

# 基于超声红外热成像的缺陷检测与定位研究<sup>\*</sup>

米浩<sup>1</sup>, 杨明<sup>1</sup>, 于磊<sup>2</sup>, 安大伟<sup>1</sup>, 赵夙<sup>2</sup>, 金家欣<sup>1</sup>, 雷华明<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学仪器科学与工程系 上海, 200240) (2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波, 315201)

**摘要** 超声红外热成像以超声作为激励源, 能够用于检测多种工件, 但是由于热传导效应及空气的散射, 检测结果中缺陷边缘较为模糊, 成像对比度不高, 并且会有温度分布不均引起的“散斑噪声”。为解决以上问题, 提出了一种对超声红外热成像结果进行缺陷检测和定位的方法, 使用限制对比度自适应直方图均衡 (contrast limited adaptive histogram equalization, 简称 CLAHE) 方法对图像进行对比度增强, 用巴特沃斯滤波器进行降噪, 根据图像的局部方差特征判断是否有缺陷, 并通过形态学处理对缺陷中心进行定位。实验表明, 根据局部方差可以对图像进行有效判断, 经过形态学处理之后能够准确定位。该研究为通过超声红外热成像实现缺陷检测及定位提供了一种便捷有效的方法。

**关键词** 红外热成像; 图像处理; 缺陷检测; 巴特沃斯滤波器

**中图分类号** TP391.5

## 引言

超声红外热成像技术在无损检测领域受到了广泛关注, 该检测方案具有检测范围广、速度快及适用性强等优势。研究人员对其内在机理和生热规律进行了研究, 然而对于缺陷的红外图像识别和定位研究还不成熟, 限制了其广泛应用<sup>[1-4]</sup>。使用超声红外热成像方式进行缺陷检测时, 热传导会使缺陷周围的材料和空气的温度升高。空气的散射会导致成像结果的高温区域边界模糊, 范围扩大。空气或被测件温度分布不均也引起图像质量下降<sup>[5-7]</sup>。已有学者对此进行了研究, 文献[8]提出一种基于热导方程的增强和热像分析算法, 通过滤波降低了噪声水平, 减弱了边界的模糊效应。Yuan 等<sup>[9]</sup>提出了一种自适应三边对比度增强方法, 从对比度、强度和锐度 3 个方面提升图像的视觉质量, 达到了提高图像熵值的效果。Bai 等<sup>[10]</sup>提出一种基于多尺度顶帽变换的红外图像增强算法, 利用多尺度顶帽变换提取亮区域和暗区域并重构, 提高了图像的对比度。现有研究中对红外热图像的增强多为针对大视野中目标对象细节和轮廓的增强, 超声红外热成像检测缺陷时需要关注的是对于较小视野范围, 其缺陷的轮廓不明显, 呈现渐变的特性, 故适用性较弱。现有的对缺陷进行检测的成果中, 是针对热图像中的亮点和裂

纹进行分类, 并没有区分正常和缺陷区域, 且识别准确度受到一定的限制<sup>[11]</sup>。检测缺陷若不能及时发现并对其进行定位, 则难以控制产品质量。

笔者提出了一种基于超声红外热成像的缺陷检测与定位方法, 对红外成像的结果进行滤波处理和图像增强, 并根据局部方差特征对成像结果进行判断是否为缺陷工件, 实现缺陷的定位。

## 1 理论基础

振动会引起摩擦, 摩擦做功会产热。超声波使得被激励的物体的一些性能发生变化, 使振动过程中的产热现象更加明显<sup>[12]</sup>。Han 等<sup>[13]</sup>建立了用于分析超声聚能杆和刚性物体接触产生声混沌的理论模型, 证明了声混沌的产生源于超声聚能杆和试件之间的接触。Barden 等<sup>[14]</sup>建立了超声脉冲激励时裂纹尖点和裂纹边缘的生热解析模型, 分析了内部应力和缺陷表面的温升关系。超声波在激励被测件时引起物体振动, 缺陷两侧接触面的振动状态不一致导致相互摩擦、碰撞, 摩擦做功将超声波的能量转化为热能, 可以利用动力学方法分析此发热过程。

对于某有限元  $e$  满足以下弹性动力学方程

$$\mathbf{M}_e \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C}_e \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_e \boldsymbol{\delta} = \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_e \quad (1)$$

其中:  $\boldsymbol{\delta}$  为单元  $e$  的节点位移矩阵;  $\mathbf{M}_e$  为单元的质量矩阵;  $\mathbf{C}_e$  为单元的阻尼矩阵;  $\mathbf{K}_e$  为单元的刚度矩

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(81571831, 51275287)  
收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-11-09

阵;  $f_o$  为外载荷矩阵;  $f_u$  为碰撞接触力矩阵。

在超声波激励下,被测件中的裂纹缺陷界面由于之间的动摩擦力作用,振动的机械能转化为热能,产生热量的热流密度为

$$q(t) = [\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v(t)|}] F_N(t) v_r(t) \quad (2)$$

其中:  $\mu_d$  为接触面的动摩擦因数;  $F_N$  为法向接触力;  $v(t)$  为接触点的相对速度;  $v_r(t)$  为接触点的相对切向速度;  $\mu_s$  为接触面的静摩擦因数;  $c$  为静摩擦转换为动摩擦的速度系数。

在缺陷部位的产热量为

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N [\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v_i(t)|}] F_i(t) v_i(t) \Delta A_i \quad (3)$$

其中:  $N$  为裂纹区域接触摩擦点数量;  $F_i(t)$  为第  $i$  个接触单元的法向压力;  $v_i(t)$  为第  $i$  个接触点的相对切向速度;  $\Delta A_i$  为单元的接触面积。

固体中的热传导控制方程<sup>[7]</sup>为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{k} g(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

其中:  $T$  为温度矩阵;  $k$  为热导率;  $g(x, y, z, t)$  为热源;  $\alpha$  为热膨胀系数。

对被测件内的热量传输过程进行分析,边界条件为

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{\Gamma} = h(T - T_0) \quad (5)$$

其中:  $T_0$  为室温矩阵;  $\Gamma$  为被测件的边界;  $h$  为被测件表面的对流换热系数。

取加权残差为零(即加权残差的 Galerkin 法)推导出有限元离散方程,然后采用后差分法可得

$$\left[ \frac{C}{\Delta t} + K + F \right] T_t = \frac{C}{\Delta t} T_{t-\Delta t} + Q \quad (6)$$

其中:  $T$  为节点温度矩阵;  $Q$  为节点生热率矩阵;  $C$  为热容矩阵;  $K$  为热传导矩阵;  $F$  为有对流边界条件引起热传导的矩阵;  $T_t$  为  $t$  时刻的节点温度矩阵;  $T_{t-\Delta t}$  为  $t - \Delta t$  时刻的节点温度矩阵。

求出热传导方程的数值解,即可得出被测件表面上缺陷处的温度高于正常部位的温度,且由于热量的传导,使缺陷周围温度随之升高<sup>[3]</sup>。

## 2 红外热图像的增强

由于缺陷区域的温度高于正常区域,在使用红外热成像设备测试被测件之后,会有明显的颜色差异,因此通过对热图像进行处理及分析,可以达到识别缺陷并定位的效果。

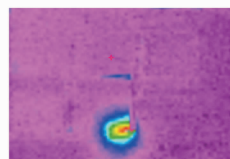
受到环境温度、被测件温度分布不均、热量扩散

及热成像设备的分辨率等因素的影响,热图像中色调单一,并有很多噪声,边缘模糊,如图 1(a) 所示。因此,需要对热图像进行对比度增强和降噪。

### 2.1 图像对比度增强

由于热图像的色调单一,转化为灰度图像后,灰度直方图分布集中。笔者选择限制 CLAHE 算法,相比于自适应直方图均衡算法和直方图均衡算法,CLAHE 算法具有很好的效果,可以拓宽热图像灰度直方图的分布,增强正常区域和缺陷区域的灰度差异,同时能够有效抑制噪声区域的增强,防止过度增强<sup>[15]</sup>。

CLAHE 算法首先将图像分为多个大小相等、互不重叠的区域,对每个区块的灰度直方图按照阈值进行剪切,对超出阈值的像素进行灰度重分配,将重分配之后的直方图进行均衡化,即将直方图均匀地分布到指定灰度范围内,采用双线性插值进行灰度值的重构。经此算法处理之后的效果如图 1 所示。可以看出,经过 CLAHE 算法处理,图像的对比度增强,灰度分布区域更广,为下一步的降噪处理奠定基础。



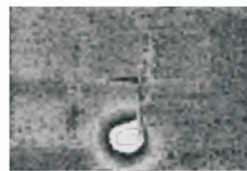
(a) 红外热图像

(a) Infrared thermal image



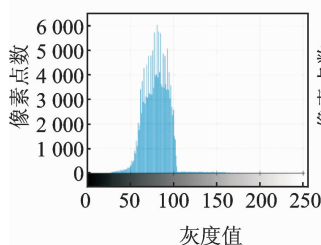
(b) 灰度化红外热图像

(b) Gray-scale infrared thermal images



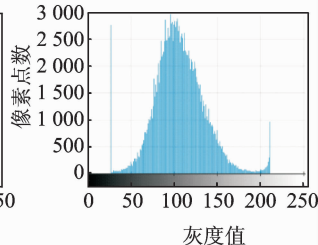
(c) CLAHE增强的灰度化图像

(c) CLAHE enhanced grayscale image



(d) 灰度化图像的灰度直方图

(d) Gray histogram of gray image



(e) CLAHE增强的灰度直方图

(e) CLAHE enhanced gray histogram

图 1 对比度增强效果

Fig. 1 Contrast enhancement effect

## 2.2 图像的降噪

为达到增强缺陷边缘的效果,多采用高通滤波来减弱噪声影响<sup>[16]</sup>。热图像中的边缘模糊属低频噪声,包括由于温度扩散引起的边缘模糊及温度分布不均引起的散斑噪声,此类噪声为低频噪声,环境中的噪声多对应于频域空间中的高频部分,起因是成像缺陷及光线反射等。因此,需要对图像进行带通滤波降噪。频域滤波的理论基础为卷积定理

$$f(x, y) * h(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) H(u, v) \quad (7)$$

其中:  $H(u, v)$  为滤波器的传递函数。

频域滤波处理图像的原理如图 2 所示。

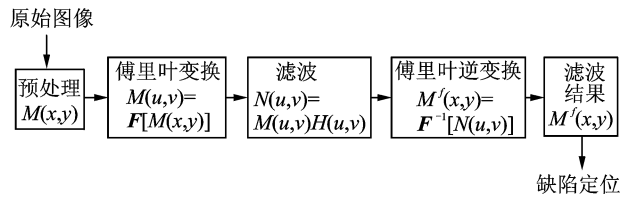


图 2 频域滤波原理

Fig. 2 Principle of frequency domain filtering

热图像中低频部分为温度变化缓慢或温度稳定的区域,属于正常区域,对缺陷轮廓的提取影响较小,巴特沃斯带通滤波器可以削弱低频部分,同时对高频噪声进行抑制,具有精度高、稳定和灵活等特点<sup>[17]</sup>,可为后续的图像缺陷检测保留重要的信息,因此笔者选择巴特沃斯带通滤波器进行增强。

巴特沃斯带通滤波器可以理解为截止频率不同的巴特沃斯高通滤波器和低通滤波器的串联, $n$ 阶巴特沃斯高通滤波器传递函数为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D(u, v)}{D_H}\right)^{2n}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{D_L}{D(u, v)}\right)^{2n}} \quad (8)$$

其中:乘号前、后的部分分别实现高通和低通滤波; $D_H, D_L$ 分别为高通和低通滤波器的频率半径,即高频截止频率和低频截止频率,且  $D_L < D_H$ ;  $D(u, v)$  为点  $(u, v)$  到图像中心的距离。

滤波后,缺陷区域轮廓明显增强,正常区域的散斑噪声减弱。滤波后的图像及频谱如图 3 所示。

## 3 缺陷识别与缺陷中心定位

### 3.1 缺陷识别

常用的缺陷识别方法有神经网络和支持向量机等,根据大量的样本,对图像进行特征采集和识别训

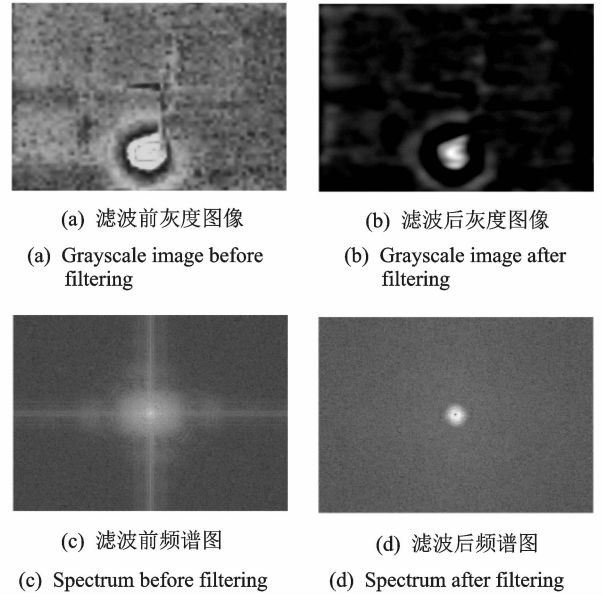


图 3 滤波前后对比图

Fig. 3 Comparison before and after filtering

练。鉴于本研究中的样本较少,笔者采用色彩分量-局部方差作为识别缺陷的特征。经过图像增强之后,缺陷区域和正常区域区分较为明显,缺陷区域的色彩分布不均匀,正常区域的色彩分布较为统一。因此,笔者根据此特征,选取局部方差作为区分图像中是否有缺陷的依据。具体方案如下:a. 将红绿蓝色彩模式(red, green, blue, 简称 RGB)的图像的 G 分量图像分为  $3 \times 3$  共计 9 部分,子图像长度或宽度不是整数的向下取整;b. 对每个子图像求灰度值的标准差,记为  $s_i, i = 1 \sim 9$ ;c. 求  $s_i$  的极差  $D$ ,若  $D > D_0$ ,则判断此图像中的被测件有缺陷;否则,判断为正常被测件,其中  $D_0$  为阈值。在同一实验环境下采集的热图像阈值  $D_0$  较为接近。采用已有热图像中 20 个正常图像的子图像方差与 20 个缺陷图像的子图像方差的平均值确定阈值,四舍五入取为 49。

### 3.2 缺陷中心定位

对识别出有缺陷的图像进行缺陷中心定位。通过形态学处理的闭运算消除缺陷周围杂点的影响,选取图像中最大连通域的质量中心作为缺陷中心。

经过形态学处理,二值图像中会有多个大小不等的连通域,缺陷区域和温度分布不均的区域都会形成连通域。缺陷区域周围的像素点灰度值较大,会形成面积较大的连通域。因此,笔者选取面积最大的连通域  $P$  作为包含缺陷中心的连通域。连通域  $P$  的像素点坐标集合为  $\{X, Y\}$ , 即

$$\{X, Y\} = \{(x, y) \mid x \in X, y \in Y, (x, y) \in P\} \quad (9)$$

计算灰度图像中  $(X, Y)$  区域内,以灰度为权

重的重心坐标  $(X_{Gcore}, Y_{Gcore})$  为

$$X_{Gcore} = \frac{\sum_{i=1}^n h(x_i, y_i) x_i}{\sum_{i=1}^n h(x_i, y_i)} \quad (10)$$

$(x_i, y_i) \in (X, Y)$

$$Y_{Gcore} = \frac{\sum_{i=1}^n h(x_i, y_i) y_i}{\sum_{i=1}^n h(x_i, y_i)} \quad (11)$$

$(x_i, y_i) \in (X, Y)$

## 4 实验与分析

### 4.1 系统结构

实验采用大功率超声电源驱动超声换能器,激励被测件在其 20 kHz 附近的谐振频率上进行共振,超声激励功率和时间可以连续调节和精确控制。被

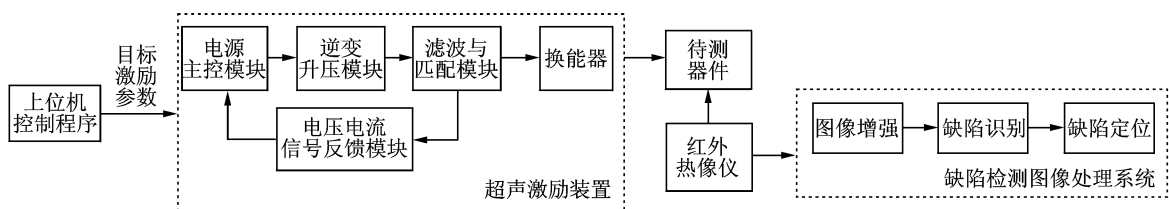


图4 系统结构

Fig. 4 System structure

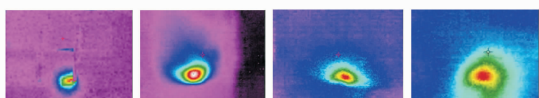
测件有正常的以及带缺陷的超声刀具和复合材料板。在谐振频率附近,超声振动信号可以使被测件产生最大的振动幅度。红外热成像设备采用 Fluke Ti20 红外热成像仪,分辨率为  $128 \times 96$ 。编程环境为 Matlab2016b,程序运行环境为 Windows 10 系统。

系统结构如图 4 所示。

### 4.2 实验结果与分析

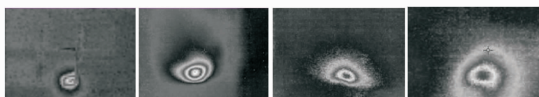
#### 4.2.1 图像增强

经过 CLAHE 算法对图像的增强和巴特沃斯带经过 CLAHE 算法对图像的增强和巴特沃斯带通滤波器滤波,图像的显示效果明显得到提升,如图 5 所示。可以看出,增强之后的图像缺陷区域更加明显。笔者对图像处理效果进行量化分析采用的指



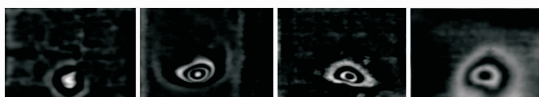
(a) 原始热图像

(a) The original thermal image



(b) 灰度化的热图像

(b) The grayed-out thermal image



(c) 经过CLAHE+巴特沃斯滤波增强的灰度图像

(c) The grayscale image enhanced by CLAHE+Butterworth filtering

图5 图像增强效果

Fig. 5 Image enhancement effect

simulator,简称 GSSIM)。PSNR 为峰值与噪声信号强度的比值,此指标基于计算图像的均方误差描述信号的噪声,PSNR 越大,图像质量越高。FSIM 运用相位一致性提取图像的底层特征。CoC 表示算法应用与图像之间的相互依赖关系,可以评估两幅图像之间的相关性。EPI 可以衡量算法对图像边缘特征的保持能力。GSSIM 使用梯度特征评估图像质量。FSIM,CoC,EPI 和 GSSIM 越接近 1,重建图像的质量越高<sup>[18-20]</sup>。

#### 4.2.2 缺陷识别

图 6 为图像质量评价指标。笔者选取图 6 中的 7 张图像的识别结果进行展示,将每张图像分为  $3 \times 3$  个子图像,每个子图像的标准差及其极差如表 1 所示。测试的 7 张图像中,图 1~4 为缺陷件的热图像,图 5~7 为正常被测件的热图像。实验结果表明,以极差阈值 49 为分界线,可以较好地区分出有缺陷的图像和正常的图像。

为了验证检测结果,笔者采用另一种无损检测方法——阵列涡流技术对钛合金超声刀进行验证。

使用 Ectane2 涡流数据采集设备对被测件进行检测,被测件如图 7(a)所示,检测结果如图 7(b)所示。图 7(a)中使用白色框线标注出了缺陷裂纹。

标为:峰值信噪比(peak signal to noise ratio,简称 PSNR),特征相似性(feature similarity index,简称 FSIM),相关系数(correlation coefficient,简称 CoC),边缘保持指数(edge preservation index,简称 EPI),基于梯度特征的结构相似度(grid scheduling



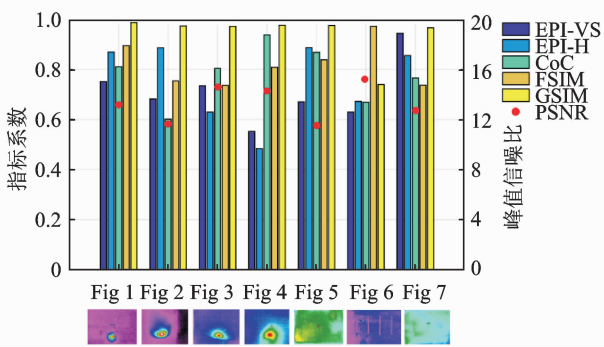


图 6 图像质量评价指标

Fig. 6 Image quality evaluation indicators

表 1 各个子图像标准差及其极差

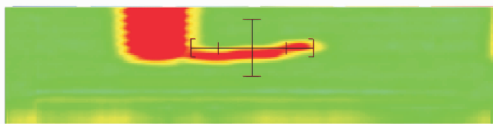
Tab. 1 Standard deviation of each sub-image and its range

子图像 方差	图像编号						
	1	2	3	4	5	6	7
var (1)	0.02	2.39	3.28	15.5	28.7	14	26.5
var (2)	0.18	2.31	2.93	28.2	23.2	12.5	15.2
var (3)	1.4	2.81	3.1	35.2	24.7	6.32	19
var (4)	0.04	23	7.53	20.5	21.6	5.41	24.8
var (5)	0.29	76	74.8	73.7	17.2	2.38	18.4
var (6)	0.04	3.61	23.6	42.7	22.4	1.72	9.84
var (7)	0.05	46.9	13.4	44.5	22.2	9.64	38.6
var (8)	66.2	76.9	84.7	49.5	30	4.37	12.6
var (9)	0.04	3.05	65.7	45.2	19.9	2.08	12.6
极差	66.2	74.6	81.8	58.2	12.8	12.2	28.7



(a) 被测件的两个侧面

(a) Two sides of the test piece



(b) 涡流检测结果(局部)

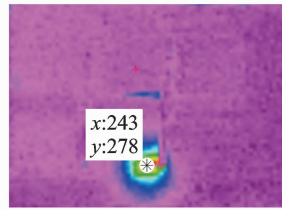
(b) Eddy current test results (partial)

图 7 被测件与涡流检测结果

Fig. 7 Tested object and eddy current test

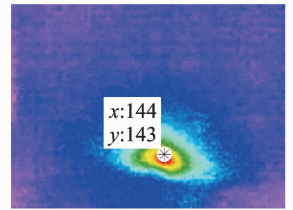
图 7(b)为图 7(a)中白框区域的检测结果。可以看出,图 7(b)“十”字区域有一条明显的红色带,对应于被测件的缺陷裂纹,缺陷左侧的大块红色区域为超声刀自身孔洞结构。经测量,被测件表面缺陷长度为 15 mm。根据红外热图像的子图像方差

可以判断出此被测件是有缺陷的。超声刀的红外热成像检测结果为图 8(a)所示。可以发现,阵列涡流检测结果与本方法检测结果基本相同,且红外检测结果并未将自身孔洞结构识别为缺陷。



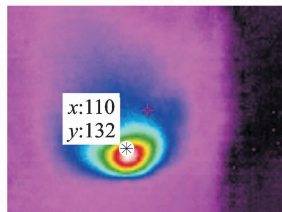
(a) 实验图像a的定位效果

(a) Test the positioning effect of image a



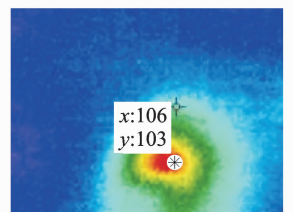
(b) 实验图像b的定位效果

(b) Test the positioning effect of image b



(c) 实验图像c的定位效果

(c) Test the positioning effect of image c



(d) 实验图像d的定位效果

(d) Test the positioning effect of image d

图 8 缺陷中心定位效果

Fig. 8 Defect center positioning effect

### 4.2.3 缺陷中心定位

图像缺陷中心定位效果如图 8 所示。图 8 表明,此算法对于不同大小、不同背景的图片及不同形状的缺陷均能实现缺陷定位的目标,可以准确定位出缺陷的中心。

## 5 结束语

超声红外热成像具有边界模糊、对比度较低、具有散斑噪声等特点,为缺陷的识别和定位带来了障碍。根据子图像方差的极差来分辨是否带有缺陷,利用缺陷所在连通域的灰度重心作为缺陷的中心实现缺陷的定位。实验表明,此方法能够识别缺陷的存在并定位缺陷的中心,为超声红外热成像提供了一种高效便捷的方法,具有较强的工程意义,可以为工艺和加工工具的改进提供基础。本研究仍有不足之处,未能通过图像对缺陷的形成原因进行分类,图像增强方法中的参数未能实现自适应调节等。

### 参 考 文 献

[1] 冯辅周,张超省,张丽霞,等. 超声红外热波技术的研究现状[J]. 无损检测, 2012, 34(9):46-49.  
FENG Fuzhou, ZHANG Chaosheng, ZHANG Lixia,

- et al. Research situation of ultrasonic infrared thermal wave technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2012, 34(9):46-49. (in Chinese)
- [2] 徐维超. 超声红外热波无损检测技术应用于裂纹检测的研究[D]. 北京:首都师范大学, 2008.
- [3] 曹彦鹏, 许宝杯, 何泽威, 等. 红外热成像信号处理技术的研究进展[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(2): 219-227.  
CAO Yanpeng, XU Baobei, HE Zewei, et al. Research advances in infrared thermography signal processing technology[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(2): 219-227. (in Chinese)
- [4] 周胜利, 姚志远, 沙金. 超声切割刀动力学分析和结构优化设计[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(12):1631-1635.  
ZHOU Shengli, YAO Zhiyuan, SHA Jin. Dynamics analysis and structural optimization design of an Ultrasonic Cutter[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(12):1631-1635. (in Chinese)
- [5] 刘慧. 超声红外锁相热像无损检测技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] RENSHAW J, CHEN J C, HOLLAND S D, et al. The sources of heat generation in vibro thermography [J]. *Ndt & E International*, 2011, 44(8):736-739.
- [7] ROTHENFUSSER M, HOMMA C. Acoustic thermography: vibrational modes of cracks and the mechanism of heat generation [J]. *Economic Record*, 2005, 24(1):249-261.
- [8] HOLLAND S D, RENSHAW J. Physics-based image enhancement for infrared thermography [J]. *Ndt & E International*, 2010, 43(5):440-445.
- [9] YUAN L T, SWEE S K, PING T C. Infrared image enhancement using adaptive trilateral contrast enhancement [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 54: 103-108.
- [10] BAI X, ZHOU F, XUE B. Infrared image enhancement through contrast enhancement by using multi-scale new top-hat transform [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(2):61-69.
- [11] 冯辅周, 张超省, 江鹏程, 等. 超声红外热像技术中缺陷的自动识别[J]. *激光与红外*, 2012, 42(10): 1149-1153.  
FENG Fuzhou, ZHANG Chaosheng, JIANG Pengcheng, et al. Automatic defect recognition in ultrasonic infrared thermal imaging technology [J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(10): 1149-1153. (in Chinese)
- [12] MIGNOGNA R B, Jr R E G, Jr J C D, et al. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials[J]. *Ultrasonics*, 1981, 19(4):159-163.
- [13] HAN X, LOGGINS V, ZENG Z, et al. Mechanical model for the generation of acoustic chaos in sonic infrared imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(8):1332-1334.
- [14] BARDEN T J, ALMOND D P, MORBIDINI M, et al. A quantitative investigation of thermosonics[C]// 15th World Conference on Nondestructive Evaluation. Roman: [s. n.], 2000.
- [15] JI Z, DING W, YE F, et al. Shape-adapting thermoacoustic imaging system based on flexible multi-element transducer[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(9):094104.
- [16] 王初阳, 李雪, 梁承玉, 等. 典型的红外图像背景抑制滤波算法研究[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(8):33-37.  
WANG Chuyang, LI Xue, LIANG Chengyu, et al. Study of algorithms for typical infrared image background suppression filtering [J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(8):33-37. (in Chinese)
- [17] 王大红, 胡茂林. 巴特沃斯非线性混合滤波器图像滤波方法设计[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(21): 195-198.  
WANG Dahong, HU Maolin. Image processing method using mixed non-linear Butterworth filter [J]. *Computer Engineering & Applications*, 2010, 46(21): 195-198. (in Chinese)
- [18] 杨春玲, 陈冠豪, 谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(7): 1313-1317.  
YANG Chunling, CHEN Guanhao, XIE Shengli. Gradient information based image quality assessment [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(7):1313-1317. (in Chinese)
- [19] ZHANG L, ZHANG L, MOU X, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8):2378-2386.
- [20] 苗莹, 易三莉, 贺建峰, 等. 结合梯度信息的特征相似性图像质量评估[J]. *中国图像图形学报*, 2015, 20(6):749-755.  
MIAO Ying, YI Sanli, HE Jianfeng, et al. Image quality assessment of feature similarity combined with gradient information [J]. *Journal of Image & Graphics*, 2015, 20(6):749-755. (in Chinese)



**第一作者简介:**米浩,女,1994年8月生,硕士。主要研究方向为缺陷检测和图像处理。

E-mail: mhsjtu@sjtu.edu.cn

**通信作者简介:**杨明,男,1964年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为超声电机、无损检测及人工心脏辅助。

E-mail: myang@sjtu.edu.cn

