黏接复合结构损伤的非线性超声评价研究进展

李晓阳¹, 税国双^{1*}, 汪越胜^{1,2*}

1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 天津大学机械工程学院, 天津 300350

* 联系人, E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn; yswang@tju.edu.cn

2021-07-19 收稿, 2021-10-15 修回, 2021-10-18 接受, 2021-10-20 网络版发表

国家自然科学基金(11172034, 11472039, 11772040)资助

摘要 黏接复合结构具有重量轻、应力分布均匀等优点, 广泛应用于航空航天、船舶以及汽车工业中。黏接界面是黏接复合结构的重要构成要素, 在很大程度上决定着该复合结构的总体力学性能, 因此对其损伤的检测与评价研究一直是大家关注的热点问题。对于空间尺寸远小于超声波波长的材料微观结构特征变化, 非线性超声检测技术具有更高的表征灵敏度。近年来, 非线性超声检测技术得到了相关领域的广泛关注, 一系列研究成果不断涌现。本文综述了近年来利用非线性超声对黏接复合结构及其界面损伤进行无损评价的研究进展, 主要包括基于透射体波、导波和混频波的结构界面早期性能退化、微观损伤的超声检测与评价研究成果, 并对今后进一步的研究进行了展望。

关键词 非线性超声波, 无损检测, 黏接复合结构, 导波, 混频

黏接是利用胶黏剂在联接面上产生的机械结合力、物理吸附力和化学键合力而使两个黏接件联接起来的工艺方法。黏接复合结构具有比强度、比模量高, 应力分布均匀, 减震性能优越和工艺简单等优点^[1], 因此被广泛应用于航空航天、船舶以及汽车工业中。比如现代航空工业, 利用黏接的工艺方法后, 由于金属联接件的减少, 结构构件重量可减轻20%~25%, 疲劳强度比铆接提高10倍^[2]。黏接界面是黏接复合结构的重要构成要素, 其在很大程度上决定着复合结构的总体力学性能, 重要工程中众多新型材料均是通过黏接界面的设计来调配其总体力学性能的, 因此对材料黏接界面行为的研究一直是科学界和工程界关注的热点问题^[3]。

超声无损检测是利用超声波在对结构不造成损伤的情况下进行的检测评价, 自诞生以来已成为一种发

展历史较长的材料性能检测技术手段, 并在工程实践中得到了广泛的应用。现有的超声无损检测技术主要是针对结构寿命的损伤起始与积累以及最终的失效阶段, 如探测材料中的微孔、微裂纹等缺陷的存在和分布等, 这主要应用了声波的时程、声速、衰减、阻抗、散射等信息。早期, Maeva等人^[4]综述了利用超声扫描、超声共振谱以及Lamb波法对黏接结构中的损伤进行检测的研究进展。虽然超声无损检测技术可以表征黏接面中的孔洞、裂缝以及脱胶等缺陷, 但对黏接接头的黏接强度、黏接力、黏接面的微观损伤以及早期性能退化情况等直接、定量的评价和检测就无能为力了。近年来发展的非线性超声检测技术可以较为有效地解决上述问题。一系列的研究表明, 材料性能退化总是伴随着某种形式的微观结构变化以及材料非线性力学行为, 从而引起超声波传播的非线性, 即高

引用格式: 李晓阳, 税国双, 汪越胜. 黏接复合结构损伤的非线性超声评价研究进展. 科学通报, 2022, 67: 610–620

Li X Y, Shui G S, Wang Y S, et al. Progress on nonlinear ultrasonic evaluation of damages within the adhesively bonded composites (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 610–620, doi: 10.1360/TB-2021-0711

频谐波的产生^[5~10]。

正是由于非线性超声对材料微观结构变化更加敏感,对结构材料的早期性能退化、微小损伤检测有着很大的优势,因此近年来受到广泛关注^[11~15]。比如,邓明晰^[16]最先采用界面非线性声反射技术得到了共振条件下具有累积增长效应的Lamb波二次谐波解析解,为基于非线性Lamb波的超声检测提供了重要的理论基础。Nagy^[17]基于非线性超声的疲劳损伤评价、Deng等人^[18]的非线性Lamb波二次谐波累积效应实验验证、Pruehl等人^[19]基于非线性Lamb波的塑性损伤检测、Shui等人^[20]基于非线性表面波的材料表面损伤检测、Xiang等人^[21]群速度不匹配条件下可累积二次谐波产生的问题研究、Lissenden等人^[22]基于三次谐波的局部塑性损伤评价等,为非线性超声评价方法的进一步研究奠定了坚实的基础。Croxford等人^[23]利用非共线混频方法对塑性变形和疲劳损伤的评价、焦敬品课题组^[24,25]利用混频波对疲劳裂纹损伤和奥氏体不锈钢中的腐蚀检测、Zhao等人^[26]基于含随机分布裂纹的有限元模型对薄板中非线性Lamb波产生机制的分析等,则为非线性超声技术的应用开辟了更广阔的空间。

同其他损伤相比,黏接复合结构和界面中的损伤检测与评价更为复杂。对一个典型的黏接面来说,其厚度一般在100 μm左右,其中界面层的厚度一般在5~10 μm^[27]。黏接面的失效形式有两种:发生于胶黏剂与被黏接物间的界面层的失效(adhesion failure),以及发生于胶黏剂层内部的失效(cohesion failure)^[28]。由于黏接界面的存在,超声波在复合结构和界面中传播时会发生复杂的折射、反射和散射,而且胶层的存在会加大声波的能量衰减,这些问题使研究声波在黏接结构中的传播变得更复杂。基于非线性超声方法,近年来相关领域的专家学者对复合结构黏接界面的损伤检测研究开展了大量卓有成效的工作^[29~31]。根据具体黏接复合结构的特点,目前比较常用的非线性超声检测方法有体波透射法、导波法和混频法。体波透射法和导波法主要利用高次谐波幅值、基于高次谐波和基波幅值的非线性系数等参量来评价黏接结构中的早期性能退化和微观损伤,混频法则主要利用混频共振波幅值、基于混频波幅值与初始激励波幅值比的非线性系数等参量对黏接结构早期损伤进行检测评价与定位。下面具体综述近年来基于体波、导波和混频波的黏接复合结构及其界面损伤的非线性超声无损评价研究进展。

1 基于体波的非线性超声检测

当一列超声纵波在含有损伤的介质中传播并考虑非线性本构关系时,其非线性波动方程可以写成

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left(1 + \beta \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

其中, β 是与材料高阶弹性常数相关的非线性系数。当入射波为 $A_1 \cos(kx - \omega t)$ 时,根据近似微扰理论可以得到非线性波动方程的解为

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x + A_1 \cos(kx - \omega t) \\ &\quad + \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x \cos[2(kx - \omega t)] + \dots \\ &= A_0 + A_1 \cos(kx - \omega t) + A_2 \cos[2(kx - \omega t)] + \dots, \quad (2) \end{aligned}$$

其中, A_1 为基频波幅值, A_2 为二次谐波幅值。随着早期损伤的产生与演化,材料的高阶弹性常数变化更显著,导致非线性系数 β 也产生明显的变化。因此,在实验研究中可以通过对基频波、二次谐波幅值的测量得到材料的非线性系数变化情况,从而实现对早期损伤的评价。

非线性超声无损检测技术就是通过检测声波信号中的高次谐波信号来实现结构材料早期性能退化以及微损伤的评估。基于体波的非线性超声检测原理和操作相对简单,采集得到的信号无频散,信号处理也比较容易,因此这种方法应用较广,是目前一种比较成熟的非线性超声无损检测技术。图1所示为一个典型的基于体波的非线性超声测试系统示意图^[32],该系统包括主机、50 Ω终端、衰减器、高通滤波器、低通滤波器、示波器、计算机以及压电换能器等。实验测试中,通过计算机设置参数控制非线性超声测试系统主机激发一个脉冲信号,信号经由50 Ω终端后激励超声压电换能器产生超声信号,该信号与结构材料内部微损伤等相互作用后由接收端的压电换能器接收,通过示波器采集并进行信号处理。对接收到的信号进行快速傅里叶变换,可得基频幅值 A_1 和倍频幅值 A_2 ,并由此进一步得到非线性系数 $\beta = A_2/A_1^2$ 。在非线性超声测试中,非线性系数是一个非常重要的参量,它对黏接结构早期的性能退化非常敏感。比如,Shui等人^[32]开展了镁铝合金-环氧树脂黏接结构的疲劳加载和非线性超声测试,研究了非线性系数随疲劳寿命的变化过程,有效实现了对黏接结构疲劳损伤的健康监测。因此,非线性系数是一个评价复合黏接界面损伤的有效参量,能够对其损伤演化进行有效的检测。

图 1 (网络版彩色)黏接界面损伤的非线性检测装置^[32]

Figure 1 (Color online) Experimental setup for nonlinear measurement of damages in the adhesive joint^[32]

对于不同的破坏损伤模式, 非线性系数随疲劳加载次数的变化规律也不尽相同. 比如, 苑博等人^[33]利用非线性体波研究了黏接构件在温度循环作用下的损伤情况, 发现高温循环疲劳下的非线性系数在加载初期基本保持不变, 到一定的加载次数之后, 非线性系数才随着循环次数的增加而增大. 低温循环作用下的情况则不同, 加载初期非线性系数就随着低温循环次数的增加而迅速增大, 之后变化减缓趋于稳定. 这是因为高温循环疲劳时胶层的三阶弹性常数变化明显, 而在低温循环疲劳时黏接界面的拉伸刚度变化明显. 由于疲劳损伤模式不同, 相应的非线性系数的变化规律也不同, 这为利用非线性系数定征不同的损伤模式、开展结构材料早期性能退化和微观损伤评价提供了重要的思路. 此外, 非线性系数还能直接反映复合结构界面的黏接质量、黏接接头的塑形损伤等情形. 比如, 对金属基复合材料结构界面, 敦怡等人^[34]发现, 黏接界面完好时非线性系数最小, 完全脱黏时非线性系数最大. 这表明, 可以通过非线性系数的测试实现对金属基复合材料结构界面完好黏接、脱黏以及弱黏接的评价. 对于

焊接接头塑性变形, Xiang等人^[35]发现, 非线性系数皆随塑性损伤的增加而不断增大, 且模拟结果符合实验测试结果, 实现了对焊接接头塑性损伤进行健康监测的目的. 上述基于体波的非线性超声实验测试, 均能证实非线性系数能够有效对结构材料早期性能退化和微观损伤进行有效评价, 这为进一步将该技术推广到工程应用提供了有力的技术手段.

为了揭示复合结构界面早期性能退化以及微观损伤与非线性体波中高次谐波的关系, 还需要建立相应的理论模型, 开展相关的理论研究. 目前比较被广泛接受的是界面弹簧模型, 通过法向和切向弹簧刚度的变化模拟界面的损伤演化情况. 比如, 安志武等人^[36]通过考虑弱非线性效应、忽略基波的能量变化、利用二阶微扰近似建立了界面非线性弹簧模型, 得到了弹簧刚度与高次谐波的关系. 结合实验测试结果, 该弹簧模型能够很好地对复合结构中的黏接界面损伤进行评价与检测, 因此在进一步的理论研究中, 可以在此基础上通过考虑胶层的黏性、衰减等因素继续完善该弹簧模型, 开展界面损伤机理的研究. 与弹簧模型类似, 目前还有

一种理论模型能够揭示界面的损伤与高次谐波的关系。该模型的核心思想是,认为在黏接层出现损伤时会使其拉伸模量降低,但是压缩模量保持不变,导致界面在超声波的作用下出现不同的界面拉压刚度。此时,界面处的应力边界条件^[32]可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_y(x) = K^+ \Delta u_y(x), \sigma_y, & \Delta u_y \geq 0, \\ \sigma_y(x) = K^- \Delta u_y(x), \sigma_y, & \Delta u_y \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Delta u_y(x)$ 是界面处的不连续位移, K^+ 和 K^- 分别是界面拉伸刚度系数和压缩刚度系数。正是由于损伤演化过程中微裂纹的出现,超声通过界面传播时在一个拉伸和压缩周期内需满足不同的本构关系,从而导致高次谐波的产生。该模型更符合黏接胶层出现裂纹损伤的情形。如图2所示为基于该理论模型和非线性超声实验测试的非线性系数与疲劳寿命的关系,基于理论预测和实验测试的非线性系数变化规律基本一致,表明该拉/压刚度模型能够体现界面的损伤演化过程,这为进一步开展基于体波的非线性超声检测理论研究提供了思路。

2 基于导波的非线性超声检测

除了基于体波的非线性超声检测以外,目前基于导波的非线性超声检测方法也获得了广泛关注,特别是对薄板、圆管等结构中的早期疲劳损伤、塑性变形、微裂纹等微观损伤的检测。基于非线性导波的黏

图2 (网络版彩色) 基于理论模型和实验测试的非线性系数和疲劳寿命的关系^[32]

Figure 2 (Color online) The relationship between nonlinear parameters and fatigue life based on the theoretical model and the experiment testing^[32]

接复合结构超声检测原理与体波法类似,即通过研究超声导波与材料内部非线性微结构相互作用产生的高次谐波特征来对结构内部损伤进行检测与评价。其优势是可以实现在被检测结构的同侧进行信号的激励和接收,而且声波的传播距离长,便于对大型板壳类结构的检测评估。对于层状板壳类结构,在二阶微扰近似条件下,伴随基频Lamb波产生的二倍频体力和面驱动应力张量会激发出一系列二倍频模式,构成基频波的二次谐波声场。当基频Lamb波有非零能量流馈入二次谐波,且基频和二倍频模式满足相速度匹配条件时,该二倍频Lamb波模式随传播距离累积增长^[18]。超声导波与结构内部非线性损伤相互作用产生的二次谐波可以被有效地采集,实现结构内部损伤的检测。正是由于非线性导波在满足一定条件下才具有累积传播特性,在实验研究中需要激发特定模式的基频和倍频模式,从而有效实现对微弱高次谐波信号的采集与分析。

图3所示为一个三层黏接复合结构的示意图,其中的黏接胶层含有随机分布的微裂纹。满足相速度匹配条件下,在其左侧施加正弦波激励基频信号,该基频声波在黏接结构中传播并在裂纹区与微裂纹相互作用后产生高次谐波,即倍频Lamb波。对接收到的时域信号进行快速傅里叶变换后可得到基频和二倍频的幅值。基于基频幅值 A_1 和倍频幅值 A_2 定义非线性系数 $\beta' = A_2 / A_1$,可进一步计算得到非线性系数和裂纹区微裂纹数目之间的关系如图4所示^[37]。研究结果显示,该非线性系数能够有效反映界面胶层的损伤情况,即随着裂纹数目的增加,非线性系数逐渐增大。这为基于导波的非线性超声无损检测提供了可靠依据,对于板壳类黏接界面的微裂纹损伤,基于高次谐波的非线性系数能够对其进行有效评价与监测。

同样,在理论研究方面,由于损伤的存在,可以认为界面刚度的变化是导致二次谐波产生的直接原因。因为随着界面性能退化或微观损伤的存在,其刚度系

图3 (网络版彩色) 基于导波法检测三层黏接结构损伤示意图^[37]

Figure 3 (Color online) Schematic of detecting damages in a tri-layer adhesive structure based on the guided wave method^[37]

图4 (网络版彩色)声学非线性系数与微裂纹数目的关系^[37]
Figure 4 (Color online) Acoustic nonlinear parameter versus crack number^[37]

数减小,二次谐波幅值随传播距离的累积效应会发生改变.因此,可以利用二次谐波或相应的非线性系数评价多层复合结构界面的损伤性能状况.其中有代表性的理论研究包括Deng^[38]在二阶微扰条件下利用模式展开法所研究的存在非完好界面多层结构中Lamb波二次谐波产生问题、高广健等人^[39]讨论的含弱界面双层圆管结构中非线性导波传播问题等,这为有效揭示非线性导波中二次谐波与损伤的作用机理及变化规律提供了相应的理论依据.对于复合圆管结构, Li等人^[40]利用解析分析和有限元模拟的方法研究了其中的非线性周向导波传播问题.由于材料的固有非线性,复合圆管内部存在二阶驱动力和表面界面驱动力,它们是导致周向导波二次谐波产生的原因.而界面刚度系数的变化会影响周向导波的频散关系,进而影响二次谐波的累积效应.理想完好情况下,二次谐波随角度变化线性累积,随着界面结合质量的恶化,二次谐波的累积性发生改变.这进一步揭示了复合圆管中高次谐波的产生机理,开拓了基于非线性导波损伤评价的应用范围.

在理论研究的指导下,可以利用非线性超声测试系统开展基于导波的复合结构黏接界面强度或损伤的实验研究^[5].测试系统主机激发的基频信号经过衰减、低通滤波等环节后,由压电换能器和一定角度的斜楔激发指定模态的Lamb波,然后由压电换能器和斜楔接收非线性Lamb波信号.将接收到的信号处理之后可得到基频幅值和倍频幅值,进而可得到非线性系数.为了能够得到随传播距离累积增长的二次谐波,一般需要满足基波和二次谐波的相速度、群速度匹配条件.基于上述测试系统,邓明晰^[41]开展了利用应力波因子来

定层状黏接结构界面黏接强度的研究.随着界面固化时间的延长,黏接结构的黏接强度不断增强.根据实验采集的信号经处理后可得到,相应的应力波因子也随着固化时间的延长而单调增大.该实验研究结果证实了利用Lamb波应力波因子可以很好地反映黏接结构的固化情况,能够对黏接结构的黏接强度进行评价,这为基于非线性导波的损伤检测应用提供了实验研究基础.对层合梁中的层离损伤, Soleimanpour和Ng^[42]利用非线性导波开展了实验研究.采用多个压电换能器对试件扫描,其中一个压电换能器用于激发 A_0 模态的基波,其他换能器用于接收信号.结果显示,采用合适的激励接收方式可以检测到不同损伤情况下的高次谐波信号,并且不需要基准信号就可以实现层合梁中的层离损伤的检测与定位.这表明,利用非线性导波不仅可以实现界面损伤的检测,还能实现对界面损伤的定位,具有一定的启发性.

此外,在基于导波的非线性超声实验研究中,还可以通过进一步考虑利用三倍频实现对脱层损伤的定征,其中比较有代表性的研究是Hong等人^[43]用非线性超声导波方法对含内衬耐腐蚀管道脱层损伤的检测.将采集到的时域信号进行处理,得到基频幅值 A_ω 、二倍频幅值 $A_{2\omega}$ 和三倍频幅值 $A_{3\omega}$,进而根据定义的二阶非线性系数和三阶非线性系数

$$\beta = \frac{A_{2\omega}}{A_\omega^2}, \delta = \frac{A_{3\omega}}{A_\omega^3}, \quad (4)$$

分别得到二阶非线性系数、三阶非线性系数与损伤大小的关系.研究表明,虽然二阶非线性系数和三阶非线性系数都随着脱层损伤的增大而增大,但是与二阶非线性系数相比,三阶非线性系数对脱层损伤的变化更加敏感^[43].这为利用非线性导波进行复合结构界面损伤检测提供了很好的思路,即可以进一步利用更高阶的谐波来对结构损伤进行评价,实现更小空间尺度微观损伤的检测.

由于在非线性超声实验研究中,高次谐波信号一般都比较微弱,如何实现高次谐波信号的有效检测和提取则是一个必须考虑的问题.除了采取高通滤波、放大高次谐波的方法外,导波相位反转技术也是一项非常有效的高次谐波提取方法. Li等人^[44]利用相位反转法对经受低速冲击破坏的层压复合材料进行非线性超声检测.在相位反转技术中,将两个相位相反的时域信号叠加时,奇次谐波的幅值相互抵消,偶次谐波的幅

值叠加变大, 因而得到的二次谐波幅值比基波幅值大很多. 这就为开展非线性超声检测的实验测试提供了一个非常有效的方法, 不但能够提高信噪比, 而且采用相位反转技术后还能够得到更大幅值的偶次谐波信号. 因此, 不论是开展基于体波还是导波的非线性超声损伤评价, 相位反转技术都具有一定优势.

3 基于混频法的非线性超声检测

基于体波和导波的非线性超声无损检测方法主要是通过弹性波与损伤微结构相互作用产生高次谐波来实现损伤状况评价. 由于存在高次谐波信号弱、信噪比低等缺点, 在一定程度上限制了这项技术在实际工程中的广泛应用. 近年来, 基于混频法的超声无损检测技术引起了大家的广泛关注. 若超声波在含有损伤等非线性源的区域相遇, 它们则会与含损伤的介质发生相互作用, 产生新的频率成分, 如和频分量、差频分量等^[24]. 根据两列入射波的方向是否平行, 非线性超声混频检测方法可分为共线混频法和非共线混频法两类. 对于纵波与横波共线混频的情况, 将产生第三列混频横波, 且产生共振波需要满足条件^[45,46]

$$\frac{\omega_L}{\omega_T} = \frac{2c_L}{c_L - c_T}, \quad (5)$$

其中, ω_L 、 ω_T 分别为入射纵波、横波的频率. 此时, 非线性系数可表示为

$$\beta_T = \frac{2c_T(c_L - c_T)}{UV\omega_T^2} A, \quad (6)$$

其中, U 、 V 分别为纵波、横波的幅值. 因此, 可以利用共振波幅值 A 和非线性系数评价结构材料的损伤^[47]. 在基于混频法的非线性超声检测中, 能够产生共振混频波是一个必须考虑的因素. Gao和Qu^[48]给出了两列平面波产生共振混频的充分必要条件, 为混频信号参数的确定提供了重要的参考.

与基于体波和导波的非线性超声检测方法相比, 混频法的检测方式更加灵活多样, 不但可以通过改变入射波的方向和波的类型产生具有不同振动模式和传播方向的混频波, 还可以通过控制入射波的相位等参数来控制混频发生的位置, 从而实现对结构的扫查和损伤定位. 比如, Liu等人^[45]利用纵波、横波共线混频的方法实现了铝合金试件塑性变形的检测, Yuan等人^[46]利用共线混频法实现了金属材料塑性损伤的评价与损伤的定位, 这些都为利用体波混频方法对损伤进

行检测和定位提供了重要的研究基础. 此外, 为了适应板类结构的检测, 人们还开展了基于导波的混频研究^[49]. 比如, Li等人^[50]通过数值模拟研究了混频Lamb波在薄板中的传播问题. 在满足混频条件下, S_0 和 A_0 模态Lamb波入射可以产生 A_0 模态的混频波, 混频波的非线性系数随结构非线性的增大而线性增长. 另外, Mehtya等人^[51]利用非线性Lamb波混频方法检测了9Cr-1Mo钢蠕变过程中的塑性变形问题, 测量了试件各位置在不同蠕变情况下的和频幅值, 结果显示, 和频幅值随着时间的增加而不断增大. 这进一步证实, 基于导波的混频技术能够定征结构材料的非线性, 以及与材料非线性相关的微观损伤.

正是由于能够通过控制入射波的相位等参数来控制混频发生的位置, 使得利用混频法对黏接复合结构界面损伤的检测独具优势. 如图5所示为采用非共线混频法对含有不同程度热疲劳损伤的铝合金黏接试件进行混频检测的示意图^[52]. 利用非共线的纵波和横波作为入射波, 使其在黏接界面处相遇产生混频波, 并在黏接接头的同一侧接收混频横波信号. 研究表明, 混频响应幅值和三阶弹性常数呈线性关系, 且混频发生在黏接界面时的响应幅值比其他情况大很多, 幅值随黏接界面非线性的增加而增大^[52]. 这说明, 采用混频的方法能够有效地实现对黏接界面健康状态的监测. 同时, 采用这种测试方法的好处就是, 不但可以准确控制在黏接界面处发生混频, 而且可以实现同侧激发、同侧接收. 这对实际结构中不能两侧同时触及的情形, 比如黏接管道、层状核反应结构等, 优势更为明显.

对于复合金属结构中的合金扩散结合界面, 利用

图5 (网络版彩色)非共线混频实验装置示意图^[52]
Figure 5 (Color online) Schematic diagram of the experiment setup using the nonlinear wave mixing method^[52]

基于混频的非线性超声检测技术同样可以有效实现对扩散界面状态的监测与评估. 比如, Zhang等人^[53]利用有限元方法研究了基于非共线混频技术的非完好扩散钛合金界面检测问题. 如图6所示, 两列横波分别以一定角度入射并在非完好界面相遇, 混频产生一系列透射纵波和一系列反射纵波. 由于非完好界面的存在, 反射纵波幅值比完好界面的大很多, 实现了非完好界面的识别. 实验研究中, Escobar-Ruiz等人^[54]也通过利用两列非共线横波混频的方式证实了混频波的非线性参量可以有效评估扩散结合界面的微观结构. 因此, 不论是结构材料中的塑性损伤, 还是复合结构中黏接界面的微观损伤, 都能利用非线性超声混频技术实现有效的检测与评价, 这是一项非常具有应用前景的损伤检测和定位方法.

此外, 为了更加适用于板壳结构的非线性超声混频检测, 还可以激发满足一定条件的两列导波实现特定位置的声波混频. 比如, Chen等人^[55]利用Lamb波混频法研究了双层黏接板结构中界面性质的变化对混频波的影响. 一系列 A_0 模式波和一系列 S_0 模式波相向传播, 在界面区域相遇并产生可以累积传播的混频谐波. 在满足相速度匹配条件和非零通量条件下, 可以得到归一化基频幅值、非线性系数与波混合区位置的关系. 该研究结果显示, 在损伤区域混频时得到的非线性系数明显不同. 这为利用导波混频开展复合结构中黏接界面损伤的定位和评价提供了重要的研究基础和启发, 即通过对混频区域的空间扫描, 实现对复合板结构界面局部损伤和性能退化的检测以及空间定位.

基于同样的思路, 利用导波混频还可以实现层状复合材料中各类微观损伤的检测. 比如, Zhu等人^[56]

研究了利用混频Lamb波对复合材料层压板中微裂纹损伤进行检测的问题, 得到了不同损伤情况下混频波的频域幅值. 此时的和频幅值与差频幅值都随着损伤的增大而增大, 且呈正相关的关系. 他们还进一步定义了非线性系数^[56]

$$\beta_1 = \frac{A_3}{A_1 A_2}, \beta_2 = \frac{A_4}{A_1 A_2}, \quad (7)$$

其中, A_1 和 A_2 是两个激励信号的幅值, A_3 和 A_4 分别是和频与差频信号的幅值. 结果显示, 上述两个非线性系数都会随着损伤大小的变化而产生显著的改变. 因此, 这进一步证实了基于混频导波的非线性系数还能够实现复合材料层中损伤的检测, 可以作为表征复合材料层压板内部微裂纹损伤的有效参数.

4 结论与展望

经过多年的发展, 非线性超声检测技术已经成为检测材料结构早期性能退化、微损伤的有效方法, 应用广泛, 深受重视. 本文综述了近年来利用非线性超声对黏接复合结构及其界面损伤进行评价的研究进展, 包括基于透射体波、导波以及混频波的黏接复合结构及其界面损伤的超声检测研究成果. 其中, 基于体波的非线性超声检测方法由于原理和操作方法相对成熟, 接收到的体波信号无频散且易于处理, 因此是一种比较容易实现且应用较广的非线性超声无损检测方法, 可以对黏接结构中的黏接质量、脱黏损伤、疲劳损伤、塑性变形以及温度循环作用损伤等进行有效的检测与评价.

基于导波的非线性超声无损检测方法具有检测距

图6 (网络版彩色)混频有限元模拟示意图(a)以及两个横波的干涉(b)^[53]

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of the finite element simulation using mixing waves (a), and the interference pattern of two shear waves (b)^[53]

离长、能够在结构的同侧激励和接收信号等优势,更适用于板壳类黏接复合结构的各种损伤评价与检测。该方法不但可以有效实现这种黏接结构的黏接强度、界面性能状况等的检测,还可以对黏接层内部微裂纹损伤、热疲劳损伤、冲击损伤以及脱层损伤、层离损伤等进行评价。

基于混频法的非线性超声无损检测技术不仅可以实现对黏接结构的黏接质量、界面性质、热疲劳损伤、微裂纹损伤等进行有效检测和评价,而且还能够通过改变激励位置、声波传播方向和时间来调节混频波产生的位置,实现对层状结构中局部界面损伤的定位。这为进行更大范围的损伤检测以及工程结构中的损伤定位问题提供了有效的实验手段,进一步开拓了非线性超声无损检测技术的应用空间。

但是,关于黏接结构损伤机理的研究还比较有限,理论模型多数是非线性弹簧模型的改进和延伸,信号处理的方法也比较类似,仍有许多方面需要进一步的

探索和研究。在今后的研究中,可以继续探索建立不同类型的理论模型,引入更多的与材料性质相关的参数,使理论模型更加贴近实际,从而更加深入地研究超声波在黏接结构各种界面的传播状况,更好地理解波在黏接结构中损伤微结构的作用机理。其次,利用非线性导波进行黏接复合结构的损伤检测时,由于导波的多模态特性和复杂的激发条件,使得该方法在实际应用中还存在高次谐波信号弱、信号处理难度较大等问题,因此在激发特定导波模态的实验方法研究、评价参数的创新以及信号处理手段的提升等方面仍有很多需要进一步进行探讨的问题。关于混频方法,今后可以进一步开展非共线纵波、横波对损伤的检测与定位研究,提高检测与定位精度。同时,关于导波的混频研究,特别是将其应用于黏接界面损伤检测的研究,目前的成果还非常有限,今后可以继续加强不同模态产生共振混频波条件的研究,以及利用不同的导波模态对黏接界面的损伤进行检测与定位的研究工作。

参考文献

- 1 Qi Y, Wang Y D, Zhao C W, et al. Photo-graft modification of fluoropolymer surface and its bonding properties with EVA hot melt adhesive (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 3623–3630 [祁源, 王印典, 赵长稳, 等. 含氟聚合物表面光接枝改性及其与EVA热熔胶粘接性能. 科学通报, 2018, 63: 3623–3630]
- 2 Sun D L, Yu X C. *Adhesives and Fundamentals of Bonding Technology* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2014 [孙德林, 余先纯. 胶黏剂与粘接技术基础. 北京: 化学工业出版社, 2014]
- 3 Xu W, Chen L, Zhang Q C, et al. Mechanical behavior and characterization of bonding interface (in Chinese). *Sci Sin-Techol*, 2012, 42: 1361–1376 [许巍, 陈力, 张钱城, 等. 粘结界面力学行为及其表征. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 1361–1376]
- 4 Maeva E, Severina I, Bondarenko S, et al. Acoustical methods for the investigation of adhesively bonded structures: A review. *Can J Phys*, 2004, 82: 981–1025
- 5 Liu Y L, Hu N, Deng M X, et al. Nonlinear Lamb waves in plate/shell structures (in Chinese). *Adv Mech*, 2017, 47: 503–533 [刘瑶璐, 胡宁, 邓明晰, 等. 板壳结构中的非线性兰姆波. 力学进展, 2017, 47: 503–533]
- 6 Lissenden C J, Liu Y, Chillara V K, et al. Nonlinear guided wave mixing for localized material state characterization. *Phys Procedia*, 2015, 70: 668–671
- 7 Zhang J F, Xuan F Z, Xiang Y X. Evaluation of material damage using nonlinear ultrasonic wave (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1536–1550 [张剑锋, 轩福贞, 项延训. 材料损伤的非线性超声评价研究进展. 科学通报, 2016, 61: 1536–1550]
- 8 Zhou Z G, Liu S M. Nonlinear ultrasonic techniques used in nondestructive testing: A review (in Chinese). *J Mech Eng*, 2011, 47: 2–11 [周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展. 机械工程学报, 2011, 47: 2–11]
- 9 de Lima W J N, Hamilton M F. Finite-amplitude waves in isotropic elastic plates. *J Sound Vib*, 2003, 265: 819–839
- 10 Shui G, Wang Y, Gong F. Evaluation of plastic damage for metallic materials under tensile load using nonlinear longitudinal waves. *NDT&E Int*, 2013, 55: 1–8
- 11 Zhu W J, Deng M X, Xiang Y X, et al. Second harmonic generation of Lamb wave in numerical perspective. *Chin Phys Lett*, 2016, 33: 104301
- 12 Li W, Cho Y. Thermal fatigue damage assessment in an isotropic pipe using nonlinear ultrasonic guided waves. *Exp Mech*, 2014, 54: 1309–1318
- 13 Bermes C, Kim J Y, Qu J, et al. Nonlinear Lamb waves for the detection of material nonlinearity. *Mech Syst Signal Proc*, 2008, 22: 638–646
- 14 Li Z N, Wang Y Z, Wang Y S. Nonreciprocal transmission for the SH wave in a nonlinear elastic wave metamaterial with imperfect interfaces (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 695–703 [李珍妮, 王毅泽, 汪越胜. 含非完好界面的非线性弹性波超材料中SH波的非互易传输. 科学通报, 2020, 65: 695–703]
- 15 Liu Y, Kim J Y, Jacobs L J, et al. Experimental investigation of symmetry properties of second harmonic Lamb waves. *J Appl Phys*, 2012, 111:

053511

- 16 Deng M X. Research on nonlinearity of Lamb waves (in Chinese). *Acta Acust*, 1996, (4): 429–438 [邓明晰. 兰姆波的非线性研究. 声学学报, 1996, (4): 429–438]
- 17 Nagy P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, 1998, 36: 375–381
- 18 Deng M, Xiang Y, Liu L. Time-domain analysis and experimental examination of cumulative second-harmonic generation by primary Lamb wave propagation. *J Appl Phys*, 2011, 109: 113525
- 19 Pruell C, Kim J Y, Qu J, et al. Evaluation of plasticity driven material damage using Lamb waves. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 231911
- 20 Shui G S, Wang Y S. Nondestructive evaluation of material damage using nonlinear Rayleigh waves approach. *Adv Mater Res*, 2012, 463–464: 1522–1526
- 21 Xiang Y, Zhu W, Deng M, et al. Generation of cumulative second-harmonic ultrasonic guided waves with group velocity mismatching: Numerical analysis and experimental validation. *Europhys Lett*, 2016, 116: 34001
- 22 Lissenden C J, Liu Y, Choi G W, et al. Effect of localized microstructure evolution on higher harmonic generation of guided waves. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 178–186
- 23 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 Acoust Soc Am*, 2009, 126: EL117–EL122
- 24 Jiao J P, Sun J J, Wu B, et al. Research on nonlinear ultrasonic testing of microcracks in structure using wave mixing method (in Chinese). *Acta Acustica*, 2013, 38: 648–656 [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. 声学学报, 2013, 38: 648–656]
- 25 Jiao J, Sun J, Li G, et al. Evaluation of the intergranular corrosion in austenitic stainless steel using collinear wave mixing method. *NDT&E Int*, 2015, 69: 1–8
- 26 Zhao Y, Li F, Cao P, et al. Generation mechanism of nonlinear ultrasonic Lamb waves in thin plates with randomly distributed micro-cracks. *Ultrasonics*, 2017, 79: 60–67
- 27 Shui G S, Wang Y S, Qu J M. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound (in Chinese). *Adv Mech*, 2005, 35: 52–68 [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. 力学进展, 2005, 35: 52–68]
- 28 Thompson R B, Thompson D O. Past experiences in the development of tests for adhesive bond strength. *J Adhes Sci Technol*, 1991, 5: 583–599
- 29 Zhang S, Guo C, Cheng L, et al. Testing method for composite insulators interface based on nonlinear ultrasonic. *IEEE Access*, 2019, 7: 83111–83119
- 30 Ju T, Achenbach J D, Jacobs L J, et al. A non-collinear mixing technique to measure the acoustic nonlinearity parameter of adhesive bond. *AIP Conf Proc*, 2018, 1949: 070005
- 31 Shui G, Song X, Xi J, et al. Experimental characterization of impact fatigue damage in an adhesive bonding using the second harmonics. *J Nondestruct Eval*, 2017, 36: 23
- 32 Shui G, Wang Y, Huang P, et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of the fatigue damage of adhesive joints. *NDT&E Int*, 2015, 70: 9–15
- 33 Yuan B, Shui G S, Wang Y S. Nonlinear ultrasonic evaluation of damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2018, 67: 074302 [苑博, 税国双, 汪越胜. 循环温度疲劳作用下粘接界面损伤的非线性超声评价. 物理学报, 2018, 67: 074302]
- 34 Dun Y, Shi X H, Xu Z S. Nondestructive evaluation of adhesive interfaces in MMCS using nonlinear ultrasonic method (in Chinese). *Chin Mech Eng*, 2008, 19: 2351–2354 [敦怡, 师小红, 徐章遂. 非线性超声在金属基复合材料结构界面粘接强度评价中的应用. 中国机械工程, 2008, 19: 2351–2354]
- 35 Xiang Y X, Zhu W J, Deng M X, et al. Experimental and numerical studies of nonlinear ultrasonic responses on plastic deformation in weld joints. *Chin Phys B*, 2016, 25: 024303
- 36 An Z W, Wang X M, Mao J, et al. Theoretical and experimental research on nonlinear spring models of a bonding interface (in Chinese). *Acta Acust*, 2010, 35: 481–487 [安志武, 王小民, 毛捷, 等. 粘接界面的非线性弹簧模型及实验验证. 声学学报, 2010, 35: 481–487]
- 37 Li X, Shui G, Zhao Y, et al. Propagation of non-linear Lamb waves in adhesive joint with micro-cracks distributing randomly. *Appl Sci*, 2020, 10: 741
- 38 Deng M X. Analysis of second-harmonic generation of Lamb waves propagating in layered planar structures with imperfect interfaces. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 221902
- 39 Gao G J, Deng M X, Li M L, et al. Influence of the interfacial properties on guided circumferential wave propagation in the circular tube structure (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 224301 [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. 物理学报, 2015, 64: 224301]
- 40 Li M, Deng M, Gao G, et al. Modeling of second-harmonic generation of circumferential guided wave propagation in a composite circular tube. *J Sound Vib*, 2018, 421: 234–245
- 41 Deng M X. Characterization of interface strength of adhesive joints of layered planar structures using a Lamb wave approach (in Chinese). *J Log Eng Univ*, 2006, 22: 5–10 [邓明晰. 一种定征层状平面结构界面粘接强度的兰姆波方法. 后勤工程学院学报, 2006, 22: 5–10]

- 42 Soleimanpour R, Ng C T. Locating delaminations in laminated composite beams using nonlinear guided waves. *Eng Struct*, 2017, 131: 207–219
- 43 Hong X, Liu Y, Lin X, et al. Nonlinear ultrasonic detection method for delamination damage of lined anti-corrosion pipes using PZT transducers. *Appl Sci*, 2018, 8: 2240
- 44 Li W, Jiang C, Qing X, et al. Assessment of low-velocity impact damage in composites by the measure of second-harmonic guided waves with the phase-reversal approach. *Sci Prog*, 2020, 103: 1–14
- 45 Liu M, Tang G, Jacobs L J, et al. Measuring acoustic nonlinearity parameter using collinear wave mixing. *J Appl Phys*, 2012, 112: 024908
- 46 Yuan B, Shui G, Wang Y S. Evaluating and locating plasticity damage using collinear mixing waves. *J Materi Eng Perform*, 2020, 29: 4575–4585
- 47 Yuan B, Shui G S, Wang Y S. Advances in research of nonlinear ultrasonic wave mixing detection technology in non-destructive evaluation (in Chinese). *J Mech Eng*, 2019, 55: 33–46 [苑博, 税国双, 汪越胜. 非线性超声混频检测技术在无损检测中的研究进展. *机械工程学报*, 2019, 55: 33–46]
- 48 Gao X, Qu J. Necessary and sufficient conditions for resonant mixing of plane waves in elastic solids with quadratic nonlinearity. *J Acoust Soc Am*, 2020, 148: 1934–1946
- 49 Hasanian M, Lissenden C J. Second order harmonic guided wave mutual interactions in plate: Vector analysis, numerical simulation, and experimental results. *J Appl Phys*, 2017, 122: 084901
- 50 Li F, Zhao Y, Cao P, et al. Mixing of ultrasonic Lamb waves in thin plates with quadratic nonlinearity. *Ultrasonics*, 2018, 87: 33–43
- 51 Metya A K, Tarafder S, Balasubramaniam K. Nonlinear Lamb wave mixing for assessing localized deformation during creep. *NDT&E Int*, 2018, 98: 89–94
- 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. *AIP Conf Proc*, 2017, 1806: 020011
- 53 Zhang Z, Nagy P B, Hassan W. Enhanced nonlinear inspection of diffusion bonded interfaces using reflected non-collinear ultrasonic wave mixing. *AIP Conf Proc*, 2016, 1706: 020023
- 54 Escobar-Ruiz E, Ruiz A, Hassan W, et al. Non-linear ultrasonic NDE of Titanium diffusion bonds. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 187–195
- 55 Chen H, Gao G, Hu N, et al. Modeling and simulation of frequency mixing response of two counter-propagating Lamb waves in a two-layered plate. *Ultrasonics*, 2020, 104: 106109
- 56 Zhu W G, Li Y F, Guan L Q, et al. Micro-crack detection of nonlinear Lamb wave propagation in three-dimensional plates with mixed-frequency excitation. *Chin Phys B*, 2020, 29: 014302

Summary for “黏接复合结构损伤的非线性超声评价研究进展”

Progress on nonlinear ultrasonic evaluation of damages within the adhesively bonded composites

Xiaoyang Li¹, Guoshuang Shui¹ & Yue-Sheng Wang^{1,2*}¹ School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;² School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

* Corresponding authors, E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn; yswang@tju.edu.cn

Adhesively bonded composite structures are widely used in aerospace, shipbuilding and automotive industries because of such advantages as lower structural weight and more uniformly distributed stresses. As an important component of the adhesive joints, properties of the adhesive interface determine the integrity of the whole adhesive structure, making the research on damage detection and evaluation of the adhesive interface an extensively concerned topic in the related fields. The ultrasonic nondestructive testing technique, which has a long history of development since its appearance, is an effective technology for testing, evaluating and characterizing material properties and damages. Because of the advantage of realizing the detection without causing additional destruction to the structure and materials, the ultrasonic nondestructive testing has been widely used in engineering practice. However, the existing traditional ultrasonic nondestructive testing technology mainly concerns the initiation and accumulation of material damages, final failure of the structure on service. It is difficult in characterizing the bonding strength, bonding force, early degradation and micro-damage of the bonding surface directly and quantitatively, which is not capable of realizing the structural health monitoring and life prediction of the adhesive joints.

It is promising that the nonlinear ultrasonic technology developed in recent years can effectively solve the problems mentioned above. When nonlinear waves are employed, this technique has higher sensitivity in characterizing the change of micro-structure of materials and micro-damages, whose spatial dimension is much smaller than the wavelength of ultrasonic waves. Considering these advantages, nondestructive testing and evaluation employing nonlinear waves have been widely investigated in recent years; a series of new methods have appeared and many important achievements have been obtained. Detection and evaluation of damages within bonded composite structures and adhesively jointed interfaces are more complicated. There are two types of adhesive failure: Adhesion failure in the interface layer between the adhesive and the adhered, and cohesion failure in the adhesive layer. Due to the existence of adhesive interfaces, complex refraction, reflection and scattering will occur when ultrasonic waves propagate in the adhesive composite structure and interfaces, particularly the existence of the adhesive layer will increase the attenuation of the wave energy. These problems make the investigation of wave propagation in the adhesively bonded structure even more complicated. Based on the nonlinear ultrasonic technique, many investigations have been carried out and many fruitful achievements have been obtained in examining and evaluating the early degradation of the bonded interface. Generally, bulk waves, guided waves and mixing waves are employed in theoretical and experimental research. Bulk waves can be excited and received without much difficulty, and guided waves are effective in examining plate and shell structures. In both cases, the magnitude of high-order harmonic waves and related nonlinear parameters are used in the process of evaluation and characterization. As to the mixing wave method, the amplitude of the mixing resonance waves and the nonlinear parameter based on the mixing resonance waves are employed in evaluating and locating the early damage within the composite structure and the adhesively bonded interface.

In this paper, we review the progress of applying the nonlinear ultrasonic waves in evaluating early degradation and micro-damage of the adhesively bonded composite structures and interface damage, including the theoretical and experimental investigations of employing transmitted bulk waves, guided waves and mixed waves. Furthermore, future research related to the characterization of composite structures and adhesive joints is suggested.

nonlinear ultrasonic wave, nondestructive evaluation, adhesively bonded composites, guided waves, mixing waves

doi: [10.1360/TB-2021-0711](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0711)