

## Study on the Hybrid Detection Method of Pressure Pipeline Defects with EMAT/PECT\*

CHEN Tao<sup>1,3\*</sup>, HE Qian<sup>1</sup>, LÜ Cheng<sup>2</sup>, DENG Zhiyang<sup>1</sup>, TU Jun<sup>1</sup>, SONG Xiaochun<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China;

2.Hubei Special Equipment Inspection Testing Institute, Wuhan Hubei 430077, China;

3.Xiangyang Industry Research Institute of Hubei University of Technology, Xiangyang Hubei 441100, China)

**Abstract:** Aiming at the demand of synchronous and rapid detection of deep and surface defects of penstock, a hybrid detection method for deep and surface defects of pressure pipelines is studied based on the principle of EMAT/PECT (Electromagnetic Acoustic Transducer/Pulsed Eddy Current Testing). Firstly, the finite element simulation software is used to establish the EMAT/PECT composite testing model, and the detection principle of the composite probe is studied. Then, the influence of deep and surface defects on EMAT/PECT composite signal and the signal extraction method are studied. Finally, the EMAT/PECT composite probe is made, and the pressure pipeline with deep and surface defects is tested. The test results show that the hybrid detection method can effectively detect 1 mm-wide and 2 mm-deep cracks on the outer surface of the pressure pipe and 2 mm-thickness thinning defects on the inner wall of the pipe, thus eliminating the blind spot of defect detection when the two detection techniques are used alone, and has high detection accuracy. After further optimization, the proposed method is expected to be used for synchronous and rapid detection of surface and deep defects in pressure pipelines.

**Key words:** NDT; pressure pipeline; EMAT/PECT; hybrid detection

EEACC: 7230 doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2023.06.003

## 压力管道缺陷电磁超声/脉冲涡流复合检测方法研究\*

陈涛<sup>1,3\*</sup>, 何倩<sup>1</sup>, 吕程<sup>2</sup>, 邓志扬<sup>1</sup>, 涂君<sup>1</sup>, 宋小春<sup>1</sup>

(1.湖北工业大学机械工程学院,湖北武汉430068;2.湖北特种设备检验检测研究院,湖北武汉430077;

3.襄阳湖北工业大学产业研究院,湖北襄阳441100)

**摘要:** 针对压力管道内、外壁缺陷快速检测的需求,根据电磁超声/脉冲涡流复合检测原理,研究压力管道深层和表层缺陷同步检测方法。首先,利用有限元仿真软件建立电磁超声/脉冲涡流复合检测模型,研究复合式探头的检测原理;接着,研究深层及表层缺陷对电磁超声/脉冲涡流复合信号的影响规律和信号分离方法;最后,制作电磁超声/脉冲涡流复合式探头实物,并对带有深层和表层缺陷的压力管道试件进行试验测试。试验结果表明:论文研究的复合检测方法能够从管道外部有效检出压力管道外表面宽1 mm、深2 mm裂纹和管道内壁2 mm厚度减薄缺陷,弥补了两种检测技术单独使用时存在缺陷检测盲区的不足,且具有较高的检测精度。该检测方法经过进一步优化有望用于压力管道表层和深层缺陷同步快速检测。

**关键词:** 无损检测;压力管道;电磁超声/脉冲涡流;复合检测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2023)06-0860-08

压力管道广泛应用于电力、石油、化工、航空、军事等领域,是我国规定涉及人身安全的八大特种设备之一,其运行环境复杂,传输介质一般为具有易燃、易爆、高温、高压、剧毒、强腐蚀等特性的气体或液体<sup>[1]</sup>。长期在复杂工况下运行,压力管道易出现腐蚀、裂纹等缺陷,一旦发生泄漏或爆炸事故,会给国家和人民群众的生命财产以及周边环境造成极大危害<sup>[2-3]</sup>。因此,高效率的压力管道缺陷无损检测

技术受到国内外学者的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

超声技术是一种常用的压力管道缺陷检测及监测技术,可利用声波信号的幅值及相位变化来评估缺陷的尺寸和位置、以及材料物理性质<sup>[6-7]</sup>。与常规超声检测相比,电磁超声检测具有方向性好、非接触、无需耦合剂等优点,且目前的研究取得了较好的成果<sup>[8-10]</sup>。但电磁超声检测技术在工程应用中仍存在不足,例如利用电磁超声横波检测表面及近表面

项目来源:国家重点研发计划项目(2022YFF0605600);国家自然科学基金项目(52105550)

收稿日期:2022-03-28 修改日期:2022-07-06

缺陷时,由于声程较短,存在回波信号被淹没在始波中造成检测盲区的问题<sup>[11-12]</sup>。针对表面及近表面检测盲区问题,天津工业大学的刘素贞等<sup>[13]</sup>采用电磁超声和涡流复合检测探头对铝板进行分步检测;哈尔滨工业大学的孙崢<sup>[14]</sup>利用不同的信号处理通道对电磁超声和脉冲涡流信号进行分离,实现了管道厚度与表面裂纹的同步检测;电子科技大学的郭伟等<sup>[15]</sup>利用信号接收电路将电磁超声/脉冲涡流复合信号进行分离,实现了油气管道壁厚的电磁超声检测以及表面缺陷的脉冲涡流检测;西安交通大学的田明明等<sup>[16]</sup>利用傅里叶变换、滤波等信号处理方法从复合信号中分离出用于铝板复杂缺陷检测的电磁超声与脉冲涡流信号。

目前,电磁超声/脉冲涡流复合检测方法的研究取得了一定的进展,但大多需要利用复杂的信号处理电路对复合信号进行分离与提取,检测成本高且检测系统复杂。本论文针对压力管道内、外壁缺陷快速检测的需求,根据电磁超声/脉冲涡流复合检测原理,研究压力管道深层和表层缺陷同步检测方法。该方法中的复合检测探头能够同步激励和接收电磁超声及脉冲涡流检测信号,并通过简单的信号处理即可分离出用于表征压力管道表层缺陷的脉冲涡流信号,以及用于表征压力管道深层缺陷的电磁超声信号。该方法中的电磁超声测厚误差为1.3%,接近现有复合检测方法的测量精度<sup>[14-15]</sup>;该方法中的脉冲涡流检测表面3 mm深裂纹缺陷时,比利用不同信号处理电路分离出的脉冲涡流缺陷信号峰值差增大了19%。

## 1 电磁超声/脉冲涡流复合检测原理

电磁超声/脉冲涡流复合检测一般由永磁体、线圈和待测工件三部分组成<sup>[14]</sup>,如图1所示,其中永磁体用于提供垂直偏置磁场,线圈用于激励及接收检测信号。在 $t$ 时刻加载瞬态激励电流 $J_s$ 到螺旋型线圈上,由于电磁感应,试件近表面会感应出脉冲涡流 $J_e$ ,脉冲涡流产生的二次磁场在线圈中感应出脉冲涡流信号 $V_e$ ,脉冲涡流信号可表示为<sup>[16-18]</sup>:

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}_t = \mathbf{J}_s - \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}_t}{\partial t} + \nabla \varphi \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_{p,t} = \nabla \times \mathbf{A}_t \quad (2)$$

$$V_e = - \frac{\int \mathbf{B}_{p,t+\Delta t} ds - \int \mathbf{B}_{p,t} ds}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_t$ 为磁矢势, $\mathbf{B}_{p,t}$ 为瞬态磁通密度, $\sigma$ 为电导率, $\mu$ 为磁导率, $\varphi$ 为磁标势。当试件表面存在缺陷

时,试件中脉冲涡流的强度和分布会发生改变,使检测线圈的电压和阻抗发生变化,进而引起脉冲涡流信号变化。

同时,试件近表面的脉冲涡流 $J_e$ 在磁场的作用下产生洛伦兹力 $f_L$ ,即

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为磁通密度,是由 $\mathbf{B}_{p,t}$ 和永磁体提供的垂直偏置磁场叠加形成。洛伦兹力引起试件振动产生超声波,超声波在试件内传播后反射回试件表面,与激励过程相反,检测线圈产生感应电动势。电磁超声检测电压 $V_u$ 可表示为<sup>[16,19-20]</sup>

$$\mathbf{B}_{u,t} = \sigma (\mathbf{v}_t \times \mathbf{B}_m) \quad (5)$$

$$V_u = - \frac{\int \mathbf{B}_{u,t+\Delta t} ds - \int \mathbf{B}_{u,t} ds}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{B}_{u,t}$ 为试件振动产生的瞬态磁通密度, $\mathbf{B}_m$ 为永磁体产生的磁通密度, $\mathbf{v}_t$ 为节点速度矢量。检测线圈中得到的检测电压 $V_t$ 为电磁超声检测信号与脉冲涡流检测信号的复合,即

$$V_t = V_u + V_e \quad (7)$$

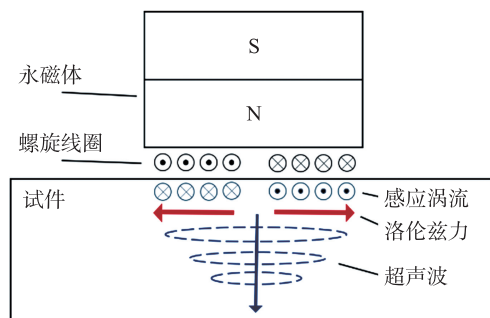


图1 电磁超声/脉冲涡流复合检测原理图

## 2 复合检测有限元模型及仿真

### 2.1 模型建立

使用COMSOL仿真软件,建立图2所示压力管道复合检测二维模型,模型为两个磁场和一个固体力学场的多物理场求解模型,一个磁场用于永磁体的稳态求解,另一个磁场和固体力学场用于螺旋线圈与压力管道的瞬态求解。

复合检测有限元模型的部分参数如表1所示,本文选用剩余磁通密度为1.2 T的永磁体提供垂直偏置磁场;设置螺旋线圈匝数为23匝,线间距为0.3 mm,将螺旋线圈的每根导线简化为点,螺旋线圈的间距即为点的间距;被检测材料选用碳钢,将压力管道的两个端面设置为吸收边界,管道的泊松比为0.3,密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为2.06×10<sup>11</sup> Pa。选用半个周期的正弦电流作为螺旋线圈的激励电流,表达式为

$I = \sin(2\pi ft)$ , 正弦激励电流频率为 2 MHz。本模型中永磁体与空气域采用常规网格划分, 压力管道的最大网格为超声波波长的 1/5, 以提高求解的精确度。

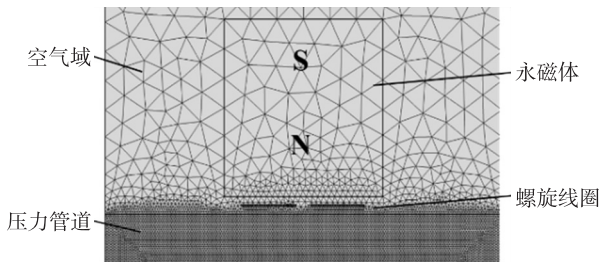


图 2 复合检测模型网格划分

表 1 模型参数

类型	线圈	永磁体	压力管道
宽度/mm	0.2	20	50
高度/mm	0.2	20	14
电导率/(S/m)	$5.7 \times 10^7$	$2.03 \times 10^6$	$4.032 \times 10^6$
提高/mm	1	1	—

## 2.2 仿真与分析

为了探究该复合检测方法中电磁超声与脉冲涡流的信号特征以实现复合信号的分离, 在仿真模型中, 将激励信号以线电流的方式加载到螺旋线圈上, 提取用以表征压力管道底部减薄缺陷的电磁超声信号与表征压力管道表面缺陷的脉冲涡流信号, 经过数值计算得出两种信号耦合之后的复合检测信号, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 脉冲涡流信号的响应时间远小于电磁超声信号, 表现为激励信号结束后的振荡衰减信号, 根据此特征可在复合检测信号中对脉冲涡流信号进行分离。

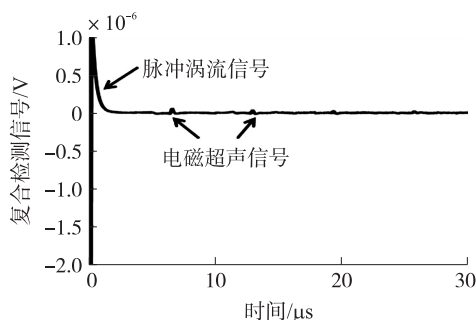
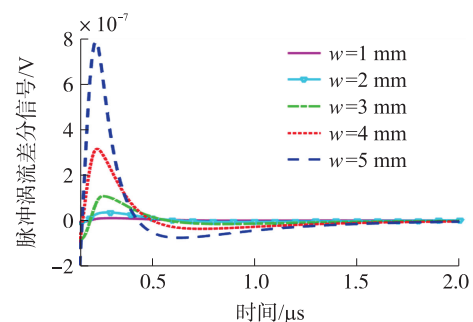


图 3 复合检测信号

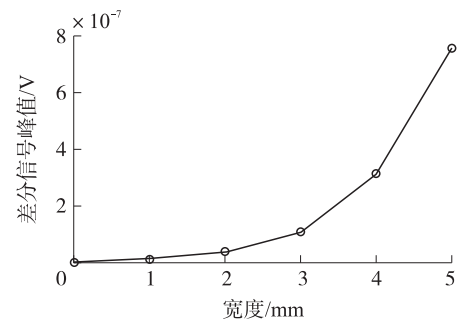
接着, 在探头正下方的压力管道底部与表面分别设置了缺陷, 管道厚度为 14 mm, 底部缺陷是 2 mm 与 4 mm 的减薄缺陷; 表面缺陷是深度  $d$  为 2 mm, 宽度  $w$  以 1 mm 为步长从 1 mm 增加至 5 mm 的裂纹缺陷, 以及  $w$  为 2 mm,  $d$  以 1 mm 为步长从 1 mm 逐步增加至 5 mm 的裂纹缺陷。

提取检测信号中激励信号结束后的衰减时间段

作为脉冲涡流检测信号段, 以压力管道表面无缺陷时的脉冲涡流信号作为参考信号, 对深度 2 mm、宽度变化的各个表面缺陷信号进行差分处理, 从而减小其他因素对检测信号的影响, 得到不同缺陷宽度的脉冲涡流差分信号, 如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知, 随着缺陷宽度增加, 脉冲涡流差分信号幅值增加。为了进一步研究脉冲涡流差分信号随缺陷宽度的变化规律, 提取不同宽度缺陷的脉冲涡流差分信号峰值, 得到图 4(b) 所示的差分信号峰值随表面缺陷宽度变化关系图。由图 4(b) 可知, 随着表面缺陷宽度的增加, 脉冲涡流差分信号峰值增大, 且增加幅度逐渐变大。



(a) 脉冲涡流差分信号



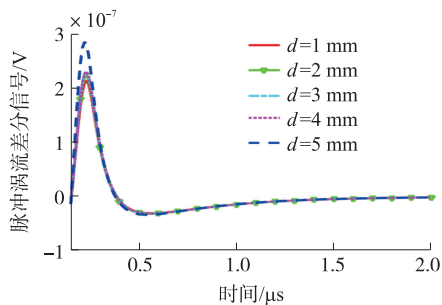
(b) 差分信号峰值随表面缺陷宽度的变化

图 4 不同宽度缺陷的脉冲涡流信号

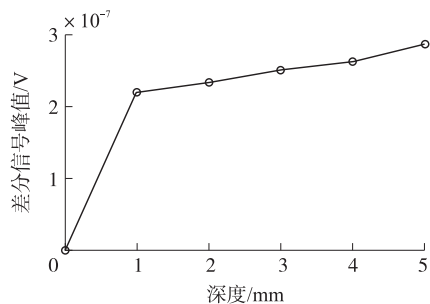
对于宽度为 2 mm、深度变化的表面缺陷, 将其脉冲涡流信号分别与无缺陷信号进行差分, 得到图 5 所示的不同深度缺陷的脉冲涡流信号。从图 5(a) 中可以看出宽度均为 2 mm 的裂纹缺陷, 其深度变化对脉冲涡流差分信号的影响不明显。提取不同深度缺陷的脉冲涡流差分信号峰值, 得到如图 5(b) 所示的差分信号峰值随表面缺陷深度的变化关系。从图 5(b) 中可以看出缺陷深度为 1 mm 和无缺陷处的差分信号峰值差别明显, 但深度由 1 mm 增加到 5 mm 过程中, 差分信号峰值变化较小。产生这种现象的原因是复合探头的激励频率较高, 由于趋肤效应, 涡流渗透深度较浅。

对于厚度减薄为 10 mm 的压力管道, 不同时刻  $t$  的超声波位移分布如图 6 所示, 其中, 图 6(a) 为激

励信号停止后压力管道表面在洛伦兹力作用下产生的超声波位移;图 6(b)显示了超声波沿管道厚度方向传播后到达管道底部的位移分布;图 6(c)为在管道底部发生反射后开始向管道表面方向传播的超声波;图 6(d)显示了超声波再次传播到管道表面,形成检测信号。由图 6 可知,超声波在压力管道传播过程中逐渐衰减,且在管道底部发生反射,检测信号中包含了管道厚度信息。



(a) 脉冲涡流差分信号



(b) 差分信号峰值随表面缺陷深度的变化

图 5 不同深度缺陷的脉冲涡流信号

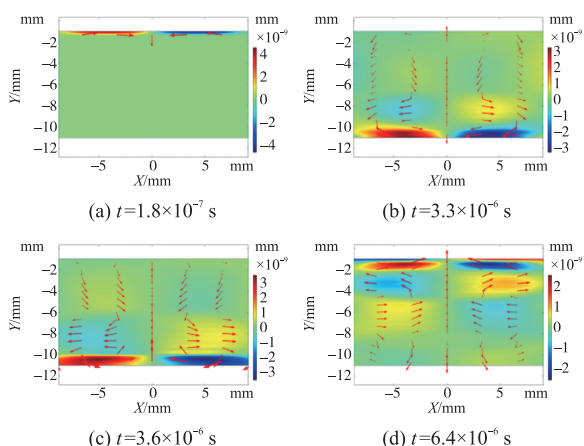


图 6 不同时刻超声波位移云图

将复合检测信号与脉冲涡流信号进行差分即可得到电磁超声检测信号,不同厚度减薄及无缺陷时的超声波多次反射回波如图 7 所示。从图 7 中可以看出厚度为 14 mm 的压力管道在减薄缺陷深度增加过程中,其回波信号逐渐靠近始波信号,且回波信号幅值随着反射次数的增加逐渐衰减,通过提取回波与始波的时间差,并根据超声波在管壁中的传播

速度,可以得到管道底部的减薄缺陷信息,计算结果如表 2 所示。

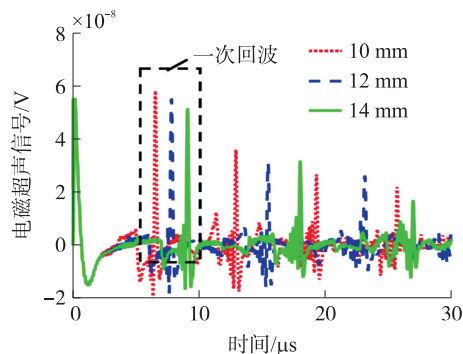


图 7 电磁超声检测信号

表 2 电磁超声检测分析

时间差 / $\mu\text{s}$	波速 / (m/s)	检测值 /mm	实际值 /mm	误差 /%
6.4	3 100	9.9	10.0	1.0
7.6	3 100	11.8	12.0	1.6
9.1	3 100	14.1	14.0	0.7

### 3 压力管道缺陷检测试验

#### 3.1 平板试件试验

为验证本文设计的复合探头检测效果,搭建如图 8 所示的电磁超声/脉冲涡流复合检测系统对具有表面缺陷与底部减薄缺陷的平板试件进行检测。该复合检测系统主要包括具有信号发生器和接收器功能的 RITEC-4000、复合检测探头、示波器、双工器等。其中复合检测探头由永磁体和线圈构成,永磁铁尺寸为 40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 40 mm,剩磁大小为 1.2 T,线圈为 PCB 螺旋线圈,导线直径为 0.2 mm,共 23 匝,线间距为 0.3 mm。复合检测探头的激励信号是频率为 2 MHz 的正弦激励,同时探头对复合检测信号进行接收。

为了对比本论文设计的复合检测方法与利用信号处理电路对检测信号进行分离的复合检测方法的检测效果<sup>[14]</sup>,在实验过程中增加了一个用于接收脉

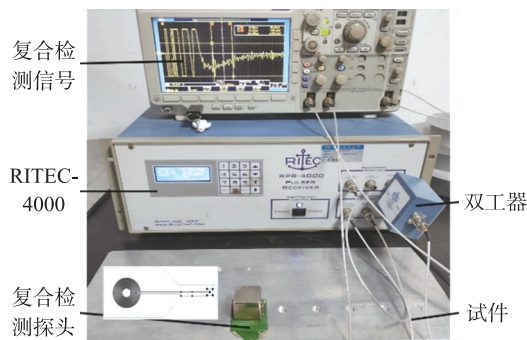


图 8 复合检测试验系统图

冲涡流信号的螺旋线圈,电磁超声信号依然采用线圈自发自收的接收方式。由于电磁超声换能效率较低,需要将初始信号接入具有放大、滤波功能的 RITEC-4000,从而得到分离的电磁超声检测信号;而脉冲涡流信号的幅值较大,需要将初始信号接入分压电路,经过信号衰减后分离出脉冲涡流检测信号。为研究管道弯曲弧度对检测结果的影响,首先制作了图 9 所示的带有表面缺陷铝平板试件与具有底部减薄缺陷的钢平板试件。铝试件板尺寸为 350 mm×180 mm×10 mm,表面缺陷是一组长度为 30 mm,深度为 2.0 mm,宽度以 1.0 mm 为步长从 2.0 mm 逐步增加至 6.0 mm 的缺陷和一组长度为 30 mm,宽度为 4.0 mm,深度以 1.0 mm 为步长从 2.0 mm 逐步增加至 6.0 mm 的缺陷,各个缺陷间距均为 75 mm。底部减薄缺陷为在 17.0 mm 厚的钢板加工了 2.0 mm,5.0 mm,7.0 mm 深度的缺陷,各个缺陷之间的间距为 40 mm。上述各缺陷的加工误差均为±0.1 mm。



图 9 带缺陷的平板试件

采用上述两种复合检测方法分别对带有表面缺陷的铝板试件进行检测。复合检测信号经过 RITEC-4000 放大后,如图 10 所示,根据式(7)可知,检测线圈中得到的检测信号为电磁超声信号和脉冲涡流的复合信号;同时根据仿真结果可知,脉冲涡流信号为激励信号结束后的振荡衰减信号,即可提取检测信号中激励信号结束后的衰减时间段作为脉冲涡流检测信号段。

将分离出的脉冲涡流信号与电路分离出的脉冲涡流信号分别以无缺陷信号作为参考信号,与各个表面缺陷信号进行差分处理,得到图 11 与图 12 所

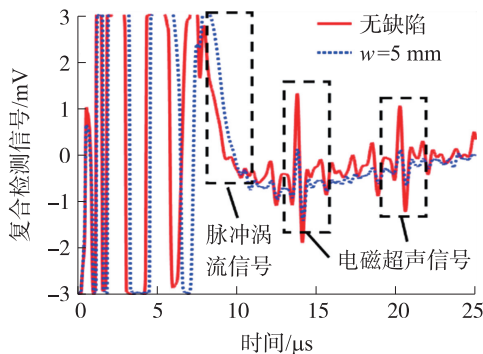
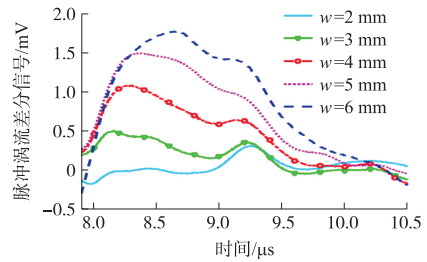
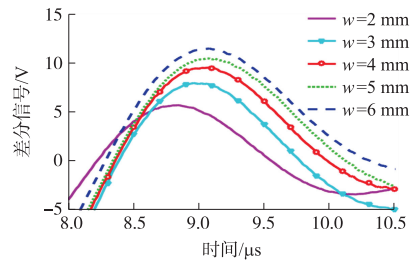


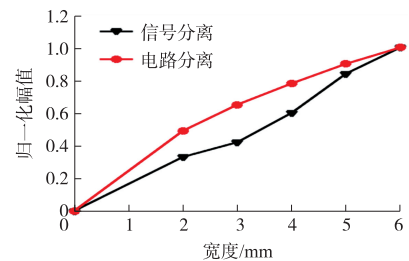
图 10 平板试件复合检测信号



(a) 信号分离的脉冲涡流差分信号

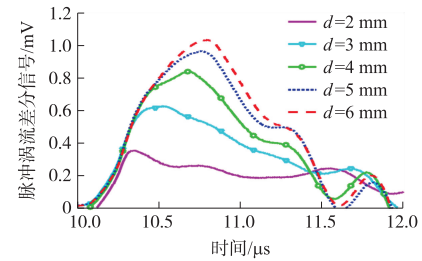


(b) 电路分离的脉冲涡流差分信号

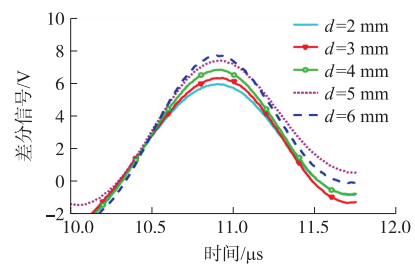


(c) 差分信号峰值随宽度的变化

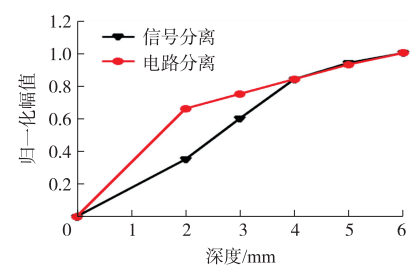
图 11 平板试件不同宽度缺陷脉冲涡流信号



(a) 信号分离的脉冲涡流差分信号



(b) 电路分离的脉冲涡流差分信号



(c) 差分信号峰值随深度的变化

图 12 平板试件不同深度缺陷脉冲涡流信号

示的平板试件脉冲涡流检测信号,其中图 11(c)为图 11(a)与图 11(b)中脉冲涡流差分信号峰值进行归一化处理后的随表面缺陷宽度变化关系图;图 12(c)为图 12(a)与图 12(b)中脉冲涡流差分信号峰值归一化处理后的随表面缺陷深度变化关系图。由图 11(c)可知,随着表面缺陷宽度的增加,两种方法分离出的脉冲涡流差分信号的峰值均增大,但对于小于 3.0 mm 的缺陷宽度,电路分离出的差分信号峰值差更大;当宽度由 3.0 mm 增加到 6.0 mm,复合信号分离出的差分信号峰值差更大。由图 12(c)可知,随着表面缺陷深度的增加,两种方法分离出的脉冲涡流差分信号的峰值也均增大,但对于 2.0 mm 的缺陷深度电路分离出的差分信号峰值差更大;当深度由 2.0 mm 增加到 6.0 mm,复合信号分离出的信号峰值变化更大。

综上所述,平板试件脉冲涡流检测结果与仿真结果一致,验证了本文所提复合检测方法中利用脉冲涡流信号检测表面缺陷的有效性;通过与采用不同信号处理电路分离检测信号的方法对比可知,缺陷宽度与深度在 3.0 mm 至 6.0 mm 范围内,从复合检测信号中分离的脉冲涡流信号对于表面缺陷具有更高的检测灵敏。

对钢平板试件的底部减薄缺陷进行检测,将复合检测信号与脉冲涡流信号进行差分得到电磁超声检测信号,如图 13 所示。从图 13 中可以看出,随着减薄缺陷深度的增加,回波信号逐渐靠近始波信号,与仿真结果一致;另外,由于该电磁超声信号与电路分离的电磁超声信号都是由 RITEC-4000 放大、滤波后所得,缺陷的检测精度基本无变化。通过计算一次回波与二次回波的时间差,并根据超声波在试

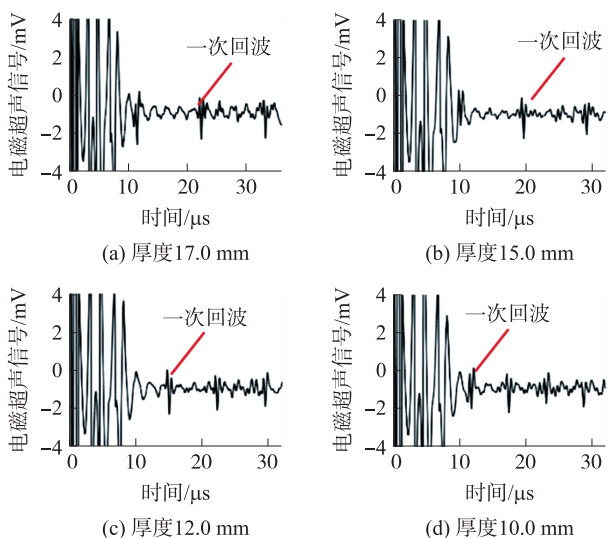


图 13 平板试件电磁超声检测信号

件中的传播速度,可以得出平板试件底部的减薄缺陷信息,具体计算结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,分离出的电磁超声信号最小检测误差为 1.2%,能有效检测出钢平板试件的底部减薄缺陷。

表 3 钢板电磁超声检测分析

时间差 / $\mu\text{s}$	波速 / $(\text{m/s})$	检测值 / $\text{mm}$	实际值 / $\text{mm}$	误差 / $\%$
6.3	3 100	9.8	10.0	2.0
7.6	3 100	11.8	12.0	1.7
9.8	3 100	15.2	15.0	1.3
11.1	3 100	17.2	17.0	1.2

### 3.2 压力管道试验

为测试该方法在实际压力管道中检测的有效性,进一步选用了一截壁厚 10.0 mm,内径 106 mm 的压力管道和一截壁厚 8.0 mm,内径 114 mm 的压力管道进行检测。在壁厚 10.0 mm 的压力管道表面加工了三个长度 15 mm,宽度 1.0 mm,深度分别为 2.0 mm、3.0 mm、5.0 mm 的缺陷,各缺陷的加工误差均为  $\pm 0.1$  mm,被检测的压力管道如图 14 所示。



图 14 被检测的压力管道

试验平台的搭建与前文一致,利用设计的复合探头对压力管道缺陷进行检测,分别将复合检测信号中分离出的脉冲涡流信号与电路分离出的脉冲涡流信号进行差分,得到脉冲涡流差分信号峰值随表面缺陷深度的变化关系,如图 15 所示。由图 15 可知,当缺陷宽度为 1.0 mm,深度在 2.0 mm 至 5.0 mm

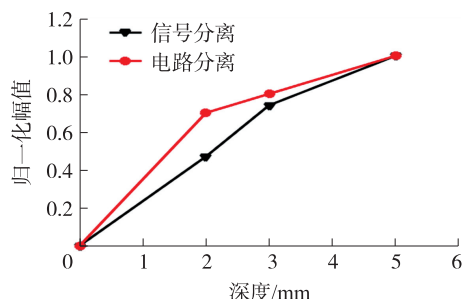


图 15 压力管道脉冲涡流差分信号峰值

范围时,两种方法分离出的脉冲涡流差分信号峰值均随着缺陷深度的增加而增大。但对于深度为 2.0 mm 的缺陷,电路分离出的差分信号峰值变化更大;当深度由 2.0 mm 增加到 5.0 mm 时,复合信号分离出的差分信号峰值差更大,在深度为 3.0 mm 时,峰值差增大了 19%。

同时,得到分离的电磁超声检测信号如图 16 所示,通过计算不同厚度检测信号二次回波与三次回波的时间差,并根据超声波在钢板中的传播速度,可以得出压力管道壁厚分别为 7.9 mm 与 9.8 mm,与游标卡尺测量的壁厚相差约 1.3%。与平板试件相比,压力管道的检测信号幅值略小,这是因为管道表面的弧度对信号造成了一定的干扰,但是检测信号随缺陷深度的变化规律依旧与理论研究相符。综上所述,平板试件与压力管道的试验均验证了本文研究的电磁超声/脉冲涡流复合检测方法能对试件表面不同宽度与深度的缺陷以及底部不同深度的减薄缺陷进行有效检测,并且压力管道的弯曲弧度对检测结果的影响较小。

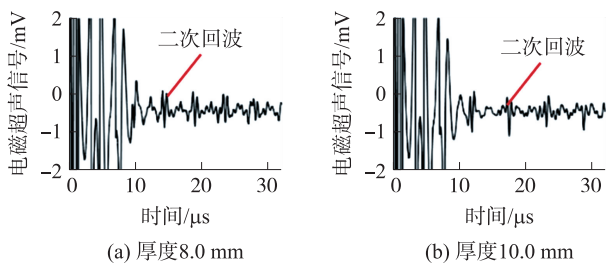


图 16 压力管道电磁超声检测信号

## 4 结论

针对压力管道内、外壁缺陷快速检测的需求,根据电磁超声/脉冲涡流复合检测原理,研究压力管道深层和表层缺陷同步检测方法。利用 COMSOL 仿真软件建立了电磁超声/脉冲涡流复合检测模型,探究了该复合检测方法中电磁超声与脉冲涡流信号的分离方法;通过对平板试件和压力管道试件的缺陷对比测试,验证了该复合检测方法的可行性,并证明了本文选取的压力管道试件的弯曲弧度对测试结果影响较小。试验结果表明,该复合检测方法能够有效识别压力管道外表面宽 1.0 mm、深 2.0 mm 裂纹缺陷和内表面 2.0 mm 厚度减薄缺陷,其中电磁超声测厚误差可小至 1.3%,脉冲涡流检测表面 3 mm 深裂纹缺陷时,比利用不同信号处理电路分离出的脉冲涡流缺陷信号峰值差增大了 19%。该复合检测方法消除了两种技术单独使用时存在检测盲区的问题,且具有较高检测精度,在压力管道内外部缺陷的

同步快速检测中具有较大的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 赵红标. 压力管道检验报告监督抽查问题分析[J]. 特种设备安全技术, 2021(4): 28-29, 38.
- [2] 韦永金, 吴文林, 秦硕, 等. 压力管道全面检验与内检测规范内容分析[J]. 特种设备安全技术, 2021(1): 19-21, 27.
- [3] 杜鑫, 惠虎. 微小试样取样法在含腐蚀坑缺陷压力管道合于使用评价中的工程应用[J]. 压力容器, 2018, 35(11): 61-67.
- [4] 沈功田. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 1-12.
- [5] 陈庆, 刘书麟, 程学晶, 等. 压力管道用柔性石墨不锈钢齿复合垫片压缩-回弹性能优化试验研究[J]. 压力容器, 2016, 33(11): 20-23.
- [6] 段伟亮. 铝合金厚板电磁超声缺陷检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [7] Nardo R M, Cerniglia D, Lombardo P, et al. Detection, Characterization and Sizing of Hydrogen Induced Cracking in Pressure Vessels Using Phased Array Ultrasonic Data Processing[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2(6): 581-588.
- [8] 涂君, 蔡卓越, 张旭, 等. 钢轨电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 42-48.
- [9] 郭鹏, 徐鸿, 田振华, 等. 电磁超声换能器优化设计与板状结构损伤成像应用研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(11): 1758-1765.
- [10] 刘冉, 武新军. 基于洛伦兹力机理的电磁超声周向导波传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 94-96, 100.
- [11] 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.
- [12] 陈涛, 曹恒, 张赛, 等. 涡流检测在铝板超声缺陷检测盲区中的应用研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 13-16.
- [13] 刘素贞, 孟学艳, 张闯, 等. 金属材料缺陷的电磁超声/涡流复合检测技术研究[J]. 声学技术, 2018, 37(1): 43-50.
- [14] 孙崢. 基于电磁超声与脉冲涡流的管道内检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [15] 郭伟. 一种基于 EMAT 与 PECT 机理层复合的无损检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [16] Xie S J, Tian M M, Xiao P, et al. A Hybrid Nondestructive Testing Method of Pulsed Eddy Current Testing and Electromagnetic Acoustic Transducer Techniques for Simultaneous Surface and Volumetric Defects Inspection [J].

- NDT & E International, 2017, 86(3): 153-163.
- [17] Urayama R, Uchimoto T, Takagi T. Application of EMAT/EC Dual Probe to Monitoring of Wall Thinning in High Temperature Environment[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3-4): 1317-1327.
- [18] Tian S X, Chen Z M, Ueda M, et al. Signal Processing Schemes for Eddy Current Testing of Steam Generator Tubes of Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 245(4): 78-88.
- [19] Xie S J, Chen Z M, Takagi T, et al. Quantitative Non-Destructive Evaluation of Wall Thinning Defect in Double-Layer Pipe of Nuclear Power Plants Using Pulsed ECT Method[J]. NDT & E International, 2015, 75(10): 87-95.
- [20] Liu Z H, Zhao X, Pei N, et al. Numerical Decoupling Study of EMAT Testing Signal for Ferromagnetic Materials[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3476-3486.



陈涛(1986—),男,河南固始人,博士,副教授,硕士生导师。主要研究领域为传感器与仪器仪表、无损检测新技术及自动化检测装备,chentao@hnu.edu.cn;



何倩(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为无损检测新技术及应用,1960345633@qq.com。