

基于反射式脉冲红外热成像法的定量测量方法研究*

陶宁¹⁾ 曾智^{1)2)†} 冯立春¹⁾ 张存林¹⁾

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

2) (重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047)

(2012年3月31日收到; 2012年5月23日收到修改稿)

本文提出了一种利用反射式脉冲热成像法测量缺陷深度、热扩散系数或缺陷界面热波反射系数的方法. 首先, 介绍了脉冲热成像法的基本原理以及定量测量算法. 其次, 利用 304 不锈钢制作了平底孔试件并预埋了四种不同物质并进行了实验, 给出在不同条件下对缺陷深度、热扩散系数或缺陷界面热波反射系数测量的结果. 实验结果显示实际测量值与其他方法测量值基本符合, 误差范围在 $\pm 5\%$ 以内, 并讨论了影响测量精度的原因.

关键词: 脉冲热成像, 定量测量, 缺陷深度, 热波反射系数

PACS: 42.30.-d

1 引言

脉冲红外热成像无损检测技术近年来发展迅速, 由于其检测速度快、观测面积大以及单向非接触等优势在航空航天、电子以及新材料等领域都有广泛的应用. 除了对表面下各种缺陷的检测与评估, 还可以实现对材料厚度、缺陷深度以及表面下材料和结构特征识别^[1-4].

本文提出了一种利用反射式脉冲热成像法测量缺陷深度、热扩散系数或缺陷界面热波反射系数的方法. 其中, 缺陷深度或者被测件厚度测量的相关测量方法较多, 大部分深度测量方法都是通过获得温度时间曲线中的某特征时间进行计算. 热对比度峰值方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^[5]. 热对比度变化率峰值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^[6]. 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^[7]. 对数曲线二阶微分峰值法以对数温度 - 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^[8]. 绝对微分峰值方法对原始热波降温曲线乘以对应时刻平方根, 提取其一阶微分峰值时间作为特征时间, 该方法也不需要参考曲线^[9]. 上述五种方法所对应的特征时间均与缺陷深度或试件厚度平方成线性关系. 脉冲红外热波技术测厚方法还有比如直接对降温曲线线性段进行拟合直接测厚^[10]或转换到频域测厚^[11]. 以上缺陷深度定量测量方法仅针对缺陷界面为空气界面, 本文将考虑不同缺陷界面时缺陷深度定量测量问题.

热扩散系数测量方法主要有稳态法和非稳态法, 非稳态法由于其速度快, 相对应用较多. 常见有激光脉冲法可用于测量不同温度范围的热扩散率, 以及闪光灯脉冲法用于深度方向 (或与热波平行方向) 热扩散系数的测量, 目前主要采用透射式脉冲方法进行测量^[12-14]. 当热扩散系数和缺陷深度之一已知时, Balageas 利用对数温度 - 对数时间曲线的一阶微分半峰值和二阶微分峰值时刻进行另外一个参数的定量测量^[15]. 测量试件本底材料与缺陷界面热波反射系数可间接测量缺陷蓄热系数, 而目前对蓄热系数的测量方法都是直接测量或者是

* 国家自然科学基金 (批准号: 10804078) 资助的课题.

† E-mail: zzh406@hotmail.com

测量多层结构材料的整体表观蓄热系数. 脉冲热波技术用于测量缺陷热反射系数的方法较少, 作者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^[4].

本文中选取 304 不锈钢材料制作 4 个 1.1 mm 和 4 个 2 mm 的平底孔试件, 相同缺陷深度的平底孔内填入不同材料物质模拟不同缺陷, 以脉冲红外热波技术作实验方案. 由于对数曲线的一阶和二阶微分受曲线拟合参数影响较大, 本文提出一种直接基于原始降温曲线的计算方法, 在特定条件下可实现被测试件内部预埋缺陷的深度定量测量、缺陷界面热波反射系数定量测量以及对深度方向热扩散系数的定量测量.

2 脉冲红外热成像原理

脉冲红外热成像方法以热波理论为理论依据, 通过主动对被检物体表面施加一个平行于物体表面的均匀脉冲面热源, 这一面热源以热波形式向试件内部传播, 当遇到两种介质界面时将发生发射和透射, 通常情况下, 被测物体内部的缺陷或结构造成的热属性差异会影响其相应表面的温场变化. 同时使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可实现对物体内部缺陷或损伤的定量测量, 如图 1 所示.

在实际应用中, 当物体表面下存在缺陷或结构不均匀时, 可假设简化为两层介质平板模型, 其中第一层为本底材料, 第二层为缺陷或损伤. 理想条件下, 物体表面受到均匀加热后, 热量向物体内部传导过程可简化成一维热传导过程, 满足傅里

叶方程

$$k \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

其中, $T(x, t)$ 是 t 时刻 x 处的温度, $k(W/m \cdot K)$ 是热传导率. 密度 $\rho(kg/m^3)$ 与比热 c 的乘积是介质的体热容. 热扩散系数为 $\alpha = k/(\rho c)$. 对某一特定介质, 一般情况下 α 可视为常数.

物体表面受到热流能量为常数 q 的脉冲热源激励后, 假设第一层介质表面完全吸收热能, 热量将以热波的形式向材料内部传播, 当遇到两种材料的非绝热界面后会发生反射和透射. 这里假设热波反射回第一层材料表面边界时没有能量损失, 发生全反射, 那么材料表面温度可以通过对到达第一层材料表面界面处的所有分量求和得到, 因此可得出物体表面温度 T 随时间 t 变化的解析解为^[16]

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

其中, 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, R 为热波反射系数,

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}, \quad (3)$$

其中 e_1 为被测基体材料的蓄热系数, e_2 为缺陷材料的蓄热系数. 目前反射式脉冲红外热波技术中缺陷深度定量测量基本均基于 (2) 式, 经过某种变化而获得特征时间实现深度测量. 理论上, 当被测试件及缺陷的热特性和几何特性已知时, 当 (2) 式中各参数中仅有一个参数未知时, 可直接由 (2) 式求解出该未知参数.

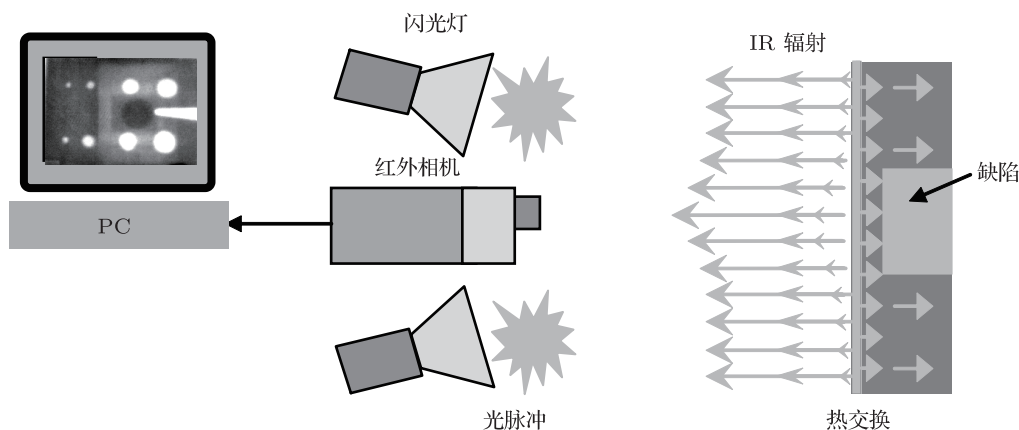


图 1 脉冲红外热波实验原理图

对于实验数据, (2) 式中参数 q 的准确值较难确定, 它受所使用的闪光灯能量、试件表面热吸收系数和热辐射系数等的影响. 因而, 较难利用 (2) 式直接求解未知参数 R, L 或 α . 为了消掉未知参数 q , 可对待计算的某一降温曲线, 取两个不同时刻 t_1, t_2 , 并提取这两个时刻对应的温度 $\Delta T(0, t_1)$ 和 $\Delta T(0, t_2)$. t_1 时刻对应 (2) 式除以 t_2 时刻对应 (2) 式, 可得到

$$\frac{\Delta T(t_1)}{\Delta T(t_2)} = \frac{\sqrt{t_2}}{\sqrt{t_1}} \cdot \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(\frac{-n^2 L^2}{\alpha t_1}\right)}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(\frac{-n^2 L^2}{\alpha t_2}\right)}, \quad (4)$$

式中, 有三个参数: 缺陷深度 L 、反射系数 R 和热扩散系数 α . 在特定条件下, 即当这三个参数中任意两个参数为已知时, 可通过 (4) 式直接计算得到另外一个参数. 对于大部分测厚应用, 缺陷界面均为空气界面, 即 $R = 1$, 或者当 R 为已知时, 如果材料热扩散系数已知, 此时可通过 (4) 式直接求出缺陷深度 L . 对于某些为非空气界面缺陷检测时, 比如蜂窝结构积水积油等应用检测, 蒙皮厚度也就是缺陷深度 L 和蒙皮的热扩散系数已知, 此时可通过 (4) 式直接求出反射系数 R , 还可以通过 (3) 式间接求出缺陷材料的蓄热系数达到表面下识别的目的. 对于热扩散系数测量, 只需测量被测件厚度且反射系数 R 为 1 或为已知时, 可由 (4) 式直接求出材料的热扩散系数.

3 试件

实验选取 304 不锈钢材料作为试件本底材料, 试件尺寸为 $260 \text{ mm} \times 235 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 在其背面加工了八个直径相同 ($\phi 25$), 两种深度 (1.1 mm 和 2 mm) 的平底圆孔, 两孔之间的间距及圆孔至试件边缘的间距均为 40 mm, 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. 试件设计如图 2 所示, 各平底孔孔底距被检表面的深度如表 1 所示.

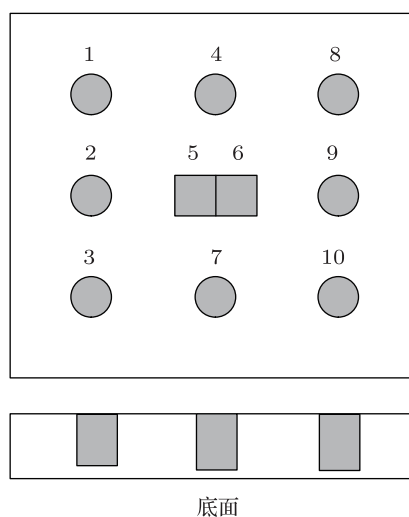


图 2 试件设计示意图

表 1 1—10 号平底孔孔底距被检表面的高度以及预埋物质

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
深度/mm	1.95	1.98	1.93	2.02	2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
物质	油	空气	水	蜡	—	—	蜡	油	空气	水

4 定量测量分析

4.1 实验分析

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 (kJ 量级) 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, 热像仪工作频率设置为 60 Hz, 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. 以空气孔和水孔为例, 分别选取 1.1 mm 空气孔和水孔、2 mm 空气孔和水孔以及无缺陷区域分别得到脉冲加热后的相应表面区域的降温曲线, 其对应数温度-对数时间曲线如图 3 所示. 当被测试件材料选定后, 比如所选定的不锈钢试件, (2) 式中的热扩散系数和蓄热系数已确定. 因而, 温度变化规律由缺陷深度 L 和缺陷类型, 及 R 确定. 由图 3 可看出, 深度越浅的平底孔对应曲线越早偏离“正常”曲线, 偏离时间与缺陷深度相关, 在分离点之前

的表面温度变化曲线相同;在分离点之后,不同暗藏物区域所对应的降温曲线变化趋势各不相同.对于深度相同的平底孔,其对应表面区域温度值仅与热波反射系数 R 有关, R 值越小,其降温相对越快.

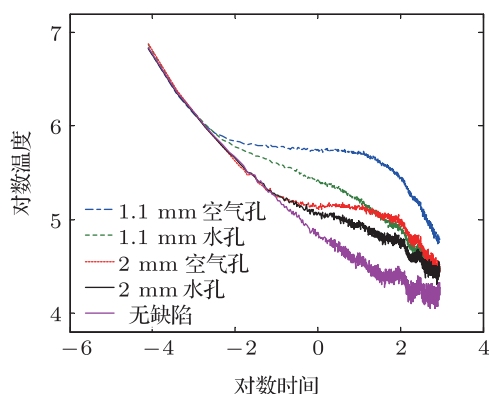


图3 试件空气-水-正常区域对应表面温度-时间对数曲线

4.2 t_1 和 t_2 时刻选取

由前述可知,当缺陷深度 L 、反射系数 R 和热扩散系数 α 三个参数中任意两个参数为已知时,可通过 (4) 式直接计算得到另外一个参数.需对待计算降温曲线,选取两个不同时刻 t_1, t_2 ,并提取这两个时刻对应的温度 $\Delta T(0, t_1)$ 和 $\Delta T(0, t_2)$. t_1 和 t_2 的选择决定计算的准确度,由于 (4) 式是由两个不同时刻温度相比而得到,因而,选取不同 t_1 和 t_2 的组合可能得到相同比值.为了解决该问题,首先参考图 3 所示对数温度-对数时间曲线,其初始段是斜率为 $-1/2$ 的直线段,相对无缺陷区域越浅缺陷偏离时间越早,在偏离时间以前数据和无缺陷区域相同.基本思路是 t_1 时刻应该选为分离时刻前,不同类型缺陷其对应温度在该时刻一致;而 t_2 时刻应该选在分离时刻后,不同类型缺陷其对应降温已有差异,通过该差异可以直接利用 (4) 式求解某未知参数.对于 t_1 的选择,参考图 3,应该限定在开始到分离时刻.由于所采用脉冲热成像系统脉冲时间不是理

想的脉冲源,对初始温度造成一定影响,在本文中选定为对数温度-对数时间曲线分离时刻前 1 或者前 2 帧.对于 t_2 的选择,应该在偏离时刻后,由于三维热扩散影响,该时刻不能太靠后,可大致参考图 3 中待处理曲线与参考无缺陷曲线最大温差时刻,可以最大温差时刻及其前面若干帧时刻作为 t_2 .

以 2 mm 孔为例, t_1 时刻选定为第 9 帧, t_2 时刻分别选定为 t_1 时刻后 200 帧.利用 (4) 式进行缺陷深度计算,式中,热反射系数所涉及蓄热系数利用加拿大 Mathis Tci 导热测试仪测量得到,水和空气的蓄热系数从其他文献查得;不锈钢的热扩散系数可由公式 $\alpha = \sqrt{k/e}$ 求出,相关数据如表 2 所示.利用 (3) 式所计算得到的热反射系数和热扩散系数代入 (4) 式进行计算,图 4 比较了 4 种不同类型缺陷情形时所得到的缺陷深度值.由该图可以看出,较靠近 t_1 时刻所计算得到的缺陷深度较实际深度偏小;而在有限时间段内,比如图 4 中 50—200 帧内,所计算得到缺陷深度值较稳定.随着时间的增大,由于三维热扩散的影响,实际热波降温曲线相对理论曲线有一定偏差,从而造成利用 (4) 式计算得到的值有较大误差.比如对于水孔,由于其热反射系数相对其他 3 个孔较小,其对应温差峰值时刻

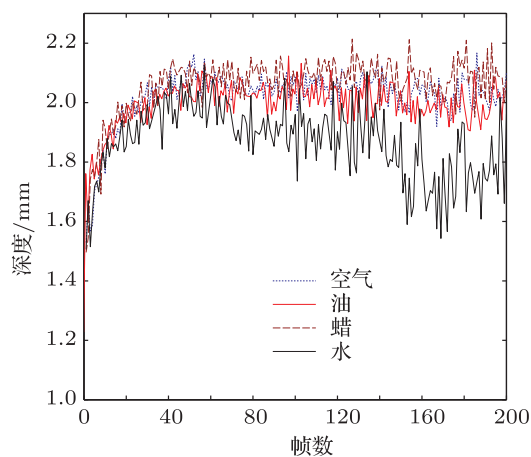


图4 测量深度与 t_2 关系曲线

表 2 模拟不同缺陷类型材料热学参数

	不锈钢	水	油	蜡	空气
蓄热系数/(J/K·cm ² ·s ^{0.5})	0.798	0.159	3.7×10 ⁻²	7.28×10 ⁻²	5.7×10 ⁻⁴
热扩散系数/(cm ² /s)	4.8×10 ⁻²	—	—	—	—

也较靠前, 相对较早时间更容易受到三维热扩散影响, 所以从图 4 可以看出水孔对应结果在 150—200 帧已出现一定偏差. 因而, t_2 时刻选取不能太靠前, 也不能太靠后. 从图 4 也可以看出, 计算结果受噪声影响出现一定波动, 为了减小噪声对计算精度的影响, 实际计算时, 取 t_2 为最大温差时刻及其前面若干帧 (比如 10 帧) 对计算结果取平均值作为最终测量值.

4.3 实验数据计算

利用上述方法对不锈钢平底孔内预埋水、油、蜡和空气的试件进行脉冲红外热波实验, 从而获得试件表面热波降温数据序列. 提取每个平底孔对应表面中心点热波降温曲线, 按照上述方法选取 t_1 和 t_2 . 本实验中缺陷深度 L 、热反射系数 R 和热扩散系数 α 均为已知, 现假定其中两个参数已知, 另外一个参数未知, 以 (4) 式进行定量测量计算, 并用已知参数进行验证.

表 3 缺陷深度测量结果

	理论值/mm	测量值/mm	误差/%
空气孔	1.1	1.112	1.091
	1.98	2.006	1.308
油孔	1.1	1.104	0.327
	1.95	1.986	1.836
蜡孔	1.1	1.117	1.500
	2.02	2.090	3.446
水孔	1.1	1.076	-2.145
	1.93	1.908	-1.150

当热反射系数 R 和热扩散系数 α 已知时, 利用 (4) 式进行缺陷深度定量测量, 相应结果列在表 3 中. 反射式脉冲红外热波技术中现有缺陷定量测量方法均假定热反射系数为 1 的情况, 实际应用中可能存在缺陷为非空气界面, 比如夹杂深度, 表 3 结果说明当 R 为已知时本方法所计算缺陷深度不受缺陷界面参数影响. 当缺陷深度 L 和热扩散系数 α 已知时, 利用 (4) 式计算缺陷界面热反射系数 R . 可参考图 3 大致获得温差最大时刻, 或可由 $t = 2L^2/\alpha$ 计算得到温差最大时刻, 直接求解而获得缺陷界面热波反射系数 R , 结果列在表 4 中. 当所感兴趣区域界面热反射系数和缺陷深度为已知时, 可直接计算出本底材料在深度方向上的热扩

散系数, 结果如表 5 所示, 其误差为与用 Tci 测量值相比较结果. 由表 3—表 5, 利用本方法测量的缺陷深度, 热波反射系数以及热扩散率测量结果与其他方法的测量值相比, 测量值误差均在 $\pm 5\%$ 以内.

表 4 热波反射系数测量结果

	1.1 mm			2 mm	
	理论值	测量值	误差	测量值	误差
空气孔	1.000	0.993	-0.710	0.962	-3.800
油孔	0.911	0.911	-0.085	0.898	-1.435
蜡孔	0.833	0.806	-3.170	0.808	-2.990
水孔	0.668	0.683	2.320	0.672	0.702

表 5 热扩散率测量结果 (Tci 测量值 $4.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$)

	测量值/ 10^{-2}	误差/%
1.1 mm 空气孔	4.7277	1.71
2 mm 空气孔	4.7664	0.91

4.4 测量精度影响因素

(2) 式是基于二维热传导理论模型假设在狄拉克脉冲函数激励作用下对热传导方程进行推导得到的解析解. 实际实验中, 利用闪光灯对被检物体进行脉冲激励, 通常具有一定的脉冲宽度, 闪光灯激励后获取的前若干帧数据受到影响, 因此, 在实际测量时 t_1 时刻的选取应考虑到闪光灯脉冲宽度的影响. 此外, 高热扩散率高热导率的材料受闪光灯脉宽的影响相对越大.

上述理论模型假设热波反射回第一层材料表面边界时没有能量损失, 即满足材料边界绝热条件, 实际实验中由于空气对流等因素影响, 边界有能量损失, 尤其对于较厚的材料以及低导热率低热扩散率的材料影响更大.

上述两层介质理论推导模型假设物体表面受到脉冲热源激励后在第一层介质表面吸收热能, 形成面热源. 这种假设通常对于可见光不透明材料是正确的, 但对于一些半透明材料, 比如某些涂层材料, 可见光对材料照射后实际是在材料表面下一定深度形成一个体热源, 会影响热传导过程以及表面温场分布. 本文中采用了光不透明材料, 可忽略体热源的影响.

此外, 由于热像仪噪声等效温度、三维热扩散效应以及实验环境等因素均会对测量精度造成影响.

5 结论

本文尝试利用反射式脉冲热成像法进行近表面及表面下定量测量, 对不锈钢试件预埋四种不同缺陷进行了理论分析和实验研究, 分别对缺陷深度、缺陷界面热波反射系数以及材料热扩散系数

在其中两种参数已知条件下, 对第三个参数进行了测量, 测量误差均在 $\pm 5\%$ 以内, 验证了脉冲热像法在定量无损评价应用中的可行性. 该方法对缺陷深度的测量与其他方法相比, 不需要参考曲线的引入, 考虑不同缺陷界面的影响, 同时保证了较高的测量精度. 对热波反射系数的测量不需要参考曲线的引入, 可间接求出缺陷材料的蓄热系数从而达到表面下识别的目的. 对材料热扩散系数的测量与其他方法相比, 采用反射式单面测量的方法, 不需要制作小尺寸样品, 更有利于实际检测应用.

-
- [1] Shepard S, Hou Y, Lhota J 2004 *CD-ROM proceedings of the 16th world conference on NDT*, Aug 30–Sep 3, 2004 791
- [2] Chen D P, Zeng Z, Zhang C L, Jin X Y, Zhang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094207 (in Chinese) [陈大鹏, 曾智, 张存林, 金学元, 张崢 2012 物理学报 **61** 094207]
- [3] Zeng S Q, Xu H F, Li J Y, Liu X D 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1338 (in Chinese) [曾绍群, 徐海峰, 李骄阳, 刘贤德 1997 物理学报 **46** 1338]
- [4] Tao N, Zeng Z, Feng L C, Li Y, Zhang C L 2011 *Infrared and Laser Engineering* **40** 2098 (in Chinese) [陶宁, 曾智, 冯立春, 李越, 张存林 2011 红外与激光工程 **40** 2098]
- [5] Favro L D, Jin H J, Wang Y X, Ahmed T, Wang X 1991 *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Proceedings of the 18th Annual Review*, Brunswick, ME, July 28–Aug. 2, 1991 p447
- [6] Ringermacher H I, Archacki Jr. R J, Veronesi W A 1998 *U. S. Patent* No. 5, 711, 603 [2008]
- [7] Han X Y, Favro L D, Thomas R L 1998 *the Second Joint NASA / FAA / DOD Conference on Aging Aircraft*, NASA/CP-1999-208982, Part 1, 1998 p265
- [8] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, Wang D, Ahmed T 2003 *Opt. Eng.* **42** 1337
- [9] Zeng Z, Zhou J, Tao N, Feng L C, Zhang C L 2012 *Infrared Physics and Technology* **55** 200-4
- [10] Sun J G 2008 *U. S. Patent* No. 6,542,849 [2003]
- [11] Maldague X P, Marinetti S 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 2694
- [12] Sun J G 2007 *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* **4** 75
- [13] Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, Abbott G L 1961 *J. Appl. Phys.* **32** 1679
- [14] Gaal P S, Thermitus M A, Stroe D E 2004 *J. Therm. Anal. Calorimet.* **78** 185
- [15] Balageas D L 2010 *the 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography* Québec, Canada July 27–30, 2010 [16]
- [16] Lau S K, Almond D P, Milne J M 1991 *NDT & E International* **24** 195

The method of quantitative characterization using reflection pulsed thermography*

Tao Ning¹⁾ Zeng Zhi^{1)2)†} Feng Li-Chun¹⁾ Zhang Cun-Lin¹⁾

1) (*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*)

2) (*Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China*)

(Received 31 March 2012; revised manuscript received 23 May 2012)

Abstract

In this paper, a new method using reflective pulsed thermography to measure defect depth, thermal wave reflection coefficient and thermal diffusivity is presented. First, a brief description of the pulsed thermography in terms of theoretical background and quantitative measurement is given. One stainless steel 304 structure machined several flat-bottom holes in which it is filled with different materials are used as experimental sample, the measured results of defect depth, thermal diffusivity and reflection coefficients at defect interface under different conditions are given. The agreement between the results obtained by using pulsed thermography and the value presented in the literature or measured by other techniques appears satisfactory within errors of $\pm 5\%$, and possible reasons for affecting the measurement precision are discussed.

Keywords: pulsed thermography, quantitative characterization, defect depth, thermal wave reflection coefficient

PACS: 42.30.-d

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10804078).

† E-mail: zzh406@hotmail.com