

创新点/亮点: 引入声线示踪阵列超声线性 C 扫描成像方法, 解决管道复合材料修复层无损检测漏检难题, 缺陷漏检率降低 25%, 平均精度提高 47%。

引用格式: 李荣光, 朱甜甜, 孙伶, 陈斯迅, 周文彬, 周正干. 管道碳纤维复合材料修复层阵列超声检测方法提高检测精度 [J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(6): 728-742. // LI Rongguang, ZHU Tiantian, SUN Ling, CHEN Sixun, ZHOU Wenbin, ZHOU Zhenggan. Ultrasonic phased array detection method for improving detection accuracy of repair layers in pipeline carbon fiber composite materials [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(6): 728-742.

管道碳纤维复合材料修复层阵列超声检测方法提高检测精度

李荣光¹, 朱甜甜^{2*}, 孙伶¹, 陈斯迅¹, 周文彬², 周正干²

1. 国家管网集团北方管道有限责任公司, 河北廊坊

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京昌平

*通信作者: 朱甜甜, 电子邮箱: zhutiantian@buaa.edu.cn

摘要: (目的意义) 管道碳纤维复合材料修复作为一种新型修复技术, 被广泛应用于管道油气储运等多个领域, 然而由于复合材料修复层的高衰减性、各向异性和多层结构的影响, 导致超声无损检测困难。(方法过程) 为解决上述技术难题, 引入一种基于声线示踪的阵列超声线性 C 扫描成像方法, 通过准确计算阵列超声聚焦法则, 实现了对碳纤维复合材料修复层内部缺陷的高分辨率、高精度成像。(结果现象) 对典型缺陷试样开展检测实验, 结果表明对于层间脱粘缺陷和界面脱粘缺陷均可有效检测, 相比传统的均质化方法, 缺陷漏检率降低 25%, 缺陷定量平均精度提高 46.6%。(结论建议) 说明阵列超声检测技术应用与管道复合材料修复层检测是完全可行的, 为管道修复层的质量评估提供了一种有效的非破坏性检测手段。

关键词/主题词: 阵列超声; 碳纤维复合材料; 管道修复层; 油气储运; 无损检测; 缺陷检测; 声线示踪; 超声成像

中图分类号: TB332; TB553 文献标识码: A DOI: [10.13639/j.odpt.202501005](https://doi.org/10.13639/j.odpt.202501005)

收稿日期: 2024-04-20; 修回日期: 2024-07-31; 录用日期: 2024-10-20; 编辑: 杨春莉

Ultrasonic phased array detection method for improving detection accuracy of repair layers in pipeline carbon fiber composite materials

LI Rongguang¹, ZHU Tiantian^{2*}, SUN Ling¹, CHEN Sixun¹, ZHOU Wenbin², ZHOU Zhenggan²

1. National Pipeline Network Group Northern Pipeline Co., Ltd., Langfang, Hebei, 06500, China

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Changping, Beijing 102206, China

*Corresponding author. ZHU Tiantian, E-mail addresses: zhutiantian@buaa.edu.cn

Abstract: Pipeline carbon fiber composite material repair, as a novel repair technology, is widely applied in fields such as oil and gas transportation and storage. However, due to the high attenuation, anisotropy, and multi-layered structure of the composite material repair layer, ultrasonic non-destructive testing (NDT) becomes challenging. To solve the above technical problems, this paper proposes a linear C-scan imaging method based on acoustic ray tracing. By accurately calculating the array ultrasonic focusing laws, high-resolution and high-precision imaging of internal defects in the composite material repair layer is achieved. Experimental tests on typical defect specimens demonstrate that both interlaminar delamination and interface delamination defects can be effectively detected. Compared to traditional homogenization methods, the defect missed detection rate is reduced by 25% and the average defect quantification accuracy is improved by 46.6%. These results indicate that array ultrasonic testing technology is fully applicable to the detection of composite material repair layers in pipelines, providing an effective non-destructive testing solution for the quality assessment of pipeline repair layers.

Key words: Array ultrasonic; Carbon fiber composite materials; Pipeline repair layer; Oil and gas storage and transportation; Non-destructive testing; Defect detection; Acoustic ray tracing; Ultrasonic imaging

<https://doi.org/10.13639/j.odpt.202501005>

Received 20 April 2024; Revised in revised form 31 July 2024; Accepted 20 October 2024

0 引言

随着高钢级管道在能源输送领域的广泛应用,其安全性和稳定性日益受到重视。管道在长期使用过程中,受到腐蚀、裂纹等多种因素的影响,导致结构性能下降,早在2016年,李荣光等认为管道使用过程中产生的缺陷可能会给管道的正常输送带来严重的安全隐患,并介绍了油气长输管道常见的管体缺陷类型和修复技术,分析了高钢级管道在线不停输修复技术的可靠性研究及发展趋势^[1]。为了解决这一问题,需要对管道进行及时修复弥补,2019年,张李等通过分析在油气管道出现缺陷时的一般影响因素,探讨在实际油气管道中所使用的修复方法^[2]。碳纤维复合材料修复技术因其高强度、良好的设计性和无需焊接的特点,以及施工时不动火、可以带压操作、施工流程简单等特点,逐渐成为管道修复的首选方案。2019年,刘永忠对碳纤维复合材料进行全面分析,并对碳纤维复合材料补强技术在输油管道中的应用进行研究,提出该修复技术可以有效提升输油管道维修工作的效率和质量^[3]。2020年,杨寄诚等通过爆破实验研究了修复层厚度对失效内压的定量影响,表明随着修复层厚度增加,修复效果增加的幅度会降低^[4]。

碳纤维复合材料增强修复管道的方法主要包括预成型法和湿缠绕法。预成型法,又称为套筒法,依据所使用的套筒材料进行分类,分为复合材料套筒法:2018年,Mazurkiewicz等提出使用复合材料作为套筒材料,增强了钢管的性能^[5];复合材料/灌浆套筒法:2021年,Md等对具有不同金属损失水平的全尺寸管道进行三维有限元分析,评估灌浆复合材料修复系统的失效行为和能力,发现使用高抗拉强度灌浆,复合修复系统可以恢复有缺陷的钢管的能力,最多可恢复约70%的金属损失^[6]。根据具体施工的方式不同,湿缠绕法可分为以下几种方法:纤维布周向缠绕法:2019年,张宝龙等使用纤维布周向缠绕法,解决了湿缠绕法在施工中的周向纤维布缠绕问题,证明了复合材料修复能明显提高含环向裂纹管道的承压能力和承弯能力,从而提高管道的安全裕度^[7];2020年,孙传青通过玻璃纤维复合材料周向缠绕法加强整体管段,弥补干线管道因地区等级变化带来的安全裕量不足问题,为干线管道高后果区治理提供指导性建议^[8]。纤维缠绕法:2020年,Al-Abtah提出纤维增强聚合物复合材料外包裹法,消除了热影响区对焊接管道的承压能力和劣化性能的影响^[9];纤维布贴片法:2021年,Chen等提出了纤维布贴片法,利用有限元分析评估复合材料修复管道的力学性能,通过增加复合材料纤维布的厚度解决了湿缠绕法中纤维布贴片过程中带来比外包裹法更高的界面剪切应力问题^[10]。其中,纤维布周向缠绕法是在周向360°对管道的增强或修复部位进行缠绕,而纤维布贴片法仅对待增强修复的区域进行局部补强。2022年,何毅等对复合材料增强修复油气管道研究进展做了综述,认为纤维布贴片法虽然使用的复合材料较少且施工更简便,但对管道增强和修复效果往往比周向缠绕低^[11]。

目前大多数碳纤维复合材料修复层通常由多层碳纤维布和环氧树脂基体组成,当检测到管道出现腐蚀缺陷时,采用湿缠绕工艺,将浸润环氧树脂胶的碳纤维布在管道缺陷处外部缠绕粘贴形成一个复合材料修复层。这种结构设计旨在利用碳纤维材料在纤维方向的高强度,结合环氧树脂基体的粘结性能,以固化后与管道形成一个整体。

总体来说,固化后的复合材料修复层呈现为碳纤维与环氧树脂交叠的多层粘接结构。在管道复合材料修复过程中,由于环境限制,通常采用常温下的人工缠绕方式进行修复,这种修复方式在管道维修中得到广泛应用,但是其修复质量严重依赖于操作人员的技术水平和经验。当修复过程中树脂层的厚度与碳纤维复合材料单层厚度相近时,导致复合材料修复层结构的致密性相对较差,修复层内部容易产生气泡、分层、孔隙等缺陷,进而影响管道修复质量。为了更好地监测和评估管道碳纤维复合材料修复层的修复质量,各类无损检测技术被应用在修复层检测中,以监控修复层的结构完整性。管道碳纤维复合材料修复层中普遍存在的缺陷类型,如图1所示。

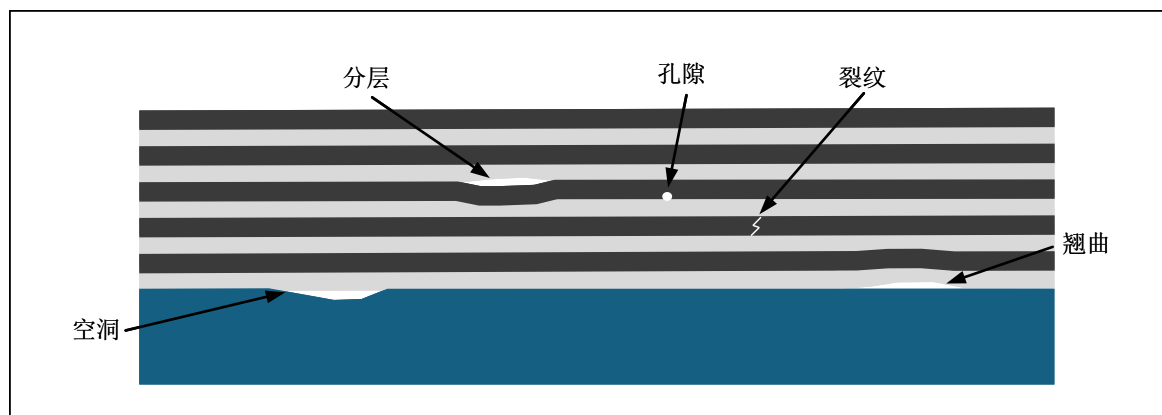


图 1 碳纤维复合材料典型缺陷示意图

Fig. 1 Typical defect map of carbon fiber composite materials

从图 1 中可以看出,在复合材料修复过程中,由于层间污染、粘接力不足、树脂未完全浸润或树脂中空气未彻底排出等因素可能会产生诸如分层、脱粘、孔隙、空洞和纤维褶皱等缺陷。此外,在修复材料的固化过程中,碳纤维铺层的不均匀收缩可能会引起修复层的弯曲变形,进而导致修复层与管道表面不能有效贴合,这种现象被称为翘曲缺陷。在上述典型缺陷中,孔隙缺陷和裂纹缺陷通常尺寸微小,对修复层的有效性产生的影响较弱,而修复层与管道的界面分离、修复层层间的分层脱粘以及管体表面的空洞缺陷对于管道碳纤维复合材料修复层的有效性具有显著负面影响,因此,能够有效检测并进行准确评估这类缺陷,对修复层的整体性能和管道的长期安全性具有重要意义。

目前国内外针对碳纤维复合材料的检测方法主要包括电磁检测、射线检测、红外热成像检测、超声波成像检测等。2020 年,张荣华等提出了一种块均质化的建模方法,有效模拟平纹编织碳纤维复合材料的电磁特性,解决了平纹编织碳纤维复合材料的疲劳检测问题^[12]。2022 年,李红利等提出了方块模型和纱线模型,并基于电磁感应原理设计了一种无需手动旋转的 12 线圈电磁式阵列涡流传感器,成功检测平纹碳纤维增强树脂基复合材料中裂纹缺陷^[13]。针对碳纤维复合材料的射线检测,近年来开展了诸多研究。2019 年,廖见明分析了射线检测在复合材料无损检测中的应用,认为射线检测技术在复合材料中具有很大的作用^[14]。李琼艳等分析了 X 射线技术在复合材料中的应用探讨,发现存在诸多不足如灵敏度低、成本高和对目标对象的厚度存在限制^[15]。董方旭对比分析了 X 射线断层 CT 成像检测、X 射线螺旋 CT 成像检测和 X 射线锥束 CT 成像检测三种 X 射线 CT 成像检测方法,证明了 X 射线锥束 CT 成像检测方法在对碳纤维树脂基复合材料内部分层缺陷的检测中优势最大,为碳纤维复合材料射线检测提供了借鉴意义^[16]。2020 年,李小丽等以复合材料内部分层缺陷为研究对象,对比了 CT 技术与 X 射线检测技术的检测能力,认为 X 射线检测对复合材料中分层缺陷的检测效果较差^[17]。2022 年,章清乐等提出了一种 X 射线数字成像自动化扫描成像检测方法,解决了大型复合材料蜂窝夹芯结构的无法快速可视化检测难题^[18]。2023 年,杨玉森等用 X 射线检测法及高分辨率超声脉冲反射法对单向铺层复合材料层压板冲击损伤进行无损检测与评估,认为传统 X 射线方法对裂纹缺陷较为敏感,但对分层缺陷无法达到检出效果,具有一定的局限性^[19]。

针对碳纤维复合材料的红外热成像检测,近年来同样开展了诸多研究。2019 年,南方等开展了红外热成像技术对各类表面状态下航空复合材料的检测研究,认为红外热成像技术应用于复合材料检测中,对复合材料试件的表面状态存在一定局限性^[20]。2020 年,郭德伟等对比了不同的形状及不同损伤所适用的主流无损检测方法技术原理,并利用红外热成像的方法对碳纤维增强树脂基复合材料开展红外热成像检测实验,弥补了 CT 方法不能直观地得到表面损伤的缺点^[21]。2022 年,朱笑等采用红外热成像检测技术对低速冲

击载荷下的碳纤维复合材料层合板表面与内部损伤进行识别, 解决了损伤区域弱边缘的检测能力不足的问题^[22]。2023 年, 裴翠祥等研究了一种基于衍射分束原理的激光光束整形和匀化方法, 并在此基础上开发了便携式光纤耦合光束匀化激光红外热成像检测系统, 解决了传统红外成像方法由于激光加热不均造成的检测能力较低等问题^[23]。

相比之下超声检测是最有效、应用最为广泛的方法之一。其中阵列超声检测技术以其高精度、高分辨率和非破坏性的特点, 成为复合材料无损检测领域的重要研究方向。2019 年, Lin 等利用 Dijkstra 算法成功反演出碳纤维复合材料层压板中声传播路径并实现其中横通孔的全聚焦成像, 解决了阵列超声全聚焦难以在复合材料检测中应用的问题^[24]。2021 年, Priya 等采用基于脉冲回波法的超声 C 扫描技术实现了复合材料中纤维裂纹和分层的检测, 解决了传统 C 扫描成像对复合材料的检测难题^[25]。Cao 等利用 Dijkstra 算法成功反演出碳纤维复合材料多向板 R 区结构中声传播路径和传播时间, 提供了复合材料声束路径计算的新思路^[26]。曹弘毅等利用阵列超声对碳纤维增强树脂基复合材料分层缺陷进行评估, 认为阵列超声检测技术对碳纤维复合材料具有很高的检测精度, 对较小缺陷具有很好的检测效果^[27]。张婷等分析了褶皱缺陷的检测和对力学性能的影响, 提出了复合材料层压板的褶皱缺陷设计容限推荐为 5°, 为褶皱缺陷的无损检测提供了设计要求^[28]。2022 年, Jeroen 等基于 A 扫描信号采用统计时间能量化方法实现了碳纤维复合材料层压板分层缺陷的 C 扫描成像, 解决了传统时间门方法难以对复杂冲击损伤簇范围的提取和量化问题^[29]。周正干等利用维特比算法实现碳纤维复合材料多向板中纤维褶皱缺陷的全聚焦成像, 提高了检测分辨率^[30]。2023 年, 王俊等针对碳纤维复合材料层压板结构设计基于线性阵列和环形阵列换能器的超声检测方法, 发现采用线阵换能器可在具有较高信噪比的同时, 对厚度较小(≤ 10 mm)的复合材料平板试样实现高效率检测, 而环阵换能器对厚度较大的平板试样具有更高的检测精度以及更小的成像畸变^[31]。Ma 等提出了一种用于多重延迟问题的归一化互相关峰值方法, 消除一些幅度下降并平衡拖尾效应和频率相关效应, 解决了随着深度增加, 碳纤维铺层信息丢失的问题^[32]。然而, 上述这些方法都是针对高温高压环境下制作而成的碳纤维复合材料, 结构内树脂分布均匀且树脂层通常远薄于复合材料层, 而碳纤维复合材料的修复层主要由碳纤维布编织而成, 其具有的分层各向异性显著、树脂层厚度不均匀等特点, 导致超声波在材料中的传播衰减更为显著, 声束聚焦困难, 反射信号的信噪比低, 不易分辨。

因此, 本研究聚焦于管道碳纤维复合材料修复层的典型缺陷, 旨在通过阵列超声检测技术, 提供一种高效、准确的非破坏性检测方法, 以为管道修复层的质量评估提供科学依据, 并为复合材料管道修复层中其他缺陷的检测与评价提供参考, 从而为油气管道的安全维护和长期稳定运行提供技术支持。

1 方法过程

1.1 室内研究

1.1.1 碳纤维修复层声学传播特性

碳纤维复合材料具有声学各向异性, 对修复层内声波的传播和衰减具有显著影响。单向碳纤维铺层中, 超声波的传播满足 Christoffel 方程, 见式(1)。

$$(\Gamma_{im} - \rho v^2 \delta_{im}) u_m = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度, 单位 kg/m^3 , v 为声波相速度, 单位 m/s , δ_{im} 为克罗内克符号, u_m 为质点矢量方向位移, 单位 m , Γ_{im} 为 Christoffel 声学张量, 其定义见式(2)。

$$\Gamma_{im} = C_{ijkm} n_j n_k \quad (2)$$

式中: C_{ijkm} 为材料的 4 阶刚度张量 ($i, j, k, m = 1, 2, 3$), n_i ($i = 1, 2, 3$) 分别对应声波波矢在 (x, y, z) 三个方向的方向余弦。

求解方程(1)可以得到 ρv^2 的三个解, 分别对应近似纵波(qP)、近似垂直剪切波(qSV)以及近似水平剪切波(SH)。对于每一组解, 都存在一个相应的质点矢量方向位移 u_m , 它指向该类型波的质点振动方向。

各向异性介质中, 声波相速度的方向与声波波阵面垂直, 其与声波波包传播方向存在一定的夹角, 而声波群速度的方向是声波能量的传播方向(即波包传播方向), 为了准确描述声波在各向异性材料中的传播行为, 采用群速度作为关键参数, 其计算公式, 见式(3)。

$$v_{gi} = \frac{C_{ijk} u_j u_m u_k}{\rho v} \quad (3)$$

式中: u 代表质点矢量方向位移, v_g 为声波能量的传播矢量, 在无能量耗散的各向异性介质中, 声波的群速度与声波能量传播矢量相同。由此可得声波的群速度的计算公式, 见式(4)。

$$\begin{cases} c_g = |v_{gi}| = \sqrt{v_{g1}^2 + v_{g2}^2 + v_{g3}^2} \\ \theta_g = \arctan \frac{v_{g1}}{v_{g3}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: c_g 为群速度的幅值, 单位 m/s, θ_g 为群速度的方向角。

在各向同性平面内, 弹性力学特征在各个方向上相同。在这种情况下, 选择各向同性平面为 yz 平面, x 轴为对称轴, 横向各向同性材料的刚度系数矩阵中总共有 8 个独立的参数。用于制作复合材料修复层的双向碳纤维布通常选用 T700 东丽原丝, 其密度 $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$, 可计算出铺层的刚度系数矩阵。因此, 根据公式(3)和公式(4)可以计算不同纤维铺设角度、不同传播方向 θ 的声波群速度 c_g , 如图 2 所示。

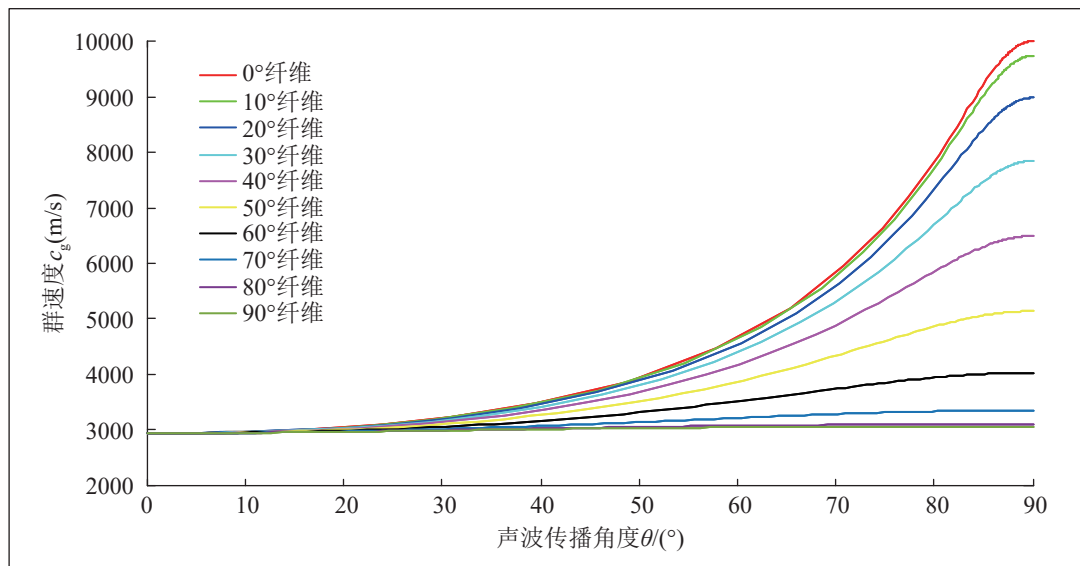


图 2 碳纤维缠绕材料声波群速度变化图

Fig. 2 The variation of acoustic wave group velocity in carbon fiber wound materials

从图 2 中可以看出, 当声波入射平面的面内方向角 $\theta < 20^\circ$ 时, 入射平面内群速度基本相等, 即当声波入射角度较小时, 碳纤维复合材料可以近似视为各向同性材料, 而当声波入射平面的面内方向角 $\theta > 20^\circ$ 时, 单向碳纤维铺层内群速度受群速度方向角度影响较大。

1.1.2 声线示踪方法

阵列超声技术利用阵列超声换能器产生和接收超声波, 以检测材料内部的缺陷。该技术基于波束控制原理, 通过改变阵列换能器中各阵元的发射和接收信号的相位, 实现超声波束的动态聚焦和偏转。阵列超声无损检测技术能够实现线性扫描、扇形扫描和动态深度聚焦等多种扫描方式, 显著提高了检测的灵活性和效率, 增强了分辨率。

当超声波以一定角度从一种介质入射到另一种介质中时, 声波在界面处会发生折射反应, 入射和折射的角度关系符合斯涅尔定律。然而, 由于所涉及的复合材料修复层具有各向异性, 使得直接应用斯涅尔定律进行声线路径的迭代计算变得复杂。为了解决上述技术难题, 采用先离散后整合的动态规划思路进行路径搜索。以费马原理理论依据, 即“超声波总是沿着用时最短的路径在空间两定点之间传播”, 显然可以将碳纤维复合材料中的声线示踪转换为计算机科学图论研究中的最短路径问题。若能够获知各离散节点之间的声传播路径和时间信息, 便可以使用维特比最短路径搜索算法整合各离散点之间的路径, 实现构件内任意两定点之间的声线路径。具体搜索过程如下:

1) 初始化: 对于复合材料表面(第一层)的离散点, 计算从声源点 s 到这些点的声传播时间。由于第一层的点直接与声源点相邻, 因此 S 到这些点的时间即为最短时间, 声速在楔块中以直线传播, 计算公式为声程除以传播方向对应的声波群速度。

2) 网格离散化: 网格化的疏密直接影响声线路径搜索的准确性和搜索效率。由于碳纤维复合材料修复层单一铺层内近似认为是均质的各向异性材料, 因此在厚度方向离散单位为单一铺层厚度, 而在水平方向, 选择以 0.1 mm 等长度进行离散, 兼顾搜索效率和搜索准确性。

3) 计算声速空间分布: 在 1.1.1 节中已经说明了单铺层内的声速计算方法, 根据结果可知声速的大小与定点所在铺层的纤维方向和弯曲位置有关, 可以得出相邻层两点的声速的空间分布。

4) 建立声时矩阵: 用 t_{pq} 表示任意两点 p 、 q 之间的传播时间, 值得注意的是, 当 p 、 q 两点位于同一深度或者位于不同纤维方向铺层内时, 声波无法直接由 p 点传播至 q 点, 此时 $t_{pq} = \infty$, 仅当 p 点和 q 点位于同一纤维铺层中且不在同一深度时, 声波可以直接从 p 点传播至 q 点, 计算公式, 见式(5)。

$$\begin{cases} t_{pq} = \frac{\sqrt{(x_p - x_q)^2 + (z_p - z_q)^2}}{v(x_p, z_p, \theta_p, \beta_{pq})} \\ \beta_{pq} = \arctan((x_q - x_p)/(z_q - z_p)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $v(x_p, z_p, \theta_p, \beta_{pq})$ 表示在纤维方向为 θ_p 的铺层内, 与法线夹角为 β_{pq} 方向上的群速度。利用上式可以计算出区域中任意两个离散点之间的声传播时间。

5) 最短路径搜索: 维特比最短路径搜索算法本质是一种动态规划算法, 即从起点到终点的最短路径一定包含了终点前一个点的最短路径。具体实现过程为: 首先, 以阵元为起点 s , 位于试样表面的离散点 $q_{1j} (j = 1, 2, \dots, m)$ 的最短声时路径有且只有一条, 其中 m 为每一层纤维铺层的离散点数, 最短声时为 $t_{sq_{1j}}$; 当经过第一层纤维铺层时候, 离散点 $q_{2j} (j = 1, 2, \dots, m)$ 在大量的可能路径, 其中每个离散点的最短声时为 $t_{sq_{1j}} + t_{q_{1j}q_{2j}}$; 以此类推, 可以找出试样内所有离散点的最短声时, 当终点为 e 时, 最短声时为 $t_{sq_{1j}} + t_{q_{1j}q_{2j}} + \dots + t_{q_{nj}e}$, 其中 n 为碳纤维铺层总数; 通过迭代上述步骤, 维特比最短路径搜索算法可以计算出从声源点 S 到复合材料修复层中任意点的最短传播时间。

6) 路径回溯: 最终根据回溯原理, 可以从计算出的最短传播时间反推出对应的声传播路径。

1.2 应用案例

1.2.1 试验材料及设备准备

在管道修复层中, 在脱粘缺陷和腐蚀缺陷处形成空腔, 使得缺陷处与周围材料的声速差异较大, 超声波会在此处产生强烈的反射信号。在人工缺陷试样的制作过程中, 脱粘缺陷采用与复合材料声速差异较大的泡棉和聚四氟乙烯模拟, 同时采用机加工打薄的方式模拟管道表面的腐蚀缺陷。参照管道复合材料修复的标准方法, 采用湿缠绕法进行管道复合材料典型缺陷试样的制备, 制作过程, 如图 3 所示。

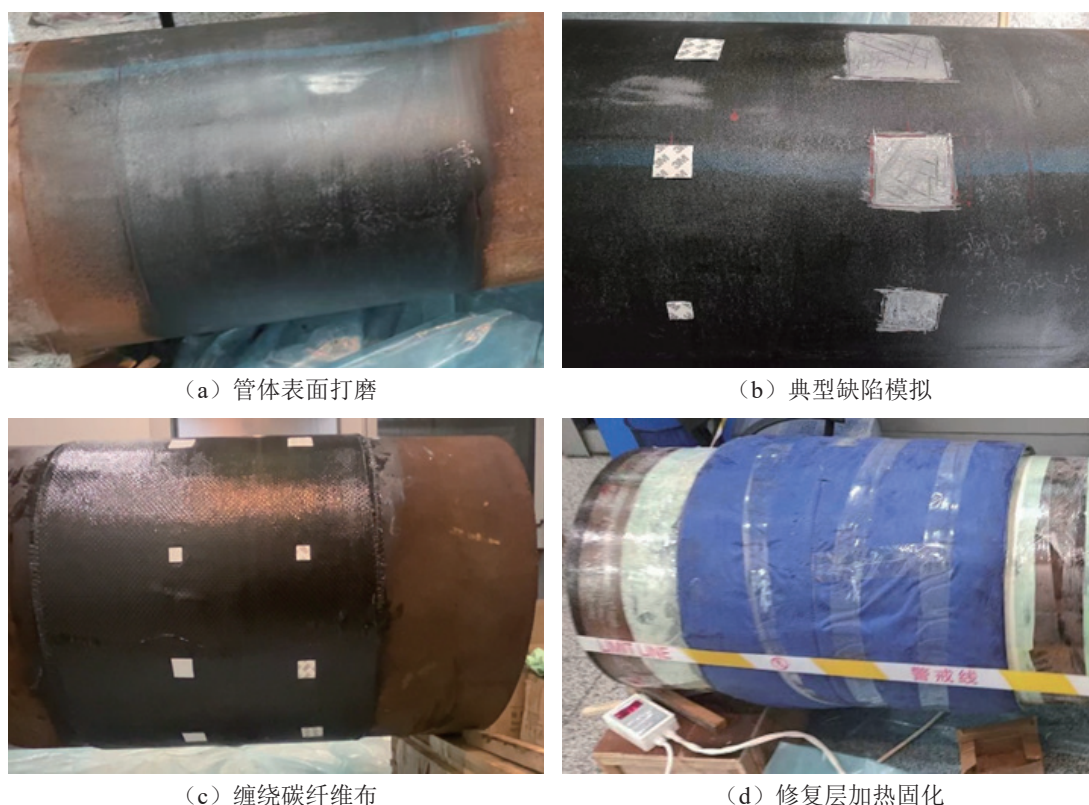


图 3 碳纤维复合材料修复层缺陷制作过程

Fig. 3 The fabrication process of defects in the repair layer of carbon fiber composite materials.

从图 3 中可以看出,碳纤维复合材料修复层缺陷制作主要包括了表面打磨、缺陷模拟、缠绕碳纤维布及加热固化,其中表面打磨为了去除表面杂质,增加吸附力。采用专业的打磨设备对试样表面进行处理,确保表面粗糙度满足工艺要求,打磨深度控制在 0.2~0.3 mm 范围内,以避免对基体材料造成过度损伤。缺陷模拟阶段采用精密加工方式,在碳纤维布层间预埋特定尺寸的缺陷,包括管道腐蚀、修复层层间脱粘、管体与修复层界面脱粘等典型缺陷类型。缠绕碳纤维布时,需要保持恒定的张力和缠绕角度,并实时监控树脂含浸量,确保其在 45%~55% 的理想范围内,每层铺设完成后进行压实,以减少层间气泡,提高修复层每层的致密度。加热固化采用分段升温方式,先在 60 °C 下保温 2 h,再升至 80 °C 保温 4 h,最后在 120 °C 下保温 6 h,以确保树脂充分交联固化并防止树脂堆叠。

为了模拟复合材料修复层中的常见缺陷,使用一个管径为 559 mm,管长为 700 mm 的高钢级管道试样,设计使用厚度为 8 mm 的碳纤维复合材料修复层(每层碳纤维布的厚度约为 0.2 mm,每层树脂厚度约为 0.3 mm)进行修复,修复层宽度为 500 mm。在修复过程中预埋缺陷管道腐蚀、修复层层间脱粘、管体与修复层界面脱粘等典型缺陷,每类缺陷设置三种不同尺寸,缺陷的分布,如图 4 所示。

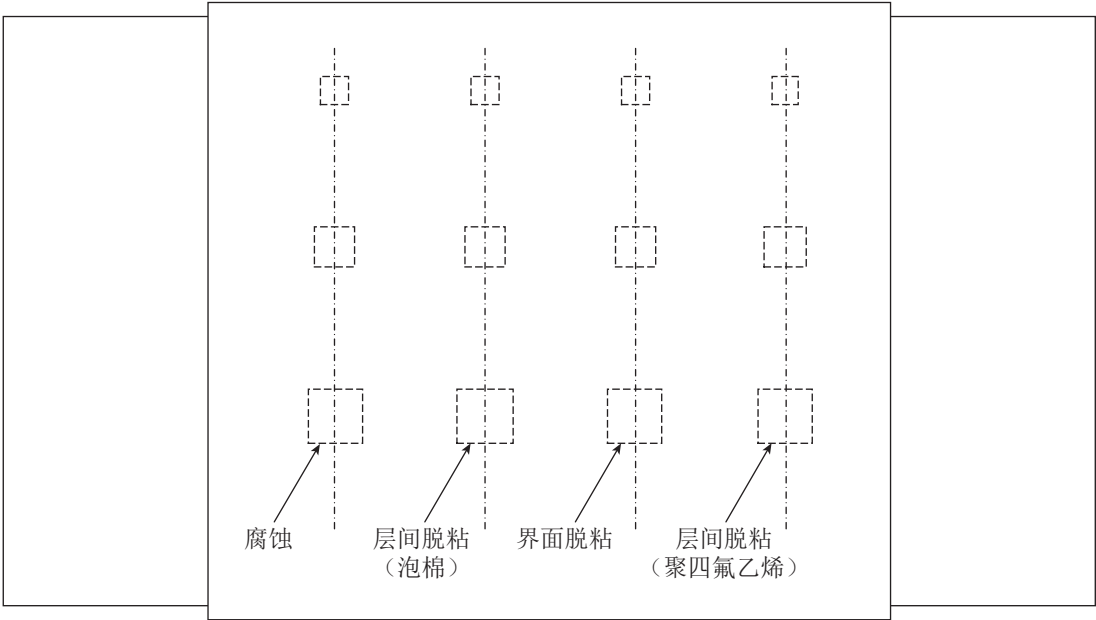


图 4 试样缺陷分布

Fig. 4 Defect distribution in the specimens

从图 4 中可以看出, 每段修复层内部均埋有模拟管体表面腐蚀缺陷(机加工打薄), 模拟修复层与管体界面脱粘缺陷(泡棉)以及模拟修复层层间脱粘缺陷(泡棉和聚四氟乙烯)四种类型的缺陷。其中每类缺陷包含三个不同大小的人工缺陷。试样中详细的缺陷位置及尺寸, 见表 1。

表 1 试样缺陷尺寸设计

Table 1 Defect size design for the specimens.

缺陷类型	缺陷构成	缺陷大小	缺陷厚度
管体表面腐蚀缺陷	均匀减薄区域	20.0 mm × 20.0 mm 30.0 mm × 30.0 mm 40.0 mm × 40.0 mm	2.0 mm
修复层管体界面脱粘缺陷	泡棉	20.0 mm × 20.0 mm 30.0 mm × 30.0 mm 40.0 mm × 40.0 mm	1.0 mm
修复层层间脱粘缺陷	聚四氟乙烯	20.0 mm × 20.0 mm 30.0 mm × 30.0 mm 40.0 mm × 40.0 mm	1.0 mm
	泡棉	20.0 mm × 20.0 mm 30.0 mm × 30.0 mm 40.0 mm × 40.0 mm	1.0 mm

从表 1 中可以看出, 每种类型的缺陷都包含三种不同尺寸, 用于研究对不同尺寸缺陷的检测能力。此外, 修复层层间脱粘缺陷包含了两种不同材料进行模拟, 管体表面腐蚀缺陷是通过对管体打磨进行均匀减薄来模拟, 厚度均为 2.0 mm, 而其他缺陷厚度均为 1.0 mm。

传统的手动超声检测应用于大面积的管道复合材料修复层时效率低下, 无法检测缺陷全貌, 因此研究引入自动化阵列超声检测系统对修复层进行检测, 如图 5 所示。

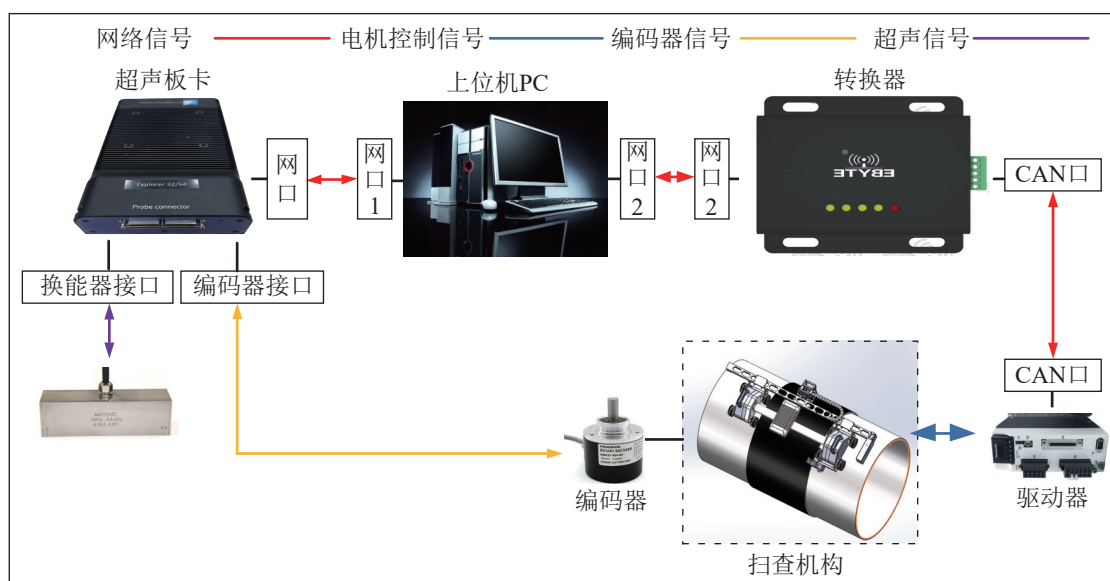


图 5 修复层自动超声扫查系统结构

Fig. 5 Automated ultrasonic scanning of the repair layer

从图 5 中可以看出,该自动化扫查系统主要由双驱动单元、超声板卡,扫查轴等部分组成,通过上位机的两个网口分别传输超声信号和电机驱动器信号,驱动器控制驱动单元运动。其中,步进轴驱动单元可磁性吸附于管道表面,沿着垂直于管道母线方向运动,扫查轴携带阵列超声检测探头沿着管道母线方向运动,从而进行管道修复层的栅格线性 C 扫描。

实验过程采用的换能器是 32 阵元线性阵列探头,中心频率为 1 MHz,阵元间距为 1.5 mm,阵元数量为 32,激发孔径为 8,聚焦深度 12 mm,使用的楔块高度为 20 mm,声速为 2337 m/s,超声探头与修复层通过喷水进行耦合。通过对复合材料修复层试样采集阵列超声数据,并导入 MATLAB 软件进行后处理 C 扫描成像分析。

1.2.2 试验流程设计

试验旨在通过自动化阵列超声检测系统对管道碳纤维复合材料修复层中的缺陷进行高效、准确的检测,并对缺陷的空间分布及尺寸进行定量分析。

首先对试样表面进行全面清洁和打磨处理,确保其表面无杂质和不平整部分,避免出现超声探头和试样之间难以耦合问题。在此基础上,通过预先对复合材料修复层的仿真分析,确定合适的检测参数,包括选择阵列超声换能器主频、激发孔径、采样率等,以确保信号的准确采集和数据的高质量重建。

接着,确定复合材料修复层的扫描区域和扫描速度,在扫描检测阶段通过步进驱动单元实现探头沿管道母线方向的精确线性扫描,同时,超声探头通过步进轴在垂直方向上逐步运动,覆盖整个管道修复层区域。在扫描过程中,实时采集到的反射信号将经过超声成像系统进行初步处理,主要包括去噪、衰减补偿、归一化等操作,并初步成像显示。

最后,将采集到的超声信号导入 MATLAB 处理软件,设置合适的时间闸门,成像阈值等参数,生成高质量的碳纤维复合材料修复层阵列超声 C 扫描图像。同时,根据 C 扫描图像对修复层中的各类缺陷进行精准定位,并根据回波特征与设计尺寸进行比对,确定缺陷的位置、形态和尺寸。

此试验流程通过严格的试样制备、精确的扫描数据采集与高效的图像处理手段,确保了缺陷检测的高效性、准确性与可重复性,为管道复合材料修复层的超声检测技术发展奠定了坚实的基础。

1.2.3 试验结果分析

分别通过均质化声速法和声线示踪法计算聚焦法则,使用二维扫查器采集阵列超声线扫 C 扫描数据,成

像闸门均设置在二次回波位置, C 扫成像结果, 如图 6 所示。

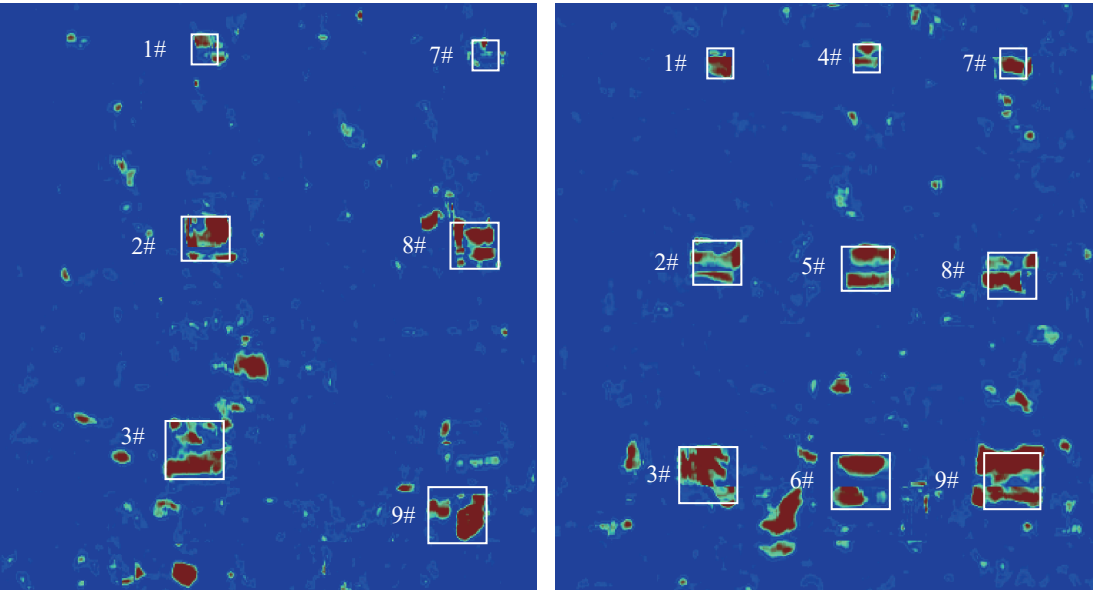


图 6 修复层检测 C 扫图像

Fig. 6 C-scan image of the repair layer inspection

从图 6 中可以看出, 使用均质化声速法进行 C 扫描成像, 仅能对修复层层间脱粘缺陷进行检测, 对修复层管体界面脱粘缺陷和管体表面腐蚀缺陷均无法有效成像, 且部分缺陷出现位移和形状发生畸变, 这是由于声束无法有效聚焦引起的。而使用声线示踪法进行 C 扫描成像, 所有的层间脱粘缺陷和界面脱粘缺陷均被检测成像, 可以区分粘接界面的完好与否; 但是管体表面腐蚀缺陷无法检测出来, 这是由于腐蚀区域树脂渗透, 声波能量衰减变大, 回波信号微弱, 难以有效成像。相比于传统的均质化声速方法, 使用声线示踪法检测管道碳纤维复合材料缺陷漏检率降低 25%, 验证了方法的可行性。

为了量化检测效果, 使用-6 dB 法定量缺陷的大小, 并与真实缺陷尺寸对比, 计算成像精度, 见表 2。

表 2 缺陷定量尺寸对比

Table 2 Quantitative defect size comparison

缺陷编号	真实尺寸/mm	声线示踪法-6 dB 尺寸/mm	均质化声速法-6 dB 尺寸/mm	精度提高/%
1#	20.0 × 20.0	15.6 × 14.3	13.8 × 10.2	20.6
2#	30.0 × 30.0	32.4 × 25.8	33.4 × 33.6	31.8
3#	40.0 × 40.0	38.5 × 41.2	43.9 × 29.3	18.8
4#	20.0 × 20.0	17.5 × 17.2	-	-
5#	30.0 × 30.0	31.9 × 29.7	-	-
6#	40.0 × 40.0	38.8 × 45.4	-	-
7#	20.0 × 20.0	21.5 × 23.0	13.8 × 10.3	88.1
8#	30.0 × 30.0	34.2 × 34.3	29.7 × 21.8	58.4
9#	40.0 × 40.0	44.6 × 39.3	22.2 × 34.4	61.8

从表 2 中可以看出, 整体上使用声线示踪法计算的缺陷尺寸更加接近真实缺陷尺寸, 缺陷定量平均精度提高了 46.6%。其中对于用泡棉模拟的层间脱粘缺陷(1#, 2#, 3#), 使用声线示踪法提升的精度小于用聚四氟乙烯模拟的层间脱粘缺陷(7#, 8#, 9#), 说明相较于聚四氟乙烯, 泡棉由于其结构疏松, 能够更好地模拟试样中的脱粘缺陷, 因此在 C 型图像中表现出更加清晰的缺陷图像。而对于同样由泡棉模拟的修复层与管体界面脱粘缺陷(4#, 5#, 6#), 使用声线示踪法可以有效检测到, 但是相比于(1#, 2#, 3#)的修复层脱粘缺陷, 缺

陷定量尺寸偏差变大,使用均质化声速法则完全无法检测,说明深层区域对于声波衰减性变大,回波幅值被削弱,缺陷检出能力变弱。

2 结果现象讨论

2.1 缺陷漏检率降低 25% 的原因分析

从实验检测结果来看,使用均质化声速法 C 扫成像在 12 个预埋缺陷中只检测出 6 个缺陷,漏检率为 50%,而使用声线示踪法 C 扫成像在 12 个预埋缺陷中检测出 9 个缺陷,漏检率为 25%。相比与传统的均质化声速法,使用声线示踪法对碳纤维复合材料修复层进行 C 扫描成像,缺陷漏检率降低了 25%。

为了直观分析漏检率降低的原因,需要计算在碳纤维复合材料修复层中的传播时间。2018 年, Lin 等提出使用基于模型底面反射法(back-wall reflection method, BRM) [33] 计算 qP 波在复合材料碳纤维层压板中的传播时间,解决了传统全聚焦方法对于碳纤维复合材料层压板检测灵敏度低的问题,证明了在提供准确速度模型的前提下,基于模型的方法计算碳纤维复合材料中 qP 波传播时间是有效的,如图 7 所示。

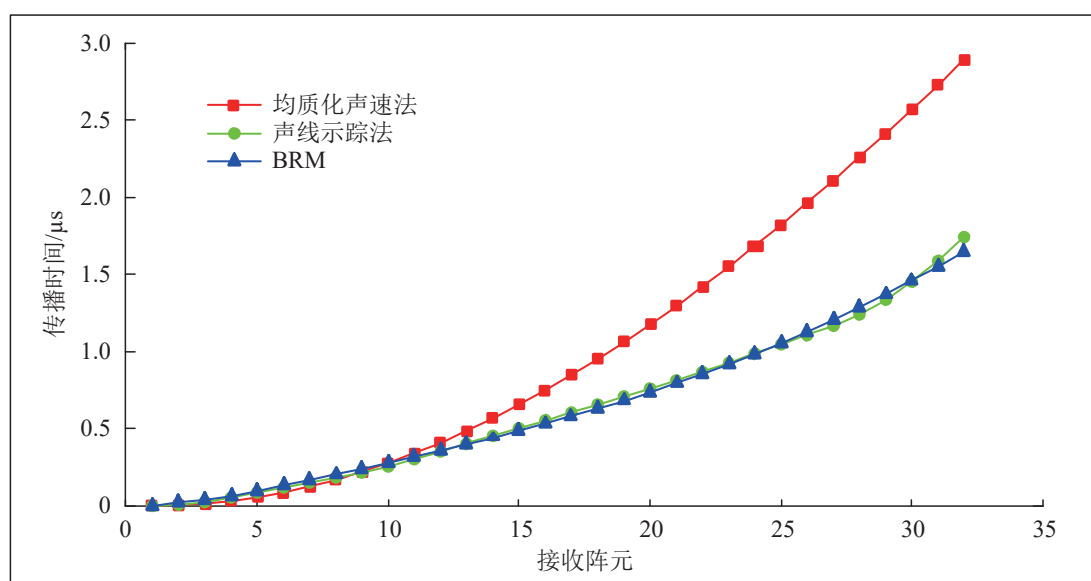


图 7 三种不同方法计算的 qP 波传播时间差曲线

Fig. 7 The qP wave propagation time difference curves calculated by three different methods

从图 7 中可以看出,在使用均质化声速计算声传播时间,只有前 10 个阵元接近 BRM 实验测量值,当接收阵元与发射阵元的距离更远时,两者差值迅速增加;而声线示踪法所有阵元计算的声传播时间都与 RBM 测得的值接近,说明声线示踪法计算的声传播时间与真实复合材料修复层中声波传播时间相近,聚焦性能得到提升,具备更加的检测能力。这与文献 [33] 中 Lin 等通过仿真建立复合材料碳纤维多向板模型,模拟 BRM 测量得到的 qP 波传播时间的结果呈现高度一致性。文献 [30] 中,周正干等解释说明了这种现象是由于碳纤维复合材料中多层结构的层间多次反射以及层间碳纤维各向异性引起声波传播行为发生偏差导致的,不能直接等效于在各向同性介质中传播,仅当入射声波波长远大于碳纤维复合材料的单铺层厚度的前提下,均质化声速法计算的传播时间接近实际值。

因此,使用声线示踪法进行 C 扫描成像,可以准确计算每个阵元发射声波到达聚焦目标位置的声传播时间和传播路径,相比与传统的均质化声速方法,在相同激发孔径条件下,声线示踪法能够实现更为精准的声束聚焦。这不仅提高了声波的传播能量,还使声波能够穿透更深的区域,进而提升了检测的深度和精度。特别是在检测碳纤维复合材料中的底部修复层与管体界面脱粘缺陷时,声线示踪法能够准确捕捉到回波信

号。这是因为声波在聚焦时能有效地集中能量, 确保能够到达较深的区域并准确反射回来, 从而识别这些较为隐蔽的缺陷。

但是, 声线示踪法在聚焦和深度检测方面具备优势, 但是由于腐蚀区域树脂渗漏, 导致声波传播过程中能量的显著衰减, 进一步减弱了回波信号, 同时声波在变厚的树脂层之间多次反射同样导致能量的耗散, 使得检测的灵敏度和准确性降低。在这种情况下, 声波的传播路径和能量分布受到影响, 从而导致腐蚀缺陷的回波信号可能难以被有效捕捉。这也是声线示踪法依旧无法检测出管体与修复层界面的腐蚀缺陷的原因。

2.2 缺陷定量平均精度提高 46.6% 的原因分析

由于实验试样中预埋缺陷均为面积型缺陷, 以 -6 dB 法定量的缺陷面积和实际缺陷的面积比来代表精度, 声线示踪法提升的精度计算方法见式(6)。

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_0} \quad (6)$$

式中: p_1 和 p_2 分别表示声线示踪法和均质化声速法定量缺陷的精度, S_1 、 S_2 和 S_0 分别表示声线示踪法定量缺陷面积、均质化声速法定量缺陷面积和实际缺陷面积。因此, 可以计算出声线示踪法定量缺陷平均精度提高了 46.6%。

为了直观分析精度提高的原因, 建立碳纤维复合材料 COMSOL 仿真模型, 模型底部设置分层缺陷, 同时确保可以接收到缺陷位置的回波信号, 分别设置声线示踪法和均质化声速法计算的聚焦法则, 直观显示声线示踪法和均质化声速法计算的聚焦法则在复合材料修复层中的传播情况, 如图 8 所示。

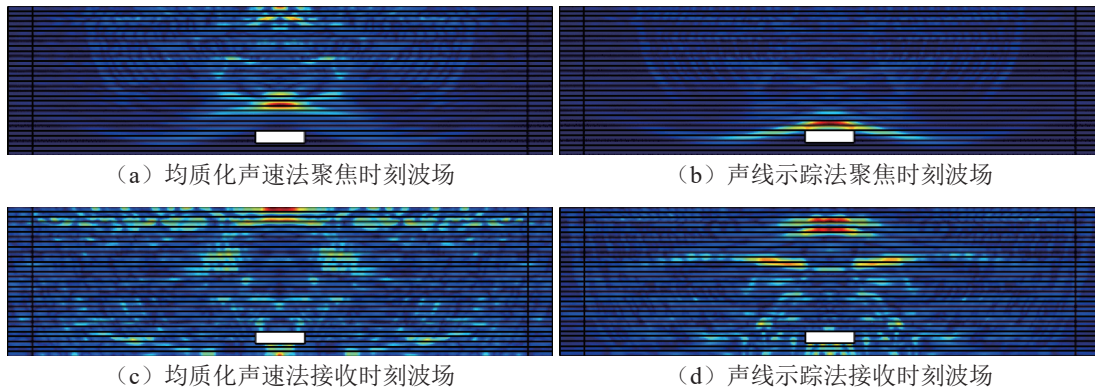


图 8 两种方法不同时刻的波场图

Fig. 8 Ultrasonic wave field diagrams of two methods at different times

从图 8 中可以看出, 采用均质化声速法计算的聚焦法则无法在碳纤维复合材料中准确聚焦到缺陷位置, 且传播路径存在复杂的声波散射现象, 同时接收回波能量涣散, 回波信号干扰严重; 而采用声线示踪法计算的聚焦法则可以准确控制声束在碳纤维复合材料中聚焦到缺陷位置, 聚焦声波覆盖缺陷边缘, 声波多路径效应和散射减弱, 同时接收的回波能量同样聚焦, 信号干扰减弱。正如文献 [24] 中指出的, 使用均质化声速法会过度简化材料特性, 忽略了材料在不同方向上声学性质的差异, 这导致声波在传播过程中产生偏离理想路径的现象。此外, 由于碳纤维和树脂层界面的阻抗差异, 声波会发生复杂的散射, 均质化声速法无法准确预测这种散射效应, 造成能量的分散和衰减, 而声线示踪法通过考虑材料的微观结构, 能够更好地描述声波与材料界面的相互作用。

在可检缺陷的前提下, 声线示踪法能够有效减弱由于波束散射或多路径效应带来的影响, 增强了回波信号的强度, 直接表现为在 C 扫图像中伪像变少, 缺陷边缘相形貌更加清晰, 能够精确反映缺陷的实际尺寸和位置, 从而减少了测量误差, 提高了检测精度。相比之下, 均质化声速法由于忽略了材料内部的局部各向异性, 导致声波传播时聚焦声束发生偏差, 回波信号中成分复杂, 包含大量的层间散射信号, 在 C 扫图像中表

现为伪像增加、缺陷位置发生位移、缺陷形状发生畸变等现象,导致测量误差较大,精度较差。

因此,声线示踪法在缺陷定量方面展现了明显优势,有效避免了声波的过度衰减和散射,提高了缺陷尺寸测量的准确性,提升了检测精度。

3 结论

将阵列超声声线示踪 C 扫描成像方法引入管道复合材料修复层缺陷检测是完全可行且有效的,该方法首先通过理论分析碳纤维复合材料修复层声学特性,建立仿真模型优化检测参数,然后根据声束示踪法计算阵列超声线性扫查聚焦法则,最后通过磁吸式扫查器采集 C 扫检测数据并进行成像分析。通过制备预埋管体腐蚀缺陷、管体与修复层界面脱粘缺陷以及修复层层间脱粘缺陷的管道复合材料修复试样进行检测成像试验,并与传统均质化声速检测方法进行对比,得到如下结论:

(1)通过本文研究,使用传统均质化声速法进行阵列超声 C 扫描成像,由于无法对声束有效聚焦,仅能对修复层层间脱粘缺陷进行检测,且缺陷形状位置发生畸变和位移;方法对所有的层间脱粘缺陷和界面脱粘缺陷均可有效检测,可以区分粘接界面的完好与否;相比均质化声速法,缺陷漏检率降低 25%,缺陷定量平均精度提高了 46.6%,进一步验证了方法的有效性。

(2)目前研究结果表明还存在管道腐蚀缺陷无法被有效检测的问题,这是因为管道腐蚀缺陷本身位于修复层底部,声波受到碳纤维各向异性、层间多次反射和高衰减性影响较大,且腐蚀缺陷特性导致修复层树脂大量渗入,声波能量衰减急剧变大,即使声束可以有效聚焦,能反射回来的声波依旧能量非常弱甚至无法被有效接收。

(3)未来可以通过频率选择性补偿技术对衰减较大的声波频段进行增强以及优化阵列超声换能器降低树脂对声波传播的影响等方法解决管道碳纤维复合材料修复层管体腐蚀缺陷的无损检测。

致谢

感谢单位和单位在研究实施过程和论文撰写过程中提供的一切帮助。感谢个人在研究过程中给予的支持和协调。

稿件申明

1. 论文所有作者都同意文章中的作者排名,不存在排名争议,对文章中的学术观点一致,对文章中涉及的结论建议意见一致。

2. 文章涉及的内容不存在学术不端的问题。

署名贡献声明

李荣光:提出研究选题,设计研究方案。

朱甜甜:实验探究,文章撰写。

孙伶:实验数据整理及分析。

陈斯迅:实验材料支持。

周文彬:文章审阅修和修改。

周正干:最终审阅定稿。

利益冲突说明

1. 论文不涉及企业技术商业秘密。

2. 专家审稿时没有需要避讳的问题。

数据可用性声明

本研究中涉及的所有原始数据、分析脚本及研究过程中产生的其他相关数据资料,均已妥善保存并可通过合理请求获得。为确保数据的隐私与安全,以及遵守相关伦理与法律要求,部分敏感或个人信息已进

行脱敏处理。研究者鼓励并欢迎其他学者基于本研究数据进行进一步的探索与分析。如有数据访问需求, 请通过电子邮件联系通信作者, 并在邮件中明确说明数据使用目的、研究计划以及预期的研究成果。我们将在收到请求后的合理时间内, 根据数据共享政策与程序, 对请求进行评估并作出回应。

参考文献

- [1] 李荣光, 杜娟, 赵国星, 等. 油气长输管道管体缺陷及修复技术概述 [J]. [石油工程建设](#), 2016, 42(1): 10-13. //LI Rong-guang, DU Juan, ZHAO Guoxing, et al. Overview of long distance oil/gas pipeline defects and repair technology [J]. [Petro-leum Engineering Construction](#), 2016, 42(1): 10-13.
- [2] 张李, 王祯中, 贾向明, 等. 油气管道本体缺陷修复方法及现场应用 [J]. [中国石油和化工标准与质量](#), 2019, 39(20): 115-116. //ZHANG li, WANG Zhenzhong, JIA Xiangming, et al. Repair methods for defects in oil and gas pipelines and their on-site applications [J]. [China Petroleum and Chemical Standard and Quality](#), 2019, 39(20): 115-116.
- [3] 刘永忠. 碳纤维复合材料补强技术在输油管道维修中的应用 [J]. [粘接](#), 2019, 40(12): 61-64. //LIU Yongzhong. Application of carbon fiber composite reinforcement technology in oil pipeline maintenance [J]. [Adhesion](#), 2019, 40(12): 61-64.
- [4] 杨寄诚, 王言聿. 复合材料缠绕修复管道的应变分析 [J]. [机械强度](#), 2020, 42(1): 55-60. //YANG Jicheng, WANG Yanyu. Strain analyses of repaired pipelines by enwrinding composite materials [J]. [Journal of Mechanical Strength](#), 2020, 42(1): 55-60.
- [5] Łukasz MAZURKIEWICZ, Jerzy MALACHOWSKI, Michał TOMASZEWSKI, et al. Performance of steel pipe reinforced with composite sleeve [J]. [Composite Structures](#), 2018, 183: 199-211.
- [6] Shamsuddoha MD; Manalo ALLAN, Aravinthan THIRU, et al. Failure analysis and design of grouted fibre-composite repair system for corroded steel pipes [J]. [Engineering Failure Analysis](#), 2021, 119: 104979.
- [7] 张保龙, 王彬彬, 成志强. 复合材料修复含环向裂纹管道试验研究 [J]. [成都大学学报 \(自然科学版\)](#), 2019, 38(2): 194-198. //ZHANG Baolong, WANG Binbin, CHENG Zhiqiang. Experimental study on pipelines with circumferential crack repaired by composite materials [J]. [Journal of Chengdu University\(Natural Science Edition\)](#), 2019, 38(2): 194-198.
- [8] 孙传青. 玻璃纤维复合材料用于干线管道整体加强适用性分析 [J]. [化工管理](#), 2020(24): 166-167. //SUN Chuanqing. Analysis of the applicability of glass fiber reinforced composites for main pipeline overall reinforcement [J]. [Chemical Engineering Management](#), 2020(24): 166-167.
- [9] Fatima Ghassan AI-ABTAH, E. MAHDI, Samir GOWID. The use of composite to eliminate the effect of welding on the bending behavior of metallic pipes [J]. [Composite Structures](#), 2020, 235: 111793.
- [10] CHEN Jiaqi, WANG Hao, SALEMI Milad, et al. Finite element analysis of composite repair for damaged steel pipeline [J]. [Coatings](#), 2021, 11(3): 301.
- [11] 何毅, 赵广慧. 复合材料增强修复油气管道的研究进展 [J]. [中国塑料](#), 2022, 36(4): 70-82. //HE Yi, ZHAO Guanghui. Research progress in repairing and reinforcement of oil and gas pipeline with composites [J]. [China Plastics](#), 2022, 36(4): 70-82.
- [12] 张荣华, 史可宇, 何家俊, 等. 平纹编织碳纤维复合材料的块均质化建模及其涡流无损检测 [J]. [天津工业大学学报](#), 2020, 39(5): 61-66. //ZHANG Ronghua, SHI Keyu, HE Jiajun, et al. Block homogenization modelling method and eddy current nondestructive testing of plain-woven CFRPs [J]. [Journal of Tiangong University](#), 2020, 39(5): 61-66.
- [13] 李红利, 李硕, 修春波, 等. 基于电磁式阵列传感器的平纹编织碳纤维复合材料检测方法 [J]. [天津工业大学学报](#), 2022, 41(3): 48-54. //LI Hongli, LI Shuo, XIU Chunbo, et al. Detection method of plain weave carbon fiber reinforced plastics based on array electromagnetic sensor [J]. [Journal of Tiangong University](#), 2022, 41(3): 48-54.
- [14] 廖见明. 射线检测在复合材料无损检测中的应用 [J]. [现代物业 \(中旬刊\)](#), 2019(1): 28. //LIAO Jianming. A preliminary discussion on the application of radiographic testing in nondestructive testing of composite materials [J]. [Modern Property Management](#), 2019(1): 28.
- [15] 李琼艳, 王蕴怡, 王嘉鹭, 等. 对 X 射线检测技术在复合材料检测中的应用探讨 [J]. [智库时代](#), 2019(19): 241-243. //LI Qiongyan, WANG Yunyi, WANG Jialu, et al. Exploration of the application of x-ray inspection technology in composite material testing [J]. [Think Tank Era](#), 2019(19): 241-243.
- [16] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X 射线 CT 成像检测方法对复合材料内部分层缺陷检测结果的影响研究 [J]. [玻璃钢/复合材料](#), 2019(3): 86-91. //DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. Influence of X-ray CT imaging detection method on testing results of delamination defects in composite material [J]. [Composites Science and Engineering](#), 2019(3): 86-

91.

- [17] 李小丽, 陈新波, 单柏荣, 等. 飞机复合材料分层缺陷的 CT 与 X 射线检测对比试验研究 [J]. 无损探伤, 2020, 44(5): 41-43. //LI Xiaoli, CHEN Xinbo, SHAN Borong, et al. Comparative experimental study on CT and X-ray detection of delamination defects in aircraft composite materials [J]. Nondestructive Testing Technology, 2020, 44(5): 41-43.
- [18] 章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像自动化快速扫描检测技术 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 78-83. //ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated x-ray digital radiography scanning imaging technique [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 78-83.
- [19] 杨玉森, 魏然. 复合材料层压板冲击损伤的无损检测与评估 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(1): 63-68. //YHAN Yusen, WEI Ran. Nondestructive testing and evaluation of impact damage in composite laminates [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(1): 63-68.
- [20] 南方, 肖鹏. 复合材料结构表面状态的红外热成像检测影响研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 83-87. //NAN Fang, XIAO Peng. Research of composites surface influence on thermography detection technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 83-87.
- [21] 郭德伟, 马其华. CFRP 薄壁管红外热成像和 CT 检测的研究分析 [J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(3): 294-298. //GUO Dewei, MA Qihua. Research and analysis of infrared thermography and CT detection of thin-walled CFRP tube [J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(3): 294-298.
- [22] 朱笑, 袁丽华. 基于红外热成像的 CFRP 复合材料低速冲击损伤表征 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4164-4171. //ZHU Xiao, YUAN Lihua. Low-velocity impact damage characterization of CFRP composite based on infrared thermography [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4164-4171.
- [23] 裴翠祥, 陈振伟, 王志, 等. 新型光束匀化激光红外热成像检测系统及应用 [J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1485-1491. //PEI Cuixiang, CHEN Zhenwei, WANG Zhi, et al. Study on new beam homogenization laser infrared thermography system and applications [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10): 1485-1491.
- [24] LIN Li, CAO Huanqing, LUO Zhongbing. Dijkstra's algorithm-based ray tracing method for total focusing method imaging of CFRP laminates [J]. Composite Structures, 2019, 215: 298-304.
- [25] I. Infanta Mary PRIYA, B. K. VINAYAGAM. Detection of damages on biaxial GFRP composite material using non-destructive technique[J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(5): 2569-2603.
- [26] CAO Huanqing, GUO Shifeng, ZHANG Shuxiao, et al. Ray tracing method for ultrasonic array imaging of CFRP corner part using homogenization method [J]. NDT & E International, 2021, 122: 102493.
- [27] 曹弘毅, 马蒙源, 丁国强, 等. 复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估 [J]. 材料工程, 2021, 49(2): 149-157. //CAO Hongyi, MA Mengyuan, DING Guoqiang, et al. Delamination defects testing and evaluation of composite laminates using phased array ultrasonic technique [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(2): 149-157.
- [28] 张婷, 黄爱华, 李向前. 褶皱缺陷的检测及对力学性能的影响研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 78-83. //ZHANG Ting, HUANG Aihua, LI Xiangqian. Research on wrinkle defects inspection and influence of wrinkle defects on mechanical properties [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 78-83.
- [29] Vandendriessche JEROEN; Orta Adil HAN; Verboven ERIK, et al. Probabilistic ultrasound C-scan imaging of barely visible impact damage in CFRP laminates [J]. Composite Structures, 2022, 284.
- [30] 周正干, 朱甜甜, 马腾飞, 等. 先进树脂基复合材料纤维褶皱缺陷阵列超声全聚焦成像 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4384-4392. //ZHOU Zhenggan, ZHU Tiantian, MA Tengfei, et al. Array ultrasonic total-focus imaging detection technology for advanced resin matrix composite fiber fold defect arrays [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4384-4392.
- [31] 王俊, 周正干, 王进, 等. 基于线阵和环阵换能器的 CFRP 层压板超声成像特性研究分析 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 30-39. //WANG Jun, ZHOU Zhenggan, WANG Jin, et al. Research and analysis on ultrasonic imaging characteristics of CFRP laminates based on linear and annular array transducers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(10): 30-39.
- [32] MA Tengfei, ZHOU Zhenggan, LI Yang, et al. Point-cloud acquisition in CFRP composites using ultrasonic location estimation with the phase-shift reference pulse [J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109557.
- [33] LIN Li, CAO Huanqing, LUO Zhongbing. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay correction [J]. NDT & E International, 2018, 97: 51-58.