

复合材料锁相红外热像法无损探伤技术研究

张 炜¹, 刘 涛¹, 杨正伟¹, 张瑞民²

(1. 第二炮兵工程学院 203 教研室, 陕西 西安 710025; 2. 第二炮兵青州士官学校 203 教研室, 山东 青州 262500)

摘 要:为了解决复合材料红外热波定量识别缺陷的难题,从锁相热像法的原理出发,利用数值计算的方法对锁相热像法在检测中的应用问题进行研究。建立相位差与缺陷深度的关系,进而识别缺陷尺寸;对不同缺陷存在最佳检测频率,能使相位差最大;对于同一缺陷,同一频率,幅值差与激励信号强度成正比。这对红外热波无损探伤的定量检测和评估、锁相激励信号参数的优化等具有重要意义。

关键词:复合材料;锁相热像法;最佳检测频率;定量检测

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Study of lock-in thermographic NDT to inspect composite plates

ZHANG Wei¹, LIU Tao¹, YANG Zheng-wei¹, ZHANG Rui-min²

(1. 203 Staff Office, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2. 203 Staff Office, The Second Artillery Qing Zhou Petty Officer College, Qingzhou 262500, China)

Abstract: Quantitative identifying is a difficult problem of inspecting composite plates. In order to resolve it, in base of Lock-in thermographic NDT theory, studied problem how to apply the Lock-in thermographic NDT. Ascertain the relationship of phase shift and defect depth, which make quantitative inspecting feasible. Phase shift will be the biggest with certain frequency. The rate of swing difference and heat flux is a constant. These provide academic basis to optimize parameter of thermal inspitring signal and were great valuable to quantitative testing and evaluation of thermal wave NDT.

Key words: composite plates; Lock-in thermographic NDT; best inspecting frequency; quantitative inspecting

1 引言

与金属材料相比,复合材料具有质量轻、强度高、抗疲劳、耐腐蚀等优良特性,被广泛应用于航空宇航领域。在复合材料制作过程中,制作工艺参数难以精确控制,而且在使用过程中,由于静载荷、疲劳、蠕变、机械损伤等原因,复合材料存在多种缺陷,如孔隙、分层与夹杂等缺陷^[1]。

红外热波无损检测技术具有检测速度快、检测面积大和检测效果直观的优点^[2],特别是锁相技术,检测结果由相位和幅值入手,可以得到更多检测信息,从而对缺陷实现定量检测,极大地提高了对复合材料的检测速度和检测效果,在文献[3]~[6]中只对锁相技术的原理进行介绍,没有激励源的选取

以及定量识别缺陷没有进行详尽的阐述,本文借助数值计算的方法对试件在正弦周期信号加热情况下的热传导过程进行计算研究,探索锁相热像法在红外热波无损探伤方面的应用问题,解决缺陷定量识别问题。

2 锁相热像法的原理

锁相技术也是锁相环技术,它用于在通信的接收机中,其作用是对接收到的信号进行处理,并从中提取某个时钟的相位信息,根据接收到的信号,仿制一个时钟信号,使得这两个信号从某种角度来看是

作者简介:张 炜(1963-),男,教授,博士,主要从事检测技术,故障诊断,无损探伤方面研究。E-mail: zhangweihuaiyu@163.com

收稿日期:2009-03-14

同步的。在锁定情形下,该仿制的时钟信号对于接受的信号与时钟信号具有一定相位差。

锁相热像法检测装置如图1所示。由锁相设备控制热源发射出周期性信号,对试件加热。由热像仪检测试件表面的温度信息,计算机对信息处理,从接收到缺陷区域和非缺陷区域的信号中,提取特定频率的信号,由于缺陷存在,这两个信号存在相位差和幅值差,由分析幅值差和相位差入手,得到缺陷信息。在本文中取热源输出的调制信号为 $Q\sin(2\pi ft)$ (Q 为信号强度, f 为信号频率),在该信号激励下,试件表面的温度也成正弦周期性变化,设其周期为 T (该周期与激励信号周期相等)。

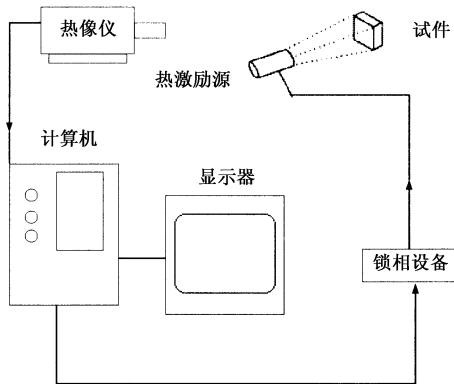


图1 锁相红外热成像检测装置

图2是时间表面温度在一个周期内的变化曲线。

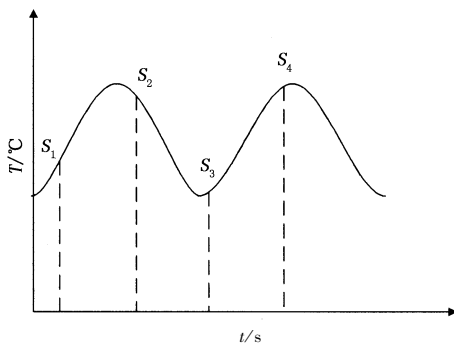


图2 表面温度在一周期内的变化曲线

在图2中, S_i ($i=1,2,3,4$) 是某点在4个时刻 (四个时刻点等间距, 且为 $T/4$) 的温度值, 那么该点的振幅 A 与相位 ϕ 可由式(1)和式(2)确定^[2]:

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (1)$$

$$\phi = \arctan \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4} \quad (2)$$

式中, A_d 为缺陷区域幅值; A_0 为非缺陷区域幅值; ϕ_d 缺陷区域相位; ϕ_0 非缺陷区域相位。

对试件表面各点温度值经过式(1)和式(2)的处理后,得到表面温度的振幅图和相位图,如图3所示。缺陷区域温度的振幅和相位与非缺陷区域不同,这样就探测到缺陷的位置,通过对振幅和相位的分析可以得到缺陷的深度和尺寸,由此可以主要研究两个物理量:相位差和幅值差。相位差和幅值差都是指缺陷区域节点和非缺陷区域节点温度变化相位和幅值之差,幅值差 ΔA 和相位差 $\Delta \phi$ 由式(3)与式(4)确定:

$$\Delta A = A_d - A_0 \quad (3)$$

$$\Delta \phi = \phi_d - \phi_0 \quad (4)$$

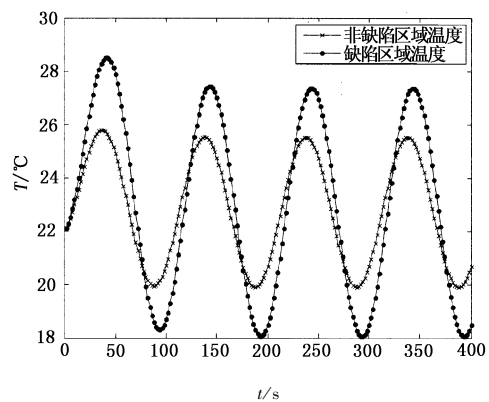


图3 缺陷区域和非缺陷区域温度变化曲线

检测缺陷要先建立起关于试件材料相位差与缺陷深度关系的数据库,根据测得的相位差就能得到深度,进而确定缺陷的其他尺寸。

3 计算模型

本文使用 ANSYS 软件进行数值模拟,建立如下模型:设环境温度为 22°C ,图4为有限元模型,选用 Thermal SOLID70 单元,这样计算节点较少,且计算精度高于四面体单元,采用扫掠划分网格的方法,可以保证划分的网格在厚度方向上比较均匀,减少由于网格自身的不均匀导致的计算误差。本模型在网格划分前对各单元进行了 glue 操作,在计算过程中热量进行三维传导,更接近实际情况;图5为模型的尺寸示意图,中间圆柱为缺陷,该区域为空气时表示孔隙,为真空时表示分层,为水时表示夹杂,复合材料取各向同性,忽略表面的热辐射和对流,除加载面外,其他表面为绝热^[5]。该材料的物理参数为:密度: 1600 kg/m^3 ,定压比热容: $1200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,导热系数: $0.26 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

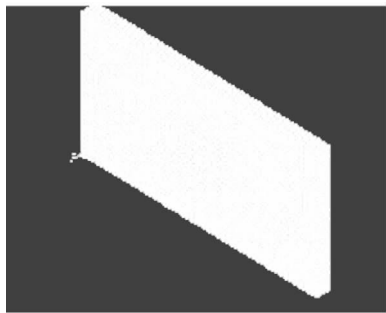


图4 有限元模型

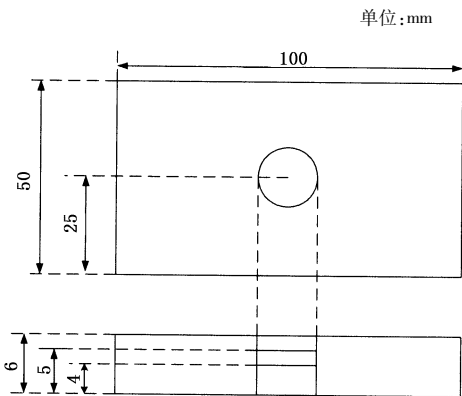


图5 缺陷示意图

4 计算结果及分析

4.1 热源信号频率对检测量的影响

孔隙是复合材料的一种典型缺陷,取模型缺陷为孔隙(缺陷的成分是空气,密度:1.205 kg/m³;定压比热容:1005 J/(kg·K);导热系数:0.026 W/(m·K))。激励源信号表达式为 $Q\sin(2\pi ft)$,取 Q 固定, f 可调, Q 为500 W/(m²·s), f 分别为:0.005,0.01,0.02,0.05,0.1(单位:Hz);取 f 固定, Q 可调。 f 为0.01 Hz, Q 分别为 100,200,500,1000,2000(单位:W/(m²·s)),在计算结果中取缺陷区域和非缺陷区域各一个点(缺陷区域取节点 2893,非缺陷区域取节点 386),则相位差和幅值差如表 1 和表 2 所示。

表 1 相位差和幅值差随信号频率的变化

频率/Hz	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1
相位差/(°)	9	19.3	22	10.8	3
幅值差/℃	15.7	3.8	1	0.02	0

表 2 相位差和幅值差随信号幅值的变化

强度/ (W·m ⁻² ·s ⁻¹)	100	200	500	1000	2000
相位差/(°)	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
幅值差/℃	0.76	1.52	3.8	7.6	15.2

由表 1 可知,在计算的频率中,相位差随频率增

加先增大随后减小,在频率 0.02 Hz 左右相位差得到最大值,设相位差达到最大值时的频率为最佳检测频率,该频率与检测对象和缺陷的物理参数、缺陷的深度和尺寸有关;幅值差随频率的增加一直减小,在频率为 0.1 Hz 处变为 0,已经很难识别缺陷。由表 2 可知,相位差与加热强度无关,只与试件和缺陷的本身物理特性有关,但随着加热强度的增大,幅值差会增大,而且幅值差与加热强度成正比。该关系说明要增强缺陷影响效果,可以通过增强激励信号的强度,在噪声等多种不利影响因素存在的情况下,有利于提取缺陷信息。

4.2 缺陷尺寸对检测量的影响

取计算缺陷模型为孔隙,激励源信号表达式为 $Q\sin(2\pi ft)$,由第 4.1 节的分析结果可以看出,取 Q 为 500 W/(m²·s), $f=0.01$ Hz 时,幅值差和相位差都较大,所以取该值。一般缺陷的深度和缺陷的直径是影响检测结果的主要因素,建立以下两个模型:

模型 1:模型尺寸为 300 mm×100 mm×8mm,缺陷直径为 30 mm,缺陷深度分别为 1 mm,2 mm,3 mm,4 mm,5 mm,6 mm,六个缺陷均匀分布在试件上;

模型 2:模型尺寸为 450 mm×100 mm×6mm,缺陷深度为 1 mm,缺陷直径分别为 30 mm,20 mm,16 mm,12 mm,10 mm,8 mm,6 mm,4 mm,2 mm。

模型 1 的相位差与幅值差如表 3 所示。

表 3 模型 1 的计算结果

深度/mm	1	2	3	4	5	6
相位差/(°)	9.2	8.3	2.8	-1.4	-2	0.6
幅值差/℃	3.3	0.1	-0.3	-0.1	0	0

由表 3 可以观察到在缺陷直径相同时,随深度的增大,相位差减小。当缺陷深度为 4 mm 时,相位差变为负值,在深度为 6 mm 时,变为正值。该现象的产生可能是网格划分不均匀带来的计算误差所造成的。所以在缺陷直径为 30 mm,缺陷深度为 4 mm 时,在进入表面温度稳定变化时,由相位图已经观察不到缺陷存在。由表 3 可知,在深度为 1 mm 时,还可以清楚地看到幅值差的存在,在深度大于等于 2 mm 时,由幅值差已经观察不到缺陷。由此可知,相位差较幅值差包含更多缺陷信息,由相位图更容易发现缺陷,也能够更多地对缺陷进行定量分析。所以只对模型 2 的相位差进行分析。

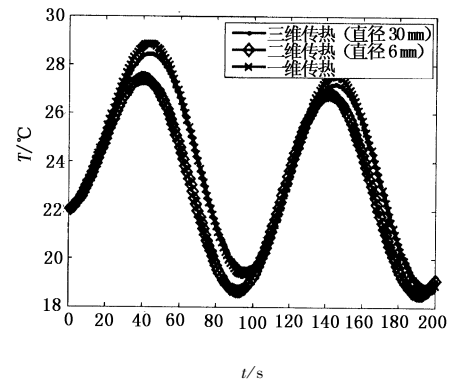
表 4 为模型 2 的计算结果,由表中数据可以看出,当深度为 1 mm 时,缺陷直径在大于 10 mm 时,相位差大致相同,考虑到计算误差,相位差的值在此范围内应该是相同的。在半径小于 10 mm 后,相位差开始迅速下降,等于 2 mm 时,相位差仅为 1.2°,如果直径继续减小,相位差就会变得更小,发现缺陷也就更难。

表 4 不同缺陷直径的相位差

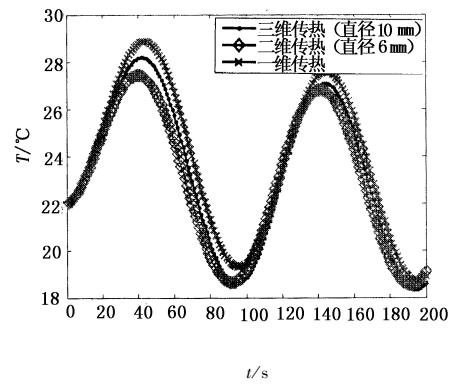
直径/mm	30	20	16	12	10	8	6	4	2
相位差/(°)	22.6	23.1	22.2	23.2	22.3	16.2	11.3	5	1.2

在本小节中,选取的缺陷区域节点时,选取尽量接近缺陷圆心的节点(因为该节点的温度变化与其他节点相比最接近一维传热情况),图 6(a)为一维传热情况下缺陷区域节点温度(以下简称一维节点温度)和三维传热情况下缺陷直径为 6 mm 和 30 mm 缺陷区域节点温度(以下简称 6 mm 和 30 mm 节点温度,类似情况用类似简称)比较图,由图可知,30 mm 节点温度变化与一维传热非常相近,算得相位差都为 22.6°。图 6(b)为一维节点温度和 6 mm 和 10 mm 节点温度变化比较图,由图观察到 10 mm 与 6 mm 节点温度变化对比情况,与一维传热节点温度变化的近似程度,前者明显高与后者,所以在 10 mm 出算得相位差为 22.3°,在 6 mm 节点处算得相位差为 11.3°。为使图更清晰,只给出 30 mm 与 6 mm 节点的温度变化图,缺陷区域直径在此范围之内,随直径的增大,与一维传热的近似程度逐渐增高,所以在缺陷直径大于等于 10 mm 时,计算出的相位差大致相同;缺陷直径小于 6 mm 时,随着直径的减小与一维传热情况的不同程度越来越大,如图 6(c)所示,这样算得的相位差就会越来越小。

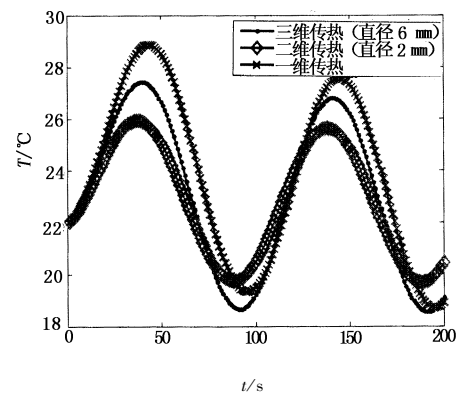
定量识别缺陷是无损检测的目的。在只考虑一维传热情况下,可以通过建立相位差与缺陷深度关系的数据库,这样就可以通过测得相位差,进而对缺陷进行定量计算。在三维传热情况中,如果节点温度变化接近一维传热的情况,可以参照数据库,近似得到缺陷的尺寸,而且接近的程度越高,其计算结果就越精确。在本模型中,就可以用缺陷直径大于等于 10 mm 时的相位差去近似代替一维传热中的相位差,算得缺陷深度。



(a) 三维传热时缺陷直径为 30 mm 与 6 mm



(b) 三维传热时缺陷直径为 10 mm 与 6 mm



(c) 三维传热时缺陷直径为 6 mm 与 2 mm

图 6 一维传热和三维传热的节点温度变化对比图

4.3 不同类型缺陷对检测量的影响

复合材料的主要缺陷是孔隙、分层和夹杂,针对不同类型缺陷建立模型。尺寸如图 5 所示,有限元模型如图 4 所示,缺陷材料的物理参数如表 5 所示。取激励源信号表达式为 $Q\sin(2\pi ft)$,取 Q 为 500 W/(m²·s),取 $f=0.01$ Hz,则相位差和幅值差如表 6 所示。

从表 6 可分析出,影响相位差和幅值差的物理参数是导热系数。缺陷与试件材料导热系数关系不同引起不同效果,一个相位超前,一个相位延迟。对比导热系数,复合材料的导热系数大于空气而小于

水,使得它的相位比空气的延迟,而比水的超前。由此可知,缺陷材料导热系数与试件材料相比,大得越多,其相位超前越多,而小得越多,相位滞后越多。幅值差的变化也遵循该规律。

表 5 缺陷材料的物理参数

物理量	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	定压比热容 /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
空气	1.205	1005	0.026
水	1000	4200	60

表 6 不同缺陷的相位差和幅值差

缺陷类型	孔隙	分层	夹杂
相位差/($^{\circ}$)	19.3	29.5	-6.7
幅值差/ $^{\circ}\text{C}$	3.8	4.2	-1.4

4.4 结 论

从上面的计算结果及分析可以得到以下结论:

- (1)对不同缺陷,存在一个最佳检测频率,在该频率下,能得到最大的相位差,该频率只与缺陷尺寸和试件本身物理特性有关;
- (2)对同一缺陷,随检测频率增大,幅值差会减小,对于同一频率,幅值差与检测强度成正比;
- (3)缺陷直径一定时,缺陷深度越小,相位差和幅值差越大,在深度大于一定值时,观察不到相位和幅值的不同;
- (4)在缺陷深度一定时,缺陷直径大于某一值时,其几何中心节点的温度变化与一维情况相近,在一定的误差内,可以用其相位差计算缺陷深度;

(5)影响相位变化的主要参数是试件和缺陷材料的导热系数,如果相位滞后,导热系数相差越大,相位滞后越多,幅值差越大。

5 总 结

介绍了锁相热像法的原理,并利用数值计算的方法对不同的热激励信号(变量为强度和频率)、不同尺寸缺陷(变量为深度和直径)和不同缺陷类型等不同条件下的试件的热传导过程进行了模拟计算,对结果中出现的一些现象进行了分析,这些对进一步优化锁相热像法有很重要的意义。

参考文献:

[1] 王小永,钱华. 先进复合材料中的主要缺陷与无损检测技术评价[J]. 无损探伤,2006,8(4):1-6.

[2] 蒋淑芳,郭兴旺,沈京玲,等. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热波无损检测[J]. 激光与红外,2005,35(8):584-586.

[3] 刘波,李艳红,等. 锁相红外热成像技术在无损检测领域的应用[J]. 无损探伤,2006,6(3):12-15.

[4] W Bai, B S Wong. Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography[J]. Meas. Sci. Technol,2001,12:142-150.

[5] K Srinivas, A O Siddiqui, J Lahiri. Thermographic inspection of composite materials[C]. Hyderabad:Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation,2006.

[6] Sung Quek, Darryl Almond. A novel and robust thermal wave signal reconstruction technique for defect detection in lock-in thermography[J]. Meas. Sci. Technol.,2005,16:1223-1233.