

# 蜂窝缺陷的红外无损检测及有限元模拟

黄新萍 陶 宁 蒋玉龙 王中华 张存林

(北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 首都师范大学物理系, 北京 100048)

**摘要** 蜂窝结构在使用过程中, 常见的缺陷有脱粘和积水。红外无损检测技术通过对试件主动加热, 利用热像仪采集试件表面的红外辐射变化, 从而检测出物体的缺陷信息。实验结果表明, 蜂窝积水位置的温度要低于参考区域的温度。基于这一现象, 利用 Ansys 有限元软件模拟了蜂窝结构的脉冲红外热成像检测过程, 并与实际脉冲红外热成像用于表面下识别检测实验结果进行对比, 验证了模拟结果的正确性。对蜂窝结构的积水、脱粘和积油缺陷模拟并进行对比识别, 为实际实验提供理论基础。

**关键词** 测量; 脉冲红外热成像; 有限元分析; 蜂窝结构; 缺陷

**中图分类号** O59 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0612002

## Thermal Wave Nondestructive Testing of Honeycomb Defects and Finite Element Modeling

Huang Xinping Tao Ning Jiang Yulong Wang Zhonghua Zhang Cunlin

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** The main defects of honeycomb structure in use are debond and water. Thermal wave nondestructive testing technology uses the pulse to heat the sample and thermal camera to detect the surface temperature so as to detect the defects of object information. The experimental results show that the temperature of the water position is lower than the temperature of the reference area. Based on this phenomenon, the Ansys finite element software is used to simulate the pulsed thermography, and the simulation results are compared with the actual test results, which verify that the finite element method is feasible to infrared non-destructive testing. The simulation and identification of the debond, water and oil defects are made to provide theoretical foundation for the actual experiment.

**Key words** measurement; pulsed thermography; finite element analysis; honeycomb structure; defects

**OCIS codes** 040.3060; 040.6808; 120.4290

## 1 引 言

蜂窝结构由于质量轻、强度高和刚度大等特点, 在航空航天、机械制造等领域得到广泛应用。在制作和使用中蜂窝结构都容易出现缺陷, 极大地影响了蜂窝结构的使用, 因此有必要对其进行无损检测。蜂窝结构的结构比较复杂, 其内部缺陷的无损检测一直是人们研究的热点。

目前在航空航天中通过不同的无损检测手段来检测蜂窝结构, 这些方法包括目视法、敲击法、声谐

振法、超声检测技术和射线检测技术等<sup>[1]</sup>。目视法仅能检查察看蜂窝区外部缺陷; 手锤敲击法根据不同的声响来判断蜂窝结构是否脱胶, 结果不够准确; 超声脉冲可以检验蜂窝胶接结构的胶层脱粘和胶层疏松情况, 适用于面积较小的局部检测; 射线检测适合于检测夹芯结构中的芯子变形、开裂、发泡胶发泡不足以及镶嵌物位置异常等缺陷的检测, 对垂直于材料表面的裂纹也具有较高的检测灵敏度和可靠性, 但不易区分积水和填充胶的缺陷, 且费用昂贵。

**收稿日期:** 2013-01-11; **收到修改稿日期:** 2013-03-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(10804078)和中国民航局联合资助项目(U1233120)资助课题。

**作者简介:** 黄新萍(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事红外无损检测方面的研究。E-mail: 2xinp@163.com

**导师简介:** 陶 宁(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事红外无损检测方面的研究。E-mail: ninatao1021@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

近 10 年来,红外无损检测技术在航空航天材料的检测和评估中发展快速。相对于常规方法,其探测面积大、速度快、非接触的特性,可以方便快捷地检测出缺陷位置,对于蜂窝结构的缺陷检测相对易于实现。美国韦恩州立大学较早实现了脉冲式红外热波无损检测技术对复合材料的检测,利用降温曲线区分材料的不同缺陷,利用对数时间曲线的特征偏离时间测量复合材料的深度<sup>[2]</sup>。Clemente 等<sup>[3,4]</sup>分别利用脉冲相位、锁相、超声红外热成像技术对分层缺陷、蜂窝核积水、脱粘缺陷进行了检测研究,结果表明脉冲红外热成像技术对分层缺陷、蜂窝积水缺陷具有较好的探测能力。国内进行相关领域研究的机构有首都师范大学、北京航空航天大学等<sup>[5,6]</sup>,用计算热反射系数的方法实现了对金属材料缺陷的识别<sup>[7]</sup>。对复合材料的脉冲红外热波无损检测的研究在一些领域中得到实际应用,发展较为迅速<sup>[8~11]</sup>,相关定量计算尚在探索阶段。

本文采用 Ansys 有限元软件模拟了蜂窝结构的脉冲红外热成像检测过程,并对蜂窝结构的积水、脱粘和积泊缺陷模拟进行了对比。

## 2 红外热波无损检测技术原理

红外热像法是利用外部热源主动加热,检测物的表面产生温差,从而实现内部缺陷检测的一种技术。实验中采用闪光灯作为激励源,以高能脉冲激励被检测物表面,若被检测物内部有缺陷,缺陷区域与参考区域对于热的响应不同,缺陷区域与参考区域对应的表面产生温差,再利用热像仪获取被检测物表面的红外辐射信号,从而实现内部缺陷的检测,如图 1 所示。这种检测方法直观、准确、快速,在某种程度上可以取代一些传统的检测技术。

介质受到脉冲热激励后,表面吸收的热量以热波的形式向下继续传递,传至缺陷面发生时反射和

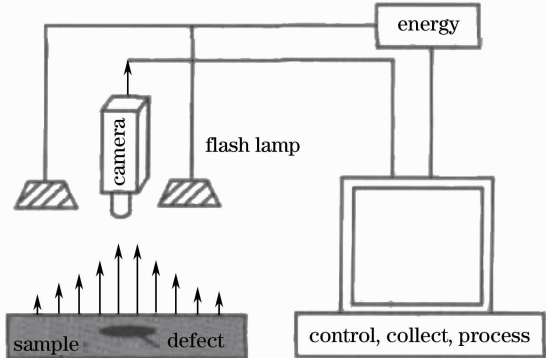


图 1 反射式脉冲红外热成像检测示意图

Fig. 1 Sketch of reflection pulsed thermography

透射。若热波传播时没有能量损失,通过求解热传导方程,可得到  $x=0$  处表面温度的函数<sup>[12]</sup>

$$\Delta T(0, t) = \frac{Q}{e \sqrt{\pi t}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(\frac{-n^2 L^2}{\alpha t}\right) \right], \quad (1)$$

式中  $L$  为缺陷所在深度,  $n$  表示热波传播到两种材料界面发生的反射次数。

实际应用中通常用对比温度求出两种介质间的反射系数,并进一步求出表面下异物的吸热系数、热导率和热扩散系数等参数达到识别异物的目的<sup>[6]</sup>。

## 3 蜂窝积水实验

### 3.1 脉冲红外检测系统

实验所用脉冲红外热波无损检测系统由脉冲热激励系统、数据采集系统以及数据处理系统三部分组成,如图 2 所示。实验采用的热激励源是两个氙灯,产生瞬间可见光热源激励被测物表面,光脉冲的宽度为 2 ms,可根据实验需求选取不同等级的能量,可以提供的最大能量为 9.6 kJ。实验中使用的热像仪是 FLIR ThermaCAM SC300 红外热像仪,具有量子阱红外光子探测器和高可靠性的内循环制冷器。计算机配置为 P III 2.4 G 双 CPU 处理器,使用 WindowsXP 系统及专用热波成像软件。热波成像软件进行热激励触发控制、热像仪采集时间、采集频率等实验条件设置及处理数据和记录分析图像等,能保存多种格式的文件。

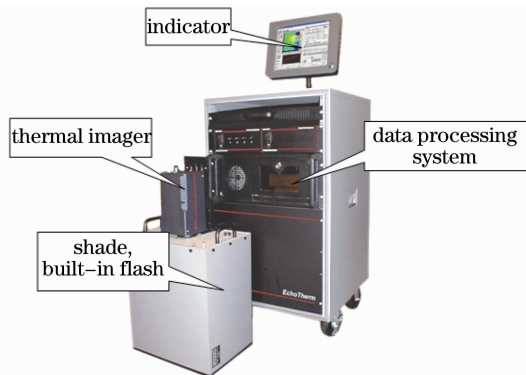


图 2 脉冲红外检测系统

Fig. 2 Pulse infrared detection system

### 3.2 实验过程

实验试件为铝蒙皮纸蜂窝,如图 3 所示,尺寸为 240 mm×120 mm×25 mm,蜂窝芯为六边形,蜂窝芯边长为 3 mm,为了便于液体的注入,试件只设计有一面蒙皮,另一面蜂窝核裸露,蒙皮厚度为 1 mm。

蜂窝结构积水的人工缺陷主要是通过水分的扩

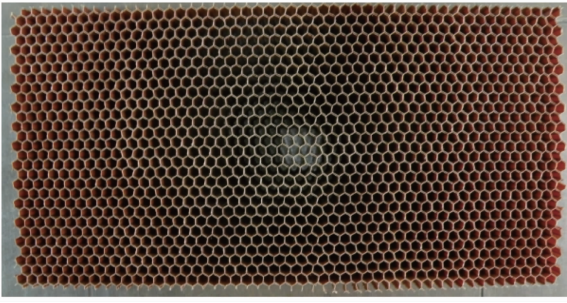


图3 蜂窝结构试件(裸核面)实物图  
Fig. 3 Physical map of honeycomb sample  
(exposed surface)

散和直接注入两种机理形成。实验通过往蜂窝核内注水来形成积水缺陷,单核所注水量都为满蜂窝。实验设计的(裸核面)积水位置和积水蜂窝个数如图4所示,1~9号位置分别对应的是1~9个蜂窝核积水的位置。

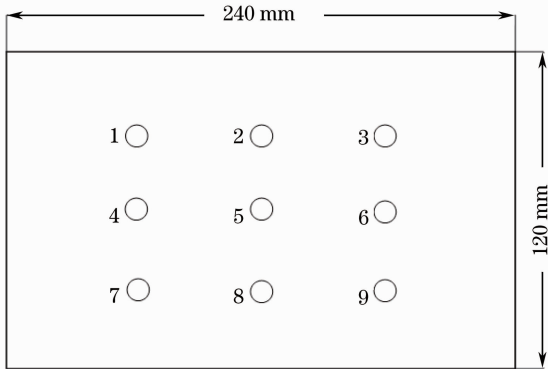


图4 试件积水位置和积水蜂窝个数  
Fig. 4 Water position and the number of water

在室温下进行试验,首先对热像仪进行标定,调整焦距,闪光灯能量设置为 9.6 kJ,热像仪采集频率为 60 Hz,采集时间取 10 s。通过计算机来控制闪光灯对试件表面加热,同时利用热像仪来记录试件表面的温度变化,计算机软件自动对实时图像进行分析和处理。得到的试件表面的原始热图如图5所示。

蜂窝结构内部的缺陷分层影响了热量在试件内

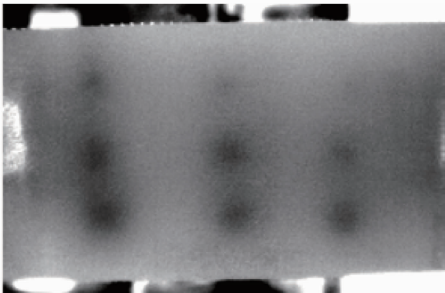


图5 试件的原始热图  
Fig. 5 Original thermal map of honeycomb sample

部的传递,图5中从右上方到左下方的较暗区域依次是2~9号积水的区域,此热图清晰地显示了蜂窝试件正常区域和各个积水区域表面的温度差异性,正常区域要比有积水缺陷的区域更亮,温度更高。实验证明,蒙皮的厚度影响了热量在试件内部的传输,同时由于受实验环境、三维热扩散等的影响,1 mm厚铝蒙皮试件用脉冲红外热像法检测时基本上看不出只有一个蜂窝核有积水时的缺陷。

选取3~9号积水区域的中心区域及参考区域一点,分别做出相应的时间温度降温曲线,所选点的降温曲线排列顺序从上至下依次为参考区域、3~9号蜂窝积水区域,如图6所示。热波在材料中的传播速度跟材料的导热系数有关,导热系数越大,传播速度越快。水的导热系数要比空气的大很多,所以积水缺陷的降温曲线变化比正常区域的降温曲线变化大,即降温更快,图6中积水区域的降温曲线在正常区域降温曲线的下方,可见实验结果与理论分析相同。

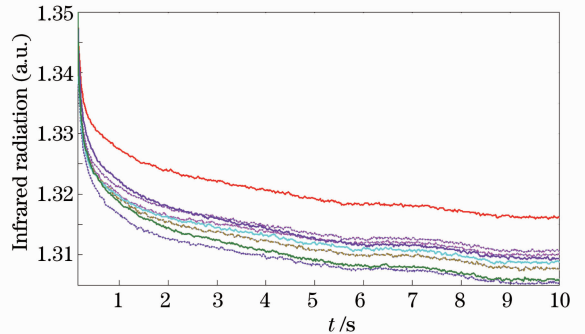


图6 脉冲红外热像法检测蜂窝结构表面温度时间曲线  
Fig. 6 Experimental surface temperature versus decay curves of honeycomb sample

假设忽略胶层的影响,只考虑蜂窝蒙皮和积水缺陷间的热传递,当热波经过试件表面继续向下传递,在界面上发生折射和反射,含水量不同,吸收的热量也不同,热波在不同界面的传递影响试件表面的温度变化,通过降温曲线的区别可定性区别出表面下含水量的差异。由降温曲线,水量越大,热传导在界面的消耗越多,反射到表面的热越少,表现为温度越低。不同个数蜂窝核满蜂窝积水的实验结果对同一个核内不同积水量的进一步计算起到一定的指导作用。

#### 4 Ansys 有限元模拟脉冲红外热像法检测蜂窝结构

Ansys 是大型有限元分析软件,广泛应用于航

空航天、汽车、机械制造等行业。Ansys 热分析基本原理将研究对象划分为若干有限元节点,根据能量守恒定律求解每一节点的热平衡方程,计算各节点温度和其他相关量。

#### 4.1 铝蒙皮纸蜂窝结构积水的有限元模拟

在 Ansys 模拟中,为了减小计算量,模型与实际试件存在一定的差异,对上述铝蒙皮纸蜂窝试件进行模拟,从裸核面来看,模拟图如图 7 所示,红色选中区域为积水位置。热荷载方式采用热流密度法,进行多步加载,模拟热激励和降温两个过程。网格划分为设置体大小为 0.001 m 的自由划分方式,材料的热属性如表 1 所示。

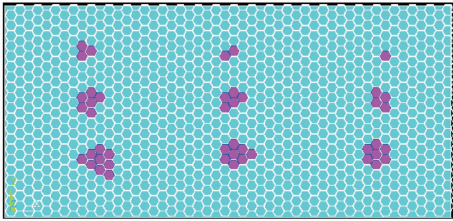


图 7 试件模拟图

Fig. 7 Model of sample

表 1 材料的热学性能参数

Table 1 Thermal properties of material

Material	Thermal conductivity K / [W/(m·C)]	Density $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat C / [J/(kg·C)]
Aluminum	206	2696	880
Fiberglass	1.97	1600	627
Epoxy resin	0.251	2170	840
Air	0.027	1.165	1004
Water	0.61	1000	4185
Oil	0.15	2010	820

实验中,闪光灯脉冲强热流加载到被检测物表面,由  $q = \frac{p}{s}$  (单位:W/m<sup>2</sup>) 计算得出  $q = 4 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>,模拟中加载时间设置为 0.002 s,为了提高计算机的计算效率,将载荷截止时间设为 5 s。虽然模拟时间比实际时间少,但并不影响模拟结果与实际检测结果的对比,因为所有缺陷在前几秒内就可检测出来。图 8 是 5 s 末铝蜂窝试件表面温度等值线图,图中积水区域对应表面处呈黄色不规则圆形区,亮度越高,代表温度越高,红色区域温度高于黄色区域的温度。模拟图上的黄色区域即实验热图上颜色较暗的区域,在模拟图上也看不到只有一个蜂窝核积水的缺陷,两个积水缺陷的比较模糊,形成不易观察的散点热分布,只有积水的蜂窝核大于三个的时候,用

Ansys 模拟时等值线图才能感应到。实际检测中,能检测到两个以上蜂窝积水的缺陷。模拟时忽略了三维热扩散效应的影响,实际操作中存在扩散,误差在所难免存在。模拟结果与实验所得到的热图相比对应性较好,因此用 Ansys 模拟蜂窝结构的脉冲红外热像法检测是可行的。

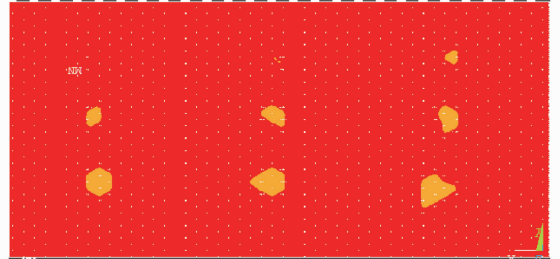


图 8 Ansys 模拟 5 s 末试件表面温度等值线图

Fig. 8 Surface temperature contour map of model obtained by Ansys corresponding to  $t = 5$  s after heat flow has been applied

选取蜂窝试件上表面各个积水区域中心点和正常区域一点,作出温度时间曲线,如图 9 所示。由 Ansys 热分析模拟得到的蜂窝试件表面降温曲线可以看出,模拟结果更为清晰,最上边的曲线是正常区域的降温曲线,向下依次是 1~9 个蜂窝积水缺陷的降温曲线,曲线的走向和实际实验一致,模拟结果和实验结果是匹配的。实际实验中,1 mm 厚铝蒙皮试件检测不到只有一个蜂窝核积水缺陷的位置,与正常区域的温差较小,但在降温曲线上可以体现,可以在检测中起到辅助作用。

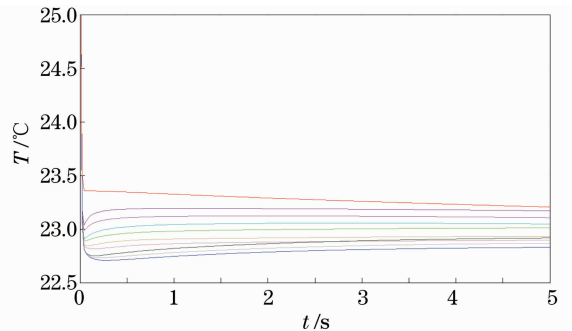


图 9 Ansys 模拟蜂窝结构表面温度时间曲线

Fig. 9 Simulated surface temperature curves of model obtained by Ansys

#### 4.2 玻璃纤维蒙皮纸蜂窝结构积水和脱粘的有限元模拟

选取玻璃纤维蒙皮纸蜂窝结构进行模拟,蒙皮厚度 1 mm,蜂窝芯边长为 3 mm,模拟结果更为明显。热荷载方式继续采用热流密度法,执行多步加载,模拟热激励和降温两个过程。为了减小计算量,

只模拟蜂窝试件的一部分(22×11个蜂窝单元)。试件设定的缺陷从蒙皮面来看从左往右依次是脱胶、单核满蜂窝积水和单核满蜂窝积油,其中脱粘的区域为3 cm×3 cm的矩形区域,积水和积油缺陷的蜂窝核个数都是两个。

图 10 为加载热流密度法模拟检测结果和实验热图的比较,模拟热图与实验热图相符。图 11 为蜂窝试件的实验和模拟表面温度时间( $T-t$ )曲线,其中,模拟图选取实际实验过程中的前 5 s 时间,与模拟时间相对应。

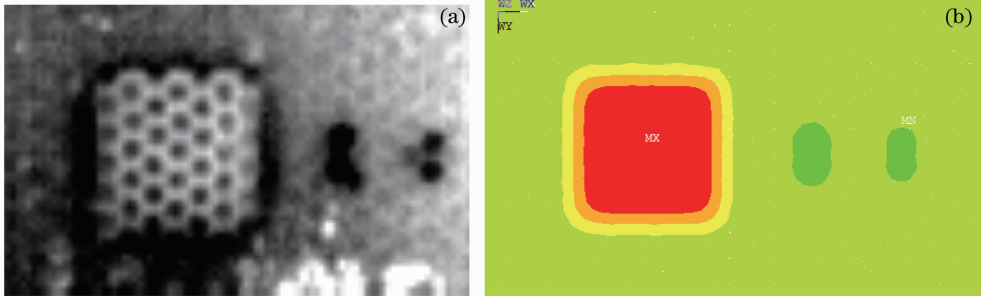


图 10 实验热图(a)和 Ansys 模拟热图(b)

Fig. 10 Experimental thermal map (a) and simulation thermal map (b)

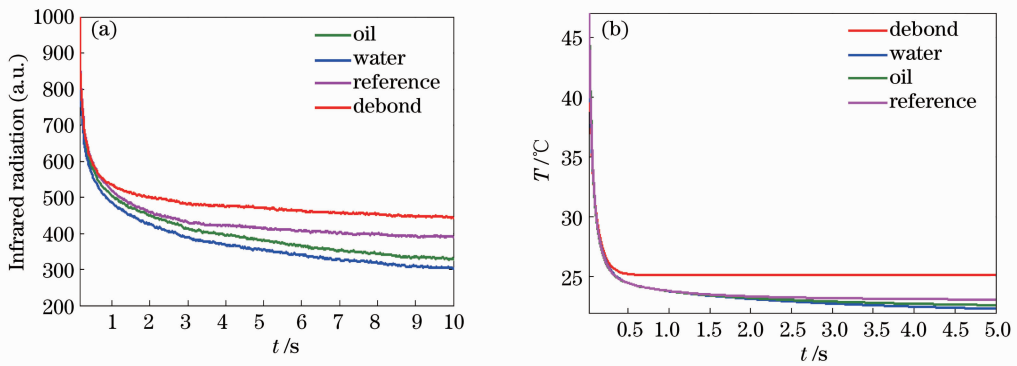


图 11 实验表面温度时间曲线(a)和 Ansys 模拟表面温度时间曲线(b)

Fig. 11 Experimental surface temperature decay curves (a) and the simulated surface temperature decay curves (b)

蜂窝中存在的脱粘是指蒙皮和蜂窝之间的粘接不好,热量在往下传递的过程中遇到阻碍,形成热量堆积,表现为降温时脱粘区域的表面温度高于正常区域的温度。从模拟的等值线图明显可以看到,积水区域的温度要低于参考区域的温度,脱粘区域的温度要高于参考区域的温度。这点也在模拟的

$T-t$  图像[图 12(a)]上得到验证,即  $T-t$  图像上从上到下依次是脱粘、参考、积水的温度曲线。图 12(b)为积水和脱粘区域与正常区域的温差变化关系。从图中可见,虽然积水和脱粘都会产生温度异常区域,但其形成的温差的变化规律不一样。所以,通过温差-时间规律分析,较容易可以识别脱粘和积

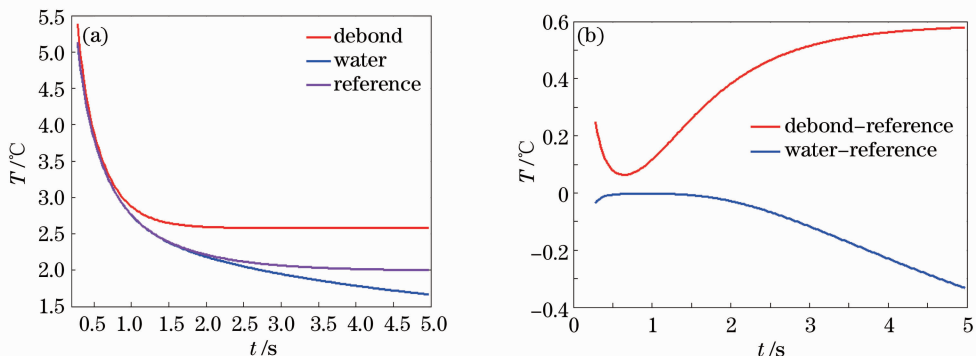


图 12 Ansys 模拟蜂窝脱粘积水的表面时间温度曲线(a)和温差曲线(b)

Fig. 12 Simulated surface temperature decay curves (a) and simulated temperature-time curves (b) obtained by Ansys

水区域。实验图上脱粘缺陷周围的暗色区域是缺陷形成时的胶粘剂堆积,模拟的模型较为理想化,脱粘区域为均匀的空气分布,结果略有不同。

继续选取蜂窝试件表面相应各点,分别得到蜂窝试件的模拟和实验的积水和积油缺陷的降温曲线,如图 13 所示。因为油的导热系数越小,传播速度慢。所以积油缺陷的降温曲线变化比积水缺陷区

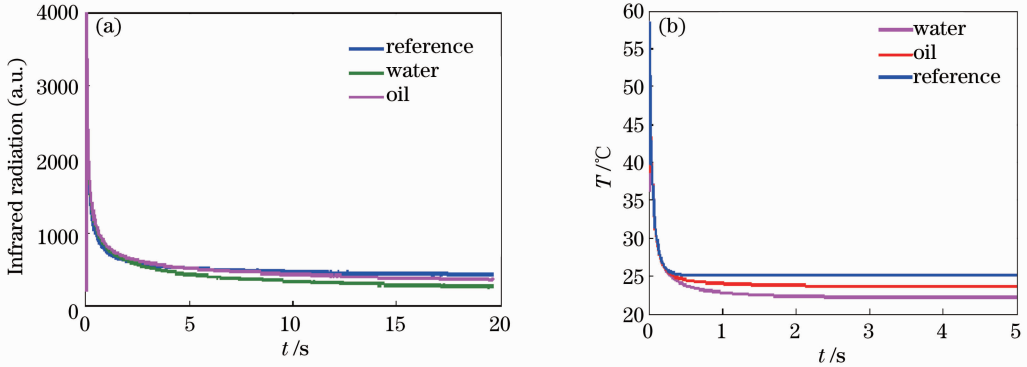


图 13 实验检测蜂窝结构的表面时间温度曲线(a)和 Ansys 模拟表面时间温度曲线(b)

Fig. 13 Experimental surface temperature decay curves (a) and simulated surface temperature decay curves (b)

## 5 结 论

脉冲红外热像法检测技术可对蜂窝结构的积水和脱粘进行快速有效地检测,保障了蜂窝结构的正常使用。实际检测过程中存在噪声、加热不均匀等的影响,采用 Ansys 有限元模拟的方法可以排除这些因素的影响,在计算中数据更为准确。表面下异物量的识别尚无成熟理论,只做定性分析。铝蒙皮厚 1 mm 的蜂窝材料在实验和模拟的热图上均可以检测出两个以上蜂窝核积水的缺陷,借助降温曲线可以更精确地检测。蜂窝材料在降温过程中,由于不同物体所聚集的热量相差明显,形成不同的温度时间变化规律。如以正常区域为参考基准,降温开始时积水区域的温度低于正常区域,表现为负温差。脱粘区域的温度高于正常区域,表现为正温差。积油缺陷降温的速度较积水缺陷降温更缓慢,以此来识别蜂窝材料的各种缺陷,Ansys 在脉冲红外热像法的模拟为近一步定量检测提供了理论基础。

## 参 考 文 献

- Ning Ning, Yuan Shenfang, Shen Zhen *et al.*. Nondestructive testing technology for aviation composite component in service [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, (15): 50~52  
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
- Xun Wang. Pulse-Echo Thermal Wave imaging of Metals and Composite [D]. USA: Wayne State University, 2001

域的降温曲线变化小,即降温慢,图 13 中积油区域的降温曲线在积水区域降温曲线的上方。综上所述,降温曲线的顺序从上到下应为脱粘缺陷、正常区域、积油缺陷和积水缺陷,这和图 11 实验和模拟的降温曲线走势都相同。计算预埋物蓄热系数的方法可以进行表面下异物识别,这里只做定性分析,由试件的表面降温曲线来识别蜂窝结构的不同缺陷。

- I. C. Clemente, M. Genest, S. Guibert *et al.*. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: a comparative study [C]. *SPIE*, 2007, **6541**: 654116
- L. D. Favro, T. Ahmed, Xiaoyan Han *et al.*. Thermal Wave Imaging of Disbonding and Corrosion on Aircraft [M]. //Donald O. Thompson, Dale E. Chimenti, Review of Progress in Quantitative Nondestructive evaluation. Springer, 1995, **15A**: 1747~1753
- Tao Ning, Zeng Zhi, Feng Lichun *et al.*. Thermal effusivity measurement of subsurface heterogeneous materials using pulsed thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(11): 2098~2103  
陶 宁, 曾 智, 冯立春等. 采用脉冲红外成像法的表面下暗藏物蓄热系数的测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(11): 2098~2103
- Tao Ning, Zeng Zhi, Feng Lichun *et al.*. The finite element modeling of subsurface recognition for pulsed thermography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1108010  
陶 宁, 曾 智, 冯立春等. 基于脉冲红外热像法的表面下识别的有限元模拟 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1108010
- Huo Yan, Li Huijuan, Zhao Yuejin *et al.*. Study on the detectability of carbon fiber reinforced plastics composites using pulsed infrared thermography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 277~281  
霍 雁, 李慧娟, 赵跃进等. 脉冲红外成像对于碳纤维复合材料检测能力的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 277~281
- Wang Xun, Jin Wanping, Zhang Cunlin *et al.*. Actuality & evolvement of infrared thermal wave nondestructive imaging technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2004, **26**(10): 497~501  
王 迅, 金万平, 张存林等. 红外热波无损检测技术及其进展 [J]. *无损检测*, 2004, **26**(10): 497~501
- Li Yanhong, Jin Wanping, Yang Danggang *et al.*. Thermal wave nondestructive testing of honeycomb structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 45~48

- 李艳红, 金万平, 杨党纲 等. 蜂窝结构的红外热波无损检测[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(1): 45~48
- 10 Jiang Shufang, Shen Jingling, Yang Danggang *et al.*. Infrared thermal wave nondestructive testing on bonding defects of honeycomb aluminum composites [J]. *Nondestructive Testing*, 2006, **28**(1): 23~25
- 蒋淑芳, 沈京玲, 杨党纲 等. 铝蜂窝胶接缺陷的红外热波无损检测[J]. 无损检测, 2006, **28**(1): 23~25
- 11 Zhou Keyin, Tian Yupeng, Yao Entao *et al.*. Method for recognizing type of flaw in honeycomb parts [J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2004, **19**(1): 115~118
- 周克印, 田裕鹏, 姚恩涛 等. 蜂窝结构缺陷类型识别的研究[J]. 数据采集与处理, 2004, **19**(1): 115~118
- 12 S. K. Lau, D. P. Almond, P. M. Patel. Transient thermal wave techniques for the evaluation of surface coatings [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1991, **24**(3): 428~436

栏目编辑: 何卓铭