

Q460 疲劳损伤的非线性导波检测及寿命预测*

郭宇^{1,2}, 贾攀^{1,2}, 丁涛涛^{1,2,3}, 朱武军³

(1. 江苏徐工国重实验室科技有限公司 徐州, 221004) (2. 高端工程机械智能制造国家重点实验室 徐州, 221004)
(3. 华东理工大学机械与动力工程学院 上海, 200237)

摘要 钢结构在实际工况环境中受到瞬态和重复载荷影响会发生损伤, 为保障设备的安全运行, 需要针对较易发生损伤的关键性钢结构进行健康监测和寿命评估。首先, 利用非线性超声导波具有对微纳尺度损伤敏感以及检测效率高等优点, 分别采用离线和在线非线性超声导波检测方法对 Q460 高强钢疲劳损伤试样进行检测和表征, 构建了非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线; 其次, 利用非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线构建了 Q460 高强钢疲劳寿命评估方法, 在损伤状态检测的同时实现剩余寿命的预测。离线和在线检测试验结果表明, 非线性超声参量随疲劳寿命呈现先增后减的变化趋势, 且在疲劳寿命为 60% 附近出现峰值。

关键词 Q460 高强钢; 疲劳损伤; 非线性超声参量; 寿命预测
中图分类号 TH113.1; TH114

引言

Q460 作为一种低合金高强度结构钢, 具有较高的强度和良好的塑性, 被广泛应用于工程机械、化工、矿山、桥梁及建筑等领域^[1-3]。Q460 高强钢在服役过程中长期承受频繁交替的拉压和弯曲载荷, 极易产生疲劳损伤。随着时间的推移, 疲劳损伤累积导致钢材内部的微观结构发生变化, 从而降低了其承载能力且严重影响设备的安全运行。在服役载荷和实际工况条件下, 钢材的疲劳损伤最初表现为早期微观尺度的演化和力学性能的退化, 然后是中期微缺陷的形成以及缓慢扩展, 后期是宏观缺陷的迅速扩展最终导致钢结构的断裂。研究表明, 宏观疲劳裂纹形成前的早中期损伤演化发展占了疲劳寿命的 80%~90%^[4-8]。因此, 系统研究钢结构疲劳损伤早中期的检测和表征方法, 对于保障设备的安全运行具有重要意义。

目前, 常用的疲劳损伤检测方法主要包括磁粉检测、渗透检测、射线检测和超声检测等。磁粉检测和渗透检测主要用于检测疲劳引起的构件表面和近表面损伤, 以宏观疲劳裂纹为主, 并不适用于构件内部疲劳损伤的检测。超声检测和射线检测适用于检测构件表面和内部的疲劳损伤, 但是射线检测对于平面型损伤容易漏检, 且该方法成本较高, 对人体有

危害。Worlton^[9]将超声导波作为一种检测方法引入到无损检测领域。随着超声导波检测方法在无损检测和结构健康监测领域的应用, 研究人员将波速、振幅、模态变化及导波散射等参量作为线性超声导波损伤检测的指标, 然而这些指标易受试验操作方法、环境因素、几何形状和边界条件等方面的影响^[10-11]。此外, 线性超声导波检测方法对于材料早中期损伤的敏感性较弱, 多用于宏观损伤的检测和定位表征。Nagy^[12]通过试验证明了非线性超声损伤检测方法比线性超声具有更好的敏感性。非线性超声导波检测方法可以克服线性超声导波的缺点, 有效实现微观组织缺陷的检测^[13-16]。因此, 通过构建非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系, 可进一步实现钢构件的早中期疲劳损伤检测和寿命预测。

当前, 已有学者使用非线性超声检测方法对一些低强度钢材中存在的疲劳损伤进行了检测和评价。Jhang^[17]研究得出, SS41 钢和 SS45 钢非线性超声参量随疲劳周期呈现递增的趋势。Sagar 等^[18]将非线性纵波方法应用于珠光体钢的低周疲劳损伤检测研究, 得出非线性超声参量随疲劳损伤呈现先增后减再增的变化趋势。Zhang 等^[19]针对 304 不锈钢的低周疲劳损伤进行非线性纵波测量研究, 发现非线性超声参量随疲劳周期数呈现先增后减的趋势。Wang 等^[20]采用非线性超声导波检测方法对 Q690

* 国家自然科学基金资助项目(12004114)

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-25

高强钢的塑性损伤进行了研究,得出非线性超声参量随应变呈现先增后减的变化趋势。此外,诸多学者利用非线性超声检测方法开展了其他金属材料的疲劳损伤研究^[21-26]。但是,受到试样制备等问题的困扰,采用非线性超声导波对高强钢疲劳损伤的研究较少。另外,针对金属材料中疲劳损伤的非线性超声导波检测方法仍然存在一些问题亟需解决,例如缺乏疲劳损伤的全寿命周期内寿命预测方法等。

笔者开展了Q460高强钢疲劳损伤的非线性超声导波检测及表征试验研究,分别采用离线和在线非线性超声导波检测方法研究了全疲劳寿命周期内Q460高强钢非线性超声参量的变化趋势,构建了非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线,并利用非线性超声参量与疲劳寿命的关系曲线初步建立了疲劳损伤寿命评估方法,以便实现Q460高强钢的剩余寿命预测。

1 非线性超声检测理论

非线性超声导波检测方法主要是基于超声导波在材料早期损伤阶段能够表现出明显的非线性效应,从而实现构件早期损伤的有效检测和表征。通过超声换能器激励产生大幅值高能超声信号进入固体介质,当超声波在传播过程中遇到微损伤时,与材料微观结构相互作用并产生高次谐波信号。由于高次谐波的强度与材料微观组织变化之间存在关联性,因此可以通过测量高次谐波信号的变化情况对构件的损伤状态进行表征和分析。

固体介质中非线性应力-应变关系可以描述为

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

其中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量; β 为二阶非线性系数。

固体介质中质点在 x 方向上的运动方程为

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

其中: ρ 为材料密度; u 为 x 方向位移; t 为传播时间。

假设一列 x 方向传播的压缩纵波进入固体介质中,结合式(1)和式(2)可得该纵波的波动方程为

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

当进入固体介质的超声波为单频正弦波时,即 $u = A_1 \sin \omega t$,在不考虑声衰减的情况下,结合式(2)和式(3)可得固体介质中超声波的表达式^[21]为

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

其中: μ 为 x 方向位移; A_1 为基波信号的幅值; k 为波数,即 $k = 2\pi/\lambda$; ω 为角速度; β 为非线性超声参量。

由此可知,二次谐波幅值为

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

对式(5)进行变换可得非线性超声参量为

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

在损伤检测和评估过程中,为了简化非线性超声参量的计算量,通常使用相对非线性超声参量作为评价材料中微损伤状态的主要参量^[5, 26],即

$$\beta_R = A_2/A_1^2 \quad (7)$$

2 试验系统及试样制作

2.1 非线性超声检测系统

非线性超声导波试验装置示意图如图1所示。检测试验使用RITEC RAM-5000 SNAP高能超声检测系统进行加汉宁窗正弦脉冲信号的激励。该系统具有高输出功率以及宽频率范围激励的特点,可以实现待激发信号参数的调控以及接收信号的增益和滤波,并且可以同步具有声速、衰减、时域和频域等数据分析功能。另外,非线性超声导波检测试验设备还包括示波器、滤波器、信号衰减器、后端增益器、计算机、角度超声换能器和Q460疲劳试样等。高能超声检测系统驱动角度超声换能器在Q460钢板中激励产生超声导波信号,然后由接收端角度超声换能器获取板中的超声导波信号,再转换为电信

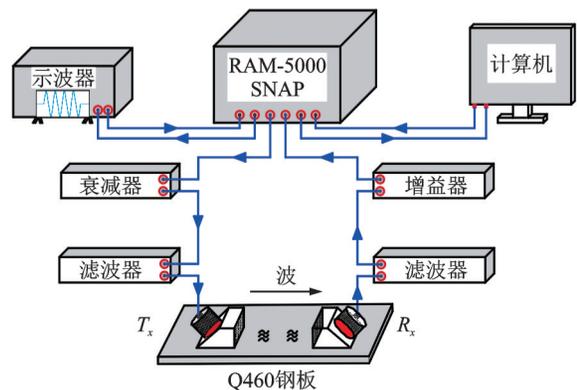


图1 非线性超声导波试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of nonlinear ultrasonic waves experimental device

号进入高能超声检测系统和示波器,进行信号处理并保存。

2.2 疲劳试样制作

根据《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[27],将Q460高强钢制作成标准试样,试件尺寸如图2所示。试样厚度为5 mm,中间测试段长度为90 mm,宽度为25 mm,两侧夹持段长度和宽度均为50 mm。Q460材料参数如表1所示。采用Instron液压伺服万能试验机对Q460试样进行室温下的疲劳试验,试验装置及断裂试样如图3所示。考虑到板状试样不易承受压应力,因此采用应力比为0.1的拉-拉疲劳方式。试样制作过程中采用应力控制模式,频率为10 Hz,应力选取Q460高强钢屈服极限强度的90%。

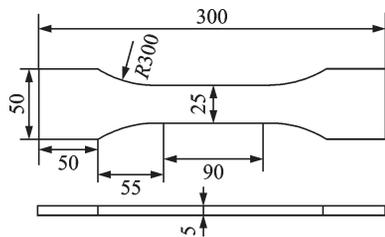


图2 Q460试件尺寸示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of specimen of Q460 (unit: mm)

表1 Q460材料参数

Tab.1 Material parameters of Q460

| 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 纵波速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 横波速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|--|--------------|------|---|---|
| 7 827.8 | 212.5 | 0.29 | 5 928.7 | 3 248.4 |

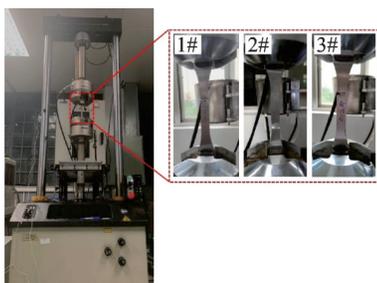


图3 Q460疲劳试验装置及断裂试样

Fig.3 Fatigue test device and fracture sample of Q460

为了标定Q460高强钢试样在相应条件下的疲劳寿命,随机选取3根试样进行疲劳断裂试验,即相同试验条件下获得每根试样疲劳断裂所需的疲劳周期数,最终得到3根试样的疲劳断裂周期数分别为258 010周、251 670周和249 530周,平均疲劳断裂周期数为253 070周。将3根试样的平均疲劳断裂

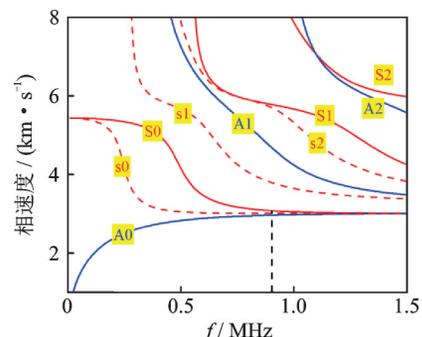
周期数作为Q460高强钢试样的疲劳断裂寿命。在相同试验条件下使用连续试验方法依次制作3批相同的疲劳试样,每批疲劳试样连续加载周期数均设置为10%~90%的疲劳寿命,间隔为10%的疲劳寿命,每批疲劳试样存在9个不同的寿命阶段。

3 结果及讨论

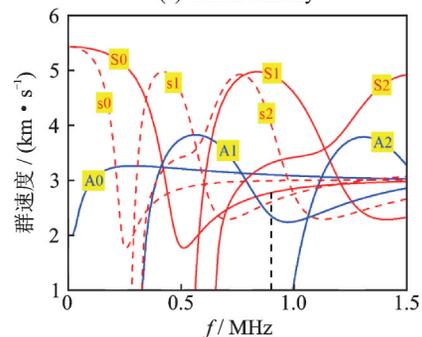
3.1 非线性超声导波的模式选择

基于超声导波频散方程绘制5 mm厚Q460板的频散曲线,如图4所示。其中:蓝色实线为反对称A模式基频导波频散曲线;红色实线为对称S模式基频导波频散曲线;红色虚线为对称模式二倍频导波频散曲线,即对称模式基频导波频散曲线的频率减半获得。非线性超声导波试验中获得二次谐波信号的主要条件是选用的模式必须满足相速度匹配和非零能量流。考虑到实际工况中应用的有效性和便利性,选取频率为0.9 MHz对应的S0-s0模式对开展试验研究。该模式对满足相速度匹配条件,波长大且衰减小,激发效率参量相对较大,更利于在工程中的应用。

根据Snell定律可以计算超声换能器进行基频S0模式激励时的楔块角度^[5],其计算公式为



(a) 相速度
(a) Phase velocity



(b) 群速度
(b) Group velocity

图4 5 mm厚Q460板的频散曲线

Fig.4 Dispersion curve of 5 mm thick Q460 plate

$$\sin \theta = v_{\text{wedge-L}} / v_p \quad (8)$$

其中: $v_{\text{wedge-L}}$ 为楔块材料的体纵波声速; v_p 为基频 S0 模式在相应频率下的相速度。

本研究采用有机玻璃作为楔块材料, 即 $v_{\text{wedge-L}} = 2654.7 \text{ m/s}$; 基频 S0 模式在频率为 0.9 MHz 时的相速度为 $v_p = 3067.8 \text{ m/s}$ 。因此, 非线性超声导波试验过程中超声换能器的楔块角度约为 60° 。

3.2 离线/在线非线性超声导波检测

首先, 采用离线非线性超声导波检测方法分别对不同阶段疲劳寿命的 Q460 高强钢试样进行试验测量, 构建非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线。试验过程中, 激发端和接收端角度超声换能器在每个待测试样中的距离均为 90 mm, 即试样中的平行段。将获得的时域信号进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, 简称 FFT) 分析, 从而得到基频和二次谐波信号的幅值, 然后代入式(7)计算获得的相对非线性超声参量, 最后归一化处理无损试样的相对非线性超声参量。离线试验中相对非线性超声参量随疲劳寿命的变化如图 5 所示。由图可知, 拟合曲线呈现先增后减的变化趋势, 且在疲劳寿命为 60% 附近时达到最大值。

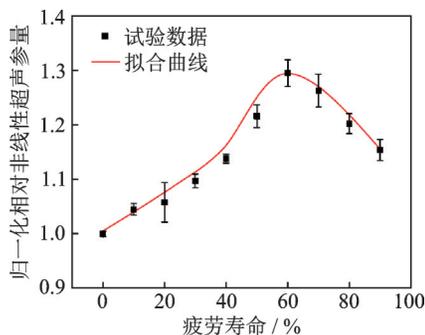


图5 离线试验中相对非线性超声参量随疲劳寿命的变化

Fig.5 Variation trend of relatively nonlinear ultrasonic parameters with fatigue life in off-line experiments

考虑到不同疲劳阶段 Q460 高强钢试样之间存在特异性以及实际工况检测中的环境差异性, 离线非线性超声导波检测试验结果具有一些误差。因此, 开展了在线非线性超声导波检测试验, 相关试验参数均与离线试验相同。在线非线性超声导波测量试验布置如图 6 所示。使用夹具进行激发端和接收端角度超声换能器的固定, 同时保证角度超声换能器与试样之间具有良好的耦合性和稳定性。

在疲劳试验过程中, 每隔 100 周次实时保存 1 次测量数据, 实现了非线性超声导波信号的在线获取,

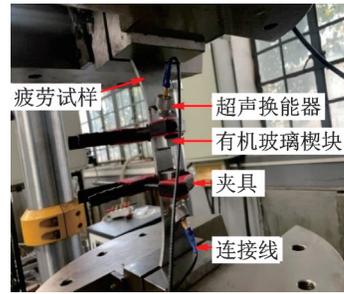


图6 在线非线性超声导波测量试验布置

Fig.6 On-line nonlinear ultrasonic guided wave measurement experiment

从而使试验更贴近于实际工况。使用 FFT 分析采集的非线性超声导波时域信号, 以第 1 组测量数据得到的相对非线性超声参量值进行归一化处理, 最终得到在线试验中相对非线性超声参量随疲劳寿命的变化, 如图 7 所示。相对非线性超声参量同样呈现先增后减的变化趋势, 在疲劳寿命为 60% 附近时达到最大值, 之后出现明显的下降趋势。

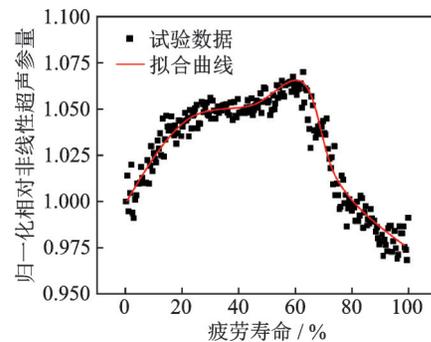


图7 在线试验中相对非线性超声参量随疲劳寿命的变化

Fig.7 Variation trend of relatively nonlinear ultrasonic parameters with fatigue life in on-line experiments

在疲劳寿命的 60% 之前, Q460 高强钢材料中发生微孔洞、微裂纹的萌生和聚集, 从而使材料中产生非线性效应。超声导波经过疲劳损伤区域之后产生的二次谐波信号增强, 非线性超声参量随之出现递增的变化趋势。在疲劳寿命的 60% 之后, 微裂纹逐渐扩展为宏观裂纹, 在一定程度上阻碍了超声信号的传播, 使得信号幅值出现了衰减, 导致非线性超声参量出现递减的变化趋势。因此, 非线性超声参量的变化在一定程度上反映了 Q460 高强钢微观组织的不断劣化, 可将非线性超声参量的变化曲线应用于评估材料内部的损伤情况, 并对其进行损伤程度定级及寿命预测。

3.3 非线性超声参量-剩余寿命预测方法

本研究分别通过离线和在线非线性超声导波检

测试试验,获得了相对非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线,非线性超声参量受到疲劳损伤过程中微观组织演化和裂纹扩展的影响而呈现先增后减的变化趋势。在实际工况中,首先获得钢构件健康状态下的相对非线性超声参量,然后间断性获得构件使用过程中的相对非线性超声参量,最后将归一化相对非线性超声参量与非线性超声参量-疲劳寿命关系曲线进行比较,以此评估疲劳损伤所处的阶段及剩余疲劳寿命。Q460疲劳损伤剩余寿命预测如图8所示。当归一化相对非线性超声参量 $\beta_1=1.1$ 时,评估分析得到Q460构件所处的疲劳寿命阶段为26%,则剩余寿命分数应为 $N_1=74%$,即图8中蓝色虚线所示;当归一化相对非线性超声参量 $\beta_2=1.2$ 时,构件的剩余寿命分数为 $N_2=46%$ 或者 $N_2=17%$,即图8中橙色点划线所示,此时需要进一步跟踪相对非线性超声参量的变化趋势以确定剩余寿命。

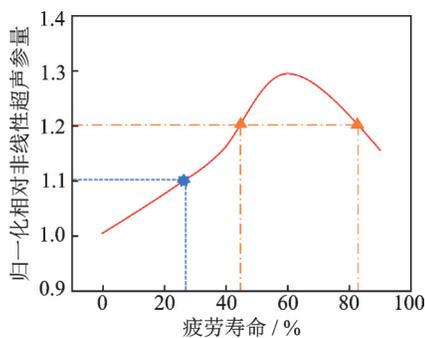


图8 Q460疲劳损伤剩余寿命预测

Fig.8 Residual life prediction of fatigue damage of Q460

4 结论

1) 分别采用离线和在线非线性超声导波检测方法实现了Q460高强钢疲劳损伤的检测和评估,并构建了非线性超声参量与疲劳寿命之间的关系曲线。结果显示,相对非线性超声参量随疲劳寿命呈现先增后减的变化趋势,在疲劳寿命为60%附近时出现最大值。

2) 非线性超声参量增加阶段主要受到微裂纹、微孔洞等微损伤的形成和发展的影响,非线性超声参量减小阶段体现在微损伤向宏观损伤的发展,宏观损伤的形成阻碍了超声信号的传播。

3) 非线性超声参量随疲劳周期数的变化反映了Q460高强钢的不断劣化。基于非线性超声参量-疲劳寿命关系曲线构建了Q460高强钢疲劳寿命评估方法,以便实现剩余寿命的预测。

参 考 文 献

- [1] 冯祥利. 低合金高强Q460钢厚板焊接接头的变形及断裂行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [2] HAN X, CHANG M, LI H F, et al. Mechanical behavior of Q460 high-strength steel under low-cycle fatigue loading [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022: 8471016
- [3] 邱晨, 邢信慧, 张丽, 等. Q460高强钢材及T形对接接头超低周疲劳特性[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(16): 166-174.
QIU Chen, XING Jihui, ZHANG Li, et al. Ultra-low cycle fatigue properties of Q460 high strength T-shape butt weld joints [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 166-174.(in Chinese)
- [4] MEYENDORF N G H, RÖSNER H, KRAMB V, et al. Thermo-acoustic fatigue characterization [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40: 427-434.
- [5] SUN D, ZHU W, QIU X, et al. Nonlinear ultrasonic detection of closed cracks in metal plates with phase-velocity mismatching [J]. *NDT and E International*, 2023, 135: 102788.
- [6] SAGAR S, DAS S, PARIDA N, et al. Non-linear ultrasonic technique to assess fatigue damage in structural steel [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(2): 199-202.
- [7] DING T T, ZHU W J, MA C Y, et al. Influence of cyclic-loading induced fatigue micro-crack growth on Generation of nonlinear ultrasonic Lamb waves [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40(3): 62.
- [8] 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 Bingsheng, LIU Ziran, ZHANG Yuechun, et al. Experimental study of early fatigue nonlinear ultrasonic detection in Magnesium alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 20-24.(in Chinese)
- [9] WORLTON D. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32: 967-971.
- [10] MITRA M, GOPALAKRISHNAN S. Guided wave based structural health monitoring: a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(5): 053001.
- [11] SU Z, ZHOU C, HONG M, et al. Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: Linear versus nonlinear signal features [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2014, 45(1): 225-239.
- [12] NAGY P B. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization [J]. *Ultrasonics*,

- 1998, 36: 375-381.
- [13] CHILLARA V, LISSENDEN C. Review of nonlinear ultrasonic guided wave nondestructive evaluation: theory, numerics, and experiments[J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(1): 011002.
- [14] 李卫彬, 项延训, 邓明晰. 超声兰姆波二次谐波发生效应的理论、试验及应用研究进展[J]. *科学通报*, 2022, 67(7): 583-596.
LI Weibin, XIANG Yanxun, DENG Mingxi. Advances in theoretical, experimental and applied studies on second-harmonic generation of ultrasonic Lamb waves [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(7): 583-596. (in Chinese)
- [15] LISSENDEN C J. Nonlinear ultrasonic guided waves-principles for nondestructive evaluation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(2): 021101.
- [16] XIANG Y, DENG M, XUAN F. Creep damage characterization using nonlinear ultrasonic guided wave method: a mesoscale model[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(4): 044914.
- [17] JHANG K Y. Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, 47(3): 540-548.
- [18] SAGAR S, METYA A K, GHOSH M, et al. Effect of microstructure on non-linear behavior of ultrasound during low cycle fatigue of pearlitic steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(6): 2895-2898.
- [19] ZHANG J, XUAN F. Fatigue damage evaluation of austenitic stainless steel using nonlinear ultrasonic waves in low cycle regime[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(20): :204906.
- [20] WANG X, XIANG Y X, ZHU W J, et al. Damage assessment in Q690 high strength structural steel using nonlinear Lamb waves [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117384.
- [21] DENG M, PEI J. Assessment of accumulated fatigue damage in solid plates using nonlinear Lamb wave approach[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 121902.
- [22] 吴斌, 颜丙生. 非线性超声检测镁合金疲劳的仿真和试验[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(1): 96-100.
WU Bin, YAN Bingsheng. Simulation and experiment of fatigue damage measurement in Magnesium alloy using nonlinear ultrasonic [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(1): 96-100. (in Chinese)
- [23] JANG J, SOHN H. Online remaining fatigue Life estimation of curved steel connection using nonlinear ultrasonic modulation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 170: 107566.
- [24] 屈文忠, 李拯, 王芝, 等. 基于非线性超声调制方法的损伤识别与定位[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5): 852-857.
QU Wenzhong, LI Zheng, WANG Zhi, et al. Damage detection and localization using nonlinear ultrasonic modulation method [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5): 852-857. (in Chinese)
- [25] LEE Y F, LU Y. Identification of fatigue crack under vibration by nonlinear guided waves [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163: 108138.
- [26] HU X, CHING T N, KOTOUSOV A. Early damage detection of metallic plates with one side exposed to water using the second harmonic generation of ultrasonic guided waves [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 176: 109284.
- [27] 中国钢铁工业协会. GB/T 3075—2021 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S].



第一作者简介:郭宇,男,1975年10月出生,博士、研究员。主要研究方向为装备可靠性工程。曾发表《Dissection method of solid rocket motor chamber based on ultrasonic vibration sawing》(《Propellants Explosives Pyrotechnics》2022, Vol.47, No.2)等论文
E-mail: inner_mongolian@163.com

通信作者简介:丁涛涛,男,1993年10月生,博士、工程师。主要研究方向为服役结构的超声导波损伤检测、工程机械可靠性分析及评价。
E-mail: ttding_xcmg@126.com