

热波成像频域分析*

曾绍群 徐海峰 李骄阳 骆清铭 刘贤德
(华中理工大学光电子工程系,湖北,武汉,430074)

TN21

摘要 从频域角度运用相干传递函数阐明了热波成像系统的成像特征,用热波成像方法测量了样品内部结构缺陷的低频信息.研究表明缩小泵浦光斑在一定程度上有利于提高空间分辨率.系统的通频带随着缺陷趋近于表层而增大,从而解释了热波成像对亚表面结构极为敏感.

关键词 热波成像,相干传递函数,频域分析,无损检测.

引言

热波成像已引起了人们极大的关注.热波成像测量一直面临着如何建立较为完备的理论,正确描述信号形成的机理^[1],从而由测量信号获得样品的真实未知结构.

由于对这一问题的研究直接关系到能否用热波进行无损检测,热波无损检测系统的性能优劣等,这方面的研究一直十分活跃. Mandilis^[1]等提出了热波传播的近场极限理论,用之描述热波信号的特性; Lorincz^[2]等研究了样品热性质具有横向周期性分布的特殊情况; Freidrich^[3]和 Seidel^[4]等从点扩散函数出发研究了热波成像的分辨率和对比度函数.

事实上,对于成像系统,常用传递函数研究其成像性能^[5].因此,我们认为,通过热波成像系统的频域研究,无疑会获得热波图像信号的形成机理,揭示测试信号与内部结构的内在关系,从而正确理解所得热波图像,并为适当设计系统、评价系统性能以及进一步进行热波信息处理提供方法及理论指导.

我们在文献^[6]中运用微扰理论证明了热波成像具有线性平移不变性,本文在这基础上导出热波成像系统的相干传递函数(Coherence transfer function,CTF),阐明其成像特征.

1 相干传递函数(CTF)

当待测样品为半无限大,且缺陷引起的热导率偏差 k_1 远小于样品均匀热导率 k_0 时,对于样品内部某截面上的缺陷,热波成像具有线性平移不变性^[6].缺陷函数 $k_1(x, y, z) = k_1(x, y)\delta(z - z_0)$ 所产生热波测试信号为 T_m ,其 Fourier 谱 T_m 为^[6]

$$T_m(k_{ix}, k_{iy}) = k_1(k_{ix}, k_{iy})H_k(k_{ix}, k_{iy}), \quad (1)$$

式(1)中 k_1 为缺陷谱;

* 国防预研基金资助项目(编号 92J8.12)
稿件收到日期 1996-11-29,修改稿收到日期 1997-3-28

$$H_k = (ik_x H_p) \otimes (ik_x H_i) + (ik_y H_p) \otimes (ik_y H_i) + (\xi H_p \otimes \xi H_i), \quad (2)$$

式中(2)中 $H_p = G_p \frac{e^{-t\tau_0}}{k_0 \xi}$; $H_i = G_i \frac{e^{-t\tau_0}}{k_0 \xi}$; G_i 和 G_p 分别是泵浦源函数和探测光学系统函数的

二维 Fourier 变换; $\xi = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + ia^2 f}$ 为热波空间波矢; (k_x, k_y) 和 (k_{xx}, k_{yy}) 分别, 与坐标 (x, y) 和扫描坐标 (x_s, y_s) 相对应; a 为热扩散常数, 与 k_0 、热容 ρC_0 有关; f 为调制频率.

式(1)表明, 热波成像系统对样品内部任一截面上缺陷测量时, 测试信号的频谱等于缺陷函数频谱与一函数 H_k 的乘积. 由线性系统理论可知, H_k 即为热波成像系统的传递函数.

由于参与合成信号的基本量是热波的复振幅, 系统对复振幅具有线性平移不变性, 因此传递函数为相干传递函数(CTF)

对于光热辐射测试(Photothermal Radiometry, PTR)热波成像系统, 探测光斑尺寸远大于热扩散长度, 因此可令测试函数 $g_p(x, y) = 1$, 此时由式(2)求得系统 CTF 为

$$H_k(k_{xx}, k_{yy}) = H_m(k_{xx}, k_{yy}) G_i(k_{xx}, k_{yy}), \quad (3)$$

式(3)中 $H_m(k_{xx}, k_{yy})$ 为

$$H_m(k_{xx}, k_{yy}) = k_0^{-2} \exp\{-(\sigma + \xi_{xx})z_0\}, \quad (4)$$

式(4)中 $\xi_{xx} = (k_{xx}^2 + k_{yy}^2 + \sigma^2)^{1/2}$; $\sigma = (1+i)a$. 式(3)表明采用较大测试光斑时, 整个热波成像系统可分解为泵浦系统和成像测量系统的级联, 泵浦系统 CTF 为 G_i , 测量系统 CTF 为 H_m , 总的 CTF 为各子系统 CTF 之乘积.

1.1 泵浦系统

用聚焦激光束泵浦时, 设光束能量为高斯分布, 则 $z=0$ 面上源分布 $g_r(r)$ 可表示为 $g_r(r) = \exp\{-\pi(r/r_0)^2\}$, r_0 为泵浦光高斯分布的 $\exp(-\pi)$ 半径, 忽略常系数, 有

$$G_r = \exp\{-\pi(r_0 \rho)^2\}. \quad (5)$$

不同聚焦半径 G_r 波形如图 1 所示. 由式(5)及图 1 可知, 泵浦系统具有低通特性. 可求

得其半功率带宽 $\rho_s = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \cdot \frac{1}{r_0}$, 即 ρ_s 与光束半径 r_0 成反比. 因此, 加热光束半径越小, 泵浦系统带宽越大, 该子系统传递的信息量越大.

1.2 成像测量系统

对于成像测量系统, 由式(4)可知, H_m 与样品均匀热性质 $(k_0, \rho C_0)$ 、调制频率 f 及缺陷深度 z_0 有关. 从另一个方面来说, $k_0, \rho C_0, f, z_0$, 已作为系统参数, 与系统的输入函数—缺陷函数 $k_i(x, y)$ 分离了, 这是将系统分析方法引入热波成像分析中应强调的一点. 正是这种分离, 才能够考虑样品均匀热性质 $(k_0, \rho C_0)$ 、光强调制频率 f 和缺陷深度 z_0 (作为一个系统参数) 等对系统成像特性的影响.

由式(4)可得到像测量系统相干传递函数 H_m 的振幅 $A(\rho)$ 及相位 $\phi(\rho)$ 为

$$A = k_0^{-2} \exp\{-(2^{-1/2}a + \rho_s \sin\theta)z_0\}, \quad \phi = -(2^{-1/2}a + \rho_s \cos\theta)z_0, \quad (6)$$

式(6)中 $\rho_s = [(2\pi\rho)^2 + a^4]^{1/4}$, $\theta = \frac{1}{2} \arctg(a^2/4\pi^2\rho^2)$.

从成像角度出发, 我们更关心系统对结构各空间频率成分对比度的传递. 为此, 用零频

分量 $A(0)$ 对 $A(\rho)$ 归一化, 得调制传递函数 (MTF) $m(\rho)$:

$$m(\rho) = \frac{A(\rho)}{A(0)} = \exp\{(2^{-1/2}a - \rho_a \cos\theta)z_0\}. \quad (7)$$

式(7)数值模拟如图2所示. 由图2可知, 热波成像测量系统作为一个信息传输环节, 其滤波函数具有低通特征.

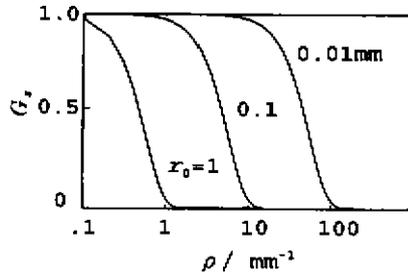


图1 泵浦系统 CTF
Fig.1 The CTF of the pump system

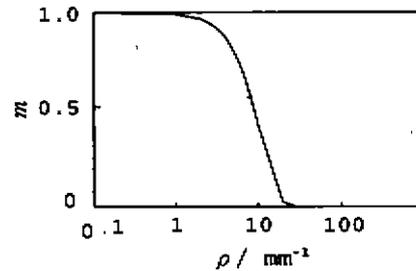


图2 热波成像测量系统 MTF
Fig.2 The MTF of thermal wave imaging measurement system

2 讨论

综合图1,2可知, 热波成像测量了样品中结构缺陷的低频信息. 由于热波成像系统可视作两子系统的级联, 因此, 当系统带宽受泵浦子系统限制时, 缩小加热光斑会有助于提高分辨率; 当系统带宽受成像测量子系统限制时, 缩小加热光斑不会提高分辨率.

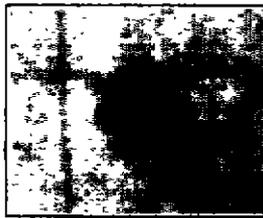


图3 PTR 检测模拟样品结果
Fig.3 Experimental results of a sample with artificial defects measured with PTR

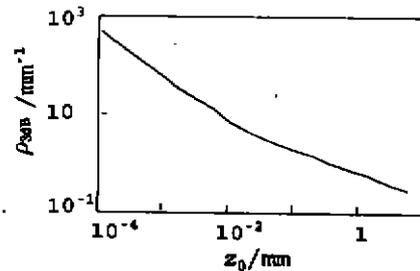


图4 成像测量系统 ρ_{3dB} 与 z_0 的关系
Fig.4 The relation of ρ_{3dB} vs z_0 for the image measurement system

图3是用光热辐射测试技术对一模拟样品检测的结果. PTR 实验系统与方法参见文献[7]. 模拟样品制备方法如下: 在样品背面钻三个不同深度小圆孔, 两个较深, 一个较浅, 然后填入木屑, 用焊锡封好, 用之分别模拟两个较浅缺陷和一个较深缺陷(相对于样品正面). 热波图像显示了两个较浅缺陷, 各自的边缘是模糊的. 这证实热波图像反映了样品内部结构的低频信息. 样品中较深缺陷, 热波图像中未能显示出来. 由后面的分析可知, 这是因为缺陷较深时, 系统能测得的信息太少. 热波图像中其它的不均匀之处, 是样品表面结构非均匀所致.

由式(7)可求出成像测量系统的半峰值功率带宽 ρ_{3dB} 由下式决定,

$$a/\sqrt{2} - [(2\pi\rho_{3dB})^4 + a^4]^{1/4} \cos\theta = (\ln 2)/(2z_0), \quad (8)$$

由此可得 ρ_{3dB} 与 z_0 的关系如图 4 所示. 图 4 表明, z_0 增大使得 ρ_{3dB} 下降, 两者均取对数坐标时, 具有类似线性衰减关系; 因此, 深度越大的结构, 系统能测得的信息越少. 图 3 中的实验结果也证实了这一点.

以上分析表明, 热波成像系统测量了样品内部结构缺陷的低频信息; 缩小泵浦光斑在一定程度上有利于提高空间分辨率; 成像测量系统的通频带随着缺陷趋近于表层而增大, 因此热波成像对表面及亚表面的结构缺陷极为敏感.

REFERENCES

- 1 Mandelis A. *J. Phys. A. Math. Gen.*, 1991, **24**(11): 2485~2505
- 2 Lorincz A. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(12): 6713~6716
- 3 Friedrich K, Haupt K, Seidel U, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(8): 3759~3764
- 4 Seidel U, Haupt K, Walther H G. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(9): 4396~4401
- 5 王之江, 伍树东. *成像光学*, 北京: 科学出版社 (WANG Z J, WU S D. *Image Optics*, Beijing: Science Press), 1991: 181~191
- 6 曾绍群, 徐海峰, 李骄阳等. *物理学报* (ZENG S Q, XU H F, LI J Y, *et al.* *Acta Physica Sinica*), 1997, **46**(7): 1338
- 7 Zeng S, Xu H, Liu X, *et al.* *SPIE*, 1994, **2321**: 171~174

FREQUENCY DOMAIN ANALYSIS OF THE THERMAL WAVE IMAGING SYSTEM*

ZENG Shao-Qun XU Hai-Feng LI Jiao-Yang LUO Qing-Ming LIU Xian-De

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Imaging characteristics of the thermal wave imaging system were illustrated with the concept of coherence transfer function (CTF) by means of frequency domain analysis. With this technique low frequency information of the internal defects of the opaque sample was obtained. Reducing the radius of the pump beam results in a higher spatial resolution to some extent. This method is very sensitive to subsurface defects and this is also illustrated with the fact that passband of the measurement system increases with the decrease of defect depth.

Key words thermal wave imaging, coherence transfer function, frequency domain analysis, nondestructive evaluation

* The project supported by the National Defence Preliminary Research Foundation
Received 1996-11-29, revised 1997-03-28