

超声导波电磁声换能器的研究进展

刘增华, 谢穆文, 钟栩文, 龚 裕, 何存富, 吴 斌
(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 超声导波具有检测范围大、检测效率高等优点, 广泛应用于板、管等典型波导结构的缺陷检测。作为超声导波换能器类型之一, 电磁声换能器(electromagnetic acoustic transducer ,EMAT) 得到广泛关注和快速发展。综述了近 20 年来超声导波电磁声换能器的研究进展。主要包括: 针对板和管结构超声导波检测的单模态 EMAT 结构设计; 用于提高激励导波的能量和模态单一性的 EMAT 线圈与磁体结构参数的优化, 针对非金属材料检测的新型贴片式 EMAT 的结构设计; 阵列技术在 EMAT 性能优化上的应用和在缺陷定位和成像上的应用。

关键词: 电磁声换能器; 超声导波; 结构设计; 阵列技术

中图分类号: TB 552

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2017) 02 - 0192 - 11

doi: 10. 11936/bjtxb2016080062

Research Progress of Electromagnetic Acoustic Transducers for Ultrasonic Guided Waves Inspection

LIU Zenghua , XIE Muwen , ZHONG Xuwen , GONG Yu , HE Cunfu , WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China)

Abstract: Ultrasonic guided waves have been widely applied to the defect inspection of typical waveguide structures including plates and pipes because of their large area inspection capability and high efficiency. As one type of the transducer for ultrasonic guided waves inspection , electromagnetic acoustic transducers (EMAT) attracted wide attention and got rapid development. In this paper , the research progress of EMAT for ultrasonic guided waves inspection in the past twenty years was reviewed. Main contents include the following aspects: the structural design of the single-mode EMAT used in the ultrasonic guided waves inspection of plate-like and pipe structures; the configuration parameters optimization design of coil and magnet for improving the energy and the purity of guided wave modes , the configuration design of new type patch EMAT for non-metallic materials; and the application of array technique on the EMAT performance optimization and defect localization and imaging.

Key words: electromagnetic acoustic transducer; ultrasonic guided waves; structural design; array technique

超声导波检测技术是一种新兴的无损检测和结构健康监测方法。超声导波在波导结构中传播时,

声场受波导界面的制导遍布结构的整个截面, 同时对结构内外表面的缺陷进行检测。因此, 超声导

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11527801 , 51475012 , 11272021); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201304048)

作者简介: 刘增华(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超声无损检测新技术、结构健康监测及传感器测试技术方面的研究, E-mail: liuzenghua@bjut.edu.cn

波摆脱了常规检测需逐点扫查的局限,非常适合对板、管、杆等典型波导结构进行长距离、大范围的全面检测。目前,超声导波检测常用的换能器主要包括压电式、电磁声式、脉冲激光式等。其中,电磁声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)作为一种新型的超声发射接收装置,基于电磁耦合方式直接在受检件内部形成超声声源,因此,检测时无须对被测试样表面进行预处理和涂抹声耦合剂。同时,EMAT能够方便、灵活地激发多种类型的超声导波,如Lamb波、SH波和表面波等。由于非接触性、高效性、设计灵活性等特点,EMAT在超声导波检测领域中具有广阔的应用前景^[1-6]。

与应用最为广泛的压电换能器相比,通常EMAT存在一些不足,如:换能效率较低;辐射模式较宽,能量不集中;只能检测导电材料或者铁磁性材料。然而,近年来,随着EMAT技术的不断发展,这些不足也得到了有效的弥补和改善。

本文综述了近20年来超声导波EMAT的研究进展。主要集中于以下几个方面:用于板和管结构检测的超声导波EMAT结构设计、EMAT结构参数设计优化、磁致伸缩贴片式EMAT的研制、阵列技术在EMAT性能优化及缺陷定位成像方面的应用。

1 基本原理

1.1 典型结构中的超声导波

超声波在波导结构如板和管中传播时,由于介质性质的不连续性产生1次或多次反射或透射而发生复杂的波型转换,不同类型的反射波、折射波和透射波相互耦合,产生一种沿着整个波导结构传播的特殊超声波,即为超声导波^[7]。

超声导波在板结构中主要有2种类型:SH波和Lamb波,其中Lamb波存在对称模式和反对称模式2种模态。图1(a)为SH波和Lamb波在1 mm厚铝板中的群速度频散曲线。而当超声导波在管道中传播时,共有3种模态:轴对称扭转模态 $T(0, m)$ 、轴对称纵向模态 $L(0, m)$ 以及非轴对称弯曲模态 $F(n, m)$ 。其中 n 为周向阶数,表示导波绕管壁螺旋式传播的形态; m 为模数,表示导波在管道厚度方向上的振动形态。管中轴对称超声导波模态应用最为广泛。图1(b)为轴对称超声导波模态在内径50 mm、壁厚10 mm钢管中的群速度频散曲线。

超声导波在板、管道等有界介质中传播时,受介质结构尺寸的影响,使得波速依赖于波的频率,频率不同,波速也随之改变,即为超声导波的频散。在特

定频率下,有多个模态同时存在,即为超声导波的多模态现象。从图1中的板和管中超声导波群速度频散曲线中均可以明显地看到超声导波的频散和多模态特性。实际检测时,通常在模态较少的低频段选择非频散或者低频散的模态进行检测^[8]。不同模态导波具有不同的波结构,对不同类型缺陷的灵敏程度也不尽相同。因此,在利用EMAT作为换能器进行超声导波检测时,需要充分考虑检测需求和所激励模态的特性、工作频率,研制专门的EMAT,激励接收所选取的模态,达到检测目的。也正是由于超声导波复杂的频散和多模态特性,使得EMAT在进行超声导波检测时,专用性强,不具有通用性,给EMAT的研制带来了一定的困难,另一方面也使得超声导波EMAT的研究更加丰富和深入。

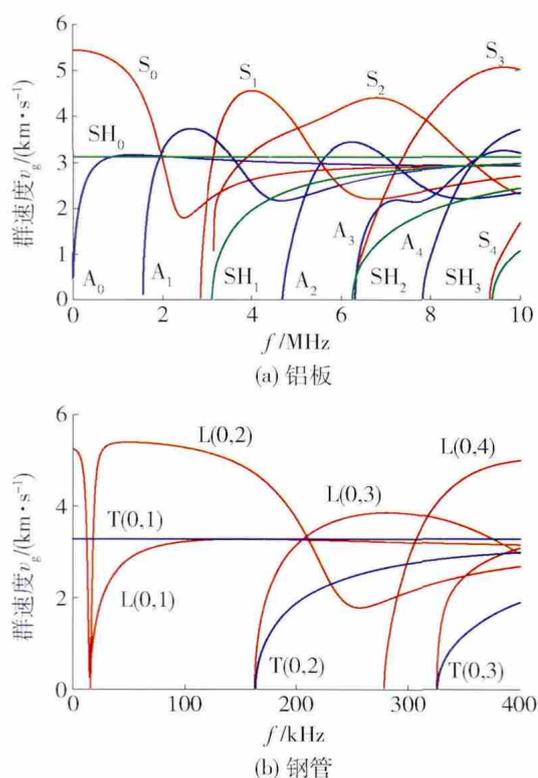


图1 超声导波群速度频散曲线

Fig. 1 Group velocity dispersion curves of ultrasonic guided waves

1.2 EMAT 工作机理

EMAT有洛伦兹力、磁致伸缩力以及磁性力3种换能机理。在铁磁性材料中,这3种换能机理同时存在。其中,磁性力存在于非均匀磁场中,由磁化强度和磁场强度的梯度的点积所决定。在一般情况下,磁性力远远小于洛伦兹力和磁致伸缩力。因此,目前主要集中于基于洛伦兹力和磁致伸缩力2种换能机理的EMAT的设计与研究。EMAT主要由3部

分构成: 载有高频信号的线圈, 提供偏置静磁场的磁体以及产生和传播超声导波的被测试件。被测试件本身作为换能器的一部分, 是 EMAT 和其他类型换能器的重要区别, 也是 EMAT 不需要声耦合的原因。

基于洛伦兹力机理的 EMAT 在工作过程中, 载流线圈中通有的高频电流 J 会在换能器周围产生一个与发射电流频率一致的交变磁场, 并进而在导体表面集肤深度内感生出与线圈电流方向相反、频率相同的感应涡流 J_e , 如图 2(a) 所示。磁体产生一个偏置静磁场 B_s , 交变的感应涡流在磁场的作用下产生洛伦兹力 F_L , 力的方向由左手定则判断。在洛伦兹力作用下, 试件产生周期性的振动。当这种振动以波的形式沿试件传播时, 就完成了电磁超声波的发射过程。在 EMAT 接收过程中, 当超声波行进到换能器下方时, 质点振动会切割 EMAT 中产生的静磁场, 在试件内引发感应电动势和感应电流, 进而在换能器附近产生感应磁场; 接收线圈处于变化的磁场中时会在圈内感生出电压, 通过检测分析该电压就可获得由激励处传播过来的超声波所携带的信息。

磁致伸缩式 EMAT 是利用材料的磁致伸缩效应及其逆效应完成超声波的激励和接收过程。图 2(b) 为磁致伸缩机理 EMAT 的工作原理示意图。载流导体中通入高频电流 J , 电流会在铁磁性试件中产生一个与发射电流频率一致的交变磁场 B_d , EMAT 中的磁体提供偏置磁场 B_s , 铁磁性材料在动静态磁场的作用下由于磁致伸缩效应, 发生周期变形, 从而形成材料内部的振动, 并最终通过超声波的形式向外传播。EMAT 接收过程中, 当导波传播到换能器下方时导致结构变形, 根据逆磁致伸缩效应, 铁磁性材料中的磁场产生变化, 并进而导致换能器附近的磁场发生变化, 接收线圈处于变化的磁场中时会在圈内感生出电压, 对该电压进行分析可获得接收信号所包含的信息。

一般情况下, 用于一般弱铁磁性金属材料的磁致伸缩型 EMAT 的换能效率低于洛伦兹力型 EMAT 的换能效率, 然而对于高铁磁性材料的检测, 磁致伸缩型 EMAT 的换能效率更高^[9]。因此, 在磁致伸缩型 EMAT 的设计中, 采用镍带、铁钴合金带等高铁磁性薄片作为磁致伸缩力传递的媒介, 黏结或者固定在待测结构表面构成一种新型的磁致伸缩贴片换能器 (magnetostrictive patch transducer, MPT)。图 2(c) 为 MPT 的工作原理示意图。当 MPT 工作时, 磁

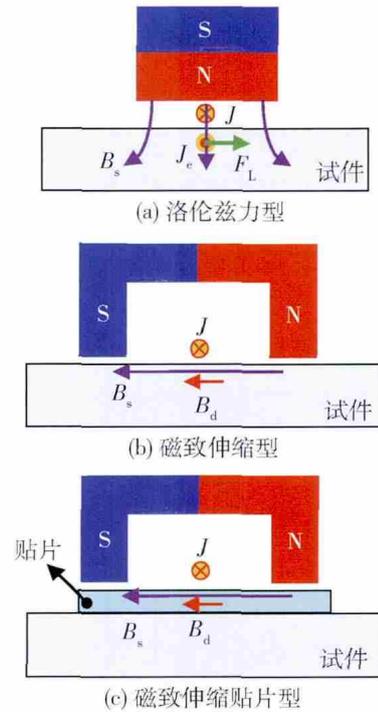


图 2 EMAT 的工作机理

Fig. 2 Working mechanisms of EMATs

致伸缩贴片基于磁致伸缩效应产生变形并通过机械耦合将变形传递到被测试件中, 当变形以波的形式向外传播即完成了 MPT 的激励过程。当被测试件的变形被耦合到磁致伸缩接收贴片中, 基于磁致伸缩逆效应, 产生变化的动磁场, 并在接收线圈中感应出电压, 即完成了 MPT 的接收过程。MPT 的使用, 不仅可以实现非铁磁性非金属材料的电磁超声检测, 而且还具有较高的换能效率, 提高了 EMAT 的检测能力和范围, 并可用于结构健康监测领域。

2 用于典型波导检测的 EMAT

2.1 EMAT 的结构设计

EMAT 具有非常好的可设计性, 通过改变线圈形状或者静磁场的配置形式, 即可激发出不同类型的导波模式。常用的线圈结构形式多样, 主要有回折线圈、螺旋线圈、跑道线圈等, 线圈的制作工艺包括排线、薄膜、导线、印刷电路等^[10]。出于结构紧凑考虑, 常用的磁体多为永磁铁。通过对永磁铁结构以及充磁方向的设计, 使其产生与线圈方向垂直、平行磁场或其他特殊形式的磁场。相同的线圈和静磁场配置在不同的检测对象中可激励出不同模式的超声导波, 不同的换能器结构也可以激发出相同的超声导波模式。随着加工工艺的不断提高, 可以设计制作出布线复杂甚至阵列形式的柔性印刷线圈, 层

数可以是单层、双层乃至多层. 质量轻、尺寸小的强磁场永磁体如钕铁硼磁铁和柔性印刷线圈的应用, 不仅使 EMAT 结构更加紧凑, 而且大大提高了 EMAT 的换能效率.

2. 1. 1 板结构中的 EMAT

板结构中的 EMAT 按照换能器产生的声场分布形式, 可分为指向型和全向型 2 种. 指向型 EMAT 在实际应用中, 必须根据分辨率指标、检测区域大小以及换能器的运动速度来选择合适的指向角. 指向角过大则会因能量分散而降低分辨率, 过小则会缩小换能器的检测区域并限制换能器的检测速度. 全向型 EMAT 多应用于缺陷成像中, 利用 EMAT 阵列并结合成像算法实现缺陷的定位. 阵列单元选择全向型 EMAT 的检测效果一般会优于有一定指向性或窄带宽的 EMAT. 目前, 多采用 EMAT 激励最低阶 Lamb 波和 SH 波, 包括 A_0 、 S_0 和 SH_0 模态, 对板结构进行检测和成像.

1) A_0 模态 EMAT 低频段 A_0 模态主要以离面位移为主, 使用磁致伸缩效应难以产生垂直于板表面的磁致伸缩力, 因此, 目前研制的 A_0 模态 EMAT 都是基于洛伦兹力机理. Guo 等^[11] 利用回折线圈和提供垂直磁场的永磁铁, 在铝板中激励出具有指向性的单一 A_0 模态, 并实现了铝板中的凹槽缺陷的检测. Huang 等^[12] 采用了圆形回折线圈 (contra-flexure coil, CFC) 和柱状磁铁, 在铝板中实现全向性 A_0 模态的激励和接收, 换能器结构见图 3 (a), 并结合换能器阵列和层析成像技术, 实现了铝板中腐蚀缺陷的检测. Nagy 等^[13] 利用螺旋线圈和远小于线圈直径的柱状磁铁, 基于泊松效应通过控制入射角, 在薄板中激励出全向性 A_0 模态, 换能器结构见图 3 (b). 回折线圈 EMAT 的线圈中相邻 2 根导线的间距往往

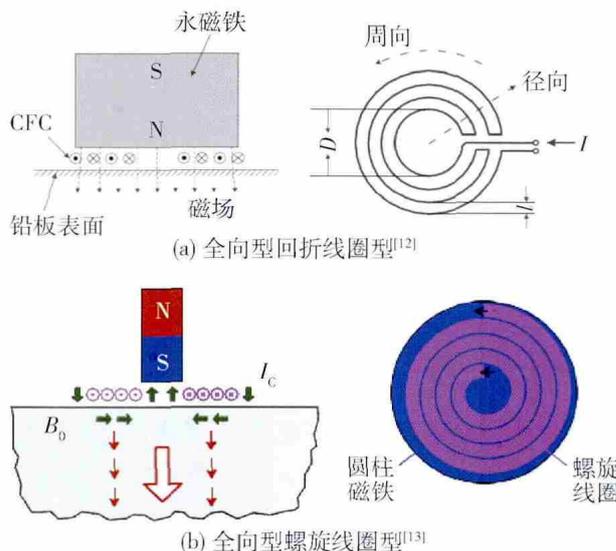


图 3 A_0 模态 EMATs

Fig. 3 A_0 mode EMATs

就是所激励导波模态的半波长.

2) S_0 模态 EMAT 目前, 全向型 S_0 模态 EMAT 得到了较多的关注与研究. Wilcox 等^[14] 建立了板中全向型 EMAT 理论模型, 利用环状紧凑缠绕的螺旋线圈 (close-winding spiral coil, CWSC) 基于洛伦兹力机理, 设计制作出可以有效地激励出在 360° 方向范围内具有相同的指向性的 S_0 模态 EMAT, 见图 4 (a). 该换能器无法实现单一模态的激励, Lee 等^[15] 设计了双环状螺旋线圈全向型 S_0 模态 EMAT. 该换能器使用 2 个绕线方式相反的串联的盘状线圈作为波长滤波器, 抑制了 A_0 模态的产生. Lee 等^[16] 也设计了全向型 S_0 模态 MPT. 该全向型 MPT 利用环状 CWSC 线圈产生径向动磁场, 利用圆柱磁铁提供径向辐射的偏置静磁场, 基于镍片的磁致伸缩效应, 在非铁磁性铝板中激励纯净的全向性 S_0 模态,

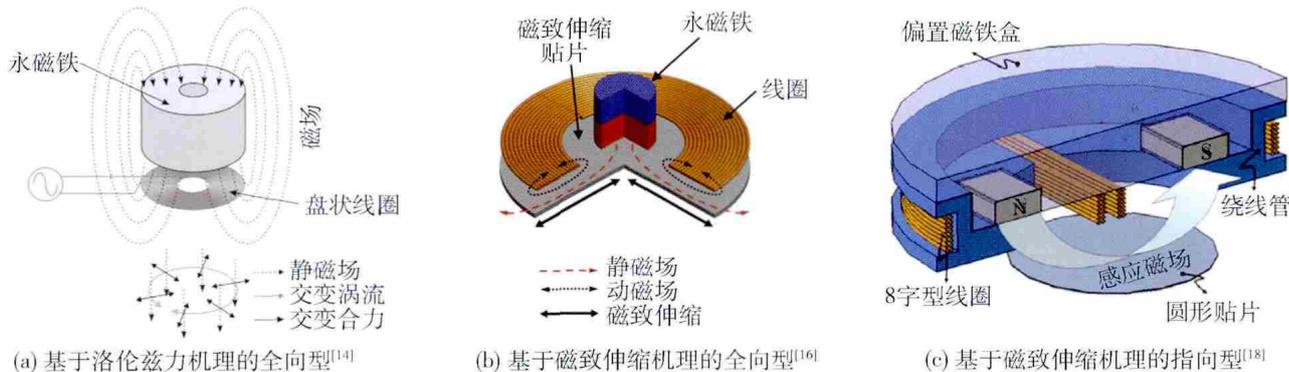


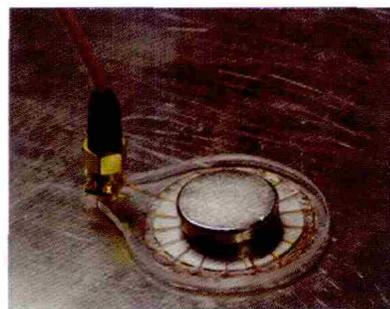
图 4 S_0 模态 EMATs

Fig. 4 S_0 mode EMATs

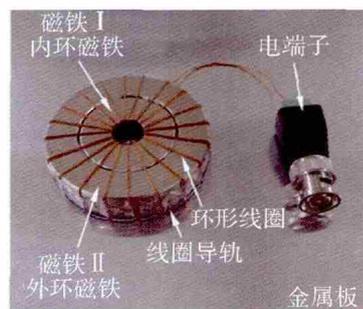
换能器模型见图4(b)^[16]. 为了提高全向型MPT的换能效率, Kim等^[17]利用在圆形镍片径向刻槽的方法提高试件表面的静磁场强度, 并指出随着刻槽数的增多, 换能器的全向性也得到提高. Ju等^[18]设计了一种指向型MPT, 利用8字型线圈和一对永磁铁, 在贴有镍片的铝板上基于磁致伸缩效应产生 S_0 模态. 结构见图4(c). 通过实验和理论对该指向型MPT产生的Lamb波的辐射特性进行分析, 表明激励和接收线圈中动静磁场的方向互相倾斜在 70° 附近时, 激励出的 S_0 模态能量最大.

3) SH_0 模态 EMAT SH_0 模态 EMAT的设计始于指向型. Vasile等^[19]设计了指向型 EMAT, 采用周期永磁铁(periodic permanent magnet, PPM) 和缠绕在磁铁轴向上的线圈. 基于洛伦兹力机理, 在铝板中激励出指向性 SH_0 模态. 这种 PPM 型 EMAT 中相邻两磁铁的间距往往就是所激励导波模式的半波长. Thompson^[20]利用回折线圈和水平磁场, 基于磁致伸缩效应机理在铁磁性材料中也产生了指向性 SH_0 模态. Cho等^[21]设计了指向型 SH_0 模态 MPT 换能器结构与 S_0 模态 MPT 类似, 一对永磁铁提供与8字型线圈产生动磁场方向垂直的静磁场, 在粘有圆形磁致伸缩贴片的铝板上激励出 SH_0 模态. 该团队还研究了激励和接收线圈中磁场方向对产生的模态类型的影响以及磁致伸缩贴片尺寸和激励频率与信号幅值的作用规律. 在上述研究基础上, Lee等^[22]采用平面螺线管阵列(planar solenoid array, PSA) 线圈代替8字型线圈, 在铝板中有效激励出具有较高能量的 SH_0 模态. 该换能器与回折线圈式换能器类似, 相邻螺线管的绕线方向相反, 从而在试件中产生相位相差 180° 的质点振动. 该 PSA 型 SH 模态 MPT 同时具有较好的指向性和能量强度高的特性. 在全向型 SH_0 模态 EMAT 的研制方面, Seung等^[23]设计了一种全向型 MPT, 该换能器通过在圆形底板径向上缠绕线圈, 载流线圈产生环形动磁场, 圆柱磁铁提供径向辐射的偏置静磁场, 以环形镍片作为磁致伸缩力传递媒介, 实现了铝板中全向性 SH_0 模态的激励. 换能器结构见图5(a). 为了提高换能器的换能效率, Seung等^[24]通过实验和仿真的方法研究了磁铁与线圈之间的距离对 SH_0 模态单一性的影响, 结果发现, 适当增加提离距离将会减少伴随产生的 S_0 模态, 提高激励模态的单一性. Seung等^[25]设计的基于洛伦兹力机理的全向型 SH_0 模态 EMAT 如图5(b)所示, 在同轴的环形磁铁对上缠绕线圈, 载流线圈产生径向分布的感应涡流, 环形磁铁对提供在径

向方向相反的偏置静磁场, 在金属板中激励出全向性的 SH_0 模态.



(a) 磁致伸缩型^[23]



(b) 洛伦兹力型^[25]

图5 SH_0 模态 EMATs

Fig. 5 SH_0 mode EMATs

2.1.2 管道中的 EMAT

针对管道轴向位置缺陷的检测, 使用最多的是扭转模态和纵向模态, 如扭转模态 $T(0, 1)$ 和纵向模态 $L(0, 2)$. $T(0, 1)$ 模态的传播速度恒定, 不随频率的变化而变化, 即非频散, 在传播过程中波形不会发生畸变, 有利于缺陷的检测和定位. $L(0, 2)$ 模态在较低的频率段下传播速度最快, 能比其他模态更快地到达接收装置, 因此更易于在时域内与其他模态进行区分, 并且 $L(0, 2)$ 模态离面位移相对较小, 能量泄漏也相应地较小, 传播距离相对较长, 在对管道长距离检测具有一定优势^[26].

在管道检测中, $L(0, 2)$ 模态 EMAT 多基于磁致伸缩效应机理. Kwun等^[27]提出了一种用于管道周向裂纹检测的磁致伸缩 EMAT, 该换能器可以激励出沿管道轴向传播的纵向模态导波. 其结构如图6(a)所示, 在铁磁性管道上缠绕一定宽度(单簇)的多匝线圈作为激励线圈, 磁铁提供沿管道轴向的偏置静磁场, 当激励线圈中通入高频电流时, 在管道中激励出纵向模态. 该 EMAT 结构简单、便于使用, 但难以通过理论确定最优工作频率, 因此无法进行 EMAT 的优化设计. 为了解决这一问题, Hao等^[28-29]提出了多簇线圈代替 Kwun 设计的单簇激励

接收线圈,如图 6(b) 所示. 该线圈可以通过改变相邻多簇线圈的距离控制换能器的最佳工作频率,提高了信号能量以及信噪比. Liu 等^[30] 提出一种新型的 MPT 阵列,其结构如图 7 所示,永磁铁阵列在镍带上产生均匀的轴向静磁场,利用多分裂回折线圈 (multi-splitting meander coil, MSMC) 在镍带上感应出周向分布的涡流. 该换能器在管道中激励接收单一的 $L(0,2)$ 模式,并实现了缺陷定位. 与传统的回折线圈 $L(0,2)$ 模式 MPT 相比,多分裂回折线圈式 MPT 提高了信号能量.

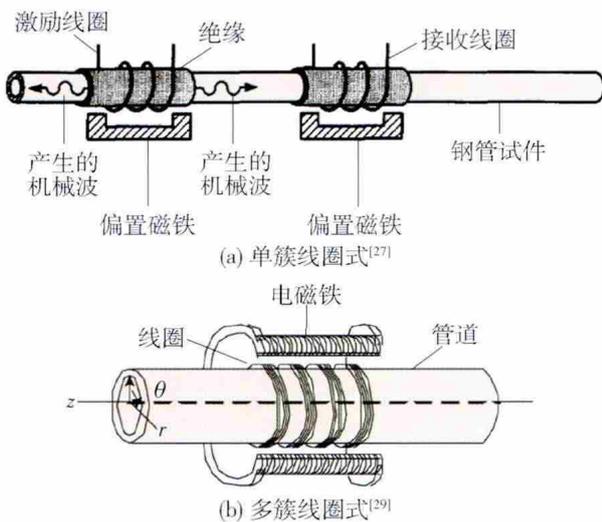


图 6 纵向模式磁致伸缩 EMAT

Fig. 6 Longitudinal mode magnetostrictive EMAT

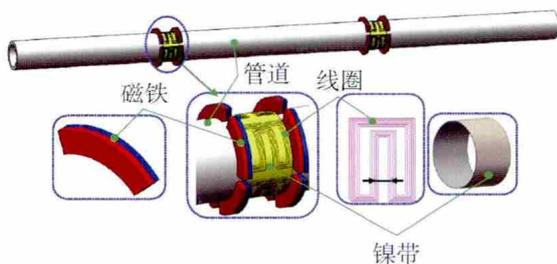


图 7 纵向模式磁致伸缩 EMAT 阵列的结构^[30]

Fig. 7 Configuration of longitudinal mode magnetostrictive EMAT array

管中扭转模式以剪切变形为主,根据磁致伸缩原理,剪切变形由铁磁性材料在互相垂直的动静磁场的作用下产生. Kwun 等^[31] 设计的扭转模式 MPT 采用提供周向静磁场的磁化镍带和提供轴向动磁场的线圈在管道中激励出扭转模式. Kim 等^[32] 通过沿与管道轴向成 45° 方向贴的条形磁致伸缩贴片,用电磁铁替代预磁化过程,给磁致伸缩贴片提供静磁场,在管道中激励出扭转模式. 为了提高该 MPT

激励信号的能量, Park 等^[33] 在条形贴片两端加 V 型磁轭,大大提高了贴片中的磁通量密度;为了解决 V 型磁轭在导波中引入杂波问题, Park 等^[34] 提出使用 Z 型贴片的 MPT,该换能器在保证信号强度的情况下,显著提高了信噪比. 通过理论分析, Velichko 等^[35] 证明了板中最低阶水平剪切 SH_0 模式和管中最低阶扭转模式 $T(0,1)$ 的相似性. 利用板中激励 SH_0 模式 EMAT 的结构可以在管中激励出 $T(0,1)$ 模式. Cho 等^[36] 基于回折线圈 SH_0 模式 MPT 设计了 $T(0,1)$ 换能器,由提供周向静磁场的一对永磁铁和同时粘贴在管道表面的磁致伸缩贴片以及柔性回折线圈组成. 该换能器可以在管中激励出兆赫兹的扭转模式. Liu 等^[37] 提出了使用改进的平面螺旋线圈阵列,设计了一种在管道中激励和接收单一扭转模式的 MPT 阵列,如图 8 所示,与回折线圈型 MPT 阵列相比,该换能器大大提高了扭转模式的能量. 何存富等^[38] 基于板中洛伦兹力型 PPM-EMAT,通过设计磁铁的几何形状以及跑道线圈的阵列形式,研制出能在管中激励接收 $T(0,1)$ 模式的 EMAT.

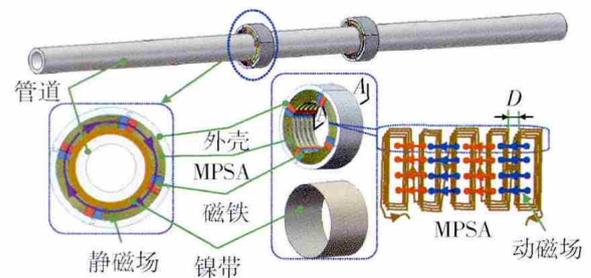


图 8 扭转模式磁致伸缩换能器阵列结构^[37]

Fig. 8 Configuration of torsional mode MPT array

2.2 EMAT 的优化设计

为提高 EMAT 的换能效率,国内外学者在 EMAT 的优化设计方面做了大量研究工作. 试件内超声导波的激励源来自于 EMAT 产生的洛伦兹力或者磁致伸缩力. 其中,洛伦兹力与磁场强度和感应涡流成正比;磁致伸缩力与试件在偏置静磁场下的磁致伸缩系数和动磁场强度有关. 对于这 2 种换能机理,力的大小都与动静磁场以及试件本身的属性有关. 因此,为提高换能效率,需要对提供动静磁场的磁体和线圈结构参数进行优化;也需要选择在试样中产生导波的方式,即利用高铁磁性薄片或高导电薄片贴在被测试件表面,构成贴片式 EMAT.

1) 磁体和线圈的优化设计 Murayama^[39] 基于磁致伸缩效应机理研究了回折线圈和磁铁对产生的

动静磁场成 0° 和 90° 方向布置的 S_0 和 SH_0 模态 EMAT 信号强度与磁铁强度间的依赖关系,优化了系统效率. Mirkhani 等^[40]研究了基于洛伦兹力机理 EMAT 线圈与磁铁的关系,通过仿真发现,磁铁宽约为跑道线圈宽度的 1.2 倍时,EMAT 激发超声信号的幅值增长了 10%. 进一步增加磁极面积,超声信号幅值不会明显增强,该结论为磁铁最佳尺寸的选取提供了依据. Dhayalan 等^[41]采用软磁合金薄带作为 EMAT 磁流集中器(magnetic flux concentrator, MFC),通过实验和仿真验证了 MFC 的使用能有效提高换能器接收信号的幅值. 翟国富等^[42]通过解析方法分析发现,当圆柱磁铁的直径是螺旋线圈的 1.5~2.0 倍,厚度与直径相等时,换能器换效率较高. Kim 等^[43]利用 2 种线圈分别提供强度可调的周向静磁场和轴向动磁场. 通过调整输入动磁场线圈的电流大小可以控制铁磁性贴片上的磁通量方向. 该换能器与预磁化换能器相比,提高了回波能量、信噪比以及对缺陷的敏感度. 考虑到安全生产和换能器磨损,一般要求 EMAT 与试件间保持一定的间隙,即提离距离. 试件尺寸的分散性、表面粗糙度等因素均可造成提离距离的波动,并进而改变空间电磁场分布和线圈的电参数(如互感、发射电流等),直接影响测量精度和稳定性. 因此,必须降低换能器对提离距离的敏感度. Jian 等^[44]认为较小的线圈受提离效应影响更为显著,均匀静磁场范围越大,提离效应对 EMAT 的影响就越小. Huang 等^[45]针对基于磁致伸缩效应机理的回折线圈 EMAT 在钢板中检测,分析了不同提离距离对超声幅值的影响,指出为了保证提离效应对信号幅值影响最小,EMAT 的最佳提离距离应为 2 mm.

2) 贴片式 EMAT 的设计 李固等^[46]通过仿真分析发现待测试样的电导率越高,试样表面形成的涡流密度越大. 因此,在对某种低电导率试件进行电磁超声检测时,可以在其表面贴一层高电导率材料作为媒介,提高检测效率. 因为 EMAT 检测对象的材料属性必须为导电材料甚至磁致伸缩材料,限制了其在非金属材料领域的应用. 为了扩大 EMAT 的应用范围,需要在非金属试件表面粘贴产生洛伦兹力或磁致伸缩力的结构. 目前多使用在试件表面粘贴高铁磁性贴片设计成 MPT,并利用该换能器对非金属材料进行检测^[16-18]. 针对长期远程结构健康监测需求, Kannan 等^[47]对条形贴片 MPT 进行优化设计,利用高分子聚合磁条作为磁致伸缩材料,坡莫合金作为聚磁材料的换能器,实现管道的现场健康

监测. 并且通过实验证明,磁致伸缩贴片的磁各向异性在扭转模态的激励中起着重要作用. 为了解决高频情况下管道 MPT 检测中由多重拖尾脉冲造成的信号变形问题, Kim 等^[48]将镍带边缘打磨变薄,避免使管道在贴片与非贴片处声阻抗发生突变,减少导波在镍带内部来回反射,避免波形失真. 该方法也应用于其他 MPT 的研制中^[30,40]. 在被测试件上贴导电材料作为洛伦兹力传递的媒介,黏结或者固定在待测结构表面构成洛伦兹力贴片换能器(Lorentz force patch transducer, LFPT)也可以实现非金属材料的电磁声检测. 图 9 为使用铜箔贴片的 Lamb 波模态 LFPT 在有机玻璃板上采集的信号. 图中可以明显分辨出 2 个波包,第 1 个波包为换能器激励时产生的串扰信号,与激励信号的时间位置相同;第 2 个波包为接收换能器接收到的直达波信号. 该实验表明了在非金属材料上粘贴铜箔构成 LFPT 进行检测是有效的. 并且,与 MPT 相比,LFPT 降低了对贴片材料的要求,更加方便经济. 铜箔或其他高电导率箔类贴片的使用不存在粘贴固化过程,提高了检测效率.

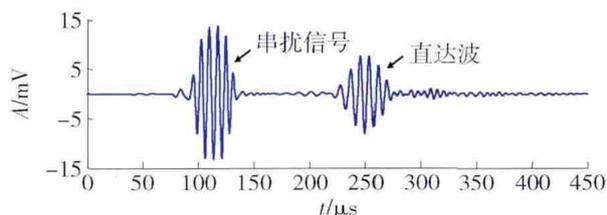


图 9 130 kHz 时 Lamb 波模态 LFPT 的检测信号

Fig. 9 Measured signal at 130 kHz employing Lamb wave mode LFPT

2.3 EMAT 阵列技术

在超声导波检测中,多个阵元按照一定的排布方式排列构成换能器阵列,以提高检测能力或检测范围. 目前应用在超声导波 EMAT 中的阵列技术主要有 2 种:阵列式 EMAT 和 EMAT 阵列.

阵列式 EMAT 是指是由多个部件(线圈或磁铁)按照一定的排布方式组成的 EMAT. 磁铁阵列式 EMAT 中的磁铁阵列是为了提供特殊的偏置静磁场. Vasile 等^[19]利用磁极交替出现的永磁铁阵列提供周期偏置磁场研制出指向型 SH 模态 EMAT,磁铁的宽度为半波长. 线圈阵列式 EMAT 中的线圈阵列是为了提高激励接收能量或者构成波长滤波器,抑制非目标模态信号. 线圈式的 EMAT 本质上是阵列式换能器,每根导线都是一个阵元,因此这种换能器的频率选择性很强. 对于采用回折线圈的

EMAT 线圈中相邻 2 根导线的间距往往就是所激励导波模式的半波长^[11]. 柔性印刷电路板上的双层或者多层线圈就是增强激励接收能量的典型例子^[30-37]. 并且,这类换能器的声束扩散角也由回折线圈的尺寸参数决定. Lee 等^[15]设计了双盘状螺旋线圈. 2 个绕线方式相反串联的盘状线圈作为激励接收换能器的波长滤波器,抑制了 A_0 模态的产生.

EMAT 阵列是多个 EMAT 按照一定的排布方式构成一个阵列. Kim 等^[49]将 6 个回折线圈磁致伸缩 EMAT 周向安装在管道上,基于惠更斯原理构成一个环形相控阵,实现 $T(0,1)$ 模态的激励以及波束指向性的控制. 为了提高上述 EMAT 阵列在管道中对小缺陷的检测能力,需要解决高频段下导波信号的多模态问题. Kim 等^[50]利用 2 个间距一定的 EMAT 阵列作为激励换能器,通过控制 2 个换能器阵列的激励延迟,提高 $T(0,1)$ 模态的信号强度并抑制高阶扭转模态的信号能量.

Liu 等^[30-37]将 EMAT 阵列和阵列式 EMAT 技术应用到 $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态 MPT 阵列的设计中. 2 种 MPT 阵列通过布置在管道上的磁铁阵列分别提供沿管道周向和轴向均匀分布的偏置静磁场;平面螺线管阵列和多分裂线圈阵列在整个磁致伸缩贴片上提供动磁场. 其中磁铁对和单个螺线管阵列、单个多分裂回折线圈以及部分磁致伸缩贴片构成了具有一定指向角的 $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态 MPT. 4 个 MPT 单元构成的 EMAT 阵列通过导线连接,基于阵列式 EMAT 原理,构成了 1 个大 MPT. 这 2 种 MPT 与回折线圈阵列 MPT 相比,提高了信号的能量.

以上 EMAT 阵列技术的应用都可以理解为通过阵列技术提高 EMAT 激励接收信号的能量和信噪比. 下面主要介绍 EMAT 阵列技术在缺陷检测成像方面的研究. 换能器阵列可以分为密集阵列和稀疏阵列 2 种. 密集型阵列通常为紧密分布在结构中某个区域,可以排布成线阵、平面阵列、弧形阵列和环形阵列. Wilcox 等^[51-52]将 S_0 模态 EMAT 排列成环状全向性阵列并对板状结构进行缺陷检测,实现了缺陷的定位和成像. 焦敬品等^[53]利用环状 EMAT 阵列对铝板上的缺陷进行了虚拟聚焦成像. 稀疏型 EMAT 阵列通常布满整个结构,可以弹性布置. 刘增华等^[54]利用研制的全向型 S_0 模态磁致伸缩 EMAT 组成稀疏换能器阵列,见图 10(a),采用自激自收的方式对铝板结构中缺陷进行检测,消除了常规的稀疏换能器阵列成像时对结构健康状况下的信

号依赖,实现了缺陷的无基准定位和成像,成像结果见图 10(b).

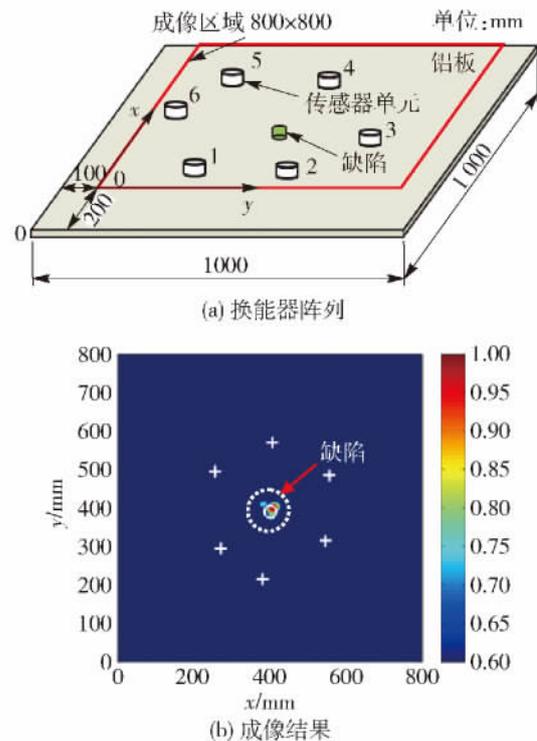


图 10 基于 EMAT 阵列的板结构缺陷检测^[54]

Fig. 10 Plate-structure defect detection using EMAT array

3 总结与展望

重点综述了近 20 年来基于不同工作机理下超声导波 EMAT 的设计、优化和阵列技术的研究进展. EMAT 具有非常好的可设计性,随着制作工艺的不断提高,可以制作出复杂布线的线圈和异型磁铁,进而设计出结构紧凑、换能效率高、可激励出多种单一超声导波模态的 EMAT.

随着检测设备性能的提升,EMAT 换能效率在一定程度上得到改善. 基于 EMAT 的超声导波检测技术将会得到进一步发展和应用. 超声导波 EMAT 未来将在以下几个方面得到快速发展:

1) 在结构形式方面,随着制作工艺的进步与新材料的应用,超声导波检测 EMAT 将向着小型化、集成化、多功能化以及专用化等方向发展. MPT 和 LFPT 两种新型粘贴式的 EMAT 由于其换能效率高于一非接触式 EMAT,可用于非铁磁性和金属材料的检测,扩大了 EMAT 可检材料的范围,并可推广应用于结构健康监测领域. 新近发展的“coil only”型 EMAT^[55]无须永磁铁提供偏置静磁场,具有结构简单、质量更轻、体积小、提离距离高等优点,也

逐渐受到关注.

2) 在模式利用方面,目前研究的超声导波模式多集中于低频低阶模式.随着检测要求的提高,EMAT还可用于高频高阶超声导波模式的激励和接收,而与此同时其他模式的抑制则将是关注的重点.

3) 在应用领域方面,通过将EMAT与阵列技术结合,发展成像算法,对缺陷进行智能识别与分类,实现对结构的健康状况评估,也将成为超声导波EMAT技术新的重要研究领域.

参考文献:

- [1] 张广纯. 电磁声(EMA)检测技术的研究、开发与工程化[J]. 应用声学, 1995, 14(2): 1-6.
ZHANG G C. Research, development and engineering of the EMA inspection technique [J]. Applied Acoustics, 1995, 14(2): 1-6. (in Chinese)
- [2] CALKINS F, FLATAU A, DAPINO M. Overview of magnetostrictive sensor technology [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 18(10): 1057-1066.
- [3] 王淑娟, 康磊, 赵再新, 等. 电磁超声换能器的研究进展综述[J]. 仪表技术与换能器, 2006(5): 47-50.
WANG S J, KANG L, ZHAO Z X, et al. Overview of research advances in electromagnetic acoustic transducer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2006(5): 47-50. (in Chinese)
- [4] 张勇, 陈强, 孙振国, 等. 用于无损检测的电磁超声换能器研究进展[J]. 无损检测, 2004, 26(6): 275-279.
ZHANG Y, CHEN Q, SUN Z G, et al. Development of research on electromagnetic acoustic transducer for nondestructive testing [J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(6): 275-279. (in Chinese)
- [5] 刘燕, 王悦民, 孙丰瑞, 等. 板状结构缺陷电磁超声导波检测技术研究进展[J]. 无损检测, 2012, 34(10): 60-66.
LIU Y, WANG Y M, SUN F R, et al. Progress in research of electromagnetic acoustic transducer technique for the plate-like structure defect detection [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(10): 60-66. (in Chinese)
- [6] KIM Y Y, KWON Y E. Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides [J]. Ultrasonics, 2015, 62: 3-19.
- [7] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 82-142.
- [8] 彭鸽, 袁慎芳. 主动 Lamb 波监测技术中的传感元件优化布置研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 957-962.
- PENG G, YUAN S F. Optimization for collocation of sensors in active Lamb wave-based monitoring [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 957-962. (in Chinese)
- [9] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P B, et al. Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(12): 2571-2581.
- [10] 黄松岭. 电磁超声导波理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 10-100.
- [11] GUO Z, ACHENBACH J D, KRISHNASWAMY S. EMAT generation and laser detection of single Lamb wave modes [J]. Ultrasonics, 1997, 35(6): 423-429.
- [12] 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.
- [13] NAGY P B, 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.
- [14] WILCOX P D, LOWE M J, CAWLEY P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(12): 2370-2383.
- [15] LEE J K, KIM Y Y. Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation [J]. NDT&E International, 2016, 83: 38-47.
- [16] LEE J K, KIM H W, KIM Y Y. Omnidirectional Lamb waves by axisymmetrically-configured magnetostrictive patch transducer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(9): 1928-1934.
- [17] KIM K, LEE H J, LEE J K, et al. Effects of slits in a patch of omnidirectional Lamb-wave MPT on the transducer output [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3): 035019-035033.
- [18] JU S L, CHO S H, KIM Y Y. Radiation pattern of Lamb waves generated by a circular magnetostrictive patch transducer [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(5): 054102-054104.
- [19] VASILE C F, THOMPSON R B. Excitation of horizontally polarized shear elastic waves by electromagnetic transducers with periodic permanent magnets [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(4): 2583-2588.

- [20] THOMPSON R B. Generation of horizontally polarized shear waves in ferromagnetic materials using magnetostrictively coupled meander-coil electromagnetic transducers [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 34(2): 175-177.
- [21] CHO S H, LEE J S, YOUNG K Y. Guided wave transduction experiment using a circular magnetostrictive patch and a figure-of-eight coil in nonferromagnetic plates [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 224101-224103.
- [22] LEE J S, KIM Y Y, CHO S H. Beam-focused shear-horizontal wave generation in a plate by a circular magnetostrictive patch transducer employing a planar solenoid array [J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 18(1): 445-455.
- [23] SEUNG H M, KIM H W, KIM Y Y. Development of an omni-directional shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducer for plates [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(7): 1304-1308.
- [24] SEUNG H M, KIM Y Y. Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer [J]. *NDT&E International*, 2016, 80: 6-14.
- [25] SEUNG H M, PARK C I, KIM Y Y. An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 58-66.
- [26] LIU Z H, XIE X D, WU B, et al. The application of low frequency longitudinal guided wave mode for the inspection of multi-hole steel floral pipes [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 353: 012013-012020.
- [27] KWUN H, HOLT A E. Feasibility of under-lagging corrosion detection in steel pipe using the magnetostrictive sensor technique [J]. *NDT&E International*, 1995, 28(4): 211-214.
- [28] HAO K, HUANG S, ZHAO W, et al. A new frequency-tuned longitudinal wave transducer for nondestructive inspection of pipes based on magnetostrictive effect [C]// *IEEE Sensors Applications Symposium*. New York: IEEE, 2010: 64-68.
- [29] HAO K S, HUANG S L, ZHAO W, et al. Multi-belts coil longitudinal guided wave magnetostrictive transducer for ferromagnetic pipes testing [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(2): 502-508.
- [30] LIU Z, HU Y, FAN J, et al. Longitudinal mode magnetostrictive patch transducer array employing a multi-splitting meander coil for pipe inspection [J]. *NDT&E International*, 2015, 79: 30-37.
- [31] KWUN H, KIM S Y, CRANE J F. Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes: US6429650B1 [P]. 2002-10-08.
- [32] KIM Y Y, PARK C I, CHO S H, et al. Torsional wave experiments with a new magnetostrictive transducer configuration [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(6): 3459-3468.
- [33] PARK C I, KIM W, CHO S H, et al. Surface-detached V-shaped yoke of obliquely bonded magnetostrictive strips for high transduction of ultrasonic torsional waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(22): 224105-224107.
- [34] PARK C I, CHO S H, KIM Y Y. Z-shaped magnetostrictive patch for efficient transduction of a torsional wave mode in a cylindrical waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(17): 174103-174105.
- [35] VELICHKO A, WILCOX P D. Excitation and scattering of guided waves: relationships between solutions for plates and pipes [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(6): 3623-3631.
- [36] CHO S, KIM H, KIM Y. Megahertz-range guided pure torsional wave transduction and experiments using a magnetostrictive transducer [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(5): 1225-1229.
- [37] LIU Z, FAN J, HU Y, et al. Torsional mode magnetostrictive patch transducer array employing a modified planar solenoid array coil for pipe inspection [J]. *NDT&E International*, 2015, 69: 9-15.
- [38] 何存富, 胡跃刚, 焦敬品, 等. 低阶扭转模态电磁声阵列换能器研制及其在厚壁小径管中的试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(2): 14-20.
- HE C F, HU Y G, JIAO J P, et al. Array of fundamental torsional mode EMATs and experiment in thick-wall pipe with small diameter [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 14-20. (in Chinese)
- [39] MURAYAMA R. Driving mechanism on magnetostrictive type electromagnetic acoustic transducer for symmetrical vertical-mode Lamb wave and for shear horizontal-mode plate wave [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(7): 729-736.
- [40] MIRKHANI K, CHAGGARES C, MASTERTON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters [J]. *NDT&E International*, 2004, 37(3): 181-193.
- [41] DHAYALAN R, MURTHY V S N, KRISHNAMURTHY C V, et al. Improving the signal amplitude of meandering coil EMATs by using ribbon soft magnetic flux concentrators (MFC) [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(6):

- 675-82.
- [42] 翟国富,汪开灿,王亚坤,等. 螺旋线圈电磁超声换能器解析建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 147-154.
ZHAI G F, WANG K C, WANG Y K, et al. Analytical modeling and analysis of electromagnetic acoustic transducers with spiral coils [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(18): 147-154. (in Chinese)
- [43] KIM Y G, MOON H S, PARK K J, et al. Generating and detecting torsional guided waves using magnetostrictive sensors of crossed coils [J]. NDT&E International, 2011, 44(2): 145-151.
- [44] JIAN X, DIXON S, PALMER S B. In-plane and out-of-plane particle velocity measurement using electromagnetic acoustical transducers [C] // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. New York: IEEE, 2005, 2(2): 1276-1279.
- [45] HUANG S, ZHAO W, ZHANG Y, et al. Study on the lift-off effect of EMAT [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2009, 153(2): 218-221.
- [46] 李固,陈鹏,王帅,等. 电磁超声表面波换能器设计参数仿真[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(4): 54-58.
LI G, CHEN P, WANG S, et al. The simulation of designing parameter of electromagnetic surface wave transducer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 30(4): 54-58. (in Chinese)
- [47] KANNAN E, MAXFIELD B W, BALASUBRAMANIAM K. SHM of pipes using torsional waves generated by in situ magnetostrictive tapes [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2505-2515.
- [48] KIM H W, CHO S H, KIM Y Y. Analysis of internal wave reflection within a magnetostrictive patch transducer for high-frequency guided torsional waves [J]. Ultrasonics, 2011, 51(6): 647-652.
- [49] KIM H W, LEE J K, KIM Y Y. Circumferential phased array of shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducers for pipe inspection [J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 423-431.
- [50] KIM H W, KWON Y E, LEE J K, et al. Higher torsional mode suppression in a pipe for enhancing the first torsional mode by using magnetostrictive patch transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(3): 562-572.
- [51] WILCOX P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(6): 699-709.
- [52] WILCOX P, LOWE M, CAWLEY P. Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(4): 653-665.
- [53] 焦敬品,杨敬,何存富,等. 基于虚拟聚焦的板结构兰姆波换能器阵列检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 12-20.
JIAO J P, YANG J, HE C F, et al. Virtual focusing based Lamb wave transducer array method for plate structure inspection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 12-20. (in Chinese)
- [54] 刘增华,樊军伟,何存富,等. 基于全向型 S_0 模式磁致伸缩换能器的无参考缺陷成像方法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 8-16.
LIU Z H, FAN J W, HE C F, et al. Research on baseline-free damage imaging method employing omnidirectional S_0 mode magnetostrictive transducers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 8-16. (in Chinese)
- [55] RUETER D, MORGENSTERN T. Ultrasound generation with high power and coil only EMAT concepts [J]. Ultrasonics, 2014, 54(8): 2141-2150.

(责任编辑 杨开英)