



中国机械工程学会无损检测分会 UT培训讲义

本讲义由学会常务委员 晏荣明 编写
(仅供参考)

中国机械工程学会无损检测分会 深圳市无损检测人员培训中心

电话：021-65550277

电话：13538291001

邮箱：chsndt2008@163.com

邮箱：yanrongming@126.com

第五章 超声检测工艺

CHAPTER 5

ULTRASONIC TESTING PROCEDURE

内容 CONTENTS

- 了解被检对象情况
INFORMATION ABOUT TEST OBJECT
- 选择检测技术 **TECHNIQUES SELECTION**
- 选择检测条件 **PARAMETERS SELECTION**
- 调整仪器状态 **EQUIPMENT ADJUSTION**
- 传输修正和衰减系数测量
TRANSMISSION CORRECTION AND ATTENUATION MEASURING
- 检验 **EXAMINATION**
- 评定不连续性 **DISCONTINIUTY EVALUATION**
- 记录与报告 **RECORDS & REPORTS**

了解被检对象情况

INFORMATION ABOUT TEST OBJECT

- 材质、结构、形状和尺寸
- 制造工艺及其可能存在的不连续性
- 检测要求
- 检测和验收标准

选择检测技术

TECHNIQUES SELECTION

- 检测任务
- 显示方式
- 工件形状、材质、尺寸
- 不连续性取向、位置

选择检测条件

PARAMETERS SELECTION

- 探头 **Transducers**
- 检测仪 **Instrument**
- 耦合剂 **Couplant**
- 入射方向 **Incident Direction**
- 检测时机 **Inspection Stage**
- 试块 **Blocks**

探头 **Transducers**

- 频率
- 晶片尺寸
- 形式

探头 **Transducers**——频率

- 灵敏度
- 分辨率
- 近场
- 指向性
- 衰减

探头 Transducers——晶片尺寸

- 晶片尺寸 \uparrow →声束在近场的覆盖范围 \uparrow （近场定位越不准）、声束在远场的覆盖范围 \downarrow （探头指向性 \uparrow ，横向分辨率 \uparrow ，远场定位越准）、辐射功率 \uparrow （穿透性 \uparrow ，对大厚度工件和粗晶材料的检测越有利）、近场长度 \uparrow （对一定厚度工件进行计算法调灵敏度和当量评定越不利）
- 晶片尺寸 \downarrow →声束在近场的覆盖范围 \downarrow （近场定位越准）、声束在远场的覆盖范围 \uparrow （探头指向性 \downarrow ，横向分辨率 \downarrow ，远场定位越不准）、辐射功率 \downarrow （穿透性 \downarrow ，对大厚度工件和粗晶材料的检测越不利）、近场长度 \downarrow （对一定厚度工件进行计算法调灵敏度和当量评定有利）。

探头 **Transducers**——形式

- 单晶/双晶：盲区、信噪比；
- 宽带/窄带：分辨率、信噪比；
- 普通/聚焦：灵敏度、信噪比、分辨率。

检测仪 **Instrument**

- 灵敏度余量
- 发射功率
- 频率范围
- 重复频率
- 类型：数字式/模拟式

耦合剂 **Couplant**

- 作用：排除探头与工件间的间隙
- 要求：无腐蚀、无毒
- 常用耦合剂：机油、甘油、化学浆糊

入射方向 **Incident Direction**

扫查面和入射方向的选择原则：

- 保证超声波的声束可到达工件中每个可能存在不连续性的部位。
- 声束轴线与不连续性的可能取向垂直。

检测时机 **Inspection Stage**

- 机械加工之前、热加工之后；
- 在渗透检测和磁粉检测之后；
- 在目视检测之后。

试块 **Blocks**

- 试块的选择依据——根据检测标准和检测程序。
- 标准试块——校验系统性能；
参考试块——调整仪器状态。
- 参考试块
材质应与被检工件具有相同或相似的声学性能。

调整仪器状态

EQUIPMENT ADJUSTION

- 调整时基线（定标）
Time Base Line Calibration
- 调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

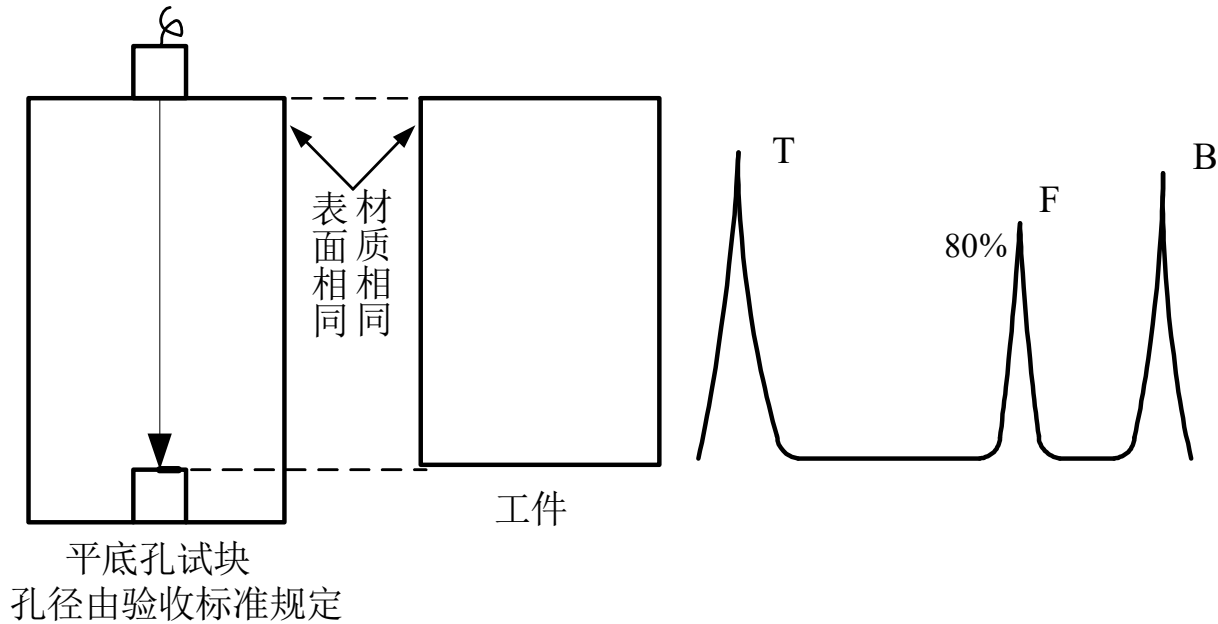
调整时基线（定标）

Time Base Line Calibration

- 声程定标
- 深度定标
- 水平定标

调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——试块比较法



调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——试块比较法

例 5 某钢锻件长宽高尺寸为 $100\text{mm} \times 80\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，每个面的加工余量为 10mm ，三个互相垂直的面都要求扫查。用纵波法进行超声检测，验收标准规定，凡大于 $\phi 2\text{mm}$ 当量的平底孔的不连续性不可验收，试块与工件的传输修正值为 $+4\text{dB}$ （试块表面更光滑，材质衰减更小），试用试块比较法调整检测灵敏度。

调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——试块比较法

解：

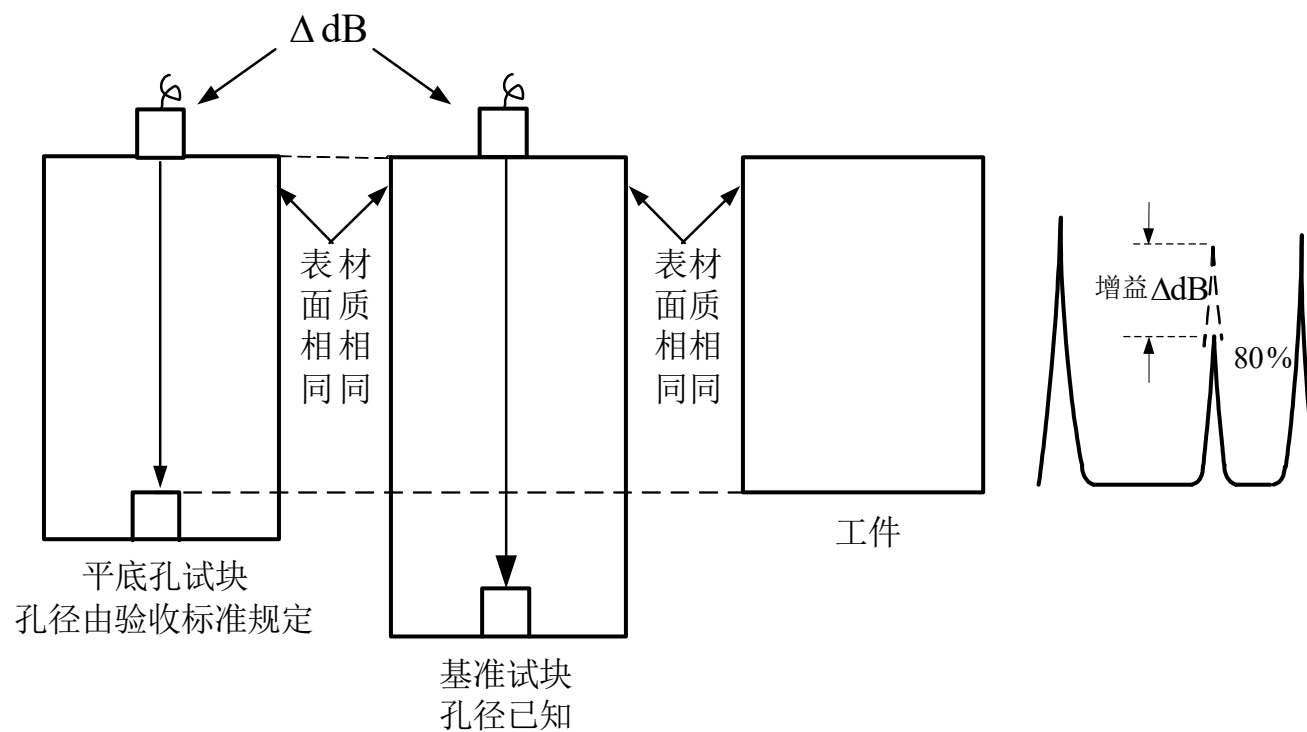
①选择埋深为工件最大探测厚度，即 100mm，直径为 $\phi 2$ mm 的平底孔试块；

②把探头稳定耦合在试块上，找到最高回波，调节衰减和增益旋钮，将回波调整到基准波高（如 80%满刻度），记录此时衰减器的总数；

③因试块和工件的表面和衰减有差异，还应作传输修正。具体操作如下：由于测量的 Δ dB 为正数，即工件的表面损失和材质衰减比试块更严重，所以应在上述衰减器总数基础上再增益（对于模拟式超声探伤仪，使读数减小，对于数字机则应使分贝数增加，即波高提高）4dB。

调整检测灵敏度 Sensitivity Setting

——试块计算法



调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——试块计算法

例6 用频率为2.5MHz、晶片直径为20mm的纵波探头检测某钢锻件，锻件的厚度为500mm，测得工件和试块的表面补偿为3dB，验收标准为 $\phi 3$ mm平底孔当量。如何利用埋深为200mm，孔径为 $\phi 2$ mm平底孔试块来调节灵敏度？（已知钢中 $c_L = 5900\text{m/s}$ ，锻件和试块的衰减忽略不计。）

解：

首先判断是否符合计算法的适用条件：

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{20^2}{4 \times \frac{5.9 \times 10^6}{2.5 \times 10^6}} = 42mm$$

因此，试块中的平底孔埋深和试件厚度均大于 3N，可以用试块计算法来调节检测灵敏度。

检测灵敏度调节量为：

$$\Delta dB = 40 \lg \frac{x_j}{x} \times \frac{d}{d_j} = 40 \lg \frac{200}{500} \times \frac{3}{2} \approx -9dB$$

计算结果表明，埋深为 500mm，直径为 2mm 的平底孔（要求的灵敏度）比基准试块平底孔回波低 9 dB，加上工件表面补偿 3dB，所以共需增益 12dB。

操作：用直探头耦合到试块的表面，找到试块中平底孔的最大回波，并调到规定基准高度，调节仪器的衰减器，增益 12dB。

调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——试块计算法

- 例7 上例中，如果工件和试块的衰减系数均为 0.005 dB/mm ，则如何利用埋深为 200mm ，孔径为 2 mm 平底孔试块来调节灵敏度？

调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting** ——试块计算法

解：

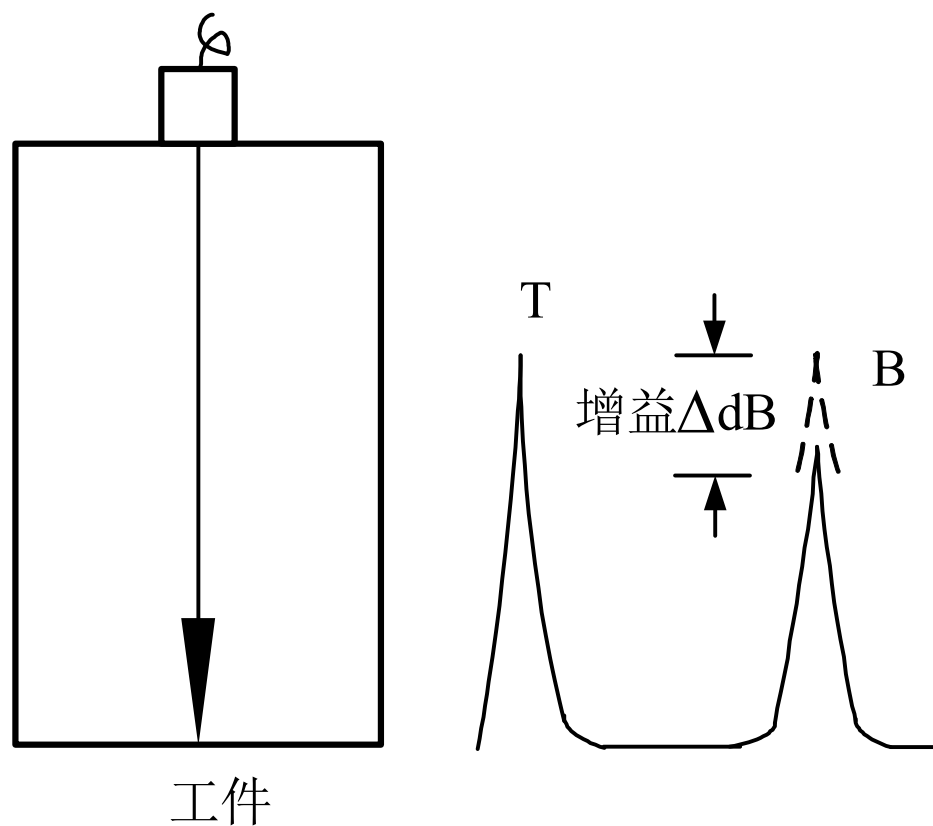
检测灵敏度调节量为：

$$\Delta dB = 40 \lg \frac{200}{500} \times \frac{3}{2} + 2 \times 0.005 \times (200 - 500) \approx -9 - 3 = -12 dB$$

计算结果表明，考虑衰减后二者相差 12，再加上工件表面补偿 3dB，所以共需增益 15dB。

操作方法与上例同。

调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting** ——底波计算法



调整检测灵敏度 **Sensitivity Setting**

——底波计算法

- 例8：用2.5P20Z直探头检测厚度为300mm的某钢锻件，按验收标准规定直径为2mm平底孔当量以上的缺陷不能验收，试用底波计算法调整检测灵敏度（已知钢锻件纵波声速为5850m/s）。

调整检测灵敏度 Sensitivity Setting

——底波算法

解

第一步：判断是否满足用底波算法调整灵敏度的条件

$$\text{近场长度为: } N = D^2 / 4\lambda = fD^2 / 4c = 2.5 \times 10^6 \times 20^2 / 4 \times 5850 \times 10^3 = 42(\text{mm})$$

所以锻件厚度 $x > 3N$ ，满足用底波算法调整灵敏度的条件

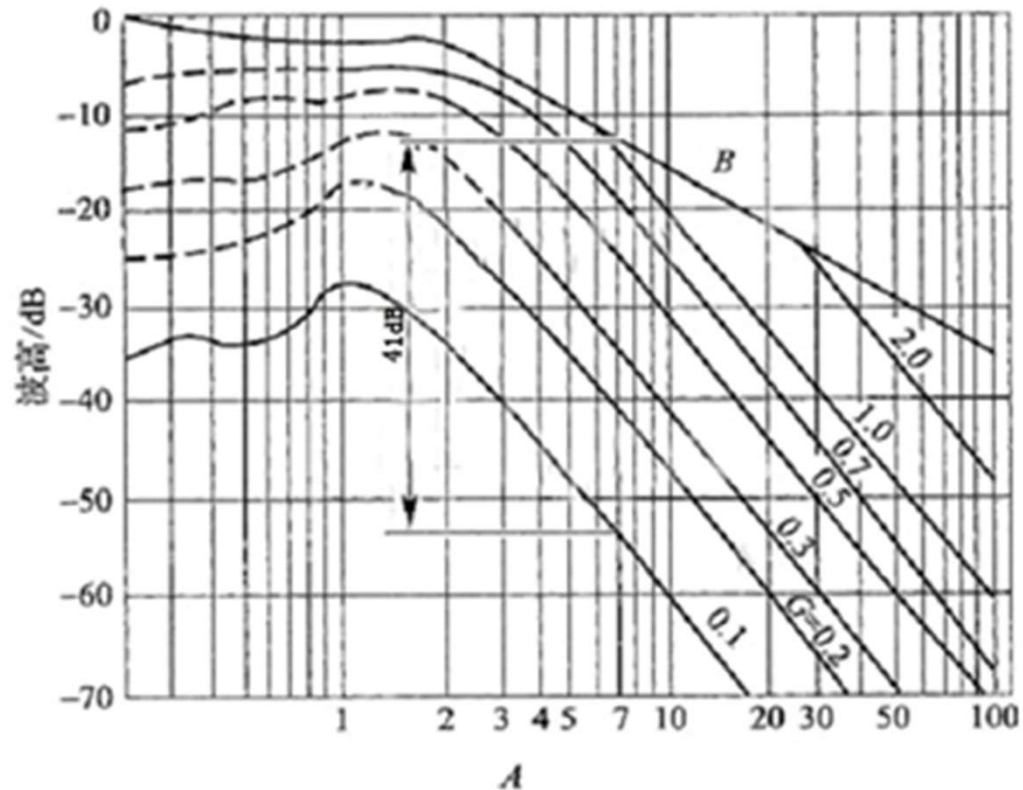
第二步：调整灵敏度

$$\text{根据: } \Delta dB = 20 \lg \frac{p_d}{p_B} = 20 \lg \frac{\pi d^2}{2\lambda x} = 20 \lg \frac{3.14 \times 2^2}{2 \times 2.34 \times 300} \approx -41(\text{dB})$$

操作：在工件表面质量完好处找到最大底波，调整至基准波高，然后增益41dB.

调整检测灵敏度 Sensitivity Setting

- 例9 上例中用2.5P20直探头对该钢质工件进行超声检测，同样要求当量不小于2mm直径的平底孔缺陷不能验收，试用AVG法调整检测灵敏度。



解：

第一步：计算工件厚度的归一化声程 A

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{20^2}{4 \times \frac{5.85}{2.5}} = 42.7(\text{mm})$$
$$A = x / N = 300 / 42.7 \approx 7$$

第二步：计算验收灵敏度要求的归一化缺陷尺寸 G

$$G = d / D = 2 / 20 = 0.1$$

第三步：通过查阅 AVG 曲线找出灵敏度调节量。如图 4-14 所示，通过查阅 AVG 曲线可得，在归一化声程为 7（即 300mm）处归一化缺陷尺寸为 0.1，即直径为 2mm 反射体与底面回波幅度差异为 41dB。

第四步：操作，操作方式与上例相同。

可见，用 AVG 曲线法调整灵敏度的结果与底波算法相同。

传输修正和衰减系数测量

TRANSMISSION CORRECTION AND ATTENUATION MEASURING

- 传输修正测量

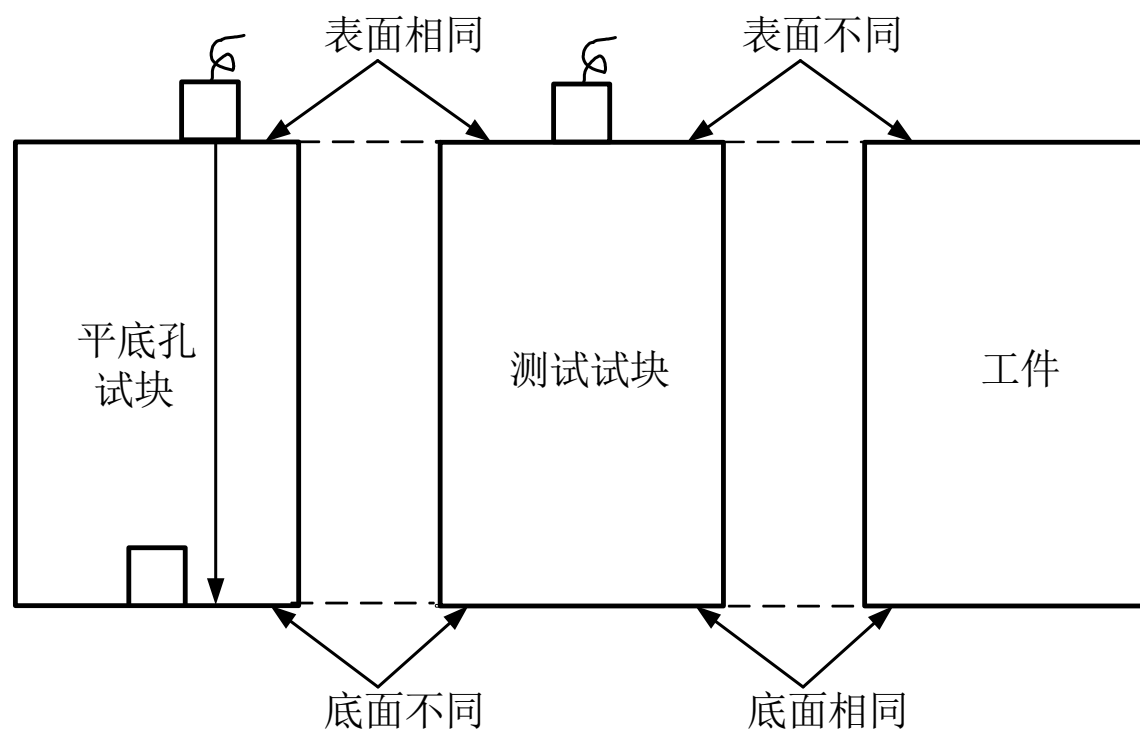
TRANSMISSION CORRECTION MEASURING

- 衰减系数测量

ATTENUATION MEASURING

传输修正测量 TRANSMISSION CORRECTION MEASURING

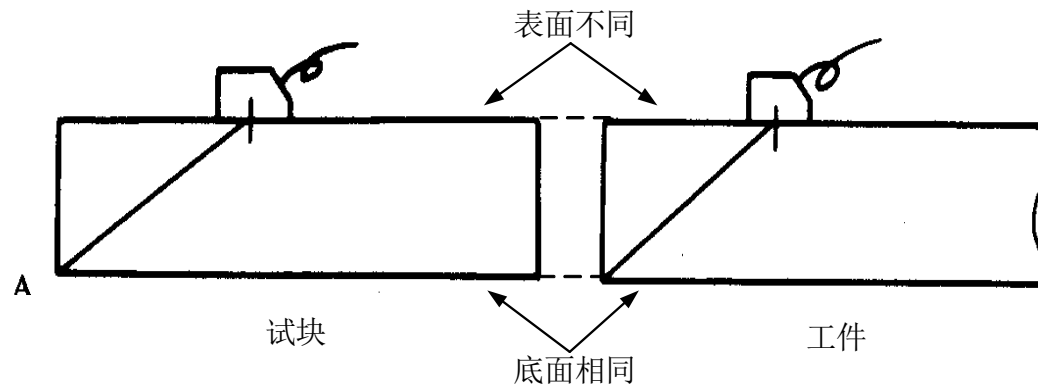
——直束纵波检测技术



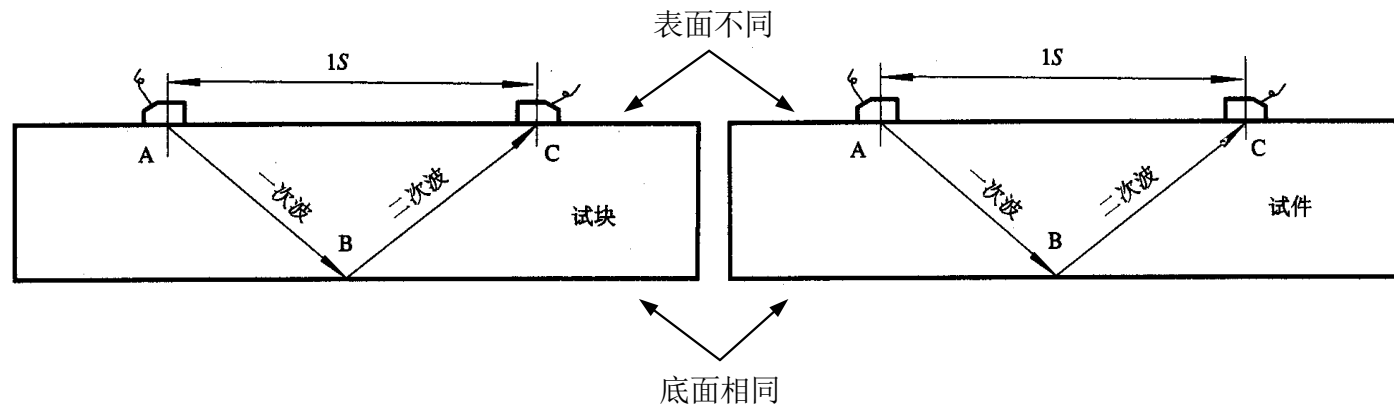
传输修正测量 TRANSMISSION CORRECTION MEASURING

——斜束横波检测技术

- 单探头法



- 双探头法



衰减系数测量

ATTENUATION MEASURING

$$\alpha = \left(\Delta dB - 6dB - H' \right) / 2T$$

例1：某锻件两表面光滑且平行，厚度为400mm，用直探头试验，测得第一、二次底波分别为60%和20%，反射损失为0.5dB，试求该锻件的衰减系数。

衰减系数测量

ATTENUATION MEASURING

解：

$$\begin{aligned} \text{根据： } \alpha &= (20 \lg(B_1 / B_2) - 6 \text{ dB} - H') / 2x \\ &= (20 \lg(60 / 20) - 6 - 0.5) / 2 \times 400 = 0.037 (\text{dB} / \text{mm}) \end{aligned}$$

所以，该锻件的衰减系数为 $0.037 \text{ dB} / \text{mm}$ 。

衰减系数测量

ATTENUATION MEASURING

- 例2：某钢板两表面光滑且平行，厚度为10mm，用5P20直探头试验，测得第二、五次底波分别为80%和40%，每次反射损失为0.5dB，试求该钢板的衰减系数。

衰减系数测量

ATTENUATION MEASURING

解：

$$\begin{aligned} \text{根据： } \alpha &= (20 \lg(B_m / B_n) - H') / 2(n - m) \times \\ &= (20 \lg(80 / 40) - 0.5 \times 3) / 2 \times (5 - 2) \times 10 = 0.075(\text{dB} / \text{mm}) \end{aligned}$$

所以，该钢板的衰减系数为 $0.075 \text{dB} / \text{mm}$ 。

检验 Examination

- 扫查 Scanning
- 波形鉴别 Wave Interpretation

扫查 Scanning

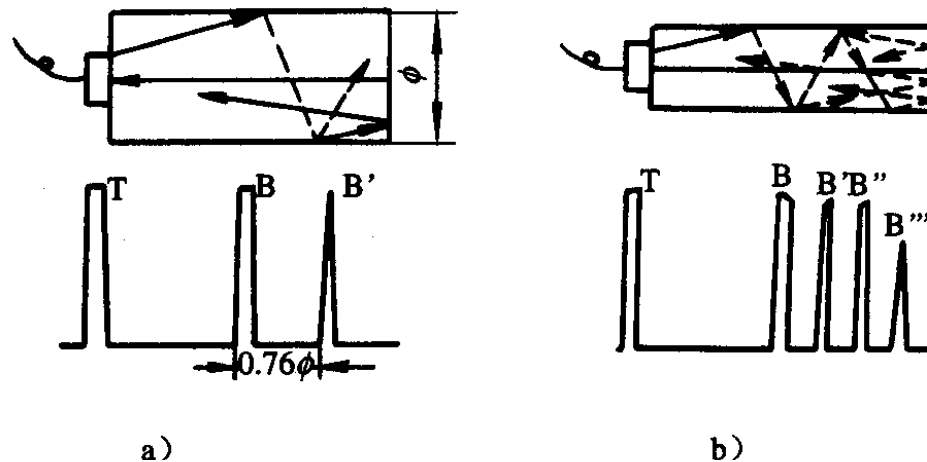
- 扫灵敏度：比检测灵敏度高3~6dB；
- 扫查方向：至少两个互相垂直方向；
- 扫查速度：应低于120mm/s；
- 扫查间距：一定比例重叠。

扫查 Scanning

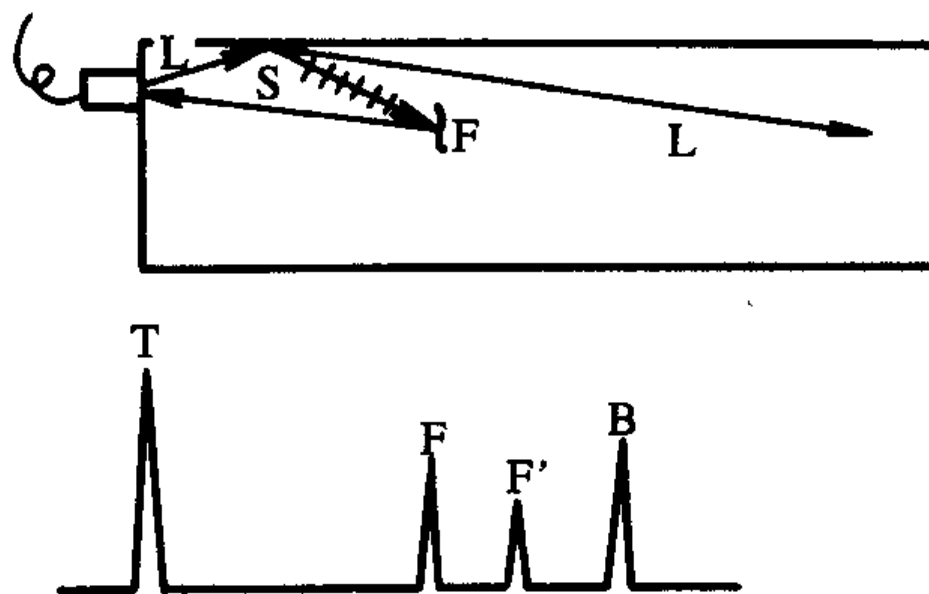
- 双晶探头：检测细长形不连续性时，应使探头隔声层与不连续性主延伸方向平行，探头垂直于不连续性主延伸方向移动。测定不连续性纵向长度时，探头隔声层应与缺陷主延伸方向垂直放置，并沿不连续性的纵向移动。
- 扫查方式：前后、左右、摆动、环绕。

波形鉴别 Wave Interpretation —— 迟到波

- 底面迟到波

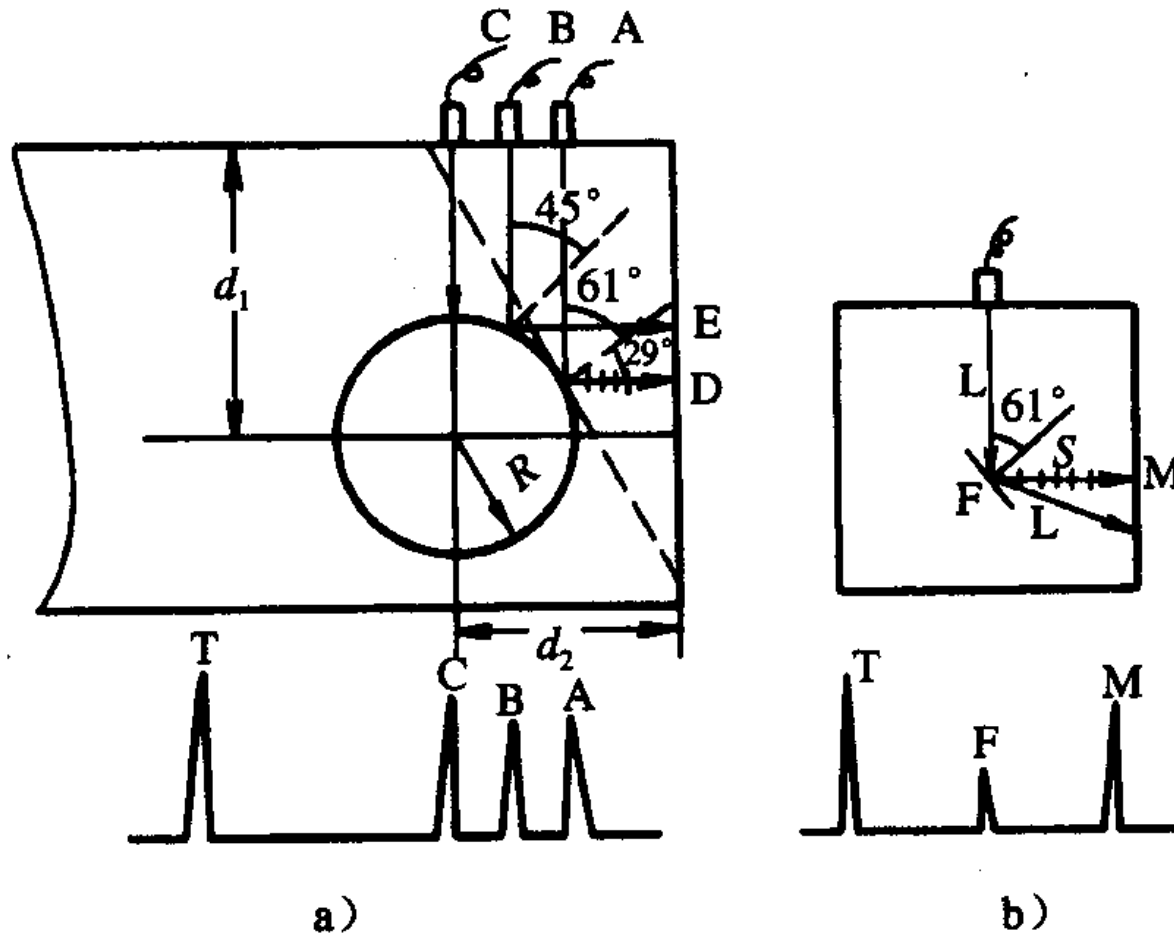


- 不连续性迟到波



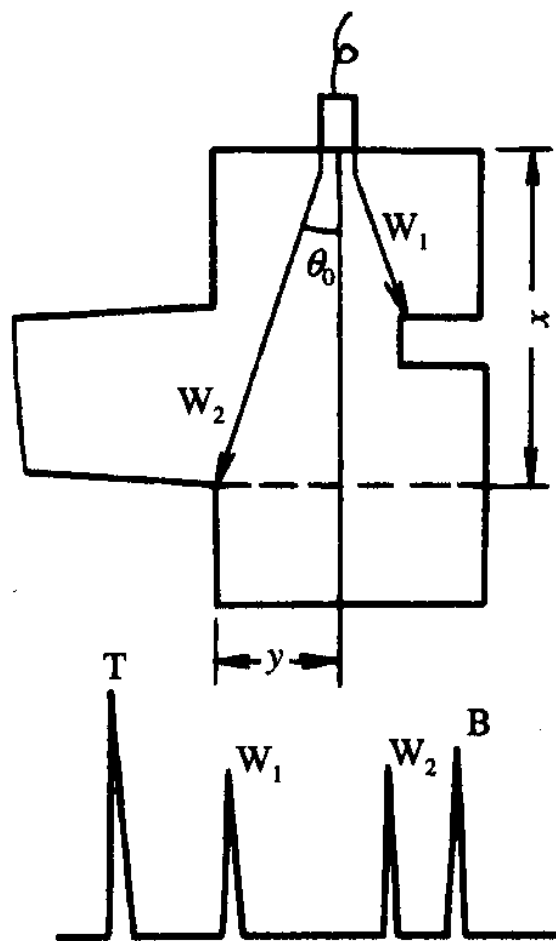
波形鉴别 Wave Interpretation

—— 61° 和 45° 反射波



波形鉴别 Wave Interpretation

——轮廓回波



评定不连续性

DISCONTINUITY EVALUATION

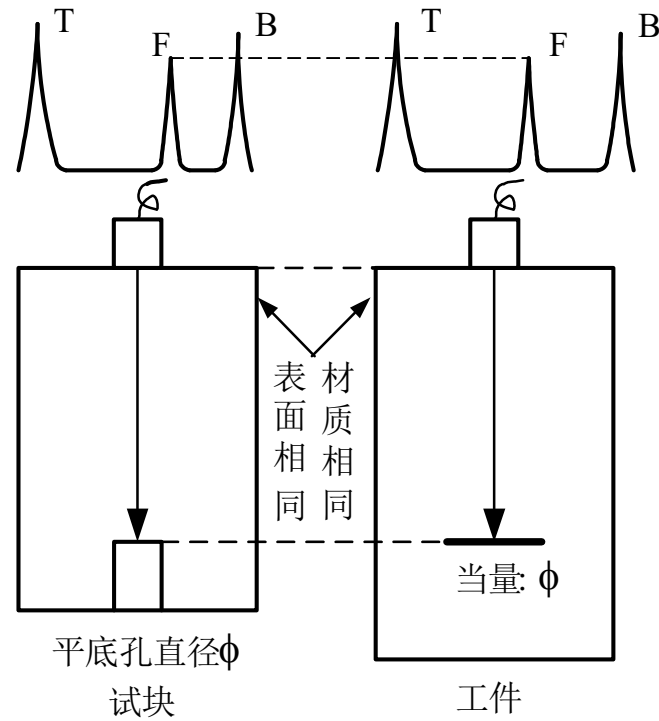
- 定位
- 定量
- 定性

定位

- 定位：确定不连续性的三维坐标。
- 方法：通过定标。

定量

- 当量评定法
试块对比法、
计算法、
AVG曲线法。



定量

- 例3 某锻件超声纵波检测时，在检测灵敏度下发现埋深为100mm处不连续性的波高为80%，与工件材质和表面状况相同、直径为2mm的平底孔的试块，其孔的埋深也是100mm，其波高为80%，则：
- 该不连续性的当量表示为：直径 2mm平底孔当量。

定量

- 例4 上例中的锻件，如果测得工件表面补偿为3 dB，且测得该 2mm平底孔回波高度为40%，则该不连续性的当量为：

直径2mm+3 dB（表面补偿）+6dB（不连续性比平底孔回波高 $20\lg 80/40=6$ dB）
= 直径2mm+9 dB。

定量

- **例10:** 使用模拟式仪器，用直探头接触法探测某锻件，在50mm发现一个不连续性回波，其波幅为40dB，现有一个埋深为50mm，孔径为2mm的平底孔试块，用直探头探测该平底孔的波幅为35dB，已知工件与试块表面补偿为2dB，忽略试块与锻件的声衰减，试求该不连续性的当量。

定量

- 解：

试块的平底孔埋深与不连续性的埋深相同，
不连续性的波幅比平底孔高 $40-35=5\text{dB}$

考虑到表面补偿，所以不连续性的波幅应
为： $5\text{dB}+2\text{dB}=7\text{dB}$ ，所以，该不连续性的
当量为： $\phi 2+7\text{dB}$ 。

定量

例 11 用 2.5P14Z 直探头，对厚度为 350mm 的钢工件探伤，发现距探测面 200mm 处有一反射体，此反射体回波高度比平底孔试块 150/ ϕ 2（即埋深为 150mm，孔径为 2mm）的平底孔回波高度高 11dB，忽略材质衰减，求该反射体的当量平底孔尺寸。

定量

解：

$$\text{因为 } N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{fD^2}{4c} = \frac{2 \times 14^2}{4 \times 5.85} = 20\text{mm}$$

所以，反射体和平底孔的埋深均大于 $3N$ ，故可以用当量计算法进行评定。

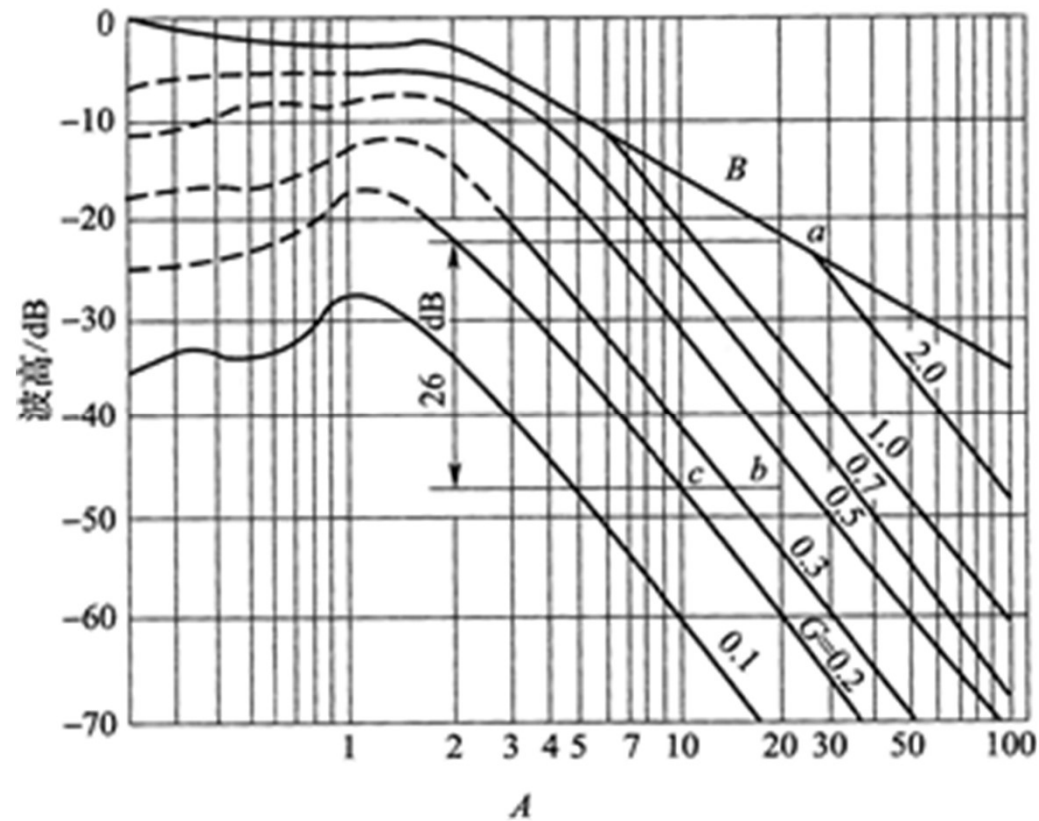
将 $x=200\text{mm}$ ， $x_j=150\text{mm}$ ， $d_j=2\text{mm}$ ， $\Delta\text{dB}=11\text{dB}$ ， $\alpha=0$ ，代入式 4-7，可得：

$$d = \frac{d_j x}{x_j} 10^{\frac{\Delta\text{dB}}{40}} = \frac{2 \times 200}{150} \times 10^{\frac{11}{40}} = 5(\text{mm})$$

即此反射体的当量平底孔直径为 5mm 。

定量

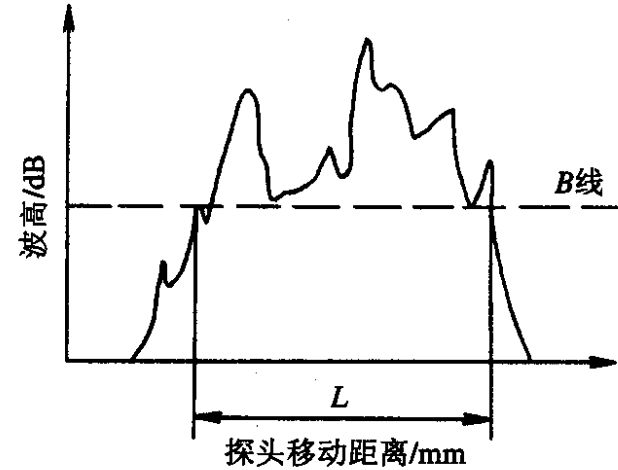
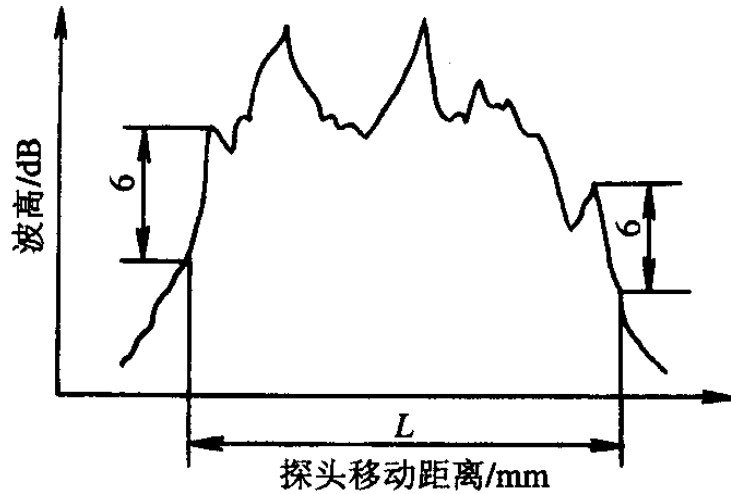
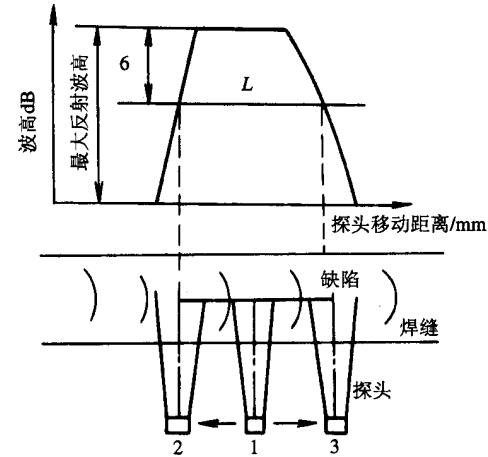
例 16 用 2.5MHz、 $\phi 14$ 直探头对厚度 420mm 的钢质工件进行检测，在 210mm 处发现一反射体，此反射体回波比工件底波低 26dB，如图 4-19 所示，求此反射体的当量尺寸。（已知钢中纵波声速为 5850m/s）



定量

- 测长法

半波高度法、端部峰值法。



定性

- 定性
回波特性
经验积累

记录与报告

RECORDS & REPORTS

- 记录
- 报告