

# 复合材料冲击损伤的超声红外检测

王成亮,杨 波

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

**摘要:**研究了应用超声红外技术检测复合材料试件冲击损伤缺陷。针对红外图像对比度差、缺陷轮廓模糊等特点,采用具有非高斯核函数的LBF模型进行了缺陷的边缘检测,利用缺陷边缘实现了缺陷的定量分析。从试验结果可以看出,LBF模型相对于其它常用的边缘检测方法,能够很好地检测低对比度红外图像的目标边缘,为复合材料缺陷的定量分析奠定了基础。从缺陷的长度和宽度定量计算精度可见,超声红外检测方法对于复合材料的缺陷是一种有效的检测手段,为复合材料的研制提供了强有力的技术支持。

**关键词:**复合材料;超声红外检测;边缘检测;冲击损伤

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2010)11-0893-05

## Ultrasonic Excited Thermography Nondestructive Testing for Impact Damage of Composite Material

WANG Cheng-Liang, YANG Bo

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The ultrasonic excited thermography nondestructive testing was utilized in detecting an impact damage of a composite material. Considering the thermal images characteristics of low contrast and edge fuzziness, a LBF model based on a non-Gaussian kernel function was used to detect the defect edge and a quantitative calculation was performed. The experiment result showed that the LBF model could effectively identify the object edges of low contrast thermal images, comparing to other common edge detection methods, which laid a good foundation for the quantitative assessment of composite defects. What is more, the detection accuracy of defect length and width showed that ultrasonic excited thermography nondestructive testing was an effective detect method for the defect detection of composite material, which provided powerful technical support for research and development of composite materials.

**Keywords:** Composite materials; Ultrasonic excited thermography testing; Edge detection; Impact damage

目前复合材料的无损检测方法主要有目视、渗透、射线和超声检测法等,这些方法各有所长,但也各有其局限性。笔者研究了新兴的超声红外无损检测技术,采用超声波作为激励源,利用超声波在传播过程中,复合材料缺陷等不均匀部位处由于摩擦、热弹和迟滞效应等作用,引起机械能显著衰减,并产生热量,使缺陷等不均匀结构处及相邻区域的温度明显升高的现象,再利用红外热像仪获取红外热图,采

用图像处理的方法对红外热图进行处理,从而可以实现对复合材料缺陷的检测、识别与定量分析。

由于检测过程中各种因素的影响,如光照、视角和复合材料的各向异性等,使获得的红外热图不同程度地存在边缘模糊、局部或整体对比度差等不足之处。因此,进行图像处理时要求图像增强算法应具有增强红外热图中缺陷边缘、改善图像对比度等功能,同时能有效地抑制噪声。所以,选取合适的算法对红外热图进行处理,显得尤为重要。近年来,基于小波变换的图像增强方法层出不穷,取得了一定的成果。但对于笔者研究所获得的红外图像,采用

收稿日期:2009-10-30

作者简介:王成亮(1984—),男,硕士研究生,主要研究方向为复合材料红外超声检测等。

小波变换方法结果不理想。

笔者结合红外图像的特点,选取基于区域的活动轮廓模型 LBF(Local Binary Fitting)对图像进行处理,并给出了红外热图中缺陷的定量计算分析。结果表明,LBF 模型可以很好地检测目标图像的边缘,为缺陷的定量分析奠定了坚实的基础。

## 1 LBF 模型的数学基础<sup>[1-2]</sup>

在描述 LBF 模型之前,先来介绍一下 PC (Piecewise Constant)模型。

PC 模型是著名的基于区域的几何活动轮廓模型。该模型不是利用梯度描述目标边缘的位置,而是以 Mumford-Shah 泛函为基础,并假定图像由两个平均灰度相差较大的同质区域(目标和背景)组成,从而利用目标和背景之间的灰度平均值的差别来进行分割<sup>[3]</sup>。其数学描述为:设活动轮廓线  $C$  将定义在图像域  $Q$  上的图像  $I$  划分为两个部分,分别记为  $\text{inside}(C)$  和  $\text{outside}(C)$ , $c_1$  和  $c_2$  分别是  $C$  的内、外部区域的图像灰度平均值。定义能量函数:

$$\begin{aligned} F(C, c_1, c_2) = & \mu \cdot \text{Length}(C) + v \cdot S_0(C) \\ & + \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |I - c_1|^2 dx \\ & + \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |I - c_2|^2 dx \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\text{Length}(C)$  表示边界曲线  $C$  的长度;  $I$  是待分割的图像;  $S_0(C)$  为曲线  $C$  的内部区域的面积;  $\mu, v \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0$  是权重系数。前两项称为“光滑项”,后两项称为“拟合项”。常数  $c_1$  和  $c_2$  使全局二值拟合项(固定  $C$ )  $\lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |I - c_1|^2 dx + \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |I - c_2|^2 dx$  达到最小。换言之,常数  $c_1$  和  $c_2$  分别是  $I^2$  意义下图像在  $\text{inside}(C)$  和  $\text{outside}(C)$  中灰度的拟合值。因此,PC 模型对仅含两个同质区且同一区域中灰度变化不大的图像,可以取得较好的分割效果。然而,对于灰度不均一的图像,用算术平均值  $c_1$  和  $c_2$  分别拟合图像在  $\text{inside}(C)$  和  $\text{outside}(C)$  中的灰度值,势必产生较大的误差,从而产生错误的分割。

针对上述问题,产生了一种局部能量泛函-局部二值拟合(LBF)能量,并用其在图像区域上的积分代替 PC 模型的二值拟合能量。

对任意  $x \in \Omega$ (图像区域),LBF 能量泛函定义为:

$$\begin{aligned} \epsilon_x(\varphi, f_1, f_2) = & \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} K(x-y) |I(y) - f_1(y)|^2 dy + \end{aligned}$$

$$\lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} K(x-y) |I(y) - f_2(y)|^2 dy \quad (2)$$

式中  $K(x) = K(|x|)$  是一个核函数,满足局部性质:非负单减,且  $\lim_{|x| \rightarrow \infty} K(x) = 0$ 。 $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  是图像的灰度拟合值,通过极小化上述能量得到。因为核函数  $K(x)$  具有局部性质,所以  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  主要由  $x$  附近的灰度值确定,具有“局部”的特征<sup>[4]</sup>。

显然,在 LBF 模型中,选取合适的核函数是至关重要的。满足上述局部性质的函数很多,文献[4]选取为高斯函数:

$$K_\delta(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}}, u \geq 0 \quad (3)$$

LBF 模型的能量泛函定义为(水平集表示形式):

$$\begin{aligned} E(\varphi, f_1, f_2) = & \int_{\Omega} \sigma[\varphi(x)] |\nabla \varphi(x)| dx + \\ & \int_{\Omega} \epsilon_x dx + u \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla \varphi(x)| - 1)^2 dx \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\varphi$  是水平集函数;  $\Omega$  是图像区域;  $\delta(x)$  是 Dirac 函数;  $\epsilon_x$  是 LBF 能量式的水平集表示。

固定  $\varphi$ ,极小化能量泛函式(4),得到  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  的表达式为:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{K(x) \cdot [H(\varphi(x))I(x)]}{K(x) \cdot H(\varphi(x))} \\ f_2(x) &= \frac{K(x) \cdot [(1 - H(\varphi(x)))I(x)]}{K(x) \cdot [1 - H(\varphi(x))]} \end{aligned}$$

最后极小化能量泛函式(4),并采用梯度下降法,得到水平集演化的偏微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = & v \delta(\varphi) \operatorname{div} \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} - \delta(\varphi) (\lambda_1 e_1 - \lambda_2 e_2) \\ & + u \left( \nabla^2 \varphi - \operatorname{div} \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} e_1(x) &= \int_{\Omega} K(y-x) |I(x) - f_1(y)|^2 dy \\ e_2(x) &= \int_{\Omega} K(y-x) |I(x) - f_2(y)|^2 dy \end{aligned}$$

在水平集演化方程(5)中,  $e_1(x)$  和  $e_2(x)$  显然是水平集演化速度  $\varphi_t$  最重要的组成部分(LBF 模型不同于 PC 模型之处),它们由核函数  $K(x)$  完全确定。因此,核函数  $K(x)$  在很大程度上确定了水平集的演化速度  $\varphi_t$ 。因此,选择合适的核函数  $K(x)$  是减少演化时间的一种有效途径<sup>[5]</sup>。

在核函数的选择上,缺乏统一标准,大多根据图像来进行选择。文献[1]选取了式(3)的高斯函数,文献[2]指出了高斯函数的不足之处,认为高斯函数

的与中心距离为  $\sigma$  和  $3\sigma$  的点是导致水平集演化速度慢的原因,为此,笔者选择如下函数为核函数:

$$K_p(u) = \frac{1}{1+u^p} \quad p \in (0,1], u \geq 0 \quad (6)$$

这里要求  $p \in (0,1]$  是因为  $p > 1$  时,  $K_p(u)$  具有与高斯函数相似的图形特征,存在拐点下降快的问题,所以要避免。

## 2 复合材料试件及缺陷描述

图 1 所示为一个碳纤维复合材料的飞机机翼肋段零件,其基体树脂为低温固化改性环氧树脂体系,增强纤维是 T300-3K-40B 碳纤维,采用阳膜成型,真空袋封装,热压罐固化工艺。图 1 中小圆点是一个圆形标签,与缺陷位置靠近,可以用作缺陷定量计算时的标定依据。



图 1 (尾)肋段

试件上有一处人为缺陷,是将试件水平放置后,采用 1 kg 质量的锤头,以一定加速度垂直撞击肋段而产生,由于冲击能量较大,产生了贯穿性的冲击损伤,造成了试件明显纤维撕裂和断裂。该缺陷从试件正面不可视,从试件背面目视分层区域长 7~8 cm,宽 1 cm 左右。该缺陷用以模拟飞机装配时工具坠落到该部件上产生的冲击损伤。

## 3 超声红外检测红外图像处理结果及分析

超声红外检测试验中超声激励系统采用的是 Branson 公司的 2000aed 超声仪,超声频率为 20 kHz。红外热像仪采用的是 FLIR 公司的 ThermaCAM<sup>TM</sup> SC3000,图像分辨率可达  $320 \times 240$  像素,其工作波段为 8~9  $\mu\text{m}$ 。

将图 1 复合材料试件放在薄橡胶垫上合适位置,调整红外热像仪,使视场中试件位置尽量居中,之后调整热像仪的焦距,采用均匀黑体对其进行温场标定,确保热像仪视场均匀。调整试验条件,包括超声激励枪的振幅、作用时间等参数。设定采样时间长 10 s,频率为 60 Hz,控制超声激励枪下降后短时间激励试件后上移,与此同时,红外热像仪实时记录试件表面温场,最后通过专用图像软件得到红外热图序列。在整个热图序列中,超声激励后视场中缺陷处慢慢变亮后逐渐变暗,说明缺陷处的热量集中,温度最初升高,之后热量逐渐向周围扩散,直至

达到热平衡状态为止。

从该试件的红外热图序列中选取缺陷显现清晰的热图,如图 2 所示,左上部分为人为缺陷,右下部分为圆形标签,该人为缺陷在热图中的显现出现了不连贯的特点,各处的亮度也不同,这是因为缺陷不同位置距离试件表面的深度不同而引起的。

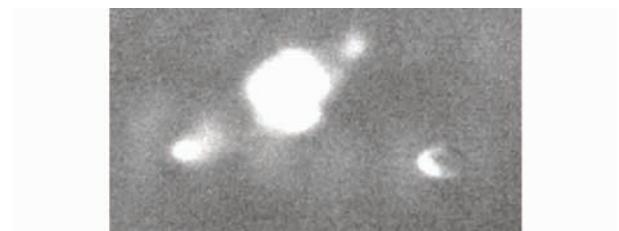
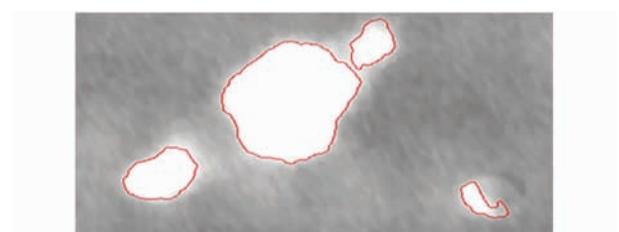


图 2 未经处理的热图

如前所述,复合材料的超声红外热图的对比度差、边缘模糊。为了进行缺陷的定量计算,得到其长度、宽度、周长、面积等信息,需要进行适当的图像处理,提取缺陷的边缘。分别采用 LBF 模型的两种核函数,即高斯和非高斯核函数对目标图像进行处理,选取不同的初始化条件下(在缺陷位置的直线、圆和点),在缺陷区域处理后的图像如图 3~5 所示。



(a) 高斯函数模型,迭代 120 次,5.62 s



(b) 非高斯函数模型,迭代 50 次,1.23 s  
图 3 初始条件为直线时处理后的热图

由图 3~5 可知,3 种初始化条件下,两个模型的试验结果很接近,即分割结果相同。但是,非高斯函数模型的分割时间明显比高斯函数模型的分割时间少很多,且分割时间和迭代都比较稳定;此外,在试验的过程中发现,初始条件的变化对高斯函数模型的影响大,如初始条件选择在缺陷外,会导致高斯

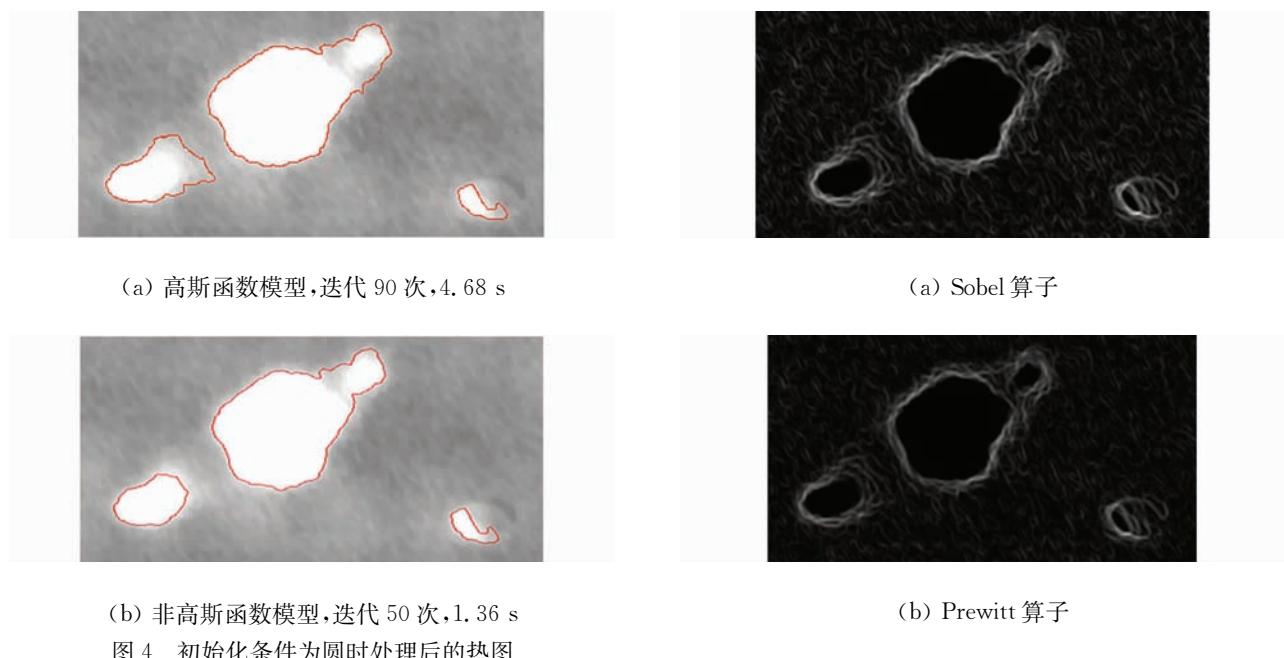


图 4 初始条件为圆时处理后的热图

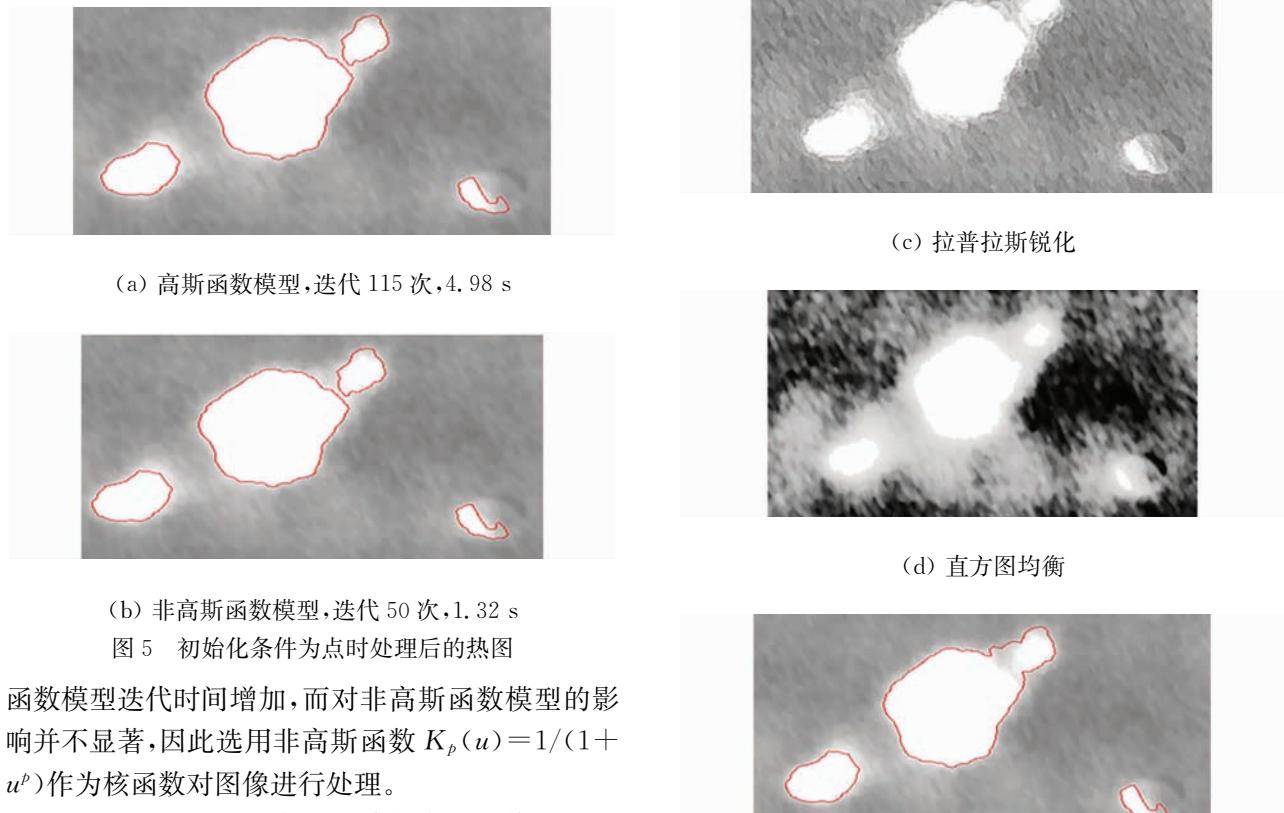


图 5 初始条件为点时处理后的热图

函数模型迭代时间增加,而对非高斯函数模型的影响并不显著,因此选用非高斯函数  $K_p(u) = 1/(1+u^p)$  作为核函数对图像进行处理。

下文再比较 LBF 模型和其他常用图像增强方法的处理结果,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, LBF 模型对于噪声不敏感,能非常准确地找到图像的边缘,从而达到图像增强的目的,而其他几种方法即使是在已经预处理的情况下(滤波处理),对噪声依然很敏感,导致在增强图像的同时,也增强了噪声。

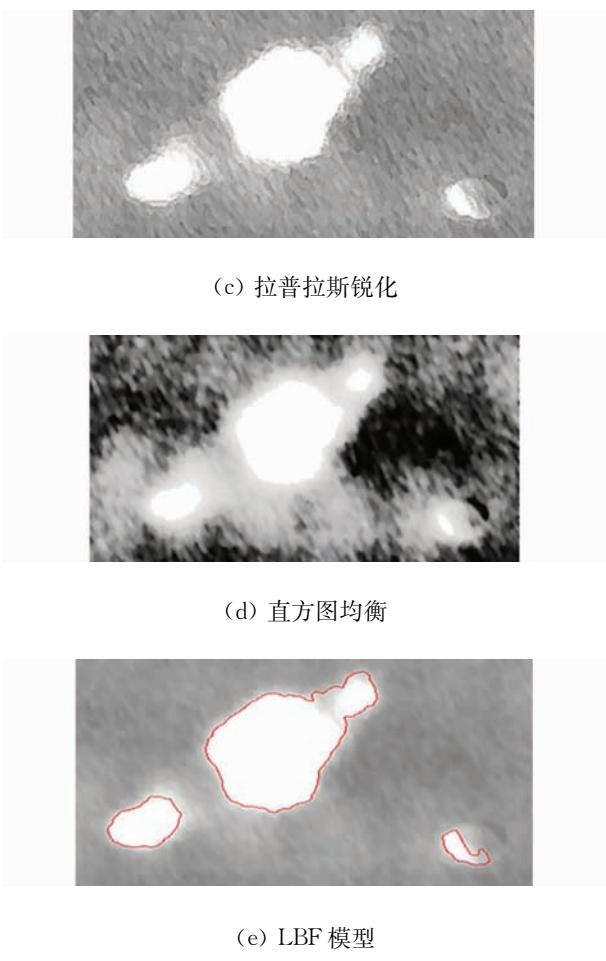


图 6 不同图像增强算法的处理结果比较

#### 4 超声红外检测的红外图像缺陷定量分析

运用 LBF 模型把缺陷边缘提取出来之后,再对其进行定量分析。定量计算算法采用 VC++ 进行

编程(Windows XP 环境下),计算内容包括面积、周长、长度和宽度。

缺陷面积只要计算缺陷边缘内所有像素点之和,周长为边缘像素点之和。算法的具体实现思想可参考文献[6],这里主要描述缺陷宽度的定量分析,它的基本思想是:找到缺陷上下两个端点,记下这两个端点的坐标位置,它们之间的距离即为缺陷长度;求出与两端点所在直线相垂直直线(即宽度所在直线)的斜率,在边界点上寻找具有同样斜率的线段,并计算其距离,距离最大者即为最大宽度。为了提高编程及搜索效率,编程中用到了置标志位的方法,即所有边界点初始数目同样多的布尔型数组,初始化为 FALSE,找到合适的点后把相应的标志位置至为 TRUE,搜索的时候只搜索标志位为 FALSE 的点,这样可以大大提高效率。

在得到以像素为单位的缺陷特征前,还需要对图中的像素进行标定。由于红外热图中标签(左下角)大部分对比度和背景的对比度相差很小,所以只有一部分被识别出来,采用的是在标签图像上加矩形框的办法对缺陷进行标定,再利用矩形框作为参考对图像进行拉伸后输入标签的实际尺寸,从而得到每个像素点的实际尺寸。缺陷从图中看是两个,这是由于缺陷上、下贯穿于复合材料,位置较深的部分缺陷激励时间要小于缺陷的其它部分,所以在红外热图上的显现不连贯,我们在程序中已作了处理,把这两部分缺陷作为一个缺陷计算,就得到如图 7 所示的检测结果。



图 7 缺陷定量分析结果

从图中缺陷长度和缺陷宽度检测精度可以看出,采用 LBF 模型的图像增强算法,对缺陷的定量计算的作用不可忽视,得到了较高的检测精度。其它参数诸如面积等特征,由于很难得到精确的实际面积等尺寸,加上缺陷显现由于复合材料的分层结构出现的不连贯现象,值得在后续的研究中通过试验手段、试验参数、图像处理等各方面进行改善。

## 5 结论

复合材料的优点虽然突出,但结构和工艺的特殊性给无损检测技术带来了难度。超声红外检测技术作为一门新兴的技术应用到复合材料的无损检测还有很多值得研究的方面,特别是在这种检测方式下获得的红外热图存在对比度差、缺陷轮廓模糊等特点。研究了红外热图中缺陷边缘的检测方法。在此基础上,对该缺陷进行了定量分析。缺陷长度和宽度的计算精度表明,该缺陷边缘检测方法有效地提取了缺陷的边缘,效果良好,为复合材料超声红外检测缺陷的定量评估奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] Li Chunming, Kao Chiu-Yen, Gore John C. Implicit active contours driven by local binary fitting energy [C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, [s. l.]: [s. n.], 2007:17—22.
- [2] 原野, 何传江. LBF 活动轮廓模型的改进[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(15):177—179.
- [3] 董吉文, 杨海英. 活动轮廓模型综述[J]. 信息技术与信息化, 2008(5):45—46.
- [4] Li C, Xu C, Gui C, et al. Level set evolution without re-initialization; a new variational formulation[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, [s. l.]: [s. n.], 2005:430—436.
- [5] Vese L, Chan T. A multiphase level set framework for image segmentation using the mumford and shah model [J]. Int'l J Comp Vis., 2002(50):271—293.
- [6] Yang Bo, Wang Chengliang. Thermal nondestructive testing technology of aircraft composite material[C]// The 9<sup>th</sup> IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, [s. l.]: [s. n.], 2009 (2):557—562.