

## 等效载荷法模拟激光超声微裂纹检测

战宇<sup>1</sup>, 刘常升<sup>2</sup>, 薛俊川<sup>3</sup>

- (1. 东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 中航工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要:** 基于等效载荷法, 应用有限元软件 Abaqus 模拟了脉冲激光激发的超声表面波在预加裂纹的半无限大弹性薄板内的传播, 并探讨了微裂纹的尺寸对超声信号的影响。将脉冲激光激励等效为作用在薄板表面的在时间和空间上均满足高斯分布的脉冲载荷, 并通过引入修正系数建立了激光的物理参数与峰值载荷的定量关系。在实验验证了有限元模型和等效载荷法正确性的基础上, 探讨了裂纹的宽度、深度对反射波和透射波声学特性的影响。结果表明, 所建立的等效载荷法能有效地模拟激光超声检测裂纹的实验过程, 对激光超声的数值模拟研究以及在裂纹检测方面的应用具有重要的意义。

**关键词:** 激光超声; 微裂纹; 有限元; 等效载荷法

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1006004

## Simulation of laser ultrasonic detection micro crack by equivalent load method

Zhan Yu<sup>1</sup>, Liu Changsheng<sup>2</sup>, Xue Junchuan<sup>3</sup>

- (1. College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

**Abstract:** The ultrasonic surface wave induced by the laser shock processing and its propagation in half-space elastic plate with micro crack were simulated with Abaqus software based on equivalent load method, and the effects of the size of the micro cracks on the ultrasonic signal were also discussed. The pulsed laser was equivalent to a load with Gaussian profile in time and space, and the relationship between the physical parameters of the laser and the load was established by the correction factor. On the basis of verifying the correctness of the finite element model and equivalent load method, the effect of the crack width and depth on the acoustic characteristics of reflection wave and transmission wave was discussed. The results show that the equivalent load method is effective to simulate the process of laser ultrasonic crack detection, and it is very important for the numerical simulation of laser ultrasonic and the application in the detection of the crack.

**Key words:** laser ultrasonic; micro crack; finite element; equivalent load method

收稿日期: 2016-02-08; 修订日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51074050)

作者简介: 战宇(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光超声无损检测方面的研究。Email: zhanyu@mail.neu.edu.cn

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、激光表面改性的研究。Email: cslu@mail.neu.edu.cn

## 0 引言

裂纹大量地存在于工程结构中, 严重地影响了结构的安全和寿命, 如何快速地检测、评估裂纹, 是无损检测的重要任务。近年来, 激光超声无损检测技术以其非破坏、非接触、高精度、高效率、穿透力强、可在线操作等优点已成为材料表面裂纹检测的一种十分有效的方法<sup>[1-4]</sup>。脉冲激光激发的超声表面波在材料表层传播, 对介质表面微结构非常敏感, 通过检测裂纹反射波和透射波的声学特性的变化, 可实现对工程构件的表面和亚表面缺陷的检测和评估, 为特殊工况下的材料和微结构的缺陷检测提供一种非常有效的方法。

目前, 国内外的学者大多侧重于激光超声检测的实验方面的研究, 主要包括残余应力的测量、裂纹检测、材料弹性常数的测量等<sup>[5-7]</sup>。有限元数值方法可以在不做实验的前提下了解激光激发超声波这一复杂的物理过程, 更全面地了解超声波在试样中的传播规律。因此, 针对于激光超声问题的研究, 在实验前进行相应的有限元分析是十分必要的。

Xu 等人采用应力-位移混合和理想匹配层的有限元方法建立了半无限大介质的激光超声有限元模型, 并消除了模型边界反射波的干扰<sup>[8]</sup>。Liu 等人使用有限元方法模拟了时间和空间上调制的激光光源激发大位移幅值声表面波的过程, 计算结果为提高表面波信噪比提供了重要依据<sup>[9]</sup>。Wang 等人探讨了在金属圆管上的表面波激发问题, 并模拟了铝管偏心状态对表面波传播特性的影响, 为激光超声在管状材料无损检测中的应用提供了理论指导<sup>[10]</sup>。Guan 等人采用顺序耦合方法, 将激光简化为表面热流, 先求解热流引起整体结构温度场, 再将温度场作为外部载荷来求解位移场<sup>[11]</sup>。国外学者提出了一些力学模型, 降低了求解热弹性机制下的激发表面波过程中多场耦合的复杂性, 提高了计算效率, 也为进一步研究激光激发超声的机理打下基础。Achenbach 提出了将脉冲激光等效成力偶极子, 并用该模型分析了激光在一个均匀、各向同性的线弹性体上激发超声表面波的过程, 同时对脉冲激光是点光源和线光源两种情况进行了讨论<sup>[12]</sup>。Sohn 和 Krishaswamy 采用弹簧振子点阵模型模拟了微裂纹的激光超声检测过

程, 所得的数值结果与实验解吻合良好<sup>[13]</sup>。

Eliezer 等采用实验的方法研究了大功率激光作用在铝、铜和环氧树脂上时产生的冲击压力, 并给出了压力的分布规律和峰值压力的计算公式<sup>[14]</sup>。Phipps 等系统地研究了激光的主要参数(功率、波长、脉宽)与其在材料中产生的冲击压力的关系, 并指出这类公式同样适用于热弹性机制下的小功率激光<sup>[15]</sup>。根据他们的工作, 结合脉冲激光束满足时间和空间高斯分布的特点, 文中提出将脉冲激光等效成高斯分布的脉冲载荷, 并通过引入修正系数建立了激光的主要物理参数与等效载荷之间的关系。应用有限元软件 Abaqus 对激光激发的超声表面波在预加裂纹薄板结构中的传播过程进行了系统的有限元分析, 探讨了表面裂纹的几何尺寸对反射波和透射波的影响以及裂纹对表面波的滤波效应, 为激光超声无损检测在缺陷的检验和定性评估提供了一种简单有效的数值方法。

## 1 建立有限元模型

### 1.1 模型建立与网格划分

建立各向同性均匀的薄铝板模型, 长  $L=100\text{mm}$ , 宽  $M=65\text{mm}$ , 厚  $H=2\text{mm}$ , 材料弹性模量  $E=68.5\text{GPa}$ , 泊松比  $\mu=0.34$ , 密度  $\rho=2700\text{kg/m}^3$ 。脉冲线光源激光垂直辐照样品(图 1)表面, 线光源长度方向为空间坐标系的  $z$  轴方向, 表面缺陷的走向与线光源平行, 激光源宽度为  $5\text{mm}$ , 该问题可以简化成平面应变问题来分析。

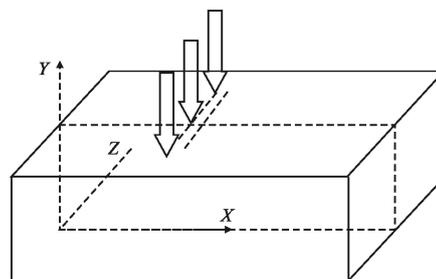


图 1 激光辐照样品示意图

Fig.1 Schematic of laser irradiation on the sample

有限元方法数值模拟激光超声问题时, 为保证求解的精度和稳定性, 需要选择合适的时间步长和单元长度。一般说来, 时间步长应该足够小到能够反映激光作用样品的过程。时间步长越小求解精度越高, 越能分辨出高频成分的超声波, 但是也降低了计

算效率。在这种情况下,同时考虑读取时间的准确性对时差计算表面波速度的影响,该模型设置固定时间步长  $\Delta t=1 \times 10^{-9} \text{ s}$ , 等效载荷作用时间为  $2.4 \times 10^{-8} \text{ s}$ , 整个分析步的时间为  $5 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。一般情况下为精确模拟激光作用产生的弹性波的传播过程,要求网格尺寸至少要小于弹性波波长的  $1/4$ ,估算网格大小为  $0.042 \times 0.0127 \text{ mm}$ 。使用 Abaqus 里面的 Explicit 分析步,有限单元部分单元类型设置为 CPE4,为了提高信噪比,在模型的边缘使用无限单元 CINPE4 消除来自边界的反射波干扰信号。

### 1.2 脉冲激光作用的等效载荷法

准确地对激光超声检测铝板表面缺陷进行有限元数值模拟,脉冲激光对样品的作用是非常关键的。根据脉冲激光的实际工作参数和高斯分布规律,通过引入修正系数建立了载荷大小与激光物理参数之间的定量关系,得到了时间和空间上均满足高斯分布的脉冲载荷作为激励源来建立激光超声的力学加载模型。在实验中采用的激光器型号为 Beamtech 公司生产的 Dawa-100 系列激光器,能量  $E_0=100 \text{ mJ}$ 、脉冲宽度  $\tau=8 \text{ ns}$ 、激光波长  $\lambda=1064 \text{ nm}$ 、重复频率  $1 \sim 20 \text{ Hz}$ ,激光器的峰值功率密度  $I_0 = \frac{E_0}{\tau A} = 3.2 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ,  $A$  为激光作用面积,可以通过聚焦透镜和柱面透镜调节。脉冲激光在铝板表面产生的等效载荷为:

$$P = \alpha P_{\max} f(r) g(t) \quad (1)$$

其中,脉冲激光产生的峰值压力的近似解可以解析的定量表示为<sup>[14]</sup>:

$$P_{\max} = k \tau \frac{1}{8} \frac{1}{\lambda} \frac{3}{4} I_0 = 132 \text{ MPa} \quad (2)$$

式中:  $k=2.3 \times 10^{-5}$  是与材料有关的系数。

等效脉冲载荷的空间和时间分布与脉冲激光采用相同的分布函数<sup>[12]</sup>:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2}{r_0} e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, g(t) = \frac{8t^3}{\tau^4} e^{-\frac{2t}{\tau}} \quad (3)$$

其中  $\alpha=15.003$  为文中引入的修正系数,可由  $P=P_{\max}$  ( $r=0, t=0.969$ ) 确定,依据激光超声有限元分析的经验,文中取载荷作用时间  $t_{\max}=3\tau$ 。

## 2 模型的验证和表面波速的计算

### 2.1 表面波特性的验证

(1) 在模型表面载荷附近沿水平方向取 3 个节

点,  $x_1=34.775 \text{ mm}$ ,  $x_2=43.049 \text{ mm}$ ,  $x_3=55.649 \text{ mm}$ , 输出节点的位移历程曲线。由图 2 可以看出:在早期的瑞利表面波的传播过程中,波的特性(位移)的幅值在相邻的节点有很大的变化,符合表面波产生初期的不一致性的特点。

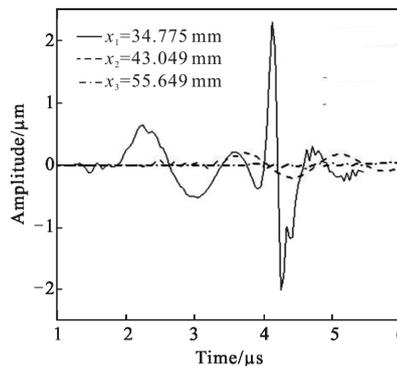


图 2 节点的时间-位移曲线

Fig.2 Displacement-time curves of nodes

(2) 在模型表面远离激发区域取 3 个节点,  $x_3=55.649 \text{ mm}$ ,  $x_4=54.909 \text{ mm}$ ,  $x_5=58.169 \text{ mm}$ , 输出节点的位移历程曲线。由图 3 可以看出:远离激励源的一段距离后,各节点的相对幅值的差距变小了,波形在传播的过程中将基本不变,符合表面波在远离振源区各点的幅值不变的特点。

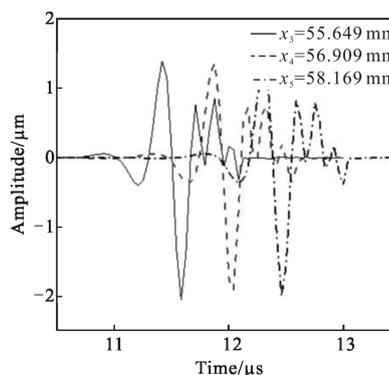


图 3 节点的时间-位移曲线

Fig.3 Displacement-time curves of nodes

(3) 沿深度方向在  $x_4$  节点下方取 3 个节点,  $y_1=0.369 \text{ mm}$ ,  $y_2=0.968 \text{ mm}$ ,  $y_3=1.478 \text{ mm}$ , 输出每个节点的位移历程曲线。由图 4 可得:随着深度的增加,节点的位移振幅逐渐衰减,符合表面波随深度衰减的特点。

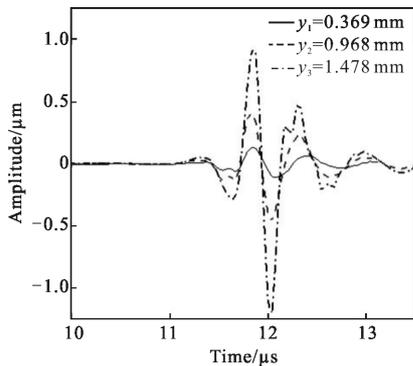


图 4 节点的时间-位移曲线

Fig.4 Displacement-time curves of nodes

### 2.2 表面波速度的实验验证

为了进一步验证有限元模型的正确性, 采用已有的激光超声实验系统检测铝板中的表面波。实验样品为 6061 铝板, 几何尺寸与有限元模型保持相同。实验系统主要包括激发系统和接收系统两部分。激发系统由 Nd:YAG 脉冲激光器和光学透镜组成, 激光器的物理参数如 1.2 节所描述, 用来产生激光脉冲线光源。接收系统由激光多普勒振动计、示波器、光电探测器和计算机组成, 用来采集、记录铝板表面的超声信息。激光多普勒振动计发出连续功率小于 1 mW 的 He-Ne 激光, 照射到具有超声振动的物体表面上而发生多普勒效应, 接收的反射光就携带了超声振动的信息, 示波器将光信号转化成电信号并记录下来。

实验中测量 7 组数据, 采用线性拟合的方法消除系统的时间延迟和测量误差, 直线的斜率就是表面波的传播速度, 结果如图 5 所示。线性拟合直线

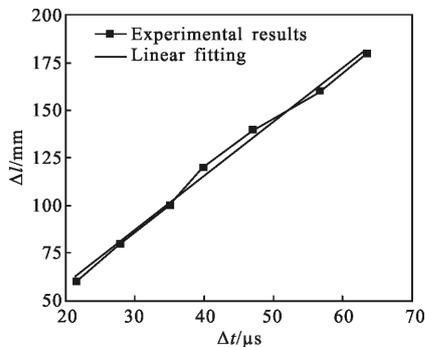


图 5 实验结果的线性拟合

Fig.5 Linear fitting curves of experimental results of surface waves

的斜率  $k=2.849\ 23$  可得实验测得的表面波速度  $\bar{C}_R=$

2 849.23 m/s。由图 3 中节点的时域信息得到每个节点位移达到最大值和最小值的时间  $t_{max}$ 、 $t_{min}$ , 采用逐差法计算表面波的速度  $C_R=2\ 897$  m/s, 数值解与实验结果误差为 1.65%。文中采用等效载荷法来模拟激光诱导超声问题, 可以产生信号良好的超声表面波。

### 3 裂纹检测

为了能够满足在役结构部件在线检测时高效率、高精度的要求, 系统的研究裂纹尺寸对表面波的反射波和透射波的影响是非常必要的。文中取 5 组裂纹, 结果如表 1 所示。可以看出裂纹的尺寸对反射波和透射波的幅值有一定的影响: 由编号 2、4、5 可以看出, 随着裂纹宽度的增加, 反射波和透射波的幅值减小, 这是因为裂纹对声波的散射作用增强, 能量散失越大; 由编号 1、2、3 可以看出, 裂纹的深度越大, 反射波的幅值越大, 透射波的幅值越小, 这是因为随着裂纹深度的增加, 更多的超声表面波信号被反射和散射, 能量散失较少。

表 1 裂纹对应的反射波和透射波

Tab.1 Corresponding of reflection wave and transmission wave to the crack

Crack number	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$	Amplitude of the reflection wave/ $\mu\text{m}$	Amplitude of the transmission wave/ $\mu\text{m}$
1	300	200	-0.481	-0.765
2	300	300	-0.623	-0.408
3	300	400	-0.671	-0.306
4	400	300	-0.543	-0.346
5	500	300	-0.476	-0.305

### 4 结论

基于等效载荷法, 建立了激光激发超声表面波检测金属材料表面微裂纹的有限元模型, 并利用激光超声实验系统测量了铝板中的表面波传播速度, 验证了有限元模型的正确性。在此基础上通过有限元分析探讨了微裂纹的宽度、深度对表面波的影响。结果表明:(1) 基于等效载荷法所建立的有限元模型能简单有效地模拟激光诱导超声波的物理过程, 得到声学性能良好的超声表面波。该方法简单有效地

避免了热弹性分析激光超声问题中的热-力耦合以及计算量巨大的问题。(2) 裂纹的尺寸对反射波和透射波的幅值有一定的影响,裂纹越宽,反射波和透射波的幅值越小;裂纹越深,反射波的幅值越大,透射波的幅值越小。该规律可以作为裂纹定性评估的参考。该研究对激光超声的有限元分析以及复杂情况下的裂纹检测具有重要的意义。

参考文献:

[1] Luo Yukun, Luo Shitu, Luo Feilu. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 479-487. (in Chinese)  
罗玉昆, 罗诗图, 罗飞路. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 479-487.

[2] Wu Yihui, Jia Hongguang, Ju Hui. Lamb waves generated by laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 299-303. (in Chinese)  
吴一辉, 贾宏光, 鞠辉. 激光激发兰姆波 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 299-303.

[3] Ni Chenyin, Shi Yifei, Shen Zhonghua. Numerical simulation on near field surface acoustic waves induced by laser line source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 324-327. (in Chinese)  
倪辰荫, 石一飞, 沈中华. 激光激发材料中近场声表面波的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 324-327.

[4] Song Yanxing, Wang Jing, Feng Qibo. Influence of laser parameters and laser ultrasonic detection method on ultrasonic signals[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1432-1437. (in Chinese)  
宋燕星, 王晶, 冯其波. 激光参数及激发超声探测方法对超声信号影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1432-1437.

[5] Sanderson R M, Shen Y C. Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound [J]. *Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87(12): 762-765.

[6] Li Jia, Ni Chenyin, Zhang Hongchao. 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. (in Chinese)  
李加, 倪辰荫, 张宏超. 基于激光辅助加热的激光超声投射法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408008.

[7] Dong Liming, Ni Chenyin, Shen Zhonghua. 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. (in Chinese)  
董利明, 倪辰荫, 沈中华. 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.

[8] Xu Boqiang, Liu Hongkai, Xu Guidong. Mixed stress-displacement finite element method for laser-generated ultrasound[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 230-235. (in Chinese)  
许伯强, 刘洪凯, 徐桂东. 基于应力-位移混合有限元法的激光超声数值模拟[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 230-235.

[9] Liu Jinsheng, Xu Zhenhua, Gu Guoqing. Numerical study on improvement of signal-to-noise ratio of surface acoustic waves based on laser array [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 403-406. (in Chinese)  
刘津升, 徐振华, 顾国庆. 激光阵列用于改善声表面波信噪比的数值研究[J]. 激光技术, 2011, 35(3): 403-406.

[10] Wang Guixin, Yan Gang, Guan Jianfei. Effect of wall thickness of aluminum pipes on laser-induced ultrasonic waves[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 260-265. (in Chinese)  
王贵鑫, 严刚, 关建飞. 金属圆管管壁厚度对瑞利波影响的研究[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 260-265.

[11] Guan J F. Numerical study on depth gauging of surface breaking defects using laser-generated surface acoustic waves [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(3): 032703.

[12] Achenbach J D. Laser excitation of surface wave motion [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(11): 1885-1902.

[13] Sohn Y, Krishnaswamy S. Mass spring lattice modeling of the scanning laser source technique[J]. *Ultrasonics*, 2002, 39(8): 543-551.

[14] Eliezer S, Gazit Y, Gilath I. Shock wave decay and spall strength in laser-matter interaction [J]. *Appl Phys*, 1990, 68(1): 356-358.

[15] Phipps C R, Turner T P, Harridon R F. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers [J]. *Appl Phys*, 1988, 64(3): 1083-1096.