

板壳结构中的非线性兰姆波

刘瑶璐¹ 胡宁^{1,†} 邓明晰^{1,2,*} 赵友选¹ 李卫彬¹

¹ 重庆大学航空航天学院, 重庆 400044

² 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 401331

摘要 鉴于常规超声检测技术对分布式材料细微损伤和接触类结构损伤的检测效果不佳, 近年来非线性超声技术逐渐引起广泛关注. 超声波在板壳结构中通常以兰姆波的形式进行传播, 然而由于兰姆波的频散及多模特性, 使得非线性兰姆波的理论 and 实验研究进展缓慢. 本文从经典非线性理论出发, 总结了源于材料固有非线性诱发的非线性兰姆波的理论 and 实验两个方面的研究进展, 并综述了兰姆波的二次谐波发生效应在材料损伤评价方面的若干应用; 从接触声非线性理论出发, 讨论了目前由于接触类结构损伤诱发的非线性兰姆波的研究现状. 最后展望了非线性兰姆波的未来研究重点及发展趋势.

关键词 非线性兰姆波, 经典非线性理论, 接触声非线性理论, 材料性能评估, 微裂纹检测

中图分类号: O347 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-16-032

收稿日期: 2016-10-17; 录用日期: 2017-01-04; 在线出版日期: 2017-01-20

[†] E-mail: ninghu@cqu.edu.cn

* E-mail: dengmx65@yahoo.com

引用方式: 刘瑶璐, 胡宁, 邓明晰, 赵友选, 李卫彬. 板壳结构中的非线性兰姆波. 力学进展, 2017, 47: 201714

Liu Y L, Hu N, Deng M X, Zhao Y X, Li W B. Nonlinear Lamb waves in plate/shell structures. *Advances in Mechanics*, 2017, 47: 201714

© 2017《力学进展》版权所有

1 引 言

板壳结构在各类装备中被广泛使用, 比如飞机的机身、机翼和螺旋桨叶片, 运载火箭的燃料贮箱, 核电站反应堆的压力容器等. 这些板壳构件在正常使用过程中, 由于受外部环境载荷作用、疲劳效应、腐蚀效应以及材料老化等各种不利因素的影响, 结构的力学性能逐渐退化. 虽然在现有标准下, 对这些结构都会进行监测和定期维护以保证其安全使用, 但是一些灾难性事故总是不可避免地发生, 比如 2009 年 2 月 12 日, 美国一架客机由于服役时间偏长而积累下来的机翼局部损伤导致的故障问题而坠毁. 这些事故说明虽然通过传统无损检测手段得到的检测报告都符合安全标准, 但是结构性能的退化过程并没有被有效评估和检测出来. 随着航空航天、核电、机械和化工等领域对安全性和耐久性要求的日益严苛, 对各类装备中被广泛使用的板壳结构的评估和检测手段也提出了更高的要求.

相对于传统线性超声检测技术, 非线性超声检测技术对空间尺寸远小于超声波波长的材料微观结构特征有较高的灵敏度, 它对材料早期性能退化和结构内部早期损伤的评估和检测具有特殊优势, 因而受到广泛关注 (Cantrell & Yost 2001, Donskoy 2006, Van Den Abeele et al. 2001, Aleshin & Van Den Abeele 2007, Solodov 1998). 超声波的非线性是指超声波在材料中传播时发生波形畸变、谐波滋生、边频带形成等非线性现象, 并且非线性现象会随着材料性质的变化而变化. 目前被广泛研究和应用的非线性超声检测技术包括高阶谐波技术 (Shui et al. 2008)、次谐波和 DC(直流 direct current) 响应技术、非线性超声共振谱技术和混频响应技术. 由于非线性现象的复杂性, 至今人们对于非线性谐波产生机理的认识相当有限, 主要包括材料本构关系非线性的弹性动力学理论和接触声非线性理论两个方面. 前者属于经典非线性理论, 超声波在材料中传播时, 当在小振幅声波激励下, 材料中的应力和应变都非常小, 超声波的传播遵循线性规律; 当在有限振幅声波激励下, 虽然材料的变形还在弹性范围内, 但是此时需要用非线性应力-应变关系来表征材料的力学性能, 并且在材料中传播的超声波将发生非线性响应, 表现为在波的能谱中有基频的高阶谐波或分阶谐波信号出现. 对于完好的材料, 这种非线性响应较小, 但是当材料性能发生退化, 如疲劳、蠕变、应力残余等, 这种非线性响应将显著增强, 高阶谐波或分阶谐波的能量会明显增大, 这一现象为材料早期性能退化的评估奠定了基础. 当材料中出现闭合裂纹等接触类损伤后, 出现了和上述现象不一样的超声响应 (Ostrosky & Johnson 2001), 主要表现为: (1) 在小振幅声波激励下就出现谐波滋生现象, 而在有限振幅声波激励下, 会出现明显的三阶或三阶以上的高次谐波, 其谐波幅值比经典非线性理论值要高几个数量级; (2) 谐波幅值与基波幅值之比不再与经典非线性理论相符; (3) 应力-应变关系的滞回效应导致高阶

谐波随基波幅值的二次变化; (4) 混频声波激励下的声场调制现象等. 经典非线性理论无法解释上述现象, 于是研究者转向接触声非线性理论, 提出了多种不同的理论和模型进行研究. 这类研究可以分为两类, 一类是从材料的微观物理机制出发, 考虑裂纹界面微观特征, 建立有效物理模型, 研究损伤对超声响应的影响; 另一类从非线性声学现象出发, 建立损伤及其演化过程的等效模型, 并结合超声波动方程分析超声波的非线性响应与损伤之间的关系. 这类研究为利用非线性超声方法检测和评估结构损伤奠定了基础.

超声波在板壳结构中传播时, 由于上下边界面的影响, 超声波在两表面之间来回反射, 在满足相位匹配的条件下, 入射波和反射波就会形成贯穿层厚的驻波, 从而波只能沿层的延伸方向传播, 板壳结构成为波导, 波导中的波被称为超声导波. 对于板壳结构, 在其内部传播的超声导波根据质点的振动情况可分为两类: 水平剪切波 (shear horizontal wave, SH wave) 和兰姆波 (Lamb wave). 由于 SH 波引起的质点振动 (位移和速度) 都位于平行于层面的平面中 (图 1(a)), 因此可以认为 SH 波是沿平行于层面方向偏振的体剪切波上下反射叠加的结果 (图 1(b)). 在不同的激励频率下板内会出现不同模态的 SH 波, 根据质点的位移场表达式可分为对称模式和反对称模式, 图 2 为铝板中的 SH 模态的相速度频散曲线, 其中零阶模式 (SH0 波) 是非频散波. 相比垂直偏振横波 (shear vertical wave, SV 波) 和纵波 (longitudinal wave, L 波), 当 SH 波从平行于偏振方向的表面反射时, SH 波不会转为其他类型的波, 且杂乱回波较少. 其次, SH 波比体波散射少, 衰减小, 在相同的频率下比体波传播得更远. 因此在超声无损检测领域 SH 波具有极大的应用潜力. 但是, 产生纯 SH 波比较难, 以前实验时多使用电磁超声换能器 (EMAT) 来激励和接收 SH 波, 但是电磁超声换能器只适用于导电材料, 极大地限制了 SH 波的实际应用. 最近北京大学李法新课题组采用面内剪切 (d24) 型压电陶瓷换能器在平板中激励出单模态的零阶水平剪切波 (SH0 波), 同时还可以有选择性地接收 SH0 波, 该工作在基于 SH 波的损伤检测应用方面实现了突破性的进展 (Miao et al. 2016). 但是, 目前研发出的面内剪切 (d24) 型压电陶瓷换能器只能在较低频率范围内激发纯 SH0 波和选择性接收 SH0 波.

与 SH 波引起的平行于层面的质点运动不同, 兰姆波引起的质点振动在垂直于层面的平面内作椭圆轨迹运动. 英国科学家 Lamb (1917) 在平板自由边界条件下求解波动方程时得到了一种特殊波动解, 后人把这种波动命名为兰姆波以纪念它的发现者. 兰姆波是一种在厚度与激励声波波长为相同数量级的声导波 (如金属薄板) 中由纵波与横波耦合而成的特殊形式的应力波, 它在不同厚度及不同激发频率下会产生不同的传播模式 (Viktorov 1965). 根据质点振动位移的分布形态不同, 兰姆波被分为对称型兰姆波 (S 模式) 和反对称型兰姆波 (A 模式), 如图 3 所示. 同时对于不同模式的兰姆波, 还有不同的阶次, 通常用 $S_0, S_1, S_2 \dots$ 表示不同的对称型兰姆波, 用 $A_0, A_1, A_2 \dots$

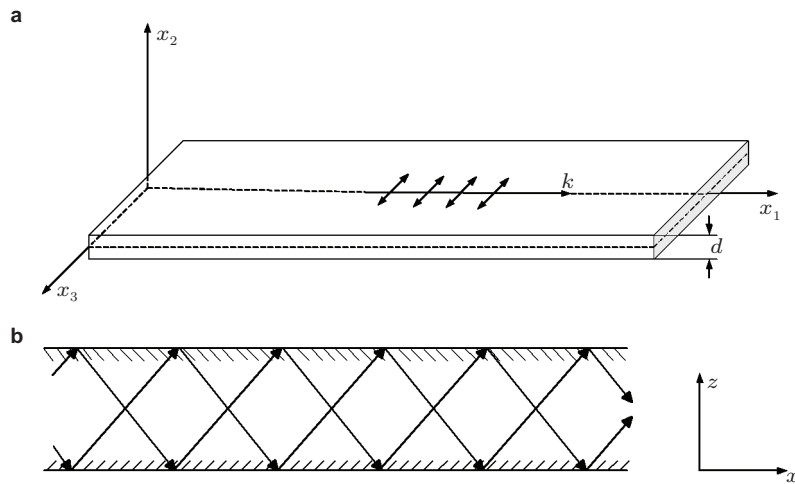


图 1

水平剪切波的传播, 其中传播方向为 x_1 , 质点位移方向为 x_3

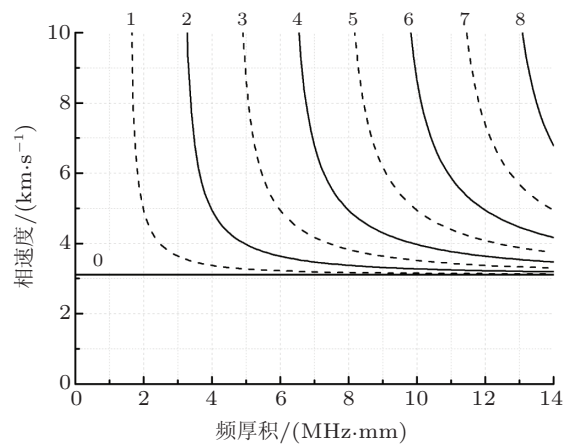


图 2

铝板中的 SH 模式的相速度频散曲线 ($c_T = 3100\text{m/s}$), 其中实线代表对称模式, 虚线代表反对称模式

表示不同的反对称型兰姆波. 此外, 兰姆波的另外一个基本特征是频散性, 即传播速度随着频率的变化而变化, 图 4 是兰姆波在铝板中传播的频散曲线, 可以发现, 与 SH 波不同, 兰姆波的零阶模式也是频散的. 与 SH 波相比, 兰姆波用常规压电换能器很容易被激励和接收. Giurgiutiu (2003, 2005) 研究了在单个压电晶片驱动器激励下的板中兰姆波模式及其特征. Sonti 等 (1995) 分析了在条形、圆形、椭圆形、三角形等不同形状

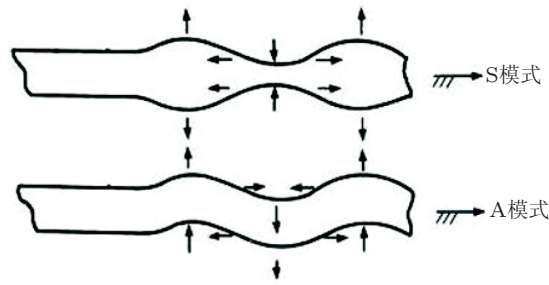


图 3

对称型兰姆波 (S 模式) 和反对称型兰姆波 (A 模式)

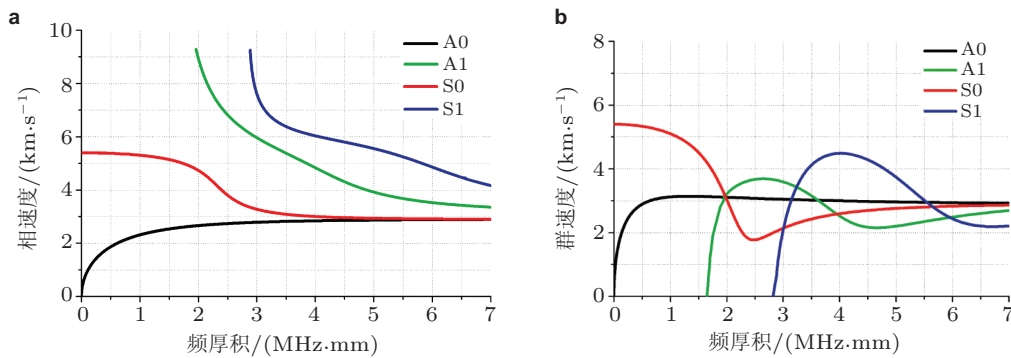


图 4

兰姆波在铝板中传播的频散曲线. (a) 相速度, (b) 群速度

的压电晶片激励下板结构中产生的兰姆波模式. Su 和 Ye (2009) 对压电晶片作为作动器和传感器的理论建模进行了综述. 所以, 虽然波动形式上 SH 波比兰姆波要简单, 但大量的研究迄今仍选择利用兰姆波对板壳结构进行损伤检测和评估.

作为板壳结构中传播的一种典型声导波模式, 兰姆波可以实现对固体板的快速大范围损伤检测, 但兰姆波复杂的传播特性极大地限制了其实际应用. 直到 20 世纪 60 年代初, 美国工程师 Worltony (1961) 首次提出铝和锆的频散曲线的模式特征可应用于材料的无损检测之后, 人们才逐步开始研究基于兰姆波的结构损伤识别方法 (Demer & Fentnor 1969). 自 20 世纪以来, 随着计算机和数值仿真技术的飞速发展和测试手段的不断改进, 基于线性超声理论的兰姆波损伤识别方法已获得长足的进步, 其中常用方法包括直接法、可能性评估法、层析成像法、相控阵法、人工智能法等. 直接法是根据在不同传感路径下导波从激励位置经过损伤位置传播到接收位置时, 与无损的参照结构对比产生的到达时间差来判断是否存在损伤, 以及确定损伤大小 (Diamanti et

al. 2007; Qiu et al. 2011, 2013). 可能性评估法根据由于损伤引起的波包到达时间来确定损伤可能存在的椭圆轨迹, 并且根据距该椭圆距离大小构造一个损伤概率密度函数来评估检测区域各点的损伤概率; 为提高可靠性, 通过布置传感器网络获取多条传感器路径的损伤概率信息, 从而实现检测区域的损伤分布评估 (Wang et al. 2010, Lu et al. 2011). 层析成像法同样通过布置传感器网络, 利用不同传感器路径在检测区域内重构一个反应损伤位置、大小、形状的图像 (Wright et al. 1997, Sicard et al. 2002, Liu et al. 2014). 与可能性评估法相比, 层析成像法需要对整个检测区域进行扫描, 因而所需的传感器数目较多. 相控阵法也是基于布置一个传感器网络, 通过精确控制每个传感器的激励和接收时间以及相位延迟, 实现对结构的全面扫描, 从而获取结构中损伤的类型、位置以及形状等信息 (Luo & Rose 2007, Purekar & Pines 2010). 同样, 相控阵法的传感器网络也是比较复杂的. 人工智能法利用先前大量数据对人工神经网络算法或遗传算法进行训练, 再用训练好的算法来检测结构, 实现结构的损伤评估甚至损伤图像重构 (Su & Ye 2005, Vishnuvardhan et al. 2007). 可是, 这些基于线性超声理论的兰姆波损伤识别方法能检测出损伤的尺寸都受限于检测导波的波长, 对于材料早期性能退化和结构内部早期微损伤几乎不敏感.

鉴于非线性超声具有检测灵敏度高的优点和超声兰姆波具有检测速度快的特点, 若将两者加以结合, 则可望发展出一种既有高检测灵敏度又有快检测速度的非线性兰姆波检测技术. 但是, 关于非线性兰姆波的研究成果仍然非常有限, 原因主要有两个方面: 一是由于板上下边界反射、模式转换等因素的影响, 兰姆波传播过程异常复杂, 理论上分析十分困难; 二是兰姆波具有频散特性, 一般情况下难以产生较明显的非线性效应, 因此通过实验测量兰姆波的非线性效应也十分困难. 非线性超声在检测材料早期性能退化和结构早期损伤方面的潜力给无损探伤领域注入了新的活力, 然而非线性兰姆波的相关理论和实验研究的缓慢发展阻碍了其实际应用. 本文从理论和实验两个方面总结了近二十年来关于非线性兰姆波的研究进展, 第 2 节介绍基于经典非线性理论的非线性兰姆波的相关工作; 第 3 节介绍基于接触声非线性理论的非线性兰姆波的相关工作; 最后展望了非线性兰姆波的未来研究重点和发展趋势.

2 基于经典非线性理论的非线性兰姆波

本节主要介绍源于材料的固有物理非线性诱发的非线性兰姆波的相关研究进展. 一般认为, 材料的固有物理非线性产生的原因有两个: (1) 由原子间的相互作用力或点阵的非简谐性引起的非线性; (2) 由内部微观缺陷如位错、滑移带等引起的非线性. 其中由位错等微观缺陷引起的非线性占主导地位.

2.1 理论和数值分析

基于经典弹性非线性理论的声波动理论主要研究固体介质的固有物理非线性对声波传播特性的影响, 在理论分析中, 固有物理非线性主要通过应力 - 应变关系中的非线性系数予以描述 (Auld 1973, Cantrell 2003, 税国双等 2005). 数学上, 应力 - 应变之间的非线性关系可以用非线性系数表示, 对于一维情况, 有

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon) \quad (1)$$

式中, σ 为应力, ε 为应变, E_0 为材料的线弹性模量, β 为二阶经典非线性系数. 由于在固体介质中声波传播非常复杂, 基于经典弹性非线性理论的声波动理论的研究之前主要针对声纵波和声表面波 (Qian 1995, Zabolotskaya 1992, Gusev et al. 1998, Kumon & Hamilton 2002). Breazeale 等从连续介质模型出发, 将方程 (1) 和声波动方程结合, 从数学上推导出二维纵波非线性波动方程, 求解该方程可得到非线性响应 (即谐波幅值) 与非线性系数之间的关系. 若输入为连续正弦波, 波动方程的近似解为

$$u = A_1 \cos(kx - \omega t) - \frac{1}{8} k^2 x \beta A_1^2 \cos 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

式中 ω 为激励波的角频率, x 为波的传播距离, k 为波数, t 为时间, A_1 为基波幅值. 从式中可以看出二次谐波幅值 $A_2 = \frac{1}{8} k^2 x \beta A_1^2$, 因此非线性系数 β 可以表示为

$$\beta = 8 \frac{A_2}{A_1^2} \frac{1}{k^2 x} \quad (3)$$

由此可知, β 正比于二次谐波幅值与基波幅值的平方的比值, 换言之, 材料的非线性系数可以通过二次谐波幅值与基波幅值的平方的比值随传播距离增大的变化关系来衡量. 但是, 与声纵波和声表面波相比, 兰姆波的非线性理论研究进展缓慢.

直到 20 世纪 90 年代, 邓明晰 (1996, 1997, 1999) 最先采用界面非线性声反射技术, 将兰姆波视为由满足边界条件的横、纵波在固体板的上、下界面反射重构而成, 假设了兰姆波的横、纵波的形式解, 将其代入非线性波动方程并采用逐级近似方法进行求解, 得到了共振条件下满足边界条件和初始条件的具有累积增长效应的兰姆波二次谐波的解析解; 结果表明, 在共振条件下固体板中传播的兰姆波可激发出两种类型的二次谐波, 一种是自由二次谐波, 其值非常微弱且难以对其进行实际测量, 另一种是累积二次谐波, 它随传播距离的增大而累积增长, 是实验测量信号中二次谐波的主要成分. 为克服共振条件下不能严格给出兰姆波自由二次谐波的解析解的不足, Deng (2003)、Lima 和 Hamilton (2003) 先后各自分别采用导波激发的模式展开方法, 在二阶微扰近似条件下推导出了更具一般性的兰姆波二次谐波声场的解析解. 据其研究结果可知, 伴随基频兰姆波传播所产生的二次谐波声场, 可视为由一系列二倍频兰姆波模式叠加

而成; 只有与基频兰姆波相速度相等 (相速度匹配) 的二倍频兰姆波模式才表现出随传播距离累积增长的性质; 其他与基频兰姆波相速度不等 (相速度失配) 的二倍频兰姆波模式, 其振幅随传播距离表现出拍效应, 可不考虑它们对基频兰姆波二次谐波声场的贡献; 基频兰姆波的二次谐波声场主要取决于满足相速度匹配条件的二倍频兰姆波模式. 邓明晰和 Lima 等研究均表明, 累积二次谐波的产生需要两个条件: 基频兰姆波有非零能量流馈入二次谐波、基频兰姆波模式的相速度须与二倍频兰姆波模式的相速度相同. Muller 等 (2010) 考虑在实际的非线性实验中一般采用有限周波数的正弦或余弦信号激发兰姆波的情形, 补充了第三个条件: 基频兰姆波模式的群速度须与二倍频兰姆波模式的群速度相等 (群速度匹配); 提出该条件主要是基于这样一种考虑, 采用有限长时域信号激励的兰姆波在结构中以波包的群速度向前传播, 基频兰姆波和二倍频兰姆波模式的群速度相匹配时才能同步传播, 如此由基频兰姆波传播至二次谐波的能量才能发生累积. 若以上三个条件需同时满足, 则兰姆波累积二次谐波的产生条件就显得过于苛刻. 在对兰姆波二次谐波发生效应的物理实质进行深入分析的基础上, 邓明晰等 (2011, 2012) 从理论和实验上证明, 即使群速度匹配条件不满足, 伴随有限长兰姆波时域信号传播所产生的二次谐波信号, 仍可随传播距离累积增长. 此外, Zhu 等 (2016) 还从数值仿真的角度出发, 进一步证明了兰姆波累积二次谐波的产生, 并不受限于基频和二倍频兰姆波模式的群速度匹配条件.

目前, 非线性兰姆波的理论研究还不能认为完全成熟, 因为从理论上既得不到封闭解的 β 系数, 而且在关于兰姆波高次谐波的对称性问题上结论还不统一. 邓明晰 (1996, 1999, 2003) 推导出的二次谐波位移场具有对称性质并由此得出结论, 不论基波是对称模式还是反对称模式, 被产生的二次谐波只能是对称模式的, 即 S 模式. Srivastava 和 Scalea (2009) 得到的结论是, 反对称模式不会出现在偶数阶谐波, 它可以出现在奇数阶谐波; 而对称模式可以出现在所有高阶谐波, 即包括偶数阶谐波和奇数阶谐波. 这个结论在一定程度上和邓明晰的一致, 即二阶谐波 (偶数阶谐波) 只能是对称模式的. Muller 等 (2010) 得到二次谐波可以交差产生的结论, 即一个反对称波的基波可以产生对称的二次谐波. 可以发现, 前面的结论在一定程度上都有相同的地方, 而 Lima 和 Hamilton (2003) 从理论上得到的结论是: 一个基波只能产生与其同类的二次谐波, 如 A 波只能产生 A 波的二次谐波; S 波只能产生 S 波的二次谐波. 因此, 在今后的研究中, 不管是从理论还是实验都有必要对兰姆波高次谐波, 尤其是二次谐波的对称性问题进行深入研究, 以便在将来的非线性兰姆波的损伤检测应用中对合适模式的选取进行指导.

前面的研究都是针对普通的各向同性固体板的, 邓明晰等 (2005, 2007) 采用二阶微扰近似和导波的模式展开方法, 从理论上还研究了各向异性固体板和分层结构中的兰姆波的二次谐波发生效应, 并给出了二次谐波声场的一般形式解. 板的各向异性

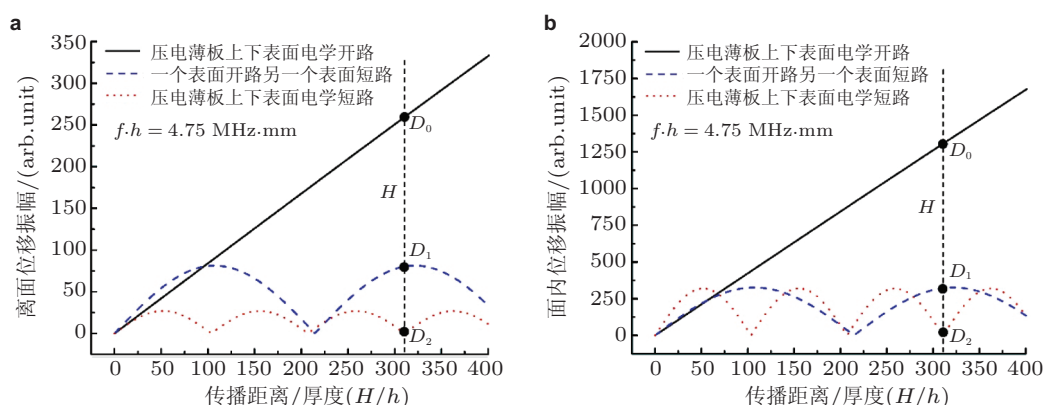


图 5

在厚度为 h 的 YZ-LiNbO_3 压电薄板中, 伴随基频导波模式传播所发生的二倍频导波模式在薄板表面的振幅随传播距离的关系曲线. (a) 离面位移, (b) 面内位移 (Deng & Xiang 2015)

会引起导波模式相速度的改变, 从而显著影响到导波二次谐波. 分层结构中的二次谐波声场可视为各层结构中各自产生的一系列二倍频兰姆波的叠加, 如果某一二倍频兰姆波的相速度与基频兰姆波的相速度相等, 则该二倍频兰姆波在传播方向上将随传播距离呈线性积累增长趋势, 如果它们的相速度不相等, 则二倍频兰姆波的振幅将随传播距离呈正弦形式振荡变化, 并且速度相差越大二倍频兰姆波的振幅随传播距离的振荡越剧烈. 此外, Deng 和 Xiang (2015) 在考虑压电材料的弹性、压电及介电非线性之后, 首先从理论上研究了压电薄板中超声导波的二倍谐波发生效应, 发现通过改变压电薄板表面的电边界条件, 可显著地调节或控制超声导波的二倍谐波发生效应; 如图 5 所示, 在一特定的传播距离 H , 不同电边界条件所对应的二次谐波振幅 (点 D_0 , D_1 和 D_2) 差异甚大.

目前存在两种分析非线性兰姆波的理论方法. 邓明晰 (1998, 1999) 基于界面非线性声反射理论分析了单层各向同性固体板中的兰姆波二次谐波声场. 采用该方法可得到满足二阶波动方程、边界条件和初始条件的具有累积效应的二次谐波的解析解, 在二阶微扰近似条件下该解为准确解, 其物理意义直观, 逻辑清晰, 易于理解. 但对于多层、各向异性或几何形状复杂的波导结构, 采用该方法的分析过程较为繁琐, 另外也难以分析在满足相速度匹配条件下的二次谐波声场. 为克服上述不足, 邓明晰 (2003)、Lima 和 Hamilton (2003) 各自独立提出采用导波激发的模式展开分析方法, 以更全面地分析兰姆波的二倍谐波发生效应. 其基本要点是, 在二阶微扰近似条件下, 伴随基频兰姆波传播所产生的二倍频体力张量和面驱动应力张量, 其作用是在板中激发出

一系列的二倍频兰姆波模式, 它们叠加起来即构成基频兰姆波的二次谐波声场; 当基频兰姆波的相速度与某一二倍频兰姆波模式的相速度相等时, 该二倍频兰姆波模式随传播距离累积增长, 此时其等同于之前基于界面非线性声反射理论所得的具有累积效应的二次谐波. 关于发生累积效应兰姆波二次谐波的条件, 两种分析方法所得结论是相一致的. 众所周知, 模式展开分析方法是基于互易原理, 而理论上互易原理并不适于分析非线性问题, 但在二阶微扰近似条件下, 非线性效应可视为是线性波动响应的一个二阶微扰, 兰姆波的二次谐波发生问题即成为一个已知二倍频激发源 (源于基频兰姆波的传播) 的线性激发问题. 综合以上两种方法开展比较研究, 更加有利于理解非线性兰姆波传播问题的物理本质.

针对非线性兰姆波传播理论的研究, 有争议的观点主要包括: (1) 产生具有累积效应的二次谐波在满足初始的基频兰姆模式和二倍频兰姆波模式相速度匹配的同时, 是否还需要同时满足两者之间的群速度匹配条件? Deng 等 (2011, 2016) 不仅在理论上解释了相速度匹配就可产生具有累积效应的二倍频兰姆波信号, 同时还从实验上给予了证实. 在满足相速度匹配条件下, 无论基频与二倍频兰姆波模式是否满足群速度匹配, 都可产生具有累积效应的二次谐波, 故群速度匹配不是产生具有累积效应二次谐波的必要条件. (2) 二倍频兰姆波是否存在反对称模式? 一般认为兰姆波的传播存在对称和反对称两种形式, 通过分析二倍频兰姆波声场 (Deng 1999, 2003), 可发现无论初始激励的基频兰姆波模式是对称或非对称的, 所产生的二倍频兰姆波都应是对称的.

在数值分析中, 固有物理非线性主要通过固体介质的高阶弹性常数予以描述. 目前大部分研究工作都是把材料的三阶弹性常数引入本构关系中, 构造超弹性本构模型并将其代入运动方程, 从而获得非线性响应. 常用的超弹性本构模型有 Landau-Lifshitz 模型和 Murnaghan 模型. Chillara 和 Lissenden (2014, 2016) 比较了线弹性本构模型, 超弹性 Murnaghan 本构模型和几何非线性三种情况下不同模式和频率的兰姆波在铝板中传播一定距离后的非线性响应, 结果显示线弹性本构模型基本不会引起兰姆波的非线性响应, 而几何非线性引起的非线性响应要远小于超弹性 Murnaghan 本构模型引起的非线性响应, 这说明材料本身的非线性是诱发超声非线性响应的主要因素. 另外, Chillara 和 Lissenden (2014, 2016) 分析还发现, 当基波为 0.5 MHz 的 S_0 波时, 获得的二次谐波主要为 1 MHz 的 S_0 波; 尽管 0.5 MHz 的 S_0 波和其倍频的 1 MHz 的 S_0 波的相速度并不严格匹配 (两者近似相等), 这种情况下诱发的二次谐波在一定传播距离范围内仍是具有累积效应的. 图 6 显示了在传播距离 x/λ_{S_0} 大于 10 之后, 累积二次谐波的幅值呈下降趋势. 图 6 所示结果说明了兰姆波累积二次谐波的产生并不需要严格满足相速度和群速度匹配条件, 这与邓明晰之前分析所得的当基频和二倍频兰姆波相速度近似相等也可产生累积二次谐波 (邓明晰 2003)、以及兰姆波累积二次谐波的产生并不受限于群速度匹配条件 (邓明晰 2011, 2012) 是相一致的. 当基波为 3.6 MHz 的

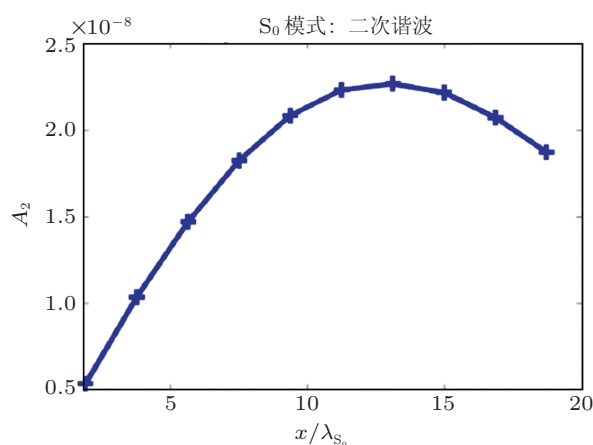


图 6

基波为 S_0 波 (0.5 MHz) 时二次谐波幅值和传播距离之间的关系 (Chillara & Lissenden 2016)

S_1 波时, 获得的二次谐波主要为 7.2 MHz 的 S_2 波, 由于 3.6 MHz 的 S_1 波与 7.2 MHz 的 S_2 波的相速度严格相等 (图 7), 所以这种情形下诱发的二次谐波具有积累效应 (图 8), 二次谐波的幅值随着传播距离的增大呈线性增长趋势. Pau 和 Scalea (2015) 提出一个模型来研究兰姆波在含预应力板内的传播规律, 该模型综合考虑了有限应变和包含三阶弹性常数的应变能表达式两个因素, 分两步求解含预应力板内的非线性兰姆波. 第一步求解出以初始应力为变量的群速度和相速度的函数, 论文中讨论了沿波传播方向一致的单向拉压状态 (A)、垂直于波传播方向的单向拉压状态 (B)、平面内各向同性应力状态 (C) 这三种应力状态下板内兰姆波的群速度和相速度的变化, 并且比较了在这三种应力状态下兰姆波的群速度随板内应力变化的相对改变 (如 图 9); 第二步采用摄动法求解在给定波速下二次谐波的位移分量, 图 10 显示了三种应力状态下不同应力大小时二次谐波位移分量的变化曲线, 从图中可以看到, 在平面内各向同性应力状态下受应力影响最大, 其次是沿波传播方向一致的单向拉压状态, 垂直于波传播方向的单向拉压状态受应力影响最小.

利用数值分析方法研究非线性兰姆波的传播特性, 以进一步揭示非线性兰姆波的传播机理, 近年来越来越受到重视. 但目前的数值分析方法主要是基于将三阶弹性常数引入到应力 - 应变的非线性本构关系之中, 这种经典的非线性本构关系, 并不适用于在含有微损伤、微缺陷的材料结构中分析非线性兰姆波的传播特性. 微损伤、微缺陷引发兰姆波非线性响应的机理目前还不清晰, 特别是, 不同的损伤类型还可引发不同的非线性响应特征. 因此利用数值分析方法研究非线性兰姆波, 尚需在非线性声学

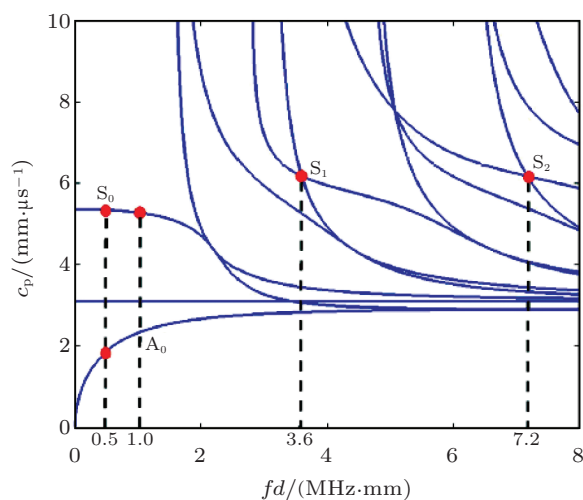


图 7

在铝板的相速度频散曲线中显示基波和二次谐波之间相速度的关系 (Chillara & Lissenden 2016)

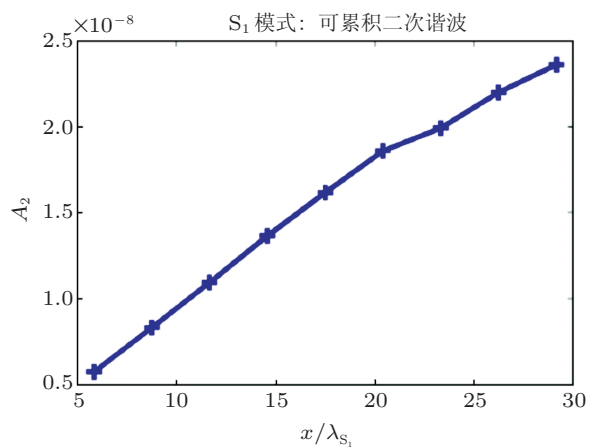


图 8

基波为 S_1 波 (3.6 MHz) 时二次谐波幅值和传播距离之间的关系 (Chillara & Lissenden 2016)

响应机理上作进一步探索以开发可被广泛应用的数值分析模型.

2.2 实验研究

由于兰姆波的频散特性, 一般情况下产生的二次谐波不具备积累效应, 因此通过

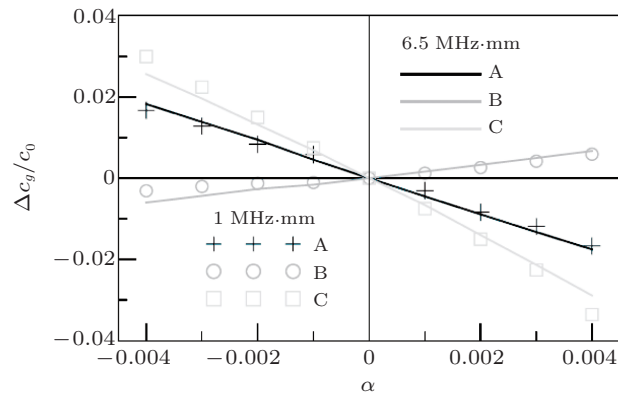


图 9

三种应力状态下兰姆波的群速度随板内应力变化的相对改变 (Pau & Scalea 2015)

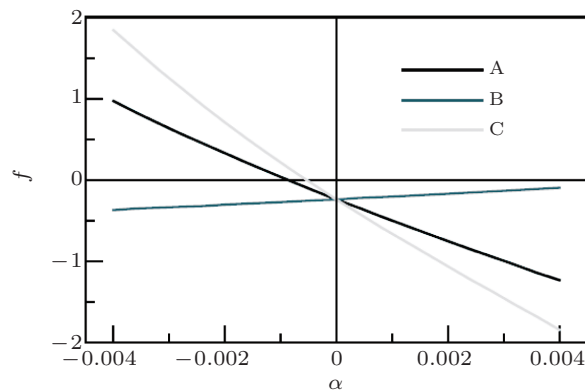


图 10

三种应力状态下二次谐波位移分量的变化曲线 (Pau & Scalea 2015)

实验获取兰姆波的非线性响应是一件非常困难的事情. 目前绝大多数实验研究都使用 Ritec 公司开发的 RAM-5000-SNAP 测量系统开展进行, RAM-5000-SNAP 测量系统主要包括两个宽带射频脉冲放大器、独特的信号追踪接收器、 90° 相移敏感检测器、门积分器和多个频率合成器. 实验时通过门控放大器放大发射信号, 在接收端运用超外差技术和向敏检波积分技术充分提取不同频率的信号 (基频, 非线性效应产生的二次谐波、三次谐波及和频差频等). 非线性超声实验测量系统如图 11 所示, RAM-5000-SNAP 测量系统发出的信号经过衰减器后由超声换能器入射到试件中激发兰姆波, 在试件中传播一段距离后再由超声换能器接收波信号. 将采集到的信号进行傅里叶变换或者短时傅里叶变换, 求出基频幅值和倍频幅值, 进而计算材料的非线性系数. 从图

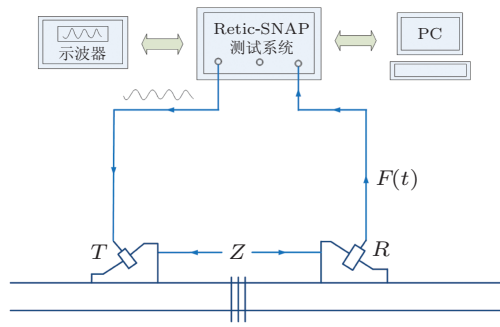


图 11

非线性超声实验测量系统

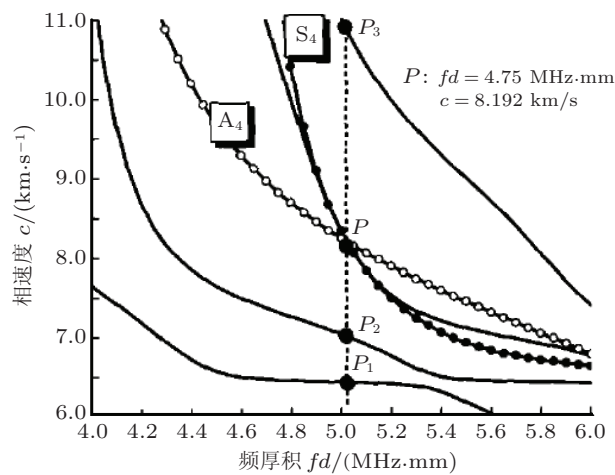


图 12

基频与二倍频兰姆波的频散曲线 (P 点: $c^{(\omega)} = c^{(2\omega)}$) (Deng et al. 2005)

11 可知, 非线性超声实验并不复杂, 难点在于兰姆波模式的选择。

邓明晰等 (2005, 2006) 最早通过实验验证了兰姆波在一定条件下其二次谐波随传播距离累积增长这一现象, 他们在 2 mm 厚的单层铝板中用斜劈换能器激发和接收兰姆波, 调整斜劈角度可选择被激发的兰姆波模式, 通过相速度频散曲线 (图 12) 确定激发基频兰姆波模式 (A_4 和 S_4 模式), 使其相速度与某一二倍频兰姆波模式的相速度相等或近似相等 (P 点)。实验中以扫频方式依次产生从 4.8 MHz 到 5.5 MHz 的射频脉冲, 同时在不同传播距离处测量基频和二倍频兰姆波信号在铝板表面的振幅, 其中基频兰姆波信号通过对超声信号进行低通滤波而获得, 二倍频兰姆波信号通过对超声信号进行高通滤波而获得, 它们的振幅是通过匹配的门积分器进行积分运算而获得。实

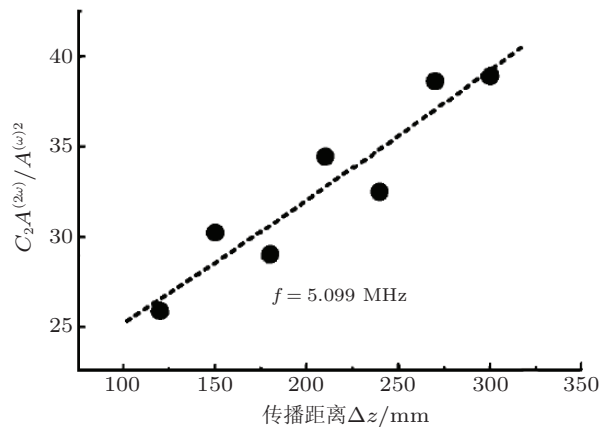


图 13

频率为 5.099 MHz 时二次谐波幅值与基频兰姆波振幅平方比值与传播距离的关系曲线 (Deng et al. 2005)

验结果得到, 在 $f = 5.10 \text{ MHz}$ 附近二次谐波振幅与基频波振幅的平方之比随传播距离增大呈线性增长趋势 (图 13).

Liu 等 (2012) 采用可变角度超声探头进行非线性超声实验研究非线性兰姆波二次谐波的对称性. 实验研究了对称的 S_1 - S_2 模式对与反对称 A_1 - A_2 模式对、 A_2 - A_4 模式对的非线性系数随传播距离的关系. 结果表明三组模式对的非线性系数均随传播距离呈现线性增长趋势, 但对称的 S_1 - S_2 模式对的斜率远大于反对称 A_1 - A_2 模式对和 A_2 - A_4 模式对 (如图 14). 为了进一步研究反对称模式对的非线性系数随传播距离的增长是否由累积效应产生, 他们还研究了反对称 A_1 - A_2 模式对和 A_2 - A_4 模式对在两种不同型号 (代表不同损伤程度) 的铝板中的非线性系数随传播距离的变化, 结果发现其拟合曲线的斜率基本不变, 这说明反对称兰姆波模式对的非线性系数随传播距离的增长与材料的非线性无关. 因此得出结论, 非对称二次谐波不具备累积效应, 只有对称的二次谐波才能随传播距离发生累积效应.

Matlack 等 (2011) 通过实验研究了对称的 S_1 - S_2 模式对、 S_2 - S_4 模式对的有效二次谐波的产生, 发现虽然两组模式对的非线性系数均随传播距离的增大而增大, 但是 S_2 - S_4 模式对的增长斜率是 S_1 - S_2 模式对的 4.23 倍 (图 15), 这说明高阶谐波对材料的非线性更加敏感. 但是, 从实际的实验状况考虑, 采用 S_1 - S_2 模式对所产生的其他模式杂波较少, 且基波和二次谐波的波速最快, 在信号处理方面优于 S_2 - S_4 模式对, 因此 S_1 - S_2 模式对还是一种比较好的选择.

Bermes 等 (2008) 采用斜劈式超声换能器和激光干涉仪 (用于接收信号) 研究了在两种型号不同的铝板中 S_1 - S_2 模式对的非线性系数随激励电压、传播距离变化的关

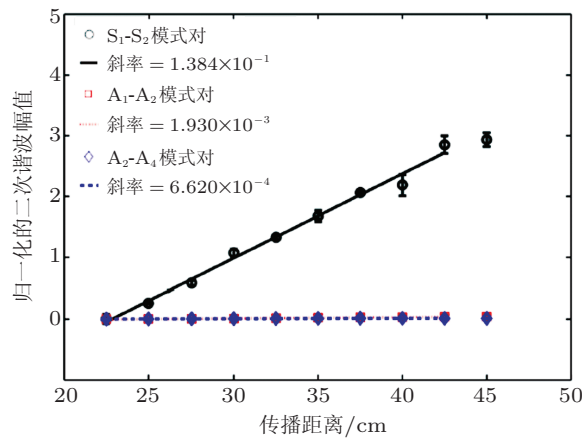


图 14

铝板 (6061-T6 型号) 中三组模式对的归一化非线性系数 $c_{\beta}^2 A_2 / A_1^2 \omega^2$ 与传播距离的关系 (Liu et al. 2012)

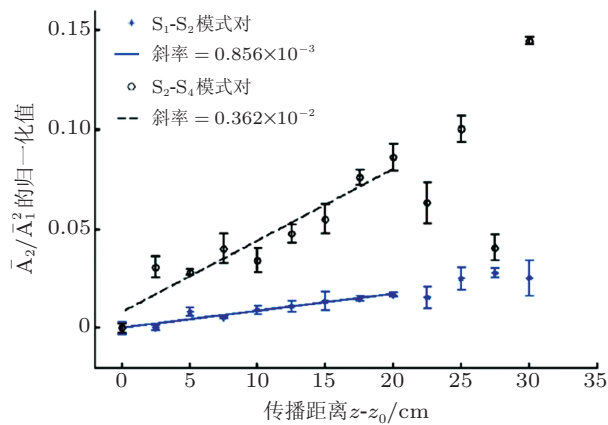


图 15

S_1-S_2 模式对、 S_2-S_4 模式对的非线性系数 $\beta' = \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right)_z - \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right)_{z_0}$ 与传播距离的关系 (Matlack et al. 2011)

系. 结果显示, 非线性系数随激励电压的增大基本保持不变 (图 16), 说明非线性系数基本不受激励信号大小的影响; 而非线性系数随传播距离的增大呈线性增长趋势, 但对于不同型号的铝板 S_1-S_2 模式对的非线性系数随传播距离的增长速率不同 (图 17), 说明 S_1-S_2 模式对可用于衡量材料的弹性非线性. 目前大部分的实验结果只能定性地衡量材料的非线性程度, 如果能建立材料力学性能参数与兰姆波的非线性特征之间的定量关系, 则可实现对材料早期性能退化的定量评价.

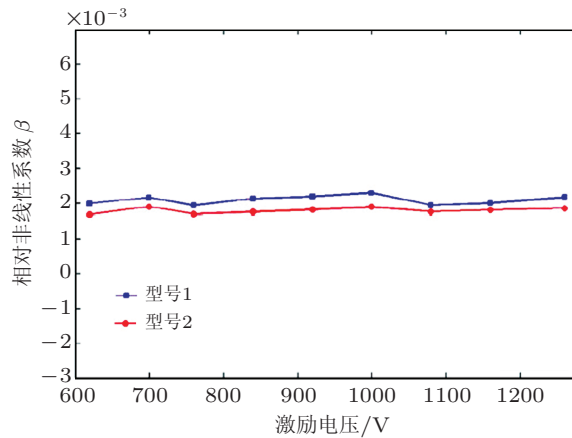


图 16

一定传播距离处相对非线性系数 $\beta' = \frac{A_2}{A_1^2}$ 与激励电压的关系 (Bermes et al. 2008)

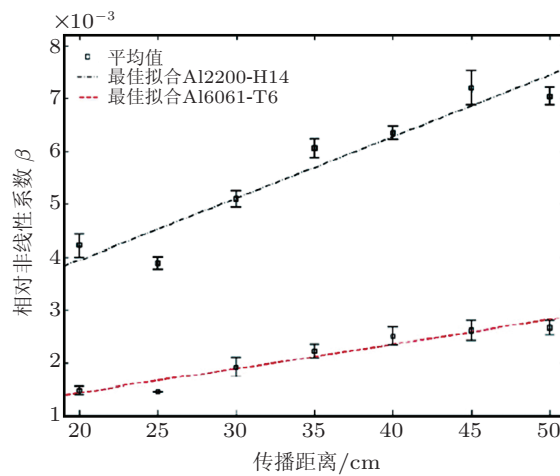


图 17

在不同型号铝板中 S1-S2 模式对的相对非线性系数 $\beta' = \frac{A_2}{A_1^2}$ 与传播距离的关系 (Bermes et al. 2008)

实验研究中, 目前广泛采用的方法是根据可产生具有累积效应兰姆波二次谐波的相速度匹配条件, 激励特定的基频兰姆波模式并验证二次谐波随传播距离的累积效应. 研究分析满足相速度匹配条件的兰姆波各个模式的波结构发现, 这些模式都存在一个共同的特点: 板材表面上的法向位移分量为零, 而切向位移分量为最大值. 在实际的测量中, 法向位移分量更容易被检测. 邓明晰 (2003) 研究了基频与二倍频兰姆波

信号在相速度近似匹配情况下,二次谐波法向位移分量显著增大,并通过实验证实了基频与二倍频兰姆波信号在相速度近似匹配的情况下,也可以产生具有累积效应的二次谐波,因此提出适度的相速度不匹配会更有利于实验测量兰姆波的二次谐波信号.

2.3 材料损伤评价方面的应用

大量的试验研究证明材料的早期疲劳损伤,蠕变,界面粘接强度的退化可用超声非线性系数进行表征,因为相对于基频波,高次谐波对材料性能的微小变化更为敏感,但是大部分研究都是针对非线性超声纵波和声表面波的,在非线性兰姆波方面目前的研究工作还比较少.

2.3.1 材料疲劳损伤评价

邓明晰和项延训等(2007, 2008, 2011)通过测量兰姆波的基波和二次谐波的幅-频曲线研究了采用非线性超声兰姆波方法评价铝板的拉-拉疲劳损伤、镍合金钢板的热降解的可行性.实验结果发现,铝板在疲劳加载过程中,在其中传播的兰姆波的基波应力波因子随循环次数的改变并不明显,且与循环次数的对应关系也不确定(图 18(a)和图 18(c));而兰姆波二次谐波的应力波因子随循环次数的变化表现出非常敏感的性质,尤其是在周期性载荷作用的最初阶段,二次谐波的应力波因子随循环次数的变化非常显著,并表现出明显的单调对应关系(图 18(b)和图 18(d));将镍合金钢板放置高温环境中不同时长,则相当于镍合金钢板经历不同的热降解时间,发现兰姆波随着热降解时间表现出三个阶段不同的变化趋势,在热降解时间较短的早期阶段,非线性系数呈单调上升趋势,在中间相当长的热降解时间段,非线性系数表现出相对平稳的变化趋势,当热降解时间进入第三阶段,非线性系数呈逐渐下降趋势(图 19),原因是长时间的高温环境引起位错变化和微孔萌生导致相速度不匹配.

Li等(2012)针对航空复合材料热疲劳问题通过实验比较了线性参数(群速度、衰减系数)和非线性系数(S_1 - S_2 模式对)对热疲劳加载周期数的敏感度,从图 20可以看出,群速度几乎不受热疲劳加载周期数的影响,而非线性系数的敏感度明显大于衰减系数,并且非线性系数随周期数的增长呈明显的线性增长趋势,这非常有利于对材料早期疲劳损伤进行评价.

2.3.2 材料塑性变形程度评价

Pruell等(2007)考察了材料的累积塑性对兰姆波的非线性响应的影响.实验中使用了1个未变形试件作为参考和5个塑性变形程度不同的试件,其中最大程度的塑性变形都远低于试件发生紧缩所达到的塑性变形,因此塑性变形被认为均匀分布于整个试件,结果显示逐渐积累变大的塑性变形导致兰姆波的非线性逐渐增大(图 21),这说明非线性兰姆波可用于检测由塑性驱动的材料微观损伤.

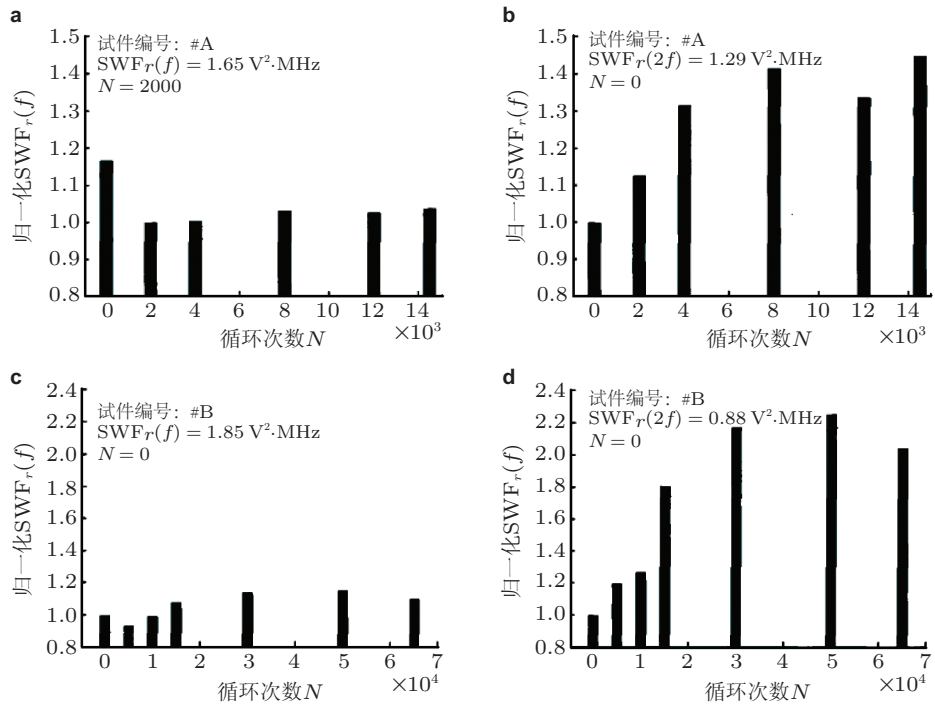


图 18

超声兰姆波的归一化应力波因子与循环次数的关系 (邓明晰 & 裴俊峰 2008). (a) 基波, 试件 #A, (b) 二次谐波, 试件 #A, (c) 基波, 试件 #B, (d) 二次谐波, 试件 #B

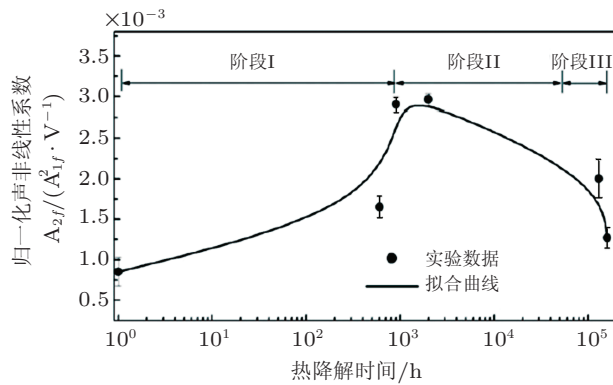


图 19

频率为 2.45 MHz 时兰姆波声非线性系数与热退化时间的关系 (Xiang et al. 2011)

2.3.3 材料冲击损伤评价

Rauter 和 Lammering (2015) 比较了复合材料的冲击损伤对兰姆波的群速度和非

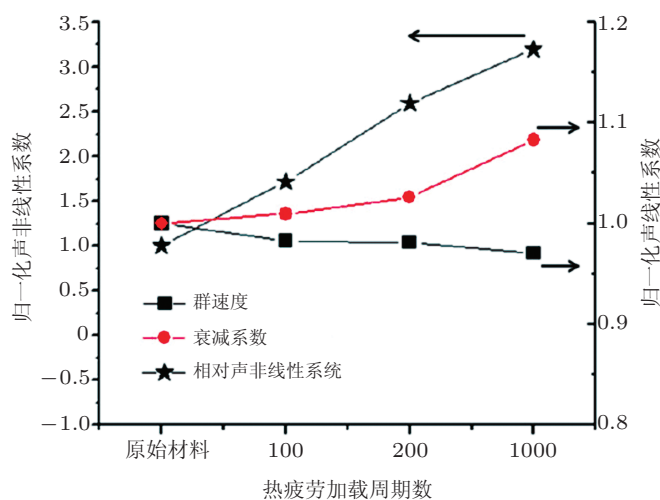


图 20

比较兰姆波的群速度、衰减系数和相对声非线性系数对热疲劳加载周期数的敏感度 (Li et al. 2012)

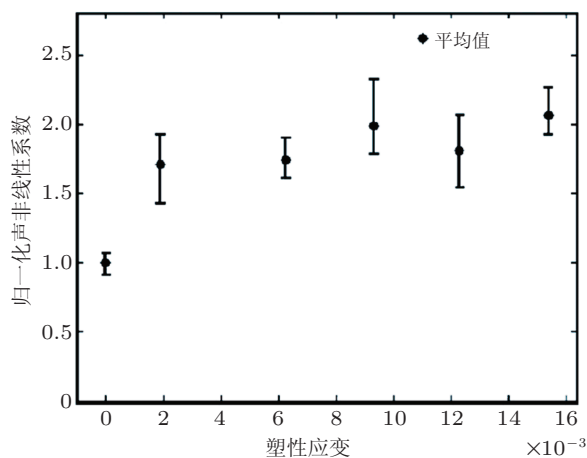


图 21

兰姆波的非线性与塑性变形的关系 (Pruell et al. 2007)

线性响应的影响. 实验时用 4 种不同的冲击能量冲撞试件的 3 个位置 (图 22), 然后激发 S_1 - S_2 模式对在试件中传播, 采用 Morlet 小波变换处理接收到的信号, 比较兰姆波波包群速度和 S_1 - S_2 模式对的非线性系数随冲击能量的变化. 结果显示兰姆波波包群速度几乎不受冲击的影响 (图 23(a)), 而 S_1 - S_2 模式对的非线性系数随冲击能量的增大而明显增大 (图 23(b)), 这说明兰姆波的速度几乎不受复合材料中微结构损伤的影

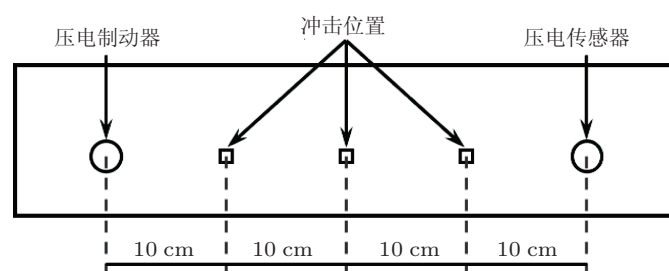


图 22

实验方案示意图 (Rauter & Lammering 2015)

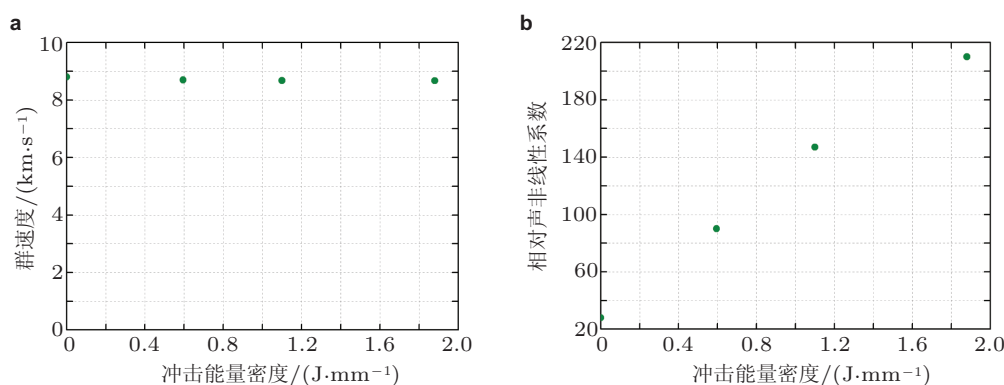


图 23

实验结果: (a) 群速度与冲击能量的关系, (b) 相对超声非线性系数与冲击能量的关系 (Rauter & Lammering 2015)

响, 所以不能期待通过测量兰姆波速度的变化来检测复合材料中微结构损伤; 而兰姆波的非线性响应对冲击非常敏感, 如果能将非线性系数与冲击能量建立对应关系, 则可预测复合材料被冲击严重程度.

2.3.4 复合板材层间粘接性能评价

复合板材粘接层的质量优劣对复合板材结构性能影响很大, 然而, 粘接层力学性能的微小变化, 比如刚度系数的微小改变, 不足以引起兰姆波频散特性发生较显著的变化. 邓明晰 (2005) 将兰姆波检测技术与非线性超声测量方法结合起来, 在兰姆波具有强烈非线性效应的条件下, 对三种不同粘接情况的复合板材中传播的兰姆波的基波及二次谐波幅频特性进行了实验研究. 实验结果如表 1 所示, 三种粘接情况对应的二次谐波的应力波因子显示出良好的区分特性, 并且不同粘接状态导致的兰姆波频散特性的变化可通过二次谐波幅频曲线峰值 ($c_F^{(\omega)} = c_H^{(2\omega)}$ 或 $c_F^{(\omega)} \approx c_H^{(2\omega)}$) 所对应频率值的

差异得以体现. 此结果也显示了非线性超声兰姆波测量技术对复合板材的粘接状况进行有效表征的巨大潜力.

表 1 三种粘接情形的非线性兰姆波实验结果 (邓明晰 2015)

实验样品	$c_F^{(\omega)} = c_H^{(2\omega)}$ (或 $c_F^{(\omega)} \approx c_H^{(2\omega)}$) 对应的频率	二次谐波的应力波因子	
		数值	百分比
完好粘接/胶层较薄	2.22 MHz, 1.92 MHz	0.240 V · MHz	100%
完好粘接/胶层较厚	2.26 MHz	0.165 V · MHz	69%
包含夹杂物	2.36 MHz	0.015 V · MHz	6%

以上的实验研究表明, 非线性超声兰姆波技术有望成为准确评估材料性能退化的有效方法. 尽管利用非线性兰姆波评估和检测材料损伤已经受到广泛的关注, 但在实际评估和测试过程中, 需要注意的是: 由于损伤引发非线性响应的机理还不是很清晰, 而兰姆波非线性响应的形式也有不同的类型, 针对不同类型的损伤, 作者认为需要开发特定的非线性兰姆波检测与评估技术. 同时, 如部分研究者发现, 兰姆波的非线性响应 (非线性声学参数 β) 也不一定是随着损伤程度的增大呈递增关系; 针对不同程度的损伤演化阶段, 仍需深入分析非线性兰姆波的响应特征.

3 基于接触声非线性理论的非线性兰姆波

对于体积型缺陷 (如空洞) 及开口裂纹等结构损伤, 超声波在这类损伤处主要发生的反射、透射以及衰减现象使用线性超声理论便可阐释清楚, 但对于闭合微裂纹、分层等接触类结构损伤, 超声波遇到这类损伤会发生一些非线性现象, 比如高阶谐波滋生、次谐波滋生、声共振频率漂移和混频声场调制, 这些现象用传统的线性超声理论无法解释, 于是基于接触非线性的超声理论就逐渐发展起来了. 国内外研究者为了解释上述非线性现象, 提出了多种不同的理论和模型, 比如基于双线性刚度模型的呼吸裂纹模型 (Solodov et al. 2002, Worden & Tomlinson 2001, Friswell & Penny 2002), 修正应力-应变公式添加描述高阶非线性和滞回效应的系数 (Ostrowsky & Johnson 2001, Guyer & Johnson 1999, Van Den Abeele & De Visscher 2000), 考虑裂纹界面微观特征引入界面接触对呼吸裂纹模型进行修正 (Baltazar et al. 2002, Pecorari 2003, Belyaeva et al. 1993). 但是, 目前这方面大多数的研究都是关于超声波的, 在少量的关于兰姆波的研究中都使用基于双线性刚度模型的呼吸裂纹模型来解释高阶谐波滋生现象.

基于双线性刚度模型的呼吸裂纹模型 (图 24) (Shen & Giurgiutiu 2012) 假设裂纹在超声波传播通过时存在两种状态: 闭合和张开. 因此, 将裂纹等效为两个刚性接触

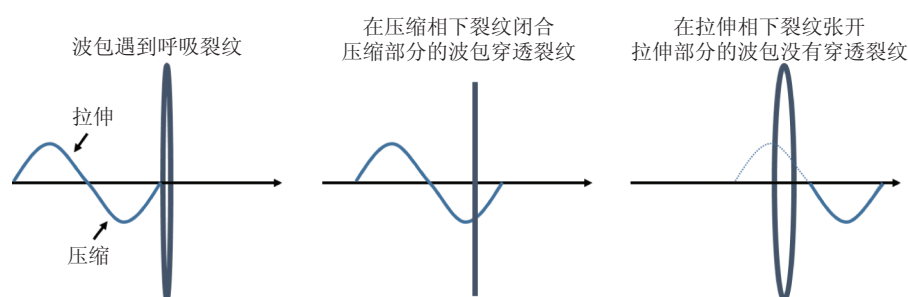


图 24

超声波传播通过呼吸裂纹示意图 (Shen & Giurgiutiu 2012)

的光滑, 并定义了接触刚度来表示裂纹的力学性能, 通过设置裂纹开口和闭合时所需要的力不同, 也就是两种状态对应的刚度不同, 来模拟裂纹的开闭效应. 当超声波传播至裂纹处, 压缩相的情况下会使得裂纹闭合从而超声波穿透裂纹, 拉伸相的情况下会使得裂纹开口导致超声波无法穿透裂纹, 因而只有在拉伸相时才能得到类似于半波整流状态的反射波, 因而该模型用于解释高次谐波滋生现象.

Wan 等 (2014) 将呼吸裂纹模型引入数值计算模型, 研究了埋藏于薄板内的微裂纹诱发的 S_0 波的非线性响应, 结果发现 S_0 波的非线性响应随微裂纹的长度增大而增强, 随微裂纹的宽度增大而减弱. Hong 等 (2014) 通过数值计算和实验研究考察了不同的传播路径 S_1-S_2 模式对的非线性系数与疲劳微裂纹位置的关系, 发现当 S_1-S_2 模式对的传播路径经过裂纹或者极度靠近裂纹区域时非线性系数很大, 然而一旦传播路径不靠近裂纹区域非线性系数则急剧下降 (图 25), 这说明利用非线性系数可以对裂纹进行定位. 因而, 他们将稀疏传感器网络技术与非线性兰姆波方法结合起来 (图 26(a)), 通过实验和数值模拟成功检测并定位出铆钉圆孔边的疲劳初始裂纹 (图 26(b)) (Hong et al. 2014). 总的来说, 目前对于兰姆波的非线性现象, 除了高阶谐波滋生, 尤其是二次谐波的产生现象被广泛研究和应用, 其他的非线性现象还没有受到广泛关注.

4 总结与展望

非线性兰姆波具有兰姆波检测速度快等诸多优点及非线性超声测量方法检测灵敏度高的特点, 近年来引起了研究者的广泛关注和研究兴趣, 迄今为止, 已就非线性兰姆波的理论、实验及应用研究开展了大量的工作, 在其二次谐波发生效应的物理机制、实验测量技术及材料/结构早期损伤评价方面, 均取得了较为丰硕的成果, 为发展板壳材料/结构早期损伤的准确无损评价技术奠定了理论和实验基础. 从实际应用及理论研究的完备性方面考虑, 仍有以下问题需作进一步研究, 具体包括: (1) 兰姆波的

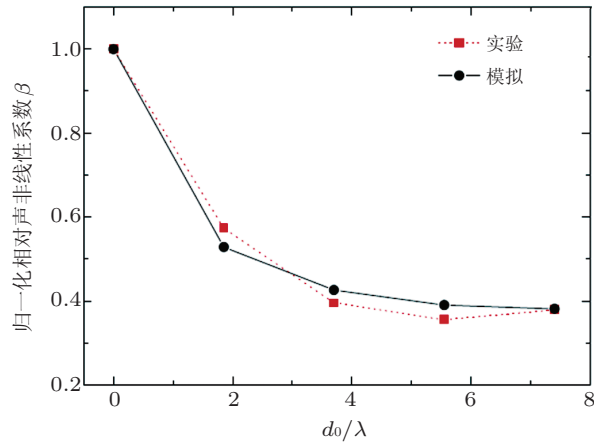


图 25

S_1 - S_2 模式对的非线性系数与传播路径到裂纹的距离的关系 (Hong et al. 2014)

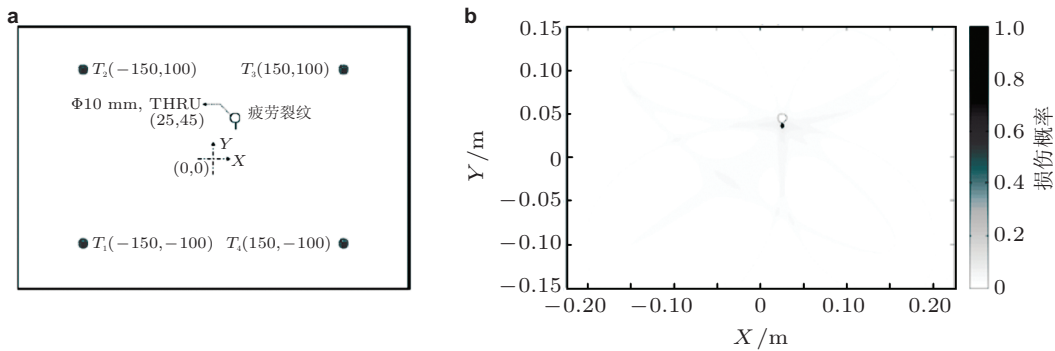


图 26

(a) 铆钉圆孔边疲劳初期裂纹的检测方案示意图 (单位 mm, 疲劳微裂纹被放大示意),
(b) 检测结果图 (Hong et al. 2014)

非线性累积效应条件问题. 对于兰姆波的非线性累积条件, 之前主要的争议在于是否需要群速度匹配; 近年来开展的理论和实验工作已经证明了群速度匹配条件并不是必需的; 为更好地选择适于板壳材料/结构损伤评价的兰姆波模式, 仍需从理论上深入分析并计算在群速度匹配及失配的条件下, 兰姆波的二次谐波发生效率. (2) 兰姆波二次谐波的对称性问题. 关于各向同性固体板中兰姆波二次谐波的对称性已有明确的阐述, 即二次谐波声场只能呈对称分布, 但就各向异性或复杂结构中兰姆波的对称性问题, 仍需开展进一步研究, 以确定二次谐波是否可呈反对称性质, 若存在是否仍具有累积效应等. (3) 建立物理或数学模型, 寻找非线性兰姆波特征系数与驱动材料损伤演化

的因素之间的准确定量关系, 发展基于非线性兰姆波的材料损伤评估技术. (4) 建立模型或寻找合适模型解释关于兰姆波的次谐波滋生、声共振频率漂移和混频声场调制现象, 从理论上指导基于非线性兰姆波的接触类损伤检测技术的发展. 在实验方面, 比如: 信号处理问题. 由于兰姆波的多模式特性, 不管用何种方法激励目标兰姆波模式, 不可避免会产生其他兰姆波模式, 这导致接收信号的时域波形非常复杂, 模式识别非常困难, 增大信号处理的难度. 现在常用的信号处理方法有快速傅里叶变换 (FFT), 短时傅里叶变换 (STFT), 时频分析 (spectrogram) 和小波变换. 而目前降低该问题的影响的方法是尽量选择低阶模式, 减少其他模式的影响. 如能发展有效的可识别各种模式的信号处理方法, 则可有效推动非线性兰姆波研究的进展. 鉴于兰姆波的信号处理复杂的情况, 未来值得开展的重点研究方向包括以下两个方面:

(1) 研究基波为兰姆波的基频模式 (S_0 和 A_0 波) 的非线性兰姆波损伤检测技术. 由于受限于相速度匹配的条件, 目前绝大部分的研究都集中在基波为 S_1 和 A_1 模式或者更高阶的兰姆波. 近来有研究者从数值模拟和实验两方面验证了不用严格满足相速度匹配条件, S_0 波在铝板中传播也产生了明显的二次谐波. 显而易见, 采用能量更高、频率更低、传播距离更远的基频波作为基波, 可以提高信噪比, 降低信号处理难度, 对未来的工程实际应用产生积极的影响.

(2) 研究兰姆波的混频问题. 揭示多个不同频率的兰姆波模式在板壳结构中传播时产生强烈混频效应的物理机制, 研究兰姆波混频效应的测量方法及在材料/结构早期损伤评价中的应用.

致谢 国家自然科学基金项目资助 (11632004, 11602040, 11604033, 11474361, 11274388, 51405405).

参考文献

- 邓明晰, Price D C, Scott D A. 2005. 兰姆波非线性效应的实验观察. 声学学报, **30**: 37-46 (Deng M X, Price D C, Scott D A. 2005. Experimental observations of nonlinear effects of Lamb waves. *Acta Acustica*, **30**: 37-46).
- 邓明晰, 裴俊峰. 2008. 无损评价固体板材疲劳损伤的非线性超声兰姆波方法. 声学学报, **33**: 360-369 (Deng M X, Pei J F. 2008. Nondestructive evaluation of fatigue damage in solid plates using nonlinear ultrasonic Lamb wave method. *Acta Acustica*, **33**: 360-369).
- 邓明晰, 项延训, 裴俊峰, 刘良兵. 2012. 基于群速度失配的超声兰姆波二次谐波的时域测量方法. 声学学报, **37**: 621-628 (Deng M X, Xiang Y X, Pei J F, Liu L B. 2012. Time-domain measurement technique of second harmonic of ultrasonic Lamb waves using mismatch of group velocities. *Acta Acustica*, **37**: 621-628).
- 邓明晰. 1996. 兰姆波的非线性研究. 声学学报, **21**: 429-436 (Deng M X. 1996. Research on nonlinearity of Lamb waves. *Acta Acustica*, **21**: 429-436).
- 邓明晰. 1997. 兰姆波的非线性研究 (II). 声学学报, **22**: 182-187 (Deng M X. 1997. Research on nonlin-

- earity of Lamb waves (II). *Acta Acustica*, **22**: 182-187).
- 邓明晰. 2005. 分层结构中兰姆波二次谐波发生的模式展开分析. 声学学报, **30**: 132-142 (Deng M X. 2005. Modal expansion analyses of second-harmonic generation of the Lamb waves in layered structures. *Acta Acustica*, **30**: 132-142).
- 邓明晰. 2005. 一种定征复合板材粘接层性质的非线性超声兰姆波方法. 声学学报, **30**: 542-551 (Deng M X. 2005. Characterization of adhesive joints of composite solid layers using a nonlinear Lamb wave approach. *Acta Acustica*, **30**: 542-551).
- 邓明晰. 2006. 兰姆波非线性效应的实验观察 (II). 声学学报, **31**: 1-7 (Deng M X. 2006. Experimental observations of nonlinear effects of Lamb waves (II). *Acta Acustica*, **31**: 1-7).
- 税国双, 汪越胜, 曲建民. 2005. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价. 力学进展, **35**: 52-65. (Shui G S, Wang Y S, Qu J M. 2005. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound. *Advances in Mechanics*, **35**: 52-65).
- Aleshin V, Van Den Abeele KEA. 2007. Micro contact-based theory for acoustics in micro damage materials. *J. Mech. Phys. Solids*, **55**: 366-390.
- Auld B A. 1973. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. New York: John Wiley.
- Baltazar A, Rokhlin S I, Pecorari C. 2002. On the relationship between ultrasonic and micromechanical properties of contacting rough surfaces. *J. Mech. Phys. Solids*, **50**: 1397-1416.
- Belyaeva I Y, Zaitsev V Y, Ostrovsky L A. 1993. Nonlinear acousto-elastic properties of granular media. *Acoust. Phys.*, **39**: 11-15.
- Bermes C, Kim J Y, Qu J M, Jacobs L J. 2008. Nonlinear Lamb waves for the detection of material nonlinearity. *Mech. Syst. Signal PR.*, **22**: 638-646.
- Cantrell J H, Yost W T. 2001. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. *Int. J. Fatigue*, **23**: 487-490.
- Cantrell J H. 2003. *Fundamentals and Application of Nonlinear Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. Florida: CRC Press LLC.
- Chillara V K, Lissenden C J. 2014. Nonlinear guided waves in plates: a numerical perspective. *Ultrasonics*, **54**: 1553-1558.
- Chillara V K, Lissenden C J. 2016. Review of nonlinear ultrasonic guided wave nondestructive evaluation: theory, numerics, and experiments. *Opt. Eng.*, **55**: 011002.
- Demer L J, Fentnor L H. 1969. Lamb wave techniques in nondestructive testing. *International Journal of Nondestructive Testing*, **1**: 251-283.
- Deng M X, Pei J F. 2007. Assessment of accumulated fatigue damage in solid plates using nonlinear Lamb wave approach. *Appl. Phys. Lett.*, **90**: Art. No. 121902.
- Deng M X, Xiang Y X, Liu L B. 2011. Time-domain analysis and experimental examination of cumulative second-harmonic generation by primary Lamb wave propagation. *J. Appl. Phys.*, **109**: 113525.
- Deng M X, Xiang Y X. 2015. Analysis of second-harmonic generation by primary ultrasonic guided wave propagation in a piezoelectric plate. *Ultrasonics*, **61**: 121-125.
- Deng M X, Wng P, Lv X F. 2005. Experimental observation of cumulative secondharmonic generation of Lamb-wave propagation in an elastic plate. *J. Phys. D - Appl. Phys.*, **38**: 344-353
- Deng M X. 1999. Cumulative second-harmonic generation of Lamb mode propagation in a solid plate. *J. Appl. Phys.*, **85**: 3051-3058.
- Deng M X. 2003. Analysis of second-harmonic generation of Lamb modes using a modal analysis approach.

- J. Appl. Phys.*, **94**: 4153-4159.
- Deng M X, Yang J. 2007. Characterization of elastic anisotropy of a solid plate using nonlinear Lamb wave approach. *J. Sound Vib.*, **308**: 201-211.
- Diamanti K, Soutis C, Hodgkinson J M. 2007. Piezoelectric transducer arrangement for the inspection of large composite structures. *Composites Part A*, **38**: 1121-1130.
- Donskoy D. 2006. Assessment of initial material damage and remaining life prediction with nonlinear acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**: 3293.
- Friswell M I, Penny J E T. 2002. Crack modeling for structural health monitoring. *Struct. Health. Monit.*, **1**: 139-148.
- Giurgiutiu V. 2003. Lamb wave generation with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring// Smart Structures and Materials 2003: Smart structures and Integrated systems, 111-122.
- Giurgiutiu V. 2005. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**: 291-305.
- Gusev V E, Lauriks W, Thoen J. 1998. New evolution equations for the nonlinear surface acoustic waves on an elastic solid of general anisotropy. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**: 3203-3215.
- Guyot R A, Johnson P A. 1999. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials. *Phys. Today*, **52**: 30-36.
- Hong M, Su Z, Lu Ye, Cheng L. 2014. Temporal information of linear and nonlinear Lamb waves for fatigue damage localization: analysis and synthesis//7th European workshop on Structural Health Monitoring, July 8-11, 2014, La Cite, Nantes, France.
- Hong M, Su Z, Wang Q, Cheng L, Qing X. 2014. Modeling nonlinearities of ultrasonic waves for fatigue damage characterization: theory, simulation, and experimental validation. *Ultrasonics*, **54**: 770-778.
- Kumon R E, Hamilton M F. 2002. Directional dependence of nonlinear surface acoustic waves in the (001) plane of cubic crystals. *J. Acoust. Soc. Am.*, **115**: 2060-2069.
- Lamb H. 1917. On the waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society A*, 293-312.
- Li W, Cho Y, Achenbach J D. 2012. Detection of thermal fatigue in composites by second harmonic Lamb waves. *Smart Mater. Struct.*, **21**: 085019.
- Lima W J de, Hamilton M F. 2003. Finite-amplitude waves in isotropic elastic plates. *J. Sound Vib.*, 265: 819-839.
- Liu Y L, Hu N, Xu H, Yuan W F, Yan C, Li Y, Goda R, Alamusi, Qiu J H, Ning H M, Wu L K. 2014. Damage evaluation based on a wave energy flow map using multiple PZT sensors. *Sensors*, **14**: 1902-1917.
- Liu Y, Kim J Y, Jacobs L J, Qu J M, Li Z. 2012. Experimental investigation of symmetry properties of second harmonic Lamb waves. *J. Appl. Phys.*, **111**: 053511.
- Lu X, Lu M, Zhou L M, Su Z, Cheng L, Ye L, Meng G. 2011. Evaluation of welding damage in welded tubular steel structures using guided waves and a probability-based imaging approach. *Smart Mater. Struct.*, **20**: 015018.
- Luo W, Rose J L. 2007. Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder. *J. Acoust. Soc. Am.*, **121**: 1945-1955.
- Matlack K H, Kim J Y, Jacobs L J, Qu J M. 2011. Experimental characterization of efficient second harmonic generation of Lamb wave modes in a nonlinear elastic isotropic plate. *J. Appl. Phys.*, **109**: 014905.
- Miao H, Huan Q, Li F. 2016. Excitation and reception of pure shear horizontal waves by using face-shear d24 mode piezoelectric wafers. *Smart Mater. Struct.*, **25**: 11LT01.

- Muller M F, Kim J Y, Qu J, Jacobs L J. 2010. Characteristics of second harmonic generation of Lamb waves in nonlinear elastic plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, **174**: 2141-2152.
- Ostrosky L A, Johnson P A. 2001. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *Riv. Nuovo Cimento*, **24**: 1-46.
- Pau A, Scalea F L di. 2015. Nonlinear guided wave propagation in prestressed plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, **137**: 1529-1540.
- Pecorari C. 2003. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact. *J. Acoust. Soc. Am.*, **113**: 3065-3072.
- Pruell C, Kim J-Y, Qu J, Jacobs L J. 2007. Evaluation of plasticity driven material damage using Lamb waves. *Appl. Phys. Lett.*, **91**: 231911.
- Purekar A S, Pines D J. 2010. Damage detection in thin composite laminates using piezoelectric phased sensor arrays and guided Lamb wave interrogation. *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, **21**: 955-1010.
- Qian Z W. 1995. Second order harmonics of surface-waves in isotropic solids. *J. Sound Vib.*, **187**: 369-379.
- Qiu L, Yuan S F, Zhang X Y, Wang Y. 2011. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures. *Smart Mater. Struct.*, **20**: 105014.
- Qiu, L., Liu, M.L., Qing, X.L., Yuan, S.F. 2013. A quantitative multidamage monitoring method for large-scale complex composite. *Struct. Health. Monit.*, **12**: 183-196.
- Rauter N, Lammering R. 2015. Impact damage detection in composite structures considering Nonlinear Lamb wave propagation. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, **22**: 44-51.
- Shen Y, Giurgiutiu V. 2012. Simulation of interaction between Lamb waves and cracks for structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors//ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. Stone Mountain, Georgia, USA.
- Shui G S, Kim J Y, Qu J M, Jacobs L J. 2008. Nonlinear Lamb waves for the detection of material nonlinearity. *Mech. Syst Signal Pr.*, **22**: 638-646.
- Sicard R, Goyette J, Zellouf D E. 2002. A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures. *Ultrasonics*, **39**: 487-494.
- Solodov I Y, Krohn N, Busse G. 2002. CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*, **40**: 621-625.
- Solodov I Y. 1998. Ultrasonic of nonlinear contacts: propagation, reflection and NDE application. *Ultrasonics*, **36**: 383-390.
- Sonti V R, Kim S J, Jones J D. 1995. Equivalent forces and wavenumber spectra of shaped piezoelectric actuators. *J. Sound Vib.*, **187**: 111-131.
- Srivastava A, Scalea F L di. 2009. On the existence of antisymmetric or symmetric Lamb waves at nonlinear higher harmonics. *J. Sound Vib.*, **323**: 932-943.
- Su Z, Ye L. 2005. Lamb wave propagation-based damage identification for quasi-isotropic cf/ep composite laminates using artificial neural algorithm: part i-methodology and database development. *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, **16**: 97-111.
- Su Z, Ye L. 2009. Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications. Springer, 2009.
- Van Den Abeele K, De Visscher J. 2000. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. *Cement Concrete Res.*, **30**: 1453-1464.
- Van Den Abeele KEA., Sutin A, Carmeliet J, Johnson P A. 2001. Micro-damage diagnostics using nonlinear

- elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT & E Int.*, **34**: 239-248.
- Viktorov I A. 1965. Ultrasonic Lamb wave (Review). *Ultrasonics*, **11**: 1.
- Vishnuvardhan J, Krishnamurthy C V, Balasubramaniam K, 2007. Genetic algorithm based reconstruction of the elastic moduli of orthotropic plates using an ultrasonic guided wave single-transmitter-multiple-receiver SHM array. *Smart Mater. Struct.*, **16**: 1639-1650.
- Wan X, Zhang Q, Xu G, Tse P W. 2014. Numerical simulation of nonlinear Lamb waves used in a thin plate for detecting buried micro-cracks. *Sensors*, **14**: 8528-8546.
- Wang D, Ye L, Su Z, Lu Y, Li F, Meng G. 2010. Probabilistic damage identification based on correlation analysis using guided wave signals in aluminum plates. *Struct. Health. Monit.*, **9**: 133-144.
- Worden K, Tomlinson G R. 2001. Nonlinearity in structural dynamics: Detection, Identification and Modelling. Bristol: IOP Publishing Ltd.
- Worlton D C. 1961. Experimental confirmation of Lamb waves at Megacycle Frequencies. *J. Appl. Phys.*, **32**: 967-971.
- Wright W, Hutchins D, Jansen D, Schindel D. 1997. Air-coupled lamb wave tomography. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **44**: 53-59.
- Xiang Y, Deng M, Xuan F-Z, Liu C-J. 2011. Experimental study of thermal degradation in ferritic Cr-Ni alloy steel plates using nonlinear Lamb waves. *NDT & E Int.*, **44**: 768-774.
- Zabolotskaya E A. 1992. Nonlinear propagation of plane and circular Rayleigh waves in isotropic solids. *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**: 2569-2575.
- Zhu W J, Deng M X, Xiang Y X, Xuan F Z, Liu C J. 2016. Second harmonic generation of Lamb wave in numerical perspective. *Chin. Phys. Lett.*, **33**: 104301.

(责任编辑: 戴兰宏)

Nonlinear Lamb waves in plate/shell structures

LIU Yaolu¹ HU Ning^{1,†} DENG Mingxi^{1,2,*}
ZHAO Youxuan¹ LI Weibin¹

¹ College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Logistics Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China

Abstract Because the conventional linear ultrasonic testing is not suitable for the distributed minor material damage and the contact-type structure damage, nonlinear ultrasonic technique has attracted wide attention in recent years. It is well-known that ultrasonic waves propagate in plate and shell structures with Lamb wave modes. However, due to the complexity of Lamb wave propagation, the theoretical and experimental studies on nonlinear Lamb waves make progress slowly. According to the mechanism of generation, and the progresses of theoretical and experimental works about the nonlinear Lamb waves induced by the inherent material nonlinearity are summarized based on classical nonlinear theory, and the application of the second harmonic Lamb mode in damage evaluation of material is reviewed. The present research status of the nonlinear Lamb waves induced by the contact-type structure damage is also discussed based on contact acoustic nonlinearity. At last, the future research emphasis and development trend of nonlinear Lamb waves are presented and discussed.

Keywords nonlinear lamb waves, classical nonlinear theory, contact acoustic nonlinearity, material performance evaluation, microcrack detection

Received: 17 October 2016; accepted: 4 January 2017; online: 20 January 2017

† E-mail: ninghu@cqu.edu.cn

* E-mail: dengmx65@yahoo.com

Cite as: Liu Y L, Hu N, Deng M X, Zhao Y X, Li W B. Nonlinear Lamb waves in plate/shell structures.

Advances in Mechanics, 2017, 47: 201714

© 2017 *Advances in Mechanics*.



胡宁, 教授, 51 岁, 1991 年在重庆大学获得固体力学博士学位, 先后在南京航空航天大学、日本东北大学、清华大学、Johns Hopkins 大学、日本千叶大学、湖南大学等单位工作, 2013 年回国时任日本千叶大学人工系统科学专攻 (含机械、电子、医疗器械 3 个系) 的专攻长、机械系主任、教授。现任重庆大学航空航天学院院长、澳洲 QUT 兼职教授、南京航空航天大学客座教授、中国复合材料学会理事、日本复合材料学会评议员、重庆航空学会常务副理事长、国际智能结构委员会 (ICAST) 委员、世界华人计算力学协会常务理事等职。主要研究领域有: 固体力学; 金属与复合材料及其结构的力电热等性能评价、设计、反问题等; 结构与功能型工业与纳米复合材料制备与加工; 基于 Lamb 超声波的结构和材料无损检测和实时监控技术等。

目前担任 Scientific Reports (Nature 集团) 等 9 份国际杂志 (其中 6 份 SCI 杂志) 和 2 份中日杂志的副主编、牵头客座主编、编委等职。出版了英文书籍 2 部; 申报和获批日本、中国专利近 10 项; 发表中、日、英期刊论文 230 篇, 其中 SCI 论文 150 篇、被引用 3200 次、H-index=30、多篇 ESI 高被引论文作者、入选爱思唯尔中国学者高被引榜单 (材料力学, 2014, 2015)。曾在 40 多个国际、国内会议上做特邀、专题和大会报告等; 曾获得过国家基金委杰出青年基金 (B 类, 2007)、重庆市百人计划 (短期项目, 2007)、四川省百人计划 (短期项目, 2007)、国家千人计划特聘专家 (创新型, A 类, 2013) 等荣誉。

在中国和日本, 作为项目负责人和副主研获得的包括中国国家自然科学基金 (主研: 杰青 B 类、重点项目 1 项与面上项目 2 项)、中国 863 项目、中国科技部国际合作项目、日本国家科学基金、即日本文部省 JSPS (日本学术振兴会) 科研补助费 (S 级, A, B, C 级)、JST (日本科学技术振兴机构)、美国空军亚太地区研发机构、JAXA (日本宇宙航空研究开发机构)、东芝 (株)、新日铁化学 (株)、铃木汽车公司 (株) 等单位在内的各项科研经费超过 500 万美元。



邓明晰, 教授, 51 岁, 先后于四川大学、南京大学和同济大学获得理学学士、硕士和博士学位。现任中国声学学会常务理事、重庆市声学学会副理事长、教育部近代声学重点实验室 (南京大学) 学术委员。长期从事超声学和非线性声学的理论、实验及应用研究, 先后负责 7 项国家自然科学基金项目和 1 项教育部新世纪优秀人才支持计划项目, 在科学出版社出版学术专著《固体板中的非线性兰姆波》, 发表学术论文 180 余篇, 其中被 SCI 收录 60 余篇、被 EI 收录 90 余篇。在超声导波非线性研究方面取得一系列开创性成果, 发表的相关论文荣获中国声学学会会刊——《声学学报》年度最佳优秀论文奖, 以及第五届中国科协期刊优秀学术论文奖。作为项目负责人, 获得国家教育部自然科学奖二等奖 1 项 (2013)、重庆市自然科学奖二等奖 1 项 (2013)、重庆市科技进步奖三等奖 2 项 (2000, 2000); 作为项目主研人员, 获得国家科技进步奖二等奖 1 项 (2004)、上海市自然科学奖一等奖 1 项 (2015)、军队科技进步奖一等奖 1 项 (2000)。