

无缝钢管自动超声探伤*

北京钢厂探伤组

随着我国国民经济的飞速发展,对冶金产品(如管、棒、丝、带、板等)的质量也不断提出新的更高的要求。例如,用于电站锅炉、核反应装置及石油化工等设备上的管材,在相应的标准中均规定,不允许存在导致断裂性的缺陷。因此,无缝钢管在出厂前必须进行严格的质量检验。

超声波探伤是检验金属材料质量的一项新技术。用于管材,它可以发现表面及金属内部的各种微小缺陷。因此,目前已得到广泛应用。为了不断适应社会主义建设的需要,近年来,不少单位又在如何提高探伤速度和灵敏度方面,进行了一系列的试验研究工作,并已取得了一些可喜的成绩。

在毛主席无产阶级革命路线指引下,在批林批孔运动的推动下,我厂和汕头超声电子仪器厂、北京冶金仪表厂等单位密切协作,经过一年多的努力,于1974年4月研制出了一种新型的无缝钢管自动超声探伤设备,实现了无缝钢管高速自动探伤。一年来的生产实践证明,这套设备性能良好,操作简便,工作可靠。与普通超声探伤装置相比,它具有以下优点:检验效率提高10倍;更好地保证产品质量;节约劳动力,显著地改善了劳动条件;降低探头等材料的消耗。因此,它是一种多快好省的技术设备。这套设备的研制成功,对迅速提高我国冶金产品无损检验技术水平,能够起到促进作用;对加速我国社会主义建设也具有一定意义。

一、超声探伤的物理基础

1. 超声波的产生

众所周知,人耳一般能感觉20—20000赫之间的应力波,即声。低于20赫的应力波,称次声;高于20000赫的应力波,称超声。产生超声的方法很多。目前,在检验技术中应用最多的是利用晶体的压电效应的逆效应——电致伸缩效应。

我们先谈谈压电效应。

某些晶体,在一定的方向受压或受拉时,会在一定的晶体表面上出现电荷,这种效应,称为压电效应。反

之,当在晶体上加上电场时,晶体会发生受压缩短或受拉伸长的机械形变。这种现象,称为压电效应的逆效应或称电致伸缩效应。如图1所示,在石英片的 x 轴方向的拉力,使 $abcd$ 平面和与之平行的 $efgh$ 平面分别产生正和负电荷;而在石英片的 x 轴的压力,则使 $abcd$ 平面和 $efgh$ 平面分别产生负和正电荷。这种现象又是可逆的。

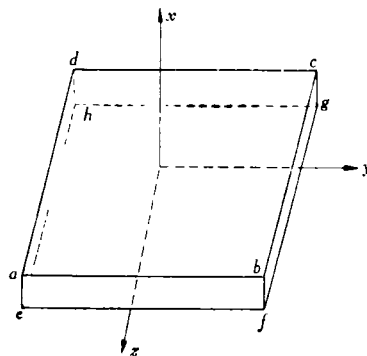


图1 压电石英片的轴向

本设备是利用锆钛酸铅片的压电效应的逆效应制成产生超声和接收超声的压电式换能器(即探头)。探头的一般结构如图2所示。若将探伤仪的脉冲电压(其频率与晶体片的固有振动频率相同),加在探头的锆钛酸铅晶体片的两个极(即两个面)上,则晶体片产生弹性振动,即发生超声波;反之,若锆钛酸铅晶体片,由于接收超声波而发生弹性振动,则在其两个极上就产生脉冲电压输入探伤仪器。这就给超声探伤提供了条件。

2. 超声波为什么能探伤

超声波所以能探伤,是由它的物理性质决定的。它像光、电、热等一样具有一系列的物理性质。下面将与探伤有关的一些特性,作简要说明。

(1) 超声波的反射 大家知道,当我们面对一堵

* 1975年8月收到。

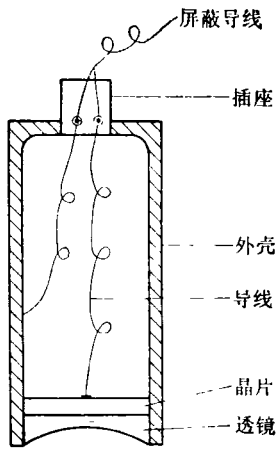


图2 探头的一般结构

高大的墙壁，距一定距离高声喊话时，片刻后就会听到自己喊话的回音。这是一种简单的物理现象，称回声。超声波在从一种介质向另一种介质传播时，也会产生同样的现象，叫做超声波的反射。也就是说超声在传播过程中，在两种介质的介面处会产生反射（或者回声），在这同时，还有超声的透过或者折射现象发生。

(2) 折射和波型转换 超声波和其他机械波一样，也有纵波、横波的区别。而探头的压电晶片发生的超声波为纵波。现就以超声纵波为例，来谈它在传播过程中的透过或者折射现象。

当超声纵波倾斜射入异质固体介面时，在一般情况下，会有部分超声波被反射，其余则透过固体介面，产生折射。这时并将发生波型的转换，即产生折射纵波和折射横波。如图3所示。利用折射定律可准确求出两种折射波的传播方向。

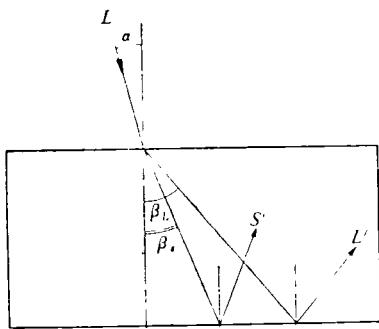


图3 超声的透过或折射

L ——入射纵波。 α ——入射角。 L' 、 S' ——折射纵、横波。 β_L 、 β_S ——纵、横波折射角。

(3) 超声波的声场形状及聚焦 充满声波的空间叫声场。声场有各种各样的形状和扩散角。它主要取决于声源直径和声波的波长。由理论计算和实验得知，声场的形状是一个具有一定扩散角的圆锥体。如

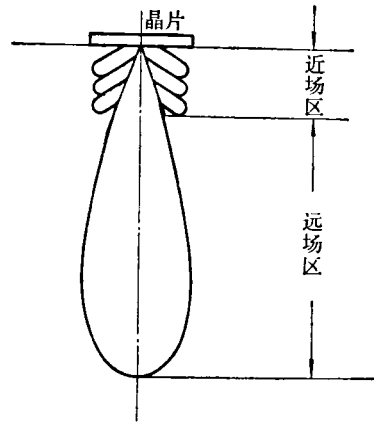


图4 声场形状与扩散角示意图

图4所示。

声场的固有形状，对超声探伤是不利的。然而，为了使声束会聚，以获得高能量的声束，尽可能的减少钢管内壁的干扰回声，提高探伤灵敏度，在工艺上可以使声束聚焦成一条线或一个点。通常采用声透镜或者制造会聚型晶片。本设备是采用声透镜的方法，对超声波声束进行聚焦。

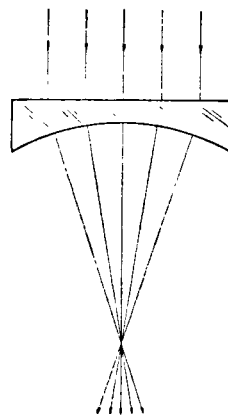


图5 超声透镜的聚焦

声透镜聚焦的物理基础是超声波在异质固体介面会发生反射与折射现象。如图5所示。若选择适当几何形状的声透镜，便可将声束会聚成所需要的形状（一条线或者一个点）。本设备所使用的压电晶片和声透镜的参数见表1。

表1 压电晶片和声透镜的参数

探头类型	压电晶片		声透镜	
	直径	频率	材质	材质
线聚焦	20mm	5 MC	锆钛酸铅	环氧树脂
点聚焦	14mm	5 MC	锆钛酸铅	环氧树脂

超声波是由探伤仪器发射与晶片固有振动频率相同的脉冲电压，加在探头的压电晶片上而产生的。为了提高探伤灵敏度，在晶片前面需要加上声透镜，使声束会聚成所需要的形状。当超声纵波通过超声介质垂直射入钢管的介面后，就进入钢中并向前传播，若遇到缺陷（裂纹、夹杂、气泡等），部分超声波就可能被反射，返回压电晶片，探伤仪的萤光屏上就可能显示出伤波图像。这叫做纵波探伤。如果需要横波探伤，就要

使超声纵波倾斜入射于钢管的介面,发生折射和波型转换,使纵波转换为横波。横波在钢中向前传播,遇到缺陷,同样可能使探伤仪器的萤光屏上显示出伤波图像来。这叫做横波探伤。

二、高速自动超声探伤

近几年来,横波水浸法探伤在国内外都有显著增加的趋势。这是因为它具有探伤灵敏度高、分辨率强、改善方向性和容易实现自动化等优点,尤其对各种焊缝和管材等工件的探伤,更有特殊效果。本设备所采用的方法,叫做横波局部水浸探伤。

1. 基本原理

横波局部水浸钢管探伤原理如图6所示。是由超声探伤仪输出脉冲电压,加在探头的压电晶片上,由于压电效应的逆效应,晶片就产生强烈的振动而发射出超声纵波。为提高探伤灵敏度,在压电晶片前面装有声透镜,通过声透镜的超声束聚集成一个点或一条线。此时,在探伤仪的萤光屏上就有始波产生。为了使超声纵波转换为超声横波,采用螺杆使探头中心偏离钢管中心,这样声束就通过探头水管喷射出的矩形水柱(超声介质)向前传播,倾斜入射在水柱与钢管的介面处。这时,在探伤仪的萤光屏上就出现第一个界面波。声束在此处发生折射后进入钢管中,并同时发生波型转换,产生折射横波。通过调节探头的入射角(即调节探头中心偏离钢管中心的距离——偏心量),使入射声束发生波型转换时,只有折射横波进入钢管中。进入钢管中的折射横波在管壁内按反射规律呈锯齿形沿钢管圆周方向传播。在超声传播过程中,钢管如果有缺陷,则超声波束在缺陷处会部分发生反射,并按反射规律返回探头的压电晶片,则在它的上面就会有脉冲电压产生,并输入探伤仪。此时,在萤光屏上就出现伤波;钢管若没有缺陷,声束在管壁内呈锯齿形沿钢管

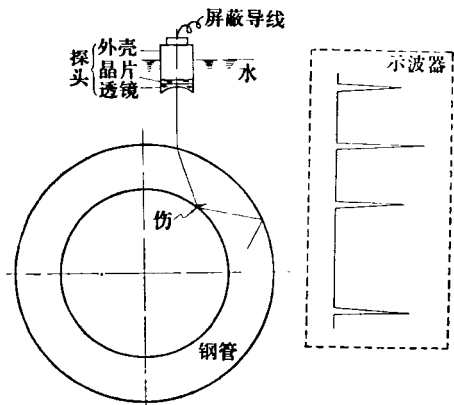


图6 横波水浸(局部)钢管探伤原理示意图

圆周方向一直向前传播,到声能消失为止。在这种情况下,探头的压电晶片收不到反射回波信号,萤光屏上也就不会出现伤波。

这里附带说明一下横向缺陷的探伤(如图7所示)。探头应布置在钢管轴线平面内,并与钢管轴线成一定夹角。横向缺陷探伤原理与前面所述类似,只不过折射横波在管壁内呈锯齿形沿钢管轴向向前传播。这里不再重述。

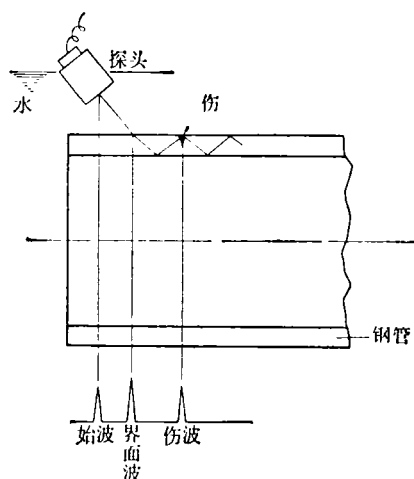


图7 横向缺陷探伤原理示意图

为了不使所有类型的缺陷漏检,应根据不同的对象,选择适当的探头类型及布置形式。本设备所采用的探头类型及其布置型式将在后面叙述。

2. 技术要求

(1) 声速入射角度 在基本原理部分已经谈过,横波水浸超声探伤,声束需倾斜射入钢管表面,目的是获得纯粹横波,这样,声束就有入射角度的问题,如图8所示。

根据折射定律,由图8可以得出

$$\frac{\sin \alpha}{V_{L1}} = \frac{\sin \beta_L}{V_{L2}} = \frac{\sin \beta_S}{V_{S2}}, \quad (1)$$

式中: α ——纵波入射角; β_L, β_S ——纵、横波折射角; V_{L1}, V_{L2} ——纵波在水、钢中的声速; V_{S2} ——横波在钢中的声速。

为了使折射纵波(L_2)不进入钢管中,以获得纯粹横波,则要求 $\beta_L \geq 90^\circ$ 。由公式(1)可得:

$$\alpha \geq 14.5^\circ.$$

14.5°是纵波全反射的入射角,称第一临界角。

为了使折射横波(S)进入钢管中,则要求 $\beta_S \leq 90^\circ$,同样道理可求得

$$\alpha \leq 27.5^\circ.$$

27.5°是横波全反射的入射角,称第二临界角。

在实际操作中,是用偏心量(x)来代替入射角的,

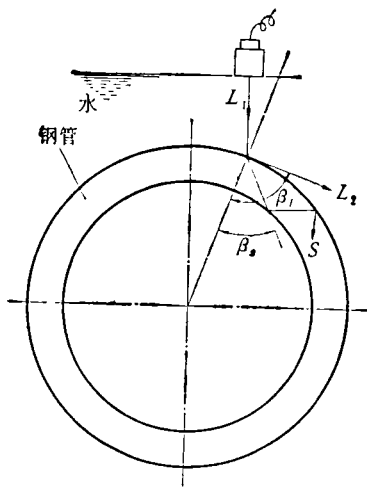


图8 超声在钢管中的折射

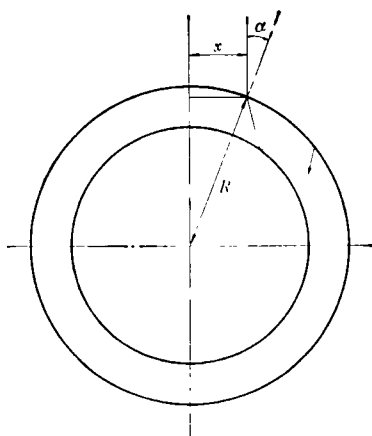


图9 入射角与偏心量的关系
R——钢管外径之半； x——探头偏心量

如图9所示。由图9通过计算得偏心量(x)的范围近似为： $R/2 - R/4$ 。

实践证明，偏心量的可调范围实际比 $R/2 - R/4$ 要小(从图10可以看出)，这是由多种因素造成。

(2) 超声的传播介质 水浸法探伤要求传播超声的水——超声介质，没有影响传播超声的杂质。因为水中若混有杂质，就会使声束在水和杂质的介面处发生反射，而在探伤仪的荧光屏上显示出杂质的回波，造成伤波无法辨认，更谈不上自动探伤。

本设备有一套水的过滤和自动循环系统，无杂质的水将在超声传播的路径上(探头到钢管表面)源源不断。

(3) 机械设备形式 为了高速自动探伤，机械设备一般有三种形式：(a)探头固定，钢管直线前进；(b)探头固定，钢管螺旋前进；(c)探头转动，钢管直线前

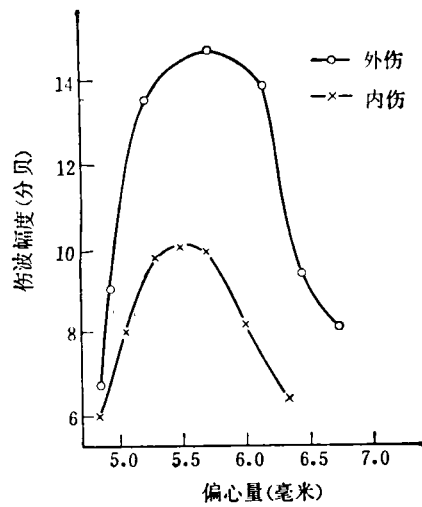


图10 伤波幅度与偏心量的关系

进。

本设备采用第三种形式，因为我厂生产的无缝钢管口径较小，如果使钢管转动，设备就比较复杂。然而，为了避免缺陷漏检，让探头转动较好。也就是说，采用探头转动，钢管直线前进比较适宜。

3. 应用范围

利用横波对钢管进行探伤时，钢管壁厚必须小于或等于钢管外径的22%，否则钢管内壁上的缺陷将无法检查。

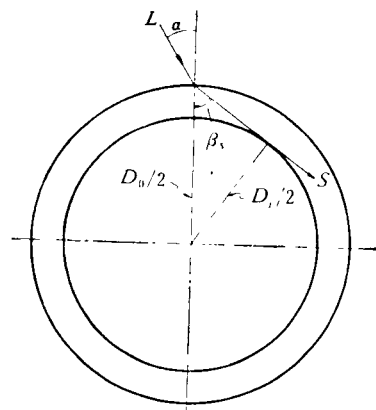


图11 折射横波与钢管内壁相切

从图11可以看出，为检查钢管内壁缺陷，折射横波至少和钢管内壁相切。即要求

$$\beta_s \leq \sin^{-1} \frac{D_i}{D_0} \quad (2)$$

式中： D_i ——被检钢管内径； D_0 ——被检钢管外径。

现用 t 来代替被检钢管壁厚。对于一般碳素钢来说，由式(2)和式(1)可得到：

$$t/D_0 \leq 0.22 = 22\%$$

三、无缝钢管自动超声探伤设备简介

图 12 是探伤仪器和机械传动部分的主传动装置(主机)照片。



图 12 探伤仪和主传动装置(主机)

本设备采用钢管直线前进,探头围绕钢管转动,分别由两台可控硅无级调速控制的直流电机驱动。这对于提高探伤速度和防止缺陷漏检是非常必要的。

探头分三组,每组三只,分别固定在三个探头盘上。第一组和第二组为线聚焦型,它从钢管中心线两侧入射,来检查缺陷方向不同的纵向缺陷(见图 13)。这是为了使在管壁内传播的横波声束尽可能垂直于钢管的缺陷方向,以得到高的伤波幅度,提高不同方向的缺陷探伤灵敏度。第三组为点聚焦型,用来检查钢管内外表面的螺旋形缺陷。探头型式及其参数见前面表 1。

本设备未布置钢管横向缺陷探头,我们考虑是:(1)点聚焦型探头可以发现横向缺陷;(2)根据我厂生产实践,人工检查和人工探伤多年来未发现横向缺陷。

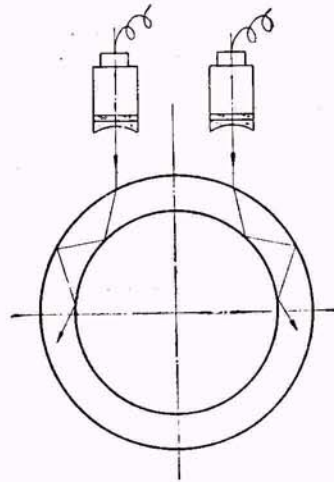


图 13 缺陷方向不同与探头布置情况示意图

因此,在设计这套设备时,没有专门布置横向缺陷探头。

本设备还设有自动上料、自动堵头、自动标记、自动分类、自动下料装置。这样就实现了对无缝钢管进行自动超声探伤操作。

本设备技术性能见表 2。

表 2 设备技术性能

项 目	性 能 参 数
被检钢管外径	φ 25—80mm
探伤灵敏度	可检出深度为壁厚的 5% 以上,长度为 15 mm 以上的纵向缺陷
探伤速度	0—30 米/分,连续可调
自动化程度	上料、堵头、探伤、报警、标记、分选、下料均为自动操作