

光热辐射测量技术应用于材料物性和缺陷的无损检测*

李佩赞 王钦华

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘要 描述了光热辐射测量技术的特点、原理和测量装置, 并扼要介绍了材料热扩散率、材料表面伤痕和内部缺陷的无损检测。

关键词 光热辐射测量, 热扩散率, 缺陷, 无损检测

Abstract The characteristics, principles and measuring equipment of photothermal radiometry are described. A brief introduction to the measurement of thermal diffusivity of solid materials, nondestructive evaluation of surface scars and inner defects of matter is given.

Key words photothermal radiometry, thermal diffusivity, defect, nondestructive evaluation

1 引言

光热辐射测量 (photothermal radiometry) 技术, 简称 PTR 技术, 与光声光谱 (PAS) 技术、光热偏转 (PTD) 技术、光热透镜 (PTL) 技术等都属于热波检测, 是一门新的检测技术。

PTR 技术和热成像技术一样, 也是属于红外检测的范畴。但 PTR 本身具有独特的优点, 与 PAS 相比, 是一种非接触检测, 无需与被测样品接触, 对样品尺寸不加限制; 与 PTD、PTL 相比, 只需照射光, 省去检测光, 实验装置较为简单, 使用调节较为方便; 与热成像相比, 设备费用省得多, 而且是采用调制光照射样品, 使样品吸收光后, 引起周期性温升和热 (红外) 辐射变化, 因而具有信号振幅和信号位相两个可测因子 (热像探测中只有信号振幅因子), 提高了测量的灵敏度和可靠性, 加上采用响应快的红外探测器, 进行非接触探测, 特别适用于真空、高温、高压和动态等特殊环境中的样品的遥感遥测。所以 70 年代后期以来, PTR 已在表面科学^[1]、光热光谱分析^[2]、非接触检测^[3,4]等方面

得到了重要应用, 目前正处于发展阶段^[5]。

2 原理

PTR 技术的原理^[6]是, 采用一束经调制的光照射被测样品, 样品吸收光后, 引起局部性和周期性的温度涨落和红外辐射的变化, 采用适当的红外探测器, 即可探测样品产生的光热信号。由于样品产生的光热信号的大小与样品的光学性质、表面状态、内部结构和热物理特性等因素有关, 为 PTR 技术的广泛应用提供了理论依据。

依光激励方式不同, PTR 可分为连续调制激励和脉冲激励。前者采用连续激光或其他强光作为照射光, 调制频率一般为十到几百赫兹, 在能够保证有足够大的信噪比时, 亦可采用更高的调制频率; 后者采用脉冲激光作为照射光, 脉冲功率为几个毫焦到几个焦, 脉冲持续时间

* 国家自然科学基金资助项目。

1995 年 5 月 29 日收到初稿, 1995 年 7 月 31 日收到修改稿。

为纳秒到毫秒。

依测量方式不同, PTR 可分为透射测量和背向散射测量. 透射测量即从透射方向测量 [图 1(a)], 入射调制光和测量装置位于样品的两边, 一般不用于遥测, 如果入射光光强不够大, 光热信号较弱, 测量仅能限于薄层样品; 背向散射测量从漫反射方向测量 [图 1(b)], 入射调制光和测量装置位于样品的同一边, 适用于对样品进行遥测, 并且对厚度较厚和强散射样品亦很适用.

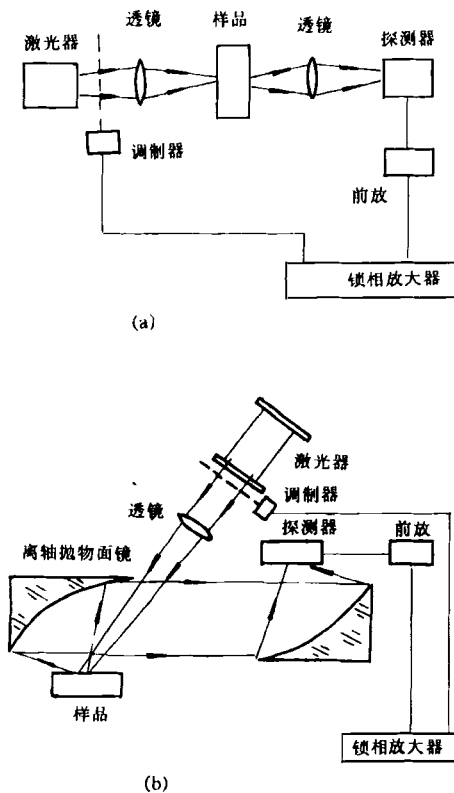


图 1 光热辐射测量装置
(a)透射测量;(b)背向散射测量

对于单层样品的 PTR 信号的理论分析在文献[7]中已作了介绍, 文献[8]在假设入射光为 $I = I_0[1 + \exp(j\omega t)]$ 的调制光照射样品(如

图 2 所示), I_0 为入射光强的幅值, $\omega = 2\pi f$ 为调制圆频率, 则样品热辐射的变化由 $W = \epsilon\sigma T^4$ 得

$$\delta W = 4\epsilon\sigma T^3 \delta T,$$

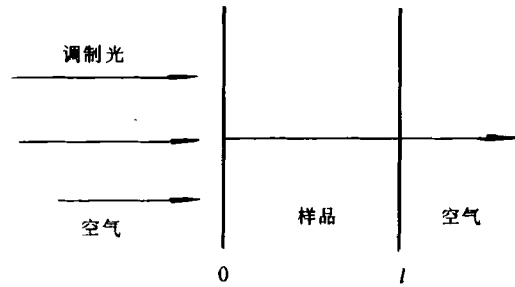


图 2 单层样品

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数, ϵ 为样品的发射率(忽略随温度的变化), T 为样品达到动态平衡时的表面静态温度. 红外探测器输出的 PTR 信号正比于 δW . 采用一维热传导模式处理, 并设样品的光吸收系数较大, 可得样品前后表面温度改变量分别为 $\delta T(0) = A(0)\cos\varphi(0)$ 和 $\delta T(l) = A(l)\cos\varphi(l)$. 对于漫反射光热信号的振幅 $A(0)$ 和位相 $\varphi(0)$ 分别为^[8]

$$A(0) = \frac{\sqrt{2}I_0}{2k\mu^{-1}} \left[\frac{e^{2l\mu^{-1}} + e^{-2l\mu^{-1}} + 2\cos(2l\mu^{-1})}{e^{2l\mu^{-1}} + e^{-2l\mu^{-1}} - 2\cos(2l\mu^{-1})} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$\varphi(0) = \tan^{-1} \left[\left(\frac{e^{l\mu^{-1}} - e^{-l\mu^{-1}}}{e^{l\mu^{-1}} + e^{-l\mu^{-1}}} \right) \tan(l\mu^{-1}) \right] - \tan^{-1} \left[\left(\frac{e^{l\mu^{-1}} + e^{-l\mu^{-1}}}{e^{l\mu^{-1}} - e^{-l\mu^{-1}}} \right) \tan(l\mu^{-1}) \right]^{-\pi/4}. \quad (2)$$

透射光热信号的振幅 $A(l)$ 和位相 $\varphi(l)$ 分别为:

$$A(l) = \frac{\sqrt{2}I_0}{\kappa\mu^{-1}} [e^{2l\mu^{-1}} + e^{-2l\mu^{-1}} - 2\cos(2l\mu^{-1})]^{-1/2}, \quad (3)$$

$$\varphi(l) = -\tan^{-1} \left[\left(\frac{e^{l\mu^{-1}} + e^{-l\mu^{-1}}}{e^{l\mu^{-1}} - e^{-l\mu^{-1}}} \right) \tan(l\mu^{-1}) \right]^{-\pi/4}, \quad (4)$$

式中 $\mu = \left(\frac{2\alpha}{\omega}\right)^{1/2}$, 称为热扩散长度, α 为热扩散率, k 为热导率.

3 应用

从(1)–(4)式可以看出, PTR 信号的振幅和位相与样品的物性 α, k , 厚度 l 和调制频率 f 等有关. 依此, 可进行以下几个方面的应用测量.

3.1 材料热扩散率的测量

热扩散率是材料的重要热物理参数, 在新材料开发和其他应用研究中, 快速准确地知道其数值有着重要意义. 但是热扩散率的数值在很大程度上依赖于材料的物理状态和制备过程, 确切的数值往往需要通过实地测量. 国内目前多采用激光脉冲法, 测量装置比较复杂. 我们已应用 PTR 法测量稳态下光热信号的振幅和位相的频率特性曲线, 用曲线拟合法确定材料的热扩散率^[9]. 若由计算机进行采样、频率扫描、范围控制和数据处理, 便可实时快速求得样品的热扩散率.

在激光材料处理过程中, 材料热扩散率将随材料表面层硬化程度的变化而变化, 于是应用 PTR 法可以遥测热扩散率的变化以监控激光对材料的处理过程^[10].

3.2 材料表面微伤痕的无损检测

试样表面出现微伤痕时, 伤痕处相当于试样厚度有了一些减小, 相应的 PTR 振幅信号和位相信号(滞后)增大. 以透射检测为例, 从(3), (4)式可知, 其光热信号 $A(l), \varphi(l)$ 与厚度 l 联系密切. 当 l 减小时, $A(l), \varphi(l)$ 增大. 图 3(a), (b)所示为壁厚 0.2mm 的紫铜和铝样品^[11], 内壁分别有三条人工刻痕的振幅扫描曲线. 可以看出, 刻痕位置和振幅最大值完全对应. 刻痕深度越深, 即厚度越小, 振幅信号越大; 刻痕宽度越宽, 对应于振幅扫描曲线越展宽. 测量了试样各伤痕处的频率特性曲线, 然后用最小二乘法对测量数据进行曲线拟合, 求出伤痕处试样的实际厚度, 再与无伤痕试样的

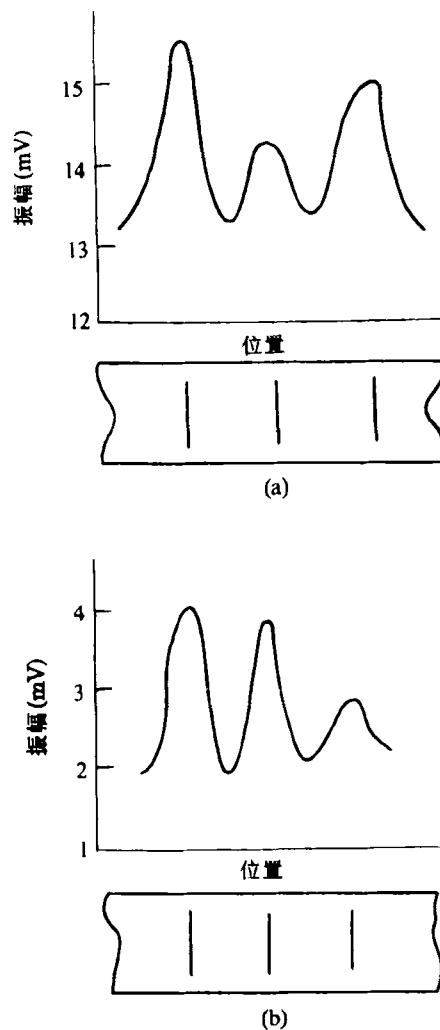


图3 材料表面的无损检测
(a)紫铜样品;(b)铝样品

厚度比较, 即可计算相应的伤痕深度. 尤其对仪器和人眼无法接触到的圆筒试样内壁, PTR 技术可提供较为方便的无损检测方法. 我们应用透射 PTR 技术测量了某圆筒壁厚为 0.200mm, 各伤痕处的壁厚在 0.180—0.192mm 之间的伤痕深度, 最小的达 $8\mu\text{m}$ ^[11]. 由于该圆筒很薄, 是超声的盲区, 超声难以检测, 但采用 PTR 技术检测十分有利. 由于整个样品薄, 光热信号大, 信噪比大于 50, 因此获得了很高的信噪比和比较好的空间分辨率.

3.3 材料内部缺陷的无损检测

对于单层样品,当内部存在缺陷或不均匀结构时,热传递过程产生不同程度的受阻,于是缺陷或不均匀结构处 PTR 信号的振幅和位相出现明显的改变.图 4 所示为厚度为 2mm 的铝平板,内有直径分别为 0.8mm, 0.8mm, 1.0mm, 孔中心距离分别为 25mm 和 30mm 的三个小孔,采用调制频率为 8.17Hz 的 PTR 振幅 $A(l)$ 和位相 $\varphi(l)$ 的扫描曲线.两次各自的扫描曲线完全一致,说明重合性好.由 $A(l)$, $\varphi(l)$ 扫描曲线对比可以看出,对应于孔 1 和孔 3 处振幅减小,位相滞后增大,与实际情况一致,但对应于孔 2 处位相滞后增大,表明此处有内孔存在,然而从振幅反而增大(热传导不被受阻),却得不出此处有孔的结论,这是由于受表面状态吸收不同影响所致,而且 $A(l)$ 扫描曲线较为平坦,灵敏度低,可见,检测材料内部的缺陷,位相法优于振幅法^[12].实际应用中,可根据不同的被测对象,选择其中的一个信号因子(振幅或位相)作为主要参量,另一个作为辅助参量,进行比较,以提高检测的灵敏度和可靠性.

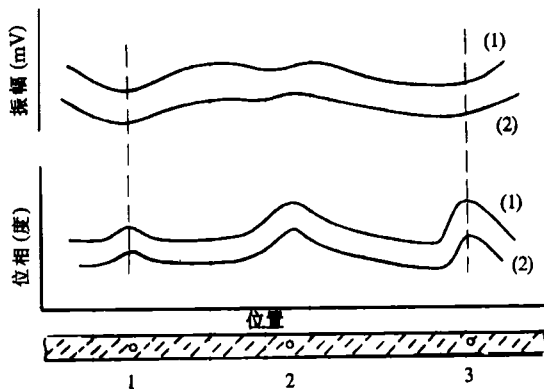


图 4 铝板的振幅和位相扫描曲线

单层样品内部存在缺陷时,理论上可近似看成三层样品结构,用三层(或多层)的 PTR 理论^[13],定量计算缺陷的线度.

4 小结

以上分析表明, PTR 技术应用于材料物性和缺陷的无损检测是可行的,有效的,尤其对于薄层样品,光热信号大,信噪比高,采用设备较为简单的透射 PTR 检测装置,即可获得较高的灵敏度.此外,为了提高检测的空间分辨率,可将入射调制光经聚焦后照射于样品^[14].若根据特定的要求,进行专门的仪器结构设计,可望 PTR 技术成为无损检测的新的有力工具.

参 考 文 献

- [1] Wang Y. H., R. I. Towns, G. F. Hawkins, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 538.
- [2] P. E. Nordal, S. O. Kanstand, *Appl. Phys. Lett.*, **38**(1981), 486.
- [3] G. Buss, *Infrared Phys.*, **20**(1980), 419.
- [4] A. C. Tam, *Infrared Phys.*, **25**(1985), 305.
- [5] P. E. Nordal, S. O. Kanstand, *Infrared Phys.*, **25**(1985), 295.
- [6] 李佩赞, *红外技术*, **11-3**(1989), 1.
- [7] R. Santos, L. C. M. Miranda, *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 4194.
- [8] 管国兴、郑小明、李佩赞, *红外研究*, **7-3**(1988), 201.
- [9] Qian Lin, Li Peizan, *Appl. Opt.*, **29-28**(1990), 4241.
- [10] M. Mundasa, Ma Tianchi, A. Mandelis et al., *Material Science and Engineering*, **A159**(1992), 111.
- [11] Li Peizan, Zhou Genyuan, *Appl. Opt.*, **31-19**(1992), 3725.
- [12] 李佩赞、王钦华, *仪器仪表学报*, **15-3**(1994), 265.
- [13] 李佩赞等, *红外研究*, **9-3**(1990), 215.
- [14] 王磊、李佩赞, *光学学报*, **14-10**(1994), 1117.