



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

第二章 超声检测的物理 基础

Chapter 2 Physical Foundations for Ultrasonic Testing

内容 Contents

- 机械振动与机械波
 - 声波的种类
 - 声波的叠加、干涉、衍射
 - 声波的传播速度
 - 声场的特征值
 - 声波垂直入射到界面时的反射和折射
 - 声波倾斜入射到界面时的反射、折射与波型转换
 - 超声波的聚焦与发散
 - 超声波的衰减
 - 超声波的声场
 - 规则反射体的回波声压
 - **AVG**曲线
-

机械振动与机械波

Mechanic Vibration and Wave

- 机械振动
- 机械波



机械振动——谐振动

- 振动：质点不停地在平衡位置附近往复运动的状态。
- 谐振动：质点受到跟位移成正比、方向总是指向平衡位置的回复力作用下的振动。
- 振动方程：

$$y = A \cos(\omega t + \phi)$$

A : 振幅

$\omega = 2\pi f$: 角频率

ϕ : 初始相位

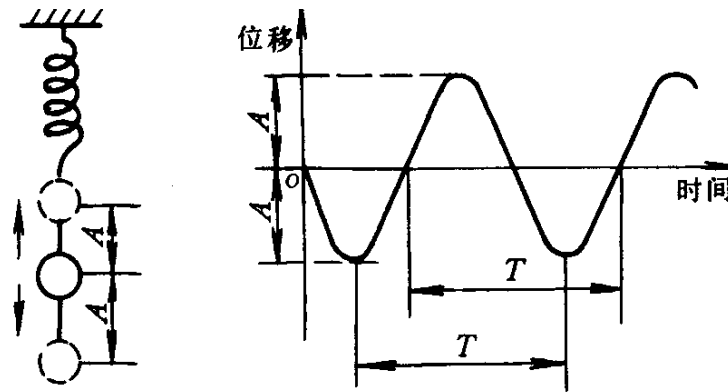


图 1-1 加载弹簧的振动

机械振动——谐振动

- 特点：

位移随时间的变化符合余弦规律；

振幅和频率始终保持不变、自由、周期的振动——最基本、最简单的理想的振动；

固有频率由系统本身决定；

只有弹力或重力做功，机械能守恒。

机械振动——阻尼振动

- 定义：振幅或能量随时间不断减少的振动。

- 振动方程

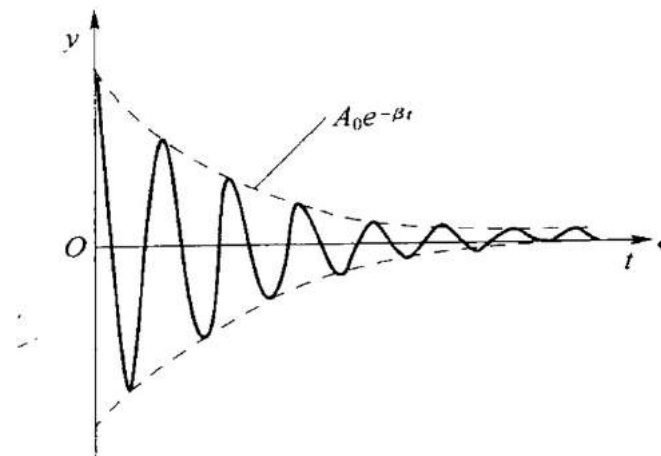
$$y = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

β : 阻尼系数

- 特点

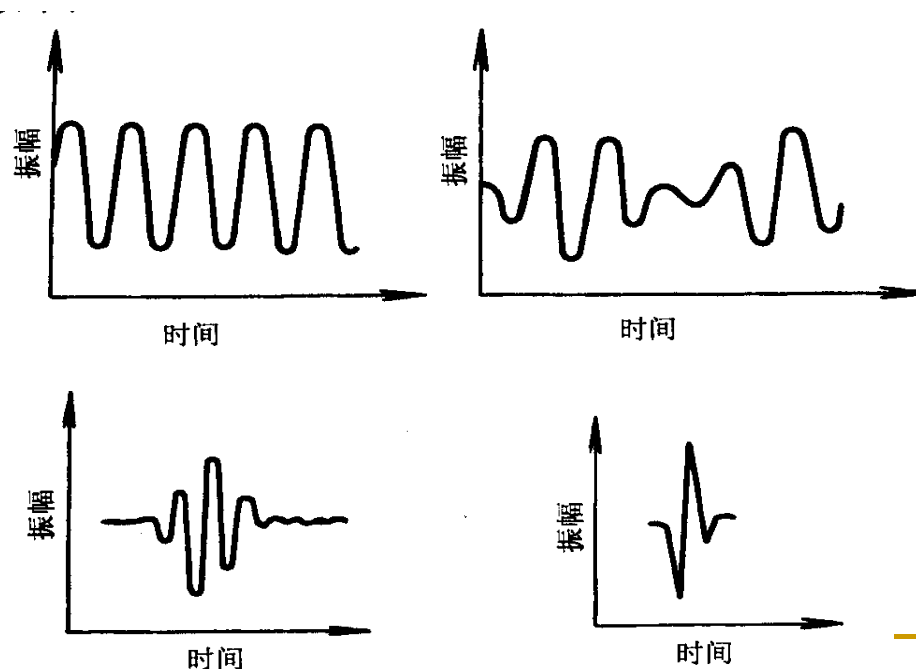
质点的振幅随时间不断减小，直至为零；
不符合机械能守恒。



机械振动——阻尼振动

- 在超声检测的应用

超声检测换能器设计：晶片浇注背衬，使振动迅速停止，缩短脉冲宽度，提高检测分辨率。



机械振动——强迫振动

- 定义：在周期外力的作用下物体所作的振动。

- 振动方程

$$y = A \cos(Pt + \varphi)$$

P : 策动力的圆频率

- 特点：

稳定后为谐振动，振幅不变，频率与策动力相同；
不符合机械能守恒。

机械振动——受迫振动

- 共振

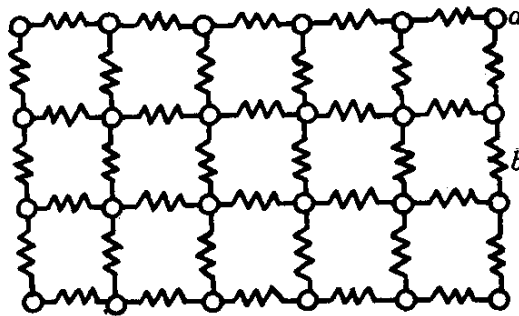
当策动力的频率与其固有频率相同时，振幅达到最大的现象。

- 超声检测的应用：

超声检测换能器晶片在发射超声信号的激励下作受迫振动；接受信号时亦然。

机械波——产生与传播

- 机械波
机械振动在介质中传播形成机械波。
- 弹性介质
由以弹性力保持平衡的各个质点所构成。



a—质点 *b*—表示弹性的弹簧

机械波——产生与传播

- 产生机械波的条件

机械振动源、弹性介质。

- 特点：

机械振动是机械波的根源、机械波是机械振动状态的传播。

机械波的传播不是物质的传播，而是振动状态和能量的传播。

机械波——产生与传播

- 弹性波、声波
在弹性介质中传播的机械振动。
 - 简谐波
当振动源作谐振动时所产生的波。
-

机械波——物理量

- 周期、频率、波长和波速：

$$\lambda = c/f = cT$$

机械波——波动方程

- 原点质点振动方程

$$y = A \cos \omega t$$

- 波动方程

$$y = A \cos(\omega t - kx)$$

x : 声程

声波的种类

Classification of Sound Wave

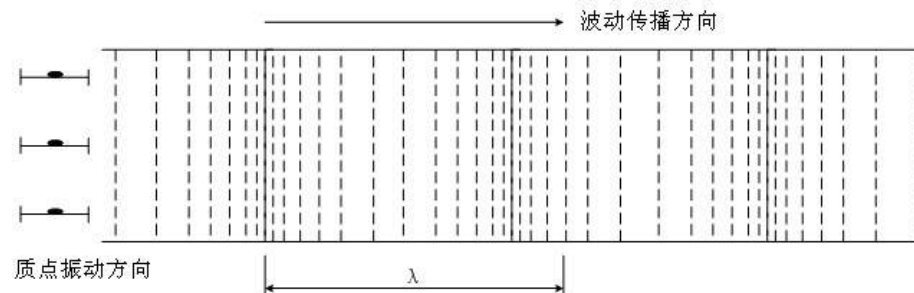
- 按频率分
 - 按波型分
 - 按波形分
 - 按振动的持续时间分
-

声波的种类 —— 按频率分

- 次声波： $f < 20\text{Hz}$
 - 可闻声波： $20\text{Hz} < f < 20\text{kHz}$
 - 超声波： $f > 20\text{kHz}$
-

声波的种类——按波型分

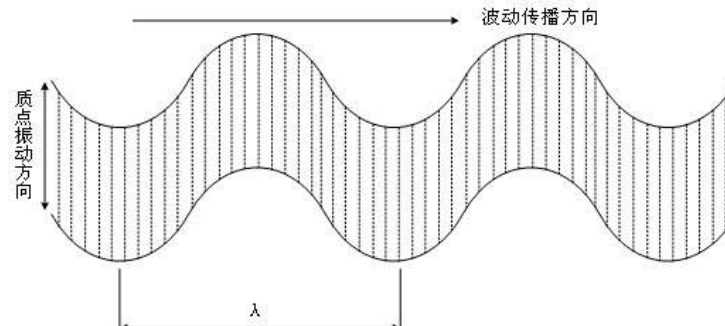
- 纵波（压力波、压缩波、疏密波）
longitudinal (compressive)wave



- 特点
质点的振动方向与波的传播方向一致。
- 应用
最广泛，适合于检测与工件表面平行的不连续性。

声波的种类 —— 按波型分

- 横波（剪切波） transverse wave (sheer wave)



- 特点

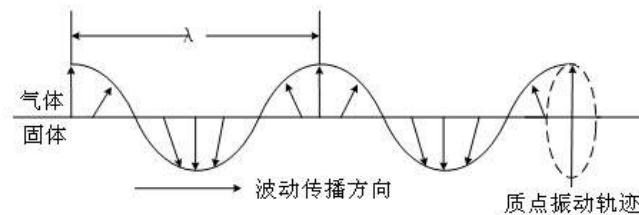
质点的振动方向与波的传播方向垂直。

- 应用

广泛，适合于检测与工件表面倾斜的不连续性。

声波的种类 —— 按波型分

- 表面波（瑞利波） surface wave / Rayleigh wave



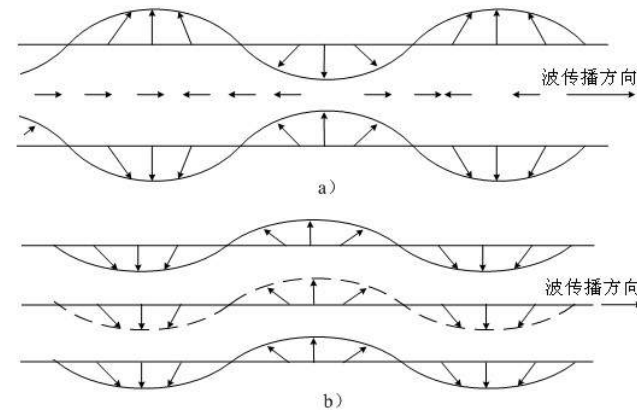
- 特点：
质点振动轨迹为椭圆
- 应用：
较广泛，适合于检测工件表面不连续性。

声波的种类 —— 按波型分

- 板波(兰姆波)plate wave (Lamb wave)

- 特点：
整板振动。

- 应用：
较广泛，薄板检测。

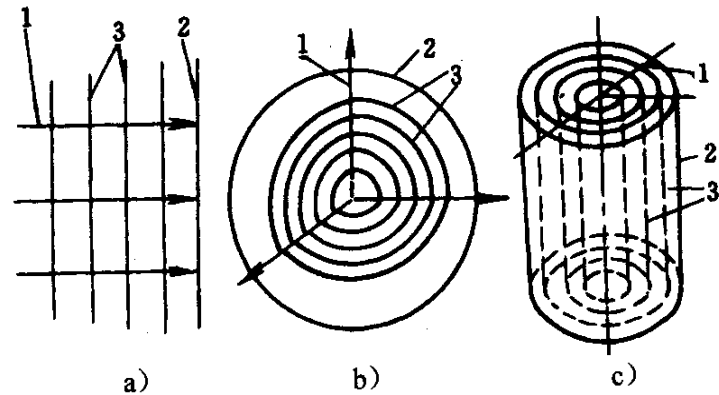


声波的种类 —— 按波形分

- 波阵面：同一时刻相同振动状态质点组成的面。
- 平面波
无穷大平板声源产生的波阵面为平面的声波。

$$y = A \cos(\omega t - kx)$$

- 特点：在无穷大均匀弹性理想介质中，振幅不衰减
- 应用：直探头辐射的声波在晶片附近近似平面波。



声波的种类 —— 按波形分

- 球面波

球状声源产生的波阵面为球面的声波。

$$y = \frac{A}{x} \cos(\omega t - kx)$$

- 特点

振幅与距声源距离成反比。

- 应用

超声换能器辐射声波在足够远处近似球面波；
所有规则反射体回波声压计算的前提。

声波的种类 —— 按波形分

- 柱面波

柱状声源产生的波阵面为柱面的声波。

$$y = \frac{A}{\sqrt{x}} \cos(\omega t - kx)$$

- 特点

质点振幅与声程的平方根成反比。

声波的种类 —— 按波形分

- 活塞波

实际超声检测换能器辐射的声波。

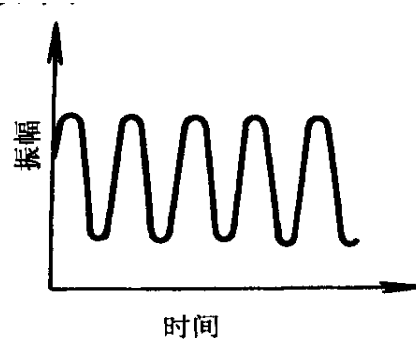
- 特点

既非平面波，也非球面波。

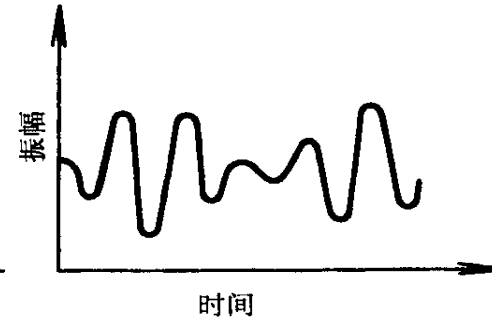
近处接近平面波；远处接近球面波。

声波的种类 —— 按振动的持续时间分

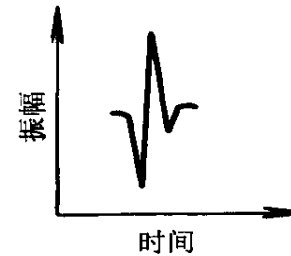
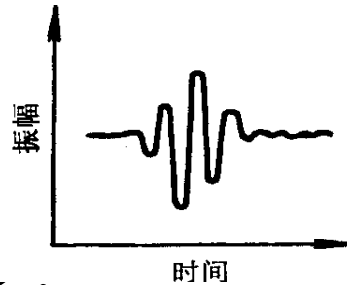
- 连续波



- 脉冲波



- 应用

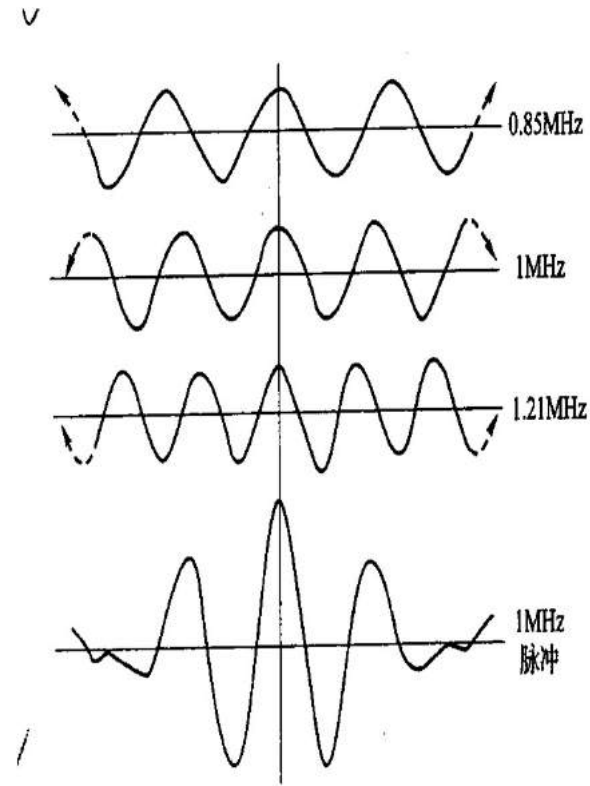
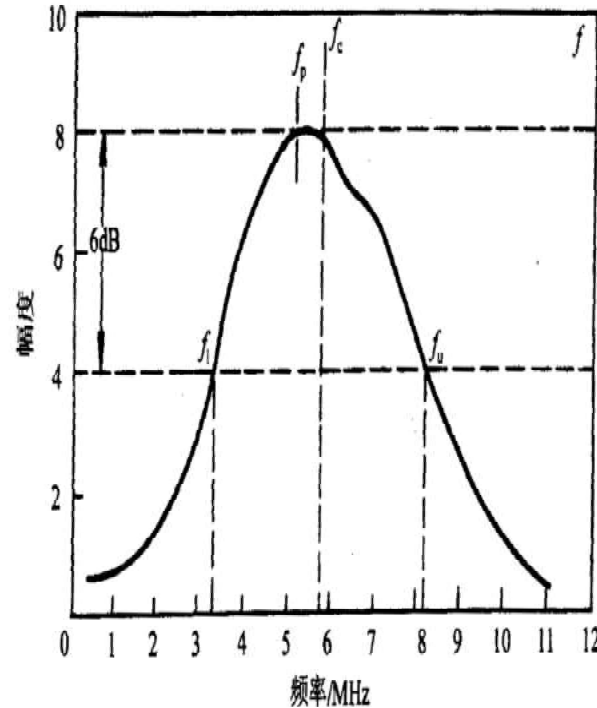


连续波——软，

脉冲波——强度高、灵敏度高、脉冲窄、频带宽、分辨率高，应用广泛。

声波的种类 —— 按振动的持续时间分

- 频谱
峰值频率
中心频率
频带宽度



- 频谱分析
脉冲波可分解为多个不同频率的谐波分量。

声波的叠加、干涉、衍射

Superposition, interference, diffraction

- 波的叠加与干涉
 - 驻波
 - 惠更斯—菲涅耳原理与波的衍射
-

波的叠加与干涉

- 波的叠加原理——独立性原理

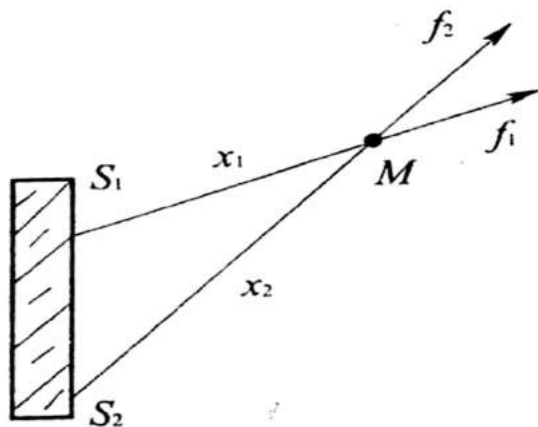
几列波在空间某处相遇时，质点的振动是各列波引起振动的合成。

- 波的干涉

两频率相同、振动方向相同、相位差恒定的波相遇时，某些地方振动加强、另一些地方振动减弱的现象。

波的叠加与干涉

■ 质点M的合成



$$y_1 = A_1 \cos \omega(t - x_1/c)$$

$$y_2 = A_2 \cos \omega(t - x_2/c)$$

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

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta}$$

当 $\delta = n\lambda$ (n 为整数) 时, $A = A_1 + A_2$

当 $\delta = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$ (n 为整数) 时, $A = |A_1 - A_2|$

驻波

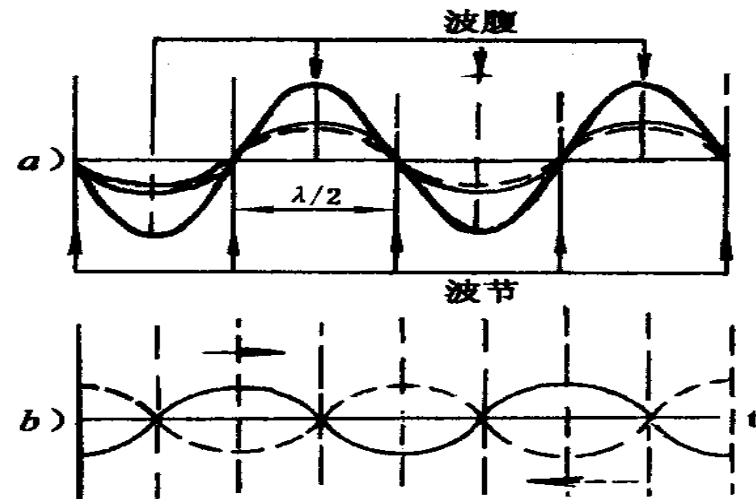
- 定义:

两列振幅相同的相干波在同一直线上沿相反方向传播时相互叠加而成的波。干涉的特例。

$$y_{\lambda} = A \cos 2\pi(ft - x/\lambda)$$

$$y_{\text{反}} = A \cos 2\pi(ft + x/\lambda)$$

$$y = y_{\lambda} + y_{\text{反}} = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos(2\pi ft)$$



驻波

- 特点:

波腹: 振幅为 $2A$;

波节: 振幅为 0 ;

相邻两波腹或波节之间的距离

$$\Delta x = \lambda / 2$$

- 在超声检测的应用

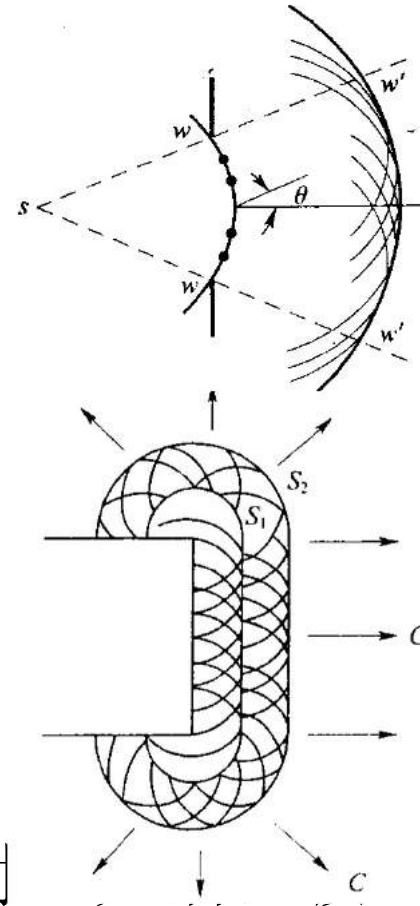
超声检测探头晶片形成驻波时振动最强,

晶片的频率常数为: $N = ft = c / 2$

晶片的厚度为: $t = \lambda / 2$

惠更斯—菲涅耳原理与波的衍射

- 惠更斯原理：波阵面上的任何一点都可看作新的次波源，从波阵面上各点发出的许多次波形成的包络就是新的波阵面。
- 作用
确定波前的几何形状和波的传播方向,解释波的反射、折射和衍射

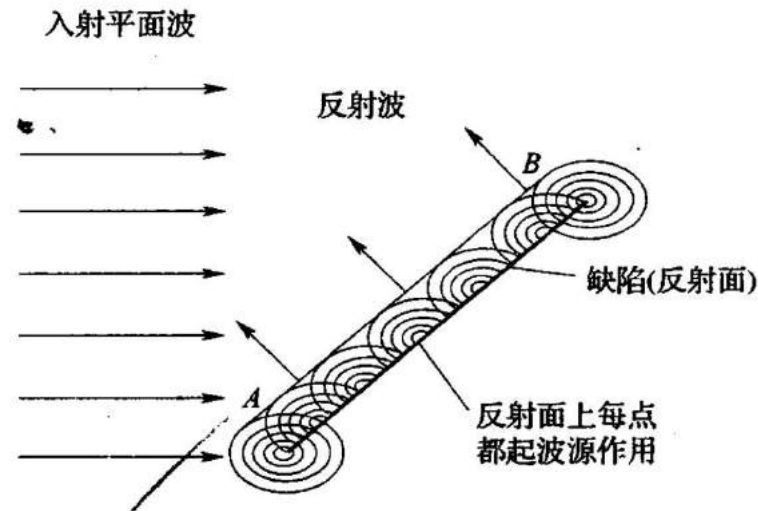
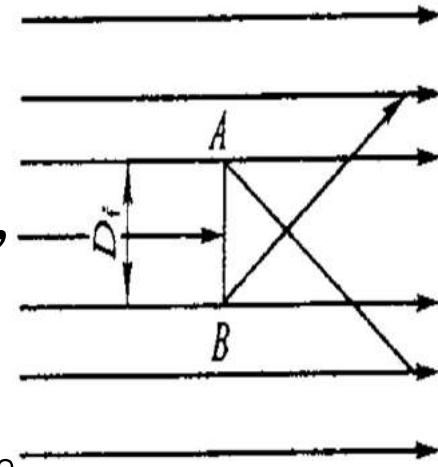


惠更斯—菲涅耳原理与波的衍射

■ 波的衍射（绕射）

当 $D = \lambda$ 时，波的绕射强、反射弱，易漏检，
检测灵敏度为 $\lambda/2$ ；

当 $D \gg \lambda$ 时，反射强、绕射弱，几乎全反射。



惠更斯—菲涅耳原理与波的衍射

- 对超声检测的影响

有利：超声波可在晶粒中传播；

不利：小缺陷反射波弱，易漏检。

- 超声检测的应用

利用衍射波检测缺陷——TOFD技术；

微小缺陷的检测。

声波的传播速度 Sound Velocity

- 固体介质中的声速
 - 液体、气体介质中的声速
 - 声速的测量
 - 超声波速度特性的应用
-

固体介质中的声速—— 无限大固体介质中的声速

- 声速：介质声学特征参量。
- 无限大固体介质中的声速：

$$\text{纵波声速: } C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$\text{横波声速: } C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

$$\text{表面波声速: } C_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1-\sigma} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

固体介质中的声速

——细长棒中的纵波声速

细长棒（直径 $d = \lambda$ ）：

$$\text{声速： } c_{Lb} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

固体介质中的声速—— 声速与温度、应力、均匀性的关系

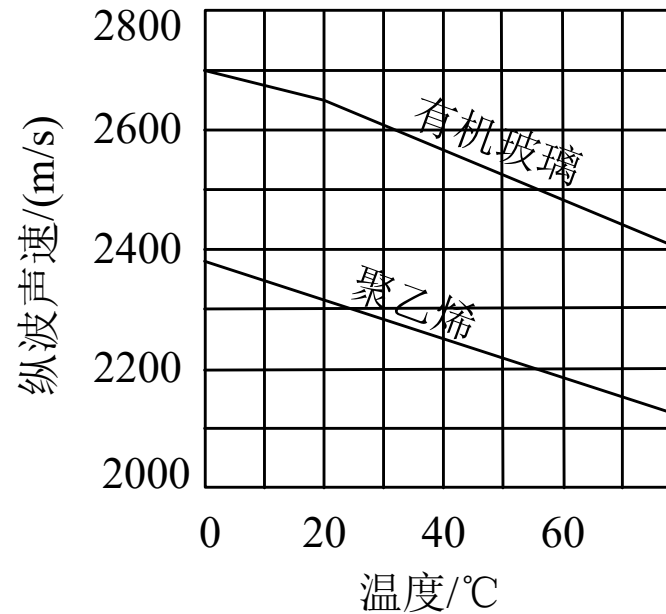
■ 声速与温度的关系：

$$T \uparrow \Rightarrow c \downarrow$$

声速与应力的关系：

$$\text{压应力: } \sigma \uparrow \Rightarrow c \uparrow$$

$$\text{拉应力: } \sigma \uparrow \Rightarrow c \downarrow$$



固体介质中的声速—— 声速与温度、应力、均匀性的关系

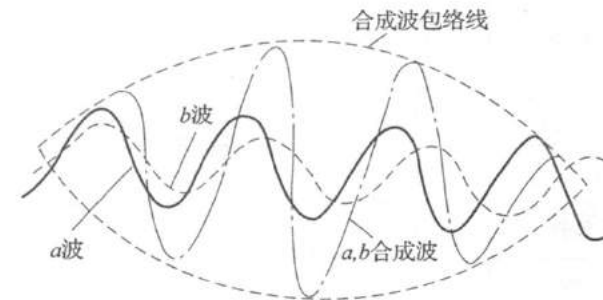
- 铸铁均匀性

表面——冷却速度快、晶粒细、速度大；

中心——冷却速度慢、晶粒粗、速度小。

固体介质中的声速——兰姆波声速

- 兰姆波分类：对称型（S）、非对称型（A）
- 相速度：相位传播的速度
- 群速度：包络的传播速度
- 特点：频散波——速度与频率、板厚有关



液体、气体介质中的声速

- 液体、气体中的纵波速度（不能传播横波）

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

式中： B ——液体、气体介质的容变弹性模量

- 声速与温度的关系

$T \uparrow \Rightarrow c \downarrow$ （水除外）

声速的测量——超声检测仪器测量法

■ 原理

$$t = \frac{2d}{c_1}$$

$$t = \frac{2b}{c_2}$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{d}{b}$$

$$\text{即 } c_1 = c_2 \frac{d}{b}$$

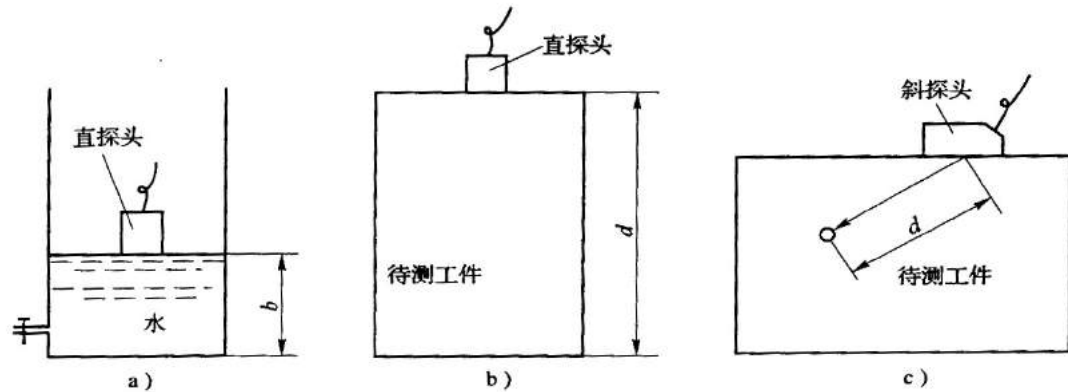


图 2—28 对比法测声速

■ 特点：精度不高

声速的测量——测厚仪测量法

- 共振法

$$c = 2f_n \frac{d}{n}$$



声场的特征值

Characteristics Parameters of Sound Field

- 声压 **Sound Pressure**
 - 声阻抗 **Impedance**
 - 声强 **Intensity**
 - 分贝与奈培 **Decibel & Neper**
-

声压

- 定义：介质中有声波和没有声波传导时某点的压强之差。

$$P = P_1 - P_0$$

单位： Pa

经推导得： $P = -\rho c \omega A \sin \omega(t - x/c) = -\rho c \omega A \sin(\omega t - kx)$

声压幅值为： $P_m = \rho c \omega A = \rho c u$

- 式中： ρ ——密度；
 c ——声速；
 u ——质点振动速度， $u = \omega A$ ；
 k ——波数， $k = 2\pi / \lambda$.

声压

- 结论：
声场中某点的声压随时间和声程周期变化；
声压的幅值与密度、声速和频率成正比——超声波的声压很高。
 - 超声检测中的应用
超声检测仪器显示的信号幅度的本质就是声压 P 。
-

声阻抗

- 定义

声场中任意一点的声压与该点质点振动速度之比。

$$Z = P / u = \rho c u / u = \rho c$$

- 意义：表达材料声学特性。
单位： $kg / m^2 \cdot s$

- 应用：超声波的反射和透射取决于声阻抗。

声强

- 定义

在垂直于声波传播方向上单位面积上的声能。

- 平面波的声强

$$I = \frac{W}{S\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2$$

- 结论

$= \frac{1}{2} Z u^2 = \frac{P^2}{2Z} = \frac{P^2}{2\rho c}$
单位体积元内的总能量周期性变化；
声强与频率的平方成正比——超声波的声强远大于可闻声波。

分贝与奈培

基准声强： $I_1 = 10^{-16} W/cm^2$ (人耳刚能感知的声强)

声强级： $\Delta = \lg \frac{I_2}{I_1}$ (B——贝尔, *Bel*)

取其1/10即分贝 (dB? 一分贝)

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

波高比较： $dB = 20 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg \frac{H_2}{H_1}$

分贝与奈培

对 P_2 / P_1 取自然对数: $\Delta = \ln \frac{P_2}{P_1} = \ln \frac{H_2}{H_1} (NP)$

$$\Delta = \ln \frac{P_2}{P_1} = \ln e = 1(NP)$$

$$\Delta = 20 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg e = 8.68(dB)$$

$$1NP = 8.68dB$$

- 应用

回波信号之间的比较

超声波垂直入射到界面时的反射和透射

Normal Beam Incidence: Reflection & Transmission

- 单一平界面的反射率与透射率
 - 薄层界面的反射率与透射率
 - 声压往复透射率
-

单一平界面的反射率与透射率

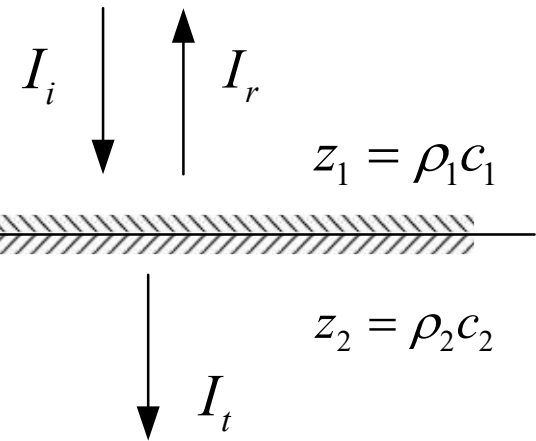
定义:

声压反射率: $r = \frac{p_r}{p_i}$,

声压透射率: $t = \frac{p_t}{p_i}$

声强反射率: $R = \frac{I_r}{I_i}$,

声强透射率: $T = \frac{I_t}{I_i}$



在界面两侧声波须满足的条件:

界面两侧的总声压相等: $p_i + p_r = p_t$

界面两侧质点振动速度相等: $(p_i - p_r) / Z_1 = p_t / Z_2$

单一平界面的反射率与透射率

$$\text{声压反射率: } r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\text{声压透射率: } t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

二者间的关系: $1 + r = t$

$$\text{声强反射率: } R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = r_p^2$$

$$\text{声强透射率: } T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{Z_1}{Z_2} t_p^2$$

二者间的关系: $R + T = 1$

单一平界面的反射率与透射率

当 $Z_1 > Z_2$ 时(钢/水界面)

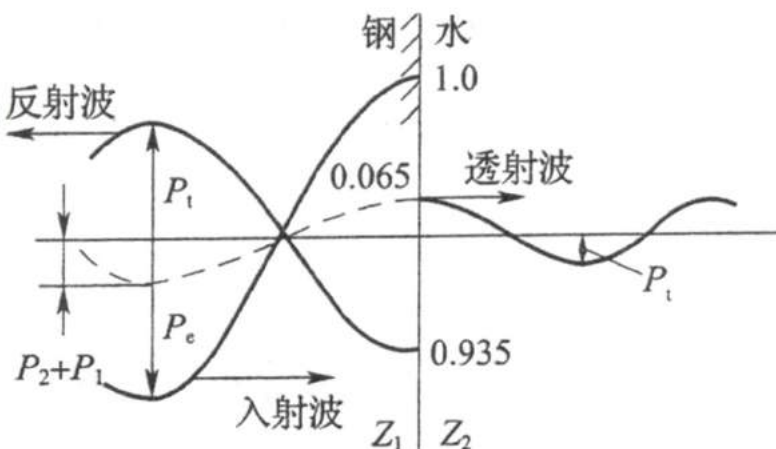
钢的 $Z_1 = 4.6 \times 10^7 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$? 水的 $Z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$

声压反射率: $r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = -0.935$,

声压透射率: $t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 0.065$

$R = r^2 = 0.875$, $T = 1 - R = 0.125$

可见: 当入射波介质声阻抗远大于透射波
介质声阻抗时,声压反射率很高、透射率很低;
反射波声压与入射波反相。



单一平界面的反射率与透射率

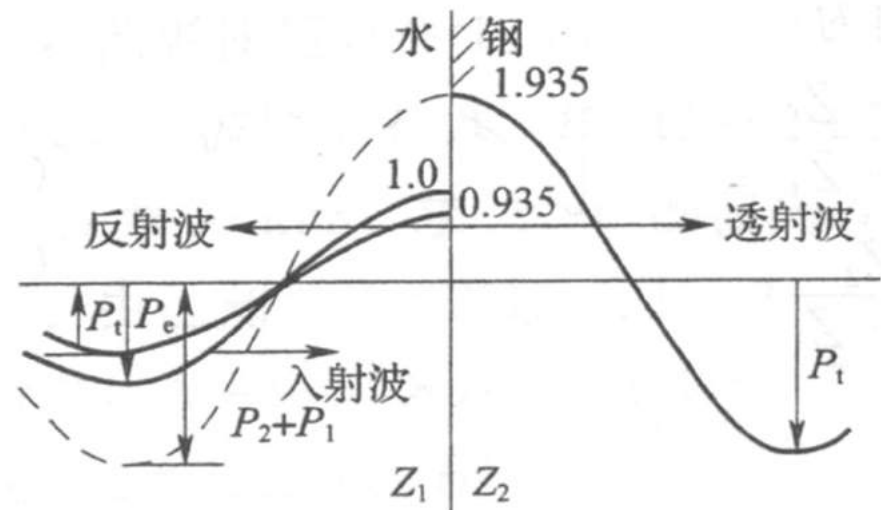
当 $Z_1 < Z_2$ 时（如水/钢界面）

水的 $Z_1 = 1.5 \times 10^6 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$ ，钢的 $Z_2 = 4.6 \times 10^7 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$ ？

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = 0.935, \quad t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 1.935$$

$$R = r^2 = 0.875,$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} = 0.125$$



可见，当声波垂直入射到水/钢界面时：

反射波与入射波同相；

虽然 $t > 1$ ，这是力的平衡： $P_o + P_r = P_t$ ，且 $R + T = 1$ ，符合能量守恒。

声强反射率和透射率和钢/水界面相同，所以R和T与入射方向无关

单一平界面的反射率与透射率

当 $Z_1 \approx Z_2$ 时（碳素钢/不锈钢界面）

碳素钢 $Z_1 = 4.6 \times 10^7 \text{ Kg/m}^2\text{s}$ 不锈钢 $Z_2 = 4.57 \times 10^7 \text{ Kg/m}^2\text{s}$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = -0.003, \quad t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 0.997$$

$$R = r^2 = 9 \times 10^{-6} \approx 0, \quad T = 1 - R \approx 1$$

可见，当声波垂直入射到声阻抗差异很小的介质组成的界面时，几乎全透射，无反射。如焊接良好的母材与填充金属的结合面无反射波。

单一平界面的反射率与透射率

当 $Z_1 \gg Z_2$ 时（如钢/空气界面）

钢的 $Z_1 = 4.6 \times 10^7 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$ ，空气的 $Z_2 = 0.00004 \times 10^7 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ s}$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx -1, \quad t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \approx 0$$

$$R = r^2 \approx 1, \quad T = 1 - R \approx 0$$

可见，当声波垂直入射到钢/空气界面时：

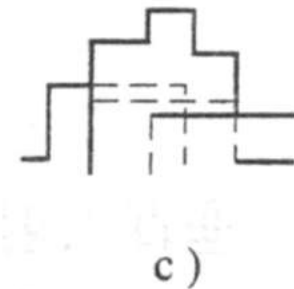
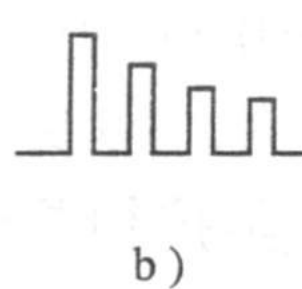
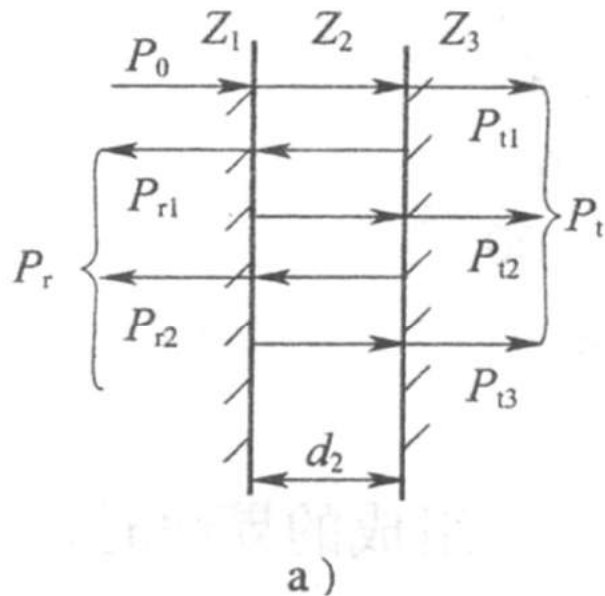
反射波与入射波反相；几乎全反射，无透射。

超声检测中的应用：

超声检测裂纹、分层等内含空气类缺陷很灵敏。

薄层界面的反射率与透射率

- 当超声波脉冲宽度小于薄层厚度时，反射波和透射波不干涉；否则，相互干涉。



薄层界面的反射率与透射率

均匀介质中的异质薄层 ($Z_1=Z_3 \neq Z_2$)

$$r_p = \frac{p_r}{p_i} = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}}$$

$$t_p = \frac{p_t}{p_i} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}}$$

式中： $m = \frac{Z_1}{Z_2}$

薄层界面的反射率与透射率

当 $d = n \cdot \frac{\lambda_2}{2}$ (n 为整数)时, $r \approx 0$, $t \approx 1$

可见: 当薄层两侧介质声阻抗相同, 薄层厚度为其半波长的整数倍时, 声波全透射, 如同薄层不存在一样——半波透声层。

当 $d = \frac{2n-1}{4} \cdot \lambda_2$ (n 为整数)时, r 最高, t 最低。

薄层界面的反射率与透射率

图 1 空气/钢界面反射率

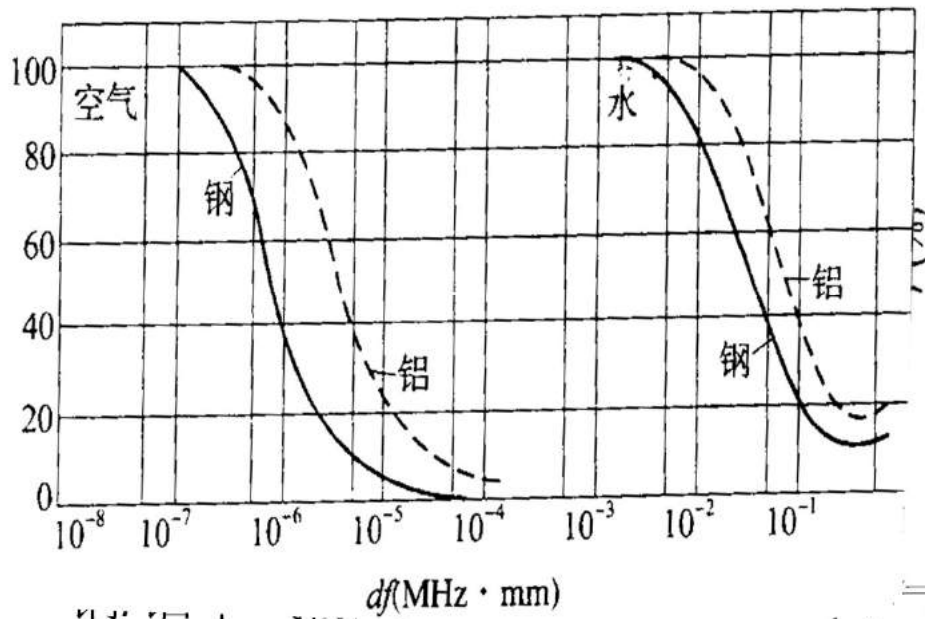


图 2

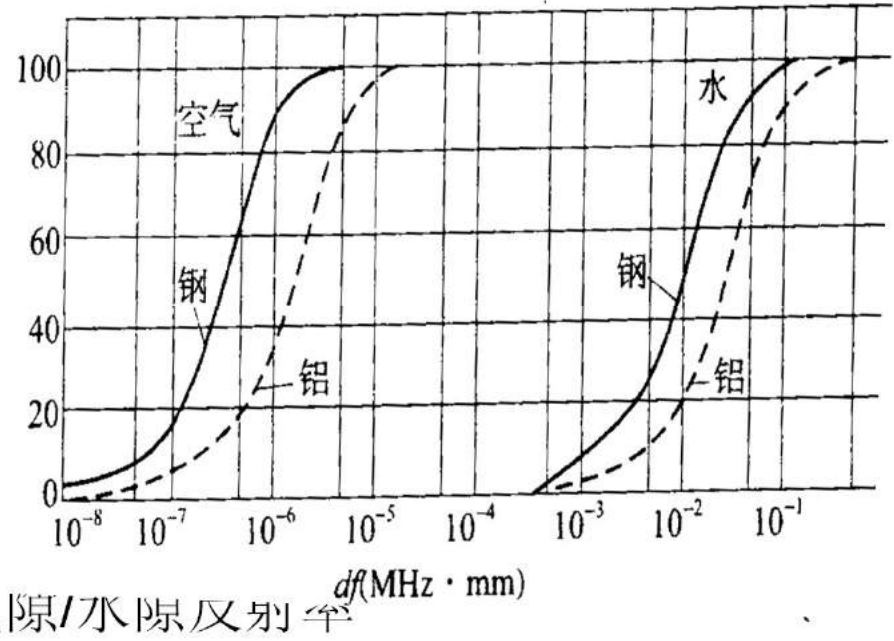


图 3 空气/水界面反射率

薄层界面的反射率与透射率

当频率 f 一定时，钢中的气隙厚度 $d \uparrow \Rightarrow r \uparrow$
 \Rightarrow 超声波对检测裂纹的灵敏度很高。

当钢中气隙厚度 d 一定时，检测 $f \uparrow \Rightarrow r \uparrow$
 \Rightarrow 提高检测频率，有利于提高灵敏度。

薄层界面的反射率与透射率

薄层两侧介质不同的双界面 ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$)

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2} + \left(Z_2 + \frac{Z_1Z_2}{Z_2} \right) \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}$$

当 $d = n \frac{\lambda_2}{2}$, ($n =$ 为整数) 时, $T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2}$

即：当超声波垂直入射到两侧介质不同的薄层时，

若薄层厚度为半波长的整数倍，则声强透射率与薄层的性质无关。

薄层界面的反射率与透射率

当 $d = \frac{2n-1}{4} \lambda_2$, (n 为整数)时, 且 $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$

$T=1$

即: 当超声波垂直入射到两侧介质不同的薄层时,
若薄层厚度为 $\lambda_2/4$ 的奇数倍, 且阻抗匹配时,
则声波全透射。

应用:

直探头保护膜设计。

声波倾斜入射到界面时的反射、折射与波型转换

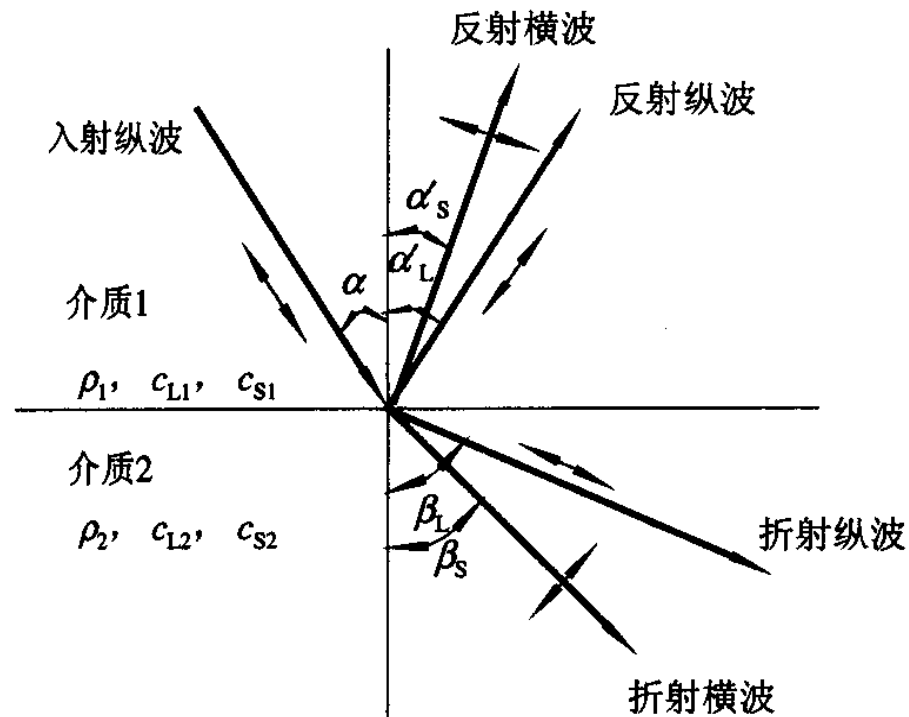
Oblique Incidence: Reflection, Refraction & Mode Conversion

- 反射、折射定律与波型转换
 - 声压反射率
 - 声压往复透射率
 - 端角反射
-

反射、折射定律与波型转换

——纵波入射时

$$\frac{\sin \alpha_l}{C_{l1}} = \frac{\sin \alpha'_l}{c_{l1}} = \frac{\sin \alpha'_t}{c_{t1}} \frac{\sin \beta_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \beta_t}{C_{t2}}$$



反射、折射定律与波型转换

——临界角

第一临界角：若 $c_{l1} < c_{l2}$ ，折射纵波全反射时的纵波入射角：

$$\alpha_I = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{l2}}$$

第二临界角：若 $c_{l1} < c_{t2}$ ，折射横波全反射时的纵波入射角：

$$\alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{t2}}$$

以纵波倾斜入射到有机玻璃 / 钢界面为例：

$$\alpha_I = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{l2}} = \arcsin \frac{2730}{5900} = 27.6^\circ$$

$$\alpha_{II} = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{t2}} = \arcsin \frac{2730}{3230} = 57.7^\circ$$

反射、折射定律与波型转换

——临界角

纵波倾斜入射：

当 $\alpha < \alpha_I$ 时， 在工件中既有纵波、也有横波；

当 $\alpha_I \leq \alpha < \alpha_{II}$ 时， 在工件中只有横波；

当 $\alpha \geq \alpha_{II}$ 时， 在工件中既无纵波，也无横波，
开始转变为表面波。

表面波的激发角度：

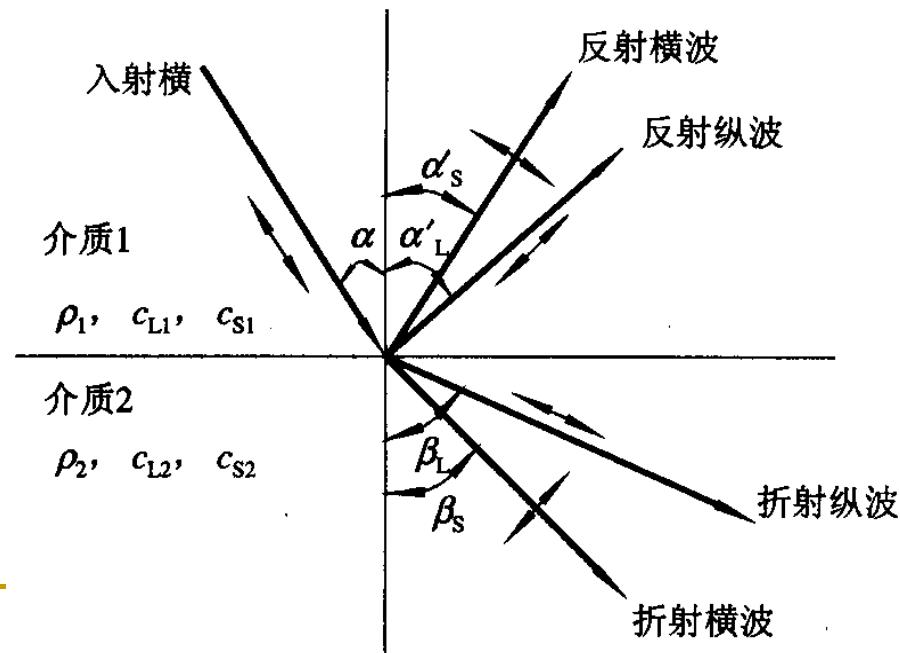
$$\alpha_R = \arcsin \frac{c_{II}}{c_{R2}}$$

式中： c_{R2} —— 表面波声速

反射、折射定律与波型转换

——横波入射时

$$\frac{\sin \alpha_t}{C_{t1}} = \frac{\sin \alpha'_t}{c_{t1}} = \frac{\sin \alpha'_l}{c_{l1}} = \frac{\sin \beta_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \beta_t}{C_{t2}}$$



b)

反射、折射定律与波型转换

——第三临界角

- 定义：横波倾斜入射，当反射纵波全反射时的横波入射角。

$$\alpha_{\text{III}} = \arcsin \frac{c_{t1}}{c_{l1}}$$

对钢而言，

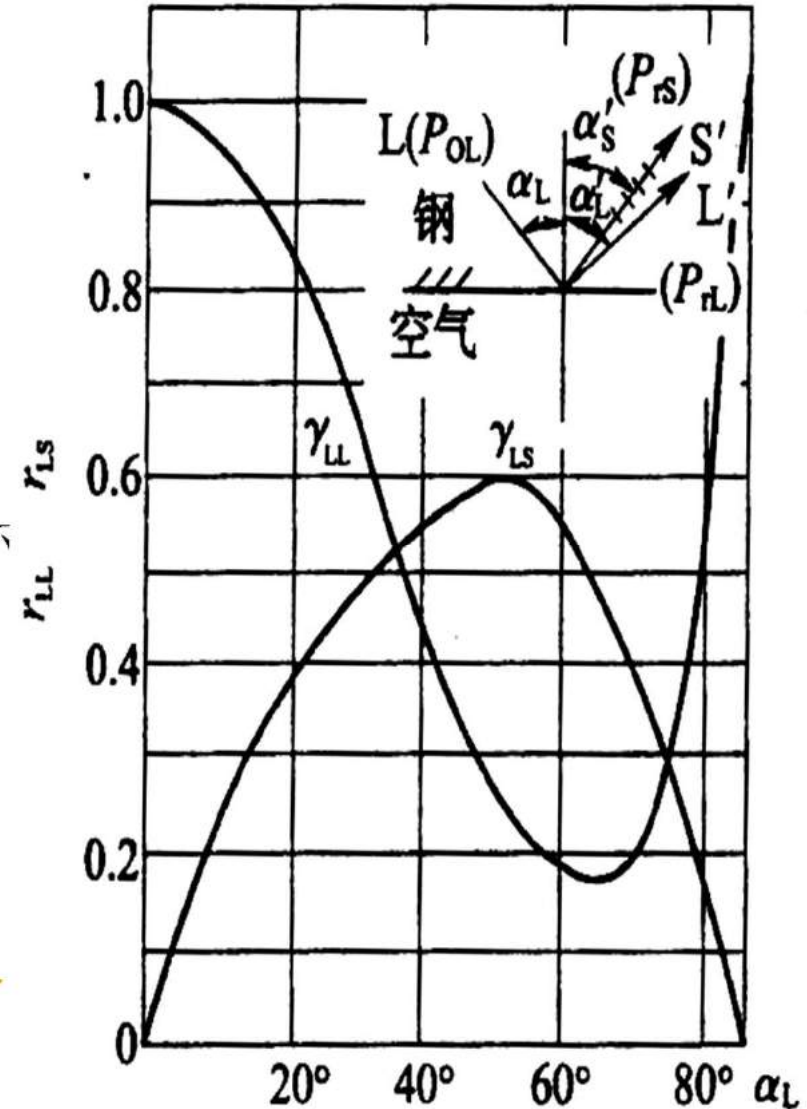
$$\alpha_{\text{III}} = \arcsin \frac{c_{t1}}{c_{l1}} = \arcsin \frac{3230}{5900} = 33.2^\circ$$

即：当横波入射角大于等于 33.2° 时，

工件中只有反射横波。

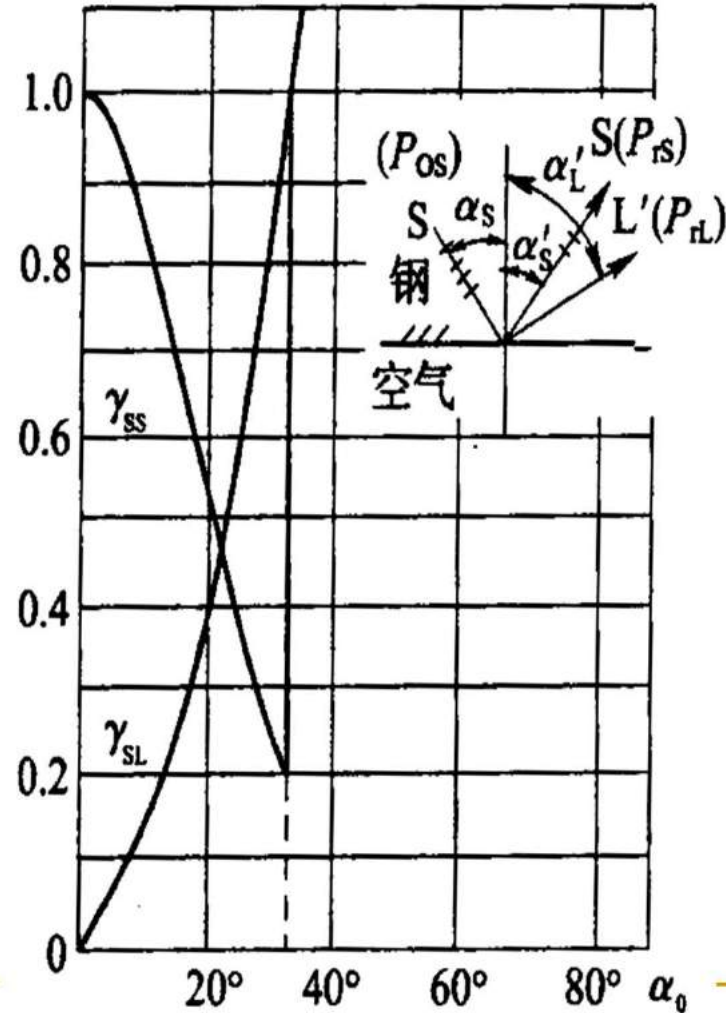
声压反射率—— 纵波倾斜入射到钢/空气界面

- 影响声压反射率的因素：
声阻抗、入射角度
- 可见：入射角等于60度时
纵波反射率较低，
横波反射率较高。



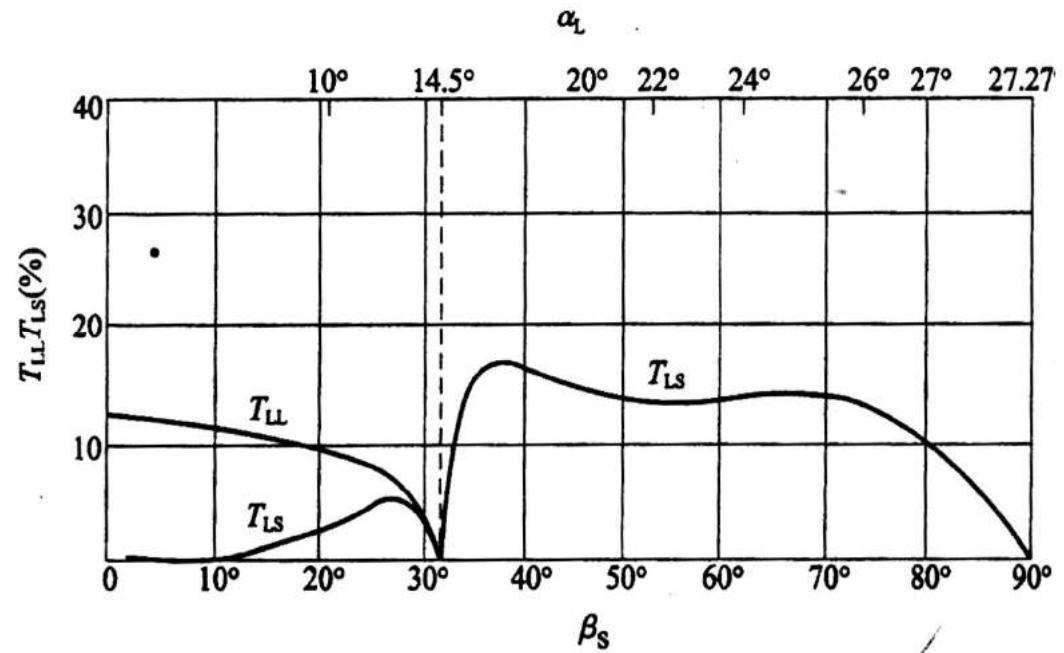
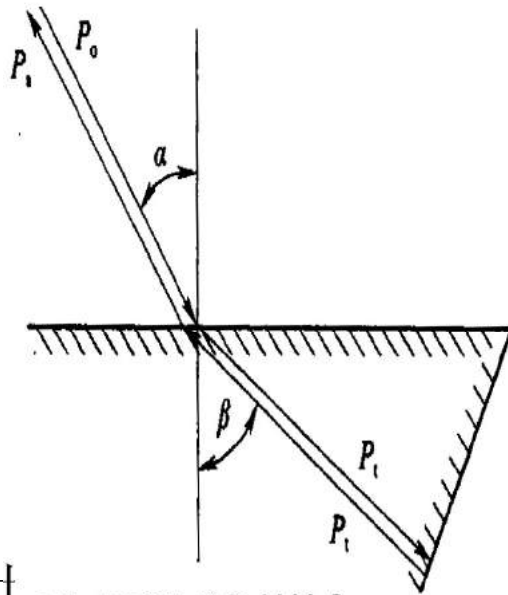
声压反射率—— 横波倾斜入射到钢/空气界面

- 可见：
当横波入射角=30度时，
横波反射率很低；
纵波反射率较高。



声压往复透射率

- 定义：与垂直入射相同。

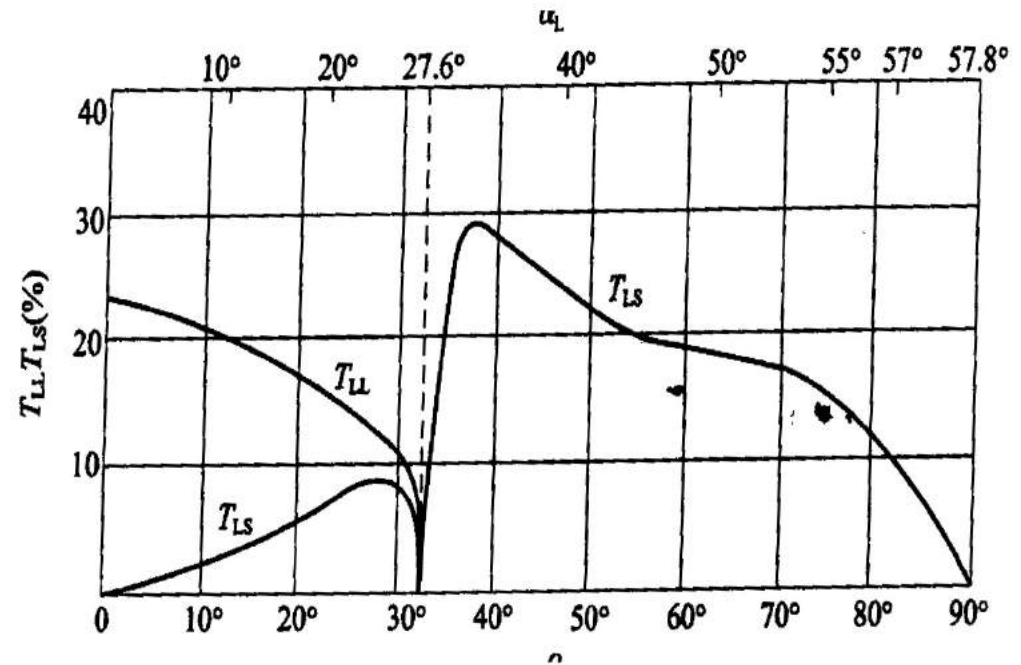


- 对小角度而言：

透射率较低，灵敏度较低——采用聚焦技术。

声压往复透射率

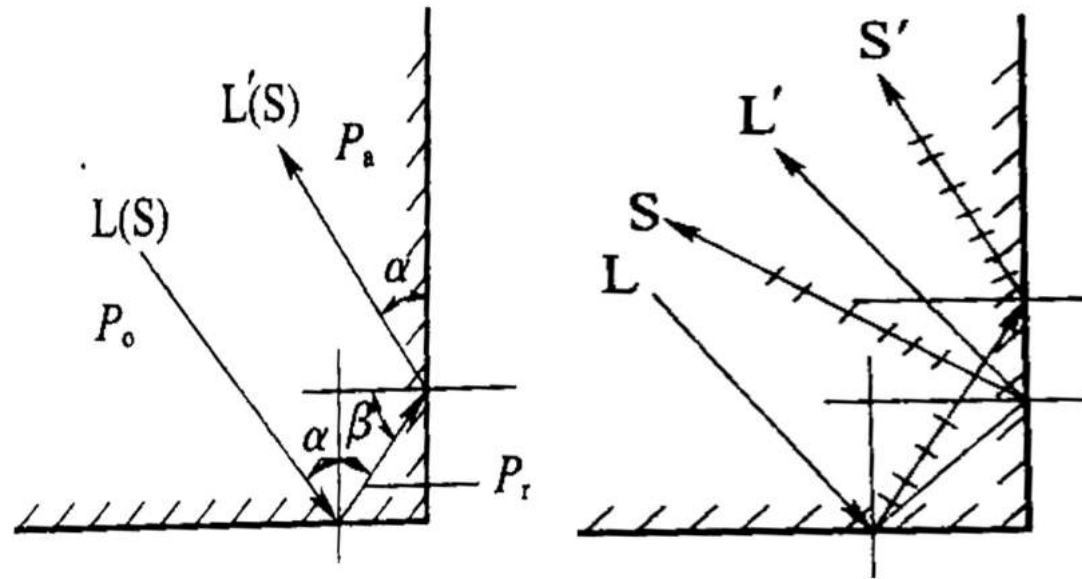
- 对有机玻璃/钢
横波折射角范围：
 $45^\circ \sim 70^\circ$



端角反射

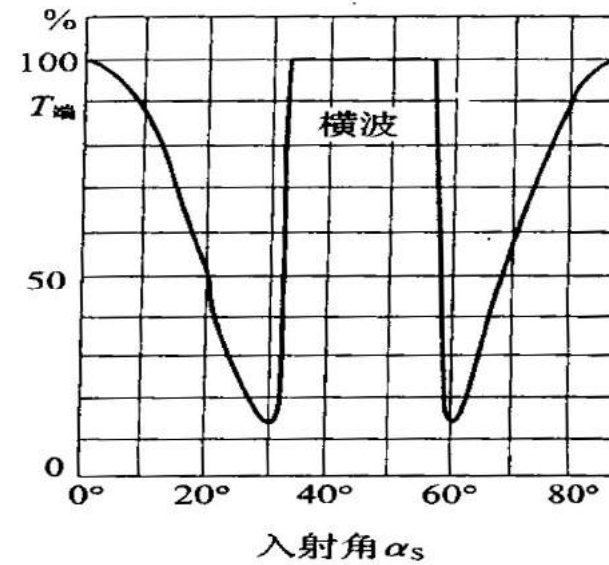
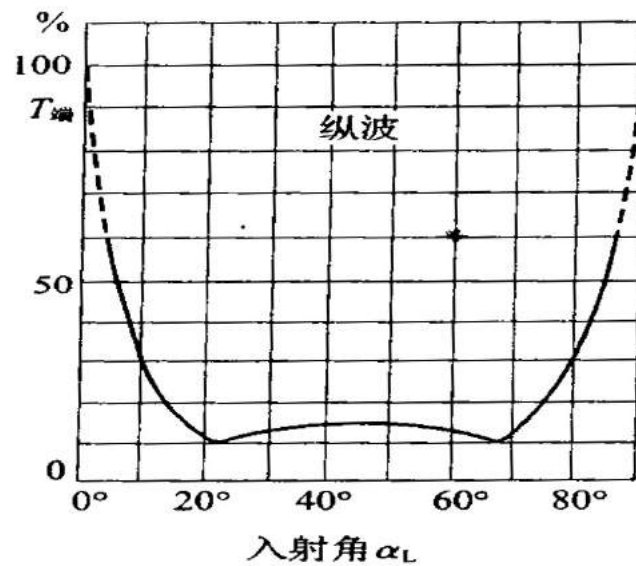
- 定义: $T_{\text{端}} = \frac{P_a}{P_0}$

- 端角反射情况



端角反射

■ 端角反射率



- 可见，横波入射时，入射角在 30° 和 60° 时端角反射率最低——根部未焊透的检测应注意选择。

超声波的聚焦与发散

Focus & Diverge

- 声压距离公式
- 球面波在平界面上的反射与折射
- 平面波在曲界面上的反射与折射



声压距离公式

- 平面波：声压不随距离变化

- 球面波：

$$P = \frac{P_1}{x}$$

- 柱面波：

$$P = \frac{P_1}{\sqrt{x}}$$

球面波在平界面上的反射与折射

——双平界面上的反射

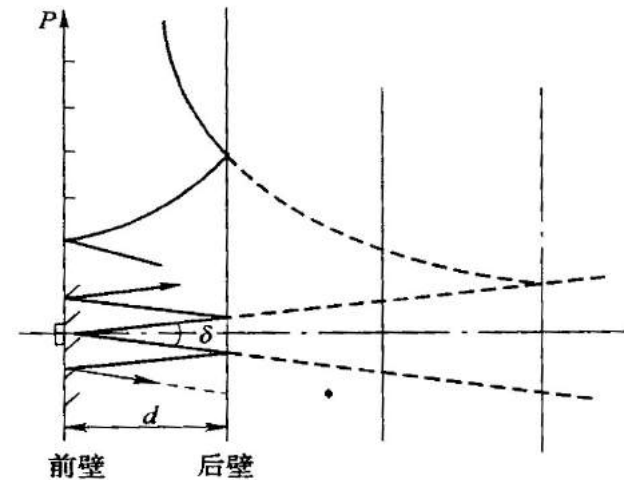
- 规律：多次反射仍符合球面波规律；当 $r=1$ ， d 较大，对脉冲波不产生干涉，

前壁各次反射波声压比为：

$$\frac{P_1}{2d} : \frac{P_1}{4d} : \frac{P_1}{6d} : \dots = 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \dots$$

- 在超声检测中应用

当 d 较大时，探头辐射的超声波近似为球面波，合底波的高度比符合的 $1:1/2:1/3:1/4:\dots$



平面波在曲界面上的反射与折射

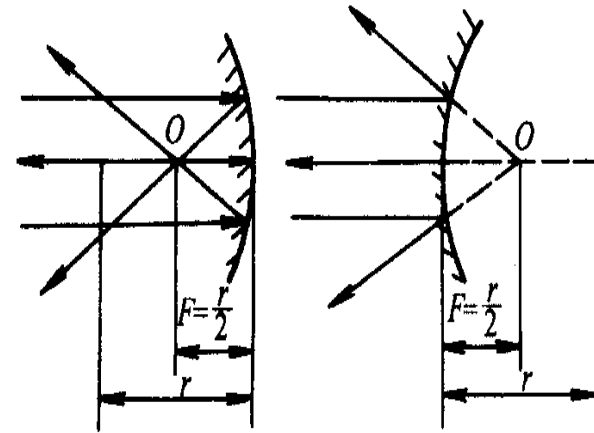
——反射

- 入射到球面时——反射波可视为从焦点发出的球面波，或聚焦、或发散，声压：

$$P_x = P_0 \left| \frac{f}{x \pm f} \right|$$

式中：f——焦距， $f=r/2$

+——用于发散，——用于聚焦

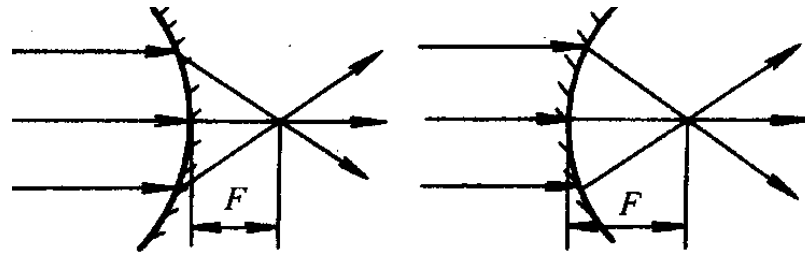


b)

平面波在曲界面上的反射与折射

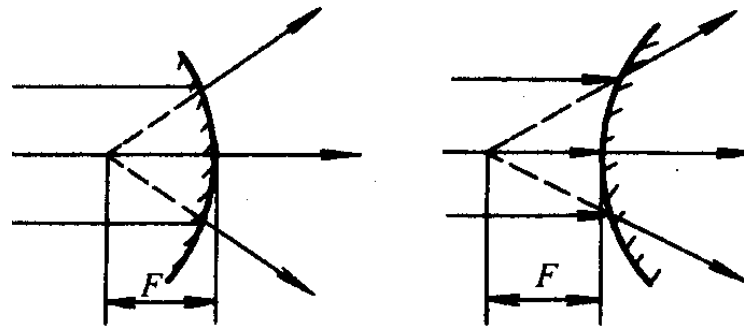
——折射

- 影响聚焦或发散的因素：曲面的凹凸、声速。



a)

b)



c)

d)

a) $c_1 < c_2$ b) $c_1 > c_2$ c) $c_1 > c_2$ d) $c_1 < c_2$

声波的衰减 Sound Attenuation

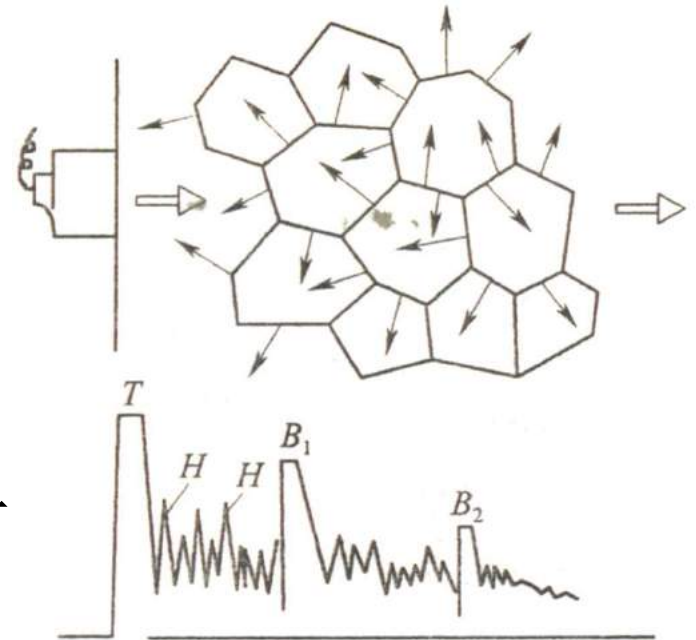
- 衰减的原因
 - 衰减方程与衰减系数
 - 衰减系数的测量
-

衰減的原因

- 声波传导时衰減的原因：

声场的因素——扩散衰減；

介质的因素——吸收、散射



衰减的原因——扩散衰减

■ 原理

声束扩散，即随着离声源的距离增加声束的截面不断增大，使单位面积上的声能不断减少。

■ 影响因素

仅取决于波阵面的形状，与介质的性质无关。

球面波：声压与离声源距离成反比；

柱面波：声压与离声源距离的平方根成反比；

平面波：声压不随距离变化，所以不存在扩散衰减

衰減的原因——吸收衰減

- 原理

声波在介质中传播时发生吸收现象并造成吸收衰減。

- 影响因素

由热传导引起的声吸收；

介质的内磨擦（黏滯性）引起的声吸收——黏滯衰減。

- 与频率有关：

$$\alpha_a = c_1 f$$

衰减的原因——散射衰减

- 原理：当声波传播中遇到障碍物时，
如果 $d \ll \lambda$ ，则将发生反射和折射；
如果 $d \approx \lambda$ （如金属晶粒），将发生显著的绕射现象，造成能量损失，称为散射衰减。
- 影响因素：取决于晶粒平均尺寸与波长的比值

衰减方程与衰减系数——方程

平面波声压衰减方程（无扩散衰减，只有介质衰减）：

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x}$$

式中： α ——介质衰减系数，单位：NP/mm

球、柱面波声压衰减方程（既有扩散衰减，又有介质衰减）：

$$P_x = \frac{P_1}{x} e^{-\alpha x}$$

$$P_x = \frac{P_1}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x}$$

衰减方程与衰减系数——衰减系数

- 介质衰减系数

$$a = \alpha_a + \alpha_s$$

$$\alpha_a = C_1 f$$

$$\alpha_s = \begin{pmatrix} c_2 F d^3 f^4 & d < \lambda \\ c_3 F d f^2 & d \approx \lambda \\ c_4 \frac{F}{d} & d > \lambda \end{pmatrix}$$

- 意义

式中： d ——晶粒直径；
是表征材质声学性能的指标。 F ——各向异性系数。

衰减方程与衰减系数——衰减系数

- 可见：

α_a 与 f 成正比；

α_s 与 f 、 d 、 F 有关，当 $d < \lambda$ 时，与 f^4 、 d^3 成正比。

- 在超声检测中的应用

超声检测粗晶材料时，若检测频率高，衰减严重且杂波严重，信噪比低——奥氏体焊缝检测的困难。

根据材料衰减情况，判定晶粒度大小、缺陷密集程度、石墨含量、水中泥沙含量。

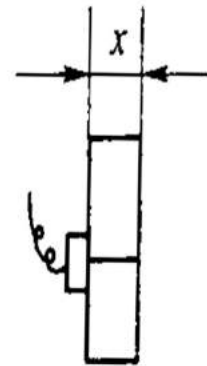
衰减系数的测量

——薄工件

- 衰减系数:

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_m / B_n) - \delta}{2(n - m)x} \text{ (dB / mm)}$$

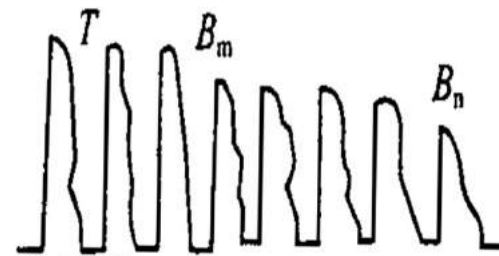
式中: δ ——反射损失



- 要求

工件两表面平行、光洁;

传播距离在未扩散区内, 无扩散衰减。

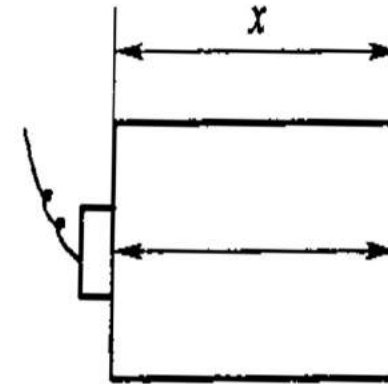


衰减系数的测量

——厚板或粗圆柱体

- 衰减系数:

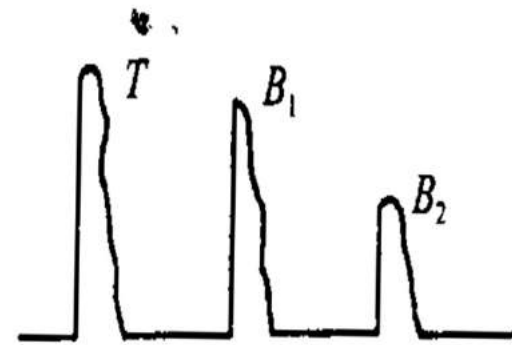
$$\alpha = \frac{20 \lg(B_1 / B_2) - 6dB - \delta}{2x}$$



- 要求:

工件两表面平行、光洁;

传播距离在远场区内, 有扩散衰



超声波的声场

- 纵波发射声场
 - 横波发射声场
 - 聚焦声源发射声场
-

纵波发射声场

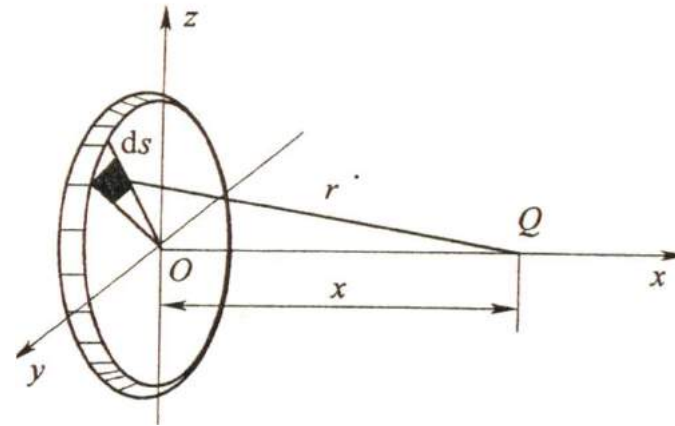
——圆盘声源声轴线上的声压分布

声轴线上的声压幅值为：

$$P = 2P_0 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{R_s^2 + x^2} - x)$$

式中： R_s —— 声源半径；

x —— 声程。

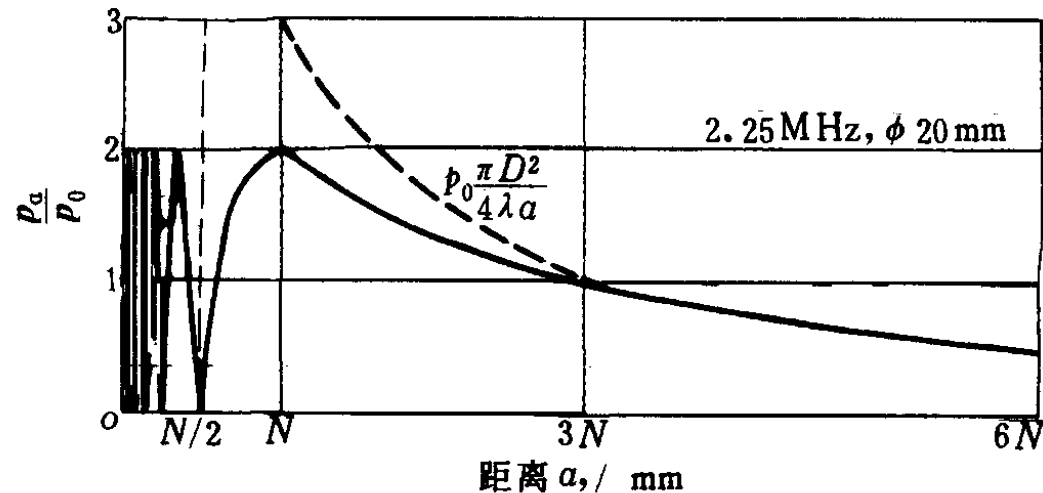


当 $x \geq 2R_s$ 时：

$$P \approx 2P_0 \sin \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{R_s^2}{\lambda x} \right)$$

当 $x \geq 3R_s^2 / \lambda$ (足够远) 时

$$P \approx \frac{P_0 \pi R_s^2}{\lambda x} = \frac{P_0 F_s}{\lambda x}$$



纵波发射声场

——圆盘声源声轴线上的声压分布

- 近场区：在声源附近由于波的干涉而出现一系列声压极大值和极小值的区域——菲涅尔区。在近场内，声束不扩散。

- 近场长度

声压的最后极大值出现的声程：

$$N = \frac{D_s^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D_s^2}{4\lambda} = \frac{R_s^2}{\lambda} = \frac{F_s}{\pi\lambda}$$

纵波发射声场

——圆盘声源声轴线上的声压分布

声压有极小值：

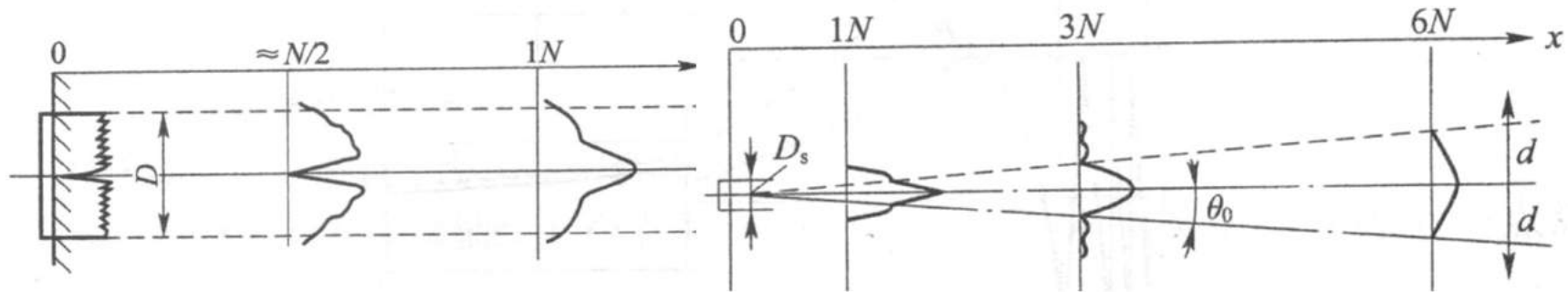
对应的声程约为 $N/2$ 、 $N/4$ 、 $N/8\dots$

- 远场区：声程 $x > N$ 的区域。声压随声程单调下降，当 $x > 3N$ 时， $P \approx P_0 F_0 / \sqrt{2x}$ ——声压与声程成反比——符合球面波的规律——所有规则反射体回波声压计算的基础。

纵波发射声场

——圆盘声源横截面声压分布

- 近场：存在中心轴线上声压为0的截面，轴线上声压为0，偏离中心声压较高；
- 远场：轴线上声压最高，偏离中心声压逐渐降低。同一截面声压分布对称。



纵波发射声场

——圆盘声源横截面声压分布

- 应用：

探头声轴线偏离、折射角测量均应在远场。



纵波发射声场

——指向性和半扩散角

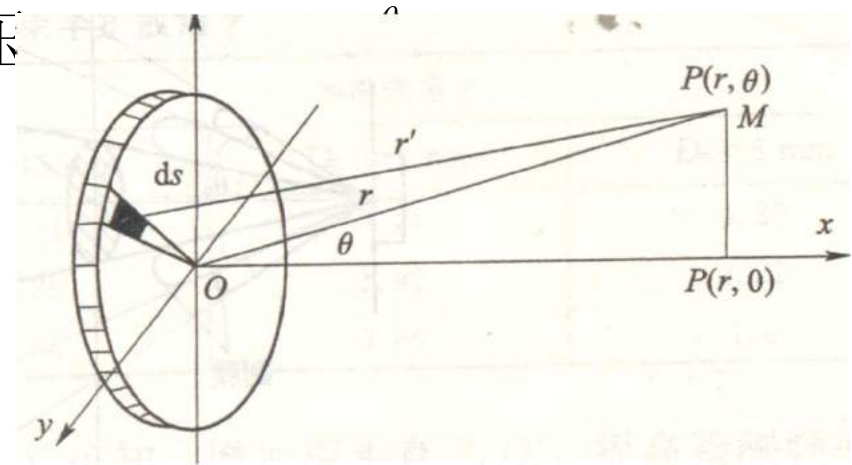
- 指向性：声束集中向一个方向辐射的性质。

在足够远场处空间任意点的声压

$$P = \frac{P_0 F_s}{\lambda r} \left[\frac{2J_1(kR_s \sin \theta)}{kR_s \sin \theta} \right]$$

指向性系数：

$$D_c = \frac{P(r, \theta)}{P(r, 0)} = \frac{2J_1(kR_s \sin \theta)}{kR_s \sin \theta}$$



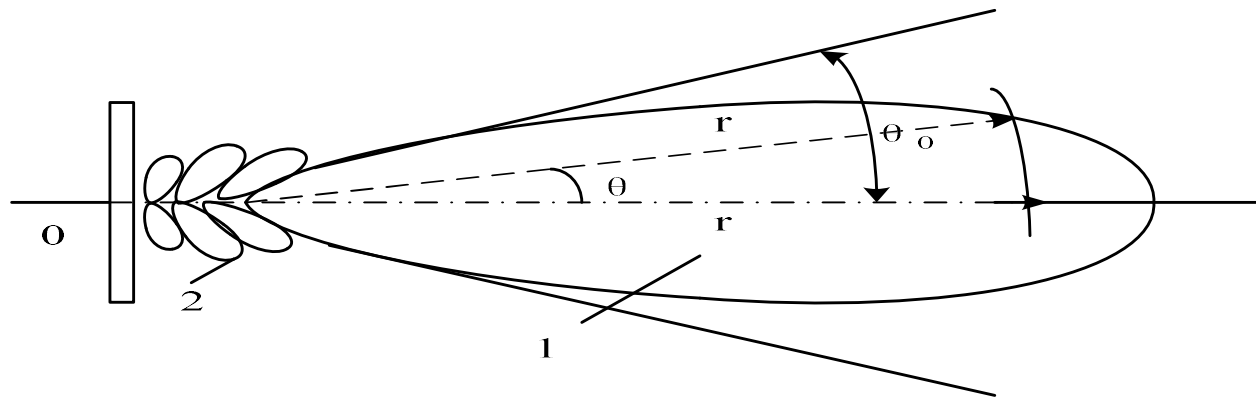
纵波发射声场

——指向性和半扩散角

当 $y = kR_s \sin \theta = 3.83, 7.02, 10.17 \dots$ 时, $D_c = 0$, 即有声压为0点。

当 $y = kR_s \sin \theta = 3.83$, 即第一零点发散角——半扩散角:

$$\theta_0 = \arcsin 1.22 \frac{\lambda}{D_s} \approx 70 \frac{\lambda}{D_s} (^{\circ})$$

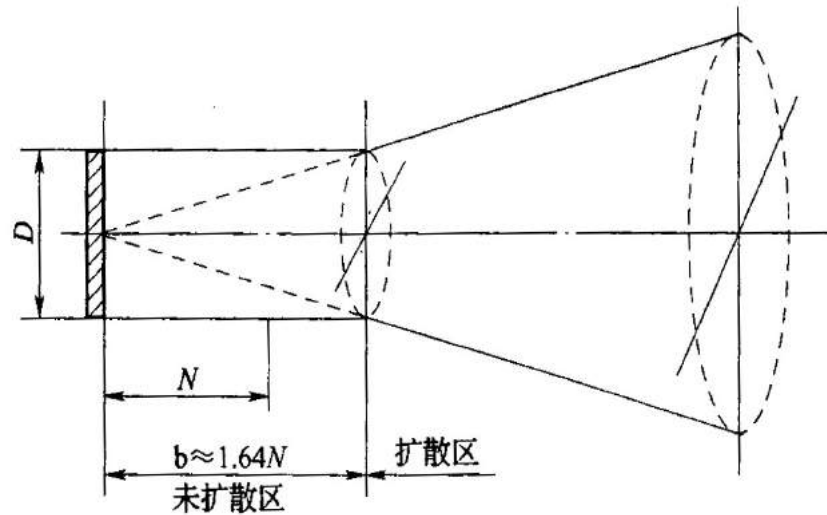


纵波发射声场——未扩散区与扩散区

- 未扩散区长度

$$\theta_0 = \text{arc sin } 1.22 \frac{\lambda}{D_s}$$

$$b \approx \frac{D_s^2}{2.44\lambda} = 1.64N$$



实际声场与理想声场比较

——特点

- 理想声场：连续波均匀激励、理想液体介质；
实际声场：脉冲波非均匀激励、固体介质。

- 特点：
相同：远场；
不同：近场：实际声场近场的声压分布较均匀，幅度变化较小，极大值点的数量也少，极小值远大于0。

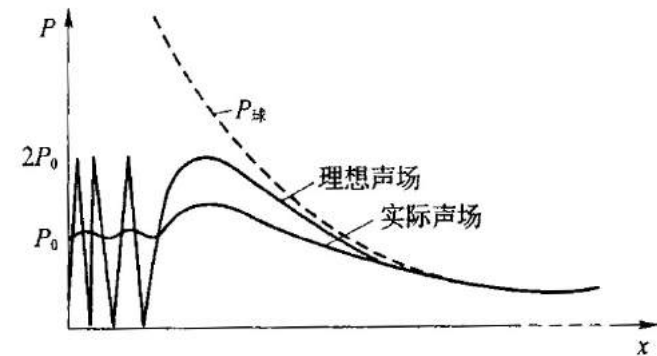


图 3—14 实际声场与理想声场声压比较

实际声场与理想声场比较

——原因

- 理想声场时连续波，在某点完全干涉、实际声场时脉冲波，部分干涉或不干涉；
 - 激励脉冲包含了許多频率成分，每个频率的信号激励晶片所产生的声场相互叠加，使总声压分布趋于均匀；
-

实际声场与理想声场比较

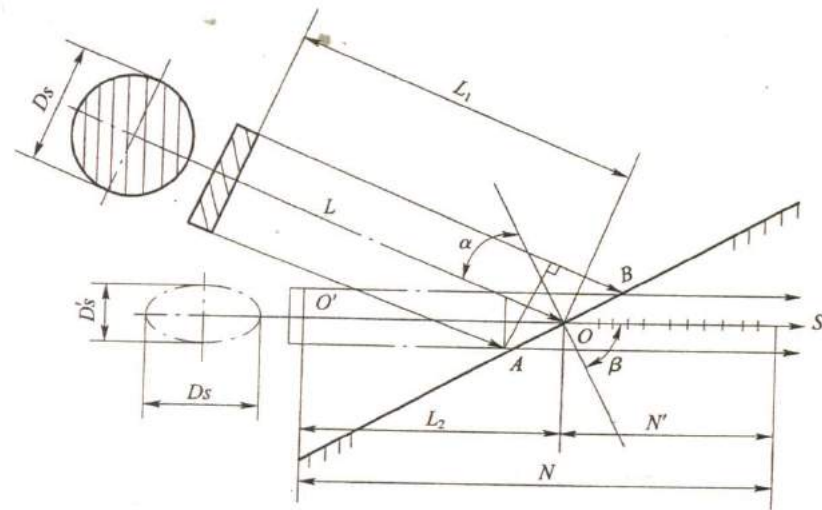
——原因

- 实际声场声源的激励非均匀，中间幅度大，边缘幅度小，而干涉主要受边缘的影响大，所以产生的干涉比均匀激励时的小的多；
 - 理想声场针对液体，声压线形叠加；实际声场针对固体，声压方向在连接线上，叠加干涉少。
-

横波发射声场

- 假想：把第一介质中的纵波声场转换为轴线与横波波束一致的横波声场。
- 假想横波声源为椭圆，长轴为 D_s ，短轴为：

$$D'_s = D_s \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}$$



横波发射声场

- 在足够远处声轴线上的声压：

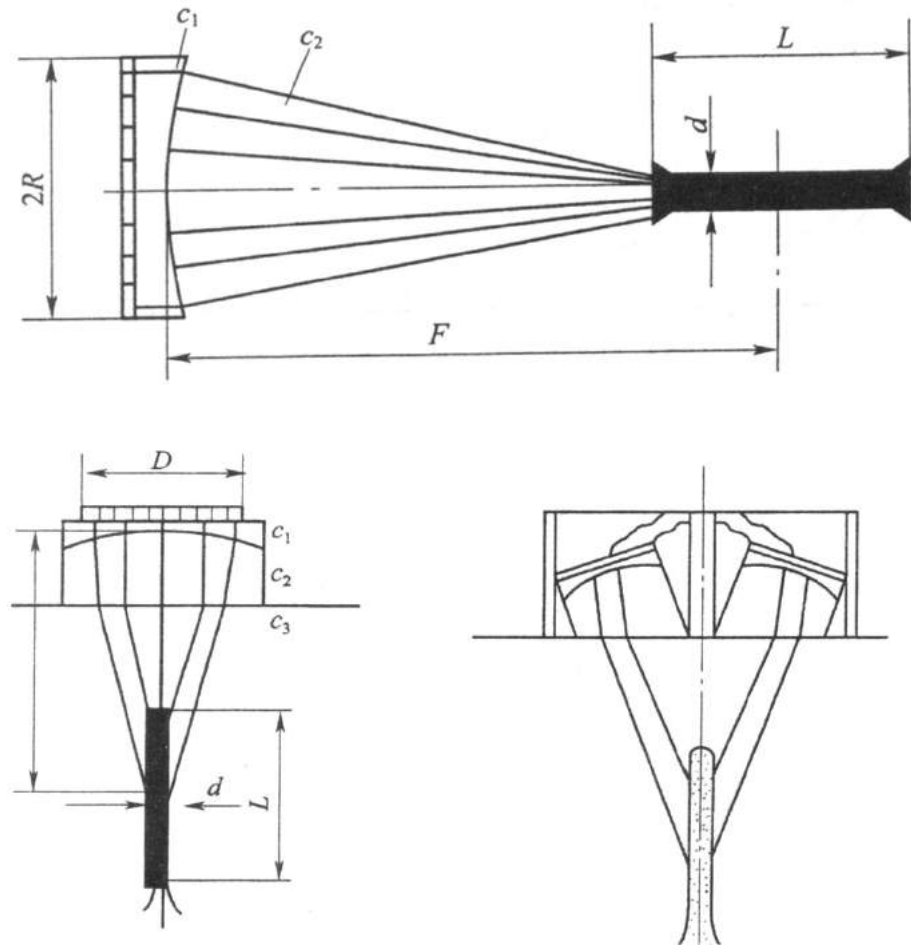
$$P = \frac{KF'_s}{\lambda_{s2}x}$$

式中： $F'_s = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} F_s$ ——等效声源面积

- 规律：与纵波相似。

聚焦声源发射声场

- 分类：水浸、接触



聚焦声源发射声场——应用

- 粗晶材料检测——声束细，散射概率小，信噪比高，灵敏度高；
- 缺陷尺寸测量——更准确；
- 裂纹高度测量——用衍射法测量准确；
- 缺点：声束细、扫查效率低；固定焦距探头仅适用于一定深度范围。

规则反射体的回波声压

Echo Sound Pressure

- 大平底 **Flat Bottom**
- 平底孔 **Bottom-Drilled Hole**
- 大直径圆柱体 **Huge Diameter Cylinder**



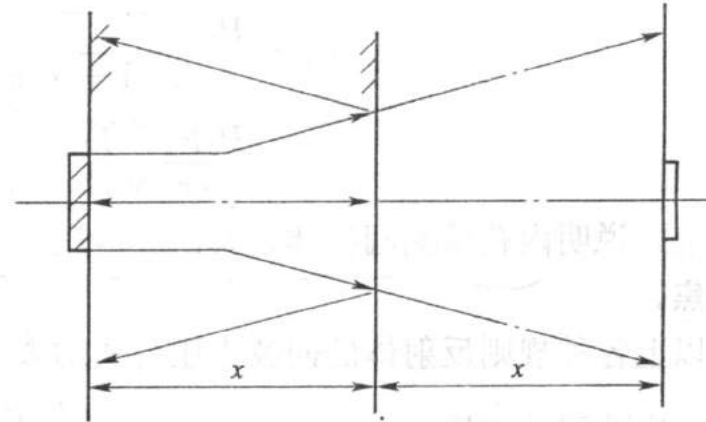
规则反射体的回波声压——大平底

大平底回波声压： $P_B = P_0 \frac{F_s}{2\lambda x}$

规律：

声压与声程成反比、

与频率成正比。



两厚度分别为 x_1 ， x_2 的大平底的回波声压分别为：

$$P_{B_1} = P_0 \frac{F_s}{2\lambda x_1} \quad P_{B_2} = P_0 \frac{F_s}{2\lambda x_2}$$

$$\Delta dB = 20 \lg \frac{P_{B_2}}{P_{B_1}} = 20 \lg \frac{x_1}{x_2}$$

所以，距离相差一倍，其回波声压相差6dB.

规则反射体的回波声压——平底孔

平底孔处的声压： $P_x = P_0 \frac{F_s}{\lambda x}$

探头接收到的平底孔回波声压：

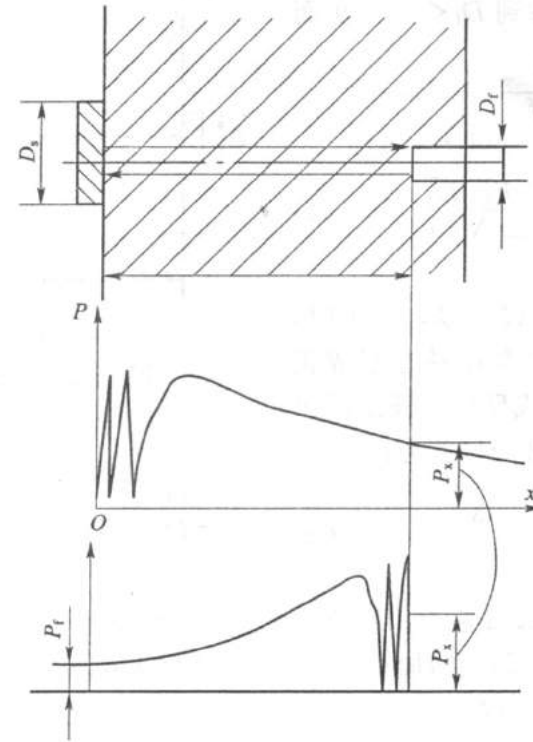
$$P_f = P_0 \frac{F_s F_f}{\lambda^2 x^2}$$

式中： F_s ——声源面积；

F_f ——平底孔面积。

规律：

回波声压与平底孔直径的平方成正比、与声程的平方成反比、与频率的平方成正比。



规则反射体的回波声压——平底孔

声程和孔径不同的两平底孔回波声压：

$$P_{f1} = P_0 \frac{F_s F_1}{\lambda^2 x_1^2} \quad P_{f2} = P_0 \frac{F_s F_2}{\lambda^2 x_2^2}$$

二者的回波声压（高度）差：

$$\Delta dB = 20 \lg \frac{P_{f1}}{P_{f2}} = 20 \lg \left(\frac{D_1}{D_2} \times \frac{x_2}{x_1} \right)^2 = 40 \lg \left(\frac{D_1}{D_2} \times \frac{x_2}{x_1} \right)$$

- 平底孔孔径差1倍：回波声压差 **12 dB**
- 平底孔声程差1倍：回波声压差 **12 dB**

规则反射体的回波声压——平底孔与大平底比较

大平底和平底孔的回波声压分别为：

$$P_B = P_0 \frac{F_s}{2\lambda x_B} \quad P_f = P_0 \frac{F_s F_f}{\lambda^2 x_f^2}$$

两回波的声压（高度）差为：

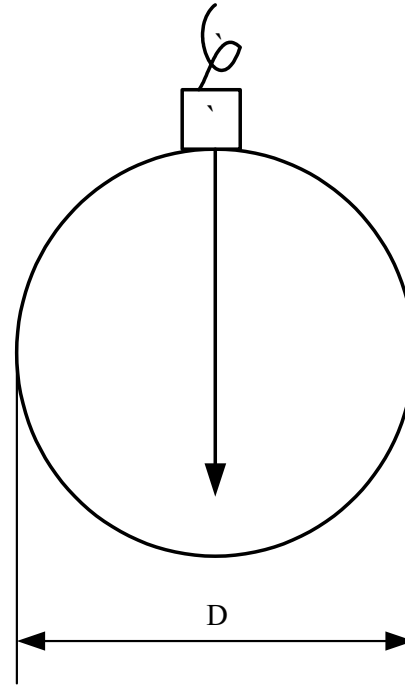
$$\Delta dB = 20 \lg \frac{P_f}{P_B} = 20 \lg \frac{\pi d^2 x_B}{2\lambda x_f^2}$$

应用：底波法调整灵敏度、缺陷当量计算。

规则反射体的回波声压——大直径圆柱体——实心

- 圆柱体回波声压:

$$P = P_0 \frac{F_s}{2\lambda D}$$



- 可见，与厚度与直径相同的大平底相同。

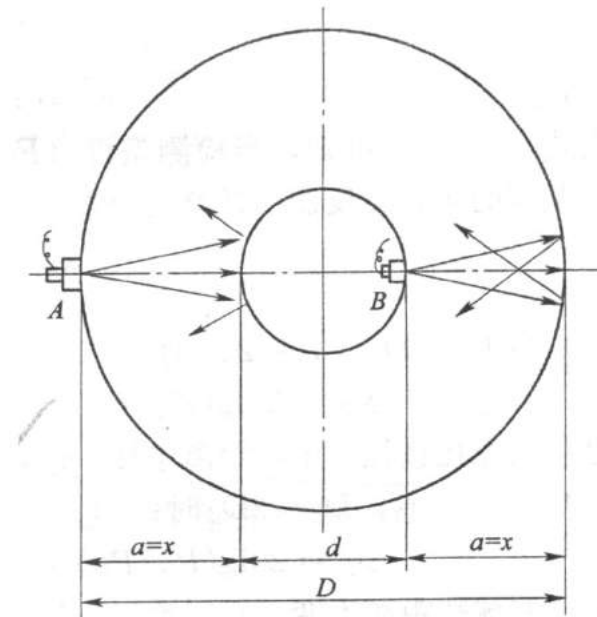
规则反射体的回波声压——大直径圆柱体——空心

从外圆周径向入射时回波声压:

$$P_B = \frac{P_0 F_s}{2\lambda s} \sqrt{\frac{d}{D}}$$

从内圆周径向入射时回波声压:

$$P_B = \frac{P_0 F_s}{2\lambda x} \sqrt{\frac{D}{d}}$$



可见，从外圆周面入射时比大平底回波低，因为内壁凸面发散。

从内圆周径入射时比大平底回波高，因为外壁凹面聚焦。

AVG曲线——纵波平底孔通用曲线

- 制作： $x > 3N$ ：计算； $x < 3N$ ：实测

$$\text{大平底回波声压： } P_B = P_0 \frac{\pi D_s^2}{8\lambda x}$$

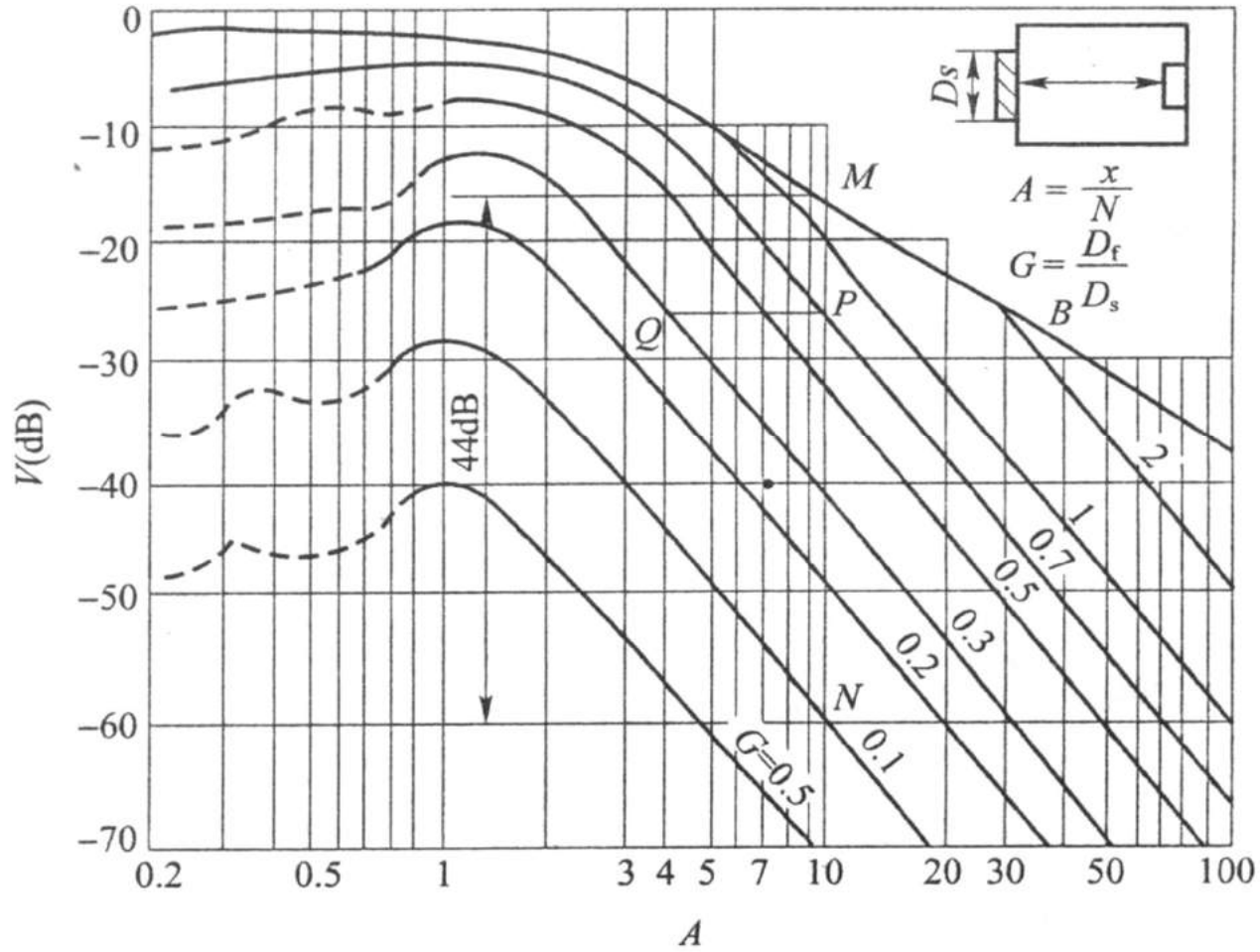
$$\text{平底孔回波声压： } P_f = P_0 \frac{\pi D_s^2}{4\lambda x} \frac{\pi D_f^2}{4\lambda x}$$

$$\text{归一化声程： } A = \frac{x}{N}, \quad \text{归一化缺陷当量： } G = \frac{D_f}{D_s}$$

$$\text{大平底相对波高： } V_B = 20\lg \frac{P_B}{P_0} = 20\lg \frac{\pi}{2A} = 20\lg \frac{\pi}{2} - 20\lg A$$

$$\text{平底孔相对波高： } V_f = 20\lg \frac{P_f}{P_0} = 40\lg \frac{\pi G}{A} = 40\lg \pi + 40\lg G - 40\lg A$$

AVG曲线——纵波平底孔通用曲线



AVG曲线——纵波平底孔通用曲线

- 优点

通用性强，适用于不同探头。

- 缺点

归一化计算复杂。

AVG曲线——纵波平底孔通用曲线

- 例：

用2.5P20直探头检测厚度为400mm的钢锻件，已知纵波声速为5900m/s，在170mm处发现一缺陷，其回波比底波低10dB。（1）如何用底波调整 $\phi 2\text{mm}$ 灵敏度？（2）求此缺陷的当量平底孔尺寸。

AVG曲线——实测曲线

- 制作

以特定仪器和探头，在不同深度和孔径的反射体试块上实测。

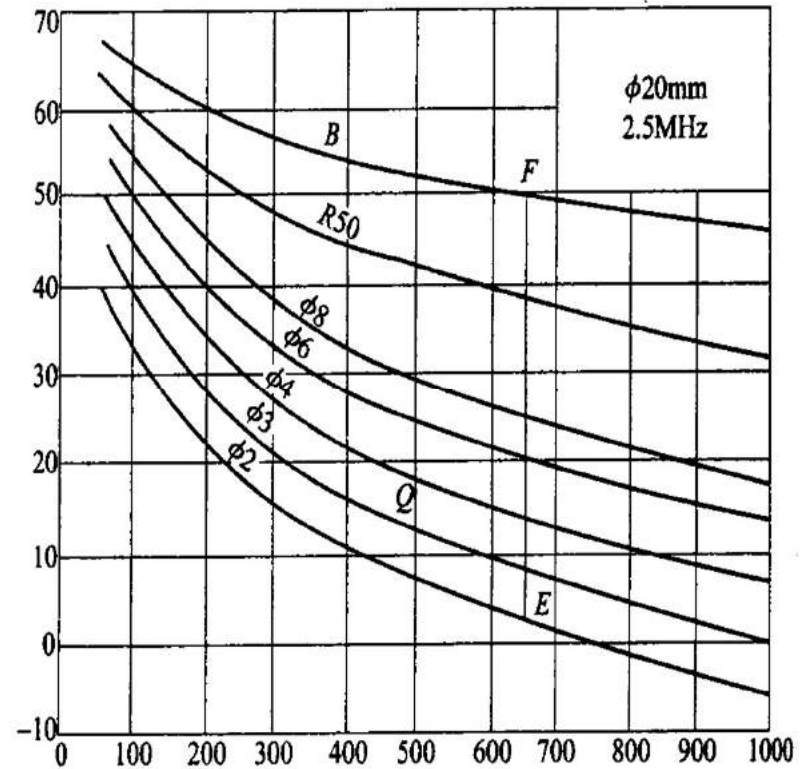
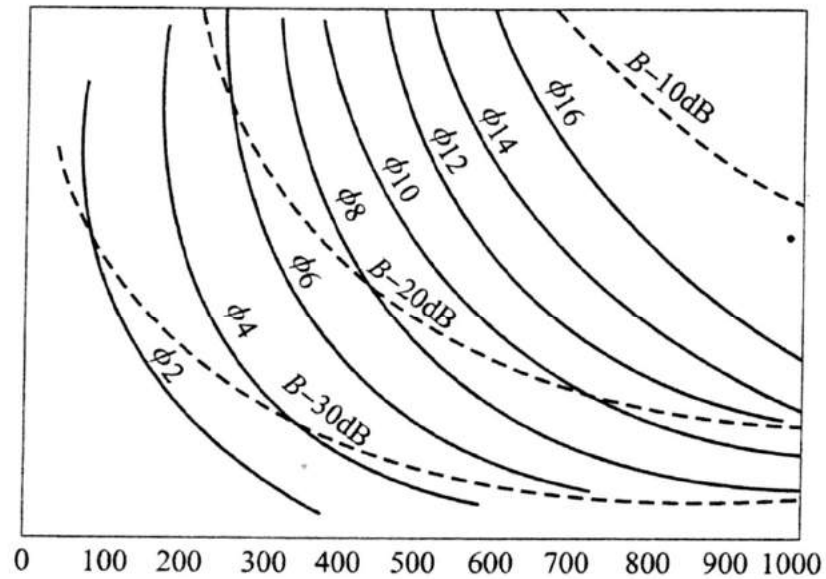
- 优点

使用简单，无需归一化计算。

- 缺点

只适用于某特定的仪器和探头。

AVG曲线——纵波平底孔实测曲线



AVG曲线——横波平底孔实测曲线

- 制作
平底孔三角试块实测
- 适用性
仅适用于特定探头。

