

DOI: 10.11973/wsje201508013

# 超声 TOFD 检测声波在不锈钢焊缝中的传播特性及其应用

孟贵云<sup>1</sup>, 张世宏<sup>2</sup>, 陈振华<sup>3</sup>, 李新蕾<sup>1</sup>, 王 宏<sup>2</sup>

(1. 杭州华安无损检测技术有限公司, 杭州 310023; 2. 新疆科瑞检测科技有限公司, 克拉玛依 834009;  
3. 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:** 由焊缝内部粗大柱状晶引起的声波衰减及散射噪声会给超声检测带来较大的困难。采用超声 TOFD 检测方法对奥氏体不锈钢焊缝进行检测; 通过调整探头参数在焊缝中形成入射方向各异的检测声束, 分析焊缝组织结构在各种声场条件下对缺陷衍射波幅度及信噪比的影响。结果显示: 不锈钢焊缝中的超声波传播具有明显的各向异性特征, 焊缝中不连续界面的取向与声束的夹角对检测波衰减及散射具有显著影响, 优化声束入射方向能有效提高检测波信噪比; 此外, 建立了焊缝组织结构模型进一步解释了声波传播各向异性的形成机理, 为优化检测参数提供了可靠的理论依据。

**关键词:** 焊缝组织; 信噪比; 超声 TOFD; 各向异性

中图分类号: TG156; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2015)08-0051-06

## The Characteristic and Application of the Wave Propagation in Ultrasonic TOFD Testing of Stainless Steel Weld

MENG Gui-yun<sup>1</sup>, ZHANG Shi-hong<sup>2</sup>, CHEN Zhen-hua<sup>3</sup>, LI Xin-lei<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Huan NDT Technology Co., Ltd., Hangzhou 310023, China;

2. Xinjiang Kerui Test Technology Co., Ltd., Karamay 834009, China;

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

**Abstract:** Ultrasonic testing is difficult to be implemented well because of the acoustic noise and attenuation resulted by the big column grain in the weld. In the paper, ultrasonic TOFD method is adopted to inspect the defects in austenitic stainless steel weld. Ultrasonic beam with different incident angle is formed in the weld through adjusting experimental parameters, and then the influence of weld structures on amplitude of diffraction waves and signal-to-noise ratio is analyzed to reveal the ultrasonic propagation in the weld. The results indicate that the wave propagation in the weld shows obvious anisotropy characteristics, and the included angle of the ultrasonic beam and discontinuous boundary in weld have a significant impact on the wave attenuation and scattering, so optimizing the beam direction is liable to enhance noise-signal ratio and testing effect. Moreover, the mechanism of anisotropy is presented by constructing weld modal, which gives reliable theory evidence for optimizing testing parameters.

**Keywords:** Weld structure; Noise-signal ratio; Ultrasonic TOFD; Anisotropy

收稿日期: 2014-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11104129); 无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助项目(ZD201029001)

作者简介: 孟贵云(1980—), 男, 工程师, 主要从事质量管理工作。

奥氏体不锈钢焊接结构被广泛地应用于石油、化工、核电、航空航天等现代工业领域。焊接结构常常在高温高压、腐蚀、冲刷、放射性的恶劣环境下服役, 是完整构件的薄弱区域, 故对其进行无损检测显得非常重要<sup>[1-3]</sup>。超声衍射时差法(Time of Flight

Diffraction) 又称为超声 TOFD 法, 是焊缝无损检测的最有效方法之一, 具有检测信息丰富、抗噪声强、效率高、定位定量准确等优势<sup>[4-6]</sup>。目前, 超声 TOFD 检测方法主要应用于普通钢的检测中, 研究领域包括检测信号处理、检测盲区、检测图像分析、缺陷自动识别等<sup>[7-11]</sup>。由于受焊缝粗大柱状晶组织的影响, 不锈钢焊缝的超声 TOFD 检测信号容易出现强烈衰减、散射及扭曲, 不可避免地会造成缺陷衍射波能量弱、结构噪声强、信噪比低等问题, 其检测工艺并不成熟。焊缝组织结构对超声波传播的影响的机理性研究是提高焊缝超声 TOFD 检测效果的重要基础, 对于优化检测参数、开发新型检测方法、解释检测结果具有重要作用。

笔者将超声 TOFD 检测技术应用于奥氏体不锈钢焊缝的无损检测中, 深入探讨了超声波在焊缝传播的机理性问题。分析了厚板不锈钢焊缝的组织结构特征, 依据焊缝截面的金相图建立分析模型; 通过调整试验参数在焊缝中形成入射方向各异的检测声束, 探讨了焊缝组织中的不连续边界在各种声束入射条件下对衍射波幅度及信噪比的影响。

## 1 试样制备及试验方法

### 1.1 试样制备

检测试样为开 90°V 型坡口的不锈钢对接焊缝, 板厚 35 mm, 焊缝长度 70 mm; 不锈钢牌号为 0Cr18Ni9Ti (石油、核电管道用材), 焊接方式为埋弧焊。在焊缝上截取长 20 mm 的焊缝试样, 经打磨抛光、电解腐蚀后制成金相试样。图 1 为焊缝截面金相图, 图中显示了焊缝坡口及鱼鳞状的焊道熔合线; 柱状晶组织的纤维结构垂直于焊缝坡口、穿过多层焊道往焊缝中心生长; 随着柱状晶不断接近焊缝中心, 其生长方向趋于垂直焊缝表面。焊缝组织中除沿特定方向生长的粗大柱状晶的边界特征外, 多道焊中各焊道间熔合线形成的结构不连续也将对超声波传播产生影响。在对不锈钢进行超声 TOFD 检测时, 超声波的传播特性必然受焊缝组织结构的影响。

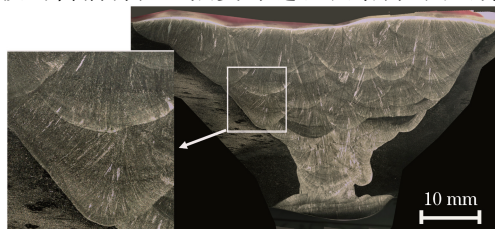


图 1 焊缝金相组织结构

### 1.2 试验方法

垂直于焊缝截面中部加工直径 3 mm, 长 20 mm 的横孔, 如图 2 所示。为凸显焊缝组织结构对超声 TOFD 检测信号的噪声影响, 试验采用中心频率 10 MHz 的超声 TOFD 专用探头; 并配备了三种不同角度斜楔构成 45°、60°、70° 的入射声波。采用超声 TOFD 检测的通用探头布置方式, 两探头的声束入射点间距为  $S$ , 如图 2 所示。通过调整  $S$  可改变主声束交点在焊缝中的位置及焊缝中深度  $h$  处所覆盖声束的传播方向, 此传播方向用  $\beta$  角表示:

$$\beta = \arctan\left(\frac{S/2}{h}\right) \quad (1)$$

改变  $S$  值可将钢中折射角为  $\alpha$  的两探头的声束主轴交点调整到焊缝中缺陷处; 此时缺陷处的覆盖声束的传播方向  $\beta = \alpha$ 、缺陷与余高间焊缝区域的声束传播方向  $\beta > \alpha$ 、与底面间区域的声束传播方向  $\beta < \alpha$ ; 增大  $S$  值可将声束主轴交点调整至焊缝根部, 此时整个焊缝区所覆盖声束传播方向  $\beta > \alpha$ 。因此, 可通过调整  $S$  值来改变焊缝中声束的传播方向以分析声束方向与柱状晶方向夹角对检测信号的影响。

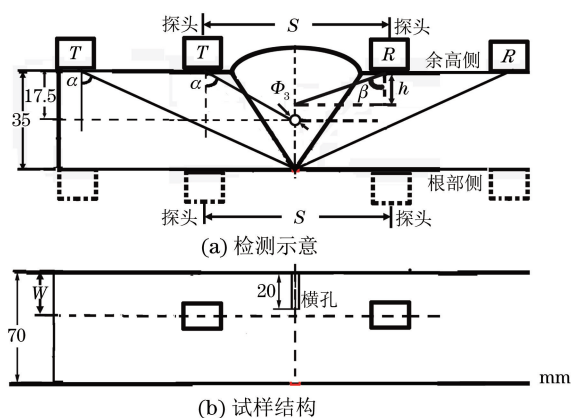


图 2 检测示意及试样结构

## 2 信号分析及特征值定义

采用 10 MHz、60° TOFD 检测专用探头, 分别以相同的试验参数从焊缝余高侧和焊缝根部侧提取检测信号。根据 TOFD 定位公式可将超声 A 扫描信号与焊缝结构相对应:

$$t = \frac{2\sqrt{(S/2)^2 + d^2}}{c} + 2t_0 \quad (2)$$

式中:  $t$  为目标信号的时间位置;  $S$  为探头声束入射点间距;  $d$  为目标信号深度;  $c$  为纵波声速;  $t_0$  为探头延迟。

试验中,  $S$  为 61 mm, 两探头延时和  $2t_0$  为 5.5  $\mu$ s,

声速  $c$  为  $5\,900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。按式(2)可计算目标信号的时间位置: 直通波、底波分别位于时间轴  $15.84$ 、 $21.23\text{ }\mu\text{s}$  处; 横孔上端散射波和下端衍射波相互分离, 分别位于时间轴  $17.15$ 、 $17.62\text{ }\mu\text{s}$  处。图 3(a) 是探头置于焊缝根部侧的检测信号, 与计算值基本一致, 图中 NR 为衍射波-底波区域内的 A 信号; 图 3(b) 是探头置于余高侧的检测信号, 该信号受焊缝组织结构散射及衰减的影响异常强烈, 只能显示底波信号。相同试验参数下从焊缝两侧提取的检测信号具有较大差异, 超声波传播的各向异性特征非常显著。鉴于从余高侧无法提取具有缺陷衍射波特征的一次波检测信号, 而从焊缝根部侧提取的检测信号尽管含有较明显的噪声信号但其衍射波特征信号依然显著, 更适于后续探讨的开展。

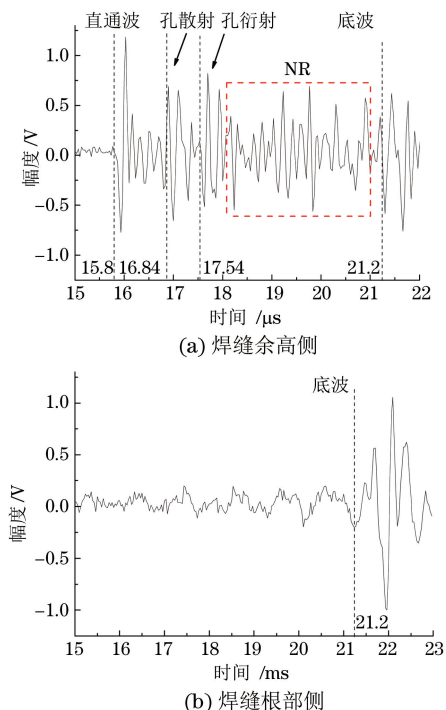


图 3 两种检测面的焊缝超声 TOFD 检测信号

为在不同声场条件下定量分析噪声水平, 定义信噪比  $R_r$  作为检测特征值:

$$R_r = D_{\text{MAX}} / N_{R_{\text{MAX}}} \quad (3)$$

式中:  $D_{\text{MAX}}$  为孔衍射波最大幅度;  $N_{R_{\text{MAX}}}$  为衍射波-底波区域噪声最大幅度, 见图 3;  $R_r$  可表示缺陷至底面(余高侧)的噪声水平。

### 3 检测结果分析

分别采用  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$  探头布置于焊缝根部侧, 提取各  $S$  值下焊缝中横孔缺陷的超声 TOFD 信号, 并按式(2)计算衍射波幅度及信噪比作为检测特征

值。由于调整探头间距等效于调整焊缝区域中检测声束的传播方向; 因此, 特征值(衍射波幅度及信噪比)随  $S$  值的变化趋势亦可反映其与焊缝中柱状晶-入射声束夹角的关系。为避免检测结果受主观因素的干扰, 特征值均为经多次测量后取的平均值。

随着  $S$  值的增大, 由声程增大引起的声波辐射衰减逐渐增大并导致检测波幅度降低。由于声束截面的幅度分布特点, 横孔上覆盖的声波幅度在主声束交点与横孔相交时会出现增大的现象, 这补偿了由声程增大引起的衰减并使得衍射波幅度出现突增。图 4 的试验结果符合上述过程, 当声束主轴交点覆盖到横孔下端附近时引起衍射波突增, 即:  $60^\circ$  探头  $S$  为  $71\text{ mm}$  处、 $70^\circ$  探头  $S$  为  $91\text{ mm}$  处均出现声束主轴交点位于缺陷时的衍射波幅度突增。由于  $45^\circ$  探头受前沿长度及焊缝根部变形的阻挡而无法将主声束交点调整至横孔处( $S$  为  $19\text{ mm}$ ), 衍射波幅度在  $S$  为  $36\sim 80\text{ mm}$  范围内单调递减。此外, 三类探头在  $S$  为  $91\text{ mm}$  时, 衍射波幅度均出现局部增大; 除  $70^\circ$  探头情况,  $45^\circ$  及  $60^\circ$  探头的声束主轴早已离开缺陷端, 因此排除声束主轴交点引起的幅度突变, 而应考虑焊缝组织结构对声波衰减及散射的作用。按式(1)计算可知:  $S$  为  $91\text{ mm}$  时, 横孔处所覆盖声束传播方向均为  $67.4^\circ$ , 可判断此角度覆盖到横孔下端时, 焊缝组织衰减及散射的降低使得衍射波幅度出现了突增。而  $70^\circ$  探头在  $S$  为  $91\text{ mm}$  时, 同时具备检测声波幅度最高(声束主轴交点与横孔相交)及由焊缝组织引起的声波衰减最低( $\beta$  角为  $67.4^\circ$ )两个条件, 因此可获得最高的衍射波幅度, 如图 4 所示。

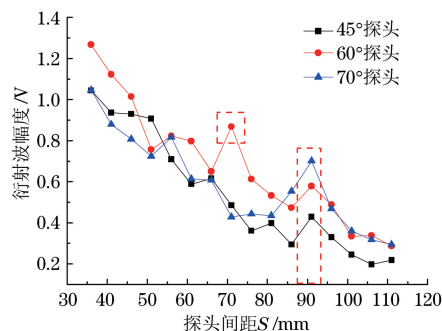


图 4 衍射波幅度随探头端部距离的变化曲线

将横孔下端至焊缝余高区域设为目标区域, 分析该区域在各种入射条件下的声衰减及散射。试验测得了各探头检测信号的信噪比  $R_r$  随  $S$  的变化趋势图(图 5), 信噪比在  $S$  为  $91\text{ mm}$  时最大。因此, 尽管声程的增大及声束主轴交点远离横孔均能导致衍射波幅度降低, 但当声束以  $67.4^\circ$  入射到横孔区域

时,由柱状晶引起的结构噪声及声能衰减降低,使得衍射波幅度突增、目标区域形成的散射噪声降低。图 5(b)显示:60°探头、S 为 91 mm 时的衍射波信噪比最高可达 2.6,此时检测信号如图 6 所示。

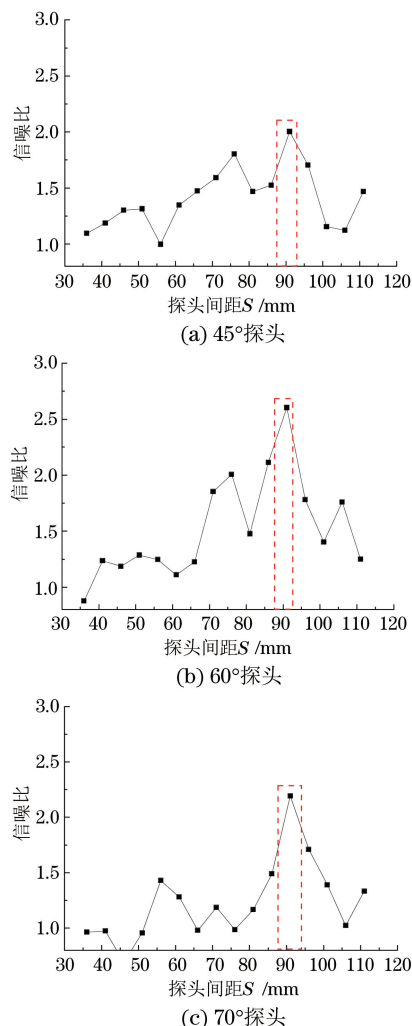


图 5 各探头测得信号的信噪比随探头端部距离的变化趋势

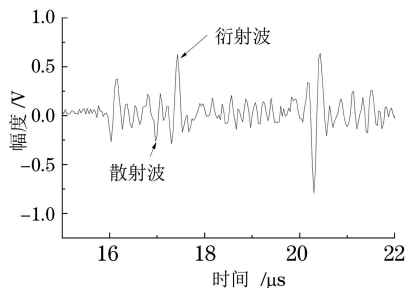


图 6 60°探头间距 S 为 91 mm 时的检测结果

通过测量探头声束截面的声压分布可估计覆盖至目标区域的声压分布情况,图 7(a)是试验测得的探头发射声束的截面声压分布(实测值)情况。S 为 91 mm 时,据式(1)计算可知目标区域中覆盖了 52.5°~67.4°的入射声束。各型探头发射声束在目标区域的

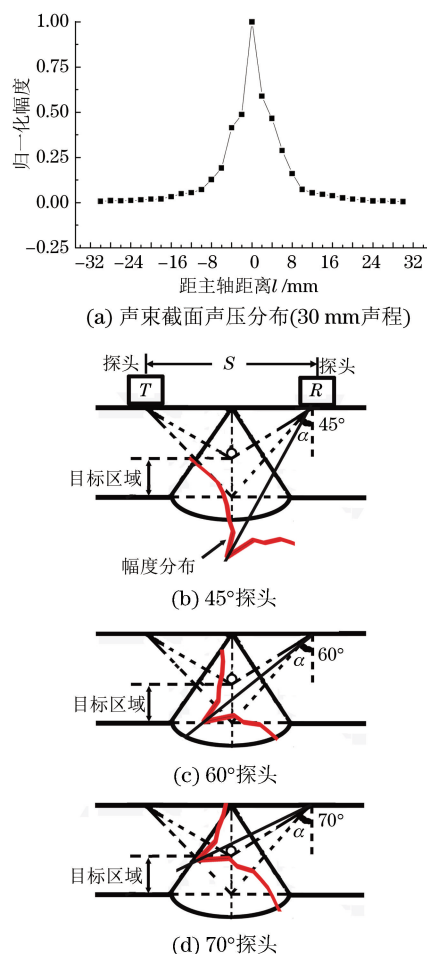


图 7 探头声压截面分布及不同探头检测时,焊缝中声束幅度分布示意

声压分布并不相同,如图 7(b)所示;对于 70°探头,主声束交点位于 16 mm 深度(横孔附近)处可激发最高幅度衍射波,但目标区域内  $\beta$  角为 67.4°的声束幅度最高,形成较大散射噪声并使得信噪比较低;对于 60°探头,声束主轴在焊缝中交于 26 mm 深度处,最高幅度的 60°斜入射声束覆盖于目标区域中部,形成较小的结构散射;尽管衍射波幅度比 70°探头情况时低但可获得最高信噪比。因此可判断,幅度最高的 60°声束入射于目标区域中部时,受焊缝组织结构散射和衰减的影响较小。对于 45°探头,当 S 值增大至 91 mm 时获得最高信噪比,目标区域中最大幅度声束的  $\beta$  角为 52.5°(余高处),该角度声束在目标区域下端(余高侧)可形成更小的散射噪声。基于以上分析可知,当 67.4°的声束入射于横孔下端时,受结构噪声及衰减的影响较小,可获得较高的衍射波幅度(衍射波幅度突增);目标区域中部覆盖的声波传播方向  $\beta$  为 60°时具有较小的干扰噪声;而目标区域中下部(余高侧)最高幅度声束的  $\beta$  角为 52.5°



时,由结构引起的声波散射也较小。因此,检测中应综合入射波幅度分布及入射波声束角度两方面来调整探头布置、提高检测信噪比。 $60^\circ$ 斜探头、 $S$  为 91 mm 时,在目标区域能同时获得合适的声束传播方向及声压分布,可在保证横孔下端具有足够的检测波声压以形成较高幅度衍射波信号的同时,避免增大目标区域的噪声干扰,该条件下的信噪比最高。

结合焊缝的结构特征,分析声波在焊缝中传播的机理。柱状晶组织具有垂直于熔合线切线并朝焊缝中心上方生长的趋势,随着柱状晶粒不断接近焊缝中心,其生长方向趋于垂直焊缝表面<sup>[12-13]</sup>。为了在简化分析过程的同时,又能保留焊缝结构的基本特征,按焊缝截面金相图对坡口及焊道熔合线进行描边处理建立焊缝模型,如图 8 所示。图 8 中直线为熔合线的切线,该切线平行于坡口;柱状晶垂直于坡口向焊缝中心生长并逐渐垂直于焊缝表面(图 8 中柱状晶为示意图);探头布置于焊缝根部侧。

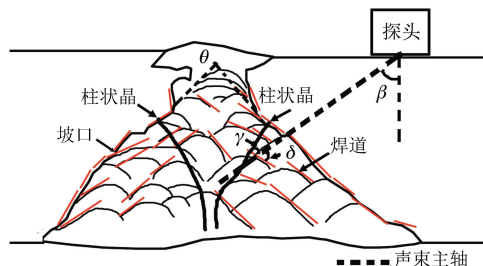


图 8 焊缝描边模型示意

设焊缝坡口角度为  $\theta$ 、声束传播方向为  $\beta$ 、检测声束与柱状晶生长方向的夹角为  $\gamma$ 、检测声束与熔合线方向的夹角为  $\delta$ ,则有:

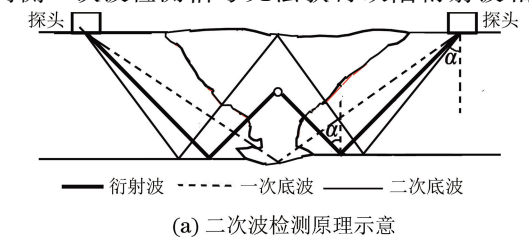
$$\gamma = \left| \frac{\theta}{2} - \beta \right| \quad (\gamma \leq 90^\circ) \quad (4)$$

$$\delta = \left| 180 - \frac{\theta}{2} - \beta \right| \quad (\delta \leq 90^\circ) \quad (5)$$

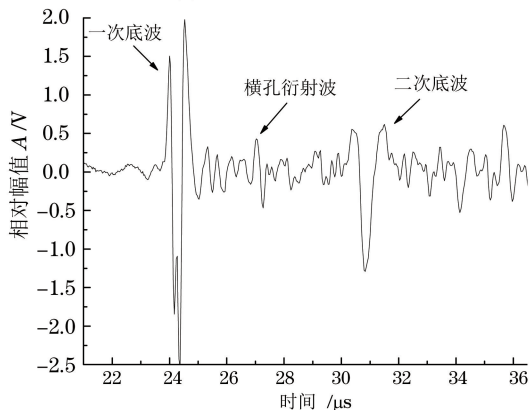
坡口角  $\theta = 90^\circ$ ,由式(4)、(5)可知:声束入射至横孔下端的方向角  $\beta$  为  $67.4^\circ$  时,声束传播方向与柱状晶生长方向的夹角  $\gamma$  为  $21.4^\circ$ ,检测声束与焊道熔合线的切线方向夹角  $\delta$  为  $22.4^\circ$ ;前面的试验结果显示,此时可获得最佳的衍射波信噪比。因此可推断:声束传播方向与不均匀介质边界的夹角越小,由边界引起的声波散射及衰减越低,因此以此角度入射到横孔时会出现衍射波突增。需要注意的是, $\gamma$  对声波散射及衰减的影响比  $\delta$  的影响要大很多。体现在  $45^\circ$  声束入射情况下,尽管  $\delta$  为  $90^\circ$ ,但由于  $\gamma$  接近  $0^\circ$  而能获得较高的信噪比;相反,如果将探头布置在余高侧, $\delta$  可调整到接近  $0^\circ$  左右,但由于其  $\gamma$  较

大而导致剧烈的柱状晶界面散射及衰减,实际上无法在余高侧接收到缺陷的一次波衍射信号。随着柱状晶接近焊缝中心,柱状晶逐渐垂直于焊缝上下表面生长;这意味着要获得最小的声束散射和衰减,入射声束角度在目标区域内应随深度逐渐减小。图 5,6 的试验结果证明了这一点, $67.4^\circ$  声束在横孔处具备最大衍射波幅度和最小组织散射和衰减, $60^\circ$  斜入射声束和  $52.5^\circ$  斜入射声束分别在焊缝中部及下部(余高)附近形成最小结构散射;即:随着柱状晶生长的深度增大,声束传播方向  $\beta$  角减小,可获得较小的组织结构散射及衰减。

在根部侧检测焊缝中缺陷时,容易获得较小的  $\gamma$  值;因此,探头置于根部侧检测时,可获得较高的缺陷衍射波信噪比。然而,封闭的管道或容器的焊缝根部一般位于内壁,无法在根部布置探头。这种情况下,可采用二次波进行检测,通过将探头布置于余高侧增大  $S$  值提取二次波来获得与根部检测相近的效果,如图 9(a)所示。二次波检测声束经母材入射到焊缝根部侧再经侧面反射进入焊缝区域。由于二次波检测时的声程较长、声束扩散衰减较严重,检测中采用了中心频率 5 MHz、角度  $45^\circ$ 、晶片直径 20 mm 的大功率超声 TOFD 专用探头进行检测,检测信号如图 9(b)所示。通过相位及幅度特征,可分辨横孔缺陷的衍射波信号;尽管其受噪声的影响较大且声程计算较复杂,易造成深度计算的误差;但与余高侧一次波检测信号无法获得缺陷衍射波相比,



(a) 二次波检测原理示意



(b) 缺陷检测信号

图 9 二次波检测原理示意及缺陷检测信号

二次波检测法具有显著优势。

#### 4 结论

(1) 超声波在不锈钢焊缝中传播时受组织结构的影响, 具有明显的各向异性, 衰减和散射与其传播方向密切相关。较大的不连续边界与声束的夹角引起剧烈的衰减和噪声, 而导致无法提取缺陷衍射波; 反之, 较小的声束夹角可获得较明显的缺陷衍射波特征。

(2) 不锈钢焊缝中主要存在柱状晶和焊道熔合线两种边界, 应使这两类边界相对于入射声束具备较小的夹角, 其中柱状晶与入射声束的夹角更为重要。声束以  $67.4^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $52.5^\circ$  覆盖横孔下端、目标区域中部, 目标区域底部时, 可获得最小的焊缝组织散射及衰减; 这一规律与焊缝中柱状晶的生长趋势一致。当采用  $60^\circ$  斜探头布置于焊缝根部检测时, 能量分布最接近上述要求, 能获得最高信噪比。

(3) 超声 TOFD 检测工艺设计必须以了解焊缝结构特征为前提, 按其组织结构特点来制定。针对多道焊开 V 型坡口的厚板不锈钢焊缝的检测, 探头布置于焊缝根部侧时, 可通过调整探头间距获得最佳信噪比; 而探头布置于焊缝余高时, 由于通过一次波声束无法获得较小的声束与柱状晶夹角, 可通过二次波进行检测。

#### 参考文献:

- [1] 韩恩厚, 王俭秋, 吴欣强. 核电高温高压水中不锈钢和镍基合金的腐蚀机制[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1379-1390.
- [2] 高东海, 范振中, 黄凤英. 不锈钢异质焊缝超声探伤界面回波的分析[J]. 无损检测, 2013, 35(7): 13-15.

- [3] 孙威. 不锈钢焊缝金属的组织演变及其影响[J]. 机械制造文摘, 2012(6): 6-10.
- [4] BALASUBRAMANIAM T, BABY S, PARDIKAR R J. Time-of-flight diffraction technique for accurate sizing of surface breaking cracks[J]. Insight, 2003, 45(5): 600-604.
- [5] BASKARAN G, BALASUBRAMANIAM K, LAKSHMANA R C. Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique [J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 458-467.
- [6] 杨双羊, 盛朝阳, 路燕, 等. 谱熵分析方法在 TOFD 信号特征提取中的应用[J]. 无损检测, 2014, 36(11): 45-48.
- [7] 陈振华, 胡怀辉, 卢超. 基于超声 TOFD 直通波及神经网络的近表面缺陷自动识别[J]. 无损检测, 2014, 36(3): 14-24.
- [8] 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.
- [9] FERRAND A, DARMON M, CHATILLON S. Modeling of ray paths of head waves on irregular interfaces in TOFD inspection for NDE [J]. Ultrasonics, 2014, 54: 1851-1860.
- [10] ANGAM P, VIJAYAREKHA K, SAJU T V. Signal quality enhancement using higher order wavelets for ultrasonic TOFD signals from austenitic stainless steel welds[J]. Ultrasonics, 2013, 53: 1288-1292.
- [11] 迟大钊, 刚铁, 高双胜. 超声 TOFD 法检测信号相位识别技术[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 17-20.
- [12] 孙晓娜, 雷毅, 张鹰. 厚板奥氏体不锈钢焊缝显微组织分析[J]. 金属热处理, 2006, 31(10): 21-23.
- [13] 林莉, 杨平华, 张东辉. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-19.

(上接第 50 页)

数分析能得到材料的损伤动态分布, 以为海洋平台 T 型管损伤声发射信号的识别与评价提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 戴光. 声发射检测技术在中国——庆祝中国机械工程学会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测, 2008, 30(7): 389-394.

- [2] 周世兵, 徐振源, 唐旭清. 新的 K-均值算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 27-31.
- [3] 李晶皎, 王爱侠, 王娇, 等. 模式识别[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 431-432.
- [4] POLLOCK A A. Acoustic emission inspection. ASM handbook, Vol 17. Nondestructive evaluation and quality control [M]. Materials Park, USA: ASM International, 1989: 278-294.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告