

航空 CFRP 中分层缺陷的脉冲红外检测精度研究

李慧娟

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要 随着材料科学、结构力学的飞速发展,碳纤维增强复合材料(CFRP)越来越多地应用于航空产品中。CFRP 在生产过程中易于产生分层缺陷,难以利用传统检测方法进行检测。红外热波成像检测技术能够对脱粘型缺陷进行准确定位及尺寸测量,然而对于深度测量方面还处于初级研究阶段。利用脉冲红外热成像检测技术对 CFRP 中不同大小及深度分层缺陷进行检测,通过对不同时刻检测表面的温度-时间曲线进行比较与处理测量缺陷大小,通过对对数-时间曲线进行二次微分方法测量缺陷深度。同时,将测量结果与实际缺陷尺寸及深度进行比较,分析此种方法对缺陷大小及深度的检测精度。检测结果表明,脉冲红外热成像方法对宽深比大于 3 的缺陷,大小检测精度均低于 10%,对缺陷深度的检测精度随深度增加及尺寸减小而降低。

关键词 复合材料;检测精度;脉冲红外热成像;无损检测

中图分类号 TB332 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100112

Investigation of Pulse Thermography Sensitivity for CFRP Delamination in Aero-Space Industry

Li Huijuan

(China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is widely used for making leaf joint and cartridge receiver with the development of material science and structural mechanics. The main kind of flaw is delamination, but this type of flaw can not be tested easily by using tradition method. In order to promoting the product quality, pulse theography is developing and becoming perfect. But the test sensitivity of pulse theography can not be definded exactly, in order to solve this problem, pulse thergraphy method is used for testing artifical parts with different delamination flaws. Pulse theography method can find and locate the delamination flaw in CFRP, can measure the size and depth of the flaw. When the percentage of wide and depth is lower than 3, the test sensitivity is lower than 10%, and the sensitivity is becoming low as the size become small and the depth become deep.

Key words composite material; test sensitivity; pulse thermography; nondestructive testing (NDT)

OCIS codes 160.0160; 100.0100; 350.0350

1 引 言

随着航空工业的不断发展,为满足新一代战斗机及大型客机的生产需求,碳纤维增强复合材料(CFRP)越来越广泛地应用于飞机机身、机翼、尾翼及航空涡扇发动机压气机转子/静子叶片、整体叶环、机匣、低压轴和排气喷管作动筒等中温零部件上^[1]。然而,新型材料的使用必然引入新型生产缺陷,为保证复合材料在制造、生产过程中的产品质

量,随之而来的关键问题就是解决新型材料中新型缺陷的无损检测问题。

新型复合材料的应用带来了新的缺陷形式及无损检测方法的快速发展,对于碳纤维增强复合材料层压板结构而言,生产过程中易于出现的分层缺陷,由于 CFRP 与金属材料之间存在较大的物理及力学性能、结构特点和制造工艺等方面的差异,针对金属的检测方法并不能完全适用于复合材料检测需

收稿日期: 2010-08-26; 收到修改稿日期: 2010-11-06

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目(T062007A002)资助课题。

作者简介: 李慧娟(1980—),女,工程师,主要从事航空航天复合材料产品的红外与激光检测等方法研究。

E-mail: LHJ1900@126.com

求^[2]。因此,各类光学检测方法以其非接触、无污染、不受工件几何外形和尺寸限制、全场检测、检测灵敏度高和检测速率高等特点被大量应用于复合材料分层缺陷的检测中。在 20 世纪 90 年代,美国空军、美国国家航空航天局(NASA)、波音和空客等国外机构和公司均已开展针对复合材料的脉冲红外检测技术研究。目前脉冲红外热成像方法对复合材料中脱粘缺陷的检测适用性已得到认可,越来越多的单位将重点转向热扩散抑制、缺陷深度定量测量、缺陷边缘提取与识别等定量分析工作。在国内,空间技术研究中心、航空材料研究所、首都师范大学等多家科研院所及高校均已进行了一定程度的脉冲红外检测方法研究^[3]。

红外热波无损检测技术作为一种新型检测方法,对一定材料及缺陷的检测适用性已得到证实,美国已经编制形成了脉冲红外热成像检测方法的美国材料与试验协会(ASTM)标准,波音公司已将此方法作为检测飞机中复合材料的主要方法。但上述标准及检测技术均未指明此方法对特定材料及缺陷的检测精度。本文针对逐步应用于航空工业生产的 CFRP 材料进行检测,利用脉冲红外热波方法对内

部预置不同深度、不同大小平底孔的碳纤维增强复合材料板进行检测,利用 Matlab 软件计算时间-温度、时间-对数曲线,利用数学方法对时间-对数曲线进行二次微分,分别对缺陷大小及缺陷深度进行测量,将检测结果与实际测量结果进行比较分析,分析脉冲红外热成像方法对碳纤维增强复合材料中分层缺陷的检测精度。

2 复合材料模拟试件设计

由于 CFRP 材料的结构特点及制作工艺与金属材料存在极大差异,其内部易出现分层缺陷。分层缺陷可以理解为由于空气隙的存在而导致材料不连续,可以利用在板内预置平底孔的方式对复合材料中分层缺陷进行模拟。

设计制作总厚度为 5 mm 的 CFRP 层压板,在层压板内分别制作直径为 10, 7 和 4 mm 的圆形平底洞及边长为 10 mm 的平底洞,距离待检测表面深度分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 3.5 mm,模拟脱粘及分层缺陷设计图如图 1 所示。

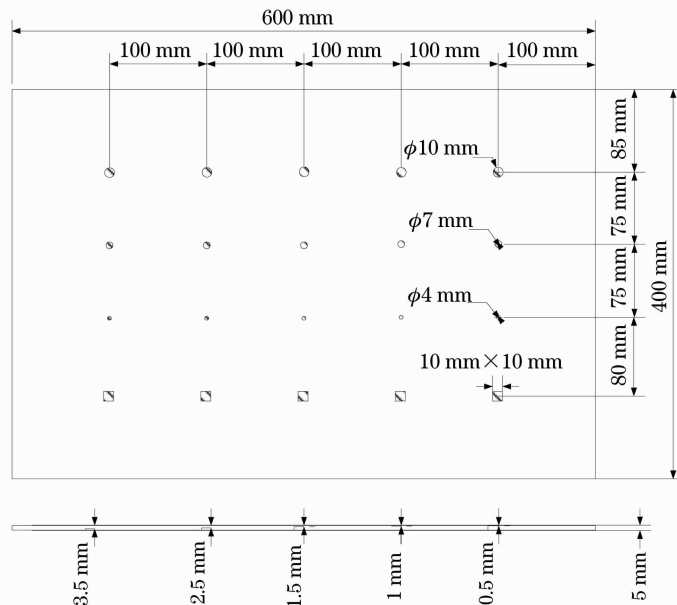


图 1 模拟缺陷设计图

Fig. 1 Defect distribution of specimen

3 脉冲红外热成像检测技术

3.1 脉冲红外热成像检测原理

任何物体,当它的温度在绝对零度以上时,就会发射红外光线。即使物体的温度较低,以红外线辐射形式发射出来的能量也是很可观的。根据物体的

这种特性,利用红外热像仪来感受物体发射的红外线辐射能,就能够灵敏、精确的检测出目标物体的表面温度,从而探查出它的内部缺陷。当工件受到外部的热激励或周期性的载荷时,如果工件内部有缺陷,由于缺陷部位阻挡或加速均匀热流,使工件局部

表面的辐射能(温度)出现微小的变化。红外热成像技术利用红外辐射原理,通过测量目标物体表面的红外辐射能,将被测体表面温度的分布转换成形象、直观的热图像。通过对被测物体表面温度变化过程进行分析来对内部缺陷进行分析判断^[4]。

3.1.1 缺陷大小测量理论

脉冲式红外热波无损检测以热传导理论为基础,在一维传导模型下,脉冲面热源施加于被检测物表面,在试件表面以热波形式向试件内部纵向传播,并随时间和穿透深度指数衰减,遇到不同介质,在介质界面处按边界条件继续传播和反射。当均匀热流加到平板表面时,基于平板内的热各向同性,三维的热传导问题可以简化成二维热传导问题^[5],二维的傅里叶热传导定律为

$$K_x(y) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_y(z) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho C_\rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

式中 K_x, K_y 分别为热流方向和垂直平面的导热系数, ρ 是材料密度, C_ρ 是材料比热。根据此热传导方程可知,材料内部存在异性介质时热流发生反射,在物体表面形成与基体材料相异的温度场,以此来对缺陷尺寸进行测量。

3.1.2 缺陷深度测量理论

根据理论推导,内部有缺陷和内部完好区域(参考区域)的表面温度对比度 ΔT 达到最大值的时间为

$$t_m = 2d^2/\alpha$$

式中 d, α 分别表示缺陷深度和导热程度。利用温度对比度最大值对应的时间可以进行材料或结构内部缺陷所在深度的定量测量^[6]。温度对比度与缺陷所在深度和完好区域的参考厚度有关,而且与缺陷周围的三维热传导与缺陷的横向尺寸有关。同时,由于温度对比度最大时刻分离点难以进行区分,受人为因素影响较大,因此在实际检测过程中,将温度对比度热学方程取对数后求得二阶微分,利用二阶微分峰值时间来取代分离时间^[7]。由于经过二阶微分后去除干扰信号及影响因素,选取峰值时间更为准确^[8]。

3.2 检测设备

采用红外热波无损检测系统,该系统由热激励系统、红外热像仪和计算机组成,热激励系统的两个高能氙灯,最大能量可达 9.6 kJ,脉冲宽度为 2 ms。红外热像仪是瑞典的 ThermaCAM™ SC3000,制冷型量子阱焦平面红外光子探测器,探测波段为 8~9 μm , 320 pixel \times 240 pixel,室温下最小温度分辨率为 0.02 $^\circ\text{C}$ 。整个检测过程的热激励和信号采集时

间较短,依材料热属性及结构性质不同,从几十秒到几分钟内即可完成。采集到的信号通过电缆线传送到计算机,由图像处理软件进行实时处理或后期对比分析处理。

4 检测试验

4.1 检测过程

由于探测装置限制,单次探测面积为 320 mm \times 240 mm,因此对 CFRP 层压板进行分区处理。利用闪光灯加热试件表面时,热像仪记录试件表面温度场,计算机软件对实时图象序列进行处理和分析后得到红外热像序列图。不同深度和大小缺陷随着时间延长逐渐清晰。具体实验参数如表 1 所示。

表 1 脉冲实验参数

Table 1 Parameters for pulse test

Parameters	CFRP
Distance /mm	450
Power /kJ	9.6
Frequency /Hz	60
Time /s	15

4.2 检测结果

4.2.1 缺陷大小检测精度

由于热扩散作用影响,缺陷在刚显现时刻的尺寸最能体现其真实性,随着时间延长,热扩散作用导致缺陷边缘逐渐扩展,导致测量尺寸大于缺陷实际尺寸。因此,对缺陷进行测量的时刻应选在缺陷刚刚显现的时刻。对试件内部全部缺陷进行编号,右起第一列缺陷由上至下分别为 1-1, 1-2, 1-3, 1-4; 第二列缺陷由上至下分别为 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 依次类推。对第一列缺陷进行尺寸测量热图如图 2 所示,图 3 为此时此刻第一列缺陷中心位置热辐射量曲线。

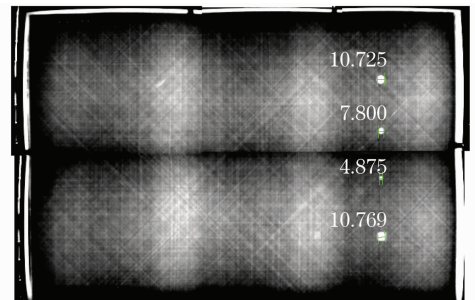


图 2 第一列缺陷测量结果图

Fig. 2 Test result for first row

脉冲红外热像法能够检测出设计图中全部 5 列缺陷,由于 5 列缺陷所处深度不同,测量时分不同时刻进行测量。根据实验条件计算每一像素点所代表长度,在热辐射曲线中分别取各峰值半波高位置的

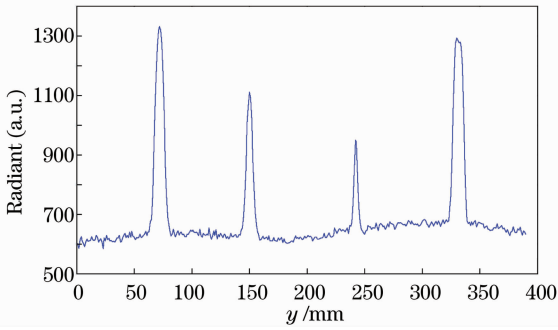


图3 第一列缺陷热辐射量曲线

Fig. 3 Radiant quantity curve for first row

宽度,用以代表缺陷横向尺寸。对每个缺陷进行尺寸测量显示值及误差如表2所示。

表2 缺陷尺寸测量结果

Table 2 Size test result

Number	1-1	1-2	1-3	1-4
Measured value /mm	10.725	7.8	4.875	10.769
Design value /mm	10	7	4	10
Error /%	7.25	11.43	21.86	7.69
Number	2-1	2-2	2-3	2-4
Measured value /mm	10.805	7.822	4.895	10.786
Design value /mm	10	7	4	10
Error /%	8.05	11.74	22.37	7.86
Number	3-1	3-2	3-3	3-4
Measured value /mm	10.816	7.93	4.902	10.809
Design value /mm	10	7	4	10
Error /%	8.16	13.28	22.55	8.09
Number	4-1	4-2	4-3	4-4
Measured value /mm	10.875	7.992	5.117	10.891
Design value /mm	10	7	4	10
Error /%	8.75	14.17	27.92	8.91
Number	5-1	5-2	5-3	5-4
Measured value /mm	11.009	8.101	0	11.054
Design value /mm	10	7	4	10
Error /%	11.09	15.72	∞	10.54

从表2中可以看出,当缺陷尺寸较大时,检测精度较高。直径为10 mm的缺陷测量误差在10%以下,随着缺陷尺寸的减小,检测精度逐渐降低。对于相同深度、不同尺寸的缺陷进行测量时,测量误差随缺陷尺寸的减小而逐渐增大;对不同深度、相同尺寸的缺陷进行测量时,测量误差随深度的增加而逐渐增大。对于深度为3.5 mm,直径为4 mm的缺陷进行检测时,难以在热图中对缺陷进行识别与测量,说明对CFRP而言,直径为4 mm的缺陷其探测极限深度为3.5 mm,这一结论与美国ASTM标准相一致^[9]。

4.2.2 缺陷深度检测精度

利用对数温差二阶微分峰值时间的特征偏离时

间与缺陷所在深度的平方成正比的关系进行缺陷深度测量是红外热波检测技术中的常用方法,在深度测量过程中对数特征曲线偏离时间与缺陷深度的平方成正比,与材料热扩散率成反比^[10]。对前4排缺陷进行深度检测,利用对数温差二阶微分峰值时间对1-1,2-1,3-1,4-1缺陷深度进行测量,其对数温差二阶微分曲线如图4所示。

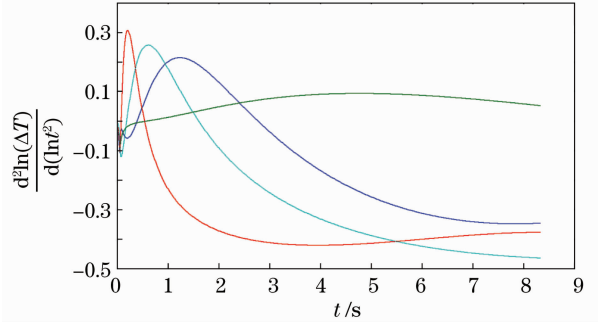


图4 对数温差二阶微分曲线

Fig. 4 Second differential lg T-t curve

对四条对数温差二阶微分曲线峰值时间进行测量,根据 $t \propto d^2$ 的关系,以深度最大2.5 mm的4-1处为基准点计算1-1,2-1,3-1三点处深度值,计算深度值如表3所示。

表3 缺陷深度测量结果

Table 3 Depth test result

Number	1-1	2-1	3-1	4-1
Peak time /s	0.2	0.6	1.25	4.73
Design value /mm	0.5	1	1.5	2.5
Measure value /mm	0.5141	0.8904	1.28	2.5
Error /%	2.82	10.96	14.667	benchmark

由图4可以看出,对于大小相同、深度不同的分层缺陷,随着缺陷深度增加,对数温差二阶微分曲线峰值时间逐渐延长,可以此作为对缺陷深度进行定性测量的根据。根据对数温差二阶微分峰值时间正比于缺陷深度的关系,以2.5 mm深缺陷为基准对其余3处缺陷深度进行计算,可以从表3中看出,随缺陷深度增加对深度测量的检测精度逐渐降低。

5 结 论

对航空产品中逐渐得到广泛应用的CFRP材料中易于出现的分层缺陷为研究对象,利用脉冲红外热成像方法对其进行检测。能够检测出内部预置直径为4~10 mm的全部缺陷,同时对缺陷尺寸及深度进行快速、准确测量,证明此种方法能够满足CFRP材料中分层缺陷检测需求。

对缺陷尺寸进行测量结果表明,缺陷大小对检

测精度产生影响。缺陷越大,深度越小,检测精度越高;反之,缺陷越小,深度越大,检测精度越低。

对缺陷深度进行测量结果表明,能够对缺陷相对位置进行准确定位,在已知检测材料厚度或某一位置深度前提下能够对缺陷深度进行准确测量。

参 考 文 献

- 1 Liang Chunhua. Application of continuous fiber reinforced metal matrix composite component on turbofan aeroengine [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, **15**: 32~35
梁春华. 连续纤维增强的金属基复合材料部件在航空涡扇发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2009, **15**: 32~35
- 2 Li Huijuan, Wu Dongliu, Wang Juntao *et al.*. Testing honeycomb structure by different methods[J]. *Wu sun tan shang*, 2009, **2**(33): 9~12
李慧娟, 吴东流, 王俊涛等. 铝蒙皮蜂窝夹层结构的各种无损检测方法[J]. *无损探伤*, 2009, **2**(33): 9~12
- 3 Yang Xiaolin, Dai Yongchao, Li Yanhong *et al.*. Application of the thermal wave testing technology in composites of airplane[J]. *Non-Destructive Testing*, 2007, **4**(29): 200~202
杨小林, 代永朝, 李艳红等. 红外热波技术在飞机复合材料损伤检测中的应用[J]. *无损检测*, 2007, **4**(29): 200~202
- 4 Xue Shuwen, Lei Yu, Chen Xiquan *et al.*. Physical basis and detecting principles of thermal pulse video thermography nondestructive testing[J]. *J. UEST of China*, 2005, **3**(34): 320~327
薛书文, 雷雨, 陈习权等. 脉冲红外热成像无损检测的物理检测机理[J]. *电子科技大学学报*, 2005, **3**(34): 320~327
- 5 Zhang Xiaochuan, Jin Wanping, Li Yanhong *et al.*. Measurement of thickness of glass fiber reinforced plastic flatbottom hole sample by infrared thermal NDT[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 16~18
张小川, 金万平, 李艳红等. 玻璃钢平底洞缺陷试件红外热波检测方法[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1): 16~18
- 6 Li Huijuan, Huo Yan, Cai Liangxu *et al.*. CFRP sandwiched facesheets inspected by pulsed thermography[C]. *SPIE*, 2010, **7658**: 765855
- 7 C. Muralidhar, M. Venkata Reddy, K. Kumaran. Study and performance evaluation of thermal barrier coatings (TBCs) using infrared thermography [C]. Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation, 2006, 277~279
- 8 Han Xiaoyan, L. D. Favro, R. L. Thomas. Quantitative detection and characterization of corrosion in Aircraft [C]. Proceedings of the Workshop on Intelligent NDE Sciences for Aging and Futuristic Aircraft, 1998, 83~91
- 9 L. D. Favro, P. K. Kuo, R. L. Thomas. Progress in the development of pulse-echo thermal wave imaging for NDE [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1994, **13A**: 395~399
- 10 C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague. Pulsed phase thermography inversion procedure using normalized parameters to account for defect size variations [C]. *SPIE*, 2005, **5782**: 334~341