

文章编号: 2095-2163(2020)05-0089-05

中图分类号: O426

文献标志码: A

激光超声检测材料内部缺陷的数值模拟

陈超, 张兴媛, 宋大成, 王啸伟

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 为了探究激光冲击所产生的超声波信号在缺陷材料检测中的作用, 本文凭借有限元分析手段, 采用 COMSOL 软件建立了激光超声无损检测材料内部缺陷的有限元模型, 并模拟了激光在材料中激发, 产生横波和纵波, 沿材料内部的传播过程, 得到了在激光作用下铝板内部的声场分布, 还模拟了激光超声与铝板内部裂纹缺陷和气孔之间的相互作用。仿真结果证明: 激光超声能够在铝板内部产生超声波。通过对反射波信号及其时间的分析, 可确定缺陷在材料中的深度位置, 实现宽度 0.4 mm 以上的裂纹检测, 且信号峰值与裂纹宽度之间存在着正相关关系。为在实际中检测材料内部的缺陷提供了理论基础。

关键词: 激光超声; 仿真; 内部缺陷; 有限元

Numerical Simulation of Internal Defects in Laser Ultrasonic Testing Materials

CHEN Chao, ZHANG Xingyuan, SONG Dacheng, WANG Xiaowei

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to explore the role of ultrasonic signals generated by laser shock in detecting defective materials, with the help of finite element analysis, this article uses COMSOL software to establish a finite element model of laser ultrasonic non-destructive testing of internal defects in materials, and simulates the laser excitation in materials And the propagation process of the longitudinal wave along the inside of the material obtained the sound field distribution inside the aluminum plate under the action of the laser. The interaction between laser ultrasound and crack defects and pores in the aluminum plate was simulated. The simulation results prove that laser ultrasound can generate ultrasound inside the aluminum plate. Through the analysis of the reflected wave signal and its time, the depth position of the defect in the material can be determined, and crack detection with a width of more than 0.4mm can be achieved, and there is a positive correlation between the signal peak and the crack width. It provides a reliable theoretical basis for detecting defects in materials in practice.

[Key words] laser ultrasound; simulation; internal defects; finite element

0 引言

微小裂纹和气孔等缺陷大量存在于各类工程材料中, 高效准确地检测和评估缺陷成为无损检测的重要任务。常见的无损检测技术包括超声检测、射线检测、涡流检测、渗透检测和激光全息检测等^[1-2]。而激光超声检测技术凭借其穿透力强、非接触破坏、灵敏度高、检测对象广泛、无污染等^[3-5]优点, 并且可在高温、高压、高湿、腐蚀^[6-7]和有毒等恶劣环境下进行检测工作, 成为无损检测领域的重要检测应用手段和研究方向^[8-9]。

在利用激光超声检测工程材料缺陷时, 由于获得的信号会在不同程度上受到电磁噪声、工频噪声等各种随机噪声的污染, 最终接收到的超声信号是各种波形的叠加。另外, 工程材料本身的不均匀性、阻抗小、声速低、衰减大等特点, 也对后续的信号处理、分析带来干扰和误差。随着计算机技术的飞速发展, 计算机数值模拟的广泛应用, 激光超声无损检测的数值模拟也成为重要研究对象^[10]。通过数值

模拟激光冲击产生超声波的物理过程和材料内部超声波的传播过程, 可以实现超声波的产生和对工程材料内部缺陷的检测, 为实际无损检测实验提供了可靠依据和方法。

为考察激光超声检测技术对铝材料内部缺陷检测的可行性, 本文基于平面应变理论, 通过将激光冲击作用简化, 利用 Comsol Multiphysics 软件^[11]建立了铝材料激光超声有限元数值模拟方法及其模型, 探究激光激发出超声在材料中的产生和传播过程, 模拟了激光超声与铝材料内部缺陷的相互作用过程, 通过此模型确定缺陷在材料中的埋藏深度, 初步验证了激光超声对于铝材料内部缺陷检测的可行性, 为激光超声实际检测提供了理论基础。

1 激光超声的数值模拟

1.1 超声波在固体中传播的控制方程

由牛顿第二定律可知, 超声波在固体材料中传播的控制方程^[12]为:

作者简介: 陈超(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无损检测、故障诊断。

收稿日期: 2020-03-17

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \tilde{N} \cdot \sigma = F. \quad (1)$$

式中, ρ 为材料的体密度; u 为材料变形时的位移矢量; σ 为应力张量; F 为机械载荷向量。而应力与应变的关系为:

$$\sigma - \sigma_0 = C : (\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot [(\tilde{N}u)^T + (\tilde{N}u)]. \quad (3)$$

式中, σ 为初始应力; C 为弹性矩阵; ε 为应变张量; ε_0 为初始应变。

在超声波反射界面, 采用固定约束边界条件为: $u = 0$ 。

在材料左右两侧面, 采用低反射边界条件:

$$\sigma \cdot n = -d_i \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (4)$$

式中, n 为边界方向矢量; d_i 为密度 ρ 、横波速度 C_s 、纵波速度 C_l 的函数。

1.2 模型的建立

当激光光源均匀作用在模型的上表面, 且入射激光具有轴对称分布的特点, 同时材料为各向同性、均匀、线弹性的, 则可将复杂的三维问题转化为平面二维问题, 作为二维平面弹性问题求解。本文建立模型的材料为铝, 图1为脉冲激光作用在无缺陷材料表面的示意图, 铝材料的各项力学参数如表1所示。其中, 模型宽度为46 mm, 高度为30 mm。基于上述理论, 模型上表面为自由边界, 左右两侧面为低反射边界, 下表面为固定边界。根据傅里叶原理, 激光超声效应可等效于不同幅值、不同频率的正弦波的叠加, 为了简化模型, 模拟时将激光激励源等效为单一幅值和频率的正弦函数, 设定为:

$$P = \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t). \quad (5)$$

其中 f_0 为频率, t 为激光加载时间。



图1 脉冲激光作用在无缺陷材料表面

Fig. 1 Pulsed laser acts on the surface of non-defective material

表1 铝材料的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of aluminum materials

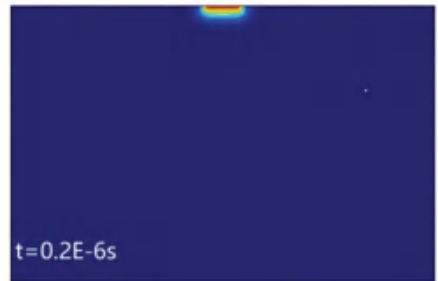
材料	密度/(kg/m ³)	杨氏模量/Pa	泊松比
铝	2 700	70e9	0.33

在方程求解时, 频率 f_0 为 1×10^6 Hz, 时间 t 为 1×10^{-6} s, 激光作用宽度为 5 mm。为了更精确获得激光在铝材料激发超声波的过程和在其中的传播过程以及计算结果, 需要划分合理的网格和设置合适的时间步长。模型网格的大小不能超过波长的 $1/4$ ^[13], 并考虑计算时间, 网格尺寸也不能太小, 在 COMSOL 软件中设定网格单元大小为极细化。为了获取超声波在铝材料中完整的传播过程, 考虑到解的精度, 时间步长设定为 2×10^{-7} s, 时间总长度为 6×10^{-6} s。

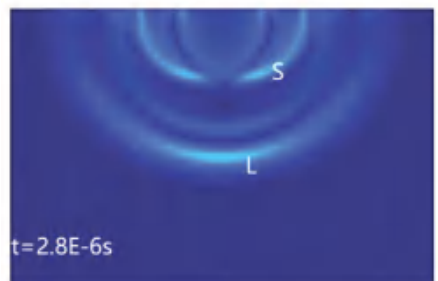
2 数值结果与分析

2.1 超声波的验证

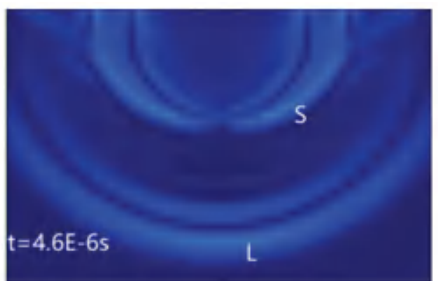
图2为激光激励源作用在模型上表面时不同时刻的超声声场分布模拟情况。从图中可观察到, 在激光作用下, 铝材料内部能同时激发出L波和S波。为了保证数值模拟的准确性, 需要通过计算来验证L波和S波为纵波(L wave)和横波(S wave)。



(a) $t = 0.2E-6$ s



(b) $t = 2.8E-6$ s



(c) $t = 4.6E-6$ s

图2 无缺陷状态下不同时刻的超声场分布

Fig. 2 Ultrasonic field distribution at different moments in a defect-free state

为了获得模型内部各点的应力分布情况, 在 COMSOL 软件中定义变量为压力, 获得压力的时间变化图, 如图 3 所示, 可根据波在传播路径上的时间差计算出波的速度, 结合声场云图即可对产生波形验证。

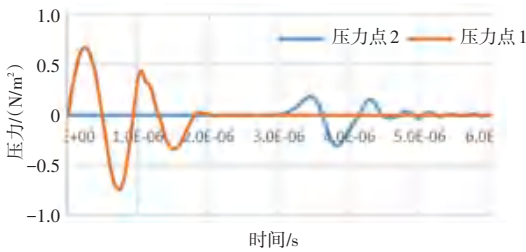


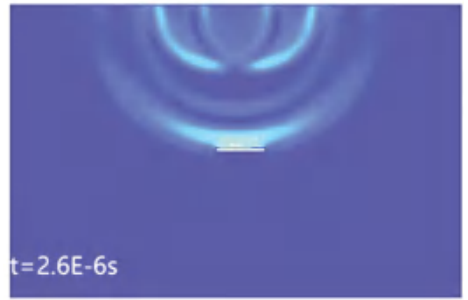
图 3 两个不同点的压力-时间曲线

Fig. 3 Pressure-time curve at two different points

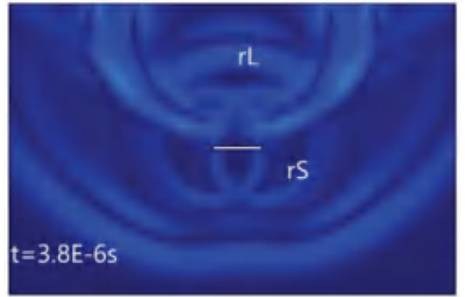
在模型中, L 波的传播路径上不同的两个点定义两个探针, 得到图 3 所示的压力时间曲线。两点之间的距离为 $l = 20 \text{ mm}$, 两点首次出现波峰时分别对应的时刻为 $\nabla t = 3.500 - 0.247 = 3.253 (10^{-6} \text{ s})$, 计算得在铝材料中 L 波速度为 $\frac{l}{\nabla t} = 6148 \text{ m/s}$, 而根据查阅资料, 纵波在铝块中传播速度为 6260 m/s , 相对误差约为 1.8% 。两者吻合较好。同理, 可计算出所建立模型中 S 波传播速度为 3166 m/s , 而横波在铝中理论传播速度为 3103 m/s , 相对误差约为 2% 。由以上分析可以看出, 计算值与理论值较为吻合, 此等效激光激励源可以在铝材料中产生纵波和横波, 仿真结果可信度较高。

2.2 存在缺陷时超声传播特性分析

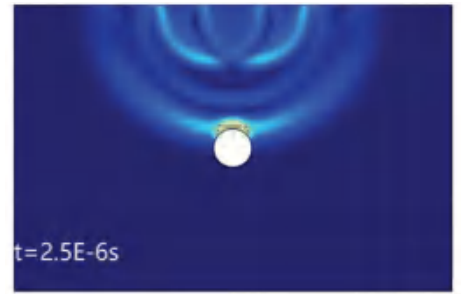
为了检验激光激发超声是否能够对铝材料的内部缺陷进行检测, 进行数值仿真模拟了激光超声与模型内部缺陷(裂纹与气孔)之间相互作用的过程和特性。图 4 为激励源激发超声波与带内部缺陷模型不同时间的数值仿真结果, 呈现了激光超声与内部裂纹和气孔的相互作用过程。其中, 模型中裂纹宽度与高度分别为 5 mm 和 0.3 mm , 气孔半径为 2 mm 。从图 4 中可以看出: 当纵波传播遇到内部裂纹后会发生强烈的反射, 形成反射波 rL, 并且反射波信号主要分布于垂直裂纹方向, 能量较为集中, 同时产生微弱的横波信号。当纵波与内部气孔相互作用时, 也会发生反射, 产生反射波 rL, 并且有波形发生模态转换, 形成横波 rS。与裂纹相比, 与气孔相互作用发生模态转换产生的横波能量较为集中, 幅值较大。因此, 在实际检测材料内部缺陷时, 可依据以上分析对裂纹和气孔两种缺陷进行确定。



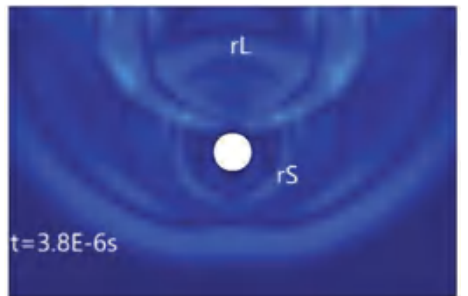
(a) 2.6E-6 s



(b) 3.8E-6 s



(c) 2.5E-6 s



(d) 3.8E-6 s

图 4 有缺陷状态下不同时刻的超声场分布

Fig. 4 Ultrasonic field distribution at different times in the defective state

2.3 模型中关于缺陷的分析

在数值模拟中, 激光激发的超声波与材料内部缺陷(裂纹和气孔)相互作用时能够产生能量集中的反射纵波。因为本文针对内部裂纹缺陷进行分析, 所以主要应用纵波的特性来分析缺陷对超声信号的影响, 从而确定材料内部缺陷的位置。通过获得反射波信号反映的时间节点和确定的纵波波速,

便可计算出内部缺陷至材料表面的直线距离,从而判断缺陷所在位置。

结合图4超声波与缺陷相互作用的过程云图与图5垂直方向位移分量随时间变化的波形图,可以确定波形图中第二个负向波峰前一下降沿为信号接收点接收到反射波的时间节点。以缺陷裂纹为例,设信号接收点与缺陷表面之间的距离为 S ,纵波波速为 V_l ,接收到反射波的时刻为 T ,因此有:

$$2S = V_l \times T. \quad (6)$$

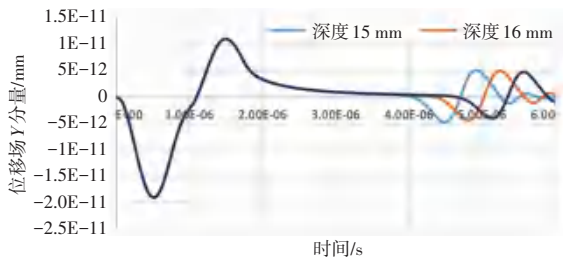


图5 不同深度缺陷下的超声信号

Fig. 5 Ultrasonic signals at different depths of defects

为了检验模型确定材料内部缺陷的准确性,对不同深度的缺陷在同一探测点进行了超声信号的接收,计算多组采集数据,如表2所示:

表2 不同深度缺陷的计算

Tab. 2 Calculation of different defect depth

深度/mm	T/s	$2S/mm$	$2S'/mm$	相对误差/%
15	4.42×10^{-6}	27.67	29.4	6
16	4.38×10^{-6}	27.42	27.4	3
17	4.0×10^{-6}	25.04	25.4	1.4

根据同一探测点对不同深度的裂纹进行位置分析,通过计算获得理论路程 $2S$,而模型中声波传播实际路程 $2S'$,理论值与实际值的相对误差在6%以内,误差较小。导致误差存在的主要因素为接收反射波时对应时刻的读数。在图5中也可发现:随着缺陷的埋藏深度逐渐变大,表面接收到的反射波信号也逐渐减小。

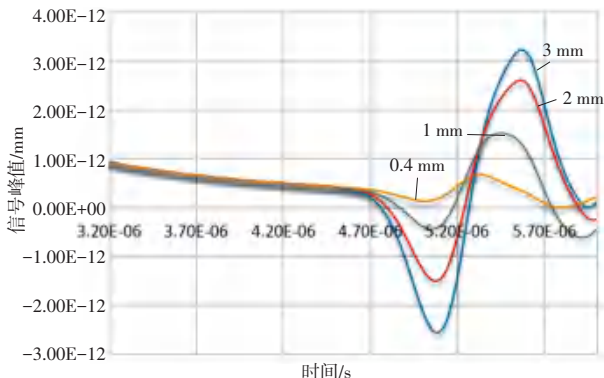


图6 不同宽度缺陷下的超声信号

Fig. 6 Ultrasonic signals with different width defects

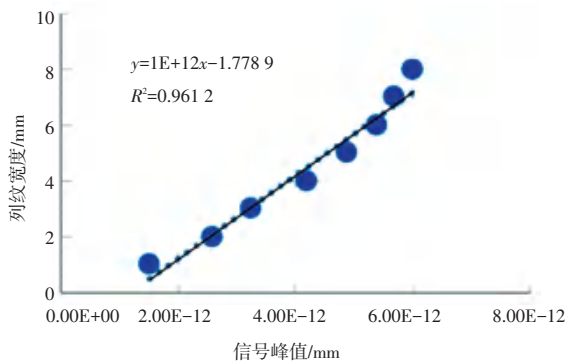


图7 裂纹宽度与信号峰值之间的关系

Fig. 7 Relationship between crack width and signal peak

如图7为不同宽度的内部缺陷对应的超声信号之间的关系。从图7可以看出,裂纹宽度从3 mm逐渐减少到0.4 mm时,反射波信号幅值也对应减小;当缺陷宽度小于0.4 mm时,反射波信号已经十分微弱,幅值很小,此时很难据此定性反映出裂纹的宽度。该数值仿真结果初步检验了激光超声对于不同宽度的内部缺陷进行检测的可行性和检测范围。

为了更加直观、准确地反应裂纹的宽度特征,图7给出了裂纹宽度与反射波信号幅值的散点图,直线为拟合关系数据。由此看出,裂纹宽度与信号峰值成正相关关系。拟合相关系数约为0.96。利用这种线性关系,通过获得反射波信号峰值可计算出相应的裂纹宽度。

3 结束语

本文基于有限元分析方法,利用COMSOL软件,建立了激光超声无损检测铝材料内部缺陷的有限元数值模型,对激光激发超声波机制进行了数值模拟,探究了激光超声在铝材料中的产生和传播过程,对横波和纵波的产生进行了验证,模拟了激光超声与材料内部缺陷的相互作用的过程,仿真结果表明:在激光作用下,在铝材料中能够产生超声波,当超声信号与材料内部缺陷相互作用时,在缺陷表面会发生反射和模态转换;缺陷的深度会影响反射波信号到达探测点的时间和反射波的幅值,可实现宽度0.4 mm以上的裂纹的检测;信号峰值与裂纹宽度之间存在正相关关系,利用这一关系,可对不同宽度的裂纹进行判断。

参考文献

- [1] 徐志祥,黄建华,王铮恭,等. 激光超声检测带涂层金属表面裂纹的数值研究[J]. 激光技术,2018,42(6):801-805.
- [2] 李巧霞. 金属表面缺陷激光超声检测技术研究[D]. 中北大学,2018.
- [3] 黄燕杰,尚建华,任立红,等. 用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究[J]. 应用光学,2019,40(1):150-156.