

纪念魏荣爵先生诞辰 95 周年

# 利用激光超声研究功能梯度材料中 声表面波的传播特性<sup>\*</sup>

程 曦 徐晓东<sup>†</sup> 刘晓峻

(南京大学声学研究所 近代声学教育部重点实验室 南京 210093)

2010 年 12 月 13 日收到

2011 年 1 月 26 日定稿

**摘要** 利用有限元的方法建立了脉冲激光在功能材料中激发声表面波的理论模型, 根据该理论模型分别分析了脉冲激光在不同空间调制下所激发的声表面波 (SAWs) 在功能梯度材料表面的传播特性, 以及不同力学参量变化对所激发的声表面波传播特性的影响。模拟结果表明: 线源激发的宽带声表面波在功能梯度材料表面传播时, 声表面波会出现明显的色散效应; 当使用光栅调制的脉冲激光在功能梯度材料上激发声表面波时, 与均匀材料中所激发的声信号相比, 激发频率发生相应的频移现象。该模型为功能梯度材料的非接触表征提供了理论基础。

PACS 数: 43.35

## Studying the propagating properties of surface acoustic wave traveling in functional gradient materials by laser ultrasonic

CHENG Xi XU Xiaodong LIU Xiaojun

(Key Laboratory of Modern Acoustics and Institute of Acoustics, Nanjing University Nanjing 210093)

Received Dec. 13, 2010

Revised Jan. 26, 2011

**Abstract** A theoretical model which is used to describe the propagating properties of surface acoustic wave (SAW) excited by a pulse laser in functional gradient materials (FGMs) has been proposed by means of the finite element method (FEM). In the theoretical model, the pump laser is focused as the linear and grating source to excite SAWs in the surface of FGMs, the traveling properties of SAWs caused by gradual variation of physical parameters of FGMs have been analyzed. The numerical results of theoretical models indicate that the wide-band SAW induced by a line-source laser will obviously disperse when traveling in FGMs; while the frequency of the single-frequency SAW generated by a laser induced thermal grating method will shift accordingly due to the gradual change of different parameters of material. The numerical results provide a theoretical basis for non-contact characterization of FGMs.

## 引言

功能梯度材料是一种多相材料, 其设计思想是在材料的制备过程中, 连续地控制各组分含量的分布, 使材料宏观特性在空间位置上呈现梯度变化, 从而满足结构元件不同部位对材料使用性能的不同要求, 达到优化结构整体使用性能的目的。这种材料及

结构中不存在明显的界面, 相应的热力学性能和物理性能也呈现梯度变化的形式<sup>[1]</sup>。功能梯度材料的应用已不局限于高温领域, 已渗透到各种新型材料的研究中。随着功能梯度材料的广泛应用, 人们对材料性能的无损评价也提出了迫切需求。

材料的无损评价方法有很多, 与传统的压电检测技术相比, 激光激发和检测超声技术具有非接触、宽带及高信噪比等优点<sup>[2]</sup>, 已被广泛应用于固体材料的

\* 国家自然科学基金资助项目 (11074126, 10674069)

† 通讯作者: E-mail: xdxu@nju.edu.cn

无损评价和材料的弹性参数表征。通过前人的不断努力,激光超声技术已成熟应用到固体材料的无损评价中<sup>[3-8]</sup>。对于功能梯度材料, Glorieux<sup>[9]</sup>等利用声波在层状材料表面传播特性理论,研究了声表面波在非均匀弹性材料中的传播性质,并且利用声表面波速度的色散特性,重建功能梯度材料弹性参数在深度方向上的分布。利用一高精度的激光超声检测系统, Ruiz<sup>[10]</sup>等分析了在经喷丸处理的表面硬化材料的声色散特性与材料近表面层残余应力之间的相互关系,以及喷丸处理后的材料表面粗糙度和热处理工艺对材料的特性影响。此外,袁<sup>[11]</sup>等利用多层材料的声传播模型,研究了功能梯度材料的杨氏模量连续变化所引起的表面波色散。

当利用脉冲激光在材料表面激发声表面波时,被激发的声表面波及其传播特性取决于材料的表面和近表面的热学和弹性性质。根据激光超声激发技术的热弹理论,本文利用有限元方法<sup>[5,13]</sup>建立了激光在功能梯度材料表面的声激发模型,并通过设置渐变参数的分析方法,数值模拟了功能梯度材料(以铝板的热学和弹性参数为参照)中被空间调制为线源和栅源的脉冲激光<sup>[12]</sup>在功能梯度材料表面所激发的瞬态温度场和热弹场,及其所产生的声表面波传播特性,并分析了渐变的力学及热学参数对所激发的声表面波特性以及传播特性的影响。

## 1 理论模型

### 1.1 热传导理论

当一束脉冲激光照射在样品表面时,样品吸收光并转化为热。在笛卡尔坐标系中,热传导方程可以表示为<sup>[2,4]</sup>:

$$-\rho C \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right] = -Q(x, y, t), \quad (1)$$

式中,  $T(x, y, t)$  表示为  $t$  时刻的温度分布,  $\rho$ ,  $C$  和  $k$  分别表示密度, 热容量和热传导系数。热源表达式为可表示为:

$$Q(x, y, t) = \frac{Q_0 \beta}{2\pi r_0^2} \exp(-\beta y) f(x) g(t), \quad (2)$$

其中,  $Q_0$  为一个脉冲中样品吸收的总能量,  $\beta$  为材料的能量吸收系数,  $r_0$  为激光束半径,  $t_0$  为脉冲激光上升的时间,  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  和  $g(t)$  分别是脉冲激光、光栅调制的脉冲激光的空间分布以及它们的时间分布, 可表示为:

$$f_1(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{r_0^2}\right), \quad (3)$$

$$f_2(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{r_0^2}\right) \cos(2\pi x/d), \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0^2} \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right). \quad (5)$$

### 1.2 热弹理论

由热扩散方程, 样品吸收脉冲激光的能量之后, 其局部受热膨胀并产生瞬态位移场。热弹方程所描述的位移  $U(x, y, t)$  为<sup>[2,4]</sup>:

$$(\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot U) - \mu \Delta \times \nabla \times U - \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla T(x, y, t) = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (6)$$

式中  $\lambda$  和  $\mu$  为材料的拉梅常数,  $\rho$  为材料密度,  $\alpha$  为材料的热膨胀系数, 材料的上下表面均满足自由边界条件:

$$n [\sigma - (3\lambda + 2\mu) \alpha T(x, y, t) \mathbf{I}] = 0, \quad (7)$$

式中  $n$  为表面的法向矢量,  $\mathbf{I}$  为单位张量,  $\sigma$  为应力张量, 响应的位移和速度的初始条件为:

$$U(x, y, t)|_{t=0} = \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (8)$$

### 1.3 有限元模型的构建

利用中心差分法离散热传导方程 (1), 建立模型瞬态热传导有限元方程<sup>[2,5,13]</sup>如下:

$$[C] \{\dot{\Phi}\} + [K] \{\Phi\} = \{H\}, \quad (9)$$

式中  $[C]$  为热容矩阵,  $[K]$  为热传导矩阵,  $[H]$  为载热矩阵,  $\{\Phi\}$  为温度矢量。热弹方程 (6) 离散后的有限元方程可表示为<sup>[2,5,13]</sup>:

$$[M] \{\ddot{U}\} + [L] \{U\} = \{P\}, \quad (10)$$

式中  $[M]$  为质量矩阵,  $[L]$  为刚度矩阵,  $[U]$  为节点唯一矩阵, 载荷矩阵  $\{P\}$  可通过在所有的单元上积分求和得到, 即:  $\{P\} = \sum \int [B]^T [D] \{\varepsilon_{th}\} ds$ , 其中  $[B]$  和  $[D]$  分别为单元的应变矩阵和材料参数矩阵, 热应变阵  $\{\varepsilon_{th}\} = \alpha \{\Phi\}$ ,  $\alpha$  为热膨胀系数。

根据初始条件, 自由边界以及边界的绝热条件, 利用中心差分法逐步迭代求解上面两个方程, 可分别得到样品表面的温度场和应力应变场, 进而得到声表面波及其沿样品表面的传播特性。

## 2 数值模拟结果及讨论

为精确讨论脉冲激光在功能梯度材料中所激发的声场及其传播特性, 本文模拟中以铝板为模拟样品, 其大小为  $20 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ , 其物理参数分别为<sup>[2]</sup>:

杨氏模量  $7 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比 0.34, 热膨胀系数  $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 密度  $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 热传导系数  $240 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , 常压热容  $880 \text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ , 热吸收系数  $1.1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。模拟中所采用的激光为纳秒脉冲激光, 其脉冲上升时间为 3 ns, 将脉冲激光聚成宽度为  $50 \mu\text{m}$  的线源, 在普通的铝板上激发声波, 该声波为一双极脉冲, 其频谱为  $2.42 \sim 200.3 \text{ MHz}$ , 中心频率为  $10 \text{ MHz}$ 。相对于铝材的表面波声速  $2902 \text{ m/s}$ , 其相应的波长范围为:  $1.2 \sim 0.014 \text{ mm}$ , 则板厚已近 3 倍于所激发的低频声波波长, 其相应的波数和材料厚度之积约为 20, 可近似认为所激发的声波为表面波<sup>[14-15]</sup>。由于功能梯度材料往往在深度方向上, 其物理参数产生相应的改变, 且近表面变化比较明显, 则根据此规律, 引入渐变函数:

$$f(y) = 0.5e^{-y^2/(1.3 \times 10^{-4})^2} + 0.5. \quad (11)$$

函数变化如图 1 所示, 利用该函数分别调制材料参数并分析在不同空间分布的脉冲光源下所激发的声波及其传播特性。

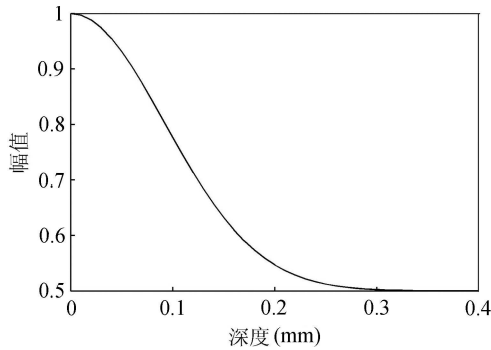


图 1 参数梯度函数

## 2.1 线源脉冲激光激发

分别将样品的杨氏模量、泊松比和密度设计成如图 1 所示渐变函数, 并分析样品的杨氏模量、泊松比和密度的变化对所激发的声表面波传播特性的影响。采用脉冲线源在样品表面激发声表面波, 在样品表面距激光中心点 1 mm, 3 mm, 5 mm 处分别观察并取相应点的声信号, 如图 2—图 4 所示。

比较图 2、图 3 和图 4 可知, 当被激发的声波在杨氏模量随深度增加而逐渐减小的功能梯度材料中传播时, 如图 2 所示, 被激发的声表面波在检测距离上产生色散, 且含高频的声表面波声速大于含低频的声表面波波速。由声表面波的传播特性可知, 声表面波在材料中的穿透深度仅为一个波长, 因而声表面波的传播特性也取决于梯度材料一个波长深度范围内的材料性质, 即声表面波中高频分量的波速仅仅受到极近表层的性质的影响, 而低频分量的声波

速度则取决于较深表层处的性质。本模拟中杨氏模量的变化特性呈逐渐递减的变化趋势, 相应的声速变化在深度方向上呈逐渐递减的变化, 模拟结果正确反映了由杨氏模量变化所导致的声色散特性, 即含高频分量的声波, 其传播速度快于含低频声波的声速。保持杨氏模量不变, 按所采用的梯度函数分别改变材料的密度和泊松比, 在相同的探测距离内, 其色散特性变化不明显。由于热传导过程相对缓慢, 热传导系数、热容变化对所激发的声表面波影响不大。

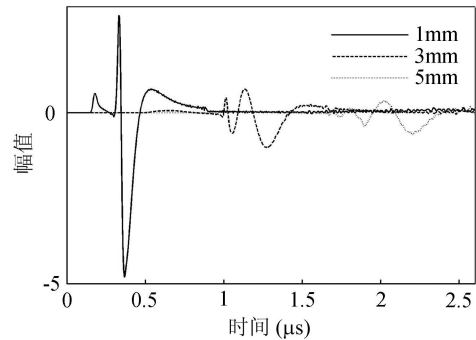


图 2 杨氏模量梯度变化的声表面波传播时域图

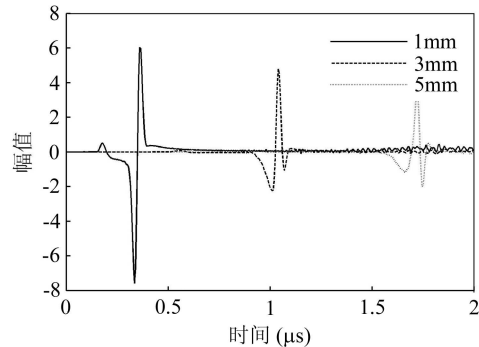


图 3 泊松比梯度变化的声表面波传播时域图

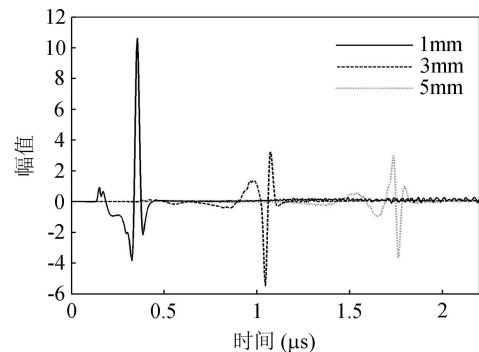


图 4 密度梯度变化的声表面波传播时域图

## 2.2 光栅调制的脉冲激光激发

在相同的材料参数条件下, 使用脉冲栅源激发声表面波, 取光栅间距为  $0.28 \text{ mm}$ , 则在相应的在被测材料表面所激发的声波波长为  $\lambda = 0.28 \text{ mm}$ , 由于该波长远小于板厚, 可近似为声表面波。图 5 为

空间调制的脉冲栅源激光所激发的声表面波, 其中心频率为 10.30 MHz, 其频谱特性如图 6 中粗点划线所示。

采用如图 1 所示的梯度函数, 分别改变样品的杨氏模量、泊松比和密度, 并利用相同的栅源在梯度材料表面激发声表面波, 其模拟所得信号的频谱如图 6 所示, 检测点与激发源(栅形热源)中心点相距 2 mm, 当仅改变材料的杨氏模量时, 与在均匀材料表面所激发的声表面波不同, 被激发的声表面波频谱发生了下移, 如图 6 中实线所示, 其中心频率为 8.57 MHz; 而当材料的密度梯度变化时, 被激发的频谱发生了上移, 如图 6 中点划线所示, 其中心频率为 11.00 MHz; 当材料的泊松比变化时, 被激发的频谱变化很小, 如图 6 中虚线所示, 其中心频率为 10.40 MHz。

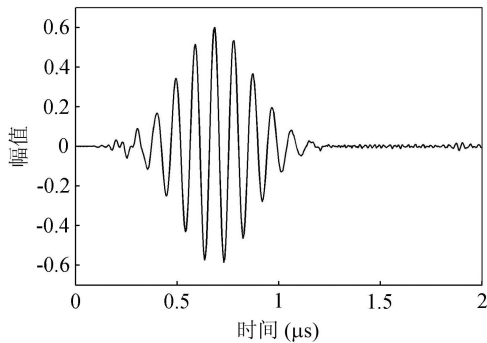


图 5 光栅调制激光激发的声表面波传播时域图

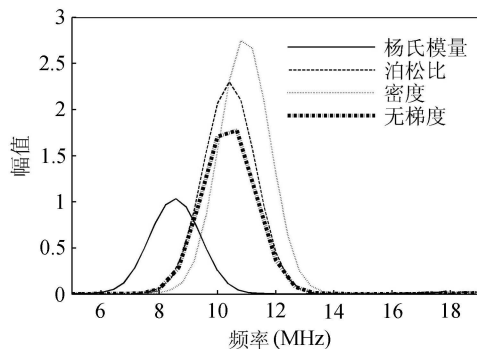


图 6 杨氏模量、泊松比、密度梯度变化以及非梯度材料中声表面波频谱图

由于声表面波的传播特性仅取决于该深度范围内梯度材料的物理参数, 即受材料的杨氏模量、密度和泊松比的变化影响, 当声表面波波长一定时, 则声速和频率成线性关系。如材料的杨氏模量呈梯度下降时, 相应的从表面到近表面, 声表面波速度由高到低逐渐减小, 受其穿透深度内材料性质的综合影响, 被栅源激发的单一声表面波声速小于表面的声速, 因此其频谱会下移; 而材料的密度与声表面波速度呈  $c_s \propto \sqrt{1/\rho}$  关系<sup>[16]</sup>, 故材料密度  $\rho$  呈梯度减小时,

频谱会上移; 如改变材料的泊松比, 计算可知当泊松比减小 50% 时, 声表面波速度从 2902 m/s 单调增加到 3105 m/s, 变化小于 4%, 可以忽略不计, 其频谱与均匀材料上所激发的声表面波频谱基本一致。此结果与线源激发的声表面波无色散是一致的。

### 3 结论

本文用有限元方法研究了激光在功能梯度材料中激发的声表面波传播情况。并通过设置材料渐变参数的方法, 模拟功能梯度材料中各力学及热学参量等梯度变化, 避免了常用的分层近似所带来的误差。

分别讨论了线源脉冲激光和光栅调制激光激发下的声表面波, 也即宽频和单频声表面波在功能梯度材料中的传播特性。结果表明, 线源脉冲激光激发的声表面波在传播过程中会发生明显的色散现象, 其中杨氏模量的梯度变化所带来的色散效果最明显, 密度次之, 泊松比再次之, 而各种热学参量的变化则不会产生色散效果。光栅调制的激光激发出的声表面波, 因其频率单一, 因此不会发生色散现象, 但受材料参数影响, 其传播速度改变从而导致频率发生蓝移或红移。其中杨氏模量和密度梯度变化所引起的频谱漂移明显, 而泊松比不明显, 此频移特性与利用声在均匀材料中传播理论所进行的类比分析相一致。为功能梯度材料的非接触式激发与检测提供了可靠的理论基础。

### 参 考 文 献

- 1 黄旭涛, 严密. 功能梯度材料: 回顾与展望. 材料科学与工程, 1997; **15**(4): 35—38
- 2 王敬时, 徐晓东, 刘晓峻, 许钢灿. 利用激光超声技术研究表面微裂纹缺陷材料的低通滤波效应. 物理学报, 2008; **57**: 7765—7768
- 3 Bruinsma A J A, Vogel J A. Ultrasonic noncontact inspection system with optical fiber methods. *Applied optics*, 1988; **27**(22): 4690—4695
- 4 Jianchun Cheng, Yves H Berthelot. Theory of laser-generated transient Lamb waves in orthotropic plates. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1996; **29**: 1857—1867
- 5 Lee J G, Burger C P. Finite element modeling of laser-generated lamb waves. *Computers & Structures*, 1995; **54**(3): 499—514
- 6 Murray T W, Wagner J W. Laser generation of acoustic waves in the ablative regime. *Journal of Applied Physics*, 1999; **85**(4): 2031—2040
- 7 An ultrasonic method for dynamic monitoring of fatigue crack initiation and growth. Bao Mi, Jennifer E. Michaels, and Thomas E. Michaels. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005; **119**(1): 74—85

- 8 Jan Herrmann, Jin-Yeon Kim, Laurence J. Jacobs *et al.* Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves. *Journal of Applied Physics*, 2006; **99**: 124913—1249138
- 9 Christ Glorieux, Gao Weimin, Kruger S E *et al.* Surface acoustic wave depth profiling of elastically inhomogeneous materials. *Journal of Applied Physics*, 2000; **88**: 4394—4400.
- 10 Alberto Ruiz, Nagy P B. Laser-ultrasonic surface wave dispersion measurements on surface-treated metals. *Ultrasonics*, 2004; **42**: 665—669
- 11 袁玲, 沈中华, 关健飞, 倪晓武, 陆建. 近表面弹性性质连续变化材料中激光声表面波的理论研究. *光子学报*, 2007; **36**(10): 1769—1773
- 12 陈翔, 李开源. 利用激光超声研究缺陷材料表面的传播特性. *大学生自然科学*, 2009; **1**(1): 21—26
- 13 William B.J.Zimmerman, 中仿科技公司. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析. 北京: 人民交通出版社, 2007
- 14 Farnell G W, Adler E L. *Physical Acoustics*, vol.9, edited by W. P. Mason and R.N. Thurston, (Academic Press, New York), Vol.9, chapter 2, 1972
- 15 罗斯 J L. 固体中的超声波. 何存富, 吴斌, 王秀彦译. 北京: 科学出版社, 2004
- 16 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础. 南京: 南京大学出版社, 2001: 522—534