

微机控制的光热辐射技术测量 金属的热扩散系数*

王钦华 李佩赞 王磊

(苏州大学物理系, 江苏, 苏州, 215006)

摘要 介绍用光热辐射技术测量材料热扩散系数的基本原理和微机控制测量装置, 给出了几种常见金属材料热扩散系数的测量结果, 并对影响测量结果的因素进行了讨论, 实验结果表明, 该技术是一种快速测量材料热学性质的有效手段。

关键词 光热辐射, 微机控制, 热扩散系数测量。

引言

热扩散系数是材料的重要热物理参数, 通常测量热扩散系数需要较长的时间和复杂的仪器设备, 而且大多都是接触式测量^[1-2]。近年来, 光声技术和光热偏转技术为热扩散系数的测量提供了非接触的测量手段^[3-6]。但是, 在光声技术中, 样品必须被密封在一个“光声池”内, 样品的尺寸受到限制; 而在光热偏转技术中, 探测光及探测器的调节给实际测量带来不便。本文采用光热辐射技术, 直接在大气环境中快速、非接触测量热扩散系数, 利用计算机对测量系统进行实时控制和数据采集并实现快速计算, 为测量凝聚态物质的热光性质以及监控材料内部变化等研究提供了一种新的手段。

1 测量原理

设有一束受调制的光照射样品, 入射光强为 $I = I_0(1 + e^{i\omega t})$, I_0 为入射光强幅值, $\omega = 2\pi f$ 为调制光的圆频率。样品吸收光后, 引起升温, 其温度最后达到的静态温度附近以调制光频率呈周期性变化。周期性变化的辐射改变量根据 Stefan-Boltzmann 定律为:

$$\delta W = 4\epsilon\sigma T^3 \delta T, \quad (1)$$

式(1)中 σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, $T = T_0 + T(X)$, T_0 为环境温度, $T(x)$ 为光束照射引起的不随时间改变的温度直流项, δT 为样品表面的温度变化。当用红外探测器探测时, 其输出

* 国家自然科学基金和江苏省教委自然科学基金资助项目

本文1994年7月16日收到, 修改稿1994年11月24日收到

的 PTR 信号 S 与样品的辐射改变量成正比, 即:

$$S \propto \delta W. \quad (2)$$

以 $\phi(x, t) = T_0 + T(x) + \delta T(x, t)$ 表示样品在 t 时刻 x 处的温度, 则得一维热传导方程为

$$\frac{\partial^2 \phi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} - \frac{(1 - \beta')}{k} \beta I_0 e^{-\beta x} (1 + e^{j\omega t}), \quad (3)$$

式(3)中 k 为样品的热导率, $\alpha = k/\rho C$ 为样品的热扩散系数, β 为样品的体吸收系数, β' 为样品表面的吸收率. 用分离变量法解式(3), 并结合边界条件, 可得样品后表面的温度改变量为^[7]

$$\delta T(l, t) = \frac{2I_0}{k\sigma_s(e^{\sigma_s l} - e^{-\sigma_s l})} e^{j\omega t}, \quad (4)$$

式(4)中 $\sigma_s = (j\omega/\alpha)^{1/2}$, $\sigma_s = \mu(1 + j)$, $\mu = (\pi f/\alpha)^{1/2}$, l 为样品的厚度. 由于 $\delta T(l, t)$ 是复数, 所以略去时间参数后, 式(4)可化成振幅和位相的表达式. 从式(4)得到的后表面的 PTR 信号的振幅和位相的表达式为

$$A(l) = \frac{\sqrt{2} I_0 Q}{(\pi f k \rho C)^{1/2}} [e^{2l\mu} + e^{-2l\mu} - 2\cos(2l\mu)]^{-1/2} = P \{ [e^{2l\mu} + e^{-2l\mu} - 2\cos(2l\mu)] \}^{-1/2}, \quad (5)$$

$$\phi(l) = -\tan^{-1} \left[\frac{e^{l\mu} + e^{-l\mu}}{e^{l\mu} - e^{-l\mu}} \tan(\mu l) \right] - \frac{\pi}{4}. \quad (6)$$

其中 $P = \frac{\sqrt{2} I_0 Q}{(\pi k \rho C)^{1/2}}$, Q 为测量系统的放大倍数以及与样品表面发射率有关的常数.

从式(5)和式(6)可见, PTR 信号的振幅和位相除与调制频率有关外, 还是样品厚度 l 和热扩散系数 α 的函数. 样品厚度 l 是容易测量的, 于是在测得 PTR 信号的振幅和位相的频率特性曲线后, 即可用曲线拟合法求得样品的热扩散系数 α 和参数 P .

2 测量装置与测量结果

测量装置如图 1 所示, 一束功率为 5W 的 CO₂ 激光经斩光器(Stanford SR540)照射到

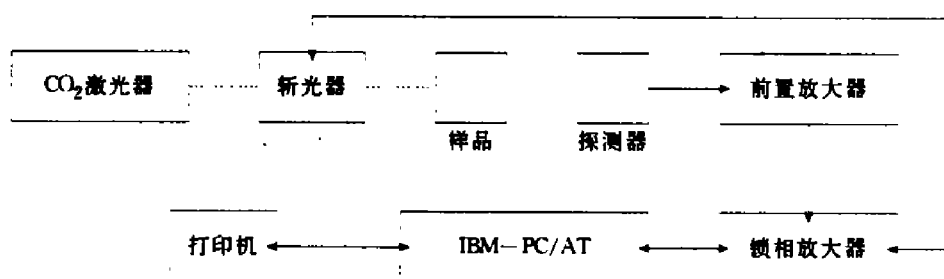


图 1 测量装置框图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement set-up

样品上,在样品的后表面用一致冷的光导型 HgCdTe 探测器(由中科院上海技术物理研究所提供)探测样品的热辐射.探测器的输出信号经一前置放大器后被输入到双相锁相放大器(Stanfrd SR530),锁相放大器将其与斩光器输出的参考信号一起进行相关检测后输出给微机(IBM-PC/AT-286).微机可同时对光热信号的振幅、位相、斩光频率和时间 4 组数据进行采集和储存,并可对所采集的数据进行适当处理(如 3 点平均,9 点平均或对数运算等).采用麦夸脱法可同时对参量 P 和 a 进行曲线拟合,结果可直接由屏幕读出或由打印机输出.在这套装置中,微机通过菜单方式可对锁相放大器的所有功能进行控制,并可通过锁相放大器精密控制斩光器的斩光频率.测试中,计算机的采样频率可根据实际需要(0.5-20Hz)进行选择,斩光频率的扫描范围以及完成该扫描范围的时间可根据信噪比大小以及数据拟合情况适当选取.实际测量中,一般应在保证信噪比大于 10 的情况下选取频率扫描范围.

为便于检验测量结果的正确性,实验对几个常见金属样品的热扩散系数进行了测量,测量结果见表 1.由表 1 可见测量结果与文献值吻合得较好.

表 1 几种金属热扩散系数的光热辐射测量值
Table 1 Measurement results of thermal diffusivity of metals using PTR

样品名称	样品厚度 (mm)	热扩散系数 测量值 (mm ² /s)	热扩散系数 文献[8]报道值 (mm ² /s)
铅	2.050	23.9	24.1
碳锰硅钢 (1.03%Mn,0.74%Si)	1.685	11.2	11.6
黄铜 (70%Cu,30%Zn)	1.976	32.5	33.9
电解铜 (98.4%Cu)	3.890	113.0	116.0

* 纯铜的文献报道值

3 讨论

3.1 样品厚度对测量结果的影响

曲线拟合中,唯一的一个参数输入量就是样品的厚度,因此,样品厚度测量的准确度将直接影响到热扩散系数的测量结果.理论和实验表明,如果样品厚度的测量误差为 1%,将导致扩散系数的测量误差为 2%.但厚度的测量误差并不影响 P 的拟合值.

实验发现,如果样品的厚度很薄(例如小于或远小于样品在 10Hz 时的热扩散长度 $\mu_s = (\frac{a}{\pi f})^{1/2}$,热扩散系数的测量结果将出现较大偏差,而当样品的厚度增加到大于或几倍于该热扩散长度时,则可得到令人满意的测量结果.这可能是由于当样品很薄时,实际的热传导与理论上的一维模型不相符合.因此,实际测量时,在保证足够信噪比的前提下,应适当选取较厚的样品.

3.2 样品表面状态对测量结果的影响

由于样品的表面情况不一样,可能引起样品表面的吸收系数和表面发射率的变化,进而引起红外辐射能量的变化.实验发现,当同一样品的表面情况变化时,拟合参数 P 的值发生变化,但对热扩散系数的测量没有影响.因此,测量热扩散系数时,可适当改变样品表面状态,以增大信号的信噪比,而不致于给热扩散系数的测量带来影响.

4 结语

本文介绍了一种采用光热辐射技术快速简便地测量热扩散系数的方法, 实现了计算机对测量系统的实时控制、数据采集和快速计算. 测量的结果与文献值吻合得较好. 这一微机控制的光热辐射测量系统不仅在材料热扩散系数测量方面, 而且在材料的无损检测和监控材料的物性变化等方面都有广阔的应用前景.

致谢 作者衷心感谢我校测试中心电镜室吴志明和高伟建工程师在样品成份测试中给予的帮助.

参考文献

- 1 Cowan R D. *J. Appl. Phys.*, 1993, **32**:1363
- 2 Watt D A. *Br. J. Appl. Phys.*, 1966, **17**:231
- 3 Pessoa o, Jr Cesar C L, et al. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**:1316
- 4 Kuo P K, Sendler E D, et al. *Can. J. Phys.*, 1986, **64**:1168
- 5 Salazar A, Sanchez-Lavega A, Fernandez J. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**:4150
- 6 Salazar A, Sanchez-Lavega A, Fernandez J. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**:1216
- 7 管国兴, 郑小明, 李佩赞. *红外研究*, 1988, **7**:201
- 8 White Frank M. *Heat Transfer*, Massachusetts: Addison-Kesley, Inc., 1984

MEASUREMENT OF THE THERMAL DIFFUSIVITY OF METALS USING PHOTOTHERMAL RADIOMETRY CONTROLLED BY MICROCOMPUTER *

Wang Qinhuo Li Peizan Wang Lei

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract Based on the principle of measurement for the thermal diffusivity using the photothermal radiometry technique, the measurement set-up controlled by a microcomputer is introduced. Measurement results of the thermal diffusivity of several common metals are given, and some factors which affect the measurement results are discussed. The experimental results show that this new technique is a useful tool for fast measurement of thermal properties.

Key words Photothermal radiometry (PTR), microcomputer control, thermal diffusivity measurement.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Natural Science Foundation of Education Committee of Jiangsu Province