物 理 学 报 Acta Phys. Sin. Vol. 62, No. 13 (2013) 138701

基于对数二阶微分极小峰值时间的测厚方法研究*

曾智1)2) 陶宁2) 冯立春2) 张存林2)†

1) (重庆师范大学计算机与信息科学学院, 重庆 400047)

2) (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)

(2013 年 1 月 23 日收到; 2013 年 3 月 1 日收到修改稿)

本文提出了一种反射式脉冲红外热波技术中采用对数温度-对数时间二阶微分极小峰值时间作为特征时间进行缺陷深度定量测量的方法. 首先, 介绍了反射式脉冲红外热波技术的基本原理, 在半无限厚平板解的基础上得到了对数温度-对数时间二阶微分极小峰值时间与缺陷深度平方的关系式. 其次, 利用不锈钢和铝材料制作平底洞试件并得到红外热图序列, 提取对数二阶微分极小峰值时间. 该特征时间与缺陷深度平方实验结果显示其具有很好线性关系, 该线性关系可用于实际缺陷深度定量测量, 并讨论了与应用广泛的对数二阶微分极大峰值法相比的优缺点.

关键词: 红外热波, 定量测量, 缺陷深度, 极小峰值

PACS: 87.63.Hg **DOI:** 10.7498/aps.62.138701

1 引 言

反射式脉冲红外热波技术由于其检测速度快、观测面积大以及单向非接触等特点, 近年来在国内航空航天、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, 比如复合材料分层、冲击损伤和蜂窝结构积液等缺陷, 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等 [1−4].

缺陷深度或者被测件厚度测量是反射式脉冲红外热波技术的定量测量应用的主要研究内容, 大部分深度测量方法都是通过获得温度 - 时间曲线经过某种变换后的某特征时间进行计算, 比如热对比度和对数变换. 基于热对比度的测厚方法应用较广, 热对比度定义为缺陷区域和参考区域温度差值, 实际应用中, 参考区域通常从无缺陷区域选取. 热对比度峰值法采用热对比度曲线的极大峰值时间作为特征时间 [5]. 热对比度一阶微分峰值法采用热对比度曲线一阶微分极大峰值时间作为特征时间 [6]. 对数温度-对数时间曲线分离法采用缺陷和非缺陷区域对应对数温度-对数时间曲线的分离时间作为特征时间 [7]. 上述几种方法均需要参考曲线, 也有一些方法不需要参考曲线. 作者对原始热波降温曲线乘以对应时间平方根, 提取其一阶微分极大峰值时间作为特征时间, 并称之为绝对微分峰值法 [8]; 另外, 还把处理后曲线设为等于某一预设值, 并提取其时间作为特征时间进行定量测厚应用 [9]. 对数温度-对数时间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极大峰值时间作为特征时间, 该方法不需要参考曲线, 且操作简单而应用广泛 [10]. 上述方法所采用的特征时间均与缺陷深度或试件厚度平方成线性关系. 反射式脉冲红外热波技术测厚方法还有比如直接选取降温曲线两个不同时间点 [11] 和直接对降温曲线线性段进行拟合直接测厚 [12] 或转换到频域测厚 [13].

本文以不锈钢和铝材料分别制作具有 6 个不同深度的平底孔试件, 以脉冲红外热波技术作为实验方案. 在半无限厚平板一维解的基础上, 本文建立了对数温度-对数时间二阶微分曲线中极小峰值时间与缺陷深度平方的关系式, 该理论公式和实验数据表明该极小峰值时间与缺陷深度平方成线性关系, 该线性关系可用于缺陷深度或试件厚度测量.

* 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目 (批准号: U1233120) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn

2 脉冲红外热成像原理

脉冲红外热波技术实验原理如图 1 所示, 两个高能脉冲闪光灯用于瞬时加热被测试件表面, 试件表面吸收瞬时热量而温度升高, 热量由试件表面向内部传导, 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. 同时使用高速红外热像仪记录试件表面降温过程, 通过对热波降温数据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.

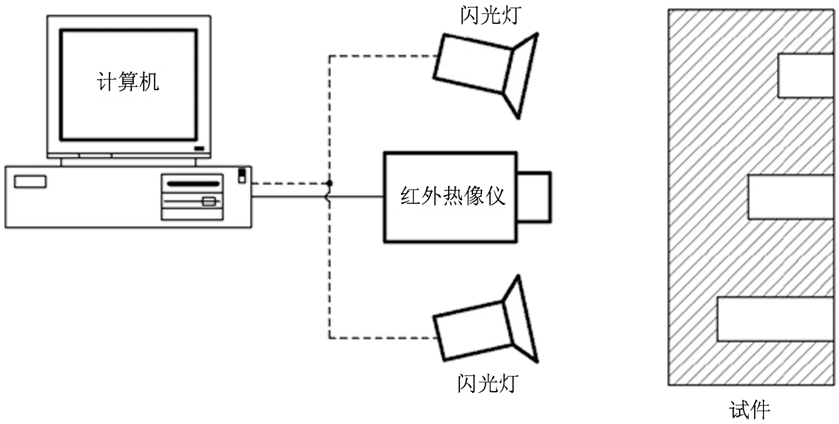

图 1 反射式脉冲红外热波实验原理图

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, 一维热传导方程可简化为 [1]

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

其中, $T(x,t)$ 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(W/m·K) 是热传导率. 密度 ρ(kg/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 α 可视为常数.

物体表面受到脉冲热源激励后, 表面吸收热能, 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介质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介质表面界面处的所有分量求和得到. 对于有限厚平板, 其表面温度随时间变化的解析解为

$$\Delta T(t)=\frac{q}{\rho CL}\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(\frac{-n^2\pi^2\alpha t}{L^2}\right)\right], \tag{2}$$

其中, L 为缺陷深度或被测件的厚度, n 为热波传播到两种材料界面发生的反射次数. (2) 式对应的对数温度-对数时间二阶微分曲线如图 2 所示, 其中, $w_0=\pi^2\alpha t/L^2$. 基于有限厚平板解的基础上所得到的对数温度-对数时间二阶微分曲线中, 仅存在一个极大峰值, 因而, 通常不说明是极大峰值, 统称为峰值. 该峰值时间为广泛应用的对数二阶微分峰值法的特征时间, 由数值模拟结果可以得到峰值时间 $t_{\max\ p}$ 与缺陷深度平方关系式为

$$t_{\max\ p}=\frac{L^2}{\pi\alpha}. \tag{3}$$

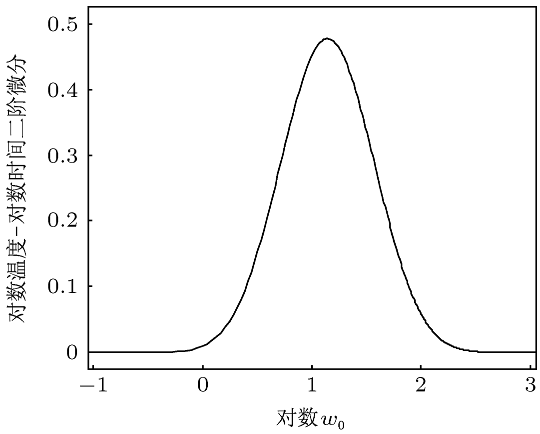

图 2 基于 (2) 式模拟的对数温度-对数时间二阶微分曲线

脉冲红外热波技术中, 还存在一个针对半无限厚平板的解

$$\Delta T(t)=\frac{q}{e\sqrt{\pi t}}\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(\frac{-n^2L^2}{\alpha t}\right)\right]. \tag{4}$$

本文将在半无限厚平板解的基础上, 即 (4) 式的基础上建立缺陷深度平方与二阶微分峰值时间

的关系. 对数温度-对数时间的二阶微分可表达为

$$\frac{\mathrm{d}^2(\ln T)}{\mathrm{d}(\ln t)^2}=\frac{t}{T}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}-\frac{t^2}{T^2}\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{t^2}{T}\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}t^2}, \tag{5}$$

式中

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{2}At^{-3/2}+2At^{-3/2}\sum\mathrm{e}^{-\frac{n^2\omega}{t}}\left(\frac{n^2\omega}{t}-\frac{1}{2}\right), \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}t^2}=\frac{3}{4}At^{-5/2}+2At^{-5/2}\times\sum\mathrm{e}^{-\frac{n^2\omega}{t}}\left[\left(\frac{n^2\omega}{t}\right)^2-\frac{3n^2\omega}{t}+\frac{3}{4}\right], \tag{7}$$

式中, $\omega=L^2/\alpha, A=Q/e\sqrt{\pi}$. 在 (4) 式基础上对 (5) 式进行数值模拟, 式中 n 取为 2, 深度 L 分别取为 1 mm 到 6 mm, 结果显示在图 3. 图中所示曲线中极大峰值对应时间即为反射式脉冲红外热波技术中广泛应用的对数温度-对数时间二阶微分峰值法中所采用的特征时间, 而由图 3 还可以看出, 每条曲线除了含有一个极大峰值外, 还存在一个极小峰值且极小峰值时间大于极大峰值时间, 并且这些极小峰值时间与缺陷深度也体现出一定关系. 图 3 中所示为 (4) 式中参数 n 取为 2 的结果, 固定公式中缺陷深度 L 为 2 mm, 参数 n 取为 1 到 5, 其他参数不变, 其模拟结果如图 4 所示. 由该图可以看出, 对数温度-对数时间二阶微分曲线中, 极大峰值对应时间基本与参数 n 无关, 而极小峰值时间随 n 值改变而改变. 假设这些峰值时间 t_p 与缺陷深度平方具有下述关系式:

$$t_\mathrm{p}=\frac{L^2}{b\alpha}, \tag{8}$$

式中, 参数 b 用于表达峰值时间与 L^2/α 之间线性关系斜率的倒数. 提取图 4 中所有极值时间, 可得到当 n 取不同值时系数 b 的值, n 等于 1 到 5 的结果列在表 1 中. 更高阶结果可以类似得到, 但是, 对于反射式脉冲红外热波技术来说, 表 1 结果基本能满足应用要求. 表 1 中第一行结果为极大峰值时间对应系数, 该结果与由基于有限厚平板解得到的结果一致, 极大峰值时间可近似看做与 n 无关, 且其系数 b 可看做为 π. 表 1 中第二行结果为极小峰值时间对应系数, 该结果显示极小峰值时间随 n 增大而增大, 意味着系数 b 随 n 增大而减小.

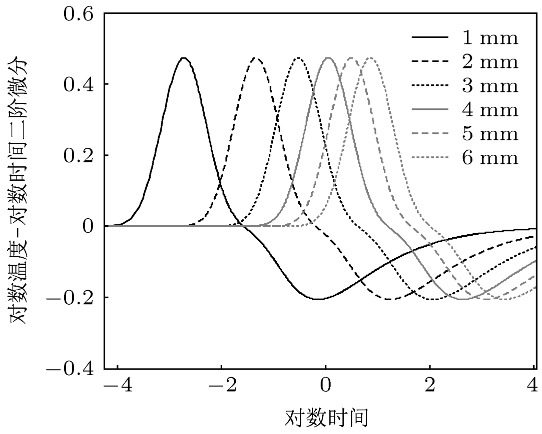

图 3 深度为 1 到 6 mm 时钢试件对数温度 - 对数时间二阶微分曲线

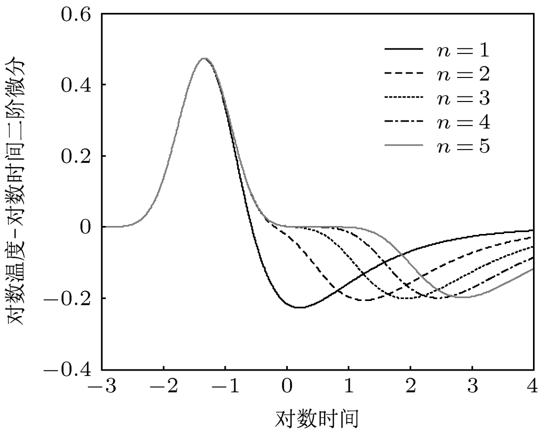

图 4 $n=1$ 到 5 时钢材料 2 mm 深度对数温度 - 对数时间二阶微分曲线

3 定量测量分析

3.1 试件

采用平底洞模拟真实缺陷是脉冲红外热波技术中常采用的方案, 本文分别选取不锈钢和铝材料制作试件, 其中, 铝试件经过阳极氧化处理. 试件尺寸均为 300 mm × 200 mm × 20 mm, 两个试件背面均加工了六个直径为 20 mm, 深度为 1 mm 到 6 mm 的平底圆孔.

表 1 n 取不同值时系数 b 值

n	1	2	3	4	5
对数二阶微分极大峰值法	3.1523	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416
对数二阶微分极小峰值法	0.6722	0.2365	0.1191	0.0716	0.0478

3.2 实验分析

以反射式脉冲红外热波技术作为实验方案, 其原理如图 1 所示. 实验检测装置采用美国 TWI 公司商业脉冲红外热成像系统, 由两个高能 (4.8 kJ × 2) 闪光氙灯产生的均匀可见光对被检试件的表面形成近似瞬时面热源的热激励, 采集频率设置为 60 Hz 的热像仪连续获取脉冲加热后试件表面的温度变化. 图 5 为不锈钢试件在 0.3 s 时刻的热图, 图中, 较浅的孔正如 (2) 和 (4) 式所描述的其强度相比较深孔更大, 在热图中表现为较亮区域. 从时间序列上来看, 较浅的孔其在热图中出现的时间也更早.

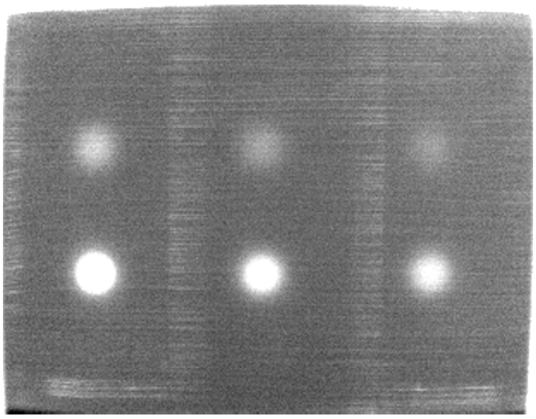

图 5 0.3 s 时刻不锈钢试件热图

3.3 对数二阶微分曲线分析

分别提取两个试件热图中每个平底孔中心像素对应降温曲线, 对原始降温曲线进行对数温度-对数时间多项式拟合, 并得到其二阶微分曲线. 图 6 和图 7 分别比较了不锈钢和铝试件的对数温度 - 对数时间二阶微分曲线, 这些二阶微分曲线与基于半无限厚平板解所模拟得到的显示在图 3 中曲线一致: 每条曲线不仅含有极大峰值, 并且还含有极小峰值. 由图 6 和图 7 的结果可以看出, 半无限厚平板解相比有限厚平板解更接近于实际应用所得到的脉冲红外热图序列结果.

不锈钢材料其热扩散系数在 10^{-6} 范围, 在反射式脉冲红外热波技术中, 这个范围内的材料其降温过程相对比较适中, 而铝材料则降温非常快, 而类似于玻璃钢这类材料则降温相对较慢. 实验中, 两个试件的采集时间均为 30 s. 对于不锈钢试件, 30 s 时间段内基本体现其完整的降温过程, 数据拟合中也可选取完整数据进行处理, 图 6 所示二阶微分曲线也较有规律, 其极大峰值和极小峰值基本能体现缺陷深度信息. 并且, 这些实验曲线和图 3 中所示模拟曲线比较接近, 每一条曲线均只有一个极大和一个极小峰值. 而对于图 7 所示的铝试件曲线, 每条曲线则具有 2 个极大峰值和一个极小峰值, 该实验结果与理论模拟曲线特征不符. 造成这个差异的原因是铝材料其热扩散系数相对较大, 其降温过程非常快, 在较短时间内即达到平衡状态. 也就是说, 其原始降温曲线初始段是较快的降温过程, 而很快其温度基本不变化, 在曲线中表现为初始段数据变化较大, 而很快曲线变为近似的水平曲线. 尽管在数据处理中仅选用了 10 s 的数据进行处理, 其后段数据还是相对较平. 多项式曲线拟合中会在数据后段产生较大误差, 从而在其二阶微分曲线中, 数据后段有多余的峰值, 正如图 7 所示. 理论上来说, 如果能保证足够大的数据采集频率, 在较短时间内采集到足够数据用于曲线拟合, 可避免产生多余的峰值. 但是, 目前的红外热像仪其采集频率还较有限, 尽管可以通过缩窗处理来采用较快采集频率, 但是其空间分辨率也同时大大减小.

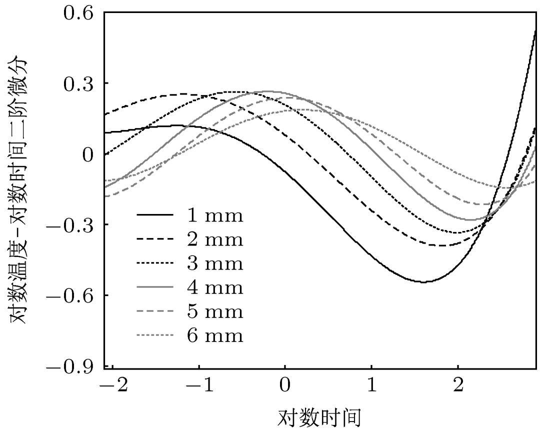

图 6 不锈钢试件对数温度-对数时间二阶微分曲线

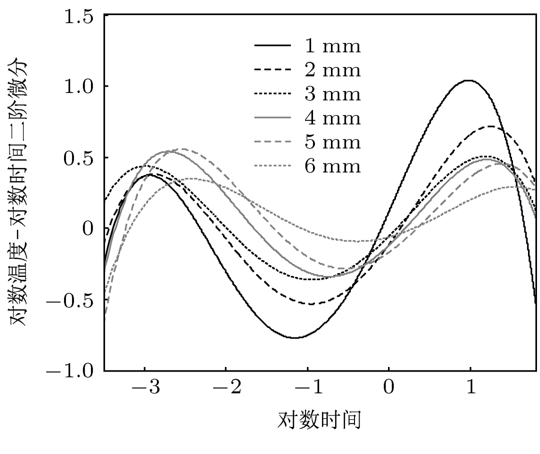

图 7 铝试件对数温度-对数时间二阶微分曲线

3.4 实验数据计算

提取图 6 中不锈钢试件的极大峰值时间, 图 8 为其实验值与理论值曲线. 由该图可以看出, 对于不锈钢试件来说, 二阶微分极大峰值法所得到的实验值与理论值较符合, 也证明了二阶微分极大峰值法的有效性. 图 9 比较了铝试件第一个极大峰值时间与其线性拟合结果, 由于铝试件其极大峰值较靠前, 且数据采集频率有限, 通过多项式曲线拟合所获得的峰值时间与理论值有一定误差, 因而, 这里仅与线性拟合值比较. 由该图可以看出, 对于较厚平底孔 (4—6 mm), 其特征时间随着缺陷深度增大而增大, 体现了相对的厚度信息; 而对于较浅平底孔 (1—3 mm), 其极大峰值时间完全没有体现厚度信息. 所获得的二阶微分极大峰值时间不仅与理论值有较大误差, 同时也没有体现出与缺陷深度平方的线性关系.

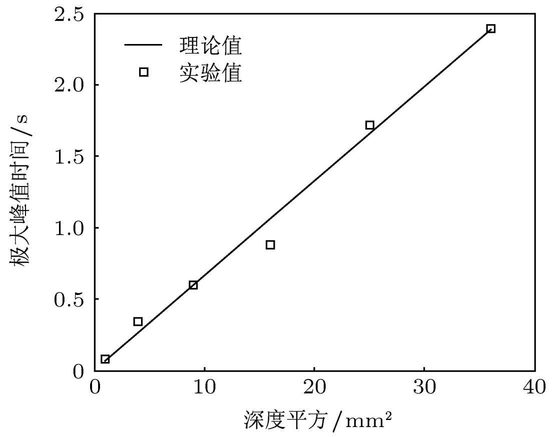

图 8 不锈钢试件实验和理论极大峰值时间比较

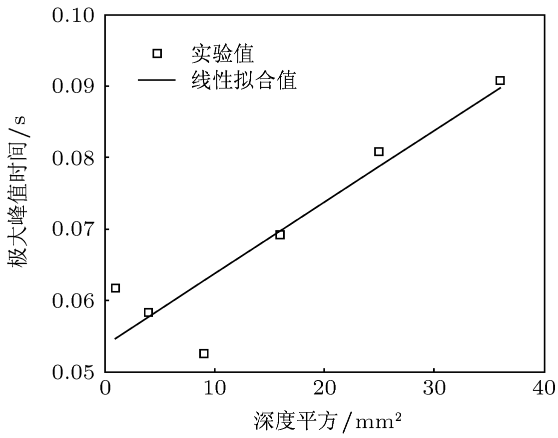

图 9 铝试件实验极大峰值时间和拟合值比较

分别提取图 6 和图 7 中不锈钢和铝试件的极小峰值时间, 图 10 和图 11 分别为不锈钢和铝试件实验值与拟合值比较. 由表 1 可以看出, 当 (4) 式中 n 取不同值时, 其极小峰值时间不同. (4) 式中指数项参数为 $n^2L^2/\alpha t$, n 表示热波在缺陷界面的热反射次数, 由该式可以看出, 在 t 时刻, 需要考虑的热波反射项取决于缺陷深度和热扩散系数. 当缺陷深度较小或者热扩散系数较大时, 需要考虑更多次热波反射项的共同作用. 本文中, 对于不锈钢和铝试件, 相对来说, 相同深度情况下, 铝试件应该考虑更多次热反射; 而对于相同试件, 其热扩散系数确定, 而缺陷深度分别为 1 mm 到 6 mm, 较小深度时应该考虑更多次热反射. 对于不锈钢或铝试件, 其不同深度时对应参数 n 不确定, 因而, 图 10 和图 11 中实验值并未与理论值对比, 而是与其线性拟合值进行比较. (8) 式表明二阶微分峰值时间与缺陷深度平方成线性关系, 在反射式脉冲红外热波技术基于特征时间的定量测厚方法中, 通常说明特征时间与缺陷深度平方成正比, 且该线性直线通过坐标原点. 由于 (8) 式中, 系数 b 随 n 值不同而改变, 而对于相同材料不同深度时, n 值可能不同, 因而, 对于基于二阶微分极小峰值时间的测厚方法中, 特征时间与缺陷深度平方并不成正比或者不通过原点. 由图 10 和图 11 中的线性拟合结果来看, 二阶微分极小峰值时间与缺陷深度平方对于两种材料来说, 均具有较好的线性关系, 但是其对应线性直线并不通过原点.

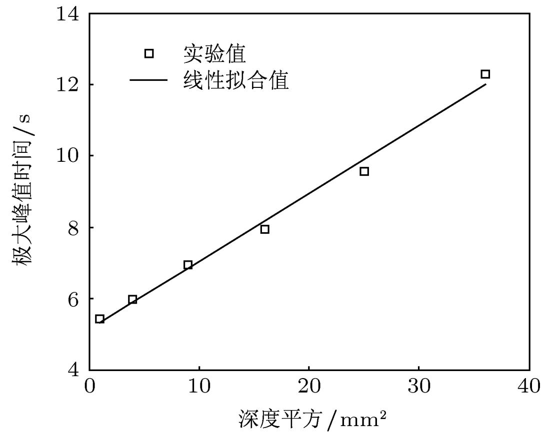

图 10 不锈钢试件极小峰值时间与拟合值比较

3.5 讨 论

基于对数温度-对数时间二阶微分极大和极小峰值法的红外热波定量测厚应用, 其算法原理基本一致, 且数据处理步骤相同, 其共同的优点为不需要参考曲线. 在对数温度-对数时间二阶微分曲线中, 无论 (4) 式中热波反射项取多少次, 其极大峰值

均在极小峰值前. 因而, 理论上来说, 极大峰值法相对极小峰值法受三维热扩散影响更小, 同时, 极大峰值法特征时间与参数 n 无关, 可以直接利用公式进行计算得到缺陷深度.

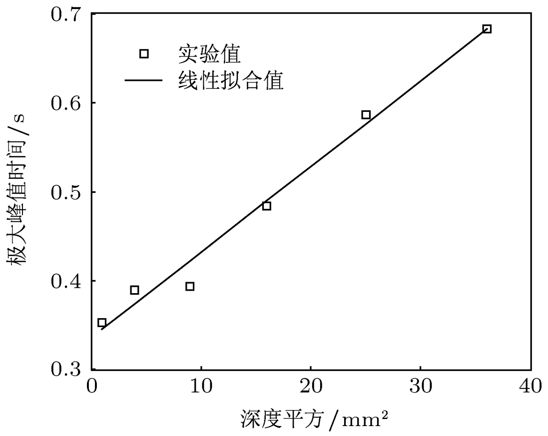

图 11 铝试件极小峰值时间与拟合值比较

由于要获得二阶微分曲线, 首先需要对原始降温曲线进行多项式拟合, 而数据拟合容易在数据两端产生较大误差; 同时, 对于热扩散系数较大材料或者较浅缺陷, (2) 和 (4) 式均表明其降温曲线初始段降温较快, 受限于热像仪采集频率而可能不能采集到足够多的降温数据; 另外, (4) 式是基于一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, 而二阶微分极大峰值较靠前, 容易受到影响. 因而, 二阶微分极大峰值法相对二阶微分极小峰值法更适合于较深或热扩散系数较小的材料, 而二阶微分极小峰值法相对更适合于较浅或者热扩散系数更大的材料.

由于对数温度-对数时间二阶微分极小峰值法其峰值时间相对极大峰值时间晚, 因而, 相对受热像仪有限采集频率、有限脉冲宽度和多项式曲线参数的影响更小. 同时, 由图 10 和图 11 可以看出, 对于本文所采用的不锈钢和铝试件, 其实验所获得的对数温度 - 对数时间二阶微分极小峰值时间与缺陷深度平方均具有较好的线性关系. 在实际应用中, 可首先选取一相同材料制作的标准试件获得该线性关系, 然后对于待测试件采用相同的实验参数和数据处理参数, 然后利用该线性关系进行定量测量. 理论上, 由于对数温度-对数时间二阶微分极小峰值时间与缺陷深度平方具有确定关系, 当热波参数 n 确定的情况下, 可以通过 (8) 式计算缺陷深度, 但是实际应用时, n 值较难确定, 因而利用线性关系进行定量测量是较好的选择.

4 结 论

本文提出在反射式脉冲红外热波技术中, 利用对数温度-对数时间二阶微分极小峰值时间进行缺陷深度定量测量, 并建立了极小峰值时间与缺陷深度平方的理论关系式, 且其所获得的极大峰值时间与缺陷深度平方的关系式与原有方法一致. 所提出的方法与目前广泛应用的基于二阶微分极大峰值法算法相似, 其操作简单, 不需要参考曲线. 二阶微分极小峰值时间与缺陷深度平方具有较好线性关系, 该线性关系可应用于实际的缺陷深度测量. 相比二阶微分极大峰值法, 所提出的二阶微分极小峰值法受热扩散系数和缺陷深度、实验参数和数据处理参数等影响更小.

[1] Shepard S M, 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, 张峥 2012 物理学报 **61** 094207]

[3] Huo Y, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144204 (in Chinese) [霍雁, 张存林 2012 物理学报 **61** 144204]

[4] Zeng Z, Li C G, Tao N, Feng L C, Zhang C L 2012 *NDT &E International* **48** 39

[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] Zeng Z, Zhou J, Tao N, Feng L C, Zhang C L 2012 *Infrared physics and technology* **55** 200-4

[9] Zeng Z, Tao N, Feng L C, Zhang C L 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 023112

[10] Shepard S M, Lhota J R, Rubadeux B A, Wang D 2003 *Opt. Eng.* **42** 1337

[11] Tao N, Zeng Z, Feng L C, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174212 (in Chinese) [陶宁, 曾智, 冯立春, 张存林 2012 物理学报 **61** 174212]

[12] Sun J G 2008 U. S. Patent No. 6,542 849 [2003]

[13] Maldague X P, Marinetti S 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 2694

Logarithmic minus peak second derivative time based depth prediction*

Zeng Zhi[1)2)] Tao Ning[2)] Feng Li-Chun[2)] Zhang Cun-Lin[2)†]

1) (*College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing* 400047, *China*)

2) (*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*)

(Received 23 January 2013; revised manuscript received 1 March 2013)

Abstract

This paper proposes to use minus peak time of second derivative with respect to time on logarithmic curve of temperature versus time as a characteristic time for defect depth prediction in pulsed wave thermography. First, the paper introduces the basic principle of pulsed wave thermography, and constructs the theoretical relation between logarithmic minus peak second derivative time and the square of defect depth based on the solution of semi-infinite body. Then, two specimens of steel and aluminum were manufactured with flat-bottom holes to simulate defects. Thermographic image sequences of those two specimens were obtained by using pulsed wave thermography, and then the logarithmic minus peak second derivative time were extracted. The extracted characteristic time has a very good linearity relation with the square of defect depth, and this linearity could be used for defect depth prediction in practical applications. The advantages and disadvantages of the proposed method and the widely used logarithmic peak second derivative method are discussed.

Keywords: pulsed wave thermography, quantitative characterization, defect depth, minus peak

PACS: 87.63.Hg **DOI:** 10.7498/aps.62.138701

* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1233120).

† Corresponding author. E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn