

文章编号: 1001-4888(2022)04-0507-10

基于非线性临界折射纵波的 金属材料塑性损伤评估^{*}

张玉华¹, 全四龙^{1,2}, 胡筱雅¹, 陈强¹, 李跃忠¹, 刘树博¹, 葛远香¹

(1. 东华理工大学 机械与电子工程学院, 江西南昌 330013;

2. 东华理工大学 江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心, 江西南昌 330013)

摘要: 本文利用临界折射纵波的非线性特性对金属构件的塑性损伤进行评估。首先, 分别对两组试件进行在线和离线应力加载, 使试件具有不同的应力状态; 再对试件进行基于临界折射纵波的非线性超声实验, 计算不同应力下的相对非线性系数。实验结果表明, 相对非线性系数和试件变形均随着试件应力水平的增加而单调递增, 且相对非线性系数和试件宏观变形的皮尔逊关联系数分别为 0.9884 和 0.9876, 说明这两组参数之间具有较强的关联性。此外, 基于实验数据建立了相对非线性系数和试件变形的幂指数函数关系, 该关系可以定量说明试件宏观变形量和相对非线性系数之间的内在联系。在不清楚材料微观结构的情况下, 利用幂指数关系可以从宏观角度根据材料变形预测相对非线性系数, 这在实际的工程应用中对金属材料进行塑性损伤评估是十分方便的。

关键词: 非线性临界折射纵波; 在线加载; 离线加载; 塑性损伤; 非线性系数

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-162

0 引言

金属构件在服役过程中会不可避免地产生变形等损伤, 这些损伤会减弱材料的机械性能, 严重时会造成构件断裂失效, 产生灾难的后果, 因此, 有效评估和检测材料的塑性损伤对金属构件的安全服役至关重要。

近年来, 金属材料的无损评估(NDE)受到越来越多的关注, 并出现了许多有效的无损评估方法, 如 X 射线法、磁巴克豪森噪声法、声发射技术和超声检测技术^[1-4]等。由于超声波在金属材料内部的传播特性与金属材料损伤有密切的关系, 因此超声检测技术是一种非常有效的评估材料损伤的方法^[5]。传统的超声检测技术利用超声波传输过程中的波速、衰减系数等参数的变化对材料损伤进行评估, 但是这种技术对微观缺陷、闭合裂纹和早期的材料性能缺陷不够敏感。相关研究表明, 当单一频率超声波在金属材料内部传播时, 会与微观缺陷发生非线性相互作用产生高次谐波^[6,7], 而非线性超声技术能够有效评估材料疲劳损伤、蠕变损伤、塑性损伤等^[8-10]。

超声非线性技术通常是利用基于基波和高次谐波的超声非线性系数对材料损伤进行评估的。Cai 等^[11]分析了 P91 钢在不同应变水平下的位错密度和超声非线性系数, 结果表明这两组参数均随着应变

^{*} 收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61663001); 江西省自然科学基金(20202BAB202008); 东华理工大学江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心开放基金(JXNE2021-03); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ160540)资助

通信作者: 李跃忠(1969—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 超声波气体流量计, 肌电假肢等。Email: lyzh@ecut.edu.cn

全四龙(1987—), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 材料辐照损伤的多次度研究、无损检测等。Email: silongquan@ecut.edu.cn

水平的增加而增加^[11]。Herrmann 等^[12]和 Kim^[13]分别探究了镍基高温合金在塑性变形过程中超声非线性系数的变化情况,都得到了超声非线性系数随塑性变形的增加而增加的结果。Hikata 等^[14]探究了单晶铝和多晶铝受拉压载荷时超声非线性系数的变化,发现单晶铝的二次谐波对拉伸应力更敏感。张剑锋等^[15,16]研究了奥氏体不锈钢在拉伸、不对称循环和对称循环载荷作用下的超声非线性响应,发现产生不同非线性现象的主要原因是不同载荷作用下位错结构的演化不一致。

由以上研究可知,超声波在金属材料内传播的非线性特性与材料微观结构有密切的关系。基于位错弦和位错偶模型^[17,18],在知道材料微观结构的情况下(如位错密度和位错弦长度等参数),可以预测材料的超声非线性系数,但是这在实际的工程应用中是非常不方便的。此外,Kim 等^[19]提出的微塑性模型可有效避免使用位错等材料微观结构参数,但是它不能预测材料的超声非线性系数。由于材料的宏观变形是由材料的微观结构演化引起的,因此可以把它看作是材料损伤在宏观方面的一个定量指标。为了在实际的工程应用中使用超声非线性系数对材料进行损伤评估,探究并建立超声非线性系数和材料宏观变形之间的关系是非常有必要的。

本文对两组不同应力加载模式的试件进行基于临界折射纵波(LCR 波)的非线性超声实验,分析两组试件在不同应力水平下相对非线性系数和变形量两组参数的变化情况,以探究相对非线性系数与试件变形量之间的内在联系。利用相对非线性系数和变形量之间的关系,根据材料的宏观变形量预测试件相对非线性系数的变化,这在实际的工程应用中对金属材料的塑性损伤进行评估是非常方便的。

1 超声非线性波动规律

在材料应变比较小的情况下,固体介质中的波动方程为

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

式中: u 为超声波在 x 方向的位移; ρ 为介质的密度; σ 为 x 方向上的正应力。

介质的非线性本构关系可以表示为

$$\sigma = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon + \dots) \quad (2)$$

式中: E 为材料的杨氏模量; ε 为材料的应变; β 为二阶非线性系数。在材料应变比较小的情况下,其正应变可以定义为 $\varepsilon = \partial u / \partial x$ 。如果将材料的正应变和式(2)均代入式(1),非线性波动方程可以改为

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

根据摄动近似理论,式(3)的解可以表示为

$$u(x, t) = u_0(x, t) + u'(x, t) \quad (4)$$

式中: u_0 和 u' 分别表示激励波和一阶摄动解。如果激励信号是一个如式(5)所示的正弦信号:

$$u_0(x, t) = A_1 \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

式中: ω 为角频率; k 为波数; x 为超声波的传播距离。那么式(3)的二阶摄动解为

$$u(x, t) = A_1 \cos(kx - \omega t) - \frac{\beta}{8} k^2 A_1^2 x \cos 2(kx - \omega t) \quad (6)$$

由式(6)可知,二次谐波的幅值 $A_2 = \frac{\beta}{8} k^2 A_1^2$ 。由二次谐波幅值等式可得,材料的二阶非线性系数表达式为

$$\beta = \frac{8A_2}{k^2 x A_1^2} \quad (7)$$

当超声波在均匀、各向同性的非线性弹性介质内传播时,假定超声波的波数 k 和传播距离 x 均为常数,那么相对非线性系数 β' 的表达式为

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

式中基波幅值 A_1 和二次谐波幅值 A_2 可以通过超声非线性输出信号的频谱图获得。

当超声波在具有应力或塑性损伤的介质内传播时,会引起材料弹性常数的变化,使超声波传输过程中的超声非线性系数发生变化,因此,可以用材料的超声非线性系数表征材料的应力或塑性损伤状态。

2 试件准备和实验设置

2.1 试件准备

45#钢是一种常用的碳素结构钢,其屈服极限是 355MPa,具有良好的机械性能,目前被广泛应用于机械加工中,因此,本研究中的试件材料选用 45#钢。平板状试件的结构如图 1 所示,试件上的灰色矩形框 1 和 2 是非线性超声实验过程中激励传感器和接收传感器的安装位置。本文实验中共有 10 个试件,试件的厚度均为 8mm,长度均为 280mm。

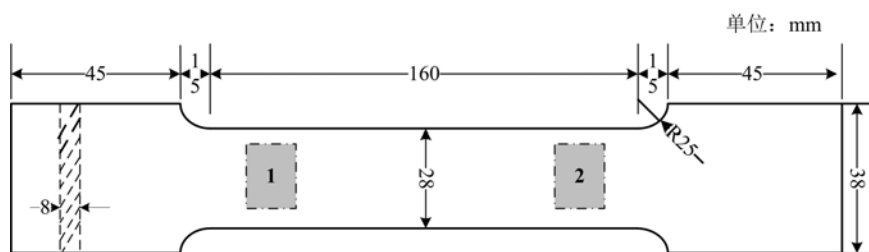


图 1 45#钢试件的结构图

Fig. 1 The structure drawing of 45# steel specimen

在电子万能试验机上对 45#钢试件进行标准的静态拉伸实验,实验的加载速率为 0.5mm/min,在静态拉伸过程中采用应力控制模式使试件保持不同的应力状态。试件加载应力范围为 0~400MPa。

根据非线性超声实验时试件是否受拉伸应力的作用,本研究的拉伸实验分为在线和离线两种模式。在线模式的应力加载范围为 0~400MPa,每隔 20MPa 暂停一次;利用电子万能试验机将试件加载到目标应力后保持载荷 300s,使试件所受应力保持不变,对试件在受力过程中进行非线性超声检测。在线研究的目的是探究试件的累计变形量(包括弹性和塑性变形)与超声波非线性特性之间的关系。在线拉伸实验的试件为 5 个。

离线模式指的是将试件加载到目标应力并保持 300s 后卸载应力至 0MPa,对试件进行非线性超声实验,之后再再将试件加载到另一个应力值进行下一组实验,直至实验结束。由于 45#钢材料具有很好的弹性恢复能力,为了较好地反映材料在不同应力下的残余变形量,离线的应力加载分别为 50MPa、100MPa、150MPa、200MPa、240MPa、280MPa、300MPa、340MPa、380MPa 和 400MPa。离线方式主要是研究试件残余变形与超声非线性特性的关系,离线拉伸试件也是 5 个。在离线和在线实验过程中,试件的变形量由电子万能试验机的横梁位移表示。

2.2 基于 LCR 波的非线性超声实验设置

LCR 波是一种沿着试件表面传播,且对切向应力比较敏感的特殊纵波^[20,21]。本研究利用临界折射纵波对具有不同塑性变形的金属试件进行非线性特性分析。根据临界折射纵波的产生原理,当一系列纵波以第一临界角入射到金属构件时,由于波的折射原理,会在试件的表面产生 LCR 波,LCR 波产生示意图如图 2 所示。由于纵波在有机玻璃和 45#钢中的传播速度分别是 2720m/s 和 5925m/s,所以本文实验中第一临界角为 $\theta_1 = \arcsin(2720/5925) = 27^\circ$ 。为了在 45#钢试件中产生沿试件拉伸方向传播的 LCR 波,有机玻璃块的角度设为 27° 。

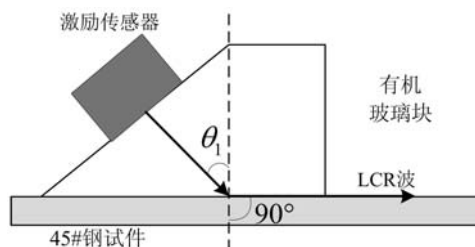


图 2 LCR 波产生示意图

Fig. 2 The generation diagram of LCR wave

非线性超声实验实物图如图 3(a)所示,实验采用 RITEC 公司的 RAM-5000-SNAP 非线性超声测

试系统进行信号的激励和接收。激励传感器的中心频率为 2.25 MHz,为了更好地接收高次谐波,选用中心频率为 5 MHz 的传感器作为接收传感器。RAM-5000-SNAP 系统产生频率为 2.2 MHz、30 个周期的脉冲串,该信号经 50 Ω 负载和低通滤波器消除高频信号干扰后,再经有机玻璃块和纵波传感器产生 LCR 波,并沿试件表面传播。在传播过程中超声波与材料损伤发生非线性相互作用,产生高次谐波,畸变的超声信号被接收传感器接收,并传输到非线性超声系统的接收通道。另外,畸变的超声接收信号由采样频率为 100 MHz 的示波器储存。在试件、传感器和有机玻璃块的接触面均匀涂抹较厚的黄油作为耦合剂,以排除传感器和接触面间的空气,减小信号的衰减。此外,为了保证试件在变形的情况下传感器能与试件表面保持紧密结合,用黑色胶带将有机玻璃块和传感器固定在试件表面上。

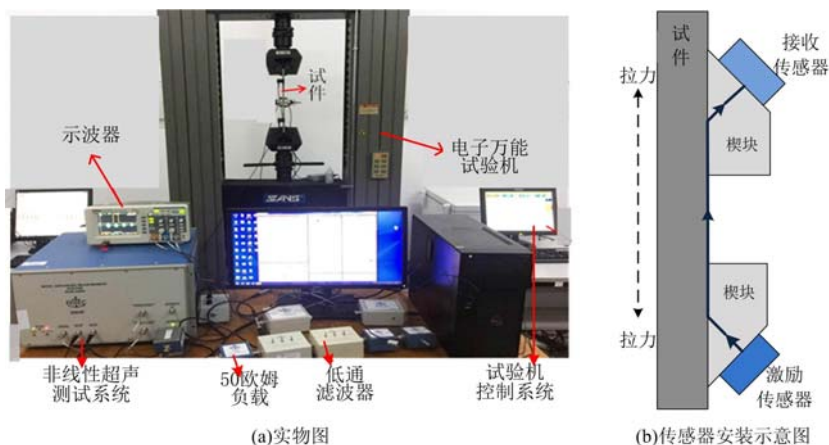


图 3 非线性超声实验结构图

Fig. 3 The structure diagram of nonlinear ultrasonic experiment

在线和离线拉伸过程中,分别对试件进行非线性超声实验,超声接收信号的时域图如图 4(a)所示。为了验证接收到的信号为临界折射纵波,在保证其他参数一致的情况下,设定有机玻璃块的角度为 25°,观察接收传感器接收到的波形。当纵波入射角为 27°时,接收信号稳态部分的幅值比较大、约为 0.45 V,波形比较完整;而当纵波入射角为 25°时,接收信号的波形比较混乱,没有出现明显的稳态部分,信号的幅值整体小于 0.1 V。通过对入射角为 27°和 25°的接收信号波形对比分析可知,当纵波入射角为 27°时,接收到的信号就是 LCR 波。

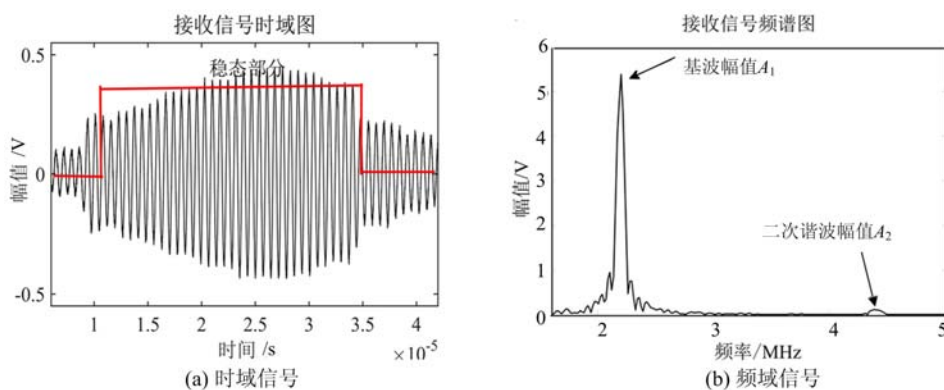


图 4 非线性超声实验的接收信号

Fig. 4 The receiving signal of nonlinear ultrasonic experiment

为了更好地提取非线性输出信号的非线性特性,利用矩形窗截取接收信号中间的稳态部分,对信号进行快速傅里叶变换,超声接收信号的频谱图如图 4(b)所示。可根据频谱图得到接收信号的基波和二次谐波幅值,并利用式(8)计算相对非线性系数 β' 。为减小实验误差,每个应力水平下,对试件重复进

行 4 次实验,用 4 次实验的平均值表示当前应力下的相对非线性系数。

由于实验过程中影响非线性的因素很多,如实验设备、耦合剂和传感器等都会引起非线性,因此在实验前,应验证实验系统的可靠性。当激励信号电压由 300V 增加至 400V 时,对试件 1 和试件 2 进行非线性超声实验,以分析二次谐波幅值 A_2 与基波幅值的平方 A_1^2 的关系(图 5)。

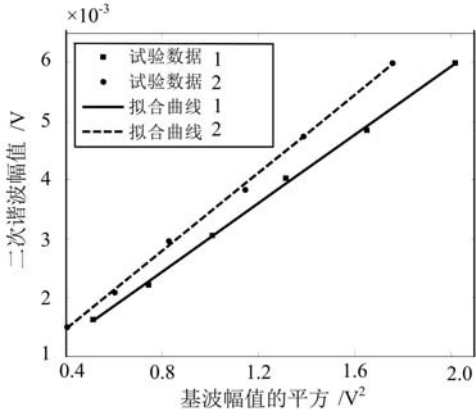


图 5 二次谐波幅值(A_2)与基波幅值平方(A_1^2)的关系
Fig. 5 The relation between amplitude of second harmonic(A_2) and square of fundamental wave amplitude(A_1^2)

由图 5 可知,当激励信号的电压增加时,二次谐波幅值和基波幅值的平方有较好的线性关系。试件 1 和试件 2 的最优拟合曲线分别是 $A_2 = 4.596 \times 10^{-4} A_1^2 + 9.907 \times 10^{-5}$ 和 $A_2 = 4.632 \times 10^{-4} A_1^2 + 7.285 \times 10^{-5}$,其相关系数 R^2 分别为 0.998 和 0.997,说明两个试件的二次谐波幅值和基波幅值的平方是高度相关的。

在不同的激励电压下,计算得到的相对非线性系数是一个常数,相对非线性系数并不随激励电压发生变化。这表明在非线性超声实验过程中计算得到的相对非线性系数仅与材料自身特性有关,与实验设备、仪器等无关,该系统能有效避免其他非线性因素,也说明了非线性超声实验系统的可靠性。

3 实验结果与讨论

3.1 在线测量

分别对 5 个在线试件进行非线性超声实验,计算每个试件在不同应力水平下的相对非线性系数^[22]和变形量,再对 5 组实验数据取均值,得到在线测量过程中试件的相对非线性系数和变形量(见表 1)。

表 1 在线实验的相对非线性系数和试件变形量

Tab. 1 Relative nonlinear coefficient and specimen deformation in on-line experiment

应力/MPa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
相对非线性系数/ $\times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$	4.60	4.64	4.69	4.83	4.942	4.98	5.07	5.16	5.21	5.34	5.47
变形量/mm	0	0.63	1.29	1.93	2.32	2.74	3.07	3.49	3.88	4.26	4.63
应力/MPa	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	
相对非线性系数/ $\times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$	5.59	5.87	6.12	6.44	6.82	7.18	7.63	7.91	8.31	8.61	
变形量/mm	5.02	5.41	6.03	6.76	7.58	8.5	9.42	10.78	12.05	13.74	

由表 1 可知,试件的应力由 0MPa 增加至 400MPa 过程中,在线实验的相对非线性系数单调递增,其数值由 $4.60 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$ 增加至 $8.61 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}$,增量约为 87%。当试件的应力水平低于 200MPa 时,相对非线性系数增加缓慢;当应力大于 200MPa 后,非线性系数增加幅度较快。根据文献[20]和文献

[22]的研究可知,应力的变化会引起材料内部微观结构的改变,这种改变是引起相对非线性系数变化的主要原因。由表 1 还可以发现,试件变形随着试件应力水平的增加而增加,尤其是应力值超过 200MPa 后,试件的变形更加明显,最大变形为 13.74mm。通过比较在线实验中试件相对非线性系数和变形量的变化趋势可知,两个变量具有相似的变化趋势:当应力低于 200MPa 时,两个变量的增加均比较缓慢;而当应力大于 200MPa 时,试件的变形更加明显,相对于非线性系数增加得更快。

3.2 离线测量

对 5 个离线试件分别进行离线加载,对试件进行非线性超声实验,计算离线状态下试件的相对非线性系数,并记录不同应力卸载后试件的残余变形。再对 5 组离线实验数据取均值,得到离线状态下试件的非线性系数和残余变形见表 2。

表 2 离线实验的相对非线性系数和试件变形量

Tab. 2 Relative nonlinear coefficient and specimen deformation in off-line experiment

应力/MPa	0	50	100	150	200	240	280	300	340	380	400
相对非线性系数/ $\times 10^{-4} \text{V}^{-1}$	4.67	4.71	4.8	5.04	5.48	5.8	6.41	6.74	7.19	7.52	7.86
变形量/mm	0	0.24	0.57	0.64	1.24	2.39	3.77	4.39	5.98	7.43	9.46

由表 2 可知,当试件的应力水平分别为 0MPa、50MPa 和 100MPa 时,计算的相对非线性系数分别为 $4.67 \times 10^{-4} \text{V}^{-1}$ 、 $4.71 \times 10^{-4} \text{V}^{-1}$ 和 $4.8 \times 10^{-4} \text{V}^{-1}$,应力由 0MPa 增加到 100MPa 时,相对非线性系数的增幅仅为 2.8%;当应力大于 200MPa 时,相对非线性系数增加的趋势加快;在整个应力增加过程中,相对非线性系数的增幅约为 63%。当应力低于 200MPa 时,试件的残余变形仅为 1.24mm。这主要是因为 45# 钢的比例极限是 200MPa,如果试件的拉伸应力低于 200MPa 时,试件主要发生弹性变形,当应力卸载时试件具有较强的弹性恢复能力,所以试件的残余变形非常小。而理论上在比例极限内,应力卸载后试件的残余变形应为 0,但由于在应力加载过程中试件和试验机夹头之间存在滑移,使试件在弹性变形阶段的残余变形并不严格为 0。而当拉伸应力大于 200MPa 时,试件的残余变形相对比较大,最大变形为 9.46mm。通过比较试件在离线测量过程中相对非线性系数和残余变形的变化情况可知,两参数也具有相似的变化趋势。

3.3 在线和离线测量的比较

基于在线和离线实验,比较两种情况下试件的相对非线性系数和变形。相对非线性系数随试件拉伸应力的变化趋势如图 6(a)所示,而试件变形随应力的变化趋势如图 6(b)所示。

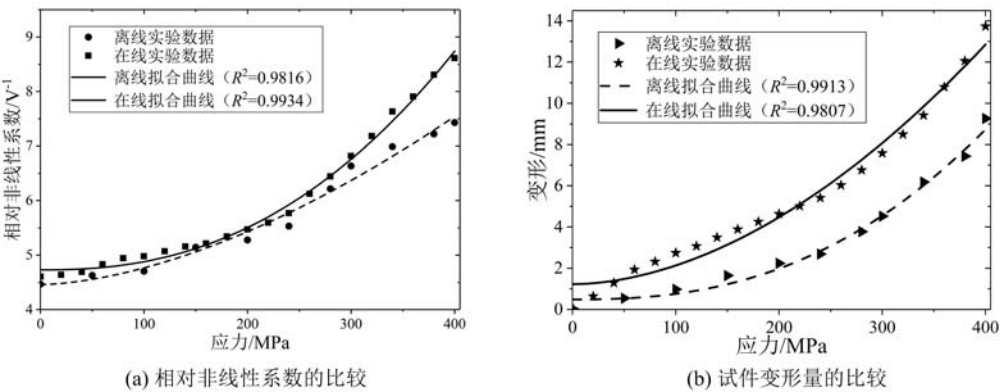


图 6 在线和离线实验数据比较

Fig. 6 Comparison between on-line and off-line experiment data

由图 6(a)可知,试件应力由 0MPa 增加至 400MPa 过程中,在线和离线实验的相对非线性系数的变化趋势是一致的,在线实验中相对非线性系数的增幅约为 87%,离线实验中该参数的增幅约为 63%。

在图 6(b)中,随着应力水平的增加,在线和离线过程中试件的变形逐渐增加,两组变形量的变化趋势保持一致;当应力低于 200MPa 时,在线和离线的变形量均比较小,而当应力大于 200MPa 时,变形的增加趋势加快,尤其是超过 300MPa 后,试件的变形更加明显。从图 6(b)还可以发现,在线变形的最优拟合曲线在离线变形最优拟合曲线的上方,这表示在相同的应力水平下,在线实验的变形量明显大于离线实验的变形量。在线变形量是试件在应力加载过程中获得的弹性变形和塑性变形的总和,而离线变形量是试件在应力卸载后得到的残余变形量。45# 钢是一种弹塑性材料,如果试件受到一定的拉伸应力后再卸载,由于试件具有较强的弹性恢复能力,因此在相同的应力水平下,试件的在线变形量大于离线变形量。对比图 6(a)和(b)可知,不管是在线还是离线实验过程中,只要试件的变形状态比较明显,计算得到的相对非线性系数就会比较大。

在统计学中,皮尔逊关联系数是一种度量两个变量间相关程度的物理量。本研究中使用皮尔逊关联系数来定量说明相对非线性系数与材料变形之间的关系。基于图 6 的实验数据,在线和离线实验的皮尔逊关联系数分别为 0.9876 和 0.9884,这说明两组实验过程中相对非线性系数与材料变形之间存在较强的相关关系。也就是说,当试件的变形量增加时,会引起材料非线性系数的增加,这说明相对非线性系数与材料变形是密切相关的。

3.4 相对非线性系数和试件变形之间的关联性分析

基于在线和离线实验,可得相对非线性系数和试件变形之间的关系如图 7 所示,其中试件的变形为自变量,相对非线性系数为因变量。

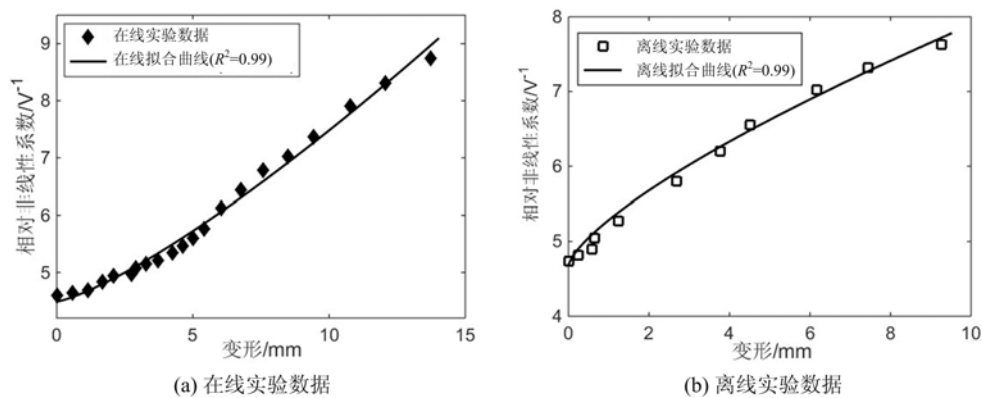


图 7 相对非线性系数和试件变形之间的关系

Fig. 7 Correlation between relative nonlinear coefficient and deformation

对比图 7(a)和(b)可知,随着自变量——试件变形的增加,因变量——相对非线性单调递增。由图 7 可见,试件应力增加过程中,材料微观结构的变化会导致材料发生明显的宏观变形,因而这也是引起超声波非线性系数发生变化的根本原因。由以上分析可知,金属材料的变形必然会引起超声波传播特性的变化,从而改变相对非线性系数,试件的变形量和相对非线性系数之间存在一定的关系。

超声波在材料内部传播的非线性特性与材料微观结构、微观变形和应力等参数有关,而材料的宏观变形 ϵ_p 同样与材料的微观特性和应力状态有关,因此,相对非线性系数和材料宏观变形可以用式(9)和式(10)来描述。

$$\beta' = f(\epsilon_m, \Xi, \sigma) \quad (9)$$

$$\epsilon_p = f(\epsilon_m, \Xi, \sigma) \quad (10)$$

式中: ϵ_m 、 Ξ 和 σ 分别为材料的微观变形、微观结构参数和应力。基于式(9)和式(10)可得,材料在某种应力水平下的相对非线性系数可以通过材料的宏观变形计算得到:

$$\beta' = \varphi(\epsilon_p, \sigma) \quad (11)$$

如果材料的变形仅仅是由材料微观结构演化引起的,那么材料的宏观变形可以看作是位错密度的单值函数。由式(11)可知,在完全消除外部应力的条件下,材料的相对非线性系数仅仅依赖于材料的位

错密度,而这与 Hikata 等^[17]的研究成果是一致的。

基于 Hikata 等^[17]的研究,相对非线性系数和位错密度的变化是一种幂指数函数。如果完全消除材料的外部应力,相对非线性系数的变化可以大致表示为

$$\beta' = \beta_0' + \lambda \epsilon_p^m \quad (12)$$

式中: λ 为常数; m 为幂指数的系数; β_0' 为初始状态下的相对非线性系数,即试件应力状态为 0 时的相对非线性系数。式(12)表示材料的宏观变形和相对非线性系数之间的依赖关系。

以在线实验数据为基础,利用最小二乘法拟合图 7(a)的实验数据,在线实验中相对非线性系数 β_{on}' 和在线变形量 ϵ_{on} 之间的最优指数拟合曲线为

$$\beta_{on}' = 4.4591 + 0.1584 \epsilon_{on}^{1.2760} \quad (13)$$

在线数据的拟合过程中, $R^2 = 0.9872$, 该值非常接近 1, 表示拟合曲线与实验数据的吻合度非常高, 因此, 可以用式(13)表示在线实验过程中相对非线性系数和变形量之间的关系。

对于图 7(b)的离线实验数据, 相对非线性系数 β_{off}' 和离线变形量 ϵ_{off} 之间的最优指数拟合曲线为

$$\beta_{off}' = 4.6916 + 0.5957 \epsilon_{off}^{0.7305} \quad (14)$$

离线数据的曲线拟合过程中, $R^2 = 0.9904$, 该值也非常接近于 1, 因此, 可以用式(14)表示离线实验过程中相对非线性系数和变形量之间的关系。

由式(13)和式(14)可知, 对于在线实验数据, 最优指数拟合曲线的常数 λ 和幂指数系数 m 分别为 0.1584 和 1.2760, 而离线实验数据中这两个参数分别为 0.5957 和 0.7305。基于在线和离线实验数据可以发现, 两组最优拟合曲线的常数 λ 和幂指数系数 m 存在一定的区别, 这有效地反映了 45 # 钢试件在不同的拉伸模式下材料内部的微观结构存在一定的差异, 而材料微观结构的差异会影响超声波传输的非线性特性。由以上分析可知, 在不了解材料微观结构的情况下, 可以通过材料的宏观结构变形状态计算金属构件的超声非线性系数, 而这对实际工程应用中金属材料的塑性损伤评估是非常方便的。

4 结 论

本研究利用 LCR 波在金属材料中传输的非线性特性对材料的塑性损伤进行评估, 主要结论如下:

(1) 在线和离线测量过程中, 相对非线性系数和宏观变形均随着应力水平的增加而单调递增, 且两者具有相似的变化趋势; 在相同的应力水平下, 离线实验的试件变形均小于在线实验的试件变形。

(2) 在线和离线实验过程中, 相对非线性系数和材料变形之间的皮尔逊关联系数非常接近 1, 说明两者具有较高的关联性。

(3) 建立相对非线性系数和宏观变形之间的幂指数函数关系, 在线和离线实验的幂指数系数分别为 1.2760 和 0.7305, 这种差异反映了金属材料在经受不同加载模式时产生的微观结构的差异。基于幂指数函数关系, 可以利用材料的宏观变形预测相对非线性系数的变化, 这在实际工程应用中材料塑性损伤进行评估是非常方便的。本研究仅对 45 # 钢材料进行了理论和实验分析, 在后续工作中会对铝等其他材料进行相关研究。

参考文献:

- [1] 焦敬品, 刘芸, 吴斌, 等. 金属板结构疲劳损伤二倍频兰姆波检测方法研究[J]. 实验力学, 2021, 36(2):157—166 (JIAO Jingpin, LIU Yun, WU Bin, et al. Fatigue damage detection in metal plates using second harmonic Lamb wave[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(2):157—166 (in Chinese))
- [2] 张颖, 吴昊, 刘延雷, 等. Q245R 钢拉伸过程屈服载荷的声学测试实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(4):644—650 (ZHANG Ying, WU Hao, LIU Yanlei, et al. Experimental study on acoustic measurement of Q245R steel yield load in tensile process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4):644—650 (in Chinese))
- [3] 刘增华, 徐庆龙, 董拓灿, 等. 基于时间反转法的 Lamb 波检测技术的研究进展[J]. 实验力学, 2015, 30(2):131—141 (LIU Zenghua, XU Qinglong, DONG Tuocan, et al. Progress of Lamb wave detection technology based on time reversal method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(2):131—141 (in Chinese))
- [4] Frouin J, Sathish S, Matikas T E, et al. Ultrasonic linear and nonlinear behavior of fatigued Ti-6Al-4V[J].

- Journal of Materials Research, 1999, 14(4):1295—1298.
- [5] 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[J]. 力学进展, 2005, 35(1):52—68 (SHUI Guoshuang, WANG Yuesheng, QU Jianmin. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1):52—68 (in Chinese))
- [6] Walker S V, Kim J, Qu J M, et al. Fatigue damage evaluation in A36 steel using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. NDT & E International, 2012, 48:10—15.
- [7] Morris W L. Acoustic harmonic generation due to fatigue damage in high-strength aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(11):6737—6741.
- [8] Li Wenkai, Cui Haitao, Wen Weidong, et al. In situ nonlinear ultrasonic for very high cycle fatigue damage characterization of a cast aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 645:248—254.
- [9] Shui Guoshuang, Wang Yuesheng, Gong Fei. Evaluation of plastic damage for metallic materials under tensile load using nonlinear longitudinal waves[J]. NDT & E International, 2013, 55:1—8.
- [10] Valluri J S, Balasubramaniam K, Prakash R V. Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques[J]. Acta Materialia, 2010, 58(6):2079—2090.
- [11] Cai Yeqing, Sun Jinzhong, Liu Chengjie, et al. Relationship between dislocation density in P91 steel and its nonlinear ultrasonic parameter[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(11):1024—1030.
- [12] 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.
- [13] Kim J Y. 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.
- [14] Hikata A, Truell R, Granato A, et al. Sensitivity of ultrasonic attenuation and velocity changes to plastic deformation and recovery in aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(4):396—404.
- [15] Zhang Jianfeng, Xuan Fuzhen, Xiang Yanxun, et al. Effects of cyclic and monotonic deformations on nonlinear ultrasonic response of austenitic stainless steel: a comparative study[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5):2008—2016.
- [16] Zhang Jianfeng, Li Shenyu, Xuan Fuzhen, et al. Effect of plastic deformation on nonlinear ultrasonic response of austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622:146—152.
- [17] 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.
- [18] Cash W D, Cai W. Contribution of dislocation dipole structures to the acoustic nonlinearity[J]. Journal of Applied Acoustics, 2012, 111(7):74906.
- [19] Kim J Y, Qu J, Jacobs L J, et al. Acoustic nonlinearity parameter due to micro-plasticity[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2006, 25(1):28—36.
- [20] Wu Bin, Yan Binsheng, He Chunfu. Nonlinear ultrasonic characterizing online fatigue damage and in situ microscopic observation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(12):2597—2604.
- [21] Song Wentao, Xu Chunguang, Pan Qinxue, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2):365—371.
- [22] 阎红娟, 徐春广, 肖定国, 等. 金属材料拉伸应力非线性超声特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6):22—29 (YAN Hongjuan, XU Chunguang, XIAO Dingguo, et al. Research on nonlinear ultrasonic properties of tension stress in metal materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6):22—29 (in Chinese))

Plastic damage evaluation of metal materials based on the nonlinear critical refraction longitudinal wave

ZHANG Yuhua¹, QUAN Silong^{1,2}, HU Xiaoya¹, CHEN Qiang¹,

LI Yuezhong¹, LIU Shubo¹, GE Yuanxiang¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Engineering Province Engineering Research Center of New Energy Technology and Equipment,

East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: In this paper the nonlinear property of critical refraction longitudinal wave was applied to evaluate the plastic damage of metallic materials in actual engineering application. Firstly, the two groups of specimens were subjected to on-line and off-line stress loading respectively, so that the specimens have different stress states. Then the nonlinear ultrasonic experiments based on critical refraction longitudinal wave were conducted on two kinds of specimens and the relative nonlinear coefficient was calculated. The experimental results indicate that the relative nonlinear coefficient and deformation increase monotonically with stress, both on-line and off-line experiments have similar variation trend. Furthermore, the Pearson correlation coefficient between the relative nonlinear coefficient and deformation are 0.9884 and 0.9876, respectively, which indicates the relative nonlinear coefficient and deformation has strong correlation. The power exponential function is established, which can be used to quantitatively explain the internal relationship between the macroscopic deformation of specimens and the relative nonlinear coefficient. Without knowing the microstructure of material, the power exponential relation can be applied to predict the relative nonlinear coefficient according to the deformation of material, which is very convenient to evaluate the plastic damage in practical engineering application.

Keywords: nonlinear critical refraction longitudinal wave; on-line load; off-line load; plastic damage; relative nonlinear coefficient