

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.020

# 不锈钢焊缝中超声传播特性及 TOFD 检测方法研究\*

陈振华 郑志远 卢超

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

**摘要:**为提高对不锈钢焊缝内部缺陷的超声检测能力,开展了关于焊缝超声波传播特性及其超声衍射时差法(TOFD)的研究工作。通过调整探头间距(PCS)改变检测声束方向,分析检测声束与柱状晶夹角对检测信号信噪比的影响,提出基于超声TOFD技术的焊缝一次波、二次波检测方法;鉴于二次波检测中特征波结构的复杂性,建立了特征波传播模型以识别二次波特征信号。研究表明,焊缝中传播的超声波声束呈现明显的各向异性特征,柱状晶与检测声束的夹角是检测信噪比的关键影响因素;与探头置于焊缝根部侧和余高侧相对应,需分别采用一次波和二次波检测方法进行TOFD检测;当检测声束与柱状晶夹角在 $35^\circ \sim 48^\circ$ 且检测区域具有较高声压时,可有效提高对焊缝缺陷的检测能力。基于声波传播的各向异性特征提出的超声TOFD一次波和二次波检测方法对于提高奥氏体不锈钢焊缝的超声检测能力具有重要作用。

**关键词:** 超声 TOFD;奥氏体不锈钢焊缝;PCS;信噪比;二次波

**中图分类号:** TG156;TN98      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4099

## Research on wave propagation characteristics in austenite stainless steel weld and ultrasonic TOFD testing technique

Chen Zhenhua Zheng Zhiyuan Lu Chao

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In order to improve ultrasonic testing capability on austenitic stainless steel weld, ultrasonic propagation characters and related ultrasonic time of flight diffraction method (TOFD) were investigated. The direction of detection beam was changed through adjusting the probes center spacing (PCS) to analyze the signal to noise ratio (SNR) varies with the angle between testing beam and columnar grain. And then, the probe distribution method of primary wave and secondary wave based on ultrasonic TOFD technique were proposed. Moreover, the model of wave propagation was constructed to identify the characteristic signal of defect in the light of complex wave structure in secondary wave method. The research indicates that the ultrasonic propagated in the stainless steel weld reflects obvious anisotropy characters, and the angle between columnar grain and detection beam is the main influencing factor to SNR of testing signal. Primary wave method and secondary wave method is respectively adopted for testing, when the probe is located on the side of weld root and reinforcement. The testing capability on stainless steel weld can be effectively improved when the angle between detection beam and columnar grain is within the range of  $35^\circ \sim 48^\circ$  and high beam amplitude is obtained. The primary and secondary wave methods of ultrasonic TOFD based on anisotropic characteristic of wave propagation are very important to improve the ultrasonic testing capability on inner defect of austenitic stainless steel weld.

**Keywords:** ultrasonic TOFD; austenitic stainless steel weld; PCS; signal to noise ratio; secondary wave

### 1 引言

由奥氏体不锈钢焊缝柱状晶引起的声能衰减及散射

极易导致超声波检测信号信噪比恶化、特征信号无法识别,是超声无损检测的难点问题。超声衍射时差技术(time of flight diffraction, TOFD)具有精准度高,可靠性好等优点,是最常用的焊缝无损检测方法之一<sup>[1-3]</sup>。国内外

学者从检测方法优化、检测信号分析、检测过程模拟等方面开展了关于奥氏体不锈钢焊缝超声 TOFD 检测的研究工作,取得了许多有益的结论。检测方法优化是通过标准试块的对照试验判别检测对象的伪缺陷信号、修正声束传播路径及缺陷测量结果<sup>[4-6]</sup>。信号和图像处理则是利用小波包分解技术、时频分析技术、自适应滤波技术、分水岭法的图像分割技术对检测信号及图像进行重构与修正以提高检测精度<sup>[7-13]</sup>。将数值分析与试验方法相结合分析衍射波特征及其传播路径,辨识检测信号中的缺陷特征<sup>[14-15]</sup>。上述研究一定程度上提高了缺陷的定位、定量精度。但是,检测信号难以识别的根源性问题,即超声波衰减及散射的形成机理问题却缺乏充分的研究。事实上,揭示柱状晶引起的声能衰减及散射机理是有效激励与识别缺陷衍射波信号的前提条件,也是方法优化、信号与图像处理的基础。

本文通过改变探头间距 (probes center spacing, PCS) 调整焊缝中检测声束的入射方向,通过试验方法分析检测信号信噪比随声束与柱状晶夹角的变化,揭示检测声波在焊缝中传播的各向异性特征。据此,提出基于超声 TOFD 检测技术的一次波和二次波检测方法及其探头布置方式。鉴于二次波法检测声波传播的复杂性,建立了声束路径模型并推导了用于计算特征波起波位置的数学公式。研究结果显示,焊缝中传播的超声 TOFD 声束呈现显著的各向异性特征,调整声束与柱状晶夹角至特定范围可有效降低声波散射及衰减;当探头布置在 V 形坡口焊缝的根部侧时,调整 PCS 即可优化一次波声束与柱状晶的夹角;当探头必须布置于余高侧时,则必须采用二次波法并需结合二次波声束路径模型实现缺陷衍射波信号的识别。本研究提出的关于奥氏体不锈钢焊缝超声 TOFD 检测的一次波和二次法,对于提高奥氏体不锈钢焊缝的无损检测能力具有重要的参考价值。

## 2 检测试样与试验方法

### 2.1 奥氏体不锈钢焊缝检测试样

焊缝检测试样为 300 mm × 70 mm × 35 mm 的 0Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢对接焊缝,焊缝开 90° 的 V 形坡口,如图 1 所示。图 1(a) 所示为焊缝组织中粗大的柱状晶垂直于坡口生长,穿过多道焊焊道后,随着不断接近焊缝中心,其生长方向趋于垂直于焊缝表面。图 1(b) 所示为按焊道和柱状晶生长趋势描边而得的焊缝组织结构模型,体现了典型的奥氏体不锈钢焊缝组织结构特征。

### 2.2 试验方法

垂直于上述焊缝截面中部及坡口中部加工直径 3 mm、长 20 mm 的横孔。采用中心频率 5 MHz、晶片直

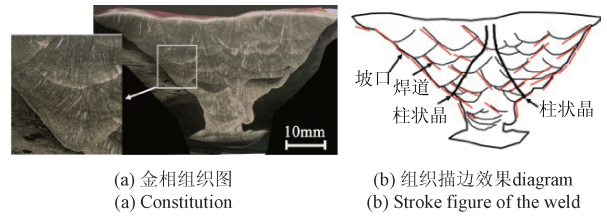


图 1 奥氏体不锈钢焊缝组织结构特征

Fig. 1 Feature of austenite stainless steel weld structure

径 6 mm 的 TOFD 专用探头,并配备可使主声束以 60° 折射角入射至焊缝的专用斜楔开展试验工作,实测探头前沿为 8 mm。收发探头按焊缝中心轴线对称布置,探头间距  $PCS = 2S$ ,探头布置及人工缺陷位置如图 2 所示。常规 TOFD 检测的特征信号包括直通波、底波、缺陷端部衍射波,各特征波信号的到达时间 (起波时间)  $t(d, S)$  表示如下:

$$t(d, S) = \frac{2\sqrt{(S^2 + d^2)}}{c_l} + 2t_0 \quad (1)$$

式中:  $S$  为  $PCS$  的 1/2,  $d$  为缺陷深度,  $c_l$  为纵波声速,  $t_0$  为楔块延迟。  $d = 0$  时,  $t(0, S)$  为直通波起波时间;  $d =$  试样厚度  $h$  时,  $t(h, S)$  为底波起波时间。本研究实测探头延时  $2t_0 = 5.5 \mu s$ 、纵波声速  $c_l = 5900 \text{ m/s}$ 。

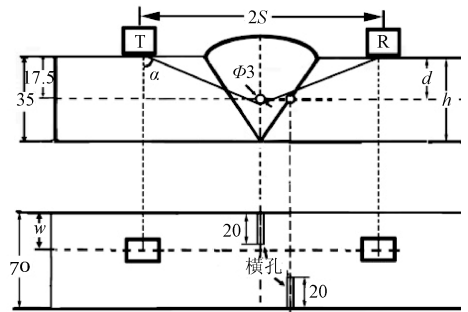


图 2 试验方法

Fig. 2 Testing method

为分析由组织结构引起的声波传播各向异性特征,将探头分别布置于焊缝根部侧和焊缝余高侧,并且通过改变  $PCS$  调整检测区域中入射声束与柱状晶生长方向的夹角,如图 3 所示。两探头以焊缝中心轴线对称放置时,设焊缝中心轴线上深度  $d$  处覆盖的检测声束方向为  $\alpha$ ,则该区域一次波检测声束与柱状晶生长方向的夹角  $\beta$  可表示如下。

探头布置于根部侧:

$$\beta_{\text{根部}} \leq 90^\circ \quad (2)$$

探头布置于余高侧:

$$0 \leq \beta_{\text{余高}} \leq 90^\circ \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{S}{d}\right) \quad (4)$$

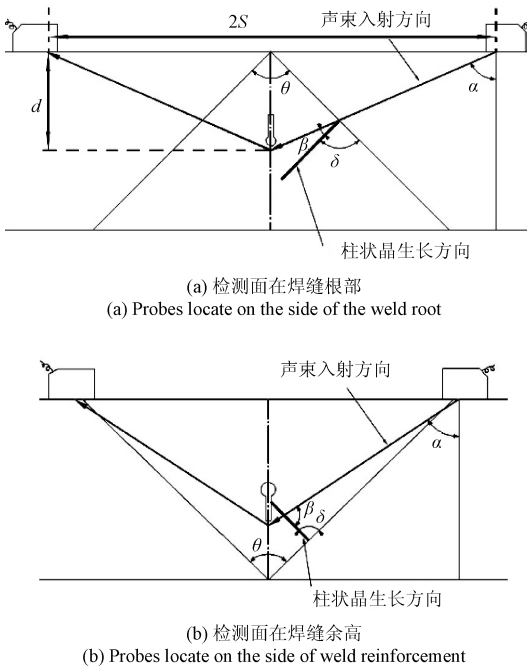


图 3 检测声束与柱状晶夹角关系

Fig. 3 The relationship of included angle between testing beam and columnar grain

式中： $\theta = 90^\circ$ ； $\delta$  为晶粒与坡口的夹角，由于晶粒垂直于坡口生长并随着接近焊缝中心逐渐趋向于垂直焊缝表面生长，与检测声束相交的柱状晶取向角度  $\delta$  的范围为  $45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ 。

### 3 焊缝超声 TOFD 检测声束的各向异性特征

#### 3.1 检测声束传播的各向异性特征

设置  $PCS = 76 \text{ mm}$ ，将探头分别布置在焊缝余高侧和根部侧并提取超声 TOFD 检测信号，如图 4 所示。由式 (1) 计算可知，此时直通波位于  $18.38 \mu\text{s}$ 、缺陷波位于  $19.90 \mu\text{s}$ 、底波位于  $23.01 \mu\text{s}$ ，计算值与根部侧检测信号一致，如图 4(a) 所示。然而，在余高侧提取的检测信号中却只能分辨底波信号，通过调节  $PCS$  无法获得有效的缺陷衍射波特征，如图 4(b) 所示。据式 (2) ~ (4) 可知，其他检测参数均相同仅检测面不同时，只会导致柱状晶与检测声束夹角  $\beta$  的差异，由此引起的检测信号差异显著反映了超声波传播的各向异性特征。

缺陷衍射波信号的信噪比与晶粒散射密切相关，晶粒散射越大、信噪比越低。因此，采用检测信号信噪比描述超声波传播各向异性特征。如图 4(a) 所示，检测信号信噪比  $R$  定义为：

$$R = \frac{S_F}{S_{NR}} \quad (5)$$

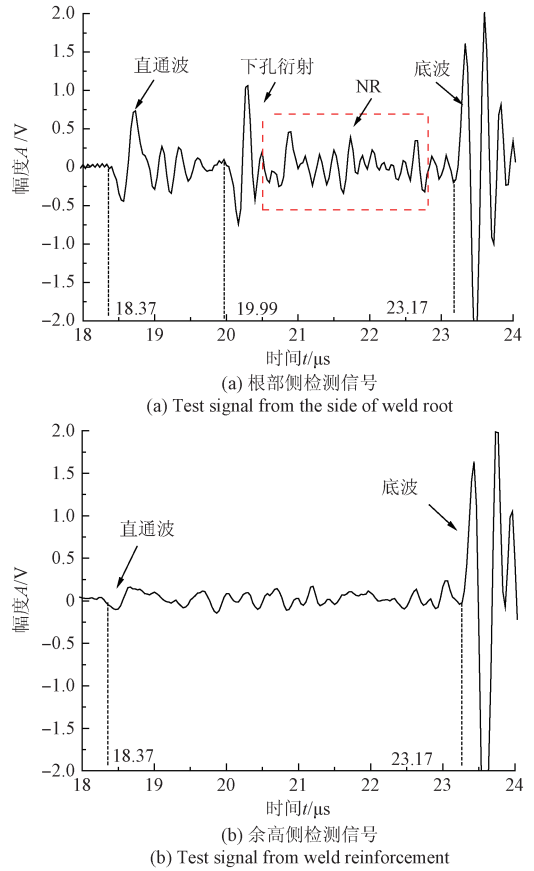


图 4 探头分别布置于焊缝两侧的检测波形

Fig. 4 Test signals picked from two sides of weld

式中： $S_F$  为缺陷衍射波的最高幅值， $S_N$  为缺陷衍射波和底波之间噪声信号  $NR$  的最高幅值。

将探头布置于焊缝根部侧提取有效的缺陷衍射波信号，通过改变探头间距  $PCS$  细致改变  $\beta$  夹角的范围，分析信噪比  $R$  随  $\beta$  角范围的变化趋势。图 5(a) 所示为衍射波幅度随  $PCS$  的增大呈下降趋势，在  $PCS = 71$  和  $91 \text{ mm}$  处出现局部幅度突增。幅度随  $PCS$  的整体下降是由于检测声束声程及扩散衰减随  $PCS$  增大引起的；在  $PCS = 71 \text{ mm}$  时的幅度局部突增则是由于此时  $60^\circ$  入射声束主轴交点正好位于缺陷下端，声束主轴附近较高的声压补偿了声波的扩散衰减，使得衍射波局部突增。然而，在  $PCS = 91 \text{ mm}$  时声束主轴早已远离横孔端部，该处衍射波幅度的局部突增显然与声束主轴是否靠近缺陷端无关。此外，图 5(b) 所示为  $PCS = 91 \text{ mm}$  时的检测信号信噪比  $R$  最高，仅因幅度的小幅突增显然不足以使该位置信噪比达到最高，因此可能的原因只能是此时柱状晶组织结构散射及衰减显著下降。可推断， $PCS = 91 \text{ mm}$  时，尽管声程增大和声束主轴偏移使横孔缺陷形成的衍射波幅度降低，但在该检测声束入射角下，由柱状晶引起的声能衰减和散射更小，使得衍射波幅度局部突增并且使信

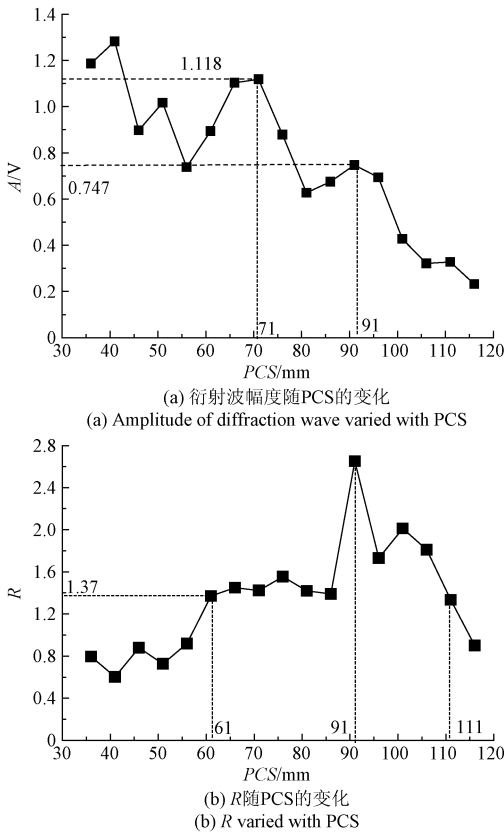


图5 缺陷端衍射波幅度及信噪比随 PCS 的变化  
Fig.5 Amplitude and SNR of defect's diffraction wave varied with PCS

噪比达到最高。

为具体讨论检测声波传播各向异性与焊缝组织结构的内在关联,计算各 PCS 下的声束与柱状晶生长方向的夹角  $\beta$ ,并分析其对检测信号信噪比  $R$  的影响。设检测声束在焊缝中部孔附近的方向角  $\alpha$  不变且仅与探头间距 PCS 和检测深度  $d$  相关(式(4));与检测声束相交的柱状晶生长方向  $\delta$  的范围为  $45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ ,因此  $\beta$  角也存在一范围,即  $\beta_{\max} < \beta < \beta_{\min}$ ,据式(2)~(4)可计算探头分别置于焊缝根部侧和余高侧  $\beta$  角范围( $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ )随 PCS 的变化。为简化分析过程,还定义了  $\beta_{\max}$  和  $\beta_{\min}$  的均值  $\beta_m$ ,其中  $\beta_m$  根部表示探头置于焊缝根部时的  $\beta_m$ 、 $\beta_m$  余高表示探头置于焊缝余高时的  $\beta_m$ 。图6所示为探头分别布置于焊缝根部侧和余高侧时,  $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$  及  $\beta_m$  随 PCS 的变化曲线,相同 PCS 下根部的  $\beta$  角范围显著小于余高的  $\beta$  角范围,  $\beta_m$  余高显著大于  $\beta_m$  根部。结合图5分析可知,探头置于根部侧且 PCS = 61 ~ 111 mm 时,  $R > 1$ ,此时  $35^\circ < \beta_m$  根部  $< 48^\circ$ ;当 PCS = 91 mm 时,信噪比  $R$  最大,此时  $\beta_m$  根部 = 44.5°。因此,可推断  $35^\circ < \beta_m$  根部  $< 48^\circ$  可获得较小的晶粒散射和衰减,  $\beta_m$  根部 = 44.5° 时晶粒散射和衰减最小。当探头布置于余高侧、PCS = 20 mm 时,  $\beta_m$  余高 = 44.5°,本

应同样达到较小的柱状晶散射与衰减。然而,此时声束主轴距横孔 11.7 mm,横孔附近检测波能量很低以至于无法在缺陷端激励有效的衍射波。尽管可通过增大 PCS 使声束主轴进一步靠近横孔,但由于 PCS = 15 ~ 61 mm 时,  $\beta_m$  余高随 PCS 的增速很大,导致 PCS 略微增大(例如增大 5 mm)  $\beta_m$  余高即可超出  $50^\circ$  并使检测声束发生剧烈衰减和散射。因此,余高侧布置探头时,无法在保证  $\beta_m$  余高处于  $[35^\circ \sim 48^\circ]$  的同时,使检测声束靠近缺陷端部以获得较高的检测声压。综上,  $\beta_m$  角度范围为  $[35^\circ \sim 48^\circ]$  可实现缺陷的 TOFD 检测,柱状晶与检测声束夹角均值  $\beta_m$  在  $45^\circ$  左右时可获得最低的声波散射和衰减;此外,为能够激发较高的缺陷衍射波,应在保证角度条件的同时使主声束尽量靠近检测的目标区域。

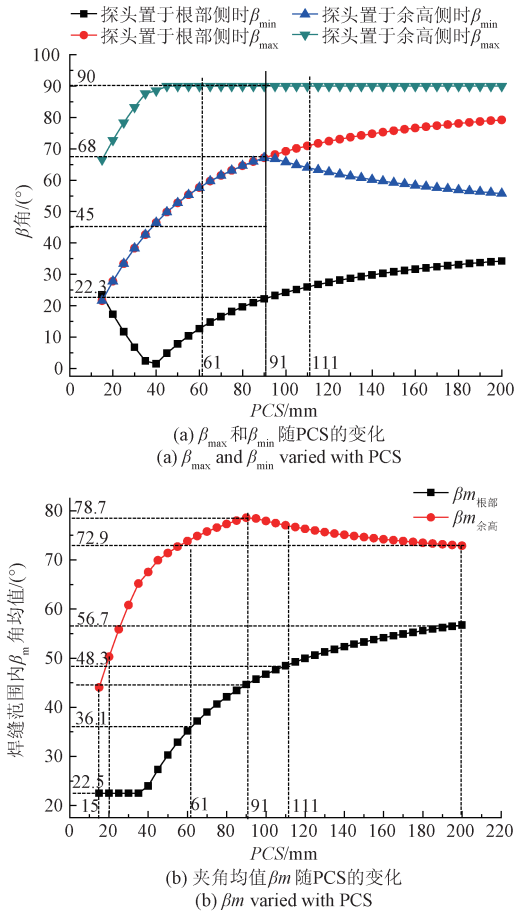


图6 横孔处声束与晶粒生长方向的夹角  $\beta$  随 PCS 变化  
Fig.6 The relationship between PCS and included angle  $\beta$  of ultrasonic beam and columnar grain

### 3.2 超声 TOFD 一次波检测效果

采用上述 60°探头布置于焊缝根部进行超声 TOFD-D 扫描成像试验。为便于对比,将完好焊缝试块与带横孔缺陷的焊缝试块拼接在一起进行 D 扫描成像, PCS 设置为 91 mm, D 扫描图如图7所示。从图7(a)的焊缝扫

描图中容易分辨缺陷位置,焊缝中孔位于(22.49  $\mu\text{s}$ , 92 mm)、坡口中孔位于(22.67  $\mu\text{s}$ , 132 mm),D 扫描显示的缺陷分布与试样人工缺陷情况一致。图 7(b)、(c)分别为焊缝中孔和坡口中孔的 A 扫描信号,焊缝中孔检测信号的信噪比  $R=2.9$ 、坡口熔合线上孔检测信号的信噪比  $R=2.4$ 。

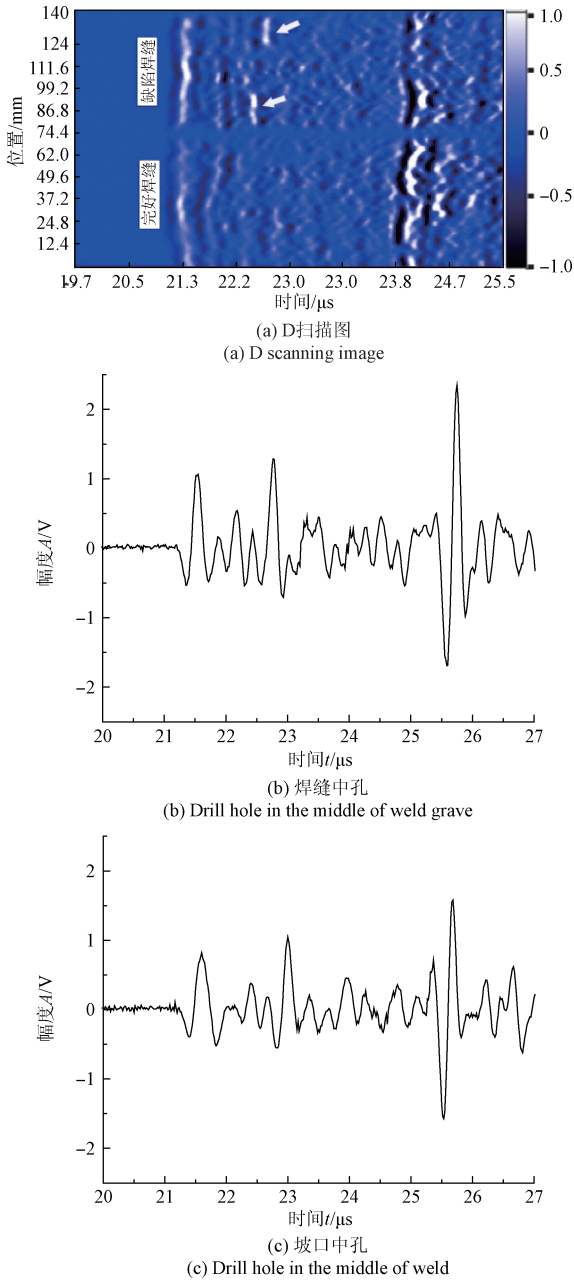


图7 探头置于焊缝根部的检测效果

Fig.7 Testing effect of the probe located on the root side of weld

探头布置于焊缝根部时,容易通过调整  $PCS$  获得合适的  $\beta m$  范围,并且同时能够保证检测声束主轴与缺陷

端部的距离较小以形成较大的端部检测波能量,因此可获得较好的超声 TOFD-D 扫描效果。

### 4 超声 TOFD 二次波检测方法

#### 4.1 二次波检测的声波传播路径分析

检测探头有时必须布置在焊缝余高侧进行检测。此时,为获得符合要求的检测声束与柱状晶的夹角,需通过一次纵波声束经底面反射至焊缝的二次波进行检测。二次波检测的特征波信号包括缺陷衍射信号、变型波衍射信号、结构反射波信号,各特征信号处于相近的时域范围、容易混淆,精确确定各特征波的时域起波位置非常重要。为此,建立二次波检测的声波传播路径模型,设板厚  $h$ 、板中部为深度为  $d$  的横孔;探头相对横孔为中心对称放置,间距为  $2S$ ,如图 8 所示。按传播路径及波型转换定义 5 种可能的特征波如下,特征波 1:纵波声束直接经底面反射至接收探头;特征波 2:纵波声束经底面二次反射后,传播至接收探头;特征波 3:纵波声束经底面反射后遭遇横孔端形成衍射纵波,衍射纵波传播至底面后反射至接收探头;特征波 4:探头发射的高能量横波声束经底面反射转换为纵波后入射至接收探头;特征波 5:探头发射的横波声束入射至横孔端发生衍射和波型转换形成衍射纵波入射至底面后反射至接收探头;图 8(a)所示为上述假设特征波 1~3 的声波传播路径、图 8(b)所示为上述假设特征波 4、5 的声波传播路径。

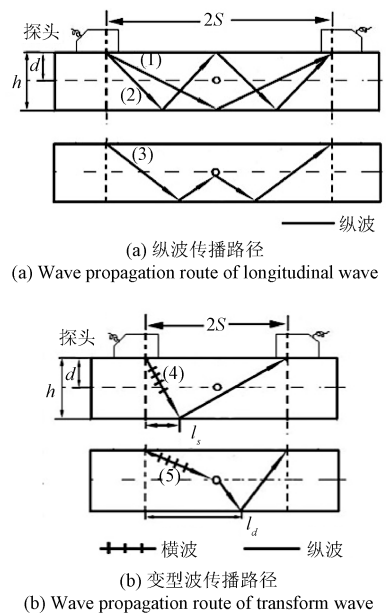


图8 超声 TOFD 检测二次波传播路径

Fig.8 Wave propagation path of ultrasonic TOFD secondary wave test

按图8(a)模型计算未发生波型转换的纵波传播路径,当传播路径以两探头中心轴线对称时,声程最短,对应的传播时间为特征波在时域信号中的起波位置。设检测信号中特征波1起波位置 $t_1$ 、特征波2的起波位置 $t_2$ 、特征波3位置为 $t_f$ ,则:

$$t_f(d) = \frac{2\sqrt{S^2 + (2h - d)^2}}{c_l} + 2t_0 \quad (6)$$

$$t_1 = t_f(h) \quad (7)$$

$$t_2 = t_f(0) \quad (8)$$

式中: $d$ 为缺陷深度, $2S$ 为探头间距、 $c_l$ 为纵波声速, $h$ 为板厚。

按照图8(b)模型可推导变型波到达时间,设横波声速为 $c_s$ 、探头发射的横波声束与底面相交的位置(反射点)距发射探头入射点的横向距离为 $l_s$ ;则特征波4到达时间 $t_s$ 可表示为:

$$t_s(l_s) = \frac{\sqrt{l_s^2 + h^2}}{c_s} + \frac{\sqrt{(2S - l_s)^2 + h^2}}{c_l} + 2t_0$$

$$0 < l_s < 2S \quad (9)$$

特征波4在检测信号中的起波时间为 $t_s$ 的最小值,则:

$$\frac{\partial(t_s(l_s))}{\partial l_s} = 0 \quad (10)$$

即:

$$\frac{l_s}{c_s \sqrt{l_s^2 + h^2}} + \frac{l_s - 2S}{c_l \sqrt{(2S - l_s)^2 + h^2}} = 0 \quad (11)$$

据式(11)可计算 $l_s$ ,将 $l_s$ 代入式(9)可解出变型波一次底波在检测信号中的起波位置。

同理,设特征波5与底面的交点距发射探头入射点的距离为 $l_d$ ,则其到达接收探头的的时间 $t_d$ 为:

$$t_d(l) = \frac{\sqrt{\left(l_d - \frac{(h - d)(2S - l_d)}{h}\right)^2 + d^2}}{c_s} +$$

$$\frac{\sqrt{(2S - l_d)^2 + h^2}}{c_l} + \frac{\sqrt{\left(\frac{(h - d)(2S - l_d)}{h}\right)^2 + (h - d)^2}}{c_l} + 2t_0 \quad (12)$$

式中: $0 < l_d < 2S$ ,变型波一次底波在检测信号中的起波时间为 $t_s$ 的最小值。则:

$$\frac{\partial(t_d(l_d))}{\partial l_d} = 0 \quad (13)$$

即:

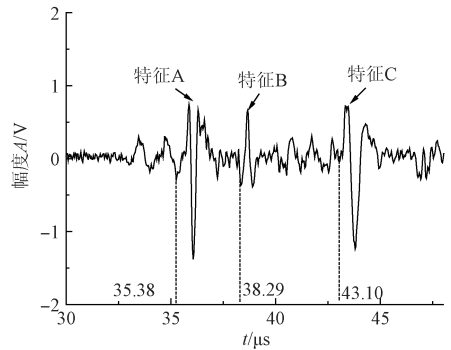
$$l_d - \frac{(h - d)(2S - 2l_d)}{h} - \frac{(h - d)^2(2S - l_d)}{h^2} + \frac{c_s \sqrt{\left(l_d - \frac{(h - d)(2S - l_d)}{h}\right)^2 + d^2}}{c_l} = 0$$

$$\frac{l_d - 2S}{c_l \sqrt{(2S - l_d)^2 + h^2}} + \frac{(h - d)^2(2S - l_d)}{c_l h^2 \sqrt{\left(\frac{(h - d)(2S - l_d)}{h}\right)^2 + (h - d)^2}} = 0 \quad (14)$$

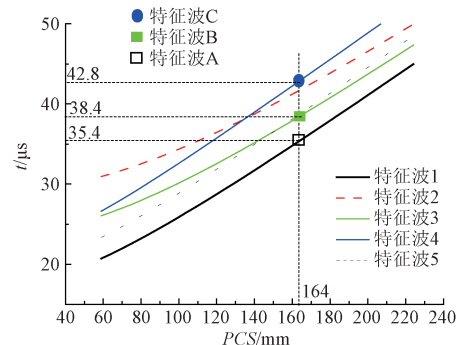
据式(14)可计算 $l_d$ ,代入式(12)可得变型波一次衍射波在检测信号中的起波位置。

### 4.2 超声 TOFD 二次波检测效果

对奥氏体不锈钢焊缝进行超声 TOFD 二次波检测,并依据式(6)~(14)确定检测信号中各脉冲信号对应的特征波传播类型。由于二次波检测的声程较长,由声束扩散引起的衰减将非常强烈。因此,试验采用大晶片探头进行检测,探头直径 12.7 mm、中心频率 5 MHz、斜楔角度 60°、实测前沿长度为 12 mm、延迟  $2t_0 = 5.5 \mu\text{s}$ 。将探头布置于焊缝余高侧且相对焊缝中心轴线对称放置,手动细致调整探头间距  $PCS = 164 \text{ mm}$  时,检测信号中出现明显的脉冲波特征,分别标示为特征波 A、特征波 B、特征波 C,如图9(a)所示。据式(6)~(14)绘制路径模型中各特征波起波位置随 PCS 的变化曲线,如图9(b)所示。将检测信号中特征波 A~C 的起波时间标注在图9(b)上并进行对照分析显示:特征波 A 的起波时间与模型特征波1起波时间随 PCS 变化的曲线重合、特征波 B



(a) 焊缝中孔的二次波检测信号(手动)  
(a) Testing signal of hole in the middle of weld (manual testing)



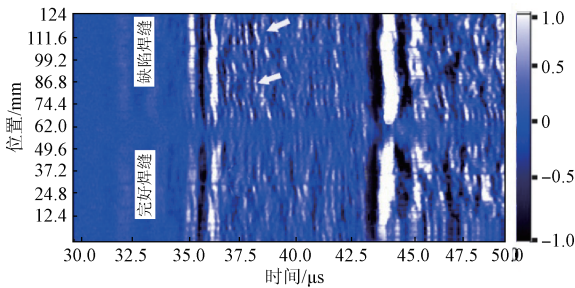
(b) 二次波检测信号特征波随PCS的变化  
(b) Arrival time of characteristic echoes in modal varied with PCS

图9 超声 TOFD 的二次波检测信号分析

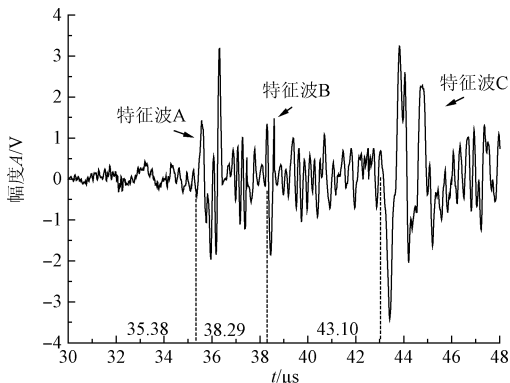
Fig. 9 Analysis of ultrasonic TOFD secondary wave testing signal

的起波时间与模型特征波 3 起波时间随 PCS 变化的曲线重合、特征波 C 的起波时间与模型特征波 4 曲线重合,在检测信号中未发现与特征值波 2) 及特征波 5) 对应的脉冲波形。据此,可确定检测信号中的特征波 B 为探头发射的纵波声束经底面反射后遭遇横孔端形成的衍射纵波,即特征 B 为二次波检测的缺陷衍射特征波。此外,特征波 2 的传播路径最长且经两次反射,导致特征波 2 幅度较小;由于模型特征波 2 与特征波 4 的到达时间相差很小,特征波 2 可能淹没于特征波 4 中以致观察不到。模型特征波 5 的路径与焊缝柱状晶呈较大角度、检测声能衰减较高,衍射波能量相对较低,导致检测信号中未观察到与模型特征波 5 对应的检测波特征。

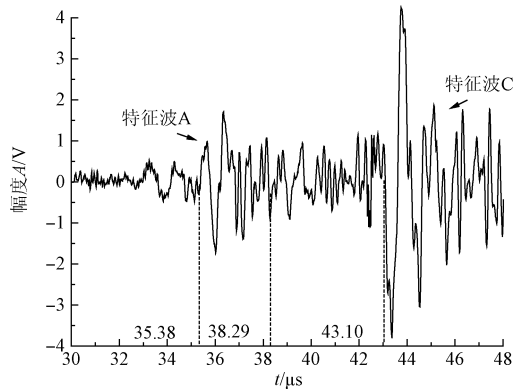
由于自动扫描过程中很难对探头进行细致调整,并且连续移动中容易使探头与工件的耦合状况恶化,需通过提高仪器增益增强检测波能量。然而,增益的提高导致仪器噪声及结构噪声的增大,使得 D 扫描图像质量变差。图 10(a)所示是 PCS = 164 mm 时的超声 TOFD-D 扫描检测图像,从 D 扫描图中可发现缺陷(由白色箭头指示)但较难区分缺陷的准确位置及尺寸。图 10(b)所示为从 D 扫描图焊缝中孔处提取的 A 扫描信号,自动扫描的最佳信噪比降低至 1.52。尽管如此,与余高侧的一次波检测信号中仅能分辨底波信号相比,二次波检测方法对焊缝缺陷的检测能力已有明显提高。



(a) 二次波D扫描成像  
(a) D scanning imaging of secondary wave



(b) 焊缝中孔二次波检测信号  
(b) Testing signal of hole in the middle of weld



(c) 无缺陷处检测信号  
(c) Testing signal of no defect weld

图 10 奥氏体不锈钢焊缝的超声 TOFD 二次波检测信号及其 D 扫描图像

Fig. 10 Ultrasonic TOFD secondary wave testing signal of austenite stainless steel weld and its D scanning image

### 5 结论

定义焊缝柱状晶与检测声场夹角范围及夹角均值分析检测声束方向对超声波传播各项异性特征的影响,柱状晶与检测声束夹角、缺陷端检测声压强度是影响超声散射及衰减、检测信号信噪比的重要因素。

应尽可能将探头布置于 V 形坡口焊缝的根部侧,通过调整探头间距将检测声束与柱状晶夹角均值调整至约 45°或 35°~48°,并同时在此条件下使声束主轴尽量靠近检测区域以激发较高的端部衍射波,由此可获得较好的检测信号信噪比。

当探头布置于焊缝余高侧时,为获得较小的声束与柱状晶夹角,需采用二次波法进行检测。鉴于波型结构和传播路径的复杂性,结合二次波检测声束的传播模型及其计算公式可确定缺陷特征波的起波位置。超声 TOFD 二次波的 D 扫描图像可显示缺陷但较难确定缺陷的准确位置及尺寸。尽管如此,该方法比在余高侧布置探头的一次波检测方法的检测效果已有明显提高。

### 参考文献

[ 1 ] 史俊伟,刘松平. 浅谈超声衍射时差法(TOFD)检测技术[J]. 航空制造技术, 2009(S1): 96-100.  
SHI J W, LIU S P. Ultrasonic TOFD technology for detection [ J ]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S1): 96-100.  
[ 2 ] NATH S K, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V, et al. Reliability assessment of manual ultrasonic time of flight diffraction ( TOFD )

- inspection for complex geometry components[J]. *NDT&E International*, 2010, 43(2): 152-162.
- [3] 黄刚. 基于超声透射时差法的金属棒缺陷检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4): 818-826.  
HUANG G. Research on defect detection system for material based on ultrasonic transmission method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 818-826.
- [4] PLOIX M A, GUY P, CHASSIGNOLE B, et al. Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainlesssteel welds; Realistic input data for NDT numerical modeling [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7):1729-1736.
- [5] 许远欢, 葛亮, 付千发. 核设备不锈钢堆焊层对超声检测的影响[J]. *无损检测*, 2013, 35(8): 18-21.  
XU Y H, GE L, FU Q F. The influence of stainless steel cladding of nuclear components on ultrasonic examination[J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(8): 18-21.
- [6] 卢威, 聂勇, 许远欢, 等. 宽频带窄脉冲 TRL 探头在奥氏体不锈钢焊缝超声检测中的优越性[J]. *无损检测*, 2013, 35(6): 77-80.  
LU W, NIE Y, XU Y H, et al. The advantage of using broad bandwidth and narrow pulse TRL probe for ultrasonic inspection of austenitic stainless steel welds[J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(6): 77-80.
- [7] 李建忠, 刘国奇, 陈振华, 等. 基于小波包分解的不锈钢焊缝超声 TOFD 检测信号及缺陷信号提取[J]. *无损检测*, 2015, 37(1): 38-41.  
LI J ZH, LIU G Q, CHEN ZH H, et al. Defect signal extraction on ultrasonic TOFD testing signal of stainless steel weld based on wavelet packet decomposition [J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(1): 38-41.
- [8] PRAVEEN A, VIJAYAREKHA K, VENKATRAMAN S T, et al. Signal quality enhancement using higher orderwaveletsor ultrasonic TOFD signals from austenitic stainless steel welds [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(7): 1288-1292.
- [9] 王柄方, 韩赞东, 原可义, 等. 基于时频分析的奥氏体焊缝超声检测信号处理[J]. *焊接学报*, 2011, 32(5): 25-28, 114.  
WANG B F, HAN Z D, YUAN K Y, et al. Signal processing in ultrasonic test of austenitic welds based on time frequency analysis [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(5): 25-28, 114.
- [10] CHEN H, ZUO M J, WANG X D, et al. An adaptive Morlet wavelet filter for time-of-flight estimation in ultrasonic damage assessment [J]. *Measurement*, 2010, 43(4): 570-585.
- [11] 盛朝阳, 刚铁, 迟大钊. 基于分水岭方法的超声 TOFD 检测图像分割 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 35-40.  
SHENG ZH Y, GANG T, CHI D ZH. Segmentation of ultrasonic TOFD testing image based on watershed method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 35-40.
- [12] 杜云朋, 王建斌, 靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7): 683-687.  
DU Y P, WANG J B, JIN X Q. Defect detection of ultrasonic guided wave pipeline using de-noising method based on wavelet modulus maximum [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(7): 683-687.
- [13] 任洁, 江剑. 声学法测棒材体积模量的自动识别算法 [J]. *国外电子测量技术*, 2016, 35(9): 105-109.  
REN J, JIANG J. Automatic recognition algorithm for ultrasonic measurement of rod-shaped material's bulk modulus [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(9): 105-109.
- [14] FERRAND A, DARMON M, CHATILLON S. Modeling of ray paths of head waves on irregular interfaces in TOFD inspection for NDE [J]. *Ultrasonics*, 2013, 54(7): 1851-1860.
- [15] 赵新玉, 刚铁, 徐春广, 等. 各向异性堆焊结构中超声传播模拟与缺陷回波预测 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 21-27.  
ZHAO X Y, GANG T, XU CH G, et al. Ultrasonic beam simulation and flaw signal prediction in anisotropic buttering weldment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 21-27.

## 作者简介



陈振华, 1982 年出生, 2004 年于江西师范大学获得学士学位, 2010 年于北京工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为超声波无损检测技术及其系统、测控技术及仪器。

**Chen Zhenhua** received B. Sc. from Jiangxi Normal University in 200 and Ph. D. from Beijing University of Technology in 2010, respectively. Now he is associate professor in NanchangHangkong University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing and related instrument, measurement and control technology and instrument.