

管道壁厚在线监测系统的发展与在浆体管道工程中的应用研究

张明航*

中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北武汉, 中国

*通讯作者

【摘要】在现代工业体系中, 金属管道作为关键的传输载体, 广泛应用于石油、石化、市政等众多领域。然而, 金属腐蚀问题给这些行业带来了巨大挑战, 不仅威胁到设施的安全运行, 还导致了严重的经济损失。因此, 腐蚀监测成为工业管道项目的研究重点, 其中管道壁厚在线监测系统在及时发现管道腐蚀、预防事故发生方面发挥着至关重要的作用。本文深入剖析了管道壁厚在线监测系统的发展现状, 全面阐述了其系统组成, 包括现场壁厚数据采集设备以及远程监测系统。详细介绍了智能超声波在线监测和智能场指纹这两种主要的壁厚监测技术, 以及基于这些技术的创新应用。同时, 着重探讨了该系统在浆体管道工程中的应用情况, 分析了应用现状和面临的技术挑战, 并对未来技术发展方向进行了展望, 旨在为相关领域的研究和实践提供全面且深入的参考。

【关键词】腐蚀监测; 浆体管道; 电磁超声; 超声导波; 磁致伸缩导波

【基金项目】中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目“基于固液两相介质动力学机理的浆体输送管道仿真与专家系统开发”(编号: 2024-MS008)

1.引言

1.1 研究背景与意义

在现代工业体系中, 金属管道作为关键的传输载体, 广泛应用于石油、石化、电力、市政等众多领域, 承担着输送石油、天然气、化工原料、水等各类介质的重要任务, 是保障工业生产和社会生活正常运转的“生命线”, 但由于受到输送介质、环境因素以及应力作用的影响, 管道不可避免地会发生腐蚀现象。金属腐蚀[1]是金属与周围环境中的介质发生化学反应或电化学反应, 导致金属材料性能逐渐劣化的过程。据相关统计数据显示, 全球每年因金属腐蚀造成的经济损失高达数千亿美元, 其中管道腐蚀占据了相当大的比例。

为了有效应对金属管道腐蚀问题, 腐蚀监测技术[2]应运而生。在众多腐蚀监测技术中[3], 管道壁厚在线监测系统具有独特的优势。它能够对管道壁厚进行实时、连续的监测, 及时发现管道的减薄情况, 准确判断腐蚀发生的位置和程度。与传统的离线检测方法相比, 管道壁厚在线监测系统具有监测频率高、数据准确性好、响应速度快等优点, 能够实现对管道腐蚀的早期预警, 为及时采取修复措施提供充足的时间。

在浆体管道工程中, 由于浆体的冲刷和腐蚀作用, 管道壁厚减薄速度较快, 传统的

检测方法难以满足实际需求。而管道壁厚在线监测系统能够实时监测管道壁厚的变化, 及时发现管道的薄弱环节, 为浆体管道的安全运行提供有力保障。因此, 深入研究管道壁厚在线监测系统的发展现状及其在浆体管道工程中的应用, 具有重要的理论和实际意义。它不仅有助于推动腐蚀监测技术的创新发展, 提高我国工业管道的安全管理水平, 还能为浆体管道工程的设计、施工和运行维护提供科学的技术支持, 促进浆体管道输送技术的广泛应用和发展。

1.2 国内外研究现状

国外在管道壁厚在线监测技术方面起步较早, 经过多年的研究和实践, 已经取得了一系列先进的技术成果, 并在实际工程中得到了广泛应用[4]。在智能超声波在线监测技术领域, 欧美等发达国家的研究处于领先地位。他们研发的高精度超声波测厚仪, 采用了先进的数字信号处理技术和传感器技术, 能够实现对管道壁厚的快速、准确测量, 一些产品的测量精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$, 能够满足对管道壁厚监测精度要求极高的场合。国外还在超声导波技术方面取得了重大突破, 开发出了适用于不同管径、壁厚和工况条件的超声导波检测系统, 这些系统能够实现对长距离管道的快速检测, 有效识别管道中的各种缺陷和腐蚀情况。

智能场指纹技术[5]也是国外研究的重点方向之一。美国、德国等国家的企业和科研机构，通过不断优化电极矩阵设计和数据处理算法，提高了智能场指纹系统的监测精度和可靠性。他们开发的智能场指纹系统，能够实时监测管道的腐蚀情况，准确计算出管道的减薄量，并对腐蚀形貌进行分析，这些系统已经在油气管网、石化管网等领域得到了广泛应用，取得了良好的效果。

国内在管道壁厚在线监测技术方面的研究起步相对较晚，但近年来发展迅速。随着我国工业的快速发展，对管道安全运行的要求越来越高，国内科研机构和企业加大了对管道壁厚在线监测技术的研发投入，取得了一系列重要成果。在智能超声波在线监测技术方面，国内已经能够自主研发生产多种类型的超声波测厚仪和超声导波检测系统，这些产品在测量精度、稳定性和可靠性等方面不断提高，部分产品的性能已经达到或接近国际先进水平。一些国产超声波测厚仪的测量精度可 $\pm 0.02\text{mm}$ ，能够满足大部分工业管道的壁厚监测需求。国内还在超声导波检测技术的应用方面进行了大量研究，针对不同行业的管道特点，开发出了相应的检测工艺和数据分析方法。

2.管道壁厚在线监测系统概述

2.1 系统组成与工作原理

管道壁厚在线监测系统主要由现场壁厚数据采集设备和远程监测系统组成。

现场壁厚数据采集设备直接安装在管道上，用于获取管道壁厚数据。其工作原理基于不同的测量技术，如超声波测厚技术利用超声波在不同介质中的传播特性来计算壁厚，通过测量超声波在管道中的传播时间，结合已知的声速，得出管道壁厚；智能场指纹技术则通过监测管道表面电场的变化来推断壁厚改变情况，对管道施加恒定电流，记录各矩阵单元的初始电位，当管道发生腐蚀，电场变化，对比电位变化即可得出管道减薄量。

远程监测系统主要由无线数据传输层、中心数据库和数据层及客户端软件展示层组成。无线数据传输层采用 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、GPRS、LoRa 等无线传输技术，将现场采集到的壁厚数据传输到服务器。中心数据库和数据层负责存储传输过来的数据，客户端软件展示层则将分析结果以直观的方式呈现给用户，用户可通过该界面了解管道

壁厚的实时状态和变化趋势。若发现管道壁厚异常变化，系统会及时发出预警信号。

系统工作时，现场壁厚测量设备将采集到的壁厚数据通过传感器转化为电信号或数字信号，经无线数据传输层处理后传输至服务器，存储到中心数据库。客户端软件按设定时间间隔或用户指令从数据库读取数据，运用算法分析计算，综合考虑管道材质、运行环境、历史数据等因素，判断管道腐蚀状况和壁厚变化趋势，最后将分析结果以图表、曲线、数字等形式呈现给用户。

2.2 主要监测技术

2.2.1 智能超声波在线监测

智能超声波在线监测技术[6]包括超声波测厚和超声导波技术。

(1) 超声波测厚技术

脉冲透射法测厚：通过固定在被测工件两侧的超声波发射探头和接收探头，使超声波穿越被测工件，根据超声波能量衰减幅值，运用公式转换获得工件厚度值，适用于厚度测量精度要求高且工件两侧空间充足的场合。

共振干涉法测厚：将两个超声波探头对置在被测工件两侧，一个发射可连续变频的超声波，调节频率使工件厚度等于超声波半波长整数倍时，入射和反射声波干涉形成驻波，利用工件固有频率、超声波在工件中的速度等参数计算工件厚度值，适用于测量精度要求极高且对工件材质和形状有一定要求的场合。

兰姆波法：当超声波以特定频率和角度入射到薄板状工件中产生兰姆波，利用探头角度和频率反向推测工件厚度，适合测量小直径薄壁管的厚度，常用于航空航天、电子等对薄壁管道检测有严格要求的领域。

脉冲反射法测厚：将超声波探头与被测表面耦合，探头激发的超声波在被测件下表面反射后被探头接收，分析材料内部缺陷和底面的反射波形，利用回波时间差和材料内部超声传导速率关系计算管壁厚度。该方法原理简单，适用性强，市面上广泛使用的脉冲式超声波测厚仪频率一般在 1-5MHz，测量时需根据不同材料校准声速。

(2) 超声导波技术

检测系统由探头、导波激励单元、导波接收单元和检测信号处理单元组成。探头以阵列形式环绕安装在管道特定部位，导波激励单元产生并放大导波信号施加在探头上激

发导波。导波在管壁传播，遇到管道不连续处和形变处，传播速度变化并产生回波信号，检测信号处理单元对回波信号提取、分析和计算，得到被检测管道的壁厚信息。超声导波是一种特殊机械弹性波，沿待检构件固有边界传递并受其约束，在工业管道传播主要包括兰姆波和水平剪切波，实际工业管道超声导波监测多采用水平剪切波，其在SH0模态下不随频率变化，适宜长距离扫查。

2.2.2 智能场指纹

智能场指纹（FSM）技术[7]通过对管道施加恒定电流，记录各矩阵单元初始电位。当管道发生腐蚀，电场变化，实时监测各矩阵单元电位并与初始电位对比，得出管道减薄量，实现对腐蚀的监测定位和形貌分析。

该技术的电极矩阵设计可根据现场实际情况定制，通讯传输可通过RS485、GPRS或者北斗卫星等方式进行，供电采用太阳能，数据处理通过专业软件自动分析处理测量数据，为用户提供管道腐蚀信息。

3.技术创新及应用情况

3.1 “回波-回波”超声波测厚

常规超声测厚采用发射-回波模式，对被测试件表面要求较高，需达到一定粗糙度等级。当存在漆层或类似涂层时，由于声波在漆层或涂层中的传播速度远低于在金属中的传播速度，会导致壁厚测量值与实际值误差超过2倍漆层厚度，极易产生测量错误。

“回波-回波”测量壁厚技术则利用两个相邻底面回波间的时间间隔来计算金属基体壁厚，该时间间隔代表透过检测材料的声波连续往返行程时间。在有涂层或表面处理不佳的被测设备中，多次回波仅发生在金属中，通过任意一对回波间隔，即可准确表征去除涂层厚度后的金属厚度，再通过特定公式精确计算试件厚度。此方法从原理上创新，有效规避了涂层导致的误差。

在普光气田项目现场，“回波-回波”超声波测厚系统得到应用，文献记载其测量最大绝对误差为0.99%，最小误差为0.01%[8]。这表明该系统在复杂工况下测量精度高，为普光气田管道安全运行提供了可靠技术保障，相比常规超声测厚，显著提高了测量准确性，减少安全隐患和维护成本。

3.2 电磁超声测厚

电磁超声测厚技术基于电磁感应原理激

发产生超声波，与传统压电超声波测厚仪相比具有诸多优势[9]。传统压电超声波测厚依赖耦合剂减少探头与被测物体表面空气间隙，以确保超声波传入被测物体，但耦合剂涂抹不均匀会导致测量误差，且其挥发或干涸需定期补充更换，增加检测成本和工作量。电磁超声测厚无需耦合剂，可直接在被测物体表面激发超声波，提高了检测便捷性和可靠性，且不受环境温度影响，无论是高温还是低温环境都能稳定工作。同时，它也不受管道表面粗糙度、防腐涂层、污垢等情况影响，能穿透表面障碍准确获取管道壁厚信息。

4.管道壁厚监测技术在浆体管道工程中的应用

4.1 浆体管道工程特点及腐蚀磨损机制

浆体管道工程在现代工业的物料输送领域中占据重要地位，广泛应用于矿山、冶金、电力等行业[10]。其主要作用是将含有固体颗粒的浆体输送到目的地，但在运行中面临复杂恶劣的工作环境，腐蚀磨损机制独特。

在浆体管道中，固相颗粒持续冲刷管壁。这些颗粒硬度和速度较高，与管壁碰撞时产生强大冲击力，破坏管道表面结构。如矿山铁精矿浆管道，铁精矿粉粒度细、硬度高，长距离输送时与管壁频繁碰撞摩擦，使管道内壁机械磨损严重。磨损程度随浆体流速增加、颗粒浓度增大和输送距离延长而加剧。

浆体管道的磨损及减薄现象位置集中，主要发生在弯头、三通等流向改变处。这些部位浆体流速和流向急剧变化，产生强烈紊流和漩涡，固相颗粒在其作用下更集中地冲击管道内壁，磨损速率远高于直管段。典型浆体输送系统中，弯头处磨损速率可能是直管段的5-10倍。这种磨蚀快、场景相对集中的特点，对管道壁厚监测技术提出特殊要求，需能快速、准确检测关键部位壁厚变化，及时发现潜在安全隐患。

4.2 现有应用技术及存在问题

目前，超声波测厚技术是浆体管道工程壁厚监测应用较广泛的手段。它利用超声波在不同介质中的传播特性测量管道壁厚，为管道健康状况提供重要信息。

实际应用中，超声波测厚技术主要对弯头、三通等局部磨蚀较大处进行在线监测。这些部位受浆体强烈冲刷和腐蚀，是管道易

出现壁厚减薄和损坏的薄弱环节。通过在关键部位安装超声波测厚传感器，可实时获取管道壁厚变化数据，及时发现安全隐患，如矿山浆体输送管道，技术人员会在弯头和三通处密集布置传感器，实现 24 小时不间断监测。

但这种监测方式存在局限性。场站内浆体管道系统复杂，弯头及三通等管件数量多，全面覆盖管道薄弱点需布置大量传感器，这不仅大幅增加项目初始投资成本，还使系统安装、调试和维护工作繁琐。每个传感器的安装都需考虑位置、布线、信号传输等问题，增加工程复杂性和难度，过多传感器还会导致数据量过大，给数据处理和分析带来压力，降低监测系统效率和准确性。

现有的监测技术无法有效监测其他水平管道上的管道减薄点。浆体管道系统中，水平管道长期运行也可能因浆体冲刷和腐蚀出现局部壁厚减薄，但因缺乏有效监测手段，这些安全隐患难以及时发现，一旦发生管道泄漏或破裂事故，会严重影响生产。

4.3 “超声导波覆盖扫查+超声波局部测厚”技术体系

“超声导波覆盖扫查+超声波局部测厚”技术体系为浆体管道工程壁厚监测提供了新方案。该技术体系以磁致伸缩超声导波技术为核心，将导波监测探头以阵列环绕方式安装在管道特定部位，导波激励单元产生并放大磁致伸缩导波信号施加在探头上，激发导波在管壁传播[11]。导波传播中遇到管道不连续处和形变处，传播速度变化并产生回波信号，通过对回波信号提取、分析和计算，可快速确定被监测管道的壁厚减薄处位置。此技术一次能对一定范围内的管道进行 100% 覆盖的长距离管壁监测，大大提高监测效率。

仅靠超声导波技术虽能快速定位管道缺陷位置，但无法准确评估管道实际减薄值。为此，该技术体系结合超声波局部测厚技术，在超声导波监测确定管道缺陷位置后，利用超声波测厚技术对缺陷点进行针对性局部单点测量，精确测量缺陷点的管道实际减薄值，为评价管道腐蚀状况提供准确数据支持，通过“先定位、后测量”实现对浆体管道壁厚的全面、准确监测。

5.管道壁厚监测技术在浆体管道工程中未来的技术发展方向

5.1 磁致伸缩导波激发强度及衰减问题解决

在浆体管道工程里，磁致伸缩导波监测技术的应用面临不少挑战，其中导波激发强度及衰减问题尤为突出，严重限制了该技术在浆体管道工程中的有效应用。

在浆体管道的实际应用场景中，场站内主输泵后的高压管道上的弯头及三通等处，是磁致伸缩导波监测技术的重点应用需求区域。然而，磁致伸缩导波在经过这些部位时，会发生显著的衰减现象。当导波传播至弯头处，由于管道几何形状突然改变，导波会在弯头内壁多次反射和折射，导致能量大量损耗，信号强度大幅降低。

为解决这一问题，研究从优化探头设计和应用新型材料两个方向展开。在优化探头设计方面，设计高效的磁致伸缩扭转导波探头。通过深入研究磁路设计原理，采用具有高磁导率和低磁滞损耗的非晶态合金材料，可显著提高磁致伸缩效应的转换效率。精心优化线圈布局，采用多线圈结构和特殊绕制方式，使线圈能更有效地激发和接收导波信号。通过这些措施，探头的激发效率和接收灵敏度大幅提高，从而增强了导波的激发强度，使导波在经过弯头或三通时仍能保持较强能量，有效提高了对微小缺陷的检测能力。

在新型材料应用方面，在管道弯头或三通的外部包裹吸声材料。橡胶、尼龙等材料具有良好吸声性能，能有效吸收多余声波能量。当磁致伸缩导波传播至弯头或三通时，这些吸声材料可减少声波的反射和散射，降低对导波传播的干扰。通过在实际管道上的应用测试，发现包裹吸声材料后，导波信号的衰减明显减少，传播距离有效延长，对微小缺陷的识别能力显著提升。

5.2 磁致伸缩导波的共振驻波问题解决

磁致伸缩导波监测技术在浆体管道工程应用时，除了面临激发强度及衰减问题，还受到共振驻波问题的困扰。在浆体管道的弯头及三通附近，由于特殊的管道结构和导波传播特性，共振驻波问题尤为突出，严重影响监测系统对管道缺陷信号的准确提取和识别。

在弯头及三通附近，导波反射波会产生频散现象，部分反射波会和发射波产生共振形成驻波。这是因为在这些部位，导波传播路径复杂，反射波的相位和频率容易与发射波匹配，从而满足共振条件。驻波的形成会导致波信号大幅增强，完全覆盖附近的管道

缺陷信号。在某浆体管道工程的实际监测中，当导波传播至弯头附近时，驻波信号的幅度是正常导波信号的 10 倍以上，使得微小缺陷信号被完全淹没，监测软件无法准确提取和识别这些信号，严重影响监测系统的准确性和可靠性。

为解决这一问题，从优化信号激励方式和改进信号处理算法两个方面入手。在优化信号激励方式方面，通过随机改变超声导波的载波频率，使不同频率的波在传播过程中不会同时满足驻波形成条件，从而减少驻波的强度。采用频率在一定范围内随机变化的脉冲序列作为激励信号，经实验验证，可将驻波 artifacts 的幅度降低 20 倍以上，有效减少驻波对缺陷信号的干扰。

在改进信号处理算法方面，采用时频分析与模态分解、基于机器学习的信号识别、奇异值分解（SVD）降噪等多种方法[12]。

时频分析与模态分解方法，如小波变换、经验模态分解（EMD）或集合经验模态分解（EEMD）等，能对含驻波干扰的信号进行深入时频分析和模态分解。使用 EMD-WT 或 WT-EMD 联合算法，先通过 EMD 将信号分解为多个固有模态函数（IMF），再利用小波变换对 IMF 进行滤波，去除包含驻波信息的高频分量，重构出缺陷信号。

基于机器学习的信号识别方法，利用卷积神经网络（CNN）或递归神经网络（RNN）等机器学习算法，对含驻波干扰的信号进行特征学习和分类。通过大量带有驻波和缺陷信号的样本数据进行训练，让模型学习驻波和缺陷信号的特征差异，从而自动识别并剔除驻波干扰，提高微小缺陷信号的提取准确率。

奇异值分解（SVD）降噪方法，对截取的检测信号进行带通滤波后，通过奇异值分解将信号矩阵分解为奇异矩阵和特征值，将小于中位数的特征值置零，去除噪声和驻波干扰，再通过逆奇异变换还原信号，有效提高磁致伸缩导波检测信号的信噪比及检测精度。

通过这些创新技术手段，有效解决磁致伸缩导波在浆体管道工程中面临的共振驻波问题，为浆体管道的安全运行提供更可靠技术保障。

6.结论与展望

随着工业的快速发展，管道作为工业生

产和基础设施建设中的关键组成部分，其安全运行至关重要。管道壁厚在线监测系统作为保障管道安全的重要技术手段，近年来取得了显著发展。

而在浆体管道工程中，由于其特殊的腐蚀磨损机制和工作环境，对管道壁厚监测技术提出了更高要求。目前，“超声导波覆盖扫查+超声波局部测厚”技术体系已成为浆体管道壁厚监测的重要发展方向。该技术体系结合了超声导波的长距离快速检测能力和超声波局部测厚的高精度测量优势，能够有效实现对浆体管道壁厚的全面监测。但由于目前超声导波覆盖扫查技术的应用场景局限性，其在浆体管道上的成熟应用仍需要从信号增强和去噪等方向去进行技术突破，相信未来随着技术的不断突破和发展，管道壁厚监测技术将能更好地满足浆体管道工程的需求，为浆体管道的安全运行提供更可靠的技术保障，推动浆体管道输送技术在各个行业的广泛应用和发展。

参考文献

- [1]王逸周.金属腐蚀机制及其先进防护技术的研究与应用[J].世界有色金属, 2024, (02) : 217-219.
- [2]李东昕.长距离集输管道腐蚀监测技术研究[J].石油和化工设备, 2022, 25 (12) : 190-193.
- [3]臧延旭.管道壁厚测量技术研究进展[J].管道技术与设备, 2013, (03) : 20-22.
- [4]何宏, 江秀汉, 李琳.国内外管道腐蚀检测技术的现状与发展[J].油气储运, 2001, (04) : 7-10+55-3.
- [5]祁永刚, 段汝娇, 杨绪运, 等.基于 FSM 的管道腐蚀监测技术实验研究[J].中国特种设备安全, 2023, 39 (S2) : 56-61.
- [6]马文明, 张中意, 尚晓培, 等.超声波壁厚在线监测系统在高酸气田的应用[J].油气田地面工程, 2020, 39 (04) : 79-83+89.
- [7]李铭, 苟浩瑞, 于永洁, 等.金属管道腐蚀在线监测信号漂移的修正方法[J].郑州大学学报(工学版), 2023, 44 (03) : 88-93.
- [8]谢兆军.超声波在线监测技术在普光气田的应用探究[J].材料保护, 2020, 53 (01) : 170-174+178.
- [9]李望, 吴长青, 赵炜炜, 等.电磁超声检

- 测技术的应用 [J]. 电子测试, 2021, (03) : 115-116+126.
- [10] 宋积文, 张亮, 金曦. 油气管道在线腐蚀监测技术的研究现状及发展趋势 [J]. 当代化工研究, 2022, (20) : 152-154.
- [11] 黄清生, 杨春, 李健. 基于磁致伸缩导波的油田集输管道在线监测技术应用 [J]. 石化技术, 2025, 32 (07) : 58-60.
- [12] 吴倩玉, 孙志刚, 王佳琦, 等. 参数优化 CatBoost 的输油管道缺陷识别方法 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2024, 41 (05) : 613-622.