

# 无损检测 材料超声速度测量方法

## 1 范围

本标准规定了用 A 型脉冲反射式超声探伤仪测量材料中超声速度的测试程序。本标准描述了一种通过与超声速度已知的参考材料进行对比测量来确定未知材料试样中超声速度的方法。

本标准测量的试样是指厚度大于或等于 5mm 的固体材料,其与超声波能量传播方向垂直的两个表面之间的平行度在 $\pm 3^\circ$ 之间,与超声探头耦合的表面要有优于 $3.2\mu\text{m}$ 的表面粗糙度。

用其他专门研制的超声仪器、辅助设备和专项技术可获得更精确的结果。附录 A 中列出了测量超声速度的其他一些方法。

注 1:包括技术、仪器、材料种类和操作人员等因素的变化都将引起绝对速度指示的变化,有时甚至会达到 5%。

注 2:受上述因素中单一因素影响的结果预期能更加精确(可能在 1%的公差范围以内)。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 12604.1 无损检测术语 超声检测

JB/T 9214 A 型脉冲反射式超声探伤系统工作性能 测试方法(JB/T 9214—1999, neq JIS Z2344:1993)

## 3 术语和定义

GB/T 12604.1 确立的术语和定义适用于本标准。

## 4 方法概要

在固体中能够传播几个可能的振动模式。本标准涉及到两种传播速度,即纵波的速度( $V_L$ ),和横波的速度( $v_t$ )。当试样在与波束垂直方向上的几何尺寸远大于波束面积和波长时,纵波速度不受试样几何形状的影响。横波的传播速度基本上不受试样几何尺寸的影响。该处描述的方法,仅适用于常规脉冲反射式超声探伤仪。

## 5 仪器设备

本标准中采用的超声检测系统可包括以下部分。

### 5.1 检测仪器

检测仪器是任何由时基线、发射(脉冲)装置、接受装置(回波放大器)和能产生、接受并显示超声波电信号的 A 扫描显示电路组成的超声仪器。仪器应能沿 A 扫描时基线以 $\pm 0.5\text{mm}$ 的精度读出  $A_k$ 、 $A_s$ 、 $A_r$ 、 $A_l$ , (其定义见 6.1.4 和 6.2.4)等几个位置。为了获得最佳的精度,应在能够显示至少 2 次,最好是 5 次清晰反

射回波的条件下,采用尽可能高的频率。

5.2 探头

根据接触法设计用来检测的探头能产生并接收适当大小、类型和频率的超声波。直接接触纵波模式用来测量纵波速度,直接接触横波模式用来测量横波速度。

5.3 耦合剂

对于纵波速度测量,耦合剂应是实际使用的材料,例如,洁净的轻质油;对于横波速度测量,应该采用高粘性的材料,如树脂或固粘结剂。对某些材料,使用类聚丁烯、蜂蜜或其他高黏弹性的材料更有效。大多数液体中,不传播横波。对多孔渗水的材料,要求采用特殊的非液态耦合剂。耦合剂不得对材料本身有害。

5.4 标准参考试块

5.4.1 速度标准试块:任何已知超声波速度,能被声波穿透,且有适当的表面粗糙度、形状、厚度和平行面的材料。标准试块的声速应由其也一些更精度的技术与已知水的声速(参见附录 A.5 和附录 C)相比较试来确定。参块考试应该测材料具有相似的衰减系数。

5.4.2 水平线性测试,参见 JB/T9241 水平线性测定方法。

6 测量程度

6.1 纵波速度

用纵波在不知材料中的传播时间与在速度标准试块( $V_K$ )中的传播时间进行比较来确定纵波速度( $V_l$ )。

6.1.1 选择具有两个一行表面的试块并测量其厚度,精度高于 $\pm 0.02\text{mm}$ 或 $0.1\%$ 。

6.1.2 在每个试块上用探头测得一个信号模式(如图 1 所示),在可清晰分辨的条件下,尽可能使反射回波数多。两次测量的时基(扫描线控制)必须设置成相同。

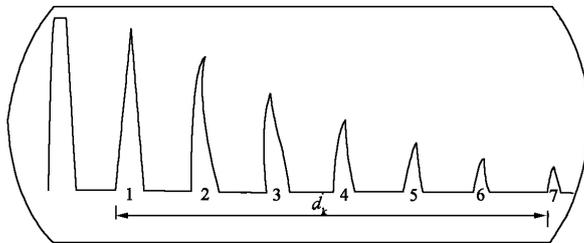


图 1 始波脉冲和 7 个反射回波

6.1.3 用刻度尺或卡尺分别测量已知和未知材料试块上第一个反射回波前沿和最后一个可清晰识别的反射回波前沿之间的时基线距离。为了获得更高的精度,可在第一个反射回波的前位置固定之后,调节放大最后一个反射回波,使之与第一个反射回波的高度一致。这样能测量到更精确的时间或距离。随后再确定最后一个反射回波前沿的位置。在任意两个反射回波之间,信号传播声程为两倍的试块厚度。信号传播通过试块并返回到入射点称为一次完整路径。在图 1 中回波 1 和回波 7 之间信号通过了 6 次完整路径。计算在两个被测试块上从第一个反射回波到最后一个反射回波之间通过的完整路径次数。这个数字比反射回波的数目少 1。注意每次测量到的试块厚度、完整路径次数和从第一个到最后一个回波之间的距离不必相同。

6.1.4 依下次计算未知声速值:

$$V_l = (A_K n_l t_l v_k) / (A_l n_k t_k) \dots\dots\dots (1)$$

式中: $A_k$ ——沿 A 扫描显示的时基线测量到已知材料从第一个到第 N 个反射回波之间的距离,单位为

$m$ ;  $n_i$ ——未知材料中完整路径的次数;  $t_i$ ——未知材料的厚度,单位  $m$ ;  $v_k$ ——已知材料中的声速,单位  $m/s$ ;  $A_i$ ——沿 A 扫描显示的时基线测量到未知材料从第一个到第  $N$  个反射回波之间的距离,单位  $m$ ;  $n_k$ ——已知材料中完整路径的次数;  $t_k$ ——已知材料的厚度,单位为  $m$ 。

注:只要系统保持一致,在测量中采用什么单位并不重要。

## 6.2 横波速度

通过比较横波在已知超声速度( $v_i$ )的材料和未知材料中的传播时间来确定横波速度( $V_s$ )。

6.2.1 选择两个表面为平行平面的试块,并测量其厚度,精度高于 $\pm 0.02mm$ 或 $0.1\%$ 。

6.2.2 在每个试块上用探头测得一个信号模式(如图 1 所示),在可清晰分辨的条件下,尽可能使反射回波数多。两次测量的时基线(扫描线控制)必须设置成相同。

6.2.3 用刻度或未卡尺分别测量已知和未知材料试块上第一个反射回波前沿和最后一个可清晰识别的反射回波前沿之间的时基线距离。为了获得更高的精度,可在第一个反射回波的前沿位置固定之后,调节放大最后一个反射回波,使之与第一个反射回波高度一致。这样能测量到更精确的时间或距离。这增加了衰减信号中的高频成分。随后再确定最后一个反射回波前沿的位置。计算在两个被测试块上从第一个反射回波到最后一个反射回波之间通过的完整路径次数。这个数字比回波数目少 1。注意每次测量到的试块厚度、完整路径次数和从第一个到最后一个反射回波之间的距离不必相同。

6.2.4 依下式计算未知声速值:

$$v_s = (A_i n_s t_s v_i) / (A_s n_i t_i) \dots\dots\dots (2)$$

式中: $A_i$ ——沿 A 扫描显示时基线测量到已知材料从第一个到第  $N$  个反射回波之间的距离,单位为  $m$ ;  
 $n_s$ ——未知材料中完整路径的次数;  $t_s$ ——未知材料的厚度,单位为  $m$ ;  $v_i$ ——已知材料中的横波速度,单位为  $m/s$ ;  
 $A_s$ ——沿 A 扫描显示时基线测量到未知材料从第一个到第  $N$  个反射回波之间的距离,单位为  $m$ ;  
 $n_i$ ——已知材料中完整路径的次数;  $t_i$ ——已知材料的厚度,单位为  $m$ 。

## 7 报告

声速测量报告中应包括如下数据。

a) 纵波:

$A_k$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$n_i$  \_\_\_\_\_;

$t_i$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$v_k$  \_\_\_\_\_  $m/s$ ;

$A_l$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$n_k$  \_\_\_\_\_;

$t_k$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$v_l$  (用公式 1) = \_\_\_\_\_  $m/s$ 。

b) 横波:

$A_i$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$n_s$  \_\_\_\_\_;

$t_s$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$v_i$  \_\_\_\_\_  $m/s$ ;

$A_s$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$n_i$  \_\_\_\_\_;

$t_i$  \_\_\_\_\_  $m$ ;

$v_s$ (用公式 2) = \_\_\_\_\_  $m/s$

c) 水平线性。

d) 测量频率。

e) 耦合剂。

f) 探头:

1) 频率; 2) 尺寸; 3) 形状; 4) 类型; 5) 序列号。

g) 试块几何尺寸。

h) 仪器:

1) 名称; 2) 型号; 3) 序列号; 4) 相关控制设置。

## 附录 A

(资料性附录)

### 材料超声速度测量的其他重要技术

#### A.1 引言

A.1.1 一些技术可以用来精确测量材料中的超声速度。这些技术大多需要用到专门研制或辅助性的仪器设备。

A.1.2 能自动测量声速或时间间隔或同时测量两者的仪器都可以买到。原本为其他测量而设计的仪器(如厚度计量器)也可用于声速测量。

A.1.3 已经引入了各种方法来解决对试块中波形的时间间隔或数目进行精确测量的问题。本附录不可能涵括所有这些技术。本附录对拥有更精密的仪器或能得到辅助仪器及希望得到更精确结果的情况来说是有用的。

A.1.4 本附录将包括一些只适合在实验室中使用的技术。只有在诸如实验室中才能达到的严格控制的条件才能得到最精确的结果。测量过程可能会很缓慢且需要精心准备的试块。

#### A.2 超声仪器的特性

超声仪器可测量随时间传播的超声波。

#### A.3 精密示波器

辅助的精密阴极射线示波器能用来观察回波模式。使用精密示波器的标准水平显示能测量出连续多次反射回波之间的传播时间。再按下式计算速度:

$$\text{速度}(m/s) = [2 \text{ 厚度}(m)] / [\text{时间}(s)]$$

#### A.4 电子时间标记

A.4.1 在基本的仪器显示器上可以用一个附件来为一个步骤显示一个或更多视频标记。这通常添加在标准回波模式上。标记可用标准控制器来移动。控制器可直接按微秒读出时间。

A.4.2 在显示器上首先将第一个步骤与第一个反射回波相匹配,然后,如果有的话,将第二个标记与第二个反射回波相匹配。基于这两个标记的控制器读数,就能确定穿过试块一次完整路径所用的时间(计算公式与 A.3 一致)。

## A.5 超声干涉计(速度比较仪)

A.5.1 对超声速度的测量可由比较脉冲在试块和在对比试块中传播路径的传播时间算出。液体(例如水)中的超声速度是已知的,因此试块中的声速能以大约0.1%的精度确定。

A.5.2 实际上,试块中的反射回波与干涉计传播路径中传来的转变到干涉点上获得的反射回波是一致的。试块和干涉计液体中的超声速度与它们的长度成比例,且这两个量都必须精确测量。

A.5.3 一个常规探头用夹子夹在一个开放式水槽中的一侧。探头频率应满足试块的要求。衰减部分必须插入到干涉计探头和电缆之间。它可不受其他测试条件的影响而改变干涉计的回波高度。

A.5.4 一个反射器浸入盛装液体的水槽中,并安装在一个可调节的机械上以使之不倾斜。该机械装置能够不接触地迅速来回运动。通过一个轴可以作很好的调节。轴转动一整圈可使运动路径改变1mm。轴杆上的一格细分刻度代表0.01mm。

A.5.5 水槽中必须充满超声速度已知的液体。如在20℃下水的超声速度=1483.1/ms。温度系数是 $\Delta v/\Delta t = +2.5\text{m/s} \cdot ^\circ\text{C}$ 对水而言,对温度的检查是完全必要的(参见附录C)。

A.5.6 也可以使用混合液体,例如,水和酒精(18%的重要百分比)的混合物,在室温下的温度系数是零。

A.5.7 按下式计算速度:

$$\text{速度}_x (\text{m/s}) = \frac{\text{速度}_\text{水} (\text{m/s}) \times \text{厚度}_x (\text{m})}{\text{距离}_\text{水中} (\text{m})}$$

## A.6 穿过混凝土的脉冲速度

A.6.1 脉冲发生器以不小于50次/s的速率产生10kHz~50kHz的重要脉冲。

A.6.2 将探头表面通过耦合介质按压在混凝土表面上。用水、油或其也粘性材料将混凝土湿润可将深头振动膜与混凝土接触表面之间的空气除掉。通过排列闸门标识脉冲对应的接收波前、读标准化刻度盘或者计算传播和接收脉冲之间的计数波形周期数,可以测量出振动膜中心之间最短的直线路径长度和在A扫描显示器上的传播时间。

## A.7 脉冲回波双晶探头方法

A.7.1 本方法使用的单探头包含两部分:一部分作为发射器,另一部分作为接收器。

A.7.2 既然超声速度测量主要是对基于试块厚度的时间的测量,且大多数厚度测量仪器用本方法成功地以高精度测量厚度,将这种速度测量方法引入实践是适当的。

注:用双晶探头方法,脉冲回波的传播时间是试块厚度的非线性函数,当此技术应用于速度测量时可能引起重大的误差。速度测量的误差可以用一个与被测试块声速度相近的参考试块来消除。单探头系统通常更适合对速度进行精密测量。

A.7.3 推荐使用任何采用双晶探头方法且有标准化刻度的厚度测量仪,包括A扫描显示单元和仪表读出器单元。对于A扫描显示单元而言,因为刻度刻在显示器的内表面或对输出信号进行积分,视差问题就被解决了。对于仪表读出器单元或数字式读出单元而言,视差不是主要的问题。

A.7.4 大多数双晶探头厚度测量仪器利用第一个反射回波来进行读出的测量。因此测试范围通常是固定的并很好地标准化了。不必产生几人反射回波来求取平均传播时间。

A.7.5 因为第一个反射回波比后面任一上反射回波,如从显像管一端开始的第五个回波,更具有深度或时间上的代表性,所以具有弯曲表面的试块在测量上出现问题更少。在小直径管材中的误差可能比相当的平直试块更大。

A. 7. 6 步骤

A. 7. 6. 1 在一个已知声速的钢制阶梯试块上校准仪器和探头。通过调节扫描延迟和范围控制,确保两个或更多的厚度(高和底)读数出现在正确的距离上(图 A. 1)。

A. 7. 6. 2 不改变仪器的扫描和范围控制测量未知速度块的厚度。用卡尺或千分尺测量被测区域的实际厚度。

A. 7. 6. 3 按下式计算未知速度:

$$V_x = V_{\text{钢}} \times \frac{\text{实际厚度}}{\text{测量厚度}}$$

式中:  $v_x$ ——未知速度。

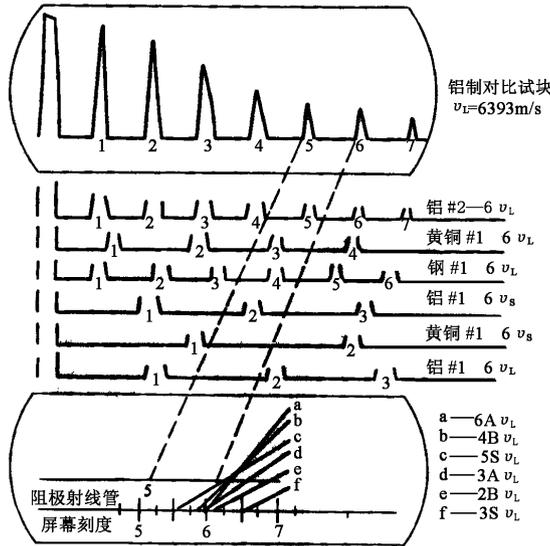


图 a. 1 避免因视差引起误差进行的仪器设置

A. 8 谐波法(零值法)

A. 8. 1 当只有几个回波能被利用时,用超声回波仪器测量壁厚将变得不准确,因为存在高吸收、腐蚀或不适宜的放射性几何结构。在这些情况下,可以将壁厚测量仪调到回波频率的谐波上(谐波法)来提高测量结果的精度。

A. 8. 2 到目前为止,干涉计方法已经用于精密测量声传播。在那些对最终精度不作高要求的场合下谐波法可代替复杂且费时的干涉法。在常规条件下,用所谓的“零值法”能获得 0. 5% 或更高的精度。

A. 8. 3 改进的方法利用了从探头发射经一长缓冲器杆后进入有几上波长厚的试样的发射频率( $rf$ )脉冲。缓冲器杆要足够长以便容纳整个  $rf$  脉冲,而脉冲也要足够长来占据试块中的三个循环行程。脉度冲在试块里反射时会产生自干涉。当试块中的循环行程于半波长的奇数倍时,会产生一个特征回波模式;偶数倍时则产生另一个模式。当  $rf$  频率变化时这两种模式会交替转变。相位与以 MHz 为单位的周期频率相对应。一种特征模式重复一次时,相位变化一个周期;两种模式之间是  $1/2$  相位周期。对应于频率的相位倒数是以微秒为单位的延迟时间  $t$ ,对于厚度为  $L$  的试块,速度为:

$$v = 2l/t$$

## A. 9 相位比较法

A. 9.1 该方法是插入 T 由不同循环行程数目组成的两个脉冲回波。如果用精确调整频率来严格控制回波相位,相位角的表达式可以写成:

$$\gamma - [(2L\omega_n)/v] = -2\pi m$$

式中: $v$ —传播速度; $\omega_n$ —共振频率( $f_n$ )的  $2\pi$  倍; $L$ —厚度; $n$ —波数; $r$ —因为在探头和试块之间密封产生的相位角。

因此,速度表示为:

$$v = (2Lf_n)/[n + (r/2\pi)]$$

A. 9.2 实验证明,只要试块厚度至少为超声波长的 100 倍,尺寸和形状的影响可以有效地减小到零。通常用高频(10MHz~20MHz)来使这种影响最小化。

A. 9.3 相位比较法的主要优点是绝对速度可以不受耦合误差的影响以非常高的精度确定,因为探头的耦合影响可以评价出来。该方法同样使得在线性尺度小至 2mm 的小试块上测量声速成为可能。

## A. 10 脉冲重叠法

A. 10.1 该方法将 rf 脉冲以近似等于波在试块中传播的循环行程延迟时间的间隔应用于探头。为了观察刚好在最后一个应用脉冲后叠加的回波,需要周期性地忽略几个应用脉冲。当回波开始按信号之间的时间间隔 T 进行相位调节时,结果脉冲出现最大振幅。在此条件下,下列等式是成立的:

$$\delta = (T/P) - (L/f)[m/p - (\gamma/2\pi)]$$

式中: $\delta$ —循环行程延迟时间; $f$ —脉冲的 rf 频率; $m$ —一个或为正或为负的整数; $r$ —与在探头端面上反射的波关联的相位角; $p$ —一个整数(1,2,3...)。

既然 T 近似等于循环行程延迟时间  $\delta$  的倍数,对于  $P=1$ ,应用脉冲对每个循环行程延迟出现一次。通常,在不同的探头共振频率  $f$  和  $0.9f_r$  之间对 T 多次测量用来获得在  $f_r$  和另一个频率  $f$  之间 T 的差异。对应于  $n=0$ ,  $\Delta T$  的负值有最小的量级;除非试块有非常低的机械独立性,延迟时间由  $\delta = T + \gamma/(2\pi f)$  给出。试块中的声速是  $v=2L/\delta$ ,其中 L 为试块的长度。

A. 10.2 这种特殊方法的优点在于探头的耦合可以考虑进去,所以本方法可以很好地适用于在压力和温度变化的场合下进行测量。用该方法,探头和试块之间的耦合影响可忽略不计。理想条件下,这种方法的精度在  $10^{-5}$  之内,而 a. 9 的相位比较法则在  $10^{-4}$  之内。按这种方法,可以向试块发送强信号,所以甚至当衰减非常高时,也能进行速度测量。

A. 10.3 这两种技术的局限性除材料的多孔性外,预计还依赖于其他各种因素,例如晶粒大小和晶粒边界状况。

## A. 11 脉冲回波交迭相速度法

在本方法中,成对的回波在观测示波器上以等于两个回波之间传播时间倒数的频率驱动 x 轴来进行比较。按 A. 10 中的  $\Delta T$  法,在回波之间选择适当循环交迭的 rf,就能对超声相速度进行精确测量。修正因超声衍射产生的相位超前,并应用于各种不同的回波对之间的传播时间,可提高平均循环行程传播时间的精度。延迟时间可精确到 0.2ns 甚至更高,在某些情况下可能低到  $5/10^6$ 。对弥散性材料,交迭经检波的高斯包络(铃曲面形 rf 脉冲,具有窄带宽。)可获得群延迟,由此,可测量出群速度。对非弥散性材料(大部分固体),可用宽带数字脉冲来代替 rf 脉冲。

## A. 12 声共振法

A. 12.1 动态声共振法,已发展成被认为是一种获得固体声速和弹性常量的标准方法。固体弯曲的、横

断的和扭转的共振频率如已确定,从这些数值可计算出声速。

A. 12.2 该方法的优点是在不丧失高精度的情况下测量便捷简单。用该方法可确定典型多孔渗水性聚合化合物的弹性模量。

A. 12.3 该方法的缺点仅仅在于被测试块的尺寸局限性。当长度小于 76mm 时,高弹性模量材料的扭转基本共振频率会超过 40kHz,这要求采用特殊的仪器和试验技术以获得精确的结果。而且,所有三维(长度、宽度、厚度)在共振频率下的弹性模量计算中都要严格引用。从实用的角度看,要制作具有一致横截面尺寸的小试块相当困难。

A. 12.4 另一个要考虑的问题是在方程式中与共振频率下弹性模量相关的形状修正因子。对于矩形试块,建议长度对横截面任一维度的比率不应小于三比一。当要求精度值在 0.1% 以内时,这个比率最好不小于六比一。因此,很难确定大件试块的弹性模量。

A. 12.5 声共振技术可在温度高达 300℃ 时进行测量。

### A. 13 瞬间接触压力耦合技术

由 Carnevale 和 Lynnworth 发明的瞬间接触压力耦合技术可测量从室温到超过 2000℃ 的纵波和切变波的速度。该技术通过瞬间压力耦合穿过试块的 1MHz 的纵波和切变波脉冲并测量其传播时间(如果衰减已确定,也可以测量振幅)。对纵波和切变波速度的测量精度约为 1%。试块是一个直径至少为五个波长且长度为几厘米的圆柱体。尺寸要求能轻易满足。因此,试块的制备和模具定型相对简单。瞬间接触法同样能用于测量管材的厚度、钢坯管中心线上的缺陷、高温下(典型地为 1000℃)材料的内部温度和其他特性。

### A. 14 开槽杆和阶梯线技术

A. 14.1 该技术可应用于典型的如直径 1cm~3cm,长几厘米的大试块,或直径小于等于 3mm,长几厘米的小试块。从室温到感兴趣的最高温度都可以对试块做典型测试。

A. 14.2 除非直径更小,大试块可视为一个延长的缓冲杆。直径的变化产生了第一个回波。自由端产生第二个回波。如果有适当的几何结构,纵波能在试块中发生部分模式转换,产生纵波和切变波,由此可以确定模量和泊松系数。通常热环境或在正常测试频率(近似 1MHz~10MHz)下缓冲器中的衰减会强加给缓冲器更高的温度限制。

A. 14.3 小试块也可能是一个延长的引入线缓冲器,但对各种不同的试块通常使用一个给定的缓冲器(例如 1mm 直径、1m 长的钨线)。该技术对于长度小于 1cm,直径远小于 1mm 的纤维状和细丝状材料尤其方便。使用 Joule-Wiedemann 磁性探头,能发射中心频率近似为 0.1MHz 的延伸和扭转脉冲并同时在缓冲器上不发生模式转换地进行非发散性传播。但由于它们的速度不同,在到达试块前,这些模式会清晰地分离。因此可以容易地确定速度、杨氏模量及剪切模量和泊松系数。在高温下,小缓冲器仅产生很少的一些热损耗。试块本身则迅速上升到熔炉的温度。在某些情况下,在循环条件和难熔金属线的熔点下,试块自身的电致发热可用来确定声速。

### A. 15 连续波(CW)相敏技术

A. 15.1 基于 CW 的测量试块相位的系统由一个自锁放大器、一个输入探头和一个输出探头组成,它们的排列使波能传播通过试块。放大器包括一个为输入探头提供 CW 的频率源。当频率变化时,锁相放大器的相位计对每 180° 相位改变记录零(清零)。因此每隔一个过零点就是相位  $\phi$  的一个周期。相位周期图对应于以 MHz 为单位的频率。该曲线的斜率是以微秒为单位的群延迟时间  $t_g$ ,由下式可以得到群速度:

$$v_g = L/t_g$$

A. 15.2 用此系统研究的理想试块是沿厚度方向进行测量的无边界金属板;或沿长度方向进行

测量的细金属线(直径为  $d$ )。在第一种情况下,侧壁效应不存在。在第二种情况下,侧壁效应仅产生第

一个纵波模式,而且只要 $\lambda$ 比 $d$ 大得多,它就是非发散性的。外形比接近一致(如立方体,其比率就完全一致)的试块,结构中模式的多样性会造成材料参数的模糊,因此只能做定性的测量。但是也可以在同样形状和尺寸的试块上做对比性测量。

A. 15.3 该方法对高衰减试块非常有用,因为它的回波观察不到,即对一种材料的试块,传播穿过一次会衰减 20dB 甚至更大。因此相位随频率单调变化,此时读数是明确的。发散性和非发散性材料都能被测试。非发散性材料的 $t_g$ 不随频率变动(即 $\phi$ 相对于频率变化的曲线是一条直线),因而群速度就等于相速度。

#### A. 16 测量材料声速的其他替代方法

A. 16.1 本标准中的这种替代方法被视为一种有效的测量材料超声速度的方法。但需作如下规定:

- a) 消除因视差带来的误差;
- b) 使因不规范的扫查线带来的误差最小化;
- c) 对所有测量都使用一种模式速度作为对比试块的已知速度。

A. 16.2 速度是单位时间传播通过的距离,所以时间(作为水平位移显示在超声脉冲回波仪器的显示屏上)等于距离除以速度。按下式距离除以速度,用已知纵波速度( $v_l$ )、厚度为 $T$ (超声波传播距离或长度 $L$ )的试块材料中的多次反射来校准时间:

$$Lu/v_l = \text{时间}$$

在另一厚度 $t$ 可被测得上的材料上设置相同的时间,可不用时间做参考,用距离和速度的比值来测量速度:

$$Lu/v_l = L_m/v_x \text{ 或 } v_x/v_l = L_m/L_u$$

既然这些都是比值,只要保持两个速度和两个长度是同样的单位,等式就可以简化成:

$$v_x = v_l L_m/L_u$$

式中: $v_x$ —被测试样中的速度(探头用于被测试样时是纵波或切变波速度); $v_l$ —对比试块中的已知纵波速度(直束纵波探头所用标准时间); $L_m$ —通过被测试样物理路径的测理长度; $L_u$ —同样时间路径下超声波通过对比试块的长度。

重新设置等式的常规术语,速度为:

$$v_x = v_l n l (NT + \text{读数})$$

式中, $n$ —被测试样发射回波的数目  $t$ —被测试样的厚度  $N$ —在 $n$ 个反射回波之前的标准反射回波数目;  
 $T$ —从第 $N$ 个显示到第 $n$ 个显示之间的以直接标准化距离单位表示的对比试块厚度。

此测量可按下列步骤进行:

A. 16.2.1 用精度为 $\pm 0.0025\text{mm}$ 的千分尺或卡尺测量对比试块的厚度 $T$ 和被测试块的厚度 $t$ 。

A. 16.2.2 在有刻度的比例尺(如钢制直角比例尺)的小刻度(如 $1\text{mm}$ 的分割线)上用铅笔芯摩擦一下。再用透明胶带从比例尺上把标准刻度提取出来,把复制的刻度带粘贴到如图 A. 1 所示的仪器,显示器屏幕的外罩上(使两个刻度重合起来,以消除因比例尺的刻度显示和眼睛未对准引起的读数误差)。

A. 16.2.3 把一直束探头连接到仪器上,探头的波模式决定了能测量哪种速度。例如,一个 $\gamma$ 切割的石英,它的主要运动是平行于接触表面的面移动,它将产生一个直束切变波。用油或甘油(其他液体,如等聚丁烯等能对测量切变波提供更好的耦合)将探头耦合到被测试块上。用拟制(限幅、门槛)控制调节来产生最大的振幅,调节仪器控制使产生最多数目的清晰反射回波。测量应在不少于2个反射回波上进行,但也不需多于10个反射回波。5个反射回波就能为速度测量提供很高的精度。如果扫查被调节到如图 A. 2 所示的屏幕上方,用油脂笔在第 $n$ 个显示的左边把扫查线标记为黑色。

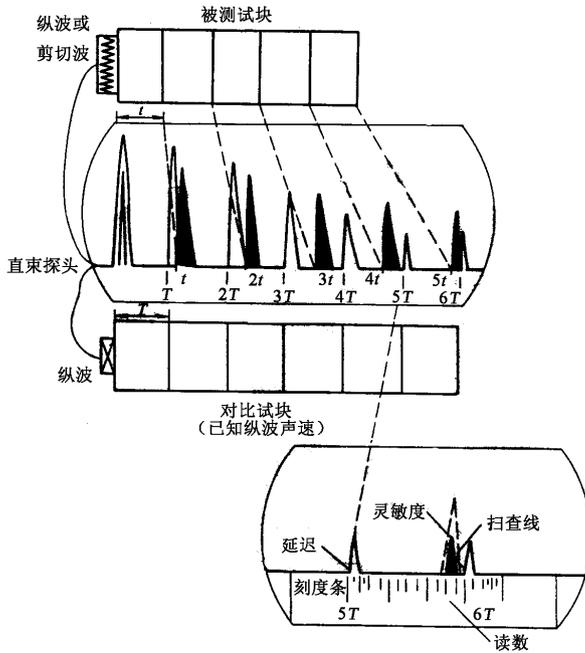


图 A.2 仪器读数设置

A. 16.2.4 读出始脉冲和油脂笔标记之间反射回波的数目( $N$ )。将第  $N$  个反射回波延迟到使其左边在比例尺上第一个整数刻度标记的位置上。扫描控制将第  $N+1$  个反射回波的左边调节到离第  $N$  个反射回波的距离等于标准试样厚度( $T$ )的位置。(延迟和扫描必须反复调节 2 或 3 次使第  $N$  个回波的位置在比例尺的第一个偶数刻度标记上且第  $N$  和  $N+1$  个反射回波之间在比例尺上的间距等于  $T$ 。)用油脂笔在屏幕上标记  $N$  和  $N+1$  的振幅并用一条地线连接这两点。

A. 16.2.5 将探头耦合到被测试块上。调节灵敏度(增益)将反射回波  $N$  的振幅设置到  $N$  和  $N+1$  振幅连线上。读出从第一个偶数刻度标记到位于  $n$  反射回波左边的扫描线点之间的距离;这就是读数。

### A. 17 透射传播—脉冲回波法

A. 17.1 透射传播技术适于试块表面不是理想的平面、平行及高衰减材料的情况。这种技术使用多于一个的探头,且不要求反射回波在一条线性时间轴上。

A. 17.2 在透射传播方法中,如果能接收到从发射探头传来的脉冲,那么如果可以确定厚度就可以进行速度测量。

A. 17.3 增加一个示波器,能获得更精确的时间读数。示波器可以观察输出脉冲,这些输出脉冲是能用作对脉冲在时间轴上进行定位的参考点脉冲中的扩展  $rf$  成分,时间轴已按参考标准进行适当地标准化了。

### A. 18 不依赖于厚度的速度计方法

A. 18.1 大多数超声速度计方法都基于下列形式的方程式:

$$v = x/t$$

式中: $v$ ——速度;

$x$ ——超声行程长度(即,对透射传播, $x$ =厚度,或对脉冲回波, $x$ =两倍厚度);

$t$ ——传播时间。

不同于这些方法,有其他一些方法无须知道  $x$  就能测量  $v$ 。因此,当确定  $x$  不方便时,例如,当只有一个表面能到达时,这些方法就很适用。

### A. 18.2 临界角反射率法

这种方法基于 Snell 法则。它涉及到对几个临界角中一个的测量,波型(纵波、切变波、瑞利波等)依赖于临界角。要测量的声速表示为  $v_2$ , Snell 法则以在声速  $v_1$  已知的邻界介质(通常为水)中初始入射角  $\theta_{1c}$  的形式给出  $v_2$  如下:

$$v_2 = v_1 / \sin\theta_{1c}$$

### A. 18.3 微分行程和微分角度法

A. 18.3.1 本方法同样基于 Snell 法则,在不方便测量  $x$  或  $\theta_{1c}$  的情况下可考虑使用该方法。对两个不同的人射角应用两次 Snell 法则,将入射角表示为  $\theta_{1a}$  和  $\theta_{1b}$ 。考察在介质 2 中类似模式的两条折射线,它们将以折射角  $\theta_{2a}$  和  $\theta_{2b}$  沿不同的路径传播。在介质 2 中分别传播时间  $t_p$  和  $t_q$  ( $t_p$  和  $t_q$  是单程传播时间)后将发生折射。将介质 1 中的声速表示为  $v_1$ ,如果定义  $A/Cc\sin\theta_{1a}/v_1$  和  $B/Cc\sin\theta_{1b}/v_1$ ,对于各向同性介质,其声速  $v_2$  可表示为:

$$v_2 = \sqrt{\frac{1 - (t_p/t_q)^2}{B^2 - A^2(t_p/t_q)^2}}$$

作为一种特殊的简化情况,令  $\theta_{1a} = 0$ (垂直入射)。那么  $A = 0$ ,且

$$v_2 = (1B) \sqrt{1 - (t_p/t_q)^2}$$

A. 18.3.2 实际的困难来自直接测量  $t_p$ 。理论上,可通过记录用回波对激光光束进行调制的时间来确定  $t_p$ ,其中激光实际上对试块的至少一个表面进行监控。当然,这只限制在透光的楔块和(或)试块上使用,且是一种相对复杂的测量。

A. 18.3.3 原则上,同样可用在垂直入射情况下测得的传播时间  $t_p$  和沿一对对称的“发射—接收”楔形探头之间试块表面的距离  $2W$  来确定  $v_2$ ,这时探头之间的距离被调整到有最大的回波振幅出现。可以表示为:

$$\frac{V_S^2}{\sqrt{V_1^2 - V_2^2 \sin^2 \theta_{1b}}} = \frac{W}{t_p \sin \theta_{1b}}$$

如果楔块的  $\theta_{1b} = 45^\circ$ ,上式可简化为:

$$\frac{v_2^2}{\sqrt{2V_1^2 - v_2^2}} = \frac{W}{t_p}$$

对于一个特殊的楔块速度  $v_1$  和测得的  $W$  和  $t_p$ ,未知速度  $v_2$  可以用迭代计算来估算,或对表 a.1 中给出的表格用插值法求得。这种方法的精度通常比简单的速度计方法要高。它依赖于  $v_1$  和  $v_2$  的相对值及入射角。误差主要来源于对  $W$  测量的不确定性。

### A. 18.4 反射系数法

在本方法中, $v_2$  是由声压反射系数  $R$  推导出来的。在垂直入射情况下可在已知特征阻抗为  $Z_1$  的第一种介质(液体或固体)和第二种介质之间的界面上测出  $R$ 。即对从介质 1 中传播到介质 2 上的波,测量  $R = -E_{\text{耦合}}/E_{\text{自主}}$ ,其中  $E$  分别是当两种介质耦合和不耦合情况下观察到的反射回波振幅。如果介质  $\rho_2$  的密度  $\rho_2$  已知或可测出,则速度  $v_2$  可由下式确定:

$$v_2 = (Z_1/\rho_2)(1+R)/(1-R)$$

表 A.1 对于 45° 入射角的  $W/t_p$  计算值

$v_2$ $m/s$	$W/t_p$			
	$v_1$			
	2500m/s	5000m/s	7500m/s	10000m/s
0	0	0	0	0
1000	0.295	0.143	0.0947	0.0709
2000	1.37	0.59	0.384	0.286
3000	4.81	0.764	0.885	0.651
4000	—	2.74	1.63	1.18
5000	—	5.00	2.67	1.89
6000	—	9.62	4.12	2.81
7000	—	49.00	6.15	3.99
8000	—	—	9.19	5.49
9000	—	—	14.43	7.43
10000	—	—	28.3	10.00

## A. 18.5 速度比值法

在某些情况下,确定通过同样路径的两种速度的比值是有用的。当路径的长度  $x$  已知时,这常常比仅确定一个速度更容易做到。纵波和切变波的速度比简化成相应传播时间比的倒数,如下:

$$\frac{v_T}{v_L} = \frac{t_L}{t_T}$$

A. 18.5.1 泊松系数  $\sigma$  可以写成下列比值的形式:  $\sigma = \frac{1 - 2(v_T/v_L)^2}{2 - 2(v_T/v_L)^2}$

A. 18.5.2 反过来,速度比也可以用  $\sigma$  表示为如下形式:  $\frac{v_T}{v_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\sigma}{2(1 - \sigma)}}$  A. 18.5.3 对于试块是直

径小于波长的圆形金属导线或细杆的情况,不是传播纵波,而是传播扩展波,其速度为  $v_E = \sqrt{E/\rho}$ ,其中,  $E$  为杨氏模量,  $\rho$  为密度;还传播扭转波,其速度为  $v_T = \sqrt{G/\rho}$ ,其中  $G$  为剪切模量,细杆速度比值如下:  $\frac{v_T}{v_E} = 1/$

$$\sqrt{2(1 + \sigma)}$$

## 附录 B

(资料性附录)

## 工程材料中的声速

本附录中给出的数值是从不同的资料收集到的。因成分、处理和测试条件的变动影响,这些数值不是绝对精确的。通常对大部分实际应用场合,这些数据是足够精确的。

表 B. 1 工程材料中的声速

材料	密度 $kg/m^3$	纵波速度		剪切波速度	
		$m/s$	$\times 10^3 in/s$	$m/s$	$\times 10^3 in/s$
铝	2700	6300	250	3130	124
铍	1850	12400	488	8650	340
铋	9800	2180	85	1100	43
黄铜	8100	4370	173	2100	83

材料	密度 kg/m <sup>3</sup>	纵波速度		剪切波速度	
		m/s	×10 <sup>3</sup> in/s	m/s	×10 <sup>3</sup> in/s
青铜	8860	3530	139	2230	88
镉	8600	2780	109	1500	59
铌	8580	4950	194	2180	85
铜	8900	4700	185	2260	88
金	19300	3240	127	1200	47
钨	1130	3860	152	2180	82
英康镍合金	8250	5720	225	3020	119
铁(电解)	7900	5960	235	3220	128
铁(铸)	7200	3500~5600	138~222	2200~3200	87~131
铅	11400	2160	85	700	27
铅铋合金	10900	2160	85	810	32
镁	1740	5740	227	3080	122
蒙乃尔铜镍合金	8830	6020	237	2720	107
镍	8800	5630	222	2960	118
塑胶(丙烯酸树脂)	1180	2670	105	1120	44
铂	21450	3960	155	1670	65
熔凝石英	2200	5930	233	3750	148
银	10500	3600	141	1590	62
银镍合金	8750	4620	182	2320	91
不锈钢(347)	7910	5790	226	3100	122
不锈钢(410)	7670	5900	232	3300	130
钢	7700	5900	232	3230	127
锡	7300	3320	130	1670	65
钛	4540	6240	245	3215	126
钨	19100	5460	214	2620	103
铀	18700	3370	133	1930	76
锌	7100	4170	164	2410	94
锆	6490	4310	169	1960	77

表 B.2 一些陶瓷材料的密度和超声速度

材料	状态	密度 kg/m <sup>3</sup>	理论值 %	纵波速度		横波速度	
				m/s	频率 MHz	m/s	频率 MHz
α 金刚砂	烧结	3190	99+	12180	20	7680	20
		3100					
		3000					
		2900					
氧化铝	烧结	3660	92	9850	50	5900	20
	锻压和烧结	3700		10200 <sup>a</sup>		5890 <sup>a</sup>	
		3700					
		3700					
氧化锆	烧结	5700	98	7040	30	3720	10
	加热老化	5680		7050		3760	
氮化硅	HIP	3200	99+	10800	50	6010	10
强化氮化硅	30% SIC 丝	3200	99+	10800	50	6250	20

材料	状态	密度 kg/m <sup>3</sup>	理论值 %	纵波速度		横波速度	
				m/s	频率 MHz	m/s	频率 MHz
强化氮化硅	20%SiC 纤维	2490	77	7600 <sup>e</sup>	5	4700 <sup>e,f</sup> 4300 <sup>e,g</sup>	5
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> (超导体)	单相无织纹	5940	93	5120	20	3040	5

- a. 波平行于锻压轴传播。  
b. 波垂直于锻压轴传播。  
c. 波平行于锻压轴振动。  
d. 波垂直于锻压轴振动。  
e. 波垂直于纤维轴传播。  
f. 波平行于纤维轴振动。  
g. 波垂直于纤维轴振动。

## 附录 C

(资料性附录)

### 水中超声速度随温度的变化

表 C.1 水中超声速度随温度的变化

温度 ℃	声速		温度 ℃	声速	
	m/s	×10 <sup>3</sup> in/s		m/s	×10 <sup>3</sup> in/s
15.0	1470.6	57.89	20.2	1483.6	58.40
15.2	1471.1	57.91	20.4	1484.1	58.42
15.6	1472.1	57.95	20.8	1485.1	58.46
15.8	1472.6	57.97	21.0	1485.6	58.48
16.0	1473.1	57.99	21.2	1486.1	58.50
16.4	1474.1	58.03	21.6	1487.1	58.54
16.6	1474.6	58.50	21.8	1487.6	58.56
16.8	1475.1	58.07	22.0	1488.1	58.58
17.0	1475.6	58.09	22.2	1488.6	58.60
17.2	1476.1	58.11	22.4	1489.1	58.62
17.4	1476.6	58.13	22.6	1489.6	58.64
17.6	1477.1	58.15	22.8	1490.1	58.66
17.8	1477.6	58.17	23.0	1490.6	58.68
18.0	1478.1	58.19	23.2	1491.1	58.70
18.2	1478.6	58.21	23.4	1491.6	58.72
18.4	1479.1	58.23	23.6	1492.1	58.74
18.6	1479.6	58.25	23.8	1492.6	58.76
19.0	1480.6	58.29	24.2	1493.6	58.80
19.2	1481.1	58.31	24.4	1494.1	58.82
19.4	1481.6	58.33	24.6	1494.6	58.84
19.6	1482.1	58.35	24.8	1495.1	58.86
19.8	1482.6	58.37	25.0	1495.6	58.88
20.0	1483.1	58.38			