DOI: 10.3901/JME.2019.16.033

非线性超声混频检测技术在无损检测中的研究进展*

苑 博¹ 税国双¹ 汪越胜^{1,2}

(1. 北京交通大学力学系 北京 100044;

2. 天津大学机械工程学院力学系 天津 300350)

摘要: 作为新兴的无损检测手段,非线性超声混频检测技术因其具有空间选择、波形转换、频率可选、方向可控等独特优势,近年来得到了广泛的关注。该技术是利用两列波在介质中的非线性相互作用特性,实现对材料力学性能的无损检测。研究表明,非线性超声混频检测技术可有效检测出诸如材料塑性变形等早期力学性能退化情况,并能实现对缺陷的定位。由于该技术对材料损伤检测的独特优势,近年来国内外许多学者做了大量研究工作,并取得一系列成果。但目前对该技术的综述性工作还相对较少。为更好地理解非线性超声混频检测技术,从共线混频检测和非共线混频检测两个方面,综述该技术在材料无损检测领域中的研究现状及进展,阐述国内外学者对该技术的研究成果。对该技术的发展趋势进行展望,期望为后续非线性超声混频检测技术的进一步研究和应用提供参考。

关键词: 非线性超声;混频技术;无损检测

中图分类号: O347

Advances in Research of Nonlinear Ultrasonic Wave Mixing Detection Technology in Non-destructive Evaluation

YUAN Bo¹ SHUI Guoshuang¹ WANG Yuesheng^{1,2}

(1. Department of Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: As a new non-destructive evaluation method, the nonlinear ultrasonic wave mixing technology has attracted much attention in recent years due to its unique advantages, such as spatial selection, waveform transform, frequency selection and controllable direction. In wave mixing technique, the non-destructive evaluation of mechanical properties of materials are realized by using the nonlinear interaction characteristics of two waves propagating in the medium. The results show that this technology can detect the degradation of mechanical properties at its early stages, such as plastic deformation; and can realize the localization of defects. In recent years, a lot of research works have been conducted and quite many achievements have been obtained in the field of wave mixing technology. However, reviewing papers about the advances in the research of nonlinear ultrasonic wave mixing detection technology in non-destructive evaluation are quite limited presently. To better understand the nonlinear ultrasonic wave mixing detection technology, the recent theoretical, numerical and experimental advances of this technology is reviewed, mainly focusing on the collinear wave mixing detection and non-collinear wave mixing detection methods. Finally, the future research emphasis and development trend of this technology are presented and discussed. It is expected to provide a reference for further research and application of nonlinear ultrasonic mixing detection technology.

Key words: nonlinear ultrasonic; wave mixing; non-destructive evaluation

0 前言

结构长期使用过程中,在自然环境及使用环境

等作用下,材料将逐渐老化,这种累积的损伤必然导致结构性能的退化,其力学性能也将随服役时间的增长而衰减。由于累积损伤过程占据了结构服役期间的绝大部分时间^[1],因此早期结构损伤的检测和评估显得尤为重要。

在工业生产检验中,超声波检测是当前应用最

* 国家自然科学基金资助项目(11472039)。20180717 收到初稿,20190423 收到修改稿

为广泛的无损检测方法。传统的超声无损检测技术是利用超声波传播过程中遇到缺陷时声波的反射、散射等线性特征进行缺陷检测和评价,对材料中的裂纹、夹层、未焊透等类型的缺陷具有较高的检测能力。然而,当缺陷尺寸小于检测超声波波长的二分之一或缺陷与周围介质的声阻抗差别很小时,传统的超声无损检测技术便很难对其实现有效的检测^[2]。与传统超声检测技术相比,非线性超声检测技术能够从本质上反映材料微小缺陷对超声波传播过程的影响,即使是非常小的损伤,当波在材料中传播时也会出现诸如波形畸变、高次谐波滋生、边频带形成等明显的非线性现象^[3-13]。该技术可通过相应的测量方法获得有用的超声非线性响应信号,进而得到反映缺陷的信息,实现材料早期力学性能退化情况的无损检测。

自 20 世纪 60 年代,许多学者^[14-19]研究发现,当两列入射声波满足一定条件时,它们非线性介质中相遇将发生相互作用,产生第三列波,即混频波(也称共振波),该波携带着与材料早期损伤的有关信息。此研究成果为非线性超声混频技术在无损检测中的应用提供了理论依据。随着混频理论的成熟和超声检测仪器的发展,近年来非线性超声混频检测技术得到了广泛的关注。该技术是利用两列超声波在介质中相互作用特性,实现对结构损伤的检测。当两列波在完好区域内相遇时,它们之间满足线性叠加原理,彼此之间不会发生相互作用,不会产生新的频率成分;若区域内含有闭合裂纹等非线性源,当两列波在该区域内相遇时,将发生相互作用,在频域内将会观察到新的频率成分,即和频分量和差频分量^[20]。通过对此成分进行相应分析,可实现对结构力学性能退化情况的检测与评估。

根据两列入射声波的方向是否平行,非线性超声混频检测技术可分为共线混频检测技术和非共线混频检测技术两类^[20]。该技术具有空间选择、波形转换、频率可选、方向可控等明显优势^[21-22]: ① 通过调整超声探头的相对位置或控制两列基频脉冲的发射时间,可实现对试件的扫查以及缺陷的定位; ② 可选择用于进行实时监测的频率,避免接收由测量系统电学部件所产生的同频率谐波噪声信号,剔除了仪器所带来的非线性; ③ 对于非共线混频检测技术,当两列基频波的频率比和入射角度满足一定条件时,两列波相互作用所产生的混频波将沿着特定方向传播,为检测带来了极大的便利^[23]。由于该技术对材料损伤检测的独特优势,近年来国内外许多学者做了大量的研究工作,取得了一系列成果。为更好地了解混频检测技术,本文首先介绍了该技

术的理论基础、之后从共线混频检测和非共线混频检测两个方面,分别综述了该技术在无损检测领域中的研究现状及进展,最后对该技术的发展趋势进行了展望。

1 非线性超声混频理论

考虑 xy 平面内的一维平面波。假设波仅沿 x 轴方向传播,且质点位移 u 仅与位置 x 和时间 t 有关,则一维条件下各向同性固体中的非线性波动方程为^[24-25]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, c 为声速, β 为声学非线性系数。

假设入射声波为两列沿同一方向传播的纵波

$$u_1 = U \cos \left[\omega_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] + V \cos \left[\omega_2 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2)$$

式中, U 和 V 分别为频率 ω_1 、 ω_2 所对应的位移幅值。将式(2)代入式(1),由微扰近似法,最终解得混合波 u_2 的位移表达式为

$$\begin{aligned} u_2 = & -\frac{UV\beta\omega_1\omega_2}{4c^2} x \cos \left[(\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] + \\ & \frac{UV\beta\omega_1\omega_2}{4c^2} x \cos \left[(\omega_1 + \omega_2) \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] + \\ & \frac{U^2\beta\omega_1^2}{8c^2} x \cos \left[(2\omega_1) \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] + \\ & \frac{V^2\beta\omega_2^2}{8c^2} x \cos \left[(2\omega_2) \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

取式(3)等号右边的第一项,得

$$u_{2d} = -\frac{UV\beta\omega_1\omega_2}{4c^2} x \cos \left[(\omega_1 - \omega_2) \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (4)$$

由式(4)可得声学非线性系数

$$\beta \propto \frac{\|u_{2d}\|}{UV} \quad (5)$$

通过分析信号中差频分量所对应的声学非线性系数 β , 可实现对结构损伤的检测。

若入射声波为一列频率 ω_T 、幅值为 V 的横波 v_1 , 另一列为频率 ω_L 、幅值为 U 的纵波 u_1 。当两列波对向混合时,即

$$v_1 = V \sin \left[\omega_T \left(t - \frac{x}{c_T} \right) \right] \quad u_1 = U \sin \left[\omega_L \left(t + \frac{x}{c_L} \right) \right] \quad (6)$$

式中, c_L 和 c_T 分别为纵波波速和横波波速。将式(6)代入质点的运动方程,通过微扰法并忽略高阶项,发现当 $\omega_L - \omega_T \rightarrow (\omega_L / c_L + \omega_T / c_T) c_T$ 时,二者的相

互作用将产生第三列波, 即混频波 v_2 , 此时有^[26-29]

$$\frac{\omega_L}{\omega_T} = \frac{2c_L}{c_L - c_T} \quad (7)$$

式(7)即为横波和纵波对向混合时产生共振波需满足的频率条件。此时 v_2 的数学表达式

$$v_2 = A \cos \left[\omega_R \left(t + \frac{x}{c_T} \right) \right] \quad (8)$$

$$A = \frac{\beta_T UV \omega_T^2 x}{2c_T (c_L - c_T)} \quad \omega_R = \omega_L - \omega_T \quad (9)$$

相应地, 声学非线性系数

$$\beta_T = \frac{2c_T (c_L - c_T)}{UV \omega_T^2 x} A \quad (10)$$

当横波和纵波同向混合时产生混频波需满足的频率条件为

$$\frac{\omega_T}{\omega_L} = \frac{2c_L}{c_L + c_T} \quad (11)$$

此时, 共振波 v_2 的数学表达式为

$$v_2 = A \cos \left[\omega_R \left(t + \frac{x}{c_T} \right) \right] \quad (12)$$

$$A = \frac{\beta_T UV \omega_T^2 x}{2c_T (c_L + c_T)} \quad \omega_R = \omega_L - \omega_T \quad (13)$$

此时声学非线性系数

$$\beta_T = \frac{2c_T (c_L + c_T)}{UV \omega_T^2 x} A \quad (14)$$

由式(8)、(12)可以看出, 当两列共线横波和纵波的频率满足一定条件时, 二者的混合可产生一列新的横波, 其频率为基频波频率之差, 传播方向与基频横波传播方向相反, 波速与基频横波波速相同。

由于该波携带着与试件损伤有关的信息, 因此可通过测量该波的幅值 A 或非线性系数 β 的大小, 实现材料早期力学性能退化的检测与评估。

下面考虑三维情形, 各向同性固体中的三维非线性波动方程可用下式表示^[14]

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} - \left(K + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_l \partial x_l} = \\ \left(\mu + \frac{A}{4} \right) \left(\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_l} + 2 \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + \\ \left(K + \frac{\mu}{3} + \frac{A}{4} + B \right) \left(\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \\ \left(K - \frac{2}{3\mu} + B \right) \left(\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \\ \left(\frac{A}{4} + B \right) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) + \\ (B + 2C) \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, ρ_0 为介质密度, u_i 为质点在 i 方向的位移, x 为质点位置, K 和 μ 分别为压缩模量和切变模量, A 、 B 和 C 为 Landau 三阶弹性常数^[30]。

入射声波位移表达式为

$$\mathbf{u}^0(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}_0 \cos(\omega_1 t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{B}_0 \cos(\omega_2 t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}) \quad (16)$$

式中, $\mathbf{A}_0$ 、 $\mathbf{B}_0$ 为入射波幅度矢量, ω_1 、 ω_2 为入射波的频率, $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_2$ 为入射波的波数。

将式(16)代入式(15), 由傅里叶变换及微扰法, 最终可得两列波相互作用时产生混频波需满足的条件, 如表 1^[14, 31]所示。

表 1 两列波相互作用产生混频波的条件

入射波	混频波波形	混频波方向	$\cos \phi$	$\tan \gamma$	频率比值范围
$T(\omega_1), T(\omega_2)$	$L(\omega_1 + \omega_2)$	$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$	$c^2 + [(c^2 - 1)(a^2 + 1)/2a]$	$\frac{a \sin \phi}{1 + a \cos \phi}$	$\frac{1-c}{1+c} < a < \frac{1+c}{1-c}$
$L(\omega_1), L(\omega_2)$	$T(\omega_1 - \omega_2)$	$\frac{\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2}{\omega_1 - \omega_2}$	$1/c^2 + [(c^2 - 1)(a^2 + 1)/2ac^2]$	$\frac{-a \sin \phi}{1 - a \cos \phi}$	$\frac{1-c}{1+c} < a < \frac{1+c}{1-c}$
$L(\omega_1), T(\omega_2)$	$L(\omega_1 + \omega_2)$	$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$	$c + [a(c^2 - 1)/2c]$	$\frac{a \sin \phi}{c + a \cos \phi}$	$0 < a < \frac{2c}{1-c}$
$L(\omega_1), T(\omega_2)$	$L(\omega_1 - \omega_2)$	$\frac{\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2}{\omega_1 - \omega_2}$	$c - [a(c^2 - 1)/2c]$	$\frac{-a \sin \phi}{c - a \cos \phi}$	$0 < a < \frac{2c}{1+c}$
$L(\omega_1), T(\omega_2)$	$T(\omega_1 - \omega_2)$	$\frac{\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2}{\omega_1 - \omega_2}$	$1/c + [(c^2 - 1)/2ac]$	$\frac{-a \sin \phi}{c - a \cos \phi}$	$\frac{1-c}{2} < a < \frac{1+c}{2}$

表 1 中 L、T 分别表示纵波和横波, ϕ 表示两列入射波 $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 之间的夹角, γ 为入射波 $\mathbf{k}_1$ 和混频波 $\mathbf{k}_3$ 之间的夹角, a 为两列入射波的频率之比 ω_1/ω_2 ,

c 为横波与纵波的波速之比 c_T/c_L , 各列波的空间位置如图 1 所示。

此外, 从表 1 还可以看出, 混频波的传播方向

图1 两列波相互作用示意图

γ 与基频波的夹角 φ 及频率比 α 密切相关, 通过选取合适的频率比 α , 可使混频波沿着理想方向传播。DEMČENKO 等^[16, 23]以 PVC 材料为例, 对两列波相互作用角度 α 、混频波的散射角度 ψ 以及散射系数 W 随频率比 d 的变化情况进行了数值模拟, 模拟结果如图 2 所示^[16, 23]。该结果为选取合适频率以及入射角度的基频波提供了参考。

图2 相互作用角度 α 、混频波的散射角度 ψ 以及散射系数 W 随频率比 d 的变化情况

2 共线混频检测技术

在对材料进行非线性超声混频检测时, 若两列入射声波相互平行或者在同一轴线上, 则称该技术为共线混频检测技术。根据入射声波的类型, 共线混频检测技术主要可分为共线纵波和纵波混频检测技术、共线横波和纵波混频检测技术和兰姆波混频检测技术。理论研究表明^[29], 当两列入射声波均为横波时, 它们之间在非线性区域相互作用所产生的混频波幅值并不会随着在混频区域的传播而累积, 且仅能在混合区域内传播, 无法在混合区域以外进行自由传播, 故这里不考虑共线横波和横波的混合情况。

2.1 共线纵波和纵波混频检测技术

当结构中存在损伤等非线性源时, 若输入信号

为两列不同频率的纵波, 则输出信号中将出现频率为 f_1-f_2 的差频分量及 f_1+f_2 的和频分量, f_1 、 f_2 为初始纵波的频率。通过分析输出信号中是否存在差频分量及和频分量, 可实现对结构有无损伤的判别^[20]。

基于以上分析, 焦敬品等^[20, 32]采用 Ritec-SNAP 非线性超声检测系统, 分别对有无疲劳裂纹的铝质梁进行了共线纵波混频检测。图 3 为所采用的非线性超声共线混频检测的试验系统框图, 其中, 探头 1 用于激励纵波脉冲, 探头 2 与双工控相连, 用于激励和接收超声波。首先利用该系统的超外差接收功能, 由差频分量及和频分量随激励信号频率的变化情况, 优选出最佳混频检测参数; 之后在不同检测参数下, 对比了有无疲劳裂纹试件检测信号的双谱分析情况, 结果如图 4 所示^[32]。可以看出, 在四种混频检测参数下, 相比于无裂纹试件, 有裂纹试

件的双谱分布中均出现了位于对称线之外交叉频率处的非零双谱点, 同时发现, 当激励频率为 2 MHz 和 2.979 MHz 时, 对结构中疲劳微裂纹的检测效果最好, 此时信号的双谱分析峰值达到最大。由此可见, 该技术可实现材料有无微裂纹的判识, 但对于微裂纹尺寸、方向等的检测, 该技术还需进一步研究。

图3 共线纵波混频检测的试验系统框图

图4 不同混频检测参数下, 有无疲劳裂纹试件检测信号的双谱分析结果对比

此外, 焦敬品等^[33]还利用该技术, 对晶间腐蚀的奥氏体不锈钢力学性能退化情况进行了检测。试件如图5所示^[33], 各试件的腐蚀程度: 试件1<试件2<试件3<试件4。定义声学非线性系数

$$\beta = \frac{\hat{B}(f_1, f_2)}{x k_1 k_2 A_1^2 A_2^2} \quad (17)$$

式中, $\hat{B}(f_1, f_2)$ 为检测信号的双谱估计值, x 为波的传播距离, k_1 、 k_2 为基频波的波数, A_1 、 A_2 为基频波的幅值。最终得到了不同腐蚀程度下各试件的声学非线性系数, 如图6所示^[33]。可以看出, 试件的腐蚀程度越明显, 其声学非线性系数越大, 通过该系数的变化情况可实现对不同晶间腐蚀程度的奥氏体不锈钢的力学性能评价。

图5 奥氏体不锈钢试件

图6 各试件声学非线性系数的测量结果

ZHANG 等^[34]采用该技术, 对 40Cr 钢的疲劳损伤情况进行了超声检测, 发现当试件疲劳损伤程度小于 65% 时, 相应的差/和频非线性系数迅速增大; 当试件疲劳损伤程度大于 65% 时, 差/和频非线性系数增速减缓。根据试验结果, 建立了疲劳寿命预测的数学模型, 得到了试件疲劳损伤程度与联合非线性系数之间的关系。试验证明, 该模型可有效预测试件的疲劳损伤情况。

LIU 等^[25]对灰浆棒中的碱-硅酸反应进行了共线纵波混频检测。试件尺寸为 285 mm×100 mm×100 mm, 分别编号 L1、L2、L3。其中, L2 试件为对照组, 该试件置于湿度为 50%、温度为 23 °C 的环境中; L1、L3 为试验组, 该组试件置于 80 °C、浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液中。每隔 24 h, 测量一次各试件的差频非线性系数大小, 测量结果如图7所示^[25]。可以看出, 随着时间的推移, L1、L3 的声

学非线性系数逐渐增大, L2 的声学非线性系数基本保持不变。由此可见, 该技术可有效检测和评估混凝土早期力学性能损伤情况。

图7 各试件归一化的声学非线性系数随时间的变化情况

此外, JU 等^[35]还分析了当考虑介质衰减时试件的声学非线性系数大小, 结果如下

$$\beta = \begin{cases} \frac{4c^2}{\omega_1 \omega_2 x} \frac{U_d}{U_1 U_2} \\ \frac{4c^2 U_d}{U_1 U_2 \omega_1 \omega_2} \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_d)}{[\exp(-\alpha_d x) - \exp(-(\alpha_1 + \alpha_2)x)]} \end{cases} \quad (18)$$

式中, β 为试件的声学非线性系数, c 为纵波波速, ω_1 和 ω_2 、 U_1 和 U_2 分别为两列初始纵波的频率和幅值, x 为传播距离, α_1 、 α_2 和 α_d 分别为两列初始纵波和混合波(频率为初始波频率之差)在介质中的衰减系数。

在此基础上, JU 等^[35]对混凝土中的碱-硅酸反应(ASR)进行了非线性超声共线混频无损检测, 比较了纵波声速、衰减系数以及混频非线性系数随 ASR 破坏程度的变化情况。结果表明, 随着混凝土损伤的加剧, 纵波声速迅速减小而衰减系数迅速增大, 但其灵敏度较差, 很难区分混凝土的不同损伤程度。对于混频非线性系数, 当不考虑介质衰减时, 随着混凝土损伤的加剧其值变化不明显; 当考虑介质衰减时, 其值随损伤程度的增加而增大, 且检测灵敏度较高。

2.2 共线横波和纵波混频检测技术

当两列入射横波和纵波的频率满足一定条件时, 二者在非线性质中相遇将产生第三列波, 该波沿着入射横波相反的方向传播, 波速与入射横波的波速相同。通过对该波进行相应分析, 可实现对材料早期力学性能退化的检测与评估。

LIU 等^[26]采用共线横波和纵波对向混合技术, 对 Al-6061 的塑性变形情况进行了超声检测。试验所采用的非线性超声检测系统如图 8 所示^[26], 其中脉冲发生器为 RITEC 公司生产的 RAM-5000 SNAP 高能幅值放大器, 收发双工器用来保证横波探头可以同时发射和接收信号。当两列入射超声波的频率满足式(7)时, 两列波的混合将产生共振横波, 通过

对该信号进行快速傅里叶变换得到共振波幅值, 由式(10)可求得试件非线性系数的大小, 进而实现对试件损伤的检测。图 9 为试件的非线性系数随轴向残余应变的变化情况^[26], 可以看出, 试件的非线性系数与其塑性变形程度密切相关, 试件的塑性变形越明显, 其非线性系数越大。因此, 该技术不失为一种检测材料塑性损伤的无损检测新方法。然而, 该技术也有一定局限性, 对于较大尺寸的试件, 发射探头的共轴性不易保证, 由于入射横波频率与共振横波频率相差较大, 横波探头需要保证有较宽的频带才能有效接收共振横波。

图8 横波和纵波共线混合所采用的非线性超声检测系统

图9 试件归一化的非线性系数随残余应变的变化情况

TANG 等^[28]采用该技术, 研究了含局部塑性变形的 Al-6061 共振波幅值的分布情况, 通过控制基频脉冲波的发射时间, 使两列波在指定位置相遇, 实现对试件的扫描。各试件共振波幅值分布情况如图 10 所示^[28]。可以看出: ① 有塑性变形的试件, 其共振波幅值要大于对应位置处完好试件的共振波幅值; ② 试件的塑性变形程度越明显, 其共振波幅值越大。由此可见, 在不移动超声探头的前提下, 该技术可实现对材料局部区域的测量, 进而定位材料的损伤位置, 为检测带来了极大便利。此外, 在对试件进行扫描时, 需要事先确定混合区域尺寸, 混合区域过大则扫描的空间分辨率较小, 不利于损伤定位, 若混合区域过小则信噪比较低, 不利于信号提取, 在实际检测中混合区域尺寸约等于试件塑性区域大小。

图10 Al-6061共振横波幅值的分布情况

2.3 兰姆波混频检测技术

随着换能器技术的不断发展,近年来针对兰姆波的非线性共线混频检测技术得到了广泛的关注。LI等^[36]借鉴体波混合时所满足的频率条件(式(11)),提出兰姆波共线同向混合时产生混频波的频率条件

$$\frac{\omega_{S_0}}{\omega_{A_0}} = \frac{2c_{A_0}}{c_{A_0} + c_{S_0}} \quad (19)$$

式中, $\omega_{S_0}, \omega_{A_0}$ 分别为 S_0 模式波与 A_0 模式波的频率, c_{S_0}, c_{A_0} 分别为 S_0 模式波与 A_0 模式波的相速度。当一系列 S_0 模式的波与一系列 A_0 模式的波同向混合时,若二者的频率满足式(19),则两种模式波的混合将产生一系列 A_0 模式波,该波频率为基频波频率之差,传播方向与初始 A_0 模式波的传播方向相反。通过有限元软件 ABAQUS,对兰姆波在薄板中的混合情况进行了模拟,验证了该技术的可行性。由混合波的时域信号特征,可实现试件损伤的位置定位以及损伤区域的大小评价。此外,模拟结果还表明,声学非线性系数随试件二次非线性的增加而增大,结果如图11所示^[36]。

图11 声学非线性系数随二次非线性的变化情况
($f_{S0}=480 \text{ kHz}, f_{A0}=366 \text{ kHz}$)

JIAO等^[37]采用非线性兰姆波混合技术,对板中的裂纹进行了超声检测。材料为冷轧碳钢板,探头发射频率分别为450 kHz和600 kHz,周期个数均为50。定义声学非线性系数如下

$$\beta = \frac{A_{f_1+f_2}}{A_1 A_2} \quad (20)$$

式中, $A_{f_1+f_2}$ 为和频幅值, A_1, A_2 为基频幅值。图12为不同裂纹长度下各试件的声学非线性系数大小^[37],可以看出,随着裂纹长度的增加声学非线性系数呈单调增长趋势,即声学非线性系数对于板中裂纹的检测很敏感,且与试件的损伤程度有很好的相关性。

图12 不同裂纹长度下各试件的声学非线性系数

METYA等^[38]采用该技术,检测9Cr-1Mo钢蠕变过程中的局部塑形变形情况。将和频分量作为评估试件损伤程度的标准,分别测量了不同蠕变条件下试件各位置处和频幅值大小,试验结果如图13所示^[38]。可以看出,随着时间的增加,和频幅值不断增大,试件中部区域的和频幅值要大于试件端部区域的和频幅值。

图13 不同蠕变条件下试件各位置处和频幅值大小

共线混频检测技术作为近期新兴的无损检测方法,具有超声二次谐波检测技术所没有的优势。首先,该技术避免接收一系列由测量系统电学部件所产生的同频率谐波噪声信号,克服了仪器带来的非

线性,使得测量结果更加准确;其次,在不移动超声换能器的条件下,通过控制两列基频脉冲波的发射时间,可实现对试件的扫查和损伤的定位,为检测带来极大的便利。

然而,该技术也有局限性。共线混频检测技术需要保证两列基频波在同一轴线上,在实际检测过程中对探头的布置情况要求较高,尤其对于大尺寸试件;其次,对于横波和纵波混频检测技术,只有当两列波满足一定的频率条件时,才能产生共振波,且该波信号强度较弱,易淹没在噪声里。因此,非线性超声检测系统需要有足够的功率放大能力和微弱谐波信号检测能力,才能有效捕捉到共振波信号。

3 非共线混频检测技术

在对材料进行非线性超声混频检测时,若两列入射声波相互不平行,则称该技术为非共线混频检测技术。根据入射波的类型,非共线混频检测技术可分为非共线横波和横波混频检测技术、非共线横波和纵波混频检测技术及非共线纵波和纵波混频检测技术。下面将分别介绍这三种混频检测技术在无损检测中的研究现状及进展。

3.1 非共线横波和横波混频检测技术

因检测成本低且操作方便,非共线横波和横波混频检测技术是当前应用最为广泛的非共线混频检测技术。图 14 为一个典型的用于非共线超声混频检测的试验装置示意图^[31]。两列不同频率的纵波信号由 Ritec-SNAP 系统的两个输出通道输出,经过特定角度的斜楔后发生波形转换,实现对横波的激发,同时斜楔还保证两列波的相互作用角度,之后两列脉冲波进入待检试件,在预计作用区域产生混频波,该混频信号由位于试件下表面的探头所接收,并经前置放大器放大,传回 SNAP 系统。

图 14 非共线超声混频检测的试验装置示意图

在材料的裂纹检测方面,LI 等^[39-40]利用该技术,对 LY12 铝合金中的疲劳裂纹进行了检测。发

射探头均采用纵波探头,发射频率均为 2.2 MHz,周期个数均为 15。此时共振条件退化为

$$\cos \phi = \frac{2c_t^2}{c_l^2} - 1 \quad (21)$$

式中, ϕ 为两列波的相互作用角度, c_t 、 c_l 分别为横波波速和纵波波速。由 Snell 定律,通过 40° 有机玻璃斜楔,实现对横波的激发。定义试件的非共线混频非线性系数

$$\beta = \frac{u_{sca}}{A_1 A_2} \quad (22)$$

式中, u_{sca} 为混频波幅值, A_1 、 A_2 为基频波幅值。通过移动两发射探头之间的相对位置,最终得到了混频非线性系数沿试件厚度方向的分布情况,并与二次谐波法得到的非线性系数进行了对比,试验结果如图 15 所示^[40]。可以看出,与二次谐波法相比,尽管二次谐波法得到的非线性系数要大于非共线混频非线性系数,但混频非线性系数沿试件厚度方向上数值变化更明显,因而更利于对材料损伤位置的定位。然而,受声波入射角度与试件尺寸的制约,在试件边缘处,该技术存在检测盲区。

图 15 材料非线性系数分布情况

此外,焦敬品等^[31,41]对含不同闭合裂纹长度的钢质梁进行了非共线横波混频检测。探头布置情况如图 16 所示^[31],发射探头均采用斜探头,各探头的折射角度分别为 70° 和 45°,探头一的发射频率为 2.34 MHz,探头二的发射频率由扫频以及共振条件确定,其大小为 3.85 MHz。两列波相互作用所产生的混频波由试件下方的纵波直探头接收,通过移动激励探头的相对位置控制两列入射声波在试件中的交汇位置,实现对试件深度方向的扫查。混频非线性系数沿深度方向上的分布情况如图 17 所示^[31]。可以看出,各试件混频非线性系数沿深度方向的变化趋势基本一致,刚开始其值较大,随着深度的不断增加,其值迅速减小,最后稳定在某一较小水平上;当某一位置存在闭合裂纹时,该位置的混频非线性

系数较高,当该位置没有缺陷时,则混频非线性系数较小。根据混频非线性系数沿试件深度方向的分布情况,可实现闭合裂纹沿深度方向上长度的测量。

图 16 探头布置方案图

图 17 不同试件混频非线性系数随深度变化规律

THANSEER 等^[42]采用非共线横波混频检测技术,对应力疲劳作用下 9Cr-Mo 钢裂纹尖端的塑性区域进行了超声检测。每 5 000 次应力疲劳,测量一次试件的非线性系数,测量结果如图 18 所示^[42]。可以看出,非线性系数随应力疲劳次数的变化情况可分为三个阶段: I 阶段,非线性系数增长缓慢,此时非线性源主要来自位错等因素; II 阶段,裂纹萌生并逐渐向两列波的混合区域靠近,此时非线性

图 18 归一化的非线性系数及裂纹尖端与波混合区域的距离随疲劳次数的变化情况

系数逐渐增大,当裂纹尖端的塑性区域抵达两列波的混合区域时,非线性系数达到最大; III 阶段,裂纹继续向前延伸并越过两列波的混合区域,此时非线性系数迅速减小。此外,通过移动两发射探头的相对位置,可实现对试件沿深度方向和水平方向的扫查。

在材料的塑性变形检测方面,CROXFORD 等^[43]利用该技术对塑性变形和疲劳损伤状态下的 Al2014-T4 进行了非线性超声混频检测。发射探头均为纵波探头,发射频率均为 5.5 MHz,根据 Snell 定理,通过 60°的有机玻璃斜楔实现对横波的激发,两列横波相互作用所产生的纵波由置于试件正上方的纵波探头接收,最终得到了试件非线性系数随残余应力和疲劳次数的变化情况,如图 19、20 所示^[43]。可以看出,随着残余应力和疲劳次数的不断增加,初始阶段试件的非共线混频非线性系数迅速增大,随后其变化趋势趋于平缓。

图 19 归一化的非共线混频非线性系数 χ 随塑性残余应变的变化情况

图 20 归一化的非共线混频非线性系数 χ 随疲劳次数的变化情况

孙茂循等^[44-45]对拉伸载荷作用下 Al7075 的塑性变形情况进行了非共线横波混频检测,试验结果如图 21 所示^[44]。可以看出,随着残余塑性变形量的增加,声学非线性系数呈增长趋势,通过改变混合区域的位置,可实现对试件的 2D 损伤成像及 3D 损伤成像,这为无损探伤提供了一种新的思路。

图 21 声学非线性参数随塑性应变增大的变化规律

此外, 刘斯明等^[21]将非共线横波混频检测技术用于检测 SiC_p 颗粒增强铝基复合材料的均匀性, 验证了该技术可作为评价试件内部非线性的手段。ZHANG 等^[46]对 TC4 钛合金的扩散焊接界面进行了检测, 通过对界面反射信号进行分析, 实现了对焊接界面质量的评价。BLANLOEUIL 等^[47-48]以含有闭合裂纹的铝试件为例, 采用有限元软件模拟了两列斜入射横波在闭合裂纹处相互作用情形, 分析混频纵波幅值随压力以及横波入射角度的变化情况。

3.2 非共线横波和纵波混频检测技术

当前, 对于非共线横波和纵波混频检测技术的研究主要集中在以下两种情形

$$SV(\omega_1) + L(\omega_2) \rightarrow L(\omega_1 + \omega_2)$$

$$L(\omega_1) + SV(\omega_2) \rightarrow SV(\omega_1 - \omega_2)$$

下面将针对以上两种情形分别进行综述讨论。

对于第一种情形, DEMČENKO 等^[49]采用 3D 光线追踪技术, 研究了当两列入射波不完全满足共振条件时散射场的特征情况, 发现随着入射角度偏差的增加: ① 散射场的波束发生偏转; ② 散射场的波束峰值减小; ③ 散射场波束发生分裂。该研究结果为非共线横波和纵波混频检测技术的应用提供了参考。此外, DEMČENKO 等^[50-51]还利用该技术, 测量了 PVC 试件的老化情况, 发现检测结果与声速、衰减测量等常规超声检测方法相比, 该技术对于试件老化情况的检测具有更高的灵敏度。

对于第二种情形, JU 等^[52]以 Al-6061 粘接界面为例(胶粘剂采用 F-9473PC), 测量了粘接界面的混频波幅值随热老化时间的变化情况。由两列波的相互作用角度 α 、混频波的散射角度 ψ 随频率比 d 的变化情况(如图 22 所示^[52]), 选取了合适的发射频率, 使产生的混频横波能恰好沿着垂直于试件表面的方向传播。这里选取纵波入射角度为 60° , 频率为 5 MHz; 横波入射角度为 38.21° , 频率为 3.5 MHz。试件置于 170°C 的干燥箱内, 每隔一段时间测量一次混频波幅值大小, 最终得到了归一化的混频波幅

值随热老化时间的变化情况, 如图 23 所示^[52]。可以看出, 随着热老化时间的增加, 归一化的混频波幅值总体上呈增长趋势, 因此该技术可用于对粘接界面力学性能退化情况的无损检测。由于发射探头与接收探头均位于试件的同一侧, 使得该技术在检测应用中更加方便、灵活。

图 22 相互作用角度 α 与散射角度 ψ 随频率比 d 的变化情况

图 23 归一化的混频波幅值随热老化时间的变化情况

3.3 非共线纵波和纵波混频检测技术

当两列纵波的入射角度和频率满足一定条件时, 二者在非线性区域的相互作用将产生一系列新的混频横波, 该波频率为基频频率之差, 传播方向为基频波传播方向的矢量差。通过对混频横波进行相应分析, 可实现对材料性能的无损检测与评价。

焦敬品等^[53]采用有限元软件 ABAQUS, 对闭合裂纹的非共线纵波和纵波混频检测技术进行了仿真研究, 通过对接收到的信号进行滤波处理, 经傅里叶变换后发现了差频成分的存在。该模拟结果表明在闭合裂纹处两列纵波的混合将发生相互作用, 产生混频横波。

MCGOVERN 等^[54-56]采用非共线纵波和纵波混频检测技术, 对沥青混凝土路面的老化情况进行了超声检测。结果发现随着老化时间的增加, 沥青混凝土的非线性系数逐渐减小, 当老化时间为 24 h 该值达到最小; 之后随着老化时间的不断延长, 其非线性系数呈指数式增长, 检测结果如图 24 所示^[54]。可以看出, 该技术可有效实现对沥青混凝土路面的

质量检测 and 评估。

图 24 归一化的非线性系数随老化时间的变化情况

与传统谐波共线非线性方法相比,非共线混频检测技术剔除了仪器带来的非线性,使得非线性检测结果更加准确;通过移动发射探头的位置,可实现对试件的扫查,进而实现对缺陷的定位;此外,由于混频波的传播方向与基频波的频率比、入射角度密切相关,因此,通过选取合适的检测频率和入射角度,可使混频波沿着理想的方向传播,为检测带来了极大的便利。

然而,该技术也存在一些问题。由于在实际的超声检测过程中需要布置三个探头,因此对被检测试件的尺寸大小有一定的要求;另外,对试件进行扫查时,在试件的边缘处会存在检测盲区;第三,接收信号的信噪比有待提高。

4 总结和展望

非线性超声混频检测技术作为近期新兴的无损检测手段,在材料早期力学性能退化损伤的检测方面有着非常广泛的应用前景。实践证明,该技术可有效检测出材料的疲劳寿命、拉伸塑性变形、蠕变损伤、闭合裂纹等早期力学性能退化情况。与传统的谐波穿透式非线性超声检测方法相比,该技术具有许多得天独厚的优势。首先,该技术可实现对材料早期损伤位置的定位。通过控制两列基频脉冲波的发射时间,或者改变换能器的相对位置,可对试件进行扫查,进而确定缺陷的位置和大小。其次,该技术对材料的非线性评价更为准确。传统的谐波穿透式方法在检测过程中易受超声检测仪器的影响,信号发生器、换能器、功率放大器等都会带来一定的非线性,而非线性超声混频检测技术可巧妙的克服这些仪器带来的非线性,由于混频波的频率为两列波的差频分量或和频分量,通过对接收到的

信号进行滤波处理,可以获得混频波信号,进而排除了仪器谐波的干扰,使得测量结果更加准确。第三,该技术可以控制混频波的传播方向。通过选取合适的入射频率和入射角度,可使产生的混频波沿着理想的方向传播,为检测带来了便利。

然而,该技术也存在一定局限性。对于超声共线混频检测技术,检测成本较高,所采用的横波探头需有较宽的频带才能有效接收共振波。对于超声非共线混频检测技术,由于检测时需布置三个探头,因此对试件的外形、尺寸等有一定要求;当对试件进行扫查时,在试件的边缘附件会存在检测盲区;此外,接收信号的信噪比较低。

目前对于超声混频检测技术的研究尚处于起步阶段,未来该技术还有很大的发展空间,在以上分析讨论的基础上,下面列出了可进一步发展完善的几个方面。

(1) 检测材料和构件。当前非线性超声混频技术主要集中在金属材料的损伤检测,对于橡胶、陶瓷、塑料等非金属材料的检测应用较少,未来的试验研究还应涉及多种非金属材料。

(2) 混频理论。迄今为止,对于体波混合(纵波和纵波混合、纵波和横波混合以及横波和横波混合等)和兰姆波混合产生混频效应的理论研究较为成熟,其他类型波(如表面波、Love波、界面波等)的混合能否产生混频波还有待进一步研究。

(3) 信号处理。由于混频波信号随机性强,具有非稳态等特点,如何从混频信号中提取出只与待测试件性质的声学参量将是该技术应用的重点。

(4) 仪器设备。由于共振波的信号幅度小,为有效捕捉混频波信号,非线性超声检测仪器需有足够的功率放大功能和微弱谐波信号的测量能力。

(5) 损伤检测的灵敏度分析。当前关于不同类型的混频检测技术对于材料损伤检测灵敏度的研究还相对较少,未来可加强该方面的研究,比较各混频检测技术对于材料损伤检测的灵敏程度。

非线性超声混频检测技术是一种具有较大发展潜力的无损检测技术,随着对该技术研究的不断深入,非线性超声混频检测技术将日趋完善,相信未来该技术必将在无损检测领域得到广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 税国双,汪越胜,曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 52-68.
SHUI Guoshuang, WANG Yueheng, QU Jianmin. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound[J]. Advances in

- Mechanics, 2005, 35(1): 52-68.
- [2] 张俊哲. 无损检测技术及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010.
- ZHANG Junzhe. Nondestructive testing technology and its application [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] CANTRELL J H, YOST W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(1): 487-490.
- [4] ABEELE E A V D, SUTIN A, CARMELIET J, et al. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy(NEWS)[J]. NDT & E International, 2001, 34(4): 239-248.
- [5] 高广健, 邓明晰, 李明亮, 等. 管间界面特性对周向超声导波传播特性的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 284-293.
- GAO Guangjian, DENG Mingxi, LI Mingliang, et al. Influence of the interfacial properties on guided circumferential wave propagation in the circular tube structure[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 284-293.
- [6] BUCK O. Harmonic generation for measurement of internal stresses as produced by dislocations[J]. IEEE Transactions on Sonics & Ultrasonics, 2005, 23 (5): 346-350.
- [7] SOLODOV I Y. Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1): 383-390.
- [8] NAZAROV V E, SUTIN A M. Nonlinear elastic constants of solids with cracks[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 102(6): 3349-3354.
- [9] JHANG K Y, KIM K C. Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect[J]. Ultrasonics, 1999, 37(1): 39-44.
- [10] FROUIN J, SATHISH S, MATIKAS T E, et al. Ultrasonic linear and nonlinear behavior of fatigued Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Research, 1999, 14(4): 1295-1298.
- [11] 颜丙生, 刘自然, 张跃春, 等. 非线性超声检测镁合金早期疲劳的实验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49 (4): 20-24.
- YAN Bingsheng, LIU Ziran, ZHANG Yuechun, et al. Experimental study of early fatigue nonlinear ultrasonic detection in magnesium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (4): 20-24.
- [12] 阎红娟, 徐春广, 肖定国, 等. 金属材料拉伸应力非线性超声特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (6): 22-29.
- YAN Hongjuan, XU Chunguang, XIAO Dingguo, et al. Research on nonlinear ultrasonic properties of tension stress in metal materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (6): 22-29.
- [13] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2011, 47 (8): 2-11.
- ZHOU Zhenggan, LIU Siming. Nonlinear ultrasonic techniques used in nondestructive testing: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 2-11.
- [14] JONES G L, KOBETT D R. Interaction of elastic waves in an isotropic solid[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(1): 5-10.
- [15] JOHNSON P A, SHANKLAND T J, O'CONNELL R J, et al. Nonlinear generation of elastic waves in crystalline rock[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2012, 92(B5): 3597-3602.
- [16] KORNEEV V A, DEMČENKO A. Possible second-order nonlinear interactions of plane waves in an elastic solid[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(2): 591-598.
- [17] YEH P. Two-wave mixing in nonlinear media[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1989, 25(3): 484-519.
- [18] DEMČENKO A. Non-collinear wave mixing for a bulk wave phase velocity measurement in an isotropic solid[C]// Ultrasonics Symposium, IEEE, 2013: 1437-1440.
- [19] KORNEEV V A, NIHEI K T, MYER L R. Nonlinear interaction of plane elastic waves[R]. CA (United States): Lawrence Berkeley National Lab, 1998.
- [20] 焦敬品, 孙俊俊, 吴斌, 等. 结构微裂纹混频非线性超声检测方法研究[J]. 声学学报, 2013, 38(6): 648-656.
- JIAO Jingpin, SUN Junjun, WU Bin, et al. A frequency-mixing nonlinear ultrasonic technique for micro-crack detection[J]. Acta Acustica, 2013, 38(6): 648-656.
- [21] 刘斯明, 彭地, 赵翰学, 等. SiCp 颗粒增强铝基复合材料非共线非线性响应试验观察[J]. 机械工程学报, 2012, 48 (22): 21-26.
- LIU Siming, PENG Di, ZHAO Hanxue, et al. Experimental observation of nonlinear response of SiCp Aluminum-matrix composites using non-collinear technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 21-26.
- [22] 王丽梅. 基于谐波和波束混叠理论的非线性超声检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- WANG Limei. Research of nonlinear ultrasonic detection technique based on harmonic theory and beam mixing[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [23] DEMČENKO A. Development and analysis of noncollinear wave mixing techniques for material properties evaluation using immersion ultrasonics[D]. Enschede: Universiteit Twente, 2014.
- [24] 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.

- HU Haifeng. 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.
- [25] LIU M, TANG G, JACOBS L J, et al. A nonlinear wave mixing method for detecting alkali-silica reactivity of aggregates[C]//AIP Conference Proceedings, AIP, 2012 (1): 1524-1531.
- [26] LIU M, TANG G, JACOBS L J, et al. Measuring acoustic nonlinearity parameter using collinear wave mixing[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(2): 375-381.
- [27] TANG G. Wave propagation in nonlinear media and its applications in nondestructive damage assessment of metallic materials[D]. Xi'an: Northwestern University, 2013.
- [28] TANG G, LIU M, JACOBS L J, et al. Detecting localized plastic strain by a scanning collinear wave mixing method[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(2): 196-204.
- [29] CHEN Z, TANG G, ZHAO Y, et al. Mixing of collinear plane wave pulses in elastic solids with quadratic nonlinearity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(5): 2389-2404.
- [30] LANDAU L, LIFSHITZ E. Theory of elasticity [M]. 3rd ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1986.
- [31] 焦敬品, 樊仲祥, 吴斌, 等. 闭合裂纹非共线混频超声检测试验研究[J]. 声学学报, 2017(2): 205-213.
- JIAO Jingpin, FAN Zhongxiang, WU Bin, et al. Experiments of non-collinear mixed frequency ultrasonic for closed crack detection[J]. Acta Acustica, 2017(2): 205-213.
- [32] JIAO J, SUN J, LI N, et al. Micro-crack detection using a collinear wave mixing technique[J]. NDT & E International, 2014, 62(2): 122-129.
- [33] JIAO J, SUN J, LI G, et al. Evaluation of the intergranular corrosion in austenitic stainless steel using collinear wave mixing method[J]. NDT & E International, 2015, 69(6): 1-8.
- [34] ZHANG Y, LI X, WU Z, et al. Fatigue life prediction of metallic materials based on the combined nonlinear ultrasonic parameter[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26(7): 1-9.
- [35] JU T, ACHENBACH J D, JACOBS L J, et al. Ultrasonic nondestructive evaluation of alkali-silica reaction damage in concrete prism samples[J]. Materials & Structures, 2017, 50(1): 60.
- [36] LI F, ZHAO Y, CAO P, et al. Mixing of ultrasonic Lamb waves in thin plates with quadratic nonlinearity[J]. Ultrasonics, 2018, 87: 33-43.
- [37] JIAO J, MENG X, HE C, et al. Nonlinear Lamb wave-mixing technique for micro-crack detection in plates[J]. NDT & E International, 2016, 85: 63-71.
- [38] METYAA K, TARAFDER S, BALASUBRAMANIAM K. Nonlinear Lamb wave mixing for assessing localized deformation during creep[J]. NDT & E International, 2018, 98: 89-94.
- [39] LI H, AN Z, LIAN G, et al. Detection of plastic zone at crack tip by non-collinear mixing method[C]// 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), IEEE, 2014: 154-157.
- [40] LI H, AN Z, LIAN G, et al. The non-collinear mixing method for the detection of the material fatigue[C]// The 21st International Congress on Sound and Vibration. Beijing: 2014: 1-6.
- [41] JIAO J, LV H, HE C, et al. Fatigue crack evaluation using the non-collinear wave mixing technique[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(6): 065005.
- [42] THANSEER P M, METYA A K, SAGAR S P. Development of a non-collinear nonlinear ultrasonic-based technique for the assessment of crack tip deformation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(6): 2632-2639.
- [43] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. The use of non-collinear mixing for nonlinear ultrasonic detection of plasticity and fatigue[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(5): EL117-EL122.
- [44] 孙茂循, 项延训, 轩福贞. 材料塑性损伤的非共线波束混频定位及表征方法[J]. 声学技术, 2016, 35(4): 178-182.
- SUN Maoxun, XIANG Yanxun, XUAN Fuzhen. Localizing the plastic deformation zone using the non-collinear wave mixing method[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(4): 178-182.
- [45] SUN M, XIANG Y, DENG M, et al. Scanning non-collinear wave mixing for nonlinear ultrasonic detection and localization of plasticity[J]. NDT & E International, 2018, 93: 1-6.
- [46] ZHANG Z, NAGY P B, HASSAN W. Enhanced nonlinear inspection of diffusion bonded interfaces using reflected non-collinear ultrasonic wave mixing[C]// American Institute of Physics Conference Series. AIP Publishing LLC, 2016: 103-128.
- [47] BLANLOEUIL P, MEZIANE A, BACON C. 2D finite element modeling of the non-collinear mixing method for detection and characterization of closed cracks[J]. NDT & E International, 2015, 76: 43-51.
- [48] BLANLOEUIL P, MEZIANE A. Finite element modeling

- of the non collinear mixing method for detection and characterization of closed cracks[C]// Earli Sig 15 on Special Educational Needs : Challenges in Learning & Instruction. AIP Publishing LLC, 2015: 621-625.
- [49] DEMČENKO A, MAININI L, KORNEEV V A. A study of the noncollinear ultrasonic-wave-mixing technique under imperfect resonance conditions[J]. Ultrasonics, 2015, 57: 179-189.
- [50] DEMČENKO A, AKKERMANN R, NAGY P B, et al. Non-collinear wave mixing for non-linear ultrasonic detection of physical ageing in PVC[J]. NDT & E International, 2012, 49(1): 34-39.
- [51] DEMČENKO A, KOISSIN V, KORNEEV V A. Noncollinear wave mixing for measurement of dynamic processes in polymers: Physical ageing in thermoplastics and epoxy cure[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 684-693.
- [52] JU T, ACHENBACH J D, JACOBS L J, et al. A non-collinear mixing technique to measure the acoustic nonlinearity parameter of an adhesive bond from one side of the sample[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017(1): 020011.
- [53] 焦敬品, 李立, 吕洪涛, 等. 闭合裂纹非共线混频超声检测方法仿真研究[C]//北京力学学会第二十三届学术年会会议论文集, 2017: 488-490.
- JIAO Jingpin, LI Li, LÜ Hongtao, et al. Simulation of non-collinear ultrasonic wave mixing detection method for closed cracks[C] // Proceedings of the 23rd Annual Conference on Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 488-490.
- [54] MCGOVERN M E, BUTTLAR W G, REIS H. Estimation of oxidative ageing in asphalt concrete pavements using non-collinear wave mixing of critically-refracted longitudinal waves[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2015, 57(1): 25-34.
- [55] MCGOVERN M E, BUTTLAR W G, REIS H. Characterisation of oxidative ageing in asphalt concrete using a non-collinear ultrasonic wave mixing approach[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(7): 367-374.
- [56] MCGOVERN M E, BUTTLAR W G, REIS H. Field assessment of oxidative aging in asphalt concrete pavements with unknown acoustic properties[J]. Construction & Building Materials, 2016, 116: 159-168.
-
- 作者简介: 苑博, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声无损检测及其应用。
E-mail: 15115256@bjtu.edu.cn
- 税国双(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂介质和结构的波动力学及应用、非线性超声无损检测。
E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn
- 汪越胜, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。长期从事弹性波和断裂力学方面的理论和应用研究; 包括各向异性介质、复合材料、周期结构、液体饱和孔隙介质的弹性波传播问题, 波与接触界面的相互作用, 复合材料的断裂动力学, 功能梯度材料的断裂力学与接触力学, 基于位错的断裂动力学等。
E-mail: yswang@bjtu.edu.cn