

电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究

谭京淑 曹福同

山东同新检测工程有限公司 山东 淄博 255088

摘要: 本文聚焦电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究,阐述了该技术原理,包括电磁脉冲、涡流检测及二者结合的工作原理。并介绍了金属管道常见缺陷类型,分析其对检测信号的影响。然后说明检测系统组成,设计实验并处理数据。探讨其在管道焊缝、内壁、接头、腐蚀与坑蚀检测等场景的应用。研究表明,该技术能精准识别与量化评估金属管道缺陷,为保障管道安全运行提供有效手段。

关键词: 电磁脉冲涡流检测; 金属管道; 缺陷检测

引言: 金属管道作为工业与民用领域的关键基础设施,其安全运行至关重要。然而,长期使用中,管道易受腐蚀、应力、焊接工艺等因素影响,产生各类缺陷,威胁管道安全。传统检测方法存在效率低、精度不足等问题。电磁脉冲涡流检测技术融合电磁脉冲与涡流检测优势,能精准识别与量化评估金属管道缺陷。本文将深入探讨该技术原理、系统设计及多场景应用,为管道安全检测提供新思路。

1 电磁脉冲涡流检测技术原理

1.1 电磁脉冲基础

电磁脉冲是短时高能的电磁辐射,依赖特定能量转换系统产生。高压直流电源为能量存储单元充电,达设定阈值后,快速高功率开关瞬间导通,存储电能可在极短时间内释放,形成强脉冲电流。此电流经发射线圈,激发出变化快、频域广的脉冲磁场。该磁场瞬时性强、强度高,能穿透金属管道表层,为涡流感应创造条件。其脉冲参数(如宽度、峰值电流)可调,能适配不同材质、壁厚

1.2 涡流检测技术原理

涡流检测以电磁感应定律为理论基石。通交流电的检测线圈靠近金属管道,产生的交变磁场穿过管道表层,在内部感应出闭合涡流回路。涡流产生新交变磁场,与原始磁场方向相反,致检测线圈阻抗改变。若管道有缺陷,缺陷处电导率、磁导率异常,会改变涡流分布、大小与路径,进而影响伴随磁场特性,最终通过线圈阻抗变化反映。检测设备监测阻抗幅值、相位变化,可判断管道缺陷,对表面及近表面缺陷敏感且无需直接接触,能快速检测。

1.3 电磁脉冲涡流检测的工作原理

电磁脉冲涡流检测以脉冲电流替代正弦交流电作激励源。检测时,脉冲激励源向发射线圈输入高强度脉冲电流,

产生脉冲磁场作用于金属管道,感应出脉冲涡流。脉冲涡流传播中,因管道材质、壁厚及缺陷而衰减畸变,同时产生二次磁场,被接收线圈捕获并转为电压信号。因脉冲信号频域丰富,不同频率渗透深度不同,可检测管道不同深度区域^[1]。检测系统分析电压-时间衰减曲线,提取特征参数,与管道壁厚、缺陷等对应,实现精准识别与量化评估。

2 金属管道常见缺陷类型及对检测的影响

2.1 常见缺陷类型

2.1.1 腐蚀缺陷

腐蚀缺陷是金属管道长期使用中,因化学或电化学反应形成的典型缺陷,与管道所处环境、输送介质相关。管道与空气、水或腐蚀性介质接触,表面金属原子发生反应致材料流失。它分均匀腐蚀和局部腐蚀,前者使管道整体厚度均匀减薄,影响承载能力;后者在局部形成腐蚀坑、沟槽等,如含硫介质管道易点蚀。这类缺陷会削弱管道结构强度,未及时检测可能致管道泄漏,引发安全事故或环境污染。

2.1.2 裂纹缺陷

裂纹缺陷主要由金属管道承受的应力、疲劳及温度变化等因素引发。安装、运行中,外力超材料极限或长期交变应力,管道内部会产生微裂纹并扩展。按走向分横向和纵向裂纹,横向对强度影响大,易致断裂;纵向多由残余或拉伸应力引发。温度骤变产生热应力超韧性极限也会产生裂纹。裂纹隐蔽性强、扩展快,是威胁管道安全运行的重要隐患。

2.1.3 焊接缺陷

焊接缺陷是金属管道连接过程中因焊接工艺不当、操作失误或材料匹配问题产生的缺陷,常见类型包括未焊透、未熔合、气孔和夹渣。未焊透指焊接接头根部未完全熔合,存在缝隙,主要因焊接电流过小、焊接速度

过快或坡口设计不合理导致；未熔合指焊缝金属与母材或焊缝金属之间未完全熔合，形成局部未连接区域，多由焊接热输入不足、焊条角度不当引起；气孔是焊接过程中熔池中的气体未及时逸出，在焊缝中形成的孔洞，与焊接材料受潮、保护气体纯度不足有关；夹渣则是焊接熔池中混入的非金属杂质未被清除，残留在焊缝中。这些焊接缺陷会降低焊缝的强度和密封性，在管道承受压力时，易成为应力集中点，引发焊缝开裂或介质泄漏^[2]。

2.2 缺陷对电磁脉冲涡流检测信号的影响

2.2.1 不同缺陷类型导致的信号特征差异

金属管道不同类型缺陷，会使电磁脉冲涡流检测信号特征差异明显，为缺陷类型识别提供依据。腐蚀缺陷使管道壁厚均匀或局部减薄，涡流流通面积改变，检测信号表现为电压幅值整体降低，衰减速率平缓，无明显突变；裂纹缺陷阻断涡流路径，使其绕行，局部涡流密度增大，信号出现明显幅值突变，相位偏移大，突变位置对应裂纹位置；焊接缺陷中，未焊透、未熔合形成缝隙，涡流扰动强烈，信号幅值不规则波动；气孔和夹渣使局部磁导率变化，信号相位间歇性偏移，波动频率与缺陷数量、分布密度相关，分析这些差异可初步判断缺陷类型。

2.2.2 缺陷尺寸和深度与信号强度的关系

金属管道缺陷尺寸（长、宽）和深度与电磁脉冲涡流检测信号强度正相关。缺陷尺寸增大，干扰涡流场范围扩大，更多涡流路径改变，二次磁场变化明显，信号强度（幅值）增大。如腐蚀区域面积越大，信号幅值降低越显著；裂纹长度、宽度增加，幅值突变更强烈。缺陷深度增加，影响涡流深度加深，脉冲涡流能量损耗加剧，信号幅值衰减速率加快，峰值位置延迟。缺陷深度接近壁厚时，信号强度剧变甚至超范围。建立缺陷尺寸、深度与信号强度的定量关系模型，可评估缺陷严重程度。

3 电磁脉冲涡流检测系统设计与实验

3.1 检测系统组成

电磁脉冲涡流检测系统由传感器模块、信号激励模块、数据采集模块和数据处理与控制模块四部分组成，各模块协同工作完成管道缺陷检测任务。传感器模块包含发射线圈和接收线圈，发射线圈用于产生脉冲磁场，接收线圈用于捕获管道中涡流产生的二次磁场信号，线圈的匝数、尺寸根据检测管道的直径、壁厚进行定制，以确保磁场覆盖范围和信号灵敏度；信号激励模块由高压直流电源、能量存储电容和快速开关组成，负责生成符合检测需求的脉冲电流，通过调节电源电压和电容参数，可改变脉冲电流的峰值和宽度；数据采集模块采用

高精度数据采集卡，将接收线圈输出的模拟电压信号转换为数字信号，采样频率需满足Nyquist定理，确保捕捉到信号的完整特征；数据处理与控制模块以嵌入式处理器为核心，搭载信号分析算法和人机交互界面，实现对检测过程的实时控制、数据存储及缺陷特征提取与识别，同时可将检测结果以图表形式直观展示^[3]。

3.2 实验设计与实施

实验设计以模拟实际金属管道缺陷检测场景为目标，首先选取两种常见材质（碳钢、不锈钢）的管道试件，管道规格涵盖不同直径（50mm-200mm）和壁厚（3mm-10mm），以验证检测系统对不同管道的适应性。在试件上通过机械加工、化学腐蚀等方法制作缺陷样本，包括不同深度（0.5mm-5mm）、长度（5mm-30mm）的腐蚀坑，横向、纵向裂纹，以及未焊透、气孔、夹渣等焊接缺陷，每种缺陷设置5-8个不同参数的样本，确保实验数据的多样性。实验参数设置方面，根据管道材质和壁厚确定脉冲激励电流峰值（5A-20A）、脉冲宽度（10μs-100μs），检测距离控制在1mm-3mm，避免距离过近损伤试件或过远影响信号强度。实验实施时，将管道试件固定在旋转平台上，使传感器沿管道轴线匀速移动，对试件表面及近表面进行全面扫描，每个缺陷样本重复检测3次，记录每次检测的原始信号数据，同时设置无缺陷区域作为空白对照，以排除背景信号干扰。

3.3 实验数据采集与处理

实验数据采集过程中，数据采集卡按照设定的采样频率（1MHz-5MHz）实时采集接收线圈输出的电压-时间信号，将数字信号暂存于缓存区，待单次检测完成后，通过数据传输接口将数据上传至计算机存储，存储格式采用二进制文件，确保数据完整性和后续处理便利性。数据预处理阶段，首先采用小波阈值去噪算法消除环境电磁干扰和设备噪声，保留信号的有效特征；然后通过信号放大电路对微弱信号进行增益调节，使信号幅值处于数据处理的最佳范围；针对信号基线漂移问题，采用线性拟合方法进行基线校正，提高信号的准确性。数据特征提取阶段，运用时域分析方法计算信号的峰值幅值、上升时间、衰减时间常数等时域参数，同时通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，提取信号的主频成分和频谱分布特征；最后采用主成分分析算法对提取的多维度特征参数进行降维处理，筛选出对缺陷识别贡献度最高的关键特征参数，为后续缺陷类型判别和量化评估提供数据支持。

4 应用场景

4.1 管道焊缝缺陷检测

在石油、天然气输送管道工程中,焊缝是管道结构的薄弱环节,易出现未焊透、未熔合等缺陷,电磁脉冲涡流检测技术在此场景中具有显著应用优势。该技术无需与焊缝表面直接接触,可在管道安装完成后快速对焊缝区域进行扫描检测,避免传统超声检测需耦合剂、检测速度慢的问题。检测时,将传感器沿焊缝长度方向移动,脉冲磁场穿透焊缝区域,若存在缺陷,会导致涡流场分布异常,通过分析检测信号的幅值突变和相位偏移,可精准定位缺陷位置^[4]。例如,在长输管道野外施工中,检测人员可携带便携式电磁脉冲涡流检测设备,对每道环形焊缝进行现场检测,检测效率可达每小时20-30道焊缝,且检测结果可实时上传至云端平台,实现焊缝质量的远程监控与评估,有效降低因焊接缺陷引发的管道泄漏风险。

4.2 管道内壁缺陷检测

金属管道内壁缺陷因位置隐蔽,传统检测方法(如目视检测)难以触及,而电磁脉冲涡流检测技术通过特殊设计的内穿式探头,可实现对管道内壁缺陷的有效检测。内穿式探头由柔性载体和阵列式线圈组成,能够适应不同直径的管道内壁,在管道内部自主移动或随输送介质流动,对内壁进行全方位扫描。当探头经过内壁腐蚀坑或裂纹区域时,脉冲磁场在缺陷处产生的涡流发生变化,接收线圈捕捉到信号变化后,传输至外部处理设备进行分析。该技术在城市供水管道检测中应用广泛,城市供水管道长期输送含杂质的水,内壁易形成腐蚀和结垢,采用电磁脉冲涡流检测技术,可在不停止供水的情况下,对管道内壁的腐蚀程度、裂纹深度进行检测,检测精度可达0.1mm,为供水管道的维修更换提供精准数据,保障城市供水系统的稳定运行。

4.3 管道接头缺陷检测

管道接头是连接不同管段的关键部位,常见缺陷包括接头松动、密封失效及裂纹,这些缺陷会导致介质泄漏,影响管道系统的正常运行,电磁脉冲涡流检测技术可针对性解决管道接头缺陷检测难题。检测时,根据接头类型(如法兰接头、承插接头)设计专用探头,探头贴合接头表面,通过脉冲激励产生磁场,若接头存在松动,会导致接头处金属接触间隙增大,涡流流通受阻,检测信

号幅值出现下降;若接头存在裂纹,信号会出现明显相位突变。在化工企业的工艺管道检测中,由于管道输送的多为腐蚀性介质,接头处易因腐蚀产生裂纹,采用该技术可定期对管道接头进行检测,及时发现潜在缺陷。

4.4 管道腐蚀与坑蚀检测

金属管道在潮湿、腐蚀性环境中易发生腐蚀与坑蚀,这类缺陷会逐渐削弱管道壁厚,降低管道的承载能力,电磁脉冲涡流检测技术在管道腐蚀与坑蚀检测中具有高效、精准的特点。检测时,传感器沿管道外壁移动,脉冲磁场穿透管道表层,根据涡流信号的衰减特征,可计算管道的实际壁厚,从而判断腐蚀程度;对于局部坑蚀,由于坑蚀区域壁厚突变,检测信号会出现局部幅值异常,通过信号分析可确定坑蚀的位置、深度和面积。在海洋石油平台的海底管道检测中,管道长期浸泡在海水中,易受到海水腐蚀和海洋生物附着腐蚀,采用该技术可通过水下机器人携带检测设备,对海底管道进行全方位检测,检测范围覆盖管道外壁的所有区域,检测结果可用于评估管道的剩余寿命,为管道的维护保养制定科学方案,保障海底石油输送的安全稳定。

结束语

电磁脉冲涡流检测技术为金属管道缺陷检测提供了创新且高效的解决方案,通过对其原理的深入剖析、系统的实验设计与实施以及多场景的应用探索,充分验证了该技术在缺陷识别与量化评估方面的准确性和可靠性。未来,随着技术的不断优化和完善,其有望在更多领域得到广泛应用,进一步提升金属管道检测的效率和精度,为保障各类管道系统的安全稳定运行发挥更为重要的作用。

参考文献

- [1]杨超,孙虎,唐超.电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究[J].电子测量与仪器学报,2025,39(4):132-140.
- [2]周瑜哲.基于电磁法对金属管道缺陷检测的仿真与试验研究[J].微型电脑应用,2023,39(9):63-67.
- [3]侯怀书,任慧霞.金属管道对接焊缝超声检测缺陷类型识别研究[J].热加工工艺,2019,48(21):143-146,152.
- [4]陈涛,何倩,吕程,等.压力管道缺陷电磁超声/脉冲涡流复合检测方法研究[J].传感技术学报,2023,36(6):860-867.