

超声渡越时差法检测图像中裂纹端部信号的识别*

迟大钊 刚 铁 盛朝阳

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 利用超声渡越时差法(Time of flight diffraction, TOFD)对含有人工内部裂纹的铝合金试块进行检测。为了提高检测精度,对低分辨率双曲线特征的 B 扫描图像进行处理。根据超声 TOFD 法的检测特点,建立 B 扫描图像合成孔径聚焦(Synthetic aperture focusing technique, SAFT)重建的数学模型,实现图像的增强处理。灰度极值检测的预处理提高了图像纵向时间分辨率;后继的 SAFT 处理有效地抑制图像中的冗余信息,提高缺陷的横向方位分辨率,从而提出一种灰度极值检测与 SAFT 相结合的 B 扫描图像处理办法。为了减少 SAFT 算法的计算时间,采用加运算窗处理,并确定合适的运算窗宽度。结果表明,该方法能有效地增强图像中检测目标,进而能够准确、快速地检测出裂纹上、下端部在模拟试块中的位置。

关键词: 超声渡越时差法 合成孔径聚焦 裂纹检测

中图分类号: TG115.28

0 前言

超声渡越时差法(Time of flight diffraction, TOFD)是通过接收缺陷端部的衍射信号对缺陷进行检测的方法^[1]。该方法可以对焊缝中缺陷的埋藏深度尺寸以及自身尺寸进行判定^[2-3],被证明为面状缺陷的最佳检测手段^[4-5]。在国外,该方法在桥梁、锅炉、压力容器焊缝的检测中得到了应用^[6],并制定了相关的标准。目前,利用超声 TOFD 法对缺陷的定位与定量检测仍在原始图像上进行,工程技术人员的知识和经验起着相当大的作用,这给缺陷的方位和尺寸判定带来较大误差。利用该方法进行 B 扫描检测时,由于探头的声束有一定的覆盖宽度,使检测目标附近很大范围内的 A 扫描信号中均含有目标信息,形成具有双曲线特征的图像。双曲线图像中的冗余信息致使图像的横向分辨率很低,无法实施准确的定位定量测量。

合成孔径聚焦(Synthetic aperture focusing technique, SAFT)算法能以小孔径系统达到大孔径的分辨率,在雷达成像中应用广泛^[7]。该算法的这一优点也使其在超声检测领域得到了应用^[8-11]。本文根据超声 TOFD 法 B 扫描过程中探头对和缺陷端部的动态几何关系,建立 SAFT 算法的数学模型,实现该算法在超声 TOFD 法 B 扫描图像增强处理的应用。为了提高图像的时间分辨率,本文对原始图

像进行了灰度极值检测的预处理。分别在原始图像和最终处理后的图像中对缺陷进行定位定量测量,并将测量结果进行了比较。

1 试块及检测系统

试块材质为高强铝合金。利用电火花和线切割方法在试块上制作了不同尺寸和倾斜角度的横通槽,用来模拟侧壁未熔合、沿焊缝纵向分布的内部裂纹等埋藏型面状缺陷。B 扫描方向垂直于横通槽的长度方向。试验所用试块以及探头的布置和扫描方式如图 1 所示。B 扫描图像利用带有超声 TOFD 附件的 C 扫描检测系统获取,系统采样频率为 100 MHz。所用换能器为一对频率、尺寸和角度精密匹配的宽带窄脉冲纵波斜探头:晶片直径为 6 mm,中心频率为 5 MHz,声束在试块中的折射角为 60°。换能器与试件之间采用水耦合。

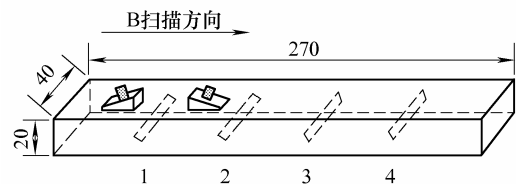


图 1 试块的几何尺寸及 B 扫描方向示意图

2 TOFD 法的检测原理

超声 TOFD 法利用纵波的非检波波形对缺陷进行检测。非检波波形包含了丰富的相位信息,可辅

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2002AA305402)。20061017 收到初稿, 20070615 收到修改稿

助对缺陷性质的判别。在超声 TOFD 法 B 扫描的整个扫描直线上, 超声探头按照“扫描—采样—扫描”的方式工作。B 扫描图像是由探头在不同的扫描位置获取的 A 扫描信号依次排列的信号矩阵, 横向表示探头扫描长度, 纵向表示声波传播时间, 其生成过程如图 2 所示。内部埋藏型缺陷的典型 A 扫描信号包括侧向波, 缺陷的上、下端部衍射波及底面反射波。其中, 侧向波和缺陷下端衍射波相位相同, 底面反射波和缺陷下端衍射波相位相同。当探头对在 AA' 位置时, 系统生成 A 扫描信号 X_{n-1} ; 当探头对经过一个步长扫描至位置 BB' 处, 此时缺陷上端部在两探头连线的中垂线上, 系统生成 A 扫描信号 X_n ; 在位置 CC' 处系统生成 A 扫描信号 X_{n+1} 。 X_n 为定位缺陷上端部的深度位置及横向位置提供准确的信息。 X_n 两侧 A 扫描信号中的缺陷衍射波干扰了对 X_n 的观测, 视为冗余信息。

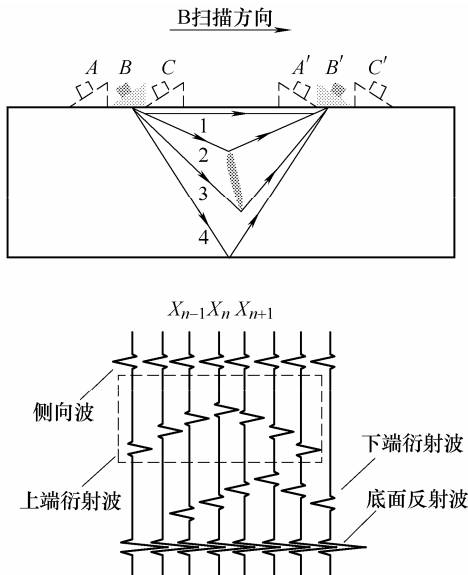


图 2 超声 TOFD 法 B 扫描检测原理

1. 侧向波 2. 上端衍射波
3. 下端衍射波 4. 底面反射波

3 B 扫描图像 SAFT 杂波抑制原理

3.1 SAFT 算法模型

SAFT 算法源于雷达技术, 其原理是以点源探头对被测物体进行扫描, 接收来自物体内部各点的回波信号并加以延时叠加处理, 最终实现图像横向分辨率的提高。现以缺陷上端的检测图像处理过程为例, 说明超声 TOFD 法检测的 B 扫描图像 SAFT 重建原理。在探头对从位置 BB' 扫描至 CC' 过程中, 探头声发射点和缺陷端部的动态几何关系如图 3 所示。图 3 中 d 为缺陷上端部在试块中的埋藏深度尺寸; $2S$ 为两探头声发射点的间距; ΔS 为探头对的扫描步长。

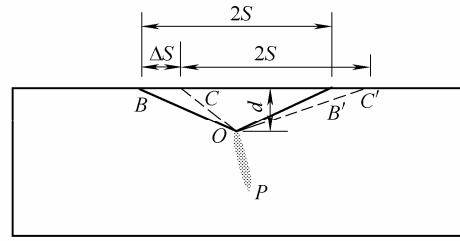


图 3 探头对和缺陷端部的几何位置关系

在声速已知的试块中, 根据如下公式可以计算缺陷端部的埋藏深度尺寸

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(T_D c)^2 + 4T_D c S} \quad (1)$$

式中 T_D 为侧向波和缺陷上端衍射波的时差; c 为纵波在试块中的声速; S 为两探头声入射点间距的一半。

对于图 2 中的 A 扫描信号 X_n , 根据式(1)可以计算求得缺陷上端部的埋藏深度尺寸 d ; 根据图 3 中的几何位置关系, 可求得缺陷上端衍射波去除探头延迟的到达时间 t

$$t = (OB + OB')/c = 2\sqrt{S^2 + d^2}/c \quad (2)$$

缺陷端部偏离两探头连线中垂线位置会带来缺陷波到达时刻的延迟。探头对从位置 BB' 经过一个扫描步长 ΔS 至 CC' 处, 获得 A 扫描信号 X_{n+1} , 其缺陷衍射波信号去除探头延迟的到达时间 $t_{\Delta S}$ 可以根据式(3)求得

$$t_{\Delta S} = (OC + OC')/c = \left(\sqrt{(S - \Delta S)^2 + d^2} + \sqrt{(S + \Delta S)^2 + d^2} \right) / c \quad (3)$$

和位置 BB' 处相比较, 探头在 CC' 处时衍射波到达时间的相对延迟量可由式(4)求得

$$\Delta t_{\Delta S} = t_{\Delta S} - t = \left(\sqrt{(S - \Delta S)^2 + d^2} + \sqrt{(S + \Delta S)^2 + d^2} - 2\sqrt{S^2 + d^2} \right) / c \quad (4)$$

同理, 对于偏离两探头连线中垂线位置 k 个扫描步长处获得的 A 扫描信号 X_{n+k} , 可以通过式(5)、(6)分别计算得出其衍射波去除探头延迟的到达时间 $t_{k\Delta S}$ 以及对于 t 的相应延迟量 $\Delta t_{k\Delta S}$

$$t_{k\Delta S} = \left(\sqrt{(S - k\Delta S)^2 + d^2} + \sqrt{(S + k\Delta S)^2 + d^2} \right) / c \quad (5)$$

$$\Delta t_{k\Delta S} = \left(\sqrt{(S - k\Delta S)^2 + d^2} + \sqrt{(S + k\Delta S)^2 + d^2} - 2\sqrt{S^2 + d^2} \right) / c \quad (6)$$

在进行 SAFT 时移运算时, 按上述求得的延迟量对参与 SAFT 运算的 A 扫描信号分别进行相应的时移。为了减少运算量以提高处理速度, 本算法采

用加运算窗处理。窗宽为参与求和运算的 A 扫描信号的个数。对缺陷上端衍射波进行处理时，运算窗高度上沿选择在侧向波和缺陷上端衍射波之间；下沿选择在上、下端衍射波之间。对 B 扫描图像待处理区域的中 A 扫描信号进行逐一处理，处理过程的数学表达为

$$X_n(t_n) = 1/(N+1) \sum_{i=n-N/2}^{n+N/2} X_i(t_i - \Delta t_i) \quad (7)$$

式(8)中的 $X_n(t_n)$ 为衍射波到达时刻为 t_n 的 A 扫描信号 X_n 经过 SAFT 处理后的返回信号； N 为参与 SAFT 运算 $X_n(t_n)$ 两侧 A 扫描信号个数，即运算窗的宽度为 $N+1$ ； $X_i(t_i - \Delta t_i)$ 为经过时移处理后第 i 个 A 扫描信号， Δt_i 为相应时移量。

3.2 SAFT 时移运算结果

分别对图 2 中的 X_{n-1} 和 X_n 两 A 扫描信号进行 SAFT 处理，运算窗宽为 5，其两侧 A 扫描信号的时移运算结果如图 4 所示。对于偏离两探头连线中垂线处的信号，其时移运算结果会导致运算窗内参与运算的各 A 扫描信号的缺陷衍射波散乱分布，如图 4 a 所示。通过窗内各 A 扫描信号作和取平均计算后，缺陷信号的幅值会很弱，甚至趋于零。对于在两探头连线中垂线处获得的 A 扫描信号，时移运算使运算窗内各 A 扫描信号的缺陷衍射波在相同的时刻到达，如图 4 b 所示。通过各 A 信号作和取平均处理后，缺陷信号的幅值仍然很强。

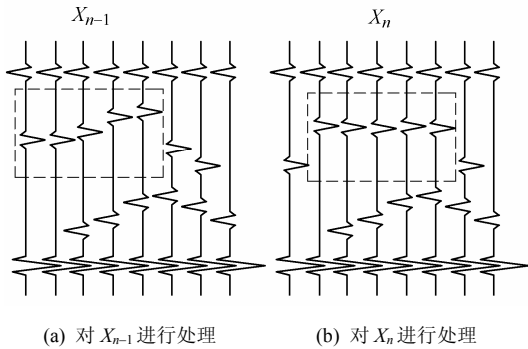


图 4 时移运算结果示意图

4 试验结果

4.1 图像处理结果

设置扫描参数： $2S=36\text{ mm}$ 、 $\Delta S=0.2\text{ mm}$ ，分别对试块中的各个模拟缺陷实施 TOFD 法的 B 扫描，保存图像数据。

图 5 所示为缺陷 2 的原始 B 扫描图像及其相应的处理结果。原始扫描图像中包含水平分布的侧向波、底面反射波和双曲线特征的缺陷上、下端部衍

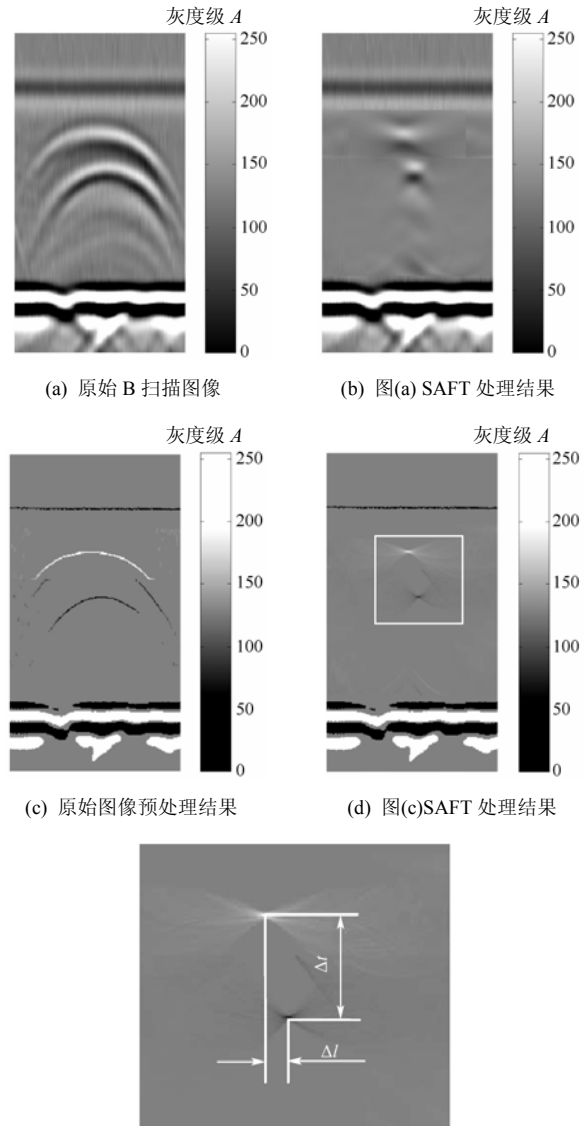


图 5 图像处理结果

射波，图像的分辨率很低，如图 5 a 所示。对原始图像中的缺陷波进行 SAFT 处理，选择运算窗宽度为 81，处理结果如图 5 b 所示。图像中的冗余信息得到了有效抑制，图像的横向分辨率得到了一定程度的改善，但是纵向分辨率很低。为了提高图像的纵向分辨率即时间分辨率，对原始 B 扫描图像进行灰度极值检测的预处理。对缺陷上端衍射波进行灰度值峰点检测，对缺陷下端衍射波进行灰度值谷点检测处理，结果如图 5 c 所示。灰度极值检测突出了缺陷信号的时间信息，使作为计算基准的侧向波和缺陷端部衍射波的时间分辨率得到了显著的提高。但是，图像的横向分辨率仍然很低。选择相同的运算窗宽度对灰度极值检测预处理后的图像进行 SAFT 算法处理，处理结果及局部放大图像分别见图 5 d、5 e 所示。灰度极值检测与 SAFT 相结合的处理，去除了图像中由于信号振荡以及声

束宽度带来的冗余信息,有效地增强了图像中的检测目标,使裂纹端部信号更易于识别。图 5 e 中的 Δl 为缺陷上、下端部的横向距离; Δt 为缺陷上下端部衍射波到达时刻的差值,包含了缺陷的垂直高度信息。

4.2 人工缺陷的测量结果

分别在原始 B 扫描图像和本文最终处理的图像

上捕捉各缺陷端部衍射信号的到达时刻,并读取缺陷上、下端部的水平位置。通过计算得出各缺陷端部的埋藏深度和倾斜角度。测量结果如表所示。其中,在原始图像上的测量结果为 3 次测量取平均值所得;在最终处理图像上的测量结果为一次测量所得。可见,在本文最终处理的图像上,对缺陷端部的定位测量更快速,更准确。

表 各人工缺陷的测量结果

试块 编号	上端埋深 d_1 / mm			下端埋深 d_2 / mm			上下端水平距离 l / mm			倾斜角度 θ / (°)		
	实际 尺寸	原始图像 测得尺寸	处理图像 测得尺寸	实际 尺寸	原始图像 测得尺寸	处理图像 测得尺寸	实际 尺寸	原始图像 测得尺寸	处理图像 测得尺寸	实际 角度	原始图像 测得角度	处理图像 测得角度
1	8.3	8.4	8.2	10.9	10.8	11.0	4.5	5.2	4.4	30.0	24.8	32.5
2	8.9	9.3	8.7	12.4	12.8	12.6	3.5	2.6	3.4	45.0	53.4	48.9
3	7.9	7.5	7.7	12.2	12.1	12.2	2.5	1.8	2.4	59.8	68.6	61.9
4	7.1	6.5	6.9	12.1	12.1	12.1	1.2	0.8	1.0	76.5	81.9	78.9

5 结论

(1) 建立超声 TOFD 法 B 扫描图像 SAFT 算法的数学模型,实现内部埋藏型缺陷图像的增强处理。提出灰度极值检测与 SAFT 相结合的 B 扫描图像处理技术。

(2) 采用加运算窗处理,合理的运算窗宽度的选取,能有效地减少 SAFT 合成运算的计算时间。

(3) 本文最终处理的图像时间纵向分辨率可达 $0.01 \mu\text{s}$; 20 mm 厚铝合金板上测量的缺陷端部埋藏深度和横向方位测量误差不超过 0.2 mm ; 缺陷倾斜角度测量误差不超过 5° 。

参 考 文 献

- [1] ELINEUDO P, ROMEU R, MARCIO H. Pattern recognition of weld defects in preprocessed TOFD signals using linear classifiers double glow surface alloying process[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2004, 23(4): 163-171.
- [2] GANG Tie, XU Yan, CHI Dazhao, et al. Ultrasonic TOFD testing for aluminum alloy weld of thick plate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(2): 79-82.
- [3] 刚铁, 徐艳, 迟大钊, 等. 铝合金焊缝超声 TOFD 检测的信号特征[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 1-4.
- [4] WILLIAM J, JOSÉ A, GLENN A. Crack measurement in steel plates using TOFD method[J]. J. Perf. Constr. Fac., 2000, 14(2): 75-82.
- [5] BABY S, BALASUBRAMANIAN T, PARDIKAR R J, et al. Time-of-flight diffraction (TOFD) technique for accurate sizing of surface-breaking cracks[J]. Insight, 2003, 45(6): 426-430.
- [6] MURAI Y, SAITO K, SUZUKI N, et al. Ultrasonic testing of welded joint models for bridge construction based on the TOFD method[J]. Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 1999, 49(2): 45-47.
- [7] 孙宝申, 张凡, 沈建中. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究[J]. 声学学报, 1997, 22(1): 42-49.
- [8] LIOU Ren-jean, KAO Kuang-chien, YEH Chin-yung, et al. Flaw detection and sizing of ultrasonic images using wavelet transform and SAFT[J]. IEEE, 2004: 106-110.
- [9] BIAGI E, MASOTTI L, ROSSI I, et al. Synthetic aperture technique for echo graphic focusing based on pulse compression[J]. IEEE Ultrasonic Symposium, 2004: 1 425-1 427.
- [10] OLIVER K C, CHRISTIAN H, PATRICK K, et al. Ultrasonic imaging of sheet metal forming[J]. Ultrasonics, 2004, 42: 989-992.
- [11] MARTIN S, WINFRIED J. Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media[J]. Ultrasonics, 2003, 41: 125-131.

METHOD FOR CRACK TIP RECOGNITION IN AN ULTRASONIC TIME OF FLIGHT DIFFRACTION IMAGE

CHI Dazhao GANG Tie SHENG Zhaoyang
(State Key Laboratory of Advanced Welding
Production Technology, Harbin Institute
of Technology, Harbin 150001)

Abstract: An aluminum sample containing artificial internal crack is inspected by using the method of ultrasonic time of flight diffraction (TOFD), and the low resolution B-scan image with hyperbolic feature is processed in order to improve testing precision. According to the inspection manner of ultrasonic TOFD, a synthetic aperture focusing technique (SAFT) algorithmic model for B-scan image reconstruction is founded. By using the model, ultrasonic TOFD B-scan image can be enhanced. The time resolution of the B-scan image is improved by the pre-processing of searching for gray peak value, and the lateral resolution of the image is enhanced by suppression of the cutter by the following processing of SAFT. A B-scan image processing method that based on searching for gray peak

value and SAFT is therefore proposed. A processing window is adopted in order to minimize the execution time of the algorithm, and proper width of the window is chosen. The result shows that the method can effectively enhance the target in the image, and the location of upper and lower crack tip in the sample can be measured rapidly and accurately accordingly.

Key words: Ultrasonic time of flight diffraction
Synthetic aperture focusing technique
Crack testing

作者简介: 迟大钊, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声波无损检测与评价。发表论文 10 篇。

E-mail: dzchi@hit.edu.cn

~~~~~

(上接第 102 页)

**Abstract:** In order to get ultra-smooth glass substrate of digital compact disc (CD), 2  $\mu\text{m}$  and 0.3  $\mu\text{m}$  cerium dioxide slurries as well as 50 nm silica slurry are prepared respectively, and three steps chemical-mechanical polishing (CMP) of sodium-calcium glass substrate in the three slurries has been studied. Results show that during the first step polishing with 2  $\mu\text{m}$  cerium dioxide slurry, a high material removal rate is reached and the average roughness  $R_a$  value of the polished surfaces can be decreased from previous 537.9 nm to 1.63 nm. In the second step CMP with 0.3  $\mu\text{m}$  cerium dioxide slurry, the  $R_a$  value can be decreased to 0.73 nm. By using 50 nm silica slurry in the final CMP, the  $R_a$  value of the glass substrate surfaces can be

further reduced to 0.44 nm, which is the lowest value reported to date for CD glass substrate polishing. Atom force microscopy (AFM) analysis shows that the polished surfaces are ultra-smooth without micro-defects. Based on the analyses of the mechanical and chemical effects during the glass substrate CMP, the CMP mechanism is deduced preliminarily.

**Key words:** Chemical mechanical polishing(CMP)  
Glass substrate Slurry  
Sub-nanometer scale planarization

作者简介: 雷红, 男, 1968 年出生, 博士, 副研究员, 中国机械工程学会高级会员。主要研究方向为纳米摩擦学和化学机械抛光技术。

E-mail: hong\_lei2000@sohu.com