

文章编号:1671-6833(2023)04-0054-06

# 基于小波变换的扩散焊超声 C 图像融合算法

常 青<sup>1</sup>, 杨程伟<sup>1</sup>, 罗彬杰<sup>1</sup>, 李细峰<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237; 2. 上海交通大学 塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030)

**摘 要:** 为了提高钛合金扩散焊界面微小缺陷的检测能力, 提出一种基于小波变换的超声 C 图像融合算法, 综合多幅图像中的缺陷信息, 重构出包含微小缺陷在内的超声 C 图像。利用小波变换将待融合的超声 C 图像分解为低频和高频部分, 并根据高、低频系数的不同特征, 对高、低频系数进行差异化融合处理, 对融合后的系数使用小波逆变换得到融合图像; 为了提高图像对比度、丰富图像细节信息, 使用改进的同态滤波器对融合图像进行增强, 从而获得结果图像。制备不同类型的人工缺陷试样进行测试, 并将所提算法和常规超声 C 扫描检测的缺陷长度进行定量比较。实验结果表明: 对于线形微小缺陷和弱结合缺陷, 使用所提算法重构的超声 C 图像的平均误差分别为 2 mm 和 4.2 mm, 常规超声 C 扫描的平均误差分别为 8 mm 和 9.5 mm。所提算法重构的超声 C 图像能够更为准确地反映出缺陷信息。

**关键词:** 扩散焊; 超声 C 扫描; 小波变换; 引导滤波; 图像融合

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.01.003

扩散焊是一种典型的固相连接方法, 广泛应用于钛合金、铝合金、不锈钢等材料的焊接中<sup>[1]</sup>。但受扩散连接表面清洁程度较低、焊接工艺参数偏差等情况的影响, 扩散焊连接界面处很容易出现不同程度的未焊合、弱结合等缺陷, 因此对扩散焊进行可靠的质量检测具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。目前, 扩散焊的无损检测多采用超声 C 扫描技术<sup>[3]</sup>。Kumar 等<sup>[4]</sup>使用超声 C 扫描技术对不同扩散焊工艺进行超声检测, 发现超声 C 扫描技术能够检测出部分焊合和未焊合区域; 张弛等<sup>[5]</sup>通过改变检测参数, 研究超声 C 扫描对于钛合金扩散焊小尺寸缺陷的检测能力, 发现常规超声检测法很难对小尺寸缺陷进行精确的检测。

超声 C 扫描成像原理是使用机械扫查的方式采集、储存、分析各采样点的 A 扫信号, 并通过灰度或伪彩色图像反映某一深度范围内的 A 扫信号的回波幅度<sup>[6]</sup>。但是常规超声 C 扫描图像的形成是通过在 A 扫信号中设置闸门, 然后利用闸门内 A 扫信号的幅值信息进行成像来实现的。因此超声 C 扫描图像的形成与闸门位置有很大的关系, 闸门位置不准确会直接影响超声 C 扫描图像的质量。此

外, A 扫信号易受噪声等外界因素的干扰, 这也会影响超声 C 扫描图像的质量。尤其是扩散焊界面含有微小缺陷时, A 信号的回波幅值会相对较小, 超声 C 扫描图像在形成的过程中会受各种因素的干扰, 导致微小缺陷不能很好地在超声 C 扫描图像中呈现出来。

针对该问题, 本文提出基于小波变换的扩散焊超声 C 图像融合算法, 将不同扫描点信号进行成像, 提取多幅含有缺陷的超声 C 图像, 利用基于小波变换的图像融合方法, 综合多幅超声 C 图像中的缺陷信息, 从而获得包含微小缺陷信息在内的融合结果图像。

## 1 原理与方法

### 1.1 基于小波变换的图像融合

基于小波变换的图像融合方法是利用小波变换的多分辨率分析将每个源图像分解为低频和高频部分, 得到各个源图像的小波金字塔; 然后使用不同的融合规则, 分别对低频和高频部分进行融合处理得到新的小波金字塔结构, 最后对处理后的小波系数进行小波逆变换, 获得最终的融合

收稿日期: 2022-05-19; 修订日期: 2022-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875350)

作者简介: 常青(1975—), 女, 山东聊城人, 华东理工大学副教授, 博士, 主要从事图像处理、模式识别研究, E-mail: changqing@ecust.edu.cn。

引用本文: 常青, 杨程伟, 罗彬杰, 等. 基于小波变换的扩散焊超声 C 图像融合算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(4): 54-59, 87. (CHANG Q, YANG C W, LUO B J, et al. Ultrasonic C image fusion algorithm for diffusion welding based on wavelet transform[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(4): 54-59, 87.)

结果<sup>[7]</sup>。

## 1.2 引导滤波

引导滤波器是一种基于局部线性模型的边缘保持器,它能够在平滑图像的同时,有效地保持图像的边缘信息<sup>[8]</sup>。引导滤波器的关键是引导图像  $I$  和滤波器输出  $q$  之间的局部线性模型,假设  $q$  为以像素  $k$  为中心的窗口  $\omega_k$  中关于  $I$  的线性变换:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k. \quad (1)$$

式中:  $a_k$  和  $b_k$  为窗口  $\omega_k$  内的线性系数。

为确定线性系数  $a_k$  和  $b_k$ ,同时需要满足滤波器的输出  $q$  和滤波器的输入图像  $p$  之间的差异最小,定义以下成本函数,使该成本函数最小:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2). \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$  为调节滤波器滤波效果的参数;  $p_i$  为输入图像  $p$  在位置  $i$  处的像素值;  $a_k$  和  $b_k$  可以通过式(3)的线性回归方法求解:

$$\begin{cases} a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\delta_k^2 + \varepsilon}; \\ b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mu_k$  和  $\delta_k^2$  分别为引导图像  $I$  在窗口  $\omega_k$  中的均值和方差;  $|\omega|$  为窗口  $\omega_k$  中的像素个数;  $\bar{p}_k$  为输入图像  $p$  在窗口  $\omega_k$  中的均值。

接下来,在整个图像的所有局部窗口中使用该线性模型来计算每个  $\omega_k$  窗口的线性系数。由于像素  $i$  会包含在不同的  $\omega_k$  窗口中,因此在计算所有  $\omega_k$  窗口的  $a_k$  和  $b_k$  后,取其平均得到最后的输出值:

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i. \quad (4)$$

式中:  $\bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_k} a_k$ ;  $\bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_k} b_k$ 。

## 2 超声C图像融合算法

### 2.1 低频系数的融合

小波分解后的低频部分主要包含图像的结构、亮度、对比度等信息。低频分量的融合方法通常采用系数直接取平均法,这种方法虽然简单高效,但是没有考虑系数之间的关系,同时会降低图像的对比度,并且会导致信息的丢失<sup>[9]</sup>。为了保证在融合过程中尽可能减少信息的丢失,本文采用基于邻域系数局部方差加权求和的方法,定义邻域系数的局部方差为

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [L(x, y) - \mu]^2. \quad (5)$$

式中:  $M$  和  $N$  分别为邻域窗口的长和宽;  $L(x, y)$  为

邻域中各点的小波系数;  $\mu$  为邻域中所有小波系数的均值。

邻域的方差越大说明小波系数的变化越大,该邻域的信息量也就越大,应该赋予更高的权重。设  $\sigma^A(x, y)$  和  $\sigma^B(x, y)$  分别表示源图像  $A$  和  $B$  以  $(x, y)$  为中心的邻域方差,得到源图像  $A$  和  $B$  在各个位置处的权重值:

$$\begin{cases} w_A = \frac{\sigma^A(x, y)}{\sigma^A(x, y) + \sigma^B(x, y)}; \\ w_B = \frac{\sigma^B(x, y)}{\sigma^A(x, y) + \sigma^B(x, y)}. \end{cases} \quad (6)$$

则融合后图像低频系数表示为

$$L^*(x, y) = w^A L^A(x, y) + w^B L^B(x, y). \quad (7)$$

### 2.2 高频系数的融合

小波分解后的高频部分主要包含图像的边缘等细节特征,但图像的噪声往往也包含在图像的高频信息中<sup>[10]</sup>。为了在减少噪声干扰的同时更好地突出图像的高频信息,采用区域能量加权求和的方式进行高频系数的融合。同时为抑制背景噪声对融合效果的影响,利用引导滤波对融合后的高频分量进行平滑。

为了尽可能地保持原始图像的边缘特征,使用 Sobel 算子与局部区域内的图像做垂直和水平方向的卷积。同时为了避免丢失图像的信息,采用加权求和的方式综合待融合图像的高频信息。式(8)定义了局部区域能量,其值越大代表着局部区域的图像越清晰,反映的信息就越多,需要赋予更高的权重。

$$E = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [S_x \otimes H(x, y) + S_y \otimes H(x, y)]^2. \quad (8)$$

式中:  $M$  和  $N$  分别为窗口区域的长和宽;  $H(x, y)$  为窗口中各点的高频系数值;  $S_x$  和  $S_y$  分别为水平和垂直方向的 Sobel 算子。

对源图像  $A$  和  $B$  进行小波分解后可得 3 个方向上的高频系数,按照式(8)计算以每个位置为中心的窗口对应的区域能量,然后再分别计算源图像  $A$  和  $B$  在各个位置处的权重值:

$$\begin{cases} w_j^A = \frac{E_j^A(x, y)}{E_j^A(x, y) + E_j^B(x, y)}; \\ w_j^B = \frac{E_j^B(x, y)}{E_j^A(x, y) + E_j^B(x, y)}. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $j$  分别代表水平、竖直和对角 3 个方向;  $E_j^A(x, y)$  为图像  $A$  在  $(x, y)$  处所对应的区域能量;  $w_j^A$  为该位置处的权值。则基于区域能量加权求和的图像高频系数表示为

$$H_j'(x, y) = w_j^A H_j^A(x, y) + w_j^B H_j^B(x, y)。 \quad (10)$$

利用引导滤波优化融合后 3 个方向的高频系数:

$$H_j^* = G_{r,e}(H_j', H_j')。 \quad (11)$$

最后,对低频系数  $L^*$  和 3 个方向的高频系数  $H_j^*$  进行小波逆变换可以得到融合图像。

### 2.3 增强融合图像

实验发现融合后的超声 C 图像的对比度较低且很多细节处不够清晰。因此,需要对融合后的图像进行增强处理。本文选择同态滤波方法来实现增强。同态滤波基于照射-反射模型,是一种在频域中压缩图像亮度范围,同时增强图像对比度的方法<sup>[11]</sup>。图像可以表示为照射分量与反射分量的乘积,照射分量一般是在空间缓慢变化的,可看作为图像的低频部分;而反射分量往往倾向于突变,可看作为图像的高频部分<sup>[12]</sup>。根据这一特征,通常对图像进行傅里叶变换,将图像的低频部分与照射分量联系起来,高频部分与反射分量联系起来。图 1 为同态滤波算法的流程图<sup>[13]</sup>。

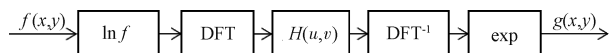


图 1 同态滤波原理图

Figure 1 Homomorphic filter schematic

由以上流程可以看出,传递函数  $H(u, v)$  控制着傅里叶变换的高频和低频分量。为达到图像增强的目的,传递函数在提高高频分量的同时也要抑制低频分量。根据这一特点,同态滤波器的传递函数一般根据高通滤波函数构造而成<sup>[14]</sup>。但是,由于传统的传递函数中包含的参数较多,需要同时调整多个参数才能达到最佳的增强效果。为了减少传递函数中的参数,并且保持增强效果不变,本文提出了一种改进的同态滤波传递函数,该传递函数是基于 S 型曲线进行改进的, S 型曲线的方程可以表示为

$$p(t) = \frac{1}{1 + x^{-t}}。 \quad (12)$$

式中:  $x$  为常数。图 2 为式(12)对应的函数曲线图。

根据曲线方程可以构造出改进的传递函数为

$$H(u, v) = \frac{a}{1 + D(u, v)^{-b}}。 \quad (13)$$

式中:  $D(u, v)$  为距滤波器中心的距离;  $a, b$  为调整增强效果的参数。

根据以上分析,本文提出的基于小波变换的超声 C 图像融合算法的具体步骤如下。

步骤 1 将待融合的超声 C 图像进行 3 层小波分解,得到各自的高、低频系数;

步骤 2 对于低频系数,采用基于邻域系数局

部方差加权求和的方法进行融合得到低频融合系数;

步骤 3 对于高频系数,采用基于局部区域能量加权求和的方法和引导滤波算法进行融合,得到高频融合系数;

步骤 4 对融合系数进行小波逆变换,最终得到融合图像;

步骤 5 最后,对融合图像采用改进的同态滤波进行增强,得到结果图像。

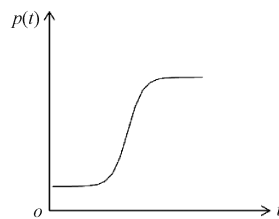


图 2 S 型曲线图

Figure 2 S-shaped graph

## 3 实验过程与结果

### 3.1 样品制备

在实际焊接过程中,扩散焊工件会受焊接面清洁程度不高、焊接工艺参数偏差等情况的影响,从而产生不同程度的未焊合缺陷,其中也包括一些微小的缺陷。由于实际航空件的测试成本太高,因此针对这些类型的缺陷,制备人工缺陷试样进行扩散焊连接实验。该类试样的具体制备方法如下:采用两块钛合金板进行扩散焊连接,在两块钛合金板之间放置一钛合金箔片,在钛合金箔片上使用氮化硼阻焊剂制造不同的形状来模拟缺陷,其中包括方形、圆形等尺寸较大的形状以及线形、弧形等尺寸较小的形状。采用正常的焊接工艺对其进行扩散焊连接,焊接完成后喷涂氮化硼的位置会形成不同程度的未焊合缺陷。图 3(a)为含有微小缺陷的人工试样图,该试样中包含方形、圆形和线形等多种形状的缺陷。其中方形缺陷的边长为 10 mm,圆形缺陷的直径为 10 mm,方形和圆形之间为喷涂氮化硼而形成的微小线形缺陷。

### 3.2 实验设计与分析

针对焊接后的人工缺陷试样,采用水浸式超声 C 扫描系统对其进行扫描,得到如图 3(b)所示的超声 C 扫描图像,将其与图 3(a)所示的人工缺陷试样实物图对比发现,超声 C 扫描图像仅能反映出部分缺陷信息,特别是图 3(a)中位置 4 和位置 6 处的线形微小缺陷不能被检测出来。

进行超声 C 图像融合的第一步,就是对超声数

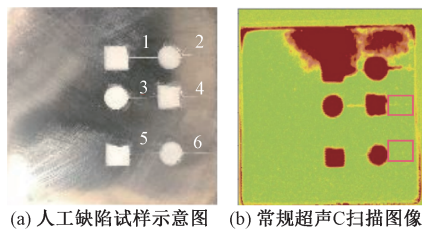


图 3 人工试样和超声 C 扫描图像

Figure 3 Artificial specimen and ultrasound C image

据进行预处理,获得待融合图像。图 4 为含有未焊接缺陷的超声 A 扫信号。对于未焊接缺陷,超声回波的幅度会有明显的增强,也就是在 A 扫信号中会呈现突变的特征。因此使用小波变换的方法对未焊接区的 A 扫信号进行突变点检测<sup>[15]</sup>,定位缺陷在 A 扫信号中的位置。通过分析发现,缺陷所在的位置为信号中第 2 个突变点的位置,即  $t = 334 \mu\text{s}$ 。

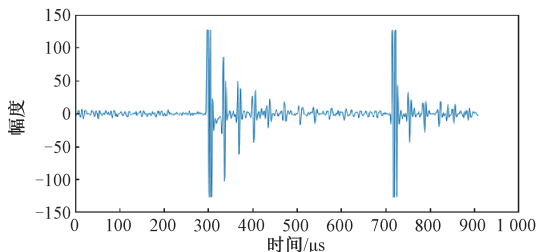


图 4 未焊接缺陷超声 A 扫信号

Figure 4 A scan signal of unwelded defects

由于缺陷信息会存在于不同切面的超声 C 图像中,于是提取所有采样点的 A 扫信号在  $t = 334 \mu\text{s}$  和  $t = 335 \mu\text{s}$  处的幅值,形成待融合的超声 C 图像,

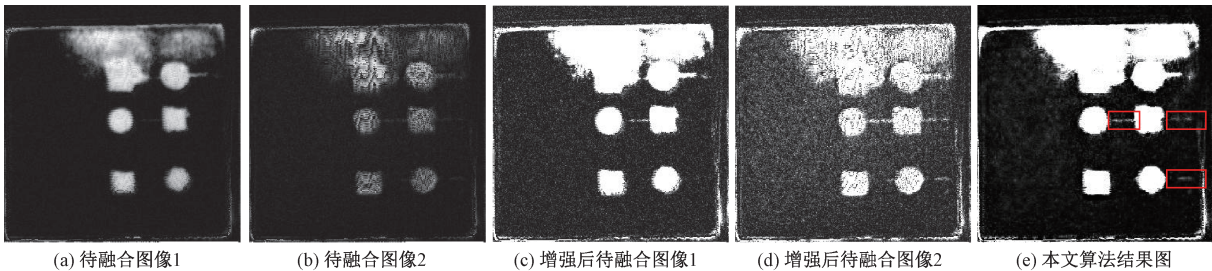


图 5 待融合图像和融合结果图

Figure 5 The image to be fused and the fusion result image

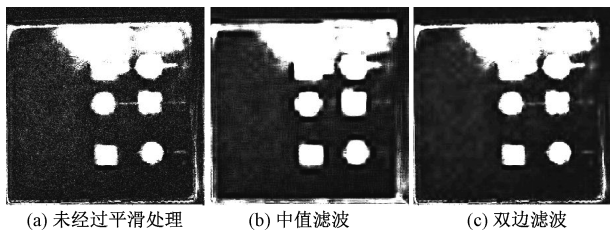


图 6 不同滤波算法效果图

Figure 6 The effect images of different filtering algorithm

对不同平滑算法得到的结果图,本文使用平均梯度和峰值信噪比 (PSNR) 作为客观评价指标,对

如图 5(a)、5(b) 所示。可以看出,使用超声信号的幅值所直接获得的超声 C 图像对比度较低且细节不清晰。为了观察待融合图像的细节特征,使用改进后的同态滤波算法对待融合图像进行增强,如图 5(c)、5(d) 所示。可以看出,经过同态滤波增强处理后的超声 C 图像对比度有明显的提升,也能看到更多的细节信息,并且两幅图像中包含的缺陷信息具有差异性和互补性。此外,增强后待融合的超声 C 图像含有明显的背景噪声,因此在融合过程中,对图像进行平滑处理是非常重要的步骤。

对待融合的超声 C 图像使用基于小波变换的超声 C 图像融合算法进行融合,得到最后的结果图如图 5(e) 所示。可以看出,本文算法重构出的结果图能够反映出更多的缺陷信息,特别是其中的微小线形缺陷,与实际的缺陷大小更接近。

为验证引导滤波在平滑图像和保持图像边缘方面的优势,进行如下对比实验:在融合过程中不使用滤波进行平滑,使用中值滤波和双边滤波进行平滑处理,得到的效果图如图 6 所示。可以看出,融合过程中不进行平滑处理获得的融合图像仍然包含背景噪声;对于使用中值滤波得到的结果图,其图像整体比较模糊,且不能保持原始图像的轮廓;使用双边滤波得到的结果图,虽然一定程度上抑制了背景噪声,但在图像的边缘保持上不及本文算法,而且对于使用双边滤波得到的结果图,其图像会因为过于平滑而导致部分细节信息的丢失。

实验产生的结果图进行评价,结果如表 1 所示。通过对各客观评价指标的结果比对,可知经过本文算法平滑处理的结果图在平均梯度和峰值信噪比方面都优于其他算法。

表 1 平滑效果对比

Table 1 Smooth effect comparison

算法	平均梯度	峰值信噪比
中值滤波	18.650 0	14.541 5
双边滤波	12.949 4	20.624 3
本文算法	19.336 5	23.704 5



为验证本文算法检测微小缺陷的准确性,将图 3(a)的人工缺陷试样、常规超声 C 扫描图像以及本文算法重构的结果图像中的线形缺陷的长度进行对比。对于人工缺陷试样,位置 3~6 处线形缺陷的长度分别为 11、12、12、13 mm。常规超声 C 扫描图像检测出位置 3 和位置 4 处的缺陷长度为 10 mm 和 6 mm,而对于位置 5 和位置 6 处的线形缺陷,在超声 C 扫描图像中则不能显示。使用本文算法重构的结果图中,位置 3~6 处的线形缺陷的长度分别为 11、10、3、8 mm。基于以上分析可以发现,本文算法重构的超声 C 图像能够更为准确地反映线形微小缺陷信息。

另外,制备多组含有线形缺陷的人工试样进行实验,并计算不同方法下的平均误差:

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^n \delta_i / n。$$

(14)

式中: $n$  为缺陷总数量; $\delta_i$  为第  $i$  个线形缺陷的实测长度与实际长度之间的误差。

制备 5 组人工试样,线形缺陷的总数量为 30 个,分别使用常规超声 C 扫描和本文算法进行检测,并计算平均误差。其中常规超声 C 扫描图像的平均误差为 8 mm,本文算法重构出的超声 C 图像平均误差为 2 mm。测试结果表明,本文算法重构出的超声 C 图像检测出的缺陷平均误差更小。

为进一步论证本文算法对微小缺陷检测的准确性,制备含有弱结合缺陷的试样进行实验。图 7(a)为常规的超声 C 扫描图像,图 7(b)为本文算法重构的超声 C 图像。可以看出,本文算法重构的超声 C 图像能够反映出更多的缺陷信息。其中,位置 1 和位置 2 为金相微观观察位置,实际缺陷长度分别为 12.0 mm 和 13.5 mm。表 2 为缺陷长度对比表,从中可以看出,常规超声 C 扫描图像在位置 1 和位置 2 处检测到缺陷长度分别为 10.0 mm 和 8.0 mm,而本文算法重构的超声 C 图像能够检测出的缺陷长度分别为 12.0 mm 和 11.5 mm。本文算法重构出的结果图中的缺陷尺寸与人工试样的实际缺陷尺寸更相近。

针对弱结合缺陷,制备多组人工缺陷试样,并在每个试样中设置多个微观观察位置,并根据式(14)计算平均误差,对于弱结合缺陷的平均误差计算, $n$  表示微观观察位置的数量, $\delta_i$  表示第  $i$  个位置缺陷的实测长度与实际长度之间的误差。由计算结果可知,常规超声 C 扫描图像对弱结合缺陷检测的平均误差为 9.5 mm,而本文算法重构出的超声 C 图像的平均误差为 4.2 mm。

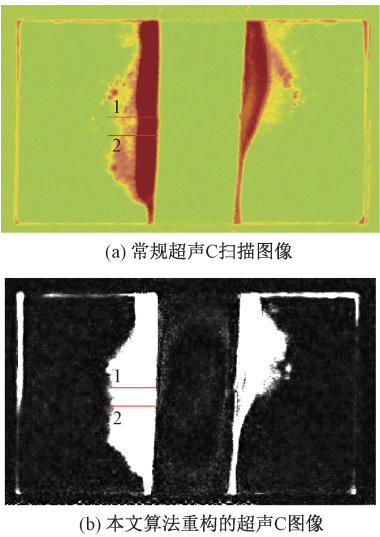


图 7 弱结合缺陷检测结果图

Figure 7 Weak bond defect detection image

表 2 微观观察位置的缺陷长度对比  
Table 2 Comparison of defect lengths at microscopic observation positions

缺陷位置	缺陷长度/mm		
	人工试样	超声 C 扫描	本文算法
1	12.0	10.0	11.0
2	13.5	8.0	11.5

4 结论

本文提出基于小波变换的超声融合算法,对不同 C 扫描点的信号进行成像,形成待融合的超声 C 图像,使用基于小波变换的图像融合方法,并结合引导滤波对待融合的超声 C 图像进行平滑处理得到融合图像;最后为提高融合图像对比度、丰富图像细节信息,使用改进的同态滤波器对图像进行增强,从而获得包含微小缺陷信息在内的融合结果图像。通过制备人工缺陷试样,将常规超声 C 扫描图像、本文算法重构的超声 C 图像与实际缺陷尺寸进行对比分析。实验结果表明:使用本文算法重构出的超声 C 图像,背景噪声得到了有效的抑制,并且能够更为准确地反映出缺陷信息。

参考文献:

[1] 叶佳龙,刚铁. 304 不锈钢扩散焊界面的超声非线性成像[J]. 焊接学报,2014,35(5):95-99,118.  
YE J L, GANG T. Ultrasonic nonlinear imaging in diffusion bonding of 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution,2014,35(5):95-99,118.

- [2] 栾亦琳. TiAl/40Cr 扩散焊界面超声信号特征分析与缺陷智能识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- LUAN Y L. Characteristics analysis of ultrasonic interface signals and defects intelligence recognitions of TiAl/40Cr diffusion bonding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [3] 吕彭民, 吴玉文, 宋年波. 钢桥面铺装层粘接强度超声波无损检测技术研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(5): 55-60.
- LYU P M, WU Y W, SONG N B. Research on the ultrasonic non-destructive test technology of bonding strength for the steel bridge deck pavement layer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(5): 55-60.
- [4] KUMAR S S, RAVISANKAR B. Destructive and non-destructive evaluation of copper diffusion bonds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 13-20.
- [5] 张驰, 栾亦琳, 罗志伟, 等. 扩散焊接头缺陷超声C扫描检测能力分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 83-86, 90, 132.
- ZHANG C, LUAN Y L, LUO Z W, et al. Analysis of ultrasonic C-scan detectability on diffusion bonding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 83-86, 90, 132.
- [6] 张驰. 钛合金扩散焊接头贴合型缺陷的非线性超声检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG C. Research of nonlinear ultrasonic testing method for kissing bond in titanium alloy diffusion bonding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [7] 仇荣超, 吕俊伟, 宫剑, 等. 多波段前视红外图像融合的海面杂乱背景平滑方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1120-1126.
- QIU R C, LYU J W, GONG J, et al. Smoothing method for sea surface rough background based on multi-spectral forward-looking infrared images fusion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 1120-1126.
- [8] 丁贵鹏, 陶钢, 李英超, 等. 基于非下采样轮廓波变换与引导滤波器的红外及可见光图像融合[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1911-1922.
- DING G P, TAO G, LI Y C, et al. Infrared and visible images fusion based on non-subsampled contourlet transform and guided filter[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9): 1911-1922.
- [9] 谭仁龙. 一种基于小波变换的图像融合方法[J]. 测绘通报, 2017(9): 42-45.
- TAN R L. An image fusion algorithm using wavelet transform[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(9): 42-45.
- [10] 齐海生, 荣传振, 肖力铭, 等. 基于双树复小波变换与引导滤波的红外与可见光图像融合算法[J]. 通信技术, 2019, 52(2): 330-336.
- QI H S, RONG C Z, XIAO L M, et al. Infrared-and-visible-image fusion algorithm based on dual-tree complex wavelet transform and guided filtering[J]. Communications Technology, 2019, 52(2): 330-336.
- [11] 冯相辉. 一种改进的同态滤波图像增强算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 138-145.
- FENG X H. An improved homomorphic filtering image enhancement algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(1): 138-145.
- [12] 程新. 基于同态滤波的图像增强算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2016.
- CHENG X. Image enhancement algorithm based on homomorphic filtering[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [13] YU H F, LI X B, LOU Q, et al. Underwater image enhancement based on color-line model and homomorphic filtering[J]. Signal, Image and Video Processing, 2022, 16(1): 83-91.
- [14] 黎秀玉, 宋树祥, 夏海英. 基于 CLAHE 和图像分解的去雾方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(5): 1552-1559.
- LI X Y, SONG S X, XIA H Y. Single image dehazing method based on CLAHE and image decomposition[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(5): 1552-1559.
- [15] 冯媛硕, 宋吉江. 基于小波变换的信号特征与突变点检测算法研究[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 76-80.
- FENG Y S, SONG J J. Research on the wavelet-based algorithms for signal feature and singularity detection[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2015, 41(1): 76-80.

## Research Status of Bioceramic Materials for Bone Substitute

GAO Jinxing<sup>1</sup>, LI Liya<sup>1</sup>, MU Jinghua<sup>1</sup>, XU Enxia<sup>1</sup>, LIU Xinhong<sup>1</sup>,  
MA Chengliang<sup>1</sup>, ZHANG Can<sup>2</sup>, ZHANG Ligu<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan Institute of Medical and Pharmaceutical Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the development demand of biomaterials for bone substitute, the development status of polymer materials, metal materials, bioceramic materials and composite materials for bone replacement were summarized. The advantages of bioceramic materials in mechanical properties, chemical properties and biological properties as bone substitute materials were emphatically introduced. The bioceramic materials play an important role in the field of bone substitute materials due to their similar density and composition to human bone, significant biocompatibility, high mechanical strength, and stable chemical properties. In this study, the research status of bioceramic materials represented by phosphate, silicate, oxides and non-oxides was systematically discussed, and the advantages and limitations of bioceramic materials and their composites as bone substitute biomaterials study were discussed. Finally, the future development direction of bioceramic materials was prospected.

**Keywords:** bone substitute materials; bioceramic materials; compound material; biological properties; physical and chemical properties

(上接第59页)

## Ultrasonic C Image Fusion Algorithm for Diffusion Welding Based on Wavelet Transform

CHANG Qing<sup>1</sup>, YANG Chengwei<sup>1</sup>, LUO Binjie<sup>1</sup>, LI Xifeng<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Plastic Forming Technology and Equipment Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In order to improve the detection ability on tiny defects at the interface of diffusion welding of titanium alloys, an ultrasonic C image fusion algorithm based on wavelet transform was proposed. Firstly, the ultrasonic C image to be fused was decomposed into low-frequency and high-frequency parts by wavelet transform, and the high and low frequency coefficients were differentiated and fused according to the different characteristics of the high and low frequency coefficients, and the inverse wavelet transform was used for the fused coefficients to get the fused image. Finally, in order to improve the contrast of the image and enrich the details of the image, the improved homomorphic filter was used to enhance the fusion image, so as to obtain the fusion result image. By preparing different types of artificial defect samples for testing, and quantitatively comparing the length of defects detected by the algorithm in this study and conventional ultrasonic C scan, the experimental results showed that for small linear defects and weak bond defects, the ultrasonic C reconstructed by the algorithm in this study could be used. The average errors of the images were 2 mm and 4.2 mm, respectively, and the average errors of conventional ultrasound C scan was 8 mm and 9.5 mm, respectively. Therefore, the ultrasonic C image reconstructed by the proposed algorithm in this study could reflect the defect information more accurately.

**Keywords:** diffusion welding; ultrasound C scan; wavelet transform; guided filtering; image fusion