



黏接界面性能劣化的非线性超声检测研究进展

李立¹, 焦敬品^{1*}, 高翔^{1*}, 贾召会², 吴斌¹, 何存富¹

1. 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041

* 联系人, E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn; gaixiang@bjut.edu.cn

2021-07-09 收稿, 2021-11-04 修回, 2021-11-09 接受, 2021-11-11 网络版发表

国家自然科学基金(11972053, 11772013, 12004018)资助

摘要 作为传统机械连接的重要补充形式, 黏接结构在工业领域应用广泛. 在外载及环境因素的综合作用下, 黏接界面的性能会出现劣化, 严重影响黏接结构的安全使用. 因此, 黏接界面性能检测一直是无损检测领域的热点和难点问题. 线性超声技术能有效实现黏接界面中分层、脱黏等损伤的检测, 但难以实现黏接界面早期劣化(如界面闭合缺陷、界面弱黏接等)的检测及定量评价, 而非线性超声技术可以克服传统线性超声技术在检测灵敏度方面的不足, 有望成为一种有效的黏接界面性能早期劣化的检测手段. 本文从理论模型和检测实验两方面对非线性超声技术在黏接界面性能检测与评价方面的研究进展进行了综述. 从界面的接触非线性和中间层的材料非线性角度出发, 介绍了界面非线性超声检测相关理论的简化模型, 如非线性弹簧模型、界面接触模型及考虑中间层厚度的接触模型等. 这些模型可用于描述超声波在弱黏接界面处产生的多种声学非线性效应, 如二次谐波产生、混频和非线性谐振等, 但需要进一步研究不同模型对超声波在弱黏接界面处非线性传播行为的描述能力. 同时, 介绍了非线性谐振、混频和二次谐波3种非线性技术在界面性能实验检测方面的研究进展. 最后, 对黏接界面性能劣化非线性超声检测技术的发展进行了展望.

关键词 黏接界面, 性能劣化, 非线性超声, 接触非线性, 材料非线性, 无损检测

作为传统机械连接的重要补充方式, 黏接结构具有重量轻、比模量高、应力分布均匀和减震性能优越等优点, 被广泛应用于航空航天、军工、建筑及机械制造等领域. 在长期使用过程中, 受温度、外载及环境因素的综合作用, 被黏接物与胶黏剂之间会产生交变应力和应变, 导致胶黏剂受损, 黏接界面力学性能下降. 由于界面的黏接强度直接决定了复合黏接结构的可靠性与安全性, 因此, 有效地检测或评估黏接界面的性能对于确保工业设备的安全服役、减少灾难性事故的发生至关重要. 由于工程应用的广泛性及对重大装备安全的极端重要性, 黏接界面性能检测一直是无损检测领域的热点和难点问题^[1,2].

由于超声波在结构中强大的传播能力及其对结构中不连续体的高敏感性, 超声波技术对黏接界面性能的检测具有很大的优势. 结构中传播的超声波会与界面发生复杂的相互作用, 产生丰富的物理现象. 基于此, 国内外学者在多层结构中超声波传播及与界面相互作用方面开展了大量的研究, 并将多种声学检测技术应用于界面特性的检测与评价. 根据检测机理, 这些检测方法可分为线性超声技术和非线性超声技术.

线性超声技术主要利用超声波传播过程产生的反射、散射、衰减等线性特性进行损伤检测. 线性超声检测中, 通常将固体与固体间的接触界面简化为弹簧模型, 利用弹簧的劲度系数表征界面特性^[3-5]. 将弹簧

引用格式: 李立, 焦敬品, 高翔, 等. 黏接界面性能劣化的非线性超声检测研究进展. 科学通报, 2022, 67: 621-629

Li L, Jiao J P, Gao X, et al. A review on nondestructive testing of bonding interface using nonlinear ultrasonic technique (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 621-629, doi: 10.1360/TB-2021-0677

模型中不同的法向劲度系数和切向劲度系数进行组合, 可以产生多种变形边界条件, 如完好黏接、完全脱黏、滑移界面、接触界面、弱黏接等. 基于弹簧模型, 常规线性超声能有效实现黏接界面状态处于分层、脱黏等损伤的判别, 但难以实现黏接界面早期劣化(如界面闭合缺陷、界面弱黏接等)的检测及定量评价^[6,7]. 非线性超声技术可以克服传统线性超声技术在检测灵敏度方面的不足^[8,9], 有望成为一种有效的黏接界面性能早期劣化的检测手段. 本文拟从理论模型和检测实验两方面对非线性超声技术在黏接界面性能检测与评价方面的研究进展进行综述.

1 接触界面非线性声学理论模型

为实现黏接界面早期损伤评价, 需要建立非线性声学参数与接触界面状态参量的关联关系. 为此, 国内外学者在接触界面非线性声学理论模型及数值分析方面开展了大量研究.

最常见的研究是将黏接层界面的非线性声学响应归结为由黏接层的非线性应力应变关系引起^[10-13]. 这类模型大多从黏接层边界的位移与应力关系出发, 演化出一系列接触界面非线性声学理论模型. 例如, Achenbach等人^[10]将黏接层简化为一个非线性弹簧界面, 提出利用界面刚度系数来描述黏接界面的非线性特性, 并推导了黏接界面的非线性声波传播方程. Pecorari^[11]考虑了黏接界面的法向和切向刚度系数, 推导了纵波、横波入射时黏接界面的二次谐波声场. Biwa和Ishii^[12]通过界面刚度系数的幂律公式, 推导了界面间隙与应力间的非线性关系; 在此基础上, 建立了界面黏接状态的分段刚度模型. 滕旭东^[13]将超声与黏接层的相互作用简化为等效的阻抗电路结构, 建立了系统的非线性振荡方程, 推导了系统非线性共振频率与高阶弹性劲度系数的函数关系. 以上研究通过引入位移或界面刚度的高阶项, 建立了黏接层应力及位移的非线性变化关系, 得到了接触界面的非线性声学响应.

当界面层厚度远小于声波波长时, 将黏接界面视作厚度可忽略的理想界面, 界面两侧基体结构间的接触为硬接触. 由于黏接层与基体间的弱黏接或硬接触以及黏接层中的微裂纹等接触界面的存在, 界面两侧边界条件不连续. 当声波穿过这类界面时, 这种边界条件不连续会对声波产生非线性调制作用, 由此导致的非线性效应称为接触非线性. Solodov^[14]将黏接界面看作硬接触, 研究了大振幅超声波入射到黏接界面时, 接

触界面产生的拍击效应以及缺陷局部共振现象. Richardson^[15]对超声波在单侧接触界面处传播的非线性效应进行了研究, 提出了超声波在接触界面的单边接触传播模型, 并推导出二维纵波传播的非线性波动方程. 基于该模型, Rudenko和Uv^[16]研究了接触条件改变时界面非线性刚度系数的变化, 建立了分布式微观接触模型. 肖齐等人^[17]对线性、指数和高斯3种界面模型下超声波的非线性响应进行了对比分析, 结果表明, 指数和高斯两种理论模型的预测结果与实验结果更为吻合. 在线性刚度界面假设下, Wu^[18]建立了超声波在闭合、部分分开与完全分开3种粗糙界面状态下的非线性传播模型. Jiao等人^[19]将承压粗糙界面等效为复合粗糙表面, 通过压力与间隙关系建立了超声波在承压粗糙接触界面的传播模型. 在准静态模型的基础上, 李海洋等人^[20]利用分段均匀概率函数描述粗糙界面的几何特性和劲度系数的非对称性, 建立了超声波在粗糙接触界面下的非线性传播模型. 在黏接界面为干摩擦的粗糙接触状态条件下, 以上模型通过对界面微观接触状态的统计分析, 获得了接触界面的非线性声学响应.

当考虑接触界面的滑动或局部滑动时, 界面处的摩擦与滞后特性可以作为新的非线性源而产生非线性声学响应. 例如, 在考虑接触面粗糙度以及摩擦和滞后效应的情况下, Delrue等人^[21]建立了接触界面非线性本构模型, 如图1所示. 该模型采用二次应力-位移关系描述界面间的拍击作用, 利用库仑摩擦定律对完全滑动情形下的摩擦作用进行描述, 并通过记忆图法(method of memory diagrams, MMD)将摩擦作用引入部分滑动接触界面中, 图1给出该模型中3种界面状态的具体描述.

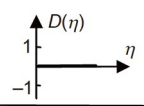
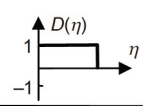
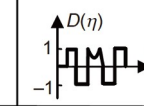
记忆图			
界面阶段	未滑动	部分滑动	完全滑动
判断准则	$a(t) < 0$	$a(t) \geq 0$ $ \tilde{b}(t-\Delta t) \geq \theta \mu a(t)$	$a(t) \geq 0$ $ \tilde{b}(t-\Delta t) < \theta \mu a(t)$
数学表达	$\tilde{b}(t) = 0$ $b_0(t) = b(t)$ $T(t) = N(t) = 0$	$\tilde{b}(t) = \pm \theta \mu a(t)$ $b_0(t) = b(t) - \tilde{b}(t)$ $T(t) = \pm \mu N(t)$	$b_0(t) = b_0(t-\Delta t)$ $\tilde{b}(t) = b(t) - b_0(t)$ $T(t) = \text{MMD}(\tilde{b}(t))$

图1 (网络版彩色)粗糙界面裂纹模型中3种可能的接触状态^[21]
Figure 1 (Color online) Three possible contact states in the model of cracks with rough surfaces^[21]

在考虑接触界面粗糙度及中间层厚度的情况下, Xiao等人^[22]提出了虚拟材料声学接触模型(图2)。该模型通过改变中间层的弹性模量、剪切模量、密度与泊松比等参量来调控接触界面的摩擦与滑移状态。在此基础上, 推导出了法向刚度和切向刚度与接触界面谐振频率的显式表达式^[23]。王汉卿等人^[24]分别利用氢键模型与双线性模型描述接触界面的完好黏接状态和弱黏接状态, 将基体材料的迟滞摩擦力等效为黏性阻尼力, 建立了含有非线性阻尼的碰撞振子模型, 用于模拟超声波在黏接界面处的非线性传播。以上模型充分考虑了接触界面的不同状态, 分别建立了接触界面处于硬接触干摩擦、部分滑移摩擦滞后等状态时界面位移的变化曲线, 对黏接界面的“拍手”效应和摩擦滞后引起的接触非线性进行了理论建模与仿真。

当黏接层为非理想介质, 且超声波波长相对黏接层厚度并非足够大时, 黏接层的厚度将无法被忽略, 此时黏接层本身的材料特性也会导致声学非线性的产生。声波在界面层传播过程中, 由于黏接层材料性质退化而产生的非线性声学响应属于材料非线性。在界面层与基体刚性连接的假设条件下, 钱祖文^[25]、Zhou和Shui^[26]利用微扰法对黏接结构的非线性波动方程进行求解, 获得了黏接结构的二次谐波声场分布。在完美黏接情况下, 邓明晰^[27,28]采用模式展开法, 对黏接结构中兰姆波二次谐波的发生进行了理论分析。Younghouse^[29]推导了具有体弹性非线性黏接层中的二次谐波声场, 并分析了黏接层刚度系数对基波和二次谐波幅值的影响。江念等人^[30]通过非线性黏弹性本构模型与氢键模型, 推导并分析了二次谐波非线性系数与黏接力之间的关系。上述研究将黏接结构损伤归结为黏接层材料三阶弹性常数的变化, 通过三阶弹性常数引入二次谐波声场, 是一种常用的黏接层超声非线性二次谐波检测的分析模型。

随着研究的深入展开, 国内外学者在黏接界面理论分析中同时考虑了界面的接触非线性与黏接层的材料非线性。例如, 邓明晰等人^[31]建立了黏接层的非线性弹簧模型, 同时考虑界面刚度变化引起的非线性应力波和界面层中传播产生的二次谐波, 研究工作为利用非线性声学参量对黏接界面进行性能评价奠定了理论依据。An等人^[32]给出了平面声波垂直及斜入射情况下黏接结构非线性弹簧模型的表达式, 得到了不同声波入射下超声波声场的分布。除此之外, 国内外学者也开展了类似的非线性弹簧模型相关的理论研究, 证明了其黏接结构中体波及导波二次谐波声场描述的有效性^[33-39]。

与上述研究类似, 国内外学者开展了黏接界面混频非线性检测相关理论的研究^[40-44]。例如, Rose等人^[42]建立了两列非共线超声波在接触界面处的混频作用理论模型, 其接触面为受非线性力作用的粗糙表面, 法向响应包含二阶非线性项, 而切向响应为线性。在对散射场关于接触界面进行对称分解的基础上, 利用微扰法对解耦的控制方程进行求解, 得到了两列入射超声波在界面处产生的线性响应和混频响应。显然, 界面处产生的混频波与因材料非线性引起的体波混频存在明显的不同, 界面处产生的混频波会同时向前和向后两个方向传播, 而材料非线性引起的混频只沿单一向前或向后传播。在界面接触非线性模型的基础上, Zhang等人^[43]建立了考虑中间薄层非线性效应的弱黏接界面分析模型, 该模型实际可由传统界面接触刚度模型通过准静态近似条件下中间层等效界面刚度推演出来, 如图3所示。数值仿真结果表明, 两种模型均可用于对两列非共线横波在弱黏接界面产生的透射和反射混频波的预测。

综上所述, 从界面的接触非线性和中间层的材料非线性出发, 国内外学者建立了多种黏接界面非线性

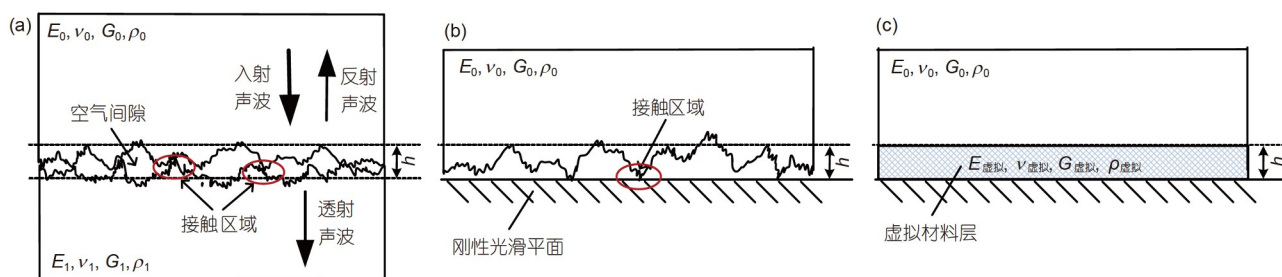


图2 (网络版彩色)粗糙界面接触模型示意图^[23]。(a) 超声反射; (b) 等效粗糙界面接触模型; (c) 薄层虚拟材料模型

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the rough interface contact model^[23]. (a) Ultrasonic reflection; (b) equivalent rough interface contact model; (c) thin layer of the virtual material model

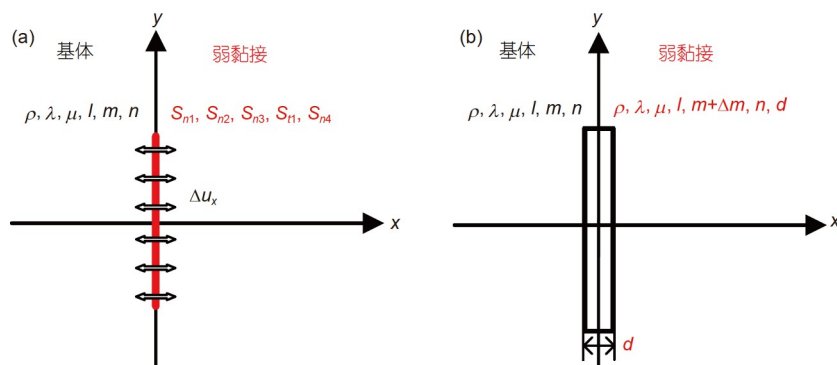


图3 (网络版彩色)两种非完好接触界面模型^[43]. (a) 无限薄界面刚度模型; (b) 薄中间层模型

Figure 3 (Color online) Schematic representations of the two imperfect interface models^[43]. (a) The infinitesimally thin finite interfacial compliance model; (b) the thin interphase layer model

超声检测模型, 如非线性弹簧模型、界面接触模型及考虑中间层厚度的接触模型等. 这些模型可用于超声波在弱黏接界面处产生的多种非线性效应(如二次谐波产生、混频及非线性谐振)的描述, 但不同模型对超声波在弱黏接界面处非线性传播行为的表征能力有待进一步研究.

2 黏接界面性能劣化非线性超声检测实验

非线性超声技术主要依据检测信号中非激励带宽内其他频率分量的变化实现结构微损伤的检测. 根据检测原理, 目前常用的非线性超声检测技术包括非线性谐振检测技术、混频检测技术和谐波检测技术等^[45-48].

与传统超声谐振检测中谐振频率偏移跟激励幅值无关的特点不同, 非线性超声谐振技术(nonlinear resonant ultrasound spectroscopy, NRUS)利用谐振频率随激励幅值的变化关系进行微损伤检测. 研究发现, 对于存在微缺陷的材料, 即使在低应变水平下(低至 10^{-8}), 随着激励水平的增加, 其弹性模量会发生非线性变化, 导致其谐振频率发生偏移, 且其偏移量与激励信号水平的变化量呈某种非线性关系; 而对于无损伤结构, 这种现象并不明显. 由于对结构微损伤的高敏感性, 非线性超声谐振技术已被应用于复合材料、岩石及金属等多种材料的早期损伤检测^[49,50]. 针对传统超声谐振技术对黏接界面性能劣化不敏感的问题, 滕旭东^[51]开展了双层黏接铝板界面超声非线性谐振特性的实验研究, 结果发现, 不良黏接区的超声谐振频率偏移量明显大于完好黏接区的偏移量. 实验证实了黏接界面等效非线性振荡模型下谐振产生机制的有效性. 整体而言, 非线性超声谐振技术目前在黏接界面性能检测方面的研究还较为有限.

混频检测技术利用两列超声波与非线性源相互作用产生的混频分量进行微损伤检测. 混频技术因具有激励频率、模态及作用区域的灵活可选择性, 且可有效避免系统非线性的影响而备受关注^[52-54]. 近年来, 国内外学者对两列超声波与接触界面的混频非线性作用开展了大量的理论分析及检测实验研究. 例如, Alston等人^[55]将两列横波非共线混频作用产生的和频纵波用于两铝质试块承压界面接触状态的检测, 并利用不同混频作用角与频率比下的和频散射波幅值构造了两声波在试块和界面交汇区域的指纹图谱. 研究发现, 随界面压力的增加, 散射波幅值变大, 同时, 指纹图谱模式产生变化, 出现了双峰现象. Ju等人^[56]将横波与纵波共线混频作用产生的差频横波用于两铝试块黏接层热老化的检测. 结果表明, 随试件老化程度的增加, 线性反射系数几乎保持不变, 而归一化非线性参数对黏接层热老化的变化极为敏感, 更适合于黏接层热老化的表征. Escobar-Ruiz等人^[57]利用线性超声与非共线混频超声对钛合金扩散黏接界面进行了检测. 结果表明, 线性声学响应与混频非线性响应适合检测的界面黏接质量范围明显不同. 线性声学响应对黏接质量较差的界面变化更敏感, 其线性声学效应大于-30 dB; 而混频非线性声学响应对黏接质量较好的界面变化更敏感. 因此, 当线性声学响应小于-30 dB时, 应利用非线性声学技术对界面黏接质量进行检测.

在混频超声检测中, 为保证两列超声波同时汇聚在待检测区域, 需要对混频检测参数(如入射声波的频率比、方向及波形等)进行精确调控. 由于检测实验中超声波传播受实验条件的影响很大, 实际结构中声场分布与理论预测值有很大的差别, 影响混频检测结果.

在诸多非线性超声检测方法中, 谐波技术的应用

最为广泛。利用有限振幅声波在结构微损伤处产生的高次谐波,谐波技术可对黏接结构中黏接层厚度变化、脱黏、黏接强度变化以及疲劳寿命等进行表征^[58-60]。例如, Rothenfusser等人^[61]通过数值仿真与实验研究了黏接层声速和厚度对透射波二次谐波幅值的影响,结果表明,黏接层厚度和声速对二次谐波幅值有较大的影响。这些研究结果对黏接界面非线性超声检测与评价具有重要的实用意义,即利用非线性超声技术对黏接结构的黏接质量进行检测时,或需要保证胶层声速和厚度不变,或需考虑胶层声速和厚度变化对测量结果的影响。

基于谐波非线性检测技术,国内外学者对完好黏接及弱黏接等界面黏接状态开展了大量实验研究。例如, Yan等人^[62]通过实验研究了不同黏接界面(完好黏接、弱黏接)承压过程中二次谐波非线性系数的变化规律,结果表明,在界面承压较小的情况下,弱黏接试件的非线性系数远高于完整试件,但随着界面承压增加,弱黏接试件的非线性系数逐渐减小,并趋于某恒定值。因此,非线性技术对低压状态下弱黏接界面状态的变化更敏感。这与Biwa等人^[63]的研究结果一致。邓明晰^[64]开展了不同黏接状态的复合板材兰姆波二次谐波产生效应的实验研究,结果表明,基于提出的非线性兰姆波应力波因子,并结合二次谐波幅频曲线峰值对应频率,可有效地对板材黏接层性质进行表征。此外,敦怡等人^[65]对不同黏接状态的金属构件进行了谐波检测实验,研究发现,完全脱黏试件的非线性系数最大,弱黏接试件的非线性系数次之,完好黏接试件的非线性系数最小。此外, Kawashima等人^[66]和Wegner等人^[67]利用二次谐波对TiAl-钢弱黏接界面和硅晶片扩散黏接界面进行超声C扫描成像。结果表明,弱黏接区非线性系数明显高于完好黏接区。除上述研究之外,国内外诸多学者也开展了类似的界面黏接状态谐波检测实验研究,证明了谐波非线性技术对弱黏接界面的高敏感性^[68-70]。

基于多种方式构造了不同黏接强度的黏接构件,国内外学者将谐波检测技术应用于黏接界面的黏接强度评价。例如, Barnard等人^[71]尝试将二次谐波非线性超声技术应用于铜扩散黏接界面强度的检测,结果表明,二次谐波非线性系数随界面脱黏缺陷的减少而减小,但脱黏界面的非线性系数要高于完好黏接界面。Liu等人^[72]对不同固化条件下2024铝/环氧树脂胶黏接面的二次谐波非线性系数进行了测量。结果表明,最佳固化

条件下黏接面的黏接强度最大,但其非线性系数最小,而不充分固化条件下黏接面的黏接强度最小,但非线性系数最大。江念等人^[73]测量了不同配比下环氧树脂胶黏接试件的非线性系数,结果表明,界面黏接质量越差,非线性效应越明显,因此可将非线性效应程度作为评价复合结构黏接质量的特征参数。邓明晰^[74]对复合结构黏接界面固化过程的非线性应力波因子进行了测量,结果表明,应力波因子与黏接层固化时间呈单调变化关系,且不同固化阶段应力波因子呈现不同特性,证明了应力波因子用于复合结构界面黏接强度评价的可行性。Chen等人^[75]对施加不同拉伸时间的玻璃黏接界面进行了非线性超声检测,结果表明,非线性系数随界面拉伸时间的增加(即黏接质量的降低)而增加。在以上研究中,虽然黏接界面的黏接强度改变的具体方式不同,但得到的谐波非线性特征参数随黏接强度的变化规律一致,证明了谐波非线性技术对黏接强度评价的有效性。

在黏接界面疲劳损伤方面, Shui等人^[76,77]对铝合金黏接试件与镁合金黏接试件在高低温循环疲劳和冲击载荷作用下产生的疲劳损伤进行了二次谐波非线性检测实验。结果表明,在一定范围内,非线性系数随高低温循环疲劳和冲击载荷次数增加呈递增趋势,但非线性系数对高低温循环疲劳次数敏感的范围明显不同。分析认为,胶层三阶弹性常数的变化是造成高温循环疲劳时非线性系数变化的主要原因,而黏接界面拉伸刚度的变化是造成低温循环疲劳时非线性系数变化的主要原因。

综上所述,谐波检测技术被认为是可能解决多层黏接结构界面特性的定量检测方法。但如何将待检测对象(如弱黏接界面)产生的谐波与其他干扰源(如检测系统)产生的谐波区分开来,一直是困扰谐波检测技术的难题。

3 总结与展望

综上所述,非线性超声技术可以克服传统线性超声在灵敏度方面的不足,对于黏接界面性能变化较为敏感,能够用于黏接界面损伤或性能劣化的检测与评价。目前,对于黏接界面性能劣化的非线性超声表征问题,国内外研究者已经从理论模型建立、检测实验等方面开展了大量卓有成效的研究。在黏接界面非线性超声理论研究方面,主要是构建了非线性弹簧模型、界面接触模型及考虑中间层厚度的接触模型等,通过

这些模型建立了超声非线性参数与界面接触状态的关联关系。在实验研究方面,利用高次谐波产生、非线性超声谐振和超声混频等非线性效应,对多层黏接结构的黏接层厚度、脱黏、黏接强度以及疲劳等损伤进行了检测和评价,证实了非线性超声技术对黏接界面性能劣化检测与评价的有效性。然而,就目前的研究来看,将非线性超声技术应用于工程黏接结构件的检测中,还需要在以下几个方面开展深入研究。

(1) 理论研究方面。由于黏接界面结构的复杂性,黏接界面非线性超声理论模型中涉及了两大类非线性来源:边界条件(接触)非线性和材料非线性。由此,衍生出了非线性弹簧模型、界面接触模型及考虑中间层厚度的接触模型等。目前,这些模型对超声波在弱黏接界

面处非线性传播行为的表征能力还有待深入研究。

(2) 检测技术方面。检测实验获得的超声非线性不仅来自待检测试件本身,而且与检测系统、耦合条件等密切相关。因此,需要研究非线性超声检测技术的抗干扰技术,以最大限度地消除或抵消传感器耦合和检测系统引起的非线性。同时,非线性超声检测结果受检测条件影响较大,如超声波模态类型、频率、幅值等,因此,需要研究获得显著非线性效应的激发条件。

(3) 弱非线性信息的提取与表征方面。与线性响应相比,非线性现象属于弱效应。因此,需要发展有效的信号处理技术,以便从强噪声中提取出弱非线性信息。同时,需要研究不同非线性超声特征参数对黏接界面性能变化的敏感性。

参考文献

- He L L, Zhang C, Li Z H, et al. Coating quality nondestructive detection of metal materials using electromagnetic ultrasound (in Chinese). *Acta Acust*, 2021, 46: 292–300 [何龙龙, 张闯, 李泽欢, 等. 涂层厚度与粘接质量的电磁声谐振无损检测. *声学学报*, 2021, 46: 292–300]
- Castaings M. SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion. *Ultrasonics*, 2014, 54: 1760–1775
- Delsanto P P, Scalerandi M. A spring model for the simulation of the propagation of ultrasonic pulses through imperfect contact interfaces. *J Acoust Soc Am*, 1998, 104: 2584–2591
- Drinkwater B, Dwyer-Joyce R, Cawley P. A study of the transmission of ultrasound across solid-rubber interfaces. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101: 970–981
- Pecorari C, Mendelsohn D A, Adler L. Ultrasonic wave scattering from rough, imperfect interfaces. Part I. Stochastic interface models. *J Nondestruct Eval*, 1995, 14: 109–116
- Margetan F J, Thompson R B, Rose J H, et al. The interaction of ultrasound with imperfect interfaces: Experimental studies of model structures. *J Nondestruct Eval*, 1992, 11: 109–126
- Leiderman R, Junqueira B F, Castello D A, et al. Identifying the ultrasonic inspecting fields that most strongly interact with adhesive bonding defects. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2018, 40: 227–240
- 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]
- An Z W, Wang X M, Li M X, et al. Theoretical development of nonlinear spring models for the second harmonics on an interface between two solids. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 114302
- Achenbach J D, Parikh O K, Sotiropoulos D A. Nonlinear effects in the reflection from adhesive bonds. *NDT E Int*, 1992, 25: 3065–3072
- Pecorari C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact. *J Acoust Soc Am*, 2003, 113: 3065–3072
- Biwa S, Ishii Y. Analysis of acoustic harmonic generation in a solid with multiple nonlinear interfaces. *J Acoust Soc Am*, 2013, 134: 4104
- Teng X D. Nonlinear acoustic modeling of micro-defects in solid and its application in non-destructive evaluation (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2018 [滕旭东. 固体微结构缺陷的非线性声学建模及检测研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2018]
- Solodov I Y. Ultrasonics of non-linear contacts: Propagation, reflection and NDE-applications. *Ultrasonics*, 1998, 36: 383–390
- Richardson J M. Harmonic generation at an unbonded interface—I. Planar interface between semi-infinite elastic media. *Int J Eng Sci*, 1979, 17: 73–85
- Rudenko O V, Uv C A. Nonlinear acoustic properties of a rough surface contact and acoustiodiagnostics of a roughness height distribution. *Acoust Phys*, 1994, 40: 593–596
- Xiao Q, Wang J, Guo X S, et al. Nonlinear interaction between ultrasound and solid rough interface (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 094301 [肖齐, 王珺, 郭霞生, 等. 固体粗糙界面与超声的非线性相互作用研究. *物理学报*, 2013, 62: 094301]
- Wu P. Nonlinear interaction of ultrasound with an unbounded rough interface. In: *Proceedings of 2005 IEEE Ultrasonics Symposium*. New York:

- IEEE, 2005, 1-4: 289–292
- 19 Jiao J P, Liu W H, He C F, et al. Nonlinear acoustic interaction of contact interfaces. *Exp Mech*, 2014, 54: 63–68
- 20 Li H Y, An Z W, Lian G X, et al. A probability model for ultrasonic nonlinear effects of rough contact interface (in Chinese). *Acta Acust*, 2015, 40: 247–253 [李海洋, 安志武, 廉国选, 等. 粗糙接触界面超声非线性效应的概率模型. *声学学报*, 2015, 40: 247–253]
- 21 Delrue S, Aleshin V, Truyaert K, et al. Two dimensional modeling of elastic wave propagation in solids containing cracks with rough surfaces and friction—Part II: Numerical implementation. *Ultrasonics*, 2017, 82: 19–30
- 22 Xiao H, Sun Y, Xu J. Investigation into the normal contact stiffness of rough surface in line contact mixed elastohydrodynamic lubrication. *Tribol Trans*, 2018, 61: 742–753
- 23 Xiao H, Sun Y. An improved virtual material based acoustic model for contact stiffness measurement of rough interface using ultrasound technique. *Int J Solids Struct*, 2018, 155: 240–247
- 24 Wang H Q, Cheng L, Liao R J, et al. Nonlinear mechanical model of composite insulator interface and nondestructive testing method for weak bonding defects (in Chinese). *Proc Chin Soc Elect Eng*, 2019, 39: 895–905 [王汉卿, 成立, 廖瑞金, 等. 复合绝缘子交界面非线性力学模型及弱粘接缺陷无损检测方法. *中国电机工程学报*, 2019, 39: 895–905]
- 25 Qian Z W. *Nonlinear Acoustics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [钱祖文. 非线性声学. 北京: 科学出版社, 2009]
- 26 Zhou S, Shui Y. Nonlinear reflection of bulk acoustic waves at an interface. *J Appl Phys*, 1992, 72: 5070–5080
- 27 Deng M X. Modal expansion analyses of second-harmonics generation of the Lamb waves in layered structures (in Chinese). *Acta Acust*, 2005, 30: 132–142 [邓明晰. 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*, 2005, 30: 132–142]
- 28 Deng M X. Characterization of surface properties of layered structures using nonlinear Lamb wave approach (in Chinese). *Acta Aeron Astron Sin*, 2006, 27: 713–719 [邓明晰. 层状固体结构表面性质的非线性兰姆波定征方法. *航空学报*, 2006, 27: 713–719]
- 29 Younghouse S J. Irradiation of an elastic plate by a finite-amplitude sound beam with applications to nondestructive evaluation. Doctor Dissertation. Austin: The University of Texas, 2002
- 30 Jiang N. Research of signal processing method for nonlinear ultrasonic testing of adhesive strength between metal and nonmetal components (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanxi: North University of China, 2015 [江念. 金属非金属粘接强度非线性超声检测信号处理方法研究. 博士学位论文. 山西: 中北大学, 2015]
- 31 Deng M X, An Z W, Li M X. Nonlinear spring model of an adhesive interface under normal incidence of a longitudinal wave (in Chinese). *Tech Acoust*, 2009, 28: 25–27 [邓明晰, 安志武, 李明轩. 纵波垂直入射条件下粘接界面的非线性弹簧模型. *声学技术*, 2009, 28: 25–27]
- 32 An Z, Wang X, Deng M, et al. A nonlinear spring model for an interface between two solids. *Wave Motion*, 2013, 50: 295–309
- 33 Mori N, Matsuda N, Kusaka T. Effect of interfacial adhesion on the ultrasonic interaction with adhesive joints: A theoretical study using spring-type interfaces. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 3541–3550
- 34 Nam T, Lee T, Kim C, et al. Harmonic generation of an obliquely incident ultrasonic wave in solid-solid contact interfaces. *Ultrasonics*, 2012, 52: 778–783
- 35 Achenbach J D, Parikh O K. Ultrasonic analysis of nonlinear response and strength of adhesive bonds. *J Adhes Sci Technol*, 1991, 5: 601–618
- 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 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]
- 38 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
- 39 Ishii Y, Biwa S, Adachi T. Second-harmonic generation in a multilayered structure with nonlinear spring-type interfaces embedded between two semi-infinite media. *Wave Motion*, 2017, 76: 28–41
- 40 Blanloeuil P, Meziane A, Bacon C. 2D finite element modeling of the non-collinear mixing method for detection and characterization of closed cracks. *NDT E Int*, 2015, 76: 43–51
- 41 Blanloeuil P, Rose L R F, Veidt M, et al. Nonlinear mixing of non-collinear guided waves at a contact interface. *Ultrasonics*, 2021, 110: 106222
- 42 Rose L R F, Blanloeuil P, Veidt M, et al. Analytical and numerical modelling of non-collinear wave mixing at a contact interface. *J Sound Vib*, 2020, 468: 115078
- 43 Zhang Z, Nagy P B, Hassan W. Analytical and numerical modeling of non-collinear shear wave mixing at an imperfect interface. *Ultrasonics*, 2016, 65: 165–176
- 44 Blanloeuil P, Croxford A J, Meziane A. Application of the noncollinear mixing method to an interface of contact. In: 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. New York: American Institute of Physics, 2014. 623–630
- 45 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]
- 46 Li W, Xu Y, Hu N, et al. Numerical and experimental investigations on second-order combined harmonic generation of Lamb wave mixing. *AIP Adv*, 2020, 10: 045119
- 47 Sun M, Xiang Y X, Deng M X, et al. Experimental and numerical investigations of nonlinear interaction of counter-propagating Lamb waves. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 11902
- 48 Solodov I, Bai J, Busse G. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes. *J Appl Phys*, 2013, 113: 223512
- 49 Hettler J, Tabatabaeipour M, Delrue S, et al. Detection and characterization of local defect resonances arising from delaminations and flat bottom holes. *J Nondestruct Eval*, 2017, 36: 1
- 50 Solodov I. Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 252–262
- 51 Teng X D. Ultrasonic nonlinear resonant characteristic at adhesion interfaces of bonded two-layer plate (in Chinese). *Acta Acust*, 2020, 45: 929–935 [滕旭东. 双层粘接板界面的超声非线性谐振特性分析. 声学学报, 2020, 45: 929–935]
- 52 Ju T, Achenbach J D, Jacobs L J, et al. One-way mixing of collinear waves in an adhesive layer. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 110–120
- 53 Jiao J P, Lü H T, He C F, et al. Fatigue crack evaluation using the non-collinear wave mixing technique. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 065005
- 54 Jiao J P, Meng X J, He C F, et al. Nonlinear Lamb wave-mixing technique for micro-crack detection in plates. *NDT E Int*, 2017, 85: 63–71
- 55 Alston J, Croxford A, Potter J, et al. Nonlinear non-collinear ultrasonic detection and characterisation of kissing bonds. *NDT E Int*, 2018, 99: 105–116
- 56 Ju T, Achenbach J D, Jacobs L J, et al. Nondestructive evaluation of thermal aging of adhesive joints by using a nonlinear wave mixing technique. *NDT E Int*, 2019, 103: 62–67
- 57 Escobar-Ruiz E, Ruiz A, Hassan W, et al. Non-linear ultrasonic NDE of titanium diffusion bonds. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 187–195
- 58 Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing. *NDT E Int*, 2001, 34: 231–238
- 59 Li M X, Wang X M, An Z W. Ultrasonic testing and evaluation of bonding interface properties (in Chinese). *Appl Acoust*, 2013, 32: 190–198 [李明轩, 王小民, 安志武. 粘接界面特性的超声检测与评价. 应用声学, 2013, 32: 190–198]
- 60 Jhang K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review. *Int J Precis Eng Manuf*, 2009, 10: 123–135
- 61 Rothenfusser M, Mayr M, Baumann J. Acoustic nonlinearities in adhesive joints. *Ultrasonics*, 2000, 38: 322–326
- 62 Yan D, Drinkwater B W, Neild S A. Measurement of the ultrasonic nonlinearity of kissing bonds in adhesive joints. *NDT E Int*, 2009, 42: 459–466
- 63 Biwa S, Hiraiwa S, Matsumoto E. Experimental and theoretical study of harmonic generation at contacting interface. *Ultrasonics*, 2006, 44: 1319–1322
- 64 Deng M X. Characterization of adhesive joints of composite solid layers using a nonlinear Lamb wave approach (in Chinese). *Acta Acust*, 2005, 30: 542–551 [邓明晰. 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, 2005, 30: 542–551]
- 65 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]
- 66 Kawashima K, Murase M, Yamada R, et al. Nonlinear ultrasonic imaging of imperfectly bonded interfaces. *Ultrasonics*, 2006, 44: 1329–1333
- 67 Wegner A, Koka A, Janser K, et al. Assessment of the adhesion quality of fusion-welded silicon wafers with nonlinear ultrasound. *Ultrasonics*, 2000, 38: 316–321
- 68 Kim Y, Choi S, Jhang K Y, et al. Experimental verification of contact acoustic nonlinearity at rough contact interfaces. *Materials*, 2021, 14: 2988
- 69 Mori N, Biwa S, Kusaka T. Harmonic generation at a nonlinear imperfect joint of plates by the S0 Lamb wave incidence. *J Appl Mech*, 2019, 86: 1–40
- 70 Yuan M, Lee T, Kang T, et al. Absolute measurement of ultrasonic non-linearity parameter at contact interface. *Nondestruct Test Eval*, 2015, 30: 356–372
- 71 Barnard D J, Dace G E, Rehbein D K, et al. Acoustic harmonic generation at diffusion bonds. *J Nondestruct Eval*, 1997, 16: 77–89
- 72 Liu G, Qu J, Jacobs L J. Effects of cure state on the ultrasonic nonlinear parameter in adhesive joints. In: *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2000, 240: 83–94
- 73 Jiang N, Wang Z B, Jin Y, et al. Measurement of interface bond quality of composite structure using nonlinear ultrasound (in Chinese). *Acta Armament*, 2014, 35: 398–402 [江念, 王召巴, 金永, 等. 复合结构界面粘接质量的非线性超声检测. 兵工学报, 2014, 35: 398–402]
- 74 Deng M X. Nondestructive evaluation of adhesive strength of composite structures using an acousto-ultrasonic approach (in Chinese). *Appl Acoust*, 2005, 24: 292–299 [邓明晰. 复合结构界面粘接强度的声-超声评价研究. 应用声学, 2005, 24: 292–299]
- 75 Chen J, Zhang D, Mao Y, et al. Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface. *Ultrasonics*, 2006, 44: 1355–1358
- 76 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
- 77 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: 1–2

Summary for “黏接界面性能劣化的非线性超声检测研究进展”

A review on nondestructive testing of bonding interface using nonlinear ultrasonic technique

Li Li¹, Jingpin Jiao^{1*}, Xiang Gao^{1*}, Zhaohui Jia², Bin Wu¹ & Cunfu He¹

¹ Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

² Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co. Ltd, Beijing 100041, China

* Corresponding authors, E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn; gaoxiang@bjut.edu.cn

As an important complement to traditional mechanical connections, bonded structures are widely used in industry. Under the combined effect of external loads and environmental factors, the performance of the bonding interface will deteriorate, which seriously affects the safe use of bonding structures. Therefore, the performance evaluation of bonding interfaces has always been a hot and difficult issue in the field of non-destructive testing. Traditional linear ultrasonic technology can effectively detect damage such as delamination and debonding in the bonding interface, but it is difficult to detect and quantitatively evaluate the early degradation of the bonding interface (such as closed defects and weak bonding). However, the nonlinear ultrasonic technology can overcome the low sensitivity of the traditional linear ultrasonic technology and is expected to be an effective means for nondestructive testing of early deterioration of bonding interface performance. In this paper, we review the recent development of nonlinear ultrasonic technology for bonding interface detection from theoretical models and testing experiments. From the perspectives of contact nonlinearity of the interface and material nonlinearity of the interlayer, we introduce relevant theoretical models for nonlinear ultrasonic inspection of bonded interfaces, such as nonlinear spring model, interface contact model and contact model considering the thickness of the interlayer. These models can be used for the description of various acoustic nonlinear effects (such as second harmonic generation, wave mixing and nonlinear resonance) generated by ultrasonic waves at weak bonding interfaces, but the ability of different models to characterize the nonlinear propagation behavior of ultrasonic waves at weak bonding interfaces needs to be further investigated. Meanwhile, we review the progress of three nonlinear techniques of nonlinear ultrasonic resonance, wave mixing and second harmonic generation in the experimental testing of bonding interface properties. The nondestructive testing of bonding interface using nonlinear ultrasonic resonance technique remains relatively limited. Mixing technology is of great interest because of its flexibility and selectability of excitation frequency, mode and area of action, and its ability to effectively avoid the effects of system nonlinearity. Among the nonlinear ultrasonic methods, harmonic techniques are the most widely used, and have been used for damage detection and performance evaluation of bonding interfaces, such as bonding thickness measurement, debonding detection, bond strength and fatigue life evaluation. The harmonic technique is considered as a possible solution for the quantitative detection of the interface properties of multilayer bonded structures. However, how to distinguish the harmonics generated by weakly bonded interfaces from those generated by detection systems has been a challenge for its application. Finally, we provide an outlook for the development of nonlinear ultrasonic detection technology for early degradation of bonding interfaces.

bonding interface, performance degradation, nonlinear ultrasonic waves, contact nonlinearity, material nonlinearity, nondestructive testing

doi: [10.1360/TB-2021-0677](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0677)