

激光超声表面波检测薄板残余应力的数值模拟

战宇¹, 刘常升², 张凤鹏¹, 邱兆国¹

(1. 东北大学理学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 应用 ABAQUS 有限元软件模拟了脉冲激光激发的超声表面波在半无限大弹性薄板内的传播. 首先把激光激励等效为作用在薄板表面的高斯分布的脉冲载荷, 模拟输入的超声信号, 在边界处采用无限单元来消除边界反射波对接收信号的干扰, 接收到的表面波信号具有典型的表面波特点. 其次, 通过修正弹性模量的方法得到薄板在单向应力状态下的应力场, 采用时差法得到表面波在应力区的传播速度, 所得的数值结果和理论解与实验结果拟合良好, 为激光超声检测残余应力提供了一种有效的数值方法.

关 键 词: 激光超声; 表面波波速; 有限元; 等效弹性模量; 残余应力

中图分类号: O 341

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)03-0406-04

Numerical Simulation of Laser Ultrasonic Surface Wave Measurement of Residual Stress

ZHAN Yu¹, LIU Chang-sheng², ZHANG Feng-peng¹, QIU Zhao-guo¹

(1. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Chang-sheng, E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The propagation of surface wave which induced by the laser ultrasonic shock processing was simulated in half-space elastic materials by ABAQUS software. First, the effect of laser shock processing was equivalent to a modulated Gaussian pulse. To eliminate the undesirable reflections from boundary edges, the infinite elements were placed along the appropriate edges of the model. The received waves agree with the Rayleigh surface waves. Secondly, the effective elastic modulus method was introduced to simulate the initial residual stress in the surface region. Detection of surface velocity based on ultrasonic time-difference method was introduced. The numerical value and theory well fit experimental datas, which provide a way of using laser ultrasonic to measure of the residual stress.

Key words: laser ultrasonic; surface wave velocity; finite element; equivalent modulus; residual stress

在生产、加工和处理材料的过程中, 由于材料局部区域产生不均匀的塑性变形, 因而必然会产生残余应力. 残余应力作为一种内应力对工件或材料各项性能的影响越来越受到人们的关注. 目前检测残余应力的方法有很多种, 作为一种新的应力检测手段, 激光超声波检测法以其非接触、宽带、空间分辨率高等独特的优越性, 近年来得到了快速的发展, 成为国内外学者研究的热点^[1-6].

由于声应力效应, 当材料存在残余应力时, 其弹性波传播速度将发生变化. 因此可以根据所测声波速度的变化来反映其传播路径上的应力大小^[7-8].

本文主要应用有限元软件 ABAQUS 模拟了脉冲激光作用于薄板表面激发的表面波的传播过程, 通过分析接收点的超声时域信号, 得到了有残余应力和理想无应力状态下表面波的速度比, 并

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074050); 外国青年学者研究基金资助项目(51250110080); 中央高校基本科研业务费重大科技创新项目(N130810002).

作者简介: 战宇(1980-), 男, 辽宁营口人, 东北大学讲师, 博士; 刘常升(1963-), 男, 内蒙古奈曼旗人, 东北大学教授, 博士生导师.

与实验值和理论解进行对比分析^[9],结果表明运用激光超声法对残余应力的检测有非常高的精度.

1 表面波的验证

1.1 建立 ABAQUS 有限元模型

考虑 1 块各向同性均匀的薄板样品,材料为 4140 钢,屈服应力 $\sigma_s = 930 \text{ MPa}$,强度极限 $\sigma_b = 1\,080 \text{ MPa}$,其中 y 轴垂直于样品的表面, x 轴和 z 轴分别垂直和平行于板边方向.假设脉冲线源激光沿着 z 轴辐照样品表面,平面 xoy 为各向同性平面,可以简化成平面应变问题来分析.建立有限元模型如图 1 所示,长度 $L = 13 \text{ mm}$,厚度 $H = 1.5 \text{ mm}$,材料弹性模量 $E = 199.5 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.29$, $\rho = 7\,858 \text{ kg/m}^3$.模型的下端和右端使用无限单元 CINPE4 消除来自边界的反射波干扰信号,约束左端 x 方向的位移.

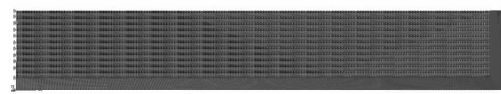


图 1 ABAQUS 有限元模型
Fig. 1 ABAQUS finite element model

为了准确模拟脉冲激光对样品的作用,得到良好的表面波信号,如图 2 所示,采用被调制过的高斯分布的脉冲载荷作为激励源作用在模型上表面,载荷作用点与光斑中心重合.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.时间步长的选择主要根据求解的精度来确定.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,需要考虑读取时间的准确性对时差法计算表面波速度的影响,本模型可选取时间步长 $\Delta t = 5 \times 10^{-10} \text{ s}$.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,要求网格尺寸小于弹性波波长的 $1/4$.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设置为 CPE4,无限单元部分单元类型设置为 CINPE4.使用 ABAQUS 里面的 Standard 分析步,采用固定增量步 $5 \times 10^{-10} \text{ s}$,脉冲激励的作用时间为 $5 \times 10^{-7} \text{ s}$,分析步的总时间为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}$.

1.2 验证表面波的两个基本特性

在模型表面取 3 个节点 $x_1 = 7.065 \text{ mm}$, $x_2 =$

8.074 mm , $x_3 = 9.041 \text{ mm}$,输出每个节点的速度、位移的历程曲线,如图 3,图 4 所示.比较图 3,图 4,可知节点 1,2,3 的速度、位移的幅值是一致的,符合表面波横向等值的基本特征.

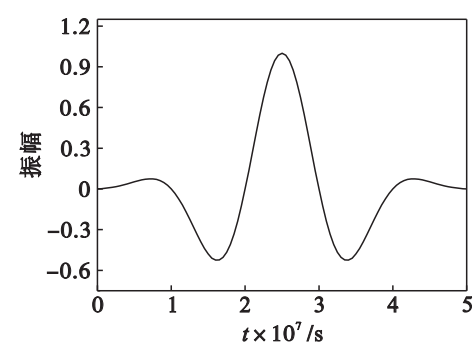


图 2 高斯分布的脉冲
Fig. 2 Gaussian pulse

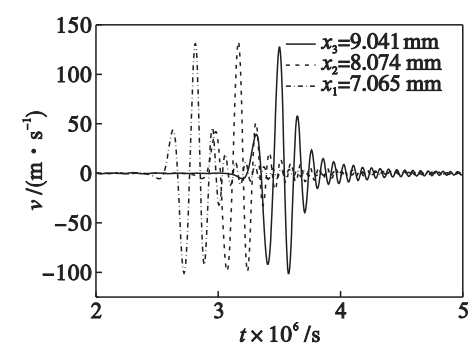


图 3 节点 1,2,3 的速度 - 时间曲线
Fig. 3 The velocity-time curves of node 1,2,3

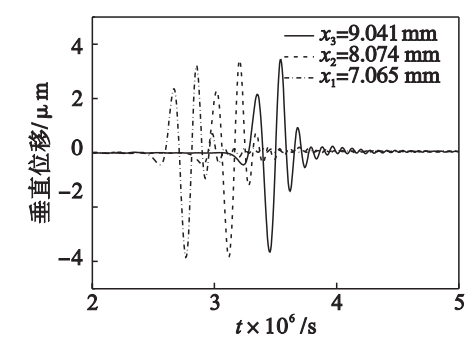


图 4 节点 1,2,3 的位移 - 时间曲线
Fig. 4 The displacement-time curves of node 1,2,3

沿 y 方向取 3 个节点 $y_4 = 1.208 \text{ mm}$, $y_5 = 1.335 \text{ mm}$, $y_6 = 1.500 \text{ mm}$,输出每个节点的速度、位移的历程曲线.

比较图 5,图 6,可知节点 4,5,6 的速度、位移的幅值随着深度的增加而逐渐衰减,符合瑞利表面波纵向递减的基本特征.因此,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.

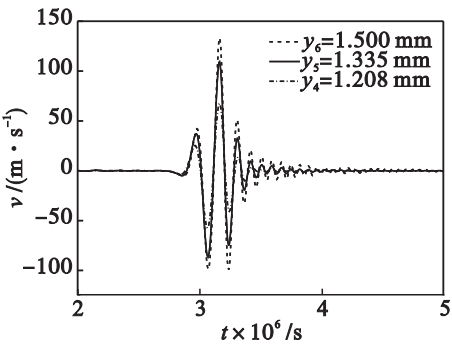


图 5 节点 4,5,6 的速度 - 时间曲线
Fig. 5 The velocity-time curves of node 4,5,6

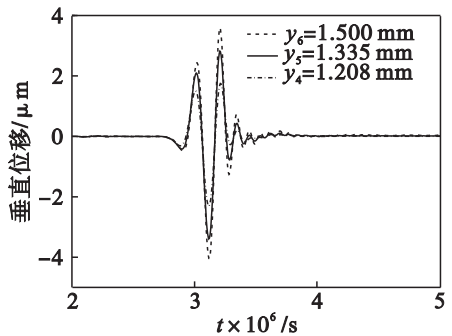


图 6 节点 4,5,6 的位移 - 时间曲线
Fig. 6 The displacement-time curves of node 4,5,6

2 应力场中表面波速的计算

2.1 等效弹性模量建立单向应力场

应力对表面波波速的影响是十分微小的, 100 MPa 的应力约改变千分之一的波速^[10], 为了精确地研究残余应力对表面波速度的影响, 通过修改弹性模量的方法来引入应力场, 引入修正的 Bergman 公式^[9]:

$$\hat{C}_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{\hat{E}_t}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (1)$$

式中: $\hat{E}_t \approx E(1 - \beta\sigma)$, 为等效弹性模量; $\beta \approx \frac{1.12 + 0.87 + 1.12\mu}{0.87 + 1.12\mu} \alpha$; $\alpha \approx \frac{\mu(2\nu + \lambda)}{4\lambda(\nu + \lambda)}$; λ 和 ν 是材料的二阶弹性常数, 即 Lamé 常数; σ 是单向应力状态下的主应力.

对于各向同性材料, Lamé 常数定义为

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{E\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \\ \nu &= \frac{E}{2(1 + \mu)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E 为杨氏模量; μ 为泊松比.

在 ABAQUS 软件的数值模拟中使用等效弹性模量来引入单向应力场, 在弹性范围内, 即 $\sigma \leq \sigma_s$, 由公式 $\hat{E}_t \approx E(1 - \beta\sigma)$ 可得等效弹性模量与

应力的关系见表 1.

表 1 等效弹性模量与应力关系 Table 1 The relationship between effective modulus and stress	
应力/MPa	等效弹性模量/GPa
0	199.500 0
230	199.414 3
416	199.328 6
691	199.242 5
807	199.199 3

2.2 表面波速度计算

在模型表面依次取 6 个节点, $x_1 = 7.065$ mm, $x_2 = 8.074$ mm, $x_3 = 9.041$ mm, $x_4 = 10.009$ mm, $x_5 = 11.018$ mm, $x_6 = 12.027$ mm. 与文献[9]中实验相符, 为了避免激光光斑半径和测试点位置测量带来的误差, 仍然采用逐差法计算瑞利表面波的速度. 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} , t_{\min} , 计算表面波速度.

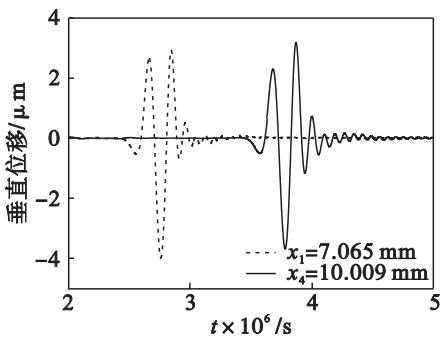


图 7 节点 1,4 的时间 - 位移曲线
Fig. 7 The displacement-time curves of node 1,4

由图 7 可得

$$C_{R1} = \frac{x_4 - x_1}{(t_{4\max} - t_{1\max} + t_{4\min} - t_{1\min})/2} \quad (3)$$

同理可得

$$C_{R2} = \frac{x_5 - x_2}{(t_{5\max} - t_{2\max} + t_{5\min} - t_{2\min})/2}; \quad (4)$$

$$C_{R3} = \frac{x_6 - x_3}{(t_{6\max} - t_{3\max} + t_{6\min} - t_{3\min})/2} \quad (5)$$

最后取平均值, 得到该模型中的超声表面波速度:

$$C_R = \frac{C_{R1} + C_{R2} + C_{R3}}{3} \quad (6)$$

3 结果与讨论

由公式(6)分别计算应力在 0, 230, 461, 691,

807 MPa 下的表面波速度的有限元数值解;由公式(1)计算出表面波速度的理论值,比较分析表面波在有残余应力存在和理想无应力状态下的速度比的数值解、理论解和实验值.如图 8 所示,表面波的波速随着应力的增加而减小,符合声弹性理论中应力与波速的定性关系^[9].

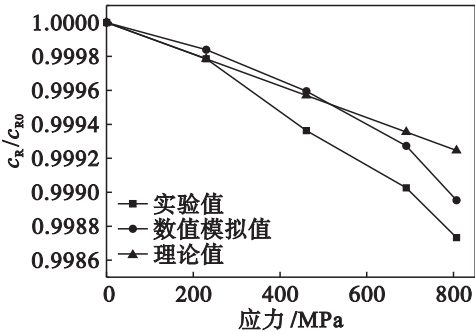


图 8 表面波速度比的实验值、数值模拟值、理论值比较

Fig. 8 The surface wave velocity ratio comparison of experimental,calculated and theoretic values

计算不同应力下表面波速度数值解与实验值的误差,如表 2 所示,最大误差仅为 0.024%,这表明该数值方法具有很高的精度,同时也说明应力对波速的影响很微小.

表 2 表面波速度比的数值解与实验值的误差					
Table 2 The surface wave velocity ratio error of calculated and experimental values					
应力/MPa	0	230	461	691	807
误差/%	0	0.005	0.024	0.024	0.022

4 结 论

- 1) 用高斯分布的脉冲载荷来代替脉冲激光对样品的作用,同时引入无限单元来消除边界反射波的干扰信号,可以得到性能良好的超声表面波.
- 2) 采用修正的Bergman公式通过修改弹性

模量建立应力场,并计算不同应力状态下的表面波速的变化,得到了与实验结果吻合良好的数值结果.

参考文献:

[1] 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]. *Applied Surface Science*,2012,258(6):1919 – 1923.

[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] Apetre N, Ruzzene M. Measurement of the Rayleigh wave polarization using 1D laser vibrometry [J]. *NDT & E International*,2011,44(3):247 – 253.

[4] Duquennoy M, Ouaftouh M. Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers [J]. *NDT & E International*,2001,34(5):355 – 362.

[5] Sanderson T, Ume C, Jarzynski J. Longitudinal wave generation in laser ultrasonics [J]. *Ultrasonics*,1998,35(8):553 – 561.

[6] Mounier D, Poilane C, Khelifa H. Sub-gigahertz laser resonant ultrasound spectroscopy for the evaluation of elastic properties of micrometric fibers [J]. *Ultrasonics*,2014,54(1):259 – 267.

[7] 沈中华,石一飞,袁玲,等. 激光声表面波的若干应用研究进展 [J]. *红外与激光工程*,2007,36(sup1):240 – 244. (Shen Zhong-hua, Shi Yi-fei, Yuan Ling, et al. Progresses in the applications of laser induced surface acoustic waves [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (sup1): 240 – 244.)

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

[9] Nguyen T L. Development of an ultrasonic technique for the measurement of machining induced surface residual stresses [D]. West Lafayette: Purdue University, 2000.

[10] 潘永东,钱梦騄,徐卫疆,等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布 [J]. *声学学报*,2004,29(3):254 – 257. (Pan Yong-dong, Qian Meng-lu, Xu Wei-jiang, et al. Residual stress profiling of aluminum alloy by laser ultrasonics [J]. *Acta Acustica*,2004,29(3):254 – 257.)