

# 基于激光激发多模态超声波速测量的 材料弹性常数测定

董利明 倪辰荫 沈中华 倪晓武

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 提出了利用精确测量激光激发的多种模态的超声波速来测定各向同性材料密度和二阶弹性(SOE)常数的实验系统和方法。把Nd:YAG激光器产生的激光聚焦成线源在样品表面不同位置激发3种模态的超声波,采用自行设计的压电陶瓷(PZT)传感器分别探测接收表面波、纵波和横波信号。利用扫描激光光源技术和波形相关技术精确测算表面波波速,再根据体波传播距离和到达时间分别计算纵波和横波波速,最后根据瑞利方程和克里斯托费尔的理论,计算得到材料的密度和二阶弹性参数。实验结果表明,该方法测得的铝样品的密度和二阶弹性常数 $C_{11}$ ,  $C_{44}$ 具有较高的可靠性和测量精度。

**关键词** 激光超声;二阶弹性常数;多模态超声;波速

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0408004

## Determination of Elastic Constants of Materials Based on the Velocity Measurement of Laser-Generated Multi-mode Ultrasound

Dong Liming Ni Chenyin Shen Zhonghua Ni Xiaowu

(College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A new method based on the measurement of velocity of laser-generated ultrasound is proposed to determinate the second order elastic (SOE) constants and density of isotropic materials. A serial of ultrasonic pulses can be detected by self-made PZT transducer fixed in the detection point when scanning the line source focused from Nd:YAG laser with electronic control translation stage. Then the velocity of Rayleigh waves is computed by waveform cross-correlation technique; the velocities of longitudinal wave and shear wave reflected by the bottom surface of the sample are obtained by different traveling time with their propagation distance. At the end, the SOE constants and density of isotropic material are determinated according to the Christoffel theory of elasticity. Results show that the values of SOE constants and density which signed with  $C_{11}$ ,  $C_{44}$  and  $\rho$  agree well with the corresponding parameters reported in the existing papers. What's more, the relative accuracy of the determinated parameters indicated from error analysis demonstrates the feasibility and reliability of this method.

**Key words** laser ultrasound; second order elastic constants; multi-mode ultrasound; wave velocity

**OCIS codes** 280.3375; 170.7180; 070.7345

### 1 引言

材料的弹性常数是表征其力学性质的基本参数,其精确测定对于材料无损检测和无损评价都是至关重要的,同时也是声弹检测不可缺少的。利用常规的机械性质测试方法来测定材料弹性常数是较

为困难的,而利用超声波脉冲技术来测定却较为容易,且具有无损伤、对材料外形要求低、测试简单等优点<sup>[1,2]</sup>,因此弹性常数的超声检测一直是实验力学、材料科学及机械工程等领域的热门课题<sup>[3~5]</sup>。

目前主要的弹性常数超声检测都是依据表征声

收稿日期:2010-09-21;收到修改稿日期:2010-11-16

基金项目:国家自然科学基金(60778006和60878023)资助课题。

作者简介:董利明(1985—),男,博士研究生,主要从事激光超声检测技术方面的研究。E-mail: donglm1985@yahoo.cn

导师简介:沈中华(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光超声技术及应用、激光与材料相互作用及应用等方面的研究。E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

波的相速度与材料弹性常数、密度及其质点振动之间关系的克里斯托费尔(Christoffel)方程式。当测定了声波的传播方向与相位速度后,就可以利用该方程式计算出材料的弹性常数。非接触式的激光超声方法具有非接触测量或遥测、空间分辨率高等优点,因此也受到了国内外学者的关注。W. W. Wilcox等<sup>[6~8]</sup>研究了利用激光超声技术通过测量体波中的纵、横波速度测定材料弹性常数的方法,但这些方法中横波速度不易测准,导致较大误差;之后何存富等<sup>[9,10]</sup>提出了一种利用纵波和表面波相结合测定已知密度的材料弹性常数的方法,但对于密度未知材料(例如合金材料)的弹性常数测定并不可行。因此,与现有方法相比,激光激发多种模式的超声测量方法,可以同时表面波、纵波和横波速度进行快速高精度测量,继而求得材料的密度和各弹性常数。

本文基于克里斯托费尔弹性理论,设计了适用于固体材料弹性常数的激光超声测量系统,采用自行研制的点接触式压电陶瓷(PZT)探头,通过对纵波、横波和表面波波速的精确测量,实现铝合金材料密度和弹性常数的无损检测。实验上分别用Nd:YAG脉冲激光器和PZT传感器在样品表面激发和接收3种模式的超声波(纵波、横波和表面波),通过移动光源扫描材料表面得到一系列的声波脉冲信号,采用波形相关技术计算出表面波的传播速度;改变激光光源位置,根据体波的传播距离和到达时间计算纵波和横波速度,然后根据瑞利方程和克里斯托费尔的弹性理论,便可计算得到合金材料的密度和二阶弹性参数。

## 2 克里斯托费尔弹性理论

对于均匀的固体材料,其运动方程可以写为<sup>[11~15]</sup>

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial r_j \partial r_i} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \quad (i, j, k, l = x, y, z) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{U}$  是质点的位移矢量;  $r$  是质点矢径;  $\rho$  是材料密度;  $C_{ijkl}$  是材料的弹性常数。一个线弹性平面波在该材料中的传播可以描述为

$$\mathbf{U}_i = a \mathbf{P}_i \exp[i(\omega t - k_j \tau_i)], \quad (2)$$

式中  $a$  为质点位移振幅;  $\mathbf{P}$  为质点偏振方向矢量;  $\omega$  为波的角频率;  $k_j$  为波矢量分量,其值即为波数。若以  $\mathbf{l}_i$  表示波方向的单位矢量,则  $K_j = K l_j$ ; 将(2)式代入(1)式后,  $\omega$  和  $P_k$  必须满足方程组

$$(K^2 C_{ijkl} l_j l_i - \rho \omega^2 \delta_{ik}) P_k = 0. \quad (3)$$

(3)式即为克里斯托费尔方程,  $P_k$  有非零解的必要条件为其特征行列式等于零,即

$$|K^2 \mathbf{\Gamma}_{ik} - \rho \omega^2 \delta_{ik}| = 0, \quad (4)$$

且  $\omega/K = V_P, V_P$  是相位速度,(4)式可写为

$$|\mathbf{\Gamma}_{ik} - \delta_{ik} \rho V_P^2| = 0, \quad (5)$$

式中  $\delta_{ik}$  为单位矩阵;  $\mathbf{\Gamma}_{ik} = C_{ijkl} l_j l_i$ , 称为克里斯托费尔矩阵。

对于各向同性材料,坐标系  $x, y, z$  与材料的主轴相重合,令波沿主轴  $x$  方向传播,则有:  $l_x = 1, l_y = l_z = 0$ , 克里斯托费尔方程便可简化为较为简单的形式,只考虑  $x-y$  平面内的波时,方程更可简化为

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ p_y \end{bmatrix} = \rho V^2 \begin{bmatrix} P_x \\ p_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

于是有

$$C_{11} = \rho V_L^2, \quad (\text{longitudinal wave}) \quad (7)$$

$$C_{44} = \rho V_S^2, \quad (\text{transverse wave}) \quad (8)$$

式中  $V_L$  和  $V_S$  分别指纵波速度和横波速度。

根据以上理论结果,便可由纵波和横波波速求得对于密度已知材料的二阶弹性(SOE)常数;但对于密度未知的合金材料,如铝合金,(7),(8)式不足以求得3个未知量  $C_{11}, C_{44}$  和  $\rho$ , 因此引入声表面波波速  $V_R, V_L, V_S$  的关系方程,即瑞利方程

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\left(\frac{V_S}{V_L}\right)^2\right]\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left[1 - \left(\frac{V_S}{V_L}\right)^2\right] = 0, \quad (9)$$

式中声表面波波速  $V_R$  为瑞利方程的最小正实根。

因此,根据(7)、(8)和(9)式,便可测定材料的二阶弹性常数  $C_{11}, C_{44}$  和密度  $\rho$ 。在一定意义上说,材料弹性常数的精确测定问题,也就是声波速度的精确测定问题。

## 3 实验系统及方法

### 3.1 实验装置

利用PZT传感器探测激光激发的超声波的实验系统如图1所示,其中1为激光器,2为柱透镜,3为步进电机,4为PZT传感器,5为示波器,6为电脑,7为铝样品。波长1064 nm、脉宽1 ns的Nd:YAG脉冲激光通过柱面镜聚焦成300  $\mu\text{m}$  宽的线光源投射到样品表面激发超声波。将PZT传感器固定在五维精密调整台上,并确保传感器探测劈面与激光光源方向平行,且在线源的中垂线方向放置。脉冲激光投射在样品表面激发出各种模式的超声

波,包括纵波、横波和表面声波,其中横波与纵波分别在样品底面反射到探测点,而声波沿样品表面传至探测点位置。由于声扰动使得样品表面发生形变并被 PZT 探测,由压电性实现声信号到电信号的转换,再由前置放大器整合放大射频输出,在数字示波器上输出信号,最后输入电脑。

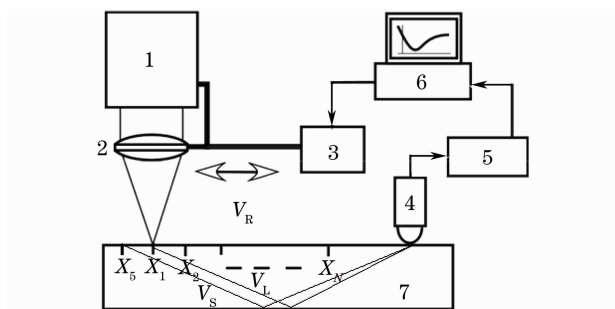


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

### 3.2 PZT 传感器的设计

考虑到实验中采用激光光源激发超声,并用扫描激光源的方法对材料进行探测,且对超声波的传播距离需要精确测量以保证声波波速的精确测定,因此用于接收超声波信号的传感器必须是点接触式的。而目前市场上的超声探头大多为面接触式探测,因此自行研制了点接触式的 PZT 传感器。

鉴于 PZT 材料稳定的压电性能和对超声信号的探测需求,自行设计研制的 PZT 压电传感器如图 2 所示。为了保证探测效果,把紧压于  $1 \text{ mm}^3$  的方形 PZT 块 2 底面的耦合材料块 1 的一端加工成劈状,耦合材料高  $0.5 \text{ mm}$ ,劈尖长度  $1 \text{ mm}$  左右,并使之平行于表面波的波前阵面,而与样品的线接触保证了传感器比点接触式更高的探测灵敏度。把方形 PZT 块的顶面和铜柱 3 相接作为一个电极,另外一个电极 4 则由耦合材料单元 1 顶部处引出,并通向一个阻抗为  $50 \Omega$  的前置放大器输出信号。整个 PZT 传感器的尺寸在  $3 \text{ mm}^2$  左右,固定在特制金属板上并使劈尖压在样品上表面进行探测。

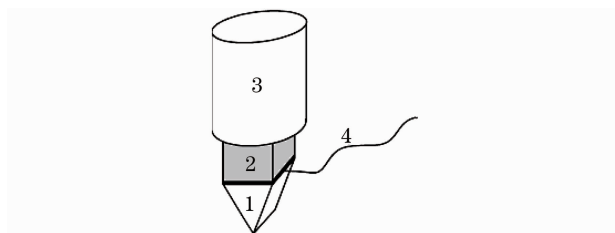


图 2 PZT 传感器示意图

Fig. 2 Schematic of PZT transducer

### 3.3 实验步骤

具体的实验步骤为:脉冲激光器激发的短脉冲激光通过柱面透镜聚焦在固体表面聚焦成线源作为声表面波的激发源,利用电脑程序控制步进电机使激光光源沿轴向精确移动,在不同的位置  $X_i (i = N, \dots, 1)$  处激发超声波, PZT 压电换能器在线源中轴线方向的固定位置分别探测不同位置激发的声表面波信号,示波器把换能器探测的声表面波信号转换成数字信号输入电脑,记录一系列传播了不同距离的激光超声波信号。在距 PZT 传感器探测点最近的位置  $X_N$  处,探测到从样品底部反射的信噪比最大的纵波脉冲信号,记录纵波到达时间  $t_L$ ; 同理,控制步进电机移动激光光源至  $X_S$  位置,使得从底部反射的横波脉冲达到最好的信噪比,记录横波到达时间  $t_S$  和光源移动距离  $d$ 。

## 4 结果与讨论

实验时,激光光源移动的步数  $N = 12$ , 每一步移动的距离为  $0.25 \text{ mm}$ 。每移动一步,记录各模态超声信号的时间延迟和波形数据。图 3 为探测到的超声脉冲信号及对声表面波的频谱分析图,图中的 R, S 和 L 分别表示沿表面传播的声表面波信号、由样品底部反射的横波信号和纵波信号,对声表面波信号做快速傅里叶变换(FFT),可以发现 PZT 传感器探测到的波形频率展宽高达  $60 \text{ MHz}$ ,反映了该传感器对高频具有良好的响应性能,而这对于精确测量声波波速至关重要。

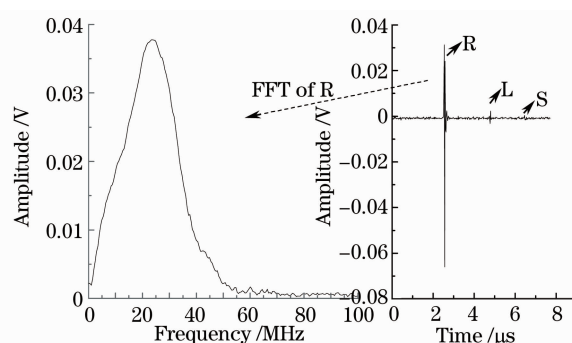


图 3 探测到的超声信号图及对声表面波的频谱分析

Fig. 3 Spectrum from the Rayleigh waves of the ultrasonic signal

运用波形相关技术对  $N$  步的探测结果计算各步的时间相对延迟  $\Delta t$ , 便可得到波形的的位置变化  $\Delta x$  与  $\Delta t$  的线性拟合关系,如图 5 所示,其拟合度达  $0.9$ ,证明了测量系统的稳定。拟合直线的斜率为

$1/V_R, V_R$  即为 Rayleigh 波波速。由此可见,增加激光探测的步数  $N$ ,可以提高声表面波波速的计算精度。

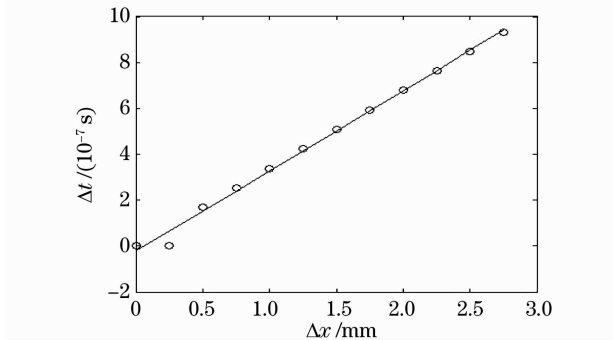


图 4  $\Delta x$  与  $\Delta t$  的线性拟合图

Fig.4 Fitting curve of  $\Delta x$  and  $\Delta t$

因此,计算得在实验中的铝样品表面上传播的声表面波波速为  $V_R=2939.9$  m/s 及  $X_N$  处激发时离探测点的距离  $L=0.55959$  cm;利用螺旋测微器测得铝板中心厚度为  $h=9.480$  mm;根据纵波传播时间  $t_L=3.1080$   $\mu$ s 和横波传播时间  $t_S=7.0768$   $\mu$ s,由

$$V_L = \sqrt{L^2 + 4h^2}/t_L, \quad (10)$$

$$V_S = \sqrt{(L+d)^2 + 4h^2}/t_S, \quad (11)$$

便可计算得纵波速度和横波速度分别为  $V_L=6361.4$  m/s;  $V_S=3137.4$  m/s。把上述 3 种模态的超声波速度值代入(7)、(8)和(9)式便可求得如下材料参数:  $C_{11}=109.6$  GPa;  $C_{44}=26.8$  GPa;  $\rho=2709$  kg/m<sup>3</sup>,这些参数值与现有文献中同类铝合金材料参数值吻合得很好,如文献[16]中:  $C_{11}=106.8$  GPa,  $C_{44}=28.3$  GPa,  $\rho=2695$  kg/m<sup>3</sup>。

## 5 测量误差分析

测量系统所存在的误差主要取决于测量纵波、横波及表面波波速的误差,而测速的误差则主要取决于测长误差即测厚  $h$  和激发点与探测点距离的  $L, d$  以及测时误差。

以  $C_{11}, C_{44}$  为例,考虑初始激发点与探测点的距离  $L$  由波形相关算法与表面波波速由程序计算所得,故二者引入的计算误差忽略不计。则由(7)、(8)、(10)和(11)式可推导出  $C_{11}$  和  $C_{44}$  测量误差的最大值分别为

$$\delta C_{11} = \frac{2\rho(L^2 + 4h^2)}{t_L^3} \delta(\Delta t_L) + \frac{8\rho h}{t_L^2} \delta h, \quad (12)$$

$$\delta C_{44} = \frac{2\rho[(L+d)^2 + 4h^2]}{t_S^3} \delta(\Delta t_S) + \frac{8\rho h}{t_S^2} \delta h + \frac{2\rho(L+d)}{t_S^2} \delta d. \quad (13)$$

式中  $\delta C_{11}$  和  $\delta C_{44}$  是二阶弹性常数的误差;  $\delta(\Delta t_L)$  和  $\delta(\Delta t_S)$  分别是纵波和横波的传播时间测量误差;  $\delta h$  和  $\delta d$  分别是样品测厚误差和测量横波时的光源移动距离误差。

测试中,  $\delta(\Delta t_L) = \delta(\Delta t_S) = 0.5$  ns,  $\delta h = 0.01$  mm,  $\delta d = 1.25$   $\mu$ m,则由(12)和(13)式可得

$$\delta C_{11} = 0.248 \text{ GPa}, \frac{\delta C_{11}}{C_{11}} = 0.226\%;$$

$$\delta C_{44} = 0.046 \text{ GPa}, \frac{\delta C_{44}}{C_{44}} = 0.164\%$$

误差分析表明,该系统具有较高的测量精度,所测铝样品的二阶弹性常数的测量误差均小于 0.3%,能满足工程及科学研究允许误差的要求。

## 6 结 论

在克里斯托费尔弹性理论上,提出了一套利用精确测量激光激发的多种模态的超声波速进而测定各向同性材料密度和二阶弹性常数的实验系统和方法。利用 Nd:YAG 激光器在样品表面激发 3 种模态的超声波,采用自行设计的 PZT 传感器探测沿表面传播的声表面波及由样品底部反射回的纵波和横波信号,通过精密电控平移台移动光源扫描激发点与探测点之间的距离,由 PZT 传感器探测到一系列的声波脉冲信号,并用波形相关算法计算时间延迟,与波形传播距离拟合求得声表面波波速  $V_R$ ,同时根据反射回的纵波和横波的传播时间  $t_L$  和  $t_S$ ,分别计算得  $V_L$  和  $V_S$ 。然后根据克里斯托费尔理论和瑞利方程便可求得材料的密度和二阶弹性常数  $C_{11}$  和  $C_{44}$ ,该结果和现有文献中的响应值吻合得很好,同时通过误差分析也体现了该方法具有较高的测量精度,为高精度的材料定量无损检测提供了依据。

**致谢** 对俄罗斯国家科学院通用物理研究所 Alexey Lomonosov 先生在传感器研制和实验过程中提供的帮助和宝贵意见表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Xiao. Laser ultrasonic measurement system based on wireless communication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 203~207  
陈晓. 基于无线通信的激光超声测量系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 203~207
- 2 Song Guorong, He Cunfu, Huang Yao *et al.*. On the measurement of the elastic constants of small-size samples by ultrasonic method [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2007, **15**(2): 226~234  
宋国荣, 何存富, 黄 垚 等. 小试件材料弹性常数超声测量方法的研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2007, **15**(2): 226~234

- 3 Shi Wenqing, Yang Yongqiang, Guo Wei *et al.*. Effects of laser pulse frequency and scanning mode on welding quality in soldering by fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 494~497  
师文庆, 杨永强, 郭 炜 等. 脉冲频率及扫描方式对光纤激光软钎焊的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 494~497
- 4 Shi Yifei, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu *et al.*. Welding stress measurement using laser-generated Rayleigh waves in aluminum alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1627~1631  
石一飞, 沈中华, 倪晓武 等. 激光激发瑞利波测量铝合金焊接残余应力[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1627~1631
- 5 R. N. Thurston, K. Brugger. Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media[J]. *Phys. Review*, 1964, **133**(6A): 1604~1610
- 6 W. W. Wilcox, C. Calder. Materials testing using laser energy deposition[J]. *Instrumentation Technology*, 1978, **25**: 63~68
- 7 L. F. Bresse, D. A. Hutchins, K. Lundgren. Elastic constant determination using generation by pulsed lasers[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, **84**(5): 1751~1757
- 8 C. B. Scruby, B. C. Moss. Non-contact ultrasonic measurements on steel at elevated temperature[J]. *NDT&E International*, 1993, **26**(4): 177~188
- 9 He Cunfu. Laser Ultrasonic Techniques and Applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995. 82~85  
何存富. 激光超声技术及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 1995. 82~85
- 10 Zhou Xingeng, He Cunfu. Laser ultrasonic techniques for non-destructive testing [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, **11**(4): 434~441  
周辛庚, 何存富. 激光超声无损检测[J]. *实验力学*, 1996, **11**(4): 434~441
- 11 D. J. Dunstan, S. H. B. Bosher, J. R. Downes. Effective thermodynamic elastic constants under finite deformation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(15): 2672~2674
- 12 M. H. Nadal, C. Hubert, R. Oltra. High temperature shear modulus determination using a laser-ultrasonic surface acoustic-wave device[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(2): 024904
- 13 R. Ramji Rao, A. Padmaja. The effective second-order elastic constants of a strained crystal using the elastic wave propagation in a homogeneously deformed material[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **63**(12): 5928~5932
- 14 David S. Kupperman, Karl J. Reimann. Ultrasonic wave propagation and anisotropy in austenitic stainless steel weld metal [J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1980, **SU-27**(1): 7~15
- 15 T. Pramila, A. Shukla, N. N. Kishore *et al.*. Determination of elastic constants of aluminium using laser based ultrasonics[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2009, **2**(12): 25~28
- 16 Zuliang Yu, Siegfried Boseck. Propagation of surface waves in deformed, anisotropic thin layered solids [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2002, **18**(2): 51~73