

金属箔材弹性常数的激光超声测量方法

陈龙¹, 刘星¹, 詹超², 李阳^{1*}

¹郑州大学机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001;

²广东省特种设备检测研究院珠海检测院, 广东 珠海 519002

摘要 弹性常数是描述金属箔材力学性能的重要参数。为了准确地测量出金属箔材的弹性常数,提出了一种基于激光超声技术的无损检测方法。首先,采用数值方法求解弹性模量计算的逆问题;然后,采用直接耦合的有限元方法,分别计算了脉冲激光在 20 μm 厚的镁锂合金、304 不锈钢以及 6061 铝合金三种箔材上激励出的超声场,将模拟得到的兰姆波速度代入数值计算程序,得到了弹性模量及泊松比的计算值,并将该计算值与有限元模型设定值进行对比;最后,结合铝合金箔材的实验测量,验证了数值求解逆问题方法的有效性。结果表明:利用所提出的数值计算方法可精确地得到箔材的弹性模量及泊松比。所得结果为进一步使用弹性常数描述金属箔材的力学性能提供了参考。

关键词 测量; 激光超声; 有限元方法; 弹性常数; 兰姆波

中图分类号 TH142

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1104003

Measurement of Elastic Constants of Metal Foils by Laser Ultrasonic Method

Chen Long¹, Liu Xing¹, Zhan Chao², Li Yang^{1*}

¹School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

²Zhuhai Branch, Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Zhuhai, Guangdong 519002, China

Abstract Elastic constants are important parameters to describe the mechanical properties of metal foils. To accurately measure the elastic constants of metal foils, a nondestructive testing method is proposed based on laser ultrasonic technology. First, the inverse problem of elastic modulus calculation is solved numerically. Second, the ultrasonic fields excited by a pulse laser on 20 μm thick foils of Mg-Li alloy, 304 stainless steel and 6061 aluminum alloy are calculated by the direct coupling finite element method. The simulated Lamb wave speed is brought into the numerical calculation program to get the calculation values of elastic modulus and Poisson's ratio which are subsequently compared with the model specifications. Finally, the effectiveness of the numerical method for inverse problems is verified by the experimental measurement of aluminum alloy foils. The results show that the elastic modulus and Poisson's ratio of foils can be accurately obtained by the numerical method. These results provide a certain reference for evaluating the mechanical properties of metal foils through the measurement of elastic constants.

Key words measurement; laser ultrasonic; finite element method; elastic constants; Lamb wave

OCIS codes 120.4290; 310.6860; 160.3900

1 引 言

随着制造技术的发展与完善,航空航天、仪器仪表和电池等对金属箔材的需求不断增加,各种金属及合金箔材的品种也日益增多。弹性模量是箔材重

要的性能参数之一,代表了其力学性能的综合情况。在损伤力学中,弹性模量与金属蠕变和疲劳损伤均有十分重要的关系^[1],材料的弹性模量可表征材料的蠕变及疲劳损伤状态^[2-3],进而有利于精确预估零件寿命。

收稿日期: 2020-05-09; **修回日期:** 2020-05-09; **录用日期:** 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51705470,51801185)、河南省重点研发与推广专项(182102210009)、河南省高等学校重点科研项目(18A460032)、广东省特检院 2017 年度院级立项科技项目(2017CY07)

* **E-mail:** yangli@zzu.edu.cn

金属箔材是块体材料经过不同程度的轧制得到的。金属箔材会在不同轧制方向上形成织构组织,因此不同方向上的弹性模量存在差异。另外,由于晶粒尺寸的变化,箔材的弹性模量与块体金属存在一定的差异^[4-5]。当前使用力学方法测试箔材的弹性模量存在一定的困难,而激光超声法因具有非接触、无损伤、优异的环境适应性以及高精度等优点而得到重视,已有大量学者使用激光超声法实现了对板材(采用表面波和纵波检测)及箔材(采用兰姆波检测)弹性模量的测量。

当板材厚度较大时,脉冲激光激励出的超声波存在表面波、纵波和横波等模态,因此可基于表面波和纵波与弹性常数的关系来计算板材弹性常数。如:战宇等^[6]利用修正高斯分布力源等效载荷对板材样品的脉冲作用产生超声波,依据表面波与纵波波速得到弹性常数,其获得的弹性模量误差值为2.1%。李茜茜等^[7]通过激光超声实验获得了金属板的表面波和纵波波速,根据固体力学理论得到了弹性常数,其结果和理论值误差在3%以内。董利明等^[8]通过激光激发多种模态的超声波,精确测量了材料密度及二阶弹性(SOE)常数,对材料密度和二阶弹性常数的测量具有较高的测量精度。但是,随着板材厚度的减小,脉冲激光激励出的超声波模态将发生变化,当厚度减小到一定值时,板中仅存在兰姆波模态^[9]。

根据薄板中兰姆波模态和弹性常数的关系,可利用兰姆波来计算箔材的弹性常数。Hayashia等^[10]根据兰姆波 A0 模态的波速和群速度色散,估计了材料厚度和声弹性模量,对于厚度小于 30 μm 的不锈钢箔,其弹性模量测量误差小于 6.8%。Ponschab 等^[11]使用高阶模态的兰姆波研究了各向同性板的材料常数和厚度特性,对兰姆波频散曲线的数值模型进行了逆优化。Spicer 等^[12]通过有限元模拟,获得了兰姆波在板中的传播速度,通过调整模拟参数逐步反演得到近似的材料参数,但该方法运算速度慢,精度不高。Sale 等^[13]以力源载荷的形式从多角度模拟了兰姆波 S0 及 A0 模态,并结合实验,使用半解析有限元法(semi-analytical finite element,SAFE)较精确地计算了弹性模量及剪切模量,但其加载形式较为复杂,且计算量较大。沈中华等^[14]用有限元方法数值模拟了激光热弹机制下在单层和双层材料中激发的超声波。曹豆豆等^[15]研究了激光超声有限元模拟的温度场,并采用环状激光光源激励出了具有单一 A0 模态的兰姆波。此类研

究为激光超声模拟提供了有效的方法。目前对金属箔材弹性常数的表征存在精度不高、计算量大且需要提前设置接近误差的猜想值等问题。

本文运用有限元方法,将高斯分布的脉冲激光源加载于二维模型,通过分析拾取点的时域信号,得到兰姆波波形及其传播速度,进而使用二分法及穷举法快速计算得到弹性模量。使用同样的方法计算 304 钢以及 6061 铝材,所得结果均与设定值吻合较好。铝合金箔材的激光超声测量实验验证了这一数值方法,为金属箔材弹性模量及泊松比的测定提供了数值计算及实验依据。

2 数值求解兰姆波在箔材中的传播特性的逆问题

2.1 理论求解兰姆波在箔材中的传播特性的正问题

由于金属箔材的厚度远小于激光超声所激励的波长,因此脉冲激光激励出的超声波在箔材中不是表面波、纵波或横波,而是兰姆波。兰姆波的频散曲线表征了不同模态兰姆波在不同频率下的群速度或相速度。通过兰姆波的频散曲线,可以清楚地分辨出板中各种模态兰姆波的传播特性^[16]。

兰姆波的传播过程需满足波动方程和边界条件,根据兰姆波的波结构,兰姆波分为对称(S)和反对称(A)两种模态^[17]。

对称模态的频散方程为

$$\frac{\tan k_{os}b}{\tan k_{ol}b} = -\frac{4k_o^2 k_{ol} k_{os}}{(k_o^2 - k_{os}^2)^2}, \quad (1)$$

反对称模态的频散方程为

$$\frac{\tan k_{os}b}{\tan k_{ol}b} = -\frac{(k_o^2 - k_{os}^2)^2}{4k_o^2 k_{ol} k_{os}}, \quad (2)$$

其中

$$k_{ol}^2 = \omega^2 / C_l^2 - k_o^2, \quad (3)$$

$$k_{os}^2 = \omega^2 / C_t^2 - k_o^2, \quad (4)$$

式中:沿着板水平方向的波数 $k_o = \frac{\omega}{C_p}$, ω 为角频率, C_p 为兰姆波相速度, $C_p = (\omega/2\pi)\lambda$, λ 为波长; b 为 1/2 板厚; C_l 为纵波速度(常数); C_t 为横波速度(常数)。

频散方程包含超越方程,无法获得精确的解析解,只能通过数值计算进行求解。频散方程包含了 6 个参数:密度、板厚、弹性模量、泊松比、频率和群速度(相速度)。当需要求解频率和群速度(相速度)的关系时,需要给出其他参数的数值。表 1 给出了

镁锂合金、304 钢以及 6061 铝的材料参数。以 20 μm 厚的镁锂合金箔材为例,根据数据计算绘制

其频散曲线,如图 1 所示,其中 f 为频率, h 为板厚, $A_0\sim A_3$ 为反对称模式, $S_0\sim S_3$ 为对称模式。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	Specific heat capacity / [$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$]	Thermal conductivity / [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$]	Coefficient of thermal expansion /($10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
Mg-Li alloy	1480	40	0.32	449	80	21.8
304 steel	8000	193	0.29	500	16.3	17.6
6061 aluminum	2700	70	0.33	900	238	23

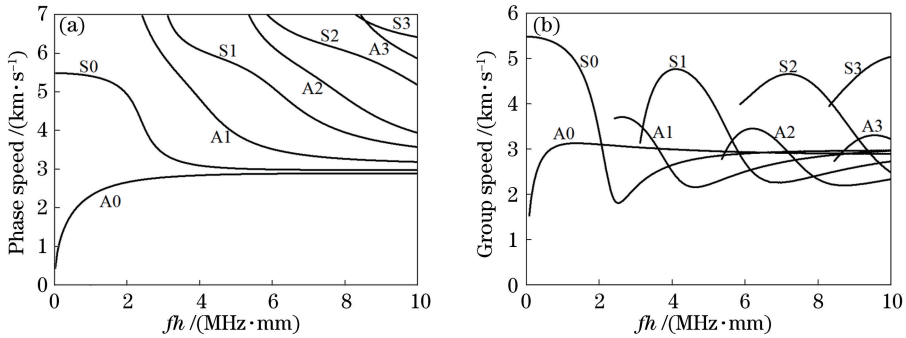


图 1 厚度为 20 μm 的镁锂合金箔材中的兰姆波频散曲线。(a)相速度;(b)群速度

Fig. 1 Lamb wave dispersion curves in 20 μm thick Mg-Li alloy. (a) Phase speed; (b) group speed

从图 1 中可以清楚地看出各模式兰姆波在不同频厚积下的传播速度。由于箔材厚度为 20 μm ,且激励出的兰姆波频率有限,因此箔材中只存在兰姆波 S_0 和 A_0 模式。并且,低频厚积下的兰姆波 S_0 模式频散较小或无频散。通过求解兰姆波的频散方程,得到频率和速度关系,这在波动力学中属于正问题求解。但是本文涉及的问题为利用兰姆波速度来求解箔材的弹性模量和泊松比,这属于逆问题求解。由于逆问题的求解过程具有不稳定性,因此求解结果会存在多解、无解和结果误差较大等问题。为了避免直接求解逆问题,本文采用数值求解逆问题,用二分法和穷举法的混合运算精确求解实验值。

2.2 数值求解兰姆波在箔材中传播特性的逆问题

以厚度为 20 μm 的镁锂合金为例,取频率为 1 MHz,频厚积即为 0.02 $\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 。当弹性模量变化 $\pm 5\%$,即弹性模量变化范围为 38~42 GPa 时,将其代入正问题求解程序计算出兰姆波 S_0 模式的群速度变化为 5349~5623 m/s,最大群速度与最小群速度的差值为 274 m/s;当泊松比变化 $\pm 5\%$,即泊松比变化范围为 0.304~0.336 时,将其代入正问题求解程序计算出兰姆波 S_0 模式的群速度变化为 5457~5519 m/s,最大群速度与最小群速度的差值为 62 m/s。前者差值是后者差值的 4.4 倍,由此可知泊松比对群速度的影响较小^[18]。泊松比变化引

起的 S_0 、 A_0 速度的变化如表 2 所示,可知泊松比的变化使得 S_0 有更好的区分度,且速度变化均匀。综合考虑,本文将通过二分法与穷举法混合计算来进行弹性常数逆问题的求解,具体流程如图 2 所示。

表 2 弹性模量为 40 GPa 时不同泊松比下镁锂合金箔材 S_0 、 A_0 模式的群速度

Table 2 Group speeds of S_0 and A_0 modes in Mg-Li alloy foils under different Poisson's ratios when elastic modulus is 40 GPa

Poisson's ratio	Group speed of S_0 mode /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Group speed of A_0 mode /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0.304	5457	1557
0.315	5478	1559
0.326	5499	1561
0.336	5519	1563

首先利用二分法缩小弹性模量求解区间。参考与被测件相近的材料,取一初始泊松比初值 ϵ_1 ,同时设定弹性模量较大的求解区间 $[a, b]$,取其中值 $D = \frac{a+b}{2}$ 并代入频散方程,求解得到一个群速度 C_g ,与模拟获得的群速度值进行比较,当差值 Δ 大于 20 m/s(具体值可调整)时,再次取中值进行求解直至差值小于 20 m/s,此时获得了缩小的弹性模量求解区间。然后通过穷举法进行精确求解。新设置泊松比求解区间 $[c, d]$,结合计算获得的缩小的弹性模量区间,使用穷举法进行逐次运算以获得精确

的求解值,当穷举计算的群速度与模拟值的差值小于 1 m/s 时即停止运算,此时的弹性模量与泊松比即为所求。此方法在不确定材料弹性模量范围时,仍能快速准确计算(如直接设置弹性模量求解区间

为 20~300 GPa,该区间包含几乎所有的金属材料)。相较于单一穷举法,计算次数较少,且适应材料范围更广。下文将分别通过有限元模拟及实验来证明该计算方法的有效性。

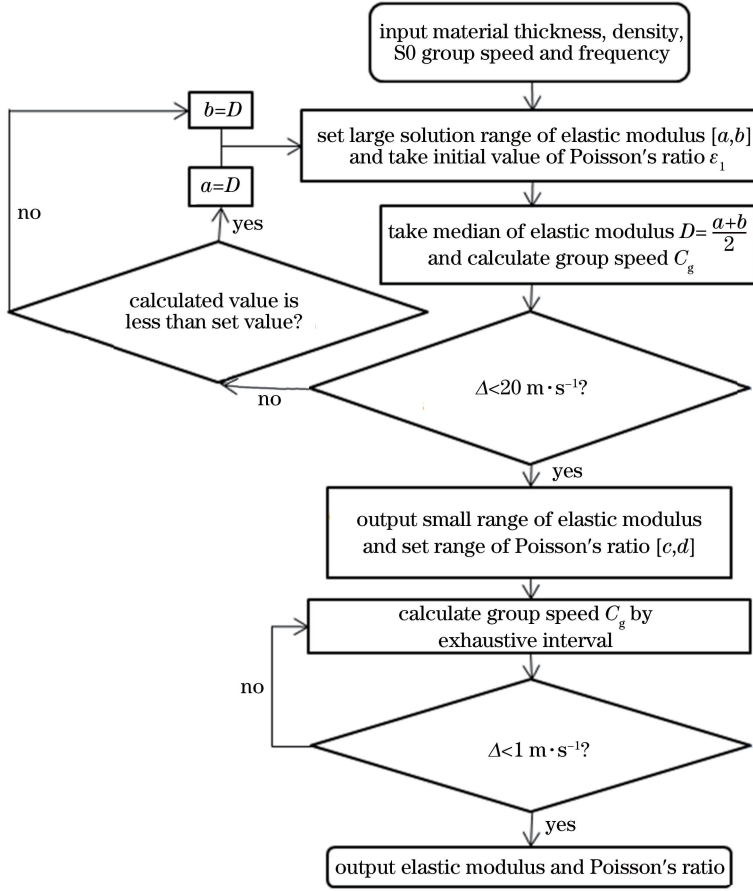


图 2 混合算法的计算流程

Fig. 2 Calculation flow chart of mixed calculation method

3 有限元模拟兰姆波测量箔材弹性常数

3.1 激光超声有限元模拟的理论基础

目前,有限元模拟激光超声的加载方式主要有两种:集中力源载荷与热流载荷^[19]。使用集中力源载荷不考虑热扩散效应,此种模型将不会激发前驱小波^[20],有一定局限性。本文主要采用热流载荷加载,将激光超声视为力热瞬态耦合问题,并利用直接耦合方法进行求解。对三种材料进行模拟,提取出兰姆波速度后将其代入逆问题求解程序中得到弹性模量,以验证逆问题求解算法的有效性。

激光超声只在试样的上表面施加载荷,对于有限元模型而言,模型的下表面以及侧面都没有加载,因此模型的下表面以及侧面符合绝热条件。初始温度为室温,在模型的上表面施加热通量,当模型边界满足绝热条件时,有

$$\mathbf{n} \cdot [k' \nabla T(x, y, t)] = 0, \quad (5)$$

式中: \mathbf{n} 为垂直于模型表面的单位向量; $T(x, y, t)$ 为 t 时刻 (x, y) 处的温度场; k' 为热扩散系数。在加载激光时,设置模型上表面的热通量为

$$-k'_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = A(T) I_0 f(x) g(t), \quad (6)$$

式中: k'_y 为 y 方向的热扩散系数; $A(T)$ 为材料表面吸收率; I_0 为入射激光的最大功率密度; 时间分布函数 $g(t)$ 和空间分布函数 $f(x)$ 分别为

$$f(x) = 3 \exp\left(-2 \frac{X^2}{R_0^2}\right), \quad (7)$$

$$g(t) = \frac{3t}{t_0} \exp\left(-\frac{2t}{t_0}\right), \quad (8)$$

式中: X 为激光作用点的坐标; R_0 为脉冲激光的光斑半径; t_0 为脉冲激光的上升时间。

模型的初始位移为

$$U(x, y, t) = \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (9)$$

模型的边界满足自由边界条件:

$$\mathbf{n} \cdot [\boldsymbol{\sigma} - (3\lambda_1 + 2\mu)\alpha_T \nabla T(x, y, t)\mathbf{I}] = 0, \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; \mathbf{I} 为单位张量; λ_1 和 μ 为 Lamé 常数; α_T 为样品热膨胀系数。

在有限元分析中, 在确保模型计算结果的求解精密度下, 一般选取 20 倍最大频率(f_{\max})的倒数作为时间步长 t_{step} :

$$t_{\text{step}} = \frac{1}{20f_{\max}}. \quad (11)$$

基于上述理论, 设置激光功率密度为 8 MW/mm^2 , 光源半径为 0.15 mm , 激光脉冲上升时间为 10 ns 。定义模型大小为 $30 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$, 材料参数设定如表 1 所示。管材模型划分的网格大小为 $2 \mu\text{m}$, 且使用直接耦合单元 plane 13 进行网格划分。脉冲激光载荷以热流形式作用于上表面距左端 5 mm 处, 模型示意图如图 3 所示。求解步长为 2.5 ns , 求解时长为 $10 \mu\text{s}$ 。结果取点区间为距加载中心右侧 $6 \sim 24 \text{ mm}$, 间隔为 0.2 mm 。

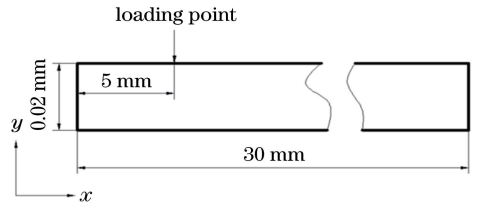


图 3 激光超声有限元模型示意图

Fig. 3 Schematic of finite element model of laser ultrasonic

3.2 数据处理

$20 \mu\text{m}$ 厚的镁锂合金上表面与加载中心相距 12.1 mm 时的时域波形曲线及 S_0 模态的一维傅里叶变换曲线如图 4 所示。从图 4 中可看出: 兰姆波 S_0 模态与 A_0 模态已完全分离开; $2S_0$ 为左侧边界反射回波。由于 $2S_0$ 在左侧边界发生 180° 的相位变化, 因此 $2S_0$ 和直接接收到的 S_0 信号呈反相位。由于 S_0 模态在低频下的频散较小或无频散, 因此 S_0 和 $2S_0$ 的波包大小无差异; 而 A_0 模态在低频下的频散较大, 因此经过一定距离传播后 A_0 模态的波包将会发散。另外, 从图 4(b) 中可知: 激励出的 S_0 模态有较宽的频带范围, 利用 6 dB 法可得频带范围为 $0 \sim 11.7 \text{ MHz}$, 但 S_0 模态的大部分能量集中在低频范围内。为了更清晰地看出 S_0 和 A_0 模态的传播特性, 我们提取了兰姆波的 B 扫图。

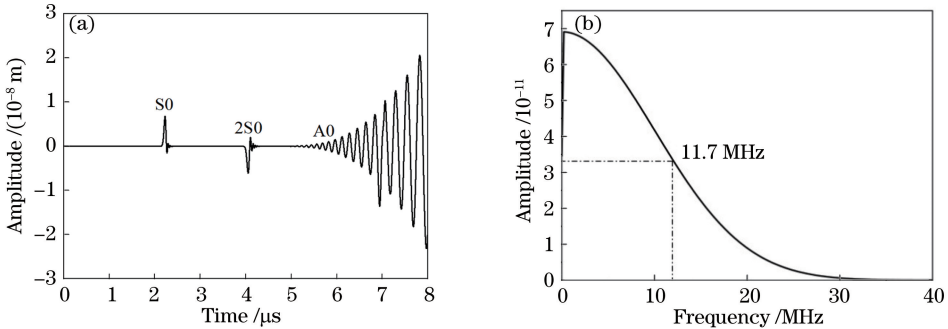


图 4 表面与加载中心相距 12.1 mm 时的超声波时域曲线及频谱图。(a) 超声波时域曲线; (b) S_0 模态的频谱图
Fig. 4 Time-domain curve and spectrum of ultrasonic wave received at 12.1 mm from surface to loading center.

(a) Time-domain curve of ultrasonic wave; (b) spectrum of S_0 mode

在距离激励点 $6 \sim 24 \text{ mm}$ 处, 间隔 0.2 mm 取一个点的采集信号, 共取 90 个点的采集信号, 得到兰姆波的 B 扫图, 如图 5 所示。从图 5 中可以清晰地分辨出 S_0 和 A_0 模态, 对应于时域图, $2S_0$ 为左侧界面反射波, $3S_0$ 为 S_0 在右侧界面反射后的反射波, $4S_0$ 为 $2S_0$ 在右侧界面反射后反射波。由 B 扫图可知: S_0 模态兰姆波的波包几乎没有发生变化, 因此可说明 S_0 模态几乎不发生频散现象; 而 A_0 模态兰姆波随着传播距离的增加, 其波包宽度迅速变大, 说明 A_0 模态频散严重。

利用二维傅里叶变换将信号从时间-空间域变换到波数-频率域, 并进行兰姆波模态的分离。根据公式, 对于沿特定方向 x 方向传播的信号 $\mu(t, x)$, 经过二维傅里叶变换后, 可得到信号在波数-频率域的信息。

$$U(\omega, k_o) = \mathcal{F}_{2D}[\mu(t, x)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t, x) \exp[-j(\omega t - k_o x)] dt dx, \quad (12)$$

式中: $U(\omega, k_o)$ 为变换后的频率-波数谱; $\mathcal{F}_{2D}(\cdot)$ 为二维傅里叶变换。

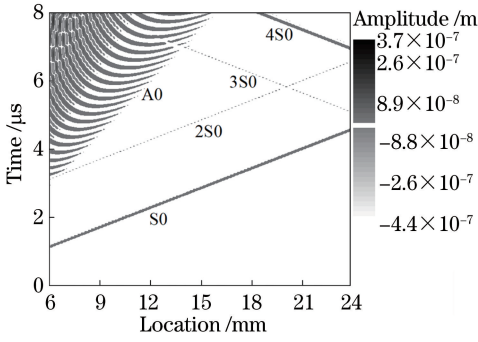


图 5 镁锂合金箔材兰姆波的 B 扫图

Fig. 5 B sweep diagram of Lamb wave in Mg-Li alloy foil

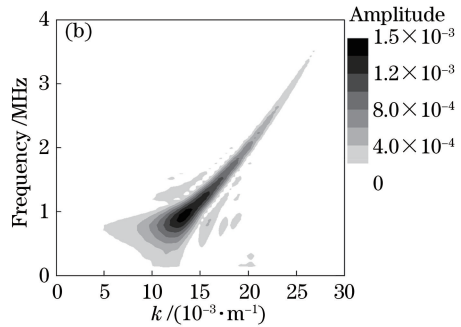
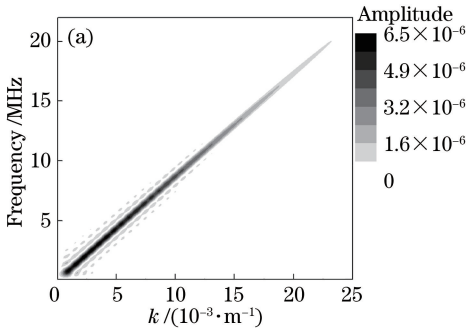


图 6 二维傅里叶变换后的结果。(a) S0 模式；(b) A0 模式

Fig. 6 Results of two-dimensional Fourier transform. (a) S0 mode; (b) A0 mode

以 20 μm 厚的镁锂合金为例,理论计算得到的不同频率下的兰姆波 S0 模式的相速度如表 3 所示。从表 3 中可知:兰姆波 S0 模式在频率为 1 MHz 时速度为 5487.7 m/s,频率为 3 MHz 时相速度为 5486.9 m/s,相速度差为 0.8 m/s,说明兰姆波 S0 模式在较低频率下的频散较小。

表 3 不同频率下兰姆波 S0 模式的相速度

Table 3 Phase speeds of Lamb wave S0 modes at different frequencies

Frequency /MHz	1	2	3
Phase speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5487.7	5487.4	5486.9

为了减小高频的影响,选择中心频率为 1 MHz、带宽为 1 MHz 的滤波器处理信号,那么距激发点 6.1,9.1,12.1 mm 三个位置上的 S0 信号波形如图 7 所示。为了避免干扰,这里利用互相关算法对信号进行处理,得到两个互不影响的信号间的函数。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T' \rightarrow T} \frac{1}{T'} \int_0^{T'} x(t)y(t+\tau)dt, \quad (13)$$

式中: $R_{xy}(\tau)$ 为互相关函数; τ 为时间延迟; T' 为信号长度; $x(t)$ 和 $y(t)$ 为信号。

由计算结果可知,三个数据点之间的延时为 5.5×10^{-7} s,由此计算获得 S0 群速度为 5467.0 m/s。用同样的方法处理其他材料,得到的

对提取的镁锂合金 S0、A0 模式作二维傅里叶变换,结果如图 6 所示。横坐标为波数 k ,波数由 $k = \frac{2\pi f}{v_p}$ 计算得到,其中 f 为频率, v_p 为相速度。由图 6 可知:A0 模式信号强度远高于 S0,这是由于 S0 模式的离面位移远小于面内位移^[21];A0 模式频率主要集中于 0~3.5 MHz,0.82 MHz 处的能量最强;S0 模式呈线性分布,表明其不同频率下的传播速度相同,证明该模式的频散较小或无频散,其频率范围较宽,最高频率可达 20 MHz;A0 模式大致呈抛物线分布,说明该模式有较严重的频散现象。

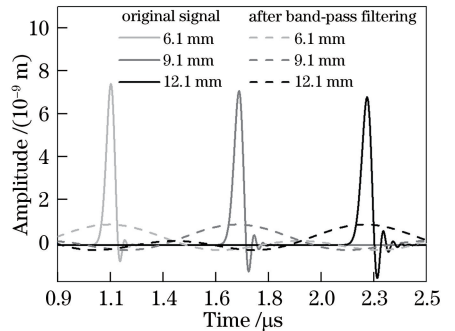


图 7 不同取点处 S0 原始数据及带通滤波后的时域波形
Fig. 7 Time-domain waveforms for S0 original data or after band-pass filtering at different points

数据如表 4 所示。将数据代入上文所述的混合计算方法的 MATLAB 程序中,即可计算出材料的弹性模量及泊松比。

通过有限元计算得到兰姆波 S0 模式在镁锂合金、304 钢和 6061 铝合金箔材上的群速度,将所得数据代入用于逆求解的混合计算方法中,计算得到的弹性模量和泊松比及其相较于模拟设定值的误差如表 5 所示,设定弹性模量区间差值均为 70 GPa,泊松比区间差值为 0.03。从表 5 可知,相较于设定值,三种材料的误差均较小,弹性模量误差值在 0.4% 以内,泊松比误差值在 2.4% 以内,该方法对

弹性模量及泊松比的表征有较高的精度。综合计算数据可知,混合计算方法很好地实现了三种材料弹性模量和泊松比的表征,数值结果与设定值吻合良

好,证明此方法对弹性模量测量有效。另外,三种材料的弹性模量范围为 40~193 GPa,证明此方法有较高的普适性。

表 4 模拟获得的参数

Table 4 Parameters obtained by simulation

Material	Coupling mode	Foil thickness / μm	Density of foil / ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Group speed of S0 mode /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Frequency of S0 mode /MHz
Mg-Li alloy	Direct coupling	20	1480	5467.0	1
304 steel	Direct coupling	20	8000	5128.2	1
6061 aluminum	Direct coupling	20	2700	5381.1	1

表 5 计算获得的材料参数及误差

Table 5 Calculated material parameters and errors

Material	Calculated elastic modulus /GPa	Error for elastic modulus /%	Calculated Poisson's ratio	Error for Poisson's ratio /%
Mg-Li alloy	39.84	-0.40	0.315	-1.56
304 steel	193.05	0.03	0.287	-1.03
6061 aluminum	70.08	0.13	0.322	2.42

4 实 验

4.1 实验参数

为了验证数值求解的正确性,采用铝箔进行了相关实验。图 8 显示了铝箔上的激发点和测量点。激光脉冲能量设定为 1 mJ,焦斑直径约为 200 μm ,其能量密度低于烧蚀阈值,因此产生了激光热弹效应^[22]。铝箔为 20 μm 厚的方形箔材(尺寸为 100 mm \times 100 mm),其被均匀并自由地放置在扫描台上,铝箔上下边界视为无应力。测量区域是一条长度为 15 mm 的线,距离激发点 5 mm,扫描间隔为 0.25 mm,在整个测量中共采集 60 个点。超声波接收器采用 Quartet-FH 系列激光超声干涉仪,其参数为:波长 532 nm,检测频率 1~20 MHz,光斑直径 100~500 μm ^[23]。采样频率为 500 MHz,采样点数为 1024 个。

4.2 数据处理

距激发点 5 mm 处接收到的兰姆波离面位移如图 9(a)所示。由于脉冲激光激发的兰姆波的频厚积较小,铝箔中只存在两种模态,即 S0 及 A0 模态。通过 Lamb 波的频散曲线进行了验证。另外,由于 S0 的群速度大于 A0,因此在时域中 S0 模态出现在 A0 模态之前。此外,由于测量表面上 S0 的离面位移非常小,因此 S0 模态的振幅远小于 A0 模态。图 9(b)显示,快速傅里叶变换(FFT)后 S0 模具有宽的频域,最大值分别出现在 1, 2.38, 4.38 MHz 处。

为了降低测量不确定度,对于距离激发点 5 mm 和 10 mm 处接收到的两个脉冲,采用互相关算法确定二者之间的延迟时间,如图 10(a)所示。图 10(b)显示了两个脉冲的互相关结果,延迟时间为 0.94 μs 。因此,S0 模态的群速度是 5319 m/s。

用螺旋测微计测量箔材的厚度,测微计的精度为 1 μm ,5 次不同位置测厚结果的平均值为 20 μm ,用测量质量除以估算体积来估算箔材密度,并得到了铝箔的四个参数:群速度 5319 m/s,中心频率 1 MHz,厚度 20 μm ,密度 2700 kg/m^3 。通过所提出的混合计算法,得到弹性模量为 67.6 GPa 和泊松比为 0.339。弹性模量和泊松比的参考值分别为 69 GPa 和 0.33,其误差值分别为 2.0% 和 2.7%。激光超声测得的弹性模量和泊松比与参考值均吻合良好,因此,激光超声法可用于测试铝箔的弹性模量和泊松比。

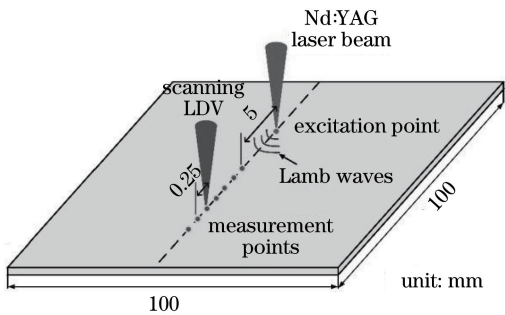


图 8 铝箔上的激发点和测量点示意图

Fig. 8 Schematic of excitation point and measurement points on aluminum foil

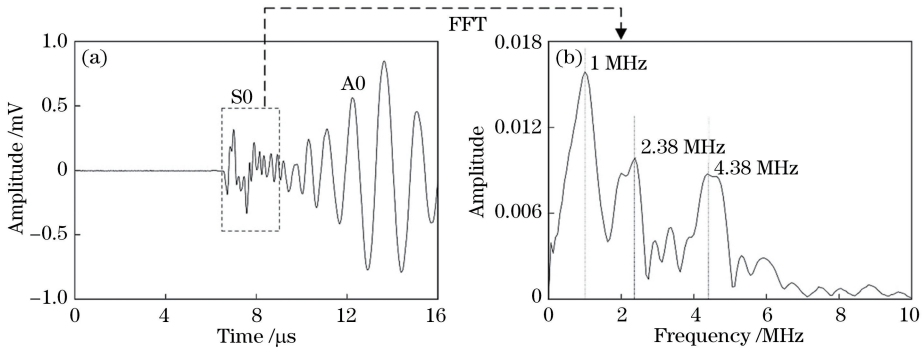


图 9 距激发点 5 mm 处接收到的信号。(a) 超声波时域曲线; (b) S0 一维傅里叶变换曲线

Fig. 9 Signals received at 5 mm away from excitation point. (a) Time-domain curve of ultrasonic wave; (b) one-dimensional Fourier transformation curve of S0

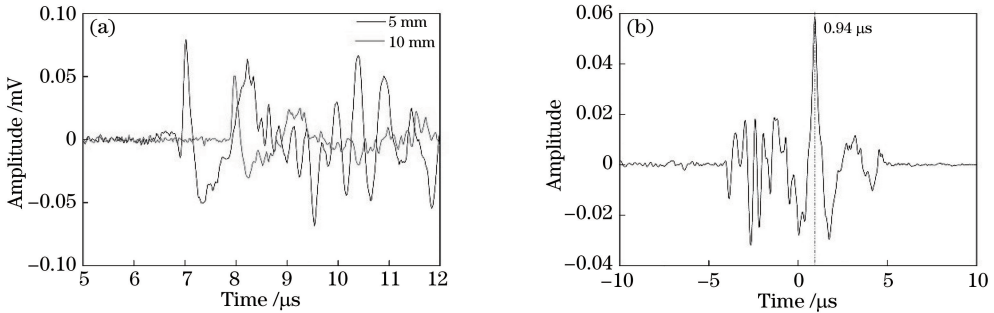


图 10 距离激发点 5 mm 和 10 mm 处接收到的时域信号及信号延迟。(a) 时域信号; (b) 延迟时间

Fig. 10 Time-domain signal received at 5 mm and 10 mm from excitation point and signal delay. (a) Time-domain signals; (b) delay time

5 结 论

提出了一种弹性模量及泊松比的激光超声快速测量方法。为了验证该数值方法的正确性,采用直接耦合的有限元方法对三种金属箔材进行了模拟,并进行了相关实验,结论如下。

1) 在数值计算中,弹性模量的计算精度在 0.4% 以内,泊松比误差达到 2.4%。实验结果显示,弹性模量及泊松比的误差均在 3% 以内,证明所提出的二分法和穷举法的混合计算方法可解决箔材弹性常数求解的逆问题。

2) 实现了弹性模量范围为 40~193 GPa 的三种材料的参数模拟测量,证明了该混合计算方法的普适性,为进一步使用弹性模量描述金属材料的力学性能提供了数据支撑。

参 考 文 献

[1] Li S M. Mechanical fatigue and reliability design [M]. Beijing: Science Press, 2006.
李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
[2] Zhang G D, Su B, Wang H, et al. Effect of elastic

modulus on low cycle fatigue performance parameters [J]. Journal of Aeronautical power, 2005, 20(5): 768-771.
张国栋, 苏彬, 王泓, 等. 弹性模量对低周疲劳性能参数的影响[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 768-771.
[3] Wang Y F, Wu X Y, Pan Z Y, et al. Effect of elastic modulus on the VIV-induced fatigue damage in deep sea risers [J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(6): 867-878.
王一飞, 吴晓源, 潘志远, 等. 弹性模量对深海立管涡激振动疲劳损伤的影响[J]. 船舶力学, 2007, 11(6): 867-878.
[4] Meng B, Wang W H, Zhang Y Y, et al. Size effect on plastic anisotropy in microscale deformation of metal foil [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 46-61.
[5] Shimizu T, Ogawa M, Yang M, et al. Plastic anisotropy of ultra-thin rolled phosphor bronze foils and its thickness strain evolution in micro-deep drawing [J]. Materials & Design, 2014, 56: 604-612.
[6] Zhan Y, Xue J C, Liu C S. Numerical simulation of laser ultrasonic elastic constant measurement based on Abaqus [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42

- (5): 0508002.
战宇, 薛俊川, 刘常升. 激光超声测量弹性常数的 Abaqus 数值模拟 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508002.
- [7] Li X X, Zhao J F, Pan Y D. On the measurement method of material constants based on laser ultrasonic field testing system [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3): 352-360.
李茜茜, 赵金峰, 潘永东. 基于激光超声场检测的材料常数测量方法 [J]. 实验力学, 2016, 31(3): 352-360.
- [8] Dong L M, Ni C Y, Shen Z H, et al. Determination of elastic constants of materials based on the velocity measurement of laser-generated multi-mode ultrasound [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0408004.
董利明, 倪辰荫, 沈中华, 等. 基于激光激发多模态超声波速测量的材料弹性常数测定 [J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408004.
- [9] Shi J M, Zheng D, Pan W, et al. Research on FBG ultrasonic sensor based on coupling cone structure and its nondestructive testing [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206004.
史镜名, 郑狄, 潘炜, 等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206004.
- [10] Hayashi Y, Ogawa S, Cho H, et al. Non-contact estimation of thickness and elastic properties of metallic foils by laser-generated Lamb waves [J]. NDT & E International, 1999, 32(1): 21-27.
- [11] Ponschab M, Kiefer D A, Rupitsch S J. Simulation-based characterization of mechanical parameters and thickness of homogeneous plates using guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(12): 1898-1905.
- [12] Spicer J B, McKie A D W, Wagner J W. Quantitative theory for laser ultrasonic waves in a thin plate [J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(18): 1882-1884.
- [13] Sale M, Rizzo P, Marzani A. Semi-analytical formulation for the guided waves-based reconstruction of elastic moduli [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2241-2256.
- [14] Shen Z H, Xu B Q, Ni X W, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. Chinese Journal of 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.
- [15] Cao D D, Wang K S, Yan Y N. Simulation of laser-generated single-mode lamb wave by finite element method [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(4): 483-487.
曹豆豆, 王开圣, 杨雁南. 激光激发单模兰姆波的有限元模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(4): 483-487.
- [16] Han X H, Li Y, Zhou Q X, et al. Interference of lamb waves at overlap joints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 87-93.
韩晓辉, 李阳, 周庆祥, 等. 兰姆波在搭接焊缝上的干涉 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 87-93.
- [17] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb waves: Physical theory and applications [M]. New York: Plenum Press, 1967.
- [18] Xu W, Shen Z H, Ni C Y, et al. The influence of temperature on the Lamb wave of zero group velocity in thin plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202005.
许薇, 沈中华, 倪辰荫, 等. 温度对薄板中零群速度 Lamb 波的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202005.
- [19] Zhan Y, Liu C S, Xue J C. Simulation of laser ultrasonic detection micro crack by equivalent load method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 64-68.
战宇, 刘常升, 薛俊川. 等效载荷法模拟激光超声微裂纹检测 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 64-68.
- [20] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C. Laser ultrasound in solids [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
沈中华, 袁玲, 张宏超. 固体中的激光超声 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [21] Li Y, Cai G X, Dong R Q. The reflection and transmission of Lamb waves at overlap joints [J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 495-503.
李阳, 蔡桂喜, 董瑞琪. 兰姆波在搭接焊缝上的反射和透射 [J]. 声学学报, 2017, 42(4): 495-503.
- [22] Lu P X, Wang D, Li Y. Laser ultrasonic C-scan test method of stiffener width [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171203.
路培鑫, 王栋, 李阳. 加强筋宽度的激光超声 C 扫描检测方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171203.
- [23] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic surface waves on surface defects [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041203.