

# 厚壁焊缝阵列超声 SH 波检测的成像方法

孙舒然,陈以方,原可义,韩赞东

(清华大学 机械工程系,北京 100084)

**摘要:**采用超声水平剪切 SH 波检测粗晶材料厚壁钢板内的  $\phi 2$  mm 人工缺陷横孔并对其聚焦成像。搭建了 20 通道阵列超声 SH 波检测成像试验系统,检测待检的奥氏体不锈钢试样内部竖直排布的 13 个间距  $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ,深度范围  $10 \sim 380 \text{ mm}$ ,尺寸小于检测波波长(3.09 mm)的人工缺陷。基于合成孔径聚焦原理对各通道信号处理并成像,准确定位了缺陷中心,并以一个检测波长以内的误差表征了缺陷大小。为高温高压下工作的钢制大型设备的焊缝在线检测提供了依据。

**关键词:**厚壁;奥氏体不锈钢;焊缝;超声水平剪切波;合成孔径聚焦;成像检测

中图分类号:TB 553; TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2013)04-0010-05

## Imaging of Ultrasonic SH Wave Inspection of Thick-walled Welds Based on Array Technology

SUN Shu-Ran, CHEN Yi-Fang, YUAN Ke-Yi, HAN Zan-Dong

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:**  $\phi 2$  artificial defects in a thick-walled scorched steel plate were detected and imaged with focused ultrasonic shear horizontal (SH) waves. An inspection and imaging system with 20 channels of ultrasonic shear horizontal waves was developed on the purpose of detecting the thirteen defects, being spaced out  $30 \pm 1 \text{ mm}$  apart and ranged vertically within  $10 \sim 380 \text{ mm}$  deep, with the dimensions less than one detection wavelength(3.09 mm). On the theory of synthetic aperture focusing for long distance inspections, the signals from the related channels were processed and imaged. It was achieved that the defects were accurately located, keeping the error range of dimensions no more than one detection wavelength. The method provides reference to the in-line detection of large scale steel equipments in high-temperature and pressure environment.

**Keywords:** Thick wall; Austenitic stainless steel; Weld; Ultrasonic shear horizontal (SH) wave; Synthetic aperture focusing; Imaging and inspection

奥氏体不锈钢作为粗晶材料的一种,具备良好的抗氧化性和耐腐蚀性,在高温高压条件下可作为重要的结构材料应用于核工业、石油化工、采矿冶金等领域中,尤其是应用于大型的厚壁结构设备中。在高压( $8 \sim 25 \text{ MPa}$ )、高温( $400 \sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、临氢等苛刻条件下工作,这些设备的焊缝中由于气孔、夹渣、未熔合与未焊透以及裂纹等缺陷的存在,对设备的安全服役构成了威胁,须定期进行在线无损检测<sup>[2]</sup>。

工业上通常采用的探测奥氏体不锈钢厚焊缝内

部缺陷的方法有射线检测和超声检测。射线检测时由于射线对裂纹等缺陷不敏感,且被检测工件越厚其灵敏度越低,所需射线的能量越大;在工件厚度大于等于  $100 \text{ mm}$  的情况下,只有利用加速器才能达到对射线能量的要求。可见,射线检测对厚壁工件中的细小裂纹检出相当困难,我国质量技术监督局 1999 颁发的 154 号文件《压力容器安全技术监察规程》中规定:当厚度大于  $38 \text{ mm}$  时,焊缝探伤要增加超声波检测。

在工业方面普遍应用的大型设备中,不锈钢壁厚多在  $100 \text{ mm}$  以上。因此对厚壁工件的检测,超声检测以其安全性高、操作方便等特点,广泛地被采用为焊接结构的在线无损检测方法。目前国内可利

收稿日期:2012-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60871101)

作者简介:孙舒然(1987—),女,硕士研究生,从事超声相控阵成像检查和超声 CT 检测工作。

用高频(10 MHz)超声脉冲波提高检测精度,对70 mm以内钛合金材料厚壁试样检测,其灵敏度可达到 $\phi 0.4$  mm<sup>[4]</sup>;Gao等对50 mm厚奥氏体钢焊缝检测时,将缺陷中心定位误差控制在缺陷深度的2%。

笔者对400 mm壁厚的奥氏体不锈钢中 $\phi 2$  mm的人工横孔缺陷实行超声检测试验,考虑到高频超声波在该类材料中随传播深度增加而严重衰减,使缺陷信号难以分辨,因此不宜使用高频率超声检测;而且介质的粗大晶粒会散射超声波,形成杂乱草状的干扰噪声而降低信号信噪比。在一定条件下,超声常发生波型转换,甚至改变传播方向,混杂于缺陷波信号当中而造成缺陷误判。

考虑到以上几点,选取主频1 MHz的超声水平剪切SH(shear horizontal)波换能器检测厚壁试样。SH波在粗晶材料中各向异性较小,散射过程中波型转换形式少,有效避免了检测时时域上多种波型信号的混杂,早在1987年已被用于粗晶材料的探伤中;同时较低频率的换能器也减少了信号强度随传播距离而导致的衰减。

为了提高厚壁焊缝的超声检测信号信噪比,笔者通过选用低频窄带的探头,采取聚焦、相控等技术,合理使用信号处理技术这三种途径,基于合成孔径聚焦技术,利用超声SH波换能器阵列对试样内的不同深度区域内的缺陷逐一检测,为高温高压下工作的厚壁设备(如加氢反应器、各类厚壁管道等)的在线检测提供了参考。

## 1 超声 SH 波检测系统设计

设计了20通道合成孔径聚焦成像检测试验系统,由信号源、示波器、成像计算机、SH波换能器等组成。其中,信号源用于发射400 V方波脉冲并接收回波信号,成像计算机用于信号采集、处理和成像。取奥氏体不锈钢钢板试样(尺寸规格为805 mm×400 mm×40 mm),视为工业设备的厚壁纵断面;试样中的人工缺陷A~M均为 $\phi 2$  mm,深15 mm的人工孔,其在试样中的分布如图1所示。

在图1所示的坐标系中,以坐标( $x, y$ )表示缺陷中心位置,则各缺陷的 $x$ 坐标均为0,A孔至M孔的 $y$ 坐标分别为10,40,70,100,130,160,190,219,250,280,310,339,368 mm。缺陷大小 $\phi 2$  mm,仅为厚壁试样尺寸的0.25%。

试验系统选取主频1 MHz,带宽0.2~2 MHz,

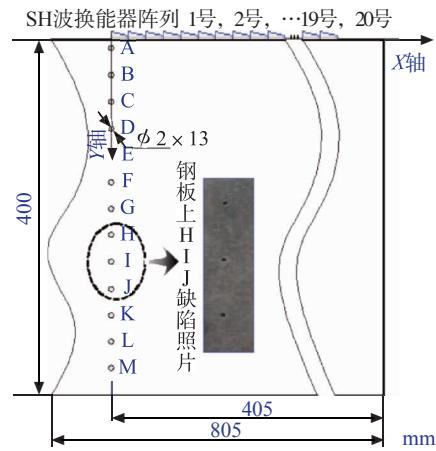
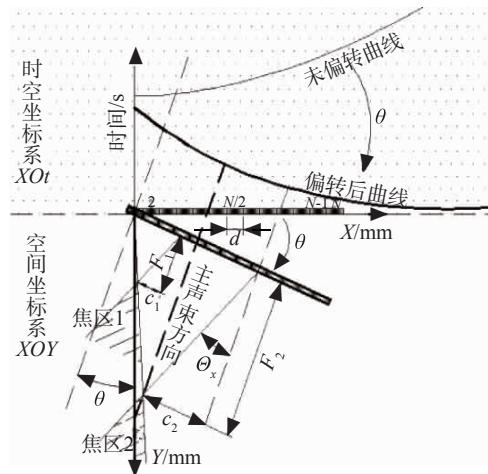


图1 钢板试样尺寸及SH波换能器阵列布置示意

激励脉冲激发换能器,在钢板试样上水平布置20个SH波换能器构成检测阵列。测得SH波声速 $c_t=3090.7$  mm/s。

在厚壁材料检测中,各缺陷分部布置,对于不同深度的检测区域,须合理调节阵列的焦距 $F$ ;使检测区域位于焦区内,保证各阵元的声场均对检测目标做了贡献,避免出现处于边缘的阵元声场与中心声场不相干的问题。

首先须估算阵列的焦区位置:如图2(a)所示的XOY坐标系, $\theta$ 为阵列倾斜角度,根据实际聚焦区 $F$ 的需要,激发 $N$ 个宽度为 $d$ 的等间距排列成阵列的矩形阵元,这时焦距 $F$ 满足:



(a) N元线阵焦区设计示意

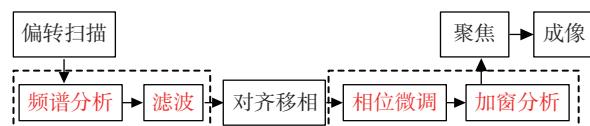


图2 N元线阵焦区设计及信号处理步骤

$$F = \frac{c}{\tan\Theta_{1/2}}, c = \frac{(N-1) \times d}{2} \quad (1)$$

式中: $\Theta_{1/2}$  为阵元的半扩散角,  $\Theta_{1/2} = \arcsin(1.22\lambda/d)$ ;  $\lambda$  为介质中的声波波长,  $\lambda = c/f$ ;  $c$  为介质内声速;  $f$  为阵元激发声波的频率。

各缺陷沿图 2 所示的 Y 轴排布, 焦距  $F$  在 Y 轴上映射为  $F \cdot \cos\theta$ 。将阵列中阵元设计成一定的倾斜角度  $\theta$ , 使它们的主声束方向指向竖直排布的缺陷, 区域内的信号既不相干也不相消。

试验系统中, 检测波波长  $\lambda$  既定,  $F \cdot \cos\theta$  由阵元数量  $N$ 、阵元宽度  $d$  和阵元倾斜角度  $\theta$  决定。

在待检厚壁试样中,  $N$  值的改变能够有效改变焦距, 达到变深检测的目的。在图 2(a) 的空间坐标系  $XOY$  中随  $N$  的增加, 阵列的焦区由焦区 1 深入到焦区 2。基于这个原理, 试样中更深层的缺陷也能够通过  $N$  的增加而实现。

在  $N$  逐级增加的前提下, 合理设计阵元宽度  $d$  和倾斜角度  $\theta$ , 可以减少或避免缺陷信号在时域上的混杂相消现象, 更使焦区逼近检测区域 Y 轴并聚焦, 提高检测定位精度等。

基于阵列中倾斜阵元的设计, 针对每个缺陷可得出其对应的主检测阵元, 在成像分析时依据缺陷声波信号的相位-幅值特征合理选择并加权(即根据特征位置对各通道的信号乘以 0 或 1)阵列通道, 减少声波信号畸变, 提高成像设备的工作效率。现取阵元宽度  $d=7.0$  mm, 阵元倾斜角度  $\theta=8.5^\circ$ 。

在空间坐标系  $XOY$  中, 假设检测区域内的 Y 轴上某处存在缺陷 \*, 其相关的信号组在时空坐标系  $XO_t$  下的波阵面曲线以  $t=0$  点为顶点, 即其相位在时间上有突出特征的点(相位特征)位于  $t=0$  点, 对应于 1 号阵元; 而检测缺陷 \* 在  $N^*$  号阵元的主声束扫查区域内, 即其幅值大的点(幅值特征)位于  $N^*$  号阵元。为合理利用阵列中各阵元的主声束带, 呈现清晰缺陷图像, 使用“偏转扫描”方法将缺陷相关信号组的相位-幅值统一于同阵元中。如图 2(a) 所示, 令到达缺陷的主声束方向为法线方向, 偏转阵列所在水平面使相关波阵面曲线随之偏移  $\theta$  角度, 则缺陷 \* 的相位特征的点与幅值特征点均因偏转而位于  $N^*$  号阵元的信号上。偏转后波阵面曲线如图 2(a) 中粗实线所示。

基于偏转后的信号, 以将对缺陷信号进行如图 2(b) 所示的信号处理分析, 完成对各深度缺陷信号的时频分析, 得到聚焦信号并成像。

## 2 超声 SH 波阵列合成孔径信号分析

根据上述的试验系统设计理论, 阵列以“一发多收”方式采集信号, 20 通道阵列即可采集  $20 \times 20$  组缺陷信号。以 6 号阵元发射全阵元接收的 20 组信号为例, 其时域信号组如图 3(a) 所示。图中用虚线标出与各缺陷相关的信号组的波阵面曲线走向趋势。

根据焦区范围分析, 可以确定在距离阵列较近的缺陷检测中, 只打开少数通道; 随着检测深度的增加, 逐渐打开其余通道至打开全部通道。合理有效地利用通道信息可使信号处理工效显著提高。

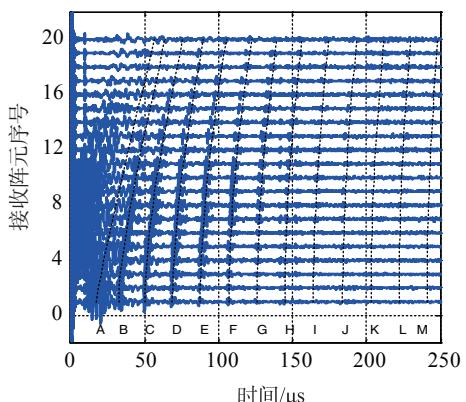
阵列信号在时域上的发射与接收有先后, 存在一定的相位差, 信号到达阵列的不同时间也反映缺陷所在的位置、大小等信息。空间上 SH 波在介质中传播会发生能量衰减, 信号达到阵列的强度也不同。可将时空信息关联进行信号分析, 为清晰成像做好准备。

试样中的 13 个缺陷由于深度不同而分别对应不同的时间段, 且由于它们之间的深度间距相对阵元宽度足够大, 所以与各缺陷相关的信号段间是相互不影响的, 不会造成信号混杂的现象。

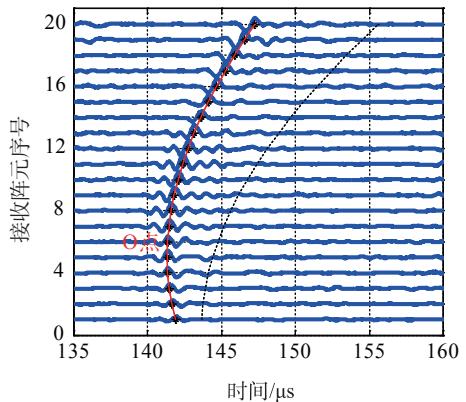
以下取 H 缺陷为例, 详述图 2(b) 的各环节所示的信号分析处理。

H 缺陷深 219 mm, 根据其所在焦区, 阵列通道取全通道。H 缺陷的原始信号波阵面曲线如图 3(b) 虚线所示(6 号阵元发射, 全阵元接收), 波前所形成曲线族的相位顶点位于 1 号阵元处。移相使信号相位幅值特征统一于同一阵元。设阵列中  $i$  号阵元发射,  $j$  号阵元接收的信号为  $S_{i,j}$ 。与缺陷相关的 SH 波从  $i$  号阵元发出, 在介质内传播至缺陷, 设 SH 波所行走的声程  $L_i^H$ ; 随后由该缺陷散射而传至  $j$  号阵元, 被  $j$  号阵元接收, 设散射出的 SH 波所行走的声程  $L_j^H$ ; 此过程中 SH 波所行的全声程  $L_{i,j}^H$ 。虚拟偏转阵列所在水平面  $\theta$  角度后, 超声波至各检测区域的往返声程均随此偏转而发生变化, 则其对应的传播时间  $t$  也以等比例  $c_t$  变化。

据此“偏转”, 得到如图 3(b) 所示的信号组, 其波阵面曲线如图中实线所示。曲线的相位顶点(曲线上最前端的顶点)已由 1 号阵元转移到 5 号阵元(H 缺陷的幅值特征所在的阵元)处, 即图 3(b) 所示“O 点”。设针对某一缺陷 \* 阵列中信号偏移后, 在其相关时域段内的  $i$  号阵元发射,  $j$  号阵元接收的缺



(a) 关于各缺陷 6 号阵元发射全阵元接收信号组

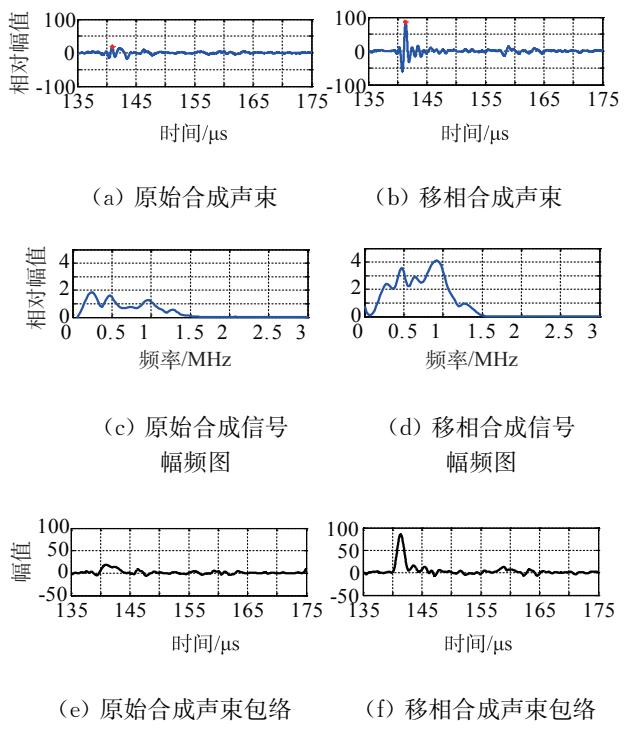
(b) 关于 H 缺陷信号组偏转移相示意  
图 3 6 号阵元发射全阵元接收信号组

陷相关信号为  $S_{i,j}^{*,\prime}$ 。

分析试验系统中 20 通道阵列采集的各缺陷 \* 的相关信号  $S_{i,j}^{*,\prime}$ , 缺陷主频在 0.5 MHz 左右。对  $S_{i,j}^{*,\prime}$  作 Fourier 变换, 进行时频分析, 缺陷的回波信号频带约在 0~2 MHz 之间。以此频带为参考, 设计带通滤波器。滤波能够有效滤除信号段中夹杂的底波, 提取强度较低的缺陷信号, 提高信号信噪比, 修正成像效果。对滤波后的信号  $S_{i,j}^{*,\prime}$ , 以对应的相位幅值特征所在阵元为基准移相对齐, 随后可将信号聚焦成像。

而 SH 波在奥氏体不锈钢介质中传播过程中会因晶粒不均匀等因素产生传播路径或传播速度的微小波动, 使缺陷信号存在一定的相位偏差。在时域内调整信号, 以相关信号段的第二次峰值为基准“对齐微调”。各缺陷的相位调整值不超过激励信号的一周期 (1 μs)。如图 4 所示, 在相位微调后, H 缺陷信号段声束合成后信号幅值明显高于未调整前, 且微调后信号的幅频特性也更接近于缺陷频域特性。

厚壁试样中的部分缺陷如 A, B 和 M, 距离试样



(e) 原始合成声束包络 (f) 移相合成声束包络

图 4 相位微调对比图(H 缺陷)

边缘很近, 相关缺陷信号混于试样边缘的高强度反射波信号中不易识别。根据检测目标的空间位置对信号进行了局部分析。计算检测区域的缺陷反射信号出现位置, 在轻微波动的范围内对缺陷信号段加选通窗, 如此减小甚至消除了检测区域附近的其他反射信号的干扰。采用 Blackman 窗为窗函数分析信号, 窗长度选择为 4~6 个激励信号周期, 使缺陷成像分辨率提高。对此厚壁试样采取了滤波、频域分析和加窗分析等处理后, 将阵列内信号在时域内聚焦合成声束, 如图 5 所示。聚焦后的信号以其相位-幅值特征阵元为基准, 幅值远高于单通道信号。集合阵列中的全部通道的信号加以聚焦, 信号总幅值会进一步加强, 聚焦生成高亮度的缺陷灰度图像。

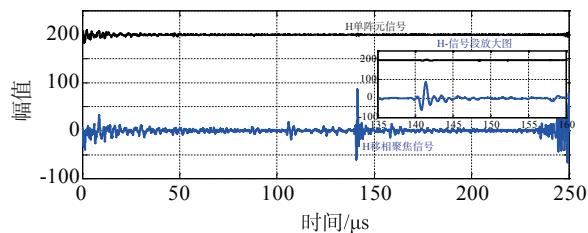


图 5 H 缺陷的移相聚焦信号与单阵元信号比较

试样中的各缺陷聚焦信号如图 6 所示。等深度间距的缺陷, 其聚焦信号在时域上均匀分布, 在不同深度的检测区域形成高亮度的点。

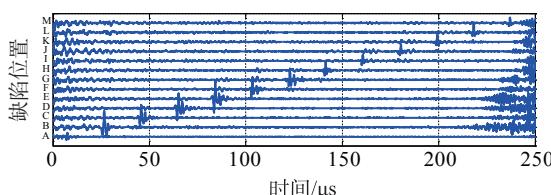


图 6 各缺陷聚焦信号

### 3 超声 SH 波聚焦成像

根据上述信号分析处理,将阵列中各阵元的信号在检测区域合成聚焦,缺陷的聚焦信号的幅值远高于无缺陷区域,由此生成关于各缺陷的灰度图像如图 7 所示。以 H 缺陷为例,其相关信号组聚焦于 H 附近区域,形成一个高亮区域,即反映了 H 缺陷的位置和尺寸信息。

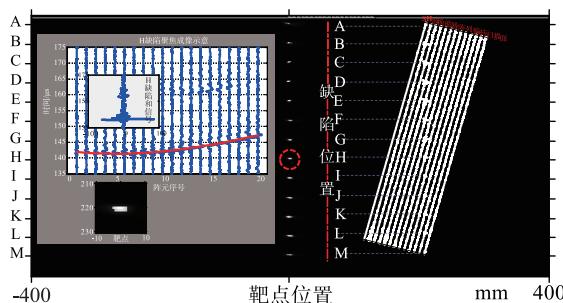


图 7 超声 SH 波成像结果

试验中,SH 波在不锈钢中传播时严重衰减,如图 7 所示,各缺陷聚焦信号强度随其深度增大而快速减小。大深度缺陷的信号仅能够在其对应的相位幅值特征阵元及相邻阵元所收发的信号中有较高质量的波形信号;试验中依据信号质量,对 I~M 缺陷(高于 200 mm 深度缺陷)开通各自正对的若干通道阵列,舍弃其他衰减严重的信号以免造成干扰;并在信号处理时合理改变窗函数长度进行加窗分析,提高信号信噪比和分辨率。

图 7 中标出 13 个缺陷编号,反演图像结果与试验试样的实际缺陷信息相符,具体的缺陷成像大小及定位坐标列于表 1 中。随检测深度的增大,缺陷成像尺寸误差迅速增大至 6 mm,中心横向定位精度也有所下降,纵向定位精度准确。

由于缺陷尺寸小于 SH 波检测波长,易发生声波的衍射等现象,形成干扰噪声。对此采用带通滤

表 1 缺陷成像尺寸及定位

缺陷	尺寸	中心 y 位置	缺陷	尺寸	中心 y 位置
A	3×3	9.5	H	5×3	223.5
B	3×3	40.5	I	6×3	253
C	4×3	72	J	7×3	284.5
D	4×3	102	K	8×3	314
E	4×3	133	L	8×3	344
F	5×3	163.5	M	8×3	374
G	5×3	193.5			

注:1) 缺陷位置 x 坐标均为 0。

波及加窗分析等信号处理方式减少上述问题的影响,在 150 mm 深度范围内,尺寸误差、定位误差均不超过 2 mm;于 250 mm 及以上的深度缺陷的检测可达定位要求,但横向分辨率较低,仍需进一步研究。

### 4 结论

针对工业设备厚壁焊缝超声检测问题,设计并搭建了一套厚 400 mm 的奥氏体不锈钢的 20 通道超声水平剪切波检测试验系统:以钢板试样为焊缝纵断面,检测其中竖直排布的  $\phi 2$  mm 大小,排布深度 10~380 mm 的 13 个人工缺陷。通过合理设计和倾斜阵元阵列减少了复杂转换波所造成的诸多干扰信号;利用合成孔径聚焦方式,结合滤波、加窗分析等信号处理手段,检测并成像了试样内部的全部人工缺陷。检测图像准确有效地反映了检测区域声场的特点,检测当量大小及定位误差均低于其所在深度的 1.5%。为工业上的重大在役设备的厚壁焊缝超声检测提供了有效的参考。

### 参考文献:

- [1] 杨奕,陈以方,曾阳.阵列超声场的信号采集与处理系统[J].电子技术应用,2003(4):41~43.
- [2] 刘德宇,沈功田,李邦宪.压力容器无损检测——加氢反应器的无损检测技术[J].无损检测,2005,27(2):96~99.
- [3] 迟大钊.基于超声 TOFD 法的焊缝缺陷表征研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [4] 凡丽梅,史亦伟,任吉林.应用超声多区聚焦技术检测大厚度电子束焊缝[J].材料工程,2009(6):73~77.

欢迎网上投稿 网址: [www.mat-test.com](http://www.mat-test.com)