

激光与光电子学进展

基于非线性超声的铝板裂纹参数检测研究

詹湘琳^{**}, 孙李明恒^{*}

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 材料早期性能退化阶段的损伤形式以微裂纹为主, 微裂纹与超声的非线性作用能够表征材料的损伤情况。根据经典微裂纹非线性弹簧模型, 从理论上分析裂纹参数对非线性系数的影响, 建立不同裂纹参数的铝合金板三维模型, 使用高频 Lamb 波进行数值仿真, 研究长度、宽度和角度与非线性系数的关系, 结果表明非线性系数随裂纹长度增加而增加, 随裂纹宽度变宽而减小。在 Lamb 波传播方向与垂直方向布置三个接收探头, 三个接收探头的非线性系数随角度增加而变化, 因此通过三点的非线性系数值可以判断裂纹的角度。这一研究工作对后续使用高频 Lamb 波定量检测微裂纹角度具有重要意义。

关键词 材料; 金属材料; 非线性超声; Lamb 波; 损伤评价

中图分类号 TB559 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1716002

Detection of Crack Parameters of Aluminum Plates Based on Nonlinear Ultrasonic

Zhan Xianglin^{**}, Sun Limingheng^{*}

*College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China*

Abstract The damages formed in the early stage of degradation are mainly micro-cracks, and the nonlinear effect between micro-cracks and ultrasound can characterize the damage of materials. In this paper, the influence of the crack parameters on the nonlinear coefficient is analyzed theoretically based on the classical microcrack nonlinear spring model. Then, three-dimensional models of aluminum alloy plates with different crack parameters are established. High-frequency Lamb waves are used for numerical simulations to study the relationships between nonlinear coefficients and the length, width and angle. The experimental results show that as the length of the crack increases, the nonlinear coefficient increases; the width of the crack increases, and the nonlinear coefficient decreases; when three receiving probes are arranged in the Lamb wave propagation direction and the vertical directions, the three-point nonlinear coefficient changes with the angle. The angle of the crack can be roughly judged by the three-point nonlinear coefficient value. The research work is of great significance for the subsequent use of high-frequency Lamb waves to quantitatively detect the angle of micro-cracks.

Key words material; metallic material; nonlinear ultrasonic; Lamb wave; damage assessment

OCIS codes 160.3900; 120.4290; 000.2658

收稿日期: 2020-12-15; 修回日期: 2020-12-31; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61102097)

通信作者: *lmh_sun@163.com; **xlzhan@cauc.edu.cn

1 引言

在民航领域,铝合金材料具有质量小、耐腐蚀等优点,应用十分广泛。目前,在国内主要的干线客机 B767、B747 和 A320 上,铝合金使用率均超过 75%。铝合金工件最常见的损伤形式是疲劳微裂纹,构件内部的微裂纹会随着使用时间的累积而扩展,逐渐形成宏观裂纹^[1],导致构件失效而引发事故。研究表明,早期性能退化阶段占据材料疲劳寿命期的 80%~90%^[2]。因此,对铝构件早期的微裂纹检测十分必要。

传统线性兰姆(Lamb)波检测方法是利用超声 Lamb 波在损伤处传播时发生偏折、模态转换等特点,有效检测出宏观缺陷^[3]。但理论表明,这种方法只能检测出尺寸大于半波长的缺陷,对于微裂纹检测存在较大的局限性^[4],而非线性超声(Nonlinear Ultrasonic)能够有效检测出小于半波长的损伤^[5]。非线性 Lamb 波检测的基本原理是利用裂纹两侧在超声作用下相互碰撞和摩擦产生的非线性应力-应变关系,研究超声波非线性特征,这些非线性特征能够表征材料的内部损伤情况^[6]。

国内外学者对使用超声检测材料损伤开展了大量研究。邓明晰等^[7-8]针对 Lamb 波在材料中的传播特性,提出了一种相速度匹配、群速度失配的超声 Lamb 二次谐波时域测量方法。Tie 等^[9]通过数值仿真与实验的方式,研究 Lamb 波非线性特征与复合材料低速冲击损伤的关系,证明 Lamb 二次谐波幅值与非线性系数随低速冲击能量与复合材料分层区域的增加而增大,谐波幅值和非线性系数可以用作表征材料的损伤情况。曹书浩等^[10]通过实验研究了非线性 Lamb 波检测裂纹时模态对非线性参量的影响,结果表明利用 Lamb 波检测板材裂纹时只有满足相速度匹配的对称模态谐波才具有累积效应,据此可以用来进行非线性检测。Andreades 等^[11]针对复合材料板,使用 8 个超声传感器阵列计算非线性系数,并对复合材料板损伤进行定位研究,提出一种基于非线性超声的损伤定位算法。Chen 等^[12]针对金属材料疲劳损伤进行研究,结论表明非线性系数与材料蠕变损伤有密切关系。杨连杰等^[13]使用激光激发表面波信号检测表面裂纹,结果表明表面波的反射系数与透射系数可以用来表征表面损伤的深度。焦敬品等^[14]使用数值仿真研究了裂纹角度与非线性谐波散射方向的关系,结果表明反射纵波的二次、三次谐波沿传播方向的增加量是裂纹角度增量的 2 倍。这说明:当

Lamb 波斜入射裂纹时,导波不再是均匀散射,裂纹参数,如长度、宽度及角度,会影响非线性谐波的接收幅值,从而影响非线性系数的计算,降低了检测的准确度。目前一般是针对声束垂直作用于损伤界面进行研究,关于损伤角度对检测影响的研究较少。

针对以上研究现状,本文采用高频 Lamb 波对铝板内的缺陷进行检测。其一,在垂直入射的情况下,研究裂纹长度和宽度对非线性系数的影响;其二,在固定裂纹长度和宽度的情况下,研究当裂纹逆时针旋转一定角度时,角度参数对非线性系数的影响。

2 超声非线性效应

非线性系数通常用于描述材料损伤等引起的非线性特征,微裂纹的参数如宽度、长度和角度会影响非线性系数的大小。本研究采用弹簧模型对微裂纹的非线性行为进行分析。

2.1 非线性系数

考虑一维纵波在非线性介质中沿 x 方向传播,其二阶非线性系数可表示为^[15]

$$\beta = \frac{8A_2}{k^2 x A_1^2} = \frac{2c^2 A_2}{\pi^2 f^2 x A_1^2}, \quad (1)$$

式中: β 是非线性系数;波数 $k=2\pi f/c$, c 是波速, f 是声波的频率; x 是声波传播的距离; A_1 是基波的幅值; A_2 是二次谐波的幅值。对于特定的材料和激励波形,波数 k 和声波的传播距离 x 都是固定值,所以 $\beta \propto A_2/A_1^2$ 。因此,(1)式可以转化成相对二阶非线性系数 β' ,用以表征材料的损伤情况,表达式为

$$\beta' = A_2/A_1^2. \quad (2)$$

2.2 微裂纹非线性弹簧模型

金属板微裂纹损伤在外界应力作用下会不断地作开合等运动,并不断地扩展,当外力作用与裂纹开合作用一致时,微裂纹的长度、宽度和两侧接触面积也会随之改变,因此将该过程比作弹簧^[16],弹簧的刚度系数使用扩展刚度系数 $K(\xi)$ 表示,依照泰勒公式,微裂纹上的内应力 $\Delta\sigma$ 可以表示为^[17-18]

$$\Delta\sigma = K_0 \xi + K_1 \xi^2 + o(\xi^3), \quad (3)$$

式中: ξ 是裂纹厚度界面的变化量; K_0 是扩展弹簧刚度的线性常数, K_1 是扩展刚度系数的二阶非线性项,两者可以用于量化描述材料的损伤情况; $o(\cdot)$ 表示高阶无穷小。

假设在激励声波 $u(x)=U(x)\cos(\omega t)$ 的作用下[其中 $U(x)$ 为声波随位置变化的振动位移, ω 为

声波的角频率; t 为时间], 位于板件中 x_0 处微裂纹尺寸变化的表达式为

$$\xi = \frac{a}{b} \times \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_0} \cos \omega t, \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别代表裂纹的长度和宽度, 若将裂纹看作椭圆形, 则为椭圆的长轴和短轴; x_0 为微裂纹在长为 L 、宽为 H 的板中的位置。将(4)式代入(3)式, 可得声波在微裂纹处产生的内应力为

$$\Delta \sigma = K_0 \left. \frac{a}{b} \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_0} \cos \omega t + \frac{K_1 a^2}{2b^2} \left(\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_0} \right)^2 \cos 2\omega t - \frac{K_1 a^2}{2b^2} \left(\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=x_0} \right)^2, \quad (5)$$

(5)式中的后两项是由二阶非线性系数 K_1 产生的内应力, 分别记为 $\Delta \sigma_1 = \frac{K_1 a^2}{2b^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \cos 2\omega t$, $\Delta \sigma_2 = \frac{K_1 a^2}{2b^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$, 其中 $\Delta \sigma_2$ 是常数, 所以只分析 $\Delta \sigma_1$ 。设微裂纹截面积为 S , 则在微裂纹处的应力 F_1 可表示为

$$F_1 = S * \Delta \sigma_1 = S * \frac{K_1 a^2}{2b^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \cos 2\omega t. \quad (6)$$

令 $U(x) = A_1 * \cos(kx)$, 考虑 x_0 处微裂纹两侧的位移是连续的, 则 $U(x = x_0^-) = U(x = x_0^+)$, 若应力发生突变: $\sigma|_{x=x_0^+} - \sigma|_{x=x_0^-} = 2F/S$, 则板中应力-应变的关系为

$$\sigma = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (7)$$

式中 E 为杨氏模量, ν 为泊松比。

基于(7)式, 缺陷处二次谐波 $U_2(x)$ 为

$$U_2(x) = \frac{1 - \nu^2}{E} * \frac{K_1 a^2 A_1^2 k}{b^2} * \frac{\cos kx_0}{\sin kL} * \sin kx_0 * \cos [k(L - x)]. \quad (8)$$

由(8)式可知, 裂纹处超声信号的二次谐波幅值为

$$A_2 = \frac{1 - \nu^2}{E} * \frac{K_1 a^2 A_1^2 k}{b^2}. \quad (9)$$

由(9)式可知, 裂纹的长宽会影响二次谐波幅值的大小。将(9)式代入(2)式有

$$\beta' = \frac{1 - \nu^2}{E} * \frac{K_1 a^2 k}{b^2}. \quad (10)$$

由(10)式可以看出, 相对二阶非线性系数随裂纹长度 a 的增加而变大, 随裂纹宽度 b 的增大而变小。因此, 裂纹的长度和宽度会影响非线性参量的大小。

当 Lamb 波斜入射损伤时, Lamb 波将不会在各个方向上均匀散射, 通常使用散射系数 M 表示 Lamb 波在各个方向的散射特性^[19], 表达式为

$$M(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{\mu_0}{\mu_1} \sqrt{\frac{r_2}{\lambda}} \exp [ik(r_2 - \lambda)], \quad (11)$$

式中, α_1 是入射角度, α_2 是散射角度, μ_0 是入射波幅值, μ_1 是散射波幅值, r_2 为裂纹到接收点的距离, λ 为入射波波长。由(11)式分析可知, 当探头位置固定时, 裂纹到接收点的距离 r_2 、波数 k 和入射波波长 λ 均为定值, 因此某一角度的散射系数只与入射波幅值和散射波幅值有关。当使用高频 Lamb 波进行检测时, 由微裂纹的碰撞摩擦产生的二次谐波散射方式会发生变化, 随角度变化接收到的基波幅值和谐

波幅值也会改变, 故裂纹的角度会影响非线性系数的大小。通过研究非线性系数的变化, 可实现对裂纹角度的估计。

3 铝板中非线性 Lamb 波的数值仿真

由于激励源的频率会影响接收到信号的非线性效应, 本研究采用数值仿真方法得到检测回波的波形, 而有限元模型的网格划分需要根据激励信号的参数来确定。下面首先分析激励源参数的选择。

3.1 激励源参数选择

超声波在薄板中传播时, 质点会在横向和纵向发生振动, 合成一种椭圆轨迹, 从而产生 Lamb 波。Lamb 波在薄板中传播时, 会产生对称型和非对称型两种模态。根据 Rayleigh-Lamb 方程, 在各向同性材料中, Lamb 波对称型与反对称型频散方程可表示为

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k_L^2 pq}{(q^2 - k_L^2)^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k_L^2)^2}{4k_L^2 pq}, \quad (13)$$

式中: $p = \sqrt{\frac{\omega_L^2}{c_L^2} - k_L^2}$, $q = \sqrt{\frac{\omega_L^2}{c_T^2} - k_L^2}$, c_L 和 c_T 分别

是介质中的纵波波速和横波波速; h 是薄板厚度的 $1/2$ (板厚为 d); Lamb 波波数 $k_L = \omega_L / c_p$, $c_g = d\omega_L / dk_L$, c_p 和 c_g 分别是 Lamb 波的相速度和群速度,

$\omega_L = 2\pi f_L = 2\pi\lambda / c_p$ 为 Lamb 波的圆频率。根据(12)式和(13)式,使用二分法计算绘制出 Lamb 波频散曲线^[20],可得频厚积 $f_L \cdot d$ 与 c_p 、 c_g 的关系,如图 1 所示。

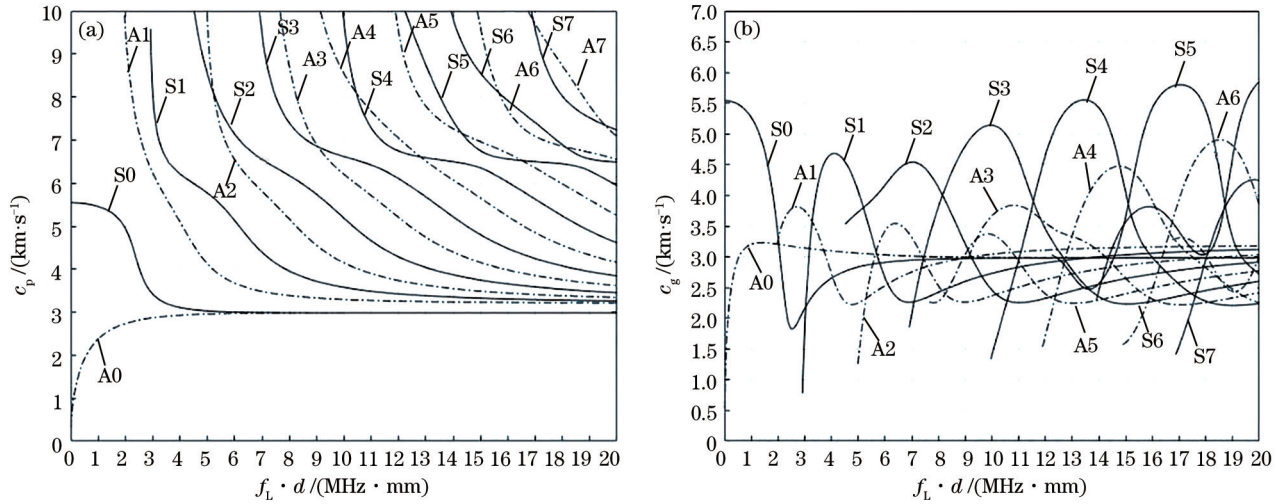


图 1 Lamb 波频散曲线。(a)相速度曲线;(b)群速度曲线

Fig. 1 Lamb wave dispersion curves. (a) Phase velocity curves; (b) group velocity curves

图 1 中, S 和 A 分别代表对称型和反对称型 Lamb 波。当频厚积 $f_L \cdot d \leq 2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时,铝板中只有 S0 和 A0 两种模式存在,声波组成简单。但是由(10)式可知,相对非线性系数与激励信号频率成正比,即激励信号的频率越高,接收到的信号非线性特征越明显。邓明晰等^[7]的研究指出,当基波相速度与二次谐波相速度相等时, S 波的二次谐波具有累积效应,即二次谐波的幅值随着传播距离的增大呈近似线性增加,因此,根据图 1,当频厚积 $f_L \cdot d$ 分别等于 $3.8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 和 $7.6 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时, S1 与 S2 模式对应的相速度都约为 $6.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,满足相速度匹配原则,所以本研究选择 S1 模式和 S2 模式进行检测,又因为铝板的厚度为 3.8 mm ,故激励源的频率为 1 MHz 。

3.2 有限元建模

文中使用有限元仿真软件 ABAQUS 建立超声波传播的有限元模型。材料属性设置为线弹性,采用 C3D8R 单元和动力学显式进行解算。铝合金板的密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量 $E = 75.6 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.33$ 。在建立有限元模型时,不考虑材料形状的非线性效应,建立的铝板三维模型的长和宽均为 150 mm 、厚度为 3.8 mm ,并在其两侧施加对称约束力。将裂纹位置设置在模型中间,微裂纹的形状为椭圆形,椭圆的长轴和短轴分别

代表微裂纹的长度和宽度。在振源处施加集中力载荷,激励信号是频率为 $f = 1 \text{ MHz}$ 、由汉宁窗调制的五周期正弦波,激励方程为 $u(t) = A \sin(2\pi ft) \times [1 - \cos(2\pi t/5)]$ 。

为了有效仿真 Lamb 波在板中的传播过程,得到由微裂纹运动产生的二次谐波,根据 Dunne 等^[21]的研究结果,可知有限元模型的单个有限元尺寸需满足

$$\Delta x_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}}{10}, \quad (14)$$

式中, Δx_{\max} 是单个有限元的最大尺寸, λ_{\min} 是求解所需的最小波长。

使用 ABAQUS/Explicit 模块,基于时间显式积分进行求解,其时间增量步进要满足 Courant-Friedrichs-Lewy 稳定条件^[22],分析步进的时间增量不能超过该稳定极限值。因此,分析步进的时间步长需要满足

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{\Delta x_{\min}}{c}, \quad (15)$$

式中, Δt_{\max} 是增量步长的最大值, Δx_{\min} 是有限元的最小值。

根据 Lamb 波的频散曲线, S2 模式在 $7.6 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 处的群速度为 $4.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。仿真中使用的激励信号频率为 1 MHz ,二次谐波频率为 2 MHz ,根据上述(14)式和(15)式,考虑计算效率和仿真精度,设置有限元尺寸为 0.2 mm 。在裂缝处,

设定微元尺寸为 0.1 mm, 时间增量步长为 1.0×10^{-8} s。在裂纹两侧表面定义了硬接触方式, 最终建立的有限元模型如图 2 所示。

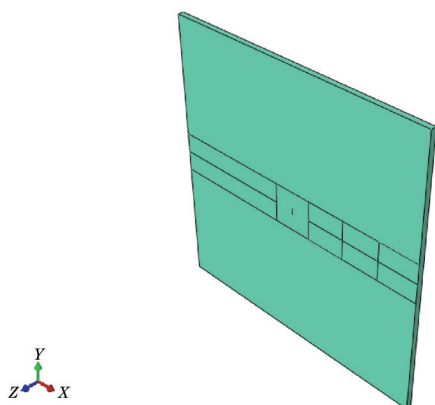


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

4 数值仿真结果分析

4.1 裂纹参数对非线性系数的影响

由于微裂纹存在, 声波在板中传播时会产生非线性谐波, 当裂纹的参数改变时, 基波与谐波会发生变化。通过对仿真结果的数值分析, 研究了不同参数对非线性系数的影响。

图 3 截取了起始一段时间内, 无裂纹和宽度为 0.002 mm、长度为 1 mm 的裂纹在相同观测点接收到的信号。可以看出, 当铝板中存在损伤时, 接收到的信号幅值会减小。分析时, 一方面, 由于裂纹的作用, 其中一部分波被反射; 另一方面, 微裂纹的非线性作用会产生新的谐波分量, 导致接收到的信号幅值和相位发生变化。

只从时域波形很难分析信号中的谐波成分, 为

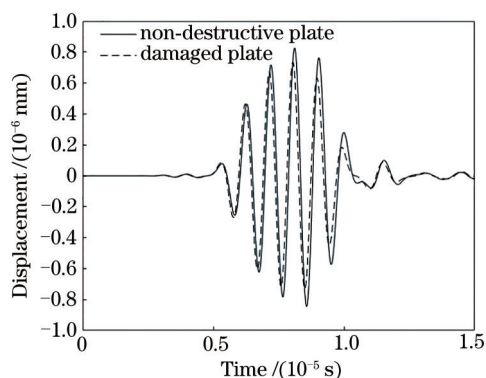


图 3 有损、无损时信号对比图

Fig. 3 Comparison chart of received signals for non-destructive and damaged plates

了更准确地分析接收到的信号并提取谐波成分, 使用快速傅里叶变换(FFT)和小波变换(DWT)对信号进行分解。图 4 给出了在无裂纹情况和有裂纹情况下, 接收信号的频谱图。从图中可以看出, 当铝板中无损伤时, 检测波信号只在 1 MHz 处出现了波峰, 当铝板中有裂纹存在时, 除了在 1 MHz 处存在波峰, 2 MHz 处的波峰值明显高于无损伤时的幅值。

图 5 是信号的时频谱图, 可以发现, 有裂纹板相对无损板的信号能量分布发生了变化: 在信号的二倍频和三倍频处都出现了明显的谐波分量, 且二倍频处的谐波幅值大于三倍频处的幅值; 在无损板中, Lamb 波的频散特性导致其他频率成分存在, 但是相较于有损板其幅值很小。

4.1.1 裂纹长度对非线性系数的影响

根据裂纹弹簧理论, 可知裂纹的长度和宽度会影响非线性系数的大小。下面进一步分析裂纹参量变化与非线性系数之间的关系。设置裂纹的宽度为 0.005 mm, 长度 l 分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm, 可得长度与非线性系数拟合曲线如图 6 所示。

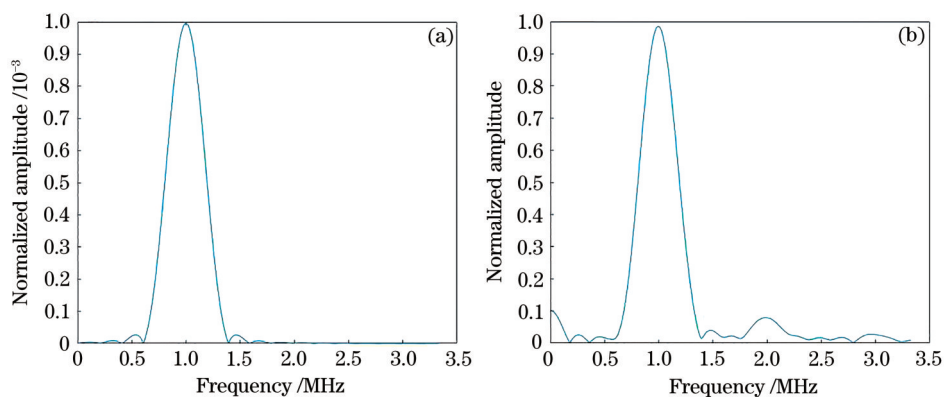


图 4 信号频域图。(a) 无损板频谱图; (b) 有损板频谱图

Fig. 4 Signal frequency domain diagrams. (a) Non-destructive plate spectrogram; (b) spectrogram of damaged plate

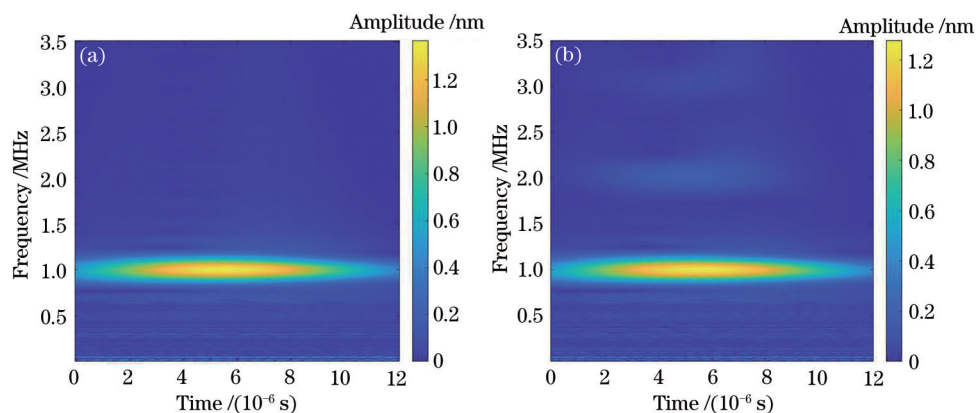


图 5 接收信号时频域图。(a)无损板时频域图;(b)有损板时频域图

Fig. 5 Received signal time-frequency domain diagrams. (a) Time-frequency domain diagram of non-destructive plate; (b) time-frequency domain diagram of damaged plate

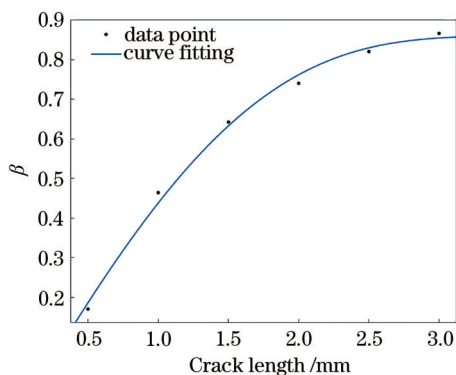


图 6 β 与裂纹长度拟合曲线

Fig. 6 β fitting curve with crack length

从图 6 可以看出非线性系数与裂纹的长度呈正比关系,这与弹簧模型中的结论一致。这是由于裂纹长度增加但宽度不变,使得裂纹两侧接触面变大,运动产生的非线性效应更明显,导致非线性系数增加。根据以上 6 组数据,可得拟合曲线方程为

$$\beta = \frac{-0.04375l^3 + 0.226l^2 + 0.8537l - 0.2855}{l + 0.6218} \quad (16)$$

4.1.2 裂纹宽度对非线性系数的影响

设置裂纹的长度固定为 1.5 mm,宽度分别为 0.005, 0.025, 0.045, 0.065, 0.085, 0.105 mm, 计算得到的非线性系数与宽度的关系如图 7 所示。从图 7 中可以看出,非线性系数随裂纹宽度的增加而减小,并且减小的幅度逐渐减小。这是由于裂纹宽度增加,使得裂纹两端表面的距离增加,从而导致两表面发生碰撞等运动的面积变小,所以非线性系数减小。根据数据,可得拟合曲线为

$$\beta = 0.678 \times \exp(-3.877d) \quad (17)$$

4.1.3 裂纹角度对非线性系数的影响

角度相同的垂直裂纹和 45°斜裂纹的仿真云图

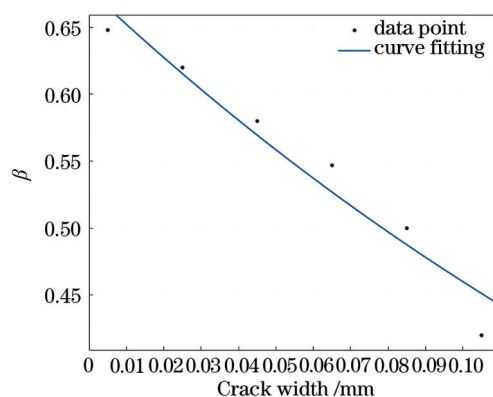


图 7 β 与裂纹宽度拟合图

Fig. 7 β fitting curve with crack width

如图 8 所示。从图中可以看出,当 Lamb 波入射到斜裂纹中时,反射波和谐波的传播方向都会改变,这说明角度的变化会影响非线性系数的大小。

为了进一步研究裂纹角度与非线性系数的关系,本研究在损伤周围布置如图 9 所示的 3 个探头, p1、p2 和 p3 在同一个半圆上,半圆的圆心与裂纹的中心重合, p2 与裂纹的短轴共线, p1、p3 与裂纹的长

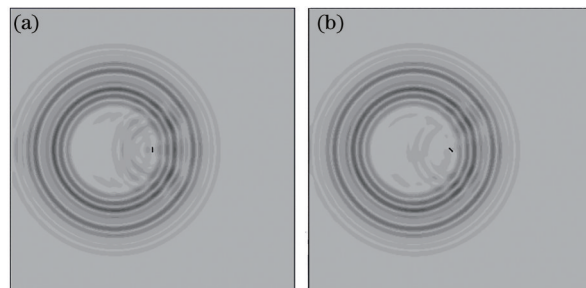


图 8 裂纹仿真对比图。(a)直裂纹仿真云图;(b)45°裂纹仿真云图

Fig. 8 Crack simulation comparison. (a) Straight crack simulation cloud map; (b) 45° crack simulation cloud map

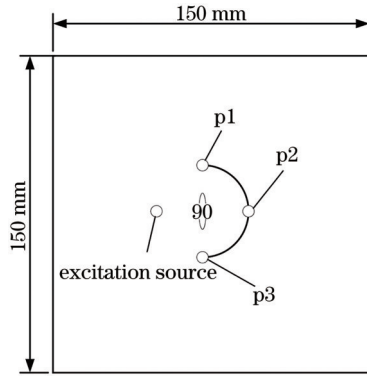


图 9 仿真示意图

Fig. 9 Simulation diagram

轴共线,利用3个探头接收信号的非线性系数可以检测裂纹的角度。设置裂纹宽度为0.02 mm,长度为1.0 mm,逆时针转动,接收点设置在8.0 mm处。

由于反射波等复杂成分存在,需要将3个探头接收到的信号通过高通滤波器进行滤波。当裂纹转过15°时,滤波之后的高次谐波信号如图10所示。从图中可以发现,当Lamb波倾斜入射裂纹时,p2探头接收到的谐波幅值减小,p1探头接收到的谐波幅值明显增强,而p3探头谐波信号的幅值变化较小。比较3个探头接收到的谐波幅值,可以看出接收到的高次谐波幅值相差明显,这说明裂纹的角度会影响谐波幅值的大小,进而影响非线性系数的变化,故利用3个探头对裂纹角度进行估计是可行的。

根据上述分析,设置转动角度范围为0°~90°,步进设为15°,进一步计算3个探头接收信号的非线性系数,得到的拟合曲线如图11所示。

图11中的3个探头接收到的信号的非线性系数随角度变化的关系为

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{0.05459\alpha^2 + 4.384\alpha + 489.8}{\alpha^2 + 49.09\alpha + 2221} \\ \beta_2 = 0.1922\sin(0.01998\alpha + 0.4766) + 0.07845\sin(0.03082\alpha + 2.931)^\circ \\ \beta_3 = -0.000021\alpha + 0.1057 \end{cases} \quad (18)$$

根据图11和(18)式,可以看出p2探头接收信

号的非线性系数随角度变化减小,且变化的幅度随

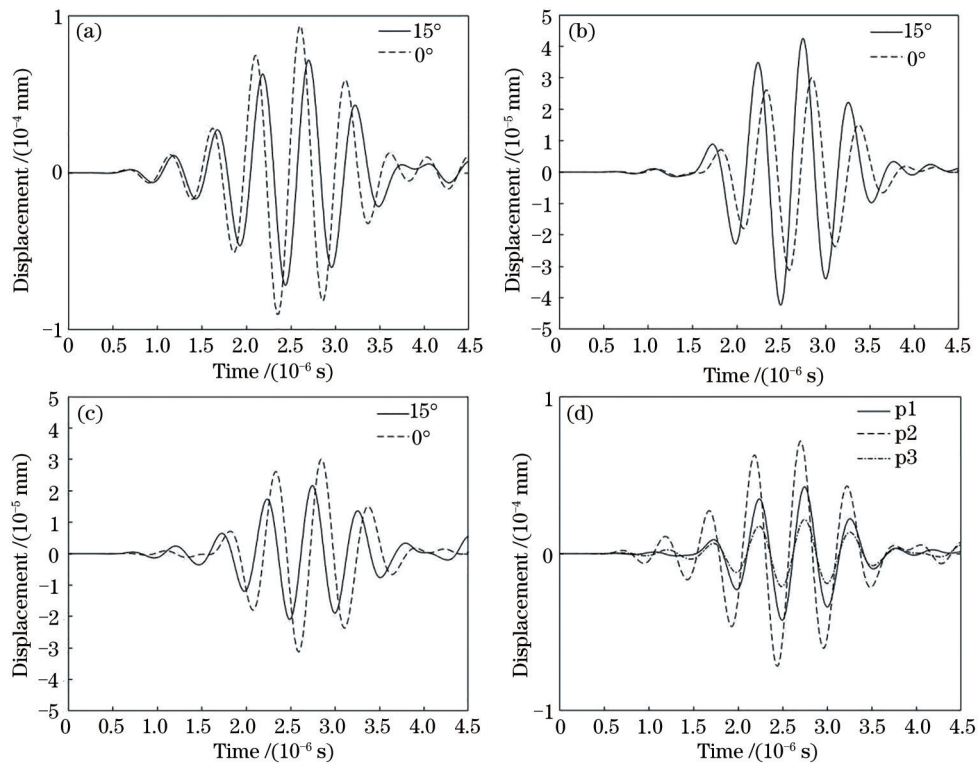


图 10 谐波信号对比图。(a)旋转角度为0°和15°时p2探头提取信号对比;(b)旋转角度为0°和15°时p1探头提取的信号对比;(c)旋转角度为0°和15°时p3探头提取信号对比;(d)旋转角度为15°时3个接收点的提取信号对比

Fig. 10 Harmonic signal comparison. (a) p2 probe extraction signal comparison at 0° and 15°; (b) p1 probe extraction signal comparison at 0° and 15°; (c) p3 probe extraction signal comparison at 0° and 15°; (d) comparison of signals extracted from three receiving points at 15°

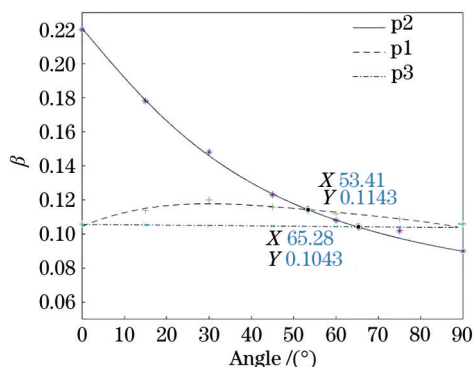


图 11 p1、p2、p3 探头接收到信号的非线性系数拟合曲线
Fig. 11 β fitting curves of p1, p2 and p3 probes extraction signals

角度变化而减缓;p1 探头接收信号的非线性系数随角度变化先增大后减小,在 30°左右达到最大值,且最大值之前的变化幅度要比之后的变化大;p3 的探头接收信号的非线性系数随角度增大而减小,其减小趋势接近于线性。

4.2 任意角度仿真试验

为了进一步验证在 3 个探头下,利用非线性系数的大小估计裂纹方向角的可行性,分别在 30°两侧选择 17°和 58°进行仿真实验。将角度代入(18)式可得到非线性系数的计算值;通过设置裂纹参数对上述两种角度下的裂纹回波进行仿真,结合(2)式可得到非线性系数的仿真值:结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 17°时检测结果

Table 1 Test results at 17°

Parameter	β_1	β_2	β_3
Calculated value	0.1734	0.1156	0.1053
Simulation value	0.1762	0.1095	0.1096
Error / %	1.615	5.227	4.084

表 2 58°检测结果

Table 2 Test results at 58°

Parameter	β_1	β_2	β_3
Calculated value	0.1100	0.1134	0.1045
Simulation value	0.1082	0.1162	0.1088
Error / %	1.636	2.469	4.115

由表 1 和表 2 分析可知,p1 探头仿真得到的非线性系数值与理论计算值误差在 2.0% 以内,p2 探头的计算结果与仿真结果的误差在 2.0%~5.3% 之间,相对 p1 探头的误差较大;p3 探头的计算值与理论值误差在 4.0%~4.2% 之间,其误差百分比相对比较稳定。根据上述结果与图 11,可以发现判断裂纹角度时,当 p2 得到的相对非线性系数大于 0.12

时,虽然误差较大,但是相比 p1、p3 值更明显,所以此时以 p2 探头的结果为准;当相对非线性系数范围在 0.12~0.1043 时,p1 和 p2 探头的结果较为接近并大于 p3 探头,但是由于两者存在误差,所以取两者的平均值作为裂纹角度值;同理,当得到的非线性系数小于 0.1043 时,以 p1 和 p3 探头结果的均值为准。

因此,通过三探头的方式可以对裂纹的角度变化进行有效分析,从而判断裂纹的方向。

5 结 论

基于弹簧模型对微裂纹的非线性行为进行分析,采用数值仿真方法,使用高频 Lamb 波分析了裂纹参数与非线性系数的关系。其中裂纹的长度与非线性系数成正比,裂纹的宽度与非线性系数成反比。分别研究了 3 个方向上非线性系数与裂纹角度参数的关系,结果表明,在 3 个探头的情况下利用非线性系数可以对裂纹角度进行估计。

参 考 文 献

- [1] Zhao N. Research on ultrasonic nonlinear detection technology for micro metal fatigue damage[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
赵娜. 金属疲劳微损伤的非线性超声检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [2] Cantrell J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460 (2043): 757-780.
- [3] Wang Q. Research on Lamb wave and linear PZT array scanning based on directional damage imaging and evaluation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 507-511, 628.
王强. 方向性损伤的 Lamb 波压电线阵扫描成像与评估[J]. 振动·测试与诊断, 2017, 37(3): 507-511, 628.
- [4] Lu M H, Xu X X. Review of nonlinear ultrasonic testing method[J]. Nondestructive Testing Technology, 2012, 34(7): 61-66.
陆铭慧, 徐肖霞. 非线性超声检测方法及应用[J]. 无损检测, 2012, 34(7): 61-66.
- [5] Dun Y, Shi X H, Wang G L, et al. Nonlinear ultrasonic test of micro-nano crack[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 132-137.
敦怡, 师小红, 王广龙, 等. 微纳米级裂纹的非线性

- 超声检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 132-137.
- [6] Qiao S, Zhu J X, Lü B L, et al. Numerical simulation on damage assessment of micro cracks by ultrasonic nonlinearity[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2020, 42(4): 50-55.
乔松, 朱建新, 吕宝林, 等. 微裂纹群损伤的超声非线性评价数值仿真[J]. 无损检测, 2020, 42(4): 50-55.
- [7] Deng M X, Pei J F. Nondestructive evaluation of fatigue damage in solid plates using nonlinear ultrasonic Lamb wave method[J]. *Acta Acustica*, 2008, 33(4): 360-369.
邓明晰, 裴俊峰. 无损评价固体板材疲劳损伤的非线性超声兰姆波方法[J]. 声学学报(中文版), 2008, 33(4): 360-369.
- [8] Deng M X, Xiang Y X, Pei J F, et al. Time-domain measurement technique of second harmonic of ultrasonic Lamb waves using mismatch of group velocities[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(6): 621-628.
邓明晰, 项延训, 裴俊峰, 等. 基于群速度失配的超声兰姆波二次谐波的时域测量方法[J]. 声学学报, 2012, 37(6): 621-628.
- [9] Tie Y, Zhang Q S, Hou Y L, et al. Impact damage assessment in orthotropic CFRP laminates using nonlinear Lamb wave: Experimental and numerical investigations[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111869.
- [10] Cao S H, Zhang H F, Xiong H Y, et al. Research on plate crack detection based on nonlinear Lamb wave[C]//*Proceedings of the 2019 National Acoustics Conference*, September, 21, 2019, Shenzhen, Guangdong, China. Beijing: Chinese Society of Acoustics, 2019: 277-278.
曹书浩, 张韩飞, 熊晗宇, 等. 基于非线性兰姆波的板材裂纹检测研究[C]//2019年全国声学大会论文集, 深圳, 广东, 中国. 北京: 中国声学学会, 2019: 277-278.
- [11] Andreades C, Malfense Fierro G P, Meo M. A nonlinear ultrasonic SHM method for impact damage localisation in composite panels using a sparse array of piezoelectric PZT transducers[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106181.
- [12] Chen B B, Wang C, Wang P F, et al. Research on fatigue damage in high-strength steel (FV520B) using nonlinear ultrasonic testing[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 1-15.
- [13] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041203.
- [14] Jiao J P, Li H P, Lü H T, et al. Numerical simulation of nonlinear interaction between ultrasonic and micro-cracks in different directions[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(5): 708-715.
焦敬品, 李海平, 吕洪涛, 等. 超声波与不同方向微裂纹的非线性相互作用数值仿真[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 708-715.
- [15] Kundu T, Eiras J N, Li W B, et al. Fundamentals of nonlinear acoustical techniques and sideband peak count[M]//Kundu T. *Nonlinear ultrasonic and vibro-acoustical techniques for nondestructive evaluation*. Cham: Springer, 2019: 1-88.
- [16] Hu H F. Research on theory and key technologies of nonlinear ultrasonics for health monitoring of plate-like metallic structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
胡海峰. 板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [17] Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing[J]. *NDT & E International*, 2001, 34(4): 231-238.
- [18] Yan H J, Liu F B, Pan Q X. Characterization of micro-crack in metal plane using nonlinear ultrasonic waves[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(4): 17-21.
阎红娟, 刘峰斌, 潘勤学. 金属板件中微裂纹的非线性超声表征方法研究[J]. 现代制造工程, 2018(4): 17-21.
- [19] Wilcox P D, Holmes C, Drinkwater B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(8): 1541-1550.
- [20] Yan S, Zhang H F, Meng Y Y. Numerical calculation and experimental validation for Lamb wave dispersion curves[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2010, 27(1): 1-4.
阎石, 张海凤, 蒙彦宇. Lamb波频散曲线的数值计算及试验验证[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),

2010, 27(1): 1-4.

- [21] Dunne P C. Finite elements, procedures in engineering analysis: Kalus-Jurgen Bathe (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982) [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,

1982, 35(1): 123-124.

- [22] Lax P D. Hyperbolic difference equations: a review of the Courant-Friedrichs-Lewy paper in the light of recent developments[J]. IBM Journal of Research and Development, 1967, 11(2): 235-238.