

# 超声波端角反射及其波形转换探讨

凌礼恭

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100088)

**摘要:**介绍了超声波端角反射及其特点。以钢、空气界面为例重点分析了纵波、横波端角反射过程中的波型转换及其对回波信号传播时间的影响。在此基础上对端角反射率变化的大致成因和实践中探头角度的选择进行了分析。最后对焊缝超声波检测端角反射的辨识方法进行了探讨。

**关键词:**超声波;端角反射;波形转换;反射率

**中图分类号:**TG115.28 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2013)04-0126-03

## 1 端角反射及其特点

超声波在两个平面构成的直角内的反射叫做端角反射。端角反射的产生可以归为两类,一类由于结构直角部位产生的端角反射,例如板材边缘等;另一类由于焊缝根部缺欠产生的端角反射,例如根部未焊透、未熔合、与母材表面垂直的根部裂纹、错边等,如图 1 所示。

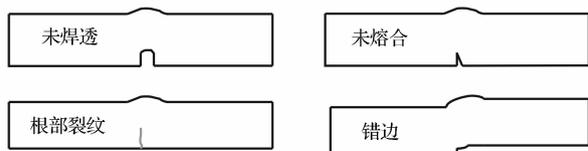


图 1 可能产生端角反射的根部缺欠形式

在不考虑波型转换的情况下,通过简单的几何知识可以证明,当超声波以平行波束入射到端角时,超声波在端角处的第一个反射点无论在底面上还是在垂直面上,经过第二个反射点后返回到探头,其声程都是相同的。同时,只要端角反射回波能被探头接收到,反射点的位置无论在何处,其声程也都是相同的。

## 2 端角反射的波型转换

当超声波倾斜入射到界面时,在一定入射角度条件下除产生同种类型的反射和折射波外,还会产生不同类型的反射和折射波,即发生波型转换。因此在发生端角反射时可能伴随不同形式的波型转换。下面分纵波入射和横波入射来讨论端角反射时的波型转换,以钢、空气界面为例进行说明,由于钢、空气界面两侧声阻抗差别较大,下文分析均不考虑界面处波的

折射。钢中纵波声速  $C_L = 5900\text{m/s}$ ,钢中横波声速  $C_S = 3230\text{m/s}$ 。

在不考虑波型转换的情况下,反射回波与入射波相互平行,如图 2、图 3 中粗实线所示。

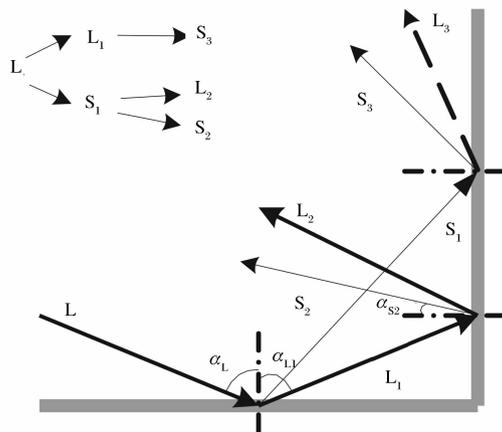


图 2 纵波端角反射波形转换示意图

### 2.1 纵波端角反射波型转换

根据超声波的反射定律可得式(1)一式(3),式中除  $\alpha_L$  外,其余各角度均为其下标所表示的波在其反射点处与法线的夹角,例如  $\alpha_{L1}$ ,  $\alpha_{S2}$ 。由式(1)、式(2)、式(3)代入钢中的波速计算可得:当入射纵波 L 存在时,  $L_1$ 、 $S_1$ 、 $L_2$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  均存在,如图 2 中实线所示,而  $L_3$  不存在,如图 2 中短点虚线所示。

对于不同的传播介质,  $L_3$  也可能存在,即若  $\sin^{-1} C_S / C_L > 45^\circ$ ,则  $L_3$  有存在的可能。具体需要根据结合式(1)、式(3)中有关 L、 $S_1$ 、 $L_3$  的部分进行计

收稿日期:2013-01-29

作者简介:凌礼恭(1985—),男,湖北麻城人,环境保护部核与辐射安全中心,干部,工程师,工学硕士,研究方向:核安全设备在役检查、焊接、无损检测、金属材料、核安全等。

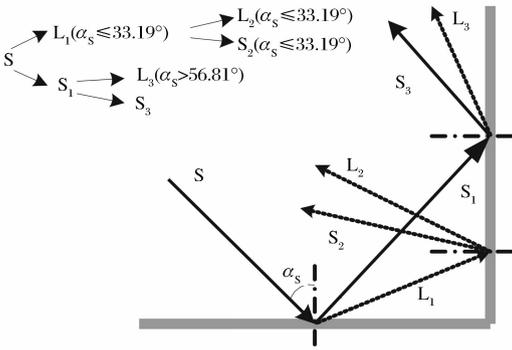


图3 横波端角反射波形转换示意图

算。

$$\frac{\sin\alpha_L}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{L1}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S1}}{C_S} \quad (1)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - \alpha_{L1})}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{L2}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S2}}{C_S} \quad (2)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - \alpha_{S1})}{C_S} = \frac{\sin\alpha_{L3}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S3}}{C_S} \quad (3)$$

### 2.2 横波端角反射波型转换

同样根据反射波的反射定律可得下式(4)、式(5)、式(6),除 $\alpha_S$ 外,式中其余角度含义与2.1节类似。由式(4)、式(5)、式(6)计算可得:当 $0 < \alpha_S \leq 33.19^\circ$ 时, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 存在;当 $33.19^\circ < \alpha_S \leq 56.81^\circ$ 时,仅有 $S_1$ 、 $S_3$ 存在,如图3中粗实线所示;当 $\alpha_S > 56.81^\circ$ 时, $S_1$ 、 $L_3$ 、 $S_3$ 存在。

$$\frac{\sin\alpha_S}{C_S} = \frac{\sin\alpha_{L1}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S1}}{C_S} \quad (4)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - \alpha_{L1})}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{L2}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S2}}{C_S} \quad (5)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - \alpha_{S1})}{C_S} = \frac{\sin\alpha_{L3}}{C_L} = \frac{\sin\alpha_{S3}}{C_S} \quad (6)$$

### 2.3 端角反射波型转换后回波信号时间差(以钢为例)

假设钢中纵波从工件表面入射点到端角反射的第一个反射点的传播时间是 $t$ ,则横波的传播时间约为 $1.83t$ 。从第一个反射点到第二个反射点之间的传播时间较短,在这里忽略不计。近似认为入射波与探头接收到的反射回波(包括反射波及波形转换波)的传播路径平行,即声程相同。

#### 2.3.1 纵波端角反射回波信号时间差

由2.1节可知探头接收到的纵波端角反射可能有纵波 $L_2$ ,横波 $S_2$ 、 $S_3$ ,由于纵波、横波声速的差异,探头接收到的上述信号会有时间差即在检测仪显示器水平刻度上刻度会不同。

按上述假设纵波 $L_2$ ,横波 $S_2$ 、 $S_3$ 的传播时间分

别约为 $2t$ 、 $2.83t$ 、 $2.83t$ 。因此纵波的端角反射很可能出现三个尖峰,其中两个相邻。

由此我们可以通过对三个尖峰之间水平刻度的大致关系来分析和识别纵波端角信号。

#### 2.3.2 横波端角反射回波信号时间差

由2.2节可知当 $0 < \alpha_S \leq 33.19^\circ$ 时,探头接收到的横波端角反射可能有 $L_2$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ,按上述假设它们的传播时间分别约为 $2.83t$ 、 $3.66t$ 、 $3.66t$ 。对于这一角度范围内的横波探头,端角反射可能出现三个尖峰,其中两个相邻。

当 $33.19^\circ < \alpha_S \leq 56.81^\circ$ 时,探头接收到的纵波端角反射仅有 $S_3$ ,同理它的传播时间约为 $3.66t$ 。对于这一角度范围内的横波探头,端角反射仅有一个尖峰。

当 $\alpha_S > 56.81^\circ$ 时,探头接收到的纵波端角反射可能有 $L_3$ 、 $S_3$ 。同理它们的传播时间分别约为 $2.83t$ 、 $3.66t$ 。对于这一角度范围内的横波探头,端角反射可能有两个尖峰。

由此我们可以通过对不同角度范围的探头端角反射信号尖峰个数及尖峰之间水平刻度的大致关系来分析和识别横波端角信号。

### 3 端角反射率

回波声压 $P_a$ 与入射波声压 $P_0$ 之比称为端角反射率,用 $T_{端}$ 表示。如图4为钢、空气界面上钢中的端角反射率随入射角度变化的曲线。

$$T_1 = \frac{P_a}{P_0} \quad (7)$$

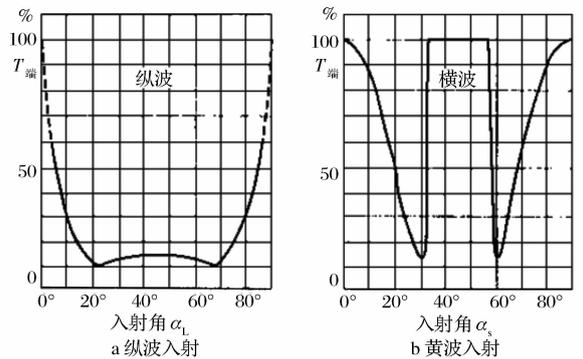


图4 端角反射率<sup>[1]</sup>

由图4a所示可知,纵波入射时,端角反射率都很低。从2.1节的分析中可以定性解释这一现象,纵波在端角的两次反射中分离出较强的横波 $S_1$ 、 $S_2$ 从而使回波声压 $P_a$ 大大降低,即端角反射率大大降低。

由图4b所示可知,当 $34^\circ < \alpha_S \leq 56^\circ$ 时,端角反射率达到100%,2.2节的定性分析表明在此入射角度范

围内横波未发生波形转换,未分离出纵波和横波,仅发生横波的全反射,产生  $S_1$ 、 $S_3$ ,因此反射声压与入射声压相等,反射率达到 100%。当  $0 < \alpha_s \leq 34^\circ$  时,端角反射率较低,2.2 节的定性分析表明  $0 < \alpha_s \leq 34^\circ$  时,横波的一次反射分离出纵波  $L_1$ ,使回波声压  $P_a$  大大降低。当  $\alpha_s > 56^\circ$  时,2.2 节的定性分析表明  $\alpha_s > 56^\circ$  时,横波的二次反射分离出纵波  $L_3$ ,使回波声压  $P_a$  大大降低。至于当  $\alpha_s = 30^\circ$  或  $60^\circ$  时回波声压最低, $\alpha_s$  在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  附近时,横波端角反射率理论上很高的现象,引入斜入射声波声压反射率公式进行定量分析<sup>[2]</sup>即可解释。

综上分析,实际工作中横波检测焊缝根部未焊透、根部裂纹等缺陷时横波入射角应该选择在  $35^\circ \sim 55^\circ$  范围内,即  $K = 0.7 \sim 1.43$  为宜,检测灵敏度较高。虽然图 4 中还可以看出  $\alpha_L(\alpha_s)$  在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  附近时,无论纵波还是横波,端角反射率理论上都很高,但实际上由于入射波、反射波在边界互相反射而部分抵消,因此实际上检测灵敏度并不高。

由于不同角度对于端角反射率影响很大,从而使缺陷的当量大小受到很大影响。ASME 第 V 卷第四章附录 B50 中规定了有关不同入射角条件下端角反射的修正。

## 4 焊缝超声波检测端角反射的辨识

### 4.1 根据端角反射点的位置辨识

对于由结构直角部位产生的端角反射,可以通过探头位置、探头参数、工件尺寸等信息判断。然后由如 4.2、4.3 节等的方法进一步验证,相对容易判断。下文着重探讨焊缝根部缺陷端角反射的辨识。

对于未焊透、未熔合、错边和根部裂纹产生的端角反射,未焊透、未熔合和错边其实际深度值均约等于工件厚度值,根部裂纹的深度值因焊缝内成型不同而稍有变化,但也接近工件厚度值。另外未焊透、未熔合、错边和根部裂纹的水平位置通常在焊缝区域内,所以从反射信号判断刚好处在工件底部焊缝表面或近表面的缺陷具备端角反射的必要条件,需要给予关注并进一步分析其是否为端角反射。

### 4.2 根据静态波形辨识

基于 2.3 节讨论的结果,可根据斜探头波型种类、探头角度、回波信号的尖峰数目、尖峰水平刻度位置信息来识别端角反射。不过端角反射并非一定能同时显示所有的尖峰即尖峰数目达到理论最大值。所以尖峰数目没到理论最大值时未必不是端角反射,

需结合其它方法判断,而尖峰达到最多数目且水平位置关系符合 2.3 节讨论结果的很可能就是端角反射。

## 4.3 根据动态波形辨识

### 4.3.1 旋转探头动态波形

探头在与焊缝垂直的位置(疑似端角反射体产生最大回波的位置)以入射点为原点,分别顺时针和逆时针旋转探头,若任意方向旋转时波幅均降低迅速且明显,则该反射回波可能是端角反射产生的。因为当探头转动后,端角反射波不能(大部分不能)沿入射路径方向返回,所以回波信号很低。

### 4.3.2 垂直焊缝前后移动探头动态波形

根据第 1 节中所述端角反射的特点,可在出现疑似端角反射信号时,探头垂直焊缝前后移动,观察动态波形。若在探头的一定移动范围内该信号水平刻度基本不变(理论上波幅也应该基本不变),则该信号很可能是端角反射回波。

## 4.4 根据入射角度与端角反射率的关系辨识

对于横波斜探头的扫查,根据图 4 入射角  $\alpha_s$  与端角反射率的关系,选用不同入射角即不同  $K$  值的探头扫查疑似存在端角反射体的区域,如果反射声压与探头  $K$  值的对应关系与图 4 所示一致,则说明是端角反射,反之则不是。例如  $K = 1$  时,回波声压很高, $K = 1.8$  时,回波声压很低,则说明横波入射角度与回波声压关系符合端角反射的规律,该区域应该存在端角反射体。实际判断时可以多选用几个不同  $K$  值的探头,以提高辨识的可靠性。

## 5 总结

- 1) 在不考虑波型转换的情况下,探头在垂直于焊缝方向的一定范围内移动时,端角反射声程不变;
- 2) 端角反射的波形转换路径可以通过入射角、介质声速等信息进行定量分析;
- 3) 端角反射过程中的波形转换对端角反射率有直接影响;
- 4) 位置、静态波形、动态波形等信息可作为端角反射辨识的参考依据。

## 参考文献

- [1] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:44.
- [2] 刘智. 横波在端角反射中的理论研究[J]. 东北电力技术,2006(9):5-8.

(下转第 134 页)

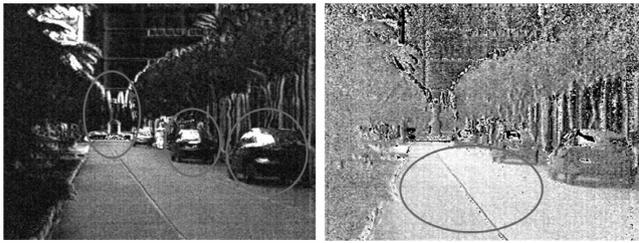


图14 道路偏振度图像(左)和道路偏振角图像(右)

图13和图14是在道路上进行探测,视场中同时存在人造规则目标(马路),人造不规则目标(汽车和雕像)和自然目标(两边的树)。从图上可以清晰看见偏振图像基本上将所有的目标全部描绘出来。而偏振角图像对于人造目标成像比较清晰,对于自然背景依旧成像杂乱无章。

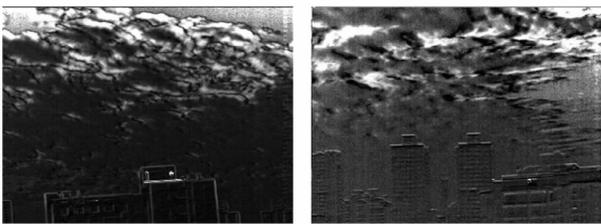


图15 云彩偏振度图像

图15是专门对云彩进行偏振度采集,发现云彩也具有较好的偏振效应,对于大气探测、天气预报等有良好的应有前景。

## 5 结论

本文首先阐述了长波红外偏振探测的原理模型,并根据其原理设计搭建了一套长波红外偏振探测装置。在实验室环境中,利用反射起偏的原理,对这套探测装置进行了性能检测分析,通过实验结果的计算分析,验证了该探测装置具有较好的性能指标。同时,通过这套探测装置进行了相关典型目标的长波红外偏振成像实验,通过辐射成像、偏振度成像及偏振角成像三种方式的对比研究,得出长波红外偏振成像的特点与优势,对于实际应用中具有一定的意义与价值。

## 参考文献

- [1] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:15-30.
- [2] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2010:281-284.
- [3] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 上海:中科院上海技术物理研究所教育中心,2008:20-29.

## Analysis and Imaging Performance of LWIR Polarization Detection

LIU Yu-xuan, GU Ming-jian

(Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In order to study the mechanism of LWIR polarization detection, based on the detection of practical, this paper designed established a LWIR polarization detector. In a laboratory environment we carried out the performance testing of the detector. The test results showed that the detector had a good performance. Based on the result, the paper analyzed the factors that influence the detection. At the same time, the article pictured the typical targets in the field, including the artificial target and natural environment. Through comparative analysis of the radiation imaging, the degree of polarization imaging and angle of polarization imaging, the results showed that the infrared polarization imaging had its unique advantages and characteristics, for practical applications there is a certain meaning and value.

**Key words:** LWIR; the degree of polarization; polarization imaging

(上接第128页)

## Discussion on the End-corner Reflection of Ultrasonic and Its Waves Mode Conversion

LING Li-gong

(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environment Protection, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The end-corner reflection of ultrasonic and its characteristics are introduced. In steel-air interface, for example, longitudinal and transverse waves mode conversion and its effect on the time of echo signal transmitting are focused, in the process of the end-corner reflection. On the basis of the above, the causation of the variety of the end-corner reflection ratio and the selection of probe angle in practice are analyzed. Finally, the end-corner reflection identification method in ultrasonic testing of the weld is discussed.

**Key words:** ultrasonic; end-corner reflection; waves mode conversion; reflection ratio