

超声检测激光沉积制造 TA15 合金弱小缺陷的增强

李一波**, 韩毅, 杨光*, 钦兰云, 王超

沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136

摘要 提出了一种基于离散小波变换的算法,对超声检测激光沉积 TA15 合金图像中微小、低对比度的缺陷进行了增强。利用 Penalized 软阈值对缺陷的高频细节信息进行去噪,并通过 Gamma 变换提高缺陷低频信息的对比度。综合考虑信息熵和对比度,对多组样本进行了测试实验。研究表明,针对具有独特快速熔凝组织的激光沉积制件,所提算法比高斯滤波及模糊集增强理论具有更好的弱小缺陷增强能力。

关键词 激光技术; 图像增强; 离散小波变换; 水浸超声检测; 激光沉积制造

中图分类号 TG115.28+5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102006

Weak Defect Enhancement in Ultrasonic Testing of Laser Deposition Manufactured TA15 Alloys

Li Yibo**, Han Yi, Yang Guang*, Qin Lanyun, Wang Chao

Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

Abstract Based on the discrete wavelet transform, an algorithm is proposed to enhance the tiny and low-contrast defects in the ultrasonic testing images of the laser deposited TA15 alloys, in which the Penalized soft threshold is used to denoise the high-frequency detail information of the defects and the Gamma transform is used to enhance the contrast of the low-frequency information of the defects. Both the information entropy and the contrast are taken into account to test multiple groups of samples. The research results show that, as for the laser-deposited parts with a unique rapid solidification structure, the proposed algorithm has a better ability of weak defect enhancement compared with the Gaussian filtering and the fuzzy set enhancement theories.

Key words laser technique; image enhancement; discrete wavelet transform; immersion ultrasonic testing; laser deposition manufacturing

OCIS codes 140.3330; 100.2980; 100.3008; 100.2000

1 引 言

TA15 钛合金是一种广泛应用于航空航天领域的新型近 α 钛合金,但在传统加工中其存在复杂结构件制造困难、加工周期长和材料利用率低等问题^[1-3]。激光沉积制造(LDM)技术作为一种新型的先进制造技术,相比传统加工,具有工艺简单、成本低、柔性高的优点^[4],但是在沉积成形过程中,材料易受工艺参数及外部环境因素的影响而产生熔合不良、气孔等内部缺陷^[5]。LDM 技术的发展历史较短,且 LDM 制件的组织特征与传统加工构件具有

较大差别,针对 LDM 制件中缺陷的无损检测方法并不完善^[6-7]。同时,在利用超声成像技术对 LDM 复杂制件的内部缺陷进行检测时,受材料组织、探头性能、环境因素的影响,容易产生噪声,从而影响微小缺陷的提取^[8]。研究者提出了多种算法以增强缺陷信号,尽管研究的材料有所不同,但是对超声检测激光沉积 TA15 缺陷信号的增强有借鉴意义。Ng 等^[9]在对多层复合材料缺陷的研究中,提出了一种基于离散小波变换(DWT)来提高信噪比的方法,相较分离谱处理、期望最大化和希尔伯特变换信号处理,DWT 在提高信噪比方面具有明显优势。Wu

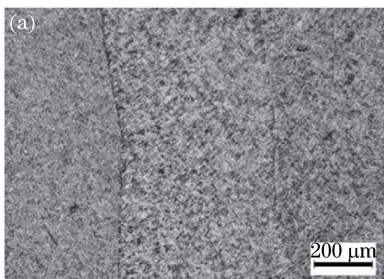
收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104002)、工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-71)

* E-mail: yangguang@sau.edu.cn; ** E-mail: liyibo@sau.edu.cn

等^[10]用 DWT 的方法对复杂焊接结构的探伤图像进行了处理,证明 DWT 方法能够提高缺陷检测精度。Farley 等^[11]提出了一种结合小波变换和神经网络来处理缺陷探测信号的方法,研究了两个位置很近、形状相似的缺陷的提取,虽然该方法很好地显示了预测值与目标值的相关性,但是存在一定局限性。Tabatabaeipour 等^[12]从检测工艺入手,提出了基于水浸超声检测倾斜入射和反向散射来检测摩擦焊的焊缝根部缺陷的方法,取得了较好的提取效果。Yang 等^[13]提出了一种基于平稳小波变换的新方法,在磁瓦图像中的各种光条件下自动检测低对比度缺陷,这种方法对低对比度图像的缺陷提取具有借鉴意义。苏娟等^[14]结合脉冲耦合神经网络(PCNN)分割和模糊集理论,实现了红外图像的增强,有效凸显了图中的目标。温海滨等^[15]提出了一种红外图像细节信息的自适应增强算法,实验结果表明,所提算法能增强图像细节和视觉效果。张晓光等^[16]采用逐级局部化处理的方法,将焊缝 X 射线图像分割为裂纹区域和非裂纹区域,对裂纹缺陷采用了 Beamlet 变换的方法来增强缺陷边缘与背景的对比,是一种较为实用的缺陷提取方法。阮雪茜等^[17]研究了不同的激光立体成形 TC4 显微组织对超声声速及衰减因子等超声参量的影响,研究结果对认知其声学特性有重要意义。迟大钊等^[18]运用小波包对含有粗大晶粒组织的奥氏体不锈钢焊缝的弱超声缺陷信号进行了处理,有效地抑制了噪声。

在 LDM 制件的无损检测方面,美国国家航空与航天局(NASA)运用各种无损检测手段,测试获得了部分可用于增材制造零部件的无损检测数据^[19]。德国 MTU 公司开发了一种新型在线无损检测工具并将其集成到增材制造设备中^[20]。国内相关研究较少且相对滞后,仍局限于传统超声、X 射线等手段,先进无损检测手段的应用程度较低^[21]。



LDM 制件具有独特的快速熔凝组织,材料噪声很大,声衰减严重。针对这一现状,本文利用水浸超声检测来探测 LDM 制件的内部缺陷,在认知其特殊熔凝组织声学特性的基础上,提出了一种基于 DWT 的 LDM 制件的弱小缺陷的图像增强算法。

2 激光沉积 TA15 组织的声学特性

在对激光沉积 TA15 制件缺陷的超声检测中,超声回波信号受到多种因素的影响。由于 LDM 逐点逐层沉积成形的特性,在熔池冷却过程中,熔池中大部分热量会从基板或已沉积层向下散失,且晶体生长方向与散热方向相反,故晶体逆着热流向上生长,具有明显的方向性。经过逐层沉积,新的沉积层晶体在已沉积层晶体外延的基础上继续凝固生长,层层沉积,形成图 1(a)所示的贯穿多个沉积层的呈外延生长的粗大原始 β 柱状晶。当超声波在粗大晶粒中传播时,散射衰减严重,衰减后的超声波沿着复杂的路径再次回到超声探头被接收时,就会引起林状回波,降低检测的信噪比。同时,超声扫描方向与 β 柱状晶生长方向的相对位置关系也会影响噪声分布。这是由于定向生长的 β 柱状晶对不同传播方向的声波表现出不同的弹性常数,故其弹性性能呈现出声学各向异性。其次,超声波在传播过程中遇到晶界时会产生散乱反射,引起反射衰减。对于激光沉积 TA15 钛合金,如图 1(b)所示,在其晶界处,凝固偏析致使 α 稳定元素在晶界处聚集,故形成沿晶界向晶内生长的 α 片层。这些在晶界处聚集的 α 片层使晶界处的声阻抗增大,故散射衰减严重,影响缺陷的检测。此外,激光沉积构件最典型的缺陷是气孔,当超声波传播到气孔表面时,由于球面散射作用,很大一部分超声波能量不能被探头接收,故在超声 C 扫描图像中部分微小气孔缺陷的对比度不高甚至被漏检。

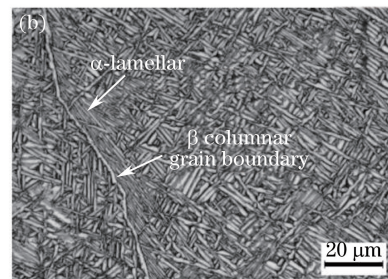


图 1 LDM 的 TA15 钛合金的组织形貌。(a)宏观;(b)微观

Fig. 1 Morphologies of LDMed TA15 titanium alloy. (a) Macroscopic; (b) microscopic

3 二维 DWT 原理

小波基函数具有很大相关性,故在连续小波变换中信息是冗余的。将连续小波变换中的尺度参数 a 和平移参数 b 离散化,使得小波基函数满足正交完备性条件,小波变换后的系数就没有了任何冗余度。对于一幅尺寸为 $M \times N$ 的图像 $f(x, y)$,其变换的 Mallat 算法通过一对滤波器构成,分解算法可表示为

$$\begin{cases} C_{j+1,k,m} = \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} C_{j,l,n} h_{l-2k} h_{n-2m} \\ d_{j+1,k,m}^1 = \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} C_{j,l,n} h_{l-2k} g_{n-2m} \\ d_{j+1,k,m}^2 = \sum_l \sum_k C_{j,l,n} g_{l-2k} h_{n-2m} \\ d_{j+1,k,m}^3 = \sum_l \sum_k C_{j,l,n} g_{l-2k} g_{n-2m} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $C_{j+1,k,m}$ 和 $C_{j,l,n}$ 分别为尺度 $j+1$ 及尺度 j 的尺度系数, $m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N, k, l$ 均为整数; Z 表示整数集; h_k, g_k 分别对应低通和高通滤波器; $d_{j,k,m}^s$ ($s=1, 2, 3$) 为小波系数。

其重构算法为

$$\begin{aligned} C_{j,k,m} = & \sum_l \sum_n C_{j+1,l,n} h_{k-2l} h_{m-2n} + \\ & \sum_l \sum_n d_{j+1,l,n}^1 h_{k-2l} g_{m-2n} + \\ & \sum_l \sum_n d_{j+1,l,n}^2 g_{k-2l} h_{m-2n} + \\ & \sum_l \sum_n d_{j+1,l,n}^3 g_{k-2l} g_{m-2n}. \end{aligned} \quad (2)$$

其分解和重构过程如图 2 所示。输入二维图像 $f(x, y)$ 后,首先分别用滤波器对行(或列)进行高通滤波和低通滤波,得到原始图像在水平方向上的低频分量 L 和 高频分量 H ;然后再对得到的两个图像进行列(或行)滤波,得到低频分量 L_{L1} 、水平高频分量 L_{H1} 、垂直高频分量 H_{L1} 和对角线高频分量 H_{H1} ;再向下进行二级分解,即把低频分量 L_{L1} 分解为一个低频分量及三个方向的高频分量,依次类推。重构过程即先对每一列(行)进行离散小波逆变换,再对变换所得数据的每一行(列)进行离散小波逆变换,即可获得重构图像。

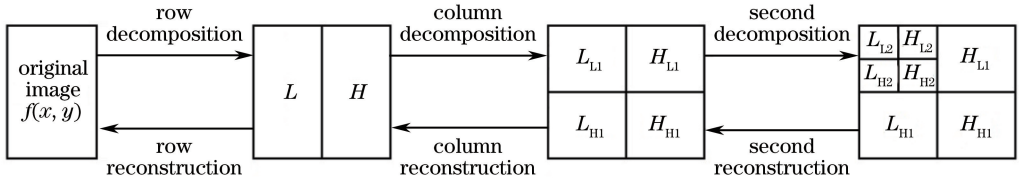


图 2 离散小波分解及重构过程

Fig. 2 Decomposition and reconstruction process of DWT

4 缺陷图像的采集及处理

4.1 图像采集

LDM 制件多是直接成形的复杂零部件,在实际应用中,常规的超声检测技术难以满足这类零部件的检测要求。而水浸超声检测这一非接触式的检测技术使得超声波的发射和接收较为稳定,便于声束聚焦,灵敏度较高,并且可以在机械系统的驱动下自动沿曲面或不规则表面进行扫查,避免了人为因素造成的检测失误,最重要的是 C 扫描成像可以直观看出缺陷的形状并粗估缺陷的大小。在实际应用中,水浸超声检测的优势对 LDM 制件的缺陷检测有着重要意义。

超声检测所用的 TA15 钛合金试件通过 LDM 系统制成,该系统包括半导体激光器、载气式送粉器、四路同轴送粉头、稀有气氛保护箱、冷水机、氧分析仪、光路及聚焦系统等。送粉所用 TA15 粉末的

粒度分布为 $47 \sim 165 \mu\text{m}$,工作前进行真空烘干处理,成形后进行 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 去应力退火。采用德国 PVA TePla 公司生产的 SAM 300 超声波扫描显微镜对试件进行水浸超声 C 扫描成像检测,探头的采样频率为 30 MHz ,工作频率为 15 MHz ,探头分辨率为 $0.75 \mu\text{m}$,焦距为 25 mm ,系统增益为 40 dB 。

4.2 基于 DWT 的图像处理

通过水浸超声检测 C 扫描所得的图像如图 3(a) 所示,可以看出,部分小缺陷与正常区域的对比度很低,如标示的缺陷 1 和缺陷 2,识别及定位困难。图 3(b) 所示为其灰度三维图像,可更为直观地看出,部分小缺陷的超声回波信号较弱,灰度水平很低,甚至被周围背景淹没。

小波基函数的消失矩越大,越有利于消除噪声,但是消失矩的增大会使支撑长度增大,产生边界问题。故折中考虑,选取近似对称小波函数 sym4,对超声 C 扫描原图像进行 DWT,分解层数为 3,第三

层的分解系数如图 4 所示。由图 4(a)可知,在低频子带中,背景平坦均匀,噪声能量水平较低,没有杂乱现象,大部分的缺陷信息能够完整显示,但也存在部分较小缺陷,如图 4(a)中缺陷 1,其回波信号较弱,对比度较低,很容易被漏检。由图 4(b)~(d)可知,缺陷的细节信息和噪声在高频子带中集中体现,尤其在垂直方向和斜线方向,高频系数受噪声的影响严重,缺陷信息被噪声掩盖。在图 4(d)中,斜线

高频子带中的缺陷 1 被噪声完全淹没。故后续处理主要通过修改分解系数来抑制高频噪声和增大低回波信号缺陷的对比度,具体实现算法如下。首先通过 Gamma 变换来增大低频分解系数,然后通过 Birge-Massart 惩罚函数来提取每层小波细节系数的 Penalized 阈值,接下来对各方向的高频系数进行软阈值去噪,最后通过离散小波逆变换来获取最终图像,算法流程图如图 5 所示。

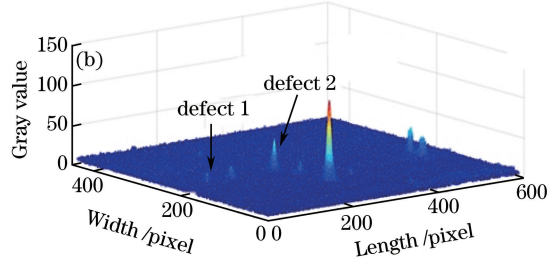
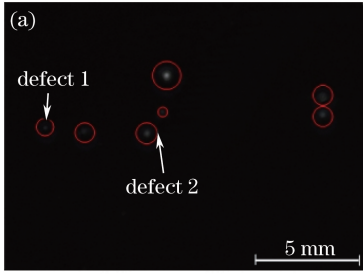


图 3 原始缺陷。(a) C 扫描图像;(b)三维灰度图

Fig. 3 Original defects. (a) C-scan image; (b) 3D gray image

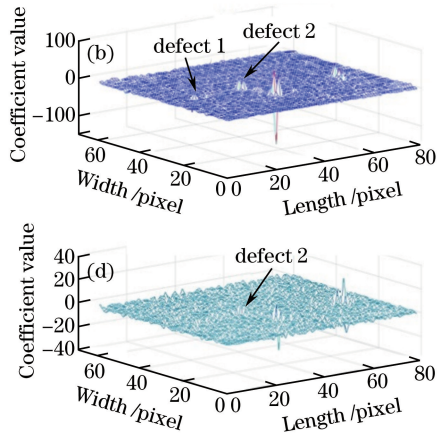
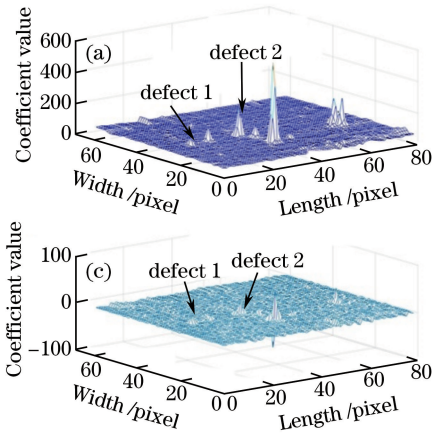


图 4 离散小波的第三层分解系数。(a)低频系数;(b)水平高频系数;(c)垂直高频系数;(d)斜线高频系数

Fig. 4 Decomposition coefficients of DWT at level 3. (a) Low-frequency coefficients; (b) horizontal high-frequency coefficients; (c) vertical high-frequency coefficients; (d) diagonal high-frequency coefficients

Gamma 变换用于增大低频系数, Gamma 变换的规则为

$$y = (x + e_{sp})^\gamma. \quad (3)$$

式中 $x, y \in [0, 1]$; e_{sp} 为补偿系数; γ 为伽马系数。经过变换后,新的低频系数如图 6(a)所示,弱小缺陷与周围背景的对比如明显提高。

Birge-Massart 惩罚函数通过求解其极小值而确定全局最优阈值,其惩罚规则为

$$c(t) = - \sum_{k \leq t} c^2(k) + 2\sigma^2 t [\alpha + \ln(n/t)], \quad (4)$$

式中 $c(t)$ 为惩罚后的小波系数, t 为阈值; $c(k)$ 为小波系数,它按绝对值递减的次序分类; σ 为信号去噪

时零均值高斯白噪声的标准偏差; α 为调谐参数,它必须选取大于 1 的实数; n 为小波系数值。当小波系数的绝对值小于给定阈值时,令软阈值为 0; 大于阈值时,令软阈值减去阈值,即

$$w_\lambda = \begin{cases} [\text{sign}(w)](|w| - \lambda), & |w| \geq \lambda \\ 0, & |w| < \lambda \end{cases}, \quad (5)$$

式中 w_λ 为软阈值; $|w|$ 为小波系数的绝对值; λ 为给定的阈值; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。对各方向的高频系数进行软阈值去噪,结果如图 6(b)~(d)所示。可以看出,经过 Penalized 软阈值去噪后,高频子带尤其是斜线高频子带的噪声水平明显下降,被噪声淹没的小缺陷高频细节部分也得以凸显。

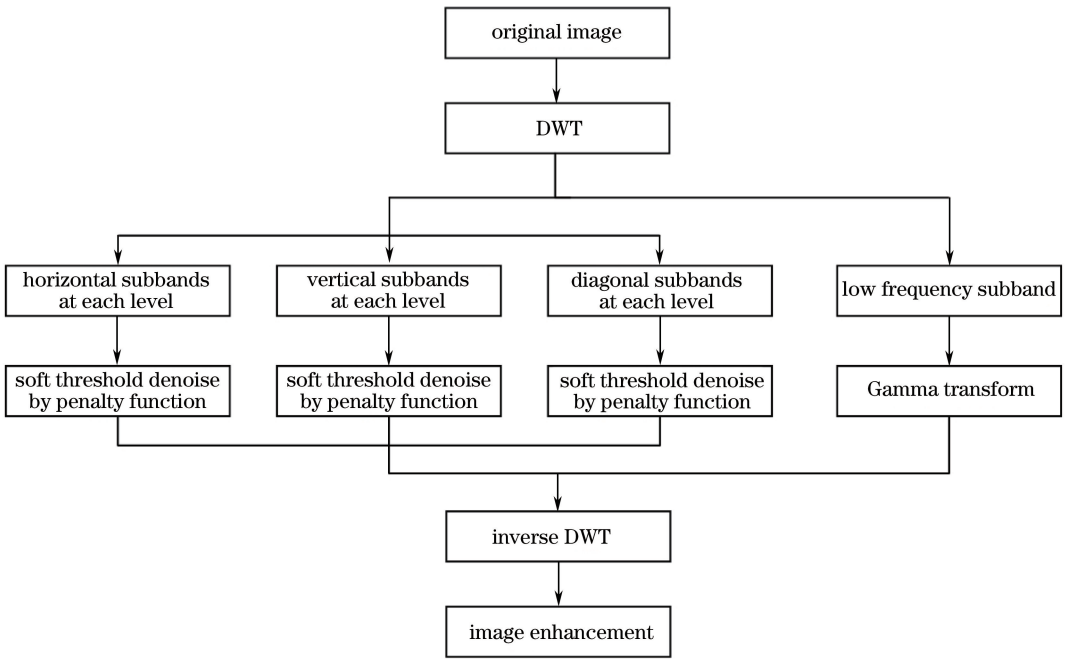


图 5 图像处理算法流程

Fig. 5 Flow chart of image processing algorithm

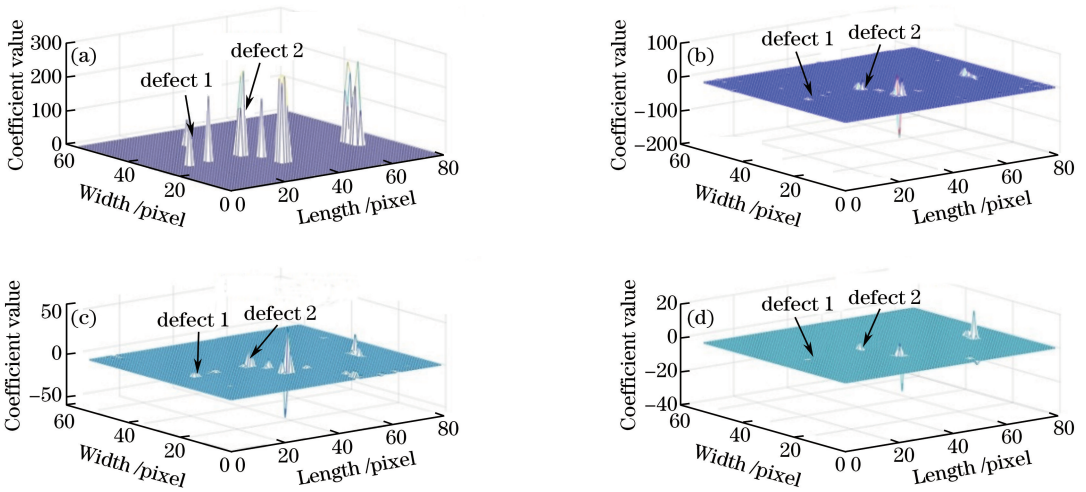


图 6 Gamma 变换后的小波系数。(a)低频系数;(b)水平高频系数;(c)垂直高频系数;(d)斜线高频系数

Fig. 6 Wavelet coefficients after Gamma transform. (a) Low-frequency coefficients; (b) horizontal high-frequency coefficients; (c) vertical high-frequency coefficients; (d) diagonal high-frequency coefficients

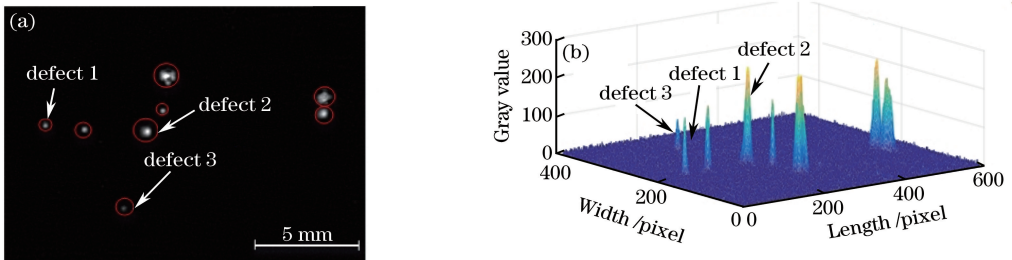


图 7 DWT 的重构图像。(a)二维图像;(b)灰度三维图

Fig. 7 Reconstructed image of DWT. (a) 2D image; (b) 3D image

经过 DWT 的重构图像及其灰度图如图 7 所示,可以看出,缺陷 1 和缺陷 2 等弱小缺陷的对比度明显增强。缺陷中心高亮,由于声散射作用,中心周围稍弱的特征信息也得以保留。相较于图 3,部分弱小缺陷如缺陷 3 经过处理后也得以凸显。

5 分析与讨论

选取以同样超声参数测得的 5 个样本,分别用高斯滤波、模糊集图像增强理论对 5 个样本进行处理,处理后图像与所提算法处理后图像的对比图如图 8 所示。可以看出,相比于原图像及另外两种算法处理后的图像,经所提算法处理后的超声检测 TA15 图像的弱小缺陷对比度得到明显提高。

选取缺陷样本进行超声检测,然后从截面剖开制备金相试样。原始超声检测 C 扫描图像、所提算法增强后图像及金相图分别如图 9(a)~(c) 所示。在制备金相过程中,缺陷截面不可避免地磨损,故金相图中的缺陷直径会与超声检测 C 扫描图像的

有微小差别;除此之外,可以看出,增强后的图像能够保留完整的缺陷信息,其尺寸及分布并无明显失真。

	original image	Gauss filter	fuzzy set theory	proposed method
sample 1				
sample 2				
sample 3				
sample 4				
sample 5				

图 8 各个算法处理结果的对比

Fig. 8 Comparison among results by various algorithms

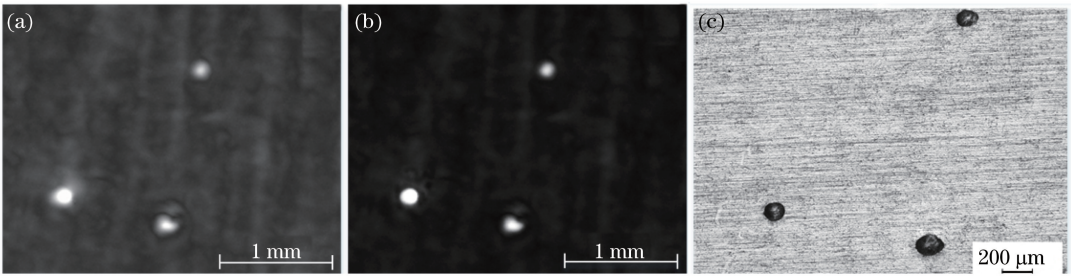


图 9 处理结果对比。(a)缺陷超声检测图;(b)所提算法增强图;(c)截面金相图

Fig. 9 Comparison among processing results. (a) Ultrasonic detection image of defects; (b) enhancement image by proposed algorithm; (c) sectional metallograph

为了定量地评估算法性能,从图像信息熵 E 及对比度 C 两个方面对超声检测激光沉积 TA15 弱小缺陷图像的增强算法进行客观评价, E 和 C 的定义分别为

$$E = - \sum_{i=1}^{k-1} p_i \lg p_i, \quad (6)$$

式中 p_i 为图像 $f(x, y)$ 中第 i 级灰度出现的概率。图像信息熵描述了图像的平均信息量,信息熵越大,图像所含信息内容越多,其像素位置及其邻域的灰度信息越详细。

$$C = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [I(x, y) - \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} I(x, y)]^2}, \quad (7)$$

式中 $I(x, y)$ 为图像 (x, y) 位置的灰度值。 C 的值

越大,二值图像中黑白反差越明显,清晰度越高,缺陷越容易被识别。

各个算法处理后的图像信息熵和对比度见表 1 和表 2。可以看出,经所提算法处理后,超声图片的信息熵高于原图像及另外两种算法的处理结果,说明缺陷的细节信息得到了增强。同时,经所提算法处理后,图像对比度也显著高于原图像及另外两种算法的处理结果,说明缺陷与背景之间的对比增强,细节的可视度得到提高。高斯滤波后,虽然细节信息得到了增强,但是对比度有所减弱。模糊集增强理论的对比度显著提高,但是其图像信息熵有所减小,表明丢失了缺陷的部分细节信息。故所提算法是可行且具有相对优越性的。

表 1 经各个算法处理后的图像信息熵

Table 1 Image information entropy after processing by each algorithm

Algorithm	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Original image	1.2892	1.5335	1.4488	1.5133	1.7425
Gauss filtering	1.6474	1.6923	1.6485	2.0233	1.8910
Fuzzy set theory	1.1870	1.1469	0.9640	1.5044	1.3574
Proposed method	2.1112	2.0369	1.9282	2.2365	2.1052

表 2 经各个算法处理后的图像对比度

Table 2 Image contrast after processing by each algorithm

Algorithm	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Original image	2.4790	2.1452	1.6750	2.8834	2.0883
Gauss filtering	0.9210	0.9703	0.8035	1.2034	1.0263
Fuzzy set theory	9.7627	5.3041	3.6857	10.8496	5.5496
Proposed method	17.4297	14.7263	12.4420	17.2197	13.8637

对高斯滤波、模糊集增强理论及所提算法的平均运算时间(AOT)进行对比。图像样本大小为 590 pixel×439 pixel,测试实验是在内存为 4 GB、中央处理器(CPU)主频为 1.70 GHz 的计算机上进行的,测试软件为 MATLAB R2016b,结果见表 3。可以看出,所提算法与常规的图像增强理论相比,在处理速度方面的差异性不显著,但是却取得了比常规图像增强算法更好的增强效果,故在效率方面,所提算法是具备优越性的。

表 3 平均运算时间的对比

Table 3 Comparison among average operation time

Algorithm	Gauss	Fuzzy	Proposed
	filtering	set theory	
AOT /s	0.6743	0.9635	0.8932

6 结 论

针对水浸超声检测激光沉积 TA15 制件时出现的弱小缺陷,通过认知激光沉积特殊熔凝组织的声学特性,提出了一种基于 DWT 的弱小缺陷识别方法,并结合实验数据分析讨论了其优越性,得出以下结论。

1) 激光沉积形成的定向生长的粗大 β 柱状晶及晶界处聚集的 α 片层引起的散射衰减是造成超声检测缺陷时能量衰减的主要原因,加之晶界处的反射衰减及气孔缺陷的球面散射作用,共同导致了超声检测时部分小缺陷的对比度不足。

2) 提出了基于 DWT 的超声检测激光沉积 TA15 弱小缺陷的增强算法。通过对高频系数的 Penalized 软阈值去噪,有效抑制了高频噪声;通过对低频系数的 Gamma 变换,显著提高了弱小缺陷的对比度。经过增强后,能识别出图像中对比度不

足的弱小缺陷,有利于进一步的缺陷提取。

3) 针对激光沉积 TA15 弱小缺陷,多组对比数据表明,所提算法比传统的高斯滤波及模糊集增强理论模型有更好的对比度增强及细节特征信息保留的能力。

参 考 文 献

- [1] Li X W, Sha A X, Zhang W F, *et al.* TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(Z1): 90-94. 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20(Z1): 90-94.
- [2] Xue S. Study on the forming features and process of large scale TA15 titanium alloy aviation structural parts[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. 薛松. TA15 钛合金大型航空结构件成形特性与工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [3] Liu Q M, Zhang Z H, Liu S F, *et al.* Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4. 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
- [4] Deng X H, Yang Z J. Current situation and prospect of titanium alloy additive manufacturing technology[J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(5): 113-120. 邓贤辉, 杨治军. 钛合金增材制造技术研究现状及展望[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(5): 113-120.
- [5] Zhang F Y, Chen J, Tan H, *et al.* Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 211-215.

- 张凤英, 陈静, 谭华, 等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 211-215.
- [6] Huang W D, Lin X. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- [7] Zhang A F, Li D C, Liang S D, *et al.* Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 16-22.
张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(22): 16-22.
- [8] Zhang X F, Wang Z, Zhou Y P. Noise processing in ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(5): 200-202, 229.
张小飞, 王茁, 周有鹏. 超声检测中的噪声处理[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 200-202, 229.
- [9] Ng S C, Ismail N, Ali A, *et al.* Ultrasonic NDE for internal defect detection in multi-layered composite materials by multi-resolution signal decomposition[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 13(1): 87-94.
- [10] Wu T Y, Ume I C, Rogge M D. Detection of defects in welded structures with complex geometry using statistical method based on discrete wavelet transform[C]. ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2009: 419-425.
- [11] Farley S J, Durodola J F, Fellows N A, *et al.* High resolution non-destructive evaluation of defects using artificial neural networks and wavelets[J]. NDT & E International, 2012, 52: 69-75.
- [12] Tabatabaeipour M, Hettler J, Delrue S, *et al.* Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt-joints[J]. NDT & E International, 2016, 80: 23-34.
- [13] Yang C L, Liu P Y, Yin G F, *et al.* Defect detection in magnetic tile images based on stationary wavelet transform[J]. NDT & E International, 2016, 83: 78-87.
- [14] Su J, Li B, Wang Y Z. Infrared image enhancement based on PCNN segmentation and fuzzy set theory[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0910001.
- 苏娟, 李冰, 王延钊. 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0910001.
- [15] Wen H B, Bi D Y, Ma S P, *et al.* Variational retinex algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911005.
温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911005.
- [16] Zhang X G, Sun Z, Hu X L, *et al.* Extraction method of welding seam and defect in ray testing image[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 77-80, 117.
张晓光, 孙正, 胡晓磊, 等. 射线检测图像中焊缝和缺陷的提取方法[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 77-80, 117.
- [17] Ruan X Q, Lin X, Huang C P, *et al.* Effect of microstructure of laser solid forming TC4 titanium alloy on ultrasonic parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0103005.
阮雪茜, 林鑫, 黄春平, 等. TC4 激光立体成形显微组织对超声参量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103005.
- [18] Chi D Z, Mai C L, Sun C L, *et al.* Wavelet package based ultrasonic defect detection method for testing austenitic stainless steel weldment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 43-46, 115.
迟大钊, 麦成乐, 孙昌立, 等. 基于小波包的奥氏体焊缝缺陷超声信号识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 43-46, 115.
- [19] Waller J M, Saulsberry R L, Parker B H, *et al.* Summary of NDE of additive manufacturing efforts in NASA [J]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1650(1): 51-62.
- [20] Bamberg J, Dusel K H, Satzger W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines [J]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1650(1): 156-163.
- [21] Ling S. Additive manufacture technique and related NDT for its products[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 60-64.
凌松. 增材制造技术及其制品的无损检测进展[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 60-64.