doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.11.010

基于混频非线性超声的金属压力管道早期疲劳损伤检测①

赵祖鸣②*** 陈文飞*** 王银成*** 柴军辉**** 罗利佳③*** 包士毅***

(*浙江工业大学机械工程学院 杭州 310032)

(**浙江工业大学过程装备及其再制造教育部工程研究中心 杭州 310032)

(***宁波市特种设备检验研究院 宁波 315048)

(****宁波市劳动安全技术服务有限公司 宁波 315048)

摘 要 压力管道在服役过程中由于受载荷波动等因素的影响容易产生疲劳损伤,疲劳损伤的累积会导致管道失效。本文针对金属压力管道早期疲劳损伤的检测问题开展研究,提出了基于混频非线性超声的疲劳损伤检测方法,设计了混频非线性超声检测装置,开展了 304 不锈钢试样的疲劳损伤检测实验,建立了疲劳损伤程度与混频非线性指数之间的联系。在此基础上,开展了 304 不锈钢管道疲劳损伤的在线检测实验,结果表明,在疲劳加载过程中管道应力集中部位的混频非线性指数的增长速度明显高于其他部位,证实了混频非线性超声检测方法可用于金属压力管道早期疲劳损伤的检测与评估。

关键词 压力管道;疲劳损伤;混频非线性超声;疲劳试验;损伤检测

压力管道所处的工作环境普遍比较恶劣,在介质压力波动、温度波动和管道振动等因素的综合影响下,管道由于长期承受疲劳载荷会产生微观损伤。这些微观损伤会随着时间的累积导致材料的力学性能逐渐下降。早期疲劳损伤的产生和累积过程大约占据了管道寿命的 80% ~ 90%[1],而这些早期的疲劳损伤往往不易被及时发现。随着疲劳损伤的不断累积,压力管道的承载能力会逐步降低直至突然失效,严重时可能引发泄漏爆炸事故,不仅给生产企业造成巨大的经济损失,更会危及人民群众的生命安全。

目前,多种无损检测技术已被广泛应用于管道损伤检测。根据检测原理的不同,常用的无损检测技术主要分为渗透检测、涡流检测、射线检测、漏磁检测和超声检测等[2]。传统的无损检测技术主要针对的是较大体积的材料缺陷,对早期疲劳损伤(如位错、微裂纹等)不够敏感。非线性超声检测技术作为一种新兴的无损检测技术[3],利用超声波在穿过构件损伤部位发生的非线性畸变,可实现构件早期损伤的检测与评估。目前常用的非线性超声检测方法主要包括高次谐波法[4]、振动声调制法[5]和超声混频法[6]。振动声调制法需要利用激振器在构件中激励一个高能、低频的振动波,不便于工程实施。高次谐波法的谐波响应幅值一般很低,容易被噪声淹没,因而对检测仪器的性能要求非常高,且其检测结果容易受到检测仪器自身非线性的干扰。超声混频法由于实施简单且能够不受检测仪器自身非线性的影响而受到众多学者的青睐。

国内外学者针对混频非线性超声检测方法开展了理论、仿真和实验研究[7-11]。部分学者已将混频非线性超声技术应用于材料的疲劳损伤检测。Croxford 等人[12]利用非共线混合技术对疲劳损伤进

① 国家自然科学基金(52175152,52075489),浙江省公益基础研究计划(LGG21F030010,LGG20E050017)和宁波市“科技创新 2025”重大专项(2022Z165)资助项目。

② 男,1998 年生,硕士生;研究方向:结构健康监测;E-mail:zzm923125270@163.com。

③ 通信作者,E-mail:lijialuo@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2023-07-10)

行了检测,验证了该技术在疲劳损伤检测方面的可行性。Lv 等人[13]利用非共线横波混合技术来评价疲劳裂纹取向,认为所生成的和频纵波的方向性能够对疲劳裂纹取向进行评价。Shan 等人[14]利用三波混频的非线性超声方法对材料的疲劳损伤进行检测,验证了混频兰姆波的幅值具有随传播距离增长而增大的累积效应,并提取幅值与距离关系曲线的斜率用于表征材料的疲劳损伤程度。Zhang 等人[15]采用超声波共线混频技术对金属材料的疲劳寿命进行了预测,定义了混频非线性超声参数,研究了非线性参数与材料疲劳损伤程度的关系,并基于该关系建立了疲劳寿命预测模型。Thanseer 等人[16]利用超声横波进行了非共线混合,研究了裂纹尖端疲劳过程中的局部塑性变形,探究了疲劳裂纹萌生和扩展过程中非线性参数随裂纹尖端应力积累的变化规律。Solodov 和 Kreutzbruck[17]提出了一种基于局部损伤共振的混频非线性超声检测方法,并将其应用于复合材料缺陷的非线性成像。然而,上述研究工作普遍采用的是小型材料试样或者大的平板结构样,而针对圆管结构的研究十分匮乏,因此如何将混频非线性超声方法用于金属管道的疲劳损伤检测有待研究。此外,上述混频非线性超声检测方法由于采用的是高能、高频的脉冲群信号作为探测波,需要依靠价格昂贵、性能优越的超声信号激励和处理仪器才能实施,但这些仪器基本上被国外垄断,导致这些方法难以在国内进行大规模的工程推广应用。

本文针对金属压力管道早期疲劳损伤的检测问题开展了研究,提出了基于混频非线性超声的金属管道早期疲劳损伤检测方法,设计了混频非线性超声检测装置,分别开展了 304 不锈钢试样和 304 不锈钢管道的疲劳损伤检测实验,通过定义混频非线性指数实现了疲劳损伤程度的量化表征,并建立了疲劳损伤程度与混频非线性指数之间的联系。本文所提出的混频非线性超声检测方法的主要特点是摒弃了传统非线性超声方法普遍采用的脉冲群信号,而是采用信号能量更大、抗干扰能力更强、能够在构件中形成稳定声场的正弦连续信号,从而大幅提升了混频调制响应的效果,并且显著降低了对超声信号激励和处理仪器的性能要求。

1 混频非线性超声检测方法

研究发现,材料力学性能的退化、结构的微小损伤和闭合裂纹的产生等都会造成超声波传播的畸变,引发谐波滋生、边频带形成等非线性声学现象[18]。非线性超声检测技术就是利用含缺陷材料的非线性声学响应对材料损伤进行表征。

1.1 检测原理

混频非线性超声检测方法是利用两列不同频率的超声波在材料损伤部位发生的混频调制现象来检测材料损伤。如图 1 所示,在被测构件中输入不同频率的 2 列超声信号(f_1、f_2),这 2 列信号会在损伤区域发生混频调制现象产生边频信号($f_1 \pm f_2$)。边频信号携带了被测试样的微观损伤信息,可以利用边频信号特征对材料损伤进行表征。

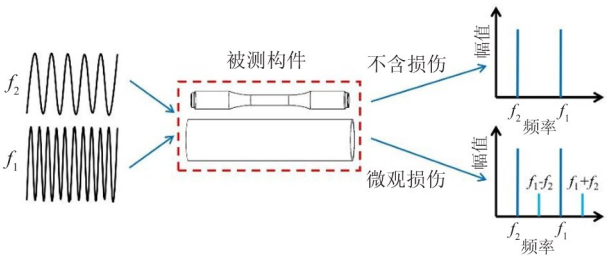

图 1 混频非线性超声检测原理

结合弹性力学原理和声学原理,可以建立金属材料非线性超声检测方法的理论模型。在各向同性的弹性固体中,一维纵波的波动方程可表示为[19]

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{1}$$

式中,u 为质点速度,t 为时间,ρ 为固体介质的密度,x 为质点位移,σ 为应力。材料的非线性应力-应变关系可表示为[20]

$$\sigma = \int E(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

$$E(\varepsilon) = E_0\{1 + \beta\varepsilon + \delta\varepsilon^2 + \cdots\} \tag{3}$$

式中,E_0 为线弹性模量,$\varepsilon = \dfrac{\partial u}{\partial x}$ 为应变,β 和 δ 分别为二阶和三阶非线性系数。将式(2)带入式(1),得到:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{2}\beta\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{3}\beta\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^3 + \cdots\right] \tag{4}$$

式中 $c = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$ 为波速。仅保留二阶非线性项时，式(4)简化为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{5}$$

根据微扰动理论，可假设式(5)的解为

$$u = u_0 + \beta u_1 \tag{6}$$

式中 u_0 表示超声波线性传播引起的位移，u_1 表示非线性位移。将式(6)带入式(5)，可得：

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(u_0 + \beta u_1) - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}(u_0 + \beta u_1) = c^2 \beta \frac{\partial}{\partial x}(u_0 + \beta u_1) \frac{\partial^2}{\partial x^2}(u_0 + \beta u_1) \tag{7}$$

在混频激励的条件下，线性位移 u_0 为 2 个正弦信号的线性叠加：

$$u_0(\tau) = A_1 \cos(\omega_1 \tau) + A_2 \cos(\omega_2 \tau) \tag{8}$$

式中，A_1、A_2 分别为高频与低频信号的幅值，ω_1、ω_2 分别为高频与低频信号的角频率，$\tau = \frac{x}{c} - t$ 为时间相关变量。利用摄动法求解式(7)，得到混频激励条件下固体质点的位移表达式[21]：

$$\begin{aligned} u(x, \tau) &= u_0 + \beta u_1 \\ &= A_1 \cos(\omega_1 \tau) + A_2 \cos(\omega_2 \tau) \\ &\quad - \frac{A_1^2 k_1^2 \beta x}{8} \cos(2\omega_1 \tau) - \frac{A_2^2 k_2^2 \beta x}{8} \cos(2\omega_2 \tau) \\ &\quad + \frac{A_1 A_2 k_1 k_2 \beta x}{4} [\cos(\omega_1 - \omega_2)\tau \\ &\quad - \cos(\omega_1 + \omega_2)\tau)] \end{aligned} \tag{9}$$

式中 $k_1 = \frac{\omega_1}{c}$ 和 $k_2 = \frac{\omega_2}{c}$ 为波数。从式(9)可以看出混频激励的响应信号中包括了基频分量(频率为 ω_1 和 ω_2)、二次谐波分量(频率为 $2\omega_1$ 和 $2\omega_2$)和调制边频分量(频率为 $\omega_1 \pm \omega_2$)，其中二次谐波分量和调制边频分量中包含材料的非线性系数 β。由式(9)可得到混频非线性系数的表达式[21]：

$$\beta = \frac{4}{k_1 k_2 x} \frac{A(\omega_1 + \omega_2)}{A(\omega_1) A(\omega_2)} = \frac{4}{k_1 k_2 x} \frac{A(\omega_1 - \omega_2)}{A(\omega_1) A(\omega_2)} \tag{10}$$

其中，$A(\omega_1 + \omega_2)$、$A(\omega_1 - \omega_2)$ 分别为和频与差频分量的幅值，$A(\omega_1)$、$A(\omega_2)$ 分别为基频分量的幅值。由于 2 列信号发生混频调制时，转移到差频与和频分量的能量并不相等，通常情况下 $A(\omega_1 - \omega_2) \neq A(\omega_1 + \omega_2)$。为了兼顾 $A(\omega_1 - \omega_2)$ 与 $A(\omega_1 + \omega_2)$ 2 个分量，采用式(11)计算混频非线性指数[22]。

$$\beta = \frac{A(\omega_1 + \omega_2) + A(\omega_1 - \omega_2)}{A(\omega_1) A(\omega_2)} \tag{11}$$

在进行混频非线性超声检测时，需要根据具体的应用场景和被检测金属构件的特性，为 2 列超声信号选择适当的激励频率和激励幅值，以获得幅值较大的混频调制信号，从而实现材料微观损伤的表征与量化。

1.2　检测系统

根据混频非线性超声检测原理搭建了混频非线性超声检测系统，其原理图如图 2 所示，主要的组成设备见表 1。该系统主要由 3 部分组成：信号激励单元、被测构件、信号接收与采集单元。信号激励单元由函数发生器、三通接头、功率放大器以及激励传感器(PZT1)构成，由函数发生器激励两列频率不同

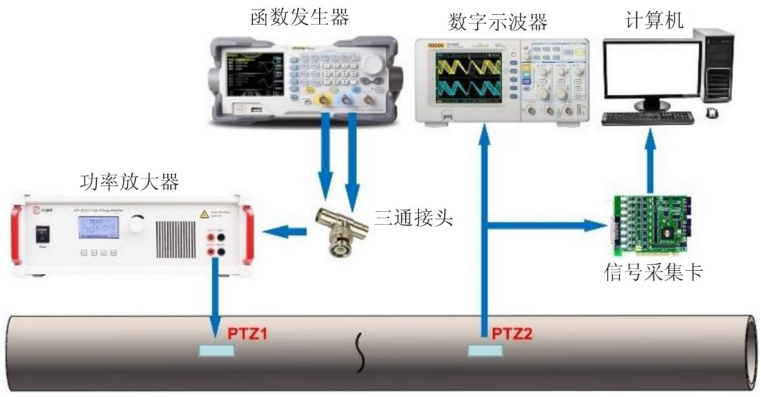

图 2　混频非线性超声检测系统的原理图

的超声信号,经三通接头线性叠加后,由功率放大器进行信号放大,并由激励传感器将输出的电信号转化为超声振动信号。被测构件为含疲劳损伤的金属试样或金属结构件。信号接收与采集单元由接收传感器(PZT2)、数字示波器与信号采集卡组成,接收传感器将接收到的超声振动信号转化为电信号,通过数字示波器对接收到的电信号进行观测,由信号采集卡进行数据采集,并传输到计算机进行信号分析。为了适应工业现场的损伤检测工作,将上述系统进行集成,设计了一套混频非线性超声检测装置,如图 3 所示。该检测装置具有轻量便携、坚固耐用等优点,可以满足工业现场检测的需求。

表 1　混频非线性超声检测系统的主要设备

设备名称	型号
函数发生器	普源 DG1032Z 函数发生器
三通接头	T 型 BNC 三通接头
功率放大器	Aigtek ATA-2022H 高压功率放大器
激励传感器	PZT5 压电陶瓷 8 mm×2 mm×1 mm
接收传感器	PZT5 压电陶瓷 8 mm×2 mm×1 mm
数字示波器	普源 DS1102E 数字示波器
信号采集卡	阿尔泰 USB8504 数据采集卡
计算机	Dell 电脑

图 3　混频非线性超声检测装置

2　含疲劳损伤构件的制备

为了开展金属压力管道疲劳损伤的混频非线性超声检测研究,本文通过疲劳试验分别制备了具有不同疲劳损伤程度的 304 不锈钢试样和管道。

2.1　304 不锈钢试样疲劳试验

如图 4 所示,304 不锈钢试样疲劳试验在 MTS Landmark 低周疲劳试验机上进行,采用棒状试样,其标距段(试样中间的光滑圆柱段)的长度为 30 mm,直径为 8 mm。疲劳试验的应变幅为 ±0.37%,加载频率为 5 Hz。在该加载条件下,通过疲劳试验得到 2 根 304 不锈钢试样的疲劳断裂寿命分别为 15 778 周次和 16 447 周次,推测此批 304 不锈钢试样的疲劳断裂寿命在 16 000 周次左右。在此基础上,通过中断疲劳试验制备了损伤程度分别为 20%、40%、60%、80% 的 304 不锈钢试样,对应的疲劳周次分别为 3 200、6 400、9 600、12 800 次,如表 2 所示。

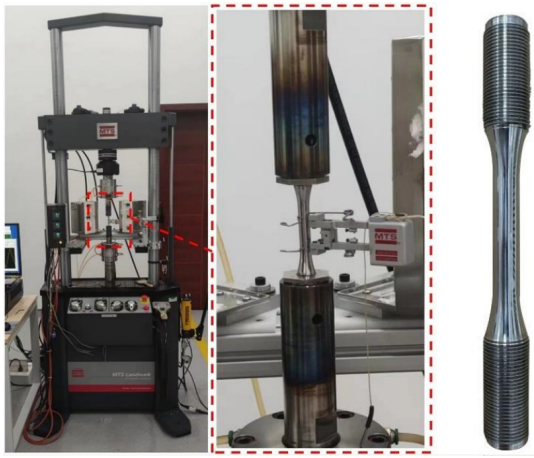

图 4　MTS Landmark 低周疲劳试验机及 304 不锈钢试样

表 2　不同疲劳损伤程度的 304 不锈钢试样

损伤程度/%	0	20	40	60	80
疲劳周期/次	0	3 200	6 400	9 600	12 800

2.2　304 不锈钢管道疲劳试验

参考《GB/T17395-2008》制作了直径为 76 mm 的 2 根 304 不锈钢管道,管道Ⅰ仅含直管与弯管,管道Ⅱ同时包含直管、弯管和三通管,如图 5 所示。采用宁波市特种设备检验研究院的疲劳测试台(见图 6)对管道进行疲劳试验,疲劳试验的峰值压力选为 15 MPa,循环频率为 6 次·min^{-1}。管道疲劳试验开始后,每隔一段时间对不同管段的损伤情况进行混频非线性超声检测,分别采集了疲劳周期为 3 100、5 420、8 250、11 180 和 14 000 时的检测信号(见表 3)。

图 5　304 不锈钢管道实物图

图 6　蓄能器脉冲测试台

表 3　304 不锈钢管道疲劳损伤的检测编号

检测编号	1	2	3	4	5	6
疲劳周次	0	3 100	5 420	8 250	11 800	14 000

3　疲劳损伤检测实验

利用混频非线性超声检测装置分别对不同损伤程度的 304 不锈钢试样和管道进行混频非线性超声检测，每组检测重复 5 次，并计算 5 次检测的平均值和标准差。为了在被测构件中获得稳定的声场，应在不超过信号采集卡采集范围的基础上选择尽可能大的激励电压，以获得较强的混频非线性响应。因此，304 不锈钢试样的检测信号采用激励电压为 20 Vpp的正弦连续信号，304 不锈钢管道的检测信号则采用激励电压为 60 Vpp 的正弦连续信号，信号的激励时间均为 1 s。两列超声信号的频率对检测结果的影响较大，因此需要选取合适的激励频率。金属构件在不同频率点的振动响应幅度不同，为了得到被测构件所对应的最优激励响应频率，用于激发较强的混频调制响应，本文采用扫频法来选取 2 列超声信号的激励频率。首先利用函数发生器激励一段连续的扫频信号输入到被测构件，然后对接收到的响应信号进行傅里叶变换求出其频谱，最后在频谱图中选取 2 个具有较大响应幅值的频率点分别作为 2 列检测信号的激励信号。在被测构件中激励所选频率的 2 列超声信号，采集混频调制后的响应信号，对得到的信号进行分析处理并计算混频非线性指数。

3.1　304 不锈钢试样疲劳损伤的检测

304 不锈钢试样在拉压疲劳过程中，疲劳损伤主要出现在试样中间的标距段。为了减小试样端部夹持段螺纹的几何非线性对检测结果的影响，并保证检测范围覆盖整个标距段，将压电传感器布置于试样标距段的两端，如图 7 所示。通过耦合剂将 2 个压电传感器固定在 304 不锈钢试样的表面，用导线将 2 个压电传感器与混频非线性超声检测装置连接，并对压电传感器的耦合质量进行检测。利用函数发生器激励频率范围为 100 ~ 1 000 kHz 的扫频信号来确定该试样的 2 个最优响应频率，扫频时间为 1 s。对接收到的响应信号进行快速傅里叶变换得到其频谱图（见图 8），在频谱图中选取 2 个频率差在50 kHz以上的极值点作为2列检测信号的激励

图 7　304 不锈钢试样的压电传感器布置

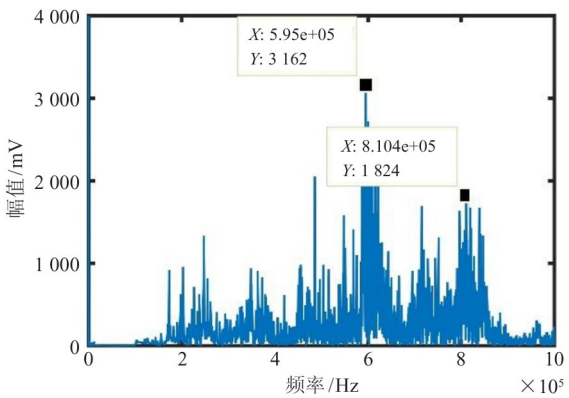

图 8　扫频激励下响应信号的频谱图

频率。规定 50 kHz 以上的频率差是为了避免出现 2 列频率相近的超声波的混频调制效果不佳的问题。

采用所选取的激励参数激发 2 列检测信号,对不同损伤程度的 304 不锈钢试样进行混频非线性超声检测,对接收到的响应信号进行快速傅里叶变换得到其频谱图(见图9)。从响应信号的频谱图中可以看出,除了 2 个幅值较大的基频信号响应外还出现了明显的调制边频分量(即差频、和频分量),这说明 2 列检测信号在经过 304 不锈钢试样损伤部位时发生了混频调制现象。提取频谱图中基频信号及边频信号的响应幅值,并带入式(11)中可计算得到试样的混频非线性指数。

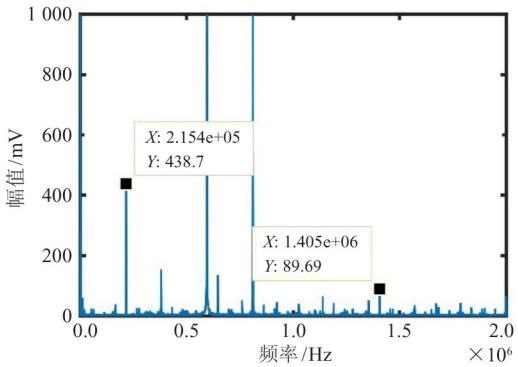

图 9　混频激励下响应信号的频谱图

3.2　304 不锈钢管道疲劳损伤的在线检测

为了保证试验安全,先将两根管道放置在防护坑内,然后连接疲劳测试台进行疲劳试验。在 2 根 304 不锈钢管道的不同位置设置检测点,检测管道不同位置的疲劳损伤。管道Ⅰ共选取了 5 个测点,对应 4 个检测段:1-2 焊缝段、2-3 弯管段、3-4 焊缝段、4-5 直管段,如图 10 所示。管道Ⅱ选取了 6 个检测点,对应 4 个检测段,包括:1-2 弯管段、2-3 焊缝段、3-4 直管段、5-6 三通段,如图 11 所示。

采用扫频法分别确定每个检测段的最优激励频率,频率越高的超声波在管道中传播时的能量衰减越明显,这导致 600 kHz 以上频段的响应幅值较低,因此扫频范围设定为 100 ~ 600 kHz,在该频段内选取 2 个最优响应频率作为 2 列检测信号的激励频率。管道疲劳试验开始后,每隔一段时间利用混频非线性超声方法对不同管段的疲劳损伤进行在线检测,分别采集管道在疲劳周次为 0、3 100、5 420、8 250、11 180 和 14 000 时的响应信号,并计算得到混频非线性指数。

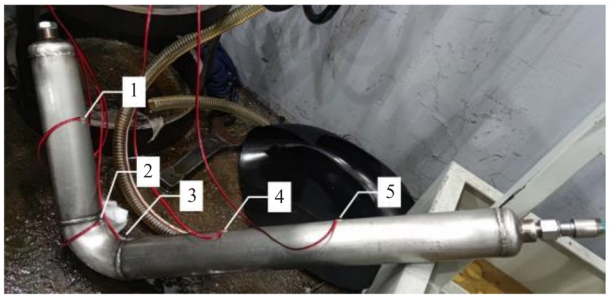

图 10　管道Ⅰ的检测点布置

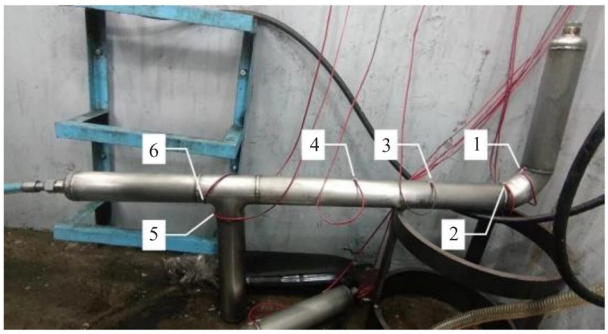

图 11　管道Ⅱ的检测点布置

4　检测结果与讨论

4.1　304 不锈钢试样的检测结果

图 12 展示了不同疲劳损伤程度的 304 不锈钢试样的混频非线性指数。由图可知,随着试样疲劳损伤程度的增加,混频非线性指数呈单调增大的趋势。未损伤试样的混频非线性指数很小(约为 2.66×10^{-10})但并不是0,这是由于实际的金属材料内部

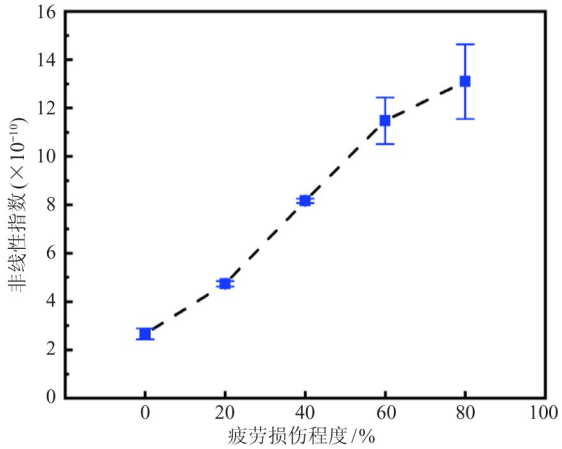

图 12　不同疲劳损伤程度 304 不锈钢试样的混频非线性指数

很难达到理想的均匀线性状态，而是普遍具有较小的非线性。由于同一批次试样的微观结构相近，可以将未损伤试样所对应的非线性指数作为基准值对含损伤试样进行评估。如图 12 所示，在疲劳损伤的初期（0% ~20%），非线性指数增长较慢；当疲劳损伤程度超过 20% 后，非线性指数的增长趋势明显加快；当损伤程度达到 60% 之后，非线性指数的增长趋势再次变缓。

图 12 中混频非线性指数的变化过程与金属材料疲劳损伤的演化进程有较好的一致性。金属材料的疲劳损伤过程主要分为 3 个阶段：裂纹萌生阶段（疲劳前期）、裂纹稳定扩展阶段（疲劳中期）和裂纹失稳快速扩展阶段（疲劳后期）。在裂纹萌生阶段，损伤的主要表现形式为位错的产生和堆积并逐渐形成微裂纹，此阶段的进程一般较长，损伤程度增加缓慢，因而混频非线性指数缓慢增大。在裂纹稳定扩展阶段，微裂纹在裂纹尖端应力集中作用下进行稳定扩展，损伤程度增加变快，因而混频非线性指数快速增大。在裂纹失稳快速扩展阶段，部分微裂纹相互连接长大演变为宏观裂纹，由于宏观裂纹可能一直处于张开状态，难以由低能量的超声激励诱发混频调制响应，因而混频非线性指数的增速再次变缓。

4.2　304 不锈钢管道的在线检测结果

图 13 展示了不同疲劳周次下管道 I 不同管段的混频非线性指数。由图可知，随着疲劳周次的增加，所有管段的混频非线性指数均呈现不同程度的增加，说明不同管段在疲劳加载过程中均出现了不同程度的疲劳损伤。直管段的混频非线性指数增长较为缓慢，说明疲劳加载对直管段的影响较小。焊缝段的混频非线性指数前期增长较为缓慢，但在疲劳周次达到 5 420 次后开始呈现稳步增长的趋势，说明当疲劳周次达到 5 420 次后焊缝段开始出现较为明显的疲劳损伤。弯管段的混频非线性指数在整个疲劳加载过程中一直呈现稳步增长趋势，当疲劳周次达到 8 250 次后弯管段的混频非线性指数增长趋势明显加快，说明弯管段的疲劳损伤情况最为明显，最先进入疲劳中期，由此可推测当疲劳周次达到一定次数后弯管段最先失效。

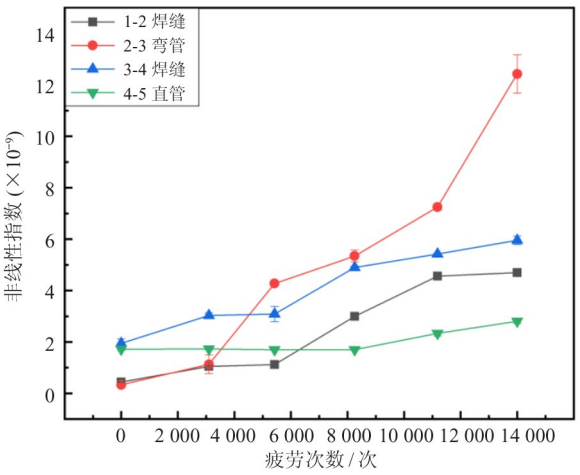

图 13　管道 I 不同管段的混频非线性指数

图 14 展示了不同疲劳周次下管道 II 不同管段的混频非线性指数。管道 II 的检测结果与管道 I 基本类似，直管段的混频非线性指数增长较为缓慢，焊缝段的混频非线性指数的增长速度略快于直管段，而三通段与弯管段的混频非线性指数的增长速度明显高于其它管段，且当疲劳周次达到 8 250 次后三通段与弯管段的混频非线性指数急剧增长，说明两管段在疲劳周次达到 8 250 次后均进入疲劳中期，由此可以推测最先失效的部位可能是弯管段或三通段。

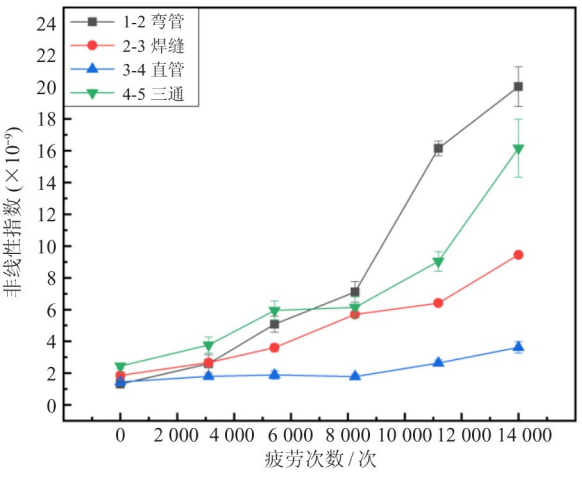

图 14　管道 II 不同管段的混频非线性指数

由以上结果可知，管道的疲劳损伤主要发生在应力集中区域，弯管与三通处的损伤最为明显。两根 304 不锈钢管道疲劳损伤的在线检测结果表明，混频非线性超声能够用于具有复杂结构的金属管道的早期疲劳损伤的在线检测。由于检测数据量有限，目前尚不能准确预估管道的疲劳失效寿命，但能

够通过混频非线性指数的增长趋势预测管道疲劳破坏部位。

5 结 论

本文提出了金属管道早期疲劳损伤的混频非线性超声检测方法,并设计了混频非线性超声检测装置,利用该装置对具有不同疲劳损伤程度的304试样进行了检测,建立了混频非线性指数与疲劳损伤程度之间的关系。在此基础上,开展了304不锈钢管道疲劳损伤的在线检测实验,得到了不同管段的早期疲劳损伤演化情况。通过分析实验结果可以得出如下结论。

(1)随着疲劳损伤程度的增加,混频非线性指数单调增大,其增长速率呈现先缓慢增大再加速增大后又变为缓慢增长的变化趋势,与金属材料疲劳损伤的演化进程相吻合,因此混频非线性指数可用于疲劳损伤程度的量化表征。

(2)混频非线性超声检测方法能够用于具有复杂结构的金属压力管道的疲劳损伤检测,管道的疲劳损伤主要出现在三通、弯管等应力集中区域,混频非线性超声检测方法对管道的早期疲劳损伤具有较高的敏感性。

参考文献

[1] MILLER K J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation part II: a general summary[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1987,10(2):93-113.

[2] 冉启芳. 无损检测方法的分类及其特征简介[J]. 无损检测, 1999,21(2):75-80.

[3] 周正干,刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2011,47(8):2-11.

[4] YANG Y, NG C T, KOTOUSOV A, et al. Second harmonic generation at fatigue cracks by low-frequency Lamb waves: experimental and numerical studies[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018,99:760-773.

[5] DZIEDZIECH K, PIECZONKA L, ADAMCZYK M, et al. Efficient swept sinechirp excitation in the non-linear vibro-acoustic wave modulation technique used for damage detection[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(3):565-576.

[6] LI F, ZHAO Y, CAO P, et al. Mixing of ultrasonic Lamb waves in thin plates with quadratic nonlinearity[J]. Ultrasonic, 2018,87:33-43.

[7] DENG M, LIU Z. Generation of cumulative sum frequency acoustic waves of shear horizontal modes in a solid plate[J]. Wave Motion, 2003,37(2):157-172.

[8] CHEN Z, TANG G, ZHAO Y, et al. Mixing of collinear plane wave pulses in elastic solids with quadratic nonlinearity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014,136:2389-2404.

[9] LI W, DENG M, HU N, et al. Theoretical analysis and experimental observation of frequency mixing response of ultrasonic Lamb waves[J]. Journal of Applied Physics, 2018,124(4):044901.

[10] LI F, ZHAO Y, CAO P, et al. Mixing of ultrasonic Lamb waves in thin plates with quadratic nonlinearity [J]. Ultrasonics, 2018,87:33-43.

[11] JIAO J, MENG X, HE C, et al. Nonlinear Lamb wave-mixing technique for micro-crack detection in plates[J]. NDT & E International, 2017,85:63-71.

[12] 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]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(5): EL117-EL122.

[13] LV H, JIAO J, WU B, et al. Evaluation of fatigue crack orientation using non-collinear shear wave mixing method [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018,37:1-16.

[14] SHAN S, HASANIAN M, CHO H, et al. New nonlinear ultrasonic method for material characterization: codirectional shear horizontal guided wave mixing in plate[J]. Ultrasonics, 2019,96:64-74.

[15] ZHANG Y, LI X, WU Z, et al. Fatigue life prediction of metallic materials based on the combined nonlinear ultrasonic parameter[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017,26:3648-3656.

[16] THANSEER P M, METYA A K, SAGAR S P. Development of a non-collinear nonlinear ultrasonic-based technique for the assessment of crack tip deformation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26:2632-2639.

[17] SOLODOV I, KREUTZBRUCK M. Ultrasonic frequency mixing via local defect resonance for defect imaging in composites[J]. Ultrasonics, 2020,108:106221.

[18] 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.

[19] BENDERF A, KIMJ Y, JACOBSL J, et al. The generation of second harmonic waves in an isotropic solid with quadratic nonlinearity under the presence of a stress-free boundary[J]. Wave Motion, 2013,50:146-161.

[20] VAN DEN ABEELE K E, SUTIN A, CARMELIET J, et al. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)[J]. NDT&E International, 2001, 34:239-248.

[21] 燕玲. 金属构件疲劳损伤的混频非线性超声检测与评价研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2021.

[22] 陈文飞, 赵祖鸣, 黄焕东, 等. 基于混频非线性超声的 TP321 不锈钢蠕变损伤检测[J]. 中国特种设备安全, 2023,39(4):23-27.

Early fatigue damage detection in metal pressure pipelines based on a nonlinear ultrasonic wave mixing method

ZHAO Zuming[*,**], CHEN Wenfei[***], WANG Yincheng[*,**], CHAI Junhui[****], LUO Lijia[*,**], BAO Shiyi[*,**]

([*] College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

([**] Engineering Research Center of Process Equipment and Remanufacturing, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

([***] Ningbo Special Equipment Inspection & Research Institute, Ningbo 315048)

([****] Ningbo Labor Safety Technology Service Co., Ltd., Ningbo 315048)

Abstract

Pressure pipelines produce fatigue damage under the effects of load fluctuations and other factors. The accumulation of fatigue damage may cause the failure of pipelines. This paper solves the problem of detecting early fatigue damage in metal pressure pipelines. A nonlinear ultrasonic wave mixing method is proposed to detect fatigue damage. A detection device is designed to implement the nonlinear ultrasonic wave mixing method. Fatigue damage detection experiments are conducted on 304 stainless steel specimens. The relationship between the fatigue damage level and the nonlinear wave mixing index is established. Moreover, experiments are conducted to detect fatigue damage of 304 stainless steel pipes. Experimental results indicate that the nonlinear wave mixing index increases more quickly in the stress concentration area. The nonlinear ultrasonic wave mixing method is proved to be effective for detecting and assessing the early fatigue damage in metal pressure pipelines.

Key words: pressure pipeline, fatigue damage, nonlinear ultrasonic wave mixing, fatigue test, damage detection