

文章编号: 1001-3806(2006)02-0177-04

透明薄膜 基底系统激光超声波的有限元数值研究

王纪俊^{1,2}, 沈中华^{1*}, 倪晓武¹, 许伯强², 关建飞¹, 陆建¹

(1. 南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094 2 江苏大学 理学院, 镇江 212013)

摘要: 在分析了网格大小和时间步长这两个重要参数和求解稳定性的基础上, 采用有限元方法建立了透明薄膜/基底系统的热传导方程和热弹性方程的有限元模型。考虑了薄膜和基底的物理参数随温度的变化, 得到了激光照射透明薄膜/基底系统温度场空间分布, 由此计算出由热弹效应激发的超声对心波形。结果表明, 透明薄膜厚度的增加, 会影响到激光激发的对心超声波形; 当薄膜厚度增大时, 对心超声波形中的双极脉冲波形振幅变大, 波形宽度加大。该方法为透明薄膜/基底系统的定量检测和无损评价提供了理论依据。

关键词: 激光物理; 超声; 有限元; 薄膜/基底系统

中图分类号: TG665 O242.1 **文献标识码:** A

Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the transparent coating-substrate system

WANG Ji-jun^{1,2}, SHEN Zhong-hua¹, NI Xiaowu¹, XU Bai-qiang², GUAN Jian-fei¹, LU Jian¹

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

Abstract The finite element model of the thermal conductive equation and the thermoelastic equation in the system consisting of a transparent coating and a opaque substrate is established based on the analysis of the stability of solution and two important parameters meshing size and time step. Taking into account the temperature dependence of material properties, the transient temperature is obtained. The near axis normal waveforms at the epicenter generated by thermoelastic effect are obtained. The influence of the coating thickness on the waveform is analyzed.

Key words laser physics; ultrasound; finite element method; coating-substrate system

引 言

激光超声由于具有非接触激发, 能一次同时在样品中激发多种模式超声波和激发的超声波频带宽等特点, 在无损伤检测领域得到越来越广泛的应用^[1-4]。激光照射在薄膜/基底系统, 系统吸收激光辐照能量, 在系统表面和内部产生温度梯度很大的瞬态温度场和热弹应力场, 形成激发超声波的体力源。激光热弹机制激发超声的理论研究工作集中在求解热弹方程, 应用的主要方法有双积分变换方法^[5]、格林函数法^[6]、双重 Fourier 变换法^[7]和本征函数展开法^[8]等解析或半解析方法。

工程应用中, 在不透明基底材料上经常会覆盖或溅射上一层透明薄膜。对透明薄膜的情况, 激光将直

接照射到薄膜/基底的分界面上, 超声体源位于系统内部, 形成埋藏振动体源。ROSA, OLTRA 和 NADAL 建立了透明薄层和基底系统的物理模型, 采用解析方法对激光脉冲产生的超声波的对心波形进行了理论和实验研究^[9-10]。但解析计算方法难以处理复杂的几何形状和存在缺陷的样品及由于温度的变化而产生的材料热物理参数改变的影响。有限元方法可以灵活地建立复杂模型, 考虑薄层和基底的物理参数随温度的变化, 得到全场的数值解。激光超声的产生和传播与薄膜(或涂层)及基底的材料物理性质和结构有关, 因此, 对心波形是测量和评价薄膜(或涂层)和基底的力学和弹性性质的非常理想工具。作者采用有限元方法研究由埋藏振动体源在薄膜/基底系统中超声波的产生过程, 建立了热传导方程和热弹力学方程的有限元模型, 计算出激光脉冲照射透明薄膜/基底系统的对心波形, 分析了透明薄膜厚度对超声对心波形的影响。

1 理论模型

1.1 瞬态温度场和激光热弹超声波的产生

如图 1 所示, 在半无限不透明的基底上有一层透

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: 王纪俊(1966-), 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。

* 通讯联系人。E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2005-03-09; 收到修改稿日期: 2005-05-26

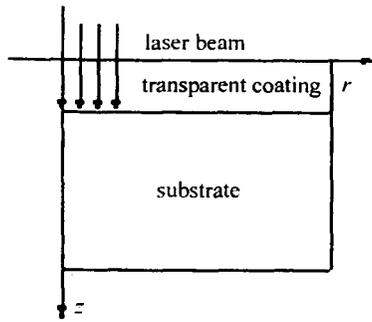


Fig 1 Schematic diagram for laser irradiating system

明薄膜, 设薄膜和基底为理想接触, 由于薄膜透明, 入射光直接照射到薄膜和基底的交界面上。激光能量低于材料的熔融阈值, 即只考虑热弹效应。考虑到入射激光束具有高斯分布的特性, 在分析中采用柱坐标系, 热传导方程表示为^[11]:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中, $T_i(r, z, t)$ 表示不同时间空间某一点的温度, ρ_i, c_i, k_i 分别表示介质的密度、比热容和热导率, $i = 1, 2$ 分别表示薄膜和基底。

系统的上下表面认为绝热。不考虑薄膜层对光强的吸收, 则薄膜和基底的分界面满足:

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=h} + I_0 A(T) f(r) g(t) = -k_2 \left. \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=h} \quad (2)$$

式中, I_0 表示入射光中心处的光强, $A(T)$ 是基底对光的吸收系数, $f(r)$ 和 $g(t)$ 分别表示激光脉冲的空间和时间高斯分布。

激光照射到透明薄膜和基底的分界面附近形成的瞬态温度场, 导致材料内产生应力、应变, 由热弹效应

Table 1 Thermal properties of aluminum, glass used in the calculation

physical properties	glass	aluminum
absorptivity		$A(T) = 5.2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-5} (T - 300)$ $292.6 T < 200K$
$k/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$1.83 \times 10^{-5} T + 0.012$	$249.45 - 0.085T, 200 < T \leq 730K$
	$1.2 \times 10^{-5} T + 0.021$	$198.47 - 0.014T, T < 730K < T_m$
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	2400	$-0.22T + 2769, 300 \leq T \leq T_m$ $3.917T, T < 200K$
$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	840	$780.3 + 0.488T, 200 \leq T \leq T_m$
Poisson's ratio	0.17	0.34
Young's modulus/Pa	7.5098×10^{10}	6.85×10^{10}
thermal expansion coefficient/ K^{-1}	0.63×10^{-6}	2.65×10^{-5}

近光束区域取为 $5\mu m$, 远离近光束区域取 $20\mu m$,

2.2 数值计算结果分析

2.2.1 温度场和温度梯度场分布

图 2 为 $1\mu s$ 时刻

激发出瞬态位移场, 在两种介质中形成超声波。位移场满足方程^[12]:

$$(\lambda_i + 2\mu_i) \nabla (\nabla \cdot U_i) - \mu_i \nabla \times \nabla \times U_i - \alpha_i (3\lambda_i + 2\mu_i) \nabla T_i(r, z, t) = \rho_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中, $U_i = U_i(r, z, t)$ 表示两介质内质点的位移, λ_i 和 μ_i 是拉梅常数和泊松比。

边界条件为薄膜和基底的分界面位移连续、应力连续。初始条件为系统初始静止。

1.2 数值计算方法

线性热弹性方程的有限元控制方程可表述为:

$$[M] \{\ddot{U}\} + [S] \{U\} = \{F_{ext}\} \quad (4)$$

式中, $[M]$ 是质量矩阵, $[S]$ 是刚度矩阵, $\{U\}$ 是位移矢量, $\{\ddot{U}\}$ 是加速度矢量, $\{F_{ext}\}$ 是激光作用, 用无条件收敛的 Newmark 时间积分方法求解上述方程。数值积分的精度取决于时间步长和单元长度。在保证求解精度下, 时间步长选取为^[13]: $\Delta t = 1/180 f_{max}, f_{max}$ 是所期望的最高频率。有限单元取 4 节点的平面单元, 采用如下关系以保证能量在连续的两个节点之间传递^[13]: $L_e = \lambda_{min}/2Q$ 其中 L_e 为单元的长度, λ_{min} 是传播过程中最小波长。

2 数值计算结果和讨论

2.1 激光和材料参数

在有限元数值计算中, 透明薄膜和基底分别为玻璃和铝。温度变化时介质的材料参数如比热容、热传导系数等也要发生改变, 材料参数及其随温度变化规律见表 1, 其中, T_m 为材料的熔点。铝盘半径 $3cm$, 厚度为 $5mm$, 薄膜厚度取值范围从 $5\mu m$ 到 $200\mu m$ 。激光能量 $13.5mJ$ 激光脉冲上升时间为 $10ns$, 激光光束半径为 $300\mu m$ 。根据激光光束半径, 有限元网格大小在

系统的瞬态温度场和温度梯度场, 其中图 2a 为是 $1\mu s$ 时系统的瞬态温度场分布图, 从图中可以看出, 系统的温升区域集中在分界面处的激光光斑附近, 温度场分

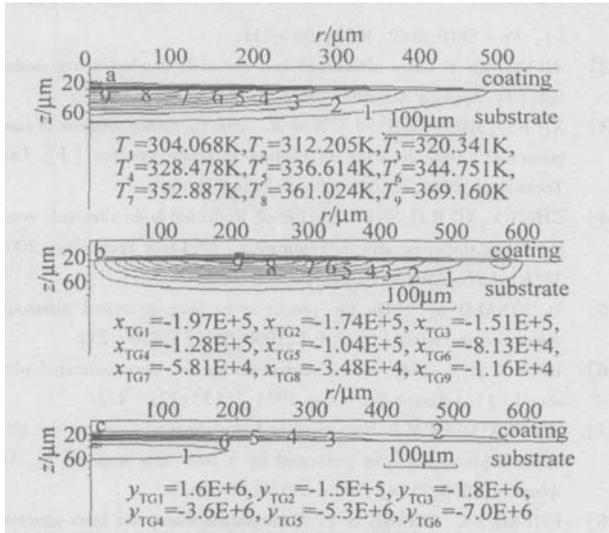


Fig 2 Contour of temperature and temperature gradient at 1μs near the heat affected zone

a- contour of temperature b- radial temperature gradient c- axial temperature gradient

布在分界面附近很小的区域, 轴向扩散深度不超过 80μm, 而径向扩散距离不超过 600μm。铝中的温度升高区域比玻璃中的温度升高区域大得多, 在玻璃中温度场的轴向扩散深度小于 15μm, 而铝中轴向扩散深度约为 60μm, 其原因是铝的热导率比玻璃大得多, 因此, 激光能量转化的热量大部分被铝所吸收。

图 2b 是 1μs 时系统的 x 方向 (即径向) 的瞬态温度梯度分布, 图 2c 是系统的 y 方向 (即轴向) 的瞬态温度梯度分布。由径向和轴向的温度梯度分布可看出: 铝材料中的温度梯度比玻璃中大很多, 而且铝的热膨胀系数比玻璃的热膨胀系数大, 所以铝中产生的弹性形变比玻璃产生的弹性形变大, 可以近似认为热弹性力源主要由铝的弹性形变产生的, 起主要作用; 径向温度梯度和轴向温度梯度均在分界面附近区域达到最大值, 由热弹效应, 温度梯度分布在材料的内部将产生瞬态应力场分布, 径向温度梯度对应于径向应力而产生横波, 轴向温度梯度对应于轴向应力而产生纵波^[11]。从图 2 还可以看出, 径向方向的温度升高区域和温度梯度存在的区域明显都要比轴向广, 决定了热弹效应产生的径向应力比轴向应力大, 这说明激光产生体源中包含有更多的横波成分。

2.2.2 近场波形及其规律 利用有限元数值计算可以得到透明薄膜/基底系统由热弹效应产生的超声波信号及不同厚度透明薄膜对超声波的影响。图 3 为薄膜厚为 20μm 时的对心近场波形, 接受位置和轴线距离为 1.5mm, 可以看出波形中先到达的纵波 (L 波), 其后到达的为横波 (S 波), 先到达的纵波中包含有双极的脉冲波形。对心波形中首先到达的纵波是由下表面质点的先向下运动, 对应于材料的向外扩张 (前驱小波), 然后是向上运动, 对应于材料的收缩 (与纵波

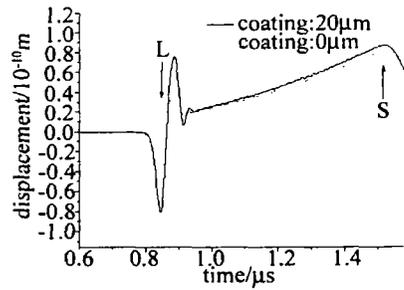


Fig 3 Near-axis normal waveform at epicenter in aluminum plate and coating-substrate system

到达的时间相一致), 纵波到达后, 由于材料的进一步收缩, 直到横波的到达。纵波中的双极脉冲波形是由基底材料形变产生的负向脉冲和由透明薄膜/基底材料的界面反射产生的正向脉冲合成的结果。图 3 中虚线表示的是单层铝板受到相同的脉冲激光照射下产生的超声对心近场波形, 比较两曲线可以看出, 透明薄膜覆盖在金属铝表面上对超声对心波形的影响主要表现在双极的脉冲波形上, 而对超声波在铝中的传播速度并无影响。由图 3 可以算得纵波和横波得速度分别为 6396.2m/s 和 3112.4m/s, 速度计算结果和理论值一致。横波的振幅相比纵波的振幅要大, 主要原因是热弹激发超声力源中包含有大量的横波成分。

进一步计算了对心近场波形随着透明薄膜厚度的增加的变化规律, 结果如图 4 所示。图 4a 为透明薄膜

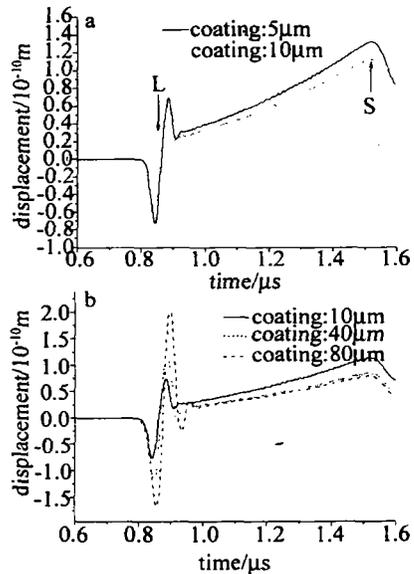


Fig 4 Waveforms in different thickness of coating

较薄时的情况, 薄膜厚度分别为 5μm 和 10μm。可以看出当透明薄膜较薄时双极脉冲波形基本相同。其原因是当透明薄膜厚度较薄, 小于其热扩散深度 (15μm 左右) 时, 产生超声的振动体力源仍可近似看成表面力源。图 4b 为薄膜厚度为分别为 10μm, 40μm 和 80μm 时的对心近场波形。由图看出, 随着薄膜厚度的增加, 双极脉冲波形的振幅逐渐增大, 在透明薄膜厚度为 80μm 时, 其振幅已经超过横波的振幅。其原因

是随着透明薄膜厚度的增加,系统的振动体力源位置也随之深入到物体内部。在无覆盖薄膜和薄膜很薄时,振动体力源的上表面为自由表面或受到的约束较小,而随着透明薄膜厚度的增加,振动体力源的上表面的约束也随之增加,因此,双极脉冲波形振幅增大。由图 4b 还可看出双极脉冲波形的波形加宽,脉冲波形有一定宽度是因为振动体源产生超声波在接受点处的高频衍射效应产生的,随着透明薄膜厚度的增加,衍射效应更加明显,波形加宽。图 4a 图 4b 中双极脉冲波形后出现了振荡波形,是由于纵波在透明薄膜中的多次反射形成的。

3 结 论

有限元数值模拟研究了激光热弹激发的瞬态超声波及其传播过程,建立起激光输入参数以及材料参数和产生的对心波形特征之间的定量关系。在分析温度场的基础上得到了玻璃/铝系统中由脉冲激光激发的对心近场超声波形,研究了透明薄膜厚度对对心近场超声波形的影响,结果表明,对心波形中的双极脉冲波形振幅和脉宽随透明薄膜厚度增加而变大。对心近场波形的纵波(特别是双极脉冲波形)和横波波中包含有薄膜厚度、基底材料和界面性质等信息,通过对超声波信号进一步分析可以了解材料的性质及参数,为薄膜材料的特性及厚度等的无损检测和评价提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] SCHNEIDER D, STEHL E, HAMMER R *et al*. Nondestructive testing of damage layers in semiconductormaterials by surface acoustic waves

[J]. Proc SPIE, 2002, 4692: 195~ 211.

- [2] ZHANG Sh Y. Laser ultrasound and materials nondestructive evaluation [J]. Applied Acoustics, 1992, 11(4): 1~ 6.
- [3] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Time/frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating/substrate systems [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 609~ 612(in Chinese).
- [4] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al*. Reflected laser ultrasonic sensor for testing thickness and its application [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 557~ 559(in Chinese).
- [5] McDONALD A F. On the precursor in laser-generated ultrasound waveforms in metals [J]. A P L, 1990, 56(3): 230~ 232.
- [6] ROSE L R F. Pointsource representation for laser-generated ultrasound [J]. J Acoust Soc Amer, 1984, 75(3): 723~ 732.
- [7] HU W X, QIAN M L. Numerical and experimental study on the ultrasonic displacement field generated by a laser line source [J]. Acta Acustica, 2000, 25(4): 345~ 350(in Chinese).
- [8] CHENG J C, ZHANG S Y. Quantitative theory for laser generated Lamb waves in orthotropic thin plates [J]. A P L, 1999, 74(14): 2087~ 2091.
- [9] ROSA G, PSYLLAK I P, OLTRA R *et al*. Simultaneous laser generation and laser ultrasonic detection of the mechanical breakdown of a coating-substrate interface [J]. Ultrasonics, 2001, 39(5): 355~ 365.
- [10] ROSA G, OLTRA R, NADAL M. Evaluation of the coating-substrate adhesion by laser-ultrasonics modeling and experiments [J]. J A P, 2002, 91(10): 6744~ 6753.
- [11] XU B Q, SHEN Zh H, LIU J *et al*. Numerical simulation of laser-induced transient temperature field in film-substrate system by finite element method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(25): 4963~ 4968.
- [12] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al*. Numerical simulation of laser-induced ultrasonic by finite element method [J]. J A P, 2004, 95(4): 2116~ 2123.
- [13] WANG G Q. Practical numerical simulation technology in engineering and practice in ANSYS [M]. Xi'an Publishing Company of Northeast University of Technology, 2001. 151~ 164(in Chinese).

(上接第 169 页)

度显著降低,损伤就随之发生。

从图 6 非常齐整的段口可以发现,复合材料的损伤是整体炭化后的损伤,没有纤维拔出的痕迹。

4 结 论

激光能量沉积在复合材料内造成一定深度的体热源。在热的作用下复合材料发生一系列的物理化学变化:树脂的热膨胀、纤维的热收缩以及树脂和纤维的分解、炭化等。热损伤的关键在于化学变化,焦化和炭化使树脂和纤维剧烈收缩,收缩所产生的应力促使性能变坏的复合材料损伤。激光热效应的影响区域很小,复合材料的物理化学变化仅发生在光照区域。激光功率高于烧蚀阈值时,辐照时间对材料的炭化面积、炭化深度、开裂程度等有很大影响。

前期的实验和后期的显微分析得到了罗飞同志的大力支持,以及李建明、李晓兰等同志的帮助,特此感

谢。

参 考 文 献

- [1] LATHAM W P, BERAUN J E. Laser effects research and modeling to support high energy laser systems [J]. Proc SPIE, 2001, 4376: 5~ 14.
- [2] SUN Ch W, FAN Zh X, CHEN Y Zh *et al*. Laser radiation effects [M]. Beijing Publishing House of Defense Industry, 2002. 6~ 7(in Chinese).
- [3] SUN Ch W. High power laser interaction with materials and damage mechanism [A]. High Power Laser Technology Analysis and Comments [C]. Mianyang Chinese Academic of Engineer and Physics, 1989. 224~ 251(in Chinese).
- [4] WANG G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyarylamide fibers irradiated by high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 11(15): 1065~ 1067(in Chinese).
- [5] STAVRIDIM, GINNEKEN B, KOENDERINK J J. Surface bidirectional reflection distribution function and the texture of bricks and tiles [J]. SPIE, 1996, 2599: 406~ 417.
- [6] ZAWORSKI J W, ELTY R, DROST M K. Measurement techniques for bidirectional reflectance of engineering materials [J]. ASME, 1993, 244: 172~ 177.