

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904962

电磁声谐振对 Q235 钢压缩形变评价研究*

蔡智超¹, 陈 澜¹, 赵振勇¹, 田贵云²

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013; 2. 英国纽卡斯尔大学工程学院 纽卡斯尔 NE1 7RU)

摘要:结构件塑性变形检测是设备安全运维中值得注意的重要问题。针对常见的 Q235 钢材料塑性变形问题,提出了一种基于电磁换能器谐振模式的非接触超声检测的方法。有别于传统的超声回波反射时差法测距原理,共振所产生的谐振超声能够显著增强电磁声谐振点的声波幅值,利用超声波在试件内共振方式实现更高精确的厚度检测。通过双波压缩叠加法及双波压缩叠乘法能够有效改善电磁声谐振信噪比并实现谐振点的提取。通过对标准试件的厚度测量,其厚度测量绝对误差控制在 0.2% 以下,最后利用电磁声谐振实现对不同轴向压力载荷下 Q235 试件的形变测量。

关键词:塑性形变;无损检测;电磁声谐振

中图分类号: TB553 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Research on electromagnetic acoustic resonance for plastic deformation in Q235 steel

Cai Zhichao¹, Chen Lan¹, Zhao Zhenyong¹, Tian Guiyun²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK)

Abstract: Inspection of plastic deformation in structural specimen is one key problem for safe operation and maintenance. In this paper, a contactless ultrasonic testing method using an electromagnetic acoustic transducer in resonant mode is proposed to solve the problem of plastic deformation in Q235 steel. Compared with conventional ultrasonic pulse echo method for plastic deformation inspection, the use of resonant ultrasonic signals and signal processing with power spectrum analysis can significantly enhance signal amplitude of the electromagnetic acoustic resonance (EMAR). The double wave superposition of n^{th} compression and double wave multiplication of n^{th} compression are applied to increase the signal-to-noise ratio and detecting ability of the resonant wave crests. The absolute error of EMAR detection in the standard specimens measurement is smaller than 0.2%, which demonstrates the capability of this plastic deformation in Q235 steel.

Keywords: plastic deformation; non-destructive testing; electromagnetic acoustic resonance

0 引 言

Q235 钢作为一种常见的碳素结构钢具有良好的韧性及强度,普遍应用于机械、桥隧、国防等工程领域,由于工况条件的改变, Q235 钢承载应力将会发生一定的变化,如不及时关注其力学性能并及时更替的话极有可能引起严重的安全事故。直接对相关结构件进行受力检测存在困难,而借助试件厚度变化的精确检测与应力应变曲线协同分析结构件受力不失为一个可行性的方案。

传统金属试件应变、厚度测量常采用接触式超声波方法,其中压电超声检测由于其激发信号强、信噪比高、操作简易等优势拥有广泛的应用。但压电超声针对恶劣工况、在役探伤等需对被检试件进行表面预处理,且需采用耦合剂贴合压电探头与试件,这在一定程度上限制了其在工况环境下的检测应用^[1-2]。电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 技术的无需耦合剂的非接触特性和单一模态声波激励特性在特殊领域具有显著优势^[3-4],故在高温高速等恶劣工况条件下,采用 EMAT 对可对斜向角度缺陷、粘接分层及测厚应用

收稿日期:2019-04-11 Received Date:2019-04-11

* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51807065)项目资助

广泛^[5-8]。然而电磁超声无损检测核心部分 EMAT 存在换能效率低、接收到的有效信号较微弱且易受电磁干扰^[9-12]。为了有效地改善回波信号质量,将 EMAT 与共振技术相结合形成的电磁声谐振技术 (electromagnetic acoustic resonance, EMAR),可提升声波信噪比,同时通过扫频产生的谐振特征能够实现对板厚、管壁薄化和材料表征等方面的精确测量^[13-17],国内外研究学者对电磁声谐振技术也进行大量的理论与实验研究。Liu 等^[16]采用 EMAR 信号功率谱估计的信号处理方法提高对粘接效果的检测能力;Kinya 等^[17]采用 EMAR 测量壁薄厚,其所获得的共振频谱实际是由板厚度的共振光谱的叠加形成。EMAR 虽然理论上增加了超声波幅值信号,在一定程度上改善了 EMAT 的信噪比(最多提高一倍),但由于被测试件厚度的增加,其相对应得激励周期数的增加,主脉冲增长而必然扩大超声波的检测盲区,导致真正可检测的谐波信号在第二次甚至多次反射叠加之后,而此时检测的超声波已经过多次反射且存在一定的损耗,较低的信噪比和积分区域选择影响着 EMAR 谐振频谱。因此在实际试件塑性形变测量中,对 EMAR 谐振时域信号的积分区域选择、谐振信号的信噪比是其工程应用的难题。

本文,通过声波谐振与传统的 EMAT 方式相结合,提出了一种声波谐振模式下 Q235 钢塑性形变的 EMAR 测量方法。首先利用多物理场有限元计算分析电磁超声谐振情况下的声波分布及其谐振特性;为了提高谐振信噪比,利用双波压缩叠加法及双波压缩叠乘法提高对扫频谐振信号的频率分辨率,以实现谐振点的精确定位及邻近谐振频率差的准确测量;最后,将 EMAR 方法应用于不同轴向力载荷下 Q235 钢试件进行厚度、应变检测,并通过与标准的实验比对验证该技术的可行性。

1 电磁声谐振工作原理

1.1 EMAR 换能原理及特点

EMAR 是以非接触声波谐振技术为基础的新型无损检测方法,其主要核心部件为电磁超声换能器,EMAR 是在电磁超声换能器的基础上有效地结合谐振技术,提高换能超声回波信号信噪比,通过扫频对接收回波信号积分处理以分析试件的谐振特性。针对厚度测量问题,宜采用螺旋线圈和圆柱形永磁体组合激发横波进行测量。

EMAR 通过电磁感应原理作用于被测试件表面层的物理场耦合区域,通过电磁场、力场和超声波场的相互转换完成对声波信号的激励和接收,其工作机理如图 1 所示,将于换能器线圈内通以交变大功率高频电流,在试件趋肤层的物理场耦合区域感应出方向相反的涡流,涡流在永磁体静态磁场的作用下形成交变电磁力。试件表面质点在电磁力的作用下振动并以超声波的形式在试件中

传播,当超声波传播至接收换能器下方时,超声波切割静磁场磁感应线,基于法拉第电磁感应定律质点振动在试件中产生交变电场,通过交变电场影响换能器线圈附近的磁场变化,继而在换能器中接收到声波电压信号。当试件的厚度为超声波在材料中传播波长的整数倍时,入射波和反射波在试块内形成驻波并形成共振。

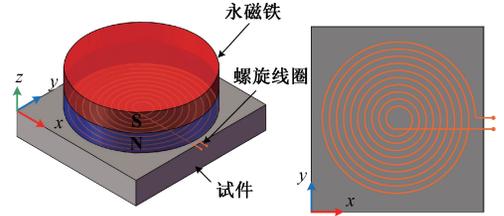


图1 EMAR 的工作机理

Fig.1 The working mechanism of EMAR

其中 EMAR 与传统的 EMAT 有两个最重要的区别。1) 对激励信号周期的要求,EMAT 测厚仅需要得到时域上分离的回波信号,因此激励信号仅需要短周期信号,然而 EMAR 激励信号的周期则由被测试件的厚度来确定,当试件较厚时,对于材料中的确定波速传播时间相对较长,这时需要加大激励的周期个数邻近回波信号达到叠加效果,故 EMAR 一般为长周期激励;2) EMAT 测厚方法由相邻单频回波信号的时间差即可以计算出声波在被测试件中的传播位移,而 EMAR 信号的接收及处理需要一定频带宽度的扫频激励,并在信号处理端需超外差的方式实现对不同频段超声信号的相位信息的采集分析。

1.2 EMAR 相位检测及谐振理论

EMAR 常采用声波收发一体模式,其单次激励的横波,将在试件的纵向来回反射接收,因此在接收时域波形 $F(t)$ 可视其为多个横波时域信号 $F_i(t)$ ($i=1,2,\dots,N$) 的连加,如当激励周期波数 n 少时 ($n \times c/f < 2 \times h$), $F_i(t)$ 可以在时域上完全分离;但当激励周期波数 n 多时 ($n \times c/f > 2 \times d$), 邻近回波则在时域上产生一定的叠加, $F_i(t)$ 则表示为:

$$F(t) = \sum_{i=1}^N F_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin(2\pi f t + \varphi_i) = A(t) \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 - (i-1) \times 2\pi f \times \frac{2d}{c}$$

式中: A_n 和 φ_n 分别表示第 n 个时域的时域信号包络和相位; c 、 f 、 d 分别表示声波在材料中的传播速度、频率、试件厚度。

而后将超外差方式处理时域信号,在保留原有超声信号相位的基础上对时域信号进行一个混频操作,使接收超声信号从载波频率转移到中频上;而后经过中频放

大器对信号进行放大和滤波,通过一对匹配射频相敏检测乘法电路,并将两路 90° 相位差中频参考信号进行积分,即可得到两路信号分量:

$$I_1 = rg \cos \phi \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = r \sum_{i=1}^N \cos \phi_i \int_{t_1}^{t_2} A_i(t) dt \quad (2)$$

$$I_2 = rg \sin \phi \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = r \sum_{i=1}^N \sin \phi_i \int_{t_1}^{t_2} A_i(t) dt$$

式中: t_1 、 t_2 是积分门被定义的起始时刻和结束时刻; r 为积分速率; g 为总增益和转换效率参数。

而后根据两路信号分量可以求得声波合振幅 A , 进一步通过激励频率变化(即激励持续时间不变,改变激励频率及激励周期),可以得到 A 与 f 之间的关系:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (3)$$

而当相邻脉冲信号相位之差为波形周期的整数倍时发生谐振,此时信号发生谐振时声波合振幅 A 达到最大值。在一定宽度的频率激励下会存在多个谐振频率,其中第 m 个谐振频率 f_m 及谐振间隔 Δf 可表示为在已知 c 的情况下可以求得精确的试件厚度 d :

$$f_m = m \frac{c}{2d} \quad (4)$$

$$\Delta f = f_m - f_{m-1} = \frac{c}{2d} \quad (5)$$

2 EMAR 有限元建模及声场分析

通过有限元方法搭建 EMAR 模型来求解换能过程,其中包括交变磁场、无电流磁场以及结构场等多物理场耦合,试件中的交变电流及静磁场分别由交变磁场、无电流磁场进行求解,结构场主要是用来分析求解试件中超声波的激励及传播。通过瞬态求解能够分析电磁力作用下的质点振动以及动态的声波在试件内详细的位移状况。

EMAR 选用螺旋线圈与柱形永磁铁组合形式,模型中永磁体半径为 25 mm,高度为 20 mm;螺旋线圈半径为 5 mm;被测试件低碳钢尺寸为 40 mm×10 mm,低碳钢,杨氏模量为 200 GPa,泊松比为 0.277,密度为 7 850 kg/m³。激励线圈加载频率 $f=2$ MHz、周波数为 3、幅值 $U=20$ A 的正弦电流激励。

电磁超声换能机理包括洛伦兹力、磁致伸缩力以及磁化力等,其中磁化力数量级较小可以忽略。在低碳钢材料中,洛伦兹力机制是钢材料的主要传导机制,因此在求解模型中只考虑洛伦兹力换能作用^[18-19]。试件中声波位移如图 2 所示,EMAR 发的体波在试件中垂直向下传播,随着传播时间的增加,横波、纵波由于速度的差异原因产生分离,纵波以较小的外偏角斜传播,横波垂直向下传播;随着传播声程的增加,横波的能量也存在着一

定的衰减;当横波遇到试件底部将产生声波反射,按照原路径又传播至试件顶部,一直往复直至衰减耗损为 0。

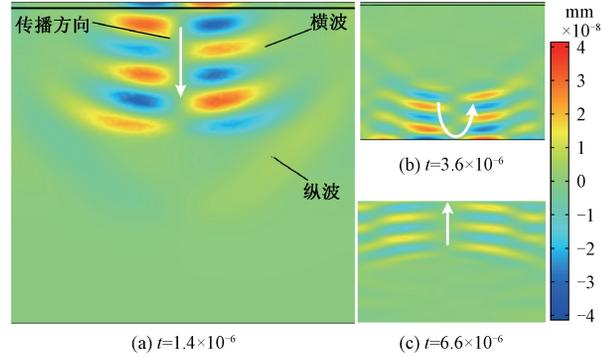


图 2 体波传播过程

Fig.2 Propagation process of body wave

横波在低碳钢中的传播速度 $c=3.107$ km/s,在超声为 2 MHz 频率时,其横波波长 $\lambda=1.55$ mm。由于低碳钢厚度为 10 mm,如当激励周期个数增加至 13 个,此时激励横波将与经底部反射的横波产生时域首位相连,整个试件垂直区域将持续存在横波位移,如继续增加激励周期个数,激励的横波将于底部反射的横波产生部分叠加,根据声波波长的特征可以判断两者叠加是否是协同增强或者减弱。如表 1 所示,分别用 $f_1=1.71$ MHz, $f_2=1.7088$ MHz 激励产生横波,其位移情况如图 3 所示,由于 f_1 对应的声波波长在声程中传播个数非整数,因此其激励横波与发射横波产生非同相位叠加并产生一定的削弱,而 f_2 对应的声波波长在声程中传播个数为整数,因此其激励横波与发射横波产生显著谐振并协同增强,如图 3 所示。

表 1 不同频率作用效果

Table 1 Different frequency effects

频率/MHz	波长/mm	板内波数	谐振效果
1.71	1.817	11.01	部分增强
1.7088	1.8182	11	全部增强

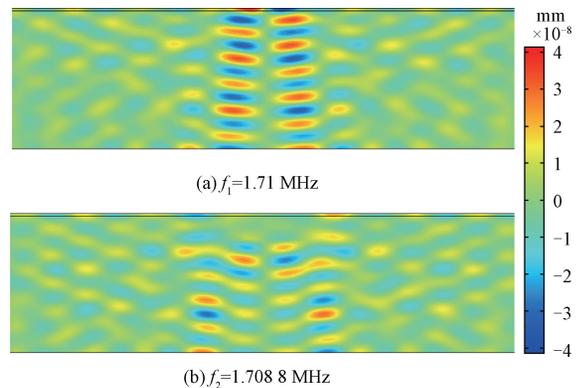


图 3 不同频率下谐振情况作用

Fig.3 Resonance at different frequencies

3 EMAR 信号处理方式

对于 EMAR 的测量采用美国 RITEC 公司研发的 RAM-5000 高性能非线性超声检测系统。该系统是在计算机控制下输出射频脉冲激励电磁超声换能器,使得磁场和电场耦合作用于试件表面产生超声波,通过双工器实现对超声波激励以及接收的分离,如图 4 所示。

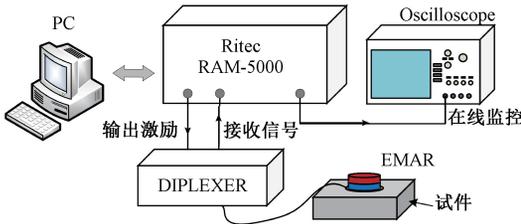


图 4 实验系统框图

Fig.4 Block diagram of experimental system

对试件进行声谐振实验中,控制下初始频率、激励电压及激励信号周期个数等来确定输出激励信号,输出射频脉冲激励换能器后可通过示波器可以观察其输入信号与输出信号的时域图,其中由系统激发的脉冲激励产生电磁超声横波,在试件中来回反复传播并且接收。如果采用短周期激励的话,横波回波信号在时域上分离,如图 5、6 所示,随着激励周期个数的增加主脉冲(发射线圈中高频电流所向外辐射的电磁干扰,通过电磁耦合被接受线圈接收到形成主脉冲干扰,主脉冲干扰的存在使得检测存在盲区)也随之增长,第 i 次横波回波将与第 $i+1$ 次横波回波相叠加,并产生一定的叠加信号,而叠加信号是增强还是减弱是与对应的激励频率及试件厚度有关,因此需要将选择回波信号中的叠加区域并预设积分的起始时间和截止时间,在该激励频率的叠加回波信号进行积分处理,并分析一定频段宽度的声波合振幅与激励频率之间的关系。

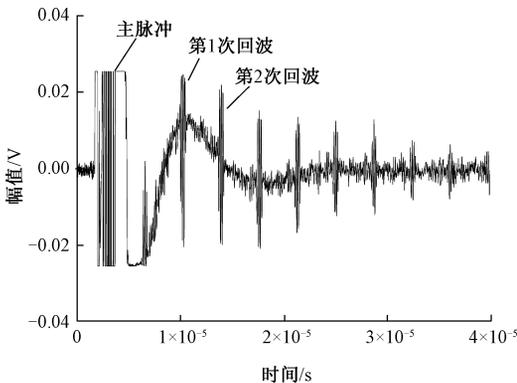


图 5 2 个周期的激励回波信号时域图

Fig.5 Time domain diagram of 2 cycles of excitation echo signals

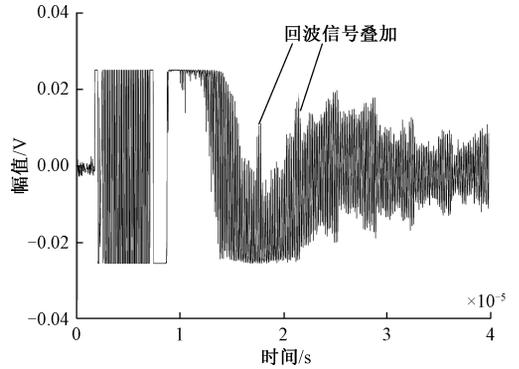


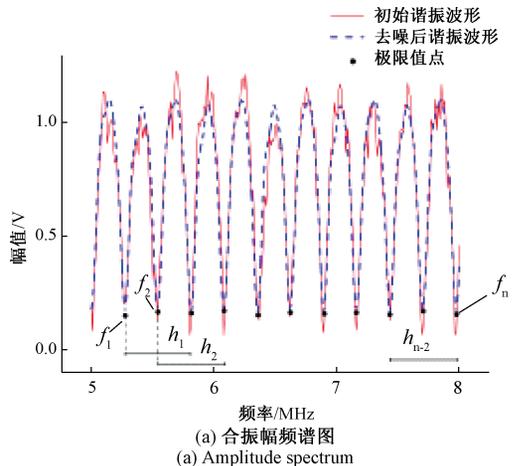
图 6 25 个周期的激励回波信号时域图

Fig.6 Time domain diagram of 25 cycles of excitation echo signal

由于存在噪声、EMAR 换能效率及其他干扰等因素,实验得到的声波合振幅频谱图存在较多噪声,难以实现谐振点拾取。因此结合声波合振幅频谱特点,将数据进行高阶傅里叶拟合预处理,如图 7 所示,并拾取拟合声波合振幅频谱图中的极小值点,以相应的频率从左到右标记为 f_1, f_2, \dots, f_n 并将以 $[f_1, f_3), [f_2, f_4), \dots, [f_{n-2}, f_n)$ 划分区间,每个区间中包含两个极大值点。将分段的谐振频率区段分别标记为 h_1, h_2, \dots, h_{n-2} ,同时使每区段为一整体平移至该扫频初始频率处进行操作。如将平移后对应的区段幅值进行叠加称为双波压缩叠加法(double wave superposition of n^{th} compression, DWSC),如将对应的区段幅值进行叠乘称为双波压缩叠乘法(double wave multiplication of n^{th} compression, DWMC),分别如式(6)、(7)所示。

$$S = \sum_{i=1}^{n-2} h_{i,f_i} \tag{6}$$

$$C = \prod_{i=1}^{n-2} h_{i,f_i} \tag{7}$$



(a) 合振幅频谱图
(a) Amplitude spectrum

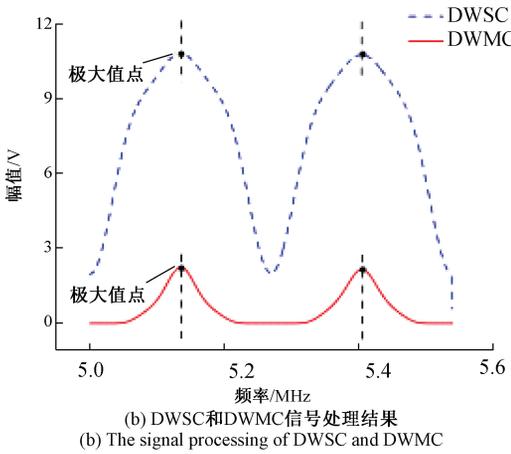


图 7 声波合振幅频谱图信号处理

Fig.7 Signal processing of acoustic wave amplitude spectrum

通过上述 2 种方法可得压缩为两个波包的声波合振幅频谱图,取出其中 2 个极大值点并计算其所对应的频率之差,即为谐振频率间隔 Δf 。在设置激励信号周期数时需要注意,随着激励周期的增加,回波信号受到的扰动也逐渐增强,故需要确定合适的周期数,以确保两邻近回波产生信号叠加。由于激励信号周期个数的增加,主脉冲也随之增长并覆盖部分回波信号,因此在框选积分区间时,先观察增加激励回波信号周期后主脉冲所在位置,靠近主脉冲的信号相对较强,故选择靠近主脉冲后第 1 个回波信号。其中积分区域和积分范围对对谐振频率间隔 Δf 检测影响较大。

1) 确定积分宽度,改变积分区域

如图 8 所示,在时域信号中确定发生叠加的区间,固定 $2 \mu\text{s}$ 积分宽度。由 $t_0 = 25 \mu\text{s}$ 为起始位置以 $0.5 \mu\text{s}$ 为步长向右移动,分别积分框选区间声波信号。起始叠加区域由于靠近主脉冲区域,幅值受到一定的影响,出现较小的削弱;随着积分区间的右移,叠加区间的框选减少的导致其积分幅值急剧下降最后保持在较小值;当继续移动至下一个叠加区域时,幅值增加,但由于回波信号在试件中存在一定的衰减,因此第 2 个叠加区域较最初的叠加区域幅值减小,当积分区域为完全叠加区间时幅值保持稳定。且观察积分区域 A 与积分区域 C 中通过求解所得的 Δf 绝对误差在 0.007% 范围之内,而当积分区域(区域 B)没有包含叠加区域时将无法得到所需频谱图,即无法计算相邻的两个谐振频率。

2) 确定积分起始位置,改变积分宽度

积分框选区间存在整体叠加区域和未叠加区域时,讨论相邻的两个谐振频率和振幅之间的关系,积分框选区域宽度由 $2 \mu\text{s}$ 开始向右逐步以 $1 \mu\text{s}$ 步长增加。根据图 9 所示的测量结果,当积分区域处于未叠加区间时,

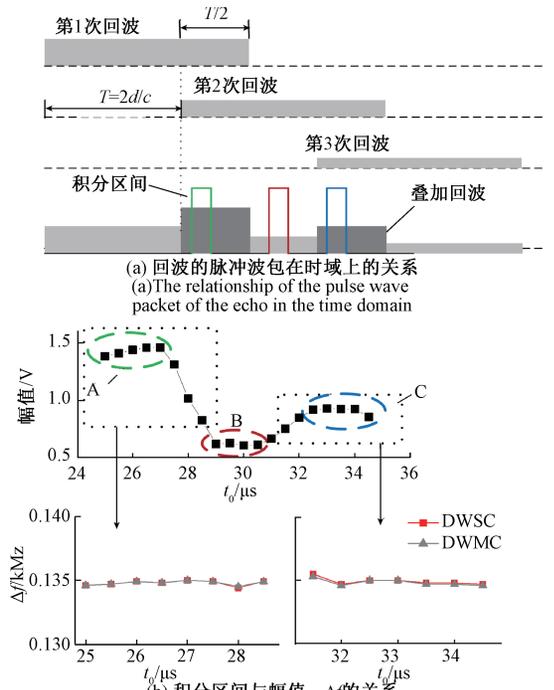


图 8 固定积分宽度下回波信号积分处理

Fig.8 Integral processing of echo signals at a fixed integral width

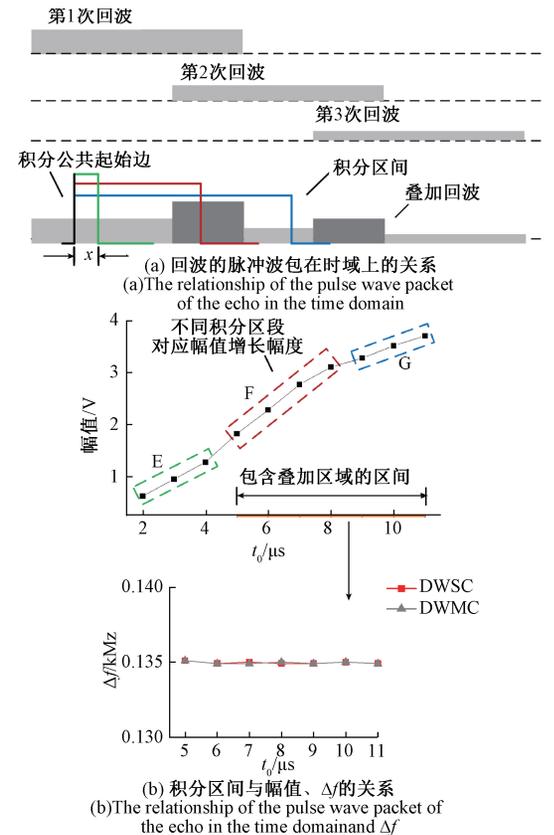


图 9 固定积分起始位置下回波信号积分处理

Fig.9 Integral processing of echo signals at the fixed integration starting position

随着宽度的增加幅值呈缓慢增长;而当积分区域包含叠加区间时,由于叠加区间信号发生谐振,幅值增长速率加快且呈线性变化,随后积分宽度延长至未叠加区域增长速率减缓。当积分区间只包含未叠加区域时无法计算 Δf ,但积分区间只要包含部分叠加区域,相邻的两个谐振频率值基本保持稳定,最大绝对误差不超过 0.03%。

当积分区域包含部分叠加区域时就可以通过计算得到 Δf ,积分宽度对 Δf 的变化无影响,因此 Δf 的准确性主要在于叠加区域的确定,虽幅值的变化由积分框选的回波和积分宽度综合决定,但积分区域的选择对其的影响可忽略不计。

4 EMAR 对压缩试件检测及标准验证

由执行标准 GB/T 7314—2005《金属材料室温压缩试验方法》,对 $\Phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的 Q235 低碳钢压缩试样进行轴向压力载荷下压缩试件的制备,由于低碳钢为塑性材料,因此在压缩试验中,试样端面存在着较大摩擦力,这阻碍了试样端面的横向变形(使试样呈腰鼓状),即高度降低、断面扩大。本文试件将在 41.5 kN 处产生压缩屈服,压缩加载范围从 40~240 kN,步长为 10 kN,据此当加载力超过 41 kN 的时,试件高度会有显著的压缩形变。使用 EMAR 方法进行声波合振幅频谱测量,如图 10 所示,并采用 DWSC 和 DWMC 获得每个压缩试件的相邻谐振峰之间的频率间隔。



(a) EMAR实验平台
(a) Experiment setup for EMAR



(b) EMAR检测
(b) EMAR detection



(c) 压缩试件
(c) Compression specimen

图 10 EMAR 实验

Fig.10 EMAR experiment

通过 EMAR 检测方案以及 DWSC、DWMC 信号处理方法得出试件的频率间隔 Δf ,并联立厚度公式 $d = c/2\Delta f$ 以及应变公式 $\varepsilon = \Delta l/l$,可以得到 Q235 应力-应变曲线图,如图 11 所示。

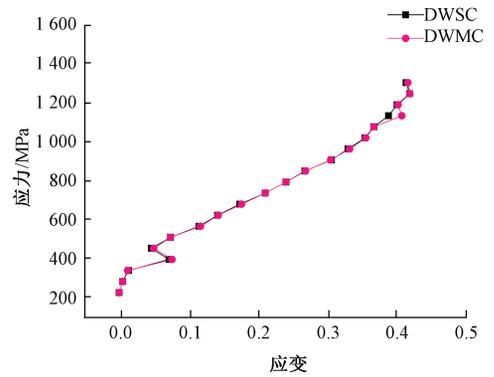


图 11 EMAR 测量的应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves measured by EMAR

为验证信号方法误差特性,将该方法应用于标准试件 6、8、12 和 16 mm 的 EMAR 声谐振测厚中,分别在试件表面选取 5 个位置分别进行谐振测量并取平均,如图 12 所示。其中标准试件 6、8、12 和 16 mm 的理论相邻谐振峰之间的频率间隔分别为 $\Delta f_1 = 0.2696 \text{ MHz}$ 、 $\Delta f_2 = 0.2022 \text{ MHz}$ 、 $\Delta f_3 = 0.1348 \text{ MHz}$ 和 $\Delta f_4 = 0.1011 \text{ MHz}$,对比实验邻近谐振峰之间的频率间隔,由图 13 所示,由 DWSC 和 DWMC 处理最大相对偏差为 0.17% 和 0.15%,最大绝对误差为 0.1% 和 0.2%,其中相对偏差可以表示数据的稳定性,绝对误差表征数据的准确度,分析表明 DWSC 和 DWMC 对 EMAR 谐振点的拾取可行且均有很高的分析精度,相比之下,经过 DWSC 求解出的 d 更接近标准试件厚度值。

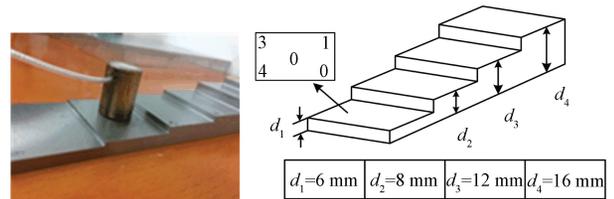


图 12 EMAR 对标准试件检测分析

Fig.12 Detection and analysis of standard specimens by EMAR

5 结 论

本文采用一款非接触式电磁声谐振的方式对于 Q235 钢材塑性变形进行评价研究。通过电磁声谐振的方式有效的利用邻近回波的叠加较好的增强回波幅值,避免了传统回波时差法超声波测量导致的一些误差。同时采用了双波压缩叠加法以及双波压缩叠乘法对于电磁声谐振频谱信号进行,能较好的提取邻近谐振点之间的频率间隔且绝对误差控制在 0.2% 以内。因此,本文提

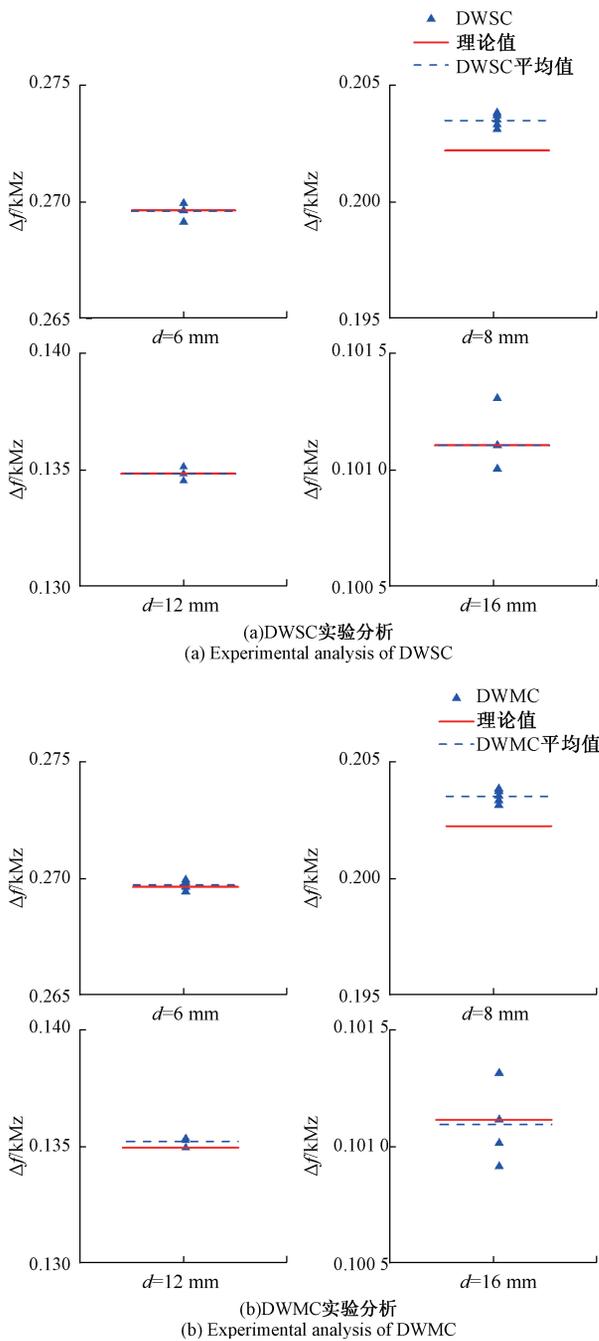


图 13 标准试件中 EMAR 误差分析

Fig.13 Error Analysis of EMAR in standard specimens

出的基于电磁声谐振的方法实现厚度、应变测量的同时能够实现对试件所受应力的间接检测。下一步的工作将利用 EMAR 方法实现“点”区域的厚度精确测量,并进一步加强完善该方法在工程力学测量上的应用分析。

参考文献

[1] SHARMA S, MAHESHWARI S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017 (38) :

203-217.
 [2] DANN M R, DANN C. Automated matching of pipeline corrosion features from in-line inspection data [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017 (162) : 40-50.
 [3] PETCHER P A, POTTER M D G, DIXON S. A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail [J]. NDT & E International, 2014, 65(3) : 1-7.
 [4] LEE J, KIM Y. Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation [J]. NDT & E International, 2016, 83: 38-47.
 [5] HUANG S, WEI Z, ZHAO W, et al. A new omnidirectional EMAT for ultrasonic Lamb wave tomography imaging of metallic plate defects [J]. Sensors, 2014, 14(2) : 3458-3476.
 [6] NAGY P, SIMONETTI F, INSTANES G. Corrosion and erosion monitoring in plates and pipes using constant group velocity Lamb wave inspection [J]. Ultrasonics, 2014, 54(7) : 1832-1841.
 [7] ZHAI G, WANG K, WANG Y, et al. Modeling of Lorentz forces and radiated wave fields for bulk wave electromagnetic acoustic transducers [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(5) : 054901.
 [8] KIM Y, KWON Y. Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides [J]. Ultrasonics, 2015(62) : 3-19.
 [9] 杨理践,邢燕好,张佳,等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4) : 150-160.
 YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection of aluminum plate based on electromagnetic ultrasonic guided wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4) : 150-160.
 [10] PEI C, LIU T, CHEN H, et al. Inspection of delamination defect in first wall with a flexible EMAT-scanning system [J]. Fusion Engineering and Design, 2018(136) : 549-553.
 [11] CLOUGH M, FLEMING M, DIXON S. Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound [J]. NDT & E International, 2017(86) : 20-27.
 [12] REN W P, HE J P, STEVE D, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018 (274) : 189-198.
 [13] KANG L, ZHANG C, DIXON S, et al. Enhancement of

ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer [J]. *NDT & E International*, 2017(86): 36-43.

- [14] KANG L, DIXON S, WANG K, et al. Enhancement of signal amplitude of surface wave EMATs based on 3-D simulation analysis and orthogonal test method[J]. *NDT & E International*, 2013(59): 11-17.
- [15] 邓明晰. 用电磁声谐振方法评价金属板材损伤的实验研究[J]. *声学技术*, 2011, 30(4): 327-330.
DENG M X. Experimental study on damage assessment of metal sheet by electromagnetic acoustic resonance method[J]. *Technical Acoustics*, 2011, 30(4): 327-330.
- [16] LIU T, PEI C, CHENG X, et al. Adhesive debonding inspection with a small EMAT in resonant mode[J]. *NDT & E International*, 2018(98): 110-116.
- [17] KINYA M, MASAHIKO M, MASAO T. Investigation of wall thinning measurement in steel plates by electromagnetic acoustic resonance[J]. *Materials Science Forum*, 2008(580-582): 113-116.
- [18] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P, et al. Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials [J]. *NDT&E International*, 2012(45): 32-38.
- [19] 时亚, 石文泽, 陈果, 等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 240-249.
SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing[J]. *Technical Acoustics*, 2018, 39(8): 240-249.

作者简介



蔡智超, 2010年于华东交通大学获得学士学位, 2016年于河北工业大学获得博士学位, 现为华东交通大学讲师, 主要研究方向为电磁传感器, 电磁超声。

E-mail: zecai@foxmail.com

Cai Zhichao received his B. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2010, and Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2016. He is currently a lecturer at East China Jiaotong University. His main research interests include electromagnetic sensors and electromagnetic ultrasonics.



田贵云(通信作者), 分别在1985年和1988年于四川大学分别获得学士学位和硕士学位, 1998年于英国Derby大学获得博士学位, 现为电子科技大学教授、国家特聘专家、英国纽卡斯尔大学传感器技术首席教授, 主要研究方向为电磁传感器、无损检测与评估、结构健康状态检测等。

E-mail: g.y.tian@newcastle.ac.uk

Tian Guiyun (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees from the University of Sichuan in 1985 and 1988, respectively, and Ph. D. degree from the University of Derby, Derby, U.K. in 1998. Currently, he is an adjunct professor in University of Electronic Science and Technology of China. He has been selected as a Chinese Distinguished Expert. Since 2007, he has been based at Newcastle University, Newcastle upon Tyne, U.K., where he is the chair professor of sensor technologies. His main research interests include electromagnetic sensors, non-destructive testing and evaluation, structural health monitoring, etc.