

# 用纵波直探头测量新型耐热钢材料 横波声速的方法

张纪周,袁世丽,何顺开

(北京巴布科克·威尔科克斯有限公司,北京 100043)

**摘要:**介绍了一种利用纵波直探头现场测定新型耐热钢材料(如P91钢)横波声速的新方法。利用纵波直探头在工件材料中产生的变型横波,通过探讨该变型横波的产生原因及传播路径,推导出该工件材料的横波声速计算公式。检测过程中,通过修正斜探头的折射角度和AVG曲线,从而提高对工件中缺陷的定位精度,以避免生产过程中的漏检和误判。

**关键词:**超声波探伤;横波声速;声特性;耐热钢

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2013)12-0019-05

## Measurement of Shear-Wave Sound Velocity Using Normal Probe for the New Heat-Resistant Steel

ZHANG Ji-Zhou, YUAN Shi-Li, HE Shun-Kai

(Babcock & Wilcox Beijing Company Ltd, Beijing 100043, China)

**Abstract:** This paper introduces a new method for field determination of a new type of heat-resistant steel materials (such as P91 steel) shear wave sound velocity using normal probes. Using the variant transverse wave from the normal probe in the workpiece, exploring the causes and the propagation path of the variant shear wave, deduced the transverse wave sound velocity calculation formula for the material. When testing, correct the angle of refraction and AVG curve. So that increasing the positioning accuracy of the defects, and avoiding the undetected and misjudgment.

**Keywords:** Ultrasonic testing; Shear wave velocity; Acoustic characteristics; Heat-resistant steel

为了节约能源、提高发电效率、减少污染,超临界、超超临界发电机组已经成为我国火电发展的必然趋势。机组运行参数(温度、压力)和单机容量的增加,促进了更高强度耐热钢的开发与应用。目前在建的多台超临界、超超临界机组的关键部件(高温集箱、主蒸汽管道等)都使用了P91、P92等新型耐热钢材料。

P91、P92钢与普通碳素钢材料的声学特性存在很大差异。由于P91材料与普通碳素钢材料的声速不同,使得同一横波斜探头在两种材料中的折射角度不同。因此,对P91对接焊缝进行超声波检测时,仪器扫描时间的校准和横波斜探头K值的测

定,不能只使用CSK-I A标准试块。否则,会造成定位误差,严重时极有可能发生漏检及误判的情况。检测中,为避免上述情况,可以采用以下两种方法:

(1) 制作P91材料的CSK-I A、CSK-III A等专用标准试块。

(2) 采用普通材质试块调试后,测定P91材料的横波声速,然后计算并修正。

理论上,使用与工件同种材料的标准试块校准更准确,但是生产中却并不适用,无法做到为每一种新材料做一种标准试块,那样也就失去了标准试块的意义。相反,如果能在现有条件下测量出该材料的横波声速,那么用计算后修正的方法反而更适用。

使用数字超声波探伤仪探伤时,声速是影响探伤定位、定性的重要因素。只有准确输入被检材料的横波声速,才能对缺陷的深度、位置进行精确的测

收稿日期:2013-01-08

作者简介:张纪周(1972—),男,主要从事无损检测工作。

量。因此测试P91材料的横波声速 $c_{S_{P91}}$ 是解决问题的关键所在,必须选择一种可以有效测试横波声速的方法。笔者介绍一种简单、可行同时又适用于大部分钢材料的横波声速测试方法。

## 1 原理分析

### 1.1 单晶直探头探伤中的变形横波现象

在使用单晶直探头对上下表面平行的锻件进行检测时,经常会遇到在一次底波 $B_1$ 之前没有任何缺陷回波,而在 $B_1$ 与二次底波 $B_2$ 之间及 $B_2$ 与三次底波 $B_3$ 之间……总存在着幅度很小且位置相对固定的回波。当从锻件的另一面检测时,该回波仍然出现在 $B_1$ 后的相同位置。

很多人将其判断为小缺陷波。当然也有人不认为是缺陷波,而将其解释为侧壁干涉、声波叠加等现象。笔者觉得将其解释为迟到波更合理。

所谓迟到波,即当探头置于细长(或扁长)工件或试块上时,扩散纵波波束在侧壁产生波型转换,转换为横波,此横波在另一侧面又转换为纵波,最后经底面反射回到探头,被探头接收,从而在示波屏上出现一个回波。由于转换的横波声程长,波速小,传播时间比直接从底面反射的纵波长。因此,转换后的波总是出现在第一次底波 $B_1$ 之后,故称迟到波。

可见,产生迟到波的必要条件就是波束扩散。扩散纵波波束倾斜入射侧壁发生波型转换,从而产生变形横波。那么试想扩散纵波波束相对于底面同样也属于倾斜入射,因此必然也会产生变形横波。

### 1.2 变型横波产生原因分析

直探头所发出的纵波也不是一条直线,而是以一定角度扩散的锥形。那么,既然有扩散,其自身也会产生波型转换。以下以单晶直探头(2.5P14Z)为例说明此问题。半扩散角 $\theta_0$ 的公式为:

$$\theta_0 = \frac{70\lambda}{D_s} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为波长; $D_s$ 为晶片直径。

已知探头频率 $f=2.5\text{ MHz}$ ;晶片直径 $D_s=14\text{ mm}$ ;钢中纵波声速 $c_L=5900\text{ m/s}$ ;钢中横波声速 $c_S=3230\text{ m/s}$ 。则,纵波波长 $\lambda_L$ 为:

$$\lambda_L = \frac{c_L}{f} = 5.9/2.5 = 2.36\text{ mm}$$

纵波半扩散角:

$$\theta_0 = \frac{70\lambda_L}{D_s} = \frac{70 \times 2.36}{14} = 11.8^\circ$$

同理,横波波长:

$$\lambda_S = \frac{c_S}{f} = 3.23/2.5 = 1.29\text{ mm}$$

横波半扩散角:

$$\theta_S = \frac{70\lambda_S}{D_s} = \frac{70 \times 1.29}{14} = 6.46^\circ$$

那么,可以认为单晶直探头(2.5P14Z)在钢中产生的纵波声束包含着一个同轴的横波声束,其半扩散角约为 $6.4^\circ$ ,如图1所示。该横波由于能量非常微弱,通常不会被发现。只有在检测需要较高灵敏度的工件(如锻件等)的情况下,才有可能被发现。

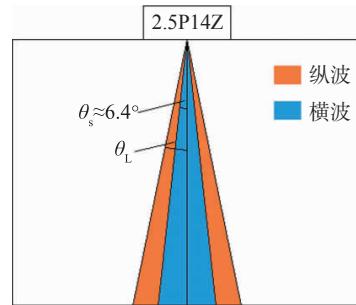


图1 半扩散角声束示意

### 1.3 推导横波声速计算公式

将单晶直探头(2.5P14Z)置于RB-III试块40mm厚度位置,将仪器灵敏度调整为 $80\%B_1+30\text{ dB}$ 。在一次底波 $B_1$ 和二次底波 $B_2$ 之间出现两个波幅相对较小的回波 $B_{LS}$ 和 $B_{SS}$ ,如图2所示。以下逐一分析 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_{LS}$ 和 $B_{SS}$ 四个回波的路径,其对应的深度值分别为 $H_{B_1}$ 、 $H_{B_2}$ 、 $H_{B_{LS}}$ 和 $H_{B_{SS}}$ 。

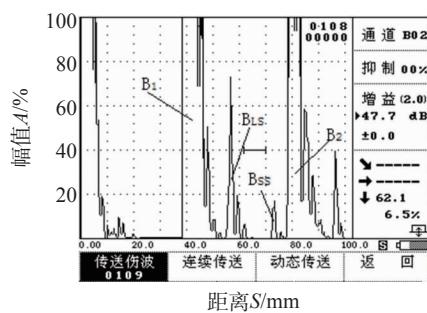
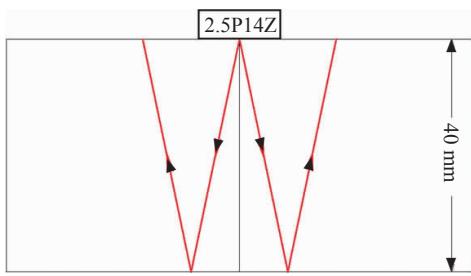


图2 标准试块的波形

图3为一次底波 $B_1$ 的回波路径。可见, $B_1$ 回波是纵波声束在试件中往复形成的,声程是试件厚度 $H$ 的两倍。超声波探伤仪记录的声程(深度)都是单程。所以, $B_1$ 的显示深度正好为试件的厚度。用公式可表示为:

$$\frac{2H_{B_1}}{C_L} = \frac{H}{c_L} + \frac{H}{c_L}$$

推导可得:

图 3  $B_1$  回波路径

$$H_{B_1} = H \quad (2)$$

图 4 为  $B_{LS}$  的回波路径图。可见,  $B_{LS}$  回波包括纵波与横波, 其能量为变型纵波与变型横波之和。由于包含了横波的成分, 其回波时间滞后于纵波的一次反射波  $B_1$ 。用公式可表示为:

$$\frac{2H_{B_{LS}}}{C_L} = \frac{H}{c_L} + \frac{H}{c_S} \quad (2)$$

推导可得:

$$c_S = c_L \cdot \frac{H}{2H_{B_{LS}} - H}$$

代入式(2)得:

$$c_S = c_L \cdot \frac{H_{B_1}}{2H_{B_{LS}} - H_{B_1}} \quad (3)$$

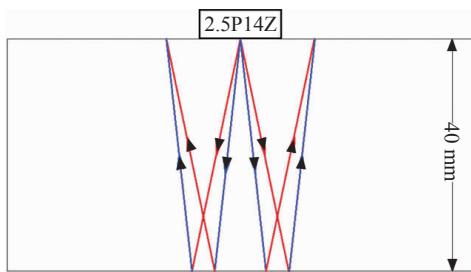
图 4  $B_{LS}$  回波路径

图 5 为  $B_{SS}$  的回波路径图。可见,  $B_{SS}$  为横波产生的回波, 不包含纵波的成分。因此, 其往复时间要长于包含纵波的  $B_{LS}$ , 回波的位置也滞后于  $B_{LS}$ 。用公式可表示为:

$$\frac{2H_{B_{SS}}}{c_L} = \frac{H}{c_S} + \frac{H}{c_S} \quad (4)$$

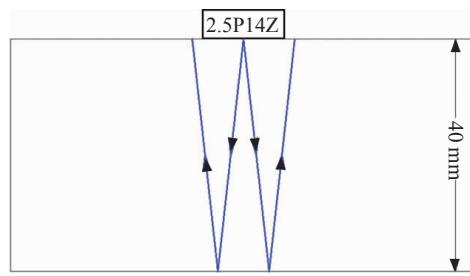
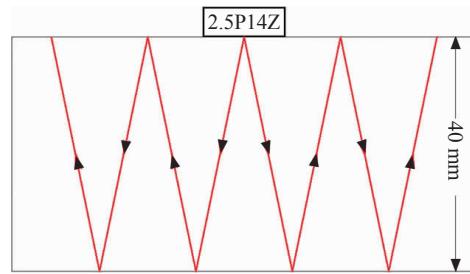
推导可得:

$$c_S = c_L \cdot \frac{H}{H_{B_{SS}}}$$

代入(1)式得:

$$c_S = c_L \cdot \frac{H_{B_1}}{H_{B_{SS}}} \quad (4)$$

图 6 为二次底波  $B_2$  的回波路径图。可见,  $B_2$  回波是纵波声束在试件中往复两次形成的, 声程是

图 5  $B_{SS}$  回波路径图 6  $B_2$  回波路径图

试件厚度  $H$  的四倍。其显示深度为试件厚度的两倍。用公式可表示为:

$$\frac{2H_{B_2}}{C_L} = \frac{H}{c_L} + \frac{H}{c_L} + \frac{H}{c_L} + \frac{H}{c_L}$$

推导可得:

$$H_{B_2} = 2H \quad (5)$$

## 2 试验验证

### 2.1 试验设备

仪器选用 HS610, HS610e A 型脉冲反射式数字超声波探伤仪。探头为单晶直探头 2.5P14Z。试块为 CSK-I A 标准试块; CSK-I B 标准试块。试件为  $\phi 447.5 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$  的 P91 钢管;  $\phi 773.5 \text{ mm} \times 146.5 \text{ mm}$  的 P92 钢管。辅助工具为游标卡尺。

### 2.2 验证过程

(1) 将探头置于普通 CSK-I A 标准试块 100 mm 处, 采用自动调校的方式调整扫描时间为 1:1, 从而得到该探头的零偏值  $L_0$ 。所谓探头零偏值, 即超声波在探头内从晶片至接触面的传播时间。

(2) 用游标卡尺精确测量 P91 试件的厚度  $H$ 。

(3) 将探头放置于 P91 试件的表面并调整扫描范围至能够显示出二次底波  $B_2$ 。

(4) 将  $L_0$  输入仪器参数, 用闸门圈住一次回波  $B_1$ , 调整仪器的声速值, 当仪器显示  $B_1$  的深度值  $H_{B_1}$  与 P91 试件的实际厚度  $H$  相吻合时, 此时的声

速即为 P91 钢实际的纵波声速  $c_{L_{P91}}$ 。

(5) 提高仪器增益 30 dB 以上,使得  $B_1$  与  $B_2$  之间出现回波  $B_{LS}$  和  $B_{SS}$ 。用闸门圈住  $B_{LS}$  或  $B_{SS}$ , 记下仪器显示深度  $H_{B_{LS}}$  或  $H_{B_{SS}}$ 。

(6) 利用公式(3)或(4)来计算 P91 钢的横波声速,得:

$$c_{S_{91}} = c_{L_{91}} \cdot \frac{H_{B_1}}{2H_{B_{LS}} - H_{B_1}}$$

$$c_{S_{91}} = c_{L_{91}} \cdot \frac{H_{B_1}}{H_{B_{SS}}}$$

通常  $B_{SS}$  的波幅远低于  $B_{LS}$ ,甚至由于试件表面粗糙度或晶粒度的原因而没有明显的  $B_{SS}$ 。因此大多数的情况下要以式(3)来计算横波声速。值得注意的是,在读取回波  $B_1$ ,  $B_{LS}$  及  $B_{SS}$  的显示深度时,必须使得其波高达到相同的波幅(通常选择 80%),以尽可能地减小误差。

以 CSK-I A 标准试块为例进行验证:

(1) 用游标卡尺测量 CSK-I A 标准试块实际厚度  $H=25$  mm。

(2) 如图 7(a)所示,用闸门圈住一次回波  $B_1$ ,调整仪器的声速值,使得  $B_1$  的显示深度  $H_{B_1}=H=25$  mm,读取此时的纵波声速  $c_L=5 956$  m/s。

(3) 如图 7(b)所示,用闸门圈住回波  $B_{LS}$ ,自动增益到与  $B_1$  同一幅度,读取回波  $B_{LS}$  的深度  $H_{B_{LS}}=35.4$  mm。代入式(3)求得试块中的横波声速  $c_S$ :

$$c_S = c_L \cdot \frac{H_{B_1}}{2H_{B_{LS}} - H_{B_1}}$$

$$= 5 956 \times \frac{25}{2 \times 35.4 - 25} = 3 251 \text{ mm/s}$$

同理对 CSK-I B 标准试块、P91 钢管  $\phi 447.5$  mm×65 mm、P92 钢管  $\phi 773.5$  mm×146.5 mm 试件的验证结果如表 1。

## 2.3 结果分析

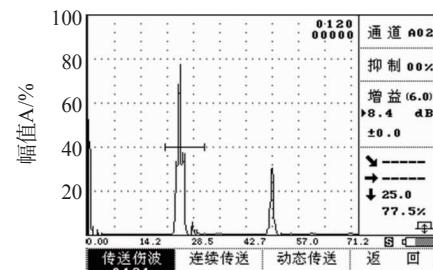
由上述结果可知:

(1) 标准试块为普通碳钢的横波声速为 3 251 m/s,与已知的碳钢、低合金钢横波声速实际横波声速 3 240 m/s 相差不大;同种材料的两种标准试块,所测的横波声速也不相同。

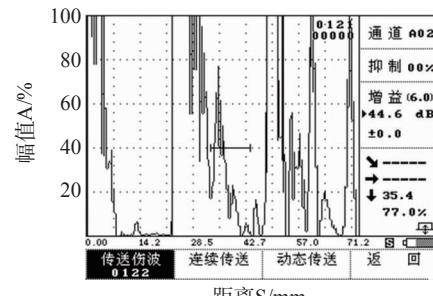
(2) P91 钢横波声速为 3 308 m/s;P92 钢横波声速为 3 284 m/s。

试验误差会对声速的测量有一定的影响。产生的原因有:

(1) 仪器的水平线性存在误差,例如仪器的水平线性误差为小于 0.1%。



(a)  $B_1$  回波



(b)  $B_{LS}$  回波

图 7 CSK-I A 标准试块回波

表 1 验证横波声速结果

试件	$H/\text{mm}$	$c_L/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$H_{B_{LS}}/\text{mm}$	$c_S/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
CSK-I A	25	5956	35.4	3 251
CSK-I B	25	5987	35.4	3 268
P91 钢管	67	5985	94.1	3 308
P92 钢管	147.2	5975	207.5	3 284

(2) 试块加工时存在误差,试块允许存在 0.05% 的加工误差。

(3) 不同仪器之间数/模转换方式不同引起的误差。

(4) 仪器产生超声波时触发和振铃时间的不同造成的差异,都可能引起测试误差。

## 3 应用实例

检测人员在对材质为 P91 的集箱管座角焊缝进行超声波检测时,选用 K2 横波斜探头(实测  $K=1.97$ )检测集箱管座角焊缝(规格为  $\phi 325$  mm×64 mm)。在管座上大约 3 点的位置,检测到一个超标缺陷(显示深度为 62 mm,指示长度为 40 mm)。通过笔者阐述的测试方法测出 P91 材料的横波声速  $c_{S_{91}}=3 313$  m/s,而钢中横波声速  $c_{S_{\text{钢}}}=3 237$  m/s。两种声速下计算所得折射角分别为  $\beta_{\text{钢}}=63.1^\circ$ ,  $\beta_{P91}=65.9^\circ$ 。

对于仪器指示深度  $H=62$  mm 处的缺陷,则仪器指示的声程为:

$$S_{\text{钢}} = \frac{H}{\cos\beta_{\text{钢}}} = 62/\cos 63.1^\circ = 137 \text{ mm}$$

仪器指示的水平位置为:

$$\begin{aligned} L_{\text{钢}} &= S_{\text{钢}} \times \sin\beta_{\text{钢}} \\ &= 137 \times \cos 63.1^\circ = 122.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

而缺陷在 P91 材料中的实际声程为:

$$\begin{aligned} S_{\text{P91}} &= S_{\text{钢}} \cdot \frac{c_{\text{P91}}}{c_{\text{钢}}} \\ &= 137 \times \frac{3.313}{3.237} = 140.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

缺陷在 P91 材料中实际深度为:

$$\begin{aligned} H_{\text{P91}} &= S_{\text{P91}} \cdot \cos\beta_{\text{P91}} \\ &= 140.2 \times \cos 65.9^\circ = 57.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

缺陷在 P91 中的实际水平位置:

$$\begin{aligned} L_{\text{P91}} &= S_{\text{P91}} \times \sin\beta_{\text{P91}} \\ &= 140.2 \times \sin 65.9^\circ = 128 \text{ mm} \end{aligned}$$

可见缺陷的实际位置与仪器指示位置相比深度差:  $\Delta H = 57.2 - 62 = -4.8 \text{ mm}$ ; 水平差  $\Delta L = 128 - 122.2 = 5.8 \text{ mm}$ 。

即, 缺陷的实际深度比显示深度浅了 4.8 mm, 缺陷的实际水平距离比显示水平距离远了 5.8 mm。

(上接第 18 页)

得到响应频率,因此检测过程动作简单,由于是激励发生快,响应得到也快,且得到的参数可直接进行整体强度判断,无需逐一检测工件,因此检测时间短,这无疑减少了技术人员在变电站带电检测的时间和操作动作,因此大大提高了检测效率和人员的安全性。

利用声振技术检测支柱绝缘子强度,其中主要的难点在于对有缺陷存在的绝缘子的判定范围的设置,在试验中选取合适的模态作为评定缺陷的依据将是后续工作的重点,这需要大量的试验来得出一套标准,另外各种不同的支柱绝缘子要建立起标准库还需要大量的工作。试验将主要以 110kV 和 220kV 带隔离刀闸开关的支柱绝缘子作为研究对象,随后再扩展到 500kV 及各种瓷套管。在此从理

#### 4 结语

综上所述,采用推荐的横波声速测量方法与其它方法相比,操作简单、方便,最大限度地排除了人为误差,可以快速准确地测量出超声波检测中所需要的不同钢种的横波声速,能保证超声波检测缺陷定位的准确性,尤其对较厚部件根部缺陷进行定位时,减少误判。此方法的优点归纳为:

- (1) 针对不同材料的工件无需制作不同的试块,无需对材料进行取样加工。
- (2) 检测结果不受材料的批次及环境温度对声速影响的限制。
- (3) 对于薄板的检测,考虑近场区的影响,可以适当延长扫描时间,以提高测量的准确性。
- (4) 对于现场无法测量工件厚度的情况,可按工件公称厚度计算。
- (5) 由于材料不同引起的衰减问题可以按 JB/T 4730—2005 标准<sup>[2]</sup>所提出的方法来测试并加以修正。

#### 参考文献:

- [1] 郑晖,林树青.超声检测(第二版)[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2008.
- [2] JB/T 4730—2005 承压设备无损检测[S].

论上提出声振检测对于支柱绝缘子的可行性,再逐步进入具体的研究。

#### 参考文献:

- [1] SINGIRESU S. Rao. Mechanical Vibration[M]. 北京:清华大学出版社,2009:442-443.
- [2] 窦振宇.高压支柱瓷绝缘子运行事故分析[J].Ceramic Research & Vocational Education,2006,4(4):42-44.
- [3] 李晓红,丁杰,陈汉明,等.电网绝缘子的无损检测技术[J].无损检测,2004,26(3):129-131.
- [4] 邬冠华,林俊明,任吉林,等.声振检测方法的发展[J].无损检测,2011,33(2):35-41.
- [6] 王乐,刘钝,杨智春,等.白噪声激励下的复合材料层合结构损伤检测的内积向量法[J].振动与冲击,2009,28(4):127-131.