

文章编号: 1001-3806(2004)06-0609-04

## 涂层-基底系统激光激发表面波的时间-频率分析

许伯强<sup>1,2</sup>, 沈中华<sup>1</sup>, 倪晓武<sup>1</sup>, 关建飞<sup>1</sup>, 陆建<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 应用物理系, 南京 210094; 2. 江苏大学 理学院, 镇江 212013)

**摘要:** 基于 Wigner-Ville 分布的时间-频率分析方法, 对用有限元方法得到涂层-基底系统中的模拟激光超声信号进行分析, 得到了在该系统中激光激发的瞬态表面波形的模态和能量分布的特征。只需利用单次测量波形, 通过群延迟时间估计, 得到涂层-基底系统中表面波的群速度分布。时间-频率方法计算群速度只要单个位移时间波形, 相比传统群速度的计算和测量比较简单。

**关键词:** 激光超声; Wigner-Ville 分布; 时间-频率分析; 群速度

**中图分类号:** TN249; TN911.6 **文献标识码:** A

### Time-frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating-substrate systems

XU Bai-qiang<sup>1,2</sup>, SHEN Zhong-hua<sup>1</sup>, NI Xiaowu<sup>1</sup>, GUAN Jianfei<sup>1</sup>, LU Jian<sup>1</sup>

(1. Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Laser induced ultrasonic waves in coating-substrate systems are broadband and dispersive, and multiple propagation modes overlap in time domain. By using time-frequency analysis based on the Wigner-Ville distribution, the characters of modes and energy distribution are obtained after analyzing laser ultrasound signals in the coating-substrate system, which are obtained by means of the finite element method. Furthermore, time-frequency method provides a direct measurement velocity dispersion by delay estimation, whose advantage is that it only needs a single measured signal.

**Key words:** laser ultrasound; Wigner-Ville distribution; time-frequency analysis; group velocity

## 引 言

激光超声提供一个非接触、无损的宽带声波, 已经广泛应用到材料的无损检测和材料的特征评价<sup>[1~3]</sup>中。在很薄的板中, 激光产生的最低阶的对称和反对称的 Lamb 波可用来提取弹性模量和板的厚度<sup>[4,5]</sup>, CHENG 建立了精确的模型并数值计算研究薄板中 Lamb 波的和厚板中的 Rayleigh 波传播现象<sup>[5]</sup>。激光产生表面波也被应用到各向异性材料的弹性模量<sup>[6,7]</sup>。最近, 激光超声导波应用到各向同性的层状材料, 以及薄膜-基底系统激光超声模型也被提出<sup>[8,9]</sup>。为了确定给定系统的结构性质, 必须解读激光产生的瞬态位移信号, 但随着材料结构越

来越复杂, 信号的解释越来越困难。

超声无损检测的核心问题是对超声信号的分析与解释, 而超声信号处理的任务是从接收信号中提取针对研究目的的信息, 用超声对各种材料进行检测时, 待测信号将通过接收信号的幅度、频率或相位来表现, 但是由于实际材料的复杂性, 以及超声波与材料微结构相互作用的复杂性, 导致了接收信号的非平稳性, 即超声信号同时受时间和频率的限制。许多作者对此进行研究, Fourier 变换适用于稳态信号的分析, 二维快速 Fourier 变换分析时变信号时, 受到信噪比的限制, 当从空间域进行二维快速 Fourier 变换, 且测量许多数据时, 会出现假频现象<sup>[10]</sup>, 另外, Fourier 变换不能同时进行时间-频率局部分析, 为了克服这一缺点, 出现了许多线性和二次型时间-频率分析方法<sup>[11~14]</sup>。比较常见的有: 短时 Fourier 变换 (STFT), Wigner-Ville (WV) 分布。STFT 分析超声信号时, 由于采用恒定的窗函数对宽带超声信号不能提供足够的时间-频率分辨率。本文中采用基于光滑的 WV 分布的时间-频率分析方法。WV

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60208004); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2001056)

作者简介: 许伯强 (1963-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事激光和材料的相互作用的研究。

E-mail: bqxu@uj.s.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08; 收到修改稿日期: 2004-08-10

分布是一种典型的双线性时频分析方法,其分布结果使信号的能量沿着瞬时频率集中,有着非常直观的物理意义。用有限元方法得到涂层-基底系统中的模拟信号,对单个波形进行分析,得到了在该系统中激光激发的瞬态表面波形的模态和能量分布的特征,只需单个波形,通过群延迟时间估计,得到群速度,相比传统群速度的计算和测量,提供了一种新的方法。

## 1 平滑伪 WV 分布理论

传统的超声信号通常是在时域或频域分析,最近,联合时间-频率方法分析超声信号的方法引起了广泛的兴趣<sup>[15~17]</sup>。由于这种方法在联合的时间-频率-能量的三维空间进行分析,能显示出更多的信息:超声波形的多种模态成分,估计各种模态具有的能量及对总的能量的贡献以及群速度的计算。

超声信号  $s(t)$  的 WV 分布的时间-频率表示:

$$W_{WV}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s^*(t - \frac{\tau}{2}) s(t + \frac{\tau}{2}) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (1)$$

式中,  $s^*(\tau)$  是  $s(\tau)$  的复共轭,  $t$  表示特定的时间,  $\tau$  表示时间变量,  $\omega$  表示频率,且有  $\omega = 2\pi f$ 。WV 分布中存在交叉项和负能量,相应的频率成分本身并不存在,从而不容易对 WV 分布的图像做出直观的解释。为了消除时域和频域中的干扰项和负能量,在 WV 分布中引入时域平滑窗函数和频域平滑窗函数,即平滑伪 WV (SPWV) 分布:

$$W_{SPWV}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| h\left(\frac{\tau}{2}\right) \right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} g(t-u) s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-i\omega\tau) du d\tau \quad (2)$$

式中,  $g(t-u)$  是时域平滑窗函数  $g(t)$  的相对于时间  $t$  的卷积,  $u$  是窗中平滑函数与 WV 分布做卷积时的一个中间变量,  $h(\tau/2)$  是定义在时间间隔  $\tau$  上,为频域平滑窗函数。

SPWV 分布中,由时间的一阶矩可以估计群延迟<sup>[13]</sup>,对给定频率,群延迟为:

$$\tau_g(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t W_{PWV}(t, \omega) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} W_{PWV}(t, \omega) dt} \quad (3)$$

式中,  $t$  是时间,  $W_{PWV}(t, \omega)$  是平滑 WV (PWV) 分布。对激光产生超声波传播的群速度可由连续波包的群延迟得到:

$$V_g(\omega) = \frac{d}{\tau_g(\omega)} \quad (4)$$

$d$  为激光作用源与波的接收点之间的距离,  $\tau_g(\omega)$  是连续波包的群延迟。

## 2 模拟波形的分析

### 2.1 模拟波形的获得

利用有限元方法数值模拟得到了镍涂层-铝基底系统中激光热弹激发的瞬态表面波形<sup>[18]</sup>。涂层厚度为  $20\mu\text{m}$ ,基底厚度为  $1\text{cm}$ 。激光辐照能量为  $0.40\text{mJ}$ ,激光脉冲为高斯分布,脉冲上升时间和激光光斑半径分别为  $10\text{ns}$  和  $50\mu\text{m}$ ,激光激发示意图如图 1 所示。镍和铝的密度分别为  $8800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  和

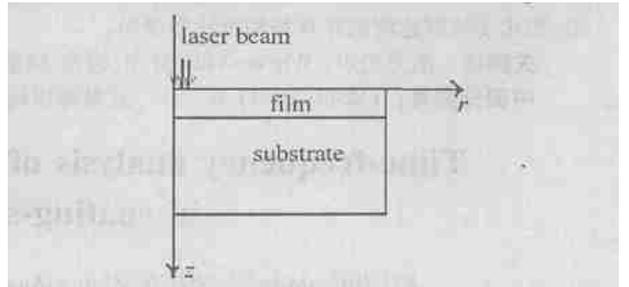


Fig. 1 Schematic diagram for laser irradiating coating-substrate system  
 $2700\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,镍和铝的纵波速度,横波速度和表面波速度分别为:镍:  $v_l = 5630\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_t = 2960\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_s = 2836\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 铝:  $v_l = 6389\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_t = 3098\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_s = 2905\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,信号的采集点到激光源的距离为  $3.5\text{mm}$ ,模拟波形见图 2。

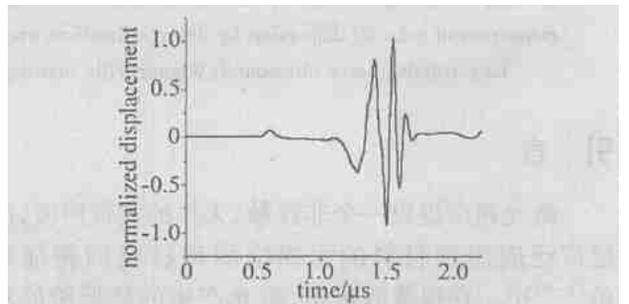


Fig. 2 Surface normalized vertical displacement at  $3.5\text{mm}$  source-receiver distance

### 2.2 模拟信号的时间-频率分析

2.2.1 瞬态超声波形的时间-频率特征 有限元方法获得的瞬态波形具有抽样间隔  $\Delta t = 3.9\text{ns}$ ,即抽样频率为  $f = 256\text{MHz}$ ,为提高时间-频率分辨率,模拟信号数据长度用加零方式增加到 1024 点。采用 51 点长度(相当于  $0.2\mu\text{s}$ )的时间和频率高斯窗对 WV 分布进行平滑处理, PWV 分布的结果见图 3。图 3 显示了激光产生瞬态波形的时间-频率图像,这个图像给出了波的二个模态,首先到达的是频率不随时间变化,也就是在这一时刻所有的频率成分同时出现的掠面纵波 (SL),稍后到达的是正常色散表面波 (SAW)。从 PWV 分布中明显地反映出信号的频率随时间变化的规律,即低频成分先到达之后出

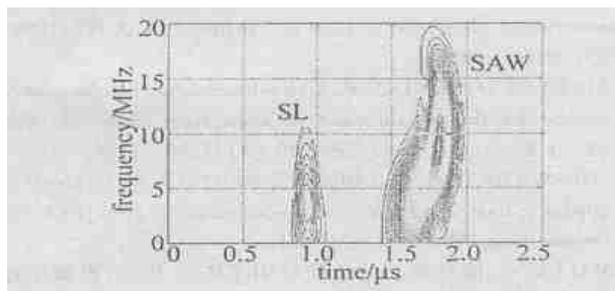


Fig. 3 Time-frequency contour image of SPWV

现高频成分,随着频率的继续增长,相应波的到达时间有所下降。从图 3 中可以看出,虽然 SPWV 分布中由于平滑函数的作用降低了时间-频率分辨率,但能在联合的时间-频率平面内同时确定波到达的时间和相应的频率,反映了频率依赖于时间的瞬态特征,波到达的时间由波包的连续变化来估计。由此可知,PWV 分布能够给出瞬态激光超声波的时间-频率的动态特征,即在时间-频率平面上的给出了波的类型、位置和形状等传播特征,这样的时间-频率分布是和激光作用源与信号采集点之间的距离、以及传播波的材料结构相联系。

2.2.2 信号的能量分布 PWV 分布的三维分布反映了波的能量传递规律以及给定信号的频率随时间变化的规律,这种分布的结果给出了在某一给定时间的不同频率成分的能量密度,即 PWV 分布系数与相应模态波的能量相对应,能量-时间,频率分布见图 4。图 5 中给出了特定时间对所有频率的能量进行积分得到时域中的能量密度,描述了不同模态

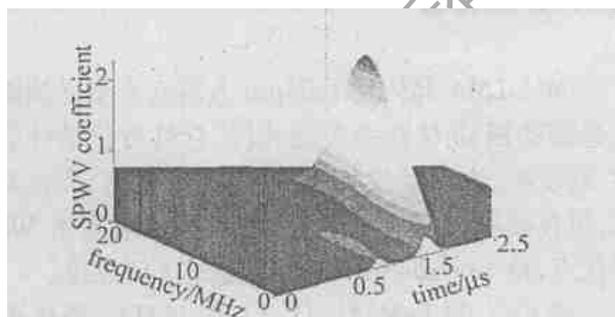


Fig. 4 Smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution image for simulated wave-form in nickel/aluminum syste

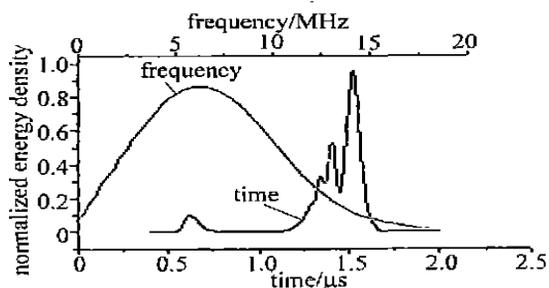


Fig. 5 Smoothed PWV distribution of transient ultrasound signal: relationship of energy density, time and frequent

波到达的时间及相应的能量大小;同时也给出了特定频率对所有时间进行积分得到信号频域中的能量密度,以及特定的频率对应于时频面中的特定点(峰值能量),反映了波的能量传播特征,与群速度相对应。

2.2.3 群速度与频率的关系 特定频率成分的波到达时间即  $\tau_g = d/v_g$ ,其中,  $d$  为超声源与接收点之间的距离,  $v_g$  是相应频率的群速度。与波的传播色散特征相联系的 PWV 分布可表示为  $W(\tau_g, \omega_g)$ , 而  $\tau_g = g(\omega_g)$ , 在时间-频率平面内体现为特定的群速度关系。根据 (3) 式,  $\tau_g$  为群延迟,由 (4) 式可以计算群速度,计算结果如图 6 所示。由计算结果可以看出,SL 模态的速度随频率的变化而略有下降,相应的值为  $5593\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (相对应的频率值为  $0.08\text{MHz}$ ),而 SAW 模态的群速度的变化规律为随着频率而变化,速度由基底的 Rayleigh 波速度 ( $2900\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 逐渐下降,当达到最小值后又随着频率的增加而增加,逐渐趋向表面涂层的 Rayleigh 波的速度 ( $2836\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),这个结论和 FARNELL<sup>[19]</sup>的理论分析结果一致。

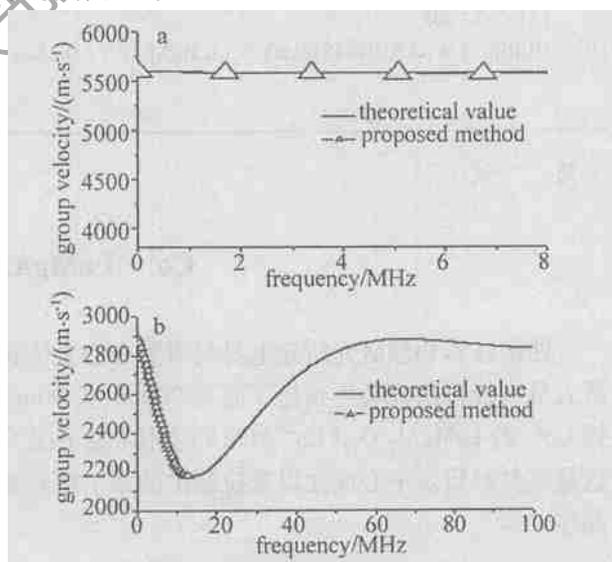


Fig. 6 Comparison of the group velocities  
a—SL b—SAW

### 3 结论

基于 PWV 分布的时间-频率分析方法,分析涂层-基底系统中的激光产生的瞬态位移响应。PWV 分布给出瞬态激光超声波的时间-频率的动态特征,清楚地时间-频率域内显示了包含多种成分的时变信号,在时间-频率平面上的给出了波的类型、位置和形状等传播特征,且 PWV 分布系数与相应模态波的能量相对应。另外,时间-频率分析中不同模态

波的到达时间,作为频率的函数,通过群延迟时间估计,计算群速度。通过时间-频率方法计算群速度只要单个位移时间波形,相比传统群速度的计算和测量较简单,具有特别重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] 张淑仪. 激光超声与材料无损评价 [J]. 应用声学, 1992, 11(4): 1~6.
- [2] 张淑仪. 超声无损检测高新技术 [J]. 国际学术动态, 1998(8): 58~60.
- [3] 章肖融. 用激光超声评估复合材料 [J]. 应用声学, 2000, 19(5): 1~9.
- [4] HUTCHINS D A, LUNDGREN K. A laser study of transient lamb waves in thin materials [J]. J Acoust Soc Amer, 1989, 85(4): 1441~1446.
- [5] CHENG J C, ZHANG S Y, WU L. Excitations of thermelastic waves in plates by a pulsed laser [J]. Appl Phys: Mater Sci Process, 1995, A61: 311~319.
- [6] CHENG J C, ZHANG S Y. Quantitative theory for laser-generated Lamb waves in orthotropic thin plates [J]. A P L, 1999, 74(5): 2087~2091.
- [7] CHAI J F, WU T T. Determinations of anisotropic elastic constants using laser-generated surface waves [J]. J Acoust Soc Amer, 1994, 95(6): 3232~3241.
- [8] 沈中华. 薄膜-基片中的激光超声研究 [J]. 声学学报, 2002, 27(3): 203~208.
- [9] MURRY T W, KRISHNASWAMY S, ACHENBACH J D. Laser generation of ultrasound in films and coating [J]. A P L, 1999, 74(23): 3561~3563.
- [10] ALLEYNE D, CAWLEY P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals [J]. J Acoust Soc Amer, 1991, 89(3): 1159~1168.
- [11] HLAWATSCH F, BOUDREAUX-BARTELS G F. Linear and quadratic time-frequency signal representations [J]. IEEE Signal Process Mag, 1992, 9(4): 21~67.
- [12] MALLAT S. 信号处理的小波导引 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 80~91.
- [13] 科恩 L. 时-频分析: 理论与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. 94~111.
- [14] 胡昌华. 基于 MATLAB 的系统分析与设计(时频分析) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. 18~28.
- [15] KWUN H, BARTELS K A. Experimental observation of wave dispersion in cylindrical shells via time-frequency [J]. J Acoust Soc Amer, 1995, 97(6): 3905~3907.
- [16] NIETHAMMER M, JACOBS L. Time-frequency representations of Lamb waves [J]. J Acoust Soc Amer, 2001, 109(5): 1841~1847.
- [17] PROSSER W H, SEALE M D. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes [J]. J Acoust Soc Amer, 1999, 105(5): 2669~2676.
- [18] XU B Q, SHEN Zh H, NI X W *et al.* Finite element model of laser-generated surface acoustic waves in coating-substrate system [J]. J A P, 2004, 95(2): 2109~2116.
- [19] MASON W P. Physical acoustics [M]. New York and London: Academic Press, 1972. 35~127.

简 讯 ·

### Co<sup>2+</sup>LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>晶体拉制成功

西南技术物理研究所光电材料研发中心全体科研人员用提拉法成功生长出了直径 20mm、长 90mm 掺 Co<sup>2+</sup>的 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> (Co<sup>2+</sup>LMA) 晶体(见下图)。这是本材料研发中心成立以来拉制出的第 1 根新型晶体。



Co<sup>2+</sup>LMA 晶体是 1.54μm 人眼安全激光测距机上急需的被动 Q 开关关键元件,它具有化学性能稳定、硬度高、饱和吸收截面大、吸收带宽窄、荧光寿命长,可在高重复频率下运转,重复频率最高达 30kHz 等优点,是 1.54μm 微激光器理想的无源器件。

掺 Co<sup>2+</sup>的 LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> (Co<sup>2+</sup>LMA) 晶体的研究在国内还未见报道。偏振吸收光谱和激光性能的测试工作正在进行,最新的测试结果将另文报道。

(本刊通讯员 供稿)