

用光热偏转技术对金属亚表面缺陷成像

章肖融 千昌明

(南京大学声学研究所)

提要: 报道用光热偏转技术(又称蜃景效应)对金属亚表面缺陷成象的实验系统和实验结果。实验表明这一方法对于完全无接触式地研究材料亚表面结构具有很大的应用潜力。

Imaging of metal subsurface defects with photothermal beam deflection technique

Zhang Xiaorong, Gan Changming

(Acoustics Institute, Nanjing University, Nanjing)

Abstract: Experimental system and results on imaging metal of subsurface defect with photothermal deflection (i.e. mirage effect) technique are presented. Experimental results show this technique has great potentialities in non-contact imaging of the subsurface-structure of materials.

一、引言

光热偏转技术, 又称“蜃景效应”(mirage effect) 技术, 是直接利用热波的特性来研究透明和不透明固体的特性。蜃景效应是光热激光偏转的形象比喻, 简称 OBD 或 PTLBD。这一技术首先由 Fournier 等^[1] 用来测量弱光吸收的凝聚材料的光吸收系数及液 He 温度下材料的相变。近几年来则已用来研究不透明材料的表面结构^[2]、亚表面结构的探测及成象^[3~5]。它与光声方法相比, 有着更大的潜力。因为在使用此技术时无需光声盒, 可允许较大面积($\sim 25 \times 25 \text{ cm}^2$) 扫描, 也不需压电换能器与样品相粘结, 是非接触式的, 且

测量是局域性的, 可以由扫描获得三维分布的讯息。缺点是调节要难些, 样品表面要平。

OBD 技术通常需要二束激光, 一束强激光作为加热束, 一束弱激光作为探针束。多数作者用 Ar^+ 激光器作为加热束, He-Ne 激光作为探针束, 本文介绍的是用 CO_2 激光器作为加热束。

二、原理及实验系统

横向蜃景效应的原理如图 1 所示。一束低频调制的强激光(称为泵束)垂直照射样品表面, 使其局部变热, 产生周期性的温度涨

收稿日期: 1986 年 9 月 15 日; 收到修改稿日期: 1987 年 1 月 21 日。

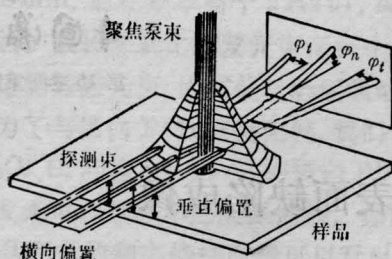


图1 层景效应原理图

落,同时亦使样品表面附近的气体层(其厚度约与气体热扩散 μ_g 相同)内形成周期性变化着的光折射率梯度。另一束弱激光作为探针束,平行并且贴近样品表面,当其通过强激光引起的周期性折射率梯度变化的气体层时就会随之发生周期性的偏转,偏转角为 $^{[1,6]}$:

$$\varphi = - \int_l \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \nabla T_g \times dl \quad (1)$$

式中 n 为室温时气体的折射率, T_g 是气体中的温度, l 是探针束前进的路径, dl 为沿路径的增量。一般有:

$$\varphi = A\varphi_n + iB\varphi_t$$

其中 A 、 B 是常数, φ_n 是垂直于样品的偏离, φ_t 是横过样品表面的偏离,如图1所示。 T_g 是样品表面温度 T_s 的函数:

$$T_s = \int_0^{\infty} t_{(\lambda)} h_{(\lambda)} \lambda J_{0(\lambda r)} d\lambda \quad (2)$$

式中 $J_{0(\lambda r)}$ 为零阶第一类 Bessel 函数, r 是在样品表面离热源中心的径向位置坐标; $h_{(\lambda)}$ 为源函数,取决于强激光束的强度分布; $t_{(\lambda)}$ 为响应函数,取决于样品、气体、背衬材料的热扩散系数($\alpha_s, \alpha_g, \alpha_b$)、光吸收系数、热导性及其力学性质。因而偏转角 φ 的振幅(即大小)和相位中都包含着样品表面、亚表面(在热扩散层内)的结构、组分等信息。故当样品的亚表面有缺陷存在时,缺陷所在区域的热学、力学特性与样品无缺陷处不一样,我们就能够由偏转角的振幅和相位变化描绘出缺陷的像。

一般样品表面产生的周期性的温度涨落又称热波(或温度波)。它是一个高阻尼的波,当其向样品内部传递时,其透入深度(热

扩散长度)可按下式估计:

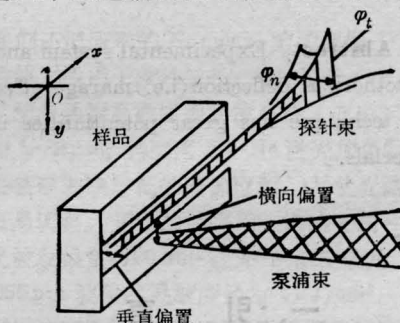
$$\mu_s = (\alpha_s / \pi f)^{1/2} \quad (3)$$

$$\alpha_s = \frac{K}{\rho C_p}$$

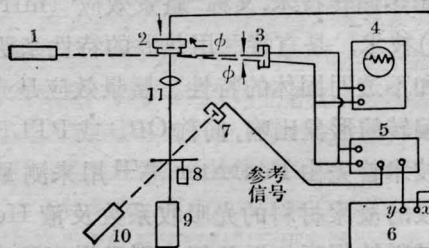
式中 f 为调制频率, K 为热导系数, ρ 为密度, C_p 为定压比热。所以本方法具有测量不透明样品亚表面约一个热扩散长度范围内的缺陷的优点。

我们用来探测亚表面缺陷的系统如图2所示。

CO_2 激光束,由频率20c/s的机械斩波器调制后经聚焦透镜垂直入射在样品上。一束He-Ne激光(也可以用其它小型白光源)与 CO_2 光束同时被调制,由光电二极管接收后送至锁相放大器作为参考信号。另一束He-Ne激光作为探针束与样品表面平行,并在样品表面附近与泵束相交。周期性偏转着的探针束光由接成差分形式的硅光电池接收并送入单通道输出的锁定放大器,分别由



(a) 光束与样品相对位置图



(b) 测量系统方框图

- 1, 10—He-Ne 激光 (2mW); 2—可移动平台及样品; 3—差分光电接收器; 4—监视器; 5—锁定放大器; 6—X-Y 记录仪; 7—光电二极管; 8—斩波器; 9— CO_2 激光; 11—透镜

图2 OBD 成象系统示意图

X-Y 记录仪或数字电压表读出其在同相时和 90° 相差时的输出信号 φ_n ，再用计算机算出其振幅和相位。当移动样品，使两激光束交点横扫过有缺陷区与无缺陷区时，可观察到 φ_n 的变化，从而求出缺陷的剖面形貌。综合所有剖面形貌，就可得出整个缺陷像。

三、实验结果和讨论

我们对两种样品进行了观察。一种是黄铜板，大小为 $121 \times 30 \times 1.2 \text{ mm}^3$ ，背面是人工锉出长 9 mm，底宽 $1.25 \sim 1.75 \text{ mm}$ ，顶部呈圆尖形，最薄处离表面的距离 $b_s = 0.11 \text{ mm}$ 的缺陷，如图 3(a) 所示。另一种是铝板，大小为 $43 \times 69 \times 4 \text{ mm}^3$ ，背面锉出长 43 mm，底部宽 6 mm，顶部宽 4 mm， $b_s = 0.15 \sim 2 \text{ mm}$ ，并有一微小区域 (A 处) 特别深的沟槽，如图 3(b) 所示。槽尖 (对黄铜) 及槽底 (对铝) 是用锉刀锉成的，并不十分平整。两样品表面均用细砂纸和绸布抛光。测量时样品与激光束的相对位置如图 3(c) 所示。测得的黄铜和铝样品亚表面缺陷见图 4 及图 5。

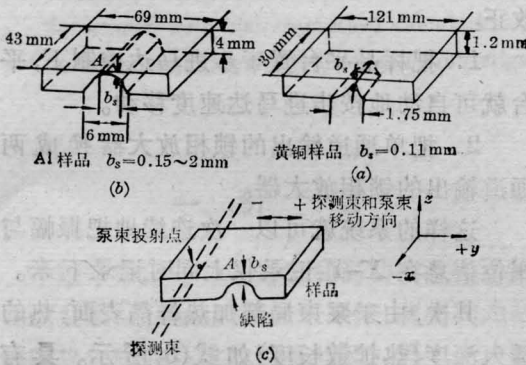


图 3 样品与激光束相对移动位置详细示意图

图 4 是对应于黄铜样品亚表面下缺陷像，其中 (a)、(c)、(d) 是让样品由左向右 (即沿 $+y$ 方向) 移动而得，(b) 则是让样品由右向左 (即沿 $-y$ 方向) 移动而得。将 (a)、(b)、(c)、(d) 各图形进行比较，我们可以获得如下几点信息：

1. 各图的振幅和相位信号都反映出缺

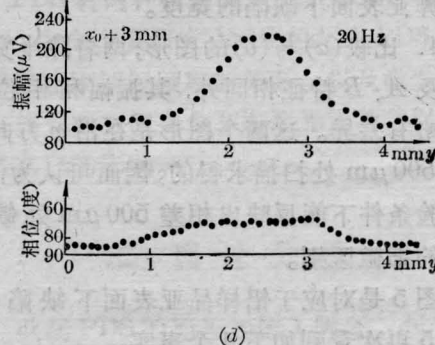
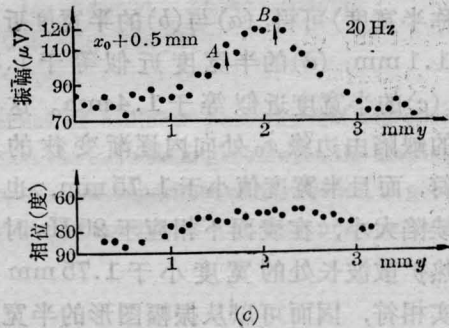
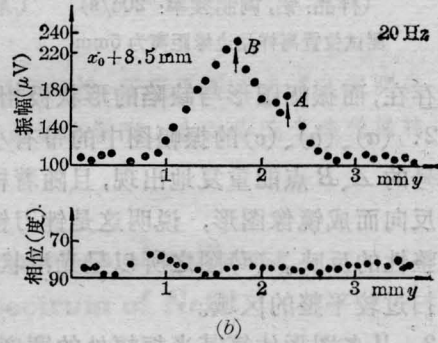
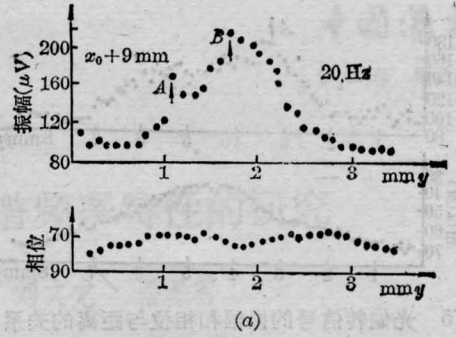


图 4 光偏转信号的振幅和相位与距离的关系 (样品: 黄铜, 调制频率: 20 c/s)

- (a) $x = x_0 + 9 \text{ mm}$ 处剖面图;
- (b) $x = x_0 + 8.5 \text{ mm}$ 处剖面图;
- (c) $x = x_0 + 0.5 \text{ mm}$ 处剖面图;
- (d) $x = x_0 + 3 \text{ mm}$ 处剖面图。

x_0 为缺陷底宽为 1.75 mm 的铜板边缘位置

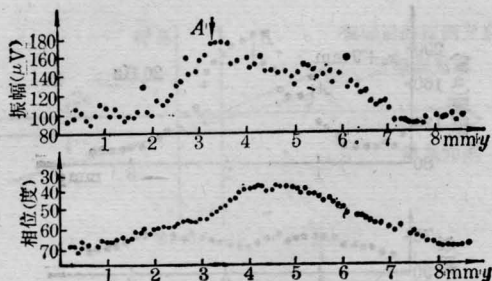


图5 光偏转信号的振幅和相位与距离的关系
(样品: 铝, 调制频率: 20c/s)
测试位置离样品边缘距离为5mm

陷的存在, 而振幅图形与缺陷的形状极相似。

2. (a)、(b)、(c)的振幅图中的带有小箭头记号的A、B点能重复地出现, 且随着样品移动反向而成镜像图形, 说明这是锉刀锉得不平整性的反映。(d)图之所以呈光滑状, 是正好扫过较平整的区域。

3. 从各图形估算其半振幅处的宽度(以下简称半宽度)可得: (a)与(b)的半宽度近似等于1.1mm, (d)的半宽度近似等于1.35mm, (c)的半宽度近似等于1.4mm。这与手锉的缺陷由边缘 x_0 处向内逐渐变狭的事实相符, 而且半宽度值小于1.75mm, 也与真实缺陷大小, 在表面下相应于20Hz时的一个热扩散波长处的宽度小于1.75mm这一事实相符, 因而可以从振幅图形的半宽度来估算亚表面下缺陷的宽度。

4. 比较(a)与(b)的图形, 两者除半宽度相近及A、B特征相同外, 其振幅和相位曲线均略有差异。这两个图形是在沿 x 方向位置差 $500\mu\text{m}$ 处扫描求得的, 因而可认为, 在本实验条件下能反映出相差 $500\mu\text{m}$ 处缺陷形状的细微区别。

图5是对应于铝样品亚表面下缺陷像, 由图5再次看到如下几个事实:

1. 无论是振幅或相位图形均反映出缺陷的存在, 振幅图轮廓与缺陷形状极为相似。

2. 振幅图中带有小箭头A点处的振幅信号加强对应于样品中 b_s 最小处的缺陷。

3. 从振幅图中求得半宽度为4.3mm,

比缺陷的顶部宽度4mm大, 比缺陷底部宽度6mm小, 而与在样品表面下一个热扩散长度(1.25mm)处, 按照图3(b)中几何形状估算出的宽度相接近。按图3(b), 当 $b_s=0.15\sim 0.2\text{mm}$, 半宽度都近似等于4.3mm。

4. 图中振幅和相位信号均显示出随着 y 增加而减弱, 变化逐渐缓慢, 这对应于缺陷顶部离表面的深度由小变大这一事实。

综合图4和图5可以得到如下几点结论:

1. 由蜃景效应的振幅或相位可以求出缺陷像。

2. 振幅图形的半宽度可用来估计缺陷的宽度。

3. 在同一样品中, 在同一泵束光能量下, b_s 愈小偏转信号愈大。我们可以由信号的大小来判断亚表面缺陷离表面的深浅。这里要提请注意, 若要定量的估算出未知缺陷的 b_s 深度, 则尚需进一步改变调制频率, 当偏转信号趋向消失时, 对应频率下的热扩散长度可用来估算 b_s 。(分析见下)。

还需要指出的是, 上述系统还可作如下改正:

1. 把样品平台置于步进马达控制下, 平台就可自动地按步进马达速度移动。

2. 把单通道输出的锁相放大器换成两通道输出的锁相放大器。

这样的系统就可以一次连续地把振幅与相位信息在X-Y记录仪上同时记录下来。

其次, 由于泵束局部加热样品表面, 热的透入深度(热扩散长度)如式(3)所示。具有两个特点:

1. μ_s 随调制频率增高而减小, 如图6所示。

2. μ_s 与同频率的声波长相比小好几个数量级(见表1)。

因此, 对样品近至几十 μm 数量级的亚表面特性进行检测正是光热偏转技术的突出之处。而且可以由改变调制频率来改变其探

表1 铝样品的 μ_s 与 λ

f	20Hz	100Hz	1kHz	1MHz
热扩散长度 μ_s (cm)	0.1255	0.056	0.0177	5.6×10^{-4}
声波长 λ (cm)	3.2×10^4	6.32×10^3	6.32×10^2	0.632

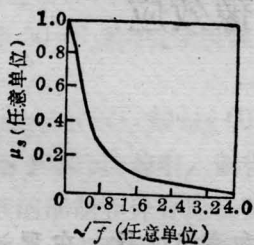


图6 μ_s 与 \sqrt{f} 的关系曲线

$$\left(\mu_s^{-1} = \sqrt{\frac{\sigma}{2}} \cdot \sqrt{f}\right)$$

(上接第 88 页)

三、结 论

1. 在波长范围 365~367 nm 内得到的 NO 共振增强多光子电离谱对应于经过 $X^2\Pi \rightarrow C^2\Pi$ 的多光子电离, 这是 (2+1) 过程, 作为探测 NO 的浓度 (2+1) 比 (2+2) 简单。

2. 用 REMPI 作为 [NO] 的测量方法, 研究了线性流管体系中 NO 与 O₃ 的快速反应动力学, 测得的速率常数为

$$k' = 1.1 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. 应用激光光谱的方法, 特别是 REMPI 方法作为化学反应动力学研究时必须

注意激光可能引起的光解等复杂因素的影响。在有光解存在的情况下, 通过引入表观解离率的近似处理方法可对实测反应速率常数进行修正。

测深度, 从而获得亚表面缺陷深度的估算或分层结构像。加上光热偏转技术的完全非接触式特点。这一方法对于完全无接触地、无损地研究材料表面、亚表面结构具有很大的应用潜力。

本工作得到教育部科技重点项目基金资助。

参 考 文 献

- 1 Fournier D *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1980; **36**: 130
- 2 Murphy J C *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1981; **38**: 196
- 3 McDonald F Alan *et al.* 1983 Ultrasonics Symp., 672
- 4 Kuo P K *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1983; **55**: 6245
- 5 Lepout F *et al. J. Appl. Phys.*, 1985; **57**: 1009
- 6 Aamad L C *et al. J. Appl. Phys.*, 1981; **52**: 4903

参 考 文 献

- 1 Cool T A. *Appl. Opt.*, 1984; **23**(10): 1559~1572
- 2 Sirkin E R. Haas Y. *Appl. Phys.*, 1981; **25**(3): 253~258
- 3 Phillips L F, Schiff H I. *J. Chem. Phys.*, 1962; **36**(6): 1509~1517
- 4 Mulcahy M F R. *Gas Kinetics*, Britain: Thomas Nelson and Sons. p. 144
- 5 McEwan Murray J, Phillips Leon F. *Chemistry of the Atmosphere*, London: Edward Arnold; 1975: 275~281