

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0287-06

纤维增强复合材料红外热波无损检测 热激励方式的选取原则

赵石彬¹ 伍耐明² 张存林³ 刘文霞³ 李晓霞² 李昊² 俞嘉捷²

(¹ 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191
² 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100191; ³ 首都师范大学物理系, 北京 100048)

摘要 红外热波无损检测中热激励方式是影响缺陷检测可靠性的主要因素之一。以玻璃纤维增强复合材料缺陷检测为研究对象, 建立纤维增强复合材料热激励方式的选取原则。选取带预埋缺陷的玻璃纤维增强层压板, 采用脉冲闪光灯、沸水水浴、烤箱恒温加热和脉冲超声四种热激励方式, 进行热波检测, 获取并处理试件表面的热激励响应信号——红外辐射值。从热图的信噪比、红外辐射值变化曲线和缺陷可检测度三个方面对比分析, 综合考查了四种热激励方式对检测结果的影响, 提出了纤维增强复合材料的热激励源的选取原则。为提高检测可靠性, 热激励源的选取应遵循这一原则。

关键词 信号处理; 热激励; 红外热波; 纤维增强; 无损检测

中图分类号 TG115.28 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0287

Select Principle of Thermal Excitation Pattern in Infrared Thermal Wave Nondestructive Testing for Fiber Reinforced Composite

Zhao Shibin¹ Wu Naiming² Zhang Cunlin³ Liu Wenxia³ Li Xiaoxia² Li Hao² Yu Jiajie²

(¹ School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
² School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China
³ Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract The pattern of thermal excitation is one of the main factors which affect the detection reliability in infrared thermal wave nondestructive testing. The experiment is designed to establish the basic principle for selecting pattern of thermal excitation. In experiment, glass fiber reinforced laminate which embeds artificial defects is a tested object, and four patterns of thermal excitation are organized as follows: pulsed flash lamp, boiling-water bath, oven thermostatic heating, and pulsed ultrasound. The thermal stimulus-response signal which is the intensity of infrared radiation of specimen surface is acquired and processed. The influence of four heating ways on the testing results is analyzed and contrasted from three respects: signal to noise ratio of thermal imaging, curves of infrared radiation intensity, and degree of defect's detectable, and a basic principle for selecting pattern of thermal excitation for fiber-reinforced composites is gotten. In order to improve the detection reliability, this principle should be followed when selecting thermal excitation pattern.

Key words signal processing; thermal excitation; infrared thermal wave; fiber reinforced; nondestructive testing

1 引 言

纤维增强复合材料(FRP)具有抗疲劳性能好、

破损安全性好等优点, 已经成为航空、航天领域的重要结构材料^[1]。由于在纤维增强复合材料制造过程

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-06-03

作者简介: 赵石彬(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事复合材料无损检测与评估等方面的研究。

E-mail: zhao_shibin2002@163.com

导师简介: 伍耐明(1954—), 男, 副教授, 主要从事现代测控技术方面的研究。E-mail: wnm@buaa.edu.cn(通信联系人)

中难以对各种工艺参数实现精确控制以及复合材料所具有的材料与结构同时成形的特点,使得纤维增强复合材料构件中易于出现各类缺陷;另外,使用过程中,静载荷、机械损伤及疲劳等原因也会导致纤维增强复合材料结构中损伤的产生。缺陷和损伤的存在将会导致材料结构强度与刚度性能大大降低,对航空航天器的成功发射和安全运行构成威胁^[2]。因此,为得到符合航天要求的材料,需要采用必要的无损检测技术对纤维增强复合材料结构中的缺陷和损伤进行较为准确的检测^[3,4]。红外热波无损检测作为一门新兴的无损检测技术能够对纤维增强复合材料中的脱粘、分层等典型缺陷进行有效检测,且系统简单、检测效率高、检测效果清晰直观和检测结果准确可靠^[5],因而在材料无损检测中得到广泛应用。

本文针对性设计了预埋有不同深度盲孔的玻璃纤维增强复合材料试件,分别采用脉冲闪光灯、沸水水浴、烤箱和脉冲超声四种激励方式,利用红外热波无损检测系统分别进行实验,从热图的信噪比、红外辐射值分布变化和缺陷可检测度三个方面对比分析,综合考查四种热激励方式对检测结果的影响,得到纤维增强复合材料的热波检测中热激励源的选取原则,为纤维增强复合材料的红外热波无损检测热激励源的选择提供参考。

2 实验材料与方 法

2.1 实验材料

实验中使用的试件为玻璃纤维增强复合材料,层合板由正交双向编织的单层板层叠而成,厚度为 6 mm,纤维体积分数为 75%,热塑性树脂基体。在 ZXL-20 型多功能钻铣床上加工 5 个深度依次为 5, 4, 2, 3, 1.6 和 1 mm 的盲孔(图 1)模拟人工预埋缺

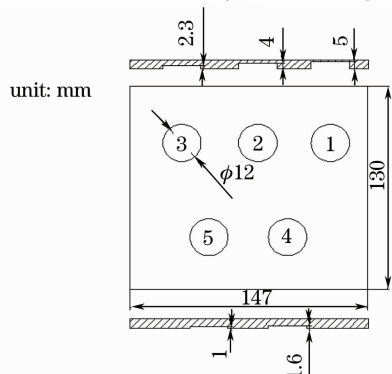


图 1 被检试件人工预埋缺陷设计图

Fig. 1 Schematic of investigated sample containing artificial defects

陷。试件无孔面作为检测面。5 个盲孔的编号如图 1 所示。

2.2 实验方法

红外热波无损检测技术是一种创新性的检测技术,其核心是针对各类试件,设计和选择不同特性的热源或机械振动对试件进行周期、脉冲和阶梯等函数形式的激励;采用现代红外成像技术,在计算机控制下进行时序热波信号探测和数据采集;使用基于热波理论模型和现代图像处理理论模型而研制的专用计算机软件进行实时图像信号处理和分析^[6,7]。

目前成熟的红外热波检测系统采用闪光灯脉冲作为激励方式,对被检物体进行主动控制式加热,利用红外热像仪探测、显示并记录其表面红外辐射及其变化,以获取材料的均匀性信息及其表面下的结构信息(如图 2)。此外,根据被检测物、检测环境和条件的不同,还可以采用超声波、热水水浴、电磁感应、电流、烤箱、机械振动等多种能够提供热扰动的激励方式^[8~11]。

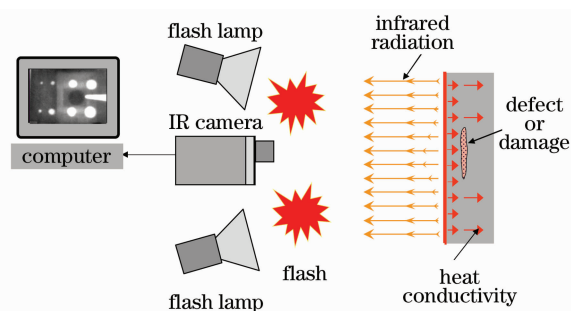


图 2 脉冲闪光灯激励红外热波无损检测技术原理图
Fig. 2 Schematic of the flash lamp excited infrared thermal wave non-destructive inspection (IR-TWI)

2.2.1 脉冲闪光灯法

脉冲闪光灯激励红外热波无损检测系统由热激励、热像仪和计算机图像处理系统三部分组成,如图 2 所示^[2]。用两个氙光闪光灯作为热激励源,同时对试样进行脉冲加热,光脉冲脉宽 2 ms,每个灯的最大能量为 4.8 kJ。热像仪采用瑞典 Therna CAMTM SC3000 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,320×240 的焦平面,温度灵敏度为 0.02 °C,探测波长为 8~9 μm,动态测量帧频可高达 180 frame/s。采用 MOSAIQ 图像处理软件进行后期图像处理。实验条件:采集频率 30 Hz,采集时间 90 s,闪光灯能量为 9.6 kJ。计算机控制系统触发闪光灯,对试样进行热激励,红外热像仪实时记录试样表面的温度场变化。以下实验中将关闭闪光灯热激励系统,改用

其他热激励方式进行加热,利用红外热像仪(采集频率 30 Hz)实时监测试件的降温变化过程。

2.2.2 热水水浴法

将玻璃纤维增强复合材料试件放入沸水中,加热 10 min 待试件热平衡后取出,迅速擦干水迹,放入热像仪视场,进行数据采集(采集时间 90 s)。

2.2.3 恒温烤箱法

将试件放入恒温箱内,调整温度到 120 ℃,恒温加热 15 min 后取出,放在热像仪视场内,用热像仪观察 120 s 内的降温过程。

2.2.4 脉冲超声波法

脉冲式超声红外热波无损检测技术利用可控、可调、短脉冲超声波激励试件,如果试件内部存在缺陷,超声能量将会引起缺陷部位发生机械振动(弹性波传播),缺陷的上下表面发生摩擦,在分层部位因热弹效应和滞后效应等原因导致声能衰减而释放出热量,形成对缺陷部位选择性的加热,最终引起局部温度升高,红外热像仪实时捕捉和采集材料表面温度场随时间的变化数据,通过后续分析得到缺陷信息(图 3)。实验条件:采集频率 30 Hz,采集时间 90 s,超声持续时间 1 s,加载力 250 N。

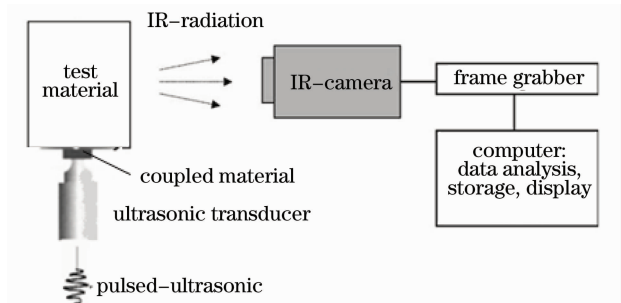


图 3 脉冲超声激励红外热波无损检测技术原理图

Fig. 3 Schematic of the pulsed ultrasonic excited infrared thermal wave non-destructive inspection

3 实验结果与分析

3.1 热图

图 4 为四种热激励方式下典型时刻的原始热图,采用伪彩色处理,颜色变化代表红外辐射值不同。由图知在图 4(a),(d)热图上不能确定较深的 4#、5# 缺陷是否存在;图 4(b),(c)可以确定 4#、5# 缺陷的存在。分析发现较深缺陷能否检出与热激励方式所能提供的能量有关。以试件的温升幅度作为衡量标准,实验中所使用的闪光灯脉冲热激励可以使试件检测面温度升高 10 ℃~20 ℃,脉冲超声热激励能使缺陷处升高 10 ℃左右;沸水水浴和烤

箱加热可以分别使试件温度整体升高 70 ℃和 90 ℃左右。由此可知在纤维增强复合材料的热波检测中,热激励方式所能提供的能量越大,可检测缺陷深度越深,缺陷检出率越高。

从热图图像均匀性角度分析,目前普遍采用的脉冲闪光灯热激励方式条件下热图图像质量最佳,试件表面温度场分布均匀[图 4(a)],缺陷易判别,可靠性高。沸水水浴、烤箱和脉冲超声热激励方式得到的热图都存在一定非缺陷引入的热不均匀性,遮蔽缺陷,影响结果判读。

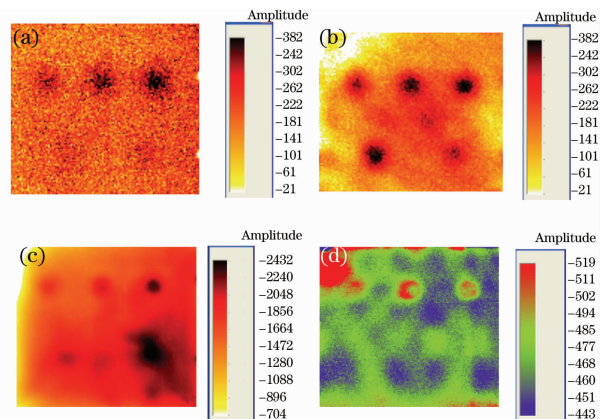


图 4 四种热激励方式得到的不同时刻热图。(a) 脉冲可见光激励,90 s,(b)沸水水浴激励,22 s,(c) 烤箱加热激励,102 s,(d)脉冲超声激励,4 s

Fig. 4 Different time thermal images of four excited modes. (a) flash lamp exciter, 90 s, (b) boiling water exciter, 22 s, (c) oven heating exciter, 102 s, (d) pulsed ultrasonic exciter, 4 s

以上从缺陷检出率、可检测深度和热图图像均匀性三个方面定性分析了四种激励方式下对玻璃纤维增强复合材料预埋缺陷的红外热波无损检测结果的影响。

3.2 红外辐射值变化曲线

3.2.1 1#~3# 缺陷红外辐射分布曲线

提取四种激励方式下试件检测面上排 1#~3# 三个缺陷直径方向(图 5 中虚线所示)上热激励响应信号——红外辐射值,作对应像元红外辐射值分布曲线(图 5),曲线的“峰”对应缺陷编号如图 5 所示。曲线的“谷”为对应虚线方向上无缺陷区域,脉冲闪光灯热激励热图中的红外辐射分布曲线的“谷”值相同[图 5(a)],说明该热激励方式加热时在检测面形成一个面热源,热向内部均匀传导,加热相对均匀。脉冲超声热激励检测热图的红外辐射值分布曲线也存在同样的情况[图 5(d)]。沸水水浴和烤箱恒温加热后的热波检测热图的红外辐射值分布曲线的“谷”值差

别较大[图 5(c)和(b)],这是因为实验 2.2.2 和 2.2.3 节中试件被加热至热平衡后,盲孔中的空气聚集热量,盲孔深度越深,所含有的热量越多。降温过程中

盲孔中的热量在横向方向上传导,在无缺陷区域形成温度梯度。这种横向温度梯度的变化将会对缺陷尺寸信息的获取造成一定的困难。

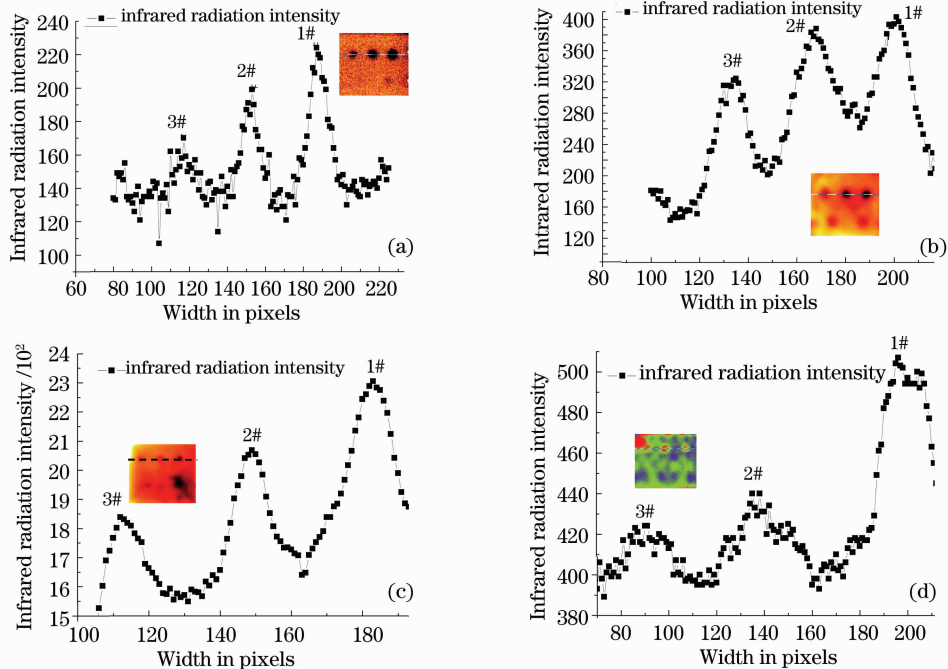


图 5 四种热激励方式下热波检测热图中 1#~3# 缺陷虚线方向对应像元上红外辐射值分布曲线。(a) 脉冲可见光激励, (b) 沸水水浴激励, (c) 烤箱加热激励, (d) 脉冲超声激励

Fig. 5 1#~3# defects in X-direction infrared radiation intensity distribution curve in thermal images of four excited mode. (a) flash lamp exciter, (b) boiling water excter, (c) oven heating exciter, (d) pulsed ultrasonic

分别提取四种热激励方式下红外辐射分布曲线上 3# 缺陷对应的红外辐射峰值,以及计算无缺陷区域 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 的平均红外辐射值(背景平均红外辐射值),得到一组信噪比如表 1 所示。沸水水浴热激励方式下热图的信噪比最高,其次是闪光灯脉冲,恒温烤箱和脉冲超声热图的信噪比最低。虽

然烤箱恒温加热方式下热波检测能够检出较深的 4# 和 5# 缺陷,但是其热图的信噪比较脉冲闪光灯热波检测热图的信噪比低。这说明缺陷检出率高的热激励方式,热图的信噪比不一定高,如果热波检测后期数据处理和缺陷信息判读时对信噪比有特殊要求,应注意考虑这一点。

表 1 不同热激励方式下 3# 缺陷信噪比

Table 1 Signal-to-noise ratio of 3# defects under different thermal excitation patterns

Infrared radiation intensity	Flash lamp	Boiling-water bath	Constant temperature	Pulsed ultrasound
Average value of background	130	210	1550	394
Peak value of response	174	330	1850	425
Signal-to-noise ratio	1.3	1.6	1.2	1.1

3.2.2 4#, 5# 缺陷红外辐射分布曲线

对距检测面 4.4 mm 和 5 mm 深的 4# 和 5# 缺陷进行红外辐射值分布和信噪比分析。图 6 是四种激励方式下试件检测面 4#, 5# 缺陷直径方向(虚线所示)的红外辐射值分布曲线,从图 6(a)可以看出缺陷 4#, 5# 缺陷的热激励响应信号几乎湮没在背景噪声中。图 6(b)~(d)的红外辐射值分布曲线在对应像元上变化,对应像元的位置,可以确认 4#, 5# 缺

陷存在。图 6 中各红外辐射分布曲线的“谷”值同样存在差别,图 6(a)和(d)中的曲线自身“谷”值一致,图 6(b)和(c)谷值沿虚线方向存在变化。这就验证了 3.2.1 节中关于沸水水浴和烤箱加热两种热激励方式可以导致横向热梯度变化的分析。

利用 3.2.1 节的方法得到 5# 缺陷的信噪比如表 2 所示。从信噪比的对比可以看出,沸水水浴加热激励方式下,5 mm 深缺陷的信噪比最高,检测结

果最可靠。图 6(d) 曲线上 5# 缺陷对应的红外辐射值相对无缺陷区域有变化,但是信噪比趋近于 1,对

于脉冲超声热激励,仅凭红外辐射值分布曲线难以确定缺陷的存在。

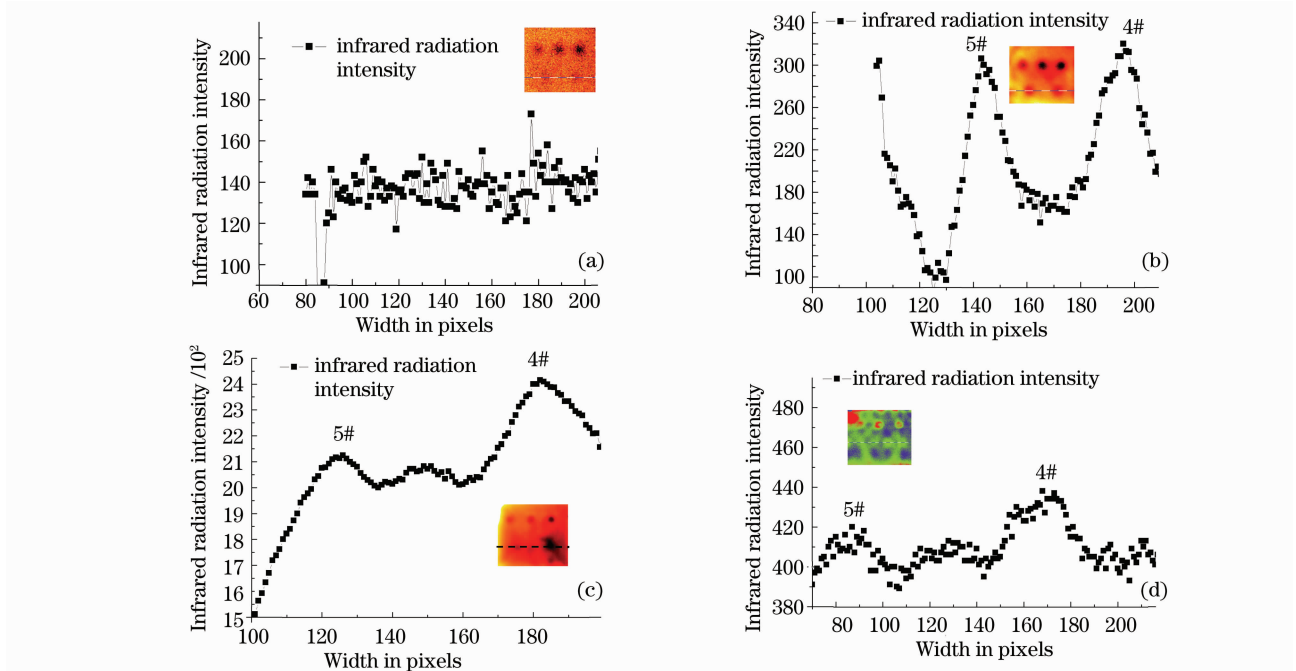


图 6 四种热激励方式下热波检测热图中 4#~5# 缺陷虚线方向对应像元上红外辐射值分布曲线。(a) 脉冲可见光激励, (b) 沸水水浴激励, (c) 烤箱加热激励, (d) 脉冲超声激励

Fig. 6 4#~5# defects in X-direction Infrared radiation intensity distribution curve in thermal images of four excited mode. (a) flash lamp exciter, (b) boiling water exciter, (c) oven heating exciter, (d) pulsed ultrasonic

表 2 不同热激励方式下 5# 缺陷信噪比

Table 2 Signal-to-noise ratio of 5# defects under different thermal excitation patterns

Infrared radiation intensity	Flash lamp	Boiling-water bath	Constant temperature	Pulsed ultrasound
Average value of background	135	170	1980	400
Peak value of response	140	310	2140	413
Signal-to-noise ratio	1.0	1.8	1.1	1.0

通过以上实验结果分析发现脉冲闪光灯热激励可以实现可控、可调,热图均匀性好,检测结果可靠,但由于其所能提供的热量受限于自身设计,不能检测较深缺陷;热水浴加热方式能提供的热量多,加热均匀,提高了检测深度,图像信噪比高,但是若用户有特殊用途和要求,如不能水浸的纤维增强复合材料构件,就不能使用该方法;恒温电烤箱所能提供的热量变化范围大,热量高,可检测深度范围大;但由于试件在烤箱中加热时与烤箱加热部位的相对位置不同,导致加热不均,影响结果判读;热超声激励源是目前一种新兴的热激励方式,从检测结果看,超声波在复合材料内部传播时与材料发生某种相互作用,在热图上形成不规则条纹热异常区域,产生这现象的机理还不清楚。从脉冲超声激励的原理和检测结果可以看出热超声不适于盲孔这种开放式缺陷的检测。

4 结 论

基于实验对比分析,综合考查四种热激励方式下试样热图的信噪比、红外辐射值分布曲线、缺陷可检测度三个方面,针对纤维增强复合材料的热波检测中热激励源选取应遵循以下原则:

- 1) 纤维增强复合材料中深度在 4 mm 以下的缺陷检测时,热激励源的选取应考虑激励方式所能提供的能量大小。
- 2) 对于不怕水浸的构件可尝试采用沸水水浴、烤箱加热和电热毯等方便易行的热激励方式。
- 3) 如果缺陷深度在 4 mm 以上且对可靠性要求比较高,应考虑使用技术成熟的、激励可控可调的脉冲闪光灯热激励方式。
- 4) 对于纤维增强复合材料构件上的闭合裂纹,应选用脉冲超声作为激励源。

为提高检测可靠性,热波检测时热激励源的选择应遵循上述原则,根据纤维增强复合材料构件的尺寸、材料属性、缺陷类型,从检测所需能量、检测深度、热图质量和信噪比等方面综合考虑,合理选择热激励方式。

参 考 文 献

- 1 W. K. Kim, O. O. Ochoa, C. A. Miller. Axial and burst analysis of off shore composite risers[C]. Proceedings of 20th annual technical conference of the american society for composites, Philadelphia, America, 2005, **9**: 26~31
- 2 L. D. Favror, P. K. Kuo, K. L. Thomas. Thermal wave imaging for NDE of composites and coatings[C]. *SPIE*, 2002, **2944**: 233~235
- 3 Lawrence D. Favor, Xiaoyan Han, Robert L. Thomas. Thermal wave imaging of defects in fiber-reinforced composites [C]. *SPIE*, 2005, **3397**: 132~134
- 4 Clemente Ibarra-Castanedo, Ermanno Grinzato, Sergio Marinetti. Recent progresses in the inspection of aerospace components by infrared thermography [C]. 17th World Conference on Non-Destructive Testing, 2008, **211**: 450~454
- 5 Shibin Zhao, Cunlin Zhang, Naiming Wu *et al.*. Infrared thermal wave nondestructive testing for rotor blades in wind turbine generators non-destructive evaluation and damage monitoring[C]. *SPIE*, 2009, **7383**: 278~285
- 6 Li Yanhong, Zhao Yuejin, Feng Lichun *et al.*. Quality evaluation of carbon fiber floor coating with infrared thermal wave nondestructive testing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1489~1492
李艳红, 赵跃进, 冯立春等. 碳纤维基体涂层质量的红外热波检测研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1489~1492
- 7 Zhao Shibin, Zhang Cunlin, Wu Naiming *et al.*. Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 456~460
赵石彬, 张存林, 伍耐明等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 456~460
- 8 Xiaoyan Han, V. Loggins, Zhi Zeng. Mechanical model for the generation of acoustic chaos in sonic infrared imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **34**(5): 23~28
- 9 L. D. Favro, Xiaoyan Han, Zhong Ouyang. Sonic IR imaging of cracks and delaminations[C]. The Japan Society for Analytical Sciences, 2001, **17**(2): 55~62
- 10 Xavier P. V. Maldague, Patrick O. Moore. Infrared and Thermal Testing Evaluation [M]. *Nondestructive Testing Handbook*, 2001. 15~20
- 11 Chen Dapeng, Zhang Cunlin, Li Yanhong. Ultrasonic burst phase thermography and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 107~110
陈大鹏, 张存林, 李艳红. 超声脉冲相位热成像技术及其应用实例[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 107~110