

# 金属材料亚表面的光热辐射检测

王心觉<sup>1,2</sup>, 刘恒彪<sup>1</sup>, 胡文祥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092;

<sup>2</sup>江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210023

**摘要** 为探讨光热辐射(PTR)技术检测金属材料亚表面缺陷的能力,理论分析了双层材料在强度调制激光束激励下产生的热波幅值和相位,实验检测了阶梯型钢板样品、铝/钢质盲孔阵列样品和钢质填锡盲孔样品的光热辐射信号。对于直径分别为 2.5, 2.0, 1.5 mm, 孔底厚度分别为 0.2, 0.4, 0.6 mm 的铝质盲孔阵列样品,实验得到的光热辐射相位分布显示了盲孔直径和孔底厚度的可区分性。对于钢质盲孔阵列样品,在盲孔填锡前后的光热辐射相位分布显示出一定区别。实验结果表明:聚焦光斑的光热辐射检测能探测到深度小于或约等于面层材料热扩散长度,截面积约等于或大于光斑面积的铝或钢内气孔缺陷。

**关键词** 测量; 材料检测; 亚表面缺陷; 光热辐射; 热波成像

**中图分类号** TB302.5      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.101201

## Photothermal Radiometry Testing on Subsurface of Metal Materials

Wang Xinjue<sup>1,2</sup>, Liu Hengbiao<sup>1</sup>, Hu Wenxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

<sup>2</sup> Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing, Jiangsu 210023, China

**Abstract** To investigate the ability of photothermal radiometry (PTR) testing on the subsurface of metal materials, the amplitude and phase of thermal wave generated from a double layer material which is excited by intensity modulated laser are analyzed theoretically. Besides, the PTR signals of stepped steel samples, aluminum/steel samples with blind hole array, and steel samples with blind hole filled tin are tested in experiments. For the aluminum samples with blind hole array with diameters of 2.5, 2.0, 1.5 mm and hole bottom thickness of 0.2, 0.4, 0.6 mm, the PTR phase distributions obtained by the experiment show that the diameter of the blind hole and the hole bottom thickness are distinguishable. For the steel samples with blind hole array, the PTR phase distribution before and after the blind hole filling with tin shows a certain difference. The experimental results show that the PTR detection of the focused spot can detect the stoma defect in aluminum or steel. The depth of the stoma defect should be less than or approximately equal to the thermal diffusion length of the surface material, and the cross-sectional area of the stoma defect should be approximately equal to or greater than the spot.

**Key words** measurement; material testing; subsurface defect; photothermal radiometry; thermal wave imaging

**OCIS codes** 120.4290; 120.6810; 040.3060

## 1 引言

光热辐射(PTR)检测技术是一种新型非接触材料检测方法,近 30 多年来引发了许多学科研究者的兴趣。这种技术从光声光谱学发展而来,继承了后者应用领域的广谱性,涉及物质吸收光谱<sup>[1]</sup>和光吸收系数测量<sup>[2-3]</sup>、材料热物性参数测量<sup>[4-5]</sup>、分层介质深度轮廓剖析<sup>[6]</sup>等。由于光热辐射信号来自受激光调制频率确定

收稿日期: 2017-05-19; 收到修改稿日期: 2017-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(11374230)

作者简介: 王心觉(1991—),男,硕士研究生,主要从事光声光热检测技术方面的研究。E-mail: wangxj12@qq.com

导师简介: 刘恒彪(1962—),男,博士,教授,主要从事光学测量、光声光热检测等方面的研究。

E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn(通信联系人)

的热波,从原理上说,该技术特别适用于检测材料的亚表面缺陷。已开展的针对光热辐射材料亚表面缺陷检测研究的对象有:材料疲劳损伤<sup>[7]</sup>和内部裂纹<sup>[8]</sup>、表面涂层粘附缺陷<sup>[9]</sup>、半导体材料缺陷<sup>[10]</sup>等。另一方面,由于光热辐射信号受到基体材料光学和热学性质,缺陷的位置、线度、形状和热学性质,激励光调制频率、入射光斑面积等检测实验参数的综合影响,必须根据基体材料与缺陷的具体情况,摸索适当的检测实验参数,这样才能得到有效的光热辐射信号。

本文为探讨光热辐射技术检测金属材料亚表面缺陷的能力,理论计算了双层材料在强度调制激光束激励下产生的材料表面温度的幅值和相位,实验检测了阶梯型钢板样品、铝/钢质盲孔阵列样品和钢质填锡盲孔样品的光热辐射信号。研究结果将为检测金属材料亚表面夹杂类缺陷的光热辐射技术的发展提供参考。

## 2 光热辐射检测的基本原理

考虑一个处于空气环境中的双层固体样品,如图 1 所示。在一束入射样品表面的强度调制平行激光束的激励下,样品吸收光能转换成热能,样品表面会产生红外辐射信号。假设入射样品表面的激光束强度按余弦规律变化,即  $I_m(t) = I_0 [1 + \cos(\omega t)] / 2$ , 其中  $I_0$ 、 $\omega$  和  $t$  分别表示激光出射强度、调制圆频率和时间。样品对光强直流分量的吸收会导致温度由开始时的持续升高到趋于一个稳定值,这是由于热流向周围环境的热传递。这个稳定的温度受样品内部缺陷的影响极小,不是光热辐射检测的特征信号。光热辐射检测的特征信号由公式中的余弦时间变化项激励。如果直接对含余弦函数的光激励求解样品温度场,求解过程比较复杂。为简化问题,可采用复指数函数  $\exp(j\omega t)$  代替  $\cos(\omega t)$ , 其中  $j$  为虚数单位。另外,金属是光的强吸收材料,光致热源可看成一个面热源,交变热源函数为

$$\tilde{Q}(x=0, t) = \frac{I_0}{2}(1-r)\exp(j\omega t), \quad (1)$$

式中  $r$  是样品光照表面的反射率。

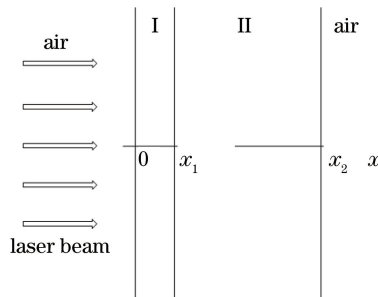


图 1 双层固体样品一维光热辐射信号的激励

Fig. 1 Excitation of one-dimensional PTR signals in a double layer solid material

用下标  $i=1,2$  分别表示样品的第 I、第 II 层。假定从样品辐射到周围空气中的热能可忽略不计,根据热传导方程,样品内各层的温度由以下方程组确定

$$\frac{\partial^2 T_i(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t}, i=1,2, \quad (2)$$

式中各层的热扩散率  $\alpha_i = k_i / (\rho_i c_i)$ ,  $k_i$ 、 $\rho_i$  和  $c_i$  分别为各层的热传导率、密度和比热容。在热传导方程组(2)式中代入交变热源函数解得的交变温度场具有  $\tilde{T}_i(x, t) = W_i(x) \exp(j\omega t)$  的形式。对这个复数温度场取实部即得到实际解。为求解交变温度场  $\tilde{T}_i(x, t)$ , 可以把时间变化因子  $\exp(j\omega t)$  分离出去, 只求温度场复振幅  $W_i(x)$ , 其满足  $\frac{d^2 W_i(x)}{dx^2} = \frac{j\omega}{\alpha_i} W_i(x)$ 。不难得出, 温度场复振幅具有指数形式的解<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} W_1(x) = A_1 \exp(\sigma_1 x) + B_1 \exp(-\sigma_1 x), & 0 < x < x_1 \\ W_2(x) = A_2 \exp[\sigma_2(x - x_1)] + B_2 \exp[-\sigma_2(x - x_1)], & x_1 < x < x_2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\sigma_i = (1+j)/\mu_i$  为空气和样品各层的热波矢量,  $\mu_i = \sqrt{2\alpha_i/\omega}$  为各层的热扩散长度。

各复值待定系数  $A_i$  和  $B_i$  ( $i=1,2$ ) 需根据边界条件和样品层间分界面的衔接条件(温度连续性和热流

强度连续性)来确定

$$\begin{cases} W_1(x_1) = W_2(x_1) \\ -k_1 \frac{dW_1(0)}{dx} = \frac{I_0}{2}(1-r) \\ -k_1 \frac{dW_1(x_1)}{dx} = -k_2 \frac{dW_2(x_1)}{dx} \\ -k_2 \frac{dW_2(x_2)}{dx} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,导出样品表面的温度复振幅为

$$W_1(0) = \frac{I_0(1-r)}{2k_1\sigma_1} \frac{1 + C \exp(-2\sigma_1 x_1)}{1 - C \exp(-2\sigma_1 x_1)}, \quad (5)$$

$$C = \frac{\sqrt{k_1\rho_1c_1} \{1 + \exp[-2\sigma_2(x_2 - x_1)]\} - \sqrt{k_2\rho_2c_2} \{1 - \exp[-2\sigma_2(x_2 - x_1)]\}}{\sqrt{k_1\rho_1c_1} \{1 + \exp[-2\sigma_2(x_2 - x_1)]\} + \sqrt{k_2\rho_2c_2} \{1 - \exp[-2\sigma_2(x_2 - x_1)]\}}.$$

样品表面的温度场会产生热辐射。根据斯忒藩-玻耳兹曼定律,当表面温度的波动幅度  $|W_1(0)|$  远小于材料的稳态平均温度  $T_g$  时,交变热辐射信号的大小由下式确定<sup>[12]</sup>

$$\tilde{R}(t) = 4\epsilon\sigma T_g^3 W_1(0) \exp(j\omega t), \quad (6)$$

式中  $\epsilon$  为表面材料发射率,  $\sigma = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数。这个信号携带有样品的热学结构信息。

## 2.1 材料分界面深度对表面温度的影响

考虑一组由轴承钢(I层/面层)和锡(II层/底层)构成的两层样品,总厚度为 5 mm。对不同的面层厚度 ( $x_1 = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \text{ mm}$ ),应用(5)式计算样品表面温度的幅值和相位。材料的热物性参数如表 1 所示。表面温度的幅值和相位随激光调制频率的变化情况如图 2 所示。

表 1 材料的热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of materials

Material	Conductivity $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Heat capacity $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Bearing steel <sup>[13]</sup>	44	7810	450
Aluminum <sup>[14]</sup>	201	2700	904
Tin <sup>[15]</sup>	67	7280	230
Air (standard state) <sup>[15]</sup>	0.028	1.203	1005

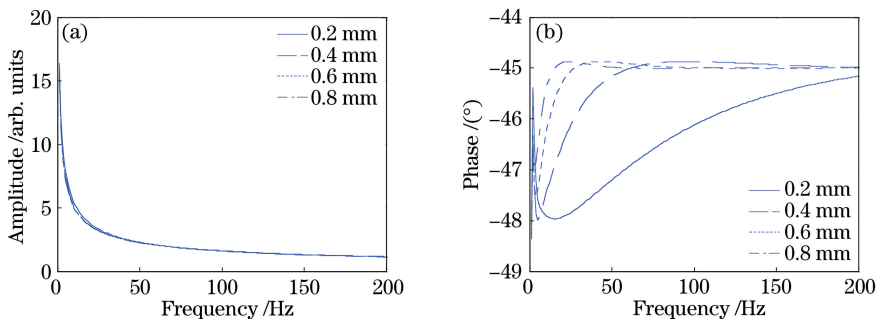


图 2 钢/锡界面深度对表面温度的影响。(a)幅频曲线;(b)相频曲线

Fig. 2 Influence of steel/tin interface depth on surface temperature. (a) Amplitude-frequency curves;

(b) phase-frequency curves

从图 2(a)可以看到,随着激光调制频率增高,样品表面温度的幅值降低;在低频调制阶段,面层越薄,温度幅值随调制频率衰减得越快。表面温度的相位反映热波相位对激励源相位的延迟。从图 2(b)可以看到,面层厚度的不同,表面温度的相频曲线明显不同;随着调制频率的提高,相频曲线先快速降低,再慢速上升,最终趋于  $-45^\circ$ 。

## 2.2 底层材料热学性质对表面温度的影响

取面层材料为轴承钢,厚度为 0.4 mm;底层材料分别为空气、锡和轴承钢,空气的厚度为 1.0 m,锡和轴承钢的厚度都为 4.6 mm。计算样品表面温度的幅值和相位。材料的热物性参数如表 1 所示。图 3 给出了样品表面温度计算结果。

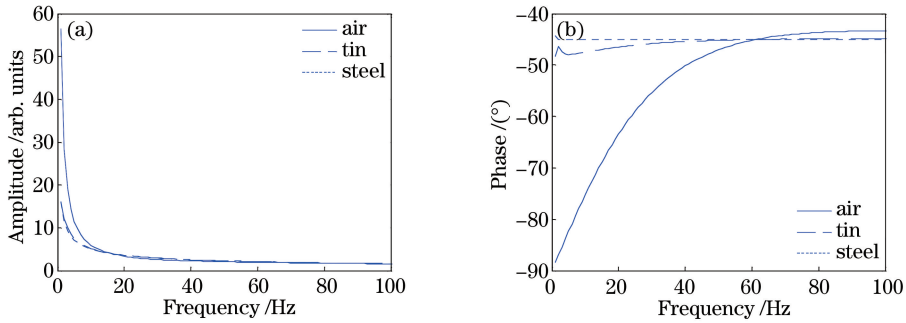


图 3 底层材料热学性质对样品表面温度的影响。(a)幅频曲线;(b)相频曲线

Fig. 3 Influence of thermal properties of underlying material on surface temperature.

(a) Amplitude-frequency curves; (b) phase-frequency curves

在图 3(a)中,在低于 15 Hz 频率下,底层分别为空气和钢时的表面温度幅值-频率曲线有较大差异;频率高于 15 Hz 时,两条曲线趋于重合。底层分别为锡和钢时的表面温度幅频曲线在所计算频域上都很接近。在图 3(b)中,表面温度的相频曲线也表现出类似的性质:在低于 60 Hz 的频率范围内,底层分别为空气和钢时的表面温度相频曲线差异较大,含锡材料的曲线则与纯钢材料的曲线差别不大。这表明当底层材料与面层材料的热学性质差别大时,低频光热辐射信号容易区分开来;但当两者的热学性质接近时,光热辐射信号难以分辨。

## 3 光热辐射检测系统

一套基本的光热辐射检测装置需要大功率激光器、红外探测器分别作为激励光源和热辐射传感器。热辐射信号是十分微弱的,往往比噪声小几个数量级,无法直接测量。对于这样的微弱信号,需要使用锁相放大器等专业设备在强噪声背景中检出有效信号。

实验装置选用中心波长为 808 nm、带电调制功能的半导体激光器(FC-808-20W-MM)。激光器发出的光束通过透镜组聚焦到被测样品表面。样品表面发出的红外辐射需经红外透镜聚焦到红外探测器(J10D-M204-R100U-60)光敏单元上。为此,采用了一对镀金的离轴抛物面反射镜。所选用红外探测器的主要响应频带范围为 1~5.5  $\mu\text{m}$ 。为了降低激光束对探测器的干扰,在探测器窗口前加装透射频带为 1.9~6  $\mu\text{m}$ 的锗窗片(WG91050-C9)。探测器将检测信号经前置放大器(PA-9)输入到锁相放大器(SR830)。锁相放大器既为半导体激光器提供调制信号,又将检出的信号输入到计算机中。为了实现样品表面的二维扫描,使用了电动平移台(STMC-02S)来移动样品位置。电动平移台由步进电机驱动,步进电机也通过计算机控制。图 4 为光热辐射检测装置简图。

为了尽可能多地会聚样品表面测点处的热辐射,其中一个抛物面反射镜安装在样品表面的正前方。该反射镜中心开有通孔,可以让激光束从中穿过,投射到样品表面上。在布置光路时,要注意遮挡杂散光,特别是消除由光学镜架、光学平台表面、实验室墙面和天花板等对激光束的多重漫反射光对样品热辐射信号的干扰。用计算机控制锁相放大器和电动平移台,就能实现光热辐射信号的自动检测。

## 4 光热辐射检测实验

### 4.1 阶梯型钢板的光热辐射检测

为了保证表面状况的一致,制作了一个阶梯型钢板样品,如图 5 所示。阶梯厚度分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 mm。热扩散长度是表征热波渗入材料内部深度的特征量。在热扩散长度为 1.15, 0.89, 0.75, 0.43,

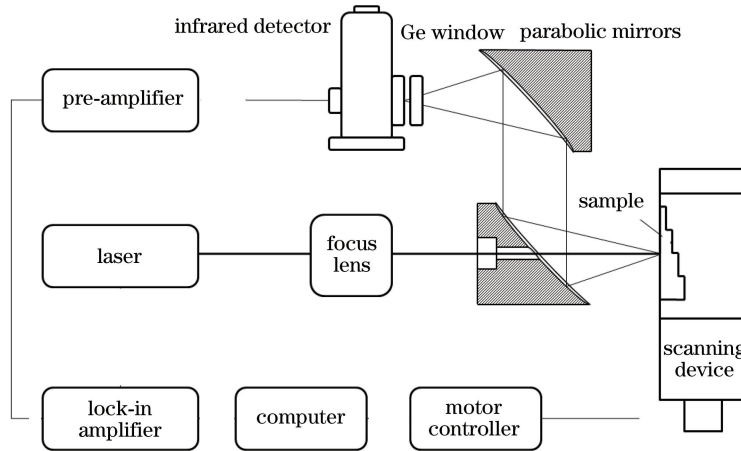


图4 光热辐射检测装置简图

Fig. 4 Diagram of PTR testing equipment

0.32 mm, 频率为 3, 5, 7, 22, 40 Hz 等的条件下, 在与阶梯面相对的平面一侧的中线上扫描检测光热辐射信号。实验参数是: 激光功率约为 1.1 W (电流为 1.7 A), 样品面上的激光光斑直径约为 2 mm。实验结果表明: 光热辐射幅值信号曲线的走势与样品的厚度呈一定的相关性; 但在阶梯跃升处, 幅值信号改变不明显。相位信号曲线对样品的厚度变化更灵敏; 在 5 Hz 和 7 Hz 频率下的曲线呈现出较好的阶梯形状, 而且样品越薄的地方阶梯形状越明显。图 5 给出了 5 Hz 频率下的相位信号曲线。在相同激光调制频率下采用不同光斑直径检测阶梯型钢板的实验表明: 光斑越小, 在阶梯跃升处可以得到更陡峭的幅值和相位信号变化, 但同时会导致光热辐射信号对厚度改变的响应降低。

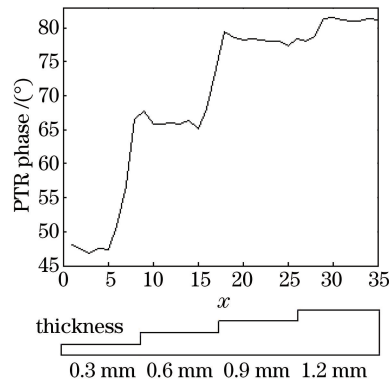


图5 5 Hz 激光调制频率下阶梯型钢板的横向扫描光热辐射相位分布

Fig. 5 Transverse scanning PTR phase distribution of stairs-type steel plate with laser modulated frequency of 5 Hz

阶梯型钢板每个台阶沿阶梯走向的长度均为 10 mm, 宽度为 20 mm。在钢板平面上的激光光斑直径约为 2 mm。在 5 Hz 的调制频率时, 钢的热扩散长度为 0.89 mm。可以应用第 2 节给出的一维光热辐射理论模型, 近似分析钢板平面上与每级台阶中心区域对应位置的的光热辐射信号对材料厚度的依赖关系。为此, 取面层材料为轴承钢, 厚度分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 mm; 底层材料为空气, 厚度为 1.0 m; 利用(5)式计算样品表面温度的幅值和相位。图 6 给出了不同厚度钢板在不同激光调制频率下表面温度的相位, 即理论光热辐射相位信号。图中在 5 Hz 频率处, 当钢板厚度从 0.3 mm 开始依次递增到 1.2 mm, 相位分别增加了 13°、15° 和 10°。再考察图 5 的阶梯状相位曲线, 从左至右, 相邻台阶的相位分别增加了 18°、12° 和 4°。从钢板厚度增加量导致的光热辐射相位增加量方面进行比较, 可以看出一维光热辐射理论模型的计算结果接近实验结果。值得注意的是, 当钢板厚度为 0.3 mm, 激光调制频率为 5 Hz 时, 图 6 给出的理论光热辐射相位值为 -86°, 而相同情形下, 图 5 给出的实测光热辐射相位值为 48°, 这是由光热辐射检测装置中调制光强信号与锁相放大器的参考信号的相位差导致的。在检测装置中, 移开锗窗片, 代之以多层白纸作为光衰减器, 直接检测激光强度调制信号。实验结果显示, 在激光调制频率为 5 Hz 时, 调制光强信号与锁相放大器的参考信号的相位差为 132°。

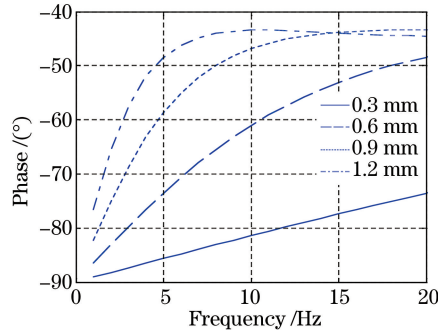


图6 不同厚度钢板的理论光热辐射相位信号

Fig. 6 Theoretical PTR phase signals of steel plates with different thicknesses

#### 4.2 盲孔的光热辐射检测

为了检验光热辐射检测系统对不同深度亚表面缺陷的检测能力,用铝板制作了一个盲孔阵列样品。样品尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。样品正面光滑,背面有不同尺寸的盲孔,几何结构如图7所示。盲孔阵列中,同一行盲孔直径相同;同一列盲孔孔底(平底)厚度相同。对盲孔样品正面进行二维扫描光热辐射检测。实验时,激光功率约为 $1.1\text{ W}$ (电流为 $1.7\text{ A}$ ),样品表面光斑直径约为 $2\text{ mm}$ 。

光热辐射检测实验时,选择 $55\text{ Hz}$ 的激光调制频率(铝的热扩散长度为 $0.69\text{ mm}$ ),扫描矩阵为 $35\text{ 行}\times 35\text{ 列}$ 。检测结果如图8所示( $x$ 方向对应图7的列向)。该三维相位图显示了样品中各盲孔的直径和孔底厚度的相对大小。

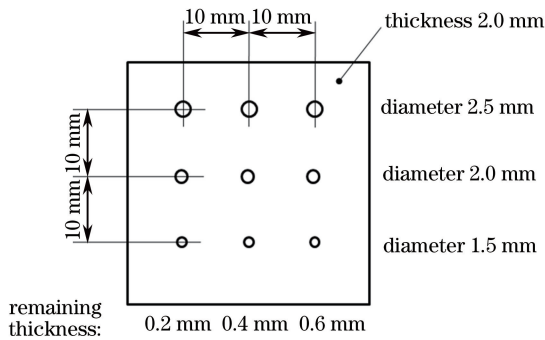


图7 铝质盲孔板几何结构示意图

Fig. 7 Geometric structure diagram of aluminum plate with blind holes

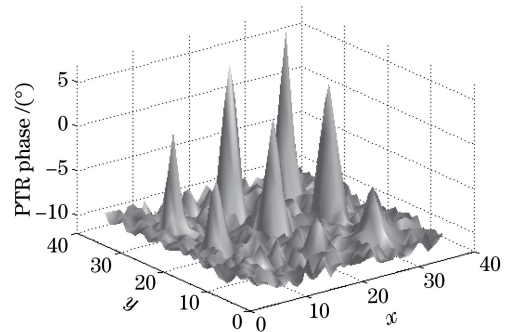


图8 铝质盲孔板的光热辐射相位分布

Fig. 8 PTR phase distribution of aluminum plate with blind holes

#### 4.3 异质填充盲孔的光热辐射检测

取一厚度为 $4.5\text{ mm}$ 的钢板制作钢质盲孔样品。样品正面和背面经过磨削加工。背面钻有不同尺寸的盲孔(尖底)。盲孔阵列中,盲孔直径分别为 $1.5, 2.5, 2.0\text{ mm}$ ,孔底厚度(从孔底尖顶到样品正面的距离)相同,约为 $0.2\text{ mm}$ 。在样品正面进行横向扫描光热辐射检测,激光调制频率为 $9\text{ Hz}$ 。检测结果如图9中实线所示。

为了考察材料亚表面热学性质的改变对光热辐射信号的影响,用焊锡填充盲孔,再次检测光热辐射信号。图9中的虚线给出了盲孔填锡后的光热辐射相位信号分布。相比于空气,焊锡与钢的热学性质更为接近。根据第2节的讨论,填锡盲孔的光热辐射信号较空气盲孔的光热辐射信号更弱。图9的结果符合这种预期。

## 5 结 论

采用阶梯型钢板样品进行光热辐射检测实验,结果表明:对厚度小于或约等于由激光调制频率确定的热扩散长度的阶梯型样品,光热辐射幅值信号与样品的厚度变化呈一定相关性,但对阶梯跃升反应不灵敏;相位信号对样品的厚度变化比幅值信号更灵敏,并能呈现与样品形状对应的阶梯分布,在样品越薄的地方相位

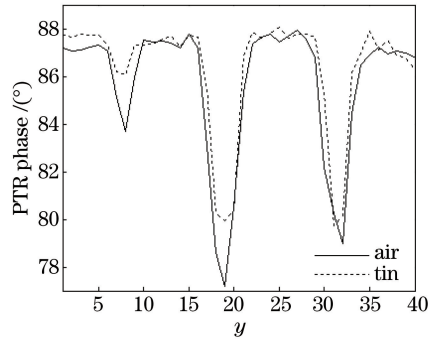


图9 钢板盲孔填锡前后的光热辐射相位分布

Fig. 9 PTR phase distributions before/after filling the blind holes on steel plate with tin

信号的阶跃越大。直径分别为 2.5, 2.0, 1.5 mm, 孔底厚度分别为 0.2, 0.4, 0.6 mm 的铝质盲孔阵列样品在 55 Hz 的激光调制频率下的光热辐射相位分布显示出盲孔直径和孔底厚度的可区分性。钢质盲孔阵列样品在 9 Hz 激光调制频率下的光热辐射相位信号分布既显示出有孔位置与无孔位置的区别, 也显示出盲孔填锡前后的区别。这些实验结果表明: 聚焦光斑的光热辐射检测能探测到深度小于或约等于面层材料热扩散长度, 截面积约等于或大于光斑面积的铝或钢内气孔以及钢内夹锡缺陷; 缺陷位置越浅、截面积越大、与面层材料的热物性参数差异越大, 光热辐射相位信号越强。后续研究工作可针对亚表面含真实夹杂缺陷的金属材料展开。

### 参 考 文 献

- [1] Nordal P E, Kanstad S O. Photothermal radiometry[J]. *Physica Scripta*, 1979, 20(5-6): 659-662.
- [2] Fuente R, Apinaniz E, Mendioroz A, *et al.* Simultaneous measurement of thermal diffusivity and optical absorption coefficient using photothermal radiometry. I. Homogeneous solids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(3): 033515.
- [3] Salazar A, Fuente R, Apinaniz E, *et al.* Simultaneous measurement of thermal diffusivity and optical absorption coefficient using photothermal radiometry. II. Multilayered solids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(3): 033516.
- [4] Fabbri L, Fenici P. Three-dimensional photothermal radiometry for the determination of the thermal diffusivity of solids[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(6): 3593-3600.
- [5] Wu Enqi, Xu Zihong, Guo Xinxin, *et al.* Influence of porosity on photothermal radiometry of carbon fiber reinforced polymers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0706006.  
吴恩启, 徐紫红, 郭新欣, 等. 孔隙率对碳纤维增强复合材料光热辐射信号的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0706006.
- [6] Long F H, Anderson R R, Deutsch T F. Pulsed photothermal radiometry for depth profiling of layered media[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(25): 2076-2078.
- [7] Zhao Yanguang, Guo Xinglin, Ren Mingfa. Lock-in infrared thermography for the non-destructive testing of fatigue specimen with defects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2776-2781.  
赵延广, 郭杏林, 任明法. 含缺陷疲劳试件的锁相红外热成像无损检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2776-2781.
- [8] Tolev J, Mandelis A. Laser photothermal non-destructive inspection method for hairline crack detection in unsintered automotive parts: a statistical approach[J]. *Ndt & E International*, 2010, 43(4): 283-296.
- [9] Ritter R, Reick M, Schmitz B, *et al.* Nondestructive and contactless evaluation of surface coatings and adhesion defects by photothermal radiometry[C]. *SPIE*, 1996, 2782: 662-673.
- [10] Nakanura H, Tsubouchi K, Mikoshiba N. Nondestructive and noncontact evaluation of semiconductors by photothermal radiometry[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, 24(1): 222-224.
- [11] Glorieux C, Fizez J, Thoen J. Photoacoustic investigation of the thermal properties of layered materials: calculation of the forward signal and numerical inversion procedure[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(2): 684-690.
- [12] Xu Guoliang. *Engineering heat transfer*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

- 许国良. 工程传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [13] Li Xiaobin, Ding Hua, Tang Zhengyou. Study of thermo-physical properties for GCr15 bearing steel in continuous casting[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2010, 9(4): 241-244.  
李晓滨, 丁桦, 唐正友. GCr15 轴承钢连铸过程中热物性参数的研究[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(4): 241-244.
- [14] Rosencwaig A. Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy[M]. Wang Yaojun, Zhang Shuyi, Lu Zonggui, Transl. Beijing: Science Press, 1986: 97.  
A·罗森威格. 光声学 and 光声谱学[M]. 王耀俊, 张淑仪, 卢宗桂, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 97.
- [15] 李毓昌. 中国大百科全书·力学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985: 355.