

激光超声测量弹性常数的 Abaqus 数值模拟

战 宇¹ 薛俊川² 刘常升³

¹东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110819

²中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

³东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 材料的力学性能直接影响到构件的安全性和寿命,而材料的弹性常数是其力学性能的重要指标。利用有限元软件 Abaqus 模拟了激光激发的超声表面波和纵波在金属薄板试样表面及体内的传播过程。采用修正的高斯分布的力源等效激光对样品的脉冲作用来产生超声波,在边界处设置无限单元消除反射回波的干扰信号,并由接收点的超声表面波和纵波信号计算得到波速大小,再根据波速和弹性常数之间的关系得到材料的弹性常数。数值结果与理论解吻合良好,为激光超声检测材料弹性常数提供了一种十分有效的数值方法。

关键词 激光技术; 激光超声; 弹性常数; Abaqus 数值模拟; 无限单元

中图分类号 O341 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0508002

Numerical Simulation of Laser Ultrasonic Elastic Constant Measurement Based on Abaqus

Zhan Yu¹ Xue Junchuan² Liu Changsheng³

¹College of Sciences, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

²Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang, Liaoning 110035, China

³School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract The mechanical properties of the material directly affects the safety and life of the components, and the elastic constants of materials is an important index of its mechanical properties. The finite element software Abaqus is used to simulate the propagation of Rayleigh surface wave and longitudinal wave laser excitation in the dissemination process of sheet metal sample surface and in vivo. Effect of pulse laser on the sample used is equivalent to the modified Gauss distribution power source to generate the ultrasonic. The infinite element at the boundary is set to eliminate the interference signal echo, and receive the ultrasonic signals to calculate the velocity of Rayleigh surface wave and longitudinal wave. According to the relationship between velocity and elastic constants, elastic constants is detected. The numerical results are in good agreement with theoretical solution, thus a very effective numerical method for laser ultrasonic detection of elastic constants of materials to provide.

Key words laser technique; laser ultrasound; elastic constants; Abaqus numerical simulation; infinite element

OCIS codes 140.3460; 160.3900; 040.1880

1 引 言

材料的弹性常数是表征材料弹性力学性能最基本也是最重要的指标,代表了材料力学性能的综合情况。目前常规测量弹性模量的主要方法为拉伸实验法,但该方法测量过程繁琐,测量时间相对较长,同时不

收稿日期: 2014-10-27; 收到修改稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51074050)、辽宁省科技攻关项目(2011221007)、沈阳市科技计划项目(F12-278-6-08)

作者简介: 战 宇(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光超声检测方面的研究。E-mail: yunbatianxia@163.com

导师简介: 刘常升(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事材料表面科学与技术、激光应用技术等方面的研究。

E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn(通信联系人)

可避免地对材料产生破坏性。尤其在某些特殊的情况,诸如高温弹性常数、在有毒或放射性物质环境下的在线测量或者试件的尺寸受到限制等,传统的方法已不能满足科学研究和生产实践的需要。激光超声无损检测技术因具有非接触、高精度、非破坏、穿透力强等许多传统测试方法不可比拟的优点^[1-3],近年来在缺陷检测^[4]、残余应力测量^[5-7]以及弹性常数测量^[8-10]等领域得到了广泛的应用。

本文应用有限元软件 Abaqus 模拟了脉冲激光作用于金属薄板表面激发的纵波和表面波的传播过程,通过分析接收点的超声时域信号,得到了纵波和表面波的波速,进而求得了材料的弹性常数,所得结果与理论解吻合良好,为激光超声检测材料力学性能提供了一种简单有效的数值方法。

2 理论基础

激光超声技术测量材料的弹性常数是建立在固体力学的理论基础上的,利用声速与材料弹性常数之间的关系进行测量。脉冲激光作用在材料表面,将在材料体内产生超声纵波、横波及表面波,其传播速度和材料的密度和弹性常数有关。根据固体力学理论,可知:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}}, \quad (1)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}}, \quad (2)$$

$$C_R = \frac{0.87 + 1.13\mu}{1 + \mu} C_S, \quad (3)$$

式中 C_L 为纵波波速, C_S 为横波波速, C_R 为表面波波速, E 为弹性模量, μ 为泊松比, ρ 为材料的密度。由(1)~(3)式可得

$$C_1\mu^3 + C_2\mu^2 + C_3\mu + C_4 = 0, \quad (4)$$

式中 $C_1 = 2.5538\gamma - 2$, $C_2 = 2.6555\gamma - 2$, $C_3 = -0.4524\gamma + 2$, $C_4 = -0.7569\gamma + 2$, $C_1 \sim C_4$ 为方程系数, $\gamma = (C_L/C_R)^2$ 。

这样在材料密度和几何尺寸已知的情况下,根据接收到的探测点的超声振动信息,采用时差法可以计算出纵波和表面波的速度,从而求出 γ 值,再由(4)式可以确定一个合适的泊松比 μ ,进而可由(1)式得出材料的弹性模量。

3 有限元模型

3.1 模型建立

考虑一块各向同性的均质薄板样品,如图1所示,脉冲线源激光沿着 z 轴均匀辐照样品表面,该问题可以简化成平面应变问题来分析。建立有限元模型如图2所示,在模型的下端和右端通过修改 INP 文件设置无限单元 CINPE4 消除来自边界的反射波干扰信号。

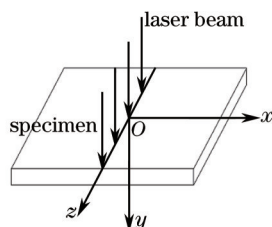


图1 脉冲激光辐照样品示意图
Fig.1 Pulsed laser irradiation samples

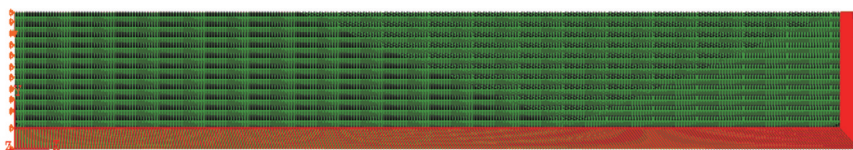


图2 Abaqus有限元模型
Fig.2 Abaqus finite element model

3.2 参数选取

有限元模型长度为 $L=13\text{ mm}$,厚度为 $H=1.5\text{ mm}$,模型将采用三种金属材料钢、铝、铜分别进行数值模拟,三种材料的弹性模量、泊松比、密度分别见表格1。

表1 材料的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of materials

Material	E/Gpa	μ	$\rho/(\text{kg}/\text{mm}^3)$
Steel	199.5	0.29	7.84
Aluminum	68.5	0.34	2.7
Copper	123	0.35	8.9

3.3 激光脉冲作用的简化和时间步长的选取

能够准确、正确地对激光超声检测材料弹性常数进行有限元数值模拟,脉冲激光对样品的作用的等效及检测点有效的时域信息的提取是非常关键的。采用修正的高斯分布的脉冲载荷作为激励源来建立激光超声的力学模型,在材料内得到良好的超声高频信号。在实验中,激光的能量、峰值功率、脉冲宽度、波长对所激发的超声波的振幅、频率等特性会有一些影响,但是不会影响到各种声波在该固体内的传播速度,因此在建模时忽略了次要因素^[11-14]。

在有限元求解该问题时,设定的时间步长和划分的单元的尺寸对数值结果的精度和稳定性影响非常大。一般来说时间步长越小精度越高,越能分辨出高频成分的超声波,同时为保证求解的精度,需保证最小的时间步长应和两个连续节点间波的传播时间相对应。但是另一方面,太小的时间步长则表明有限元的计算量将大大增加。时间步长可以选取 $\Delta t = 1/(180f_{\max})$,式中 f_{\max} 是所期望的最高超声频率。为了保证精度一般情况要求网格至少小于弹性波波长的 $1/4$,同时考虑波在物体中的传播速度、模型尺寸大小、以及计算时效等因素,估算网格大小为 $0.042\text{ mm} \times 0.0127\text{ mm}$ 。有限单元部分单元类型为 CPE4,无限单元部分单元类型设置为 CINPE4,使用 Abaqus 里面的 Explicit 分析步,采用固定增量步 $5 \times 10^{-10}\text{ s}$,脉冲激励的时间为 $5 \times 10^{-7}\text{ s}$,分析步的总时间为 $5 \times 10^{-5}\text{ s}$ 。

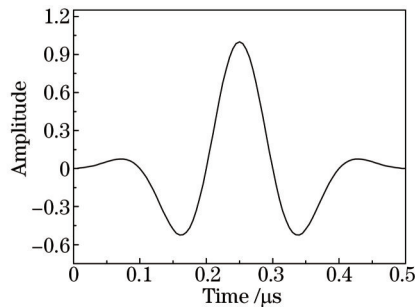


图3 高斯分布的脉冲

Fig.3 Gaussian pulse

4 结果与分析

4.1 表面波和纵波波速

以金属材料钢为例,在模型表面取6个节点, $x_1 = 7.584\text{ mm}$, $x_2 = 8.465\text{ mm}$, $x_3 = 9.347\text{ mm}$, $x_4 = 10.229\text{ mm}$, $x_5 = 11.153\text{ mm}$, $x_6 = 11.992\text{ mm}$,输出每个节点的位移历程曲线。为了避免激光光斑半径大小和测试点位置测量带来得误差,采用逐差法计算表面波的速度,根据节点的时间-位移历程曲线得到每个节点位移达到最大值和最小值的时间 t_{\max} 和 t_{\min} ,从而计算表面波速度。由图4可得

$$C_{R1} = \frac{x_4 - x_1}{(t_{4\max} - t_{1\max} + t_{4\min} - t_{1\min})/2}, \quad (5)$$

同理可得

$$C_{R2} = \frac{x_5 - x_2}{(t_{5\max} - t_{2\max} + t_{5\min} - t_{2\min})/2}, \quad (6)$$

$$C_{R3} = \frac{x_6 - x_3}{(t_{6\max} - t_{3\max} + t_{6\min} - t_{3\min})/2} \quad (7)$$

最后取平均值得到该模型的超声表面波的波速:

$$C_R = \frac{C_{R1} + C_{R2} + C_{R3}}{3} \quad (8)$$

在激光脉冲作用点正下方取 6 个节点 $y_1 = 0.279 \text{ mm}$, $y_2 = 0.394 \text{ mm}$, $y_3 = 0.508 \text{ mm}$, $y_4 = 0.623 \text{ mm}$, $y_5 = 0.737 \text{ mm}$, $y_6 = 0.852 \text{ mm}$, 采用同样的方法计算纵波的速度。

$$C_L = \frac{C_{L1} + C_{L2} + C_{L3}}{3} \quad (9)$$

由图 4 可以看出, 节点 1、4 的位移幅值是一致的, 符合表面波的特性: 在远离激励源一段距离, 当完整的瑞利表面波产生了后, 各点的表征波的特性的幅值在波传播的过程中将基本不变。比较图 4 和图 5 可进一步计算, 对于钢 $C_R = 2866 \text{ m/s}$, $C_L = 6048 \text{ m/s}$, 符合同种材料中纵波的传播速度比表面波快的特征。因此可以说, 采用高斯分布的脉冲载荷来代替脉冲激光对样品的作用, 可以得到信号良好的超声表面波。由误差分析以及波速比较结果可知, 数值模拟方法得到的波速有很高的精度, 说明了激光超声检测弹性常数的 Abaqus 数值模拟方法的可行性。

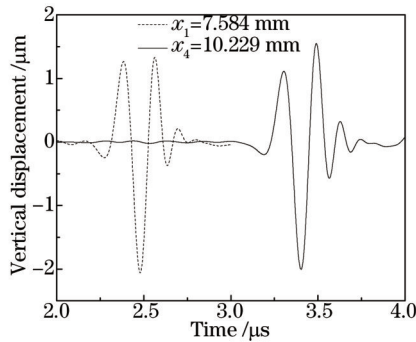


图 4 节点 1、4 的时间-位移曲线

Fig.4 Displacement-time curves of node 1、4

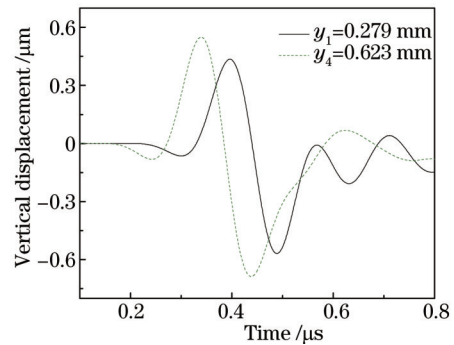


图 5 节点 1、4 的时间-位移曲线

Fig.5 Displacement-time curves of node 1、4

表 2 表面波和纵波波速的数值解与理论值

Table 2 Numerical solution of the surface wave and longitudinal wave velocity with the theoretical value

Material	$C_R / (\text{m/s})$			$C_L / (\text{m/s})$		
	Numerical solution	Theoretical solution	Error /%	Numerical solution	Theoretical solution	Error /%
Steel	2866	2906	1.37	6048	5941	1.81
Aluminum	2893	2945	1.77	6549	6412	2.14
Copper	2191	2260	3.04	4829	4700	2.75

4.2 弹性模量及泊松比的计算

将数值计算中测得的表面波和纵波波速代入(4)式中可以得到一个合适的泊松比 μ , 再将求解得到的泊松比 μ 、纵波波速 C_L 和材料的密度 ρ 值代入(1)式中, 便可计算得到相应的材料弹性模 E , 结果如表 3 所示。由表 3 可以看出利用激光超声测量材料的弹性常数时, 弹性模量的测量精度要远高于泊松比, 钢和铝的测量精度远大于铜。

表 3 材料的弹性常数

Table 3 Elastic constants of materials

Material	E / GPa			μ		
	Numerical solution	Theoretical solution	Error /%	Numerical solution	Theoretical solution	Error /%
Steel	196.33	195	0.684	0.3067	0.29	5.76
Aluminum	68.04	68.5	0.673	0.3586	0.34	5.46
Copper	120.39	123	2.118	0.3651	0.35	4.32

5 结 论

1) 激光激发的超声波可用来检测材料弹性常数,数值模拟中采用高斯分布的脉冲载荷来等效激光对样品的冲击作用,并引入无限单元来消除边界效应,建立的力学模型可得到声学性能良好的超声波。

2) 数值计算了不同金属材料弹性模量值和泊松比,与理论值比较误差很小,结果表明激光超声法检测材料的弹性常数具有很高的精度,同时也为激光超声的数值模拟提供了一种简单有效的计算方法。

参 考 文 献

- 1 Sanderson T, Ume C, Jarzynski J. Longitudinal wave generation in laser ultrasonics[J]. *Ultrasonics*, 1998, 35(8): 553-561.
- 2 Hess P, Lomonosov A M, Mayer A P. Laser-based linear and nonlinear guided elastic waves at surfaces (2D) and wedges (1D)[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 39-55.
- 3 Wang J J, Shi Y F, Lu L Z. Analysis of laser-generated ultrasonic force source at specimen surface and display of bulk wave in transversely isotropic plate by numerical method[J]. *Appl Surf Sci*, 2012, 258(6): 1919-1923.
- 4 Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves[J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1): 147-154.
- 5 Duquennoy M, Ouafouh M. Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers[J]. *NDT & E Int*, 2001, 34(5): 355-362.
- 6 Sanderson R M, Shen Y C. Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound[J]. *Pres Ves Pip*, 2010, 87(12): 762-765.
- 7 Mounier D, Poilane C, Khelifa H. Sub-gigahertz laser resonant ultrasound spectroscopy for the evaluation of elastic properties of micrometric fibers[J]. *Ultrasonics*, 2014, 44(1): 1223-1227.
- 8 Q J Huang, Y Cheng, X J Liu. Study of the elastic constants in a $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ film by means of laser-generated ultrasonic wave method[J]. *Ultrasonics*, 2006, 54(1): 259-267.
- 9 P Pietroni, N Paone, M Lebeau. Development of non-destructive Young's modulus measurement techniques in non-oriented CeF3 crystals[J]. *Nucl Instrum Meth Phys*, 2005, 537(2): 203-206.
- 10 Nguyen, T L. Development of an Ultrasonic Technique for the Measurement of Machining Induced Surface Residual Stresses[D]. West Lafayette: Purdue University, 2000.
- 11 Luo Kaiyu, Chen Qi, Lü Ci, *et al.*. Thickness analysis of two-sided simultaneous laser shock processing on AM50 Mg alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103003.
罗开玉, 陈 起, 吕 刺, 等. 双面激光同时冲击AM50镁合金板料的厚度分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103003.
- 12 Dong Liming, Ni Chenyin, Shen Zhonghua, *et al.*. Determination of elastic constants of materials based on the velocity measurement of laser-generated multi-mode ultrasound[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 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.
- 13 Li Jia, Ni Chenyin, Zhang Hongchao, *et al.*. Detection of micro-crack by ultrasonic approach of one-sided pitch-catch method based on laser assisted heating[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408008.
李 加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408008.
- 14 Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103001.
钦兰云, 王 维, 杨 光. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103001.

栏目编辑: 何卓铭