text{声速 } C=2d/(T-1-t); \quad t = 2T_1 - T_2$$

式中  $d$  ----- 工件厚度；

$t$  ----- 由探头晶片至工件表面传输时间；

$T_1$  ----- 由探头晶片至工件底一次波传输时间；

$T_2$  ----- 由探头晶片至工件底二次波传输时间；

#### 2. 穿透法测纵波声速

声速按下式计算：

$$\text{声速 } C=d/(T-1-t); \quad t = 2T_1 - T_2$$

式中  $d$  ----- 工件厚度；

$t$  ----- 由探头晶片至工件表面传输时间；

$T_1$  ----- 由探头晶片至工件底一次波传输时间；

$T_2$  ----- 由探头晶片至工件底二次波传输时间；

### 3. 反射法测横波声速

用半圆弧测横波声速，按下式计算：

$$\text{声速 } C=2d/(T-1-t); \quad t = 2T_1 - T_2$$

式中  $d$  ----- 半圆半径长度；

$t$  ----- 由探头晶片至半圆弧探测面传输时间；

$T_1$  ----- 由探头晶片至圆弧面一次波传输时间；

$T_2$  ----- 由探头晶片至圆弧面二次波传输时间；

## 第三节 波的若干概念

### 一. 波的迭加与干涉

#### 1. 波的迭加原理

当几列波在同一介质中传播时，如果在空间某处相遇，则相遇处质点的振动是各列波引起振动的合成，在任意时刻该质点的位移是各列波引起的位移的矢量和。几列波相遇后仍保持自己原有的频率、波长、振动方向等特性并按原来的传播方向继续前进，好象在各自的途中没有遇到其他波一样，这就是波的迭加原理，又称波的独立性原理。

波的迭加现象可以从许多事实观察到，如两石子落水，可以看到两个石子入水处为中心的圆形水波的迭加情况和相遇后的传播情况。又如乐队合奏或几个人谈话，人们可以分辨出各种乐器或各人的声音，这些都可以说明波传播的独立性。

#### 2. 波的干涉

两列频率相同，振动方向相同，位相相同或位相差恒定的波相遇时，介质中某些地方的振动互相加强，而另一些地方的振动互相减弱或完全抵消的现象叫做波的干涉现象。

波的迭加原理是波的干涉现象的基础，波的干涉是波动的重要特征。在超声波探伤中，由于波的干涉，使超声波源附近出现声压极大极小值。

### 二. 惠更斯原理和波的衍射

#### 1.惠更斯原理

如前所述，波动是振动状态的传播，如果介质是连续的，那么介质中任何质点的振动都将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，因此波动中任何质点都可以看作是新的波源。据此惠更斯提出了著名的惠更斯原理：介质中波动传播到的各点都可以看作是发射子波的波源，在其后任意时刻这些子波的包迹就决定新的波阵面。

#### 2.波的衍射（绕射）

波在传播过程中遇到与波长相当的障碍物时，能绕过障碍物边缘改变方向继续前进的现象，称为波的衍射或波的绕射。

当  $D \ll 1$  时, 波的绕射强, 反射弱, 缺陷回波很低, 容易漏检; 当  $D \gg 1$  时, 反射强, 绕射弱, 声波几乎全反射。

波的绕射对探伤即有利又不利。由于波的绕射, 使超声波产生晶粒绕射顺利地介质中传播, 这对探伤有利; 但同时由于波的绕射, 使一些小缺陷回波显著下降, 以致造成漏检, 这对探伤不利。一般超声波探伤灵敏度约为  $1/2$ 。

### 三. 超声场的特征值

充满超声波的空间或超声振动所波及的部分介质, 叫超声场; 超声场具有一定的空间大小和形状, 只有当缺陷位于超声场内时, 才有可能被发现。描述超声场的特征值 (即物理量) 主要有声压、声强和声阻抗。

#### 1. 声压 $P$

超声场中某一点在某一时刻所具有的压强  $P_1$  与没有超声波存在时的静态压强  $P_0$  之差, 称为该点的声压, 用  $P$  表示 ( $P = P_1 - P_0$ )。

声压幅值  $p = r \cdot c \cdot u = r \cdot c \cdot (2p \cdot f \cdot A)$

其中  $r$  ---介质的密度;

$c$  ---波速;

$u$  ---质点的振动速度;

$A$  ---声压最大幅值;

$f$  ---频率。

超声场中某一点的声压的幅值与介质的密度、波速和频率成正比。在超声波探伤仪上, 屏幕上显示的波高与声压成正比。

#### 2. 声阻抗 $Z$

超声场中任一点的声压  $p$  与该处质点振动速度  $u$  之比称为声阻抗, 常用  $Z$  表示。

$Z = p / u = r \cdot c \cdot u / u = r \cdot c$

由上式可知, 声阻抗的大小等于介质的密度与波速的乘积。由  $u = P/Z$  可知, 在同一声压下,  $Z$  增加, 质点的振动速度下降。因此声阻抗  $Z$  可理解为介质对质点振动的阻碍作用。超声波在两种介质组成的界面上的反射和透射情况与两种介质的声阻抗密切相关。

#### 3. 声强 $I$

单位时间内垂直通过单位面积的声能称为声强, 常用  $I$  表示。

$I = Z \cdot u^2/2 = P^2/(2Z)$

当超声波传播到介质中某处时, 该处原来静止不动的质点开始振动, 因而具有动能; 同时该处介质产生弹性变形, 因而也具有弹性位能; 声能为两者之和。

声波的声强与频率平方成正比, 而超声波的频率远大于可闻声波。因此超声波的声强也远大于可闻声波的声强。这是超声波能用于探伤的重要原因。

在同一介质中, 超声波的声强与声压的平方成正比。

### 四. 分贝的概念与应用

#### 1. 概念

由于在生产和科学实验中, 所遇到的声强数量级往往相差悬殊, 如引起听觉的声强范围为  $10^{-16} \sim 10^{-4}$  瓦/厘米<sup>2</sup>, 最大值与最小值相差12个数量级。显然采用绝对量来度量是不方便的, 但如果对其比值 (相对量) 取对数来比较计算则可大简化运算。分贝就是两个同量纲的量之比取对数后的单位。

通常规定引起听觉的最弱声强为  $I_1 = 10^{-16}$  瓦/厘米<sup>2</sup> 作为声强的标准, 另一声强  $I_2$  与标准声强  $I_1$  之比的常用对数称为声强级, 单位是贝尔(BeL)。实际应用时贝尔太大, 故常取1

/10贝尔即分贝 (dB) 来作单位。(如取自然对数, 则单位为奈培 NP)

$$D = \lg (I_2/I_1) \quad (\text{Bel})$$

$$= 10 \lg (I_2/I_1) = 20 \lg (P_2/P_1) \quad (\text{dB})$$

在超声波探伤中, 当超声波探伤仪的垂直线性较好时, 仪器屏幕上的波高与声压成正比。这时有

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

这时声压基准  $P_1$  或波高基准  $H_1$  可以任意选取。

## 2. 应用

分贝用于表示两个相差很大的量之比显得很方便, 在声学 and 电学中都得到广泛的应用, 特别是在超声波探伤中应用更为广泛。例如屏上两波高的比较就常常用 dB 表示。

例如, 屏上一波高为 80%, 另一波高为 20%, 则前者比后者高

$$D = 20 \lg (H_2/H_1) = 20 \lg (80/20) = 12 \quad (\text{dB})$$

用分贝值表示回波幅度的相互关系, 不仅可以简化运算, 而且在确定基准波高以后, 可直接用仪器的增益值 (数字机) 或衰减值 (模拟机) 来表示缺陷波相对波高。

## 第四节 波的反射、透射及衰减

超声波从一种介质传播到另一种介质时, 在两种介质的分界面上, 一部分能量反射回原介质内, 称为反射波; 另一部分能量透过界面在另一种介质内传播, 称为透射波。在界面上声能 (声压、声强) 的分配和传播方向的变化都将遵循一定的规律。

### 一. 单一界面的反射和透射

声能的变化与两种介质的声阻抗密切相关, 设波从介质 1 (声阻抗  $Z_1$ ) 入射到介质 2 (声阻抗  $Z_2$ ), 有以下几种情况:

#### 1. $Z_2 > Z_1$

声压反射率小于透射率。如水/钢界面。

#### 2. $Z_1 > Z_2$

声压反射率大于透射率。如钢/水界面。

声强反射率及透射率只与  $Z_1$ 、 $Z_2$  的数值有关, 与从哪种介质入射无关。

#### 3. $Z_1 \gg Z_2$

声压 (声强) 几乎全反射, 透射率趋于 0。如钢/空气界面。

#### 4. $Z_1 \gg Z_2$

此时几乎全透射, 无反射。因此在焊缝探伤中, 若母材与填充金属结合面没有任何缺陷, 是不会产生界面回波的。

### 二. 薄层界面的反射和透射

此情况主要对探头保护膜设计具有指导意义。

当超声波依次从三种介质  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  (如晶片—保护膜—工件) 中穿过, 则当薄层厚度等于半波长的整数倍时, 通过薄层的声强透射与薄层的性质无关, 即好象不存在薄层一样; 当薄层厚度等于四分之一波长的奇数倍且薄层声阻抗为其两侧介质声阻抗几何平均值 ( $Z_2 = (Z_1 Z_3)^{1/2}$ ) 时, 超声波全透射

### 三. 波型转换和反射、折射定律

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

## 1. 纵波斜入射

## 2. 横波入射

### 四. 超声波的衰减

超声波在介质中传播时，随着距离增加，超声波能量逐渐减弱的现象叫做超声波衰减。引起超声波衰减的主要原因是波束扩散、晶粒散射和介质吸收

#### 1. 扩散衰减

超声波在传播过程中，由于波束的扩散，使超声波的能量随距离增加而逐渐减弱的现象叫做扩散衰减。超声波的扩散衰减仅取决于波阵面的形状，与介质的性质无关。

#### 2. 散射衰减

超声波在介质中传播时，遇到声阻抗不同的界面产生散乱反射引起衰减的现象，称为散射衰减。散射衰减与材质的晶粒密切相关，当材质晶粒粗大时，散射衰减严重，被散射的超声波沿着复杂的路径传播到探头，在屏上引起林状回波（又叫草波），使信噪比下降，严重时噪声会湮没缺陷波。

#### 3. 吸收衰减

超声波在介质中传播时，由于介质中质点间内摩擦（即粘滞性）和热传导引起超声波的衰减，称为吸收衰减或粘滞衰减

通常所说的介质衰减是指吸收衰减与散射衰减，不包括扩散衰减。

### 第五节 超声波发射声场和规则反射体的回波声压

超声波探头（波源）发射的超声场，具有特殊的结构，只有当缺陷位于超声场内时，才有可能被发现

#### 一. 圆盘波源辐射的纵波声场

在不考虑介质衰减的条件下，当离波源较远处轴线上的声压与距离成反比，与波源面积成正比。

##### 1. 近场区

波源附近由于波的干涉而出现一系列声压极大极小值的区域，称为超声场的近场区。近场区声压分布不均，是由于波源各点至轴线上某点的距离不同，存在波程差，互相迭加时存在位相差而互相干涉，使某些地方声压互相加强，另一些地方互相减弱，于是就出现声压极大极小值的点。

波源轴线上最后一个声压极大值至波源的距离称为近场区长度，用  $N$  表示。

$$N = (D^2 - 1) / (4\lambda) \gg D^2 / (4\lambda)$$

##### 2. 远场区

波源轴线上至波源的距离  $x > N$  的区域称为远场区。远场区轴线上的声压随距离增加单调减少。当  $x > 3N$  时，声压与距离成反比，近似球面波的规律。因为距离  $x$  足够大时，波源各点至轴线上某一点的波程差很小，引起的相位差也很小，这样干涉现象可以略去不计，所以远场区不会出现声压极大极小值。

##### 3. 近场区在两种介质中分布

实际探伤时，有时近场区分布在两种不同的介质中，如水浸探伤，超声波先进入水，然后再进入钢中，当水层厚度较小时，近场区就会分布在水、钢两种介质中。设水层厚度为  $L$ ，则

钢中剩余近场区长度  $N$  为

$$N = Ds^2 / (4\lambda) - Lc_1 / c_2$$

式中  $c_1$  --- 介质1水中波速;

$c_2$  --- 介质2钢中波速;

$\lambda$  --- 介质2钢中波长。

在近场区内,实际声场与理想声场存在明显区别,实际声场轴线上声压虽也存在极大极小值,但波动幅度小,极值点的数量也明显减少。

## 二. 横波声场

目前常用的横波探头,是使纵波斜入射到界面上,通过波形转换来实现横波探伤的,当入射角在第一、第二临界角之间时,纵波全反射,第二介质中只有折射横波。

横波声场同纵波声场一样由于波的干涉存在近场区和远场区,当  $x \geq 3N$  时,波束轴线上的声压与波源面积成正比,与至假想波源的距离成反比,类似纵波声场。当横波探头晶片尺寸一定时,  $K$  值增大,近场区长度将减小。

## 三. 规则反射体的回波声压

在实际探伤中一般采用反射法,即根据缺陷反射回波声压的高低来评价缺陷的大小。然而工件中的缺陷形状性质各不相同,目前的探伤技术还难以确定缺陷的真实大小和形状,回波声压相同的缺陷的实际大小可能相差很大,为此特引用当量法;当量法是指在同样的探测条件下,当自然缺陷回波与某人工规则反射体回波等高时,则该人工规则反射体的尺寸就是此自然缺陷的当量尺寸。自然缺陷的实际尺寸往往大于当量尺寸。

超声波探伤中常用的规则反射体有平底孔、长横孔、短横孔、球孔和大平底面等。

回波声压公式(考虑介质衰减因素):

## 四. AVG 曲线

AVG 曲线是描述规则反射体的距离、回波高及当量大小之间关系的曲线; A、V、G 是德文距离、增益和大小的字头缩写,英文缩写为 DGS。AVG 曲线可用于对缺陷定量和灵敏度调整。

以横坐标表示实际声程,纵坐标表示规则反射体相对波高,用来描述距离、波幅、当量大小之间的关系曲线,称为实用 AVG 曲线。实用 AVG 曲线可由以下公式得到:

不同距离的大平底回波 dB 差

$$\Delta = 20 \lg PB_1 / PB_2 = 20 \lg X_2 / X_1$$

不同距离的不同大小平底孔回波 dB 差

$$\Delta = 20 \lg Pf_1 / Pf_2 = 40 \lg Df_1 X_2 / Df_2 X_1$$

同距离的大平底与平底孔回波 dB 差

$$\Delta = 20 \lg PB / Pf = 20 \lg 2\lambda X / \pi Df Df$$

用以上公式计算绘制实用 AVG 曲线时,要统一灵敏度基准。

## 第六节 仪器、探头和试块

超声波探伤仪、探头和试块是超声波探伤的重要设备,了解这些设备的原理、构造和作用及其主要性能的测试方法是正确选用探伤设备进行有效探伤的保证。

### 一. 超声波探伤仪

#### 1. 作用

超声波探伤仪的作用是产生电振荡并加于换能器（探头）上，激励探头发射超声波，同时将探头送回的电信号进行放大，通过一定方式显示出来，从而得到被探工件内部有无缺陷及缺陷位置和大小等信息。

## 2. 分类

按缺陷显示方式分类，超声波探伤仪分为三种。

**A型：**A型显示是一种波形显示，探伤仪的屏幕的横坐标代表声波的传播距离，纵坐标代表反射波的幅度。由反射波的位置可以确定缺陷位置，由反射波的幅度可以估算缺陷大小。

**B型：**B型显示是一种图象显示，屏幕的横坐标代表探头的扫查轨迹，纵坐标代表声波的传播距离，因而可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。

**C型：**C型显示也是一种图象显示，屏幕的横坐标和纵坐标都代表探头在工件表面的位置，探头接收信号幅度以光点辉度表示，因而当探头在工件表面移动时，屏上显示出被探工件内部缺陷的平面图象，但不能显示缺陷的深度。

目前，探伤中广泛使用的超声波探伤仪都是A型显示脉冲反射式探伤仪。

## 3. A型脉冲反射式模拟超声波探伤仪的一般原理

### 二. 探头

超声波的发射和接收是通过探头来实现的。下面介绍探头的工作原理、主要性能及其结构。

#### 1. 压电效应

某些晶体材料在交变拉压应作用下，产生交变电场的效应称为正压电效应。反之当晶体材料在交变电场作用下，产生伸缩变形的效应称为逆压电效应。正、逆压电效应统称为压电效应。超声波探头中的压电晶片具有压电效应，当高频电脉冲激励压电晶片时，发生逆压电效应，将电能转换为声能(机械能)，探头发射超声波。当探头接收超声波时，发生正压电效应，将声能转换为电能。不难看出超声波探头在工作时实现了电能和声能的相互转换，因此常把探头叫做换能器。

#### 2. 探头的种类和结构

直探头用于发射和接收纵波，主要用于探测与探测面平行的缺陷，如板材、锻件探伤等。

斜探头可分为纵波斜探头、横波斜探头和表面波斜探头，常用的是横波斜探头。横波斜探头主要用于探测与探测面垂直或成一定角度的缺陷，如焊缝、汽轮机叶轮等。

当斜探头的入射角大于或等于第二临界角时，在工件中产生表面波，表面波探头用于探测表面或近表面缺陷。

双晶探头有两块压电晶片，一块用于发射超声波，另一块用于接收超声波。根据入射角不同，分为双晶纵波探头和双晶横波探头。

双晶探头具有以下优点：

- (1) 灵敏度高
- (2) 杂波少盲区小
- (3) 工件中近场区长度小
- (4) 探测范围可调

双晶探头主要用于探伤近表面缺陷。

聚焦探头种类较多。

#### 3. 探头型号

探头型号的组成项目及排列顺序如下：

基本频率-晶片材料-晶片尺寸-探头种类-特征

### 三. 试块

按一定用途设计制作的具有简单几何形状人工反射体的试样，通常称为试块。试块和仪器、探头一样，是超声波探伤中的重要工具。

#### 1. 试块的作用

##### (1) 确定探伤灵敏度

超声波探伤灵敏度太高或太低都不好，太高杂波多，判伤困难，太低会引起漏检。因此在超声波探伤前，常用试块上某一特定的人工反射体来调整探伤灵敏度。

##### (2) 测试探头的性能

超声波探伤仪和探头的一些重要性能，如放大线性、水平线性、动态范围、灵敏度余量、分辨力、盲区、探头的入射点、K值等都是利用试块来测试的。

##### (3) 调整扫描速度

利用试块可以调整仪器屏幕上水平刻度值与实际声程之间的比例关系，即扫描速度，以便对缺陷进行定位。

##### (4) 评判缺陷的大小

利用某些试块绘出的距离-波幅-当量曲线（即实用AVG）来对缺陷定量是目前常用的定量方法之一。特别是3N以内的缺陷，采用试块比较法仍然是最有效的定量方法。此外还可利用试块来测量材料的声速、衰减性能等。

#### 2. 试块的分类

(1) 按试块来历分为：标准试块和参考试块。

(2) 按试块上人工反射体分：平底孔试块、横孔试块和槽形试块

#### 3. 试块的要求和维护

#### 4. 常用试块简介（仪器使用时重点讲解）

IIW(CSK-IA)

CS-1

CSK-IIIA

### 第七节 仪器和探头的性能及其测试

仪器和探头的性能包括仪器的性能、探头的性能以及仪器与探头的综合性能。仪器的性能仅与仪器有关，如仪器的垂直线性、水平线性和动态范围等。探头的性能仅与探头有关，如探头入射点、K值、双峰、主声束偏离等。仪器与探头的综合性能不仅与仪器有关，而且与探头有关，如分辨力、盲区、灵敏度余量等。

#### 一. 仪器的性能及其测试

##### 1. 垂直线性

仪器的垂直线性是指仪器屏幕上的波高与探头接收的信号之间成正比的程度。垂直线性的好坏影响缺陷定量精度。

##### 2. 水平线性

仪器水平线性是指仪器屏幕上时基线显示的水平刻度值与实际声程之间成正比的程度，或者说是屏幕上多次底波等距离的程度。仪器水平线性的好坏直接影响测距精度，进而影响缺陷定位。

##### 3. 动态范围

动态范围是指仪器屏幕容纳信号大小的能力。

#### 二. 探头的性能及其测试

### 1. 斜探头入射点

斜探头的入射点是指其主声束轴线与探测面的交点。入射点至探头前沿的距离称为探头的前沿长度。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探头的  $K$  值。

注意试块上  $R$  应大于钢中近场区长度  $N$ ，因为近场区同轴线上的声压不一定最高，测试误差大。

### 2. 斜探头 $K$ 值和折射角

斜探头  $K$  值是指被探工件中横波折射角的正切值。

注意测定斜探头的  $K$  值或折射角也应在近场区以外进行。

### 3. 探头主声束偏离和双峰

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。

平行移动探头，同一反射体产生两个波峰的现象称为双峰。

探头主声束偏离和双峰，将会影响对缺陷的定位和判别。

### 4. 探头声束特性

探头声束特性是指探头发射声束的扩散情况，常用轴线上声压下降  $6\text{dB}$  时探头移动距离（即某处的声束宽度）来表示。

## 三. 仪器和探头的综合性能及其测试

### 1. 灵敏度

超声波探伤中灵敏度一般是指整个探伤系统（仪器和探头）发现最小缺陷的能力。发现缺陷愈小，灵敏度就愈高。

仪器的探头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基准高所需衰减的衰减总量。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的综合性能有关，因此又叫仪器与探头的综合灵敏度。

### 2. 盲区与始脉冲宽度

盲区是指从探测面到能够发现缺陷的最小距离。盲区内的缺陷一概不能发现。

始脉冲宽度是指在一定的灵敏度下，屏幕上高度超过垂直幅度  $20\%$  时的始脉冲延续长度。

始脉冲宽度与灵敏度有关，灵敏度高，始脉冲宽度大。

### 3. 分辨力

仪器与探头的分辨力是指在屏幕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。

### 4. 信噪比

信噪比是指屏幕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。

## 第三章 常用探伤方法和技术

### 第一节 探伤方法概述

#### 一. 按原理分类

超声波探伤方法按原理分类，可分为脉冲反射法、穿透法和共振法。

#### 1. 脉冲反射法

超声波探头发射脉冲波到被检试件内，根据反射波的情况来检测试件缺陷的方法，称为脉冲反射法。脉冲反射法包括缺陷回波法、底波高度法和多次底波法。

## 2. 穿透法

穿透法是依据脉冲波或连续波穿透试件之后的能量变化来判断缺陷情况的一种方法。穿透法常采用两个探头，一收一发，分别放置在试件的两侧进行探测。

## 3. 共振法

若声波（频率可调的连续波）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。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，依据试件的共振频率特性，来判断缺陷情况和工件厚度变化情况的方法称为共振法。共振法常用于试件测厚。

## 二. 按波形分类

根据探伤采用的波形，可分为纵波法、横波法、表面波法、板波法、爬波法等。

### 1. 纵波法

使用直探头发射纵波进行探伤的方法，称为纵波法。此时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，该法对与探测面平行的缺陷检出效果最佳。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。在同一介质中传播时，纵波速度大于其它波型的速度，穿透能力强，晶界反射或散射的敏感性较差，所以可探测工件的厚度是所有波型中最大的，而且可用于粗晶材料的探伤。

### 2. 横波法

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，用以发现垂直法不易发现的缺陷。

### 3. 表面波法

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。表面波波长很短，衰减很大。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。

### 4. 板波法

使用板波进行探伤的方法，称为板波法。主要用于薄板、薄壁管等形状简单的试件探伤。探伤时板波充塞于整个试件，可以发现内部和表面的缺陷。

### 5. 爬波法

## 三. 按探头数目分类

### 1. 单探头法

使用一个探头兼作发射和接收超声波的探伤方法称为单探头法，单探头法最常用。

### 2. 双探头法

使用两个探头（一个发射，一个接收）进行探伤的方法称为双探头法，主要用于发现单探头难以检出的缺陷

### 3. 多探头法

使用两个以上的探头成对地组合在一起进行探伤的方法，称为多探头法。

## 四. 按探头接触方式分类

### 1. 直接接触法

探头与试件探测面之间，涂有很薄的耦合剂层，因此可以看作是两者直接接触，此法称为直接接触法。

此法操作方便，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。但对被测试件探测面的粗糙度要求较高。

### 2. 液浸法

将探头和工件浸于液体中以液体作耦合剂进行探伤的方法，称为液浸法。耦合剂可以是油，也可以是水。

液浸法适用于表面粗糙的试件，探头也不易磨损，耦合稳定，探测结果重复性好，便于实现自动化探伤。

液浸法分为全浸没式和局部浸没式。

## 第二节 仪器、探头的选择及耦合与补偿

### 一. 探伤仪的选择

### 二. 探头的选择

超声波探伤中，超声波的发射和接收都是通过探头来实现的。探头的种类很多，结构型式也不一样。探伤前应根据被检对象的形状、衰减和技术要求来选择探头，探头的选择包括探头型式、频率、晶片尺寸和斜探头 K 值的选择等。

#### 1. 探头型式的选择

常用的探头型式有纵波直探头、横波斜探头、表面波探头、双晶探头，聚焦探头等。一般根据工件的形状和可能出现缺陷的部位、方向等条件来选择探头的型式，使声束轴线尽量与缺陷垂直。

纵波直探头波束轴线垂直于探测面，主要用于探测与探测面平行的缺陷，如锻件、钢板中的夹层、折叠等缺陷。

横波斜探头主要用于探测与探测面垂直可成一定角度的缺陷，如焊缝中未焊透、夹渣、未溶合等缺陷。

表面波探头用于探测工件表面缺陷，双晶探头用于探测工件近表面缺陷，聚焦探头用于水浸探测管材或板材。

#### 2. 探头频率的选择。

超声波探伤频率 0.5~10MHz 之间，选择范围大。一般选择频率时应考虑以下因素：

(1) 由于波的绕射，使超声波探伤灵敏度约为波长的一半，因此提高频率，有利于发现更小的缺陷。

(2) 频率高，脉冲宽度小，分辨力高，有利于区分相邻缺陷。

(3) 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。

(4) 频率高，波长短，近场区长度大，对探伤不利。

(5) 频率增加，衰减急剧增加。

由以上分析可知，频率的高低对探伤有较大的影响，频率高，灵敏度和分辨力高，指向性好，对探伤有利；但近场区长度大，衰减大，又对探伤不利。实际探伤中要全面分析考虑各方面的因素，合理选择频率。一般在保证探伤灵敏度的前提下尽可能选用较低的频率。

对于晶粒较细的锻件、轧制件和焊接件等，一般选用较高的频率，常用 2.5~5MHz；对晶粒较粗大的铸件、奥氏体钢等宜选用较低的频率，常用 0.5~2.5MHz。如果频率过高，就会引起严重衰减，屏幕上出现林状回波，信噪比下降，甚至无法探伤。

#### 3. 探头晶片尺寸的选择

晶片尺寸对探伤也有一定的影响，选择晶片尺寸进要考虑以下因素：

- (1) 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。
- (2) 晶片尺寸增加，近场区长度迅速增加，对探伤不利。
- (3) 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。

以上分析说明晶片大小对声束指向性、近场区长度、近距离扫查范围和远距离缺陷检出能力有较大的影响。实际探伤中，探伤面积范围大的工件时，为了提高探伤效率宜选用大晶片探头；探伤厚度大的工件时，为了有效地发现远距离的缺陷宜选用大晶片探头；探伤小型工件时，为了提高缺陷定位定量精度宜选用小晶片探头；探伤表面不太平整，曲率较低较大的工件时，为了减少耦合损失宜选用小晶片探头。

#### 4. 横波斜头 K 值的选择

在横波探伤中，探头的 K 值对探伤灵敏度、声束轴线的方向，一次波的声程（入射点至底面反射点的距离）有较大的影响。K 值大，一次波的声程大。因此在实际探伤中，当工件厚度较小时，应选用较大的 K 值，以便增加一次波的声程，避免近场区探伤；当工件厚度较大时，应选用较小的 K 值，以减少声程过大引起的衰减，便于发现深度较大处的缺陷。在焊缝探伤中，不要保证主声束能扫查整个焊缝截面；对于单面焊根未焊透，还要考虑端角反射问题，应使  $K=0.7\sim 1.5$ ，因为  $K<0.7$  或  $K>1.5$ ，端角反射很低，容易引起漏检。

### 三. 耦合

超声耦合是指超声波在探测面上的声强透射率。声强透射率高，超声耦合好。为提高耦合效果，在探头与工件表面之间施加的一层透声介质称为耦合剂。耦合剂的作用在于排除探头与工件表面之间的空气，使超声波能有效地传入工件，达到探伤的目的；耦合剂还有减少摩擦的作用。

影响声耦合的主要因素有：耦合层的厚度，耦合剂的声阻抗，工件表面粗糙度和工件表面形状。

#### 四. 表面耦合损耗的补偿

在实际探伤中，当调节探伤灵敏度用的试块与工件表面粗糙度、曲率半径不同时，往往由于工件耦合损耗大而使探伤灵敏度降低，为了弥补耦合损耗，必须增大仪器的输出来进行补偿。

### 第三节 仪器调节和缺陷定位

在实际探伤中，为了在确定的探测范围内发现规定大小的缺陷，并对缺陷定位和定量，就必须在探测前调节好仪器。

#### 一. 零点调节

由于超声波通过保护膜、耦合剂（直探头）或有机玻璃楔块（斜探头）进入待测工件的，缺陷定位时，需将这部分声程移去，才能得到超声波在工件中实际声程。

零点一般是通过已知声程的试块进行调节，如 CSK-IA 试块中的 R100 圆弧面（斜探头）或深 100mm 的大平底（直探头）。

#### 二. K 值调节

由于斜探头探伤时不仅要知道缺陷的声程，更要得出缺陷的垂直和水平位置，因此斜探头还要精确测定其 K 值（折射角）才能准确地对缺陷进行定位。

K 值一般是通过具有已知深度孔的试块来调节，如用 CSK-IA 试块 F 50 或 F 1.5 的孔。

### 三. 定量调节

定量调节一般采用 AVG（直探头）或 DAC（斜探头）。

### 四. 缺陷定位

超声波探伤中测定缺陷位置简称缺陷定位。

#### 1. 纵波（直探头）定位

纵波定位较简单，如探头波束轴线不偏离，缺陷波在屏幕上位置即是缺陷至探头在垂直方向的距离。

#### 2. 表面波定位

表面波探伤定位与纵波定位基本类似，只是缺陷位于工件表面，缺陷波在屏幕上位置是缺陷至探头在水平方向的距离（此时要考虑探头前沿）。

#### 3. 横波定位

横波斜探头探伤定位由缺陷的声程和探头的折射角或缺陷的水平和垂直方向的投影来确定。

#### 4. 横波周向探测圆柱面时缺陷定位

周向探伤时，缺陷定位与平面探伤不同。

(1) 外圆探伤周向探测

(2) 内壁周向探测

### 第四节 缺陷大小的测定和缺陷高度的测定

缺陷定量包括确定缺陷的大小和数量，而缺陷的大小指缺陷的面积和长度。常用的定量方法有当量法、底波高度法和测长法三种。当量法和底波高度法用于缺陷尺寸小于声束截面的情况，测长法用于缺陷尺寸大于声束截面的情况。

#### 一. 当量法测缺陷大小

采用当量法确定的缺陷尺寸是缺陷的当量尺寸，常用的当量法有当量试块比较法、当量计算法和当量 AVG 曲线法。

##### 1. 当量试块比较法

当量试块比较法是将工件中的自然缺陷回波与试块上的人工缺陷回波进行比较来对缺陷定量的方法。

此法的优点是直观易懂，当量概念明确，定量比较稳妥可靠。但成本高，操作也较烦琐，很不方便。所以此法应用不多，仅在  $x < 3N$  的情况下或特别重要零件的精确定量时应用。

##### 2. 当量计算法

当  $x > 3N$  时，规则反射体的回波声压变化规律基本符合理论回波声压公式，当量计算法就是根据探伤中测得的缺陷波高的 dB 值，利用各种规则反射体的理论回波声压公式进行计算来确定缺陷当量尺寸的定量方法。

##### 3. 当量 AVG 曲线法

当量 AVG 曲线法是利用 AVG 曲线来确定工件中缺陷的当量尺寸。

#### 二. 测长法测缺陷大小

当工件中缺陷尺寸大于声束截面时，一般采用测长法来确定缺陷的长度。

测长法是根据缺陷波高与探头移动距离来确定缺陷的尺寸，按规定的方法测定的缺陷长度称为缺陷的指示长度。由于实际工件中缺陷的取向、性质、表面状态等都会影响缺陷回波高度，因此缺陷的指示长度总是小于或等于缺陷的实际长度。

根据测定缺陷长度时的基准不同将测长法分为相对灵敏度法、绝对灵敏度法和端点峰值法。

### 三. 底波高度法测缺陷大小

底波高度法是利用缺陷波与底波的相对波高来衡量缺陷的相对大小。当工件中存在缺陷时，由于缺陷的反射，使工件底波下降。缺陷愈大，缺陷波愈高，底波就愈低，缺陷波高与底波高之比就愈大。

### 四. 缺陷测高

## 第五节 影响缺陷定位、定量的主要因素及其它

目前 A 型脉冲反射式超声波探伤仪是根据屏幕上缺陷波的位置和高度来评价被检工件中缺陷的位置和大小，了解影响因素，对于提高定位、定量精度是十分有益的。

### 一. 影响缺陷定位的主要因素

#### 1. 仪器的影响

仪器的水平线性的好坏对缺陷定位有一定的影响。

#### 2. 探头的影响

探头的声束偏离、双峰、斜楔磨损、指向性等影响缺陷定位。

#### 3. 工件的影响

工件的表面粗糙度、材质、表面形状、边界影响、温度及缺陷情况等影响缺陷定位。

#### 4. 操作人员的影响

仪器调试时零点、K 值等参数存在误差或定位方法不当影响缺陷定位

### 二. 影响缺陷定量的主要因素

#### 1. 仪器及探头性能的影响

仪器的垂直线性、精度及探头频率、型式、晶片尺寸、折射角大小等都直接影响缺陷回波高度。

#### 2. 耦合与衰减的影响

耦合剂的声阻抗和耦合层厚度对回波高有较大的影响；当探头与调灵敏度用的试块和被探工件表面耦合状态不同时，而又没有进行恰当的补偿，也会使定量误差增加，精度下降。

由于超声波在工件中存在衰减，当衰减系数较大或距离较大时，由此引起的衰减也较大，如不考虑介质衰减补偿，定量精度势必受到影响。因此在探伤晶粒较粗大和大型工件时，应测定材质的衰减系数，并在定量计算时考虑介质衰减的影响，以便减少定量误差。

#### 3. 工件几何形状和尺寸的影响

工件底面形状不同，回波高度不一样，凸曲面使反射波发散，回波降低，凹曲面使反射波聚焦，回波升高；工件底面与探测面的平行度以及底面的光洁度、干净程度也对缺陷定量有较大的影响；由于侧壁干涉的原因，当探测工件侧壁附近的缺陷时，会产生定量不准，误差增加；工件尺寸的大小对定量也有一定的影响。

为减少侧壁的影响，宜选用频率高、晶片尺寸大且指向性好的探头探测或横波探测；必要时不可采用试块比较法来定量。

#### 4. 缺陷的影响

不同的缺陷形状对其回波高度有很大的影响，缺陷方位也会影响到回波高度，另外缺陷波的指向性与缺陷大小有关，而且差别较大；另外缺陷回波高度还与缺陷表面粗糙度、缺陷性质、缺陷位置等有影响。

### 三. 缺陷性质分析

超声波探伤还应尽可能判定缺陷的性质,不同性质的缺陷危害程度不同,例如裂纹就比气孔、夹渣大得多。但缺陷定性是一个很复杂的问题,实际探伤中常常根据经验结合工件的加工工艺、缺陷特征、缺陷波形和底波情况来分析估计缺陷的性质。

#### 四. 非缺陷回波的判别

超声波探伤中屏上常常除了始波、底波、和缺陷波外,还会出现一些其他的信号波,如迟到波、三角反射波、 $61^\circ$ 反射波以及其他原因引起的非缺陷回波,分析和了解常见非缺陷回波产生的原因和特点也是十分必要的。

#### 五. 侧壁干涉

纵波探伤时,探头若靠近侧壁,则经侧壁反射的纵波或横波与直接传播的纵波相遇产生干涉,对探伤带来不利影响。一般脉冲持续的时间所对应的声程不大于 $4\lambda$ 。因此只要侧壁反射波束与直接传播的波束声程差大于 $4\lambda$ 就可以避免侧壁干涉。

### 第四章 板材和管材超声波探伤

#### 第一节 板材超声波探伤

根据板材的材质不同,板材分为钢板、铝板、铜板等,实际生产中钢板应用最广,这里以钢板为例来说明板材的超声波探伤工艺方法。

##### 一. 钢板常见缺陷及探伤方法

钢板是由板坯轧制而成,而板坯又是由钢锭轧制或连续浇铸而成的,钢板中常见缺陷有分层、折迭、白点等,裂纹少见。

钢板中分层、折迭等缺陷是在轧制过程中形成的,因此它们大都平行于板面。根据板厚的不同,将钢板分为薄板(小于6mm)与中厚板(中板在6~40mm之间,厚板大于40mm)。中厚板常用垂直板面入射的纵波探伤法;薄板常用板波探伤法。

中厚板垂直探伤法的耦合方式有直接接触法和充水耦合法。采用的探头有单晶直探头、双晶直探头或聚焦探头。探伤钢板时,一般采用多次底波反射法,只有当板厚很大时才采用一次底波或二次底法。

##### 二. 探头与扫查方式的选择

###### 1. 探头的选择包括探头频率、直径和结构形式的选择

由于钢板晶粒比较细,为了获得较高的分辨力,宜选用较高的频率,一般为2.5~5.0MHz。钢板面积大,为了提高探伤效率,宜选用较大直径的,但对于厚度较小的钢板,探头直径不宜过大,因为大探头近场区长度大,对探伤不利。一般探头直径范围为 $F 10\sim F 30\text{mm}$ 。探头的结构形式主要根据板厚为确定,板厚较大时,常选用单晶探头;板厚较薄时可选用双晶直探头,因为双晶直探头盲区很小。双晶直探头主要用于探测厚度为6~30mm的钢板。

###### 2. 扫查方式的选择

根据钢板用途和要求不同,采用的主要扫查方式分为全面扫查、列线扫查、边缘扫查和格子扫查等。

##### 三. 探测范围和灵敏度的调整

#### 第二节 复合材料超声波探伤

##### 一. 复合材料中常见缺陷

复合材料是由母材与复合层粘合而成,常的复合材料是在碳钢或低合金母材上,粘接不锈钢、

钛、铝、铜合金等复合层，以提高钢板的耐腐蚀性。

复合材料一般用轧制、粘接、爆炸和堆焊等方法制造。复合材料中常风缺陷是脱层（脱接），即复合层与母材在界面处复合不良。

## 二、探伤方法

复合材料探伤与一般钢板的探伤方法基本相同，常用单直探头或联合双直探头进行纵波探伤。探伤时可从母材一侧探测，也可从复合层一侧探测。

## 三、缺陷的判别

### 第三节 薄板超声波探伤

对于板厚小于6mm的薄板，如采用一般的纵波探伤法，由于其板厚往往在盲区内，缺陷难以分辨。目前对这种薄板一般采用兰姆波（板波）进行探伤。

### 第四节 管材超声波探伤

#### 一、管材加工及常见缺陷

管材种类很多，据管径不同分为小口径管和大口径管，据加工方法不同分为无缝钢管和焊接管。

无缝钢管是通过穿孔法和高速挤压法得到的，穿孔法是用穿孔机穿孔，并同时用轧辊滚轧，最后用心棒轧管机定径压延平整成型。高速挤压法是在挤压机中直接挤压成形，这种方法加工的管材尺寸精度高。

焊接管是先将板材卷成管形，然后用电阻焊或埋弧自动焊加工成型。一般大口径管多用这种方法。对于厚壁大口径管也可以由钢锭经锻造、轧制等工艺加工而成。

管材中常见缺陷与加工方法有关。无缝钢管中常见缺陷有裂纹、折迭、夹层等；焊接管中常见缺陷与焊缝类似，一般为裂纹、气孔、夹渣、未焊透等。锻轧管常见缺陷与锻件类似，一般为裂纹、白点、重皮等。

#### 二、小口径管探伤

小口径管是指外径小于100mm的管材。这种管材一般为无缝管，采用穿孔法或挤压法得到，其中主要缺陷平行于管轴的径向缺陷（称纵向缺陷），有时也有垂直于管轴线的径向缺陷（称横向缺陷）。

对于管内纵向缺陷，一般利用横波进行周向扫查探测；对于管内横向缺陷，一般利用横波进行轴向扫查探测。

按耦合方式不同，小口径管探伤分为接触法探伤和水浸法探伤。

#### 三、大口径管探伤

超声波探伤中，大口径管一般是指外径大于100mm的管材。大口径管曲率半径较大，探头与管壁耦合较好，通常采用接触法探伤，批量较大时也可采用水浸探伤。

## 第五章 锻件与铸件超声波探伤

锻件和铸件是各种机械设备及锅炉压力容器的重要毛坯，它们在生产加工过程中常会产生一些缺陷，影响设备的安全使用。铸件晶粒粗大、透声性差，信噪比低，探伤困难大。

## 第一节 锻件超声波探伤

### 一. 锻件加工及常见缺陷

锻件是由热态钢锭经锻压变形而成。锻压过程包括加热、形变和冷却。形变大致分为镦粗、拔长和滚压。为改善锻件的组织性能，锻后还要进行正火、退火或调质等热处理。

锻件缺陷可分为铸造缺陷、锻造缺陷和热处理缺陷。铸造缺陷主要有：缩孔残余、疏松、夹杂、裂纹等；锻造缺陷主要有：折叠、白点、裂纹等。热处理缺陷主要有：裂纹等。

### 二. 探伤方法概述

### 三. 探测条件的选择

## 第二节 铸件超声波探伤

### 一. 铸件中常见缺陷

铸件是金属液注入铸入铸模中冷却凝固而成的，铸件中常见缺陷有气孔、缩孔、夹杂和裂纹等。

### 二. 铸件探伤的特点

1. 透声性差
2. 声耦合差
3. 干扰杂波多

### 三. 铸钢件探测条件的选择

1. 探头：一般以纵波直探头为主，辅以横波斜探头和纵波双晶探头。铸钢晶粒较粗大，衰减严重，宜选用较低的频率，一般为0.15~2.5MHZ。
2. 试块：铸钢件探伤常用 ZGZ 系列平底孔对比试块。
3. 探测表面与耦合剂：铸钢件表面粗糙，耦合条件差，探伤前应对其表面进行打磨清理，探伤时常采用粘度较大的耦合剂。
4. 透声性测试
5. 铸钢件内外层划分

## 第六章 焊缝超声波探伤

在焊缝探伤中，不但要求探伤人员具备熟练的超声波探伤技术，而且还要求探伤人员了解有关的焊接基本知识，如焊接接头型式、焊接坡口型式、焊接方法和焊接缺陷等。只有这样，探伤人员才能针对各种不同的焊缝，采用适当的探测方法，从而获得比较正确的探测结果。

### 第一节 焊接加工及常见缺陷

锅炉压力容器及一些钢结构件主要是采用焊接加工成形。焊缝内部质量一般利用射线和超声波来检测，对焊缝中裂纹、未熔合等危险性缺陷，超声波探伤比射线更容易发现。

#### 一. 焊接加工

焊接过程实际上是个冶炼和铸造过程，焊接接头形式主要有对接、角接、搭接和 T 型接头

等几种。在锅炉压力容器中，最常见的是对接，其次是角接和 T 型接头，搭接少见。

## 二. 焊缝中常见缺陷

焊缝中常见缺陷有气孔、夹渣、未焊透、未熔合和裂纹等。

焊缝中的气孔、夹渣是立体型缺陷，危害性较小；而裂纹、未熔合是平面型缺陷，危害性大，在焊缝探伤中，由于焊缝余高的影响及焊缝中裂纹、未焊透、未熔合等危险性大的缺陷往往与探测面垂直或成一定角度，因此一般采用横波探伤。

## 第二节 中厚板对接焊缝超声波探伤。

### 一. 探测条件的选择

#### 1. 探测面的修整

工件表面的粗糙度直接影响探伤结果，一般要求表面粗糙度不大于  $6.3\mu\text{m}$ ，否则应予以修整。

焊缝两侧探测面的修整宽度  $P$  一般根据母材厚度而定。

厚度为  $8 \sim 46\text{mm}$  的焊缝采用二次波探伤，探测面修整宽度为

$$P \geq 2KT+50 \quad (\text{mm})$$

厚度为大于  $46\text{mm}$  的焊缝采用一次波探伤，探测面修整宽度为

$$P \geq KT+50 \quad (\text{mm})$$

式中  $K$ ---探头的  $K$  值；

$T$ ---工件厚度。

#### 2. 耦合剂的选择

在焊缝探伤中，常用的耦合剂有机油、甘油、浆糊、润滑脂和水等，实际探伤中用得最多的是机油和浆糊。

#### 3. 频率选择

焊缝的晶粒比较细小，可选用比较高的频率探伤，一般为  $2.5 \sim 5.0\text{MHz}$ 。对于板厚较小的焊缝，可采用较高的频率；对于板厚较大，衰减明显的焊缝，应选用较低的频率。

#### 4. $K$ 值选择

探头  $K$  值的选择应从以下三个方面考虑：

- (1) 使声束能扫查到整个焊缝截面；
- (2) 使声束中心线尽量与主要危险性缺陷垂直；
- (3) 保证有足够的探伤灵敏度

设工件厚度为  $T$ ，焊缝上下宽度分别为  $a$  和  $b$ ，探头  $K$  值为  $K$ ，探头前沿长度为  $L$ ，则有：

$$K \geq (a+b+L) / T$$

一般斜探头  $K$  值可根据工件厚度来选择，薄工件采用大  $K$  值，以便避免近场区探伤，提高定位定量精度；厚工件采用小  $K$  值，以便缩短声程，减小衰减，提高探伤灵敏度。同时还可减少打磨宽度。在条件允许的情况下，应尽量采用大  $K$  值探头。

探头  $K$  值常因工件中的声速变化和探头的磨损而产生变化，所以探伤前必须在试块上实测  $K$  值，并在以后的探伤中经常校验。

#### 5. 探测方向的选择

## 二. 距离-波幅曲线的绘制与应用

缺陷波高与缺陷大小及距离有关，大小相同的缺陷由于距离不同，回波高度也不相同。描述某一确定反射体回波高度随距离变化的关系曲线称为距离-波幅曲线。

距离-波幅曲线(简称 DAC 曲线)由判废线、定量线和测长线（又称评定线）组成。