

# 采用缺陷宽深比系数定量研究缺陷尺寸对 缺陷深度测量的影响

曾 智<sup>1,2,3</sup> 陶 宁<sup>1,2</sup> 冯立春<sup>1,2</sup> 张存林<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>首都师范大学物理系,北京市太赫兹波谱与成像重点实验室;北京 100048

<sup>2</sup>首都师范大学物理系,太赫兹光电子学教育部重点实验室;北京 100048

<sup>3</sup>重庆师范大学物理与电子工程学院,重庆 400047

**摘要** 以表面阳极化处理后的铝和玻璃钢材料为例,在其背面加工 6 个不同深度的平底楔形槽。采用脉冲红外热波技术作为实验方案,提取所获得的热图序列楔形槽内不同缺陷宽深比(RDSD)的热波降温数据,来近似模拟相同深度缺陷受到不同程度的三维热扩散的影响。基于一维热传导模型分析了几种方法的测厚原理,并对所提取热波数据进行计算,比较了相同缺陷深度不同缺陷尺寸对缺陷深度测量的影响规律。结果表明各方法所对应特征时间随 RDSD 系数增大而近似线性增大,且深度更大或被测件热扩散系数更小时其斜率更大。

**关键词** 脉冲红外热波;缺陷深度;缺陷宽深比;三维热扩散

中图分类号 O434.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s108005

## Adopting the Ratio of Defect Size Over Depth to Quantitatively Study the Effect of Defect Size on the Measurement of Defect Depth

Zeng Zhi<sup>1,2,3</sup> Tao Ning<sup>1,2</sup> Feng Lichun<sup>1,2</sup> Zhang Cunlin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>3</sup>Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

**Abstract** One aluminum sample whose surface was treated with anode oxidation and one fiber reinforced plastics sample were used in this study, one side of both samples were milled six flat-bottom wedges with different depth. Pulsed thermography was used to obtain the temperature decay data series, the temperature-time curves of different positions in each wedge were extracted to approximately simulate that the same depth defects were affected with different levels of three-dimensional heat diffusion, and the extracted data can also approximately represent the temperature decay of defects with different ratio of defect size over defect depth (RDSD). The theoretical procedures of thickness measurement were analyzed based on one-dimensional heat conduction model, and the corresponding results were analyzed to compare how the defect size influences the defect depth measurement under the same thickness. The results indicate that the characteristic times of different methods approximately linearly increase with RDSD, and its slope is bigger when defect is deeper or thermal diffusivity is smaller.

**Key words** pulsed thermography; defect depth; ratio of defect size over defect depth; three-dimensional heat diffusion

**OCIS codes** 110.3080; 110.6820; 120.4290

## 1 引 言

脉冲红外热波无损检测技术是 20 世纪 90 年代

后发展起来的一种无损检测技术。通过主动对被检测物体施加脉冲热激励,使物体内部的异性结构以

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(10804078,61079020)和重庆市教委资助项目(KJ100605)资助课题。

作者简介: 曾 智(1973—),男,硕士,副教授,主要从事红外无损检测技术方面的研究。E-mail: zzh406@hotmail.com

表面温场变化的差异形式表现出来,采用红外热像仪连续观测和记录物体表面的温场变化,并对序列热图结果进行处理和分析,以实现物体内部异性结构的定性和定量测量<sup>[1~5]</sup>。

缺陷深度或者被测件厚度测量是脉冲红外热波无损检测技术定量测量的一个重要应用,一般都是通过获得温度时间曲线中的某特征时间进行计算。热对比度峰值(PCT)法采用缺陷区域减掉参考区域温度曲线的峰值时刻作为特征时间<sup>[5~8]</sup>;热对比度变化率峰值(PST)法采用缺陷区域减掉参考区域温度曲线的一阶微分峰值时刻作为特征时间<sup>[9~11]</sup>;对数温度-对数时间曲线分离法采用对数温度-对数时间曲线中缺陷和非缺陷区域的分离时刻作为特征时间<sup>[12,13]</sup>。以上3种方法都需要首先选定参考曲线,参考曲线可从无缺陷区域选择,也可以整个试件表面平均温度作为参考区域<sup>[11]</sup>,或以热波降温数据的前几帧进行拟合而自动得到参考曲线<sup>[14]</sup>。对数温度-对数时间二阶微分峰值(PSDT)法以对数温度-对数时间曲线的二阶微分峰值时间作为特征时间,该方法不需要参考曲线<sup>[15]</sup>。上述4种方法所对应的特征时间都与缺陷深度或试件厚度平方成线性关系,本文仅对这4种方法进行测厚研究。脉冲红外热波技术测厚方法还有直接对降温曲线线性段进行拟合直接测厚<sup>[5,16]</sup>或转换到频域测厚<sup>[17~19]</sup>等,本文不作对比。

上述方法都是基于一维热传导模型,而实际测厚应用都是针对有限缺陷尺寸,不同缺陷尺寸所产生三维热扩散将对测量结果产生影响。本研究选取表面阳极化处理后的铝材料和玻璃钢(FRP)材料作为试件,以脉冲红外热波技术作为实验方案。研究和比较对于相同缺陷深度情况下,不同缺陷尺寸和缺陷深度比不同测厚方法计算结果的影响规律。

## 2 脉冲红外热波理论

脉冲红外热波技术实验装置如图1所示,两个

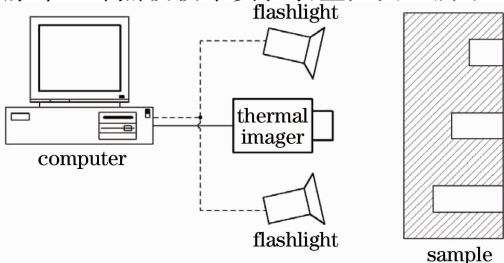


图1 脉冲红外热波实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of pulsed thermography

高能脉冲闪光灯用于瞬时加热被测试件表面,试件表面吸热而升温,热量由表面向内部传导,从而引起表面温度的降低。当试件内部有缺陷或结构异常时,将以对应表面温场异常形式表现出来。红外热像仪用于记录试件表面降温过程,通过对热波降温序列进行处理和分析,可实现被测试件内部缺陷的定性和定量测量。对半无穷大均匀介质,受平行于介质表面的均匀脉冲平面热源作用时,热传导方程可简化为<sup>[1]</sup>

$$k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -q\delta(t)\delta(x) \Big|_{x=0, t=0} \quad (1)$$

式中  $T(x,t)$  是  $t$  时刻  $x$  处的温度,  $q\delta(t)\delta(x)$  是脉冲热源函数,  $q$  为常数,是在单位面积上施加的热量,  $k[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$  是热传导率。密度  $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$  与比热  $c$  的乘积是介质材料的体热容。热扩散系数为  $\alpha = k/(\rho c)$ 。对某一特定介质,一般情况下  $\alpha$  可视为常数。

当被测试件无缺陷时,热传导方程的解为

$$\Delta T(0,t) = \frac{q}{e \sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

式中  $e$  为被测件的蓄热系数。当物体表面下有缺陷或者被测件较薄时,热传导方程的解为

$$\Delta T(0,t) = \frac{q}{e \sqrt{\pi t}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 d^2}{at}\right) \right] \quad (3)$$

其中  $n$  为脉冲传播到两种材料界面发生的  $n$  次反射,  $d$  为被测件厚度(或缺陷深度)。

## 3 试 件

选取表面阳极化处理后的铝材料和 FRP 材料作为试件,两个试件的尺寸都是  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ,分别在其背面加工 6 个不同深度的楔形槽,厚度从 2 mm 到 7 mm,每个槽厚度差为 1 mm。其中,铝的每一个槽尺寸完全一样,FRP 的每一个槽尺寸也完全一样,但是铝和 FRP 的楔形槽的尺寸略有区别。对两个试件进行脉冲红外热波实验后,每个孔提取 6 个点进行不同厚度测量方法比较。如图 2(a)所示试件俯视图,每个槽在如图所示纵向上 7 等分,所提取的每个槽对应的点且位于楔形槽的对角线上,所提取的 6 个点用  $k_1 \sim k_6$  表示。图 2(b)为楔形槽的剖面图,定义该槽的缺陷宽深比(RDSD)系数  $k$  为

$$k = L/d \quad (4)$$

式中  $L$  为楔形槽内所提取点位置横向宽度,  $d$  为对

应的楔形槽深度。以楔形槽中纵向不同位置处不同宽度来近似模拟缺陷尺寸,并以此进行相同缺陷深度情况下缺陷尺寸对缺陷深度测量影响的研究。

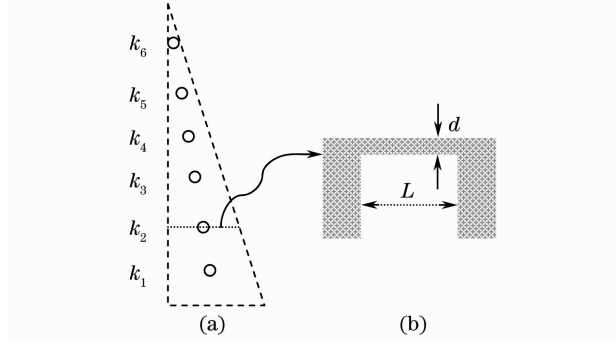


图 2 (a) 试件所提取不同 RDS 位置示意图;  
(b) 楔形槽剖面尺寸图

Fig. 2 (a) Diagram of different RDS positions;  
(b) sectional drawing of wedge

## 4 测厚计算

### 4.1 PCT 法

热对比度定义为缺陷区域信号减掉参考区域信号,参考区域通常选作无缺陷区域,可近似表达为(3)式与(2)式相减:

$$\Delta T_{TC} = \frac{2q}{e\sqrt{\pi t}} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 d^2}{at}\right), \quad (5)$$

PCT 法中特征时间为  $\Delta T_{TC}$  峰值对应时间  $t_{pct}$ ,对(5)式求导且不考虑多次反射时,可获得该峰值时间与缺陷深度有如下关系:

$$t_{pct} = \frac{2d^2}{\alpha}, \quad (6)$$

也就是  $t_{pct}$  与缺陷深度平方成正比,利用上述关系分别对铝和 FRP 试件 2 mm 和 3 mm 楔形槽内按如图 2 所示提取的热波信号进行处理,同时提取一无孔区域对应表面处热波降温信号作为参考曲线。图 3 为铝材料 2 mm 楔形槽内 6 个不同  $k$  值处的热对比度曲线,由图可见,随着  $k$  值的增大, $t_{pct}$  也增大。图 4 和图 5 分别为铝和 FRP 试件中 2 mm 和 3 mm 楔形槽内不同  $k$  值位置处,PCT 法计算结果比较。由图 2 和 3 可以看出,随着  $k$  值增大, $t_{pct}$  也增大,这是由于更小的  $k$  值处对应的热量比更大  $k$  值处向邻近的无缺陷处传导更快,导致其降温更快,因而  $k$  值小的位置其对应  $t_{pct}$  更小。且  $t_{pct}$  在相同厚度情况下与  $k$  大致成线性,对图 4 和图 5 中曲线进行线性拟合后,其斜率如表 1 所示。由表 1 可以看出较大深度处其斜率更大,也就是较大深度时的  $t_{pct}$  受  $k$  值影

响更大。而 3 mm 和 2 mm 的线性斜率相比,FRP 比值大于铝,说明相同条件下,PCT 法中热扩散系数小的材料受 RDS 影响更大。

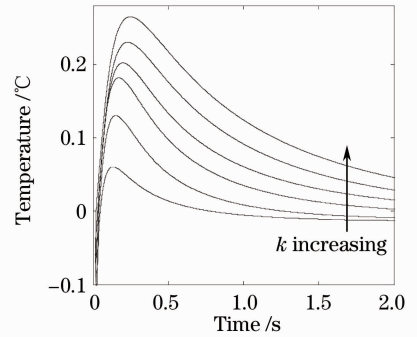


图 3 铝试件 2 mm 槽内 PCT 曲线

Fig. 3 PCT curves of 2 mm aluminum wedge

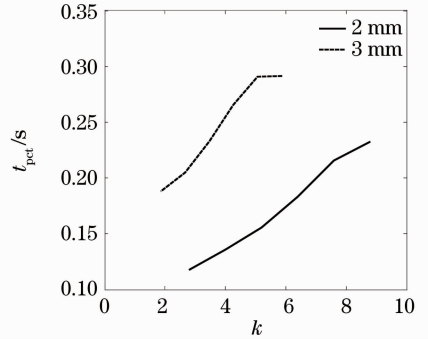


图 4 铝试件 PCT 与  $k$  关系曲线

Fig. 4 PCT over  $k$  of aluminum

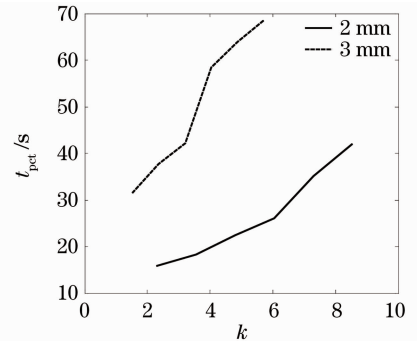


图 5 FRP 试件 PCT 与  $k$  关系曲线

Fig. 5 PCT over  $k$  of FRP

### 4.2 PST 法

PST 法中,特征时间是热对比度曲线一阶微分的峰值对应时刻。该方法是在热对比度曲线的基础上进行一阶微分处理,也就是对(5)式求二阶微分可获得其峰值对应时间<sup>[5]</sup>为

$$t_{pst} = \frac{3.64d^2}{\pi^2 \alpha}, \quad (7)$$

表 1 特征时间-RDSD 曲线斜率对比

Table 1 Slope comparison of characteristic time over RDSD

	PCT		PST		PSDT	
	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm	2 mm	3 mm
Al	0.02	0.0288	0.0006	0.0009	0.2698	0.303
FRP	4.217	9.601	0.0033	0.0045	0.176	0.4937

$t_{pst}$  与缺陷深度平方成正比。图 6 为铝材料 2 mm 楔形槽内 6 个不同  $k$  值处的热对比度变化率曲线, 由图 6 可见, 随着  $k$  值的增大,  $t_{pst}$  也增大。图 7 和图 8 分别为铝和 FRP 试件中 2 mm 和 3 mm 楔形槽内不同  $k$  值位置处, PST 法计算结果比较。由图 7 和 8 可以看出,  $t_{pst}$  与  $k$  不具有 PCT 法中较好的线性关

系, 且  $t_{pst}$  的波动范围相对较小。对图中曲线拟合求其斜率, 如表 1 所示, 其斜率很小, 可近似认为 PST 法不受  $k$  值影响。

### 4.3 对数温度-对数时间分离法

对数温度-对数时间分离法是以缺陷曲线和参考曲线对数温度-对数时间的分离时刻作为特征时间, 且该时间也与缺陷深度平方成正比, 从而达到缺陷深度测量目的。图 9 以 FRP 试件为例说明该方法, 分别选取 2, 3 和 4 mm 3 个楔形槽内两个不同  $k$  值处以及一个参考曲线的热波降温信号, 作出其对应的温度-时间对数 ( $\ln T - \ln t$ ) 曲线, 每条缺陷曲线与参考曲线分离时刻作为特征时间。图 9 中 3 条虚线分别用于大致表示 3 个不同深度降温曲线与参考曲线的分离时刻点。由图 9 可看出, 相同槽内不同  $k$  值对应曲线与参考曲线的分离时刻基本一致, 只是分离后信号强度不一样, 因而可以认为该方法不受  $k$  值影响。但是由图 9 也可以看出, 缺陷曲线与参考曲线的分离点比较难确定, 因而没有深入讨论该方法的实际计算问题。

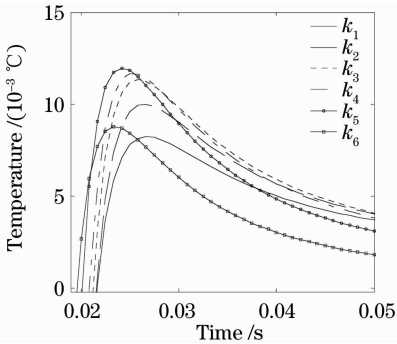


图 6 铝试件 2 mm 槽内 PST 曲线

Fig. 6 PST curves of 2 mm aluminum wedge

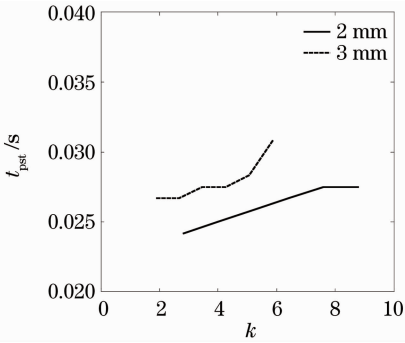


图 7 铝试件 PST 与  $k$  关系曲线

Fig. 7 PST over  $k$  of aluminum

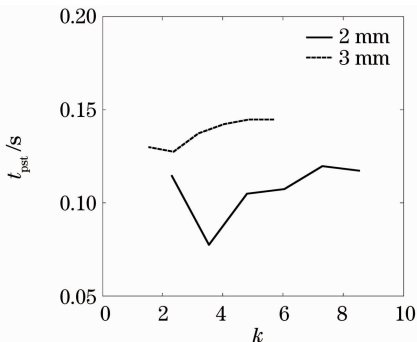


图 8 FRP 试件 PST 与  $k$  关系曲线

Fig. 8 PST over  $k$  of FRP

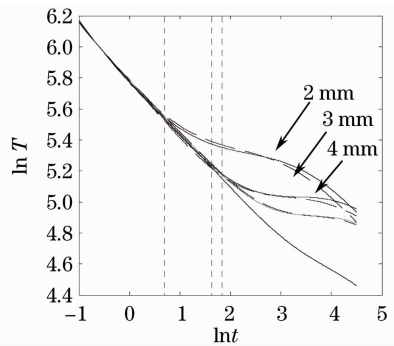


图 9 FRP  $\ln T - \ln t$  曲线

Fig. 9  $\ln T - \ln t$  curves of FRP

### 4.4 PSDT 法

以上所讨论的 3 种方法都需要参考曲线, 在某些情况下参考曲线比较难确定, 同时也引入了额外的误差。PSDT 法不需要参考曲线, 直接对待处理信号作对数温度-对数时间的二阶微分处理, 其峰值时刻作为特征时间<sup>[5]</sup>:

$$t_{psdt} = d^2 / (\pi\alpha). \quad (8)$$

图 10 为铝试件 2 mm 槽内不同  $k$  值进行对数温度-对数时间二阶微分处理后的曲线, 取其第 2 个

极大值对应时刻作为  $t_{psdt}$ ，由图 10 可见，随着  $k$  值的增大， $t_{psdt}$  也增大。图 11 和图 12 分别为铝和 FRP 试件中 2 mm 和 3 mm 楔形槽内不同  $k$  值位置处，PSDT 法计算结果比较。由图 11 和 12 可以看出，随着  $k$  值增大， $t_{psdt}$  也增大。由于 PSDT 法需要对降温数据做曲线拟合及二次微分，而峰值时间对上述操作很敏感。从表 1 中的斜率计算结果也可以看出，对于铝试件，2 mm 和 3 mm 楔形槽的斜率相差不大。而对于 FRP 时间来说，两个不同厚

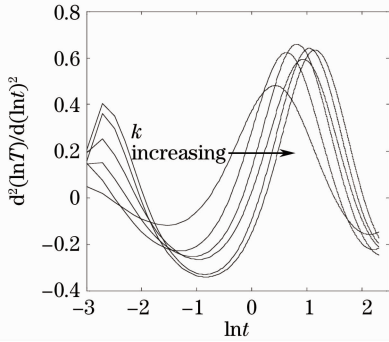


图 10 铝的对数温度-对数时间二阶微分曲线  
Fig. 10 Second-order derivatives of aluminum  
ln T-ln t curves

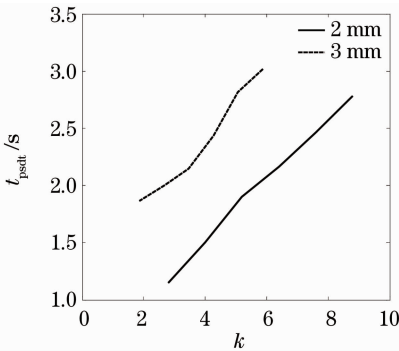


图 11 铝试件 PSDT 与  $k$  关系曲线  
Fig. 11 PSFT over  $k$  of aluminum

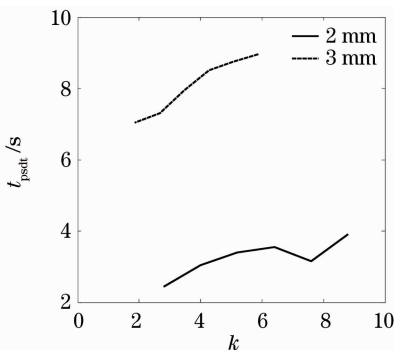


图 12 FRP 试件 PSDT 与  $k$  关系曲线  
Fig. 12 PSFT over  $k$  of FRP

度的楔形槽斜率相差较大，且 2 mm 的 FRP 试件斜率小于 2 mm 的铝试件斜率。

#### 4.5 不同方法比较

上述 4 种方法所获得的特征时间均与缺陷深度平方成正比，且其中 3 种方法给出了明确的关系式。但在实际应用中，由于所讨论的三维热扩散影响，因而很少直接应用公式直接进行厚度测量，而是利用特征时间与缺陷深度平方的线性关系进行计算。

在所给出计算公式的 3 种方法中， $t_{psdt} < t_{pst} < t_{pct}$ ，特征时间越小，受三维热扩散影响也越小，因而 PSDT 法从理论上精度应该优于 PST 法，而 PCT 法精度最差。但是从上述分析来看，PSDT 和 PCT 法受 RSDS 系数  $k$  值影响很大。同时，图 11 和图 12 中所提取的特征时间  $t_{psdt}$  对应于图 10 中二阶微分的第 2 个极大值时刻，而如果选择第 1 个极大值时刻的话，对于所选定的两个试件又不能真实反应缺陷深度信息。但图 11、图 12 和图 7、图 8 相比较发现  $t_{psdt} > t_{pst}$ ，该关系与理论关系相反。

PST 法 RSDS 系数  $k$  影响较小，且其特征时间较靠前，在实际应用中使用该方法比其它方法受缺陷尺寸影响更小。但是在实际应用时，需根据所测试件的热特性等条件对 PST 计算过程中所涉及的曲线拟合各参数进行优化。

## 5 结 论

选取表面阳极化处理后的铝材料和 FRP 材料作为试件，分别在其背面加工 6 个不同深度的楔形槽。以脉冲红外热波技术作为实验方案，分析了 PCT 法、PST 法、对数温度-对数时间分离法以及 PSDT 法这 4 种测厚方法的原理，这 4 种方法所对应的特征时间均与缺陷深度平方成正比。利用这 4 种方法对所相同缺陷深度不同缺陷尺寸时所获得的热波降温数据序列进行处理，各方法特征时间与 RSDS 系数近似成线性关系，且随该系数增大而增大。处理结果表明，热对比度峰值法和 PSDT 法所获得的特征时间受 RSDS 影响较大，而 PST 法和对数温度-对数时间分离法受 RSDS 影响较小，可近似看作与宽深比无关。在实际应用中，热对比度变化率峰值法计算简单，且受缺陷尺寸影响小，可获得较高精度。

### 参 考 文 献

- 1 Maldague X. . Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography[M]. New York: Springer, 1993
- 2 Steven M. Shepard. Flash Thermography of Aerospace Composites[C]. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007
- 3 D. P. Almond, S. K. Lau. Defect sizing by transient thermography I. An analytical treatment [J]. *J. Phys. D.*

- Appl. Phys.*, 1994, **27**(5): 1063~1069
- 4 Tang D. W., He G. H., Zhou B. L.. Effects of finite absorption depth and infrared detector non-linearity on thermal diffusivity measurement of thin films using the flash method[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**: 4249~4253
- 5 Sun J. G.. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction[J]. *J. Heat Transfer*, 2006, **128**(4): 329
- 6 V. Vavilov, T. Ahmed, J. Jin *et al.*. Experimental thermal tomography of solids by using the flash one-side heating[J]. *Sov. J. NDT*, 1990, **12**: 60~66
- 7 L. D. Favro, H. J. Jin, Y. X. Wang *et al.*. IR thermal wave tomographic studies of structural composites [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1991, **11A**(2): 447~451
- 8 Favro L. D., Han X., Wang Y. *et al.*. Pulse-echo thermal wave imaging[J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1995, **14**: 425~429
- 9 Favro L. D., Han X., Kuo P. K. *et al.*. Imaging the early time behavior of reflected thermal wave pulses [J]. *SPIE, Thermosense XV* [ ], 1995, **2473**: 162~166
- 10 Han X., Favro L. D., Kuo P. K. *et al.*. Early-time pulse-echo thermal wave imaging[J]. *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, 1996, **15**: 519~524
- 11 Ringermacher H. I., Archacki Jr. R. J., Veronesi W. A.. Nondestructive testing; transient depth thermography; US, 5711603.[P]. 1996-10-30
- 12 Xiaoyan Han, L. D. Favro, R. L. Thomas. Thermal wave NDI of disbonds and corrosion in aircraft [C]. Williamsburg: the Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft, 1998, NASA/CP-1999-208982: 265~274
- 13 Xiaoyan Han, L. D. Favro, R. L. Thomas. Quantitative defect depth measurements for NDE of composites[C]. Proc. Am. Soc. Composites, 1998. 1077~1081
- 14 M. Pilla, M. Klein, X. Maldague *et al.*. New absolute contrast for pulsed thermography[C]. QIRT, 2002. 53~58
- 15 Shepard S. M., Lhota J. R., Rubadoux B. A. *et al.*. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(5): 1337~1342
- 16 Sun J. G.. Method for determining defect depth using thermal imaging; US, 6542849[P]. 2003-4-1
- 17 Maldague X. P., Marinetti S.. Pulse phase infrared thermography[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(5): 2694~2698
- 18 Clemente Ibarra Castanedo. Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography; Depth Retrieval with the Phase[D]. Canada: University of Laval, 2005
- 19 Ibarra-Castanedo C., Maldague X.. Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on plexiglas and Aluminum samples[C]. SPIE, Thermosense XXVI, 2004, **5405**: 348~355

栏目编辑:李文誌