

相控阵超声绝对声时法测量底面开口裂纹

刘书宏^{1,2}, 郑 晖², 姜学平²

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘要: 针对工件内表面开口裂纹单面单侧定量检测困难的问题, 采用相控阵超声绝对声时法(Absolute Arrival Time Technique, AATT)从单面单侧对不同厚度试块中的底面人工开口裂纹自身高度测量进行了数值仿真和实验, 并对焊缝中的自然裂纹进行了 AATT 测量。对比 AATT 测量结果与常规衍射时差法超声检测(Time of Flight Diffraction, TOFD)测量结果并分析, 发现 AATT 从单面单侧对底面开口裂纹进行定量测量可以达到与常规 TOFD 同样的测量精度。AATT 操作简便, 可单面单侧定量测量 2 mm 以上底面开口裂纹的自身高度。

关键词: 相控阵超声检测; 相控阵超声绝对声时法; 裂纹自身高度测量

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-04-0331-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.04.009

Bottom crack measurement by using AATT with ultrasonic phased array

LIU Shu-hong^{1,2}, ZHENG Hui², JIANG Xue-ping²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China.)

Abstract: This paper proposes an effective method of using ultrasonic phased array to measure bottom cracks from single-sided-unilateral. The heights of artificial cracks in different thickness blocks are measured by the Absolute Arrival Time Technique (AATT) with ultrasonic phased array in testing simulation and experiment. The height of natural crack in a weld is also measured by AATT. A comparative analysis of the experimental results and the conventional TOFD measurement results is conducted, and the analysis results show that the height of bottom crack can be measured quantitatively by AATT from one side and this measurement technique can achieve the same accuracy as TOFD measurement.

Key words: phased array ultrasonic testing; absolute arrival time technique; crack height measurement

0 引言

压力容器和管道由于应力积累或受到腐蚀作用产生局部高应力区, 应力积累到一定程度会产生疲劳裂纹。疲劳裂纹一般出现在工件内表面和接近内表面部分, 可能导致工件发生断裂或失稳扩展。所以对工件内表面裂纹进行检测尤为重要^[1]。

裂纹检测常用的常规 TOFD 技术采用一发一收模式, 单面双侧检测的测量要求。不能满足特殊结构工件测量要求, 如 TKY 型接管单面单侧检测。常规超声端点衍射法^[2](Relative Arrival Time Technique, RATT)可单面单侧检测工件。RATT 通过移动固定 K 值的常规超声斜探头得到裂纹端点的回波信号, 并根据回波到达时间差和探头位置计算裂纹的

自身高度^[3,4]。RATT 需要来回移动探头, 检测效率低, 人为引起的误差大, 测量过程较为复杂^[5]。

相控阵超声检测技术采用多阵元的阵列探头, 依靠计算机技术使得声束在一定范围之内灵活可控^[6,7]。相控阵超声检测技术定量定位精度高, 检测速度快, 受人为因素影响比较小^[8,9]。本文用底面开口裂纹类比工件内表面开口裂纹, 提出用相控阵超声横波 AATT, 通过单面单侧扫描方式对工件内表面开口裂纹进行检测, 并根据回波信号的到达时间和对应的角度计算裂纹自身高度, 实现对工件内表面开口裂纹的绝对定量测量。

1 数值仿真

AATT 采用相控阵技术通过设定相控阵超声探头中各阵元的延时来控制合成声束偏转对工件进行扇形扫描, 根据裂纹端角回波信号和尖端回波信号到达的时间和扇形扫描角度计算裂纹的自身高

收稿日期: 2013-08-30; 修回日期: 2013-11-30

作者简介: 刘书宏(1990—), 男, 江西赣州人, 硕士, 研究方向为超声检测。

通讯作者: 姜学平, E-mail: langerxing@163.com

度。其原理如图 1 所示。

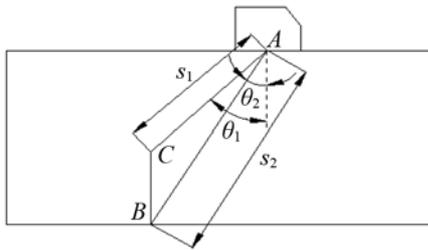


图 1 绝对到达时间技术(AATT)示意图

Fig.1 The schematic diagram of Absolute Arrival Time Technique (AATT)

AATT 计算裂纹自身高度公式见式(1):

$$h = s_2 \cos \theta_2 - s_1 \cos \theta_1 = c_T (t_2 \cos \theta_2 - t_1 \cos \theta_1) \quad (1)$$

其中: h 为裂纹自身高度, s_1 、 s_2 、 θ_1 、 θ_2 见图 1, c_T 为工件中的横波声速; t_1 为裂纹上尖端衍射回波时间; t_2 为裂纹端角回波时间。

模拟计算厚为 20 mm 的试块中高 5 mm 的底面开口裂纹的回波信息, 将裂纹上下尖端回波时间 t_1 、 t_2 和对应角度 θ_1 、 θ_2 代入式(1), 计算裂纹的自身高度 h 。

仿真中计算探头辐射声场时将声源表面离散成点声源, 利用 Pencil 法计算介质中的声场。声波传播过程中遇到缺陷或边界时, 采用基尔霍夫近似理论和几何衍射法(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)来处理^[10]。

仿真模型如图 2 所示, 仿真中所用探头参数见表 1。其中待检试件为 20#钢, 横波声速为 3200 m/s。楔块为有机玻璃, 纵波声速为 2330 m/s。仿真结果见图 3。

图 3 中开口裂纹开口处, 即端角的回波信号比上尖端回波信号强, 这是因为下尖端回波主要为反

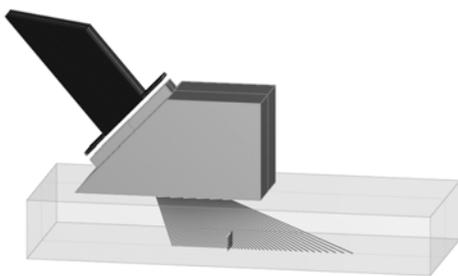


图 2 仿真试验模型

Fig.2 The model of simulation experiment

表 1 相控阵探头参数

Table 1 The parameters of phased array transducer

| 探头参数 | 参数值 | 探头参数 | 参数值 |
|--------|---------|----------|---------|
| 相邻晶片间隙 | 0.1 mm | 激励信号中心频率 | 5 MHz |
| 主动孔径 | 38.3 mm | 楔块前沿 | 26 mm |
| 被动孔径 | 10 mm | 楔块角度 | 55° |
| 晶片宽度 | 0.5 mm | 探头延迟 | 21.7 μs |

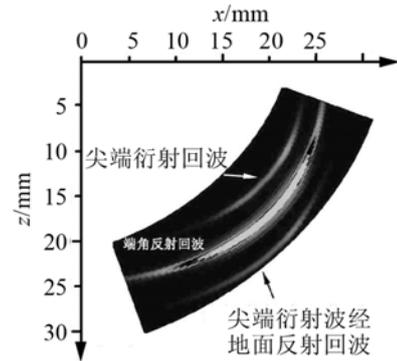


图 3 人工裂纹 AATT 仿真扇扫图

Fig.3 The sector scan simulation results of AATT for artificial cracks

射回波信号, 而上尖端回波为衍射信号。除上下尖端回波信号外还有一回波信号, 该信号是裂纹上尖端衍射波经底面反射后的回波信号。

根据仿真扇扫图, 提取裂纹尖端衍射信号和端角反射信号的幅值最大时对应的声束偏转角度和该角度上的 A 扫描信号, 读取超声回波信号的时间, 见表 2。

表 2 AATT 仿真回波参数

Table 2 The echo parameters of AATT simulation

| 裂纹回波 | 回波时间/μs | 入射角/(°) |
|--------|---------|---------|
| 尖端衍射回波 | 15.5 | 47 |
| 端角反射回波 | 17.7 | 54 |

将表 2 的回波信号的时间和对应角度代入式(1), 计算得到裂纹自身高度为 5.1 mm, 相对误差为 2%。

2 实验

设计制作不同厚度板中含不同高度的人工裂纹试块, 通过数值仿真和实验测量其尖端回波信号, 计算裂纹自身高度, 与常规 TOFD 和裂纹设计尺寸进行比较, 以确定 AATT 测量裂纹的可靠性和对裂纹定量的有效性。

相控阵检测系统由法国 M2M 公司 Multi2000 相控阵仪和 64 阵元线阵探头(型号 5L64-A2)组成。扇扫角度范围为 20°~70°。相控阵探头参数见表 1。

2.1 薄板中人工裂纹测量

为了研究 AATT 测量薄板工件中开口裂纹自身高度的能力, 设计制作了对比试块 1 见图 4、图 5。

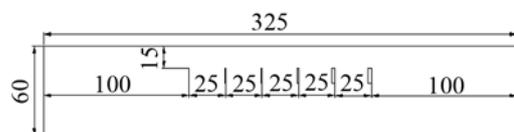


图 4 对比试块 1 俯视图(单位: mm)

Fig.4 The vertical view of the reference block 1 (unit: mm)

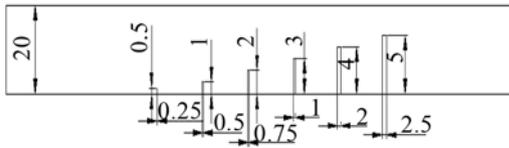


图 5 对比试块 1 侧视图(单位: mm)
Fig.5 The side view of the reference block 1 (unit: mm)

试块上的人工裂纹从左至右分别为 1 号至 6 号。试块材料为 20#钢, 横波声速为 3200 m/s。

采用 AATT 对试块 1 进行仿真和实验检测, 角度步进为 1°。读取回波信号的时间和对应角度, 用式(1)计算人工开口裂纹自身高度。

实验中能发现 1 号和 2 号人工裂纹, 但由于开口裂纹自身高度为分别 0.5 mm 和 1 mm, 裂纹太小, 裂纹尖端衍射波和端角反射波不能有效区分开, 所以不能测量出其高度。

6 号人工裂纹实验扇形扫描结果如图 6 所示。对比图 6 和图 3, 即相同条件下的模拟扇形扫描结果。和模拟结果相比, 实验扇扫结果中除了裂纹上下端的回波信号外还有一些杂波。

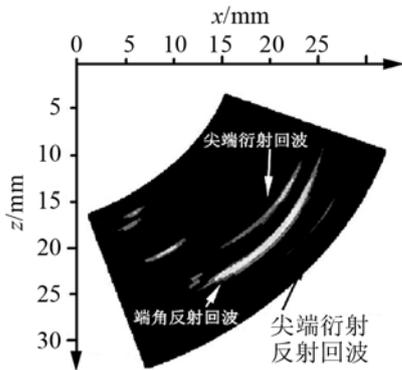


图 6 6 号人工裂纹 AATT 实验扇扫图
Fig.6 The sector scan experimental result of AATT for the artificial crack 6

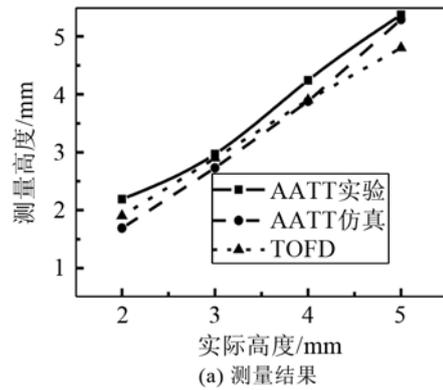
对 20 mm 厚试块上不同深度人工裂纹进行 AATT 测量的实验结果如图 7 所示。通过对图 7 分析可见, 实验与仿真结果基本一致, 并可以得出下列结论:

(1) 3 号人工裂纹的测量误差大于 10%, 4、5、6 号的测量相对误差小于 9%。AATT 测量高度小于 2 mm 裂纹的误差偏大, 能精确测量高度大于 2 mm 的开口裂纹高度。

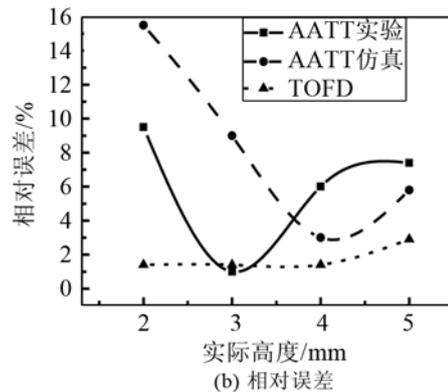
(2) 测量高度大于 2 mm 裂纹时, AATT 测量可以达到 TOFD 的测量精度。

AATT 测量结果的误差来源主要有以下两方面:

(1) 从扇形扫描中提取计算回波时间的 A 信号对应的声束偏转角 θ_1 和 θ_2 的偏差; (2) 实验中楔块中的延时引起的回波信号读取时间的误差。如图 8



(a) 测量结果



(b) 相对误差

图 7 试块 1 测量结果(a)及相对误差(b)
Fig.7 Experimental result (a) and relative error (b) for the block 1

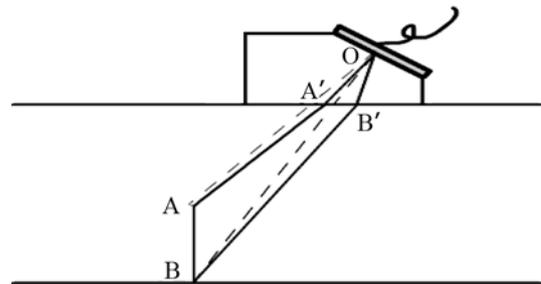


图 8 AATT 测量中声传播路线示意图
Fig.8 Schematic diagram of acoustic wave propagation path in AATT measurements

所示, 实际声波沿着实线 $OA'A$ 和 $OB'B$ 行进, 而计算中假设声波沿虚线 OA 和 OB 传播。

2.2 较厚板中人工裂纹测量

为了验证 AATT 对厚板中裂纹的测量精度, 设计制作对比试块 2, 如图 9 和图 10 所示, 人工裂纹从左至右分别为 1 号至 5 号。

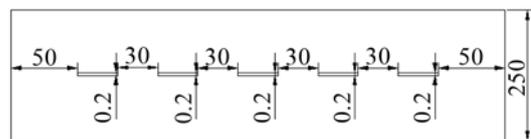


图 9 对比试块 2 俯视图
Fig.9 The vertical view of the reference block 2

由于试块厚度增加,设置扇扫角度步进为 0.5°, 测量结果如图 11 所示。

采用常规 TOFD 对试块 2 进行扫查, D 扫图^[11] 如图 12 所示。

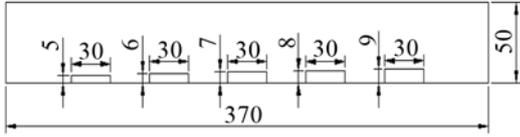


图 10 对比试块 2 侧视图
Fig.10 The side view of the reference block 2

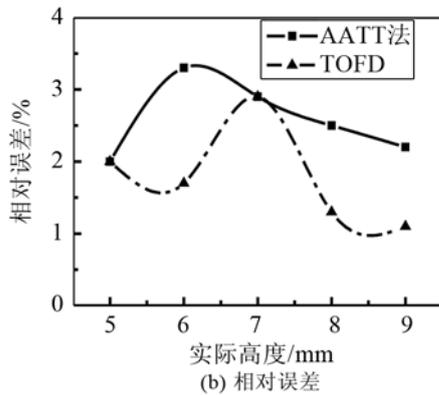
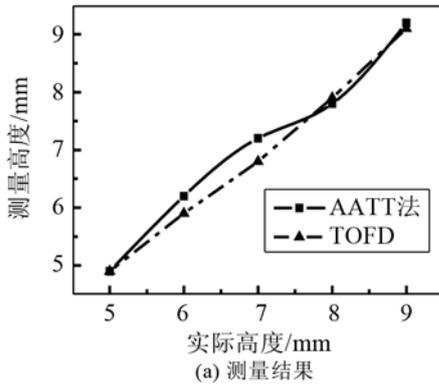


图 11 试块 2 中测量结果(a)及相对误差(b)
Fig.11 Experimental result (a) and relative error (b) for the block 2

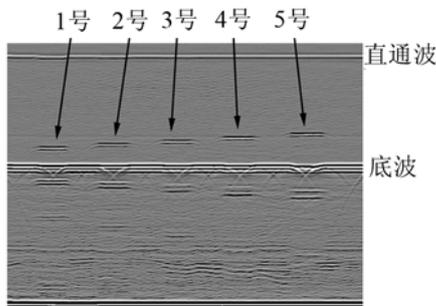


图 12 TOFD D 扫图
Fig.12 The D scan of TOFD measurement

对图 11 进行分析可知 AATT 能精确测量厚板中的开口裂纹自身高度,测量相对误差小于 4%。AATT 测量误差比 TOFD 测量误差大 1%。在测量厚板中的裂纹自身高度时,需要降低扇扫角度步

进,从而提高扇扫角度分辨率。

2.3 自然裂纹测量

实验中设计制作模焊缝试块,焊缝为双面 U 型坡口焊缝,试块厚度为 50 mm,并在模拟试块中预埋一高度为 5 mm 的底面开口裂纹,试块外观如图 13 所示。对该开口裂纹进行扇扫检测,扇扫结果如图 14 所示。图中左下部位为干扰波。

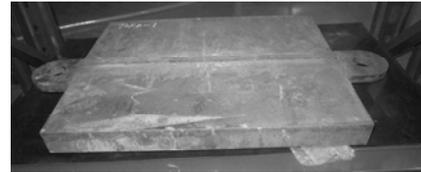


图 13 模拟试块外观图
Fig.13 The appearance of simulation block

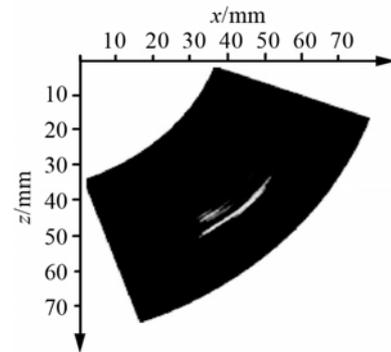


图 14 模拟试块中自然裂纹扇扫图
Fig.14 The sector scan result of natural cracks in simulated block

采用 AATT 测量裂纹自身高度为 5.5 mm, TOFD 法测量结果为 5.3 mm。所以在自然裂纹的检测中, AATT 测量开口裂纹自身高度可以达到与 TOFD 同样的测量精度。

2.4 入射角度对测量结果的影响

在 AATT 法测量过程中,还发现声波入射角度对测量结果影响较大。为更好地分析入射角对测量结果的影响,实验中 AATT 法分两种测量方式对薄板试块 1 中的人工缺陷进行测量,如图 15 所示。

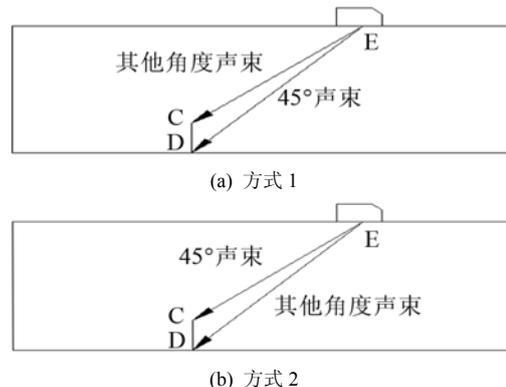


图 15 两种 AATT 法测量裂纹高度的方式
Fig.15 Two ways of AATT to measure the height of crack

在实验中对试块中1至6号裂纹进行检测, 采用AATT法测量开口裂纹自身高度, 实验结果如图16所示。

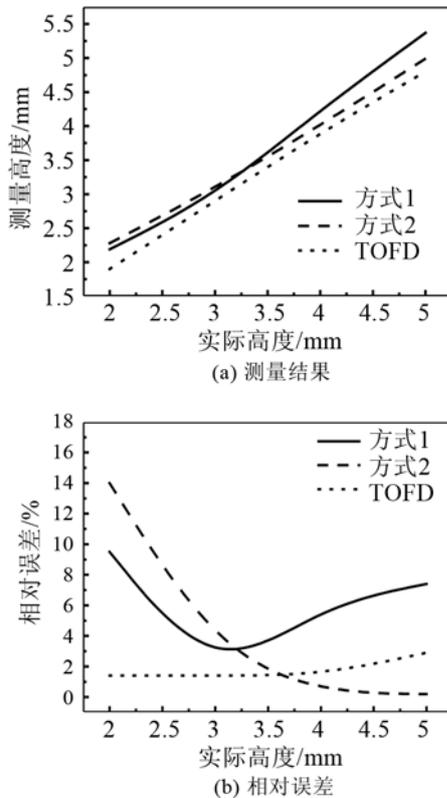


图16 扇扫测量结果(a)和相对误差(b)

Fig.16 Experimental results (a) and relative errors (b) of different measuring ways for the block 1

通过对图16分析可知, 当测量高度大于3 mm的裂纹时, 扇扫AATT法方式2, 即采用小于 45° 声束辐照裂纹下端, 而采用接近 45° 的声束辐照裂纹上尖端, 测量相对误差小于3%。

3 结论

本文通过数值仿真分析和实验对比, 发现AATT能对底面开口裂纹自身高度进行精确测量, 其测量精度与TOFD测量精度基本一致。

AATT测量过程中声束入射角对测量结果的影

响大, 因此在测量过程中需要精确控制扇扫中各个声束的入射角度。在检测厚壁工件时, 需要将扇扫入射角度步进减小, 以提高入射角度的分辨率。因此AATT对相控阵超声仪器性能依赖较大。

AATT操作简便, 声波覆盖范围大, 可以单侧单面定量测量开口裂纹自身高度, 适合在工程应用中测量底面开口裂纹的自身高度。

参 考 文 献

- [1] 任伟平. 焊接钢桥结构细节疲劳行为分析及寿命评估[D]. 四川: 西南交通大学, 2008, 14-40.
REN Weiping. Fatigue Behavior and Fatigue Life Evaluation of Structural Details in Welded Steel Girder Bridges[D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2008, 14-40.
- [2] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. JB/T 4730.3 承压设备无损检测 第3部分: 超声检测[S]. 北京: 新华出版社, 2005: 130-134.
China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. JB/T 4730.3 Nondestructive testing of pressure equipments-Part3: Ultrasonic testing[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2005: 130-134.
- [3] Satyanarayan L, Kumar A, Jayakumar T. Sizing cracks in power plant components using array based ultrasonic techniques[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 28(3): 111-124.
- [4] Satyanarayan L, Pukazhendhi D M. Phased array ultrasonic measurement of fatigue crack growth profiles in stainless steel pipes[J]. Int. J. Press. Vessels Technol, 2007, 129(4): 737-743.
- [5] Ciorau P. Contribution to detection and sizing linear defects by conventional and phased array ultrasonic techniques[J]. Journal of Nondestructive Testing, 2005, 10(9): 233-239.
- [6] Olympus NDT. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications[M]. Waltham: Olympus NDT, 2007.
- [7] 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.
SHI Keren, GUO Yumin. Phased array ultrasonic imaging testing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [8] Drinkwater B W, Wilcox D P. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [9] 刘晓睿, 刘斯以, 吴斌斌. 相控阵超声技术在工业上的应用[J]. 硅谷, 2012(17): 125-127.
LIU Xiaorui, LIU Siyi, WU Binbin. Ultrasonic phased array technology in industry application[J]. Silicon Valley, 2012(17): 125-127.
- [10] Calmon P. CIVA: An expertise platform for simulation and processing NDT data[J]. Ultrasonics, 2006, 44(Suppl.1): 975-979.