

文章编号: 1001-4888(2022)04-0455-10

基于尾波干涉的含缺陷焊缝损伤发展监测^{*}

霍林生¹, 周德田¹, 杨卓栋¹, 刘洋²

(1. 大连理工大学, 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024; 2. 辽宁省交通科学研究院有限责任公司, 辽宁沈阳 110015)

摘要: 当焊缝中存在未焊透缺陷时, 焊接试件在循环荷载作用下, 焊缝处会出现微小的塑性变形并影响焊接强度, 因此对未焊透缺陷在早期的损伤发展进行有效的监测十分重要。然而目前的一些检测方法精度较低, 无法实现长期的监测。本文提出了一种基于压电传感器的尾波干涉方法, 针对这种带有未焊透缺陷的焊缝, 设计了循环加载实验使其产生塑性变形, 对焊接试件在循环荷载作用下的微小损伤变化进行监测。实验结果表明, 在循环荷载作用下, 试件出现微小的塑性变形并逐渐变大。根据尾波干涉监测结果, 与直达波相比, 尾波信号对微小变形更加敏感。使用波形伸缩法进行计算, 最终得到平均伸缩系数(即尾波相对波速的变化值)随着循环次数的增加而上升的结论。

关键词: 尾波干涉; 压电传感器; 焊缝缺陷监测; 未焊透缺陷

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-164

0 引言

焊接技术作为一种基本的工艺方法, 已广泛应用于航空、土木等各个工业领域^[1,2]。然而, 受焊接材料、工艺以及结构形式等因素影响, 在焊接结构的焊缝处存在着裂纹、未焊透等各种缺陷^[3,4]。其中, 未焊透缺陷是一种常见的焊缝缺陷, 它能减少焊缝有效承载面积并降低焊接接头的强度。在长期荷载条件下, 缺陷处很容易产生应力集中, 出现塑性变形, 甚至成为裂纹源, 最终导致焊接结构的失效。因此, 对焊缝中的未焊透缺陷进行有效及时的检测以及实时的质量监测, 排除一些潜在的危险源, 提前预防损伤的进一步发展, 对保证焊接结构的安全性和可靠性具有重要的工程与经济意义。

随着检测技术的不断发展, 无损检测(Non-Destructive Test, NDT)与结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)受到国内外研究者的日益关注和深入研究, 并广泛应用于实践当中。目前, 针对焊缝未焊透缺陷比较有效的无损检测方法包括射线检测^[5](Radiography Testing, RT)、超声检测^[6,7](Ultrasonic Testing, UT)、超声波衍射时差法^[8,9](Time of Flight Diffraction, TOFD)和相控阵超声检测^[10,11](Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)。虽然已有的无损检测技术日益发展并成熟, 但是它们在焊缝缺陷检测方面都具有一定的局限性。例如射线检测对环境会造成污染, 而超声波等方法成本高且无法做到实时监测。此外, 大多数无损检测方法都是针对焊缝特定时刻的缺陷检测, 无法实现长期的监测。

在结构健康监测领域, 压电陶瓷材料由于具有频响范围广、响应灵敏、成本低、便于加工成型等特点, 已被用于焊缝的缺陷检测和健康监测^[12]。基于压电陶瓷传感器的焊缝缺陷监测主要有波动分析法^[13](Wave Propagation Analysis Method)、压电阻抗法^[14](Electro-mechanical Impedance Method)、

^{*} 收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178274); 中央高校基本科研业务费项目(DUT19TD26)资助

通信作者: 霍林生(1975—), 男, 博士, 教授。主要从事结构健康监测方面的研究。Email: lshuo@dlut.edu.cn

声发射法^[15](Acoustic Emission Method)以及非线性超声调制法^[16](Nonlinear Ultrasonic Modulation Method)。每一种方法都有其特定的功能和适用性。然而,上述方法在高精度方面存在一定的不足,对焊缝早期一些微小的损伤变化不够敏感。目前,需要一种精度更高的方法对焊缝早期微小损伤进行有效及时的监测,预防或阻止损伤的进一步发展^[17, 18]。近年来,作为一种较新的高精度检测方法,尾波干涉(Coda Wave Interferometry, CWI)方法受到了国内外学者的深入研究和广泛应用。

1969 年, Aki^[19]提出了对地震尾波的分析,根据地震尾波的衰减来观察地震波延时的变化。随后,很多国外学者开始了尾波领域的研究。2004 年, Snieder 等^[20]提出了尾波干涉的概念,并对尾波干涉理论进行了详细的推导和概述。此后,尾波干涉技术在地震学领域得到了进一步的应用。目前,尾波干涉方法在无损检测领域得到了越来越多的关注,已被用于不同材料以及不同损伤的检测之中。根据目前所查文献,尾波干涉方法在焊缝未焊透缺陷监测方面的应用尚未见到。

本文基于尾波干涉方法对带有未焊透缺陷的焊接试件在不同循环加载次数下的微小损伤变化进行监测,并对实验结果进行分析。对于实验得到的接收信号,首先从时域上对比分析了每个试件不同循环次数下的整体波形、直达波波形以及尾波波形。然后使用波形伸缩法进行计算,最终得到每个试件在不同循环次数下平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值的变化趋势,从而验证了尾波干涉方法对含未焊透缺陷焊缝循环加载下损伤发展监测的可行性。

1 方法

为了监测焊缝处缺陷损伤的发展,需要用压电陶瓷发射超声波,并在焊缝另一端进行接收。在焊缝结构循环加载下,缺陷会发生变化,进而改变超声波多重散射波的传播路径。本文应用超声波的尾波干涉理论对焊缝损伤进行监测,并利用波形伸缩法对尾波的变化做量化评估。根据平均伸缩系数指标的变化,可以实现对焊缝缺陷在循环加载下的发展进行监测,焊缝监测原理图如图 1 所示。PZT1 压电陶瓷发射超声波, PZT2 压电陶瓷进行接收。在被接收前,超声波会在试件内部发生多重散射,形成干涉波。通过对干涉波中尾波部分的分析,可以得出焊缝处缺陷的损伤状况。

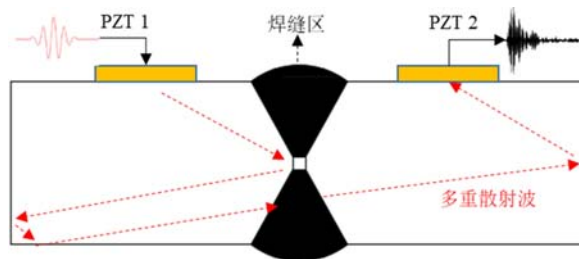


图 1 焊缝监测原理图

Fig. 1 Principle of damage development monitoring for defective weld

1.1 尾波干涉理论

尾波干涉是一种利用介质中的多重散射波检测介质微小变化的测量方法。用激励信号激励焊接试件时,检测到的响应信号为直达波信号后面带着一段幅值较小但持续时间较长的信号,像是一条长长的“尾巴”,因此称为尾波。与直达波相比,由于尾波在试件中来回多次传播,对焊缝中的微小损伤变化进行了多次衍射,使之不断放大,因此对焊缝中的微小损伤变化十分敏感。

根据 Snieder 等^[20]的研究,尾波干涉的一个主要问题就是建立走时扰动与波速变化之间的关系。假设应力波在介质中的原始波速为 v ,则相应的传播时间 t_p 为

$$t_p = \int_p \frac{1}{v} ds \quad (1)$$

式中: p 为波的传播路径; s 为长度。

当介质发生扰动时,群波速变化为 δv ,走时扰动为 τ_p ,根据一阶泰勒展开式可以得到

$$t_p + \tau_p = \int_p \frac{1}{v + \delta v} ds = \int_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\delta v}{v^2} \right) ds \quad (2)$$

由于声波在介质中所有传播路径上的波速变化是相同的,结合式(1)和式(2)可得到:

$$\tau_p = - \int_p \frac{1}{v} \frac{\delta v}{v} ds = - \frac{\delta v}{v} \int_p \frac{1}{v} ds \quad (3)$$

用平均传播时间 t 代替 t_p 可得

$$\tau_p = - \frac{\delta v}{v} t \quad (4)$$

对式(4)进行变形,可得到走时偏移与相对波速变化的关系式:

$$\frac{\tau_p}{t} = - \frac{\delta v}{v} \quad (5)$$

从接收信号时域上来看,走时扰动对应表现为信号在扰动前后的相位偏移。扰动前后直达波的幅值和相位几乎是相同的,而尾波则有明显的走时延迟,体现出尾波对介质中的微小变化进行了重复采样与放大。

1.2 波形伸缩法计算原理

尾波干涉法的实质就是通过测量不同时刻尾波之间的走时偏移(即尾波时移),来得到这段时间的尾波相对波速变化。根据目前的研究,主要有两种数据处理方法来计算尾波时移,分别是移动窗法(Moving-window Method)和波形伸缩法(Stretching Method)。与移动窗法相比,波形伸缩法不需移动时间窗,可以直接求取最终的参数 $\delta v/v$,计算过程更为方便,因此本文选用波形伸缩法进行数据处理。

将介质某一状态时的尾波波形作为参考波形,表示为 $h_0(t)$;第 k 个状态时的尾波波形可以表示为 $h_k(t)$,将两列尾波做互相关计算,通过对 $h_k(t)$ 波形在时间轴上进行拉伸或压缩,来计算互相关系数最大时对应的伸缩因子,即为尾波相对波速变化值。伸缩因子 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{\delta t}{t} \quad (6)$$

式中: δt 为尾波传播时间 t 的变化量。在时间轴上的拉伸或压缩可表示为 $t(1+\epsilon)$,则第 k 个状态时的尾波波形 $h_k(t)$ 与参考波形 $h_0(t)$ 之间的关系为

$$h_k(t) = h_0[t(1+\epsilon)] \quad (7)$$

互相关函数式可定义为

$$CC_k(\epsilon) = \frac{\int_0^T h_0[t(1+\epsilon)] h_0(t) dt}{\sqrt{\int_0^T h_0^2[t(1+\epsilon)] dt \int_0^T h_0^2(t) dt}} \quad (8)$$

式中: T 为尾波计算时间总长; CC_k 为尾波与参考波形的互相关系数。

通过调整伸缩系数,使得互相关系数取得最大值,对应的伸缩因子记为 $\epsilon_{\max}$ 。根据式(5), $\epsilon_{\max}$ 即为相对波速变化值:

$$\epsilon_{\max} = - \frac{\delta v}{v} \quad (9)$$

使用波形伸缩法计算时,为了得到更灵敏的检测结果,需要选择一个合适的时间窗口。窗口的选择遵循以下几个原则:(1)窗口的起始时间要足够靠后,以保证窗口内的信号发生多重散射。(2)窗口的长度要足够长以包含足够多的信号。(3)窗口内信号的信噪比(Signal-to-noise Ratio, SNR)要足够高,以保证信号质量较好($\text{SNR} \geq 40\text{dB}$)。

2 实验设计

2.1 试件和装置

如图2所示,本文实验一共设计了5个相同大小的狗啃状焊接试件,焊接试件长和宽分别为180mm和50mm,厚度为5mm。对于每个焊接试件,采用对接焊接方式,使用氩弧焊将两块Q235材料的钢板焊接到一起,在钢板连接接头正反面各焊一道焊缝。为了制造出未焊透缺陷,在加工中,人为控制两面焊缝的深度,使其没有焊透,在焊缝中心处留有空隙。通过多个试件的加工实验,证明了这种方

法是可行的,最终制作出这种带有未焊透缺陷的焊接试件。然后,使用环氧树脂将 2 个带有 BNC(Bayonet Nut Connector)接头的 PZT 传感器分别粘贴在焊缝的两侧。考虑尾波干涉方法对信号信噪比要求较高,实验中使用铜壳封装的压电陶瓷传感器进行信号的激励和接受,2 个传感器的距离均为 70mm。

图 3 为实验装置图。实验设备包括一台 MTS 疲劳加载机,一台配有示波器(PXIe-5122)和任意波形发射器(PXIe-5412)的 NI PXIe-1078 集成机箱、高压压电功率放大器(Trek 2100HF)以及一台搭载 LabVIEW 数据采集软件的电脑。

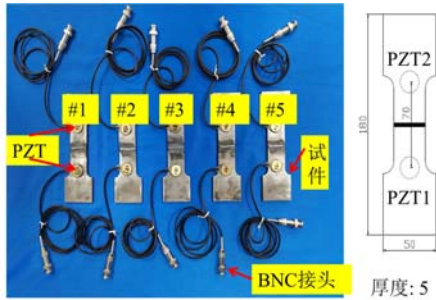


图 2 试件形状和尺寸(单位: mm)

Fig. 2 The geometry and size of the specimen (unit: mm)

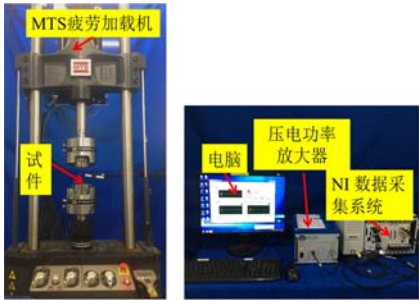


图 3 实验装置图

Fig. 3 The experimental apparatuses

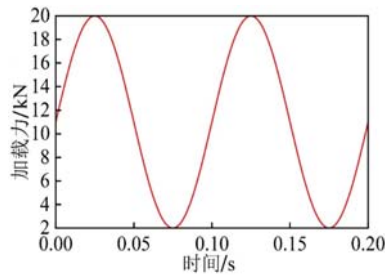


图 4 正弦加载力

Fig. 4 Sinusoidal loading force

2.2 实验流程

实验流程主要包括以下几个步骤:(1)首先将焊接试件安装在 MTS 疲劳加载机上,进行正弦循环加载实验,采用力控加载方式,具体加载方案见表 1,加载力的波形如图 4 所示。(2)然后每循环加载 10000 次,暂停加载,加载力保持在平均荷载,记录此时 MTS 轴向位移。(3)每次暂停加载,使用尾波干涉方法进行检测,使用 PZT1 发射高斯调制的正弦脉冲信号,由 PZT2 接收信号,每次检测重复 3 次。(4)检测完毕,继续加载,每个试件一共加载 100000 次,检测结束取下试件。(5)重复以上步骤,一共对 5 个试件进行检测。另外,由于实验是在室内环境下进行,并且每个试件的检测流程均在 3 个小时内完成,环境温度比较稳定,因此温度对结果的影响可以忽略。

表 1 循环加载方案

Tab. 1 The cyclic loading scheme

平均加载力/kN	加载幅值/kN	最小加载力/kN	最大加载力/kN	加载频率/Hz	加载方式
11	±9	2	20	10	正弦

实验所用激励信号为高斯调制的正弦脉冲信号。为了使结构达到最大的响应,其中心频率设置为 PZT1 传感器的谐振频率。经过阻抗分析仪(Keysight E4990A)测量,5 个试件 PZT1 传感器的谐振频率大约都在 150kHz,因此中心频率都设置为 150kHz。另外,数据采集系统的采样率设为 10MHz 足以防止信号的混叠效应。其他具体参数见表 2,正弦脉冲信号的波形如图 5 所示。

表 2 高斯调制的正弦脉冲信号参数

Tab. 2 The parameters of the modulated Gaussian sine pulse signal

中心频率/kHz	幅值/V	时间间隔/s	信号延迟/s	持续时间/s	归一化带宽	衰减/dB
150	1	1E-8	5E-5	1E-4	0.15	0.8

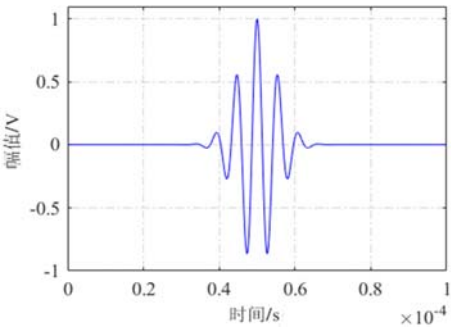


图 5 调制高斯脉冲信号波形

Fig. 5 The waveform of the modulated Gaussian pulse signal

3 实验结果与讨论

3.1 循环加载实验结果

本文一共对 5 个试件进行了循环加载实验,每个试件一共循环加载 100000 次,每隔 10000 次,暂停加载,采集 1 次实验数据,轴向加载力保持在 11kN,不同循环加载次数下的轴向位移见表 3。

表 3 不同循环加载次数下的轴向位移

Tab. 3 The axial displacement of different cyclic loading cycles

循环加载 次数	轴向加载力 /kN	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5
		MTS 轴向位移/mm				
0	11	0.246	0.180	0.150	0.155	0.188
10000	11	0.337	0.245	0.214	0.200	0.235
20000	11	0.434	0.340	0.306	0.294	0.309
30000	11	0.510	0.414	0.390	0.380	0.413
40000	11	0.547	0.466	0.445	0.443	0.486
50000	11	0.570	0.493	0.471	0.482	0.534
60000	11	0.587	0.508	0.490	0.505	0.561
70000	11	0.597	0.521	0.500	0.517	0.578
80000	11	0.599	0.525	0.505	0.521	0.584
90000	11	0.602	0.531	0.510	0.525	0.590
100000	11	0.605	0.535	0.512	0.531	0.594

由表 3 可以看出,对于每一个试件,随着循环次数的增加,在相同轴向加载力作用下,试件的轴向位移在逐渐增大。表明由于焊缝中存在未焊透缺陷,在循环加载下,焊缝处出现塑性变形而导致轴向位移增大,并且随着循环次数的增加,塑性变形在逐渐增大,试件损伤程度进一步发展。

3.2 时域信号结果分析

通过尾波干涉实验,首先得到了 5 个试件在时域上的接收信号波形。对于每个试件,分别给出了不同循环次数下的整体波形、直达波波形以及尾波波形,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,对于每一个试件,不同循环次数下的时域信号波形在整体上几乎相同;尤其是在直达波部分,不同循环次数下的波形在整体的幅值和相位上几乎相同,说明不同循环次数下的微小变形对直达波几乎没有影响。而在尾波部分,可以观察到波形之间具有明显的相位偏移,并且随着循环次数的增加,相位偏移程度也在逐渐增大。因此,与直达波相比,尾波对不同循环次数下的微小损伤变化更加敏感。

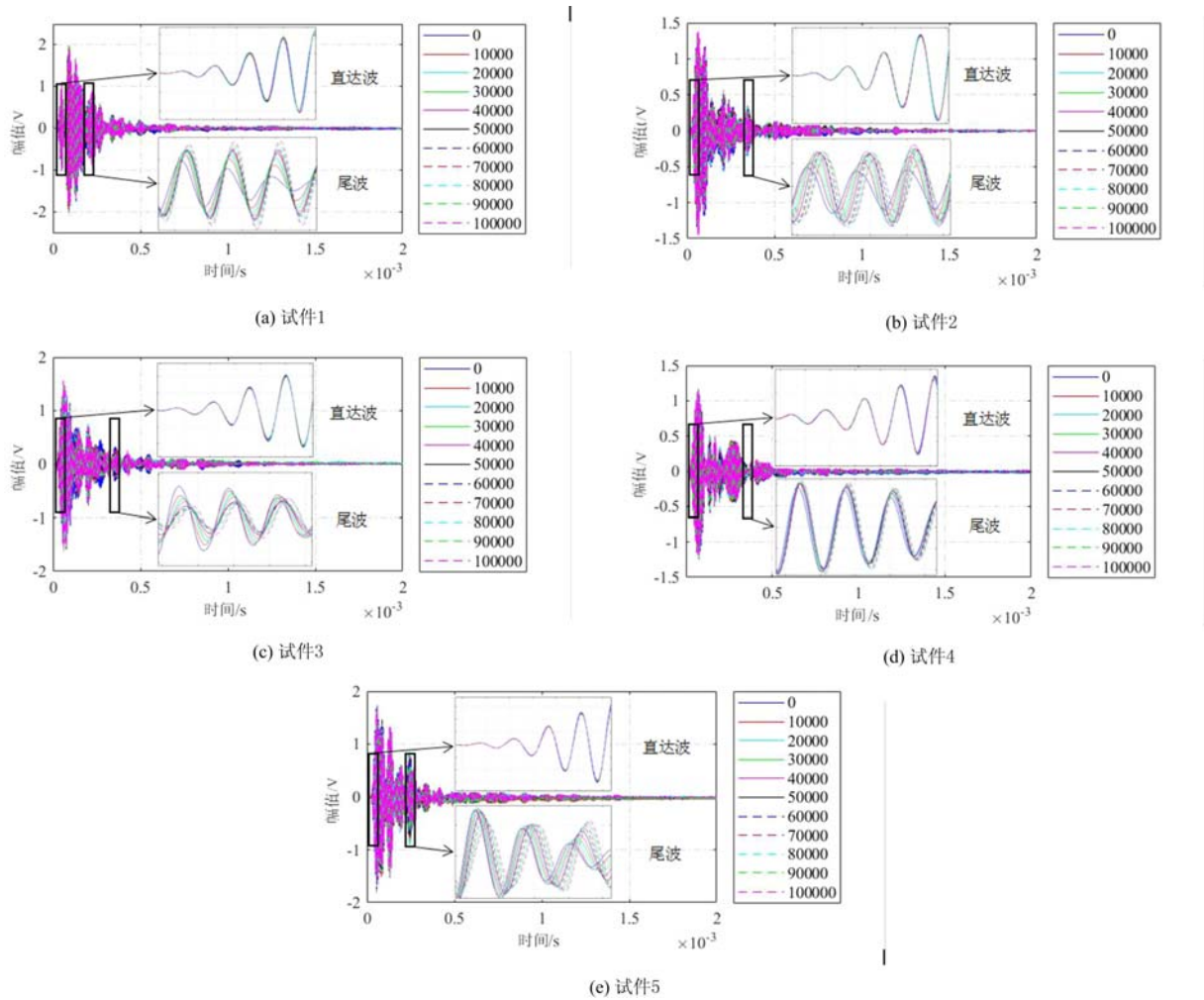


图 6 5 个试件不同循环次数下接收信号波形

Fig. 6 The received signal waveforms under different cyclic cycles of five specimens

3.3 波形伸缩法计算结果分析

使用波形伸缩法对每个试件不同循环次数下尾波之间的走时偏移进行计算,并选择一个合适的时间窗口。我们以试件 1 为例,对选取原则进行具体说明。图 7 给出了试件 1 在循环加载 100000 次下的整体信号波形。根据本文第 1 节和第 2 节所述原则,我们选取时间窗口 $[0.21, 0.26]$ ms 内的信号作为尾波来进行计算。根据同样的选取方式,对于试件 2~5,选取的时间窗口分别为 $[0.27, 0.32]$ ms、 $[0.27, 0.32]$ ms、 $[0.29, 0.34]$ ms 以及 $[0.22, 0.27]$ ms。

另外,在波形伸缩法计算中,需要 1 条参考波形。对于每一个试件,在计算时,以初始 0 循环次数下的波形作为参考波形,将之后不同循环次数下的波形与参考波形做互相关,根据互相关公式(8),得到每个试件不同循环次数下伸缩系数所对应的互相关系数如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在相同的循环次数下,互相关系数随着伸缩系数取值的不同而变化。由波形伸缩法计算原理可知,当互相关系数最大时,所对应的伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 为尾波的相对波速变化值。由图 7 可以看出,对于每个试件,不同循环次数下的互相关系数峰值逐渐向左偏移,所对应的伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 在逐渐增大,即尾波相对波速变化值在逐渐增大。根据 3 次重复实验结果,得出了每个试件在不同循环次数下的平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值的变化趋势,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,随着循环次数的增加,平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值在逐渐增大,即尾波相对波速变化在逐渐增加,除个别循环次数下对应的值出现降低之外,总体上 5 个试件的平均伸缩系数都具有一定的变化规律。分析图 8 中平均伸缩系数的变化规律可得,随着循环次数的增加,焊缝处由未焊透缺陷引

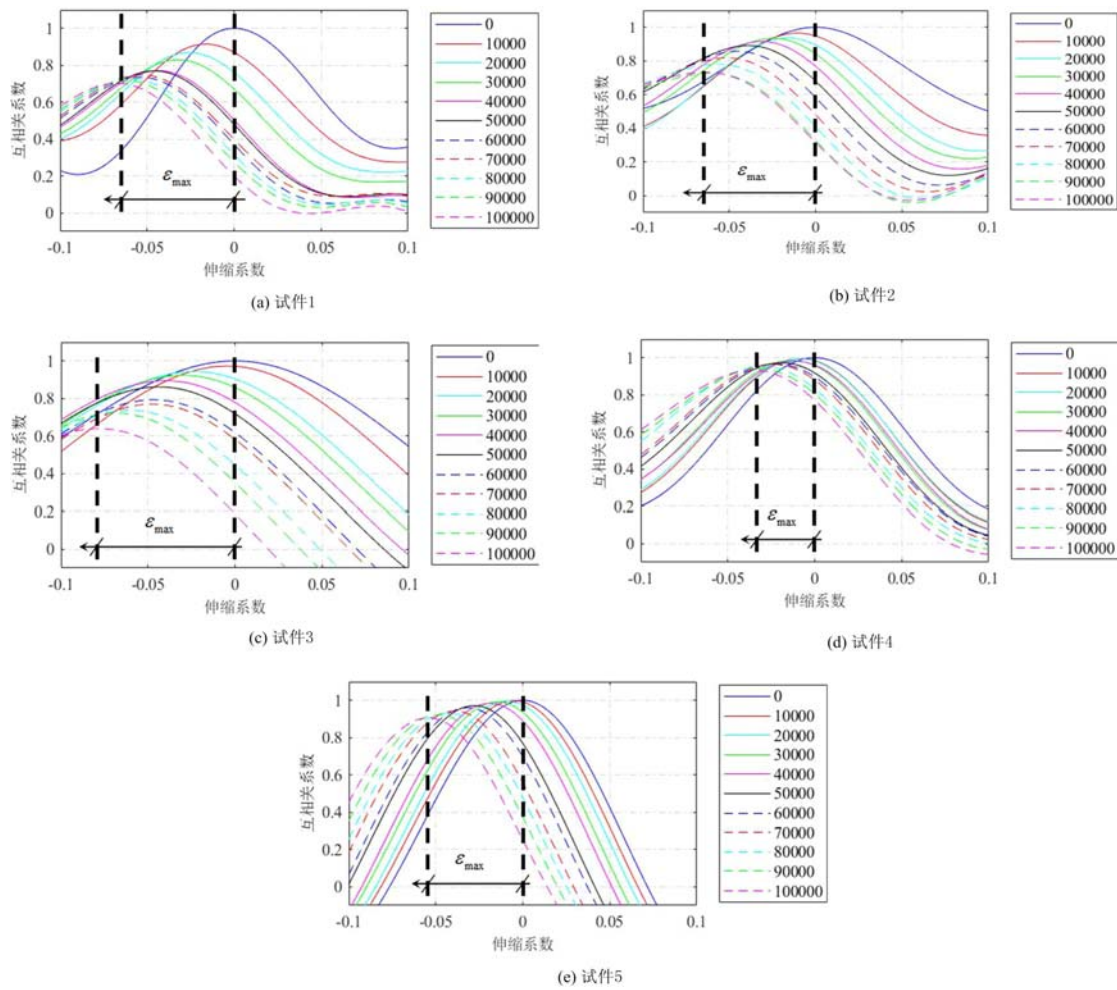


图7 5个试件不同循环次数下的互相关系数

Fig. 7 The cross-correlation coefficient under different cyclic cycles of five specimens

起的塑性变形逐渐增加,导致不同循环次数下试件的损伤程度逐渐变大,对尾波波速的影响发生变化,最终引起尾波的相对波速变化值在逐渐增加。因此,通过计算伸缩系数 $\epsilon_{\max}$,即尾波相对波速变化值,可以有效地反映出在不同循环次数下由于未焊透缺陷引起的焊缝处的微小变化,对试件的损伤程度可以进行有效的判断和分析。

4 结论

本文提出了一种基于压电传感器的尾波干涉方法,对不同循环荷载次数下由未焊透缺陷引起的微小损伤变化进行监测。首先通过循环加载实验的结果可得,随着循环次数的增加,在相同加载力的作用下,MTS 轴向位移在逐渐增大,表明试件出现微小的塑性变形并且逐渐变大。然后对尾波干涉实验得到的时域接收信号进行分析,对比了每个试件不同循环次数下的整体波形、直达波波形以及尾波波形,结果表明相对于直达波,不同循环次数下的尾波信号之间具有明显的走时偏移;接下来,使用波形伸缩法进一步对不同尾波之间的走时偏移进行计算,得到了每个试件不同循环次数下的互相关系数,以及互相关系数最大值所对应的伸缩系数 $\epsilon_{\max}$,即尾波的相对波速变化值。根据3次重复实验结果,得到了每个试件在不同循环次数下的平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值的变化趋势,发现随着循环次数的增加,平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值,即尾波相对波速的变化值逐渐增大,总体上具有一致的变化规律。根据循环次数与平均伸缩系数 $\epsilon_{\max}$ 绝对值的对应关系,可以看出通过对尾波相对波速变化值的计算,可以很好地反映出试件不同时刻下由未焊透缺陷引起的微小变化,实现对试件的损伤程度的量化分析。

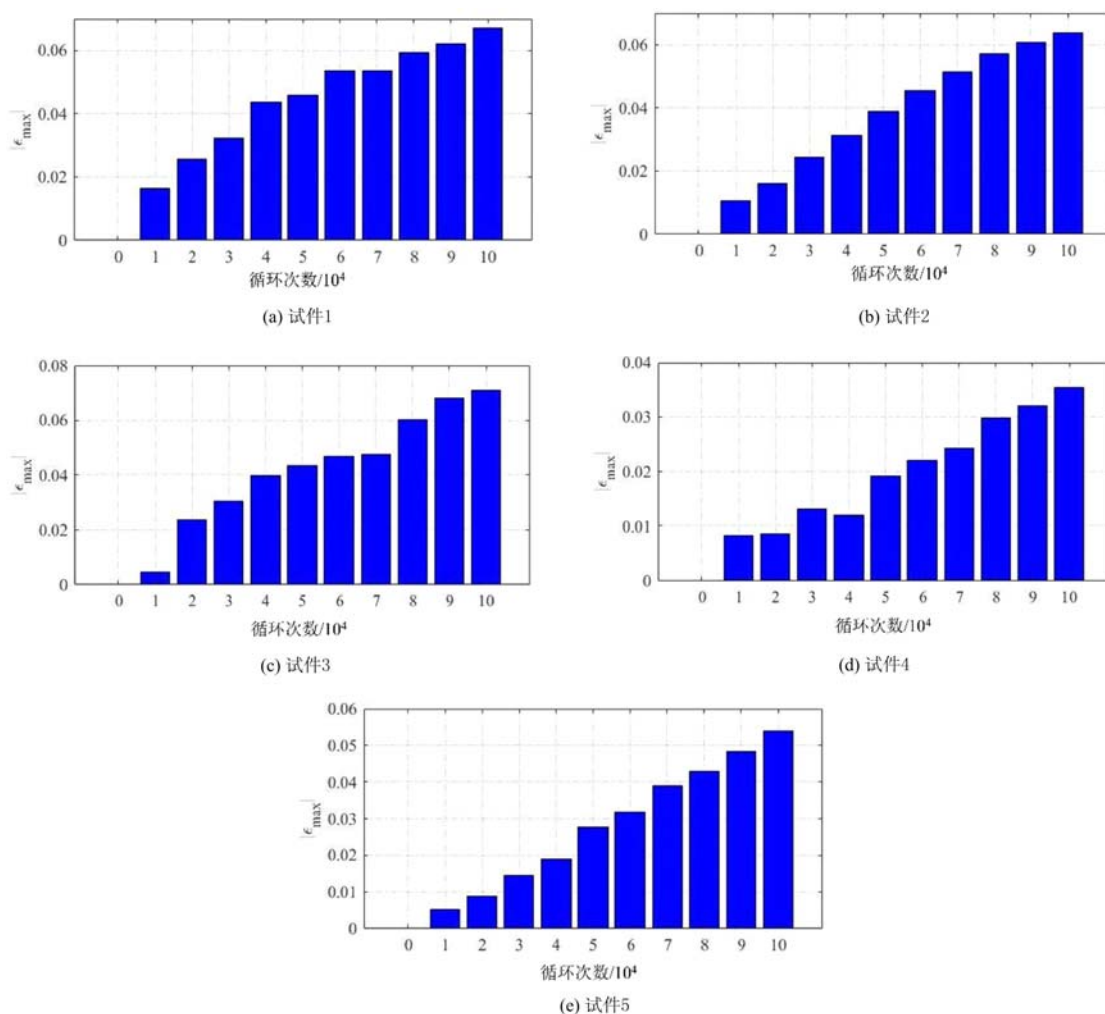


图 8 5 个试件在不同循环次数下的平均伸缩系数绝对值

Fig. 8 The absolute value of the average stretching coefficient for five specimens under different cycles

参考文献:

- [1] 王立君, 张彦华. 焊缝形状参数的统计波动对焊趾疲劳裂纹 LEFM 有效限的影响[J]. 实验力学, 1997, 12(2): 10—15 (WANG Lijun, ZHANG Yanhua. Influence of statistical fluctuation of weld shape parameters on LEFM effective limit of toe fatigue crack[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(2): 10—15 (in Chinese))
- [2] 苗张木, 陶德馨, 吴卫国. 厚钢板焊缝断裂试样疲劳裂纹预制的“高 K 比法”[J]. 实验力学, 2006, 21(3): 345—350 (MIAO Zhangmu, TAO Dexin, WU Weiguo. “High K ratio method” for prefabrication of fatigue cracks in welded fracture specimens of thick steel plate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3): 345—350 (in Chinese))
- [3] 姜昊, 白瑞祥, 雷振坤. 基于返回映射的铝合金激光焊缝的弹塑性参数反演[J]. 实验力学, 2019, 34(1): 1—11 (JIANG Hao, BAI Ruixiang, LEI Zhenkun. Inversion of elastic-plastic parameters for laser welding of aluminum alloy based on return mapping[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1): 1—11 (in Chinese))
- [4] 涂志华, 张忠, 赵立中, 等. 含表面裂纹铝合金焊缝低温断裂性能[J]. 实验力学, 1996, 11(1): 84—89 (TU Zhihua, ZHANG Zhong, ZHAO Lizhong, et al. Low temperature fracture behavior of aluminum alloy welds with surface cracks[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(1): 84—89 (in Chinese))
- [5] 田勔, 张勇, 王丽萍. 微焦点棒阳极射线检测技术在转向架激光电弧复合焊焊缝检测中的应用[J]. 电焊机, 2021, 51(6): 68—71 (TIAN Meng, ZHANG Yong, WANG Liping. Application of microfocus rod anode ray detection technology in welding seam detection of bogie laser arc composite welding[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(6): 68—71 (in Chinese))

- [6] 李茜茜, 赵金峰, 潘永东. 基于激光超声场检测的材料常数测量方法[J]. 实验力学, 2016, 31(3):352—360 (LI Qianqian, ZHAO Jinfeng, PAN Yongdong. Measurement of material constants based on laser ultrasonic field detection[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3):352—360 (in Chinese))
- [7] 李雪, 何超, 杨昆. 超声冲击对铝合金搅拌摩擦焊接头超高周疲劳性能的影响[J]. 实验力学, 2016, 31(6):809—818 (LI Xue, HE Chao, YANG Kun. Effect of ultrasonic shock on ultra-high cycle fatigue performance of friction stir welded aluminum alloy joints[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(6):809—818 (in Chinese))
- [8] 何俊. 钢材偏析对球罐焊缝衍射时差法超声检测的影响[J]. 无损检测, 2019, 41(1):27—31 (HE Jun. Effect of steel segregation on ultrasonic detection of spherical tank weld by diffraction time difference method [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(1):27—31 (in Chinese))
- [9] 黄焕东, 胡利晨, 胡炜炜. 奥氏体不锈钢焊缝超声衍射时差法检测的有限元仿真及应用[J]. 无损检测, 2020, 42(7):5—9 (HUANG Huandong, HU Lichen, HU Weiwei. Finite element simulation and application of ultrasonic diffraction time difference method for weld inspection of austenitic stainless steel[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(7):5—9 (in Chinese))
- [10] 简添福, 郭志贤, 林东文. 基于相控阵超声检测技术的钢构件角焊缝检测[J]. 化工装备技术, 2021, 42(3):38—40 (JIAN Tianfu, GUO Zhixian, LIN Dongwen. Fillet weld detection of steel components based on phased array ultrasonic detection technology[J]. Chemical Equipment Technology, 2021, 42(3):38—40 (in Chinese))
- [11] 殷尊, 孟永乐, 李佼佼. 超声相控阵技术对小口径接管座角焊缝检测研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52(3):50—54 (YIN Zun, MENG Yongle, LI Jiaojiao. Ultrasonic phased array technology for fillet weld inspection of small diameter nozzle seat[J]. Boiler Technology, 2021, 52(3):50—54 (in Chinese))
- [12] 李应卫, 周锡龙, 李法新. PZT 压电陶瓷高温变形与失效的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(5):527—534 (LI Yingwei, ZHOU Xilong, LI Faxin. Experimental study on deformation and failure of PZT piezoelectric ceramics at high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):527—534 (in Chinese))
- [13] 马晓倩, 许斌, 李俊. 基于压电波动测量的竹梁界面剥离监测试验[J]. 压电与声光, 2017, 39(5):750—753 (MA Xiaolian, XU Bin, LI Jun. Monitoring experiment of bamboo beam interface stripping based on piezoelectric wave measurement[J]. Piezoelectrics & Acoustoptics, 2017, 39(5):750—753 (in Chinese))
- [14] 张益松, 刘敏珊, 伊立言. 压电陶瓷片在振动试验中的应用[J]. 实验力学, 1987, 2(2):90—94 (ZHANG Yisong, LIU Minshan, YI Liyan. Application of piezoelectric ceramic plate in vibration test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1987, 2(2):90—94 (in Chinese))
- [15] 李彬, 张颖, 温泽明. Q345R 钢蠕变过程声发射特性实验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(2):232—238 (LI Bin, ZHANG Ying, WEN Zeming. Experimental study on acoustic emission characteristics of Q345R steel during creep process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(2):232—238 (in Chinese))
- [16] 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, 36:39—42 (LIU Bin, GANG Tie, WAN Chuhao, et al. Nonlinear ultrasonic testing method for complex structural welds [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36:39—42 (in Chinese))
- [17] 王炯耿, 姚晖, 罗宏建, 等. 铝制容器焊缝超声阵列成像方法研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4):517—524 (WANG Jiongeng, YAO Hui, LUO Hongjian, et al. Study on ultrasonic array imaging method of aluminum container weld[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):517—524 (in Chinese))
- [18] 刘永杰, 何超, 方冬慧, 等. 焊接接头超高周疲劳实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(5):617—624 (LIU Yongjie, HE Chao, FANG Donghui, et al. Experimental study on ultra high cycle fatigue of welded joints[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):617—624 (in Chinese))
- [19] Aki K. Analysis of seismic coda of local earthquakes as scattered waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(2):615—631.
- [20] Snieder R, Hagerty M. Monitoring change in volcanic interiors using coda wave interferometry: application to Arenal Volcano, Costa Rica [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): L09608.

Monitoring of damage development of defective weld based on coda wave interferometry

HUO Linsheng¹, ZHOU Detian¹, YANG Zhuodong¹, LIU Yang²

(1. State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Liaoning Transportation Research Institute Co. Ltd, Shenyang 110015, Liaoning, China)

Abstract: When there is an incomplete penetration defect occurring in the weld, the test piece will have slight plastic deformation under the cyclic loading and affect the weld strength. Therefore, it is important to monitor the damage development of incomplete penetration effectively. However, current detection methods have low accuracy and cannot achieve the long term monitoring. In this paper, we proposed a Coda Wave Interferometry (CWI) monitoring method using piezoceramic transducers. Aiming at the defective weld with the incomplete penetration, a cyclic loading experiment was designed to generate the plastic deformation and then the small damage change of the welded specimen under the cyclic loading was monitored. Experimental results show that the slight plastic deformation was occurring in the weld and developed gradually under the cyclic loading. According to the monitoring results of the CWI method, the coda wave is more sensitive to the small deformation than the direct wave. The calculations are performed using the stretching method, which eventually leads to the conclusion that the average stretch coefficient (i. e. , the relative velocity variation value of the coda wave) increases gradually with the increasing cycles.

Keywords: Coda Wave Interferometry (CWI); piezoceramic transducer; weld defect monitoring; incomplete penetration defect