

脉冲相位法用于复合材料层析检测的研究

刘颖韬, 郭广平, 杨党纲

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要:为了提高脉冲热像无损检测技术对复合材料缺陷的检测能力,研究了脉冲相位法用于复合材料层析检测的可能性。介绍了利用脉冲相位法对脉冲热像图进行数据处理的原理,进行了CFRP层板的脉冲相位法检测实验,并从传热学角度对实验结果进行了分析。实验证明脉冲相位法用于复合材料的层析检测是可行的。

关键词:无损检测;复合材料;图像处理;脉冲相位法

中图分类号:TB303 **文献标识码:**A

Pulsed Phase Infrared Thermography and Its Application in Thermal Tomography of Composite Materials

LIU Ying-tao, GUO Guang-ping, YANG Dang-gang

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:To increase the detection capability of pulsed thermography for defect inspection of composite materials, the feasibility of thermal tomography of composite materials using PPT (pulsed phase infrared thermography) was studied here. The principle of PPT for processing pulsed thermographic data was described. A PPT experiment was made on a CFRP (carbon fibre reinforced plastics) sample, and the results analysis was made. The results of the experiment gave it evidence that thermal tomography of CFRP using PPT was feasible.

Key words: nondestructive testing; composite materials; image processing; pulsed phase infrared thermography

1 引言

由于在比强度、比刚度等方面具有优异的性能,复合材料在航空、航天、兵器、核等领域作为结构材料和功能材料已经被广泛应用。随着复合材料的设计水平和生产水平的不断提高,对其无损检测技术也提出了更高的要求,以解决大量使用传统方法难以解决的无损检测和缺陷损伤评估问题。在众多无损检测新技术中,红外热像无损检测技术(infrared thermographic nondestructive testing, ITNDT)以其单向、快速、定量、无污染、易判读、适用范围广的综合优势受到广泛的关注,并在发达国家得到大量应用。

红外热像无损检测技术是一种创新性的无损检测技术。它通过主动对物体施加周期、脉冲等函数形式的可控热激励,使物体内部的异性结构(缺陷、

损伤、异物等)以表面温场变化的差异形式表现出来,采用红外热像仪连续观测和记录物体表面的温场变化,并对序列热图结果进行运算和处理,可实现对材料内部异性结构的定量表征。在美国,红外热像无损检测技术已经是排名在超声和射线检测技术之后的常规无损检测技术,尤其是脉冲热激励下的红外热像检测设备已经产品化,在航空、航天、军工、核工业、新材料研究以及汽车、船舶、压力容器、管道、城市基础设施各个方面已广泛应用,有许多成功实例。在其他西方国家,此项技术近年也得到了快速发展。国内也有众多的科研单位对此项技术进行

作者简介:刘颖韬(1976-),男,工学硕士,工程师,从事机械设计和红外热像无损检测技术研究。E-mail:yingt.liu@163.com

收稿日期:2008-10-09

研究和应用,如首都师范大学、北京维泰凯信新技术有限公司、北京航空材料研究院等。

本文所研究的脉冲相位法 (pulsed phase infrared thermography, PPT) 是一种对脉冲热像图进行数据处理的红外热像无损检测方法。它具有如下特点:对光照加热不均不敏感,在很大程度上消除了光照不均的不良影响;对空域内的随机噪声有一定的抑制作用,可以获得具有较高信噪比的图像。

2 PPT 的原理

在脉冲热像检测 (pulse infrared thermography, PT) 中,若加热脉冲理想化为冲激函数 $\delta(t)$, 则其变换到频域为常数 1, 含有所有频率分量, 故可以认为, 与锁像热像法中的单一频率被检测相比, PT 是所有频率在瞬态下同时被检测的^[1]。而在实际的 PT 中, 使用的是矩形脉冲而不是理想的 $\delta(t)$ 函数, 因此发射到试件表面的热量信号, 其所含的各个频率分量的幅值并不是一个常数, 但是它的频谱的频率范围仍然非常广 (理论上是无限的)。

PPT 是将热像中每个像素 (x, y) 对应的温度信号 $f_{x,y}(t)$ 抽取出来, 然后按式 (1) 进行傅里叶变换, 进而作频谱分析。但是实际中只能得到试件表面温度的热像序列, 也就是将连续时间信号 $f_{x,y}(t)$ 进行截断、采样和量化, 然后得到有限离散时间序列 $f_{x,y}(n)$ 。由于 $f_{x,y}(t)$ 是连续非周期信号, 因此可以用 $f_{x,y}(n)$ 按式 (2) 进行离散傅里叶变换 (discrete fourier transform, DFT) 来逼近 $f_{x,y}(t)$ 的频谱^[2]。这里 n 为时域离散值的序列号, k 为频域离散值的序列号, T 为相邻两帧图像的时间间隔, 式 (3) 中 F_0 为频率抽样间隔。 $F(jk\Omega_0)$ 可以写成式 (4) 的形式, 并且可以由式 (5) 和式 (6) 得到温度信号的幅值谱和相位谱^[3]。将图像中的每个像素都经过上述处理, 然后由在特定频率下的每个像素的相位或幅值构成相应的相位图像或幅值图像, 于是就得到了幅值序列图像和相位序列图像, 如图 1 所示。

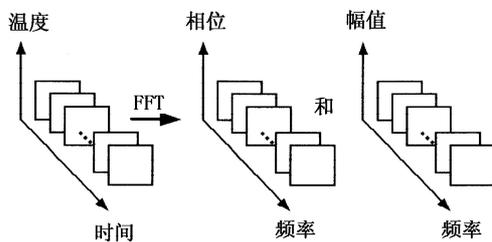


图 1 脉冲相位法原理示意图

$$F(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{x,y}(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1)$$

$$F(jk\Omega_0) = F(j\Omega) |_{\Omega=k\Omega_0} \approx T \cdot DFT[f(n)] \quad (2)$$

$$\Omega_0 = 2\pi F_0 \quad (3)$$

$$F(jk\Omega_0) = R(k) + jI(k) \quad (4)$$

$$|F(jk\Omega_0)| = \sqrt{I^2(k) + R^2(k)} \quad (5)$$

$$\Phi(k) = \arctan\left(\frac{I(k)}{R(k)}\right) \quad (6)$$

3 复合材料的 PPT 检测实验

实验样件为一块碳纤维增强塑料 (carbon fibre reinforced plastic, CFRP) 层压板, 尺寸为 320mm × 230mm, 厚度自左向右由 0.8mm 渐变为 3.6mm。缺陷为单层聚四氟乙烯膜, 缺陷厚度约为 0.1mm, 上排直径均为 6mm, 下排直径均为 9mm, 共 8 个预置缺陷, 其埋藏深度每一列相同, 自左到右分别为 1.1mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm, 以模拟分层或脱黏缺陷, 如图 2 所示。

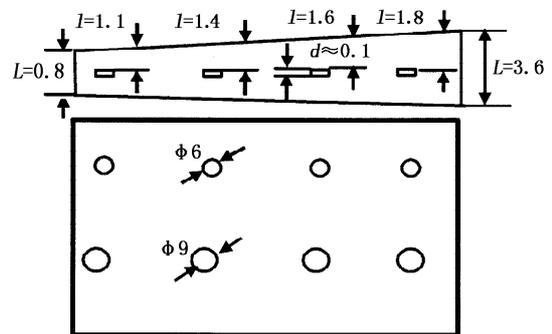


图 2 CFRP 试件

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, 总加热能量为 6.4kJ, 红外热像仪的空间分辨率为 272 × 136, 热像仪与试件之间的距离约为 700mm。用 2 个闪光灯同时对复合材料试件进行脉冲加热, 用 THV900 长波热像仪记录试件的表面温度场, 采样速度设置为 15f/s。

4 实验数据的 PPT 法处理及结果分析

从脉冲热像法得到的热像图中, 埋深 1.4mm 以上的、直径 6mm 的缺陷很难直接看到, 而且即使埋深 1.1mm 的缺陷也与背景噪声相差不大, 只有在动态显示时才容易分辨, 图 3 给出了脉冲热像图中的最佳图像。

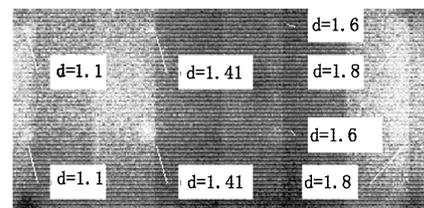


图 3 CFRP 层板样件 12-002 脉冲热像最佳图像

图4是对所得到的脉冲热像图数据采用PPT热像技术计算得到相位图,其频率为0.059Hz。从图中可以比较清楚的发现埋深1.4~1.8mm、直径6mm的缺陷,而埋深1.1mm的缺陷却不清楚。

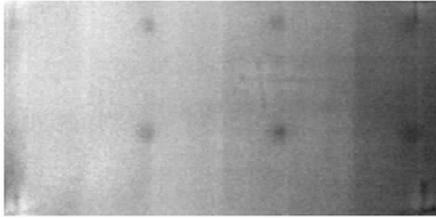


图4 CFRP层板样件12-002脉冲相位热像(0.059Hz)

PPT热像处理可以选择不同频率的相位图进行显示。图5是频率为0.117Hz的相位图。此图像中,埋深1.1mm的缺陷均可清楚地检出,而埋深1.6mm的缺陷却变得模糊,埋深1.8mm的缺陷已经不能分辨出来。

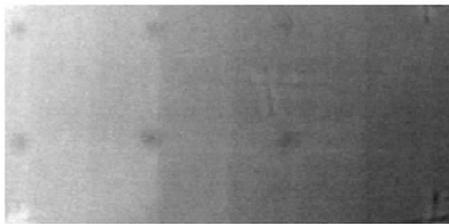


图5 CFRP层板样件12-002脉冲相位热像(0.117Hz)

上述实验表明,PPT技术对光照不均不敏感,有效降低了图像噪声,所得到的相位图像有较高的信噪比,并且可以检出不同深度的缺陷。从上述结果中还可以发现,检出埋深较浅的缺陷所使用的相位图频率较高,检出埋深较深的缺陷所使用的相位图频率较低。这是因为根据热波理论,热波的热扩散长度 μ 。

$$\mu = \sqrt{2\alpha/\omega} \quad (7)$$

式中, α 热扩散系数; ω 热波的频率。

也就是说,当热扩散系数 α 一定时,为了检出不同埋深的缺陷,就要使用不同频率的热波,对于较深埋深的缺陷,需要使用频率较低的热波,对于较浅埋深的缺陷,则需要使用频率较高的热波。脉冲加热方式提供的热波,其频率范围非常广,由于这些热波是同时发出的,故使得同时检出不同深度的缺陷、依据缺陷埋深与热波频率之间的对应关系确定缺陷深度成为可能。当不同频率的相位图与缺陷埋深建立联系后,就得到了试件的层析图。

5 结论

PPT技术可以同时检出不同深度的缺陷,检出埋深较浅的缺陷所使用的相位图频率较高,检出埋深较深的缺陷所使用的相位图频率较低,依据缺陷埋深与热波频率之间的这种对应关系可以进行缺陷深度的检测。实验证明脉冲相位法用于复合材料的层析检测是可行的。当建立了不同频率的相位图与缺陷埋深的关系式之后,就可以得到试件的层析图,这部分的工作有待于下一步进行。

参考文献:

- [1] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79 (5): 2694 - 2698.
- [2] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 2001:115 - 122.
- [3] Vallerand S, Darabi A, Maldague X. Defect detection in pulsed thermography: a comparison of Kohonen and Perceptron neural networks [C]. LeMieux D H, Snell J R Jr. Proc SPIE Thermosense-XXI, 1999:20 - 25.