

〈红外应用〉

## CFRP 层压板脉冲热像检测的图像重建与增强

郭兴旺, 吕珍霞, 高功臣

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 脉冲热像检测中直接获取的原始热像往往信噪比较低、对比度较差。为了抑制各种噪声的不良影响, 提高脉冲热像检测的缺陷探测能力, 运用基于对数多项式回归的图像重建方法对碳纤维增强塑料层压板脉冲热像检测的热像序列进行图像重建与增强。通过对一维热传导模型的解析分析论证了对数多项式回归法的理论基础; 通过层压板检测实验对图像重建与增强方法的实际处理效果进行了验证; 采用基于统计学的图像评估标准对图像增强效果作了定量评价。结果表明利用三次对数多项式回归即可精确地重建本次实验的原始热像, 同时能有效地克服复合材料层压板脉冲热像检测中随机噪声和加热不均效应对缺陷识别的干扰; 经过数据重建后所作的数字图像比原始热像有更高的缺陷显示度或分辨力, 其中以三次对数多项式回归公式中的二次项系数所作的数字图像的信噪比最大。

**关键词:** 热成像; 图像重建; 无损检测; 复合材料

**中图分类号:** TN219      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2006)05-0299-07

## Image Reconstruction and Enhancement of Pulsed Infrared Thermography of CFRP Laminates

GUO Xing-wang, LV Zhen-xia, GAO Gong-chen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Raw thermal images acquired by pulsed thermography (PT) usually have low signal noise ratio (SNR) and temperature contrast. In order to restrain the bad effects of noise and improve the defect detecting ability of PT, image reconstruction methods based on logarithm polynomial regression were carried out here to reconstruct and enhance PT image sequences of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) laminates. The basic theory of these methods were analyzed with the analytic solution of one-dimensional heat transfer model; the actual effects of image reconstruction and enhancement were verified through the laminate testing experiment; the image enhancement effects were evaluated quantitatively by the image evaluation standards based on statistics. The results indicates that the cubic logarithm polynomials can accurately reconstruct the raw thermal images in the experiment, and can effectively suppress the interference to defect recognition caused by random noise and uneven heating in the PT testing of composite laminates; the digital images from data reconstruction have clearer defect display or higher defect resolution than the raw thermal images, and the quadratic coefficient image of cubic logarithm regression shows the highest SNR.

**Key words:** thermography; reconstruction; nondestructive examination; composite materials

### 引言

碳纤维增强塑料 (CFRP—carbon fibre reinforced plastic) 层压板是一种先进的复合材料结构, 由于其具有比强度高、比刚度高和可设计性强等优点, 在航空航天飞行器制造领域的应用很多。CFRP 构件的制造工艺较为复杂, 质量难以控制, 因此对飞行器结构件等可靠性要求高的 CFRP 构件, 必须进行无损检测。

收稿日期: 2005-10-08

作者简介: 郭兴旺 (1964—), 男, 内蒙和林人, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175003); 航空科学基金资助项目 (02G51050)

CFRP 层压板构件中的材质分层剥离、脱粘和受撞击是最为常见的缺陷,对此类缺陷检测,红外热像无损检测(IR NDT—*infrared thermographic nondestructive testing*)具有一定的优势。与超声法、射线法等传统方法相比,IR NDT 具有非接触、速度快、单次检测面积大和对复杂几何形状构件的可适应性等优点,因此近年来在复合材料缺陷检测中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。根据热激励方式及信号处理方式的不同,IR NDT 有许多具体的实施方法,其中,脉冲热像法(PT—*pulsed infrared thermography*)由于具有简单快速的特点,在实际中应用最多。PT 法的一般检测过程是,以高能闪光灯产生的瞬时热脉冲加热试件表面,以红外热像仪记录试件受热激励后表面温度场的响应历程,然后对温度响应信号(即红外热像序列)进行分析和处理,从中观测和辨识试件内部缺陷或结构特征的存在及其特征。直接从红外热像仪采集的原始热像中观测识别缺陷是 IR NDT 最基本的应用方式,简单易行。但是,试件中较小的缺陷或结构异常所造成的表面温差信号与背景温度相比非常小,即原始热像图是典型的低对比度图像,其对试件内部局部异常变化的辨识能力非常有限。

提高脉冲热像法的检测能力主要有两条途径:一是从硬件上考虑,提高热像仪和热激励设备相关性能指标;二是从热像信号处理方法上考虑,对热像信号进行图像重建与增强。第一种途径受技术和成本的限制。第二种途径既经济又有效,因此在国际上的研究非常活跃。在脉冲热像检测中,国际上已发展了多种热像信号处理方法<sup>[2]</sup>。常见的一种方法是求最大温度对比度图像  $C_{\max}^i$ 。这里  $C_{\max}^i$  为第  $i$  个像素对应的温度对比度  $C_t^i$  在时间历程中的最大值:

$$C_{\max}^i = \{C_t^i\}_{\max} = \left\{ \frac{T_t^i - T_{t,nd}}{T_{t,nd}} \right\}_{\max} \quad (1)$$

式中:  $T_t^i$  为第  $i$  个像素点在  $t$  时刻的温度,  $T_{t,nd}$  为在无缺陷区所选定的参考点在  $t$  时刻的温度。显然此法需要事先知道试件的无缺陷区,以便从中选取参考点。另一种较好的方法是脉冲相位法(PPT—*Pulsed Phase Thermography*)<sup>[3]</sup>,此法无需事先知道试件的无缺陷区域,对加热不均的影响不敏感,相位图的信噪比比原始热图有显著的提高。最近几年又发展了多项式回归和对数多项式回归的热像信号处理方法<sup>[4]</sup>,回归法在抑制噪声、提高图像对比度和减少热像数据存储量方面有一定的优势。此外,还有许多学者在不断地探索新的热像信号处理方法<sup>[5]</sup>。

本文以提高脉冲热像法在 CFRP 层压板分层和脱

粘缺陷检测时的缺陷识别能力为目的,论述了以多项式回归为基础的图像重建和增强方法及其在复合材料层压板脉冲热像检测中的应用。从传热学理论出发,推导了算法的理论基础;通过层压板检测实验对图像重建与增强方法的实际处理效果进行了验证;采用基于统计学的图像评估标准对图像增强效果作了定量评价。本文的研究结论对推动红外热像无损检测和评估技术在我国复合材料板壳结构无损检测和评估中的工程应用有积极的作用。

## 1 理论分析

平板试件受热脉冲加热的响应过程本来是一个三维瞬态传热问题,但三维瞬态传热问题的求解相当复杂,一般难以用解析法来求解,而通常是采用有限单元法和有限差分法进行数值计算。为了求得解析解,这里采用一维热传导模型进行简化分析。设试件是厚的大平板,试件内距表面  $L$  处有一空气层缺陷,其面积较大,并平行于试件表面,试件其他部分同质,能量为  $Q$  (单位面积的能量,  $J/m^2$ ) 的热脉冲(平面热源)瞬时均匀作用于试件表面,如图 1 所示。设试件初始温度均匀且等于环境温度,为  $T_a$ ,材料密度为  $r$ ,比热容为  $c$ ,热传导系数为  $l$ 。把前后边界简化为绝热。对无缺陷区和有缺陷区分别按一维热传导问题进行分析。引入过余温度  $q(x,t) = T(x,t) - T_a$ ,其中  $T(x,t)$  为试件  $x$  处  $t$  时刻的温度。

对无缺陷区,将试件看作是半无限大物体,描述导热问题的微分方程、初始条件及边界条件分别为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$q=0, t=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0, x=0 \quad (4)$$

式中:  $a$  为热扩散系数,  $a = l/(rc)$ 。导热问题的解为:

$$q(x,t) = \frac{Q}{rc\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (5)$$

试件无缺陷区表面(加热面)的过余温度为:

$$q(0,t) = \frac{Q}{rc\sqrt{\pi at}} \quad (6)$$

对有缺陷区,将试件看作是有限厚度的无限大平板,且边界  $x=0$  和  $x=L$  处绝热。这时导热问题的微分方程仍为式(2),初始条件仍为式(3),但边界条件为:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0, x=0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0, x=L \quad (8)$$

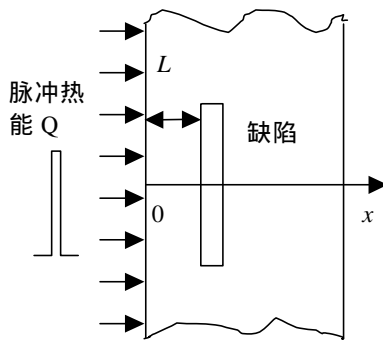


图1 一维热传导模型

Fig.1 One dimension heat transfer model

此时导热问题的解为:

$$q(x,t) = \frac{Q}{rc\sqrt{pat}} \left\{ e^{-\frac{x^2}{4at}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\frac{(x-2nL)^2}{4at}} + e^{-\frac{(x+2nL)^2}{4at}} \right] \right\} \quad (9)$$

试件有缺陷区表面的过余温度为:

$$q(0,t) = \frac{Q}{rc\sqrt{pat}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(2nL)^2}{4at}} \right] \quad (10)$$

式(10)可看作由2部分组成,第1部分是热激励脉冲直接引起的温升,表示热脉冲随时间冷却的过程,第2部分表示从脉冲发出的热能在传导途中遇到绝热边界后发生多次来回反射的结果,其中 $2nL$ 为初始脉冲热能经后表面或前表面第 $n$ 次反射再到达前表面时传导所经过的行程。引入傅立叶数 $F_o = at/L^2$ ,该变量是量纲一的,则式(10)变为:

$$q(0,t) = \frac{Q}{rcL\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_o}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2}{F_o}} \right] \quad (11)$$

设:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2}{F_o}} \quad (12)$$

容易证明, $S$ 是一个收敛级数。 $S$ 的公项是一个负指数函数,在通常条件下(例如 $0 \leq F_o \leq 1$ )随 $n$ 的增大衰减很快。在实际计算时,可把 $S$ 截断,只保留前 $M$ 次反射项,则式(11)变为:

$$q(0,t) \approx \frac{Q}{rcL\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_o}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^M e^{-\frac{n^2}{F_o}} \right] \quad (13)$$

这里还需讨论一下截取项数 $M$ 的取值问题。当

$F_o = 1$ 时,  $2e^{-2^2/F_o} = 0.0366 \ll 1$ , 因此当 $F_o \leq 1$ , 即 $L^2/t \geq a$ 时,忽略 $n \geq 2$ 对应的项时(即只取 $M=1$ )不会带来太大的误差。例如对某CFRP试件,  $a \approx 5.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[6]</sup>,  $L = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 则当 $t \leq 0.48 \text{ s}$ 时,  $n$

$\geq 2$ 对应的项可忽略。

当 $F_o \rightarrow 0$ 时,式(13)→式(6),这说明当 $L$ 很大而 $t$ 较小时,有缺陷区与无缺陷区的表面温度变化基本一致,这时二者的差别在温度上无法识别。

以上对平板瞬态传热问题的分析是基于二维热传导模型在绝热边界条件下的解析分析。对无缺陷区,当板较厚、面积较大且考查时间 $t$ 不太长时是合理的;对有缺陷区,当缺陷横向尺寸与深度之比较大且计算时间 $t$ 不太长时是合理的。当实际边界不是理想绝热时,可通过引入反射系数 $R$  ( $0 < R \leq 1$ )加以近似考虑,此时式(13)变为:

$$q(0,t) \approx \frac{Q}{rcL\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_o}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^M R^n e^{-\frac{n^2}{F_o}} \right] \quad (14)$$

下面再从对数域内考察过余温度与时间的关系。对式(6)两边取对数得:

$$\ln q = \ln \frac{Q}{rc\sqrt{ap}} - 0.5 \ln(t) \quad (15)$$

该式有如下的简便之处: 1) 是一条斜率为 $-0.5$ 的直线; 2) 时间独立于注入能量和材料的物性参数; 3) 直线的斜率与试件材料、注入能量和热相仪的校准等均没有关系,这些参数的改变只会影响总体响应水平(截距)。

实际应用中,平板物体是有限厚度的,即使无缺陷区也不可能严格地满足半无限大物体模型(即二维热传导条件),所以实测 $\ln q - \ln t$ 曲线不会是严格的直线,而是通常含有高次项,如二次和三次项。但是与有缺陷区相比,无缺陷区 $\ln q - \ln t$ 曲线的“直线行为”更明显。因此可以用对数多项式回归曲线来逼近实测数据点( $\ln q, \ln t$ )。

## 2 CFRP 层压板脉冲热像检测实验

实验试件为几块CFRP层压板,其中某一典型层压板的描述如下:长宽为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,厚度为 $1.6 \text{ mm}$ ,由16层纤维布按标准生产工艺制作而成。为了制作出缺陷,在试件中预先夹入了5个大小不等的聚四氟乙烯圆形薄膜片以模拟分层或脱粘缺陷,其直径分别为 $F20$ 、 $F15$ 、 $F10$ 、 $F5$ 、 $F3$ ,如图2所示。用聚四氟乙烯薄膜片来制作人工缺陷是国际同行的惯例,聚四氟乙烯薄膜片与树脂基不易粘接,可形成空气隙。

采用单面法检测,加热方式为单脉冲。热激励设备是两只高能闪光灯,每只灯的能量约为 $3.5 \text{ kJ}$ ,安装在热像仪的左右两侧。红外热像仪为AGEMA 900,空间分辨率为 $272 \times 136$ (在 $15 \text{ 帧/s}$ 时)。热像仪与试

件之间的距离约 700 mm。用 2 个闪光灯同时对复合材料试件进行脉冲加热，用热像仪记录试件表面温度场变化的全过程，采样速度设置为 15 帧/s。获取热像序列后，用自行开发的热像序列处理软件对其进行图像重建和增强，以考察各种数据处理方法的实际效果。

### 3 信号处理及图像重建

这里以一个典型的 CFRP 层压板试件（如图 2 所示）的检测过程为例来说明基于对数多项式回归的图像重建与增强方法的实际应用。从原始热像序列中选取脉冲加热后一定时间长度内的热像序列进行信号处理。以脉冲加热的开始点为时间零点。原始热像序列中对比度最大的一帧如图 3 所示，发生在  $t \approx 1.272$  s，图像中最小的二个缺陷难以分辨。

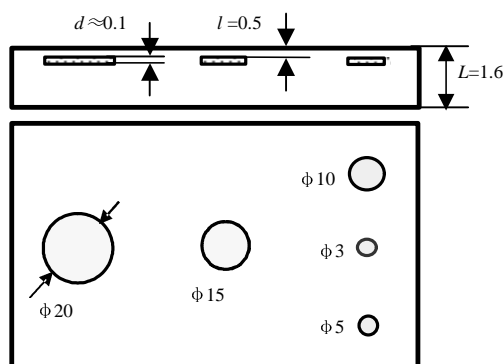


图2 CFRP 层压板试件

Fig.2 Experimental piece CFRP laminate

为了书写简便，记  $t=t$ ， $T(t)=\theta(0,t)$ 。对每个像素点对应的过剩温度数据在对数域内用下式作多项式回归：

$$\ln[T(t)] = \sum_{n=0}^N a_n [\ln(t)]^n \quad (16)$$

这里  $N$  的选定依经验而定，并不是越高越好。理论上，式(16)应包括哪几次项是由回归方程和回归系

数的显著性检验决定的。经多次试算，本次检测试验的经验值  $N=3$ 。可用回归求出的各次项系数作数字图像，其中二次项系数图的缺陷对比度较大，如图 4 所示，从中可看出所有的预设缺陷。另外与图 3 相比，图 4 的背景灰度非常均匀，即很好地消除了原始热像中的加热不均效应。

将式(16)的左边对  $\ln(t)$  求导得：

$$\frac{d[\ln(T)]}{d[\ln(t)]} = \sum_{n=1}^N n a_n [\ln(t)]^{n-1} \quad (17)$$

$$\frac{d^2[\ln(T)]}{d[\ln(t)]^2} = \sum_{n=2}^N n(n-1) a_n [\ln(t)]^{n-2} \quad (18)$$

称为对数导数。为进行对比研究，在缺陷区及无缺陷区分别选定一个典型缺陷点和无缺陷点，典型缺陷点位于最大缺陷的中间，典型无缺陷点位于最大缺陷和次大缺陷之间的中间位置。其一阶和二阶对数导数曲线如图 5 和图 6 所示，可见两个典型点对应曲线的变化行为是不同的。可利用一阶或二阶对数导数重构数字图像，其中在同一种序列中对比度最大的一阶和二阶对数导数图分别如图 7 和图 8 所示，从中可看出所有预设的缺陷。此外，对数导数图像的背景灰度也比原始热像均匀。

每个像素点对应的拟合温度可由式(19)表示：

$$T(t) = e^{\sum_{n=1}^N a_n [\ln(t)]^n} \quad (19)$$

这就是重建后的温度信号。典型点的原始数据和重建后的温度曲线的对比如图 9 和图 10 所示。从图 9 可以看到，三次对数多项式曲线对缺陷区和无缺陷区都得到了很好的逼近，通过信号重建，原始信号的时域噪声被滤除，平滑度得到提高。从图 10 可以看出，在对数域信号更接近理论上的直线。其中两条曲线开始分叉的时刻含有与缺陷深度有关的信息，有待于以后研究。在  $t \approx 1.272$  s 时，重建后的温度图像如图 11 所示，可以看到，与图 3 相比，重建后图像的噪声已经减少，图像变得比较平滑，缺陷对比度也有所增强，但是较小缺陷的显示仍旧不明显。



图3 最好的原始热像( $t=1.272$  s)

Fig.3 Best original thermal image( $t=1.272$  s)



图4 二次项系数图像（经反相）

Fig.4 Quadratic coefficient image

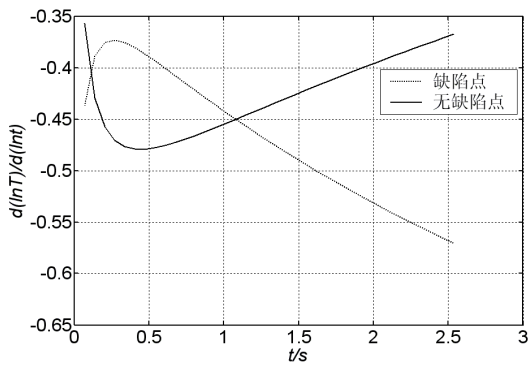


图 5 典型点的一阶对数导数曲线

Fig.5 First order logarithm derivative curve

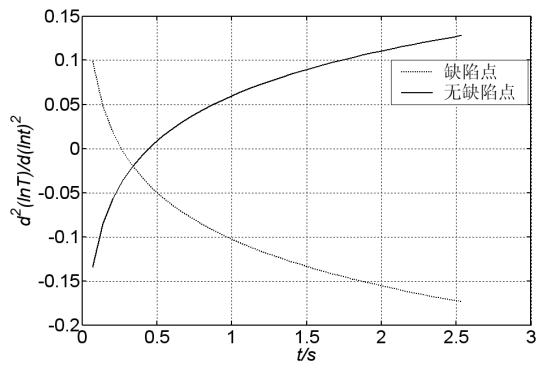


图 6 典型点的二阶对数导数曲线

Fig.6 Second order logarithm derivative curve

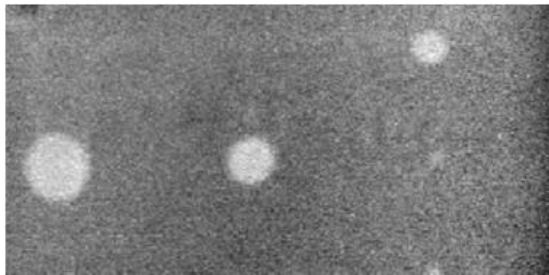


图 7 一阶对数导数图像 (经反相,  $t=2.538\text{ s}$ )

Fig.7 First order logarithm derivative image

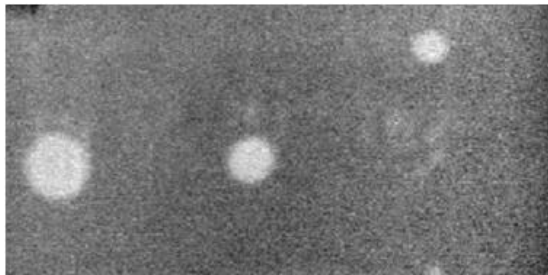


图 8 二阶对数导数图像 (经反相,  $t=2.405\text{ s}$ )

Fig.8 Second order logarithm derivative image

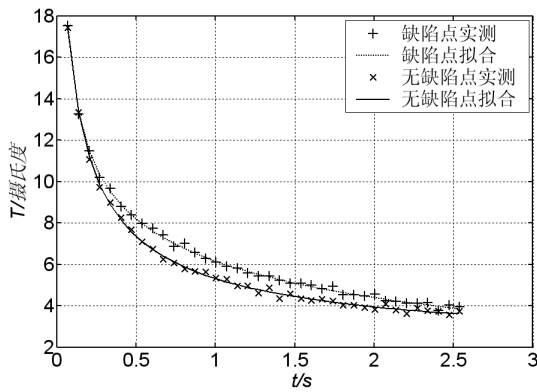


图 9 典型点的原始数据和重建温度曲线

Fig.9 Original data and reconstructed temperature curve

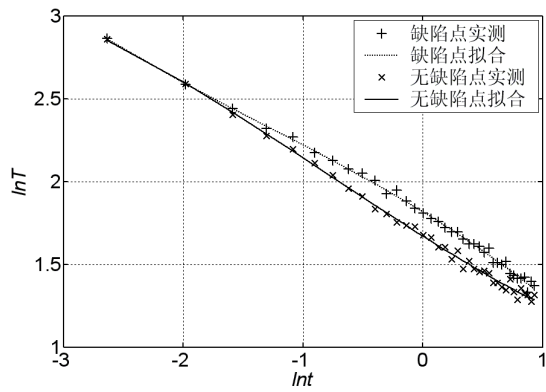


图 10 对数域内典型点的原始数据和重建曲线

Fig.10 Original data and reconstructed curve in logarithm space



图 11 回归重建的热像 ( $t=1.272\text{ s}$ )

Fig.11 Thermal image after reconstruction

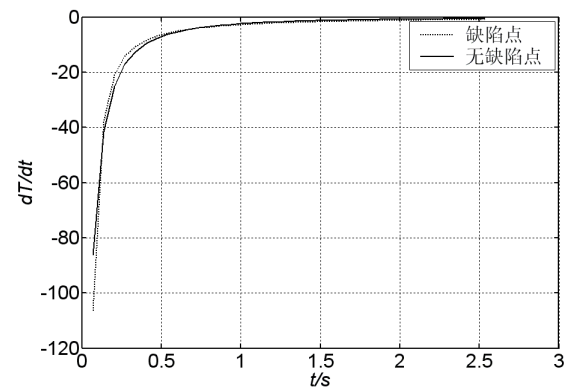


图 12 重建后典型点的普通一阶导数曲线

Fig.12 First order derivative curve after reconstruction

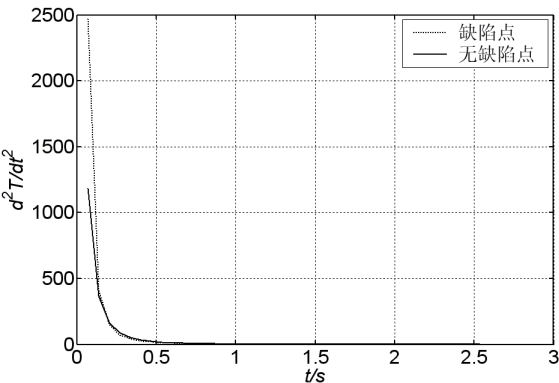


图 13 重建后典型点的普通二阶导数曲线

Fig.13 Second order derivative curve after reconstruction

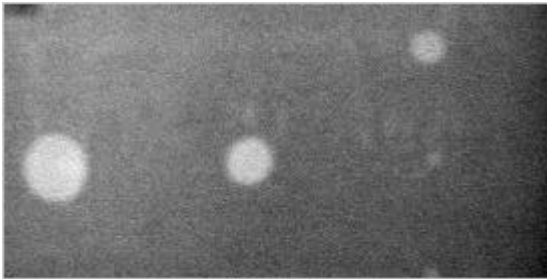


图 14 普通一阶导数图像（经反相， $t=1.872\text{ s}$ ）

Fig.14 Normal first order derivative image( $t=1.872\text{ s}$ )

从以上分析可知，经信号回归重建后，用各次回归系数、一阶对数导数、二阶对数导数、拟合温度、普通一阶导数和普通二阶导数等均可重构数字图像，且重构图像一般比原始热像有更好的缺陷显示度或分辨力，但这些方法在增强缺陷对比度和抑制加热不均效应的不良影响方面的效果不同。加热不均效应主要表现在  $T(t)$  的常数项  $a_0$  中，由于一次及一次以上的回归系数、一阶对数导数和二阶对数导数均去掉了与常数项的耦合关系，因此相应的图像基本消除了加热不均效应的影响，即图像的背景灰度均匀。从式(18)和式(19)可知，普通一阶导数和普通二阶导数仍与  $T(t)$  有关，即没有完全去掉与常数项的耦合关系，因此相应图像的缺陷对比度尽管有所改善，但不能较彻底地消除加热不均效应的影响。

4 信号处理方法的定量评价

前面对几种数字图像重构方法做了论述和比较，处理效果好不好只是视觉上的感性认识，下面再用客观的评价标准对各种图像处理方法的缺陷对比度增强效果进行定量评价。在 IR NDT 中，图像处理的效果可用下面两个统计学指标来评价。

1) 信噪比:

对式(17)求普通一阶和二阶导数得:

$$T'(t) = \frac{dT(t)}{dt} = \frac{T(t)}{t} \sum_{n=1}^N na_n [\ln(t)]^{n-1} \tag{18}$$

$$T''(t) = \frac{d^2T(t)}{dt^2} = \frac{[T'(t)]^2}{T(t)} - \frac{T'(t)}{t} + \frac{T(t)}{t^2} \sum_{n=1}^N n(n-1)a_n [\ln(t)]^{n-2} \tag{19}$$

式中两个典型点的一阶和二阶导数曲线如图 12 和图 13 所示。利用任何时刻的一阶和二阶导数可作数字图像，其中在同一种序列中对比度最大的一阶和二阶导数图分别如图 14 和图 15 所示，从中可看出所有预设的缺陷。此外，导数图像的背景灰度也比原始热像均匀，但不如对数导数图像均匀。



图 15 普通二阶导数图像 ( $t=2.205\text{ s}$ )

Fig.15 Normal second derivative image ( $t=2.205\text{ s}$ )

$$R = (T_d - T_{nd}) / S_{nd} \tag{20}$$

式中:  $T_d$  和  $T_{nd}$  分别是有缺陷区和无缺陷区的平均温度,  $S_{nd}$  是无缺陷区的标准差。

2) Z 标准:

$$Z = (T_d - T_{nd}) / \sqrt{S_d^2 / n_d + S_{nd}^2 / n_{nd}} \tag{21}$$

式中:  $T_d$  和  $T_{nd}$  分别是有缺陷区和无缺陷区的平均温度,  $S_d$  和  $S_{nd}$  是有缺陷区和无缺陷区的标准差,  $n_d$  和  $n_{nd}$  是有缺陷区和无缺陷区的像素个数。

前面有关图像的统计指标值如表 1 所示。

表 1 图像的统计指标值

Table 1 Statistical values of the images

被评价图像	R	Z
图 3 最好的原始热像 ( $t=1.272\text{ s}$ )	2.221	64.371
图 4 二次项系数图像 (经反相)	6.698	215.432
图 7 一阶对数导数图像 (经反相, $t=2.538\text{ s}$ )	4.926	169.139
图 8 二阶对数导数图像 (经反相, $t=2.405\text{ s}$ )	5.603	194.178
图 11 回归重建的热像 ( $t=1.272\text{ s}$ )	2.305	68.680
图 14 普通一阶导数图像 (经反相, $t=1.872\text{ s}$ )	4.085	122.050
图 15 普通二阶导数图像 ( $t=2.205\text{ s}$ )	2.246	63.424

从表中可以看出,对数多项式回归的二次项系数图像(图4)、一阶对数导数图像(图7)、二阶对数导数图像(图8)和普通一阶导数图像(图14)的信噪比及 $Z$ 值均比原始热像(图3)有很大的提高,其中二次项系数图像的两个指标值最高。普通二阶导数图像(图15)的信噪比提高不多, $Z$ 值却有所下降,但用肉眼看,普通二阶导数图像中较小缺陷的清晰度仍比原始热像好。回归重建的热像(图11)的两个指标都略有提高。总之,这里所给出的各种重建图像的缺陷清晰度都比原始图像有了不同程度的提高。

## 5 结论

利用三次对数多项式回归即可精确地重建 CFRP 层压板脉冲热像检测的原始热像信号,同时能有效地克服随机噪声和加热不均效应对缺陷识别的干扰,因此基于对数多项式回归的图像重建与增强方法可显著地提高复合材料层压板脉冲热像无损检测的缺陷探测能力,其中二次项系数图像的信噪比最高。在消除加热不均效应的能力上,二次项系数、一阶对数导数和二阶对数导数比普通一阶导数和普通二阶导数好。值得注意的是本文的图像重建和处理结果是针对

某一特定试件及实验作出的,因此回归方程阶次的选择和图像重建效果对于不同试件及实验将会有所不同。

## 参考文献:

- [1] Avdelidis N, Almond D, Dobbins A, *et al.* Thermal transient thermographic NDT & E of composites[A]. *SPIE[C]*. 2004: 403~413.
- [2] Vavilov V. Evaluating the efficiency of data processing algorithms in transient thermal NDT[A]. *SPIE[C]*. 2004: 336~347.
- [3] Maldague X, Marinetti S. Pulse Phase Infrared Thermography[J]. *Journal of Applied Physics*. 1996, **79**(5): 2694~2698.
- [4] Shepard S, Lhota J, Rubadeux B, *et al.* Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequence[J]. *Opt. Eng.* 2003, **42**(5): 1337~1342.
- [5] Ibarra-Castaneda C, Galmiche F, Darabi A, *et al.* Thermographic nondestructive evaluation: overview of recent progress[A]. *SPIE[C]*. 2003: 450~459.
- [6] Marinetti S, Muscio A, Bison P G, *et al.* Modelling of thermal non-destructive evaluation techniques for composite materials[A]. *SPIE[C]*. 2000: 164~173.