检测技术

# 复合材料脱粘的红外无损检测及数值模拟

#### 许 鑫

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京100191)



摘要:利用 Ansys对玻璃纤维和高硅氧层压板脱粘缺陷的脉冲热像检测法进行数值模拟,分析缺陷参数(缺陷直径)对信息参数(最大温差等)的影响,并比较两种材料的区别。结果表明,最大温差和最大对比度与缺陷直径均呈正非线性关系。并用脉冲热像实验进行对比,验证了信息参数规律的正确性;并比较得出同等条件下,两种材料都检测出部分缺陷,检测难易程度相当。

关键词: 复合材料; 脱粘; 数值模拟; 脉冲热像法; 无损检测

# Infrared Nondestructive Testing of Composites Debonding Defects and Numerical Simulation

Xu Xin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Bejing 100191)

**Abstract:** The Ansys finite element software is used to simulate the pusled thermography of glass fiber laminate and high silica lamina, which analyze the influences of defect parameters (defects diameter) on information parameters (the biggest temperature difference) and the differences between the two kinds of materials. The results show that maximum temperature difference and maximum contrast is a positive nonlinear relationship with defects diameter. Comparison is performed by pusle thermal experiments to verify the correctness of information parameters law. Besides, some defects of the materials are detected through the experiments and the detect difficulty is similar.

**Key words:** composite material; debond; numerical simulation; pusle infrared thermography; nondestructive testing

#### 1 引言

近几年随着材料技术的发展,玻璃纤维增强塑料(GFRP)和高硅氧复合材料在航空航天领域中<sup>[1]</sup>的应用越来越多,材料在生产制造过程中常出现脱粘、分层等缺陷<sup>[2]</sup>。目前,在复合材料检测方式中,射线检测法<sup>[3]</sup>对复合材料的分层缺陷不敏感,且射线对人体有害。超声检测法检测小薄材料很难,效率低且不同缺陷需使用不同探头。在复合材料检测领域中,红外无损检测技术(IR TNDT)优势是非接触、检测范围

广、速度快、安全可靠 $^{[4]}$ 。IR TNDT有几种热激励方式常用的有主动式的脉冲热像法(PT)、调制热像法(MT)等 $^{[5]}$ 。

西安交大的梅林等用三维仿真分析了整个脉冲 热像检测过程和几个影响检测灵敏度的参数,如对 比度等<sup>[6]</sup>。Vavilov 等建立了红外检测的二维和三维 数值模型,分析了缺陷形状和非均匀加热等对检测 的影响<sup>[7]</sup>。Ermanno Crinzato 等提出了专用的三维数 值模型,根据缺陷深度不同,使用不同的算法进行 了数值计算<sup>[8]</sup>。

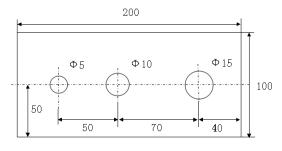
#### 2 检测材料

为了定量表征复合材料脱粘缺陷的脉冲热像检测的传热规律,本文以玻璃纤维增强塑料和高硅氧层压板复合材料为研究对象,对含有脱粘缺陷的试件用脉冲热像检测进行数值模拟,分析缺陷参数对信息参数的影响。最后用实验检测复合材料脱粘脉冲热像检测的应用效果。

试件为平底孔件,玻璃纤维层压板和高硅氧层压板三孔件、五孔件各一块,为突出缺陷,比例刻意放大一些,板尺寸示意如图1所示。本次数值模拟及实验可以检测当缺陷深度固定时,不同缺陷直径检测效果。

示意图板厚都为3mm,缺陷孔深都为2mm,缺陷孔厚1mm,为平底孔缺陷。

层压板的物理参数见表1。



a 三孔试件

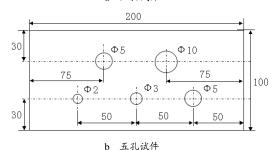


图1 玻璃纤维和高硅氧层压板试件

表1 材料的热参数

• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •			
材料	密度 $ ho$ /kg·m <sup>-3</sup>	比热容 <i>C</i> /J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	导热系数 λ /W·m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
玻璃纤维	1910	1060	0.527
高硅氧	1720	1000	0.583
空气	1.2	1005	0.07

#### 3 信息参数的定义

为了研究两种材料的表面温度信号与缺陷直径、试件材料等参数之间的规律,首先定义一部分信息参数。温差:将缺陷区表面节点温度 $T_D$ 与非缺陷区表面

节点的温度 $T_N$ 的差,记 $\Delta T$ ,

$$\Delta T = T_{\rm D} - T_{\rm N} \tag{1}$$

对比度:温差和非缺陷区温度信号的比值,记C,

$$C = \Delta T / T_{\rm N} \tag{2}$$

C 和  $\Delta T$  相比,此参数对加热能量的要求不高。此外,最大温差为温差绝对值的最大值,记  $\Delta T_{\rm m}$  。最大对比度为对比度绝对值的最大值,记  $C_{\rm m}$  。从  $\Delta T_{\rm m}$  参数能看出是否能用红外热像仪检测,从  $C_{\rm m}$  可看出缺陷热像图的清晰度。  $\Delta T_{\rm m}$  一般与加热能量成正比,而观察  $C_{\rm m}$  则最大程度地去掉加热能量的影响。

# 4 层压板脱粘 PT 检测的 Ansys 数值模拟

完全模拟真实板的尺寸,建立三维模型。实际板的示意图如图 1,从 t=0 开始在无缺陷一侧施加脉冲热像激励  $q(t) = \begin{cases} q_0 & 0 \le t \le t_h \\ 0 & t > t_h \end{cases}$ ,环境温度  $T_0 = 0^{\circ}$ C,

材料与周围空气的对流换热系数 $\bar{h}$ =10W·m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>,脉冲热流密度幅值 $q_{max}$ =5×10<sup>4</sup>W·m<sup>-2</sup>,脉冲加热时间 $t_h$ =0.01s,散热时间取 20s。由于存在缺陷,板为不规则形状,为了使得仿真结果更为精确,网格划分时,将板划为两部分,不存在缺陷的上方 2mm 实体板采用映射网格划分,存在缺陷的 1mm 厚部分采用自由网格划分,两部分通过传热单元连接。有限元分析时选择 Solid70 热分析单元,网格划分单元都为边长2mm 的正方体。加热阶段时间步长为 0.001s,散热阶段时间步长为 0.1s。

首先用Ansys对两种层压板脱粘模型进行数值计算,提取缺陷区表面中心点和非缺陷区表面中心点的温度信号,然后用Matlab数值计算结果进行处理,总结缺陷直径因素对温差、对比度等信息参数的影响规律。

#### 4.1 层压板 Ansys 模拟热图

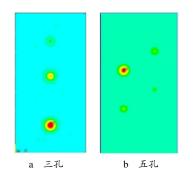


图 2 玻璃纤维孔件Ansys模拟热图

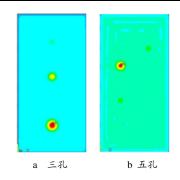


图 3 高硅氧孔件 Ansys 模拟热图

图 2、图 3 中可以清晰地看试件正常区域和各个缺陷区温度差异,缺陷区域更亮,温度更高。亮度和缺陷大小呈正关系,两种材料直径 5mm 缺陷处都隐约能检测出,5mm 以下检测不到。此热图说明,此检测试件,缺陷直径 5mm 不易检测出,5mm 以下检测不出。

### 4.2 表面温差的时间历程

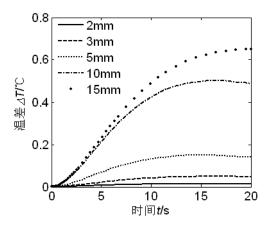


图 4 玻璃纤维不同缺陷直径缺陷区温差时间曲线

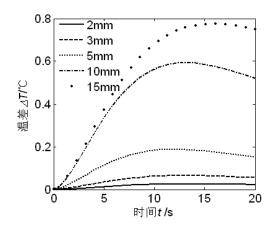


图 5 高硅氧不同缺陷直径缺陷区温差时间曲线

由图 4、图 5 可看出缺陷直径越大,最大温差越

大,出现的时间越晚。且对于玻璃纤维直径 15mm 的 缺陷,时间 18s 以后,最大温差呈下降趋势,但还不是非常明显,则可为实验设定提取缺陷图像频率 f 提供指导,可将散热时间增大一些,实验所得最大温差将更为准确。相同缺陷直径下,高硅氧层压板最大温差稍大,出现时间更早一点。

# 4.3 最大温差、最大对比度与缺陷直径关系

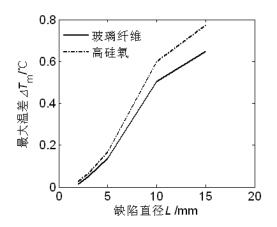


图 6 最大温差与缺陷直径的关系

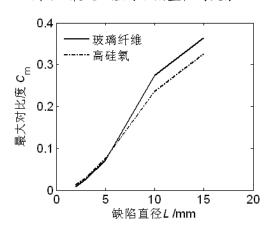


图 7 最大对比度与缺陷直径的关系

由图 6、图 7 可以看出,最大温差和最大对比度 随缺陷直径的增大而增大,且增大速度变慢。说明缺 陷直径越大,越容易检测到。同缺陷直径下,高硅氧 层压板的最大温差和最大对比度稍大于玻璃纤维,二 者区分度不大。

#### 5 层压板脱粘缺陷的 PT 检测实验

# 5.1 实验检测系统

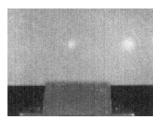
实验检测系统为自主研发的脉冲红外NDT系统, 红外热像仪为FLIR ThermaCAM系列,系统主要分为 三大块: 脉冲热激励系统,包括闪光灯进行热激励; 计算机控制的数据采集,包括热像仪的采集时间、频 率等;实验室自主开发的专用软件数据处理系统。可 处理分析热像图等信号。

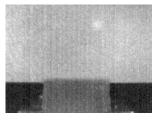
本次实验可检测缺陷深度固定时,不同缺陷直径 的检测效果和信息参数变化规律。

#### 5.2 实验结果与数据处理

## 5.2.1 试件去背景帧的脉冲热像图

实验所得去背景热像图见图 8、图 9。

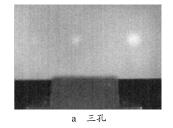




a 三孔

b 五孔

图 8 玻璃纤维三孔、五孔试件去背景热像图



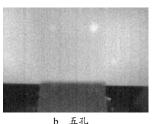


图 9 高硅氧层压板三孔、五孔试件去背景热像图

图 8、图 9 热像图和 Ansys 模拟热图对比几乎一致,对比说明,对于此类检测试件,缺陷深度为 2mm,缺陷厚度为 1mm 的分层类缺陷,缺陷直径为 15mm、10mm 都能检测出来,缺陷直径 5mm 不易检测出,5mm 以下,可能由于受实验环境、三维热扩散等影响,脉冲红外热像法则检测不出来。

对直径为 $\Phi$ 3mm、 $\Phi$ 2mm 的缺陷,实验检验不出,分析信息参数影响并无意义,所以不提取其温差、最大温差等影响规律。

#### 5.2.2 表面温差时间历程曲线

在缺陷区与非缺陷区的中心各取 3×3 像素的温度信号节点,取平均值,即为所分析的信息参数。分别作缺陷直径为 15mm、10mm、5mm 对应的温差的时间曲线图进行分析,如图 10、图 11 所示,可以看出直径 5mm、10mm、15mm 的缺陷温差变化规律和仿真所得大致一样。温差由式(1)计算所得。

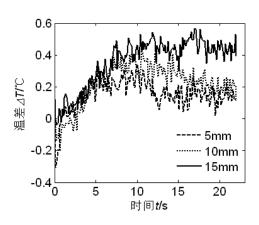


图 10 玻璃纤维复合材料表面温差时间曲线图

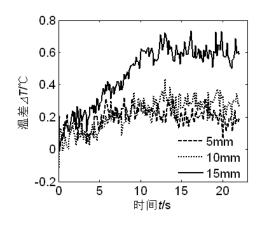


图 11 高硅氧复合材料表面温差时间图

#### 5.2.3 最大温差、最大对比度与缺陷直径的关系

图 12、图 13 最大温差和最大对比度与直径的线性变化规律和仿真所得大致趋势一样,两种材料同缺陷直径下的值和仿真略有差异,可以得出,两种材料的热扩散系数等差异不大,用脉冲热像法检测,两种材料检测难易程度差不多,很难区分。

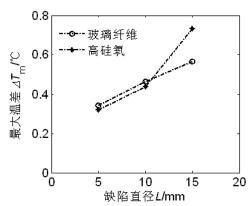


图 12 最大温差与缺陷直径的关系

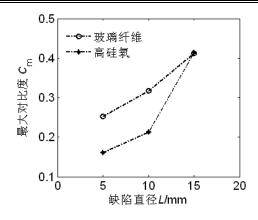


图 13 最大对比度与缺陷直径的关系

#### 6 结束语

- a. 通过仿真和实验对比,对于玻璃纤维层压板和高硅氧复合材料脱粘缺陷,用脉冲红外热像检测法检测,当缺陷深度为 1mm 左右,能检测到直径为 15mm、10mm 的缺陷,5mm 缺陷可能检测到,5mm 以下则几乎检测不到。
- b. 通过仿真和实验都证明了,当缺陷深度一定时,对于玻璃纤维层压板和高硅氧层压板,最大温差和最大对比度和缺陷直径成非线性关系,缺陷直径越大,最大温差和最大对比度越大,且最大温差出现的时间越晚。
  - c. 在同等条件下用脉冲热像法检测, 高硅氧的最

大温差、最大对比度和玻璃纤维层压板没有非常大的 差异性,两种材料检测难易程度差不多,很难区分。

# 参考文献

- 1 陈先有,曹金华,黄俊波. 航空用复合材料结构件无损检测技术分析[J]. 国防技术基础,2007(8): 11~14
- 2 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, 30(4): 1~7
- 3 宁宁, 袁慎芳, 沈真, 等. 在役航空复合材料结构的无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2008(15): 50~52
- 4 Avdelidis N P, Hawtin B C, Almond D P. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites[J]. NDT & E Int, 2003, 36 (9): 433~439
- 5 郭兴旺, 许文浩. 蜂窝结构积水的脉冲红外热像无损检测的传热分析[J]. 红外技术, 2011, 33(5): 275~280
- 6 梅林,陈自强,王裕文,等. 脉冲红外无损检测的有限元模拟及分析[J]. 西安交通大学学报,2000,34(1):67~70
- 7 Vladimir P, Vavilov. Three-dimensional analysis of transient thermal NDT problems by data simulation and processing[J]. In: Ralph B. Dinwiddie, Dennis H. LeMieux. Thermosense XXII. Bellingham: SPIE, 2000, Vol. 4020. 152~163
- 8 Grinzato E, Bison P G, Marinetti S, et al. Thermal NDE enhanced by 3D numerical modeling applied to works of art[J]. Insight, 2001, 43(4): 254~259

\*

#### (上接第35页)

情况、制造过程能力、产品质量和功能特性、产品使用情况和质量问题等进行分析和评价,实现航天复杂产品的持续改进,为企业质量成本管理和质量管理分析决策提供有效支持。最后所提方法和模型在某航天制造企业进行应用,并开发了相应的原型系统,证明了所提模型在航天复杂产品质量管理中的适用性。

#### 参考文献

- 1 Dessouky M I, Kapoor S G. A methodology for integrated quality system [J]. Journal of Engineering for Industry, ASME, 1987:241~247
- 2 Beckworth G. A Process Quality Management System [D]. Deakin University, Geelong, Australia, 1995.7

- 3 Chin S, Kim K, KimY S. A Process-based quality management information system[J]. Automation in Construction, 2004(13): 241~259
- 4 陈盛照,段桂江.与业务过程集成的质量体系管理系统设计与开发[J]. 现代制造工程,2009(3): 20~24,108
- 5 Chin K S, Duan G J, Tang X Q. A computer integrated framework for global quality chain management [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technoogyl, 2006, 27: 547~560
- 6 邓军. 面向产品生命周期的全面质量管理系统建模及实现技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- 7 International Organization for Standardization. Quality management systems–Requirements [S]. ISO 9001:2000