

基于合成孔径聚焦成像的超声衍射时差法图像优化处理

欧阳星峰, 余焕伟, 蒲建忠

(绍兴市特种设备检测院, 绍兴 312071)

摘要: 为了改善超声衍射时差法(TOFD)检测图像品质, 提高缺陷图像的横向分辨率, 从基本原理出发, 建立了 D 扫和 B 扫 TOFD 图像的合成孔径聚焦成像模型, 对提高合成孔径聚焦成像品质的方法进行了研究, 实现了 TOFD 图像的合成孔径聚焦技术与匹配滤波、维纳滤波、旁瓣抑制等算法的综合集成。试验结果表明, 提出的合成孔径聚焦成像算法能有效改善 TOFD 图像质量, 增强对缺陷尺寸的横向定量识别, 有利于高分辨 TOFD 技术的实现。

关键词: 超声衍射时差法; 合成孔径聚焦; 匹配滤波; 维纳滤波

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2019)03-0029-05

Time of Flight Diffraction Image Optimization Process Based on Synthetic Aperture Focusing Imaging

OUYANG Xingfeng, YU Huanwei, PU Jianzhong

(Shaoxing Special Equipment Testing Institute, Shaoxing 312071, China)

Abstract: In order to improve Time of Flight Diffraction (TOFD) image quality and lateral defect resolution, a synthetic aperture focusing model for D-scan and B-scan image reconstruction was built based on fundamental principles and then some techniques contributive to image reconstruction such as matched filter, wiener filter and side lobe suppression were studied and integrated in the synthetic aperture focusing technique (SAFT). The final testing results showed that the proposed SAFT could effectively improve TOFD image quality and enhance quantitative recognition of lateral defect, thus providing an important approach of the high resolution TOFD technique.

Key words: TOFD; synthetic aperture focusing; matched filter; wiener filter

作为新技术之一的超声衍射时差法(TOFD)与传统的超声波检测法不同, TOFD 是一种依靠被测试件内部缺陷的端角和端点处得到的超声波衍射能量来对缺陷测深、定高的方法, 缺陷定位不依靠信号振幅, 具有可靠性好、定量精度高、信息量丰富、检测效率高等优点^[1-2]。TOFD 技术的这些优点特别适合对焊缝缺陷的尺寸、位置、形状等信息进行精确量化, 但由于 TOFD 探头覆盖范围广, 声束指向性较

差, 缺陷在图像上常呈抛物线形, 横向分辨率存在不足^[3-4]。合成孔径聚焦技术(SAFT)最先用于合成孔径雷达, 其可以用低指向性的信号源和较低的工作频率来获得较高的方位分辨率^[5]。超声检测领域用 SAFT 来提高超声图像的分辨率, 如医学上血管内超声成像^[6-7]、焊缝高分辨率的超声重建图像以及相控阵图像的重建等^[8-9]。在国内, 也有许多学者^[10-13]对 TOFD 图像的 SAFT 重建进行了研究, 有助于提高 TOFD 图像的缺陷横向分辨率, 实现对距离较远缺陷的准确定位和定量评估。为了改善 SAFT 在 TOFD 领域的应用效果, 提高 TOFD 图像质量, 从 SAFT 算法的原理出发, 采用维纳滤波、匹配滤波、时移差值等方法对原始信号噪声和相位混

收稿日期: 2018-06-12

作者简介: 欧阳星峰(1978—), 男, 研究生, 工程师, 主要从事承压类特种设备检测工作

通信作者: 余焕伟, yhw_sxtj@163.com

叠进行抑制,显著提高了 SAFT 的处理效果,得到了较好的缺陷图像分辨率。

1 SAFT 成像算法原理

超声领域的 SAFT 是根据各成像点的空间位置,对接收到的散射信号作适当的声时延迟或相位延迟后再合成得到的逐点聚焦成像^[14], SAFT 的方位分辨率只与超声波激发晶片的尺寸有关,与声波频率和声程无关,通过 SAFT 可以使超声图像横向分辨率提高到探头晶片尺寸的一半^[15]。TOFD 非平行扫查时合成孔径聚焦成像原理示意如图 1 所示,一组 TOFD 探头以速度 v 在焊缝两侧进行非平行扫查(D 扫),超声波速度为 c ,缺陷 O 处的深度为 h ,经过时间 t 后探头从 AA' 移动到 BB' ,假设接收到缺陷衍射波 A 扫信号的时间分别为 t_A 、 t_B ,探头中心间距(PCS)为 $2S$,由几何位置关系可得

$$\Delta t = t_B - t_A = \frac{2(\sqrt{S^2 + H^2 + L^2} - \sqrt{S^2 + H^2})}{c} \quad (1)$$

式中: Δt 为接收到缺陷波信号的时间延时; $L = vt$, 为探头移动的距离; H 为缺陷深度。

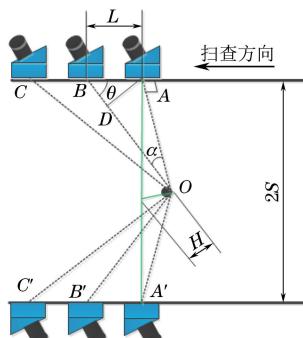


图 1 TOFD 非平行扫查时合成孔径聚焦成像原理示意

在 TOFD 检测中, A 扫信号在扫查方向上与扫查分辨率 ΔL 相对应, 因此探头移动距离 L 可用 $n\Delta L$ 来代替; TOFD 图像中沿扫查方向第 i 个 A 扫信号中, 第 j 个 AD 采样数据点相对应的像素点记为 $A_i(x_i, t_j)$, x_i 为扫查距离, t_j 为接收到当前数据点的时间。假设图 1 中 TOFD 探头在 AA' 位置时, TOFD 图像中代表缺陷 O 的图像点为 $A_i(x_i, t_j)$, 则缺陷 O 距离上表面的深度 H_j 可表示为

$$H_j = \sqrt{(t_j/2)^2 - S^2} \quad (2)$$

在式(1)中利用 $n\Delta L$ 替代 L , H_j 替代 H , 则式(1)可改写为

$$\Delta t_{nj} = \frac{2[\sqrt{S^2 + H_j^2 + (n\Delta L)^2} - \sqrt{S^2 + H_j^2}]}{c} \quad (3)$$

同理, 在平行扫查(B 扫)时, 将 TOFD 探头中心点移动 $n\Delta L$ 距离时, 探头接收到缺陷 O 散射的 A 扫信号的时间延时可表示为

$$\Delta t_{nj} = 2[\sqrt{(S + n\Delta L)^2 + H_j^2} + \sqrt{(S - n\Delta L)^2 + H_j^2} - 2\sqrt{S^2 + H_j^2}]/c \quad (4)$$

根据时间延时 Δt_{nj} 对 $A_i(x_i, t_j)$ 进行时运算, 假设参与合成孔径运算的数据点数为 $2N + 1$, 则 TOFD 图像中 $A_i(x_i, t_j)$ 点的合成孔径表达式为

$$A_i^{kj}(x_i, t_j) = \sum_{n=-N}^N \frac{A_{i+n}(x_{i+n}, t_j - \Delta t_{nj})}{2N + 1} \quad (5)$$

$A_i^{kj}(x_i, t_j)$ 为 SAFT 处理后的聚焦图像点, 合成孔径窗口大小 $2N + 1$ 可以通过近似公式^[16]或试验来估算。式(5)即为进行 SAFT 超声图像重建的基本公式, 通过改变聚焦点 $A_i(x_i, t_j)$ 的位置即可实现对 TOFD 图像的逐点聚焦成像, 但是由于探头频带、信号噪声以及相位误差等因素的影响, 常常需要采用其他方法来提高 SAFT 的成像品质。

2 TOFD 图像的信号处理及 SAFT 算法实现

2.1 SAFT 的时移线性插值

SAFT 超声成像需要对一组邻近的 A 扫信号进行时移运算, 如式(5)所示, 假设超声系统的 A/D 采样周期为 ΔT , 记 $t_j - \Delta t_{nj}$ 为 $(I + \alpha)\Delta T$, 其中 I 为整数, α 为小数, 可以看出, 当 α 不为零时, $A_{i+n}(x_{i+n}, t_j - \Delta t_{nj})$ 代表的点落在两个相邻像素点之间, 常规的方法是在 $I\Delta T$ 和 $(I+1)\Delta T$ 之间取距离最近的点, 这样不可避免地造成一定的时移误差。为了提高时移运算的精度, 对延时时移进行线性插值处理, 如式(6)所示。

$$A_{i+n}(x_{i+n}, t_j - \Delta t_{nj}) = A_{i+n}(x_{i+n}, I\Delta T) +$$

$$\alpha \{A_{i+n}(x_{i+n}, (I+1)\Delta T) - A_{i+n}(x_{i+n}, I\Delta T)\} \quad (6)$$

2.2 SAFT 的匹配滤波

在 TOFD 检测时, 随着探头的连续移动, 接收探头接收到的缺陷散射信号的时间序列发生延时, 而且其相位和频率也会变化, 这种现象可以用多普勒频移来解释。假设探头入射波信号为连续信号 $A(x, t)$

$$A(x, t) = A \exp\left(\frac{i2\pi ct}{\lambda}\right) \quad (7)$$

式中: A 为信号幅度; λ 为波长。

则图 1 中探头在 BB' 位置接收到的缺陷散射信号为

$$A(x, t) = C_s A \exp(i2\pi ct/\lambda) \times \exp\left[-\frac{i4\pi\sqrt{S^2 + H^2 + L^2}}{\lambda}\right] \quad (8)$$

式中: C_s 为入射声束在 O 点的散射系数。

令 $R = \sqrt{S^2 + H^2}$, $n\Delta L$ 替换 L , 当探头移动距离 $n\Delta L \ll R$ 时, 由一阶泰勒近似可得

$$2\sqrt{S^2 + H^2 + L^2} = 2R \left[1 + \frac{(n\Delta L)^2}{2R^2} \right] \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)可得

$$A(x, t) = C_s A \exp\left(\frac{i2\pi ct}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{i4\pi R}{\lambda}\right) \times \exp\left[-\frac{i2\pi(n\Delta L)^2}{\lambda R}\right] \quad (10)$$

O 点的散射信号的相位与 $(n\Delta L)^2$ 呈线性变化, 这即是多普勒频移, 可以看出, SAFT 成像时如果仅进行时移运算而不考虑相位变化, 在下一步进行聚焦求和运算时会造成相位混淆或干扰, 引起图像方位分辨率的下降, 因此为了提高 SAFT 成像品质, 必须要对此相位变化项进行滤波处理。匹配滤波器是最佳线性滤波器的一种, 以输出信噪比最大为准侧, 其传递函数是输入信号的复共轭, 滤波过程可以理解为求自相关, 可以抵消各频率成分的相位, 与式(10)中相位变化项对应的匹配滤波器的冲击响应为

$$h(n) = \exp\left[\frac{i2\pi(n\Delta L)^2}{\lambda R}\right] \quad (11)$$

匹配滤波器对信号的处理可以在时域做卷积运算, 也可变换到频域作乘法运算, 时域方法通常用于信号采样频率不高、滤波器系数点较少的情况, 利用卷积运算来实现。在 TOFD 图像的距离方向上对参与合成孔径运算的 $2N+1$ 个 A 扫信号进行匹配滤波, 考虑到参与运算的 A 扫信号数量较少, 选用时域卷积算法, 如式(12)所示

$$A_n^h(x_n, t) = \sum_{k=-N}^N h(k) A_{n-k}(x_{n-k}, t) \quad (12)$$

式中: $A_n^h(x_n, t)$ 表示匹配滤波后的 A 扫信号序列。

对于 B 扫, TOFD 探头垂直于焊缝方向运动, 由式(7)可得 O 点的散射信号为

$$A(x, t) = C_s A \exp\left(\frac{i2\pi t}{\lambda}\right) \times \exp\left\{-\frac{i2\pi[\sqrt{H^2 + (S + vt)^2} + \sqrt{H^2 + (S - vt)^2}]}{\lambda}\right\} \quad (13)$$

式(13)中的相位变化项对时间 t 求导, 可得多普勒频移 f_d 为

$$f_d = -\frac{v}{\lambda} \left[\frac{S + vt}{\sqrt{H^2 + (S + vt)^2}} - \frac{S - vt}{\sqrt{H^2 + (S - vt)^2}} \right] \quad (14)$$

图 2 为根据式(14)得到的不同深度下 f_d 随扫查距离变化的关系曲线, $2S$ 为 40 mm, v 为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可以看出, 衍射回波的调频斜率随缺陷深度变化较大, 深度较浅时调频斜率呈曲线变化, 深度接近于探头间距的一半时调频斜率趋于恒定, 具有线性调频信号的形式。

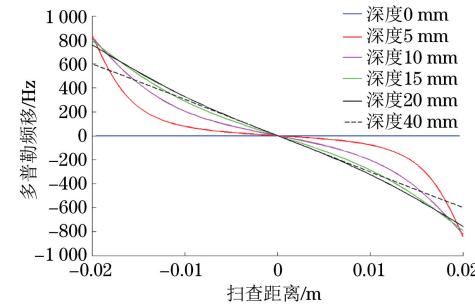


图 2 TOFD 法平行扫查时多普勒频移 f_d 随扫查距离变化的关系曲线

考虑到 TOFD 法在平行扫查时, 探头一般不越过焊缝, 扫查速度 v 相对较小, 当 $vt \ll S$ 时, 即用来进行合成孔径处理的数据窗口在距离远小于探头中心距离的一半时, 根据泰勒近似有

$$\sqrt{H^2 + (S + n\Delta L)^2} + \sqrt{H^2 + (S - n\Delta L)^2} = 2R \left[1 + \frac{(n\Delta L)^2}{2R^2} \right] \quad (15)$$

式(15)的结果与式(9)的结果相同, 可见当满足合成孔径窗口距离远小于探头中心距离的一半时, B 扫查图像也可采用与 D 扫查图像类似的匹配滤波处理方法。

2.3 超声波束旁瓣抑制

根据式(5)对 TOFD 图像进行合成孔径聚焦时, 对孔径中心位置左右两侧的 A 扫信号进行延时叠加过程中采用的是等权叠加。由于 TOFD 采用的是大扩散角探头, 波束旁瓣相对较强, 采用等权重叠加会降低对旁瓣的抑制, 影响合成孔径聚焦图像的品质。考虑到不同位置数据点对缺陷散射波贡献率的差异, 可以对合成孔径窗口不同位置的数据进行幅度加权叠加, 孔径中心点分配权重最高, 中心点两侧权重依次降低, 这样就有效抑制了参与时移运算的波束旁瓣, 这种方法称为波束幅度变迹。

结合式(5)可知, 需要进行幅度变迹处理的 A 扫信号数为 $2N+1$, 变迹窗函数 $w(n)$ 需满足在 $n=0$ 时取最大值 1, $n=\pm N$ 时取最小值, 在保留最大信息的同时尽可能地消减旁瓣波束, 符合上述要求的窗函数有 Hanning 函数和高斯函数等^[17]。经窗函数进行幅度变迹处理的合成孔径聚焦的时移运

算可写作

$$A_i^{kj}(x_i, t_j) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N w(n) A_{i+n}(x_{i+n}, t_j - \Delta t_{nj}) \quad (16)$$

2.4 TOFD 图像的维纳滤波

SAFT 能大大提高超声波图像的分辨率,但当原始图像存在较多噪声时,会掩盖图像细节部分,克服这一缺点的方法之一是使用维纳滤波与一系列角度相关参考信号相结合的 SAFT^[16]。维纳滤波是一种最优线性滤波法,可以对随机信号作平滑滤波和预测,在频域范围内可表示为

$$P(\omega_1, \omega_2) = \frac{H^*(\omega_1, \omega_2)}{H(\omega_1, \omega_2)^2 + k} G(\omega_1, \omega_2) \quad (17)$$

式中: P 为滤波去噪后的信号; G 为含有噪声的原始信号; H 为维纳滤波函数,可由最小均方误差原理求得; H^* 表示 H 的复共轭函数; k 为大小可调的常数,表示原始图像的信噪比; ω_1, ω_2 为图像频域的两个分量。

在实际的图像中,一般很难准确得到图像信噪比的先验知识,如果把图像划分成 M 个小块,在小的局部图像空间中信号可认为是稳定的,对于均值为零的白化随机噪声 V ,其功率谱可与方差相等。维纳滤波器依次作用在小块局部图像空间,滤波函数 $P(n_1, n_2)$ 就可以由局部图像信息确定,在时域范围内可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} P(n_1, n_2) = \mu + \\ \frac{\sigma_f^2 - \sigma_v^2}{\sigma_f^2} [f(n_1, n_2) - \mu(n_1, n_2)] \\ \sigma_v^2 = \frac{1}{M} \sum \sigma_f^2 \end{array} \right. \quad (18)$$

式中: μ 为局部图像范围内的均值; σ_f^2 为局部图像方差,而且在每个局部范围内的 μ 和 σ_f 值均不相同; σ_v^2 为噪声方差,可以由所有图像局部方差的平均值来估算。

根据以上所述的 SAFT 及信号处理算法,采用 Labview 和 C++ 混合编程的方法,编写了 TOFD 图像处理软件,其核心算法流程如图 3 所示。

3 试验结果

图 4(a) 为厚度为 25 mm 的钢制试块,其中心有一个 $\phi 5.6$ mm 的平底孔,距离开口表面的深度为 10 mm,图 4(b) 为其 TOFD 非平行扫查(D 扫)图像,扫查面在开口面的相对面,扫查长度为 80 mm,其中维纳滤波窗口大小为 4×4 ,TOFD 采样频率为

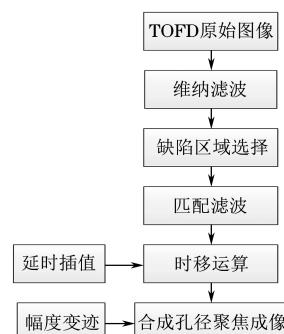


图 3 TOFD 图像处理软件核心算法流程

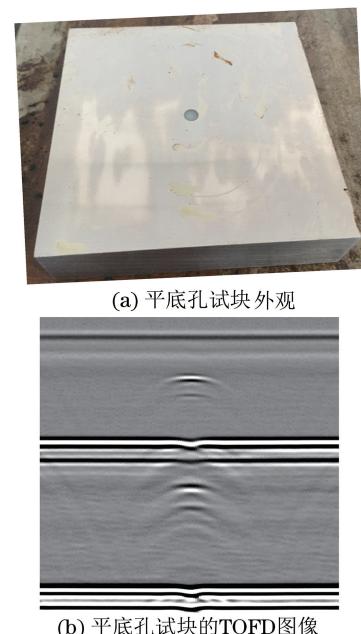
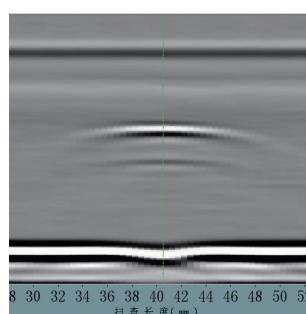


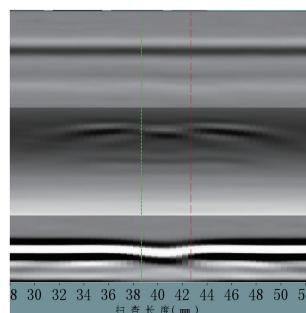
图 4 平底孔试块外观及其非平行扫查 TOFD 图像

100 MHz, 探头规格为 $\phi 6$ mm, 探头角度为 60° , 中心频率为 5 MHz, 2S 为 56 mm。从图 4(b) 可看出, 平底孔上端的 TOFD 图像呈双圆弧状, 靠近直通波的弧线比较明显, 为平底孔的主散射图像, 下部较短的弧线由部分声波沿平底孔边缘散射引起, 其位置在主信号之后, 且强度较弱。由于 TOFD 探头的扩散角较大, 旁瓣效应明显, 平底孔端部两侧的衍射弧相互叠加, 因此缺陷的横向分辨率降低。

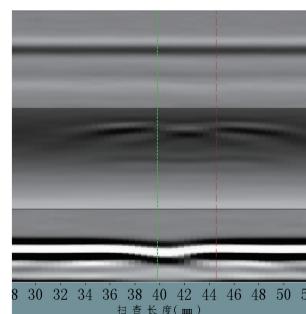
图 5(a) 为经过维纳滤波后的平底孔图像, 背景噪声基本被去除, 图 5(b) 和 5(c) 为经 SAFT 处理后的图像, 其中图 5(b) 为海宁窗变迹处理的图像, 图 5(c) 为高斯窗变迹处理图像, 图中的虚线为游标线, 图底为长度标尺, 可看出经 SAFT 处理后, 原有的衍射弧分解重构为三段离散条纹, 中间的水平条纹清晰地指示出了平底孔的位置和长度, 经测量分别为 4.1, 4.7 mm, 与处理前相比缺陷的横向分辨率提高了。对比图 5(b) 和图 5(c) 还发现: 海宁窗变迹对衍射波的抑制程度要优于高斯窗变迹对衍射



(a) 维纳滤波处理后的图像



(b) SAFT(海宁窗)处理后的图像



(c) SAFT(高斯窗)处理后的图像

图 5 经过软件处理后的平底孔 TOFD 图像

波的抑制程度,而且高斯窗变速处理后的图像存在一定的偏移,比如图 5(a)中缺陷图像的中心位置约为 40.5 mm,图 5(b)中缺陷图像的中心位置约为 40.6 mm,而图 5(c)中缺陷图像的中心位置约为 42.1 mm,图 5(c)中的结果明显大于图 5(a)和图 5(b)中的结果。

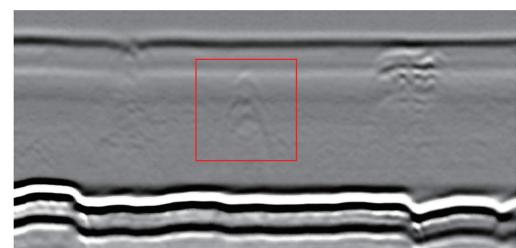
图 6(a)为厚度为 20 mm 的焊接试板外观,图 6(b)为其 D 扫图像,包括直通波、底波以及二者之间的缺陷衍射图像,扫查长度为 250 mm,探头中心间距为 38 mm,整个图谱经过 4×4 窗口大小的维纳滤波处理。对图中红色方框内的 TOFD 图谱进行 SAFT 处理,孔径数为 27,处理后的结果如图 6(c)所示。对比发现,经 SAFT 处理后抑制了缺陷处的弧状衍射波,提高了缺陷的横向分辨率。

4 结论

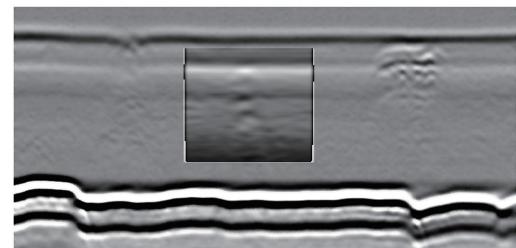
从 SAFT 的基本原理出发建立了 D 扫和 B 扫



(a) 焊缝试板外观



(b) D 扫图像(维纳滤波处理)



(c) SAFT(海宁窗)

图 6 焊接试板外观及其 D 扫 TOFD 图像

TOFD 图像的合成孔径聚焦成像模型,研究了匹配滤波和维纳滤波等方法在 TOFD 图像上的实现途径。对 TOFD 图像信号处理算法进行了优化设计,实现了 TOFD 图像的合成孔径聚焦技术与匹配滤波、维纳滤波、旁瓣抑制等算法的综合集成,并通过自编软件进行了试验验证。结果表明,提出的合成孔径聚焦图像重建算法成功实现了对 TOFD 图像的重建,有效提高了缺陷的横向分辨率,有助于 TOFD 技术的实现。

参考文献:

- [1] 李衍.超声衍射时差法探伤和定量技术——焊缝超声检测最新欧洲标准介绍[J].无损检测,2004,26(1):47-53.
- [2] 李衍.超声 TOFD 原理和方法要领[J].无损检测,2007,29(2):88-93.
- [3] 迟大钊,刚铁,袁媛,等.面状缺陷超声 TOFD 法信号和图像的特征与识别[J].焊接学报,2005,26(11):1-4.
- [4] 董镌.超声 TOFD 技术在焊缝检测中的应用及缺陷分析研究[D].兰州:兰州理工大学,2013.
- [5] SPIES M, JAGER W. Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media [J]. Ultrasonics, 2003(41): 125-131.

(下转第 37 页)

量的铁素体,而铁素体有一定的磁性,磁性给测厚结果带来了较大的误差,使测量数值小于实际厚度。

表 5 铁素体体积分数检测结果 %

标准偏差	95%可靠区间	相对精度	铁素体体积分数
0	0	0	3.1

4 结论

(1) 对爆炸焊接奥氏体不锈钢复合板复层厚度进行测量,适合的方法是超声测厚法和金相测厚法。

(2) 磁性测厚法不适合用于爆炸焊接奥氏体不锈钢复合板复层厚度的测量,其测量结果存在严重偏差,与实际厚度完全不符。

(3) 超声测厚仪便携、操作简单,超声测厚法对被检材料不产生影响,非常适合在奥氏体不锈钢复合板的生产、检验现场使用。

(4) 金相测厚法是复合板复层厚度测量最精确的方法,但该方法需要取样才能测量,因此不合适现场检测。

参考文献:

[1] 张其枢,堵耀庭.不锈钢焊接[M].北京:机械工业出版

(上接第 33 页)

- [6] PASSMANN C, ERMERT H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, 1996, 43(4): 545-552.
- [7] JENSEN J A, ODDERSHEDE N. Estimation of velocity vectors in synthetic aperture ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2006, 25(12): 1637-1644.
- [8] SCHUSTER J G, DOCTOR R S, BOND J L. A system for high-resoulution, nondestructive, ultrasonic imaging of weld grains [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(6), 1526-1532.
- [9] BOEHM R, BRACKROCK D, KITZE J, et al. SAFT for crack surface analysis comparison of modeling and phased array measurements [C]// 5th International Workshop of NDT Experts, Prague :[s. n.], 2009.
- [10] 刚铁,迟大钊,袁媛.基于合成孔径聚焦的超声 TOFD

社,2000:527.

- [2] 刘中青,邸斌.异种材料的焊接[M].北京:科学出版社,1990:273-274.
- [3] 崔崑.钢铁材料及有色金属材料[M].北京:机械工业出版社,1981:236.
- [4] 侯仰博.奥氏体不锈钢复合板制压力容器不同热处理工艺对焊接接头性能的影响[J].焊接质量控制与管理,2018,47(3):81-84.
- [5] 郑月秋.钛和不同金属焊接时的爆炸过渡焊[J].钛工业进展,1997,23(1):23-25.
- [6] 王耀华.金属板材爆炸实践与研究[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [7] 邵炳煌,张凯.爆炸焊接原理及应用[M].大连:大连工业大学出版社,1987.
- [8] 许遵言,张俭.不锈钢堆焊层厚度的测量[J].无损探伤,2002(2):9-11.
- [9] 周存龙,陈少航,黄庆学,等.热轧碳钢/不锈钢复合板的界面厚度分析[J].热处理工艺,2015,44(5):131-132.
- [10] 张宇,林莉,吕香慧,等.316L 不锈钢爆炸焊薄层厚度的超声测量[J].无损探伤,2010, 34(6):10-13.
- [11] 黄杏利,薛治国,穆绪梅,等.铝钢复合板结合性能研究[J].兵器装备工程学报,2016, 37(5):165-167.
- [12] 樊科社,李平仓,吴江涛,等.爆炸焊接法制备大面积钽/锆/钛/钢四层复合板[J].兵器装备工程学报,2017(7):148-151.

检测技术及图像增强[J].焊接学报,2006,27(10):7-10.

- [11] GANG T, CHI D Z. Novel approach to enhancement of ultrasonic TOFD B-scan image for measurement of weld crack [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(1): 87-93.
- [12] 周靖宇,林丹源,陈建华,等.合成孔径聚焦技术在 TOFD 检测中的应用[J].无损检测,2012,34(5):59-61,83.
- [13] 谢雪,祝美丽,杨会敏,等.合成孔径聚焦技术在超声衍射时差法缺陷长度定量中的应用研究[J].机械工程学报,2015,51(18):20-25.
- [14] 于婧.高性能合成孔径超声成像方法研究[D].沈阳:东北大学,2014.
- [15] 姚冰.合成孔径声纳成像及目标检测与识别技术的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [16] 宋志明,李金龙,王黎,等.合成孔径聚焦成像算法研究[J].现代电子技术,2010,33(23):17-20.
- [17] 艾春安,蔡笑风,李剑,等.干耦合超声波激励信号研究[J].中国测试,2016,42(12):12-17.