

文章编号: 0258-7025(2006)06-0765-05

圆管中激光激发表面瑞利波极性的有限元分析

何跃娟^{1,2}, 朱日宏², 沈中华³, 陆 建³, 倪晓武³

(¹ 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122
² 南京理工大学³ 电子工程与光电技术学院,³ 理学院, 江苏 南京 210094)

摘要 用有限元方法数值模拟了脉冲线源激光作用于厚铝管时产生的温升以及由此温升而产生的表面声波的情况,得到了逆时针向探测点和波源之间角度从 $\phi = 5^\circ$ 到 $\phi = 180^\circ$ 范围内一系列表面法向位移的时域波形,并对相同厚度不同外径的铝管的表面波进行对比。数值结果表明表面声波中显著的波为掠面纵波、头波和瑞利波,第一个瑞利波脉冲的极性在传播过程中发生了倒转现象,逆时针向看探测点离波源的角度 ϕ ,当 ϕ 较小时瑞利波脉冲是单极性的(负的),随着角度的增大,瑞利波脉冲逐渐变为双极性的,且双极性中正向极性逐渐增大,到 $\phi = 90^\circ$ 时变为完全双极性(正向和负向对称)。随着角度的进一步增加,双极性中负向极性逐渐减小,到 $\phi = 180^\circ$ 时瑞利波脉冲又变为单极性(正的)。不考虑衍射效应时,圆管中第一个瑞利波脉冲的极性和试样的尺寸无关,仅和探测点离波源的角度相关。

关键词 激光光学;脉冲线源激光;瑞利波极性;有限元方法;圆管

中图分类号 TN 249;O 426 **文献标识码** A

Analysis of Laser-Induced Surface Rayleigh Wave's Polarity in Hollow Cylinders by Finite Element Method

HE Yue-juan^{1,2}, ZHU Ri-hong², SHEN Zhong-hua³, LU Jian³, NI Xiao-wu³

(¹ College of Science, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China
² College of Electronic Engineering & Photoelectric Technology, ³ College of Science,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The transient temperature fields and the surface acoustic waves generated by a pulsed line-source laser in thick hollow cylinders are analyzed by using a finite element method. A series of the time domain waveforms of the surface normal displacements are shown for different angles between the source and the detection point from $\phi = 5^\circ$ to $\phi = 180^\circ$ in an anti-clockwise direction. And the surface acoustic waves generated in hollow cylinders with the same thickness and the different outer radii are compared. The numerical results denoted that the main features of the surface waves are three kinds of waves—the surface skimming longitudinal wave, head wave and the Rayleigh wave. And the first Rayleigh pulse's polarity changes gradually with the propagating angle increment. The Rayleigh pulse is monopolar (negative) near the source, becomes bipolar completely at the point of $\phi = 90^\circ$ and monopolar (positive) at $\phi = 180^\circ$. If neglected the diffraction effects, the polarity of the first Rayleigh pulse is only determined by the angle between the source and the detection point, and not related to the size of the specimen.

Key words laser optics; pulsed line-source laser; Rayleigh wave's polarity; finite element method; hollow cylinder

1 引 言

近年来,激光超声的法向和切向力源产生的瞬态弹性波场的理论和实验问题的研究越来越受到关

注。对板状材料的激光热弹激发超声包括兰姆波和瑞利波的研究,前人已经做了很多工作^[1~3]。对管状材料,文献[4]利用本征函数展开法得到了脉冲激

收稿日期:2005-11-17;收到修改稿日期:2006-01-15

基金项目:国家自然科学基金(60208004)和江南大学青年科学基金(2005LQN0021)资助项目。

作者简介:何跃娟(1971—),女,江苏宜兴人,江南大学讲师,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: yuejuanhe@thmz.com

光轴对称打在管外壁时各点振动的瞬态解;非轴对称激光照射下,文献[5]从实验上得到了薄铝管表面探测点的位移随时间的变化,并用二维傅里叶变换从理论上加以分析;文献[6]从实验上得到了厚铝管表面瑞利波波形随时间和探测角的变化关系,并用一维简化模型从理论上计算了激光产生的位移随角度和时间的变化,但没有给出探测点的完整的超声导波波形,并且没有考虑在激光作用过程中材料的参数随温度的动态变化。薄管中的周向兰姆波和平板中的类似,但厚管中的周向瑞利波比平板中的复杂。如果能用数值的方法模拟出厚圆管中激光激发超声导波的具体波形并进行分析,将给管状材料的激光超声无损检测提供理论依据。由于热弹条件下的激光超声是样品吸收能量,使温度上升从而产生热膨胀,所以研究管状材料中激光超声导波的前提是得到管状材料中的瞬态温度场,进一步根据得到的瞬态温度场得到超声波。在理论研究中,对脉冲激光热弹激发超声波进行精确解析求解十分困难,因为这一过程不仅包括瞬态热扩散^[7],而且包括瞬态弹性波的激发和在有限空间的传播^[8]。在对板状材料的激光热弹激发超声的研究中可采用傅里叶变换方法求解波动方程获得位移解的积分表达式,然后采用两次快速傅里叶变换(FFT)方法数值计算位移波形^[9],也可用有限元法^[10,11],由于有限元方法重复性好,能够灵活处理复杂的几何模型,得到全场数值解,因此本文采用有限元法来求解圆管情况下的热传导方程和热弹方程,对热弹机制下脉冲激光线源激发厚圆管中的超声导波进行研究,并对不同尺寸管子中的瑞利波极性进行分析。

2 理论模型

固体中激光激励超声波的机制随入射激光的功率密度和固体表面条件的不同而改变,分为热弹和烧蚀两种。对于表面干净、无约束的固体来说,如果入射激光的功率密度较低,激光能量不足以使固体熔化,则产生超声的过程中热弹机制起主要作用。本文考虑在热弹机制下高斯型脉冲激光经柱状透镜会聚成线源后垂直辐照到管状材料外表面。由于在管状材料中的目的主要是研究激光超声沿圆周向的传播,所以采取在管长方向上都有激光辐照这种简化模型。图1所示为模型的截面图,是垂直于圆管轴向所取的一个截面。

热弹条件下的激光超声是样品吸收能量,使温

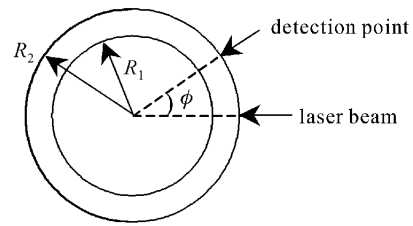


图1 激光照射模型图

Fig. 1 Model for laser irradiating the hollow cylinder

度上升从而产生热膨胀。材料中的瞬态温度场 $T(r, \phi, t)$ 满足热传导方程,在图1所示的模型下,铝管外表面激光线源宽对应的角度范围 $[-\alpha, \alpha]$ 内有热流,所以

$$-\kappa \frac{\partial T(r, \phi, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_2, -\alpha \leq \phi \leq \alpha} = P_0(1-R)g(t), \quad (1)$$

铝管外表面其他范围和内表面都绝热。式中 R 为样品表面的反射率, P_0 为辐照激光的功率密度峰值, $g(t)$ 为激光脉冲的时间分布,可以表示成

$$g(t) = \frac{t}{t_0} e^{-t/t_0}, \quad (2)$$

式中 t_0 为脉冲激光的脉宽。外表面其他范围和内表面都绝热。有限元法把经典的热传导方程表示成

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{p_1\} + \{p_2\}, \quad (3)$$

式中 $[C]$, $[K]$ 分别表示热容量矩阵和热传导矩阵, $\{p_1\}$, $\{p_2\}$ 表示热流矢量和内热源矢量,在我们的模型中激光当作表面加载,没有内热源。 $\{T\}$, $\{\dot{T}\}$ 分别表示温度矢量和温度变化率矢量。温度场可写成^[9]

$$T(r, \phi, t) = \sum_{j=1}^N N_j(r, \phi) T_j(t), \quad (4)$$

为了求解方程(3),对时间进行积分,积分步长取为 Δt ,温度和温度的一阶导数可近似写为

$$T|_i = \frac{1}{2}(T_{i+1} + T_i), \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dt} \Big|_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t}, \quad (6)$$

式中 $T_{i+1} = T(t + \Delta t)$, $T_i = T(t)$ 。把(4)~(6)式代入(3)式,可得到一个可执行的静态代数问题方程,每一个时间步的温度都能得到,并且每一时间步都考虑了材料参数的变化,从而得到整个温度场随时间的变化关系。在得到温度场 $T(r, \phi, t)$ 后,在热弹性体中,瞬态位移 $U(r, \phi, t)$ 满足纳维-斯托克斯方程,有限元方法中把此方程离散利用纽马克(Newmark)时间积分法得到位移场的数值解,在我

们所取的模型中管的内表面 $r = R_1$ 和外表面 $r = R_2$ 是自由表面。

用有限元方法研究激光激发超声时,数值积分的稳定性取决于有限元模型的时间步长和单元长度,为保证求解的精度,时间步长必须足够小,以保证最小的时间步长应和两个连续节点之间波的传播时间相对应^[12]。时间步长越小求解精度越高,而太小的时间步长则需要大量的计算时间。

3 数值模拟结果和讨论

3.1 激光和材料的有关参数

计算了 Nd:YAG 激光脉冲线源作用在管状铝材料外表面时所产生的温度场和表面的时域波。当样品厚度达到 5 mm 时表面就可得到很好的瑞利波^[11],因此取样品铝管厚度都为 5 mm。为了加以比较,取外半径分别为 15 mm 和 6 mm 两种不同模型。入射的激光束经柱状透镜会聚成长为 6 mm,宽为 260 μm 的一近似线源。激光能量为 100 mJ,脉冲上升时间为 10 ns,铝的反射率取 $R = 0.9$,且铝管表面吸收的能量全部转变成热能,和周围介质没有热交换,室温取 300 K。铝材料的热传导系数在熔点范围内随温度的变化关系为

$$\kappa = \begin{cases} 249.45 - 0.085T, & 200 \leq T \leq 730 \\ 198.47 - 0.014T, & 730 < T \end{cases}, (7)$$

比热为

$$c = 780.27 + 0.488T, \quad 200 \leq T \quad (8)$$

密度为

$$\rho = 2769 - 0.22T, \quad 300 \leq T \quad (9)$$

式中 T 为材料中的温度(K)。另外,研究超声所涉及的铝的力学参数如表 1 所示。

表 1 铝的力学参数

Table 1 Mechanical properties of aluminum used for the ultrasound analysis

Young's modulus / $\times 10^{10}$ Pa	7.02	
Poisson's ratio	0.34	
Thermal expansion coefficient / $\times 10^{-5}$ K^{-1}	2.31	
Lame's constants	$\lambda / \times 10^{10}$ Pa	5.81
	$\mu / \times 10^{10}$ Pa	2.61

3.2 数值结果和讨论

图 2 是两种不同尺寸的铝管在不同半径处温度随时间的变化曲线,图中 Δr 为在半径方向上离激光辐照中心点的距离。

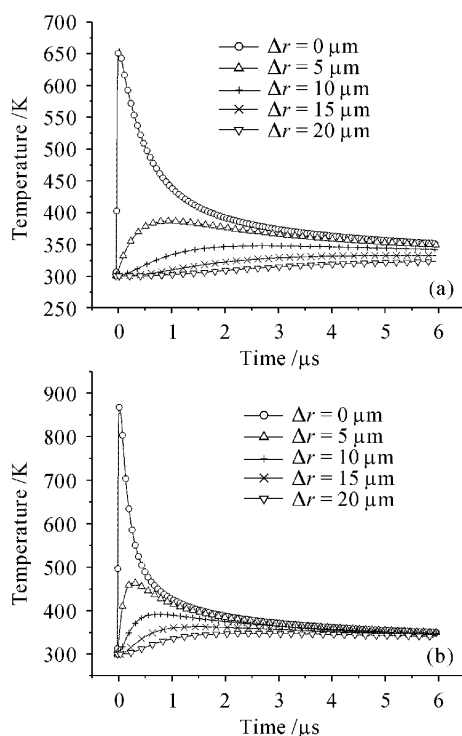


图 2 厚度都为 5 mm 的样品在不同半径处温度随时间的变化曲线

(a) 管外径为 15 mm; (b) 管外径为 6 mm ($\phi = 0^\circ$)

Fig. 2 Temperature versus time at various radii in the specimen with the same thickness of 5 mm and different outer radii

(a) 15 mm; (b) 6 mm ($\phi = 0^\circ$)

由图 2(a)和(b)可看出,随着激光辐照,材料表面温度上升得很快。这是由于激光脉冲上升时间很短,只有 10 ns。图 2(a)中激光辐照中心点在 52 ns 时达到最高,(b)中则在 40 ns 时温升就达到最高。原因是样品的尺寸不一样,在相同的激光能量和相同的聚焦情况下,尺寸小的样品最高温升较大且达到最高温升的时间短。分别把最高温升时刻的温度场作为新的有限元的加载,应用有限元方法就得到两种不同尺寸管中的位移场。

图 3(a),(b)所示是两种不同尺寸,厚度均为 5 mm 的铝管外表面逆时针向看探测点和激光照射中心点的夹角分别为 $5^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 处的垂直于铝管表面方向(即法向)的归一化位移随时间的变化关系。

由图 3 可看出,表面波中传播速度最快的波为掠面纵波(图中标示为 sP),幅度最大的波即为典型的瑞利波(标示为 R)。在近场区域,各种波形重叠在一起而几乎不可区分。由于传播速度的不同,随

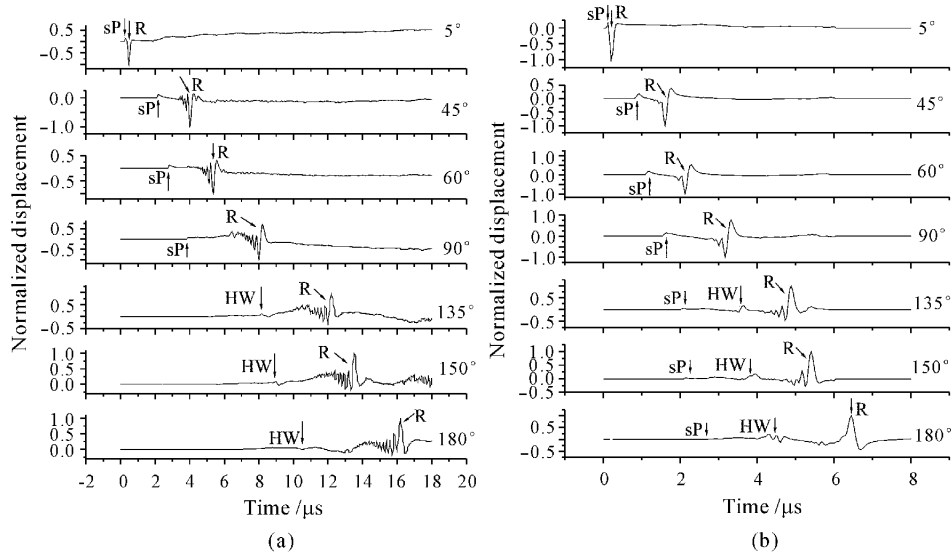


图 3 逆时针向,不同探测角下铝管外表面处的法向归一化位移随时间的变化关系

(a) 外径 15 mm;(b) 外径 6 mm

Fig. 3 Normalized displacement normal to the surface versus time at the different detection angel in an anti-clockwise direction

(a) the outer radius is 15 mm; (b) the outer radius is 6 mm

着探测点角度的增大掠面纵波和瑞利波逐渐分开,到 135° 处头波(标示为 HW)完全分开以致于能分辨出来,由于横波波速和瑞利波波速相差不多,所以在图 3 中横波没有明显地分辨出来。掠面纵波随着探测角的增大幅度逐渐减小,在图 3(a)中可以看出探测角小于等于 90° 范围内的掠面纵波都可分辨得出,而大于 90° 范围内的掠面纵波已分辨不清,图 3(b)中大于 90° 范围内的还可分辨出来。这是因为随着波的传播距离的增加,介质吸收波的幅度会逐渐减小,掠面纵波的幅度不是由探测点的角度决定而是看实际传播的距离。由图 3(b)的数值结果可知,瑞利波传到 90° 处所需时间约为 $3.215 \mu\text{s}$,图 3(b)的管半径为 6 mm,计算可得波的平均波速约为 2930 m/s ,和铝管中瑞利波的波速相近,所以图 3 中所示的瑞利波都为逆时针向传播的第一次到达探测点的波形,是第一个瑞利波脉冲 R_+ 。随着探测时间的延长,可以看到沿顺时针向传播到 90° 处的 R_- 。在 180° 处沿顺时针向和逆时针向传播的两列波同时到达探测点叠加在一起形成一个峰值,因此瑞利波的幅度应为一个方向传到此处位移的两倍。瑞利波脉冲的极性在其沿铝管圆周向传播时发生了倒转现象,在靠近波源的地方即图中 ϕ 角度较小时是单极性的(负的),随着角度的增大瑞利波脉冲逐渐变为双极性的,且双极性中正向极性逐渐增大,到 $\phi = 90^\circ$ 时变为完全双极性(正向和负向对称)。随着

角度的进一步增加,双极性中负向极性逐渐减小,到 $\phi = 180^\circ$ 时瑞利波脉冲又变为单极性(正的), 180° 范围内瑞利波脉冲正好倒转了一次。管中瑞利波脉冲极性的这种改变是圆柱表面瑞利波的频散效应引起的,脉冲激光源产生的是一个宽带超声脉冲,其带宽可考虑为约 $0.5 \sim 20.0 \text{ MHz}$,在该范围内瑞利波低频成分有较高速度而高频成分速度较低,随着距离的增大,各种波形逐渐分离开来。同时波形的相位逐渐变化,其中高频部分的相位延迟较大,相位改变 π 出现在角度为 90° 处^[6]。比较图 3(a)和(b)可以看出,管径较小时,圆管中瑞利波的极性和试样的尺寸无关,仅和探测点离波源的角度相关,这是因为管径小时传播距离较短,短距离传播时衍射效应可以忽略。根据文献[13]对平板表面所建立的衍射模型和文献[6]的实验结果可知,半径大的管中瑞利波极性的改变和管的尺寸以及入射激光的脉宽有关,大尺寸的管中瑞利波的极性由色散和衍射的总效应决定。进一步的工作可用有限元方法从数值角度来分析大尺寸圆管中波的衍射效应,对大尺寸圆管表面瑞利波的极性和管的尺寸以及入射激光的脉宽建立定量联系。

4 结 论

用有限元方法数值模拟了脉冲线源激光作用于

厚铝管时产生的温升以及由此温升而产生的表面声波的情况,得到了逆时针向探测点和波源之间角度从 $\phi = 5^\circ$ 到 $\phi = 180^\circ$ 范围内一系列表面法向位移的时域波形,并对相同厚度不同外径的铝管的表面波进行对比。数值模拟结果表明,圆管表面声波中显著的波为掠面纵波、头波和瑞利波;掠面纵波的幅度不是由探测点的角度决定而是看实际传播的距离,随着传播距离的增大波的幅度逐渐减小直至探测不到;圆管中第一个瑞利波脉冲的极性在传播过程中发生了倒转,逆时针向看探测点离波源的角度 ϕ ,当 ϕ 较小时瑞利波脉冲是单极性的(负的),随着角度的增大瑞利波脉冲逐渐变为双极性的,且双极性中正向极性逐渐增大,到 $\phi = 90^\circ$ 时变为完全双极性(正向和负向对称)。随着角度的进一步增加,双极性中负向极性逐渐减小,到 $\phi = 180^\circ$ 时瑞利波脉冲又变为单极性(正的), 180° 范围内瑞利波脉冲正好倒转了一次;忽略衍射效果,圆管中第一个瑞利波脉冲的极性和试样的尺寸无关,仅和探测点离波源的角度相关。

参 考 文 献

- Shen Zhonghua, Xu Baiqiang, Ni Xiaowu *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1275~1280
沈中华,许伯强,倪晓武等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟[J]. 中国激光, 2004, **31**(10):1275~1280
- Ni Xiaowu, Chen Xiao, Xu Boqiang *et al.*. Study of laser-generated transient Lamb wave by experiment and numerical simulation [J]. *Journal of Nanjing University of Science & Technol.*, 2003, **27**(5):70~78
倪晓武,陈笑,许伯强等. 激光激发瞬态 Lamb 波的实验检测与数值模拟研究[J]. 南京理工大学学报, 2003, **27**(5):70~78
- Shen Zhonghua, Zhang Shuyi. Laser induced ultrasound in film-substrate system [J]. *Acta Acoustica Sinica*, 2002, **27**(3):203~208
沈中华,张淑仪. 薄膜-基片中的激光超声研究[J]. 声学学报, 2002, **27**(3):203~208
- Tang Ligu, Cheng Jianchun, Wang Jinlan. Theoretical investigation of the laser-generated guided waves in hollow cylinders [J]. *Acta Acoustica Sinica*, 2001, **26**(6):489~496
汤立国,程建春,王金兰. 管道中激光激发瞬态导波的理论研究[J]. 声学学报, 2001, **26**(6):489~496
- Weimin Gao, Christ Glorieux, Jan Thoen. Study of circumferential waves and their interaction with defects on cylindrical shells using line-source laser ultrasonics [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(9):6114~6119
- D. Clorennec, D. Royer. Analysis of surface acoustic wave propagation on a cylinder using laser ultrasonics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(25):4608~4610
- Li Junchang. Calculation of heat interaction between a series of the laser pulses and the material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12):1120~1124
李俊昌. 激光脉冲列与材料的热作用计算[J]. 中国激光, 2001, **A28**(12):1120~1124
- Gong Yuliang, Wang Xiaodong, Zhang Rong. Optical detection of solid surface ultrasonic pulse using confocal Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(8):639~644
龚育良,王晓东,张蓉. 用共焦法布里-珀罗干涉仪探测固体表面超声脉冲的研究[J]. 中国激光, 1994, **A21**(8):639~644
- Hu Wenxiang, Qian Menglu. Numerical and experimental study on the ultrasonic displacement field generated by a laser pulse line source [J]. *Acta Acoustica Sinica*, 2000, **25**(4):345~350
胡文祥,钱梦驩. 激光脉冲线源位移场的数值与实验研究[J]. 声学学报, 2000, **25**(4):345~350
- Xu Baiqiang, Ni Xiaowu, Shen Zhonghua *et al.*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):621~625
许伯强,倪晓武,沈中华等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J]. 中国激光, 2004, **31**(5):621~625
- B. Q. Xu, Z. H. Shen, J. Lu *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
- He Yuejuan, Zhu Rihong, Shen Zhonghua *et al.*. The application of finite element method in the study of laser ultrasonics [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(5):269~272
何跃娟,朱日宏,沈中华等. 有限元方法在激光超声中的应用[J]. 应用激光, 2004, **24**(5):269~272
- D. Royer, C. Chenu. Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source [J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**:891-895