

文章编号: 1001-3806(2010)01-0091-04

弹性声波与表面缺陷相互作用的数值模拟

赵艳, 严伟, 沈中华, 陆建, 李相银
(南京理工大学理学院, 南京 210094)

摘要: 为了分析材料表面缺陷对声表面波传播的影响, 以弹性动力学理论为基础, 采用有限元方法数值模拟了声表面波沿金属表面传播及其与表面缺陷的相互作用。通过数值模拟弹性声表面波与不同深度、不同宽度的表面缺陷相互作用过程, 得到了声表面波经不同表面缺陷后的反射和透射表面波波形, 并对波形进行快速傅里叶变换分析。结果表明, 弹性声表面波与表面缺陷相互作用后, 产生反射 Rayleigh 波和透射 Rayleigh 波; 随着表面缺陷深度和宽度的增加, Rayleigh 波反射率相应增加, 而透射率相应减小。

关键词: 激光物理; 弹性声表面波; 表面缺陷; 有限元方法

中图分类号: TN249; O426 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.026

Numerical simulation of elastic acoustic wave interaction with surface-breaking defects

ZHAO Yan, YAN Wei, SHEN Zhong-hua, LU Jian, LI Xiang-yin

(School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the influence of defect on the surface acoustic wave, based on the theory of elastodynamics, the interaction between elastic surface acoustic waves and surface-breaking defect was simulated numerically by means of the finite element method. The interaction between the surface acoustic wave and surface-breaking defects in different depth and width was calculated, and the reflected and transmitted surface acoustic waves were obtained. And then the reflection and transmission coefficients were obtained by means of fast Fourier transform. The results show that the reflected and transmitted surface acoustic waves are induced by the interaction of defect on the acoustic wave. The reflection coefficient gradually increases and transmission coefficient decreases with the depth and width increasing.

Key words: laser physics; surface acoustic wave; surface-breaking defect; finite element method

引言

在工业生产中, 由于原材料材质、加工工艺、热处理等方面的原因, 生产的工件表面可能存在缺陷。这些缺陷会在外加应力、高温、高压和恶劣环境的作用下快速地增长, 如果不能及时检测出工件表面的缺陷, 就有可能导致重大恶性事故的发生。因此, 表面缺陷的检测在工业生产中具有很重要的意义。而超声检测技术是一种检测可靠、测定迅速、便于在线使用、对人体无害的检测技术, 已经成为人们一种新的选择^[1-2]。其中弹性声表面波的能量主要集中在材料表面附近传播, 且具有无色散、不易衰减等特点, 因而特别适用于材料表面缺陷的检测^[3]。因此, 许多国内外学者致力于弹性声表面波与缺陷相互作用的研究^[3-7]。CRANE

等人^[5]考虑了低频的弹性波在遇到平板中的缺陷后发生的散射过程, 提出了基于反射系数的计算来定量表达缺陷的特征对超声信号的影响。SONG 等人^[6]采用频域边界元法验证了实验上得到的表面波能量的透射系数与表面缺陷深度的联系。ZHAO 等人^[7]在 2 维平面内采用边界元法结合垂直模式扩展技术研究了超声导波经过表面缺陷及内部缺陷时的散射过程。

有限元方法因具有能灵活处理复杂的几何结构, 可得到全场数值解等优点已经应用于声学领域, 如作者采用有限元数值模拟了圆柱体中的 Rayleigh 波^[8], KASS 等人用有限元方法研究了单层铜材料中激光激发的频率低于 100kHz 超声信号^[9]。作者采用有限元方法数值模拟弹性声表面波与不同表面缺陷相互作用过程, 探讨缺陷尺寸对声表面波反射率和透射率的影响。

1 理论模型

如图 1 所示, 作用在 $x = 0.0$ 处的线性力源在铝块中激励出横波、纵波、头波、Rayleigh 波、掠面纵波等声

作者简介: 赵艳 (1979-), 女, 讲师, 现主要从事激光超声的有限元模拟与光学检测技术研究。

E-mail: zhaoyan7906@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2009-02-16; 收到修改稿日期: 2009-02-28

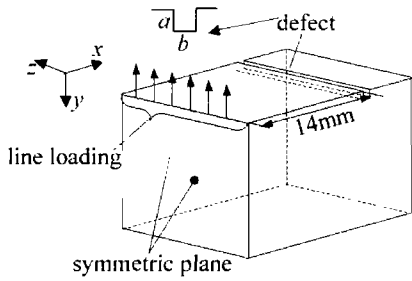


Fig. 1 Schematic diagram of elastic surface acoustic wave interaction with surface-breaking defect (a is depth of defect; b is width of defect)

波,声表面波沿着铝块表面 x 轴方向传播,并与表面缺陷相互作用。图中矩形表面缺陷位于 $x = 14\text{mm}$ 处铝块表面,并平行于 z 轴横贯铝块表面。在建立有限元模型时,由于结构的对称性,本文中考虑的是线性力源激励的平面声波与垂直于传播方向的缺陷相互作用二维问题。

图2中给出了 $x = 0.0$ 处的线性作用力源及其频谱。

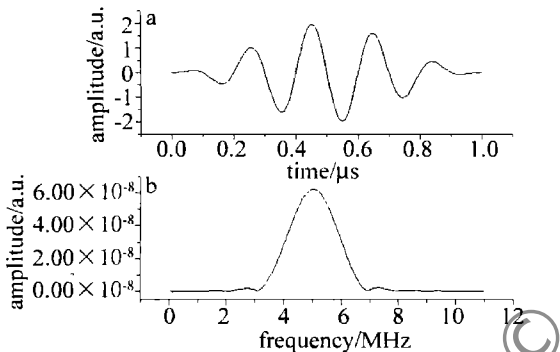


Fig. 2 a—excitation pulse b—fast Fourier transform spectrum

谱。作用力源的表达式为:

$$f(t) = \left[1 - \cos\left(2\pi m \frac{t}{T}\right) \right] \sin\left(2\pi mn \frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

式中, t 为时间,取时间常量 $T = 1.0\mu\text{s}$, $m = 1$, $n = 5$ 。

对于各向同性弹性固体材料,声波在材料中传播的数学描述为:

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{U} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{f}_{\text{ext}} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为位移矢量, λ 和 μ 为拉密常数, ρ 为材料的密度,施加在介质上的作用力源 \mathbf{f}_{ext} 为外力源矢量。

采用1阶四边形有限元单元对结构进行离散化,建立2维有限元模型。有限元单元长度的选取标准为:

$$L_e \leq \frac{1}{10} \frac{c}{f_a} \quad (3)$$

式中, L_e 为有限元网格大小, c 为声波波速, f_a 为声波频率。

根据变分原理,弹性运动方程的有限元形式为:

$$[\mathbf{M}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{H}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}_{\text{ext}}\} \quad (4)$$

式中, $\{\mathbf{U}\}$ 表示位移矢量, $\{\dot{\mathbf{U}}\}$ 为加速度矢量, $[\mathbf{M}]$ 为质量矩阵, $[\mathbf{H}]$ 为刚度矩阵,外力矢量经过变换的有限

形式为 $\{\mathbf{F}_{\text{ext}}\}$ 。采用数值积分技术求解(4)式,就可以得到作用力源在材料中激励的弹性声波场。

2 结果和讨论

根据上述有限元理论,数值模拟了弹性声表面波与不同深度,不同宽度的缺陷相互作用过程。计算中所用铝材料的密度为 $\rho = 2700\text{kg/m}^3$,纵波波速为 $c_1 = 6391\text{m/s}$,横波波速为 $c_2 = 3109\text{m/s}$,Rayleigh波波速为 $c_R = 2904\text{m/s}$ 。位于 $x = 14\text{mm}$ 处的材料表面缺陷为矩形,它的尺寸列在表1中。

Table 1 The size of defects used in the numerical calculation

defect No.	depth a/mm	width b/mm
1	0.136	0.540
2	0.169	0.540
3	0.203	0.540
4	0.242	0.540
5	0.254	0.540
6	0.353	0.540
7	0.443	0.540
8	0.540	0.540
9	0.540	0.136
10	0.540	0.169
11	0.540	0.203
12	0.540	0.242
13	0.540	0.254
14	0.540	0.353
15	0.540	0.443

图3中给出了计算中所建立的2维有限元模型以及 $t = 2.2\mu\text{s}$ 时的超声波场。从图中可以看出:作用力

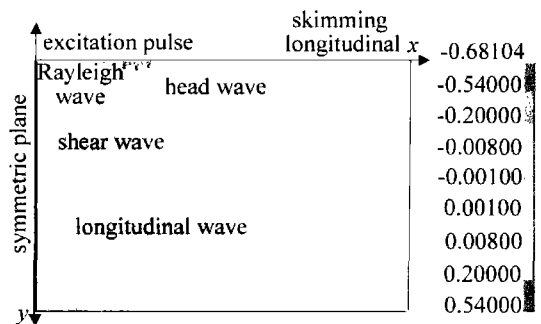


Fig. 3 Acoustic waves generated by the excitation pulse at $t = 2.2\mu\text{s}$

源在铝块中同时激励出掠面纵波、纵波、横波、头波和表面声波;首先到达探测点的是传播速度略低于纵波波速的掠面纵波;其次是传播速度略低于横波的表面波(Rayleigh波)。

图4所示的是在距离力源 7.2mm 处,也就是 $x = 7.2\text{mm}$ 处提取的波形。从图中可以看出:先后有两列波到达该点,根据这两列波的到达时间可以判断首先

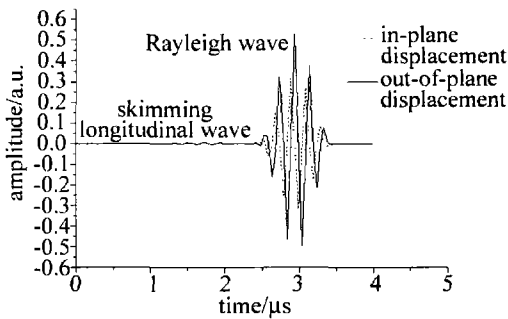


Fig. 4 Signals representing out-of-plane and in-plane displacement at $x = 7.2\text{mm}$

到达的是掠面纵波,其次是 Rayleigh 表面波。另外,从图中还可以看出:掠面纵波的两个位移分量具有相同的相位,而 Rayleigh 波的面内位移分量在时间上落后于面外位移分量 $\Delta t \approx 50\text{ns}$ 。这个时间差相对于相位差 $\Delta\phi = 2\pi f\Delta t = 90^\circ$,这是 Rayleigh 表面波的特点之一。

图 5 所示的是 Rayleigh 波的面内和面外位移分量随距离自由表面深度的变化,其中位移分量都是由最

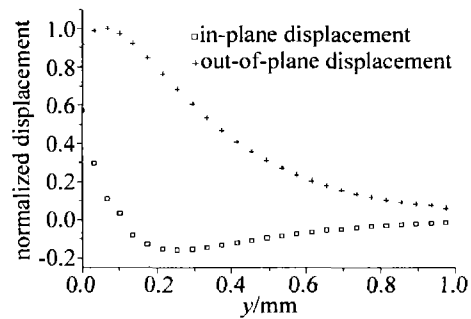


Fig. 5 The in-plane and out-of-plane Rayleigh wave displacement components at $x = 12\text{mm}$

大面外位移分量进行归一化的。数据提取点与作用力源之间的距离为 12mm 。从图中可以看出:Rayleigh 波的位移分量随着距离自由表面的深度增加而衰减。这与采用解析方法计算^[10]得到的 Rayleigh 波特性和说明了所建模型的正确性。

图 6a 所示的是距离作用力源 8mm 处提取的入射波以及经位于 $x = 14\text{mm}$ 处的缺陷(缺陷深为 0.203mm ,

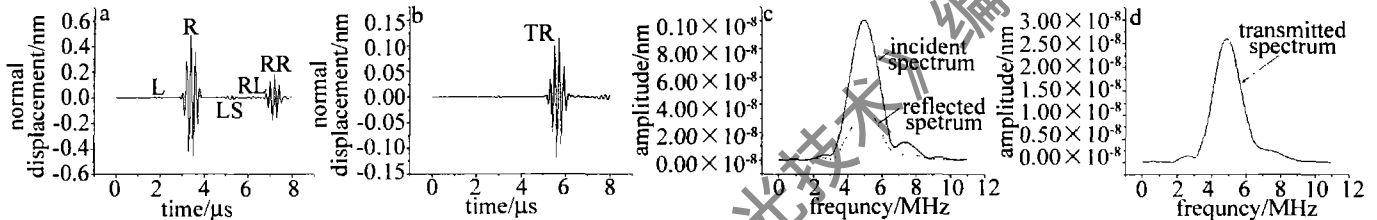


Fig. 6 a—reflected Rayleigh waveform recorded at $x = 8\text{mm}$ b—transmitted Rayleigh waveform at $x = 15\text{mm}$ c—fast Fourier transform spectrum of incident and reflected Rayleigh wave d—fast Fourier transform spectrum of transmitted Rayleigh wave

宽为 0.540mm) 反射后再次到达的超声波。L 表示直接到达的掠面纵波, R 为直接到达的 Rayleigh 波, LS 表示纵波与缺陷相互作用发生模式转换为横波反射到达的波, RL 表示 Rayleigh 波与缺陷相互作用后转换为纵波反射到达的波, RR 表示经缺陷反射后到达的 Rayleigh 波。图 6b 中给出的是距离作用力源 15mm 处提取的经缺陷后的 Rayleigh 透射波。TR 表示 Rayleigh 波经缺陷后的透射波。对图 6a 和图 6b 进行快速傅里叶变换分析,得到入射 Rayleigh 波,反射 Rayleigh 波以及透射 Rayleigh 波的频谱。如图 6c 和图 6d 所示,由于 Rayleigh 波与缺陷相互作用,一部分能量转化为热能或其它波的形式损耗了,因此,反射 Rayleigh 波和透射 Rayleigh 波的幅值相应减小,而且两者能量之和也小于入射 Rayleigh 波的能量。

采用同样的方法,又数值模拟了弹性声波与表 1 中两组缺陷(一组为不同深度、相同宽度的缺陷;一组为相同深度、不同宽度的缺陷)相互作用过程。并对入射 Rayleigh 波,反射 Rayleigh 波和透射 Rayleigh 波进行快速傅里叶变换分析,探讨缺陷深度和宽度对 Rayleigh 波的反射率和透射率的影响。反射率为反射 Rayleigh 波和入射 Rayleigh 波的比值;而透射率为透射 Rayleigh 波和入射 Rayleigh 波的比值。图 7a 和图

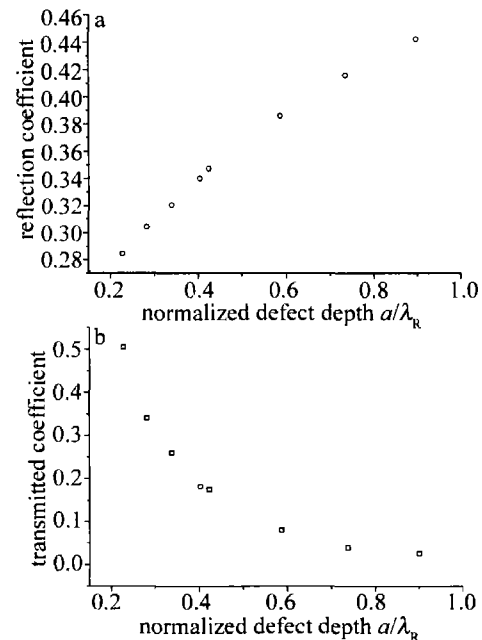


Fig. 7 The reflection coefficient and transmitted coefficient of Rayleigh waves as a function of the normalized defect depth, λ_R is the wave length of Rayleigh wave

7b 所示的分别为 Rayleigh 波反射率和透射率与归一化缺陷深度之间的关系。从图中可见,随着缺陷深度的逐渐增加, Rayleigh 波的反射率也逐渐增加,而 Rayleigh 波的透射率逐渐减小。图 8a 和图 8b 所示的分

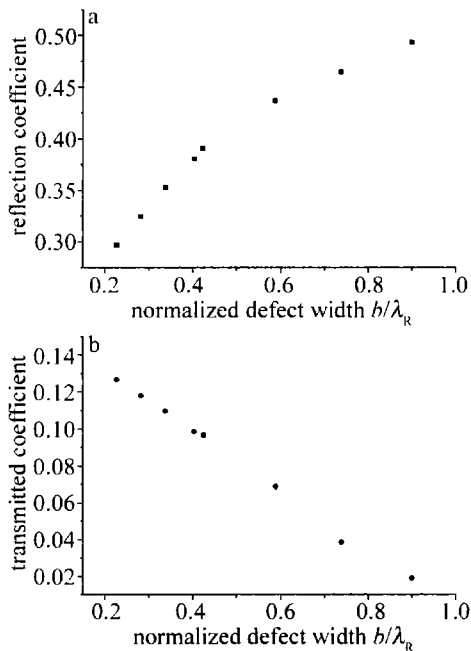


Fig. 8 The reflection coefficient and transmitted coefficient of Rayleigh waves as a function of the normalized defect width, λ_R is the wave length of Rayleigh wave

别为 Rayleigh 波反射率和透射率与归一化缺陷宽度之间的关系。从图中同样可以看出,随着缺陷宽度的增加, Rayleigh 波反射率逐渐增加,而 Rayleigh 波的透射率逐渐减小。

3 结论

采用有限元数值方法研究了弹性声表面波与不同深度、不同宽度的两组缺陷相互作用过程,并探讨了缺陷深度、宽度对 Rayleigh 波的反射率和透射率的影响。

数值结果表明:弹性声表面波与表面缺陷相互作用后,产生反射 Rayleigh 波和透射 Rayleigh 波;随着表面缺陷深度和宽度的增加, Rayleigh 波反射率相应增加,而透射率相应减小。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Sh Y. Laser ultrasound and nondestructive evaluation in materials [J]. Applied Acoustics, 1992, 11(4): 1-6 (in Chinese).
- [2] ZHAO Y, SHEN Zh H, LU J, *et al.* Laser thermo-elastic generated surface acoustic waves on cylindrical coating-substrate system [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 647-650 (in Chinese).
- [3] LIU S W, HUANG J H. Transient dynamic responses of a cracked solid subjected to in-plane loadings [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(18): 4925-4940.
- [4] CHO Y, ROSE J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(30): 4103-4124.
- [5] CRANE L J, GILCHRIST M D, MILLER J J H. Analysis of rayleigh-lamb wave scattering by a crack in an elastic plate [J]. Computational Mechanics, 1997, 19(6): 533-537.
- [6] SONG W T, POPOVICS J S, ALDRIN J C, *et al.* Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete [J]. J Acoust Soc Amer, 2003, 113(2): 717-725.
- [7] ZHAO X L, ROSE J L. Boundary element modeling for defect characterization potential in a wave guide [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(11): 2645-2658.
- [8] ZHAO Y, SHEN Zh H, LU J, *et al.* Simulation on laser-induced surface acoustic wave on isotropic cylinders by finite element method [J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(4): 774-777.
- [9] KASS M, FUKUSHIMA S, GOHSHI Y, *et al.* A basic analysis of pulsed photoacoustic signals using the finite elements method [J]. J A P, 1988, 64(3): 972-976.
- [10] ROSE J L. Ultrasonics waves in solid media [M]. Unisted Kingdom: Cambridge University Press, 1999: 90-95.

(上接第 90 页)

- [3] PAN D R, TAN J C. Deuterium separation by multiple-photon dissociation of 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoromethane in a two-frequency CO₂ laser field [J]. Chinese Journal of Lasers, 1982, 9(3): 152-156 (in Chinese).
- [4] LI T Q, RAN Y, QIN J Y. Study on tuning characteristics of optically pumped cavity NH₃ submillimeter wave laser [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(1): 30-32 (in Chinese).
- [5] TOCHITSKY S Y, SUNG C, TRUBNICK S E, *et al.* High power tunable, 0.5 ~ 0.3THz radiation source based on nonlinear difference frequency mixing of CO₂ laser lines [J]. J O S A, 2007, B24(9): 2509-2516.
- [6] JIANG Y, DING Y J. Efficient terahertz generation from two collinearly

- propagating CO₂ laser pulses [J]. A P L, 2007, 91(9): 091108.
- [7] LI Zh H, LI Y D, LIAO J M, *et al.* Experimental investigation of time-synchronized dual-wavelength TEA CO₂ laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 37-40 (in Chinese).
- [8] HARRISON R G, BUTCHER S R. Tunable simultaneous double wavelength operation of a TEA CO₂ laser [J]. Phys Lett, 1977, A61(3): 154-156.
- [9] HARD T M. Laser wavelength selection and output coupling by a grating [J]. Appl Opt, 1970, 9(8): 1825-1830.
- [10] APOLLONOV V V, GRIBENYUKOV A I, KOROTKOVA V V, *et al.* Subtraction of the CO₂ laser radiation frequencies in a ZnGeP₂ crystal [J]. Quantum Electronics, 1996, 26(5): 469-470.