

# 基于柱状金属材料表面激光激发超声波的有限元分析

王贵鑫 严刚 关建飞

(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

**摘要** 基于热弹激发机制,建立了激光在圆柱侧面激发超声波的有限元模型,研究了在不同厚度及不同曲率半径下铝质圆柱(管)中头波的传播规律,分析了头波的传播特性。模拟结果表明:头波在柱体内部一定角度范围(临界角)内产生,并以略大于瑞利波的速度沿直线传播,在传播过程中逐渐远离瑞利波,并向纵波逼近;临界角(最大振幅处)的正弦值近似等于柱体中瑞利波与纵波的波速之比;在界面处,一部分头波渗透出来沿周向传播,并迅速衰减,另一部分则发生反射,沿直线传播至界面处渗出,没有发生明显的衰减。

**关键词** 激光技术;激光超声学;柱面头波;有限元方法;无损检测

**中图分类号** TN249;O426.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.031403

## Simulation of Laser-Induced Ultrasonic Waves on Surface of Isotropic Cylindrical Metal by Finite Element Method

Wang Guixin Yan Gang Guan Jianfei

(College of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

**Abstract** A method based on thermo-elastic excitation of ultrasonic waves generated by laser at the surface of a cylinder is presented. The propagation rules of head waves at the aluminum cylinders with different radii or different thicknesses are researched. The propagation characteristics of head waves are analyzed. The numerical results show that head waves are generated at the certain range (critical angle) in the body, and then spread along the straight line at a speed slightly larger than that of the Rayleigh waves. In the propagation process, the head waves move away from the Rayleigh waves and approximate longitudinal waves. The sine values of the critical angle (at the maximum amplitude) are almost equal to the wave-velocity ratios of the Rayleigh wave and longitudinal-wave in the cylinder. At the interface, a part of the head wave escapes from the body and spreads along the circumference with a rapid attenuation, while the other part of the head wave has a reflection at the interface with a small attenuation.

**Key words** laser technique; laser ultrasonics; head wave in cylinder; finite element method (FEM); non-destructive testing

**OCIS codes** 140.3538; 280.3375; 230.7370

## 1 引言

随着激光超声技术和计算机技术的发展,脉冲激光在固体材料中激发超声波的理论和实验研究及有限元方法(FEM)的相关应用受到越来越广泛的关注。其中有限元方法在光纤特性<sup>[1]</sup>、GH4033 基材相对稀释率<sup>[2]</sup>、光抽运垂直外腔面发射激光器(OPs-VECSEL)内部的热场分布和热矢量分布<sup>[3]</sup>等研究领域都有广泛的应用。而有限元法与激光超声技术的有机结合则进一步推动了相关科学研究的发展。文献[4~6]对柱状材料进行了相关的数值模拟,并采用双积分变换法计算了激光在圆柱体中激发的柱面表面波波波形。文献[7]对有限元方法中网格大小的划分、时间步长的选做作了科学的论证。董利明等<sup>[8]</sup>提出了基于光热调制的激

收稿日期: 2012-09-12; 收到修改稿日期: 2012-12-12; 网络出版日期: 2013-02-05

作者简介: 王贵鑫(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光超声的数值模拟方面的研究。E-mail: wgx669@yahoo.cn

导师简介: 严刚(1978—),男,博士,讲师,主要从事激光超声检测技术方面的研究。

E-mail: yang@njupt.edu.cn(通信联系人)

光声表面波检测疲劳裂纹的实验系统和方法,并将其用于发动机叶片疲劳裂纹的检测。冯文等<sup>[9]</sup>则分析了超声位移场随时间变化的特征。Clorennac 等<sup>[10]</sup>采用激光超声技术检测了铁及铝圆柱表面的裂缝,讨论了圆柱表面激光瑞利波与缺陷的相互作用。赵艳等<sup>[11,12]</sup>研究了柱状和管状材料中超声波的激光激励及其传播的有限元模型及算法,从理论及实验方面研究了柱状和管状材料中激光激励超声波的传播特性及其在复杂结构材料的无损检测领域的应用。

在研究超声波在材料表面传播的过程中,也能采集到头波(HW)等微弱信号。一般认为头波是在低速介质与高速介质的界面上产生的,并且在一定程度上遵从斯涅耳定律。而关于头波的研究鲜见报道,目前的研究大多集中于瑞利波等强信号,但是头波在地震研究<sup>[13]</sup>、钻井<sup>[14]</sup>和油污处理<sup>[15]</sup>等方面都有相当重要的应用。比如,在地震研究中认为头波是最早达到的能量,而且可通过测量沿地震线的头波的速度获得地震研究的相关参数;在流体中,只有当剪切波波速大于液体流速时才能够产生头波,因而在油污处理中可以根据头波的相关信息分析油污的进度、扩散范围等重要参数;在钻井探测中,头波在研究非轴对称钻孔中的多极子声波波形及其成因时有重要意义。综上可知,头波的信号虽然微弱,但在地震研究等领域仍有一定的科学价值。据此我们认为头波在材料检测中也有一定的科学价值。本文采用有限元法对柱状及管状材料进行了相关的激光超声模拟,对头波的传播规律进行研究,以期发现相关的科学依据,为材料检测提供进一步的支持。

## 2 理论模型和计算方法

固体中激光激励超声波的机理随入射激光的功率密度和固体表面条件的不同而改变,主要分为热弹和融蚀两种。对于固体而言,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,则主要表现为热弹机制。本文主要讨论热弹条件下脉冲激光光源在铝管表面激发的头波的传播路径问题,采用线源激光垂直辐照到柱(管)状材料的外表面,并基于此讨论超声波沿圆周的传播。同时考虑到激光能量在空间的分布具有轴对称的特征,而铝圆柱(管)具有各向同性及均质的特性,三维的弹性空间问题可以简化为二维的平面问题进行分析<sup>[16]</sup>,模型如图 1 所示,其中  $R_1$  为圆管内径, $R_2$  为圆管外径,当  $R_1=0$  时,圆管就变为实心圆柱。

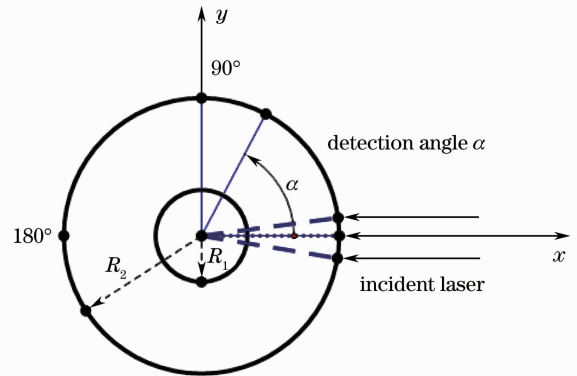


图 1 激光照射圆管模型

Fig. 1 Model of laser pulse irradiating cylindrical tube

在有限元分析中,热分析是基于能量守恒原理的热平衡方程,用有限元法计算各节点的温度,并导出其他热物理参数。针对激光激发超声过程中的热传导特点,在 ANSYS 中采用瞬态模型,其中瞬态热平衡可以表达为如下形式(以矩阵形式表示):

$$\mathbf{K}\mathbf{T} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{K}$  为传导矩阵,包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数, $\mathbf{C}$  为比热矩阵,考虑系统内能的增加, $\mathbf{T}$  为节点温度向量, $\dot{\mathbf{T}}$  为温度对时间的导数, $\mathbf{Q}$  为节点热流率向量,包含热生成。

在有限元计算中网格大小的划分和时间步长的选取对数值计算的准确性和可靠性有着很大的影响。采用如下公式计算相关模型中网格大小及时间步长:

$$L_e \leq \frac{1}{10} \frac{C}{f_{\max}}, \quad (2)$$

$$\Delta t \leq \frac{L_e}{C\sqrt{3}}, \quad (3)$$

式中  $L_e$  为有限元网格大小, $\Delta t$  为迭代计算的时间步长, $C$  为所有材料中纵波的速度, $f_{\max} = \frac{2\sqrt{2}C}{\pi} \frac{1}{r}$  为激光超声的最高频率,其中  $r$  为入射激光的光斑半径。经过科学计算及在模型中反复测试,选择激光主要作用区的网格大小为  $20 \mu\text{m}$ ,其他区域的网格大小为  $40 \mu\text{m}$ ,时间步长为  $2 \text{ ns}$ 。

### 3 数值模拟结果与分析

#### 3.1 头波在柱体内的一次传播特性

为了进一步探究头波在圆柱体内部的路径传播, 建立如下模型: 外径  $R_2 = 6$  mm, 内径  $R_1$  分别为 0、1、2、3、4 mm, 在同样参数的激光照射时, 比较相同角度下头波的振幅。以  $R_1 = 0$  mm 时的头波的振幅为参照, 分别与内径为 1、2、3、4 mm 时同角度下测得的头波的振幅比较, 结果表明: 当内径为 1 mm 时头波的振幅没有明显的变化; 内径为 2 mm 时, 已出现比较明显的衰减; 内径为 3 mm 时, 衰减幅度已大于 50%; 当内径为 4 mm 时, 已探测不到明显的头波。图 2 为探测角在  $110^\circ \sim 170^\circ$  范围内变化时得到的位移信号曲线。由图 2 可以看出, 在探测角为  $110^\circ$  时, 可以探测到一个微小的头波信号, 随后振幅逐渐增大, 在约  $130^\circ$  时振幅达到最大, 之后振幅又逐渐减小。这说明在铝圆柱内, 头波只在某一角度范围内产生、传播, 这与赵艳等<sup>[17]</sup>的结论相符, 即头波在柱体内的一次传播路径(即在柱体内产生、传播, 但是尚未到达界面时的传播路径)是直线, 而且这些头波仅在特定的范围内产生、传播。进一步根据采集到的头波信号的幅度可知, 头波信号幅度在  $130^\circ$  探测角时达到最大值。从图 2 还可以看出从  $110^\circ$  到  $170^\circ$  探测角, 头波与瑞利波的到过时间之差也越来越大, 并且逐步向纵波方向逼近。图 3 是赵艳等<sup>[17]</sup>给出的铝圆柱中纵波和头波的传播轨迹示意图。

从某种意义上说, 头波的这种特性可能有助于我们研究管道厚度及其中流体的相关特性。比如说, 如果在管道中处于头波传播路径上的某些位置出现缺陷而阻碍头波的进一步传播, 那么探测的头波信号必然出现异常。当管道内有流体和没有流体时的头波信号也必然不同, 此可以推断出管道中是否存有流体, 甚至可以探测出流体的多少。当然前提是该处管道要满足头波的产生条件, 同时还要有强大的信息数据库支持, 而具体的应用则有待于进一步的实验检验论证。

图 4 是外径为 6 mm, 内径分别为 0、1、2、3 mm 时, 在  $130^\circ$  和  $150^\circ$  探测角所测得的波形图, 图中的实线值代表内径为 0 (即实心) 时相应角度的波形图, 虚线代表内径分别为 1、2、3 mm 时的波形图。可以看出随着内径越来越大, 与实心时所得的波形相差越来越大。当内径为 1 mm 时, 如图 4(a)、(b) 中所示, 在同一探测角下测得的头波波形基本重合, 即无论是从振幅还是相位上看都无明显差别。这说明头波的产生与传播路径都与该柱体内部半径为 1 mm 的部分无关。

而在图 4(c)、(d) 中, 振幅相比实心时已明显减弱, 而且色散进一步加强, 并且在  $150^\circ$  时这一现象更为明显, 这也说明当内径为 2 mm 时(即在柱体中心处挖去内径为 2 mm 的小柱体), 已经部分阻断头波的传播路径。在图 4(e)、(f) 中, 不仅振幅大幅度衰减, 而且出现了明显的色散现象, 与图 4(c)、(d) 类似, 在  $150^\circ$  探测角所测得的波形中, 无论是振幅还是色散现象都比  $130^\circ$  探测角所得的波形更为明显, 这同样也是因为  $150^\circ$  探测角处所对应的头波的传播路径更接近圆管内表面, 即更接近边界, 在该角度下头波的传播路径更可能会被边界部分阻断。由此可以预见, 当柱体内空心部分进一步加大时, 头波的传播路径被阻断得越来越多, 当空心部分增大到一定程度后, 头波的传播路径有可能被完全阻断, 进而在探测点探测不到明显的头波信号。

如图 5 所示, 当内径为 4 mm 时, 已探测不到明显的头波信号, 图中的信号是瑞利波。这说明头波的传播路径已完全被阻断。综上所述, 不难看出头波只在柱体内部一定范围内传播, 而且存在一个如图 3 中所示的临界角  $\theta_c$ 。根据进一步的数据分析可知该临界角  $\theta_c$  所对应的探测角  $\alpha$  约在  $120^\circ \sim 170^\circ$  之间, 而临界角  $\theta_c$

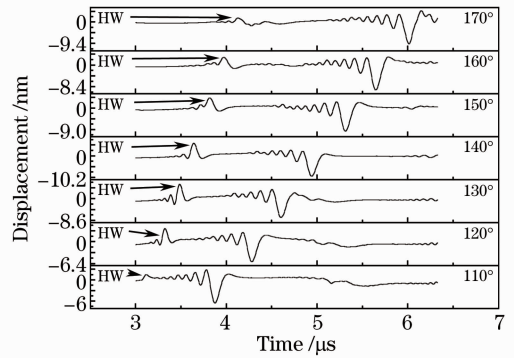


图 2 铝圆柱( $R_1 = 0, R_2 = 6$  mm)外表面不同角度( $110^\circ \sim 170^\circ$ )处的头波波形

Fig. 2 Waveforms of head waves at different angles ( $110^\circ \sim 170^\circ$ ) on outer surface of the aluminum cylinder ( $R_1 = 0, R_2 = 6$  mm)

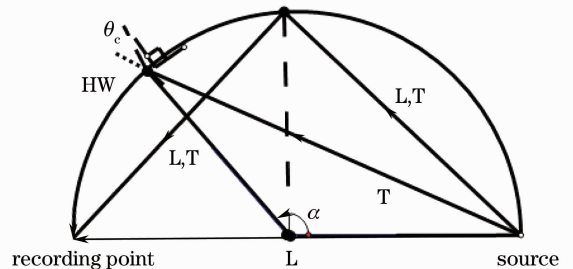
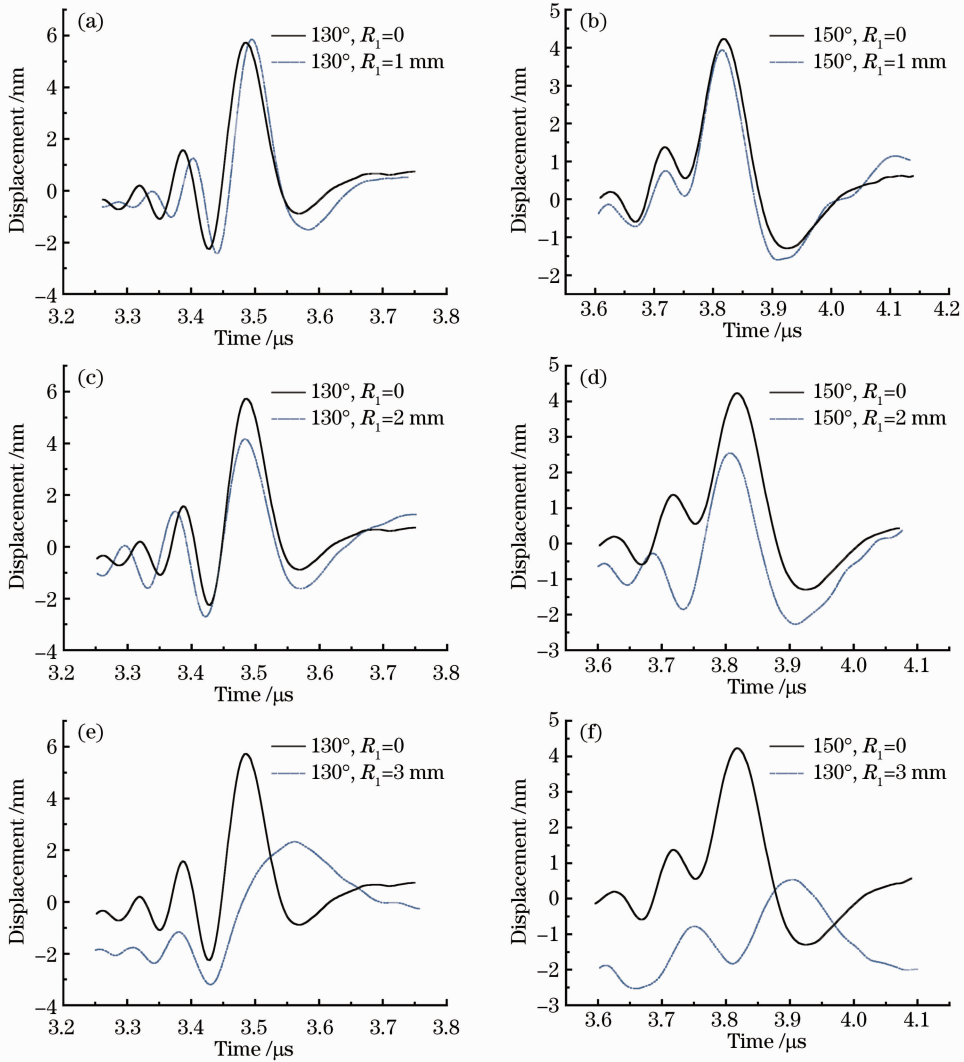


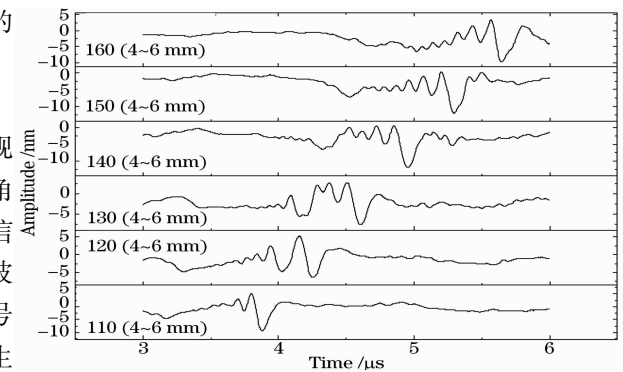
图 3 圆柱体中纵波(L)、横波(T)和头波的传播轨迹  
Fig. 3 Ray trajectories of longitudinal, transverse and head waves propagating in a cylinder

图4  $R_1=0, 1, 2, 3$  mm时  $\alpha=130^\circ, 150^\circ$  振幅比较Fig. 4 Comparison of amplitudes for  $R_1=0, 1, 2, 3$  mm and  $\alpha=130^\circ, 150^\circ$ 

的范围则在  $5^\circ \sim 30^\circ$  之间,其中头波最大幅度处所对应的  $\theta_c \approx 20^\circ$ ,对应的探测角约在  $135^\circ$  处。

### 3.2 头波在柱体内的反射

在探测铝圆柱外表面头波的位移变化情况时,发现在小角度范围( $0^\circ \sim 100^\circ$ )内,即头波产生角度之外的角度范围内也探测到了头波的信号。从时间上看,这组信号在第一次到达的瑞利波之后,在第二次到达的瑞利波(即二次反射瑞利波)之前。通过分析对比两组头波信号的传播时间及路径,发现头波在柱面上发生了反射,产生了二次回波(如图6所示),而且我们从几何角度做了初步的分析,如图7所示,其中直线  $i, k$  表示经界面反射的头波的传播路径,直线  $l, m$  表示经直线传播后直接在界面渗出的头波的传播路径,角  $\alpha_1$  代表在第二象限的探测角,  $\alpha_2$  代表在第三象限的探测角,  $\beta$  表示在第一象限的探测角。激光在  $0^\circ$  处激发出超声波后,超声波会沿以  $x$  轴为界,分别以逆时针方向和顺时针方向向对心位置传播。所以在第二象限所测得的信号,在第三象限也同样能够测到,而且在第一象限所测得的信号应该是从

图5 铝圆柱( $R_1=4$  mm,  $R_2=6$  mm)外表面不同角度( $110^\circ \sim 170^\circ$ )处的头波波形Fig. 5 Waveforms of head waves at different angles ( $110^\circ \sim 170^\circ$ ) on outer surface of the aluminum cylinder ( $R_1=4$  mm,  $R_2=6$  mm)

从第一象限所测得的信号应该是从

第三象限反射回来的信号。

换言之,图 6 中所出现的头波信号应该与图 2 中出现的头波信号存在一定的关系。其中在几何关系上

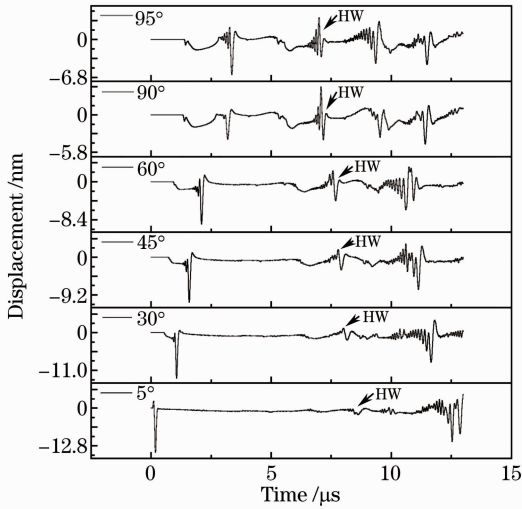


图 6 铝圆柱( $R_1=0, R_2=6$  mm)外表面不同角度( $5^\circ\sim 95^\circ$ )处的头波波形图

Fig. 6 Waveforms of head waves at different angles ( $5^\circ\sim 95^\circ$ ) on outer surface of the aluminum cylinder ( $R_1=0, R_2=6$  mm)

应有如下公式:

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad (4)$$

$$\beta = 360^\circ - 2\alpha_1, \quad (5)$$

即图 6 中在  $\beta$  处所测得的头波的传播路径应该是图 2 中在  $\alpha_1$  处所测得的路径的两倍。在传播时间上会有相应的体现。基于此,我们提取了相应角度的头波的有关信息,如表 1 所示。

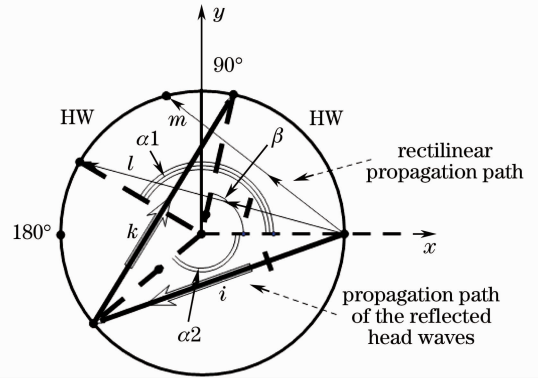


图 7 头波的传播路径分析

Fig. 7 Analysis of head-wave propagation path

表 1 不同内径、外径时对应角度头波传播时间的比值

Table 1 Ratio of HW propagation time at different angles with different  $R_1$  and  $R_2$

$\alpha_1 / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$t_2 / t_1$			
		$R_1=0, R_2=6$ mm	$R_1=0, R_2=2.06$ mm	$R_1=1$ mm, $R_2=8$ mm	$R_1=1$ mm, $R_2=10$ mm
160	40	1.98124228	1.97107954	1.98045996	1.98048706
155	50	1.98496685	1.97586829	1.98451617	1.98275862
150	60	1.98216110	1.97533615	1.98796250	1.98582788
145	70	1.98864216	1.96648437	1.98955350	1.98895205
140	80	1.98923313	1.97427266	1.99063241	1.99119276
135	90	1.98182124	1.98247490	2.10467325	1.99095633
130	100	1.98046808	1.97614046	1.98880895	1.99236034
125	110	1.99032505	1.96635770	1.98781406	1.99259114

表 1 中到达时间  $t_1, t_2$  是指所测得的头波最大振幅处的时间,即头波从波源传播到探测点所用的时间,其中  $t_1$  是一次传播路径(即图 7 中路径  $m$ )所用的时间, $t_2$  是二次传播路径(即图 7 中路径  $i, k$ )所用的时间。从表 1 可以看出,经界面反射的头波到达探测点所用的时间约是直接到达探测点的头波的 2 倍,即在第一象限附近所测得的头波是在第三象限处反射回来的头波。

## 4 结 论

采用有限元软件对激光在不同曲率半径铝圆柱(管)外表面激发的超声波进行多次信号采集,重点对头波信号的传播路径进行了比较分析。结果表明:头波的产生与纵波和瑞利波存在一定的关系,并且头波的临界角  $\theta_c$  与纵波和横波也存在一定的关系:临界角  $\theta_c$  在振幅最大时(约  $23^\circ$ )的正弦值近似等于瑞利波与纵波的波速之比。头波在铝圆柱体内某一特定角度( $\theta_c$ )范围内产生,并沿直线传播,一部分在界面上渗出,继而沿周向传播,并且在传播过程中逐步向纵波演化;另一部分在界面上发生镜面反射,并在二次接触界面上渗出。头波的这些传播特性对于柱体(厚壁管道)的无损检测,特别是对管道内部的缺陷检测将有一定的科学

价值。在后续工作中将对有内部缺陷(靠近管道内表面)的管道中激光激发的超声波做进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Dan. Microstructured fiber with closing-zero dispersion in wide wavelength range[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 090604  
王 丹. 一种宽带近零色散微结构光纤的设计与研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(9): 090604
- 2 Chen Gang, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen *et al.*. Simulation on substrate relative dilution ratio for GH4033[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 011601  
陈 刚, 黎向锋, 左敦稳 等. GH4033 基材相对稀释率的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 011601
- 3 Liu Xiangnan, Wang Xiaohua, Wang Fei *et al.*. Analysis of thermal characteristic in optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting laser with double heatspreaders[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 091404  
刘向南, 王晓华, 王 菲 等. 双散热片结构光抽运垂直外腔面发射激光器的热特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(9): 091404
- 4 X. Wu, M. Qian, J. H. Cantrell. Dispersive properties of cylindrical Rayleigh waves[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(19): 4053~4055
- 5 W. Hu, M. Qian, J. H. Cantrell. Thermoelastic generation of cylindrical Rayleigh waves and whispering gallery modes by pulsed-laser excitation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(18): 4031~4033
- 6 Y. Pan, C. Rossignol, B. Audoin. Acoustic waves generated by a laser line pulse in a transversely isotropic cylinder[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(24): 4379~4381
- 7 Frank Schubert, Bernd Koehler, Alexander Peiffer. Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT—cylindrical elastodynamic finite integration technique[J]. *J. Comput. Acoust.*, 2001, **9**(3): 1127~1146
- 8 Dong Liming, Li Jia, Ni Chenyin *et al.*. Crack detection of engine blade based on laser-heating assisted surface acoustic waves generated by scanning laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1103001  
董利明, 李 加, 倪辰荫 等. 基于光热调制检测发动机叶片疲劳裂纹的激光声表面波方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1103001
- 9 Feng Wen, Yang Dexing, Liao Wei *et al.*. Numerical simulation of laser induced ultrasonic in a diamond anvil cell by finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803005  
冯 文, 杨德兴, 廖 威 等. 金刚石压砧加载下激光超声的有限元模拟[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0803005
- 10 D. Clorennec, D. Royer, S. Catheline. Saw propagating on cylindrical parts using laser-ultrasonics: application to crack deflection[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. 207~210
- 11 Zhao Yan. Theoretical and Experimental Study of the Laser-Induced Ultrasonic Waves at Fluid-Solid Interface and Curved Surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007  
赵 艳. 流固界面和弯曲表面上激光超声的理论及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007
- 12 He Yuejuan, Zhu Rihong, Shen Zhonghua *et al.*. Simulation of laser-induced temperature fields and Rayleigh waves in thick Al pipe[J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 2005, **29**(4): 468~471  
何跃娟, 朱日宏, 沈中华 等. 厚铝管中激光激发温度场和瑞利波的模拟[J]. 南京理工大学学报, 2005, **29**(4): 468~471
- 13 Jennifer M. Leslie, Don C. Lawton. A refraction-seismic field study to determine the anisotropic parameters of shales[J]. *Geophysics*, 1999, **64**(4): 1247~1252
- 14 C. J. Randall. Multipole Acoustic waveforms in nonaxisymmetric boreholes and formations[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, **90**(3): 1620~1631
- 15 Amini Azin, Bollaert Erik, Boillat Jean-Louis. Dynamics of low-viscosity oils retained by rigid and flexible barriers[J]. *Ocean Engineering*, 2008, **35**(4): 1479~1491
- 16 Guan Jianfei. Mechanisms of Laser Generated Surface Acoustic Wave and Its Application in the Surface Defect Inspection [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006  
关建飞. 激光声表面波及其探测表面缺陷的机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006
- 17 Zhao Yan, Shen Zhonghua, Lu Jian *et al.*. Simulation of laser inducing cylindrical Rayleigh waves on isotropic cylinders by finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1062~1065  
赵 艳, 沈中华, 陆 建 等. 激光在圆柱表面激发柱面瑞利波的有限元模拟[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1062~1065