

材料损伤的非线性超声评价研究进展

张剑锋, 轩福贞*, 项延训

华东理工大学机械与动力工程学院, 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237

* 联系人, E-mail: fzxuan@ecust.edu.cn

2015-09-30 收稿, 2015-11-09 修回, 2015-11-09 接受, 2016-02-03 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51325504)资助

摘要 非线性超声技术由于能够克服传统线性超声的不足, 对于微纳尺度缺陷(如位错、微裂纹等)较为敏感, 受到研究者的广泛关注. 本文介绍了非线性超声技术检测材料损伤的基本原理; 对传播过程中非线性超声波与材料微观结构相互作用的理论研究以及非线性超声技术检测、评估材料损伤的实验研究进展进行了综述; 最后基于非线性超声损伤检测研究的现状对该技术进一步发展进行了展望.

关键词 非线性超声, 材料损伤, 无损检测, 微观结构

工程材料在服役过程中由于受到应力和环境的作用, 不可避免会产生损伤. 特别是化工、核电、火电和航空航天等领域服役的材料, 由于长期在高温、高压、腐蚀等恶劣工况下运行, 极易发生疲劳、蠕变、腐蚀等损伤, 造成材料性能退化, 严重威胁工业设备的安全运行和人民生命财产安全. 因此, 有效地表征或评估材料损伤对于确保工业设备的安全服役、减少灾难性事故发生至关重要.

目前, 对材料损伤的表征或评估主要采用试样分析法和无损检测法. 试样分析法是指从工程构件上切取部分材料, 进行力学性能、化学成分等分析, 从而评估其损伤状态和剩余使用寿命. 无损检测法是指利用射线^[1,2]、磁粉^[3]、涡流^[4,5]、液体渗透^[6]以及超声^[4,7,8]等技术实现对工程材料缺陷、损伤状态的检测评估. 相对于试样分析法, 无损检测法更有利于实现对工业设备的大范围、快速检测, 因此, 近年来受到了人们的广泛关注.

传统的无损检测方法只能检测材料中的宏观缺陷, 如裂纹、夹杂、气孔等, 对于材料早期损伤阶段形成的微纳尺度缺陷并不敏感^[9](图1). 然而研究表

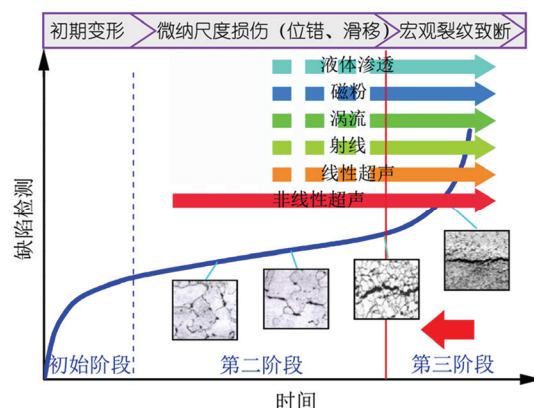


图1 (网络版彩色)材料不同损伤阶段的无损检测方法

Figure 1 (Color online) Various nondestructive testing methods of materials in different damage stages

明^[10], 对于设计良好的工程构件, 材料早期损伤(未形成宏观裂纹)占据了其寿命的绝大部分. 以疲劳损伤的工程构件为例, 其早期性能退化占据了整个疲劳寿命的80%~90%^[10~12]. 因此, 发展和完善材料早期损伤的无损检测评价方法对于实现材料服役损伤检测的全寿命覆盖, 保证工业设备的安全运行和及

引用格式: 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

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, doi: 10.1360/N972015-00962

时维护(或维修),从而降低维护(或维修)成本、延长使用寿命,具有重要意义。

研究表明^[12,13],非线性超声能够克服传统无损检测方法的不足,有效表征材料微观结构的变化,如位错演化、微裂纹萌生等,有望成为一种有效的材料损伤检测手段。本文拟从理论研究和实验研究两方面对非线性超声技术检测、评价材料损伤的研究进展进行综述。

1 非线性超声评价材料损伤的基本原理

由于晶体结构、晶体缺陷或其他微缺陷的存在,固体材料一般存在非线性的特征^[14-17]。传统线性超声波在固体中的传播亦存在非线性效应,但是这种非线性效应极其微弱,不足以从超声信号上反映出来;同时,传统线性超声检测也不关注此类非线性信号。然而,大幅值高能超声输入固体介质当中时,其传播能够呈现出较强的非线性效应,引起传播中超声波的“扭曲”和畸变,从而导致高次谐波的形成^[15,18]。这种非线性信号其实包含了材料微缺陷和材料属性等传统线性超声波无法检测到的信息。

下面以一维纵波为例,简单描述固体中非线性超声波的形成。一般情况下,考虑三阶精度,固体介质非线性应力应变关系可描述如下:

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 + \frac{1}{2}\beta\varepsilon \right), \quad (1)$$

式中, σ 为应力, ε 为应变, E 是杨氏模量, β 为二阶非线性系数。由上式可知,固体介质中质点在 x 方向上的运动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (2)$$

式中, ρ 为材料密度, x 是超声波的传播距离, u 为 x 方向的位移, t 为传播时间。假设一列沿 x 轴方向传播的压缩纵波进入上述固体介质中,结合(1)式,可以得到该纵波的波动方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right). \quad (3)$$

当进入固体介质的超声波为一单频正弦波,即 $u = A_1 \sin \omega t$ (其中, A_1 为基频波幅值, ω 是角速度),忽略声衰减,结合(2), (3)式,采用近似迭代法。可以得到固体介质中超声波的表达式^[15]:

$$u(x, t) = A_1 \sin(kx - \omega t) - \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x \cos 2(kx - \omega t) + \dots, \quad (4)$$

式中, k 为波数。从(4)式,可以看出,二次谐波幅值为

$$A_2 = \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x. \quad (5)$$

对(5)式进行变换可得二阶超声非线性参量

$$\beta = \frac{8}{k^2 x} \frac{A_2}{A_1^2}. \quad (6)$$

由(6)式可知, β 可由基频波幅值和二次谐波幅值计算得到。通过 β 可以对于材料中的损伤和微缺陷等进行评价。

2 非线性超声评价材料损伤的理论研究进展

由固体中的非线性超声波动方程(3)可知,超声非线性主要来自材料的非线性应力应变关系。对于大多数金属材料,其非线性的应力应变关系主要源于晶格和位错。在金属变形过程中,由晶格导致的超声非线性变化通常并不明显,超声非线性的主要变化来自位错^[15,19]。目前,关于位错超声非线性理论模型主要从以下三个方面来推导演绎。

2.1 位错弦相关超声非线性理论

(i) Hikata位错弦模型。1956年,Granatot等人^[20]提出位错弦钉扎理论以阐述金属材料中声速变化与声衰减的机理。1965年,Suzuki和Hikata等人^[14,15]在位错弦钉扎理论的基础上,进一步发展,考虑位错弦能量的高阶表达,提出了超声非线性位错弦模型(Hikata位错弦模型)。

如图2所示,假设在各向同性晶体中的某一滑移面上存在一个刃型位错,且该刃型位错被距离为 $2L$ 的两点钉扎住。当一个较小的纵向应力 σ 施加在这个晶体上,产生的沿滑移方向剪切应力为 $\tau = R\sigma$ 时,那么该刃型位错在剪切应力的作用下将会弓出(R 为切向分解因子,即Schmid因子)。如果剪切应力 τ 足够小,弓出的位错线接近于一段半径为 r 的圆弧。假定材料当中位错密度足够低以至于可以忽略位错之间的相互作用,作用于位错弦上的张力 T 为 $\mu b^2/2$ 。将位错弦弓出面积表达式进行级数展开,可以得到与位错相关的应力应变关系式,又因晶格应力应变关

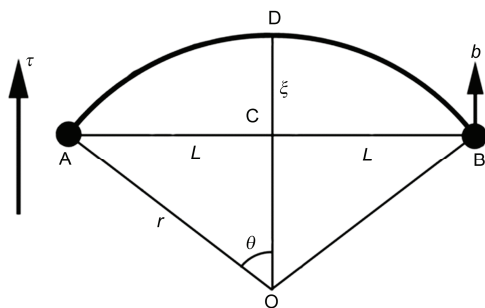
图2 位错弦受力弓出示意图^[15]

Figure 2 Schematic representation of a bowed-out dislocation by an applied stress^[15]

系已知, 因此, 晶体中总的纵向应力应变关系为

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega \Lambda L^2 R}{\mu} \right) \cdot \sigma + \frac{E_2}{E_1^3} \cdot \sigma^2 + \frac{4}{5} \frac{\Omega \Lambda L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \cdot \sigma^3 \dots, \quad (7)$$

式中, E_1 和 E_2 为二阶和三阶弹性模量, μ 为剪切模量, b 为柏氏矢量, Λ 是位错密度, Ω 为剪切应变转换为纵向应变的转换因子。

此时, 在上述晶体中引入一幅值足够大的平面纵波, 其传播方向与纵向应力方向相同。由纵波引起的叠加至纵向应力 σ 的扰动应力 $\Delta\sigma$ 会导致位错进一步移动, 从而产生一个附加应变。根据这种附加应力应变关系, 可以得到总的超声非线性参量 β 的表达式为

$$\beta = \frac{E_2}{E_1} + \frac{24\Omega\Lambda L^4 R^3 E_1^2}{5\mu^3 b^2} \sigma, \quad (8)$$

式中, 由晶格引起的超声非线性参量为 $\beta_l = E_2/E_1$, 由位错产生的超声非线性参量为

$$\beta_d = \frac{24}{5} \frac{\Omega\Lambda L^4 R^3 E_1^2}{\mu^3 b^2} \sigma. \quad (9)$$

(ii) 改进的位错弦模型. Hikata位错弦模型作为解释超声非线性形成的理论被广泛使用, 得到了许多研究者的认同, 但它仍然存在一定的局限性。首先, Hikata位错弦模型是基于纯刃型位错提出的, 而实际上位错几乎不会以纯刃型位错或螺型位错存在, 而是这两者的混合物; 第二, Hikata位错弦模型将弓出位错弦上的位错线性能视为常量, 不能真实反映应力作用下位错弦位错线性能分布。Cash和Cai^[21]利用位错动态模拟(dislocation dynamics simulations)方法计算得到了不同泊松比情况下位错的超声非线性

性参量, 结果表明: 当泊松比小于0.2时, Hikata位错弦模型能够较为有效地预测纯刃型位错和纯螺型位错引起的超声非线性变化; 泊松比大于0.2时, Hikata位错弦模型计算结果与位错动态模拟结果存在较大差异。Cash和Cai^[21]因此基于刃型位错和螺型位错弓出时位错弦平衡状态的差异, 推导出一个改进的位错弦模型(Cash位错弦模型)。但是, 对于许多金属材料, 根据Cash位错弦模型计算出的刃型位错超声非线性参量为负数, 到目前为止, 尚未有实验数据能够支撑这一结果。Chen和Qu^[22]采用类似方法也推导得到了一个改进的超声非线性位错弦模型, 并且利用分子动态模拟(molecular dynamic simulations)对该模型的有效性进行了验证。Zhang和Xuan^[23]考虑位错类型对超声非线性参量的影响, 推导得到了混合位错超声非线性参量的解析解:

$$\beta = \frac{A_2^e}{A_2^e} + \frac{256}{1215} \frac{\Omega \Lambda R^3 L^4 A_2^{e2}}{\mu^3 b^2} (1-\nu)^3 \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{3} \nu f_e + \frac{1}{3} \nu f_s \right)^{-3} \sigma, \quad (10)$$

式中, A_2^e 和 A_3^e 分别为二阶和三阶弹性模量, f_e 和 f_s 分别是刃型位错和螺型位错比例分数。基于上述超声非线性参量的解析解, Zhang等人^[23,24]认为, 相同情况下, 刃型位错的超声非线性响应要高于螺型位错。Zhang等人^[23,24]还将该模型应用于304不锈钢冷轧变形过程中的超声非线性参量理论预测, 结果表明理论计算值与实际测量值吻合较好, 且理论预测效果优于Hikata位错弦模型和Cash位错弦模型。

(iii) 位错与析出物相互作用模型. 固溶强化材料经历不同热处理条件、热损伤或蠕变损伤之后, 基体与析出物之间可能存在共格应变、准共格应变以及非共格应变3种状态。共格应变是指基体与析出物界面质点为同时处于基体与析出物两相的点阵上时所发生的点阵扭曲。在共格应变状态下, 位错与析出物之间存在较强的作用力(图3), 当析出物进一步长大后, 共格应变状态逐渐消失, 变为准共格应变或非共格应变。在准共格应变状态下, 位错与析出物之间相互作用力较弱(图4)。这种不同应变状态下析出物周围的局部应力场的不同, 使得位错与超声波之间的相互作用存在差异, 从而产生不同的超声非线性。

对于这种局部应力场的差异, Hikata位错弦模型并不能有效描述。因此, Cantrell和Yost^[27]以共格应变状态下圆球形析出相为例, 对Hikata等人经典位错弦理论模型中的应力项进行了修正, 提出了位错-析出

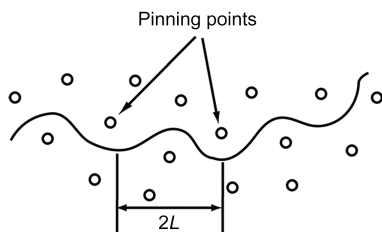


图3 共格应变状态下, 位错弦的弓出示意图^[25]

Figure 3 Schematic representation of a bowed-out dislocation under the coherency strain state^[25]

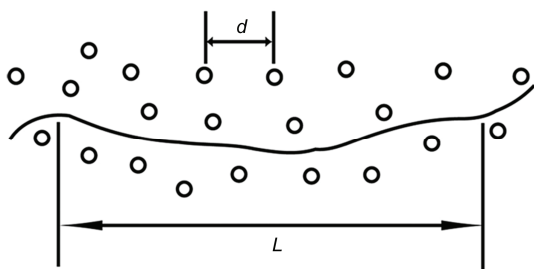


图4 准共格应变状态下, 位错弦的弓出示意图^[26]

Figure 4 Schematic representation of a bowed-out dislocation under the semicoherency strain state^[26]

物相互作用的超声非线性共格应变模型. 假定固有半径为 $r_1(1+\delta)$ 的球形析出相嵌入弹性基体中半径为 r_1 的球形空洞内, δ 是析出相和基体之间的错配因子, 析出相和基体有相同的剪切模量 μ 及泊松比 ν . 那么, 对于与析出相距离为 r 的位错, 其受到的径向应力可以表示为^[27]

$$\sigma = \frac{4\mu|\delta|r_1^3}{r^3}. \quad (11)$$

将(11)式代入(9)式中可得共格应变状态下, 位错引起的超声非线性变化量^[27]:

$$\Delta\beta = \frac{154\Omega\Lambda LR^3 C_{11}^2}{\mu^2 b^2} |\delta| r_1^3. \quad (12)$$

针对准共格应变状态下, 位错与析出相的“弱”作用力情况, Mondal等人^[28]提出了位错-析出物相互作用的准共格应变模型. 如图4所示, d 为析出相之间的距离, n 个析出相作用在位错上的平均应力为

$$\sigma = \frac{2\sqrt{n}}{\pi} \frac{32\mu|\delta|r_1^3}{d^3}. \quad (13)$$

代入(9)式, 可得相应材料中位错引起的非线性参量变化^[28]:

$$\Delta\beta = \frac{1536\Omega\Lambda L^4 R^3 C_{11}^2 |\delta| r_1^3 \sqrt{n}}{5\pi\mu^3 b^2 d^3}. \quad (14)$$

Xiang等人^[25,26]将上述共格应变模型和准共格应变模型中的超声非线性参量表达式代入超声非线性Lamb波的波动方程, 得到了这两种应变状态下超声非线性Lamb波非线性参量表达式.

2.2 位错偶超声非线性相关理论

相互平行、符号相异且存在相互作用的两个相邻刃型位错, 称之为位错偶(dislocation dipoles), 如图5所示. 研究表明^[19], 循环载荷引起的位错增殖、缠绕和移动, 能够促使金属材料中位错偶的形成. 在位错偶中, 两个刃型位错之间的距离通常较小, 会产生相互作用力, 这种作用力使得它们能够保持一个相对稳定的位错形态. 1994年, Cantrell和Yost^[19]考虑位错偶场与超声扰动应力场的相互作用, 提出了位错偶超声非线性模型(Cantrell位错偶模型). 该模型中材料超声非线性参量的表达式为

$$\beta = -\frac{A_3^H}{A_2^H} + \frac{16\pi^2\Omega R^2(1-\nu)^2(A_2^H)^2}{G^2 b} \Lambda h^3, \quad (15)$$

式中, A_2^H 和 A_3^H 分别为二阶和三阶弹性模量, Ω 表示剪切应变转换为纵向应变的转换因子, R 切向分解因子, G 为剪切模量, b 为柏氏矢量, ν 是泊松比, Λ 为位错密度, h 是位错偶高度. (15)式中, 右边第一项为晶格产生的超声非线性, 第二项为位错偶产生的超声非线性. Canrell位错偶模型与Hikata位错弦模型中的晶格超声非线性项基本相同, 主要差异在于两个模型对位错产生超声非线性描述: Hikata位错弦模型中超声非线性主要与位错密度、位错弦长度、应力大小

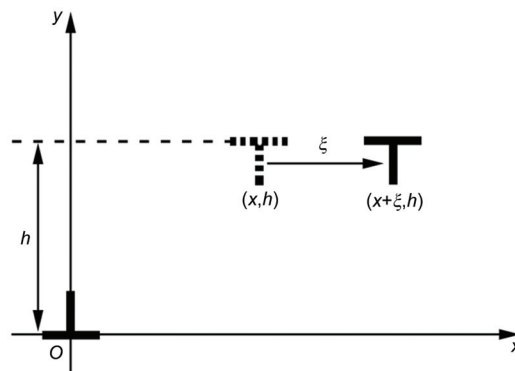


图5 位错偶中两个刃型位错之间的相互作用

Figure 5 Interaction between two edge dislocations in a dipole

有关,而Cantrell和Yost^[19]的位错偶模型超声非线性的大小主要取决于位错密度和位错偶高度,与应力无关.这种超声非线性的应力无关性也被Cantrell等人认为是该模型最显著的特点之一,然而,这仍然存在一定争议.

Cash和Cai^[29]利用位错动态模拟对位错偶超声非线性的研究表明,位错偶产生的超声非线性是应力相关的,且随着作用在位错偶上的应力增加,超声非线性也增大.因此,Cash和Cai^[29]建立了应力相关的位错偶超声非线性模型.但是,Cash等人提出的模型在不考虑应力作用时,与经典的Cantrell位错偶模型并不相同.Zhang和Xuan^[30]进一步完善了Cash等人的工作,得到了应力相关的位错偶超声非线性模型表达式:

$$\beta = -\frac{A_3^H}{A_2^H} + \frac{16\pi^2\Omega\Lambda h^3 R^2(1-\nu)^2(A_2^H)^2}{\mu^2 b} + \frac{384\pi^3\Omega\Lambda h^4 R^3(1-\nu)^3(A_2^H)^2}{\mu^3 b^2}\sigma, \quad (16)$$

式中,右边第一项为晶格产生的超声非线性参量,第二项和第三项是位错偶引起的超声非线性参量,其中,第二项与应力无关,而第三项与应力相关.如果不考虑应力对位错偶超声非线性的影响,方程(16)中的第三项消失,这时超声非线性参量的表达式与Cantrell位错偶模型相同^[19].

此外,Cantrell^[11,31,32]认为不论是平面滑移还是波滑移金属材料中疲劳引起的微观结构(如位错脉络结构(veins),驻留滑移带(persistent slip bands)等)均可以看作是由位错单极子(dislocation monopoles)和位错偶极子(dislocation dipoles)组成,可以通过计算位错单极子和位错偶极子的超声非线性参量来得到相应材料中总的超声非线性参量.对于波滑移金属中的超声非线性参量可通过下式计算得到^[11]:

$$\beta = \frac{\beta^e + f^{mp}\beta^{mp} + f^{dp}\beta^{dp}}{[1 + f^{mp}\Gamma^{mp} + f^{dp}\Gamma^{dp}]^2}, \quad (17)$$

式中, β^e 为弹性超声非线性参量, β^{mp} 和 β^{dp} 分别是位错单极子和位错偶极子超声非线性参量, f^{mp} 和 f^{dp} 分别是位错单极子和位错偶极子体积分数, Γ^{mp} 和 Γ^{dp} 是与微观结构相关的常数.

2.3 塑性相关的超声非线性理论

利用位错弦和位错偶相关的超声非线性理论计

算材料中的超声非线性参量时,必须基于详细的位错结构参数,而通常这些位错结构参数并不容易获取,需要依赖于复杂的微观结构表征手段.因此,Kim等人^[33]考虑变形状态对于超声波动方程的影响,引入名义弹性常数,建立了基于累积塑性应变的超声非线性模型.

最近,Cantrell和Yost^[34]将其推导的基于位错的超非线性模型与Kim等人^[33]提出的累积塑性应变超声非线性模型应用于预测单晶铜疲劳过程中的超声非线性参量演化,并将得到的结果与实验测量数据进行比较.结果表明,基于位错的超声非线性模型预测效果较好,而累积塑性应变超声非线性模型理论预测结果与实验测量结果差异较大.Cantrell等人^[34]认为累积塑性应变超声非线性模型预测效果较差的主要原因有:Kim等人推导得到超声非线性参量表达式过度简化,以至于超声非线性参量最终几乎只与三阶弹性常数有关;另外,疲劳过程中累积塑性应变包含两部分位错的作用,即不可恢复位错和可恢复位错,而其中可恢复位错通常不会产生疲劳损伤,这种可恢复位错的形成与加载条件极为相关.因此,尽管塑性变形与位错演化密切相关,但是塑性应变与位错密度等参量的关系可能因材料、加载类型而异,这使得关联塑性变形与超声非线性参量的难度进一步加大,仍需要继续研究探索.

3 非线性超声评价材料损伤的实验研究

目前,非线性超声波激发方式主要有以下几种^[35-37]:有限幅度法(finite-amplitude method)、混合频率响应法(mixed frequency response)、共振频率偏移法(shift of resonance frequency)、次谐波技术(sub harmonic).其中,有限振幅法激发相对简便、技术较为成熟,应用最多,其典型的检测装置示意图如图6所示.基于有限振幅法,研究者发展出了不同波型的非线性超声检测技术,如纵波^[38-40]、瑞利表面波^[41,42]、Lamb波^[43-45]等.按照损伤类型,非线性超声检测相关研究工作可以分为以下几类:拉伸(或压缩)塑性损伤、疲劳损伤、热损伤、蠕变损伤、界面黏接情况以及其他模式的损伤.

3.1 拉伸(或压缩)塑性损伤评价

拉伸、压缩塑性损伤是指材料在承受超过弹性极限的拉伸或压缩应力时产生塑性变形所引起的损伤.

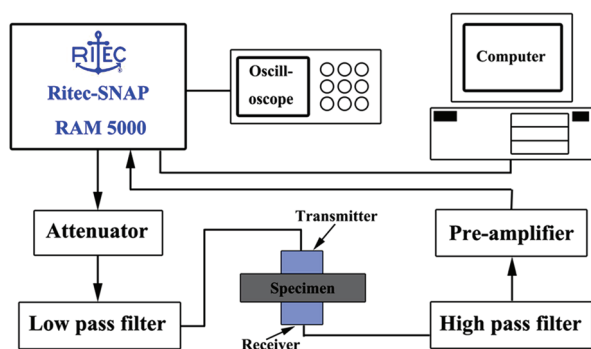


图6 (网络版彩色)典型非线性纵波实验测量装置示意图

Figure 6 (Color online) Schematic of typical experimental set-up for nonlinear longitudinal wave measurement

Hikata等人^[15]研究了单轴拉伸和压缩塑性变形后单晶铝和多晶铝的超声非线性现象,发现变形后单晶铝的超声二次谐波幅值对于施加应力(低于弹性极限)更加敏感,而多晶铝的超声二次谐波幅值几乎与施加应力无关。Jhang和Kim^[46]在结构钢SS41和SS45中观察到超声非线性参量随着拉伸应力的增加而显著增大,特别是当拉伸应力大于屈服强度以后。Herrman等人^[47]和Kim等人^[48]分别用非线性瑞利表面波和非线性纵波检测了镍基合金中的塑性损伤,发现两种波型检测结果相似:在初始塑性变形阶段,瑞利表面波超声非线性参量和纵波超声非线性参量显著增加,但是当塑性变形达到一定程度后,二者随塑性变形增加的速率均有所下降。Bermes等人^[44,49,50]和Pruell等人^[45,51,52]证实了当非线性Lamb波满足激发条件时,即相速度匹配和群速度匹配,可以被用于检测铝合金薄板的拉伸塑性损伤;Lamb波超声非线性参量随着塑性应变的增加而增大。Rao等人^[38]利用超声非线性纵波和瑞利表面波技术对不同残余拉伸塑性变形铝合金AA7175-T7351进行测量,结果表明两种波形的超声非线性参量随残余应变增加而增加,且增加速率呈两个阶段:在塑性变形较小时,超声非线性平稳增加;当塑性变形达到一定程度后,超声非线性快速增加。对变形后铝合金的X射线衍射、金相显微观察分析表明这种非线性的超声非线性响应与位错密度的增加以及拉伸塑性变形后期位错胞结构的形成有关。Kim和Jhang^[53]开发了一种窄带激光激发非线性超声表面波的方法,并成功将该方法用于表征铝合金拉伸塑性损伤。Shui等人^[54,55]和吴斌等人^[56]采用非线性超声在线和离线两种方法检测不同拉伸应力作用后的AZ31镁铝合金,观察到超声非线性参

量在拉伸应力大于屈服强度后显著增长。Viswanath等人^[39]和Zhang等人^[57]尝试将304不锈钢压缩或拉伸变形后材料屈服强度与超声非线性参量变化进行关联,结果表明随着塑性应变的增加,材料屈服强度和超声非线性均单调上升。对不同变形304不锈钢试样的微观结构分析表明,变形过程中超声非线性的增加与位错密度增加以及马氏体的形成有关。Zhang等人^[40,57]还基于塑性变形、位错与超声非线性三者相关的理论,建立了塑性应变与超声非线性参量的数学表达式。该表达式能够有效描述铝合金、304不锈钢塑性应变与超声非线性参量之间的关联。

3.2 疲劳损伤评价

工程材料在循环载荷的作用下,往往会产生疲劳损伤,引起位错微观结构变化、裂纹萌生,从而导致材料性能退化。与疲劳相关的非线性超声技术研究工作主要集中在通过对超声非线性参量与材料的疲劳寿命分数进行关联,从而评价材料的疲劳损伤。通过对已有工作中超声非线性参量与疲劳寿命分数的关系进行详细梳理,发现二者之间的变化关系可大致分为超声非线性单调上升、单调下降和非单调变化3种情况(如图7所示)。

Frouin等人^[58]对Ti-6Al-4V合金的疲劳损伤进行非线性超声检测,发现当材料寿命分数大于40%时,超声非线性参量显著增加,增加量达到180%,而相同状态下的线性超声波参量(如声速和衰减)却无明显变化。Jhang和Kim^[46,59]在疲劳损伤后的结构钢SS41和SS45当中也观察到超声非线性参量随疲劳周次的增加而成比例地增加。Kim等人^[60]对相同应变幅

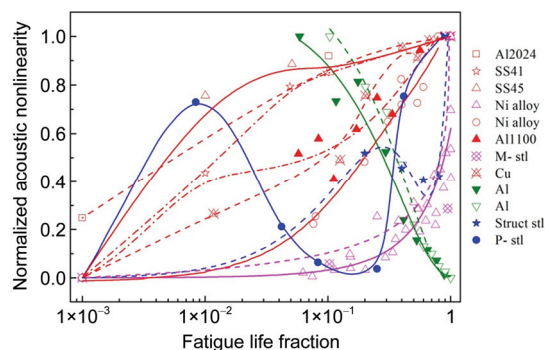


图7 (网络版彩色)文献中归一化超声非线性与疲劳寿命分数关系的总结^[30]

Figure 7 (Color online) Summary of correlation between the normalized acoustic nonlinearity and the fatigue life fraction from the literature^[30]

控制下疲劳损伤多晶纯铜和铜合金Cu-35Zn进行了声速、衰减和超声非线性参量的测量. 结果也表明这两种金属材料超声非线性参量随疲劳损伤的增加单调增加; 多晶纯铜的超声非线性增加量要大于铜合金Cu-35Zn. 相似的超声非线性参量随疲劳周次或疲劳寿命分数而增加的现象在其他金属材料中也有被观察到, 如Cantrell和Yost^[61]研究的AA2024-T4铝合金, 410Cb马氏体不锈钢^[62], Herrman等人^[47]和Kim等人^[48]报道的镍基合金, Kim等人^[63]研究的多晶铜, Pruell等人^[64]研究的Al1100铝合金, Kumar等人^[65]报道的AS7GU铝合金, Nam等人^[66]报道的Al6061铝合金, 吴斌等人^[67]研究的LY12硬铝合金以及Ikhwan等人^[68]研究的扭转疲劳316L不锈钢.

与上述单调上升的超声非线性现象相反, Deng和Pei^[43,69]利用非线性Lamb波方法对铝板疲劳损伤进行检测, 发现应力波因子随着疲劳周次的增加而单调下降. 此外, 超声非线性与疲劳周次或疲劳寿命分数之间的非单调变化现象也有被报道^[12,41,42,56,70~72]. Sagar等人^[12,70]观察到结构钢高周疲劳和低周疲劳过程中, 随着疲劳周次的增加, 超声非线性呈现先增加后下降再增加的变化趋势. Zhang等人^[30,73]对不同应力幅加载情况下304不锈钢低周疲劳损伤进行非线性超声检测, 发现损伤过程中超声非线性参量呈现先增加后减小的变化趋势. Kumar等人^[71,74]对应力幅为65 MPa的镁合金高周疲劳损伤的检测也发现到超声非线性参量随疲劳周次的增加先增加后下降, 而在6061-T6511铝合金高周疲劳损伤过程中, 超声非线性参量却随疲劳周次先下降后增加. Wu等人^[56,75]对不同应力幅控制下AZ31镁合金高周疲劳损伤的非线性超声在线检测表明: 3种应力幅控制下测量得到的超声非线性参量在疲劳寿命早期迅速增加, 当疲劳寿命分数超过约50%之后, 超声非线性参量开始轻微下降. 师小红等人^[72]报道45#钢疲劳过程中超声非线性参量呈现先增加后减小的趋势, 非线性参量的峰值出现在疲劳寿命分数的60%处. Walker等人^[41]对A36碳钢低周疲劳损伤的非线性瑞利波检测观察到超声非线性在疲劳加载的初期快速增加, 之后却保持相对稳定. Rao等人^[42]人利用非线性瑞利表面波对AA7175-T7351铝合金疲劳损伤检测, 发现超声非线性参量随疲劳周次增加呈现双驼峰形状的变化趋势.

对疲劳过程中不同超声非线性响应, 研究者尝试通过金相显微镜、X射线衍射、电子背散射衍射、

透射电子显微镜等分析材料微观组织变化来进行解释. Kim等人^[60,63]认为位错密度的增加以及位错胞结构的形成是多晶纯铜疲劳过程中超声非线性的单调上升的主要原因. 对于相同应变幅疲劳加载情况下, 多晶纯铜的超声非线性增加量要大于铜合金Cu-35Zn, Kim等人^[60]认为主要原因是多晶纯铜中形成的位错胞结构较铜合金Cu-35Zn形成的位错胞成熟. 然而, Sagar等人^[12,70]对于结构钢疲劳过程中超声非线性变化与位错微观结构的分析却表明, 位错胞结构的形成会导致超声非线性响应的下降. Sagar等人^[12,70]结合超声非线性位错弦理论, 认为在位错胞结构当中, 位错绝大部分被束缚在位错墙上而不能自由运动, 在位错胞内位错密度较低, 因此, 随着位错胞结构的形成和发展, 能够有效产生超声非线性的位错反而减少了, 因而导致材料超声非线性参量下降. Zhang等人^[30,73]认为304不锈钢低周疲劳疲劳第一阶段超声非线性参量的增加主要是由于位错单极子和偶极子密度的上升, 而疲劳第二阶段超声非线性参量下降主要是因为位错胞形成时位错单极子密度的下降和偶极子高度的减小. 因此, 目前对于疲劳过程中复杂位错结构超声非线性的响应还有待进一步探讨.

此外, 对于疲劳变形后同一试样的不同位置的非线性超声检测研究也有被报道^[68,76~80], 超声非线性参量以某一位置为中心, 沿试样夹头方向逐渐降低, 与疲劳损伤的分布情况相似. 超声非线性参量的峰值对应疲劳损伤最为集中的区域, 如疲劳断裂或将要断裂之处. 这进一步证实非线性超声技术能够有效表征材料损伤. 此外, 利用非线性超声技术对于疲劳过程中金属裂纹大小检测^[81~84], 裂纹尖端损伤分布检测^[85~87]以及裂纹定位^[88,89]等相关研究也有被报道.

3.3 热损伤评价

热损伤主要是指材料在无应力或较低应力状态下, 由于温度作用导致的材料性能变化. 热损伤(或热处理)对于材料中固溶原子、析出物以及位错等影响较为复杂, 因此, 超声非线性参量对于热损伤的响应也比较丰富.

Hurley等人^[90]研究了淬火马氏体钢中碳含量对超声非线性的影响, 结果表明超声非线性参量随碳含量质量分数增加而单调增大. Kim等人^[91,92]在

630℃等温热老化的2.25Cr-1Mo钢检测到超声非线性参量随着老化时间的增加而单调增加。扫描电子显微镜、X射线衍射、透射电子显微镜等微观结构分析表明,老化过程中, M_6C 体积分数的增加以及 $M_{23}C_6$ 晶体常数增加所导致的析出物与基体材料不匹配性增大是超声非线性持续上升的主要原因。Abraham等人^[93]研究了304不锈钢敏化程度与超声非线性之间的关系,发现超声非线性参量随敏化时间的增加单调上升。

Barnard等人^[94]利用非线性超声技术对两种热处理状态后的Inconel 718合金在650℃温度下进行1000小时内的不同时效处理试样进行检测,结果表明超声非线性对不同时效处理导致材料性能差异十分敏感,随着时效时间的增加,两种材料的超声非线性参量均呈现先增后减的变化趋势。Inconel 718合金中析出相随时间长大而导致的析出相与基体材料之间形成和失去共格应变状态被认为是造成上述超声非线性变化的主要原因。Hurley等人^[95,96]对ASTM A710钢经历不同时间热老化后的非线性超声测量,也发现超声非线性参量随老化时间增加呈先增加后下降的变化趋势。此外,这种变化趋势在其他材料的热损伤过程中也有被观察到,如Kim和Jhang^[97]研究的等温热处理铝合金,Ruiz等人^[98]研究的热损伤2205双相不锈钢,Metya等人^[99]报道的不同程度热损伤的C250级马氏体时效钢。Metya等人^[99]对经历不同热损伤时间C250级马氏体时效钢相应的透射电子显微镜观察表明,初始阶段超声非线性增加是由于中间亚稳定相 Ni_3Mo 和 Ni_3Ti 共格析出,随着老化时间进一步增长,平衡相 $FeTi$ 、 Fe_2Ni 和 Fe_2Mo 形成,使得析出物与基体之间的共格应变状态消失,从而导致超声非线性的下降。

Viswanath等人^[100]对不同时效处理M250级马氏体钢进行非线性超声测量,结果表明随时效时间增加,超声非线性参量先下降,随后增加,之后又下降。初始超声非线性下降可能是由于马氏体回复引起的位错密度下降所导致的,对于接下来的超声非线性增加和下降主要原因仍然是析出物长大形成、失去共格应变状态所引起的。Cantrell和Yost^[101]对Al2024铝合金在195℃的不同时间热损伤检测发现,超声非线性随热损伤时间呈双驼峰变化趋势。Cantrell等人^[26,101~103]利用位错-析出物超声非线性共格应变模型对Al2024铝合金热处理过程中的超声非

线性变化进行了理论分析。

关于长期热损伤材料的表征,Park等人^[104]对9-12Cr转子钢进行593~700℃之间最长时间为2万小时的等温热老化,之后进行非线性超声测量。结果表明四种温度情况下超声非线性参量随时间的增加呈先减小后增加的变化趋势。Xiang等人^[105~108]利用非线性超声纵波和Lamb波技术对时效时间最长将近20万小时的不同程度热损伤的HP40Nb合金进行了非线性超声评价研究。检测结果表明超声非线性参量随损伤时间呈现出先增加后减少的趋势。Xiang等人认为热损伤早期超声非线性的增加是由于位错密度的增加,以及析出物粗化导致的析出物与基体之间的应变不匹配,而之后的超声非线性下降可能与位错密度的下降,空洞引起的超声衰减增加等有关。

对于不同热处理工艺导致材料性能差异利用非线性超声技术进行表征的工作也有研究者报道。Li等人^[109]对Inconel X-750合金,Thiele等人^[110]对17-4 PH不锈钢的不同热处理状态的非线性超声测量表明超声非线性参量因热处理状态的不同而存在差异。Mondal等人^[28]将铝合金材料进行不同冷却速率(即空气冷却、热水冷却和冷水冷却)的固溶处理,对处理得到的材料利用非线性超声技术进行测量。结果表明,热水冷却试样对应的超声非线性参量最大,其次为冷水冷却试样,最后为空气冷却试样。透射电子显微镜分析表明热水和冷水冷却试样的析出物与基体材料呈准共格应变状态,相对于冷水冷却试样,热水冷却试样析出物尺寸较大、密度较低,但是其准共格应变状态“弱”作用力下的位错弦长度却较大,因此,根据Mondal等人^[28]的模型,热水冷却试样超声非线性参量反而较冷水冷却试样超声非线性参量值大。对于空气冷却试样,由于析出物尺寸过大,使得析出物与基体之间的准共格应变状态消失,从而导致超声非线性参量较小。

3.4 蠕变损伤评价

蠕变是指材料在应力不变的情况下,应变随时间延长而增加的现象。对于在高温下服役的工程构件,蠕变损伤是其失效的主要机制。Baby等人^[13]对IMI 834钛合金在温度为873 K和应力为300 MPa下蠕变损伤进行了非线性超声检测,结果表明超声非线性参量在蠕变寿命早期显著增加,当蠕变寿命分数超过0.6时,超声非线性参量有所下降。结合相应材

料的二次电子和光学显微镜微观形貌, Baby等人认为超声非线性蠕变寿命前期的增加正是由于微孔洞形核、发展所导致的, 而蠕变寿命后期的下降可能是由于微孔洞聚集达到一定尺度引起的衰减增加. Jitendra等人^[111]在纯铜的蠕变损伤后亦观察到超声非线性参量与蠕变空洞有关, 在同一试样的不同位置上, 蠕变空洞较多之处, 超声非线性参量往往较高, 且蠕变断裂也容易发生在该位置. 结果还表明, 超声非线性参量随着蠕变寿命分数增大总体呈上升趋势, 但是在蠕变寿命分数为0.3~0.4, 超声非线性参量存在一个小的“隆起”; 三次谐波超声非线性参量较二次谐波超声非线性参量对蠕变损伤更为敏感. Balasubramaniam等人^[112]采用一种低激发电压非线性超声测量方法对纯铜蠕变损伤进行了测量, 并对相应区域蠕变空洞密度进行统计, 结果表明超声非线性参量大小与蠕变空洞密度成指数关系增长. Kim^[113]研究了不同工况下IN738镍基合金蠕变损伤与超声非线性之间的关系, 发现各工况下超声非线性参量均随蠕变时间增加而单调增加, 且蠕变时间相同时, 更大的蠕变应力和温度会导致更高的超声非线性. 然而, Kim^[114]在铁素体12Cr钢蠕变损伤过程中却观察到超声非线性参量随蠕变时间单调下降, 且在蠕变寿命早期超声非线性下降较快, 蠕变寿命后期下降相对较慢. 结合微观结构分析, Kim^[113,114]认为超声非线性在IN738镍基合金蠕变过程增加主要是由于 γ' 相的粗化和筏状化引起的超声散射与扭曲, 而12Cr钢蠕变损伤过程超声非线性的下降主要是由于析出物密度和位错密度的减小. Xiang等人^[25,27,115]利用非线性超声Lamb波技术对Ti60合金在温度为600℃、应力为350 MPa下的蠕变损伤进行检测, 结果表明超声非线性参量随蠕变时间呈先增加、后减小的趋势, 峰值出现在蠕变寿命分数约为0.6时. Xiang等人^[25,27]认为, 蠕变寿命早期超声非线性参量增加与析出物体积分数增加、以及位错密度增加有关, 而蠕变寿命后期超声非线性参量的下降却比较复杂, 可能是析出物体积分数与位错密度的下降, 蠕变微孔洞的形成, 以及Lamb波基频波与二次谐波的失配等因素的共同作用.

3.5 材料黏接面的评价

材料黏接是指利用某些化学材料, 通过一定的工艺处理在联接面上产生机械结合力、物理吸附力和化学键合力, 将两个工件联接起来. 黏接界面广泛存在

于工程材料结构中, 界面黏接质量对于含黏接界面工程构件力学性能等起着关键作用. 通常, 由于黏接工艺的影响, 黏接界面容易出现微孔洞、裂纹、脱胶等缺陷, 从而影响黏接强度和性能. 利用非线性超声技术表征材料黏接面性能也受到了研究者的关注^[116~122].

Barnard等人^[116]尝试利用非线性超声技术表征Cu-Cu扩散焊界面强度, 发现总体上二次谐波与基频波幅值之比随界面黏接强度减小而减小. Wegner等人^[117]对扩散联接硅-硅晶片的黏接完好区和分层区界面进行非线性超声测量研究, 表明分层区超声扭曲因子要明显高于黏接完好区. Rothenfusser等人^[118]利用有限元计算和实验测量的方法讨论了黏接层厚度对超声二次谐波幅值的影响. Biwa等人^[119]研究了铝板干式界面黏接过程中不同压应力黏接效果的非线性超声评价, 发现超声非线性参量随压应力的增加而减小, 当压应力增加到一定程度后, 超声非线性参量减小量不明显. Chen等人^[120]对玻璃-水杨酸盐-玻璃黏接完好界面采用一定拉应力, 并保载不同时间, 使之产生不同缺陷的界面. 之后, 对上述界面进行非线性超声测量, 结果表明超声非线性参量随拉应力保载时间增加而增加. 利用超声二次谐波, Escobar-Ruiz等人^[121]对钛合金扩散连接界面, Kawashima等人^[122]对TiAl-Ni-钢黏接界面进行了检测.

3.6 其他模式损伤评价

除上述模式损伤评价外, Matlack等人^[123~125]利用非线性超声技术对受辐照损伤后的核反应堆压力容器钢进行了检测, 结果表明超声非线性参量对不同辐照温度、不同中子辐射量引起的材料辐照损伤变化较为敏感. 采用非线性瑞利表面波技术, Kawashima等人^[126]对铝合金表面微裂纹、Zhang等人^[127]对玻璃表面划痕以及次表面损伤、Zeitvogel等人^[128]对碳钢表面应力腐蚀裂纹进行了研究, 发现超声非线性参量与裂纹长度、裂纹宽度、裂纹密度等密切相关. Jeong等人^[129,130]对CrMoV转子钢韧脆转变温度和超声非线性参量进行了关联, 提出用非线性超声技术表征金属断裂韧性. Liu等人^[131,132]对利用非线性瑞利表面波技术检测金属材料近表面残余应力的可行性进行了探讨.

4 总结与展望

综上所述, 非线性超声技术可以克服传统线性

超声的不足,对于材料早期损伤或力学性能退化过程中的微观结构(如位错、析出物、微裂纹等)变化较为敏感,能够实现对材料损伤或失效的早期检测。目前,对于利用非线性超声技术表征材料损伤或力学性能退化的问题,国内外研究者已经从理论模型建立、实验检测等方面进行了有益尝试和探讨。在理论研究方面,主要是构建了位错弦相关模型、位错偶相关模型和塑性相关模型,建立了超声非线性与材料微观结构、塑性损伤之间的关联。在试验研究方面,对材料不同类型损伤,如拉伸塑性损伤、疲劳损伤、热老化、蠕变损伤、黏接情况以及其他形式的损伤进行了检测和分析,证实了非线性超声技术对于上述材料损伤检测的有效性。

然而,就目前的研究来看,非线性超声技术要应用于工程实际检测中,还需要继续开展以下几个方面的工作。

(1) 在理论研究方面。现有超声非线性理论模型主要基于简单的位错弦和位错偶结构,对于其他形

式的微观结构缺陷,如复杂位错结构、相、孔洞等研究较少。因此,需进一步探索非线性超声波与不连续介质相互作用的机理,完善超声非线性形成的理论基础,从而指导非线性超声技术评估材料损伤、预测材料剩余寿命。

(2) 在实验检测方面。尽管现在已经对较多种类金属材料、多种损伤类型进行了非线性超声检测评估的研究,但是对于某种材料损伤检测试样的样本量仍然较少,对非金属材料的研究更是鲜有报道。所以,还应该对更多的材料试样(包括金属和非金属材料)开展检测评估。

(3) 在检测技术方面。超声非线性不仅来自材料本身,而且与检测系统、耦合条件等密切相关,较容易受到上述因素的影响。因此,需要重视改进试验方法和手段,进一步提高非线性超声技术对于外界干扰的抵抗能力,比如,开发非接触式的非线性超声技术(包括激光超声、电磁超声等)、建立先进非线性超声信号处理方法。

参考文献

- 1 Kehoe A, Parker G. An intelligent knowledge based approach for the automated radiographic inspection of castings. *NDT & E Int*, 1992, 25: 23–36
- 2 Warren B E. X-ray studies of deformed metals. *Prog Met Phys*, 1959, 8: 147–202
- 3 Schmidt J T, Skeie K, MacIntire P. *ASNT Nondestructive Testing Handbook: Magnetic Particle Testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1989
- 4 Raj B, Moorthy V, Jayakumar T, et al. Assessment of microstructures and mechanical behaviour of metallic materials through non-destructive characterisation. *Int Mater Rev*, 2003, 48: 273–325
- 5 Hashimoto M. Eddy current testing. *Met Tech*, 1999, 69: 21–27
- 6 Borucki J, Jordan G. Liquid penetrant inspection. *ASM Handbook*, 1989, 17: 71–88
- 7 Kobayashi M, Tang S, Miura S, et al. Ultrasonic nondestructive material evaluation method and study on texture and cross slip effects under simple and pure shear states. *Int J Plasticity*, 2003, 19: 771–804
- 8 Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—Part II. Experiment and simulation. *Int J Plasticity*, 1998, 14: 523–535
- 9 Goebbels K. *Materials Characterization for Process Control and Product Conformity: Introduction to Methods for Nondestructive Characterization of Materials Microstructure and Materials Properties During Production, Operation, and Inspection*. Florida: CRC Press, 1994
- 10 Meyendorf N G, Rösner H, Kramb V, et al. Thermo-acoustic fatigue characterization. *Ultrasonics*, 2002, 40: 427–434
- 11 Cantrell J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals. *Proc Roy Soc Lond A Mat*, 2004, 460: 757–781
- 12 Sagar S P, Das S, Parida N, et al. Non-linear ultrasonic technique to assess fatigue damage in structural steel. *Scripta Mater*, 2006, 55: 199–202
- 13 Baby S, Nagaraja Kowmudi B, Omprakash C M, et al. Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique. *Scripta Mater*, 2008, 59: 818–821
- 14 Suzuki T, Hikata A, Elbaum C. Anharmonicity due to glide motion of dislocations. *J Appl Phys*, 1964, 35: 2761–2766
- 15 Hikata A, Chick B B, Elbaum C. Dislocation contribution to the second harmonic generation of ultrasonic waves. *J Appl Phys*, 1965, 36: 229–236
- 16 Smith R S R T, Stephens R W B. Third-order elastic moduli of polycrystalline metals from ultrasonic velocity measurements. *J Acoust Soc Am*, 1966, 40: 1002–1008

- 17 Sahasrabudhe G G, Lambade S D. Study of elastic and acoustic nonlinearities in solids at room temperature. *J Phys Chem Solids*, 1998, 59: 789–808
- 18 Breazeale M A, Thompson D O. Finite-amplitude ultrasonic waves in aluminum. *Appl Phys Lett*, 1963, 3: 77–78
- 19 Cantrell J H, Yost W T. Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles. *Philos Mag A*, 1994, 69: 315–326
- 20 Granatot A, Lücke K. Theory of mechanical damping due to dislocations. *J Appl Phys*, 1956, 27: 583–593
- 21 Cash W D, Cai W. Dislocation contribution to acoustic nonlinearity: The effect of orientation-dependent line energy. *J Appl Phys*, 2011, 109: 014915
- 22 Chen Z M, Qu J M. Dislocation-induced acoustic nonlinearity parameter in crystalline solids. *J Appl Phys*, 2013, 114: 164906
- 23 Zhang J F, Xuan F Z. A general model for dislocation contribution to acoustic nonlinearity. *Europhys Lett*, 2014, 105: 54005
- 24 Zhang J F, Xuan F Z, Xiang Y X. Dislocation characterization in cold rolled stainless steel using nonlinear ultrasonic techniques: A comprehensive model. *Europhys Lett*, 2013, 103: 68003
- 25 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z, et al. Effect of precipitate-dislocation interactions on generation of nonlinear Lamb waves in creep-damaged metallic alloys. *J Appl Phys*, 2012, 111: 104905
- 26 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z. Creep damage characterization using nonlinear ultrasonic guided wave method: A mesoscale model. *J Appl Phys*, 2014, 115: 044914
- 27 Cantrell J H, Yost W T. Determination of precipitate nucleation and growth rates from ultrasonic harmonic generation. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 1952–1954
- 28 Mondal C, Mukhopadhyay A, Sarkar R. A study on precipitation characteristics induced strength variation by nonlinear ultrasonic parameter. *J Appl Phys*, 2010, 108: 124910
- 29 Cash W D, Cai W. Contribution of dislocation dipole structures to the acoustic nonlinearity. *J Appl Phys*, 2012, 111: 074906
- 30 Zhang J F, Xuan F Z. Fatigue damage evaluation of austenitic stainless steel using nonlinear ultrasonic waves in low cycle regime. *J Appl Phys*, 2014, 115: 204906
- 31 Cantrell J H. Ultrasonic harmonic generation from fatigue-induced dislocation substructures in planar slip metals and assessment of remaining fatigue life. *J Appl Phys*, 2009, 106: 093516
- 32 Cantrell J H. Acoustic nonlinearity in polycrystalline nickel from fatigue-generated microstructures. *Rev Prog Quant Nondestr Eval*, 2005, 24: 337–344
- 33 Kim J Y, Qu J, Jacobs L J, et al. Acoustic nonlinearity parameter due to microplasticity. *J Nondestruct Eval*, 2006, 25: 29–37
- 34 Cantrell J H, Yost W T. Acoustic nonlinearity and cumulative plastic shear strain in cyclically loaded metals. *J Appl Phys*, 2013, 113: 153506
- 35 Jhang K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A review. *Int J Precis Eng Manuf*, 2009, 10: 123–135
- 36 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]
- 37 Shui G S, Wang S Y, 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]
- 38 Rao V V S J, Kannan E, Prakash R V, et al. Observation of two stage dislocation dynamics from nonlinear ultrasonic response during the plastic deformation of AA7175-T7351 aluminum alloy. *Mater Sci Eng A*, 2009, 512: 92–99
- 39 Viswanath A, Rao B P C, Mahadevan S, et al. Nondestructive assessment of tensile properties of cold worked AISI type 304 stainless steel using nonlinear ultrasonic technique. *J Mater Process Technol*, 2011, 211: 538–544
- 40 Zhang J F, Xuan F Z, Xiang Y X, et al. Non-linear ultrasonic response of plastically deformed aluminium alloy AA 7009. *Mater Sci Technol*, 2013, 29: 1304–1309
- 41 Walker S V, Kim J Y, Qu J, et al. Fatigue damage evaluation in A36 steel using nonlinear Rayleigh surface waves. *NDT & E Int*, 2012, 48: 10–15
- 42 Rao V V S J, Kannan E, Prakash R V, et al. Fatigue damage characterization using surface acoustic wave nonlinearity in aluminum alloy AA7175-T7351. *J Appl Phys*, 2008, 104: 123508
- 43 Deng M X, Pei J F. Assessment of accumulated fatigue damage in solid plates using nonlinear Lamb wave approach. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 121902
- 44 Bermes C. Experimental characterization of material nonlinearity using Lamb waves. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 0211901
- 45 Pruell C, Kim J Y. Evaluation of plasticity driven material damage using Lamb waves. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 231911
- 46 Jhang K Y, Kim K C. Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect. *Ultrasonics*, 1999, 37: 39–44
- 47 Herrmann J, Kim J Y, Jacobs L J, et al. Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves. *J Appl Phys*, 2006, 99: 124913

- 48 Kim J Y, Jacobs L J, Qu J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120: 1266–1273
- 49 Bermes C, Kim J Y, Qu J, et al. Nonlinear Lamb waves for the detection of material nonlinearity. *Mech Syst Signal Process*, 2008, 22: 638–646
- 50 Bermes C, Jacobs L J, Kim J Y, et al. Cumulative second harmonic generation in Lamb waves for the detection of material nonlinearities. *Rev Prog Quant Nondestr Eval*, 2007, 26: 177–184
- 51 Pruell C, Kim J Y, Qu J, et al. A nonlinear-guide wave technique for evaluating plasticity-driven material damage in a metal plate. *NDT & E Int*, 2009, 42: 199–203
- 52 Pruell C, Kim J Y, Jacobs L J, et al. Generation and detection of Lamb waves to detect plasticity-induced changes in the microstructure. *Rev Prog Quant Nondestr Eval*, 2008, 27: 1275–1281
- 53 Kim C S, Jhang K Y. Acoustic nonlinearity of a laser-generated surface wave in a plastically deformed aluminum alloy. *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 120701
- 54 Shui G, Wang Y S, Gong F. Evaluation of plastic damage for metallic materials under tensile load using nonlinear longitudinal waves. *NDT & E Int*, 2013, 55: 1–8
- 55 Shui G S, Huang P. Nondestructive evaluation of surface plastic damage for metallic material based on stress wave factor (in Chinese). *J Mater Eng*, 2013, 11: 70–74 [税国双, 黄蓬. 基于应力波因子的金属材料表面塑性损伤检测. *材料工程*, 2013, 11: 70–74]
- 56 Wu B, Yan B S, He C F, et al. AZ31 magnesium early mechanical performance degradation nondestructive testing using nonlinear ultrasonic (in Chinese). *J Aeronaut Mater*, 2011, 31: 87–92 [吴斌, 颜丙生, 何存富, 等. AZ31 镁合金早期力学性能退化非线性超声检测. *航空材料学报*, 2011, 31: 87–92]
- 57 Zhang J F, Li S Y, Xuan F Z, et al. Effect of plastic deformation on nonlinear ultrasonic response of austenitic stainless steel. *Mater Sci Eng A*, 2015, 622: 146–152
- 58 Frouin J, Sathish S, Matikas T E, et al. Ultrasonic linear and nonlinear behavior of fatigued Ti-6Al-4V. *J Mater Res*, 1999, 14: 1295–1298
- 59 Jhang K Y. Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation. *IEEE T Ultrason Ferr*, 2000, 47: 540–548
- 60 Kim C S, Kim Y H, Kim I H. Ultrasonic linear and nonlinear parameters in cyclically deformed Cu and Cu-35Zn alloy. *Key Eng Mater*, 2005, 297-300: 2134–2139
- 61 Cantrell J H, Yost W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. *Int J Fatigue*, 2001, 23: 487–490
- 62 Cantrell J H. Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel on fatigue damage accumulation. *J Appl Phys*, 2006, 100: 063508
- 63 Kim C S, Park T S, Park I K. Influence of precipitates and dislocations on the acoustic nonlinearity. *J Korean Phys Soc*, 2009, 55: 528–532
- 64 Pruell C, Kim J Y, Qu J, et al. Evaluation of fatigue damage using nonlinear guided waves. *Smart Mater Struct*, 2009, 18: 035003
- 65 Kumar A, Torbet C J, Pollock T M, et al. *In situ* characterization of fatigue damage evolution in a cast Al alloy via nonlinear ultrasonic measurements. *Acta Mater*, 2010, 58: 2143–2154
- 66 Nam T, Choi S, Lee T, et al. Acoustic non linearity of narrowband laser-generated surface waves in the bending fatigue of Al6061 alloy. *J Korean Phys Soc*, 2010, 57: 1212–1217
- 67 Wu B, Yan B S, He C F, et al. Applied research on pulse-inversion technique in acoustic nonlinear parameter measurement of fatigued metals (in Chinese). *Tech Acoust*, 2010, 29: 489–493 [吴斌, 颜丙生, 何存富, 等. 脉冲反转技术在金属疲劳损伤非线性超声检测中的应用. *声学技术*, 2010, 29: 489–493]
- 68 Ikhwang C, Taehun L, Kyung-Young J. Evaluation of fatigue degradation using nonlinear ultrasonics. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211: 1433–1438
- 69 Deng M X, Pei J F. Nonlinear ultrasonic lamb wave response to fatigue of solid plates. In: 2006 IEEE Ultrasonics Symposium. New York: IEEE, 2006. 1425–1428
- 70 Sagar S P, Metya A, Ghosh M, et al. Effect of microstructure on non-linear behavior of ultrasound during low cycle fatigue of pearlitic steels. *Mater Sci Eng A*, 2011, 528: 2895–2898
- 71 Kumar A, Adharapurapu R R, Jones J W, et al. *In-situ* damage assessment in a cast magnesium alloy during very high cycle fatigue. *Scripta Mater*, 2010, 64: 65–68
- 72 Shi X H, Li J Z, Xu Z S, et al. Lifetime prediction of metal component based on nonlinear coefficient (in Chinese). *J Solid Rocket Tech*, 2010, 33: 229–231 [师小红, 李建增, 徐章遂, 等. 基于非线性系数的金属构件寿命预测研究. *固体火箭技术*, 2010, 33: 229–231]
- 73 Zhang J F, Xuan F Z, Xiang Y X, et al. Experimental insight into the cyclic softening/hardening behavior of austenitic stainless steel using ultrasonic higher harmonics. *Europhys Lett*, 2014, 108: 46004
- 74 Kumar A, Torbet C J, Jones J W, et al. Nonlinear ultrasonics for *in situ* damage detection during high frequency fatigue. *J Appl Phys*, 2009, 106: 024904

- 75 Wu B, Yan B S, He C F. Nonlinear ultrasonic characterizing online fatigue damage and *in situ* microscopic observation. *T Nonferr Metal Soc*, 2011, 21: 2597–2604
- 76 Metya A, Parida N, Bhattacharya D K, et al. Assessment of localized plastic deformation during fatigue in polycrystalline copper by nonlinear ultrasonic. *Metall Mater Trans A*, 2007, 38A: 3087–3092
- 77 Oruganti R K, Sivaramanivas R, Karthik T N, et al. Quantification of fatigue damage accumulation using non-linear ultrasound measurements. *Int J Fatigue*, 2007, 29: 2032–2039
- 78 Kim C, Choi S, Jhang K, et al. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue damage in SUS316 alloy. *Int J Mod Phys B*, 2011, 25: 4221–4224
- 79 Jhang K Y, Lee J, Lee T. Acoustic nonlinearity of surface wave in a fatigued aluminum alloy specimen. *Mater Trans*, 2012, 53: 303–307
- 80 Kim C S, Jhang K Y. Fatigue-induced micro-damage characterization of austenitic stainless steel 316 using innovative nonlinear acoustics. *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 060702
- 81 Ryles M, Ngau F, McDonald I, et al. Comparative study of nonlinear acoustic and Lamb wave techniques for fatigue crack detection in metallic structures. *Fatigue Fract Eng M*, 2008, 31: 674–683
- 82 Dutta D, Sohn H, Harries K A, et al. A nonlinear acoustic technique for crack detection in metallic structures. *Struct Health Monit*, 2009, 8: 251–262
- 83 Shi X H, Dun Y, Wang F, et al. Nonlinear ultrasonic test for fatigue crack in metal component (in Chinese). *J Solid Rocket Tech*, 2008, 31: 99–102 [师小红, 敦怡, 王锋, 等. 金属构件疲劳微裂纹非线性超声检测. 固体火箭技术, 2008, 31: 99–102]
- 84 Dun Y, Shi X H, Wang G L, et al. Nonlinear ultrasonic test of micro-nano crack (in Chinese). *Opt Precision Eng*, 2011, 19: 132–137 [敦怡, 师小红, 王广龙, 等. 微纳米级裂纹的非线性超声检测. 光学精密工程, 2011, 19: 132–137]
- 85 Kim N, Lee T H, Jhang K Y, et al. Nonlinear behavior of ultrasonic wave at crack. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211: 313–318
- 86 Lee T H, Jhang K Y. Experimental investigation of nonlinear acoustic effect at crack. *NDT & E Int*, 2009, 42: 757–764
- 87 Ohara Y, Horinouchi S, Hashimoto M, et al. Nonlinear ultrasonic imaging method for closed cracks using subtraction of responses at different external loads. *Ultrasonics*, 2011, 51: 661–666
- 88 Zhou C, Hong M, Su Z Q, et al. Evaluation of fatigue cracks using nonlinearities of acousto-ultrasonic waves acquired by an active sensor network. *Smart Mater Struct*, 2013, 22: 015018
- 89 Semperlotti F, Wang K W, Smith E C. Localization of a breathing crack using nonlinear subharmonic response signals. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 254101
- 90 Hurley D C, Balzar D, Purtscher P T, et al. Nonlinear ultrasonic parameter in quenched martensitic steels. *J Appl Phys*, 1998, 83: 5
- 91 Kim C, Park I. Microstructural degradation assessment in pressure vessel steel by harmonic generation technique. *J Nucl Sci Technol*, 2008, 45: 1036–1040
- 92 Kim C S, Park I K, Jhang K Y. Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr–1Mo steel. *NDT & E Int*, 2009, 42: 204–209
- 93 Abraham S T, Albert S K, Das C R, et al. Assessment of sensitization in AISI 304 stainless steel by nonlinear ultrasonic method. *Acta Metall Sin-Eng Lett*, 2013, 26: 545–552
- 94 Barnard D J, Dace G E, Buck O. Buck Acoustic harmonic generation due to thermal embrittlement of Inconel 718. *J Nondestruct Eval*, 1997, 16: 67–75
- 95 Hurley D C, Balzar D, Purtscher P T. Nonlinear ultrasonic parameter in precipitate-hardened steels. *Mater Res Soc Symp Proc*, 1999, 591: 129–134
- 96 Hurley D C, Balzar D, Purtscher P T. Nonlinear ultrasonic assessment of precipitation hardening in ASTM A710 steel. *J Mater Res*, 2000, 15: 2036–2042
- 97 Kim J, Jhang K Y. Evaluation of ultrasonic nonlinear characteristics in heat-treated aluminum alloy (Al-Mg-Si-Cu). *Adv Mater Sci Eng*, 2013, 2013: 407846
- 98 Ruiz A, Ortiz N, Medina A, et al. Application of ultrasonic methods for early detection of thermal damage in 2205 duplex stainless steel. *NDT & E Int*, 2013, 54: 19–26
- 99 Metya A, Ghosh M, Parida N, et al. Higher harmonic analysis of ultrasonic signal for ageing behaviour study of C-250 grade maraging steel. *NDT & E Int*, 2008, 41: 484–489
- 100 Viswanath A, Rao B P C, Mahadevan S, et al. Microstructural characterization of M250 grade maraging steel using nonlinear ultrasonic technique. *J Mater Sci*, 2010, 45: 6719–6726
- 101 Cantrell J H, Yost W T. Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation *J Appl Phys*, 1997, 81: 2957–2962
- 102 Cantrell J H, Zhang X G. Nonlinear acoustic response from precipitate-matrix misfit in a dislocation network. *J Appl Phys*, 1998, 84: 5469–5472
- 103 Cantrell J H, Yost W T. Nonlinear acoustical assessment of precipitate nucleation and growth in aluminum alloy 2024. *Rev Prog Quant Nondestruct Eval*, 2000, 1375–1382

- 104 Park J, Kim M, Chi B, et al. Correlation of metallurgical analysis & higher harmonic ultrasound response for long term isothermally aged and crept FM steel for USC TPP turbine rotors. *NDT & E Int*, 2013, 54: 159–165
- 105 Xiang Y X, Xuan F Z, Deng M X. Evaluation of thermal degradation induced material damage using nonlinear Lamb waves. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 016202
- 106 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z, et al. Experimental study of thermal degradation in ferritic Cr-Ni alloy steel plates using nonlinear Lamb waves. *NDT & E Int*, 2011, 44: 768–774
- 107 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z, et al. Cumulative second-harmonic analysis of ultrasonic Lamb waves for ageing behavior study of modified-HP austenite steel. *Ultrasonics*, 2011, 51: 974–981
- 108 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z. Thermal degradation evaluation of HP40Nb alloy steel after long term service using a nonlinear ultrasonic technique. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 279–287
- 109 Li W, Cho Y, Lee J, et al. Assessment of heat treated Inconel X-750 alloy by nonlinear ultrasonics. *Exp Mech*, 2013, 53: 775–781
- 110 Thiele S, Matlack K H, Kim J Y, et al. Assessment of precipitation in alloy steel using nonlinear Rayleigh surface waves. In: 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, AIP Publishing, 2014
- 111 Jitendra S, Krishnan B, Raghu V. Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques. *Acta Mater*, 2010, 58: 2079–2090
- 112 Balasubramaniam K, Valluri J S, Prakash R V. Creep damage characterization using a low amplitude nonlinear ultrasonic technique. *Mater Charact*, 2011, 62: 275–286
- 113 Kim C. Creep damage characterization of Ni-based superalloy by acoustic nonlinearity. *Prog Nat Sci Mater Int*, 2012, 22: 303–310
- 114 Kim C S. Creep characterization in advanced heat-resistant steel using ultrasonic nonlinearity technique. *Mater Trans*, 2012, 53: 2028–2033
- 115 Xiang Y X, Deng M X, Xuan F Z, et al. Creep damage evaluation of titanium alloy using nonlinear ultrasonic Lamb waves. *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 106202
- 116 Barnard D J, Dace G E, Rehbein D K, et al. Acoustic harmonic generation at diffusion bonds. *J Nondestruct Eval*, 1997, 16: 77–89
- 117 Wegner A K A, Janser K, Netzelmann U, et al. Assessment of the adhesion quality of fusion-welded silicon wafers with nonlinear ultrasound. *Ultrasonics*, 2000, 38: 316–321
- 118 Rothenfusser M, Mayr M, Baumann J. Acoustic nonlinearities in adhesive joints. *Ultrasonics*, 2000, 38: 322–326
- 119 Biwa S, Hiraiwa S, Matsumoto E. Experimental and theoretical study of harmonic generation at contacting interface. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1319–e1322
- 120 Chen J, Zhang D, Mao Y, et al. Contact acoustic nonlinearity in a bonded solid-solid interface. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1355–e1358
- 121 Escobar-Ruiz E, Ruiz A, Hassan W, et al. Non-linear ultrasonic NDE of titanium diffusion bonds. *J Nondestruct Eval*, 2014, 33: 187–195
- 122 Kawashima K, Murase M, Yamada R, et al. Nonlinear ultrasonic imaging of imperfectly bonded interfaces. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1329–e1333
- 123 Matlack K H, Wall J J, Kim J Y, et al. Evaluation of radiation damage using nonlinear ultrasound. *J Appl Phys*, 2012, 111: 054911
- 124 Matlack K, Kim J Y, Wall J, et al. Radiation damage characterization in reactor pressure vessel steels with nonlinear ultrasound. In: 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, AIP Publishing, 2014
- 125 Matlack K H, Kim J Y, Wall J J, et al. Sensitivity of ultrasonic nonlinearity to irradiated, annealed, and re-irradiated microstructure changes in RPV steels. *J Nucl Mater*, 2014, 448: 26–32
- 126 Kawashima K, Omote R, Ito T, et al. Nonlinear acoustic response through minute surface cracks: FEM simulation and experimentation. *Ultrasonics*, 2002, 40: 611–615
- 127 Zhang J F, Xuan F Z, Yang F Q. Effect of surface scratches on the characteristics of nonlinear Rayleigh surface waves in glass. *J Non-cryst Solids*, 2013, 378: 101–105
- 128 Zeitvogel D T, Matlack K H, Kim J Y, et al. Characterization of stress corrosion cracking in carbon steel using nonlinear Rayleigh surface waves. *NDT & E Int*, 2014, 62: 144–152
- 129 Jeong H, Nahm S H, Jhang K Y, et al. Evaluation of fracture toughness degradation of CrMoV rotor steels based on ultrasonic nonlinearity measurements. *Ksme Int J*, 2002, 16: 147–154
- 130 Jeong H, Nahm S H, Jhang K Y, et al. A nondestructive method for estimation of the fracture toughness of CrMoV rotor steels based on ultrasonic nonlinearity. *Ultrasonics*, 2003, 41: 543–549
- 131 Liu M, Kim J Y, Qu J, et al. Measuring residual stress using nonlinear ultrasound. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211: 1365–1372
- 132 Liu M, Kim J Y, Jacobs L, et al. Experimental study of nonlinear Rayleigh wave propagation in shot-peened aluminum plates-feasibility of measuring residual stress. *NDT & E Int*, 2011, 44: 67–74

Evaluation of material damage using nonlinear ultrasonic wave

ZHANG JianFeng, XUAN FuZhen & XIANG YanXun

MOE Key Laboratory of Pressurized System and Safety, School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Generally speaking, damages and defects are inevitable with the operating life consuming of engineer structures. Engineer structures would fail or have to retire ultimately when their load bearing capacity is inadequate to accommodate the working load. It has been revealed that, to ensure the safety and reliability of components, it is essential to accurately evaluate the damages and defects during the service process. Frankly speaking, the traditional linear ultrasonic testing technology is not sensitive to micro-defects being large than 0.2 mm, which usually occur prior to 70%–80% of the material life. By contrast, the nonlinear ultrasonic testing based on the technology of ultrasonic harmonic method provides a possible way for the early evaluation of damages and defects. With the outstanding detective effectiveness and efficiency and high sensitivity to micro-nano defects, such as dislocations, micro cracks, the nonlinear ultrasonic wave technology has attracted much attention in recent years. In this work, the evaluation of material damages using the nonlinear ultrasonic wave technology was reviewed systematically. Firstly, the basic principle of nonlinear ultrasonic wave technology in the detection of material damages was introduced. One-dimensional longitudinal wave was used as an example to describe how nonlinear ultrasonic wave was generated in damaged solids. Secondly, the interaction between the propagating nonlinear ultrasonic wave and microstructures was marked. Three kinds of nonlinear ultrasonic wave models were introduced, namely dislocation string models, dislocation dipole models and plastic-dependent models. The advantage and disadvantages of the existing models were discussed comparatively. After that, experimental studies on this topic are presented according to different types of material damage, such as tensile (or compressive) plastic damage, fatigue damage, thermal damage, creep damage, adhesive damage and other damages. Experimental results show that the nonlinear ultrasonic wave technique can characterize the degrees of above damages reasonably accurately. Furthermore, the responses of acoustic nonlinearity depended on the type of damages, materials and loading conditions. Finally, further studies on the evaluation of material damages using nonlinear ultrasonic wave technology were proposed, including the interaction of nonlinear ultrasonic wave with the discontinuous medium, creation of more robust detective methods and signal processing methods, etc.

nonlinear ultrasonic wave, material damage, nondestructive test, microstructure

doi: 10.1360/N972015-00962