

近表面层黏性模量梯度变化的复合平板中激光热弹激发声表面波的传播特性

管义钧 孙宏祥 袁寿其 葛勇 夏建平

Propagation characteristics of laser-generated surface acoustic waves in composite plate with gradient changes of near-surface viscous moduli

Guan Yi-Jun Sun Hong-Xiang Yuan Shou-Qi Ge Yong Xia Jian-Ping

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 224201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.224201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浓悬浮液中纳米 SiO<sub>2</sub> 团聚体的渗透率

Permeability of nano SiO<sub>2</sub> aggregates in concentrated suspension

物理学报.2016, 65(14): 144203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144203>

基于飞秒激光微加工的介质膜损伤修复研究

Study on damage mitigation for dielectric mirrors by using femtosecond laser micromachining

物理学报.2015, 64(15): 154207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154207>

激光辐照对热退火金属/掺氟二氧化锡透明导电薄膜光电性能的影响

Effects of laser irradiation on the photoelectric properties of thermal-annealed metal/fluorine-doped tin oxide transparent conductive films

物理学报.2015, 64(3): 034211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034211>

毫秒脉冲激光辐照硅基 PIN 的温度场应力场数值分析

Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber

物理学报.2014, 63(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194205>

万瓦级光纤激光焊接过程中小孔内外等离子体研究

Plasma inside and outside keyhole during 10 kW level fiber laser welding

物理学报.2014, 63(10): 104212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104212>

# 近表面层黏性模量梯度变化的复合平板中激光热弹激发声表面波的传播特性\*

管义钧<sup>1)</sup> 孙宏祥<sup>1)2)†</sup> 袁寿其<sup>1)‡</sup> 葛勇<sup>1)</sup> 夏建平<sup>1)</sup>

1)(江苏大学理学院, 流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

2)(中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

(2016年6月7日收到; 2016年8月18日收到修改稿)

考虑复合平板近表面层的黏性模量变化特性, 建立激光在复合平板中热弹激发声表面波的有限元模型, 系统研究复合平板中声表面波的传播特性, 并讨论近表面层的黏性模量、厚度与 Lamé 常数对声表面波衰减特性的影响, 在此基础上, 结合理论计算的色散与衰减曲线对声表面波传播特性进行验证. 本研究为激光超声技术无损评估复合平板近表面层的力学性能提供理论指导, 同时也为研究复合平板表面微裂纹问题提供可行性思路.

**关键词:** 激光超声, 有限元法, 近表面黏性性质, 衰减

**PACS:** 42.62.-b, 43.35.+d

**DOI:** 10.7498/aps.65.224201

## 1 引言

随着复合材料广泛应用于航空制造业, 使得原来经典力学中不予考虑的材料黏弹性特性受到越来越广泛的重视. 然而, 由于复合材料表面长期暴露在空气中, 受到风干、湿度变化等因素影响, 会引起复合材料近表面层黏性性质的变化, 进而在材料表面产生疲劳微裂纹, 影响飞机的使用寿命. 因此, 复合材料近表面黏性性质的性能评价已成为一项亟需解决的重要问题. 激光超声技术在无损检测领域中具有重要的研究价值及应用前景, 现已广泛用于各种类型结构的性能评价及微缺陷的无损检测<sup>[1-9]</sup>.

脉冲激光作用在黏弹性复合材料表面可激发产生声表面波, 通过对声表面波传播特性的研究可以评价复合材料的力学性能. 目前, 在利用激光超

声技术评价黏弹性材料性能方面, 主要采用双积分变换解析法<sup>[10,11]</sup>, 如同济大学钱梦騄教授小组从黏弹理论出发, 通过时间坐标的拉普拉斯变换和空间坐标的汉克变换, 推导半无限大黏弹性平板<sup>[10]</sup>与黏弹性胶层/金属基底结构<sup>[11]</sup>的特征方程, 系统分析黏弹性平板与胶层对瑞利波的频散与衰减的影响. 此外, 有限元频域法<sup>[12-14]</sup>对时域波动方程进行傅里叶变换, 将其转化为频域波动方程, 能够有效地计算材料的黏弹性引起的超声波衰减问题, 并且能得到各个节点的应力与位移波形.

在材料近表面层的力学性能无损检测方面, 利用激光超声技术对金属合金材料近表面层弹性性质(杨氏模量)连续变化的研究已取得初步进展. 如: 袁玲等<sup>[15-17]</sup>针对金属合金材料近表面层弹性性质连续变化的问题, 研究激光在材料表面激发产生声表面波及兰姆波的传播特性, 并讨论近表面层

\* 国家自然科学基金重点基金(批准号: 51239005)、国家自然科学基金(批准号: 11404147)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20140519)、中国博士后基金(批准号: 2015M571672)、江苏大学高级人才基金(批准号: 13JDG106)和江苏大学青年骨干教师培养工程资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jsdxshx@ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: Shouqiy@ujs.edu.cn

弹性性质<sup>[15]</sup>、厚度<sup>[15]</sup>及分布函数<sup>[16]</sup>等因素对激光激发高频超声波的影响. 然而, 针对复合材料近表面层的黏性性质连续变化的问题, 尚未见到相应报道, 因此, 近表面层黏性性质连续变化的复合材料中超声波的激光激发、传播及其与材料缺陷的相互作用是一项迫切需要填补的重要内容.

本文研究激光在近表面层黏性模量逐渐变化的复合平板中热弹激发声表面波的传播特性, 讨论近表面层的黏性模量变化量、厚度及Lamé常数对声表面波传播特性的影响, 进而结合理论计算的色散与衰减曲线进行验证.

## 2 有限元数值模型

### 2.1 模型结构

考虑一块近表面层黏性模量逐渐变化的复合平板样品, 近表面层厚度为 $h$ , 坐标系 $(x, y, z)$ 与样品中心坐标系重合, 其中,  $y$ 轴垂直于样品的表面,  $x, y, z$ 方向的位移分别用 $u, v, w$ 来表示. 入射脉冲激光束汇聚成平行于 $z$ 轴的线源, 垂直辐照到样品的上表面, 如图1所示.

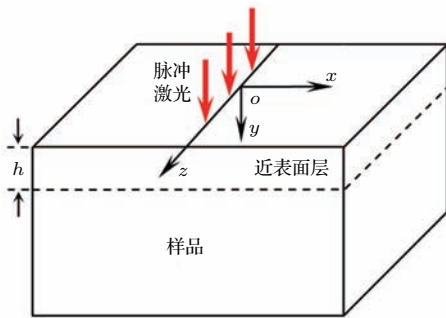


图1 激光辐照样品示意图

Fig. 1. Geometry diagram of laser irradiating sample.

根据平面应变条件, 可得 $z$ 方向的位移为零, 即激光激发的声表面波沿着 $xoy$ 平面传播, 如图2所示, 忽略样品左侧的对称区域. 忽略复合平板受热产生的力学形变, 频域中热传导方程可表示为<sup>[13,18]</sup>

$$k \left( \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial y^2} \right) - i\rho C_p \omega \hat{T} = \hat{Q}, \quad (1)$$

其中

$$\hat{Q} = Q_0 \hat{F}(\omega) g(x) h(y), \quad (2)$$

$$\hat{F}(\omega) = \frac{1}{(1 + i\omega t_0)^2}, \quad (3)$$

$$g(x) = \frac{1}{2\pi a_0^2} \exp\left(-\frac{x^2}{a_0^2}\right), \quad (4)$$

$$h(y) = \gamma \exp(-\gamma y), \quad (5)$$

式中 $k$ 为热传导率,  $\rho$ 为密度,  $C_p$ 为比热容,  $Q_0$ 为入射能量,  $a_0$ 为光斑半径,  $1/\gamma$ 为光透深度,  $t_0$ 为脉冲上升时间,  $g(x)$ 与 $h(y)$ 分别表示脉冲激光在 $x$ 及 $y$ 方向的空间分布函数,  $\hat{T}(x, y, \omega)$ 与 $\hat{Q}(x, y, \omega)$ 分别表示温度及脉冲激光源的傅里叶变换形式,  $\omega = 2\pi f$ 为角频率. 频域热弹波动方程表示为<sup>[13,18]</sup>

$$\begin{cases} C_{11}^* \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} + C_{66}^* \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2} + (C_{12}^* + C_{66}^*) \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x \partial y} \\ -\beta^* \frac{\partial \hat{T}}{\partial x} + \rho \omega^2 \hat{u} = 0, \\ C_{22}^* \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial y^2} + C_{66}^* \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x^2} + (C_{12}^* + C_{66}^*) \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x \partial y} \\ -\beta^* \frac{\partial \hat{T}}{\partial y} + \rho \omega^2 \hat{v} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\hat{u}(x, \omega)$ 及 $\hat{v}(y, \omega)$ 分别表示 $x$ 与 $y$ 方向位移的傅里叶变换形式;  $\beta = (C_{11}^* + 2C_{12}^*)\alpha_T$ ;  $C_{ij}^* = C_{ij}' + iC_{ij}''$ 为复合材料的黏弹性模量, 其中实部 $C_{ij}'$ 和虚部 $C_{ij}''$ 分别为弹性和黏性模量, 说明频域热弹波动方程不仅适用于弹性材料, 还适用于黏弹性材料. 此外, 复合平板近表面层的黏性模量沿 $y$ 轴方向增大, 近表面层的下面较黏, 其黏性模量设置为 $C_{ij}'' - (1 - y/h)mC_{ij}''$ ,  $0 \leq y \leq h$ , 式中 $C_{ij}''$ 为复合平板的黏性模量,  $m$ 表示近表面层黏性模量变化的百分比.

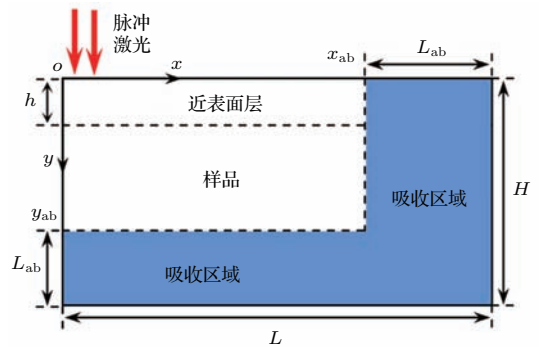


图2 样品xoy平面

Fig. 2. Cross section of sample.

利用频域波动方程计算激光超声的问题, 可引入吸收区域消除边界处反射波的影响, 如图2, 模型的右侧及下侧设置吸收区域<sup>[19]</sup>. 沿吸收区域的分界面 $(x = x_{ab}, y = y_{ab})$ , 保持材料的弹性模量

$C'_{ij}$  不变, 逐渐增大黏性模量  $C''_{ij}$ , 确保传播过程中超声波的声阻抗匹配, 随着吸收区域逐渐加深, 超声波的振幅逐渐减小, 直至忽略不计. 吸收区域中黏弹性模量  $C_{ij}^{*AR}$  表示为<sup>[14]</sup>

$$C_{ij}^{*AR} = C'_{ij} + i \left[ A \left( \frac{r}{L_{ab}} \right)^3 C'_{ij} + C''_{ij} \right], \quad (7)$$

式中  $C'_{ij}$  和  $C''_{ij}$  分别表示传播区域的弹性和黏性模量,  $r$  表示吸收区域中各点到传播区域与吸收区域交界面的距离,  $L_{ab}$  为吸收区域长度,  $A$  表示传播区域与吸收区域之间的声阻抗匹配调节参数.

### 2.2 数值模型及激光参数

基于上述公式, 采用有限元多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 建立频域数值模型, 模型长度  $L$  及厚度  $H$  设置为 15 mm, 近表面层厚度  $h$  为 0.5 mm, 右侧及下侧的吸收区域分界面分别为  $x_{ab} = 7$  mm 及  $y_{ab} = 7$  mm, 吸收区域长度  $L_{ab}$  为 8 mm. 模型的网格大小与频域步长对数值模拟的准确性及效率有较大影响, 在模型中分别设置为 20  $\mu\text{m}$  及 0.02 MHz<sup>[20]</sup>. 脉冲激光辐照于复合平板上表面  $x = 0$  mm 处, 入射能量  $Q_0$ , 光斑半径  $a_0$ , 脉冲上升时间  $t_0$  及光透深度  $1/\gamma$  分别为 0.2 J, 100  $\mu\text{m}$ , 10 ns 及 40  $\mu\text{m}$ . 复合材料的热力学参数<sup>[13]</sup> 见表 1.

表 1 数值计算的材料参数

Table 1. Material parameters used in numerical calculations.

物理参数	符号	复合材料
热传导系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$k$	16.2
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho$	1580
比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$C_p$	1500
热膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$	$\alpha_T$	$27.0 \times 10^{-6}$
黏弹性模量/GPa	$C_{11}^*$	$14.90+i*0.45$
	$C_{22}^*$	$14.90+i*0.45$
	$C_{12}^*$	$7.30 + i*0.23$
	$C_{66}^*$	$3.80+i*0.11$

### 3 数值结果与讨论

首先计算复合平板近表面层的黏性模量变化量为 60%, 不同接收距离的垂直表面位移 (虚线),

同时给出近表面层黏性模量无变化的结果 (实线) 进行比较. 如图 3 (a), 复合平板表面的位移波形主要为纵波、表面横波和瑞利波, 分别标注为 L, S 和 R. 可以看出, S 的传播速度比 R 略快, 当接收距离较近时, S 与 R 重叠, 随着接收距离增加, S 与 R 逐渐分开. 而近表面层的黏性模量变化对 S 和 R 的传播速度没有影响, 两种情况下 S 与 R 的瞬态波形的到达时间一致. 比较图 3 中实线与虚线可以看出, 近表面层黏性模量变化的 L, S 和 R 幅值较大, 其中 L 的幅值变化较小, R 与 S 的幅值变化较明显, 且 R 的振幅变化大于 S. 当近表面层的黏性模量无变化时, S 是一条近似光滑的曲线, 其特征几乎无法辨别, 当近表面层的黏性模量变化时, S 的波形特征逐渐显现出来, 其振幅增大, 且出现高频成分. 因此, 近表面层的黏性模量变化对 S 与 R 的影响较大, 下面主要研究 S 与 R 的传播特性评估复合材料近表面层的力学性能.

为了说明近表面层的黏性模量变化对 S 与 R 的影响, 计算近表面层黏性模量变化与无变化的 S 与 R 衰减曲线, 如图 4 所示. 可以看出, 近表面层的黏性模量变化引起 S 与 R 的衰减小于近表面层的黏性模量无变化情况, 因此, 当近表面层的黏性模量无变化时, S 的衰减较大, 其所对应的波形是一条近似光滑的曲线, 高频成分几乎无法辨别. 当近表面层的黏性模量变化时, 近表面上层的黏性模量逐渐减小, S 的衰减减小, 高频成分的衰减变化更为明显, 因此, S 的振幅增大, 且高频成分变化明显, 其特征逐渐显现出来. 此外, 在相同黏性模量变化的条件下, R 的衰减比 S 略强. 衰减曲线的分析结果与图 3 中瞬态波形的传播特征一致.

图 5 (a) 与图 5 (b) 分别为近表面层黏性模量变化量为 40% 及 80% 的垂直表面位移 (虚线), 接收距离均为 6 mm. 可以看出, 当黏性模量变化量从 40% 增加到 80% 时, S 与 R 的幅值明显增大, S 的波形变化更加明显, 此外, R 的幅值变化大于 S. 图 6 (a) 与图 6 (b) 分别为图 5 (a) 与图 5 (b) 中 S 与 R 的位移谱, 如图 6 (a), 随着近表面层的黏性模量变化量增加, S 的位移谱幅值增大, 且在 4.0—10.0 MHz 高频范围变化尤为明显. 如图 6 (b), 在 0—6.5 MHz 区间, R 的位移谱幅值随着近表面层的黏性模量变化量增加而增大, 且 R 的位移谱幅值变化大于 S. 这与图 5 中 S 与 R 的瞬态波形特征一致.

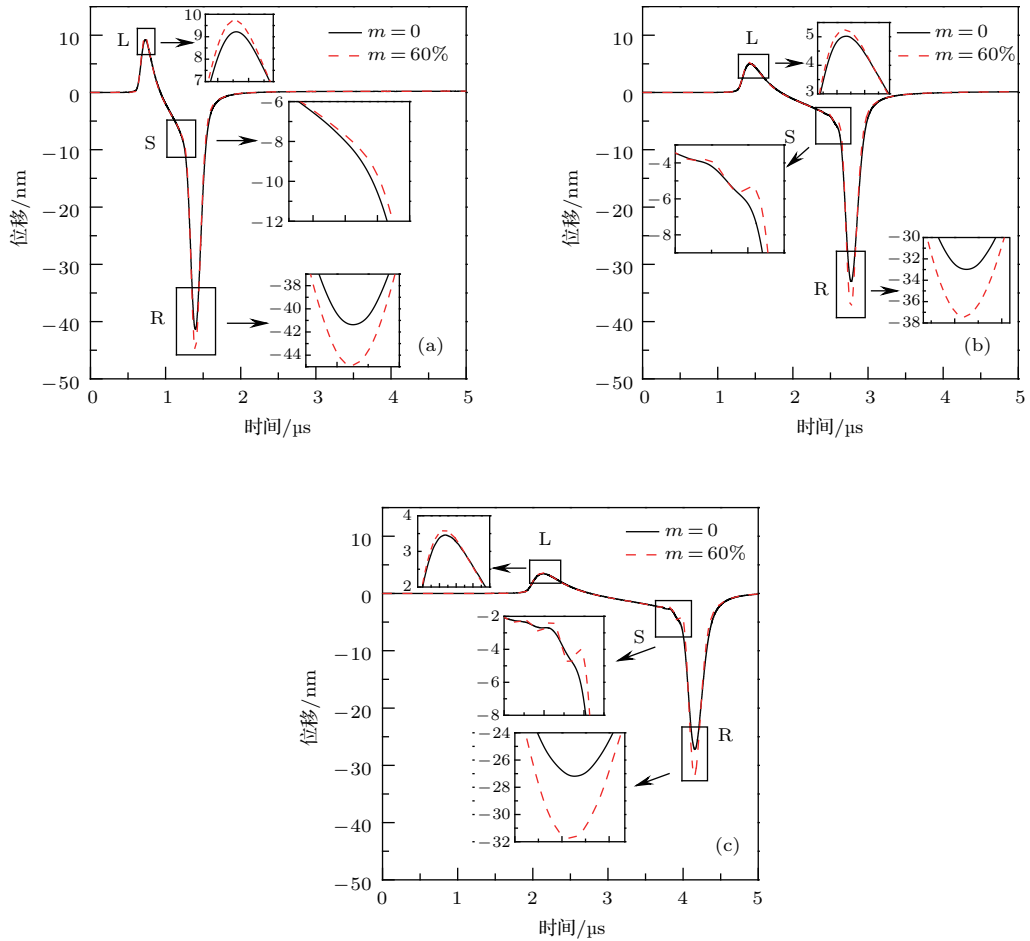


图3 不同接收距离的垂直表面位移 (a)  $x = 2$  mm; (b)  $x = 4$  mm; (c)  $x = 6$  mm

Fig. 3. Normal surface displacements with different source-receiver distances: (a)  $x = 2$  mm; (b)  $x = 4$  mm; (c)  $x = 6$  mm.

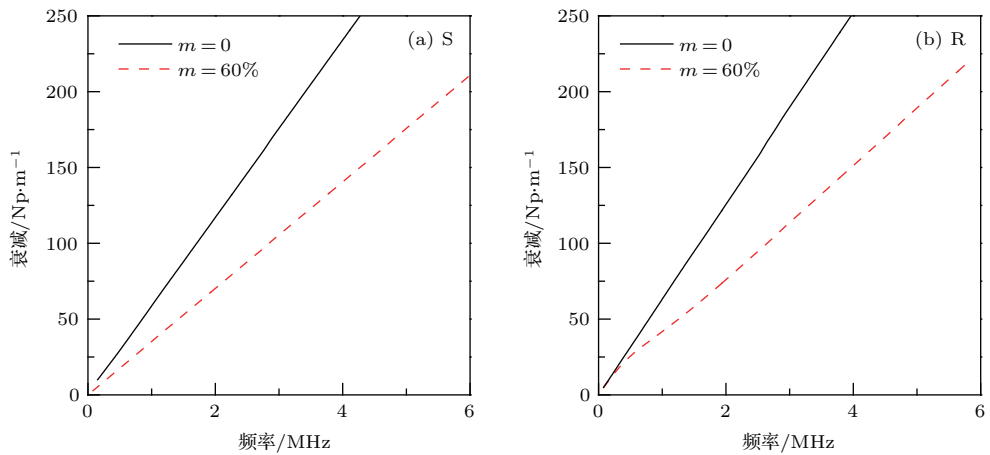


图4 (a) S与(b) R的衰减曲线

Fig. 4. Attenuation curves of (a) S and (b) R.

图7显示近表面层的黏性模量变化量分别为0, 40%及80%的S与R的衰减曲线. 可以看出, 随着近表面层的黏性模量变化量增加, S与R的衰减而减小, 且在同一变化量, R的衰减比S略强. 这

主要由于近表面层的黏性模量变化量增加, 近表面上层的黏性模量减小, 从而引起S与R的衰减减小, S与R的波形幅值增大, 这与图5与图6的结论一致.

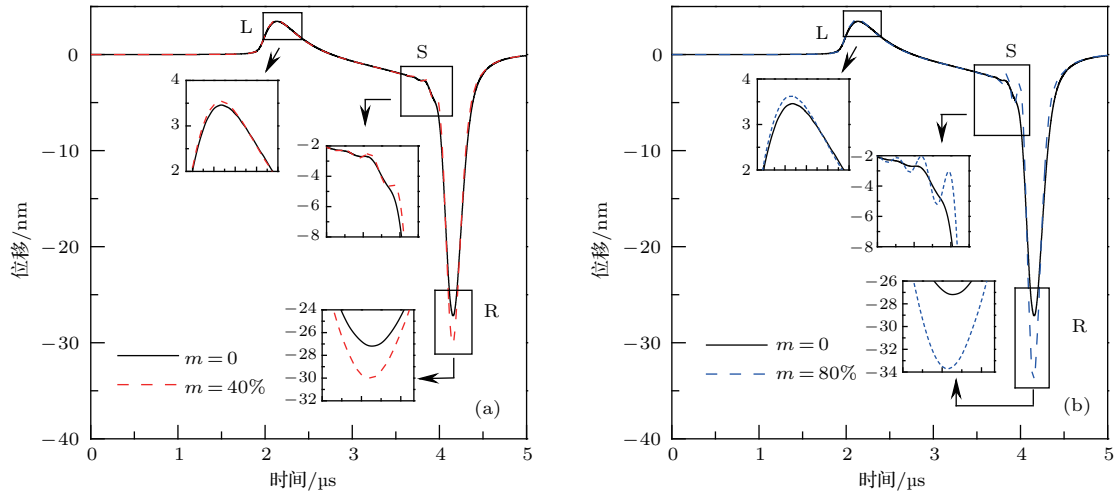


图5 近表面层黏性模量不同变化量对应的垂直表面位移 (a)  $m = 40\%$ ; (b)  $m = 80\%$

Fig. 5. Normal surface displacements with different changes of viscous moduli in near-surface layer: (a)  $m = 40\%$ ; (b)  $m = 80\%$ .

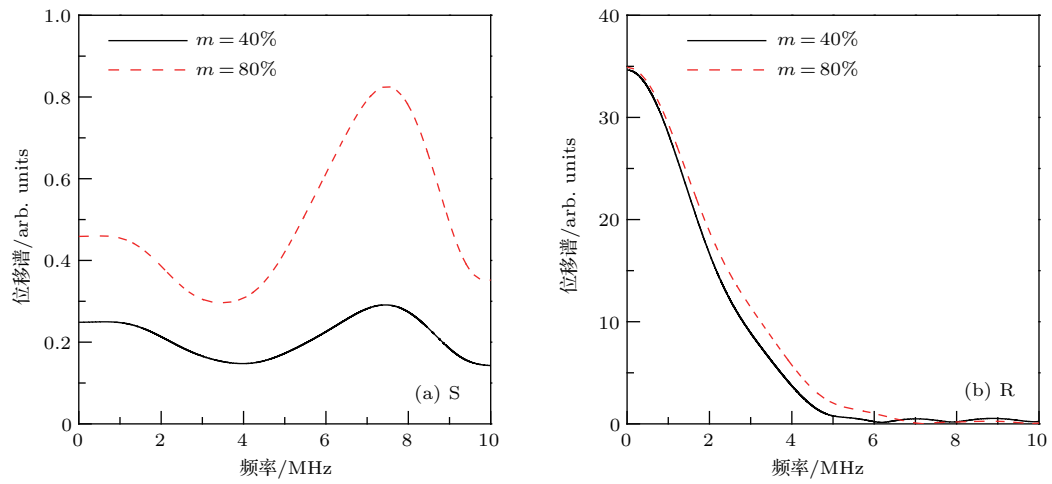


图6 近表面层黏性模量不同变化量对应的(a) S和(b) R的位移谱

Fig. 6. Displacement spectra of (a) S and (b) R with different changes of viscous moduli in near-surface layer.

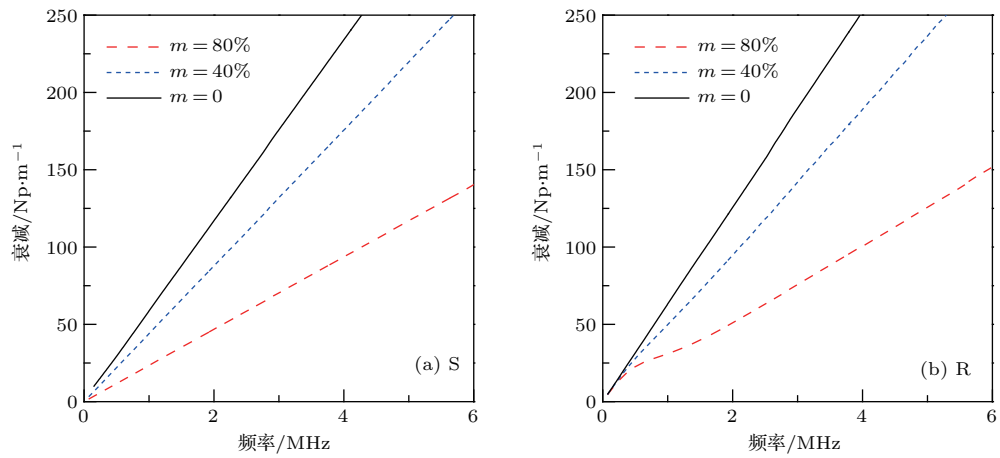


图7 (a) S与(b) R的衰减曲线

Fig. 7. Attenuation curves of (a) S and (b) R.

图 8(a) 与图 8(b) 显示近表面层厚度分别为 0.3 及 0.8 mm 的垂直表面位移(虚线), 在数值计算中, 黏性模量变化量为 60%, 接收距离为 6 mm. 可以看出, 随着近表面层的厚度增加, S 和 R 的幅值增大, S 的波形特征更明显. 说明 S 和 R 的衰减随

着近表面层的厚度增加而减小. 图 9(a) 与图 9(b) 分别为近表面层的厚度为 0.3 和 0.8 mm 对应的 S 与 R 的位移谱. 同样可以看出, 随着近表面层厚度增加, S 和 R 的衰减减小, 位移谱的幅值增大, 这与近表面层黏性模量变化量增大的效果类似.

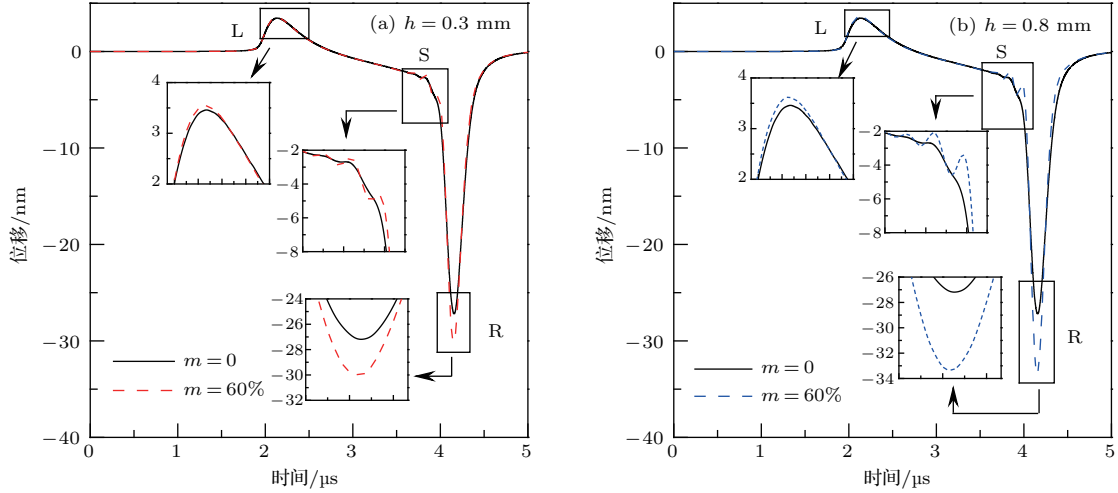


图 8 不同近表面层厚度对应的垂直表面位移 (a)  $h = 0.3$  mm; (b)  $h = 0.8$  mm

Fig. 8. Normal surface displacements with different thicknesses of near-surface layer: (a)  $h = 0.3$  mm; (b)  $h = 0.8$  mm.

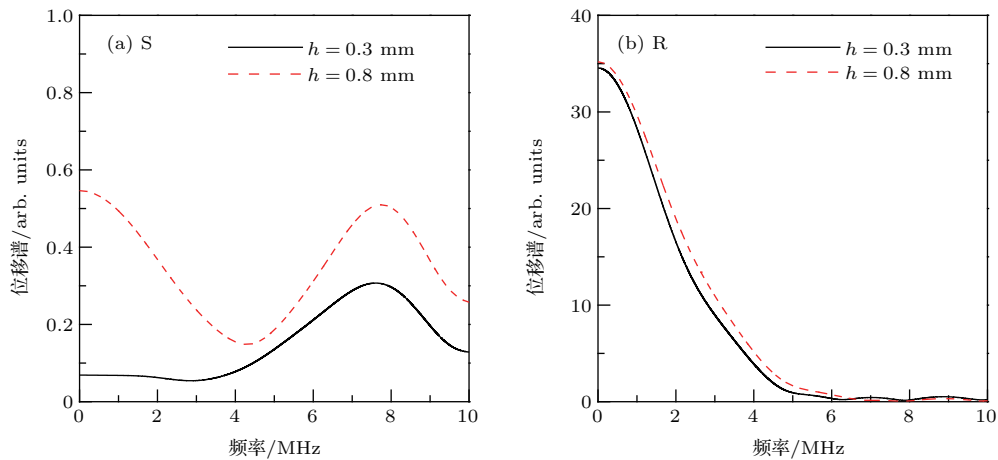


图 9 不同近表面层厚度对应的 (a) S 和 (b) R 的位移谱

Fig. 9. Spectral amplitude of (a) S and (b) R with different thicknesses of near-surface layer.

图 10(a) 与图 10(b) 分别为近表面层的厚度为 0.3 与 0.8 mm 对应的 S 与 R 的衰减曲线. 同样可以看出, 随着近表面层的厚度越大, S 和 R 的衰减越小, 这主要由于近表面层的黏性模量逐渐变化, 在变化量相同的条件下, 相同的深度上, 厚度较大的近表面层黏性模量小于厚度较小的近表面层的黏性模量, 特别是近表面的下层部分, 因此, 如图 10(a) 与图 10(b), 随着黏性模量变化的近表面

层厚度增加, S 与 R 的衰减减小, 这与图 8 与图 9 的结果完全符合.

下面研究近表面层 Lamé 常数的变化对声表面波传播特性的影响. 根据黏弹性模量 ( $C_{11}^*$ ,  $C_{22}^*$ ,  $C_{12}^*$  与  $C_{66}^*$ ) 与 Lamé 常数 ( $\lambda$  与  $\mu$ ) 之间的关系为  $C_{11}^* = C_{22}^* = \lambda + 2\mu$ ,  $C_{12}^* = \lambda$  及  $C_{66}^* = \mu$ , 可得复合材料  $\lambda = 7.30 + i \cdot 0.23$  GPa,  $\mu = 3.80 + i \cdot 0.11$  GPa, 其中  $\mu$  为剪切模量.

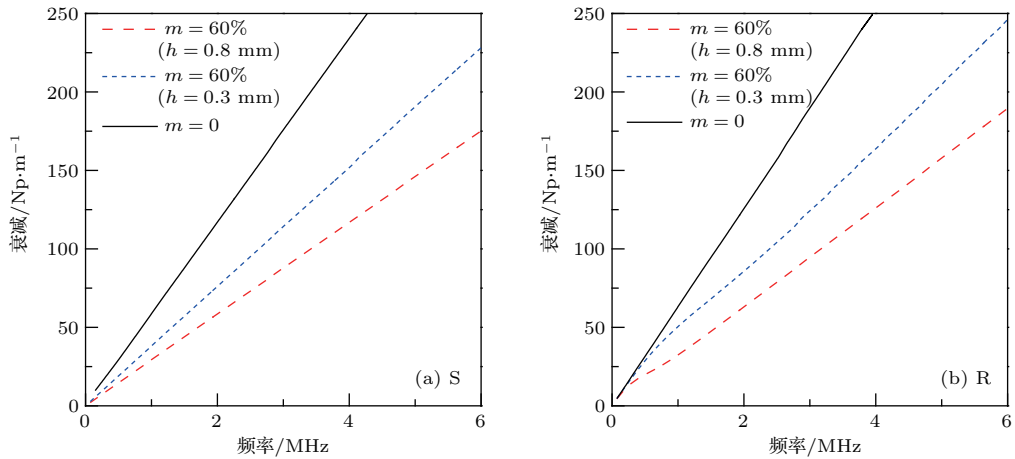


图 10 不同近表面层厚度对应的 (a) S 与 (b) R 的衰减曲线

Fig. 10. Attenuation curves of (a) S and (b) R with different thicknesses of near-surface layer.

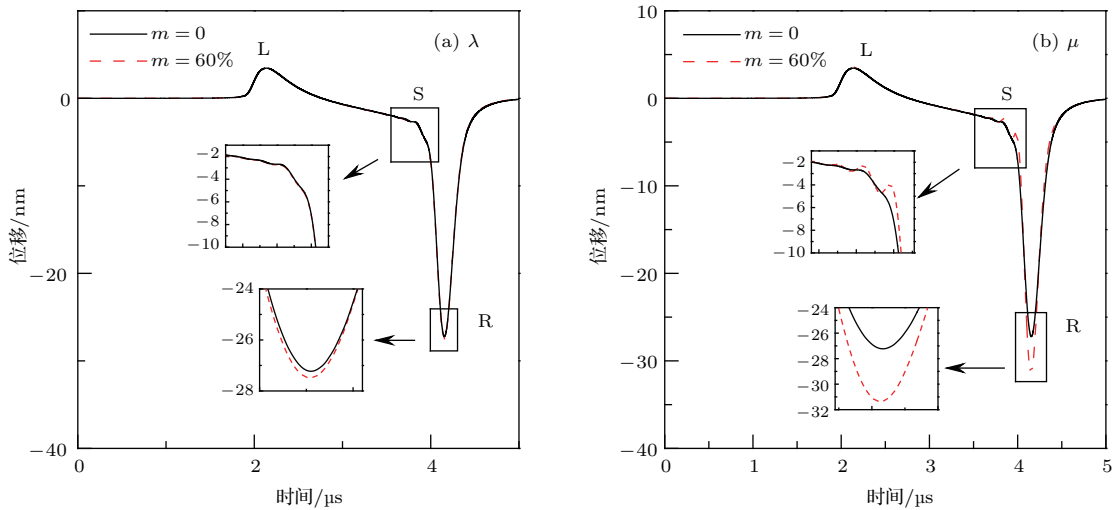


图 11 变化近表面层 Lamé 常数对应的垂直表面位移

Fig. 11. Normal surface displacements with changes of each Lamé constant in near-surface layer.

图 11 (a) 与图 11 (b) 分别为近表面层的  $\lambda$  与  $\mu$  的虚部变化 60% 的垂直表面位移 (虚线), 近表面层的厚度为 0.5 mm, 接收距离为 6 mm. 可以看出,  $\lambda$  的虚部变化时, S 与 R 的幅值几乎没有变化 [图 11 (a)], 特别是 S. 而当  $\mu$  的虚部变化时, S 与 R 的幅值明显增大 [图 11 (b)], S 和 R 的衰减减弱. 说明 S 与 R 的衰减主要与近表面层的剪切黏性模量相关, 这与钱梦騷教授小组之前所提出的 Rayleigh 波 [10] 与类 Rayleigh 波 [11] 衰减主要与材料的剪切黏性模量相关的结论一致.

图 12 为近表面层  $\lambda$  与  $\mu$  的虚部变化 60% 对应的 S 与 R 的衰减曲线. 当近表面层的  $\lambda$  的虚部变化时, S [图 12 (a)] 与 R [图 12 (b)] 的衰减曲线与近表面层的  $\lambda$  无变化几乎重合. 而当近表面层的  $\mu$  的虚部

变化时, S 与 R 的衰减明显小于近表面层  $\mu$  无变化的情况, 这与图 11 (b) 中 S 与 R 的瞬态波形特征一致, 从而进一步说明 S 与 R 的衰减与近表面层的剪切黏性模量  $\mu$  相关, 而与近表面层 Lamé 常数中的  $\lambda$  无关.

#### 4 结 论

本文考虑近表面层的黏性模量变化特性, 研究复合平板中声表面波的传播特性, 讨论近表面层的黏性模量, 厚度与 Lamé 常数对声表面波传播特性的影响, 在此基础上, 结合理论计算的色散与衰减曲线进行验证. 结果表明, 近表面层的黏性模量与厚度的变化对声表面波的传播速度没有影响, 但会



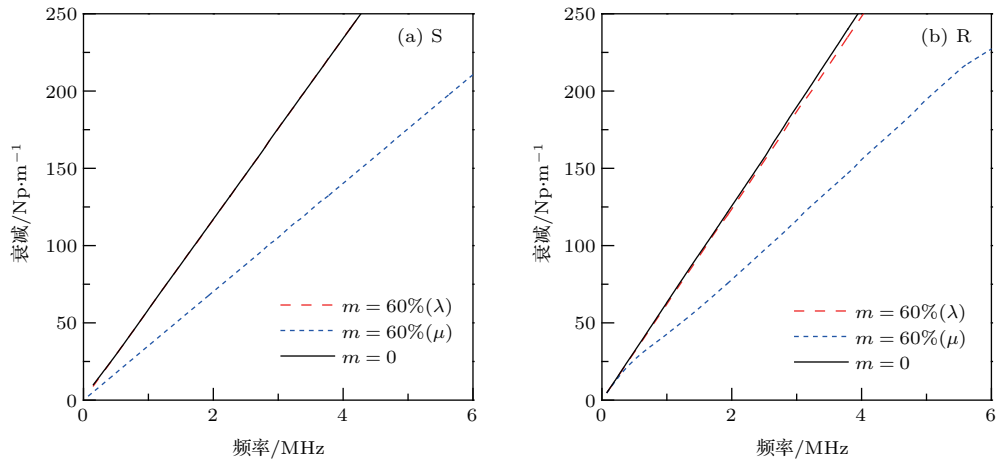


图 12 (a) S 与 (b) R 的衰减曲线

Fig. 12. Attenuation curves of (a) S and (b) R.

引起S与R的衰减变化;此外,近表面层的Lamé常数中的 $\lambda$ 的虚部变化对S与R的衰减几乎没有影响,而 $\mu$ 的虚部变化会引起S与R的衰减变化较大,说明S与R的衰减与近表面层的剪切黏性模量相关.本研究为激光超声技术无损评估复合平板近表面层的力学性能提供理论指导,同时也为将来研究复合平板表面微裂纹问题提供可行性思路.

参考文献

[1] Cheng J C, Zhang S Y 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2087  
 [2] Jian X, Fan Y, Edwards R S, Dixon S 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 064907  
 [3] Xu X D, Goossens J, Shkerdin G, Glorieux C 2008 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **55** 675  
 [4] Grunsteidl C, Veres I A, Roither J, Burgholzer P, Murray T W, Berer T 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 011103  
 [5] Ni C Y, Chigarev N, Tournat V, Delorme N, Chigarev N, Shen Z H, Gusev V E 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 014906  
 [6] Hess P, Lomonosov A M, Mayer A P 2014 *Ultrasonics* **54** 39  
 [7] Wang J S, Xu X D, Liu X J, Xu G C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7765 (in Chinese) [王敬时, 徐晓东, 刘晓峻, 许刚灿 2008 物理学报 **57** 7765]

[8] Zhang S G, Hu W X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 4314  
 [9] Zeng W, Wang H T, Tian G Y, Hu G X, Wang W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 134302 (in Chinese) [曾伟, 王海涛, 田贵云, 胡国星, 汪文 2015 物理学报 **64** 134302]  
 [10] Han Q B, Qian M L 2007 *Acta Acoustics* **32** 338 (in Chinese) [韩庆邦, 钱梦騷 2007 声学学报 **32** 338]  
 [11] Han Q B, Qian M L 2005 *Acta Acoustics* **30** 143 (in Chinese) [韩庆邦, 钱梦騷 2005 声学学报 **30** 143]  
 [12] Sun H X, Xu B Q, Qian R Z 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 073108  
 [13] Sun H X, Zhang S Y 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 123101  
 [14] Sun H X, Zhang S Y, Xu B Q 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 073107  
 [15] Yuan L, Shen Z H, Ni X W, Lu J 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 023529  
 [16] Hong K, Yuan L, Shen Z H, Ni X W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104303 (in Chinese) [洪轲, 袁玲, 沈中华, 倪晓武 2011 物理学报 **60** 104303]  
 [17] Yuan L, Sun K H, Shen Z H, Ni X W, Lu J 2015 *Int. J. Thermophys.* **36** 1057  
 [18] Sun H X, Zhang S Y 2013 *Int. J. Thermophys.* **34** 1769  
 [19] Sun H X, Zhang S Y, Xia J P 2015 *Int. J. Thermophys.* **36** 1156  
 [20] Sun H X, Zhang S Y, Yuan S Q, Guan Y J, Ge Y 2016 *Int. J. Thermophys.* **37** 68

# Propagation characteristics of laser-generated surface acoustic waves in composite plate with gradient changes of near-surface viscous moduli\*

Guan Yi-Jun<sup>1)</sup> Sun Hong-Xiang<sup>1)2)†</sup> Yuan Shou-Qi<sup>1)‡</sup> Ge Yong<sup>1)</sup> Xia Jian-Ping<sup>1)</sup>

1) (*Faculty of Science, Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

( Received 7 June 2016; revised manuscript received 18 August 2016 )

## Abstract

Taking into account the gradient change of the near-surface viscous property, we develop a finite element model of laser-generated surface acoustic wave in composite plate. The propagation characteristics of the surface acoustic wave in the composite plate are studied in detail, and the influences of the near-surface viscous modulus, thickness, and Lamé constant on the attenuation characteristics of the surface acoustic wave are discussed. In addition, the propagation characteristics of the surface acoustic wave are verified by the theoretical calculations of the dispersion and attenuation curves. The results show that the near-surface viscous modulus and thickness are related to the attenuations of the surface shear wave and the Rayleigh wave, but have no influence on the propagation velocity. Furthermore, the imaginary part of the Lamé constant  $\mu$  has great influence on the attenuations of the surface shear wave and the Rayleigh wave, whereas the imaginary part of  $\lambda$  has no effect on the attenuation characteristics of the two waves, which indicates that the attenuation of the surface acoustic wave is related to the near-surface shear viscous modulus. The study gives theoretical basis for evaluating the near-surface mechanical properties of the composite plates by the laser ultrasound technique. Besides, it provides a feasible way to study the surface micro-cracks on the composite plates.

**Keywords:** laser ultrasound, finite element method, near-surface viscous property, attenuation

**PACS:** 42.62.-b, 43.35.+d

**DOI:** 10.7498/aps.65.224201

---

\* Project supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51239005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11404147), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK20140519), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M571672), the Research Fund for Advanced Talents of Jiangsu University, China (Grant No. 13JDG106), and the Training Project of Young Backbone Teachers of Jiangsu University, China.

† Corresponding author. E-mail: [jsdxshx@ujs.edu.cn](mailto:jsdxshx@ujs.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [Shouqiy@ujs.edu.cn](mailto:Shouqiy@ujs.edu.cn)