

文章编号: 1001-3806(2007)02-0131-03

基于小波变换的薄膜激光损伤识别

何长涛¹, 马 孜^{2*}, 陈建国¹, 赵汝进³

(1. 四川大学 光电技术系, 成都 610064; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 3. 西南科技大学 信息工程学院, 绵阳 621002)

摘要: 薄膜激光损伤的准确识别在测量激光损伤阈值的实验中起着至关重要的作用, ISO 1125 标准规定应采用显微镜观察的方法来识别薄膜损伤。为做到在线自动识别损伤, 采用数字图像处理的方法, 将小波变换与图像相关识别技术结合在一起, 分析了如何利用小波变换来实现薄膜激光损伤识别的理论方法。结果表明, 这种识别方法不仅有较高的识别精度, 而且可以避免目前损伤测试工作中繁重的人工操作, 对实现激光损伤阈值测试装置的自动化有着非常重要的意义。

关键词: 薄膜; 激光损伤; 小波变换; 图像相关识别

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A

Recognition of film laser damage based on wavelet transform

HE Chang-tao¹, MA Zi², CHEN Jian-guo¹, ZHAO Ru-jin³

(1. Department of Optoelectronic, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 3. Institute of Information Engineering, University of Southwest Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract The correct recognition of film damage plays an important role in the experiment of measuring laser damage threshold. In ISO 11254, film damage is recognized through observation under a microscope. In order to realize on-line and automatic damage recognition, adopting the method of digital image processing combining wavelet transform with pattern correlation recognition technology, how to carry out film laser damage recognition with wavelet transform is realized. The result illustrates this method not only has highest precision but also avoids heavy labor manipulation and play an important role in automatic damage threshold measurement.

Key words thin films; laser damage; wavelet transform; pattern correlation recognition

引 言

在激光诱导光学元件损伤的过程中, 光学元件表面或内部某些构造或结构发生变化, 表现出不同的损伤效应。然而, 光学元件的激光损伤是个极其复杂的过程, 涉及到的因素很多, 因而还有许多问题有待进一步深入研究。目前, 普遍采用激光诱导损伤阈值 (laser induced damage threshold, LIDT) 来描述光学元件的抗激光损伤能力。用不同能量密度的激光辐照待测介质, 然后观察激光辐照处是否发生了破坏, 通过建立破坏发生与否与能量密度的关系, 就能得到介质的 LIDT 值。由此可见, 准确判断损伤与否就成为确定 LIDT 的关键。人们已经发展了相衬显微法^[1]、散射检测法^[2]、等离子体闪光法^[3]、光声测量法^[4]、光热法^[5]等

方法来判断介质是否损伤, 各种判定方法均有其合理性, 但都不能很好地解决损伤判定的问题。

国内也有多家单位从事薄膜损伤方面的研究。上海光机所是最早从事光学薄膜激光损伤研究的单位, 浙江大学采用了光热偏转成像法无损检测薄膜的激光损伤^[6], 西南技术物理研究所采用了全内反射法来检测薄膜的损伤, 成都精密光学工程研究中心也在做这方面的工作^[7]。但这些检测方法和国际标准 ISO 11254 和国标 GB/T16601-1996 标准规定的微分相衬显微镜方法都没有做到自动识别, 检测的速度慢, 效率不高。

作者采用小波变换的图像相关识别技术, 成功地解决了薄膜激光损伤的快速识别问题。并利用小波变换对图像进行多尺度的分解, 把图像分解成对应不同尺度的近似分量和细节分量, 然后分别对激光照射前后的图像在二级近似分量下的二值化图像进行相关运算, 从输出的相关峰值图像中能明显地判断薄膜的激光损伤情况, 同时也分析了如何结合小波变换来进行图像相关识别, 并且提供了相应的结构框图。

作者简介: 何长涛 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与光通信的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zimaision@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-03-28 收到修改稿日期: 2006-04-27

1 薄膜激光损伤识别原理

待识别的图像是经过激光辐照后的图像, 由于薄膜表面存在许多瑕疵, 直接判别会影响识别结果, 因此, 采用小波变换对图像进行分解, 把背景图像和待识别的图像分解成近似分量和细节分量, 在一定尺度下对其近似分量的二值化图像进行互相关运算, 通过相关系数与设定的系数阈值比较来判断薄膜是否损伤。基于小波变换的图像相关识别的原理框图见图 1。

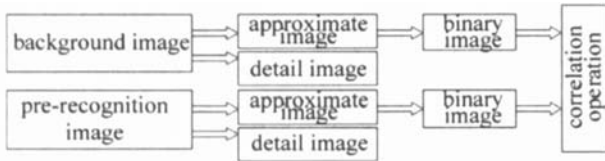


Fig 1 Pattern correlation recognition theory chart

1.1 用小波变换对图像进行分解

多分辨分析是小波分析的一个基石, $\{V_j\}$ 是一个给定的多分辨分析, $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 是尺度函数与小波函数, 初始信号 $i(x)$ 在尺度 j 上可以近似的表示为^[8]:

$$i(x) \approx A_j i(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(x) = I_{j-1} i(x) + D_{j-1} i(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_{j-1,m} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} D_{j-1,m} \psi_{j-1,k}(x) \quad (1)$$

式中, $C_{j,k}$ 是分解系数, $I_{j-1} i(x)$ 表示在第 $j-1$ 尺度上对信号的近似, $D_{j-1} i(x)$ 表示信号在第 $j-1$ 尺度上的细节分量, 利用小波变换对图像分解的同时也实现了对图像的空间滤波^[9]。

1.2 对图像近似分量进行频谱分析

光学图像的识别技术运用了光学相关运算的知识^[10], 通过检测两幅图像间的相关强度, 根据输出相关峰值的大小来判断图像的相似性^[11]。根据 Vander-Lugt 相关识别的原理对损伤图像进行相关识别, 设输入图像近似分量信号是, 其频谱为:

$$I(f_x, f_y) = F\{I(x, y)\} = \iint I(x, y) \times \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (2)$$

式中, $F\{*\}$ 是傅里叶算符, $I^*(f_x, f_y)$ 是 $I(f_x, f_y)$ 的共轭。待识别图像是 $f(x, y)$, 其频谱为:

$$F(f_x, f_y) = F\{f(x, y)\} \quad (3)$$

经过相关运算得到输出图像为:

$$P(x', y') = F^{-1}\{F(f_x, f_y) I^*(f_x, f_y)\} \quad (4)$$

$F^{-1}\{*\}$ 是逆傅里叶变换算符。

1.3 薄膜激光损伤的识别

通过比较相关输出的相关峰的能量最大值, 虽然对损伤图像可以明显地识别, 但是要做到机器的自动识别必须要建立一个量化的标准, 这样就会排除由于

人为因素产生误判的可能。

若直接比较相关输出峰值的能量最大值来判断损伤与否, 极容易产生误判。故根据相关的物理意义, 图像的相似程度可用相关系数 H 来度量, 其定义是^[12]:

$$H = \frac{\sum_y \sum_x i(x, y) \cdot f(x, y)}{\sqrt{\sum_y \sum_x i^2(x, y)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_y \sum_x f^2(x, y)}} \quad (5)$$

$H = 1$ 时, 两个图像完全一致。实际的操作中, 由于误差和噪声的存在, 实际计算的 H 值有可能与理论不一致。在实际应用中, 通过实验确定一个比较阈值, 小于阈值的即为损伤图像, 反之是没有损伤的图像。

2 实验结果与分析

采用北京镭宝公司的 PIANO-1000 激光器, 对薄膜进行激光损伤实验, 采用 XSZ-HS3 显微镜获得薄膜在激光照射前后的背景图像和损伤图像, 再用 CCD 将图像采集入计算机。

2.1 损伤图像的预处理

损伤图像是一幅经过激光辐照的光学薄膜表面显微图像, 在光源照度不稳定的情况下, 损伤图像的灰度变化较复杂, 预处理是提高后续相关识别准确度的前提条件, 其步骤是: 先将待处理图像转化为灰度图, 去除灰度图像中的背景, 再进行图像增强的处理。

经过预处理后的图像整体照度得到了矫正, 图像的对比度也明显增强。损伤原始图像如图 2a 所示, 对

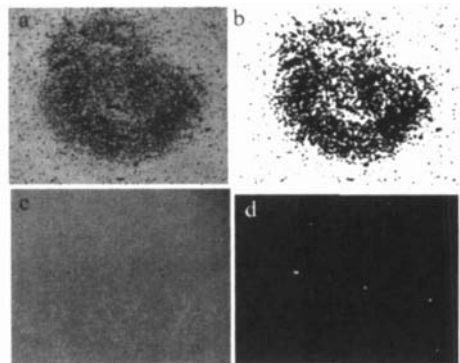


Fig 2 Damage image and background image

经过预处理后的图像进行小波分解, 分解的尺度可以根据实际情况来选取, 在这里采用“bir 2 6”小波对图像进行分解得到灰度图像的二级近似分量, 然后在二级近似分量进行二值化, 其二值化后的图像如图 2b 所示。

2.2 背景图像的预处理

背景图像是没有经过激光辐照的完好图像, 其原始图像如图 2c 所示, 根据图像预处理的流程可以得到其二级分量的二值化图像如图 2d 所示。

2.3 光学图像的相关识别

根据以上对原始图像进行预处理得到的二级近似

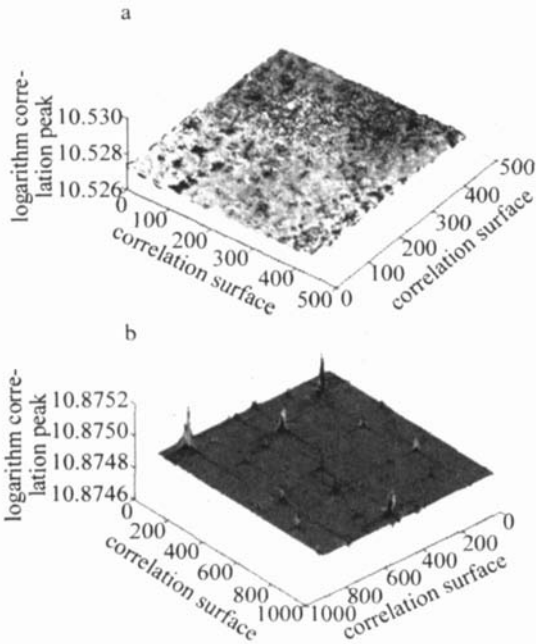


Fig 3 Correlation output image

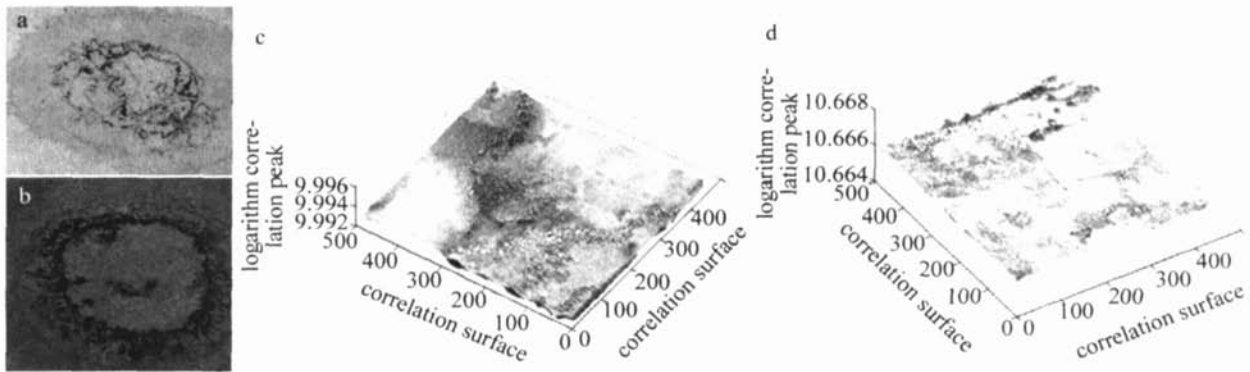


Fig 4 Representative damage image and correlation output image

验得到阈值 $H = 0.9$, 任意一幅图像与背景图像作相关, 然后再把相关系数与阈值 H 进行比较, 从而可自动识别损伤与否。

3 结论

通过小波变换把背景图像和损伤图像进行分解, 分别得到其二级近似分量, 将二级近似分量二值化, 再将二值化后的图像作互相关运算, 为了使识别精度较高, 设定阈值 $H = 0.9$, 大于阈值的待识别图像是没有损伤的, 反之就是损伤的图像。

通过对多幅图像进行处理, 把损伤识别的结果与 ISO 11254 和 GB/T 16610-96 标准要求的显微镜的观察结果进行对比, 发现利用这种图像处理技术判别薄膜损伤的方法和标准规定的显微方法得到的结果是一致的, 为损伤的自动准确检测提供了一种新的方法, 对于损伤测试装置的自动化也有着重要的意义。

参考文献

[1] BECKER J, BERNHARDT A. ISO 11254 an international standard for

分量, 对背景图像和损伤图像作互相关运算得到的互相关输出如图 3a 所示, 未损伤图像经过预处理以后图像是相同的, 两幅背景图像的自相关输出见图 3b。

从上面的峰值输出图像中很明显可以看到, 在图 3a 中没有较强相关峰值的出现, 输出比较平坦, 但在图 3b 中却出现了明显的相关峰值。背景图像是一幅没有损伤的图像, 而待识别图像就是经过激光辐照并且损伤的图像, 相关输出的结果与事实是完全一致的。

图 3a 中 $H = 0.1301$, 图 3b 中 $H = 0.9825$ 。由于在阈值测试过程中采取的测试方式不同, 每次输出的激光能量也可能不相同, 这就使得薄膜损伤有轻、重之分, 表现在图像上就是损伤形貌有差异。为此, 把另两幅具有不同损伤形貌的典型图像作为待识别图像分别与背景图像作相关运算。损伤图像见 4a 和图 4b, 其相关输出见图 4c 和图 4d。

图 4c 中 $H = 0.0129$, 图 4d 中 $H = 0.6259$ 。为了不失一般性, 还对其它损伤图像作了类似的操作, 通过实

the determination of the laser induced damage threshold [J]. Proc SPIE, 1994, 2114: 703~713

- [2] SHARP R, RUBKEL M. Automated damage onset analysis techniques applied to KDP damage and the Zeus small area damage test facility [J]. Proc SPIE, 2000, 3902: 361~368
- [3] NIX W, LU G, HE A. A new definition of laser damage threshold of thin film [J]. Proc SPIE, 1991, 1527: 437.
- [4] GIULIO M D, ALVISI M, PERRONE M R *et al*. Laser damage testing of SO_2 and H_2O_2 thin films [J]. Proc SPIE, 1999, 3738: 157~163.
- [5] BIASCHKE H, ARENS W, RISTAU D. Thickness dependence of damage thresholds for 193nm dielectric mirrors by predamage sensitive photothermal technique [J]. Proc SPIE, 2000, 3902: 242~249.
- [6] TAN H Y, LIU P C, SHI B X. Non destructive testing of laser induced damage in optical thin films by laser photothermal deflection image [J]. Acta Photonica Sinica 2005, 34(1): 158~159 (in Chinese).
- [7] MA P, HU J P, CHEN S L. High laser damage threshold coatings and damage testing technology [J]. Optics and Precision Engineering 2005, 13(4): 499~501.
- [8] SUN Z L. MATLAB 6.x image processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 194~195 (in Chinese).
- [9] XIE J N, ZHAO J L. Computer simulation of optical interspace filter process [J]. Acta Photonica Sinica 2002, 31(7): 847~850 (in Chinese).

(下转第 136 页)

对厚度为 1.83mm 的不锈钢进行测量而得到的结果。其余条件同图 6。

由图中可以看出,压电波信号的波形可以分为两组 A 和 B。在这两幅图中, A 系列的两个相邻压电脉冲峰值的时间间隔为 640ns。B 系列的两个相邻压电脉冲峰值的时间间隔也为 640ns。而对于 B₁ 峰值和 A₁ 峰值的时间间隔而言,图 6 中的时间间隔要比图 7 中的时间间隔短,并且图 7 中 B₁ 相对 A₁ 的幅值衰减要比图 6 中衰减得厉害。这是因为作者在两次实验中在 PVDF 的后面所垫的绝缘膜的厚度不同。当冲击波透过 PVDF 向后传播的时候,经过绝缘膜在绝缘膜和垫具的界面进行反射,反射回来的波透过 PVDF 传入试片并让 PVDF 感知信号。在图 7 中,由于绝缘膜的厚度较大,冲击波在其中传播的时间相对就长,所以 PVDF 感知第 1 次信号与感知经过绝缘膜和垫具界面反射回来的信号的时间间隔就较长,衰减也就较大。这就说明 A 系列是冲击波在试片中来回反射传播的信号。而 B 系列是冲击波透过 PVDF 在绝缘膜与垫具界面反射回来的波在试片中来回反射传播的信号。由图可知, A 系列和 B 系列反映的都为冲击波在材料中来回传播的信号,而冲击波在材料中来回传播 1 次所用的时间在 A、B 中都显示为 640ns。由此,冲击波在材料中来回传播 1 次所走的路程为 $s = 1.83 \times 2\text{mm}$, 所经历的时间为 $t = 640\text{ns}$, 故冲击波在不锈钢中的平均传播速度为: $\bar{v} = s/t = 5.72 \times 10^3 \text{m/s}$ 。这和应力波中纵波在不锈钢中的传播速度相一致^[14]。

3 结 论

(1) 利用 PVDF 对激光冲击波进行了实时测量,给出了激光冲击波随时间的变化曲线。在有约束层的情况下,激光冲击波的峰值大大提高,本实验中是无约束层时的 8 倍左右;脉宽也被展宽,为激光脉冲宽度的 3 倍左右。这使得作用于材料的冲击动量大大提高,使冲击强化的效果明显提高。

(2) 激光冲击波在不锈钢材料中传播的平均速度为 $5.72 \times 10^3 \text{m/s}$ 这同应力波中纵波在不锈钢中的传

播速度一致。

参 考 文 献

- [1] FAIRAND B P, CLAUER A H. Laser generation of high amplitude stress waves in materials [J]. J A P, 1979, 50(3): 1497~ 1502
 - [2] FOURNIER J, BALLARD P, MERRIEN P *et al*. Mechanical effects induced by shock waves generated by high energy laser pulses [J]. Journal de Physique III 1991, 1(9): 1467~ 1480.
 - [3] PEYRE P, FABBRO R, BERTHE L *et al*. Laser shock processing of materials: physical processes involved and examples of applications [J]. Journal of Laser Applications 1996, 8(3): 135~ 141.
 - [4] ZHANG H, ZHANG Y K, YU C Y. Surface treatment of aluminum alloy by laser shock processing [J]. Surface Engineering 1999, 15(6): 454~ 456
 - [5] FAN Y, WANG Sh B, WU H X *et al*. Experimental research of laser processing on aerial aluminum alloy [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 273~ 275(in Chinese).
 - [6] PEYRE P, BRAHAM C, LEDON J *et al*. Corrosion reactivity of laser-peened steel surfaces [J]. Journal of Materials Engineering and Performance 2000, 9(6): 656~ 662
 - [7] ZHANG W W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering transactions of the American Society of Mechanical Engineers 2002, 124(2): 369~ 378
 - [8] OCANA J L, MORALES M, MOLPECERES C *et al*. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1~ 4): 242~ 248.
 - [9] MAZHUKIN V I, NOSSOV V V, SMUROV I M. Modeling of plasma dynamics at the air-water interface application to laser shock processing [J]. J A P, 2001, 90(2): 607~ 618
 - [10] GU Y, NI Y L, WANG Y G *et al*. Experiment observation of laser driven high pressure shock waves [J]. Acta Physica Sinica 1988, 37(10): 1690~ 1693(in Chinese).
 - [11] PERYE P, BERTHE L, FABBRO R *et al*. Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0.6~ 3ns laser pulses in a confined regime with water [J]. J Phys 2000, D33(5): 498~ 503.
 - [12] ROMAN J P, BAUER F, ZAGOURI D *et al*. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges [A]. High Pressure Science and Technology 1993 [C]. New York: American Institute of Physics 1994, 1915~ 1919
 - [13] LIU Sh W, GUO D H, WANG Sh B *et al*. Effects of experimental parameters on LSP [J]. Chinese Journal of Lasers 2002, 27(10): 937~ 940(in Chinese).
 - [14] MA D Y, SHEN X. Aoustics handbook [M]. 2nd ed Beijing Science Press 2004, 173(in Chinese).
- (上接第 133 页)
- [10] LIN R, CHANG H S, BAO Z T *et al*. Simulation of the optical image recognition by using MATLAB [J]. Journal of Yunnan Normal University (natural science edition), 2004, 24(6): 36~ 39(in Chinese).
 - [11] LIU D M, SHEN J Y, WANG L J. Application of the wavelet transform to pattern correlation recognition [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 640~ 642(in Chinese).
 - [12] CHEN X M, GE B Z, ZHANG Y M. Investigation on real time mask discrimination used for correlation peak recognition [J]. Optoelectronics* Laser 1997, 8(5): 379~ 381(in Chinese).