

利用激光超声技术研究表面微裂纹 缺陷材料的低通滤波效应*

王敬时¹⁾ 徐晓东¹⁾ 刘晓峻^{1)†} 许钢灿²⁾

1) 南京大学声学研究所, 近代声学教育部重点实验室, 南京 210093)

2) 杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

(2008 年 3 月 31 日收到, 2008 年 8 月 22 日收到修改稿)

利用激光激发声表面波的理论模型, 研究了被激发宽带声表面波在具有表面微裂纹缺陷金属材料上的传播特性. 对具有不同形状的表面缺陷模型进行了数值分析. 结果表明: 表面微裂纹缺陷有明显的低通效应, 缺陷深度越大高频截止频率就越低, 缺陷深度与低通滤波的截止频率呈近似线性关系, 缺陷的宽度增大对表面波透射能量有明显的衰减作用.

关键词: 激光超声, 声表面波, 有限元方法, 低通滤波器

PACC: 4335, 4385

1. 引言

由于声表面波的近表面传播特性, 声表面波在材料的表面和近表面性质表征方面具有独特的优势^[1, 2]. 其研究主要包括以下几个方面: 一是利用声表面波在层状或非均匀材料中传播时的色散特性, 根据声传播理论反演层状材料和非均匀材料的声学参数^[3, 4]. 二是传播媒质的弹性参数决定了材料表面传播的声表面波特性, 利用声传播媒质与周围介质的相互作用关系, 发展各类声表面波传感器^[5], 例如引人注目的氢传感器^[6]. 三是声表面波脉冲对材料表面和亚表面微小裂纹非常敏感, 根据声表面波脉冲在材料中传播的反射波时空分布, 标定材料表面和近表面缺陷位置^[7]. 对于材料缺陷的表征, 人们已成功地建立了材料表面和近表面的残余应力及其应变与声表面波传播特性之间的相互关系^[8]. 然而, 利用声表面波对材料表面和近表面微裂纹缺陷表征等方面仍有许多问题值得深入分析, 如复杂表面瑞利波传导过程及动力机制等^[9, 10].

与传统的压电检测技术相比, 激光激发和检测超声技术具有非接触、宽带及高信噪比等优点, 已被广泛应用于固体材料的无损评价和材料的弹性参数

表征^[9-12]. 激光超声是利用脉冲激光照射被测固体材料, 材料吸收激光能量后产生热弹效应, 在被测材料中激发超声波. 通过检测和分析材料中传播的宽带声波, 可以得到材料的相关参数. 本文利用脉冲激光激发声波的宽带特性, 分析了具有表面微裂纹缺陷的铝板样品中在激光脉冲激发下的瞬态温度场和热弹位移场, 探讨了不同微裂纹缺陷与声表面波传播特性之间的关系, 还研究了材料的表面和近表面微裂纹缺陷的低通滤波效应.

2. 理论模型

2.1. 瞬态温度场的产生

将脉冲激光聚焦为线源, 当线状激光源与表面微裂纹缺陷平行时, 对于脉冲宽度为 8 ns 的脉冲激光, 其理论模型可简化为如图 1 所示的二维绝热模型. 图 1 中的激发点位于直角坐标系原点正上方对应的样品上表面, x 轴正方向为缺陷所在一侧的声表面波传播方向, y 轴为材料的深度方向, L 为样品铝板的厚度. 在 t 时刻的瞬态温度场分布 $T(x, y, t)$ 满足二维热传导方程

* 国家自然科学基金(批准号: 10674069, 10574071)资助的课题.

† E-mail: liuxiaojun@nju.edu.cn

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) - \rho c \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = - Q(x, y, t), \quad (1)$$

式中 k 为材料的热导率, ρ 为材料的密度, c 为材料的比热容. 热源表达式可表示为

$$Q(x, y, t) = \frac{Q_0 \beta}{2\pi r_0^2} \exp(-\beta y) f(x) g(t), \quad (2)$$

式中 Q_0 为一个脉冲中样品吸收的总能量, β 为介质的光吸收系数, r_0 为激光束半径, $f(x)$ 和 $g(t)$ 分别为脉冲激光空间和时间的分布函数. 对于聚焦线源宽度为 $2x_0$ 、上升时间为 t_0 的脉冲激光, $f(x)$ 和 $g(t)$ 可表示为

$$f(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right), \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0^2} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right).$$

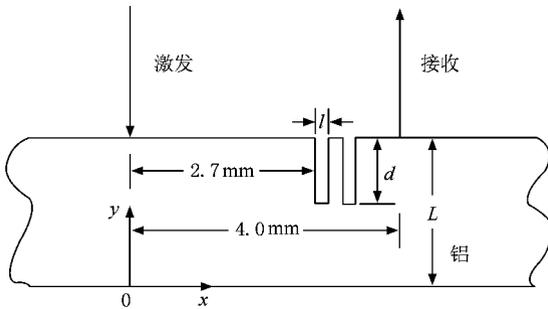


图 1 激光激发具有表面缺陷样品的原理示意图

2.2. 热弹理论

由热扩散方程可知, 样品吸收脉冲激光能量后局部受热膨胀并产生瞬态位移场. 热弹效应引起的位移 $U(x, y, t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{U} \\ & - \alpha(3\lambda + 2\mu) \nabla T(x, y, t) \\ & = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 λ 和 μ 为样品材料的 Lamé 常数, ρ 为材料的密度, α 为材料的热膨胀系数. 样品的上下表面均满足自由边界条件

$$n[\boldsymbol{\sigma} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T(x, y, t)\mathbf{I}] = 0, \quad (5)$$

式中 n 为垂直于表面的单位矢量, \mathbf{I} 为单位张量, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量. 相应的位移和速度的初始条件为

$$U(x, y, t)|_{t=0} = \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

2.3. 有限元模型的构建

利用中心差分法离散热传导方程(1), 建立模型的瞬态热传导有限元方程如下:

$$[C]K\dot{\boldsymbol{\Phi}} + [K]K\boldsymbol{\Phi} = \{H\}, \quad (7)$$

式中 $[C]$ 为热容矩阵, $[K]$ 为热传导矩阵, $\{H\}$ 为载荷矩阵, $\boldsymbol{\Phi}$ 为温度矢量.

热弹方程(4)离散后的有限元方程可表示为

$$[M]K\ddot{U} + [L]KU = \{P\}, \quad (8)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $[L]$ 为刚度矩阵, $\{U\}$ 为节点位移矩阵, $\{P\}$ 为载荷矩阵.

根据初始条件、自由边界和边界绝热条件, 利用中心差分法逐步迭代求解方程(7)和(8), 可得该样品系统的温度场和位移场, 进而模拟出样品中热传导和声表面波产生及传导过程.

3. 数值模拟和结果分析

下面模拟计算激光激发声表面波在样品中的传导过程. 计算中所采用的样品为铝板, 其厚度 L 为 4.4 mm, 缺陷距激光激发点 2.7 mm, 检测点距激光激发点 4 mm. 选取缺陷宽度 l 为 0.1 mm, 缺陷深度 d 分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm 的表面缺陷材料为第一组样品, 选取缺陷深度 d 为 0.2 mm, 缺陷宽度 l 分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm 的表面缺陷材料为第二组样品. 分别计算和分析被激发声波在各组样品中的传播特性以及缺陷的参数与通过缺陷的声波之间的相互关系. 计算中所采用的金属铝热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/K$, 杨氏模量为 $7 \times 10^{10} N/m^2$, 泊松比为 0.34, 光反射率为 0.9, 比热容为 880 J/kgK, 密度为 2700 kg/m³, 热导率为 240 W/Km.

首先分析宽带声脉冲在第一组样品上的传播特性. 在模型中选取上升时间为 3 ns、聚焦线源半宽度为 0.1 mm 的脉冲激光为激发源在样品上激发声波, 当在材料表面传播的声波遇到材料表面的缺陷时, 受缺陷影响, 一部分声波被反射, 另一部分通过缺陷继续传播. 图 2 给出了表面声脉冲通过具有相同宽度而深度分别为 0.2 和 0.3 mm 缺陷的透射波形. 比较两个时域信号可以发现, 当声脉冲通过深度为 0.3 mm 缺陷时, 该声脉冲相对于通过深度为 0.2 mm 缺陷后的声脉冲, 波形的上升沿和下降沿明显变缓, 表明其高频成分的缺失, 即随着缺陷深度的增加, 通过缺陷的声脉冲中声波的高频部分减弱, 而低频声

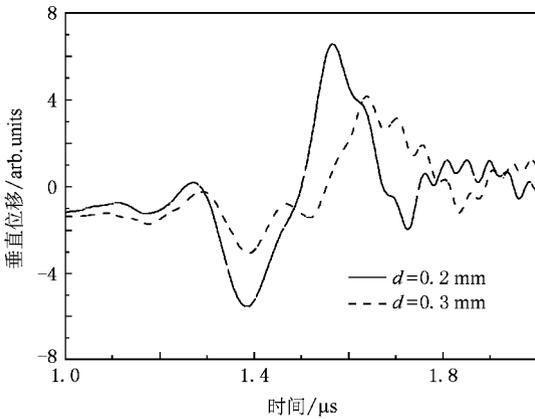


图2 声脉冲通过宽度为0.1 mm、深度分别为0.2和0.3 mm缺陷后的透射波形

波得以通过.图3给出了通过宽度相同而深度不同的表面缺陷后声脉冲的幅频特性曲线.图3中的实线是脉冲线源在无缺陷样品上激发声波的频谱图,其带宽在1—10 MHz之间.根据声速与波长之间的关系 $\lambda = V/f$ 可知,相应的被激发声波波长分别为2.8和0.28 mm,远小于实验样品的厚度,在样品表面上被激发的声波可近似为声表面波.比较在四种不同表面缺陷材料中传播的声表面波幅频特性(图3)可以发现,当缺陷深度增加时,通过缺陷后的声表面波带宽减小,其中高频截止频率逐渐降低,而低频成分保持不变,表面缺陷对传播中的声波表现出明显的低滤波效应.分别提取不同表面缺陷材料相应的截止频率(图4),该截止频率与样品缺陷的深度呈近似线性关系,即声表面波的截止频率随着缺陷深度的增加而线性降低.根据该线性关系,由声速、波长与频率的关系可知,当声表面波波长大于约3倍的缺陷深度时,声表面波能够顺利通过缺陷继续传

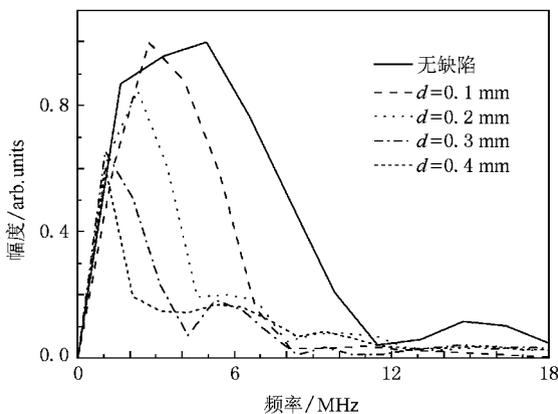


图3 在具有不同深度表面缺陷样品上传播的表面声波频谱

播,波长小于约3倍缺陷深度的声波则被缺陷反射而无法传播.

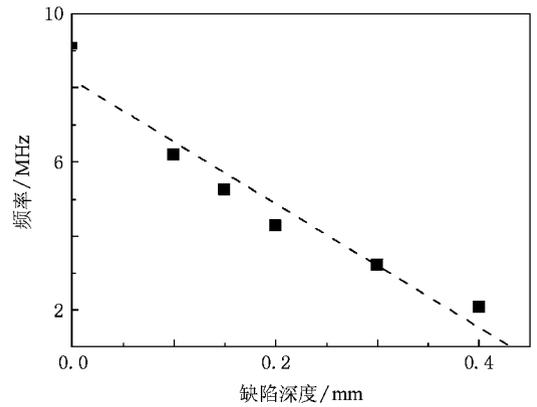


图4 瑞利波高频截止频率随表面缺陷深度的变化

保持样品缺陷深度不变,分析缺陷宽度对声脉冲传播特性的影响.图5为相同脉冲线源在第二组样品中分别激发的声脉冲通过缺陷深度为0.2 mm、宽度分别为0.2和0.3 mm的不同表面微裂纹后的时域图.比较这两个通过微裂纹后的声脉冲可以发现,除了在强度上有明显差别外,其波形的上升沿和下降沿以及声脉冲宽度并无明显变化.图6为声脉冲通过深度相同而宽度不同的四类缺陷后的频谱图.从图6可以发现,缺陷宽度不影响声脉冲的带宽,但缺陷宽度的增加会导致缺陷的边界作用更加明显,其相应频谱的主频逐渐前移,即其缺陷的宽度对频谱中高频声波的衰减作用增强,表现在通过的声表面波强度逐渐降低,尤其是通带内高频部分衰减更为明显,而低频部分却基本保持不变.

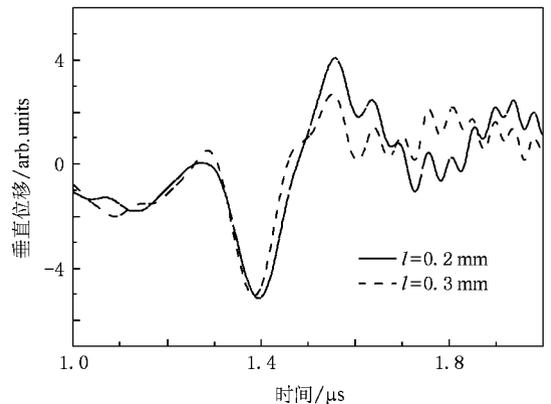


图5 声脉冲通过深度为0.2 mm、宽度分别为0.2和0.3 mm缺陷后的透射波形

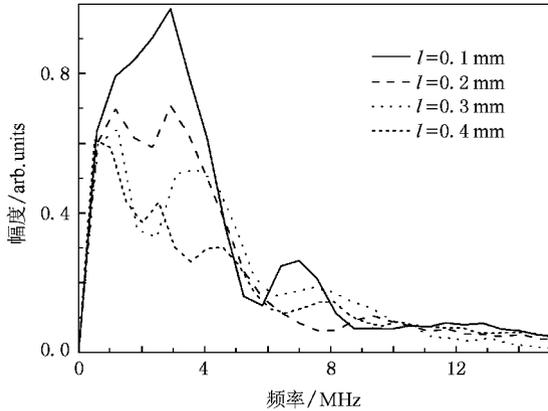


图 6 在不同宽度表面缺陷样品上传播的表面声波频谱

4. 结 论

数值分析结果表明,当脉冲激光激发的宽带声表面波通过具有表面微裂纹的表面缺陷材料时,表面微裂纹对通过的声表面波具有显著的低通滤波效应,且通过的声表面波截止频率与缺陷深度具有近似的线性关系,其低通截止频率对应的声波波长与缺陷深度呈近似的 3 倍关系.当缺陷的深度一致而改变缺陷的宽度时,缺陷宽度的大小不影响传播的低通特性,但由于散射作用,通带内声表面波的能量会随着宽度的增加迅速衰减,尤其是高频部分衰减更为明显.这些工作为表面微裂纹的定位和缺陷大小的定量检测提供了理论依据.

- [1] Scruby C B, Drain L E 1990 *Laser Ultrasonics Techniques and Applications* (New York : Adam Hilger)
- [2] Hu W X, Qian M L, Cantrell J H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4031
- [3] Xu X D, Zhang S Y, Zhang F F, Liu T Z, Wasa K 2003 *Acta Acoust.* **28** 201 (in Chinese) [徐晓东、张淑仪、张飞飞、刘天柱、Wasa K 2003 声学学报 **28** 201]
- [4] Xiao X, You X Y, Yao S Y 2007 *Acta Phy. Sin.* **56** 2428 (in Chinese) [肖 夏、尤学一、姚素英 2007 物理学报 **56** 2428]
- [5] Hashimoto K Y 2000 *Surface Acoustic Wave Device in Telecommunications : Modeling and Simulation* (Berlin : Springer)
- [6] Yamanaka K, Ishikawa S, Nakaso N 2006 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **53** 793
- [7] Zhang J Z 1993 *Nondestructive Testing Technology and Its Application* (Beijing : Science Press) (in Chinese) [张俊哲 1993 无损检测技术及其应用 (北京 科学出版社)]
- [8] Duquenois M, Ouafoutou M, Qian M L, Jenota F, Ouraka M 2001 *NDT E. Int.* **34** 355
- [9] Hevin G, Abraham O 1998 *NDT E. Int.* **31** 289
- [10] Cho Y, Rose J L 2000 *Int. J. Sol. Struct.* **37** 4103
- [11] Lomonosov A, Mikhalevich V G, Hess P, Knight E Y, Hamilton M F, Zabolotskaya E A 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 2093
- [12] Shen Z H, Zhang S Y, Chen J C 2001 *Anal. Sci.* **17** (Suppl.) 204

Low pass effect of surface defect metal based on laser ultrasonic *

Wang Jing-Shi¹⁾ Xu Xiao-Dong¹⁾ Liu Xiao-Jun^{1)†} Xu Gang-Can²⁾

1) *Institute of Acoustics , Key Laboratory of Modern Acoustics of Ministry of Education , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)*

2) *Hangzhou Applied Acoustics Research Institute , Hangzhou 310012 , China)*

(Received 31 March 2008 ; revised manuscript received 22 August 2008)

Abstract

The travelling properties of laser-generated surface acoustic wave with broad bandwidth , which propagated on a sample with surface defects , have been investigated in theory . The numerical results of theoretical models with different defects indicate that the surface defects worked as low-pass filter for the travelling surface acoustic waves . The cut-off frequency of low-pass filter is linearly related to the depth of the defect , and decreased against the increasing depth of the defect . The amplitude of the travelling surface acoustic wave is seriously attenuated with increasing width of surface defect . The numerical results provide a theoretical basis for quantitative detection of the surface defects .

Keywords : laser ultrasonic , surface acoustic wave , finite element method , low-pass filter

PACC : 4335 , 4385

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10674069 , 10574071).

† E-mail : liuxiaojun@nju.edu.cn