

超声相控阵成像技术与应用

周琦^{1,4}, 刘方军², 李志军³, 李旭东^{3,4}

(1. 北京航空航天大学 北京 100083; 2. 北京航空工艺研究所 北京 100024; 3. 欧宁管道管束检测技术公司 北京 100102; 4. 内蒙古金属材料研究所 包头 014034)

摘要: 简述了超声波相控阵成像检测技术的基本原理和主要特点, 介绍了相控阵技术检测焊缝和钛合金棒中的缺陷情况。超声相控阵换能器是由多个晶片单元组成的超声波阵列传感器; 超声相控阵仪器可通过超声波声束的角度扫描、动态焦距、焦斑尺寸调节等控制方式, 实现对工件内部传播的超声波信号的收发及图像再现。相控阵技术易于快速分辨出焊缝内缺陷分布, 利用专用探头可以检测发现 $\varnothing 0.4\text{mm}$ 平底孔的模拟缺陷。

关键词: 超声相控阵; 成像; 换能器; 缺陷

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-244X(2002)03-0034-04

Sokolov 于二十世纪三十年代提出了超声波检查早期研究, 在四十年代出现的脉冲回波探伤仪器(A 扫描)成为超声波检测技术的重要标识。而基于脉冲回波原理开发出了很多超声波检测装置, B 扫描、C 扫描等都是其发展的产物^[1]。相控阵传感器的基本概念很早就被提出, 超声相控阵技术的基本思路来源于雷达电磁波相控阵技术, 医用 B 超是最先采用超声相控阵技术的。最近超声相控阵也应用在金属和复合材料的无损检测。由于多种相关高技术, 如压电复合材料、纳秒级别脉冲信号控制、数据处理和数据分析、软件技术、计算机模拟, 在超声相控阵成像技术中得到综合应用, 超声相控阵技术得到快速发展, 例如二维和三维的成像、高分辨率、信号处理的能力^[2~4]。本文的目的是介绍超声相控阵检测原理及其在探伤中的一些应用。

1 超声相控阵基本原理及其特点

实验采用了加拿大 R/D TECH 公司研制的超声波相控阵成像设备。一般系统可驱动 32~128 个晶片的相控阵探头。相控阵换能器类型有极坐标阵列、圆环阵列、面阵列以及线阵列等。相控阵换能器在高频电信号激励下产生频率在 650kHz~20MHz 的超声波信号, 通过控制系统调整发射到相控阵多晶探头的每个晶片激发脉冲之间的相差, 穿过耦合介质进入试样内部, 实现超声波声场控制。为了实现声束控制, 各个单元晶片被施加有很短时间差的脉冲, 通过精确控制换能器晶元间的脉冲延迟, 产生

各种角度、不同焦距和焦斑尺寸的声束。来自焦点位置的回波具有可计算的相差, 反射到达换能器, 先赋予每个回波信号一个相位偏移, 再在每个换能器单元将反射回波信号叠加, 经过延相叠加的回波成为一次增强超声波扫描, 信号主要是来自焦斑的声响应, 同时材料中其它位置的杂散回波被衰减了。

图 1 以线阵列探头为例介绍相控阵线扫描、扇形扫描、及动态聚焦的原理。图 1a 简单描述声束线扫描的电子聚焦原理。相控阵换能器由 N 个独立的压电晶片单元组成, 每个晶片受独立的电磁脉冲激发。选择换能器中的几个晶片单元, 并采用适当的延时激发脉冲控制这几个晶片, 由它产生的声场就聚焦在一点上。为了每个基本声波同时到达希望的聚焦点, 需要简单地计算延时时间, 延时规律是关于焦点对称。基于同样的原理相控阵换能器可以用于声束偏转, 将以上二个延时控制信号叠加作用在晶片上, 声束将被同时聚焦和偏转, 实现扇形扫描, 如图 1b 所示。采用固定的激发脉冲序列, 但在对接收脉冲信号进行相移处理时, 采用多组相延迟序列, 针对每组相延迟序列, 可以通过计算得到这种相延迟所集中的反射信号来自的深度位置, 同时将其它深度位置的信号屏蔽, 这样, 得到的信号是有选择接收的信号, 排除了来自其它深度和方向角反射的干扰, 从而实现了类似聚焦的效果, 称为动态深度聚焦, 如图 1c。

由于实现了超声波声束的角度、焦距、焦斑尺寸的软件控制和电子控制, 与常规超声波检测技术

* 收稿日期: 2001-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助, 项目批准号 59836220

作者简介: 周琦, 博士生, 主要从事电子束焊接及表面改性处理等研究

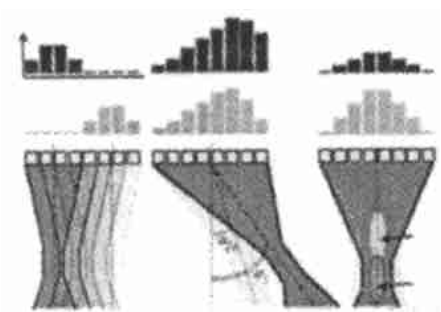


图 1 线扫描、扇形扫描、及动态聚焦原理

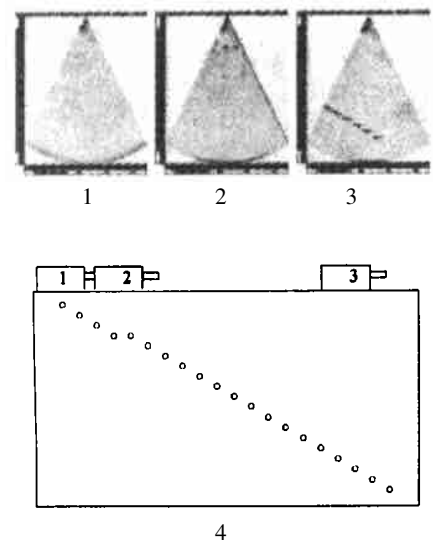


图 2 超声相控阵灵敏度检测结果与试样
1. 孔距边 10mm, 2. 最近孔距边 25mm, 3. 最近孔距边 100mm, 4. 铝板 23cm×12cm×2cm 模拟通孔 Ø1

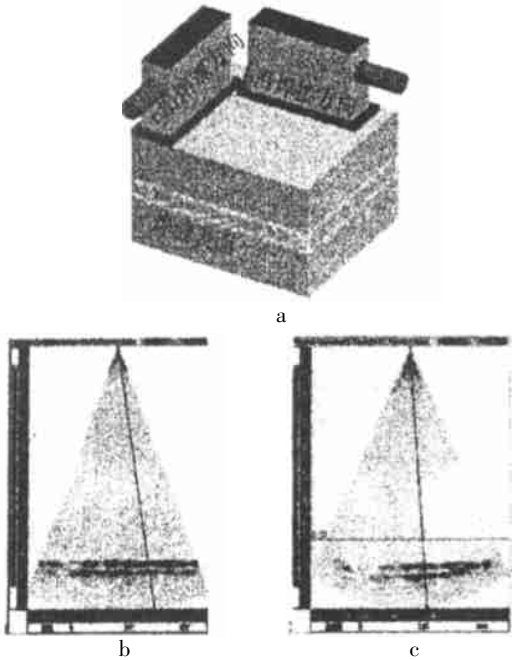


图 3 焊缝典型探测方位和图像

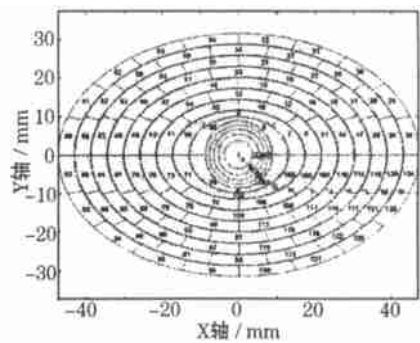
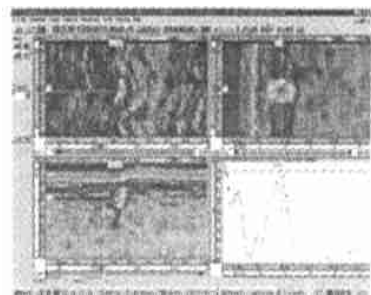
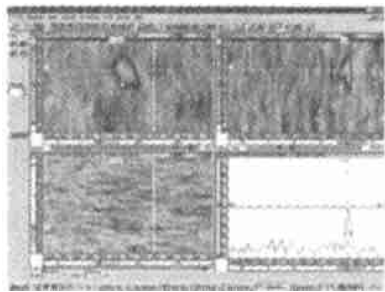


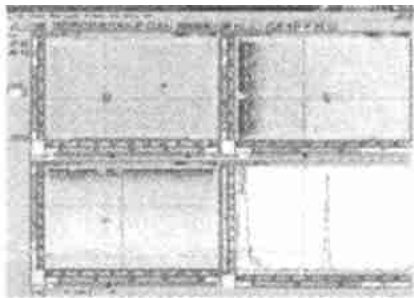
图 4 专用探头阵列平面投影



a—近表面 SNR= 11.1dB



b—4.5 英寸深 SNR= 10.5dB



c—钛合金缺陷的相控阵图像

图 5 钛合金缺陷的相控阵图像

指向和聚焦深度, 实现复杂构件和盲区位置缺陷的精确检测。⁽²⁾通过局部晶片单元组合实现声场控制, 可在保证检测灵敏度的前提下实现高速电子扫描, 不移动工件进行高速检测。⁽³⁾使用相控阵技术可以实现理想的声束聚焦, 采用同样的脉冲电压驱动每个阵列单元, 聚焦区域的实际声场强度远大于常规的超声波技术, 从而对于相同声衰减特性的材料可以使用较高的检测频率。

相比, 相控阵技术具有以下特点: ⁽¹⁾生成可控的声束

2 实验结果及分析

2.1 超声相控阵灵敏度试验

试验采用铝合金平板,其形状尺寸参见图 2—4,相控阵探头的检测位置及结果在图 2 中对应,试验是在同一参数设置下进行的(未进行动态聚焦)。当探头与检测缺陷距离为 10mm 时,图 2—1 中显示的 $\varnothing 1$ 的模拟通孔模糊不清,主要是声场的近场效应导致,如果调整检测参数的设置,图象清晰度可以得到提高,一般缺陷距探头 4~5mm 以上都可以发现。图 2—2、2—3 的通孔图象清晰,分辨率较高,由于声场的扇形扫描,距离越远扫描范围越大。

2.2 电子束焊接试样与超声相控阵图像

电子束焊接试样的检测实验采用了 Focus 32/64 PIM06 型超声相控阵成像设备。该系统最大可驱动 32 个晶片的探头,使用的探头型号为 5L32E3210,是由 32 个晶片组成的线性阵列探头,标称频率 5MHz,探头孔径为 32mm \times 10mm。

相控阵换能器放置在与试样焊缝纵剖面平行的侧面,阵列单元有二种取向:一种与焊接方向一致,另一种与熔深方向一致。一组四个晶片单元完成焊缝内某一点的聚焦信号的采集,并依次在全体 64 个阵列中完成电子扇形扫描。实验采用的电子束焊缝试样是 LY12 铝合金焊缝,熔深 $h=36\text{mm}$,电子束焊接参数如表 1 所示。以下仅介绍两例较典型图像和部位:

表 1 电子束焊接参数

| 材料 | 加速电压 | 电子束电流 | 聚焦电流 | 焊接速度 |
|-------|-------|---------|-------|-----------|
| Al 合金 | 140kv | 60—65mA | 339mA | 300cm/min |

如图 3 所示包含了二个典型方位的检测结果,相控阵探头与试样的相对方位是沿焊接方向和沿熔深方向,如图 3a 中所示。图 3b 是熔深靠近焊缝根部焊道的检测结果,超声图像区是电子束焊缝中缺陷的反射图像,表明焊缝内部存在点状或连续气孔缺陷。其缺陷对超声信号反射强烈,局部图像已连成一条线,说明焊缝局部缺陷较严重。图 3c 是沿熔深方向的相控阵图像区,焊缝上部区域信号反射较小而根部反射较强,焊缝根部气孔等缺陷的反射图像,说明焊缝根部较多,可能存在连续缺陷并且比焊缝上部缺陷密度大得多。超声相控阵检测基本可以得到试样焊缝内缺陷的分布,如图 3 中显示有离散

和连续的缺陷,根部的声反射强烈以至于图像成为线状,其缺陷的间距已小于相控阵仪器的分辨率了。这些情况基本符合焊缝纵剖图和 X 射线投影检测,但由于相控阵的分辨率限制,可能导致非连续的缺陷显示为连续超声图像,根部焊缝连续的强反射可能是由于分辨率较低而无法分开低于分辨率的二个相邻缺陷。

2.3 钛合金与超声相控阵检测

钛合金棒材质量的无损检测十分重要。但是大功率航空发动机要求采用大尺寸的钛合金棒材,检测变得越来越难。钛合金棒材由于其较大的尺寸和对内部缺陷检测能力的高要求,在各种无损检测技术方案中,超声波方法是唯一能够满足应用需求的手段。钛合金材料具有较高的声衰减,为大尺寸工件的超声波检测带来了困难,常规超声波技术的相应解决方案是采用宽频带窄脉冲和聚焦探头技术,但仍然存在在检测灵敏度和超声波穿透能力之间进行折中取舍的困难,甚至于不能保证工件整体范围的足够检测灵敏度。即使检测对象是小尺寸棒材,在选择检测技术的时候仍然需要根据不同缺陷的取向和方位选择相应声学特性和指向特性的多个探头组合,检测工艺复杂化,同时增加了不可靠因素。相控阵技术针对以上问题解决了技术细节中存在的矛盾,提供了有效的解决途径。

R/D Tech 专门针对航空用钛合金棒材检测需求开发了专用相控阵探头(Fermat 探头),如图 4 所示是专用探头外观和探头阵列平面投影图,专门用于检测直径 $\varnothing 75\text{mm}$ 到 $\varnothing 350\text{mm}$ 的钛合金棒材。同时采用了动态聚焦的技术,保证超声波声束聚焦在相当大的范围。目前可以满足 $\varnothing 0.8\text{mm}$ 平底孔当量检测能力的工业标准要求,且可检测出 $\varnothing 0.4\text{mm}$ 平底孔模拟缺陷。图 5a、b 所示是直径 203.2mm 锻态钛合金棒埋藏深度分别为 5.08mm、114.3mm 的 $\varnothing 0.4\text{mm}$ 平底孔结果,图 5c 是铸态带有自然缺陷钛合金试块(长 \times 宽 \times 高=195mm \times 110mm \times 65mm)检测结果。

综合以上试验结果,可以看出,在检测灵敏度方面,相控阵系统有很高的检测灵敏度,试验中信噪比最好可以达到 20dB,信噪比余量很大。同时所有的结果都是使用一个相控阵探头就实现了大深度范围的检测,而不需要针对不同的深度分区选择不同声学性能的探头。

3 结论

(1) 超声相控阵采用了声束的角度扫描、动态聚焦等技术, 使得检测效率、灵敏度得到提高, 且适用于复杂零件的检测, 使用方便。

(2) 超声相控阵可以检测到电子束焊缝中缺陷分布, 并且可快速分辨出在探头阵列方向大于其分辨率尺寸的缺陷情况。

(3) 相控阵技术针对钛合金棒材的质量检测提供了一种有效的无损检测途径, 并且使用一个探头就实现了大深度范围的检测。

参考文献:

- [1] 西拉特 J. 超声检测新技术[M]. 陈积懋, 余南廷译. 科学出版社, 1991. 24—28.
- [2] Macovski A. Ultrasonic imaging using arrays[J]. Proceedings of IEEE, 1979, 67(4): 484—495.
- [3] Lawrence Azar, Shi-Chang Wooh. Experimental characterization of ultrasonic phased arrays for the nondestructive evaluation of concrete structures[J]. Materials Evaluation, 1999, 57(2): 134—140.
- [4] Song Sung-Jin, Hyeon Jae Shin, You Hyun Jang. Calculations of radiation field of phased array transducers using boundary diffraction wave model[A]. 15 World Conference on Non-Destructive Testing[C]. Roma, 2000—10, 15—12.

Principle and applications of ultrasonic phased array imaging technology

ZHOU Qi^{1,4}, LIU Fang-jun², LI Zhi-jun³, LI Xu-dong^{3,4}

(1. Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Technologies, Beijing 100024, China; 3. Ou'ning Pipes Inspecting Technologies Company, Beijing 100102, China; 4. Inner Mongolia Institute of Metallic Materials, Baotou 014034, China)

Abstract: The basic principle and chief features of ultrasonic phased array imaging inspecting technology are summarized. Using ultrasonic phased arrays, the defects of welds and Ti-alloy bars were realized. A phased-array transducer is composed of multiple elements. By precisely controlling the delays between the probe elements, ultrasonic wave beams of various angles, focal distances and focal spot sizes can be produced. The ultrasonic phased array technology can detect kinds of defects in workpieces quickly and easily. The receiving and emitting ultrasonic wave and reproducing image functions can be completed by the ultrasonic phased array instrument. It is much easy for the instrument to detect the defects in welds. With special probes, Ø0.4mm flat bottom hole can be found.

Key words: ultrasonic phased array; imaging; transducer; defect

(上接第13页)

参考文献:

- [1] 亨利 G[法], 豪斯特曼 D. 宏观断口学与显微断口学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 53—59.
- [2] 高重阳, 施惠基, 姚振汉等. 薄壁柱壳在内部爆炸载荷下膨胀断裂的研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 160—167.
- [3] 胡八一, 董庆东, 韩长生等. 爆炸金属管绝热剪切断裂的细观研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 305—311.

Experimental study of fracture mechanism of copper subjected to explosive load

KANG Li-xia¹, WANG Yao-hua¹, HE Chun-xia², CAI Li-geng¹, ZHOU Chun-hua¹

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Nanjing Agriculture University, Nanjing 210032, China)

Abstract: Based on the SEM dynamic fractographs of copper cylinders damaged by inner explosive loadings, the brittle behavior of copper under the condition of high strain rate was found, and the dynamic rupture mechanism of copper was drawn, which provide important foundations for investigating the dynamic properties of metals under high-speed impact.

Key words: explosive load; copper; fracture