

激光与光电子学进展

基于局部缺陷共振的纤维金属层板微脱黏缺陷评价方法

詹湘琳, 李淑文*

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 大型飞机上的纤维金属层板因工艺、环境等原因易在黏接界面处产生脱黏, 成为影响飞机飞行的安全隐患, 因此对纤维金属层板黏接层的早期微脱黏进行有效检测与评价具有重要意义。本文提出了一种基于局部缺陷共振(LDR)的黏接界面微脱黏程度的评价方法。在接触声学非线性机制下, 将缺陷作为非线性弹簧振子, 推导其LDR频率, 并通过数值仿真分析了不同激励条件下的共振。以预置不同尺寸脱黏缺陷的玻璃纤维-铝合金黏接板为实验对象, 利用粘贴在表面的压电传动/传感单元, 根据LDR频率有选择性地采用不同频率的激励信号作用在黏接板上, 并对接收的响应信号进行频谱分析。仿真与实验结果表明, 基于LDR效应可以增强微脱黏界面间的非线性, 并可以通过LDR频率对微脱黏损伤面积进行估算。

关键词 材料; 微脱黏; 缺陷非线性; 局部缺陷共振; 频谱分析; 定量评价

中图分类号 TB526; V214.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2316001

Evaluation Method of Micro-Debonding Defects in FMLs Based on Local Defect Resonance

Zhan Xianglin, Li Shuwen*

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

Abstract Fiber metal laminates are widely used in large aircrafts. Debonding occurs easily at the bonding interface due to process and environmental factors, affecting its performance. It is essential to effectively detect and evaluate the bonding layer. This study proposes a method for evaluating the micro-debonding degree of adhesive interfaces using local defect resonance (LDR). Under the nonlinear mechanism of contact acoustics, the defect is regarded as a nonlinear spring oscillator, and its LDR frequency is determined. Numerical simulation is used to analyze the resonance under different excitation conditions. The experimental object is a glass fiber aluminum alloy bonding plate with different sizes of debonding defects. Piezoelectric actuator/sensor units are pasted on the surface, excitation signals with different frequencies are applied to the actuator according to the LDR frequency, and the spectral analysis of the response signals is conducted. The simulated and experimental results show that the nonlinear feature of the debonding interface can be improved based on the LDR effect. In addition, LDR frequency can be employed to determine the debonding damaged area.

Key words materials; micro-debonding; defect nonlinearity; local defect resonance; spectral analysis; quantitative evaluation

OCIS codes 160.2290; 120.7280; 070.7345

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61102097)

通信作者: *suvenii@sina.com

1 引言

纤维金属层板(FMLs)是将纤维增强材料层和薄金属层交替铺设并在特定温度和压力下固化而成的一种可以结合两种材料性能的复合材料^[1],具有高的损伤容限、比强度、比模量以及良好的抗疲劳性能,已被广泛应用于航空工业生产领域^[2]。但在加工和使用过程中,纤维金属层板会出现黏接不良、气孔、局部脱黏等缺陷,导致产品失效引发事故或灾难性后果^[3]。因此,这类黏接材料损伤的早期检测具有重要意义,并已经成为目前的研究热点。

近年来,国内外学者运用非线性超声方法在黏接件黏接质量的检测方面进行了大量研究,如:凡丽梅等^[4]通过采集模拟脱黏缺陷试样上缺陷处的基波和二次谐波信号,拟合出了缺陷面积与非线性系数 β 的关系曲线;张恒^[5]利用超声直入射检测方法研究了陶瓷涂层与金属基体的黏接质量,并定义了评价黏接质量的结合质量系数;江念等^[6]将回波信号中的二次谐波幅值与基波幅值的平方之比作为表征黏接界面超声非线性程度的指标以及评价界面黏接质量的特征参数;陈军等^[7]用ABAQUS对脱黏缺陷进行了有限元仿真,结果表明,非线性系数与黏接强度呈负相关;郑善朴等^[8]通过对不同脱黏缺陷的超声脉冲回波的特征进行分析与统计,实现了缺陷的定性和定位;Achenbach等^[9]指出黏接界面处的非线性行为会导致黏接失效,并会导致黏接界面处出现高次谐波;Yelve等^[10-11]发现,从高次谐波中提取的损伤指数能有效识别加筋铝板的脱黏以及压电传感器与基底间的脱黏损伤;Shui等^[12]利用非线性超声方法对黏接接头的疲劳损伤进行了研究,并探讨了二次谐波产生的原因;Wang等^[13]利用大功率超声波的非线性畸变有效诊断了复合材料界面早期的微脱黏缺陷;Li等^[14]通过仿真研究了超声参数与毫米尺度脱黏缺陷之间的定量关系。上述研究均是利用经典高次谐波(主要为二次谐波)来检测黏接质量,但高次谐波信号同基波相比本身幅值过小,不易被检测到,而且对检测仪器的性能要求较高,以其为指标的缺陷表征方式容易出现对损伤的误判。

在接触声学非线性机制下,垂直于脱黏界面的振动以及平行于脱黏界面的切向振动(即非线

性摩擦),都能使非线性急剧增加,此外还会出现频率的下变频(次谐波)等调制成分。Singh等^[15]通过对层合板的分层损伤进行有限元模拟发现,分层引起的结构的非线性行为会导致超谐波和次谐波成分产生;Zhang等^[16]利用次谐波共振方法对非线性边界条件下的疲劳裂纹进行了损伤识别研究;Maruyama等^[17]建立并求解了裂纹二维弹性波散射的边界积分方程,探讨了次谐波的产生机制;屈文忠等^[18]使用次谐波检测方法有效识别了螺栓松动。

为了进一步对纤维金属层板的微脱黏缺陷进行准确评估,本文构造了脱黏界面局部损伤共振非线性弹簧振子模型,并分析了激励频率与局部缺陷共振频率满足不同条件时的两种共振情形:1)当激励频率接近局部缺陷共振频率时,响应中非线性成分的占比明显增大,基于此可以提高非线性超声检测的灵敏度;2)当激励频率接近两倍局部缺陷共振频率时,回波响应中会存在激励信号与缺陷调制产生的次谐波成分,基于此可以提高损伤识别的准确性。此外,本文进一步推导了圆片型脱黏损伤的局部损伤共振频率,并用其对脱黏面积进行了估算。最后,对纤维-金属层板试件进行了检测,并对检测结果进行了计算分析。

2 脱黏界面理论分析

基于局部缺陷共振^[19](LDR)效应的检测方式能显著提高波向缺陷泵送能量的能力。当驱动试样的超声波频率与LDR频率匹配时,声能直接传递到缺陷。对于不同的材料和不同的损伤工况来说,LDR频率是不同的。本节首先基于接触声非线性机制,将损伤区域视为非线性振荡器,通过模型分析激励频率与LDR频率在满足一定条件下产生的调制现象,而后进一步推导圆片型脱黏缺陷的LDR频率。

2.1 脱黏界面非线性弹簧振子模型

黏接材料界面上无脱黏区的刚度呈现线性特征,而脱黏区由于界面损伤而使刚度呈现非线性特征。因此,黏接结构可简化为单自由度非线性弹簧振子模型,如图1所示。

振子由一个附着在集中质量块上的非线性弹簧(其中 F_{non} 表示非线性作用力)以及线性阻尼(刚度为 k_0)构成,此时界面间作用力与位移的关系 $F_{\text{non}}(x)$ 中便引入了非线性项。令 $F_{\text{non}}(x) = kx(x-a)^2$,其

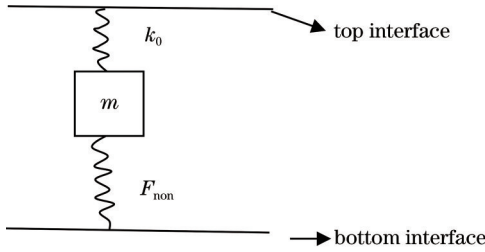


图 1 非线性弹簧振子模型

Fig. 1 Nonlinear spring oscillator model

中, k 为非线性刚度, x 为界面间位移, a 为黏接界面彻底失效的临界位移。此处只考虑 $x < a$ 的情形。当无动态载荷作用时, 两个界面之间的作用力为零。施加幅值为 F 、频率为 ω 的持续激励时, 弹簧振

子运动方程可表示为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_0x = F\cos(\omega t) - F_{\text{non}}, \quad (1)$$

式中: m 为质量块的质量; c 为阻尼; k_0 为刚度; F_{non} 为界面间的非线性作用力; t 为运动时间。在(1)式中引入

参数 $2\varepsilon\mu = \frac{c}{m}$, $\omega_0^2 = \frac{k_0 + ka^2}{m}$, $\varepsilon\alpha_1 = -\frac{2ka}{m}$, $\varepsilon\alpha_2 = \frac{k}{m}$, $f = \frac{F}{m}$, 则(1)式可以表示为

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\mu\dot{x} + \omega_0^2x + \varepsilon\alpha_1x^2 + \varepsilon\alpha_2x^3 = f\cos(\omega t), \quad (2)$$

式中: μ 为黏性阻尼系数; ω_0 为线性系统的固有频率; ε 为小参数, $\varepsilon \ll 1$; f 为激励幅值。

利用多尺度法^[20]对(2)式求一次近似解, 引入微分算子得到

$$\begin{aligned} D_0^2x_1 + \omega_0^2x_1 = & -\frac{1}{2}\alpha_1(A^2 + B^2) + 2\omega_0(A' + \mu A)\sin\beta + \left(2\omega_0A\varphi' - \frac{3}{4}\alpha_2A^3 - \frac{3}{2}\alpha_2AB^2\right)\cos\beta + 2\mu B\omega\sin(\omega T_0) - \\ & \left(\frac{3}{4}\alpha_2B^3 + \frac{3}{2}\alpha_2A^2B\right)\cos(\omega T_0) - \frac{1}{2}\alpha_1A^2\cos(2\beta) - \frac{1}{4}\alpha_2A^3\cos(3\beta) - \frac{1}{2}\alpha_1B^2\cos(2\omega T_0) - \\ & \frac{1}{4}\alpha_2B^3\cos(3\omega T_0) - \alpha_1AB\cos(\omega T_0 + \beta) - \alpha_1AB\cos(\omega T_0 - \beta) - \frac{3}{4}\alpha_2A^2B\cos(\omega T_0 + 2\beta) - \\ & \frac{3}{4}\alpha_2A^2B\cos(\omega T_0 - 2\beta) - \frac{3}{4}\alpha_2AB^2\cos(2\omega T_0 + \beta) - \frac{3}{4}\alpha_2AB^2\cos(2\omega T_0 - \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $T_0 = t$, $T_1 = \varepsilon t$, $D_0 = \frac{d(\)}{dT_0}$, $D_1 = \frac{d(\)}{dT_1}$, $\beta = \omega_0 T_0 + \varphi_T$, $A' = \frac{dA}{dT_1}$, $\varphi' = \frac{d\varphi}{dT_1}$, $B = \frac{f}{2(\omega_0^2 - \omega^2)}$ 。

当激励频率 ω 接近 ω_0 时, 将 β 代入(3)式, 则其结果中所含的 $2\omega T_0$ 、 $3\omega T_0$ 、 $\omega T_0 + \beta$ 、 $\omega T_0 + 2\beta$ 、 $2\omega T_0 + \beta$ 项成为以 ω_0 为基频的高次谐波项, 故响应中的非线性成分增加; 而当 ω 接近 $2\omega_0$ 时, $-\alpha_1AB\cos(\omega T_0 - \beta)$ 项会产生 1/2 次谐波共振, 该项是由非线性弹簧振子的非线性项直接导致的。所以, 通过 LDR 效应增强脱黏处的非线性效应以及通过次谐波的有无来识别脱黏缺陷是可行的。

2.2 LDR 频率推导

LDR 的概念基于这样一个事实: 缺陷的存在会导致其所在质量块的刚度局部降低。这会在缺陷处的特征频率 (f_{LDR}) 中表现出来。 f_{LDR} 可以作为有效刚度为 K_{eff} 和有效质量为 M_{eff} 的缺陷的固有频率, 其计算公式为

$$f_{\text{LDR}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{M_{\text{eff}}}}. \quad (4)$$

首先通过计算在一定厚度的板的某一深度处

的平底孔 (FBH) 于弯曲振动激励下的变形势能得到 K_{eff} 的表达式。在这种情况下, 对于半径为 l 、厚度为 h 的薄 FBH ($h \ll l$), 其最低振型位移的平面外分量的径向分布为^[21]

$$U_{(r)} = U_0(1 - r^2/l^2)^2, \quad (5)$$

式中: r 为径向距离; U_0 为板中心的振幅 ($r=0$)。

将(5)式用于薄 FBH 的振动势能 W_{pot} 的一般表达式中^[21], 即

$$W_{\text{pot}} = \frac{32\pi D U_0^2}{3l^2}, \quad (6)$$

式中: D 为板材料的弯曲刚度, $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)}$; E 为板材料的弹性模量; σ 为板材料的泊松比。将缺陷的有效刚度引入(6)式得到

$$W_{\text{pot}} = \frac{K_{\text{eff}} U_{\text{eff}}}{2}, \quad (7)$$

式中: U_{eff} 为有效振动位移。

对(5)式在平板表面上积分, 得到 FBH 的有效振动位移为 $\frac{U_0}{3}$, 然后结合(6)、(7)式可得有效刚度

$$K_{\text{eff}} = \frac{192\pi D}{l^2}.$$

通过振动缺陷的动能 W_{kin} ^[21] 来得到它的有效质

量 M_{eff} , 即

$$W_{\text{kin}} = \frac{M_{\text{eff}} U_{\text{eff}}^2}{2} \quad (8)$$

对(5)式积分可以得到圆板动能的表达式为

$$W_{\text{kin}} = \frac{M U_0^2}{10} \quad (9)$$

式中: M 为薄 FBH 底部板的质量, $M = \pi \rho h l^2$; ρ 为板密度。通过比较式(8)、(9)可以求出振动缺陷的有效质量 M_{eff} 为 $1.8M$ 。

将振动缺陷的有效刚度和有效质量的表达式组合可以得到薄 FBH 的 LDR 频率为

$$f_{\text{LDR}} \approx \frac{1.6h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}} \quad (10)$$

由(10)式可知, 对于薄 FBH 这样的圆片型脱黏缺陷, 其 LDR 频率 f_{LDR} 与脱黏半径 l 、脱黏厚度 h 及其所在板材的特性参数之间满足一定的关系, 这为早期微脱黏的进一步定量评价提供了理论依据。

3 数值仿真

接下来通过数值仿真方法分析当激励频率接近 LDR 频率时可以增强脱黏界面间的非线性的原因, 以及当激励频率接近 2 倍 LDR 频率时出现次谐波共振的原因。

将(1)式中的参数定性取为 $m = 0.01 \text{ kg}$, $c = 0.04$, $k_0 = 100 \text{ N/m}$, $k = -50 \text{ N/m}^2$, $a = 1$ 。首先用频率范围为 $0 \sim 500 \text{ Hz}$ 的 chirp 信号进行扫频激励, 扫频信号如图 2 所示, 扫频结果如图 3 所示。

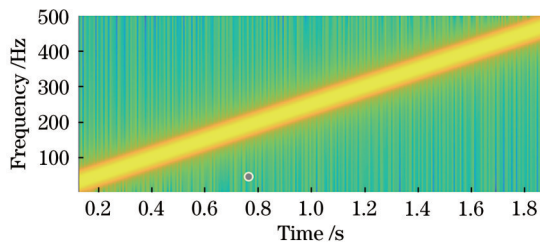


图 2 扫频信号

Fig. 2 Sweep signal

从扫频结果中找出幅值最大的峰值点对应的频率, 该频率即为 LDR 频率 (f_{LDR})。由图 3 可知此系统的 LDR 频率为 105.3 Hz 。当激励频率接近 LDR 频率时, 响应中出现非线性增强的情形, 此部分将在 3.1 节中叙述; 当激励频率接近 2 倍 LDR 频率时, 回波响应中会出现调制的次谐波成分, 此部分将在 3.2 节中叙述。

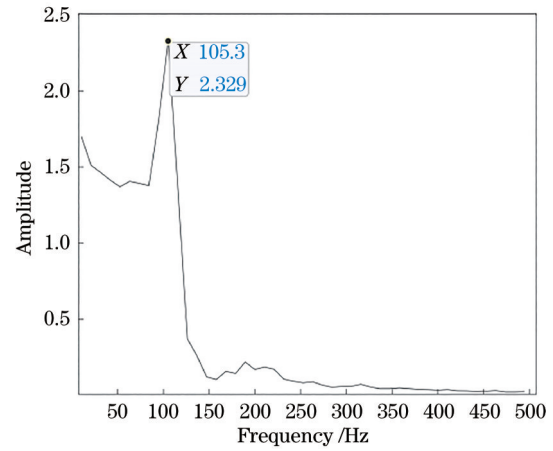


图 3 扫频结果

Fig. 3 Sweep result

3.1 基于 LDR 频率增强损伤的非线性

首先设定激励幅值为 100 N/kg , 激励频率在 LDR 频率附近取 105 Hz , 得到频域响应, 如图 4 所示; 保持激励幅值不变 (为 100 N/kg), 激励频率设置为远离 LDR 频率, 取 84.8 Hz , 得到的频域响应结果如图 5 所示。

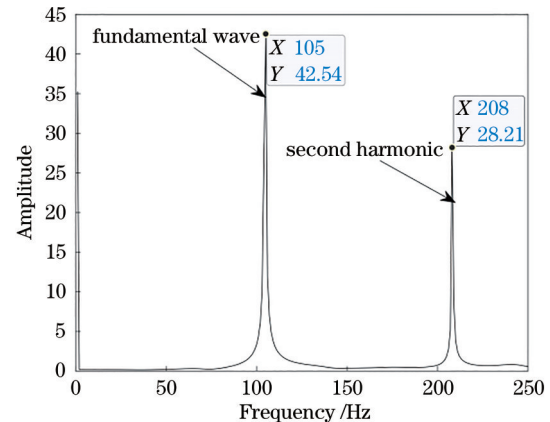


图 4 在 LDR 频率处激励所得结果

Fig. 4 Results of excitation at LDR frequency

对比图 4 和图 5, 选择二次谐波的激发效率 $\beta_2 = \frac{A_2}{A_1}$ (A_2 为二次谐波幅值, A_1 为基波幅值) 作为非线性强度评价指标, 计算可得图 4 和图 5 中的 β_2 分别为 66.3% 和 30% 。由此结果可知, 靠近 LDR 频率激励时其二次谐波激发效率比远离 LDR 频率激励时提高了一倍多, 具有明显的增强缺陷处非线性的效果。

3.2 基于 2 倍 LDR 频率激励的次谐波效应

由理论分析可知, 当激励频率为 LDR 频率的 2 倍时, 缺陷处会产生次谐波共振这一不同于高次

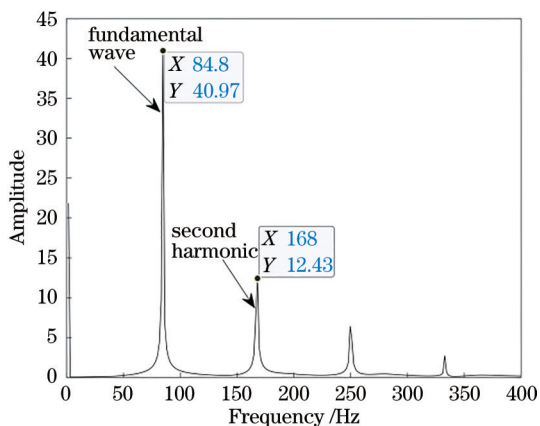


图 5 远离 LDR 频率处激励所得结果

Fig. 5 Results of excitation far away from LDR frequency

谐波的调制现象。设置激励幅值为 100 N/kg, 激励频率在 2 倍 LDR 频率附近取 210 Hz, 所得频域响应如图 6 所示。

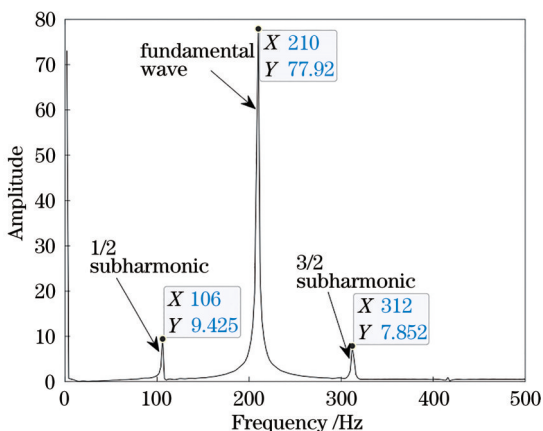


图 6 在 2 倍 LDR 频率处激励所得结果

Fig. 6 Results of excitation at 2 times LDR frequency

由图 6 结果可知, 当激励频率在 2 倍 LDR 频率附近处取值时, 回波频谱中会出现明显的 1/2 次谐波与 3/2 次谐波。这是由激励信号与损伤区域产生的不同于高次谐波的新的调制成分, 可以据此对损伤区域进行准确识别。

4 实验研究

4.1 实验过程

本文对玻璃纤维-铝合金黏接界面上的微脱黏缺陷进行评价。用环氧树脂胶将玻璃纤维板和铝合金板黏接起来获得待测试件, 玻璃纤维板和铝合金板的尺寸均为 150 mm × 50 mm × 2 mm。在玻璃纤维和铝合金的界面处预埋不同尺寸的聚四氟乙烯薄膜(并用环氧树脂胶对其进行黏接), 用以模拟

脱黏缺陷。黏接后常温放置 24 h, 按照缺陷面积从小到大依次分为 5 组, 每组包含 4 个试件(4 个试件尽可能保证其等效脱黏面积相同, 缺陷形状不同, 缺陷形状分别为圆形、不规则形、三角形以及正方形), 将各试件依次进行标号。在实验检测电路中, 信号发生器 (DG1302Z) 与功率放大器 (TEGAM2350) 相连后加载到压电片 (H4P12B-183K-2) 上, 两个压电片中的一个用来发射信号, 另一个用来接收检测信号。首先, 对各待测试件进行扫频激励 (频率为 0~500 kHz), 通过示波器 (Tektronix TDS2001C) 测量数据, 对数据进行分析后可得到不同黏接试件的 LDR 频率 (LDR 频率确定方法同第 3 节)。之后调节激励频率和幅值的大小, 获得不同激励条件下的检测结果。搭建的检测电路以及待测试件示意图如图 7 所示。测得各试件的 LDR 频率列于表 1 中。

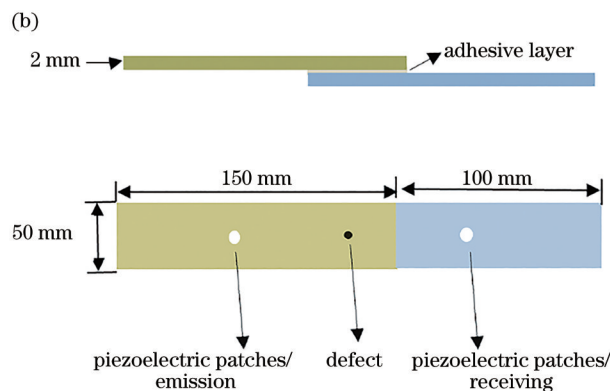
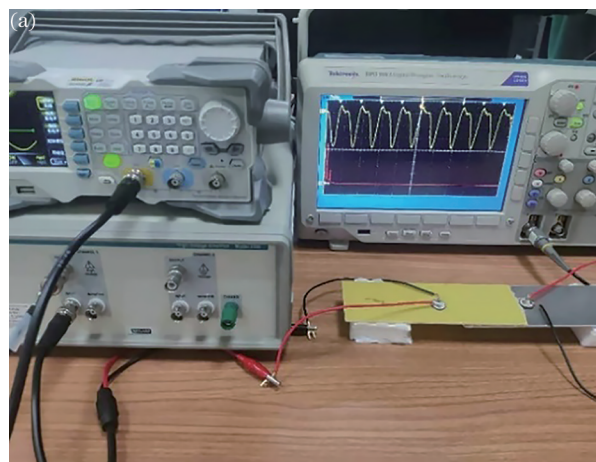


图 7 检测实验。(a)检测电路; (b)待测试件

Fig. 7 Detection experiment. (a) Detection circuit; (b) specimen to be tested

由表 1 可知, 在同样的等效脱黏缺陷面积下, 内含不同形状缺陷的待测试件的 LDR 频率不相同, 但基本都在该组平均值附近。

表 1 不同损伤尺寸试件的 LDR 频率

Table 1 LDR frequency of each specimen with different damage sizes

Damage shape	LDR frequency /kHz				
	Equivalent damage radius of 0.5 mm	Equivalent damage radius of 0.75 mm	Equivalent damage radius of 1 mm	Equivalent damage radius of 1.5 mm	Equivalent damage radius of 2 mm
Circular	466.8	198.7	120.1	63.0	31.5
Irregular shape	458.7	200.2	126.0	58.8	29.9
Triangle	450.6	188.6	109.3	60.6	29.6
Square	482.2	193.1	111.7	58.9	33.0
Average value	464.6	195.2	116.8	60.3	31.0

4.2 基于 LDR 效应增强损伤的非线性

对 6 号试件(测得其 LDR 频率为 31.5 kHz)进行检测,选择激励频率为 31.5 kHz,激励电压为 50 V,所得频域响应结果如图 8 所示;保持激励幅值不变,激励频率设为 40 kHz 进行检测,所得实验结果如图 9 所示。

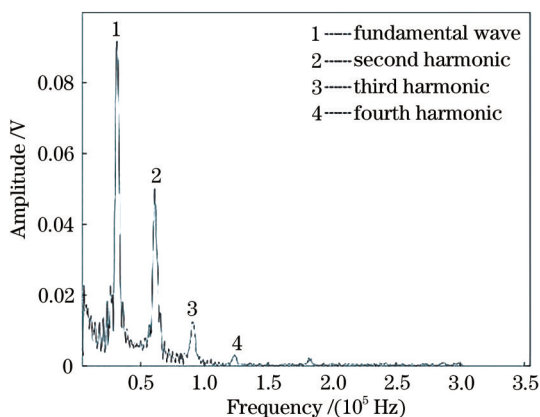


图 8 在 LDR 频率处激励试件 6 所得结果

Fig. 8 Excitation results of specimen 6 at LDR frequency

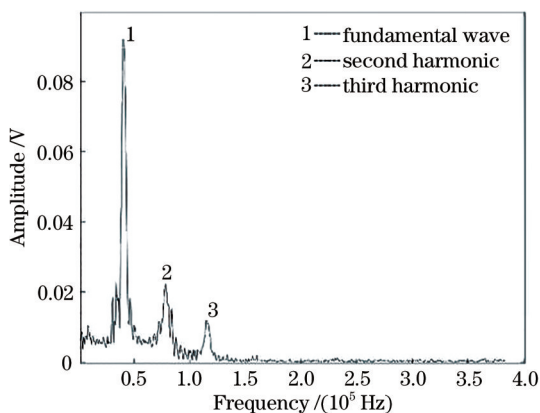


图 9 远离 LDR 频率处激励试件 6 所得结果

Fig. 9 Excitation results of specimen 6 far away from LDR frequency

对比图 8 和图 9 可知,当在接近 6 号试件的 LDR 频率处激励时,二次谐波激发效率比远离 LDR 频率激励时明显增大,图 8 中的 $\beta_2 = 54.37\%$,图 9

中的 $\beta_2 = 24.35\%$ 。这说明,与常规检测相比,基于 LDR 效应的检测具有增强缺陷处非线性的效果。

4.3 基于 2 倍 LDR 频率激励的次谐波效应

仍旧对 6 号试件进行检测,设置激励幅值为 100 V,在该试件的 2 倍 LDR 频率附近取 63 kHz 的激励频率,所得频域响应结果如图 10 所示。由实验结果可知,当激励频率为 LDR 频率的 2 倍时,缺陷处会产生 1/2 次谐波与 3/2 次谐波这两种不同于高次谐波的调制成分。

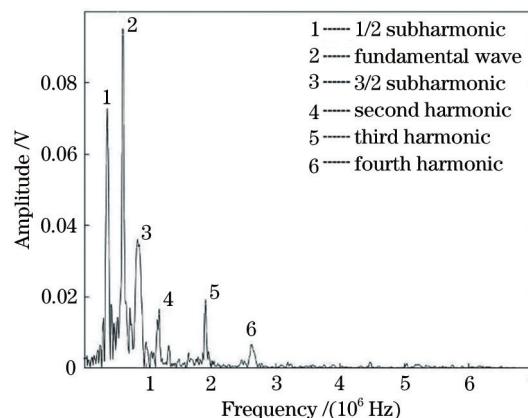


图 10 在 2 倍 LDR 频率处激励试件 6 所得结果

Fig. 10 Excitation results of specimen 6 at 2 times LDR frequency

4.4 基于 LDR 检测对激励幅值的要求低

以下从基于 LDR 检测对激励幅值要求低这一角度来说明在 LDR 频率处激励时非线性成分增强。对 6 号试件进行检测,设定激励频率为 40 kHz(远离 LDR 频率),激励电压在 1~90 V 范围内调节,观测并记录回波响应中各成分的幅值,结果如图 11 所示;设定激励频率为 31.5 kHz(LDR 频率),激励电压在 1~90 V 范围内调节,观测并记录回波响应中各成分的幅值,结果如图 12 所示。

对比图 11 和图 12 可知:在激励频率选择在 6 号试件 LDR 频率附近的情况下,当激励电压约为

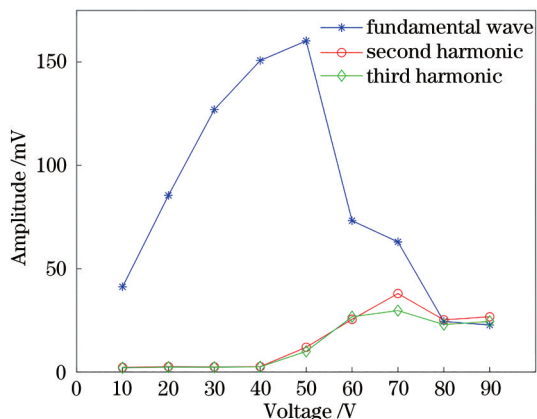


图 11 回波响应中各成分的幅值(激励频率为 40 kHz, 激励电压在 1~90 V 范围内调节)

Fig. 11 Amplitude of each component in echo response (excitation frequency is 40 kHz and excitation voltage is 1-90 V)

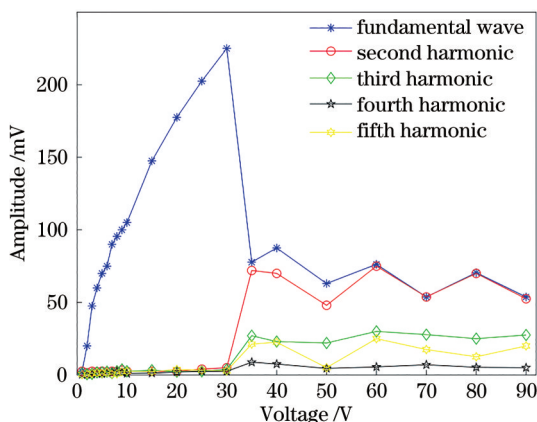


图 12 回波响应中各成分的幅值(激励频率为 31.5 kHz, 激励电压在 1~90 V 范围内调节)

Fig. 12 Amplitude of each component in echo response (excitation frequency is 31.5 kHz and excitation voltage is 1-90 V)

32 V 时,回波中基波的幅值下降明显,各高次谐波幅值上升明显;在激励频率选择在远离 6 号试件 LDR 频率附近的情况下,当激励电压增大到 50 V 左右时,回波中基波的幅值才开始下降,各高次谐波幅值增大,但增势缓慢。对比上述两种结果可知基于 LDR 效应对缺陷进行检测时对激励信号幅值的要求较低,且非线性成分明显增强,这也从另一个角度说明了基于 LDR 的检测可以增强缺陷处的非线性响应。

以下将本文仿真结果和实验结果进行对比分析。除了二次谐波效率 β_2 以外,近年来研究人员在非线形超声损伤评价中多采用非线性系数^[4,6-7]

β' ($\beta' = \frac{A_2}{A_1^2}$, A_2 为二次谐波幅值, A_1 为基波幅值) 对缺陷进行表征。分别根据在 LDR 频率处以及不在 LDR 频率处检测得到的仿真和实验结果计算 β_2 和 β' 的值, 所得结果如表 2 所示。

表 2 不同检测条件下的仿真结果和实验结果

Table 2 Simulated and experimental results under different detection conditions

Parameter	Simulated value		Experimental value	
	Not at LDR	At LDR	Not at LDR	At LDR
β_2	0.3	0.663	0.24	0.54
β'	7.4	15.5	2.6	5.8
Growth rate of β_2		121%		125%
Growth rate of β'		109%		123%

从表 2 可以看出,对于基于 LDR 的检测,本文根据仿真和实验结果计算得到的二次谐波效率 β_2 以及非线性系数 β' 相较于常规非线性超声检测均提高了一倍多。说明基于此方法能有效提高非线性超声检测的灵敏度。此外,3.2 节中的仿真结果与 4.3 节中的实验结果均表明激励频率为 2 倍 LDR 频率时,回波中会有次谐波成分出现,与理论结果一致。

4.5 损伤的定量评估

由 1.2 节推导出圆片形脱黏缺陷的 LDR 频率

$$f_{LDR} = \frac{1.6h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}}$$

查资料可得铝合金的弹性模量为 79 GPa, 密度为 2.72 g/cm³, 泊松比为 0.35, 因此 LDR 频率计算公式中只包含 2 个未知参数, 分别为 l 和 h , 它们分别为缺陷半径以及厚度。假设实验制作的微脱黏层的厚度一致, 选用 6 号试件作为参考试件, 对其损伤厚度进行计算。各参数取值分别为 $f_{LDR6} = 31.5$ kHz, $l = 2$ mm, 计算可得脱黏厚度 $h = 0.0474$ mm, 用此厚度值与实验所测各组试件的平均 LDR 频率对各组脱黏缺陷的等效损伤半径进行估算, 估算结果如表 3 所示, 误差对比如图 13 所示 (l_{th} 为理论计算所得试件脱黏缺陷的等效半径, l_{ex} 为预置脱黏缺陷的等效半径)。

根据图 13 进行误差分析计算, 用误差率 $\delta =$

$$\left| \frac{l_{th} - l_{ex}}{l_{ex}} \right|$$

对所估算的各试件脱黏区域的等效半径误差进行分析, 估算得到的 1~5 组试件的平均误差率分别为 $\delta_1 = 4.2\%$, $\delta_2 = 7.1\%$, $\delta_3 = 3.9\%$, $\delta_4 =$

表 3 各组试件的预置与估算等效损伤半径

Table 3 Preset and estimated damage equivalent radius of each group of specimens

Group number	Preset equivalent damage radius /mm	Estimated equivalent damage radius /mm
1	0.5	0.521
2	0.75	0.803
3	1	1.039
4	1.5	1.446
5	2	2.020

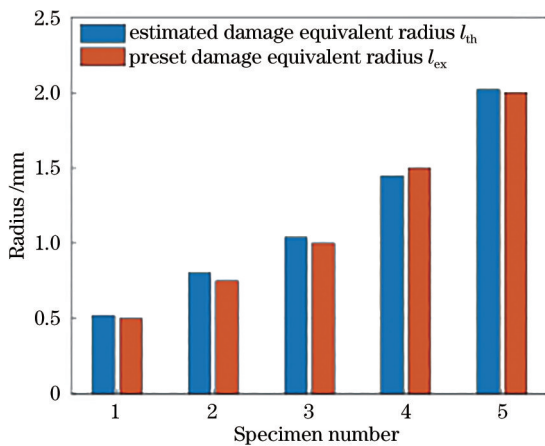


图 13 各组试件预置与估算等效损伤半径的对比

Fig. 13 Comparison of preset and estimated damage equivalent radius of each group of specimens

5.4%, $\delta_5 = 1\%$ 。这表明采用 LDR 频率能较精确地对微脱黏缺陷的等效半径进行估算,最大误差为 7.1%。

5 结 论

本文针对含微脱黏缺陷的脱黏界面建立了单自由度非线性弹簧振子模型,采用此模型分析了基于 LDR 的两种共振情况。此外,推导了 LDR 频率与损伤工况、材料特性之间的关系,并对含不同尺寸微脱黏缺陷的纤维金属层板进行了基于 LDR 的检测实验。理论分析、仿真分析和实验结果表明,不同脱黏工况对应不同的损伤共振频率。当激励频率接近 LDR 频率时,响应中非线性成分的占比明显增加,基于此可以提高非线性超声检测的灵敏度;当激励频率接近 2 倍 LDR 频率时,回波响应中会出现激励信号与缺陷调制产生的次谐波成分,基于此可以提高损伤识别的准确性。利用实验所测各试件的 LDR 频率对脱黏区域的有效损伤半径进行了估算,估算结果与实际情况有较好的一致性。

参 考 文 献

- [1] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora M Ö, et al. A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods[J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 3671-3685.
- [2] Zhang X, Liu G, He L, et al. Numerical analysis of molding properties of glass fiber reinforced resin/magnesium alloy laminates[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 74-79.
张玺, 刘刚, 何丽, 等. 玻璃纤维增强树脂/镁合金叠层板的成型性能数值分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 74-79.
- [3] Che L. Cured deformation behavior of glass fiber reinforced aluminum laminate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
车路. 玻璃纤维增强铝合金层板的固化变形行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [4] Fan L M, Dong F X, An Z W, et al. Study on nonlinear ultrasonic detection technology of debonding defects for rubber/aluminum alloy bond component[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(8): 15-21, 43.
凡丽梅, 董方旭, 安志武, 等. 橡胶/铝合金粘接构件脱粘缺陷非线性超声检测技术研究[J]. 中国测试, 2020, 46(8): 15-21, 43.
- [5] Zhang H. Ultrasonic testing method for bonding quality of ceramic coatings to metal matrix[J]. Materials Protection, 2020, 53(1): 61-66.
张恒. 陶瓷涂层与金属基体结合质量的超声检测方法研究[J]. 材料保护, 2020, 53(1): 61-66.
- [6] Jiang N, Wang Z B, Jin Y, et al. Measurement of interface bond quality of composite structure using nonlinear ultrasound[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(3): 398-402.
江念, 王召巴, 金永, 等. 复合结构界面粘接质量的非线性超声检测[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 398-402.
- [7] Chen J, Qiao D, Cui Z, et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of kissing bond defects in bonded structures [J]. Nondestructive Testing Technology, 2019, 41(9): 60-64, 74.
陈军, 乔丹, 崔哲, 等. 黏接结构弱黏接缺陷的非线性超声评价[J]. 无损检测, 2019, 41(9): 60-64, 74.
- [8] Zheng S P, Lu M H, Wang J D, et al. Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 134-141.
郑善朴, 陆铭慧, 王俊东, 等. 多层结构中脱粘缺陷

- 的超声检测方法[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 134-141.
- [9] Achenbach J D, Parikh O K. Ultrasonic analysis of nonlinear response and strength of adhesive bonds[J]. NDT & E International, 2012, 5(8): 601-618.
- [10] Yelve N P, Mitra M, Mujumdar P M. Detection of stiffener disbonding in a stiffened aluminium panel using nonlinear Lamb wave[J]. Applied Acoustics, 2015, 89: 267-272.
- [11] Yelve N P, Mitra M, Mujumdar P M. Higher harmonics induced in Lamb wave due to partial debonding of piezoelectric wafer transducers[J]. NDT & E International, 2014, 63: 21-27.
- [12] Shui G S, Wang Y S, Huang P, et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of the fatigue damage of adhesive joints[J]. NDT & E International, 2015, 70: 9-15.
- [13] Wang H Q, Cheng L, Liao R J, et al. Non-destructive testing method of micro-debonding defects in composite insulation based on high power ultrasonic[J]. High Voltage, 2019, 4(3): 167-172.
- [14] Li T, Yang Y, Gu X W, et al. Quantitative research into millimetre-scale debonding defects in wind turbine blade bonding structures using ultrasonic inspection: numerical simulations[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2019, 61(6): 316-323.
- [15] Singh A K, Chen B Y, Tan V B C, et al. Finite element modeling of nonlinear acoustics/ultrasonics for the detection of closed delaminations in composites[J]. Ultrasonics, 2017, 74: 89-98.
- [16] Zhang M Y, Xiao L, Qu W Z, et al. Damage detection of fatigue cracks under nonlinear boundary condition using subharmonic resonance[J]. Ultrasonics, 2017, 77: 152-159.
- [17] Maruyama T, Saitoh T, Hirose S. Numerical study on sub-harmonic generation due to interior and surface breaking cracks with contact boundary conditions using time-domain boundary element method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 126/127: 74-89.
- [18] Qu W Z, Zhang M Y, Zhou J Y, et al. Using sub-harmonic resonance to detect bolted joint looseness [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 279-283, 403.
屈文忠, 张梦阳, 周俊宇, 等. 螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法[J]. 振动·测试与诊断, 2017, 37(2): 279-283, 403.
- [19] Solodov I. Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(2): 252-262.
- [20] Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear oscillations[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- [21] Bishop R E D. Vibration problems in engineering[J]. The Aeronautical Journal, 1975, 79(771): 138.