

基于脉冲红外热像法的表面下识别的有限元模拟

陶 宁 曾 智 冯立春 孔德娟 张存林

(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, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 利用 ANSYS 有限元分析软件对不锈钢平底孔两种深度 4 种缺陷试件进行建模, 施加单面热流, 模拟了脉冲红外热成像检测过程。计算被检不锈钢表面的温度变化和分布, 提取相应缺陷表面对应区域的降温曲线, 计算不锈钢-缺陷界面热反射系数, 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。考察了有限元分析方法用于表面下缺陷类型识别的可行性, 为进一步进行脉冲红外热成像用于表面下识别检测提供借鉴。

关键词 测量; 脉冲红外热成像; 表面下识别; 有限元方法; 反射系数; 热传导

中图分类号 O59 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108010

Finite Element Modeling of Subsurface Recognition for Pulsed Thermography

Tao Ning Zeng Zhi Feng Lichun Kong Dejuan 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 ANSYS is used to simulate the detection process of pulsed thermography, and it simulates one steel sample with two depths and four kinds of defects under the excitation of planar heat flow. The temperature evolution and distribution of the detected surface of steel sample are calculated, the temperature decay curves corresponding to the defects areas are extracted to calculate the reflective coefficients of the interface between steel and defects, and the calculation results are compared with the experimental results of pulsed thermography. The possibility of identifying the subsurface defect characteristics by finite element (FE) modeling is studied, and it can be used as reference for pulsed thermography to be used for quantitatively detection.

Key words measurement; pulsed thermography; subsurface recognition; finite element method; reflection coefficient; heat transfer

OCIS codes 120.4290; 040.3060; 040.6808

1 引 言

脉冲红外热成像技术由于其非接触、单面检测、检测速度快以及检测结果直观等优势被广泛应用于航空航天、汽车制造以及新材料等诸多领域^[1~5]。其中, 脉冲红外热成像用于无损定量测量成为近年来研究的热门课题。用有限元(FE)方法对被检物体进行建模, 研究模拟脉冲红外热成像无损检测的过程, 可为真实红外无损检测提供理论依据以及最佳检测方案、提高检测精度, 同时为进一步定量测量缺陷的特征提供一个有效手段。

目前利用脉冲红外热像法对材料表面下缺陷深度的定量测量研究较多, 关于利用脉冲热像法定量测量材料热物性参数的研究主要包括材料热扩散系数的定量测量以及对多层结构材料的整体表观蓄热系数的测量^[5~10]。该技术用于测量表面下缺陷的热物性参数的方法较少, 本课题组采用脉冲红外热波技术在空气参考孔的基础上实现了缺陷热反射系数的测量^[11]。本文将针对利用脉冲红外热像法对材料表面下缺陷的热物性参数的定量测量, 利用有限元分析 ANSYS 软件进行红外热像法对表面下识

收稿日期: 2012-05-20; **收到修改稿日期**: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(10804078)和国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(U1233120)资助课题。

作者简介: 陶 宁(1978—), 女, 博士, 讲师, 主要从事红外无损检测技术方面的研究。

E-mail: ningtao-phy@mail.cnu.edu.cn

别的数值模拟,与实际检测结果对比,为进一步进行脉冲红外热成像用于表面下识别检测提供借鉴。

2 表面下缺陷识别原理

脉冲红外热成像方法以热波理论为理论依据,当物体表面受到一个平行于物体表面的均匀脉冲热源的作用后,热流将以热波的形式在物体内部传播,热波遇到物体内部缺陷或异性结构界面时,会发生反射,因而影响其相应表面的温度变化和温场分布。同时利用高速红外热像仪连续探测和记录被检试件的表面温度变化,经过数据分析和处理后即可实现对物体内部缺陷或损伤的定量测量。

当物体表面下存在缺陷或结构不均匀时,可简化成两层介质结构一维模型,这里假定物体表面对脉冲热源能量完全吸收,且满足边界条件及能量守恒定律,通过求解热传导方程,可得到物体表面温度的解析解为^[12]

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

式中 t 为时间, e 为材料的蓄热系数,热波在介质 1 (被检物体) 中传播,遇到介质 2 (缺陷) 界面发生反射的热反射系数 R 可表示为^[13]

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}, \quad e = \sqrt{k\rho c}, \quad (2)$$

k 是热传导率, e 为密度, c 为比热容, e 为材料的蓄热系数, Q 为常数,表示单位面积上施加的热量, L 为缺陷深度或第一层结构材料的厚度, n 为热波传播到两种材料界面发生的反射次数。

实际应用中通常减去无缺陷区域表面温度参考值得到对比温度,即

$$\Delta T_C(0,t) = \frac{2Q}{e_1\sqrt{\pi t}} \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(\frac{-n^2 L^2}{\alpha_1 t}\right). \quad (3)$$

式中 e_1 和 α_1 分别表示本底材料的蓄热系数及热扩散系数。当进行表面下缺陷定量识别时,可通过计算本底-缺陷界面热波反射系数来获得缺陷材料的蓄热系数,从而实现表面下识别的目的^[11]。

3 脉冲红外热成像表面下识别有限元模拟分析

将有限元分析方法应用于红外无损检测中,可根据实际检测条件和参数进行相应的试件建模、热激励加载,同时可排除真实检测过程中噪声、加热不均及试件制作等复杂条件影响,模拟结果可为实际

检测过程提供理论参考,优化其检测过程,为脉冲红外热像法用于表面下识别提供一个有效的分析手段。

3.1 有限元三维建模

应用 ANSYS 有限元分析软件对不锈钢两种深度平底孔预埋 4 种类型缺陷进行了三维(3D)建模,单元类型为 Solid87,网络划分为自由划分方式,体大小设置为 0.003 m。建构三维模型如图 1 所示,模型尺寸为 400 mm×100 mm×20 mm,距离加载面 L (1.1 mm 和 2.0 mm) 深度处模拟 4 个圆柱形平底孔($\phi 25$ mm),在平底孔中再建立 4 个形状相同圆柱形,分别模拟空气、油、蜡和水 4 种材料。本底材料模拟不锈钢。

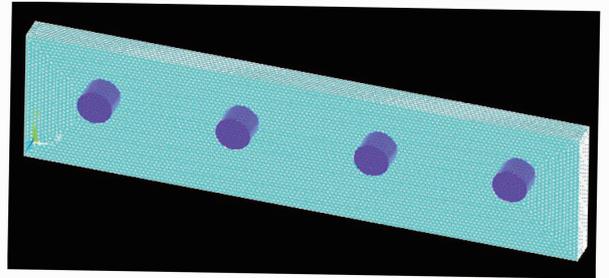


图 1 平底孔预埋缺陷有限元模拟三维模型示意图
Fig. 1 Geometry of the 3D model for the flat-bottom hole sample

模拟脉冲热激励采用热流密度热载荷方式,进行多步加载,以完成热激励和降温的两个计算过程。热流密度值设置为 8×10^6 W/m²,加载时间设置为 0.001 s。环境温度设置为 20 °C,且只考虑热传导过程,忽略加载表面的热对流及热辐射影响。模拟计算边界条件设置理想绝热条件,无能量损失。

3.2 有限元模拟结果

由于有限元模拟计算量大,表面下识别计算主要提取对比温度峰值前后的数据,故降温计算过程设置时间较短,且对于缺陷较深的平底孔试件相对热传导达到热平衡状态更慢,因此 2.0 mm 试件降温过程时间设置大于 1.1 mm 深度试件。对 1.1 mm 深度模型降温过程采集了 6 s 数据,对 2.0 mm 深度模型降温过程采集了 10 s 数据,步长设置为 0.02 s。图 2 和图 3 给出建模分析计算后模型加载表面 5 s 末温度等值线图。

图 2 和图 3 中,同一深度处预埋的不同异物所对应的表面温度各不相同,从左到右依次为空气、油、蜡、水,温度值由高到低,本底不锈钢温度最低。根据热传导理论,表面下缺陷热阻越大,热导率越小,对应表面温度越高,反之亦然,1.1 mm 模型和 2.0 mm 模型均符合此规律。其次,比较预埋同种异

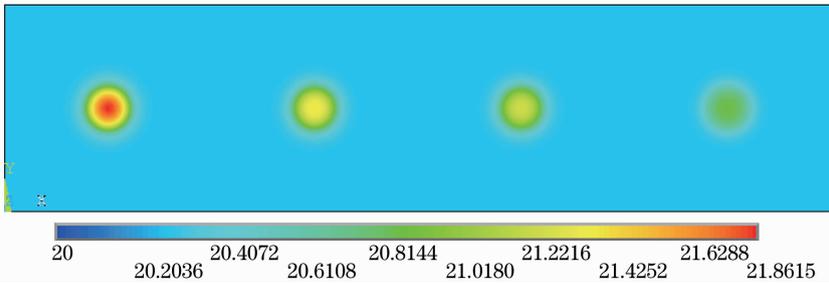


图 2 ANSYS 模拟 1.1 mm 深模型上表面 5 s 末温度等值线图

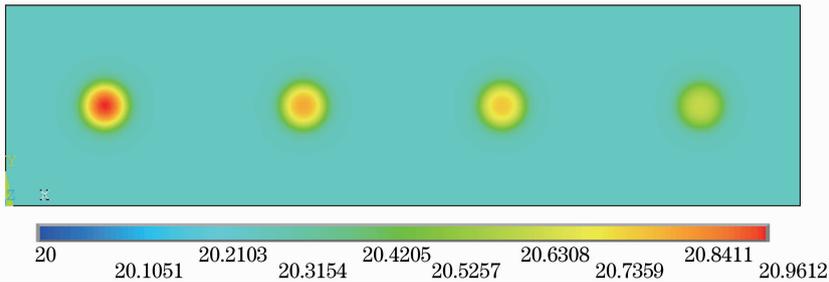
Fig. 2 Surface temperature contour map of 1.1 mm depth model as obtained by ANSYS corresponding to $t=5$ s after the heat flow has been applied

图 3 ANSYS 模拟 2.0 mm 深模型上表面 5 s 末温度等值线图

Fig. 3 Surface temperature contour map of 2.0 mm depth model as obtained by ANSYS corresponding to $t=5$ s after the heat flow has been applied

物不同深度处异物对应表面温度,深度越浅温度越高,如 1.1 mm 处的空气对应表面区的亮度高于 2.0 mm,其他异物油、蜡、水均符合此规律。由温度等值线图可定性区分 4 种不同类别缺陷。

分别从 1.1 mm 和 2.0 mm 深度模型 ANSYS 模拟实验结果中提取各缺陷对应表面温度降温数据得到表面温度时间曲线,如图 4 所示。减去本底参考区域温度值得到对比温度时间曲线,如图 5 所示。

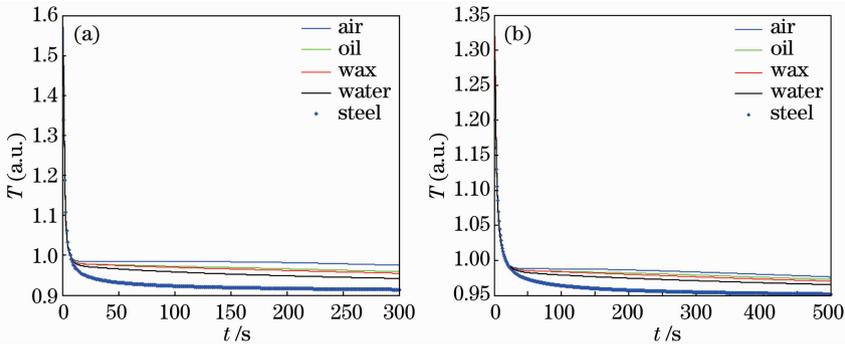


图 4 1.1 mm (a)和 2.0 mm (b)缺陷深度时 ANSYS 模拟表面温度时间曲线

Fig. 4 Simulated surface temperature decay curves of (a) 1.1 mm and (b) 2.0 mm depth model obtained by ANSYS

从图 4 可看出两图的最高温升不同,1.1 mm 深处较 2.0 mm 的升温高,且 1.1 mm 的降温 $T-t$ 曲线图中曲线的分离点比 2.0 mm 的出现时间要早。这是由于热传导至不锈钢-异物的界面处的时间与深度有关,且深度相同则分离时刻相同,分离后 $T_{\text{air}} > T_{\text{oil}} > T_{\text{wax}} > T_{\text{water}}$,与热波反射系数有关。

图 5 中,随着反射系数 R 值的增大,峰值对比温度以及峰值时间相应增大;平底孔深度越深则温度值越低。根据(3)式利用对比温度时间曲线以及

空气孔缺陷参考曲线可计算出不锈钢-水、不锈钢-油和不锈钢-蜡的反射系数 R 的值,如表 1 所示。

以上计算结果表明,ANSYS 模拟脉冲红外热像法进行表面下异物识别,模拟分析结果数据计算得到的反射系数 R 的最大误差为 $\pm 6\%$,在一定合理范围之内。利用表 1 中 1.1 mm 和 2.0 mm 深度对应的不锈钢-水的反射系数 R 值和不锈钢的蓄热系数可以求出水的蓄热系数为 1773.5 和 1714.0,与理论值 1558.9 相比误差分别为 9.9% 和 13.8%。

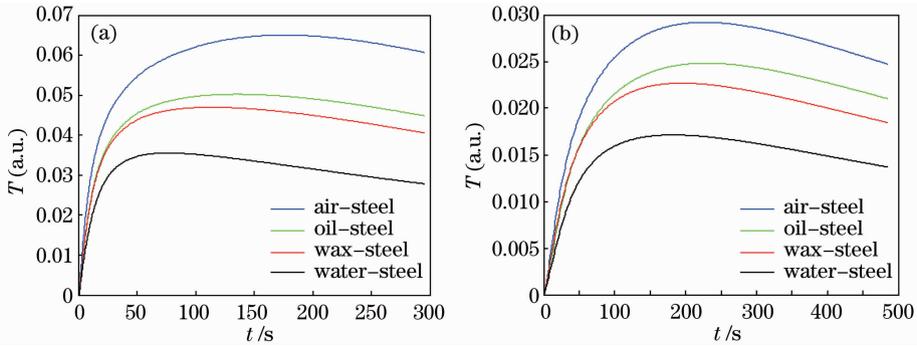


图 5 缺陷深度为 1.1 mm (a)和 2.0 mm (b)时 ANSYS 模拟表面对比温度时间曲线

Fig. 5 Simulated contrast temperature-time curves of (a) 1.1 mm and (b) 2.0 mm depth model obtained by ANSYS

表 1 表面下异物与不锈钢的反射系数有限元模拟值与理论值

Table 1 Comparison of reflection coefficient R between the FE calculation values and the theoretical values

Depth /mm	1.1	1.1	1.1	2.0	2.0	2.0
Material	Water	Oil	Wax	Water	Oil	Wax
FE calculation R	0.5955	0.8893	0.7670	0.6064	0.8578	0.8618
Theoretical value	0.6296	0.8673	0.8127	0.6296	0.8673	0.8127
Error /%	-5.4	2.5	-4.6	-3.7	-1.1	6.0

对利用脉冲红外热成像表面下异物性质定量识别具有一定的参考意义。

4 脉冲红外热成像表面下识别实验研究

为验证有限元分析模拟结果,对实际不锈钢预埋缺陷试件进行了实际检测。实验选取 304 不锈钢材料作为试件材料,在其背面加工了 8 个直径相同($\phi 25$ mm),两种深度(1.1 mm 和 2.0 mm)的平底圆孔,在平底圆孔中分别填满水、油、蜡和空气,其中蜡熔化后填入平底孔经固化冷却后再进行实验,以保证缺陷界面的紧密结合度。

4.1 实 验

检测实验装置采用了 TWI 公司商业脉冲红外热成像系统,由两个高能(4.8 kJ)闪光氙灯产生的均匀可见光对被检试件的表面实施热激励,使用红

外热像仪连续探测和记录被检试件的表面温度变化,热像仪工作波段为 $8\sim 9\ \mu\text{m}$,工作频率设置为 60 Hz,实际采集时间为 20 s。获取脉冲加热后试件表面的连续热图序列,通过采集的热图序列可以获得被测试件各平底孔区域所对应的表面降温曲线。

4.2 红外热像实验结果

图 6 分别给出了脉冲红外热成像表面下识别实验提取的 1.1 mm 深度及 2.0 mm 深度各异物缺陷所对应的表面温度时间曲线。实际实验数据采集时间比 ANSYS 模拟时间略长,降温曲线变化趋势与 ANSYS 模拟结果一致。缺陷深度越浅分离点出现时间越早,分离后 $T_{\text{air}} > T_{\text{oil}} > T_{\text{wax}} > T_{\text{water}}$ 。

图 7 分别给出了各异物缺陷位置对应表面对比温度时间曲线。实际实验结果与 ANSYS 模拟结果趋势一致,实际实验中由于噪声影响,进行实际计算时需要做曲线拟合处理。

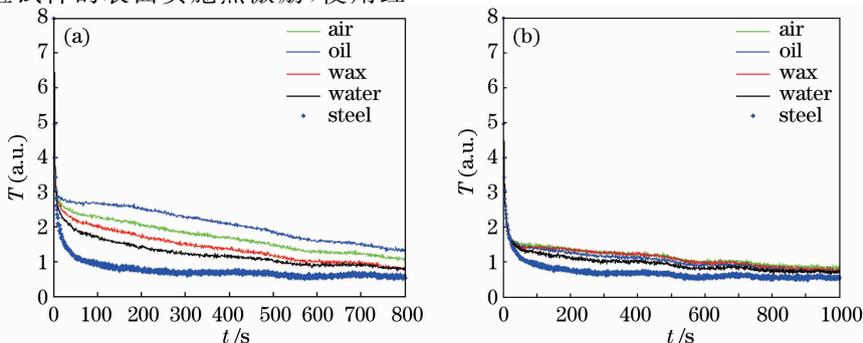


图 6 脉冲红外热成像实验 1.1 mm (a)和 2.0 mm (b)深度时各缺陷对应表面温度时间曲线

Fig. 6 Experimental surface temperature decay curves of (a) 1.1 mm and (b) 2.0 mm depth defects

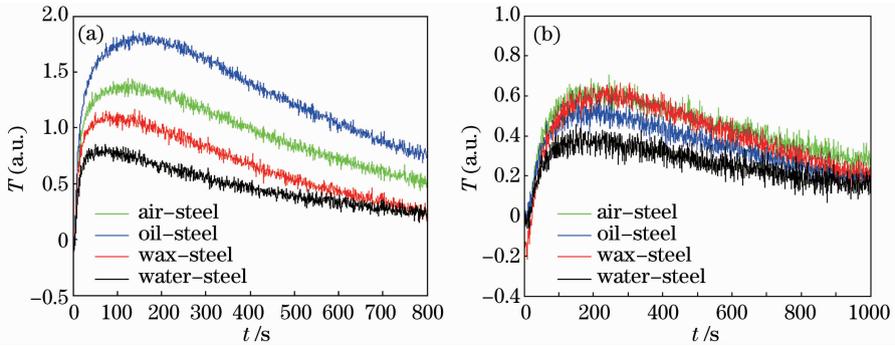


图 7 脉冲红外热成像实验 1.1 mm (a) 和 2.0 mm (b) 深度时各缺陷对应表面对比温度时间曲线

Fig. 7 Experimental contrast temperature-time curves of (a) 1.1 mm and (b) 2.0 mm depth defects

利用实验数据计算得到表面下异物与不锈钢的反射系数与有限元模拟结果比较如表 2 所示。利用实验结果计算的反射系数与模拟计算的结果基本一

致,在合理误差范围之内。利用实验数据计算水的蓄热系数误差范围在 10% 以下^[10]。

表 2 表面下异物与不锈钢的反射系数实验计算值与有限元模拟值

Table 2 Comparison of reflection coefficient R between the experimental values and the FE calculation values

Depth /mm	1.1	1.1	1.1	2.0	2.0	2.0
Material	Water	Oil	Wax	Water	Oil	Wax
Experimental calculation R	0.6437	0.8423	0.8021	0.6619	0.8501	0.7843
FE calculation R	0.5955	0.8893	0.7670	0.6064	0.8578	0.8618

从以上分析可知,有限元模拟温度时间曲线与脉冲红外热成像实验获取温度时间曲线比较,变化趋势基本一致,符合热传导规律。绝对值仍有一些误差,分析原因如下:1) 三维建模模型尺寸以及平底孔间距与实际试件有差异,由于三维热扩散效应,平底孔之间横向热扩散影响不同;2) 实际实验中采用了闪光灯脉冲热源,激励的过程实际是可见光吸收转化成热能的过程,模拟脉冲热激励采用热流密度热载荷方式,进行多步加载,热流密度值是一个估算值,与实际激励过程有差异;3) 模拟环境温度设置为恒值 20 °C,且只考虑热传导过程,忽略加载表面的热对流及热辐射影响,边界条件设置理想绝热条件,无能量损失,而实际实验环境更复杂,试件与空气之间界面有能量损失;4) 实际实验利用红外热像仪探测表面辐射能量,应考虑材料红外发射率、噪声等效温度等因素,与有限元模拟热传导过程有差异。

表面下不同深度不同性质缺陷的区别和识别是可行的。对 ANSYS 模拟热图序列以及实际实验获取热图序列分别提取了各缺陷对应表面降温曲线以及对比温度时间曲线,进行了分析讨论,模拟结果与实验结果趋势保持一致。利用有限元方法对脉冲红外热成像定量检测具有一定的理论指导意义,可为实际检测提供依据参考。

参 考 文 献

- Xiaoyan Han, L. D. Favro, R. L. Thomas. Thermal wave NDI of disbonds and corrosion in aircraft[C]. 1998 the Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft, NASA/CP-1999-208982, 1998. 265
- Zeng Zhi, Tao Ning, Feng Lichun *et al.*. Adopting the ratio of defect size over depth to quantitatively study the effect of defect size on the measurement of defect depth[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s108005
曾 智,陶 宁,冯立春等.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[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s108005
- P. Theodorakeas, N. P. Avdelidis, K. Hrissagis *et al.*. Automated transient thermography for the inspection of CFRP structures: experimental results and developed procedures[C]. *SPIE*, 2011, **8013**: 80130W
- Dapeng Chen, Zhi Zeng, Cunlin Zhang *et al.*. Air-coupled ultrasonic infrared thermography for inspecting impact damages in CFRP composite[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(s1): s10401
- Zhi Zeng, Jing Zhou, Ning Tao *et al.*. Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography[J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2012, **55**(2-3): 200~204
- J. G. Sun. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction [J]. *J. Heat Transfer*, 2006, **128** (4):

5 结 论

利用 ANSYS 有限元分析软件对不锈钢材料表面下两种深度的 4 种不同性质缺陷进行了三维建模,有限元模拟了脉冲热流对试件表面加热以及在试件内部传导的过程,并计算了模拟数据中本底材料与各缺陷界面间的热反射系数。模拟结果表明对

329~338

- 7 Jiangang Sun. Evaluation of ceramic matrix composites by thermal diffusivity imaging[J]. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2007, **4**(1): 75~87
- 8 W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler *et al.*. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity[J]. *J. Appl. Phys.*, 1961, **32**(9): 1679~1684
- 9 P. S. Gaal, M. A. Thermitus, D. E. Stroe. Thermal conductivity measurements using the flash method [J]. *J. Therm. Anal. & Calorimet.*, 2004, **78**(1): 185~189
- 10 Zhi Zeng, Chunguang Li, Ning Tao *et al.*. Depth prediction of non-air interface defects in pulsed thermography[J]. *NDT&E International*, 2012, **48**: 39~45
- 11 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暗藏物蓄热系数的测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(11): 2098~2103
- 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
- 13 C. A. Bennett, R. R. Patty. Thermalwave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(1): 49~54

栏目编辑:宋梅梅