

# 小径管焊缝 X 射线数字成像检测与相控阵成像检测技术对比

王景人<sup>1</sup>, 支泽林<sup>1</sup>, 靳超<sup>2</sup>

(1. 陕西省锅炉压力容器检验所, 西安 710048;

2. 北京邹展麓城科技有限公司, 北京 100034)

**摘要:** 在射线数字平板直接成像(DR)检测技术和相控阵(PA)检测技术的理论基础上, 通过对几种不同规格的小径管焊缝典型缺陷的检测对比来研究这两种新技术的差异, 可看出 DR 技术和 PA 技术均能检出相关缺陷, 总体来看, PA 技术检出的缺陷长度略大一些。由于 PA 技术具有三维、3D 成像等特点, 其图像显示缺陷的信息更多, 除了缺陷长度外, 还能显示在基准灵敏度下的幅值、缺陷的自身高度, 且通过设置焊缝坡口参数可实现 3D 动态成像, 可更直观显示缺陷位置; 而 DR 技术形成的缺陷形状更直观, 更便于缺陷定性。

**关键词:** 小径管; X 射线数字成像技术; 相控阵检测技术; 对比

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)04-0030-06

## Comparison of X-Ray Digital Imaging Detection and Phased Array Imaging Detection Technique of Small Diameter Tube Welds

WANG Jingren<sup>1</sup>, ZHI Zelin<sup>1</sup>, JIN Chao<sup>2</sup>

(1. Shaanxi boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Xi'an 710048, China;

(2. Beijing Zouzhan Lucheng Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100034, China)

**Abstract:** According to the principle of director digital panel radiography (DR) technique and ultrasonic phased array (PA) technique, the difference between these two new techniques can be obtained by comparing the typical defects of several different sizes of small diameter pipe welds. It can be concluded that DR technique and PA technique can detect the relevant defects on the whole, whereas the defect length given by PA was slightly oversized. As the PA technique is characteristic of 3D imaging, so its image display of defect can give more information. In addition to the length of the defect, the PA image also shows the amplitude of the reference sensitivity, the height of the defect, and it can achieve 3D dynamic imaging through setting the weld groove parameters, thus resulting in more intuitive display of defect location. On the other hand, the DR technique is to form more intuitive defect shape, and is easier to qualify the defect.

**Key words:** small diameter tube; DR technique; PA technique; comparison

数字化 X 射线数字平板直接成像技术(DR 技术)<sup>[1-2]</sup>与相控阵检测技术(PA 技术)都是近几年发

展起来的, 借助计算机成像技术的新的无损检测手段。随着科学技术的发展, 此两种技术得到了越来越多的应用。

在超声波检测方面, 美国机械工程师学会(ASME)《锅炉及压力容器规范》2004 版已将计算机成像技术及衍射时差法(TOFD)定量验证/双探头的计算机成像技术纳入到第 V 卷第四章非强制

收稿日期: 2017-09-17

作者简介: 王景人(1965—), 男, 高级工程师, 从事特种设备检验及无损检测工作

通信作者: 支泽林(1982—), 男, 硕士, 副高, 从事锅炉、压力容器、压力管道的检验检测工作, 232898350@qq.com

性附录中;两大新技术——衍射时差(TOFD)和相控阵(PA)法,ASME 2015 版已在第 V 卷第四章中增加了关于使用自动化或半自动化技术时对扫查灵敏度的要求,同时关于 TOFD 和 PA 技术的其他要求涉及的附录有强制性附录Ⅲ、强制性附录Ⅳ、强制性附录Ⅴ、非强制性附录 E、非强制性附录 L、非强制性附录 N、非强制性附录 O、非强制性附录 P。并且,其已广泛应用于压力容器设备管焊缝或结构复杂焊缝的检测中。

在射线检测方面,目前关于存储荧光体成像板成像和数字平板直接成像技术的要求,在 ASME 2015 版第 V 卷中已有 4 个强制附录,即强制附录Ⅱ、强制附录Ⅲ、强制附录Ⅳ和强制附录Ⅵ。

为更好地分析两种技术的差异性,笔者对数字平板直接成像技术和超声相控阵技术在小径管焊缝检测中的应用进行了对比,以供检测公司或压力容器制造单位制定检测工艺时参考。

## 1 DR 技术和 PA 技术对缺陷的影响因素

### 1.1 数字射线平板直接成像(DR)技术

数字射线平板直接成像(DR)技术,是射线检测的全新数字化成像技术。目前有非晶硅、非晶硒和 CMOS 数字平板三种 DR 技术。

射线数字成像检测与胶片照相检测在透照原理上是相同的,因此,可以套用射线胶片照相对比公式来分析图像对比度的影响因素。

$$\Delta D = 0.434 G\mu\Delta T / (1 + n) \quad (1)$$

式中: $\Delta D$  为底片黑度差(相当于图像灰度差); $G$  为胶片平均梯度; $\Delta T$  为工件厚度差(相当于 X 射线透照方向下的缺陷深度尺寸); $n$  为散射比; $\mu$  为材料射线线衰减系数(与射线管电压成反比)。

简要地说:在保证穿透工件的条件下,适当降低 X 射线管电压,提高胶片平均梯度、减少散射线可以提高图像对比度,提高缺陷的检测能力。

### 1.2 相控阵超声检测(PA)技术

PA 技术是一种多声束扫描成像技术<sup>[3]</sup>。

相控阵检测前的参数设置相当重要,检测前输入正确的前沿距离、最小角度、最大折射角度、试件厚度、焊缝宽度(如果考虑热影响区,加上热影响区的宽度)、角度修正增益和时间增益修正等信息,尤其是延迟法则决定着缺陷定位定量的准确性。

实际操作中探头位置不需向焊缝中心方向前后移动,仪器通过电脑控制激发和接收不同的晶片,使

聚焦点上下移动扫查整个焊缝深度,从而使测得的缺陷深度更易于接近实际情况。

## 2 试验设备与结果

### 2.1 试验设备

#### 2.1.1 射线检测设备及性能参数

采用比利时 X-RIS 公司的 GemX200 型射线机、DeReO WA 型非晶硅平板探测器、Maestro V3.1.1 软件。GemX200 型射线机的主要参数为恒电压 50~200 kV,恒电流 0.1~2 mA,焦点(短轴×长轴)0.5 mm×0.7 mm,电压波纹 0%。

DeReO WA 型非晶硅探测器主要参数为分辨率 200 μm,成像面积(长×宽)410 mm×410 mm,像素阵列 2 048×2 048,能量响应 20 keV~15 MeV。

Maestro V 3.1.1 软件功能主要有:X 射线发射时可实时调节电压、电流参数及调用各种图像处理工具实时处理图像。

#### 2.1.2 相控阵设备

采用以色列 SONOTRON NDT ISONIC 2009 型相控阵检查系统;采用一个线性相控阵聚焦探头<sup>[4]</sup>,其频率为 7.5 MHz,晶片数为 16;采用小径管专用扫查器,其直径范围:1~4 英寸(25.4~101.6 mm)。

### 2.2 试验工件

测试工件分别选用(直径×壁厚)φ 32 mm×3.5 mm(工件 1),φ 42 mm×7 mm(工件 2),φ 60 mm×8 mm(工件 3)的无缝管对接焊接件。各工件上均制作有不同规格的焊缝典型缺陷<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3 试验过程与结果

#### 2.3.1 工件 1

##### 2.3.1.1 根部裂纹

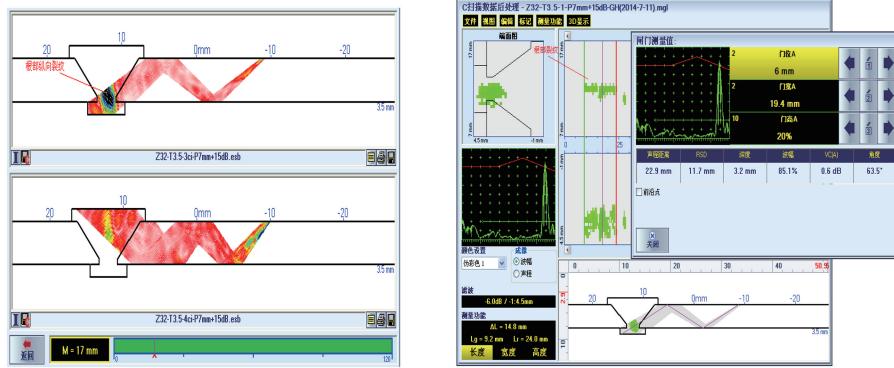
(1) PA 测试结果如图 1 所示。测得其根部纵向裂纹深度为 3.2 mm,长度为 14.8 mm,幅度为 85.1% (占满屏的百分比)。

(2) DR 检测透照参数为电压 140 kV,电流 1 mA,时间 20 s。DR 检测结果如图 2 所示,测得该裂纹长度为 12.5 mm。

##### 2.3.1.2 气孔缺陷

(1) 气孔缺陷的主视图与 PA 测试结果如图 3 所示。<sup>2#</sup>气孔缺陷的测量结果为深度 1.4 mm,长度 1.3 mm,幅度 30.7%;<sup>3#</sup>气孔缺陷的测量结果为深度 1.9 mm,长度 1.3 mm,幅度 28.6%。

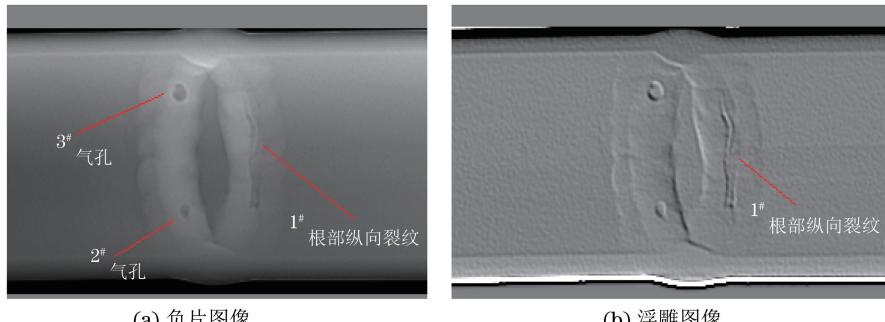
(2) DR 检测结果如图 2 所示。可得<sup>2#</sup>气孔直径为 φ 1.6 mm;<sup>3#</sup>气孔直径为 φ 1.7 mm。



(a) 根部纵向裂纹主视图

(b) PA检测结果

图1 工件1根部纵向裂纹主视图与PA检测结果



(a) 负片图像

(b) 浮雕图像

图2 工件1根部纵向裂纹缺陷DR检测结果

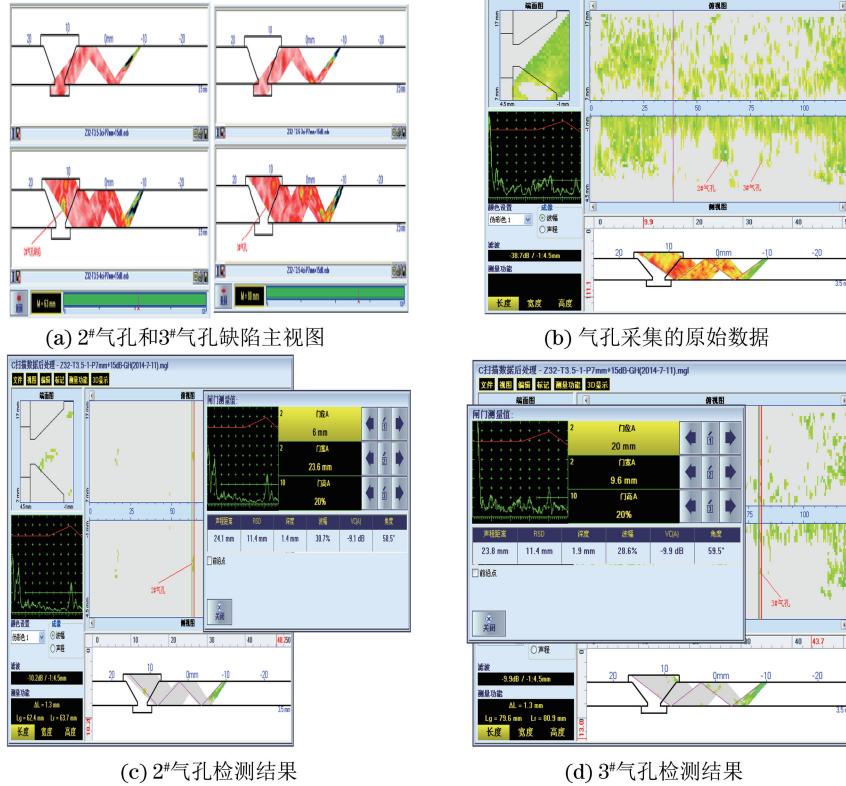


图3 工件1气孔缺陷主视图与PA检测结果

### 2.3.2 工件2

#### 2.3.2.1 1#根部未焊透缺陷

(1) 1#根部未焊透缺陷的主视图与PA测试结

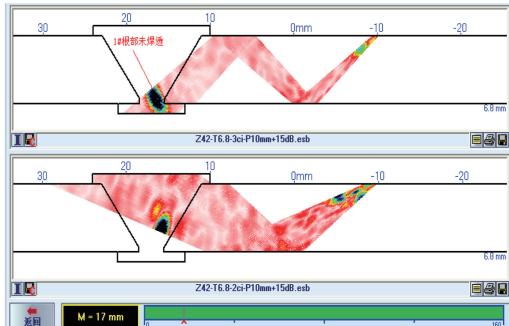
果如图4所示。测得的缺陷深度为5.6 mm,长度为25 mm,幅度 $\geq 130\%$ 。

(2) DR检测的透照参数为电压180 kV,电流

1 mA,时间20 s。其检测结果如图5所示,测得根部未焊透长度为11.22 mm。

### 2.3.2.2 坡口未熔合及气孔缺陷

(1) 坡口未熔合及气孔缺陷的PA测试结果如



(a) 缺陷主视图

图6所示。 $2^{\#}$ 气孔缺陷测量结果为深度3.5 mm,长度2.6 mm,幅度61.6%。 $3^{\#}$ 坡口未熔合缺陷在管号侧的测量结果为深度2.2 mm,长度4.4 mm,幅度76.9%。 $4^{\#}$ 气孔缺陷的测量结果为深度2.8 mm,



(b) PA检测结果

图4 工件2的1#根部未焊透缺陷主视图及PA检测结果

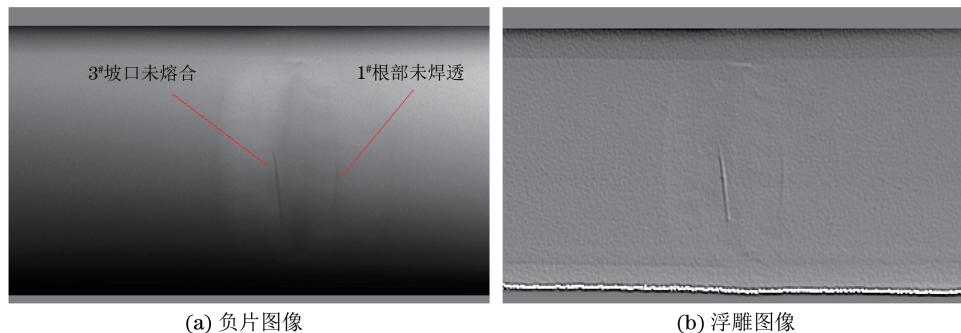
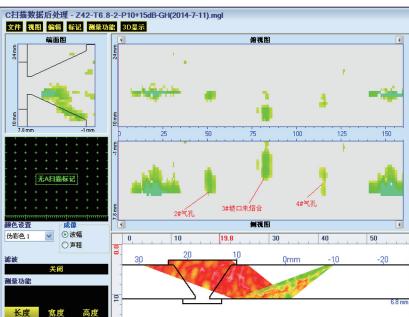


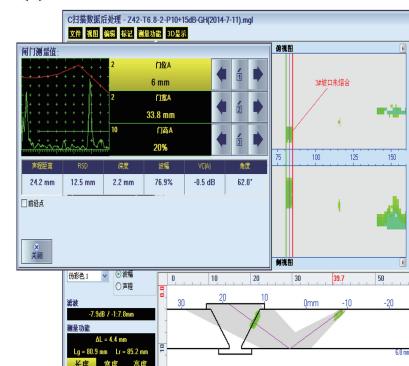
图5 工件2未熔合与未焊透缺陷的DR检测结果



(a) 坡口未熔合和气孔采集的原始数据



(b) 2#气孔检测结果



(c) 3#坡口未熔合检测结果



(d) 4#气孔检测结果

图6 工件2坡口未熔合和气孔缺陷的PA检测结果

长度4.4 mm,幅度53.8%。

(2) DR检测的透照参数为电压180 kV,电流1 mA,时间20 s。3#坡口未熔合缺陷的DR检测结果为长度11.45 mm(见图5)。2#气孔的DR检测结果为直径1.6 mm,4#气孔的DR检测结果为直径2.4 mm,如图7所示。

### 2.3.3 工件3

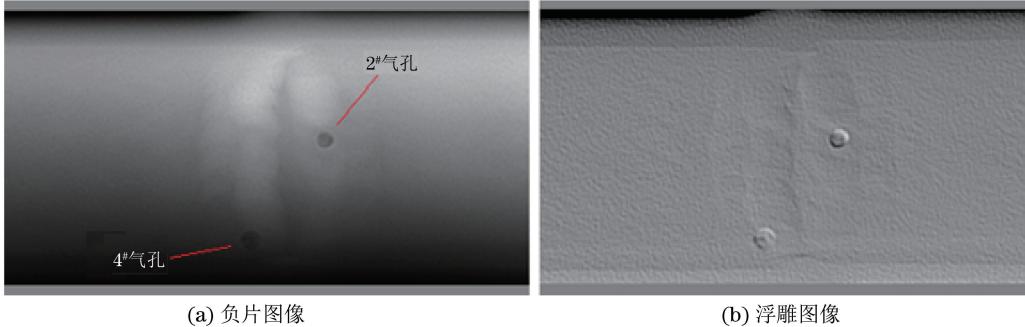


图7 工件2气孔缺陷DR检测结果

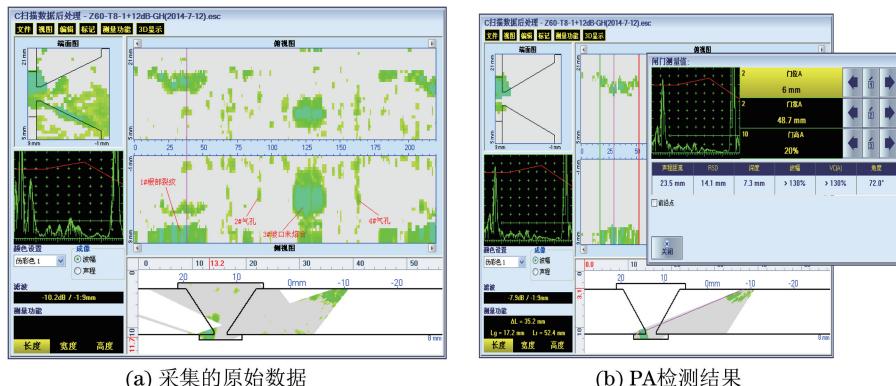


图8 工件3根部裂纹缺陷的PA检测结果

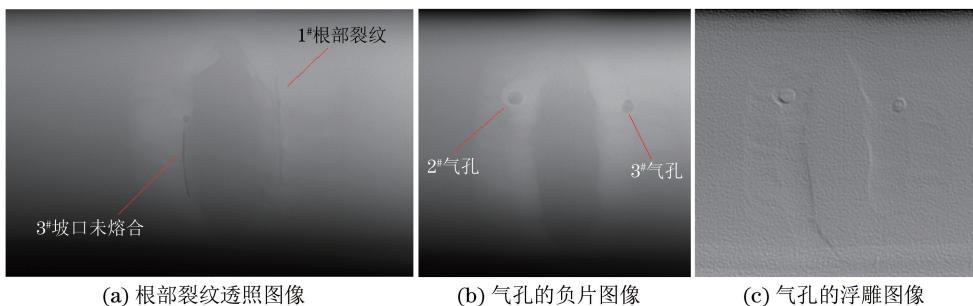


图9 工件3根部裂纹与气孔的DR检测结果

### 2.3.3.2 坡口未熔合及气孔缺陷

(1) 坡口未熔合及气孔缺陷的PA测试结果如图10所示。2#气孔缺陷的测量结果为深度3.4 mm,长度2.8 mm,幅度24.1%;3#坡口未熔合缺陷在位号侧的测量结果为深度5.2 mm,长度20 mm,幅度>130%;4#气孔缺陷的测量结果为深度4.0 mm,长度3.2 mm,幅度57.1%。

### 2.3.3.1 1#根部裂纹缺陷

(1) 1#根部裂纹缺陷的PA检测结果如图8所示。测得其深度为7.3 mm,长度为35.2 mm,幅度>130%。

(2) DR检测的透照参数为电压200 kV,电流1 mA,时间20 s。DR检测结果如图9所示,测得根部裂纹长度为29.88 mm。

### (2) DR检测结果

2#气孔DR检测结果为直径2.4 mm,3#坡口未熔合DR检测结果为长度15.78 mm,4#气孔DR检测结果为直径2.4 mm,如图9所示。

## 3 试验结果对比分析

值得指出的是由于射线穿透工件后射线强度已

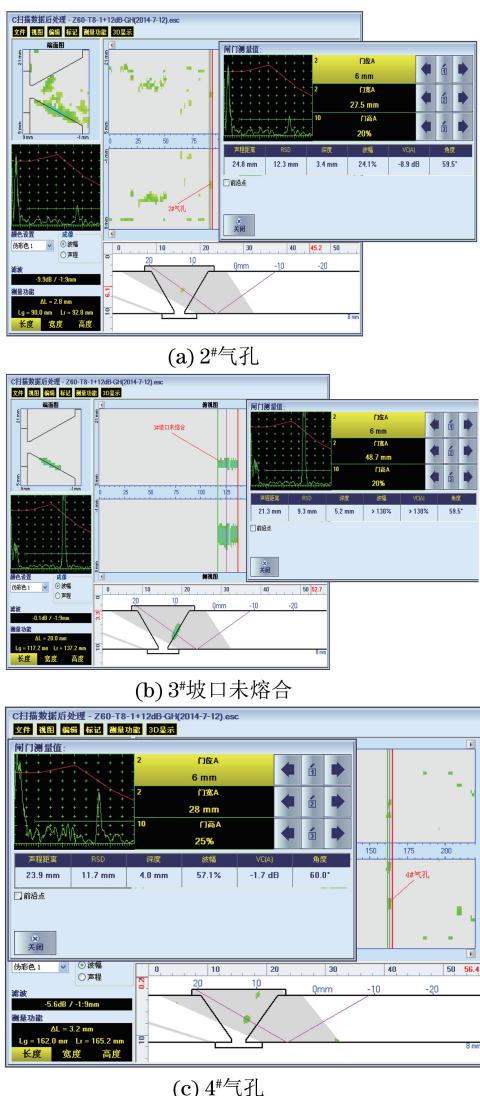


图 10 工件 3 坡口未熔合和气孔缺陷的 PA 检测结果

大幅衰减,胶片曝光是时间积累(积分)的过程,而射线数字成像(DR)采集一幅图像的时间很短(1/10 s~1/25 s),图像采集是时间的实时(微分)过程。图像采集主要考虑射线强度(mA),而曝光时间短不是主要的影响因素。工件 1,2,3 的 DR 和 PA 检测结果对比如表 1~3 所示。

表 1 工件 1 的 DR 和 PA 检测结果对比

| 缺陷      | DR 检测 |       | PA 检测 |      |
|---------|-------|-------|-------|------|
|         | 长度/mm | 长度/mm | 深度/mm | 幅度/% |
| 1# 根部裂纹 | 12.5  | 14.8  | 3.2   | 85.1 |
| 2# 气孔   | φ 1.6 | 1.3   | 1.4   | 30.7 |
| 3# 气孔   | φ 1.7 | 1.3   | 1.9   | 28.6 |

由图 1,4 可以看出,工件 1 根部纵向裂纹的 PA 测试结果(深度 3.2 mm, 长度 14.8 mm, 幅度 85.1%)

表 2 工件 2 的 DR 和 PA 检测结果对比

| 缺陷       | DR 检测 |          | PA 检测 |      |
|----------|-------|----------|-------|------|
|          | 长度/mm | 长度/mm    | 深度/mm | 幅度/% |
| 1# 根部未焊透 | 11.22 | 25       | 5.6   | 130  |
| 2# 气孔    | φ 1.6 | 2.6      | 3.5   | 61.6 |
| 3# 坡口未熔合 | 11.45 | 4.4(管号侧) | 2.2   | 76.9 |
| 4# 气孔    | φ 2.4 | 4.4      | 2.8   | 53.8 |

表 3 工件 3 的 DR 和 PA 检测结果对比

| 缺陷       | DR 检测 |       | PA 检测 |      |
|----------|-------|-------|-------|------|
|          | 长度/mm | 长度/mm | 深度/mm | 幅度/% |
| 2# 气孔    | φ 2.4 | 2.8   | 3.4   | 24.1 |
| 3# 坡口未熔合 | 15.78 | 20    | 5.2   | 130  |
| 4# 气孔    | φ 2.4 | 3.2   | 4.0   | 57.1 |

和工件 2 根部未焊透缺陷的 PA 检测结果(深度 5.6 mm, 长度 25 mm, 幅度 >130%)的显示尺寸都有所放大,这是因为相同孔径的孔处于不同的声程距离处,从而在相对近距离内的反射波的幅度较大,同一声束反射波在荧光屏上的占宽较大而显示出缺陷尺寸较大,因此相控阵宜采用幅度法进行验收。

由图 6,10 中显示的气孔缺陷测量结果可看出:相控阵采用多晶片延时聚焦的方法获得扇形扫查范围内各种角度的声束,虽然长度都一样或者相差不大,但每个角度的声孔径不同,所生成的各角度的声束对同一反射体的灵敏度也不可能完全一致,因此先以一种选定的角度制作距离-波幅曲线,再作角度增益修正,以保证同一缺陷用不同角度的超声波波幅的一致。

从以上分析可以得出以下结论:

(1) 基于以上 3 个试件中的自然缺陷,无论是 DR 技术还是 PA 技术均能检出,总体来看,PA 技术检出的缺陷长度略大一些,宜采用幅度法进行验收。

(2) 由于相控阵技术具有三维、3D 成像等特点,其图像显示的缺陷信息更多,除了缺陷长度外,还能显示在基准灵敏度下的幅值、缺陷的自身高度,且通过设置焊缝坡口参数可实现 3D 动态成像,更直观地显示缺陷位置,但应及时对制作的距离-波幅曲线进行增益修正。

(3) 从显示图像来看,使用 DR 技术检测时形成的缺陷形状更直观,更便于缺陷定性。

## 4 结语

无论是数字化成像的射线检测技术还是超声相控阵检测技术都是无损检测领域的新技术,随着这

(下转第 40 页)

(2) 设计的巴克豪森无损检测系统,可以有效地反映渗碳层深度的变化。

## 参考文献：

- [1] 孙振淋,张茜,辛玉武,等.渗碳方式对18CrNi4A钢齿轮渗碳层的影响[J].金属热处理,2015,40(12):128-131.
  - [2] 李倩,丛培武,王赫,等.18CrNiMo7-6钢齿轮真空渗碳[J].金属热处理,2017,42(3):69-71.
  - [3] 孔德群,刘庆锁,任政,等.18CrNiMo7-6齿轮轴渗碳淬火热处理的氧化分析[J].金属热处理,2016,41(7):182-186.
  - [4] SANTAAHOA S, VIPPOLAA M, SORSAB A. Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (2): 408-416.
  - [5] STUPAKOV A, NESLUSAN M, PEREVERTOV O. Detection of a milling-induced surface damage by the magnetic Barkhausen noise [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016, 410:198-209.
  - [6] 曹锐,王平,田贵云,等.齿轮材料有效硬化层深对巴克豪森噪声信号影响的研究[J].无损检测,2013,35(10):59-62.
  - [7] 李家伟,陈积懋,穆向荣,等.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2002.

(上接第 35 页)

两种技术的检测设备、检测工艺及检测标准的不断发展和完善,其会在越来越多的领域发挥更大的作用,从而提高检测速度、减少人为因素失误、降低操作者的劳动强度。

在小径管焊缝的数字化射线和超声波检测方法的选择上,还应根据工件结构、检测工艺及验收标准的相关要求来选择。

### 参考文献：

- [1] 强天鹏.射线检测[M].北京:劳动社会保障出版社,2007.
  - [2] 巨西民,蒋中印,兰州,等.埋弧焊钢管焊缝 DR 检测机

- [8] 沈功田.承压设备无损检测与评价技术发展现状[J].机械工程学报,2017,53(12):1-2.
  - [9] TITTO S, OTALA M, SAYNAJAKANGAS S. Non-destructive magnetic measurement of steel grain size[J]. NDT International, 1976, 9(3):117-120.
  - [10] JAGADISH C, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel [J]. Magnetics IEEE Transactions, 1990, 26(3): 1160-1163.
  - [11] LINDGREN M, LEPISTO T. Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel [J]. NDT & E International, 2003, 36(5):279-288.
  - [12] VASHISTA M, PAUL S. Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1595-1603.
  - [13] AMIRI M S, THIELEN M, RABUNG M, et al. On the role of crystal and stress anisotropy in magnetic Barkhausen noise [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2014, 372(12): 16-22.
  - [14] MOSES A J, WILLIAMS P I, HOSHTANAR O A. Real time dynamic domain observation in bulk materials[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2006, 304(2): 150-154.

理及应用[J].无损检测,2014,36(10):29-77.

- [3] 施克仁,郭寓岷.相控阵超声成像检测[M].北京:高等教育出版社, 2010.
  - [4] 肖琨,王强,胡栋,等.复杂工件内部缺陷超声柔性探头检测数值仿真[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(4): 65-68.
  - [5] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 78-85.
  - [6] 李剑锋.应用超声相控阵技术对特殊结构焊缝检测[J].金属加工, 2010(20): 26-30.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告