

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105038

反射式非线性超声评估 P91 钢蠕变状态的试验探究^{*}

宋俊俊^{1,2} 胡 斌² 王 强¹ 孙 亮² 原可义² 胡 栋³ 陈 涛⁴
(1. 中国计量大学质量与安全工程学院 杭州 310018; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029;
3. 泰安市特种设备检验研究院 泰安 271000; 4. 杭州市特种设备检测研究院 杭州 310051)

摘 要: 超声非线性参量作为一种表征金属材料蠕变状态的参数, 通常采用透射法进行检测时需要发射换能器和接收换能器分置于工件两侧, 很难用于在役大型工件蠕变状态检测。针对透射法存在的问题设计了反射式非线性超声检测试验系统(只需一个超声换能器), 通过分析一次底波的反射信号获得材料蠕变状态的信息。对带有焊缝的 P91 钢试块且蠕变时间分别为 0 h、120 h、250 h, 进行非线性超声检测。实验结果表明, 对于蠕变时间 120 h 和 250 h 的试块母材区, 二次谐波非线性参量相对无蠕变时增加量为 2.9%、17.4%, 试块焊缝区相对增加量为 2%、23.6%, 试块热影响区相对增加量为 5.6%、34%。
关键词: 蠕变; 超声非线性参量; 反射式检测方法; P91 钢
中图分类号: TH87 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Experimental study on creep performance evaluation of P91 steel by reflective nonlinear ultrasonic measurement

Song Junjun^{1,2} Hu Bin² Wang Qiang¹ Sun Liang² Yuan Keyi² Hu Dong³ Chen Tao⁴
(1. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Taian Special Equipment Inspection Institute, Taian 271000, China; 4. Hangzhou Special Equipment Inspection Institution, Hangzhou 310051, China)

Abstract: As a parameter to characterize the creep state of metal materials, it usually requires the emission ultrasonic probe and the receiving probe to be in coaxial position in penetration detecting. It is difficult to align the position of the emission probe and the receiving probe accurately when the penetration method is used for detecting and acquisition. A set of reflective nonlinear ultrasonic experiment system is designed to solve the problem. The detection information is extracted by analyzing the reflection signal of a bottom wave. The creep properties of P91 specimen with weld structure and creep time of 0 h, 120 h and 250 h were detected by the experiment system. The results show that the ultrasonic second harmonic nonlinear parameters after the 120 h and 250 h creep time of the P91 steel test block, the relative change of the base metal area is 2.9%, 17.4%, the weld zone is 2%, 23.6%, the heat zone is 5.6%, 34%.
Keywords: creep; ultrasonic nonlinear parameters; reflective detection; P91 steel

0 引 言

蠕变是指金属材料在保持应力不变的条件下, 应变随时间延长而增加的现象。当金属部件在高温环境下受到低于其屈服应力的作用服役时, 蠕变给金属构件带来的损害就无法忽略^[1-3]。金属部件在高温、高压的条件下

长期运行时会产生不可避免的蠕变损伤, 评估高温设备蠕变状态并预测材料剩余寿命就显得极其重要。我国亚临界、超临界机组一般都采用 P91 钢作为主蒸汽管道、高温再热管道等高温承压部件材质, 管道厚度在 30 ~ 60 mm。传统超声检测方法中声速和幅值衰减的变化对于 P91 钢的蠕变损伤变化不够敏感。非线性超声检测方法常用于对疲劳载荷作用下的材料早期性能退化进行定

量识^[4-5]。通过检测透过固体材料的基波和二次谐波幅值获得材料的非线性系数 β 来描述材料的微损伤^[6-7]。

在国外,Cantrell 等^[8]研究了超声非线性系数的变化与共格应变状态的关系,并用模型预测 AA2024 铝合金热处理过程中的超声非线性系数的 β 变化;Kim 等^[9]对于 2.25Cr-1Mo 合金钢的热损伤退化性能用归一化的非线性超声参量 β/β_0 来表征,取得较好效果。Valluri 等^[10]研究了非线性超声系数对于不同应力和温度试验条件下铜的蠕变损伤的敏感程度。Ren 等^[11]分析比较了二阶谐波和三阶谐波的 β 值对于耐腐蚀性 6061T6 铝合金热老化损伤的敏感程度。Sahu 等^[12]用 β 来表征 P92 钢试样(600 °C, 160 MPa 应力水平)的蠕变断裂情况。Metya 等^[13]使用 Lamb 波的非线性参量 β 分析 9Cr-1Mo 钢不同蠕变时间下的损伤情况,并与背散射电子衍射(EBSD)微观分析结果进行比对。Vetrone 等^[14]用三次谐波的非线性参量 β 和声发射信号检测相结合来评估 A572 钢的塑性变形情况。国内相关学者对于镁合金^[15]、钛合金^[16]、铝合金^[17]、P91 钢^[18]、T92 钢^[19]的蠕变状态及 Cr-Mo-V 钢焊接接头塑性损伤^[20]、不锈钢疲劳微损伤^[21]、有机材料^[22]进行高次谐波非线性超声参量检测的系统研究,采用非线性参量来表征不同损伤状态。

总的来说,国内外学者主要采用透射法,两个换能器分别布置于工件的两侧,高频换能器发射超声波信号穿透工件另一个换能器接收信号。但这样的方式对于现场对大型工件(如厚壁管道)无法分开安装超声波发射探头和接收探头,实现在役设备的蠕变状态检测。

因此,本文在 RAM-5000 SNAP 非线性检测系统的基础上,搭建了由一个超声换能器同时完成超声信号的发射和接收功能的反射式试验系统。设计了蠕变时间分别为 0 h、120 h、250 h 的 P91 焊缝试块。对试块中母材区、焊缝区、热影响区的蠕变性能进行检测,并与透射式非线性超声检测结果进行对比分析。

1 非线性超声检测原理

一维纵波为例,简要描述固体中非线性超声波的形成,固体介质非线性应力应变关系可描述为^[4]:

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

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。

声波在固体介质中质点在 x 方向上运动方程为:

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

式中: ρ 为材料密度, u 为 x 方向的位移, t 为传播时间,

x 轴的形变 $\varepsilon(x,t)$ 可以表示为 $\varepsilon = \partial u / \partial x$ 。当一维入射波 $A \sin(kx - \omega t)$ 入射到上述固体材料时,则材料表面处的声波为:

$$u(0,t) = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

其中, k 为波数, ω 为角频率,采用近似迭代法获得超声波的解 $u(h,t)$ 。

则非线性系数 β 的表达式为^[6]:

$$\beta = \frac{8c^2 a_2}{\omega^2 h a_1^2}, \beta \propto \frac{a_2}{a_1^2} \quad (4)$$

超声波二次谐波非线性参量 β 可由二次谐波幅值 a_2 和基频幅值 a_1 计算获得, β 对于材料中微缺陷和进行蠕变状态评价。

2 试验系统及试验对象

2.1 试验系统

在美国 Ritec 公司 RAM-5000 SNAP 非线性高能声学检测系统基础上,采用一个超声换能器布置于工件的一侧,同时完成高频超声信号的发射和接收功能(收-发合置),实现工件的反射式非线性超声检测。检测系统将采集的一次底波反射信号分离为两路,一路基波信号和一路二次谐波信号^[23]。系统激励 20 个周期的 5 MHz 单脉冲正弦信号,通过衰减器对脉冲信号进行能量调整,经双工器进入超声波换能器发射脉冲信号,脉冲信号经过检测试块后携带了大量有用检测信息并由超声换能器接收,进一步接收信号经过双工器后分成两路分别进入有 -40 dB 衰减的基波采集通道和 10 dB 增益滤波的二次谐波信号采集通道,试验装置如图 1 所示。

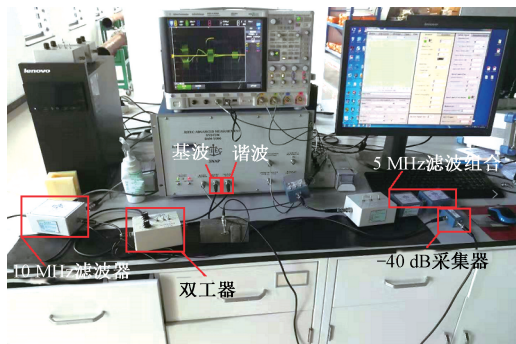


图 1 非线性超声试验系统

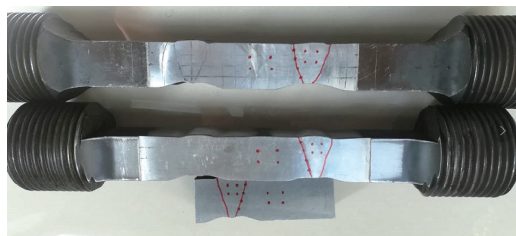
Fig. 1 Nonlinear ultrasonic experiment system

超声波换能器为 Olympus A543 s,其峰值频率 5.25 MHz。试验中 RAM-5000 所激发的高能脉冲群,使得探头激励的单频 5 MHz 信号测波信号满足试验需求,在系统软、硬件的适当增益及滤波作用下,可有效分离并采集二次谐波信号。

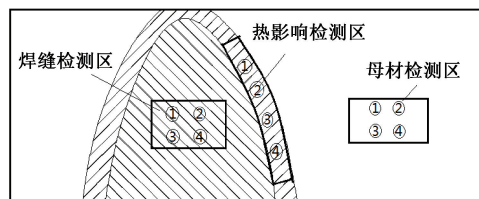
2.2 试验对象

P91 钢材质的 高温部件蠕变位置大多数位于焊缝区域,焊缝区域包括:母材区、焊缝区和热影响区。本试验设计并制作了 3 块厚度为 52 mm 且带 V 形坡口焊缝的 P91 试块进行蠕变状态测试。

P91 试块实物如图 2(a) 所示,试块的焊缝结构属于典型焊缝结构。其中两块大的试块蠕变时间为 250 h、120 h,小的试块蠕变时间 0 h。试块在进行蠕变试验前对试块进行表面渗透检测和埋藏超声检测,并进行长期放置,充分了释放焊接和成型带来的内应力影响。蠕变试验的条件为:50 MPa 单向拉力、700 ℃ 蠕变温度下,且蠕变时间分别为 0 h、120 h、250 h,断裂时间为 350 h。试块有效蠕变平行段尺寸均为:250 mm(长)×52 mm(厚)×35 mm(宽),母材区、焊缝区和热影响区各有 4 个测试位置,其分布如图 2(b) 所示,其中热影响区的宽度约 2~5 mm。



(a) 试块
(a) Test block



(b) 检测位置
(b) Inspection position of welding zone

图 2 试块结构及检测位置

Fig. 2 Structure and inspection position of test block

3 试验结果及分析

3.1 试验校验

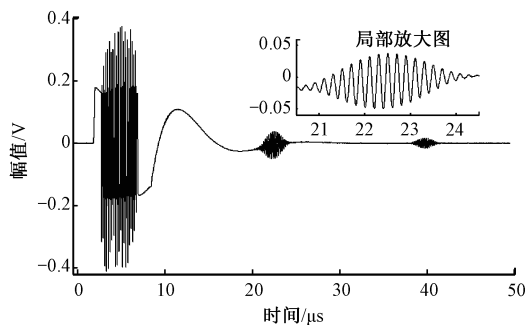
对于采集的高频信号中一次底波信号(包括基波和二次谐波)的时域特征进行分析。

其中基波通道和二次谐波通道的时域信号如图 3 所示。进一步通过时间、声速和传播距离的关系对一次底波进行验证,根据公式:

$$2h = v(t_1 - t_2) \quad (5)$$

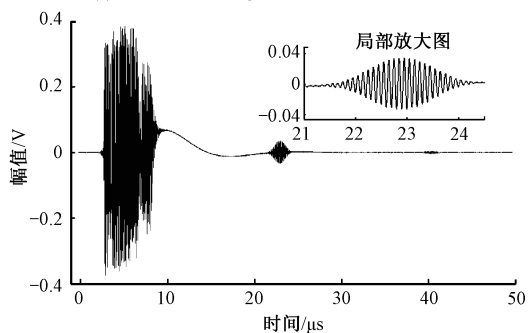
式中: h 为试块厚度、 v 为超声波速。当 $h = 52 \text{ mm}$, $v = 5960 \text{ m/s}$, 且 t_1 为信号接收时间 $20.31 \mu\text{s}$, t_2 为前沿时间 $2.722 \mu\text{s}$, 经计算可以确定在 $20 \sim 25 \mu\text{s}$ 的时域波形信

号由换能器发射 5 MHz 脉冲信号的一次底波反射信号。



(a) 基波通道时域图

(a) Time domain diagram of fundamental waveform



(b) 二次谐波通道时域图

(b) Time domain diagram of second harmonic channel

图 3 不同采集通道波形时域图

Fig. 3 Primary and second harmonic waveforms

上述检测信号的一次底波反射信号经过 -40 dB 采样器衰减后高次谐波信号基本被淹没,对衰减过的信号处理进行频谱分析,基波反射信号的频谱如图 4(a) 所示,中心频率为 5 MHz。检测信号的一次底波反射信号经过双工器和 10 MHz 高通滤波器除去基波信号并经过 10 dB 的增益后,二次谐波的反射信号频谱如图 4(b) 所示,中心频率为 10 MHz。说明该系统采集的检测信号正是试验所需的非线性超声检测信号。

3.2 焊缝结构试验结果分析

对图 2(a) 所示的 3 块 P91 钢试块(蠕变时间为 0 h、120 h 和 250 h)进行二次谐波非线性参量 β 检测。每个区域测量 4 个点再取平均值。对于母材区进行反射式非线性超声检测,不同蠕变时间试块测得的 β 值如图 5 所示。

P91 钢母材区在 0 h、120 h 和 250 h 蠕变时间条件下, β 平均值分别为 0.048 3、0.049 7、0.056 7, 方差分别为 1.1×10^{-7} 、 3.4×10^{-7} 、 7.3×10^{-6} ; 蠕变时间 0 h 时,母材区不同检测点的 β 值与其平均值最大误差约为 1.0%;蠕变时间 120 h 时 β 值与其平均值最大误差约为 1.5%;蠕变时间 250 h 时 β 值与其平均值最大误差扩大至 8.1%。说明随着蠕变时间的增加 P91 钢母材内部呈现蠕变差异。

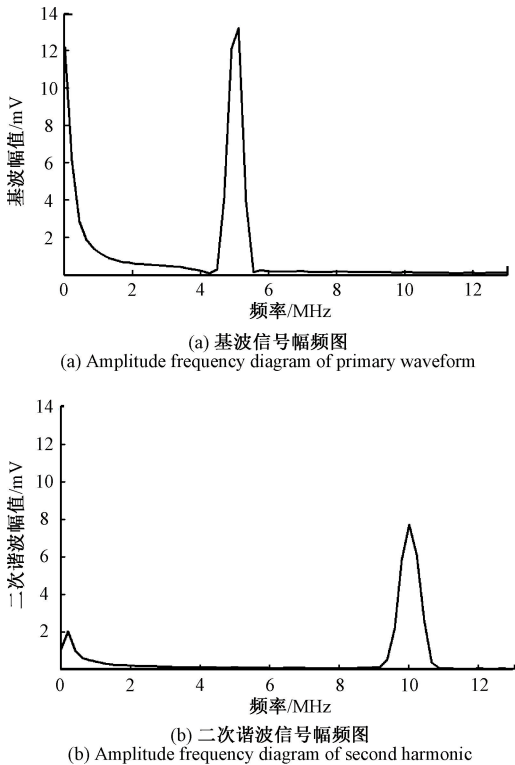


图 4 基波和二次谐波信号的幅频图
Fig. 4 Amplitude-frequency diagram of fundamental and second harmonic signals

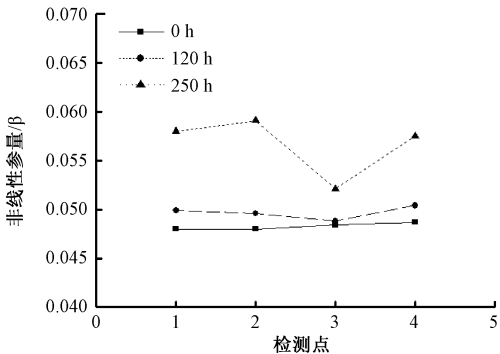


图 5 母材区非线性参量 β
Fig. 5 Nonlinear parameters β in base metal area

以蠕变时间为 0 h 母材区测得的 β 值作为参考,蠕变时间为 120 h 时,处于蠕变的初期阶段, β 值相对变化约为 2.9%,蠕变时间为 250 h 时 β 相对变化约为 17.4%。

焊缝区 β 值的变化情况如图 6 所示。在蠕变时间 0 h、120 h 和 250 h 条件下, β 平均值分别为 0.044 7、0.045 6、0.055 3,方差分别为 2.8×10^{-7} 、 2.3×10^{-6} 、 2.91×10^{-6} 。母材区在 0 h 时 β 为 0.048 3 相比,焊缝区在 0 h 时 β 平均值为 0.044 7,两者相差 0.003 6,所以 β 值变化

选择用其相对值的变化而非绝对值。

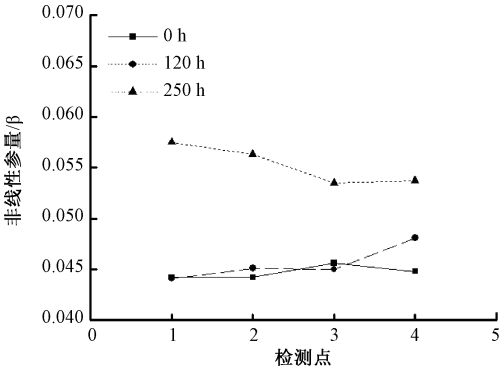


图 6 焊缝区非线性参量 β
Fig. 6 Nonlinear parameters β in weld area

接下来以蠕变时间为 0 h 焊缝区测得的 β 值作为参考,蠕变时间为 120 h 时, β 的相对变化为 2%,蠕变时间为 250 h 时, β 的相对变化量为 23.6%。

P91 钢试块焊缝热影响区 β 值的变化情况如图 7 所示,在 0 h、120 h 和 250 h 蠕变条件下,热影响区 β 的平均值分别为 0.045 1、0.047 6、0.060 4,方差分别为 2.2×10^{-6} 、 1.3×10^{-7} 、 9.0×10^{-6} 。以蠕变时间为 0 h 热影响区测得的 β 值作为参考,蠕变 120 h 时 β 的相对变化为 5.6%,蠕变时间为 250 h 时, β 值相对变化为 34%。P91 钢试块蠕变 120 h 时,处于蠕变第 1 阶段时蠕变速率增长较缓慢,当进入蠕变第 2 阶段时,蠕变速率逐渐增加较快,在蠕变时间为 250 h, β 值变化明显。

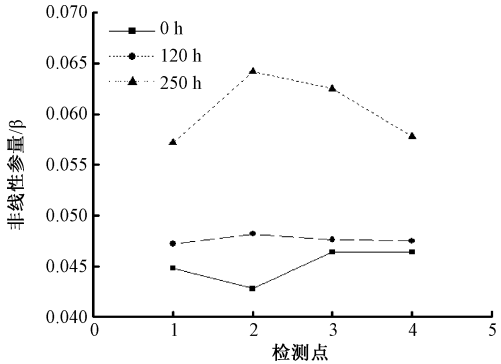


图 7 热影响区非线性参量 β
Fig. 7 Nonlinear parameters in the heat affected zone

对于母材区、焊缝区和热影响区的 β 值的相对变化进行了分析,如图 8 所示。蠕变时间在 0~120 h,母材区、焊缝区和热影响区蠕变速率变化较为缓慢, β 值相差较小。蠕变时间在 120~250 h,蠕变变化速率较快, β 值的相对变化较明显。蠕变时间达 250 h 时,母材区、焊缝区和热影响区的 β 值相对变化量分别为 17.4%、23.6% 和 34%,这说明在试验条件下热影响区受到蠕变影响

最大。

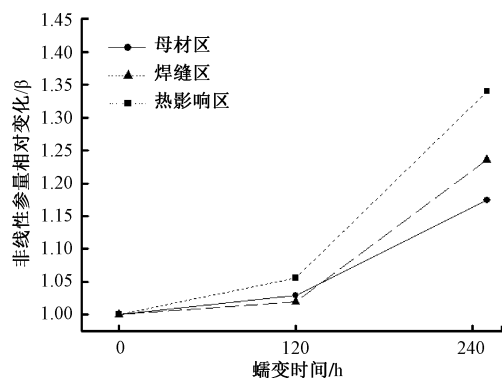


图8 反射式测量 P91 钢非线性参量 β 的相对变化

Fig. 8 Reflective measurement of relative variation of nonlinear parameters

3.3 反射式与透射式非线性参量 β 对比

实验采用传统的一发一收分置式两个超声换能器对不同蠕变时间的 P91 钢试块进行透射式 β 值测量,其结果如图9所示。

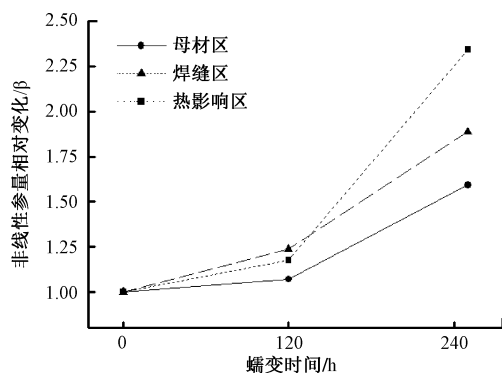


图9 透射式测量 P91 钢 β 值相对变化

Fig. 9 Transmitted measurement β relative variation comparison of P91 steel

将本文提出的反射式 β 测量值和传统的透射式 β 测量值进行比较可知:传统透射式非线性超声检测系统测量 β 的平均值在蠕变时间0 h、120 h、250 h条件下,母材区分别为0.022 8、0.024 4、0.036 3,焊缝区分别为0.021 4、0.026 5、0.040 4,热影响区分别为0.021 7、0.025 5、0.050 8。与反射式测量得到的 β 值相比,透射式所接收的二次谐波信号更强,归一化处理的 β 值得变化趋势也更加明显。

当蠕变时间为250 h时,传统透射式测量 β 值相对变化可达到200%左右,而反射式测量条件下蠕变250 h时 β 值相对变化在本次试验中只达到了30%左右。主要是因为超声波传播至试块底部时产生与反射波相位相反的回波而导致反射波衰减,对于能量更低的超声二次谐波

来说衰减更为明显。同时反射式测量时超声波传播声程两倍于透射式测量声程,二次谐波衰减更多导致 β 值的减少。从反射式测量下不同蠕变试块的 β 值相对变化梯度来看,在区分不同蠕变时间试块上仍然有较好的效果。

透射式试验下蠕变时间250 h试块热影响区、母材区和焊缝区的 β 相对变化为234.1%、159.2%、188.8%;反射式试验下 β 值在热影响区、母材区和焊缝区的相对变化分别为34%、17.4%、23.6%。对比120 h和250 h的蠕变时间而言,热影响区受到的蠕变影响最明显,蠕变损伤程度最严重。母材区结构稳定,受蠕变影响最小。

4 结 论

在传统 RAM-5000 SNAP 非线性超声系统的基础上,设计了基于单个超声波换能器(发射-接收合置)的反射式非线性超声检测系统。利用反射式非线性超声检测系统进行试验,经历120 h和250 h的蠕变时间后,P91钢试块母材区的 β 值相对变化为2.9%、17.4%,焊缝区 β 值相对变化2%、23.6%,热影响区 β 值相对变化为5.6%、34%,试验结果表明 β 值可区分出不同蠕变时间的试块及热影响区受蠕变影响最大。反射式非线性超声检测系统测得 β 值在表征不同蠕变损伤程度的试块时表现了一定的梯度,可以作为评价在役P91钢蠕变损伤程度和预测P91钢材料蠕变寿命的一个参考依据,受限于试验条件下只有蠕变时间为0 h、120 h和250 h的3块试块,因此探究在该试验方法下P91钢整个蠕变寿命期间的 β 值的变化还需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 门平,董世运,康学良,等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):1101-1118. MEN P, DONG SH Y, KANG X L, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1101-1118.
- [2] 唐志峰,孙兴涛,张鹏飞,等. 集测厚与导波检测于一体的复合式电磁超声换能器研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):98-109. TANG ZH F, SUN X T, ZHANG P F, et al. Research on composite electromagnetic ultrasonic transducer with integrated thickness measurement and guided wave detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9):98-109.
- [3] 张梁,张艳花,杨录. 基于超声导波技术的柱面接触研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12):46-50. ZHANG L, ZHANG Y H, YANG L. Research on column

- surface contact based on ultrasonic wave-guiding technology [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(12):46-50.
- [4] 原可义, 韩赞东, 钟约先, 等. 金属蠕变的实时超声检测实验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(7):739-743.
- YUAN K Y, HAN Z D, ZHONG Y X, et al. Experimental research on real-time ultrasonic detection of pure metal creep[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(7):739-743.
- [5] 李大勇, 高桂丽, 董静薇. 非线性声学和时间反转声学在材料缺陷识别中的应用现状评述[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(1):1-8.
- LI D Y, GAO G L, DONG J W. Review of the current application of nonlinear acoustics and time reversal acoustics in material defects identification[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(1):1-8.
- [6] 原可义, 韩赞东, 钟约先. P91 钢焊缝蠕变超声检测的敏感参数选择[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(3):310-315.
- YUAN K Y, HAN Z D, ZHONG Y X. Ultrasonic sensitivity parameters for creep testing of P91 steel weldments[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(3):310-315.
- [7] YUN H, RAYHANA R, PANT S, et al. Nonlinear ultrasonic testing and data analytics for damage characterization: A review [J]. *Measurement*, 2021, 186:110155.
- [8] CANTRELL J H, YOST W T. Determination of precipitate nucleation and growth rates from ultrasonic harmonic generation[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77:1952-1954.
- [9] KIM C S, PARK I K, JHANG K Y. Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25 Cr-1Mo steel[J]. *Ndt & E International*, 2009, 42(3):204-209.
- [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] REN G, KIM J, JHANG K Y. Relationship between second-and third-order acoustic nonlinear parameters in relative measurement [J]. *Ultrasonics*, 2015, 56:539-544.
- [12] SAHU M K, SWAMINATHAN J, BANDHOYPADHYAY N R, et al. Creep damage evaluation in P92 steel using second harmonic of high power ultrasonic signal [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2):4467-4474.
- [13] METYA A K, DAS A, TARAFDER S, et al. Nonlinear Lamb wave for the evaluation of creep damage in modified 9Cr-1Mo steel [J]. *NDT & E International*, 2019, 107:102130.
- [14] VETRONE J, OBREGON J E, INDACOCHEA E J, et al. The characterization of deformation stage of metals using acoustic emission combined with nonlinear ultrasonics[J]. *Measurement*, 2021, 178:109407.
- [15] 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.
- [16] 叶有俊, 朱武军, 王一宁, 等. 钛合金蠕变损伤的非线性 Lamb 波检测 [J]. *声学技术*, 2016, 35(4):345-348.
- YE Y J, ZHU W J, WANG Y N, et al. Evaluation of creep damage in Ti60 alloys by nonlinear Lamb waves [J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(4):345-348.
- [17] 冯伟, 万楚豪, 刘斌, 等. 7075 铝合金疲劳损伤的多点快速非线性超声检测[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10):23-28.
- FENG W, WAN CH H, LIU B, et al. Multi-point rapid nonlinear ultrasonic inspection on fatigue damage of 7075 aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10):23-28.
- [18] 原可义, 韩赞东, 陈以方, 等. P91 钢焊缝蠕变非线性超声检测中的衰减修正方法研究[J]. *材料工程*, 2014(7):50-54.
- YUAN K Y, HAN Z D, CHEN Y F, et al. P91 steel weld creep research on attenuation correction method in variable nonlinear ultrasonic testing [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(7):50-54.
- [19] WANG X, WANG X, NIU X, et al. Application of nonlinear ultrasonic technique to characterize the creep damage in ASME T92 steel welded joints[J]. *NDT & E International*, 2018, 98:8-16.
- [20] 李群, 张剑锋, 项延训, 等. Cr-Mo-V 钢焊接接头塑性损伤的非线性超声评价[J]. *焊接学报*, 2014, 35(7):27-30.
- LI Q, ZHANG J F, XIANG Y X, et al. Evaluation of plastic damage of Cr-Mo-V steel welding joint using nonlinear ultrasonic wave[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(7):27-30.

- [21] 尹昱, 陈振华, 肖峰, 等. 不锈钢疲劳损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 68-73.
- YIN Y, CHEN ZH H, XIAO F, et al. Nonlinear ultrasonic testing method for fatigue micro-damage of stainless steel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 68-73.
- [22] 焦敬品, 李亮, 何存富, 等. 有机材料热老化损伤非线性超声检测试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 24-29.
- JIAO J P, LI L, HE C F, et al. Experimental research on nonlinear ultrasonic testing of thermal aging damage of organic materials [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(1): 24-29.
- [23] 宋俊俊. 反射式非线性超声评价典型高温设备用钢蠕变状态的试验研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- SONG J J. Experimental study on the evaluation of the creep state of steel used in typical high temperature equipment by reflective nonlinear ultrasound [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2019.

作者简介



宋俊俊, 2016 年于中国计量大学获得学士学位, 2019 年于中国计量大学获得硕士学位, 主要研究方向为超声无损检测技术。

E-mail: 1096099076@qq.com

Song Junjun received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2016, M. Sc. degree from China Jiliang University in 2019. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing technology.



胡斌(通信作者), 2000 年于华中科技大学获得学士学位, 2004 年于清华大学获得硕士学位, 2017 年于清华大学获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院研究员, 主要研究方向为无损检测技术。

E-mail: hubin@csei.org.cn

Hu Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2000, M. Sc. degree from Tsinghua University in 2004 and Ph. D. degree from Tsinghua University in 2017, respectively. Now he is a researcher in China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include smart detection and monitoring technology.