

DOI: 10.3901/JME.2020.14.009

奥氏体不锈钢小径管焊缝缺陷多模式超声复合全聚焦成像研究*

吴斌¹ 杨敬¹ 焦敬品¹ 何存富¹ 齐高君²

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124;

2. 中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司 济南 250100)

摘要: 奥氏体不锈钢广泛应用于重大装备的关键部件中,而焊缝是整个装备的薄弱部位。在考虑超声波的多路径和易发生波型转换的特性情况下,进行奥氏体不锈钢小径管焊缝多模式超声相控阵检测方法研究。通过数值仿真,对比分析4种不同直达波检测模式和8种不同底面一次反射波检测模式对小径管焊缝中典型缺陷的检出能力。基于优选出的一种直达波检测模式和一种底面一次反射波检测模式,发展了一种多模式复合全聚焦成像方法。在此基础上,进行奥氏体不锈钢小径管焊缝缺陷检测试验。结果表明,多模式复合全聚焦成像方法可以很好实现小径管中多种缺陷检测,与单一模式全聚焦成像相比,多模式复合全聚焦成像方法不仅可以提高成像的信噪比,且可以大大减小伪像的产生。项目研究工作为奥氏体不锈钢小径管焊缝检测提供了可行的技术方案。

关键词: 多模式全聚焦成像; 复合成像; 相控阵; 奥氏体不锈钢; 焊缝

中图分类号: TG115

Study on Ultrasonic Multi-mode Composite Total Focusing Imaging Method for Welds Defect Inspection in Small-diameter Tube of Austenitic Stainless Steel

WU Bin¹ YANG Jing¹ JIAO Jingpin¹ HE Cunfu¹ QI Gaojun²

(1. College of Mechanical Engineering and Application Electronics Technology,

Beijing University of Technology, Beijing 100124;

2. POWERCHINA SEPCO1 Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250100)

Abstract: Austenitic stainless steels are widely used in key components of major equipment, and welds are weak parts of the entire equipment. Ultrasonic wave have propagated in Austenitic stainless steels welds with the multi-path and multi-mode propagation characteristics. So the multi-mode ultrasonic phased array detection method for austenitic stainless steel small diameter pipe welds is studied. The detection ability of four different direct wave inspection modes and eight different primary reflection wave inspection modes for typical defects in small diameter pipe welds are compared and analyzed by numerical simulation. A fusion imaging method is developed based on a preferred direct wave detection mode and a bottom surface primary reflection detection mode. On this basis, weld defect detection experiment is carried out on the austenitic stainless steel small diameter pipe. The results show that the multi-mode fusion imaging method can realize the detection of multiple defects in small diameter tubes well. Compared with single mode total focusing imaging method, the fusion imaging method can not only improve the signal-to-noise ratio of imaging, but also greatly reduce the generation of artifacts. The project research work provides a feasible technical solution for the inspection of austenitic stainless steel small diameter pipe welds.

Key words: multi-mode TFM; composite image; phase array; austenitic stainless steel; welds

0 前言

由于具有优良的抗腐蚀性、抗氧化性及低温韧

性等特点,奥氏体不锈钢被广泛应用于核电、石油化工和机械制造等重大基础行业的关键部位,如压力管道、锅炉、压力容器^[1]。在这些大型设备中,奥氏体不锈钢结构间的连接多采用焊接方式。而焊缝是整个设备的薄弱部位,极易产生应力腐蚀、裂纹等各类危害性缺陷,成为影响重大设备安全运行

* 国家自然科学基金资助项目(11772013, 11572011, 11572010)。20190609收到初稿,20200109收到修改稿

的事故隐患^[2-3]。因此,为保证重大基础设施的安全运行,各行业对其关键设备中的焊缝均有强制性无损检测要求。与其他材料的焊接结构相比,奥氏体不锈钢焊缝的组织结构有其独特性。奥氏体不锈钢焊缝在凝固时未发生相变,其内部组织会在焊接热循环作用下成长为粗大的柱状晶组织^[4-5]。这些柱状晶在局部具有一定的取向性,但在焊缝不同区域其取向性会发生明显的变化,从而导致焊缝呈现出各向异性。因此,奥氏体不锈钢焊缝的上述微观组织结构特点,大大增加了其无损检测的复杂性和检测难度。

本文研究对象为电站锅炉用奥氏体不锈钢小径管焊缝,该类管道的尺寸范围为:外径 D 大于 32 mm 且小于 159 mm,壁厚 h 大于 4 mm 且小于 8 mm。目前,常用的奥氏体不锈钢焊缝检测方法主要有射线法和超声法。射线法^[6]可以很好地实现焊缝内部缺陷检测,但该方法对人体有害,且对焊缝中危害性较大的裂纹、未熔合等面积型缺陷不敏感。此外,受微观组织结构衍射效应的影响,利用射线法对奥氏体不锈钢焊缝进行检测时易产生伪像,增加了缺陷识别的难度。由于超声波强大的穿透力、多种可选的检测模式及对结构不连续的高敏感性,使得超声波技术成为焊缝损伤检测的重要手段^[7]。近年来,国内外学者利用多种超声检测模式和方法,如纵波斜入射^[8-9]、横波^[10]、爬波检测^[11-12]及超声衍射时差法^[13-15],进行了奥氏体不锈钢焊缝中损伤检测研究。奥氏体不锈钢的柱状粗大晶及各向异性微观组织结构对超声波的传播有很大的影响,不仅会产生大量林状回波,降低检测信号的信噪比;而且也会使声束产生畸变、偏转,影响超声波检测定位的准确性。因此,奥氏体不锈钢焊缝的上述特点,大大增加了超声波在焊缝中传播的复杂性和检测的难度。

超声相控阵技术是一种多声束扫描成像技术。它由于其具有声束灵活可控、聚焦能力强、在焦点处空间分辨力高等优点,而被广泛应用于复杂结构中缺陷检测^[16-18]。近年来,国内外学者利用超声相控阵技术对焊缝内部缺陷开展了大量卓有成效的研究,很好地实现了焊缝中多种缺陷检测^[19-23]。而对于本文的研究对象——奥氏体不锈钢小径管焊缝,由于其厚度较小,使得直达声束无法覆盖整个焊缝待检测区域,从而导致缺陷漏检,这也是奥氏体不锈钢小径管焊缝缺陷检测的难点所在^[24]。针对直达声束难以有效覆盖待检测区域的问题,国内外学者研究了超声波波束在结构中的多次反射特性,将超声波的多次反射声束用于构件中缺陷相控阵检测成像

中。例如,在缺陷位置和方向确定的条件下,ZHANG 等^[25]研究了纵波、横波的多传播路径及波形转换对超声相控阵全聚焦成像的影响,并优化出缺陷检测效果最佳的多模式超声成像模式。为克服考虑声波多传播路径的多模式全聚焦成像的繁琐性及可能产生的伪像对检测结果的影响,SY 等^[26]提出了一种可用于评价不同传播路径声波对不同方向缺陷反射能力的评价方法,并通过全聚焦成像验证了所优化出最佳的声波传播路径对缺陷检测的有效性。FELICE 等^[27]研究了一次反射声束全聚焦成像对于表面微裂纹定量检测的有效性。于朋等^[28]就直达波全聚焦成像和一次反射波全聚焦成像对焊缝上表面微裂纹的检出能力进行了对比研究,证明了一次反射波全聚焦成像对焊缝上表面缺陷检测的有效性。针对多传播路径下多模式超声全聚焦成像中伪像对缺陷判识的影响,SY 等^[29]通过将不同检测模式下的全聚焦成像的幅值相加的方法,大大减小了伪像对缺陷判识的影响。

针对奥氏体不锈钢小径管焊壁厚较薄的特点,考虑了超声波的多路径和多模式传播特性,本文发展了一种适用于小径管焊缝缺陷检测的多模式复合全聚焦成像方法,并通过试验验证其有效性。

1 多模式全聚焦成像方法

由于超声波在结构中的扩散传播,超声波可能沿不同路径传播到缺陷处并发生反射。因此,超声传感器接收信号中可能包含不同传播路径上的缺陷回波,如图 1 所示。同时,由于超声波的多模式及在结构不连续处的波型转换,使得缺陷回波的可能

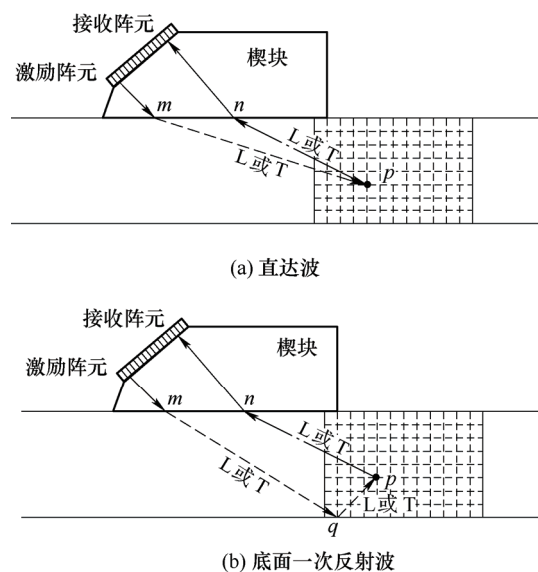


图1 超声波的传播示意图

传播模式大大增加,为声波直线传播段数的幂级数。例如,对于图 1a 所示直达声束的缺陷回波,可能的传播模式为 LL、TT、LT、和 TL 四种,对于图 1b 所示的底面一次反射声束的缺陷回波,可能的传播模式为 LLL、LLT、LTL、LTT、TTT、TTL、TLL 和 TLT 八种。由于壁厚较薄,超声波在奥氏体不锈钢小径管中传播时不可避免的会产生多次反射及模态转换,因此,对于奥氏体不锈钢小径管焊缝相控阵检测中,势必需要考虑超声波的多路径及波型转换传播特性的影响。为此,在传统全聚焦成像基础上,本文发展了一种适用于小径管焊缝缺陷检测的多模式超声全聚焦成像方法。图 2 给出了基于多模式超声全聚焦成像方法的流程图。

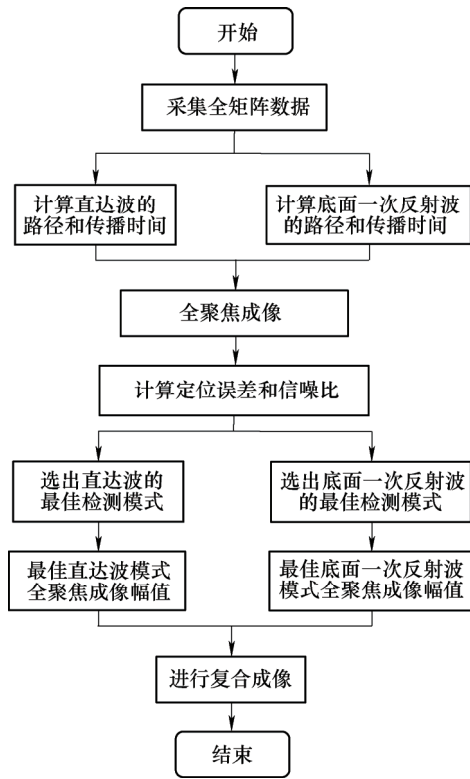


图 2 多模式超声全聚焦成像方法流程图

考虑超声波直达波和底面一次反射波进行全聚焦成像时,特定聚焦点 P 的幅值 I 可分别表示为

$$I^m(P) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_{ij}(t_{ij}^m(P)) \quad (1)$$

式中, G_{ij} 表示激励 i 阵元和接收阵元 j 对应时域信号 $g(t)$ 的希尔伯特变换后的幅值; $t_{ij}^m(P)$ 表示不同传播模式下超声波从第 i 个激励阵元传播至 p 点再传播至第 j 个接收阵元的时间; m 表示不同模式的直达波和底面一次反射波。

由于传播路径及传播特性的差异,不同模式超声波携带的结构特征及损伤信息有很大的不同,使

得其全聚焦成像结果有很大的差异。考虑到超声波的多路径和多模式传播特性,为提高奥氏体不锈钢薄壁小径管焊缝超声相控阵缺陷检出能力和检测效率,本文发展了一种多模式超声复合全聚焦成像方法。该复合成像方法的基本思想是通过一种直达波检测模式的全聚焦成像和一种底面一次反射波检测模式全聚焦成像进行加权处理^[30],其表达式为

$$I(P) = \frac{1}{2} \left(\underbrace{\sqrt{I_D^m(P)} \sqrt{I_H^m(P)}}_{\text{加权项}} \right) \underbrace{(I_D^m(P) + I_H^m(P))}_{\text{求和项}} \quad (2)$$

式中, I_D^m 表示传播模式 m_1 的直达波全聚焦成像幅值; I_H^m 表示传播模式 m_2 的底面一次反射波全聚焦成像幅值。传播模式 m_1 和 m_2 可通过第 2 节的数值仿真研究确定。

2 不同模式超声波检测能力数值仿真

本节通过数值仿真,对比分析了 4 种不同直达波检测模式和 8 种不同底面一次反射波检测模式对奥氏体不锈钢小径管焊缝中典型缺陷的检出能力,并优选出一种直达波检测模式和一种底面一次反射波检测模式。

2.1 仿真模型

基于 CIVA 软件中超声仿真平台,本文建立奥氏体不锈钢薄壁小径管焊缝检测模型,如图 3、4 所示。奥氏体不锈钢薄壁小径管的尺寸为 $\phi 42 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。焊缝区呈梯形,上顶端宽为 10 mm,底部宽为 4 mm,且高为 6.5 mm。焊缝模型的示意图如图 3 所示。由于焊缝区域较小,忽略了焊缝区的各向异性。使用长宽为 1 mm 的方形槽来模拟裂纹缺陷。缺陷与探头在圆周同一位置。为了充分说明不同模式超声波对焊缝根部缺陷检测能力的差别,进行了一系列不同条件下超声相控阵检测数值仿真。在这些仿真中,仅改变了焊缝中缺陷的位置及角度,其他检测参数均相同。表 1 列出了这些仿真模型中裂纹缺陷的大小及位置。

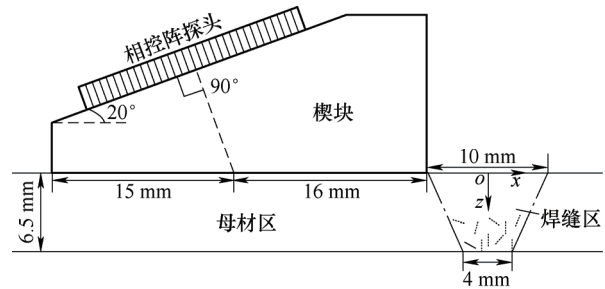


图 3 仿真模型示意图

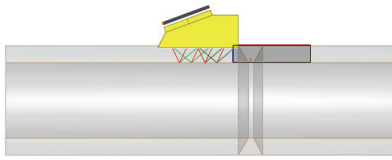


图 4 CIVA 仿真模型

表 1 缺陷参数信息表

编号	大小/mm	角度/(°)	位置/mm
A1	1×1	160	(-1.5,6)
A2	1×1	90	(-0.5,6)
A3	1×1	90	(0,5.5)
A4	1×1	50	(1.5,5)
A5	1×1	90	(2,6)
B1	1×1	165	(-2.5,4)
B2	1×1	75	(-1.4,5)
B3	1×1	145	(0.5,4)
B4	1×1	90	(1.5,4.5)
B5	1×1	65	(2.5,4)

坐标系 oxz 的坐标原点位于焊缝区上端中间位置。直线箭头表示 x 轴和 z 轴的正方向。从 x 轴逆时针旋转到裂纹的角度定义为裂纹方向。仿真模型中,所用探头中心频率为 5 MHz,阵元数量为 32,阵元宽度为 0.5 mm,阵元间距为 0.6 mm,探头与楔块耦合,楔块的中心位置为(-20.5 mm, 0 mm),激励信号为采用中心频率为 5 MHz 的 5 个周期的汉宁窗调制的正弦脉冲信号,采样频率为 100 MHz。

2.2 仿真数据成像结果及分析

按照图 2 所示的多模式全聚焦成像流程,分别对数值仿真获得的全矩阵数据在 Matlab 仿真软件中进行处理。图 5 给出了不同模式直达波的典型全聚焦成像结果。图中“+”号表示缺陷的实际位置。可以看出,4 种模式直达波全聚焦成像均可以实现缺陷检测,但成像的信噪比及缺陷定位准确性有较大差别,且 LL 模式全聚焦成像结果中产生了明显的伪像。

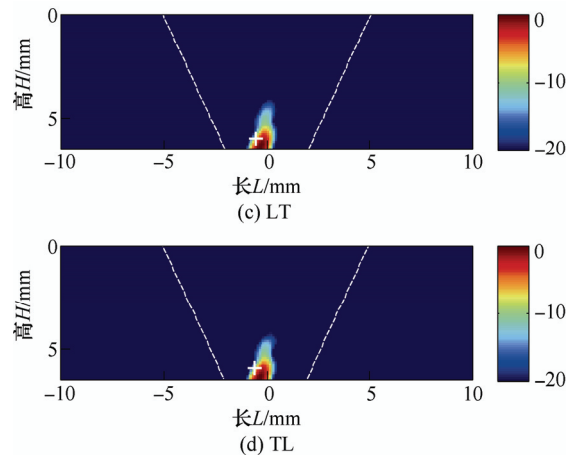
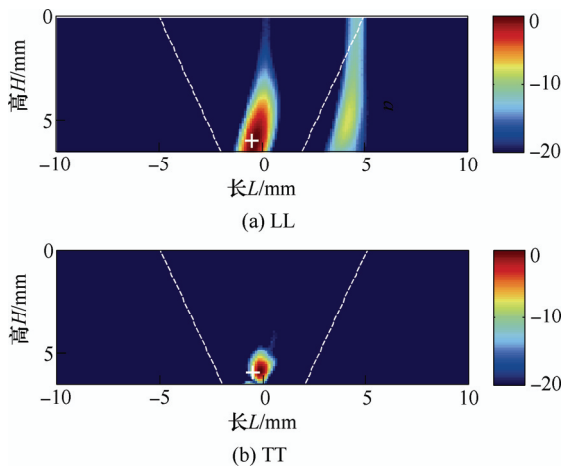


图 5 不同模式的直达成像结果(A2)

为了说明不同模式直达波对焊缝根部缺陷的检测能力,图 6 和图 7 给出了这些模式下全聚焦成像的定位误差及信噪比。其中,信噪比的定义为

$$SNR = 20 \times \lg \left(\frac{\text{mean}(I^*(x,y) \geq 0.5)}{\text{mean}(I^*(x,y) < 0.5)} \right) \quad (3)$$

式中, mean 表示取平均值; I^* 表示各成像点取归一化幅值。可以看出,与其他三种模式相比,TT 模式的定位误差最小,且信噪比最高。因此,在 4 种直达波检测模式中,优选出的最佳检测模式为 TT 模式。

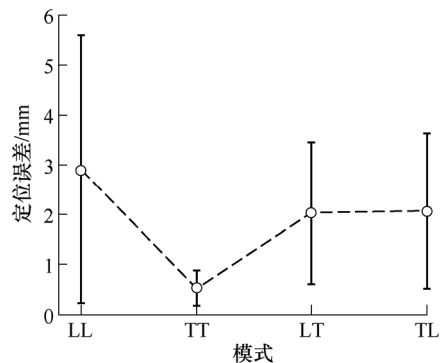


图 6 不同模式直达波全聚焦成像的定位误差

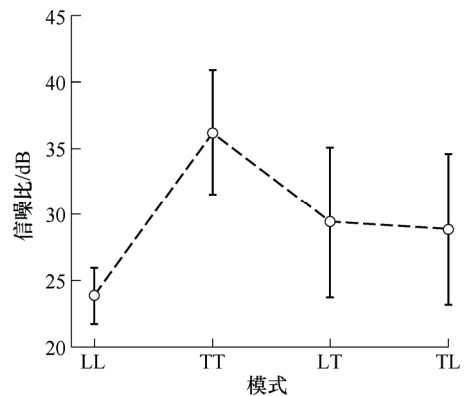


图 7 不同模式直达波成像的信噪比

同理,可以对 8 种模式的底面一次反射波对焊缝根部缺陷检测能力进行比较。图 8 给出了不同模

式底面一次反射波的典型全聚焦成像结果。可以看出, 8 种模式的底面一次反射波对同一缺陷的检测能力有很大差别。从图 8 的典型检测结果可以看出, LLL、TTT 和 TTL 可以很好地实现缺陷检测, 且定位准确, 产生的伪像较弱; LLL、LTL 和 LTT 可以实现缺陷检测, 定位较准确, 但产生了较强的伪像; 而 TLL 和 TLT 两种模式缺陷检出能力最差, 伪像强度大于缺陷的成像强度。图 9 和图 10 给出了这些模式下全聚焦成像的定位误差及信噪比。可以看出, TTT 模式和 LTT 模式的定位误差较小。而 LLL 和 TTT 模式成像的信噪比较高。

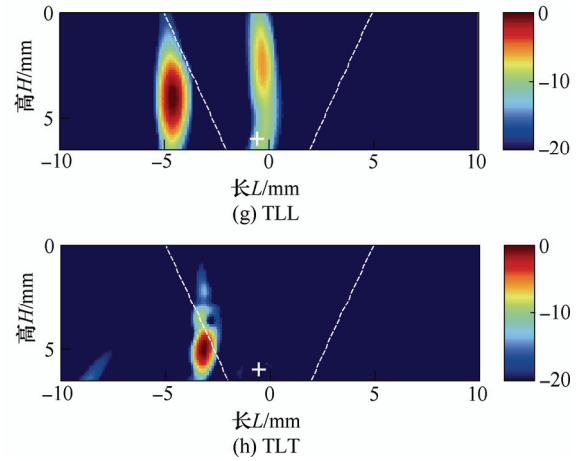
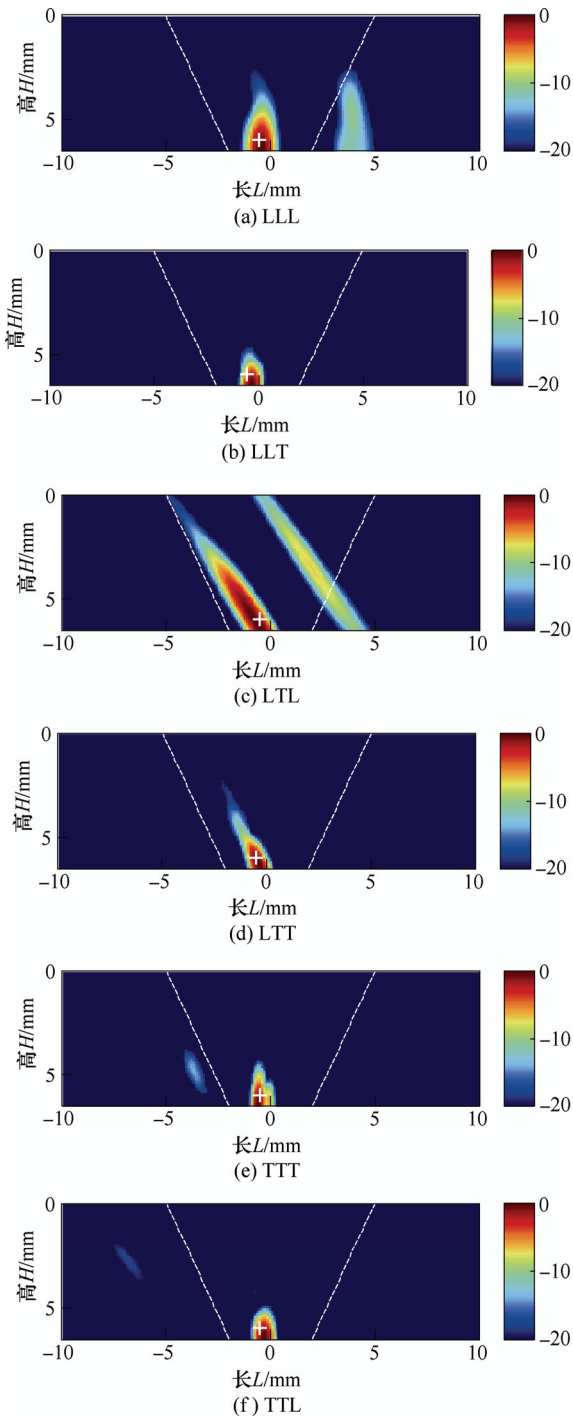


图 8 不同模式的底面一次反射波成像结果(A2)

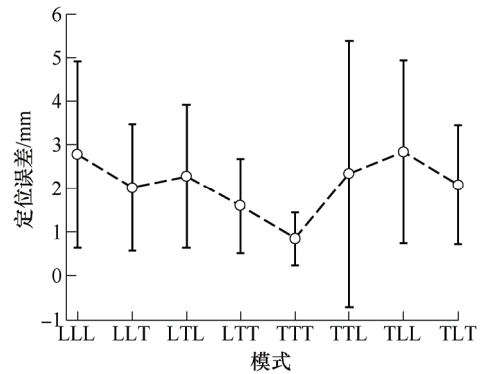


图 9 不同模式底面一次反射波全聚焦成像的定位误差

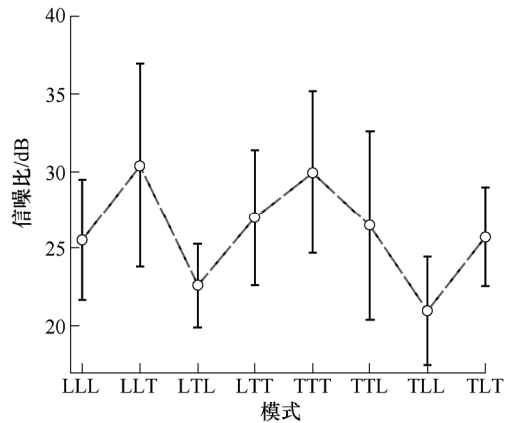


图 10 不同模式底面一次反射波成像的信噪比

综合考虑, 在 8 种底面一次反射波检测模式中, 优选出的最佳检测模式为 TTT 模式。

进一步, 利用优选出的 TT 模式和 TTT 模式按照式(2)进行加权处理, 得到的多模式复合成像结果如图 11 所示。与图 8 相比, 多模式复合全聚焦成像方法在信噪比和伪像数量上, 明显优于单模式全聚焦成像。

为了说明多模式复合全聚焦成像方法的普遍适用性, 图 12 和图 13 给出了多模式复合全聚焦成像方法与单一模式全聚焦成像方法对焊缝根部 10 种

不同缺陷的定位误差和信噪比。可以看出,与两种最优的单一模式全聚焦成像方法相比,复合模式全聚焦成像方法的定位误差更小,信噪比更高。

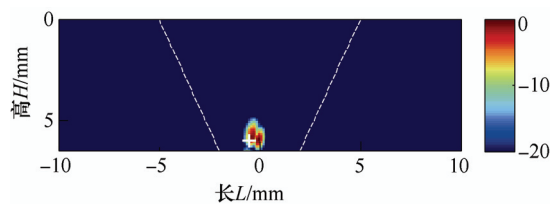


图 11 多模式复合全聚焦成像结果

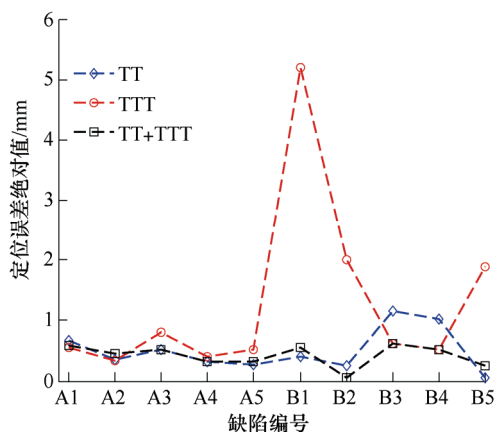


图 12 不同缺陷对应的成像定位误差

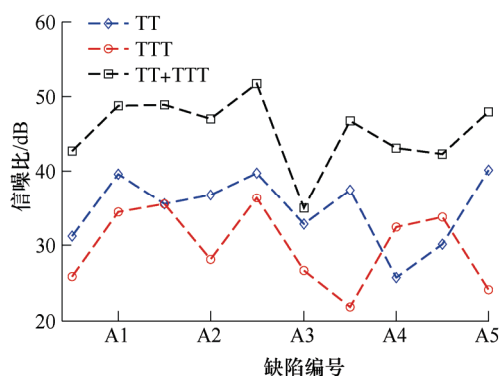


图 13 不同缺陷对应的成像信噪比

3 奥氏体不锈钢小径管焊缝检测试验

为了验证多模式复合全聚焦成像方法的有效性,对 4 根奥氏体不锈钢小径管焊缝进行了超声相控阵检测试验。试件材料均为 304 不锈钢。试件的实物图如图 14 所示。表 2 给出了所用试件尺寸及所含缺陷信息,其编号分别为 S1、S2、S3 和 S4。试验系统包括计算机、超声相控阵系统及 5 MHz 商用相控阵探头,如图 15 所示。试验检测参数,如试件和楔块的波速、激励信号、探头参数等均与文中的仿真模型一致。

表 2 试件参数信息表

缺陷编号	管径/mm	壁厚/mm	焊缝区域/mm			缺陷类型
			宽度	厚度	底部间隙	
S1	42	6.5	10	6.5	4	根部未熔合
S2	42	6.5	12	6.5	5	未焊透
S3	48	8	12	8	5	裂纹
S4	48	8	12	8	5	未焊透



图 14 奥氏体不锈钢小径薄壁管实物图

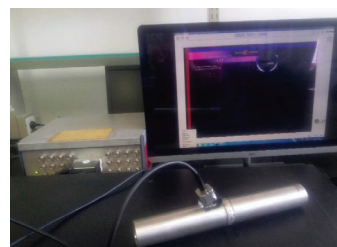
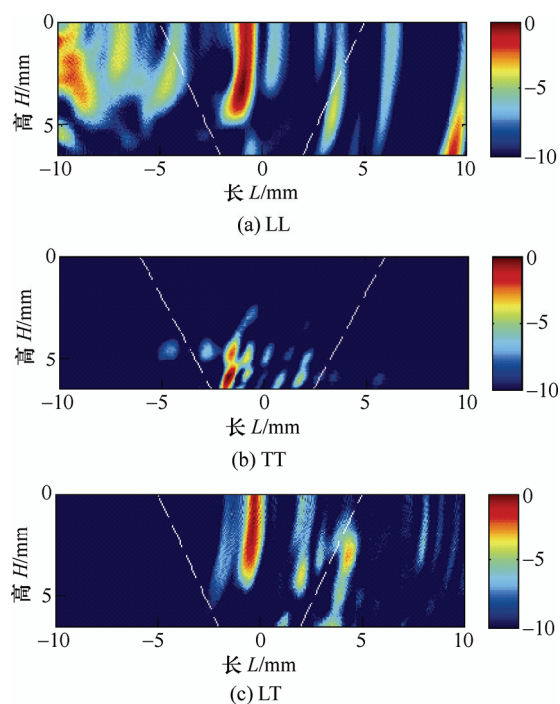


图 15 相控阵检测系统实物图

使用相控阵系统分别对 3 根试件进行检测试验,并对所采集的全矩阵数据进行成像处理。图 16、17 给出了分别使用直达波和底面一次反射波全聚焦成像对编号为 S1 的试件采集到的全矩阵数据进行处理的结果。可以看出,不同模式的全聚焦成像



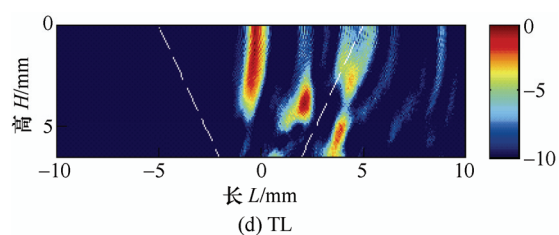
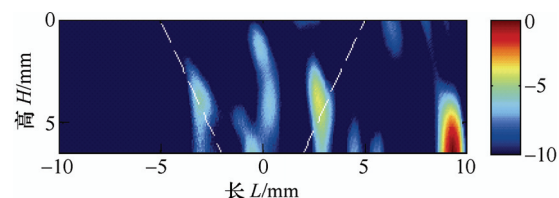
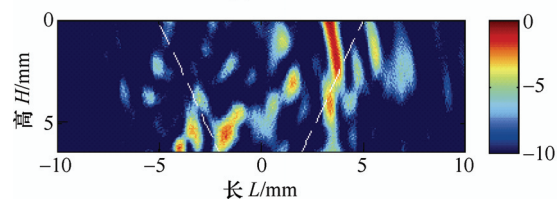


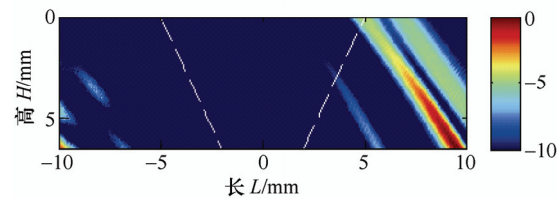
图 16 不同模式的直达波成像结果(S1 根部未熔合缺陷)



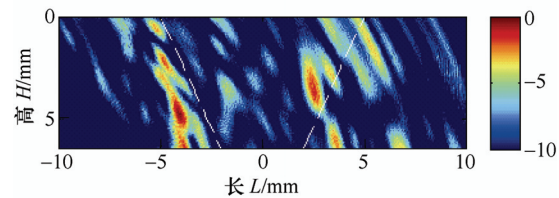
(a) LLL



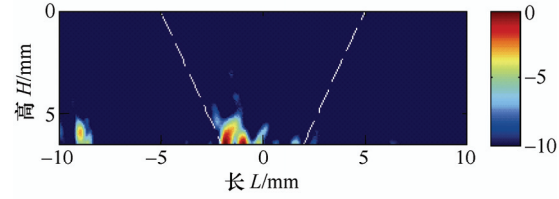
(b) LLT



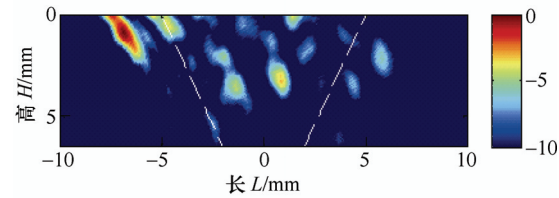
(c) LTL



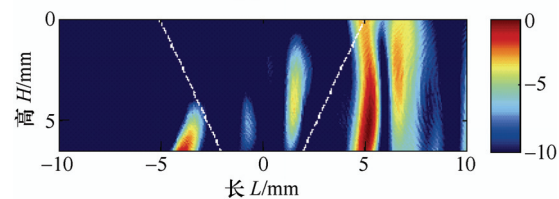
(d) LTT



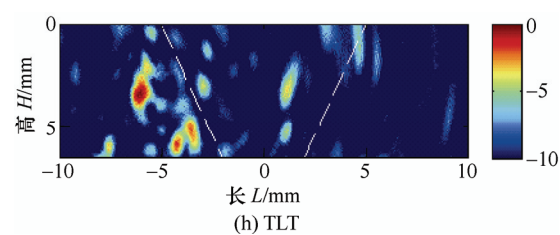
(e) TTT



(f) TTL



(g) TLL



(h) TLT

图 17 不同模式的底面一次反射波成像结果(A2)

结果有很大的不同, 且普遍信噪比较低, 多个位置呈现高亮反射信息。因此, 利用单一模式难以实现小径管焊缝中缺陷检测。图 18 给出了利用 TT 和 TTT 模式进行复合成像的结果。可以看出, 与单一模式全聚焦成像相比, 多模式复合成像的信噪比有了很大提高, 且可以很好地实现缺陷检测。

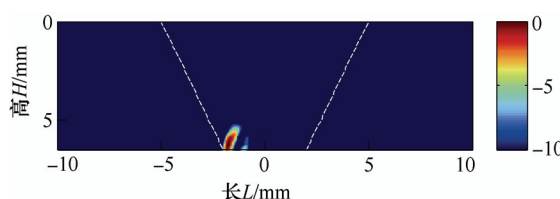
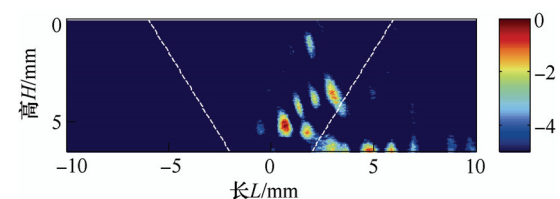
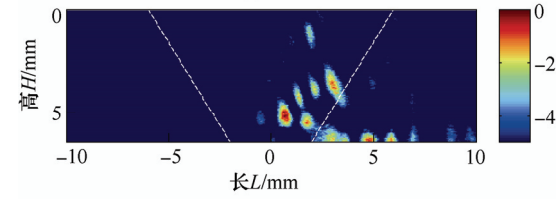


图 18 TT+TTT 复合成像结果(S1)

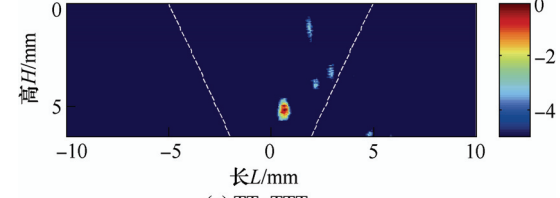
同理, 可以对缺陷编号为 S2~S4 的试件进行分析处理。图 19~21 给出了这三个试件 TT、TTT 模式全聚焦成像和 TT+TTT 模式复合成像结果。



(a) TT

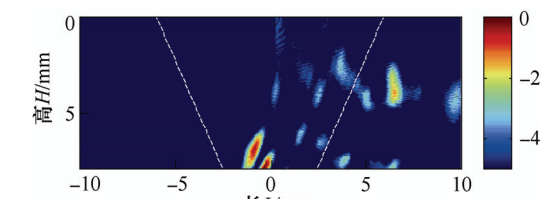


(b) TTT



(c) TT+TTT

图 19 S2 缺陷典型成像结果



(a) TT

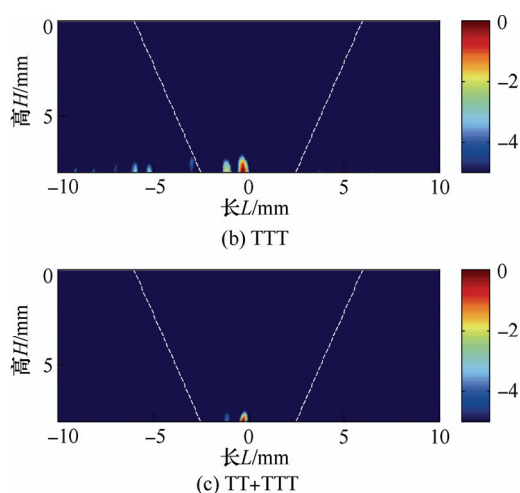


图20 S3缺陷典型成像结果

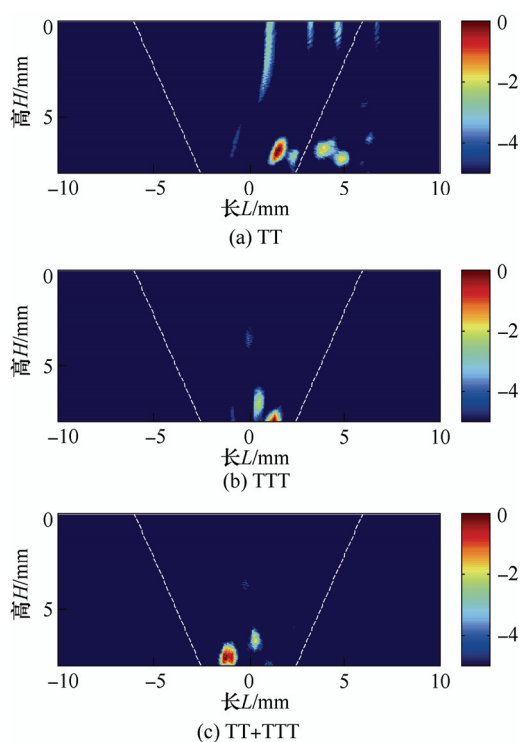


图21 S4缺陷典型成像结果

可以看出,三者都可以实现缺陷的检测,但与单一模式全聚焦成像相比,TT+TTT的复合全聚焦成像的信噪比有了较大的提高。图22给出了三种成

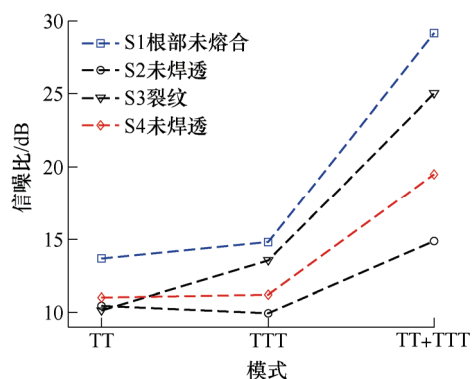


图22 三种模式成像信噪比对比

像方式对四个试件成像的信噪比。可以看出,TT+TTT成像的信噪比要高于TT和TTT模式的成像的信噪比。

4 结论

在考虑超声波多路径和多模式的传播特性的情况下,本文进行了奥氏体不锈钢小径管焊缝多模式超声相控阵检测方法研究,得出以下结论。

(1) 通过对奥氏体不锈钢小径管焊缝超声相控阵检测数值仿真,对4种不同直达波检测模式和8种不同底面一次反射波检测模式的缺陷检测能力进行了对比研究,优选出的最佳检测模式为TT模式和TTT模式。

(2) 基于优选出的一种直达波检测模式和一种底面一次反射波检测模式,发展了一种适用于小径管焊缝检测用的多模式复合全聚焦成像方法。

(3) 进行了奥氏体不锈钢小径管焊缝缺陷多模式超声相控阵检测试验和数值仿真,结果表明,复合全聚焦成像方法在信噪比和伪像数量上,明显优于单一模式全聚焦成像。

参考文献

- [1] CHEN Gang, DENG Yangchun. Load bearing capacity and safety analysis for strain-hardening austenitic stainless steel pressure vessels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(2): 179-186.
- [2] ZHONG Yunpan, ZHOU Cheng, CHEN Songying, et al. Effects of temperature and pressure on stress corrosion cracking behavior of 310S stainless steel in chloride solution[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 200-206.
- [3] 武焕春, 薛飞, 李成涛, 等. 核电主管道不锈钢在高温高压水环境下的疲劳裂纹萌生行为[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 373-377.
- [4] WU Huanchun, XUE Fei, LI Chengtao, et al. Fatigue crack initiation behaviors of nuclear power plant main pipe stainless steel in water with high temperature and high pressure[J]. Materials Review, 2018, 32(2): 373-377.
- [5] DI Hongshuang, SUN Qian, WANG Xiaonan, et al. Microstructure and properties in dissimilar/similar weld joints between DP780 and DP980 steels processed by fiber laser welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33: 1561-1571.
- [6] 张建强, 张国栋, 姚兵印, 等. 马氏体/奥氏体异种钢焊接接头IV型蠕变失效数值模拟[J]. 机械工程学报,

- 2013, 49(12): 78-83.
- ZHANG Jianqiang, ZHANG Guodong, YAO Bingyin, et al. Numerical simulation on the type IV creep failure of dissimilar welded joint between T91 and HR3C heat-resistant steels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 78-83.
- [6] 敖波, 王乃波, 何深远, 等. 小管路焊缝内部缺陷的三维 X 射线成像[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 11-14.
- AO Bo, WANG Naibo, HE Shenyuan, et al. Three dimensional imaging of internal defects in small diameter pipe welding seam by X-ray microtomography[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 11-14.
- [7] 彭志珍, 陶于春, 任尚坤. 基于不锈钢焊缝缺陷的无损检测研究进展[J]. 焊管, 2018, 41(4): 1-6.
- PENG Zhizhen, TAO Yuchun, REN Shangkun. Research progress on non-destructive testing based on weld defects of stainless steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(4): 1-6.
- [8] 任剑波, 孙加伟, 徐耀宁, 等. 核电厂蒸汽发生器锥体焊缝超声波检测技术研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(4): 83-86.
- REN Jianbo, SUN Jiawei, XU Yaoning, et al. Study on ultrasonic testing technology for conical cylinder weld of steam generator in nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(4): 83-86.
- [9] 张龙, 曾凯, 何晓聪, 等. SUS304 奥氏体不锈钢板点焊接头的超声成像分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 65-68.
- ZHANG Long, ZENG Kai, HE Xiaocong, et al. Ultrasonic imaging analyses of spot welds on SUS 304 austenitic stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(6): 65-68.
- [10] 王常玺, 刚铁, 于朋, 等. 一种铝合金薄板搅拌摩擦焊焊缝的超声快速检测方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2): 7-13.
- WANG Changxi, GANG Tie, YU Peng, et al. Ultrasonic method for rapid detection of the aluminum friction stir welding defects[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 7-13.
- [11] 袁建中, 严智, 袁光华, 等. 异种金属焊缝超声爬波检测技术[J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 109-112.
- YUAN Jianzhong, YAN Zhi, YUAN Guanghua, et al. Ultrasonic creeping wave test technique for dissimilar metal weld[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(5): 109-112.
- [12] LIU Suzhen, DONG Shuo, ZANG Yanwei, et al. Defect detection in cylindrical cavity by electromagnetic ultrasonic creeping wave[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-5.
- [13] 陈振华, 张翀, 卢超, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声 TOFD 检测中声波传播特性分析及其应用[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 91-95.
- CHEN Zhenhua, ZHANG Chong, LU Chao, et al. Application and analysis on wave propagation in ultrasonic TOFD test of austenitic stainless steel weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 91-95.
- [14] CONG Sen, GANG Tie, ZHANG Jiaying. Ultrasonic time-of-flight diffraction testing with linear frequency modulated excitation for austenitic stainless steel welds[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(8): 1-11.
- [15] MANJULA K, VIJAYAREKHA K, VENKATRAMAN B. Quality enhancement of ultrasonic TOFD signals from carbon steel weld pad with notches[J]. Ultrasonics, 2017, 84: 264-271.
- [16] 周正干, 李洋, 周文彬. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 1-11.
- ZHOU Zhenggan, LI Yang, ZHOU Wenbin. Ultrasonic phased array post-processing imaging techniques: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 1-11.
- [17] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [18] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7.
- ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phase array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.
- [19] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 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): 12-20.
- LIN Li, YANG Pinghua, ZHANG Donghui, et al. Review of phase array ultrasonic testing for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 12-20.
- [20] HAMID H B, MARTIN V, SOUHEIL-ANTOINE T,

- et al. Case study on the integrity and nondestructive inspection of flux-cored arc welded joints of Francis turbine runners[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 2201-2211.
- [21] 马立印, 李洋, 周正干. 整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1900-1908.
- MA Liyin, LI Yang, ZHOU Zhenggan. Detection of welding crack in blisk blade based on ultrasonic phased array[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1900-1908.
- [22] HUGGETT D J, DEWAN M W, WAHAB M A, et al. Phased array ultrasonic testing for post-weld and online detection of friction stir welding defects[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2017, 28(4): 187-210.
- [23] FORTUNATO J, ANAND C, BRAGA D F O, et al. Friction stir weld-bonding defect inspection using phased array ultrasonic testing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(9-12): 3125-3134.
- [24] 江野, 王东, 秦小阳, 等. 奥氏体异种钢薄壁小径管焊缝裂纹超声相控阵检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 119-122.
- JIANG Ye, WANG Dong, QIN Xiaoyang, et al. Ultrasonic phased array inspection on welded crack of austenitic dissimilar steel with thin wall and small diameter tube[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 119-122.
- [25] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method[J]. NDT&E International, 2010, 43(2): 123-133.
- [26] SY K, BRÉDIF P, EKATERINA I, et al. Development of the specular echoes estimator to predict relevant modes for total focusing method imaging[J]. NDT & E International, 2018, 99: 134-140.
- [27] FELICE M V, VELICHKO A, WILCOX P D. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique[J]. NDT & E International, 2014, 68: 105-112.
- [28] 于朋, 刚铁, 孙昌立. 基于 FSTFM 技术的焊缝表面裂纹的成像检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 15-18.
- YU Peng, GANG Tie, SUN Changli. The use FSTFM to imaging testing of surface crack in butt joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 15-18.
- [29] SY K, BREDIF P, IAKOVLEVA E, et al. Development of methods for the analysis of multi-mode TFM images[J]. Journal of Physics, 2018, 1017(1): 012005.
- [30] BENIWAL S, GHOSH D, GANGULI A. Ultrasonic imaging of concrete using scattered elastic wave modes[J]. NDT & E International, 2016, 82: 26-35.
-
- 作者简介: 吴斌, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工程波动力学及无损检测新技术。
E-mail: wb@bjut.edu.cn
- 杨敬, 女, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为现代测控技术及方法。
E-mail: jyang@emails.bjut.edu.cn
- 焦敬品(通信作者), 女, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术、现代信号分析与处理、新型传感器。
E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn