

编号: 100

超声波探伤法

机械科学研究院材料研究所

1960年12月南京

在近代飞速发展的机械制造工业中，各种重要的机械和设备，往往承受着高度的应力，因此就不容许有任何事故发生，否则就会危及很多人的生命安全和造成经济上的巨大损失。像发电厂的高压锅炉，高速旋转的蒸汽涡轮机和发电机，化学工业中的高压容器和飞机上的重要部件等^①，他们在使用时必须保证安全可靠。因此在制造时应对原材料和成品的质量进行严格的控制，采用的方法有化学分析、机械性能和金相检验，但这些都是破坏性的试验，而且所检验的只是部分金属，不能完全保证未被检验部分的质量，因此近十多年来研究用不破坏试验探导金属内部缺陷的方法，在世界范围内得到了广泛的发展。在我国上述几种产品也都利用了各种无损探伤试验来保证产品的质量。

目前常用的无损探伤方法有X射线， γ 射线，超声波，磁粉，涡流等物理试验方法，虽然这些方法不一定能全部解决机械制造中的探伤问题，但在控制重要产品的质量方面已取得了很大的效果。就性质来看，X射线和 γ 射线都属于电磁辐射，能穿透约300公厘以下的钢铁，但只能发现较大的缺陷（约为物体厚度的2%），灵敏度常感到不够，磁力和涡流探伤法都只能探测表面的缺陷，而超声波因为有很大的穿透能力和较高的灵敏度，它已被认为是一种很有发展前途的探伤方法。因此很多国家都在研究，并已取得了很大的实用价值。

我国的无损探伤工作是解放后在党和国家的重视下开始发展，几年来随着祖国机械工业的飞跃前进，各方面对探伤工作的要求日益增加，虽然探伤工作者的队伍在不断的扩大，但迅速地培养技术力量仍是当务之急，本所为此曾于1959年为全国许多厂矿的技术人员开过两次超声探伤培训班，并总结了本所几年来的超声探伤经验，编成讲

义向学员介绍。以后，各地区需要的单位甚多，为适应广泛需要，特在原讲义的基础上作了补充及修改，修订及付印时间匆促，加以我们经验不多，错漏在所不免，望读者指正。

超声波探伤讲义目录

前言

第一章 超声波探伤的物理基础.....1.1

§ 1. 超声波的基本性质.....1.1

I • 波型，波速和波长.....1.1

II • 超声波的指向性.....1.6

III • 反射和折射，类型波的产生.....1.9

IV • 干涉和绕射.....1.18

V • 超声波在金属中的衰减.....1.21

VI • 超声波的基本性质在超声波探伤中的应用.....1.25

§ 2 超声波的发生.....1.25

I • 石英晶体.....1.26

II • 铁酸钡.....1.29

第二章 超声波探伤的主要方法.....2.1

§ 1 反射法探伤概述.....2.1

§ 2 穿透法探伤概述.....2.6

§ 3 共振法探伤概述.....2.8

§ 4 各种探伤方法的比较.....2.10

第三章 脉冲反射法探伤中的基本问题.....3.1

§ 1 影响脉冲图形的各项因素.....3.1

I • 材料组织及化学成份的影响.....3.1

II • 材料侧面及底面的影响.....3.1

III • 缺陷大小及位置的影响.....3.2

IV • 缺陷形状的影响.....3.6

V • 探伤仪阻塞现象的影响.....	3•6
VI • 仪器分辨能力的影响.....	3•6
VII • 重複频率及探伤速度的影响.....	3•7
§ 2 仪器的探测条件.....	3•10
I • 仪器的灵敏度.....	3•10
II • 仪器的探测频率.....	3•10
III • 工件表面光洁度.....	3•13
IV • 耦合剂材料与耦合剂厚度.....	3•14
V • 探头的选择.....	3•15
§ 3 参考样块的用途，制作要求及维护.....	3•16
I • 参考样块的主要用途.....	3•18
II • 制造参考样块应考虑的因素.....	3•18
III • 参考样块的维护.....	3•18
§ 4 缺陷位置，大小及性质的确定.....	3•18
I • 缺陷位置的确定.....	3•21
II • 缺陷大小的确定.....	3•21
III • 缺陷性质的判别.....	3•28
§ 5 探伤结果的记录方法及探伤报告.....	3•34
I • 探伤结果的记录方法.....	3•38
II • 探伤报告.....	3•38
§ 6 有关材料判定的问题.....	3•47
第四章 探伤实例.....	4•1
§ 1 钢板的探伤.....	4•1
I • 探伤方法简述.....	4•1
II • 探伤步骤.....	4•1

III • 影响探伤的几个因素.....	4•2
IV • 存在问题.....	4•4
§ 2. 铸钢筒体内部疏松的探伤.....	4•13
§ 3. 轴类的超声波探伤.....	4•15
I • 探伤方法概述.....	4•16
II • 锻造转子的探伤.....	4•19
III • 汽轮主轴的探伤.....	4•21
IV • 飞轮地轴的探伤.....	4•21
V • 调速器齿轴轴的探伤.....	4•25
§ 4. 焊缝的超声波探伤.....	4•27
I • 电渣焊探伤.....	4•27
II • 平板对接焊缝的探伤.....	4•31
III • 管件纵焊缝的探伤.....	4•38
IV • 丁字形焊缝的探伤.....	4•41
§ 5. 汽轮机葉轮的超声波探伤.....	4•43
I • 探伤方法.....	4•43
II • 缺陷性质的判断.....	4•47
§ 6. 表面波的特性及探测轴类的表面缺陷.....	4•51
I • 表面波发生方法.....	4•51
II • 表面波的特性.....	4•53
III • 表面波应用于轴类的探伤.....	4•57
§ 7. 大型锻件毛面探伤方法简介.....	4•61
I • 毛面探伤的意义.....	4•61
II • 毛面探伤的特殊要求.....	4•61
III • 实际试验.....	4•70

第五章 鈦酸鋇壓電體及探頭的制作	5.1
§ 1 引言	5.1
§ 2 鈦酸鋇壓電體的制作	5.2
I · 鈦酸鋇壓電體的配方	5.2
II · 鈦酸鋇壓電體陶瓷粉料的制取	5.3
III · 鈦酸鋇壓電體的制作	5.4
§ 3 探頭的制作	5.10
第六章 超聲波探傷儀	6.1
§ 1 引言	6.1
§ 2 主振盪器中常用的電路	6.2
I · 多諧振盪器	6.2
II · 間歇振盪器	6.10
§ 3 鋸齒波發生器常用電路	6.13
I · 最簡單的鋸齒波發生器	6.13
II · 正向鋸齒波發生器	6.17
III · 負向鋸齒波發生器	6.19
§ 4 倒相級常用電路	6.21
I · 雙管倒相電路	6.22
II · 陰極——板極負載放大諧	6.22
III · 陰極耦合倒相諧	6.24
§ 5 調諧放大器	6.27
§ 6 超聲波探傷儀故障一覽表	6.29
I · 江南 I 型超聲波探傷儀故障一覽表	6.29
II · УЗД-7 H 超聲波探傷儀故障一覽表	6.32

第一章 超声波探伤的物理基础

§ 1. 超声波的基本性质

声波是弹性介质机械振动的传播过程。各种介质——固体，液体和气体都能被激发和传播这种机械振动。人们日常听到的各种声音，是各种介质的机械振动引起人们耳膜的振动而产生的听觉。能够引起人们听觉的机械振动，其振动次数在每秒20次以上至每秒20000次以下的范围内，在每秒20次以下的机械振动叫着次声，在每秒20000次以上的机械振动叫着超声。每秒内振动的次数，称为频率，以“赫”为单位。次声和超声都不能引起人的听觉。声波和超声波的划分，完全是根据人听觉这一主观感受而来，它们的客观本质是没有两样的。一个通俗的名称“听不见的声音”简单而深刻地道出了超声波的本质。当然，超声波还有它本身的特点。

1. 波型，波速和波长

由于各种弹性介质的弹性不同，也由于超声波传到介质的方式的差异，使传播在固体、液体和气体中的超声波有着不同的波型、波速和波长。

1. 三种波型——我们知道，当机械振动传播时（即声波形成时），振动着的介质质点并不随传播着的振动过程（声波）而移动，而是在自己平衡位置附近振动着。若质点往复振动方向与声波传播方向平行，我们就叫它为纵波，用 L 表示；若质点振动方向与声波的传播方向相垂直，我们就叫它为横波，用 S 表示。纵波和横波都传播在介质内部。若声波只沿介质的表面传播，波的幅度随深度的增加迅速减弱的波，我们就叫它为表面波，表面波在固体内传播时，质点振动作椭圆运动

形式，称为瑞利波，它具有着纵波与横波质点振动的综合性质，表面波用R表示。

表 (1. — 1. — 1.)

波 型	质点振动与波的传播	备 註
纵 波		1. 质点振动 2. 波的传播方向
横 波		
表 面		

纵波可以存在于固体、液体和气体中，横波只存在于固体中，表面波可以在固体和液体表面传播。这三种波型在超声波探伤中，都得到不同程度的应用。

2. 波速

纵波的速度——在固体中，可由下式算出：

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \dots\dots\dots (1. - 1. - 1.)$$

式中：E —— 杨氏模数； ρ —— 介质密度； σ —— 泊松比。

在液体中，可由下式算出：

$$C_L = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho \beta_s}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot B_{ad}}} \dots\dots\dots (1. - 1. - 2.)$$

式中： κ —— 定压比热与定容比热之比；

B_{1s} ——恒溫壓縮係數； B_{ad} ——熱壓縮係數；

橫波的速度，可由下式計算：

$$C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \dots\dots\dots (1-1-3)$$

式中 μ ——介質的剛性模數。

液體和氣體的剛性模數 $\mu = 0$ ，故橫波不存在於液體和氣體中，而只能存在於固体中。

从公式 (1-1-1) 和 (1-1-3) 之比：

$$\frac{C_L}{C_s} = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-\sigma)}}}{\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}}} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{(1+\sigma)}} \dots\dots\dots (1-1-4)$$

一般材料的泊松比值 $\sigma \approx 0.3$ ，因此可見：

$$\frac{C_L}{C_s} \approx 2 \dots\dots\dots (1-1-5)$$

因此，我們可以知道，在固体中，橫波的速度約為縱波速度的 50%。
表面波的速度約為橫波的 90%。

3. 波長

振動的一定周相在一振動周期內傳播的距離，叫做波長，用 λ 表示

由圖可知，波長是振動周相相同的兩點間的最小距離

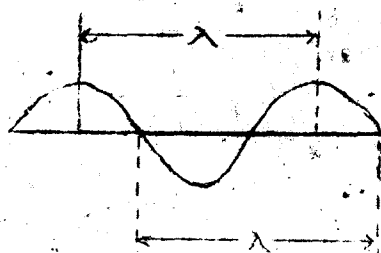


圖 (1-1-1)

振動周相相同且相距最近的兩點間的距離決定波長 λ

由图可知，波长是振动周相相同的两点間的最小距离。

波长 λ 和频率 f 波速 C 之有如下的关系：

$$\lambda = \frac{C}{f} \dots\dots\dots (1-1-6)$$

不同介質中由於波速和声波的频率不同而有不同的波长。

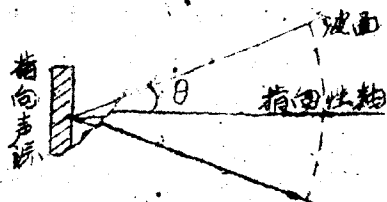
表 (1-1-2) 不同介質中，不同频率时超声波的波长

介 質	縱 波			橫 波		
	波 长 μ	波 长 μ	波 长 μ	波 长 μ	波 长 μ	波 长 μ
	1 M C	3 M C	5 M C	1 M C	3 M C	5 M C
铝	6.35	2.12	1.27	3.13	1.04	0.63
鋼	5.88	1.94	1.17	3.31	1.10	0.66
銅	4.63	1.54	0.93	2.07	0.69	0.41
水 銀	1.46	0.49	0.33	—	—	—
水	1.43	0.48	0.29	—	—	—
空 气	0.33	0.11	0.066	—	—	—

表 (1-1-3) 各种弹性介质的声速及物理常数表

II. 超声波的指向性

由於超声波的頻率較高，波長較短，因而具有比較明顯的指向性。指向性用超声波束的半擴散角 θ 表示，如图 (1-1-2) 所示，声束成圆锥形，超声波束的半擴散角的大小視声源的几何尺寸，超声波在所傳播的介质中的波長 λ 而定。若声源为圆板形，半擴散角可以下式計算：



$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

..... (1-1-7)

图 (1-1-2)

式中：

指向性声波和波面

λ —— 超声波在介质中的波長。

D —— 声源的直径。

若声源为板状矩形，半擴散角可用下式計算：

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{B} \quad \text{..... (1-1-8)}$$

式中 B —— 矩形声源的长度或宽度。

在声源附近由於声場的相互影响，而产生干涉現象，在相互产生干涉的区域，叫“干涉区”或叫 Fresnel's 区。干涉区的长度与声波的直径 D 及波長 λ 有关：

$$l_0 \approx \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{R^2}{\lambda} \quad \text{..... (1-1-9)}$$

上式只有当超声波傳播距离 $> 3R$ 时适用。

由以上三个公式可以知道，当超声波波長愈短，則半擴散角愈小，指向性就愈好，超声波的能量向着一个方向集中傳播。从表 (1-1-4) 可見，声源直径为 2.4 ~ 4.8 m/m 时，频率为 0.5 ~ 5 MC 的超声波

在鋼材中的半擴散角在 $3.4^{\circ} - 17.3^{\circ}$ 的範圍內。

能量的集中，對於探傷極為有利，使得超聲波能夠較灵敏和較準確地探出材料中的各種缺陷。

表 (1-1-4) 不同直徑 D 的聲源所發出的不同頻率 f 的
超聲波在鋼材中的 θ 及 l_0 值

D m/m	f (MC)	λ (mm)	θ	l_0 (mm)
24	5	1.17	3.4	123
24	2.5	2.34	6.8	61
48	1	5.85	8.5	99
48	0.5	11.7	17.3	55

圖 (1-1-3) 及圖 (1-1-4) 分別表示縱波及橫波在同一鋁鍛件中的擴散程度，從圖中可以看到，橫波的擴散很小。

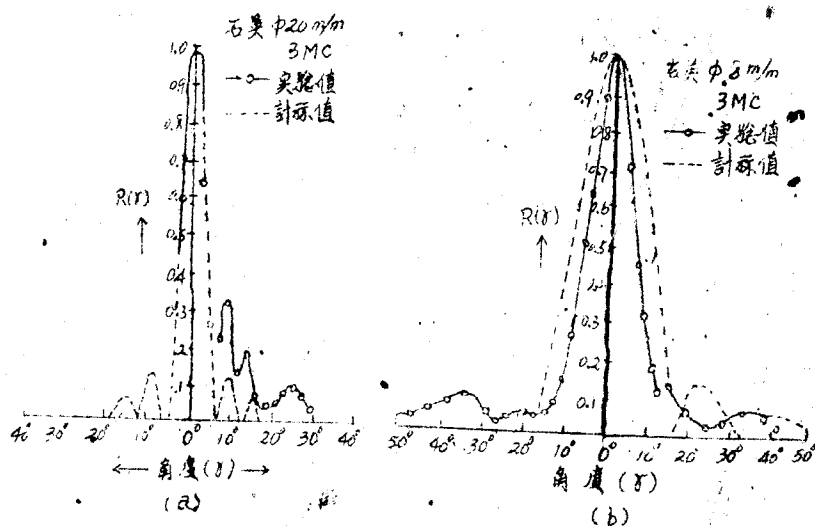


圖 (1-1-3) 超聲縱波在鋁鍛件中的擴散

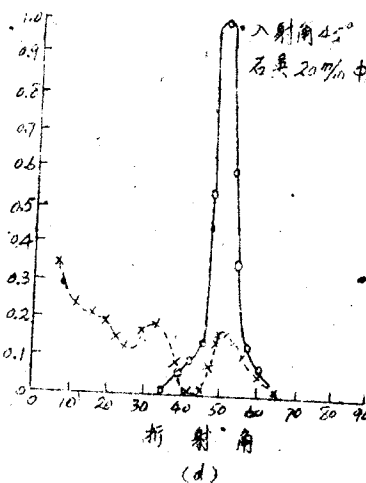
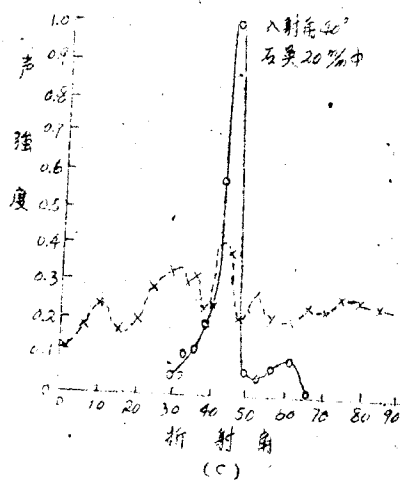
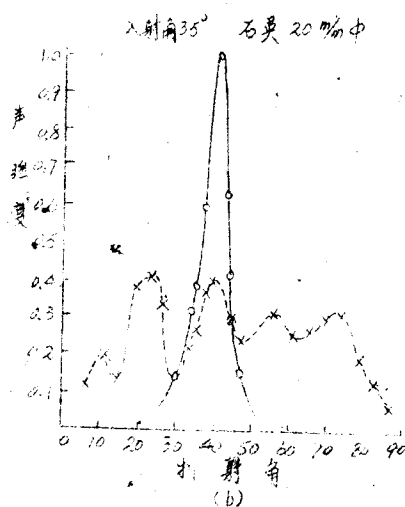
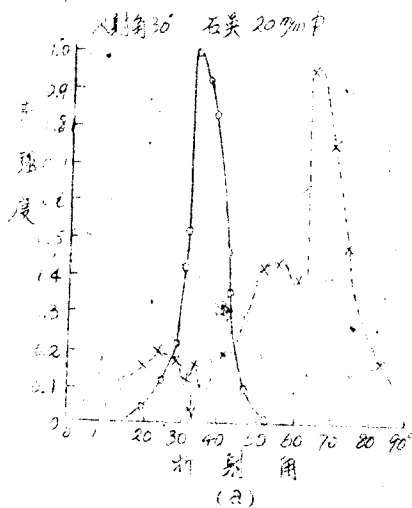


图 1-1-4) 超声横波在铝锻件中的扩散

III. 反射和折射，異型波的产生

当超声波在传播过程中斜射至異質介面时，一部分被界面反射，产生反射波，其余則通过界面沿一定方向繼續傳播，产生折射波。在反射和折射过程中都能发生波型的变换。

1. 垂直入射波的反射和透过。

当超声波以垂直方向傳播至異質介面不发生波型的变换，它只引起超声波能量的反射和透过介面。其反射能量 I_1 与入射能量 I_0 之比值称为能量反射率，用 R 表示：

$$R = \frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)^2 \dots\dots\dots (1-1-1.0)$$

式中 R_2, R_1 —— 介質 II 及介質 I 的声阻抗值。

超声波的透过能量 I_2 与入射量 I_0 之比值称为能量透过率，用 T 表示：

$$T = \frac{I_2}{I_0} = \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \dots\dots\dots (1-1-1.1)$$

例如，第 I 介質是鋁，第 II 介質是鋼，根據公式 (1-1-1.0) 和 (1-1-1.1) 可以得到能量反射率 $R = 0.204$ ，能量透过率 $T = 0.796$ 。

各种常見的介質之声阻抗及不同介質組成的界面对超声波的反射率列於表 (1-1-5) 中。

表 1-1-5 見 1.11 頁

2. 斜入射的反射

若超声波在固体中以一定角度入射於異質界面时，超声波将发生波型的交換，产生反射纵波和反射横波。若纵波以入射角 α 入射則反射纵波之反射角等於入射角，而反射横波之反射角 β 由下式規定。

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_{L1}}{C_{S1}} \quad \text{或} \quad \beta = \sin^{-1} \left(\sin \alpha \frac{C_{S1}}{C_{L1}} \right) \quad \dots\dots\dots (1-1-1.2)$$

式中 C_{L1} 及 C_{S1} 各为介质 I 中纵波及横波速度，其入射及反射情况如图 (1-1-5) a 所示：

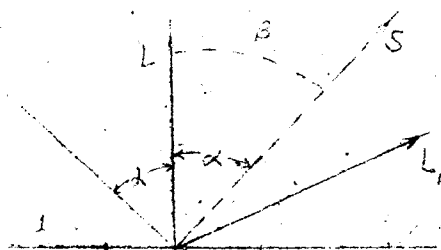


图 1-1-5a

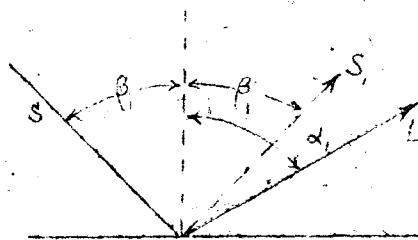


图 1-1-5b

介质 I 为固体时超声波的反射情况

若入射为横波，其入射角为 β ，則反射横波之反射角等於入射而反射纵波之反射角 α ，由下式規定：

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{C_{S1}}{C_{L1}} \quad \text{或} \quad \alpha = \sin^{-1} \left(\sin \beta \frac{C_{L1}}{C_{S1}} \right) \quad \dots\dots\dots (1-1-1.3)$$

其入射及反射情况如图 (1-1-5b) 所示。

超声波在鋼和鋁中入射角和反射角的关系曲綫如图 (1-1-6 及 b 所示。