

材料早期损伤的非线性超声诊断*

门平^{1,2}, 董世运¹, 康学良^{1,3}, 国瑞^{1,4}, 闫世兴¹

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072; 2. 中国人民解放军海军 92601 部队 湛江 524009; 3. 上海大学材料科学与工程学院 上海 200444; 4. 东北大学材料科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要:对于材料微结构特征的检测,特别是材料早期损伤,非线性超声具有独特的优势。立足于非线性超声的发展历程,阐述了非线性超声的基本理论和数学模型,深入分析了非线性超声参量的影响因素,包括位错单极子模型、位错偶极子模型、析出物和微裂纹;阐述了非线性超声的实验方法,重点介绍了非线性超声纵波和表面波的检测方法;论述了非线性超声在闭合裂纹、疲劳及位错早期损伤、材料热老化、蠕变及材料辐射损伤等领域中的应用;最后总结了非线性超声检测技术在材料早期损伤应用中面临的机遇和挑战。

关键词:非线性超声评价;接触非线性;经典非线性;谐波;早期损伤

中图分类号: TG115.28 TH878 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound

Men Ping^{1,2}, Dong Shiyun¹, Kang Xueliang^{1,3}, Guo Rui^{1,4}, Yan Shixing¹

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China; 2. 92601 Troops, People's Liberation Army Navy, Zhanjiang 524009, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. College of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Nonlinear ultrasonic methods have distinct advantage in material micro-structure features test, especially in material early damage test. Based on the development progress of nonlinear ultrasound, this paper describes the basic theories and mathematical models of nonlinear ultrasound, deeply analyzes the influence factors of nonlinear ultrasonic parameters, including dislocation monopole model, dislocation dipole model, precipitates and micro-cracks. This paper presents the details of available nonlinear ultrasonic measurement and analysis techniques, focusing on nonlinear ultrasonic longitudinal wave and Rayleigh wave methods. The main focus of this paper is a critical review of the literatures that utilize nonlinear ultrasound for nondestructive evaluation of closed crack, fatigue and early dislocation damage monitoring, thermal aging, creep damage and radiation damage in materials. Finally, the challenges and opportunities of the nonlinear ultrasonic testing technology in the application of material early damage diagnosis are outlined.

Keywords: nonlinear ultrasonic evaluation; contact nonlinearity; classical nonlinearity; harmonics; early damage

1 引言

与传统线性超声检测相比,非线性超声检测技术在材料的早期损伤具有独特优势,传统线性超声检测微裂纹长度极限和波长相当,传统线性超声检测技术对于材料中闭合微裂纹和早期损伤无能为力,非线性超声对于金属材料微观结构的变化具有良好的检测能力,可作

为传统线性超声检测的有力补充。非线性超声检测技术是利用超声波在材料中传播时与传播介质或微观缺陷相互作用而产生的非线性响应信号对材料的早期损伤进行评价,本质上反应了材料应力-应变的非线性^[1-3]。为确保关键构件的安全性,非线性超声在材料及构件质量评价上的应用研究得到了国内外学者的广泛关注,研究领域涉及能源、交通运输、航空航天工业及核工业等^[4]。

根据信号源头非线性超声可分为两类:经典非线性

和接触非线性。对于经典非线性和接触非线性理论,国内外学者进行了大量研究。美国国家航空航天局兰利研究中心的 Cantrell J. H. [5] 从离散模型入手建立了固体介质中非线性超声波动方程;美国橡树岭国家实验室的 Breazeale M. A. 等人 [6-9] 系统研究了基波、二次谐波与非线性系数、三阶弹性常数之间的关系;金属材料的疲劳与位错的运动有密切的关系,采用非线性超声评价材料的疲劳损伤,研究位错对超声非线性响应是必不可少的,美国布朗大学 Suzuki T 等人 [10] 最早研究了位错对超声二次谐波的影响, Hikata A 等人 [11-12] 等人进一步发展了这一理论;爱荷华州立大学 Buck O [13] 从理论和实验上对位错和超声波的相互作用进行了深入的研究,建立了位错钉扎单极子模型,指出二次谐波的产生依赖于应力作用下位错钉扎点之间单个位错的位移运动,并且二次谐波的幅度与应力及位错线长度 4 次方成正比;美国斯坦福大学 Cash W. D. 等人 [14]、华东理工大学的 Zhang J. F. 等人 [15] 以及美国弗吉尼亚大学 Apple T. M. 等人 [16] 分别从模拟实验、冷轧不锈钢以及单晶铜实验阐述了位错对超声非线性的贡献。

研究发现位错结构不是孤立排列,还包括位错偶极子以及多极子的复杂分布, Cantrell J. H. 等人 [17-19] 和 Cash W. D. 等人 [20] 提出了一种新的超声与位错偶极子和偶极子阵相互作用激发二次谐波的模型,其认为当位错密度很大时,超声二次谐波幅度不仅与位错线长度和应力存在关系,而且很大程度上取决于材料微观结构位错的排列。

接触性非线性的理论研究主要集中在固体界面上的超声非线性响应。南京大学和莫斯科州立大学合作研究理想界面非线性反射,并建立了基波幅度与二次谐波幅度的关系式 [21-22]; Richardson J. M. [23] 研究了光滑界面超声波作用下由于张合状态的变化引起的超声非线性,由此在界面产生倍频分频等谐波成分,同时给出理论解释;美国西北大学 Achenbach J. D. 等人 [24] 研究了裂纹界面超声波反射问题,研究了裂纹随应力张开位移与谐波响应之间的关系;日本冈山大学 Hirose S 等人 [25] 研究了裂纹接触界面动态闭合产生远场高次谐波,并采用边界元的方法求解入射波运动引起裂纹接触面动力学问题;法国缪因大学 Gusev V 等人 [26] 研究了界面与超声波相互作用而产生的迟滞现象,对界面超声波进行了定性分析,并从数值模拟的角度给出了数值计算结果和解析解。

北京工业大学吴斌等人 [27-28] 和颜丙生等人 [29-32], 主要采用非线性超声检测技术对轻质合金(铝合金、镁合金)力学性能退化及疲劳损伤进行评价;北京交通大学税国双等人 [33-35] 主要研究材料表面损伤及材料力学性能退化;南昌航空大学陆铭慧等人 [36-37], 主要利用非线性超声高次谐波评价复合材料的粘结质量;后勤工程学院邓明

晰等人 [38-42] 主要利用非线性 Lamb 波评价材料表面的早期损伤以及焊接接头的塑性变形;哈尔滨工业大学刘斌等人 [43-44] 和万楚豪等人 [45] 利用振动声调制的方法评价复杂焊缝质量和疲劳裂纹;中国科学院声学研究所安武志等人 [46-47] 研究了声波在两个固体界面传播的非线性边界条件,建立了非线性弹簧模型,并进行数值模拟及实验验证。

非线性超声检测技术除了利用基波、二次谐波以及非线性系数评价材料的早期损伤外,基于声-弹效应的应力变化引起波速的变化的测量技术,声-弹效应对材料非线性疲劳微观裂纹敏感 [5, 48]。非线性弹性波谱方法采用非线性共振波谱法和非线性调制波谱法来评价各种材料的力学性能,例如岩石和混凝土 [49-51]。非线性调制波谱法利用一束低频声波和一束高频声波通过材料的微观缺陷调制得到混频超声信号来评价材料的早期损伤 [52-53]。非线性时间反演技术 [54] 应用于地球物理和表面缺陷检测。非线性混合技术 [55-56] 是利用输入不同频率的两束超声波,由于材料的非线性而得到差频或和频信号来评价材料的疲劳损伤及塑性变形。

2 非线性超声基本理论与分析

2.1 非线性超声纵波

二次非线性超声纵波在各向同性介质传播,其简化的一维波动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度, u 为质点位移, σ_{xx} 为 x 方向的法向应力, x 为材料的坐标, t 为传播时间。二次非线性本构方程为:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 + E_1 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} E_2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \dots \quad (2)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为二阶、三阶弹性常数。则非线性波动方程可以写为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left[1 - \beta \frac{\partial u}{\partial x} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中: β 为非线性系数, c 为介质中纵波声速。对于处于初始状态的材料, β 是晶格的非简谐分量, β_0 为材料二阶、三阶弹性常数的方程:

$$\beta_0 = - \left(\frac{3C_{11} + C_{111}}{\sigma_0 + C_{11}} \right) \quad (4)$$

式中: C_{11} 、 C_{111} 分别为二阶、三阶 Brugger 常数, σ_0 为材料的初始应力。假设超声波沿晶体的(100)方向传播,式(4)为各向同性材料的精确解。 β 取决于晶体结构和材料的对称性,单一传播模式的各种单晶材料非线性系数 β 的计算可见于相关文献 [57]。

假设超声波在平面传播,式(3)的解析解为:

$$u = A_1 \sin(kx - \omega t) + \frac{\beta A_1^2 x k^2}{8} \cos(2kx - 2\omega t) + \dots \quad (5)$$

式中: ω 为角频率, k 为波数, $k = \omega/c$, A_1 为基波幅值,式(5)第2项的系数为二次谐波的幅值,用 A_2 来表示。通过上述关系可以推导出纵波非线性系数的表达式为:

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

由(6)式可知,通过测量基波幅值、二次谐波幅值、波数及传播距离,就可以计算出纵波声学非线性系数 β 。此公式可以扩展到三维模型^[58],并且适用于 Rayleigh 波^[21]和 Lamb^[59]非线性系数的推导。对于 Rayleigh 波,二次谐波幅值 A_2 具有相同的表达式,同样通过测量接收信号的基波幅值、波数和传播距离来计算,实验表明,二次谐波幅值 A_2 与基波幅值的平方 A_1^2 成正比同样适用于 Lamb 波^[38,60-62]。

2.2 非线性超声表面波

超声表面波沿半无限空间自由表面 x 正方向传播, z 坐标指向半无限空间内部,对于弱二次非线性材料,超声表面波沿无应力表面运动, Rayleigh 波的位移可以分解为纵波分量和横波分量,以正弦波的形式表示为:

$$u_x = A_1 \left(e^{-pz} - \frac{2ps}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{i(k_R x - \omega t)} \quad (7)$$

$$u_z = iA_1 \frac{p}{k_R} \left(e^{-pz} - \frac{2k_R^2}{k_R^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{i(k_R x - \omega t)} \quad (8)$$

式中: $p^2 = k_R^2 - k_p^2$, $s^2 = k_R^2 - k_s^2$, k_R , k_p 和 k_s 分别为表面波波数、纵波波数和横波波数。在传播距离足够远,二次谐波可近似表示为:

$$u_x(2\omega) = A_2 \left(e^{-2pz} - \frac{2ps}{k_R^2 + s^2} e^{-2sz} \right) e^{i2(k_R x - \omega t)} \quad (9)$$

对于各向同性材料,由于对称性,剪切波造成的声学非线性消失,二次谐波只与超声表面波的纵波分量有关。Herrmann J 等人^[63]推导出了基于基波幅度和二次谐波幅度的声非线性系数,如下式所示:

$$\beta = \frac{\bar{u}_z(2\omega)}{u_z^2(\omega)} \frac{i8p}{k_p^2 k_R} \left(1 - \frac{2k_R^2}{k_R^2 + s^2} \right) \quad (10)$$

式中:位移符号的上划线表示试件表面 $z = 0$ 处质点的基频和倍频位移振幅值。

从式(10)可以看出,对于非线性 Rayleigh 波和非线性超声纵波, β 的大小取决于基波、二次谐波幅度以及波的传播距离。为了方便研究,可以采用相对非线性系数,它与材料的绝对非线性系数成正比。

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (11)$$

对于长距离传播的非线性 Rayleigh 波,为准确测量超声非线性系数 β ,关键在于要考虑声波的衰减^[65]及衍

射效应^[64-66]。Shull D. J. 等人^[64]等从理论和数值模拟两方面研究了非线性 Rayleigh 波的衍射效应。对于沿 y 轴高斯分布的线声源可以定义为:

$$v_0(y) = v_0 e^{-(y/a)} \quad (12)$$

式中: v_0 为声源幅度, a 为线声源的半长度。对于强制函数一次谐波速度分量表示如下:

$$v_1(x, y) = \frac{v_0 e^{-(\alpha x)} \exp\left(-\frac{(y/a)^2}{1 + ix/x_0}\right)}{\sqrt{1 + ix/x_0}} \quad (13)$$

式中: $x_0 = k_R a^2/2$ 为 Rayleigh 波传播的距离,此距离表示声源从近场到远场衍射的区域。二次谐波声速分量可以表示为:

$$v_2(x, y) = \beta_{11} v_0^2 D_R(2\omega) \quad (14)$$

式中: β_{11} 为非线性系数,在文献[64,67], $D_R(2\omega)$ 为 Rayleigh 波二次谐波传播的合成衍射系数,在文献[64]。根据式(13)和(14),图1所示为 Rayleigh 波一次谐波和二次谐波幅度随传播距离的衍射及衰减数值模拟图^[66]。图中,在 $x = 0$ 处对输入一次谐波幅值进行归一化处理,传播距离 x 为纵轴,试样或声源宽度 y 为横轴。

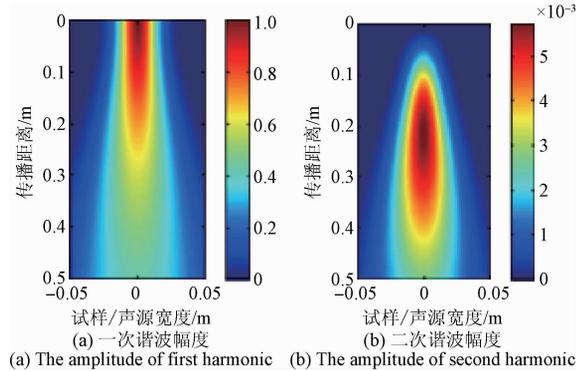


图1 谐波传播距离与试样宽度数值模拟图

Fig. 1 Numerical simulation diagram of harmonic Rayleigh wave propagation distance and sample width

二次谐波声速 $v_2(y)$ 对传播距离的依赖是不确定的,但是二次谐波在传播距离上与基波速度的平方成正比, $v_2(y) \propto v_1^2(y)$ 。对于很多金属材料^[63,68-70],在短距离传播,可以用线性的二次谐波速度进行近似,联合考虑到衰减、衍射及声源的影响因素,就可以得到更加准确的非线性系数 β 。

3 材料微观结构对超声非线性系数的影响

超声非线性系数 β 不仅取决于晶体结构,还取决于材料的局部应变。材料的局部应变来源于材料的微观结构特征,如位错、析出物,位错对超声非线性系数的影响程度超过晶格非简谐性影响。本节综述了材料不同微观结构对超声非线性系数的影响,给出了不同的理论模型,

包括位错钉扎模型^[11,71]、位错偶极子模型^[17-18]、析出物-钉扎位错模型^[72-74]以及微裂纹模型^[75-77]。

3.1 位错钉扎模型

位错运动对声非线性的贡献首先由 Suzuki T 等人^[10]提出,随后由 Hikata A 等人^[11-12]进一步拓展,此模型可以用来解释众多实验二次谐波的产生。此模型是基于 Granato A 等人^[78]提出的位错弦振动模型,认为位错弦线钉扎在两点之间,两点的距离为 $2L$,这些钉扎点可以是晶界、其他位错或者材料中的点缺陷。假设存在一个很小的非零纵向应力 σ ,其切向应力分量为 $\tau = Ra$, R 为切向分解因子,切向应力施加在位错弦上,在两个钉扎点形成外凸弓形弦,几何图形如图 2 所示, r 为曲率半径, 2θ 为弓形位错弦圆心角。施加在位错弦上的应力可以是内部残余应力,也可以是施加应力,且大小不足以位错弦脱离钉扎点。

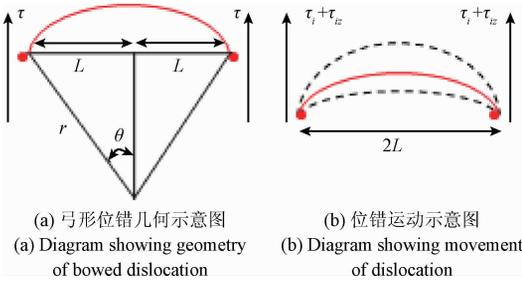


图 2 位错钉扎模型
Fig. 2 Dislocation pinning model

根据 Hikata 模型,材料总的应变为晶格应变与位错运动引起的应变之和:

$$\varepsilon = \varepsilon_l + \Omega\gamma_d \quad (15)$$

式中: ε_l 为晶格引起的应变, Ω 为切向应变与轴向应变的转换系数, γ_d 为切向应变,根据文献[11]推导,可以得到纵向应力-应变关系为:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right) \sigma + \frac{E_2}{E_1^3} \sigma^2 + \frac{4}{5} \frac{\Omega\Lambda L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \sigma^3 + \dots \quad (16)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为二阶、三阶弹性常数, Λ 为位错密度, L 为位错线长度, R 为剪应力和正应力的转换系数, μ 为剪切模量, σ 为外加应力, b 为位错伯氏矢量。当应力 σ 发生微小变化,由位错运动引起的应变对应的应力变化为:

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} (\Delta\varepsilon) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2\sigma}{\partial\varepsilon^2} (\Delta\varepsilon)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3\sigma}{\partial\varepsilon^3} (\Delta\varepsilon)^3 + \dots = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right]^{-1} (\Delta\varepsilon) - \left(\frac{E_2}{E_1^3} + \frac{12}{5} \frac{\Omega\Lambda L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \sigma \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right)^3 (\Delta\varepsilon)^2 + \dots \quad (17)$$

将式(17)和非线性应力-应变关系式 $\sigma = A\varepsilon + 1/$

$2B\varepsilon^2$ 得到系数 A 、 B 的关系式:

$$A = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right]^{-1} \quad (18)$$

$$B = - \left[2 \left(\frac{E_2}{E_1^3} + \frac{12}{5} \frac{\Omega\Lambda L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \sigma \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right)^3 \right] \quad (19)$$

将上述系数关系式代入二次谐波幅度关系式 $A_2 = 1/8(B/A)(A_1 k)^2 x$ 得二次谐波幅度为:

$$A_2 = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{E_2}{E_1^3} + \frac{12}{5} \frac{\Omega\Lambda L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \sigma \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{2}{3} \frac{\Omega\Lambda L^2 R}{\mu} \right)^3 \right] (A_1 k)^2 x \quad (20)$$

式(20)没有考虑由于位错引起基波以及高次谐波的衰减,考虑基波衰减 α_1 和二次谐波衰减 α_2 ,用 $(e_1^{-2\alpha x} - e_2^{-\alpha x}) / (\alpha_2 - 2\alpha_1)$ 代替式(20)的 x ,相对于 $1/E_1$,式(20)中 $2\Omega\Lambda L^2 R/3\mu$ 可以忽略不计,二次谐波幅度可以简化为:

$$A_2 = \frac{1}{4} \left[\frac{E_2}{E_1} + \frac{12}{5} \frac{\Omega\Lambda E_1^2 L^4 R^3}{\mu^3 b^2} \sigma \right] (A_1 k)^2 \cdot \frac{e^{-2\alpha_1 x} - e^{-\alpha_2 x}}{\alpha_2 - 2\alpha_1} \quad (21)$$

由式(21)可知二次谐波的产生依赖应力作用下位错钉扎点之间单个位错的运动,二次谐波幅度与应力、位错密度和位错线长度 4 次方成正比, E_2/E_1 代表晶格不对称对二次谐波幅度的贡献, $12\Omega\Lambda E_1^2 L^4 R^3/5\mu^3 b^2$ 代表位错位移对二次谐波幅度的贡献。

随着材料疲劳加深,位错结构会出现位错偶极子以及多极子的复杂分布,位错偶对于声非线性的贡献可以由下式表示^[17-20]:

$$\Delta\beta_{dp} = \frac{16\pi^2 \Omega R^2 \Lambda_{dp} h^3 (1-\nu)^2 C_{11}^2}{\mu^2 b} \quad (22)$$

式中: Λ_{dp} 为位错偶的密度, h 为位错偶极子的距离。由式(22)可知超声非线性系数与位错偶极子的密度 Λ_{dp} 及位错偶极子的距离 h 成正比。

Cantrell J. H.^[16,18,76,79] 推导出了由于位错、位错偶以及不同基体结构由于金属滑移引起总的非线性系数为:

$$\beta = \frac{\beta^e + f^{mp}\beta^{mp} + f^{dp}\beta^{dp}}{(1 + f^{mp}\Gamma^{mp} + f^{dp}\Gamma^{dp})^2} \quad (23)$$

式中: f^{mp} 、 f^{dp} 分别为位错单极子、位错偶极子的数量, $f^{mp}\beta^{mp}$ 和 $f^{dp}\beta^{dp}$ 取决于具体的 β 和 f 参量, Γ 取决于位错以及材料参数^[18]。

3.2 析出物-位错钉扎模型

析出物本身对非线性系数 β 的没有显著影响^[72],但是析出物与位错的相互作用对非线性系数影响具有显著提高^[72-74],析出物嵌入在基体周围会产生局部应力,此应力会施加在钉扎位错线上。半径为 r_p 的析出物嵌入在基体上,基体的自然半径为 r_a ,其关系为 $r_p = r_a(1 + \delta)$, δ

为析出物与基体晶格失配参数,如图3所示。析出物可以近似为球型嵌入各向同性的基体介质中,施加内部压力 p_0 在晶格上^[18],当 $r > r_a$ 时,晶格四周应力为 $\sigma_{rr}(r)$:

$$\sigma_{rr}(r) = -p_0 r_p^3 / r^3 \quad (24)$$

假设析出物和基体弹性特性不同,由于析出物基体在半径 r 处的应力为:

$$\sigma_{rr}(r) = -4\mu\delta \left[\frac{3B_p}{3B_p + 4\mu} \right] \frac{r_p^3}{r^3} \quad (25)$$

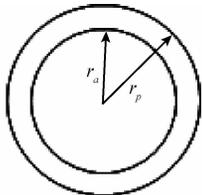
式中: B_p 为体积模量。如图3(b)所示,析出物-位错钉扎模型^[80]对超声非线性的贡献如下式所示^[74]:

$$\Delta\beta_{ppd} = \frac{1536}{5} \frac{\Omega R^3 C_{11}^2}{\mu^3 b^2} \left[\frac{3B_p}{3B_p + 4\mu} \right] (\Lambda L r_p^3 |\delta|) \quad (26)$$

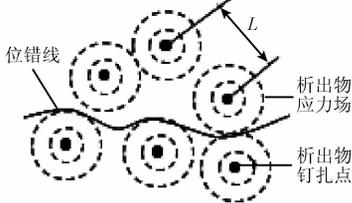
析出物的间距 L 与析出物的数量密度 N_p 关系为 $L \propto N_p^{-1/3}$, N_p 与析出物体积分数 f_p 关系为 $f_p = N_p V_p$,其中 $V_p = 4\pi r^3/3$ 为析出物的平均体积。通过简单替换, $\Delta\beta_{ppd}$ 可以写成析出物体积分数或者数量密度形式,析出物-位错钉扎模型对非线性系数影响可以简化为:

$$\Delta\beta_{ppd} \propto \frac{\Lambda r_p^3 |\delta|}{N_p^{1/3}} \quad (27)$$

$$\Delta\beta_{ppd} \propto \Lambda r_p^3 |\delta| \left(\frac{r_p^3}{f_p} \right)^{1/3} \quad (28)$$



(a) 析出物附着在半径为 r_a 的基体上半径变为 r_p
(a) Diagram of precipitate with radius of r_p embedded in a matrix with radius of r_a



(b) 位错围绕析出物分布图^[80]
(b) A dislocation bending around a distribution

图3 析出物位错钉扎模型

Fig. 3 Precipitate dislocation pinning model

3.3 微观裂纹

Hirose S 等人^[25]采用边界元的方法研究了裂纹接触面产生高次谐波的应力方程;Nazarov V. E. 等人^[77]推导出带有规律分布、形状和方向随机裂纹的弹性固体非线性系数。假设裂纹面是弹性粗糙接触,非线性来源于这种粗糙接触的非线性应力-应变关系。Cantrell J. H. ^[76]

随后利用这一模型确定了疲劳裂纹对非线性的贡献,并且取决于疲劳过程参量和疲劳程度。

首先认为单个裂纹体积的变化是由于粗糙裂纹表面产生的弹性变形,由于单个裂纹的体积变化,可以来评价整个固体的平均应变。假设每个裂纹的变形是恒定的,就可以得到轴向应力与平均应变的关系,如下式所示:

$$\sigma = E\alpha[\varepsilon - (\beta/2)\varepsilon^2 - (\delta/6)\varepsilon^3] \quad (29)$$

式中: $\alpha = (1 + aN_0/5)^{-1}$, $\beta = bN_0\alpha_1^2/7$, $\delta = cN_0\alpha_1^3 [1 - 27\alpha_1 b^2 N_0/49c]/9$, E 为弹性模量, N_0 为裂纹密度, a 、 b 、 c 为法向应力变化泰勒展开式的系数,这些系数取决于裂纹粗糙峰的分析,通过超声波在裂纹上的微小变化就可以确定这些系数^[77]。相关文献^[76,81-82]表明接触裂纹引起的非线性的数量级要比金属疲劳使晶体产生位错引起的非线性数量级要高。

4 非线性超声检测系统的发展

由于Lamb波和板波在检测时存在复杂的模式转换及频散现象,此节只讨论采用超声纵波和表面波的方法测量超声非线性参量。

4.1 非线性超声纵波检测方法

采用超声纵波测量非线性系数 β 传感器可以是接触式压电换能器^[83-88]、电容式换能器^[89-95]和激光干涉检测仪^[74,92,96-97]。在测量基波和二次谐波绝对位移幅度时,采用超声纵波,换能器可以采用接触式压电换能器^[98-99],也可以采用电容式传感器^[8,91]。

4.1.1 压电方法(非线性参数的相对幅值测量)

通过研究可知,在实际检测中非线性系数 β 作为相对参数,在原位测量中通常采用 A_1 和 A_2 的相对幅值来代替一次和二次谐波的绝对物理位移。在相对非线性系数测量时,通常测量一次、二次谐波的电压值,相对超声非线性系数如下:

$$\beta' = \frac{A_2^v}{(A_1^v)^2} \frac{8}{xk^2} \quad (30)$$

在实际测量中,通过改变输入幅度,测量一次谐波和二次谐波的幅度,计算 $(A_1^v)^2$ 和 A_2^v 拟合直线的斜率 $(A_2^v \propto (A_1^v)^2)$,即为相对非线性系数。

非线性超声波测量实验装置示意图如图4所示。需要注意的是,选用轻油作为耦合剂可以使耦合产生的非线性最小^[100]。Liu S 等人^[101]研究表明,换能器低水平耦合力2~5 N可以产生一致的二次谐波信号。在实际测量中,发射、接收换能器要求严格对齐,特别是波长小于1 mm的声波,微小错位都会导致接收信号幅度的精度。发射换能器的激发频率通常选择1~5 MHz,发射换能器中心频率在一次谐波频率附近,接收换能器的中心频率在二次谐波附近,接收换能器同时接收一次、二次谐波信

号,同时要调整接收换能器到二次谐波频率,因为二次谐波幅度要比一次谐波幅度小很多。

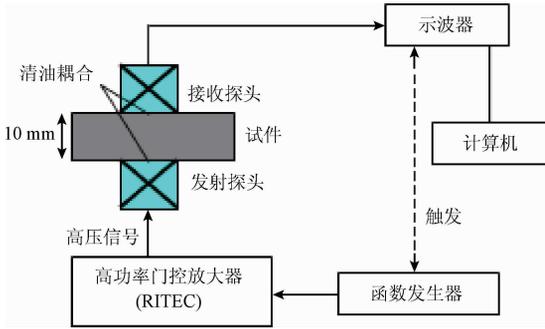


图4 非线性超声波测量实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the nonlinear ultrasonic measurement experiment equipment

4.1.2 压电方法(非线性参数的绝对幅值测量)

基于接触式压电换能器互相校准机理,可以通过测量基波、二次谐波幅度来实现超声非线性系数β的绝对测量。此方法最先由 Dace G. E. 等人^[98-99]提出,并在后续研究工作得到应用^[84,92,93]。测量过程中,校准的目的是通过测量无应力试件底波电压和电流信号来计算接收换能器频率传递函数 H(ω),位移和电流信号关系如下式所示:

$$A(\omega) = H(\omega)I'(\omega) \tag{31}$$

式中:A(ω)、I'(ω)分别为非线性测量中位移幅度信号和电流信号大小。频率传递函数可以定义为:

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{I_{in}(\omega)V_{out}(\omega)/I_{out}(\omega) + V_{in}(\omega)}{2\omega^2\rho c_L a I_{out}(\omega)}} \tag{32}$$

式中:I_{in}、I_{out}、V_{in}、V_{out}分别为校准测量中输入和输出电流、电压信号,ρ为材料密度,c_L为纵波声速,a为超声换能器半径。图5所示为 Barnard D. J. 等人^[93]搭建的绝对非线性系数实验装置框图。

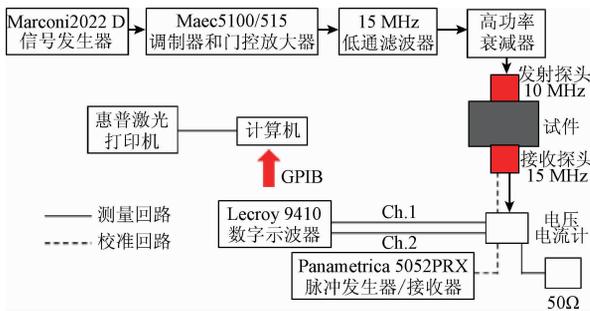


图5 压电换能器测量绝对非线性系数β和校准二次谐波实验装置框图

Fig.5 Block diagram of the experiment equipment for the measurement of absolute nonlinear coefficient β and second harmonic calibration using piezoelectric transducer

4.1.3 电容方法测量非线性参数

Gauster W. B. 等人^[90]首次开展电容式接收换能器测量二次谐波,这种方法在后续的研究中广泛使用^[94,102]包括 Cantrell J. H. 等人^[16-17]和 Yost W. T. 等人^[95]的研究。其基本原理为发射换能器固定在试块一侧发射正弦波脉冲信号,超声波穿过试块,接收电容换能器位于试块的另一侧接收信号,接收换能器与试块保持微小间距,约为 1~10 μm,试块作为电容换能器的一个电容板,收到超声波的冲击,试块和电容换能器的间距随时间发生变化。这种检测系统灵敏度高达 10⁻¹⁶ m,检测一次、二次谐波位移幅度更为有效。一次、二次谐波位移幅度 A(ω)如下式所示:

$$A(\omega) = \frac{dV_0(\omega)}{2V_b} \tag{33}$$

式中:d为电容接收换能器与试块的间距,V₀为输出电压,V_b为直流偏置电压^[102]。角频率为 ω₁和 ω₂时采用带通滤波器,在示波器上测量输出电压 V₀,式(33)中的数字2表示由于反射引起的两倍位移。采用电容式换能器检测二次谐波实验装置框图^[92]如图6所示。

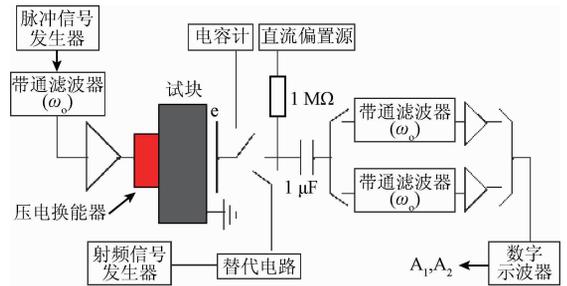


图6 电容式换能器检测二次谐波实验装置框图

Fig.6 Block diagram of the experiment equipment for the second harmonic measurement using capacitive transducer

4.1.4 激光方法测量非线性参数

基于激光超声测量二次谐波的非线性检测方法具有独特的优势,具有测量绝对点位移的能力。德国海德堡大学 Hess D 等人^[103]采用激光的方法激发非线性超声导波,美国约翰霍普金斯大学 Green R. E. ^[104]综述了非接触超声检测技术。Moreau A^[96]和美国国家标准与技术研究所 Hurley D. C. 等人^[92]分别采用外差激光干涉仪和迈克尔逊干涉仪超声非线性系数β,测量结果与文献值一致。美国空军研究实验室 Blackshire J. L. 等人^[105]采用外差激光干涉仪评价 Al2024-T3 试样的疲劳损伤,并且采用声表面波对基波、谐波的位移场进行二维成像,佐治亚理工学院 Herrmann J 同样采用外差激光干涉仪对镍基超强合金进行超声表面波的二次谐波检测。激光检测技术同样被应用于振动声学测量^[106-108]。需要注意的是

激光检测器的信号比较微弱,为了得到可用的二次谐波信号,需要对激光检测信号进行仔细的调制。

4.2 非线性超声表面波检测方法

基于超声表面波测量超声非线性参数,不仅可以减少耦合效应和发生声源的源效应,而且可以消除不同激发电压引起的非线性,因此,采用超声表面波检测超声非线性参量得到了国内外研究者的广泛关注,检测方法包括斜楔接触激发或接收法^[33-34,63,69-70,109-112]、激光干涉仪检测法^[33,63,105]、空气耦合检测法^[68]、梳形换能器检测法^[65]、电磁超声法^[113-114]。

4.2.1 斜楔法

斜楔接触法是利用换能器和试件之间的斜楔来满足相位匹配条件,斜楔材料通常为有机玻璃,换能器固定在一定角度的斜楔上激发超声表面波,根据 Snell 定律,斜楔的角度 θ_w 满足下式:

$$\sin\theta_w = \frac{c_l}{c_R} \quad (34)$$

式中: c_l 为斜楔中的纵波声速, c_R 为试样中的表面波声速。斜楔接触法的关键点在于换能器与斜楔、斜楔与试块之间耦合是否良好,这是声源散射的主要来源。斜楔接触法激发超声表面波检测超声非线性参数实验装置框图如图 7 所示。

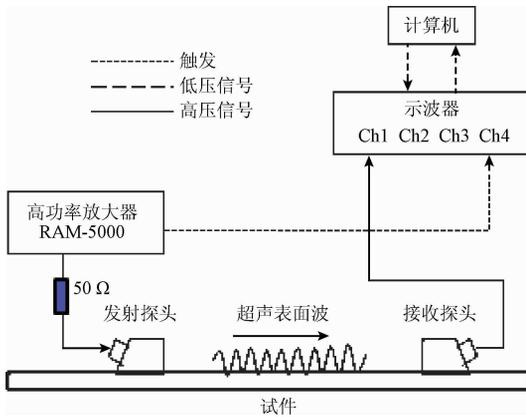


图 7 非线性超声表面波检测实验装置框图

Fig. 7 Block diagram of the experiment equipment for nonlinear ultrasonic surface wave measurement

4.2.2 空气耦合检测

采用空气耦合换能器进行超声检测已经发展了很多年。早在 1995 年 Grandia W. A. 等人^[115]对空气耦合超声换能器在无损检测评价中的应用进行了综述;Castaings M 等人^[116]采用空气耦合超声换能器在板中激发、传播和接收 Lamb 波;Wright W 等人^[117]采用激光激发换能器和压电空气耦合换能器进行超声成像检测,空气耦合超声换能器还应用于混凝土以及铝板缺陷的检测^[118-119]。空气耦合超声换能器在近几年同样应用于二次谐波的检

测^[68,120]。空气耦合超声换能器的优点在于消除了检测接收端接触条件的变化因素,接收换能器能够接收到由试件中超声表面波转换为空气中的纵波,并且通过超声表面波板外位移与空气纵波位移的相关性确定接收纵波的大小。空气耦合超声检测系统框图如图 8 所示,空气耦合接收探头到试件表面的距离为 z , z 的大小定义为空气耦合探头激发区域的中心点到试件表面的距离,此距离要尽可能地小并且保持不变,目的是减少空气的衰减和散射,为了保持接收探头在检测时到试件表面距离不变,需要专用夹具固定接收探头。

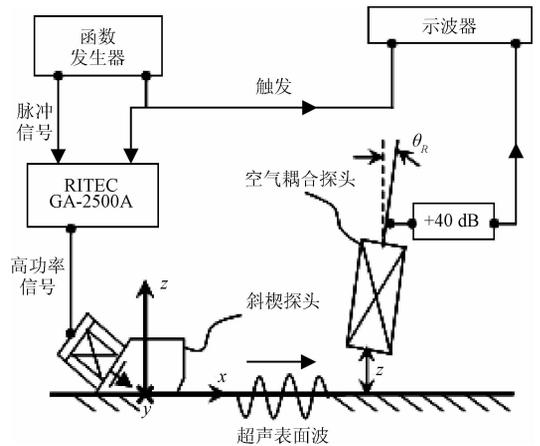


图 8 空气耦合接收超声检测系统框图

Fig. 8 Block diagram of the ultrasonic detection system using non-contact air-coupled receiver

5 非线性超声检测技术与应用

非线性超声作为一种超声无损检测评价与技术,其在材料早期损伤检测与评价中具有传统超声无法比拟的优势和检测能力,随着非线性超声检测机理和检测方法的深入研究,非线性超声检测技术在材料早期损伤的检测与评价中得到广泛应用。

从检测对象来讲,除材料早期损伤类型外,非线性超声检测技术还用于材料表面涂层^[34]、复合材料胶结质量^[36,46,123]、焊缝质量^[40,44]、固体界面性质^[47,75,81,136]、材料力学性能退化^[27,32]、晶体结构对称性^[57]的无损检测。上述研究进一步拓展了非线性超声检测技术的应用范围,促进非线性检测技术的进一步发展具有重要意义。

从检测方法来讲,超声导波技术也是近年来研究的热点。目前国内外学者在不同波导结构中的导波检测方面做了大量卓有成效的研究,将非线性超声检测技术与超声导波检测技术结合起来用于材料早期损伤会起到优势互补的作用。与传统超声检测技术相比,导波检测技术是一种高效快速的无损检测与评价技术和结构健康监

测技术,在工业基础设施中具有广阔的应用前景。目前基于非线性超声导波技术^[103]及非线性 Lamb 波检测技术^[38-39,41-42,60,62]已经应用于材料早期损伤监测。

5.1 闭合裂纹检测

在材料早期损伤中,闭合微裂纹是材料早期损伤的常见形式,广泛存在于各种工况下的材料或者构件。闭合裂纹的超声非线性检测响应属于接触非线性的范畴,闭合裂纹是相对开口裂纹而言,闭合裂纹的表面是相互接触压紧或机械啮合,采用有限幅度超声波检测闭合裂纹时,只要检测超声波的幅度大于闭合裂纹的闭合力,就可以引起闭合裂纹的非线性响应,从而产生二次谐波、高次谐波以及分谐波,而且超声波由于闭合裂纹而产生的非线性响应谐波幅度比经典非线性产生的谐波幅度要高,所以通常采用非线性超声谐波来评价材料闭合微裂纹,高次谐波的幅度和阶次包含着被检闭合裂纹属性的丰富信息,是非线性超声检测闭合微裂纹时主要利用的特征信号。

对于材料早期损伤的闭合微裂纹,常规超声检测已无能为力,为了解决这一难题,采用非线性超声检测闭合微裂纹成为超声检测的研究热点之一。早在 1982 年 Achenbach J. D. 等人^[24]研究了裂纹面相互作用而引起线性超声反射的衰减,研究了裂纹随应力张开位移与谐波响应之间的关系;Hirose S 等人^[25]研究了裂纹面动态相互作用而产生远场高次谐波,并且将远场散射的高次谐波傅里叶变换幅度作为预应力函数;俄罗斯科学院应用物理研究所的 Nazarov V. E. 等人^[77]采用非线性超声测定带有闭合裂纹固体的非线性弹性常数,研究表明,裂纹的存在会使非线性参数发生剧烈变化,非线性超声对裂纹的敏感程度比传统超声高的多;清华大学陈斌^[2]采用非线性超声对闭合裂纹的检测做了深入的研究;美国佐治亚理工学院 Kim Y. J. 等人^[81]提出了将两种固体界面弹塑性接触的微机械模型,采用此模型预测加载-卸载循环下的超声线性及非线性界面刚度,并且用闭合裂纹模型与超声波的相互作用来评价固体接触界面质量。

近几年来,基于非线性超声技术检测闭合裂纹成为国内外学者研究的重点和热点,基于非线性超声技术的检测方法日趋丰富。Cobb A 等人^[114]等人基于电磁超声检测技术对预制疲劳裂纹进行非线性超声检测;Blanloeuil P 等人^[121]基于有限元数值模拟的非共线混合法对闭合裂纹的位置和大小进行检测,Blanloeuil P 等人^[122]同样基于有限元方法对超声波在闭合裂纹处的远场散射的非线性进行数值模拟;Singh A. K. 等人^[123]采用基于有限元模拟非线性超声对复合材料的闭合层进行检测;Ohara Y 等人^[124]采用谐波相控方法对应力腐蚀闭合裂纹的深度进行检测;Ouchi A 等人^[125]采用谐波相控阵线性阵列对闭合裂纹进行长度成像评价;Yun D 等人^[126]

采用合成孔径技术和短时傅里叶变换对固体接触界面进行非线性超声 B 扫描成像;Blanloeuil P 等人^[127]采用基于基波和二次谐波散射的时间反演技术对闭合裂纹进行成像;武汉大学的 Zhang W 等人^[128]同样采用时间反演技术对金属板中的裂纹损伤进行非线性超声检测;Mezil S 等人^[129]采用非线性混频激光超声对裂纹参量进行评价;武汉大学的 Wu W 等人^[130]采用超声谐波对带有非线性边界条件的疲劳裂纹损伤进行评价,得出疲劳裂纹和边界产生的谐波信号频率范围不同。

Dziedzic K 等人^[131]等采用由于低频振动而产生高频波包与裂纹之间相互作用的变化评价铝棒中疲劳微裂纹,采用数值模拟对裂纹进行 B 扫描成像;Oberhardt T 等人^[132]等提出基于接触力的部分闭合随机分布表面微裂纹模型,并采用有限元进行数值模拟,研究表明,对于小密度裂纹,超声非线性系数与裂纹密度成正比,非线性系数随裂纹密度增加而增加,微观力学模型预测与有限元模拟结果吻合;西南交通大学的 Zhao Y 等人^[133]采用同样的模型得出的结论与 Oberhardt T 结论一致,而且得出超声非线性系数不仅与裂纹密度成正比例关系,而且还取决于超声波波动频率和裂纹面的摩擦系数;Li N 等人^[134]团队提出了非线性超声相位阈值与微裂纹评价的数值模拟方法,选择合适的相位阈值范围可以提高非线性超声参量与裂纹长度的可靠性,此方法适合于评价裂纹长度小于 5 mm 的小裂纹;Oraczewski T 等人^[135]提出了基于无线移动传感平台的非线性声学结构健康监测技术,并采用非线性振动声波调制技术对铝板疲劳裂纹进行检测,完成技术概念验证。

综上所述,非线性超声检测技术很好解决了闭合微小裂纹检测的难题,适合检测处于闭合状态下的微裂纹,对传统超声检测裂纹缺陷进行了有力的补充,但是没有进行大规模工程应用,检测系统没有实现国产化,非线性超声谐波信号微弱,信号处理和拾取难度大,目前仍处于实验室研究阶段。

5.2 疲劳-位错早期损伤监、检测

采用超声无损检测对材料早期损伤的评价是材料评价的难点和热点,疲劳、位错等力学性能退化与非线性超声谐波信号存在很强的关联性,所以采用非线性超声检测疲劳损伤成为研究者的研究重点。Morris W. L. ^[112]和 Buck O 等人^[136]最早提出疲劳对谐波产生的贡献。随后又发展了位错运动、位错亚结构以及位错偶极子对非线性系数的贡献^[17]。Cantrell J. H. 等人^[76]提出了基于综合考虑晶体的非简谐性、位错单极子、位错偶极子以及它们的亚结构包括疲劳损伤对超声非线性系数 β 幅度影响的综合理论模型。这些与超声非线性系数 β 相关的模型在波状滑动金属(如多晶镍^[18]、Al2024^[76]、410Cb 马氏体不锈钢^[137])以及平面滑动金属^[79](如镍基高强合金)

得了到验证。

从检测材料来讲,基于不同材料和不同波型的非线性超声谐波检测早期疲劳损伤开展了大量的实验工作,如在铝合金^[17,76,111,112,138]、镍基高强合金^[63,79,84]、碳钢^[69,113,139]、不锈钢^[140]、钛合金^[87,105,109]、铬镍铁合金^[109]、单晶铜^[116]等金属构件开展早期疲劳损伤评价,大量实验表明:随着疲劳周次的增加和塑性应变的累积,超声非线性系数也随之增加^[16,84,87,140]。在材料的早期损伤阶段中,超声非线性参数对疲劳敏感程度比超声线性参数(如波速、衰减)要高^[87]。

从位错形成机理来讲,疲劳是形成位错早期损伤的原因之一,材料的冷加工也会形成大量的位错并伴随残余应力的产生,研究表明,超声非线性系数与冷加工程度成正相关关系,在冷加工过程(比如冷轧)会形成大量位错以及位错亚结构^[83]。由于材料表面喷丸硬化的冷加工和残余应力,形成大量位错,也会导致超声非线性系数 β 的增加^[110]。超声非线性系数 β 测量与淬火马氏体钢中碳含量的增加有关^[141],可以用 Hikata 模型^[11]来解释,碳含量的增加会导致位错数量的增加。材料(AZ3镁铝合金^[142]以及镍基高强合金^[63])在单调载荷的作用下,超声非线性系数增加,而且在施加应力的初始阶段超声非线性系数增加的更高,可以通过微塑性模型^[143]来解释超声非线性系数的变化。

目前能够对材料疲劳-位错早期损伤具备监、检测能力的检测技术是非线性超声检测技术和金属磁记忆检测技术,金属磁记忆检测技术只能应用于铁磁性材料,而且其检测机理还未研究清楚,而超声非线性检测技术适用材料范围广泛,检测机理明确,能够对材料疲劳-位错早期损伤进行定量监、检测,不足在于检测系统没有实现国产化,没有进行大规模的工程应用。

5.3 材料热老化监、检测

材料的热老化会显著影响材料的微观结构,例如析出物、空穴以及空隙,进而影响超声非线性系数,所以非线性超声在实际应用的关键材料或者构件由于温度升高而产生过时效以及脆化方面具有很大的应用前景。Yost W. T. 等人^[138]最先提出采用二次谐波来检测热老化而使材料产生析出物,实验表明,当 Al-2024 的热处理温度从 T4 升高到 T6 时,超声非线性系数 β 增加了 10%,同时指出疲劳对超声非线性系数的影响要比析出物的影响大,但是析出物会严重影响疲劳过程中的位错结构以及它们之间的相互作用。对于两种材料而言,引起超声非线性系数的差异原因在于热处理形成相以及晶粒结构的差异。Cantrell J. H. 等人^[144]提出了超声非线性系数变化与晶格应变一致性的理论模型,实验结果表明超声非线性系数正比于析出物的体积分数以及晶格中析出物的有效错配,此模型在相关文献也获得了证明^[72]; Ruiz A 等

人^[70]研究了 2205 双相不锈钢热损伤对超声非线性系数的影响,结果表明超声非线性系数对热损伤的敏感度要比线性参量大,超声非线性系数在初始老化时间先增加后减小,并且随老化时间增加而再次增加,通过扫描电镜分析,超声非线性系数的变化归因于随着老化时间的增加材料中形成更多的 σ 相。

从检测材料来讲,对于材料因热老化引起材料力学性能的退化,非线性超声检测技术已经应用于铝合金^[72-73,138,144]、铬镍铁合金^[93,145]、钛合金^[146-147]、铁素体钢^[74,148-149]、不锈钢^[70]以及马氏体时效钢^[88,150]的热老化的评价。

采用非线性超声二次谐波技术能够对材料因热老化导致微观组织的变化进行评价,但是不同试样在微观结构上存在纹理及晶粒取向的差异,这些差异会影响超声非线性系数。其次是材料的微观结构特征(如析出物形成)和宏观损伤(如热老化引起材料的脆化)都与超声非线性系数测量息息相关,不同的微观结构特征会引起相同类型材料性能退化,但是要注意超声非线性系数对材料的微观结构特征敏感,这一点不能忽视。将非线性超声检测技术应用于材料热老化监、检测具有很好的应用前景,特别是处于高温运行状态下的构件,需要解决的问题是能够与结构健康检测结合起来,对在役构件实时检测,难点在于监测数据的分析,重点是关键设备和传感器的研制和国产化。

5.4 蠕变损伤和辐射损伤检测

材料在发生蠕变时会形成大量的位错、析出物以及空隙,这是材料非线性的主要来源之一,基于此非线性超声二次谐波检测技术已经用于蠕变损伤的检测。Baby S 等人^[146]采用非线性超声检测遭受蠕变损伤的钛合金材料,结果表明,在蠕变寿命到达 60% 时,超声非线性系数 β 增加,之后再减小,通过光学显微镜观察得知, β 增加的原因是微孔体积分数的增加, β 减小的原因是由于大量微孔聚集造成损伤尺寸的增大; Valluri J. S. 等人^[151]和 Narayana V. J. S. 等人^[152]研究在高激励振幅作用下检测遭受连续和断续蠕变损伤纯铜的二次、三次谐波幅度,检测结果表明三次谐波对蠕变损伤更敏感; Kim C. S. ^[153]对经受高温蠕变的 IN738 镍基高强合金的超声非线性系数 β 进行测定,结果表明在不同静载条件下,随着试件疲劳寿命的增加, β 单调递增,但是没有给出超声非线性系数的测量误差; Park J 等人^[154]对超-超临界火电厂涡轮转子的长时高温蠕变损伤进行检测,研究表明位错密度和第二相的分布包括亚晶的转换、Laves 相产生都和超声非线性系数 β 密切相关,材料在长期蠕变损伤中超声非线性系数 β 变化高达 300%。

早在 1965 年 Breazeale M. A. 等人^[7]采用二次谐波对受中子辐射的单晶铜进行检测。目前已经采用二次谐波

技术对结构材料中的辐射损伤进行监测^[85-86],结果表明,由于材料受到中子的轰击,会使超声非线性二次谐波振幅减小和信号衰减,并且认为出现这种情况是由于材料受到辐射致使位错钉扎或者固定。目前研究工作集中在由于辐射而引起材料脆化^[85-86],认为引起原子反应堆压力容器产生脆化的原因是析出相、位错以及微小缺陷等微观结构特征的出现。Cash W. D. 等人^[14]等认为单晶铜受到中子辐射后,由于位错偶极子的减少致使超声非线性系数 β 降低,此原因不适用于原子反应堆压力容器的情况。研究表明,增加中子辐射通量、改变辐射温度以及材料组织成分的差异都会引起原子反应堆压力容器钢材微观结构发生变化,进而影响超声非线性系数。

传统超声检测技术对于蠕变损伤和辐射损伤无能为力,非线性超声检测技术对此提供了有力的技术补充,由于受到被检对象的特殊性—高温、核辐射,这就需要检测能在自动化、非接触的条件下进行,并且能够实时监测,这些目前都不具备,需要在仪器研制和软件开发方面集智攻关,解决实际工程应用的难题。

6 非线性超声检测技术的机遇和挑战

非线性超声检测技术具备检测宏观裂纹萌生之前材料微观结构变化的能力,基于此超声检测技术已经从宏观缺陷损伤的检测与评价向材料早期微观损伤的监测与评价的技术方向扩展和迁徙。

本文查阅了自1956年以来非线性超声检测技术的相关文献,详尽梳理了非线性超声检测技术在材料早期损伤的发展历程,总结分析了非线性超声纵波、表面波检测的数学模型和检测系统,分析了超声非线性系数的微观影响因素,综述了非线性超声检测技术在材料早期损伤监测与评价的典型应用。虽然非线性超声检测技术日趋成熟,但是仍然在由实验检测到实际工程应用面临诸多挑战。

1) 加强非线性超声检测技术的机理研究,研究超声波在非连续介质传播时的相互作用机理,在实际检测系统中,要充分考虑检测装置、耦合界面、被检试件以及材料的微观组织对非线性超声造成的散射,如果处理不当,谐波信号将会淹没在噪声信号而无法提取。

2) 为了克服耦合剂引入的非线性问题,加大空气耦合超声、激光超声以及电磁超声方面的研究,将非接触超声检测技术与非线性超声检测技术结合起来克服耦合剂引入的非线性,但是要考虑到空气对超声波带来的衰减。

3) 超声检测发展的趋势就是可视化,图像化,将相控阵技术、B扫描技术、C扫描技术等成像技术与非线性超声检测技术结合,将会对超声非线性检测技术应用于工程实践奠定基础。

4) 非线性超声检测技术目前处于实验室控制下的材料微观结构损伤检测与评价,如何将其应用于实际在线、在役构件或材料的原位检测,需要建立非线性系数 β 的测量基准,所以构建非线性超声检测校准系统是必不可少的。

5) 考虑环境因素对非线性超声检测技术的鲁棒性至关重要,实验室的检测实验条件十分严格,但是实际工程应用中诸如温度、湿度、机械振动、冲击等非缺陷的非线性影响是限制非线性超声检测技术现场应用的重要因素。

6) 重要构件和材料的结构健康监测与预警是无损检测技术发展的方向之一^[155],如何将非线性超声检测技术^[156]与大数据结合,应用于重要构件和材料的全寿命、全时态的结构健康监测,是非线性超声检测技术的发展方向之一。基于大数据和云计算管理平台实现重要构件和材料早期损伤在线监测以及历史数据的融合分析与数据挖掘,准确评估构件完整性、预测构件和材料的剩余寿命,从而提高重要构件和材料在役的安全性和可靠性。

7) 如何采用无损检测的方法评价材料力学性能指标及力学性能指标退化是无损检测技术发展的方向之一,通过建立材料微观组织-宏观力学性能指标-非线性超声检测参量之间非线性或者线性映射关系,在满足工程误差要求的条件下,选择合适的拟合数学模型,实现对材料宏观力学性能指标的定量预测。

8) 目前国内开展非线性超声检测技术研究的科研机构不多,非线性超声检测技术能否在工业实践进行应用,基础技术研究、检测系统工程化、人才培养、检测标准与规范建立将成为科研机构亟待解决的问题之一。

非线性超声检测技术经过60多年的逐步发展和应用,在材料早期损伤检测与评价中起着不可替代的作用,可以预见在未来构件和材料早期损伤评价中将由实验室检测走向实际工程应用,由单一的早期损伤检测与评价向集合多种检测手段的信息融合与数据挖掘的结构健康监测方向发展,由单纯依靠非线性参量为判断依据向成像方向发展,由间歇性周期检测向全寿命、全时段、全使役实时远程健康诊断方向发展,上述目标的实现,将是今后很长一段时间内无损检测科技工作者面临的机遇和挑战。

参考文献

- [1] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
SHI K R. Advanced techniques NDT&E [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [2] 陈斌. 金属材料闭合裂纹和疲劳损伤的非线性超声检测技术研究[D]. 北京:清华大学, 2006.
CHEN B. Research on nonlinear ultrasonic testing of

- closed cracks and fatigue damage in metal materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [3] 钱祖文. 非线性声学[M]. 北京:科学出版社, 2009. QIAN W Z. Nonlinear acoustic [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [4] MATLACK K H, KIM J Y, JACOBS L J, et al. Review of second harmonic generation measurement techniques for material state determination in metals[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015, 34(1):1-23.
- [5] CANTRELL J H. Fundamentals and applications of nonlinear ultrasonic nondestructive evaluation [M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [6] BREAZEALE M A, THOMPSON D O. Finite-amplitude ultrasonic waves in aluminum [J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 3(5):77-78.
- [7] BREAZEALE M A, FORD J. Ultrasonic studies of the nonlinear behavior of solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(11):3486-3490.
- [8] BREAZEALE M A, PHILIP J. Determination of third-order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements [J]. *Physics Acoustic*, 1984, 17:1-60.
- [9] YOST W T, BREAZEALE M A. Adiabatic third-order elastic constants of fused silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(4):1909-1910.
- [10] SUZUKI T, HIKATA A, ELBAUM C. An harmonicity due to glide motion of dislocations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1964, 35(9):2761-2766.
- [11] HIKATA A, CHICK B B, ELBAUM C. Dislocation contribution to the second harmonic generation of ultrasonic waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(1):229-236.
- [12] HIKATA A, ELBAUM C. Generation of ultrasonic second and third harmonics due to dislocations. I [J]. *Physical Review*, 1966, 151(2):442-449.
- [13] BUCK O. Nonlinear acoustic properties of structural materials-A review [M]. Springer US: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1990: 1677-1684.
- [14] CASH W D, CAI W. Dislocation contribution to acoustic nonlinearity: The effect of orientation-dependent line energy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(1): 014915-014915-10.
- [15] ZHANG J F, XUAN F ZH, XIANG Y X. Dislocation characterization in cold rolled stainless steel using nonlinear ultrasonic techniques: A comprehensive model[J]. *Europhysics Letters*, 2013, 103 (6): 613-616.
- [16] APPLE T M, CANTRELL J H, AMARO C M, et al. Acoustic harmonic generation from fatigue-generated dislocation substructures in copper single crystals [J]. *Philosophical Magazine*, 2013, 93(21):2802-2825.
- [17] CANTRELL J H, YOST W T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1):487-490.
- [18] CANTRELL J H. Substructural organization, dislocation plasticity and harmonic generation in cyclically stressed wavy slip metals [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2004, 460(2043):757-780.
- [19] CANTRELL J H, YOST W T. Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles [J]. *Philosophical Magazine A*, 1994, 69(2):315-326.
- [20] CASH W D, CAI W. Contribution of dislocation dipole structures to the acoustic nonlinearity [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7):074906 - 074906-8.
- [21] SHUI Y, SOLODOV I Y. Nonlinear properties of Rayleigh and Stoneley waves in solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 64(11):6155-6165.
- [22] SHUI Y, MAO Y, JIANG W, et al. The second harmonics generation of bulk acoustic wave reflection[C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1987: 29-36.
- [23] RICHARDSON J M. Harmonic generation at an unbound interface. Part I: Planar interface between semi-infinite media [J]. *International Journal of Engineering Science*, 1979, 17(1):73-85.
- [24] ACHENBACH J D, NORRIS A N. Loss of specular reflection due to nonlinear crack-face interaction [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1982, 3 (4): 229-239.
- [25] HIROSE S, ACHENBACH J D. Higher harmonics in the far field due to dynamic crack-face contacting [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 93(1):142-147.
- [26] ALESHIN V, GUSEV V, ZAITSEV V Y. Propagation of acoustics waves of nonsimplex form in a material with hysteretic quadratic nonlinearity: Analysis and numerical simulations [J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2011, 12(3):319-354.
- [27] 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[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(1):87-92.

- WU B, YAN B SH, HE C F, et al. AZ31 Magnesium early mechanical performance degradation nondestructive testing using nonlinear ultrasonic [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31 (1): 87-92.
- [28] 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[J]. 声学技术, 2010, 29(5):489-493.
- WU B, YAN B SH, HE C F, et al. Applied research on pulse-inversion technique in acoustic nonlinear parameter measurement of fatigued metals [J]. Technical Acoustics, 2010, 29 (5): 489-493.
- [29] 颜丙生, 张士雄. LY12 铝合金疲劳损伤的非线性超声检测[J]. 航空材料学报, 2012, 32(2):93-98.
- YAN B SH, ZHANG SH X. Using nonlinear ultrasonic testing for fatigue damage of L12 aluminum alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(2):93-98.
- [30] 颜丙生, 刘自然, 张跃春, 等. 非线性超声检测镁合金早期疲劳的试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4):20-24.
- YAN B SH, LIU Z R, ZHANG Y CH, et al. Experimental study of early fatigue nonlinear ultrasonic detection in magnesium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (4): 20-24.
- [31] 颜丙生, 吴斌, 何存富. 利用非线性 Rayleigh 波检测镁合金厚板疲劳损伤的仿真和试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18):7-14.
- YAN B S, WU B, HE C F. Simulation and experiment of fatigue damage detection in magnesium thick plate using nonlinear rayleigh wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (18): 7-14.
- [32] 颜丙生, 吴斌, 李佳锐, 等. 镁合金力学性能退化非线性超声离线检测实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(10):1459-1464.
- YAN B SH, WU B, LI J R, et al. Experimental study of magnesium mechanical performance degradation off-line testing using nonlinear ultrasonic [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37 (10): 1459-1464.
- [33] SHUI G, KIM J Y, QU J, et al. A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves [J]. NDT& E International, 2008, 41(5):326-329.
- [34] SHUI G, WANG Y S. Ultrasonic evaluation of early damage of a coating by using second-harmonic generation technique [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(12):124902 - 124902-6.
- [35] 税国双, 黄蓬, 汪越胜. 列车外圆弹簧疲劳损伤的非线性超声测试[J]. 声学学报, 2013,38(5):570-575.
- SHUI G S, HUANG P, WANG Y S. Non-destructive evaluation of fatigue damage of train spring using nonlinear ultrasonic method [J]. Acta Acoustica, 2013, 38 (5): 570-575.
- [36] 陆铭慧, 祝婧. 纤维-金属层板粘接质量的非线性超声评价研究[J]. 粘接, 2013(11):38-43.
- LU M H, ZHU J. Nonlinear ultrasonic testing of adhesive interfaces in FML[J]. Bonding, 2013 (11): 38-43.
- [37] 陆铭慧, 徐肖霞. 非线性超声检测方法及应用[J]. 无损检测, 2012, 34(7):61-66.
- LU M H, XU X X. Review of nonlinear ultrasonic testing method [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34 (7): 61-66.
- [38] DENG M, PEI J. Assessment of accumulated fatigue damage in solid plates using nonlinear Lamb wave approach [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(12): 121902 - 121902-3.
- [39] XIANG Y, DENG M, XUAN F Z, et al. Cumulative second-harmonic analysis of ultrasonic Lamb waves for ageing behavior study of modified-HP austenite steel[J]. Ultrasonics, 2011, 51(8):974-81.
- [40] XIANG Y C, ZHU W J, DENG M X, et al. Experimental and numerical studies of nonlinear ultrasonic responses on plastic deformation in weld joints [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2):229-237.
- [41] DENG M X, XIANG Y C. Time-domain analysis of second-harmonic generation of primary Lamb wave propagation in an elastic plate[J]. Chinese Physics B, 2010, 28(11):456-464.
- [42] 邓明晰, 裴俊峰. 无损评价固体板材疲劳损伤的非线性超声兰姆波方法[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 360-369.
- DENG M X, PEI J F. Nondestructive evaluation of fatigue damage in solid plates using nonlinear ultrasonic Lamb wave method [J]. Acta Acoustica , 2008, 33(4): 360-369.
- [43] 刘斌, 刚铁, 万楚豪, 等. 金属杆内疲劳裂纹与振动/超声相互作用及其定量表征[J]. 声学学报, 2016, 41(4):507-514.
- LU B, GANG T, WAN CH H, et al. Interaction of fatigue crack with vibration and ultrasound in metallic rod and its use for quantitative characterization [J]. Acta Acoustica , 2016,41 (4): 507-514.
- [44] 刘斌, 刚铁, 万楚豪, 等. 复杂结构焊缝的非线性超声检测方法[J]. 焊接学报, 2015, 36(3):39-42.

- LIU B, GANG T, WAN CH H, et al. Nonlinear ultrasonic method for detecting weld of complicated structure [J]. *Journal of Welding*, 2015, 36 (3): 39-42.
- [45] 万楚豪, 刚铁, 刘斌. 非线性超声脉冲反转法在铝合金焊缝疲劳寿命预测中的应用[J]. *焊接学报*, 2015, 36(2):27-30.
- WAN CH H, GANG T, LIU B. Nonlinear ultrasonic evaluation of fatigue life of aluminum alloy welded joint based on pulse-inversion technique [J]. *Journal of Welding Technology*, 2015, 36 (2): 27-30.
- [46] 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[J]. *声学学报*, 2010, 35 (5): 481-487.
- AN ZH W, WANG X M, MAO J, et al. Theoretical and experimental research on nonlinear spring models of a bonding interface [J]. *Acta Acoustica*, 2010, 35 (5): 481-487.
- [47] AN ZH W, WANG X M, DENG M, et al. A nonlinear spring model for an interface between two solids [J]. *Wave Motion*, 2013, 50(2):295-309.
- [48] NAGY P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization [J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(s 1-5):375-381.
- [49] GUYER R A, JOHNSON P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials [J]. *Physics Today*, 2008, 52(4):30-36.
- [50] PAYAN C, GARNIER V, MOYSAN J, et al. Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121 (4): 125-130.
- [51] ABEELE E A V D, CARMELIET J, CATE J A T, et al. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12(1):31-42.
- [52] BALLAD E M, VEZIROV S Y, PFLEIDERER K, et al. Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound. [J]. *Ultrasonics*, 2004, 42 (1-9): 1031-1036.
- [53] ABEELE E A V D, JOHNSON P A, SUTIN A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12(1):17-30.
- [54] LARMAT C S, GUYER R A, JOHNSON P A. Time-reversal methods in geophysics [J]. *Physics Today*, 2010, 63(8):31-35.
- [55] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. The use of non-collinear mixing for nonlinear ultrasonic detection of plasticity and fatigue [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 126 (5): 117-22.
- [56] LIU M, TANG G, JACOBS L J, et al. Measuring acoustic nonlinearity parameter using collinear wave mixing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(2): 024908 - 024908-6.
- [57] CANTRELL J H. Crystalline structure and symmetry dependence of acoustic nonlinearity parameters [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(6):3372-3380.
- [58] NORRIS A N, HAMILTON M F, BLACKSTOCK D T. Finite-amplitude waves in solids [C]. *Nonlinear Acoust.*, 1998:263-277.
- [59] LIMA W J N D, HAMILTON M F. Finite-amplitude waves in isotropic elastic plates [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2003, 265(4):819-839.
- [60] BERMES C, KIM J Y, QU J, et al. Experimental characterization of material nonlinearity using Lamb waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (2): 021901-021901-3.
- [61] PRUELL C, KIM J, QU J, et al. Evaluation of fatigue damage using nonlinear guided waves [J]. *Smart Materials & Structures*, 2009, 18(3):2202-2221.
- [62] MATLACK K H, KIM J Y, JACOBS L J, et al. Experimental characterization of efficient second harmonic generation of Lamb wave modes in a nonlinear elastic isotropic plate [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(1):014905-014905-5.
- [63] 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]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99 (12): 124913-124913-8.
- [64] SHULL D J, KIM E E, HAMILTON M F, et al. Diffraction effects in nonlinear Rayleigh wave beams [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 97(4):2126-2137.
- [65] HURLEY D C. Nonlinear propagation of narrow-band Rayleigh waves excited by a comb transducer [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 106(4):1782-1788.

- [66] TORELLO D, THIELE S, MATLACK K H, et al. Diffraction, attenuation, and source corrections for nonlinear Rayleigh wave ultrasonic measurements [J]. *Ultrasonics*, 2015, 56(2):417-426.
- [67] ZABOLOTSKAYA E A. Nonlinear propagation of plane and circular Rayleigh waves in isotropic solids [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 91(5):2569-2575.
- [68] THIELE S, KIM J Y, QU J, et al. Air-coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves to assess material nonlinearity[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(6):1470-5.
- [69] WALKER S V, KIM J Y, QU J, et al. Fatigue damage evaluation in A36 steel using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. *NDT & E International*, 2012, 48(2):10-15.
- [70] RUIZ A, ORTIZ N, MEDINA A, et al. Application of ultrasonic methods for early detection of thermal damage in 2205 duplex stainless steel [J]. *Ndt & E International*, 2013, 54(3):19-26.
- [71] HIKATA A, ELBAUM C. Generation of ultrasonic second and third harmonics due to dislocations. I [J]. *Physical Review*, 1966, 144(2):469-477.
- [72] CANTRELL J H, ZHANG X G. Nonlinear acoustic response from precipitate-matrix misfit in a dislocation network [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(10):5469-5472.
- [73] CANTRELL J H, YOST W T. Determination of precipitate nucleation and growth rates from ultrasonic harmonic generation [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(13):1952-1954.
- [74] HURLEY D C, BALZAR D, PURTSCHER P T. Nonlinear ultrasonic assessment of precipitation hardening in ASTM A710 steel[J]. *Journal of Materials Research*, 2000, 15(9):2036-2042.
- [75] BIWA S, HIRAIWA S, MATSUMOTO E. Experimental and theoretical study of harmonic generation at contacting interface [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44 (Suppl. 1): e1319-e1322.
- [76] CANTRELL J H. Quantitative assessment of fatigue damage accumulation in wavy slip metals from acoustic harmonic generation [J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(11):1539-1554.
- [77] NAZAROV V E, SUTIN A M. Nonlinear elastic constants of solids with cracks [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102 (6): 3349-3354.
- [78] GRANATO A, LUCKE K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(6):583-593.
- [79] CANTRELL J H. Ultrasonic harmonic generation from fatigue-induced dislocation substructures in planar slip metals and assessment of remaining fatigue life [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(9):093516 - 093516-6.
- [80] THIELE S, MATLACK K H, KIM J Y, et al. Assessment of precipitation in alloy steel using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. 2014, 1581(1):682-689.
- [81] KIM J Y, LEE J S. A micromechanical model for nonlinear acoustic properties of interfaces between solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(4): 043501-043501-9.
- [82] PECORARI C. Adhesion and nonlinear scattering by rough surfaces in contact beyond the phenomenology of the Preisach-Mayergoyz framework [J]. *Acoustical Society of America Journal*, 2004, 116(4):1938-1947.
- [83] 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]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(3):538-544.
- [84] KIM J Y, JACOBS L J, QU J, et al. Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(3): 1266-1273.
- [85] MATLACK K H, WALL J J, KIM J Y, et al. Evaluation of radiation damage using nonlinear ultrasound [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(5): 054911-054911-3.
- [86] 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]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 448(1-3):26-32.
- [87] FROUIN J, SATHISH S. Ultrasonic linear and nonlinear behavior of fatigued Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Materials Research*, 1999, 14(4):1295-1298.
- [88] VISWANATH A, RAO B P C, MAHADEVAN S, et al. Microstructural characterization of M250 grade maraging steel using nonlinear ultrasonic technique[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(24):6719-6726.
- [89] GAUSTER W B, BREAZEALE M A. Ultrasonic measurement of the non-linearity parameters of copper

- single crystals [J]. *Physical Review*, 1968, 168(3): 655-661.
- [90] GAUSTER W B, BREAZEALE M A. Detector for measurement of ultrasonic strain amplitudes in solids [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1966, 37(11):1544-1548.
- [91] THOMPSON R B, BUCK O, THOMPSON D O. Higher harmonics of finite amplitude ultrasonic waves in solids [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, 59(5):1087-1094.
- [92] HURLEY D C, FORTUNKO C M. Determination of the nonlinear ultrasonic parameter using a Michelson interferometer [J]. *Measurement Science & Technology*, 1999, 8(6):634-642.
- [93] BARNARD D J, DACE G E, BUCK O. Acoustic harmonic generation due to thermal embrittlement of inconel 718 [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1997, 16(2):67-75.
- [94] CANTRELL J H, SALAMA K. Acoustoelastic characterisation of materials [J]. *International Materials Reviews*, 1991, 36(1):125-145.
- [95] YOST W T, CANTRELL J H. Anomalous nonlinearity parameters of solids at low acoustic drive amplitudes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(2):021905-021905-3.
- [96] MOREAU A. Detection of acoustic second harmonics in solids using a heterodyne laser interferometer [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 98(5):2745-2752.
- [97] YOST W T, CANTRELL J H, KUSHNICK P W. Fundamental aspects of pulse phase-locked loop technology-based methods for measurement of ultrasonic velocity [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 91(3):1456-68.
- [98] DACE G E, THOMPSON R B, BUCK O. Measurement of the acoustic harmonic generation for materials characterization using contact transducers [C]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1992, 11:2069-2076.
- [99] DACE G E, THOMPSON R B, BRASCHE L J H, et al. Nonlinear acoustics, a technique to determine microstructural changes in materials [M]. Springer US: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1991:1685-1692.
- [100] SUN L, KULKARNI S S, ACHENBACH J D, et al. Technique to minimize couplant-effect in acoustic nonlinearity measurements [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(120):2500-2505.
- [101] LIU S, CROXFORD A J, NEILD S A, et al. Effects of experimental variables on the nonlinear harmonic generation technique. [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2011, 58(7):1442-51.
- [102] YOST W T, CANTRELL J H. Absolute ultrasonic displacement amplitude measurements with a submersible electrostatic acoustic transducer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(9):4182-4188.
- [103] HESS P, LOMONOSOV A M, MAYER A P. Laser-based linear and nonlinear guided elastic waves at surfaces (2D) and wedges (1D) [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1):39-55.
- [104] GREEN R E. Non-contact ultrasonic techniques [J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1-9):9-16.
- [105] BLACKSHIRE J L, SATHISH S, NA J, et al. Nonlinear laser ultrasonic measurements of localized fatigue damage [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003, 657(1):1479-1488.
- [106] COLLISON I J, STRATOUDAKI T, CLARK M, et al. Measurement of elastic nonlinearity using remote laser ultrasonics and Cheap Optical Transducers and dual frequency surface acoustic waves [J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(6-7):471-7.
- [107] STRATOUDAKI T, ELLWOOD R, SHARPLES S, et al. Measurement of material nonlinearity using surface acoustic wave parametric interaction and laser ultrasonics. [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(4):1721-1728.
- [108] ELLWOOD R, STRATOUDAKI T, SHARPLES S D, et al. Determination of the acoustoelastic coefficient for surface acoustic waves using dynamic acoustoelastography: An alternative to static strain [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(3):1064-70.
- [109] BARNARD D J, BRASCHE L J H, RAULERSON D, et al. Monitoring fatigue damage accumulation with Rayleigh wave harmonic generation measurements [J]. 2003, 657(1):1393-1400.
- [110] 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 [J]. *Ndt & E International*, 2011, 44(1):67-74.

- [111] JAYA RAO V V S, KANNAN E, PRAKASH R V, et al. Fatigue damage characterization using surface acoustic wave nonlinearity in aluminum alloy AA7175-T7351[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(12): 123508-123508-9.
- [112] MORRIS W L, BUCK O, INMAN R V. Acoustic harmonic generation due to fatigue damage in high-strength aluminum [J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(11):6737-6741.
- [113] OGI H, HIRAO M, AOKI S. Noncontact monitoring of surface-wave nonlinearity for predicting the remaining life of fatigued steels[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(1):438-442.
- [114] COBB A, CAPPS M, DUFFER C, et al. Nonlinear ultrasonic measurements with EMATs for detecting pre-cracking fatigue damage [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive*, 2012, 1430(31):299-306.
- [115] GRANDIA W A, FORTUNKO C M. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers [J]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1995, 1(1):697-709.
- [116] CASTAINGS M, CAWLEY P. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 100(100): 3070-3077.
- [117] WRIGHT W, HUTCHINS D A, HAYWARD G, et al. Ultrasonic imaging using laser generation and piezoelectric air-coupled detection [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2-5):405-409.
- [118] ZHU J, POPOVICS J. Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor [J]. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2002, 615(1):1261-1268.
- [119] TUZZEO D, SCALEA F L D. Noncontact air-coupled guided wave ultrasonics for detection of thinning defects in aluminum plates [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2001, 13(2):61-78.
- [120] THIELE S. Air-coupled detection of Rayleigh surface waves to assess material nonlinearity due to precipitation in alloy steel [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(6): 1470-1475.
- [121] BLANLOEUIL P, MEZIANE A. Finite element modeling of the non collinear mixing method for detection and characterization of closed cracks [C]. *Earli Sig 15 on Special Educational Needs: Challenges in Learning & Instruction*, 2015,1658(1):303-314.
- [122] BLANLOEUIL P, MEZIANE A, NORRIS A N, et al. Analytical extension of finite element solution for computing the nonlinear far field of ultrasonic waves scattered by a closed crack [J]. *Wave Motion*, 2016, 66(11):132-146.
- [123] SINGH A K, CHEN B Y, TAN V B, et al. Finite element modeling of nonlinear acoustics/ultrasonics for the detection of closed delaminations in composites[J]. *Ultrasonics*, 2016, 74: 89-98, doi: 10. 1016/j. ultras. 2016.09.019.
- [124] OHARA Y, ENDO H, MIHARA T, et al. Ultrasonic measurement of closed stress corrosion crack depth using subharmonic phased array [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(7):07GD01-07GD01-6.
- [125] OUCHI A, SUGAWARA A, OHARA Y, et al. Subharmonic phased array for crack evaluation using surface acoustic wave [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(7S1)L07HC05.
- [126] YUN D, KIM J, JHANG K Y. Imaging of contact acoustic nonlinearity using synthetic aperture technique [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(7):1349-1354.
- [127] BLANLOEUIL P, ROSE L R F, GUINTO J A, et al. Closed crack imaging using time reversal method based on fundamental and second harmonic scattering [J]. *Wave Motion*, 2016, 66(11):156-176.
- [128] ZHANG W, WU W, SUN X, et al. Damage detection of closed crack in a metallic plate using nonlinear ultrasonic time reversal method [J]. *Journal of Sensors*, 2013, 2013(6):1-10.
- [129] MEZIL S, CHIGAREV N, TOURNAT V, et al. Evaluation of crack parameters by a nonlinear frequency-mixing laser ultrasonics method [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69(11):225-235.
- [130] WU W, SHEN Y, QU W, et al. Fatigue crack damage detection using subharmonic component with nonlinear boundary condition [C]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2014: 1609-1615.
- [131] DZIEDZIECH K, PIECZONKA L, KIJANKA P, et al. Enhanced nonlinear crack-wave interactions for structural damage detection based on guided ultrasonic waves [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2015, 23(8): 1108-1120.
- [132] OBERHARDT T, KIM J Y, QU J, et al. A contact mechanics based model for partially-closed randomly distributed surface microcracks and their effect on

- acoustic nonlinearity in Rayleigh surface waves [C]. American Institute of Physics Conference Series, American Institute of Physics Conference Series, 2016; 3065-3072.
- [133] ZHAO Y, QIU Y, JACOBS L J, et al. A micromechanics model for the acoustic nonlinearity parameter in solids with distributed microcracks [C]. American Institute of Physics Conference Series, 2016; 77-78.
- [134] LI N, SUN J J, JIAO J P, et al. Quantitative evaluation of micro-cracks using nonlinear ultrasonic modulation method [J]. *Ndt & E International*, 2016, 79 (4): 63-72.
- [135] ORACZEWSKI T, STASZEWSKI W J, UHL T. Nonlinear acoustics for structural health monitoring using mobile, wireless and smartphone-based transducer platform [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2015, 27(6): 1-11.
- [136] BUCK O, MORRIS W L, RICHARDSON J M. Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 33 (5): 371-373.
- [137] CANTRELL J H. Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel on fatigue damage accumulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(6):8022-8027.
- [138] YOST W T, CANTRELL J H. The effects of fatigue on acoustic nonlinearity in aluminum alloys [C]. *Ultrasonics Symposium*, 1992:947-955 vol. 2.
- [139] JHANG K Y, KIM K C. Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect [J]. *Ultrasonics*, 1999, 37(1):39-44.
- [140] NA J K, CANTRELL J H, YOST W T. Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigued 410cb stainless steel [M] Springer US: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1996; 1347-1352.
- [141] HURLEY D C, BALZAR D, PURTSCHER P T, et al. Nonlinear ultrasonic parameter in quenched martensitic steels [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83 (9): 4584-4588.
- [142] SHUI G, WANG Y S, GONG F. Evaluation of plastic damage for metallic materials under tensile load using nonlinear longitudinal waves [J]. *Ndt & E International*, 2013, 55(3):1-8.
- [143] KIM J Y, QU J, JACOBS L J, et al. Acoustic nonlinearity parameter due to microplasticity [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2006, 25(1):28-36.
- [144] CANTRELL J H, YOST W T. Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(7):2957-2962.
- [145] LI W, CHO Y, LEE J, et al. Assessment of heat treated inconel X-750 Alloy by nonlinear ultrasonics [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(5):775-781.
- [146] BABY S, KOWMUDI B N, OMPRAKASH C M, et al. Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique [J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(8):818-821.
- [147] MUKHOPADHYAY A, SARKAR R, PUNNOSE S, et al. Scatter in nonlinear ultrasonic measurements due to crystallographic orientation change induced anisotropy in harmonics generation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2):180-5.
- [148] KIM C S, PARK I K, JHANG K Y. Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr-1Mo steel [J]. *Ndt & E International*, 2009, 42 (3): 204-209.
- [149] XIANG Y, DENG M, XUAN F Z, et al. Experimental study of thermal degradation in ferritic Cr-Ni alloy steel plates using nonlinear Lamb waves [J]. *Ndt & E International*, 2011, 44(8):768-774.
- [150] METYA A, GHOSH M, PARIDA N, et al. Higher harmonic analysis of ultrasonic signal for ageing behaviour study of C-250 grade maraging steel [J]. *Ndt & E International*, 2008, 41(6):484-489.
- [151] VALLURI J S, BALASUBRAMANIAM K, PRAKASH R V. Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(6):2079-2090.
- [152] NARAYANA V J S, BALASUBRAMANIAM K, PRAKASH R V. Detection and prediction of creep-damage of copper using nonlinear acoustic techniques [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive*, 2010, 1211(1):1410-1417.
- [153] KIM C S, C J LISSENDEN. Precipitate contribution to the acoustic nonlinearity in nickel-based superalloy [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(8):219-222.
- [154] 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 [J]. *NDT & E International*, 2013, 54(3):159-165.

- [155] ZEITVOGEL D T, MATLACK K H, KIM J Y, et al. Characterization of stress corrosion cracking in carbon steel using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. *Ndt & E International*, 2014, 62(2):144-152.
- [156] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [157] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1713-1735.
- HE C F, ZHENG M F, LV Y, et al. Development, application and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1713-1735.

作者简介



门平, 分别在 2006 和 2011 年于南昌航空大学获得学士学位和硕士学位, 现为装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室博士研究生, 主要研究方向为超声检测技术、材料力学性能无损检测与评价。

E-mail: menping0502@163.com

Men Ping received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanchang Hangkong University in 2006 and 2011, respectively. Now he is a Ph. D. student in National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering. His main research interest includes ultrasonic testing technology and nondestructive testing & evaluation of material mechanical properties.



董世运(通讯作者), 分别在 1995 年、1997 年和 2000 年于哈尔滨工业大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室研究员, 主要研究方向为表面工程、激光制造与再制造及其质量无损检测评价等。

E-mail: syd422@sohu.com

Dong Shiyun (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology, Harbin, China in 1995, 1997 and 2000, respectively. Now, he is a research fellow in National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering. His main research interests include surface engineering, laser manufacturing and remanufacturing technology and quality nondestructive testing & evaluation.