

油气田双金属复合管内检测技术研究进展

唐 霏¹, 舒 洁¹, 赵 帅¹, 徐 勇²

¹中国石油西南油气田公司安全环保与技术监督研究院, 四川 成都

²中国石油西南油气田公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月19日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

双金属复合管以其优良的性价比在油气管道领域得到了广泛应用。由于其结构特殊性, 对其进行准确有效的内检测面临诸多挑战。本文分析了油气管道双金属复合管内检测技术的现状, 详细分析了无损检测技术、数字化与智能检测技术、自动化与智能化技术等主流技术在双金属复合管检测中的应用及存在的问题, 探讨了多技术融合、智能化检测、高精度传感器研发等未来发展趋势, 旨在为提高双金属复合管内检测技术水平、保障油气管道安全运行提供参考。

关键词

双金属复合管, 内检测技术, 无损检测, 智能化技术

Research Progress on Detection Technology of Bimetallic Composite Pipes in Oil and Gas Field

Fei Tang¹, Jie Shu¹, Shuai Zhao¹, Yong Xu²

¹Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company Safety, Environment & Technology Supervision Research Institute, Chengdu Sichuan

²Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 19th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

Bimetallic composite pipes have been widely applied in the field of oil and gas pipelines due to their excellent cost performance. Due to its special structure, there are many challenges in conducting accurate and effective internal detection on it. This paper analyzes the current status of the detection

文章引用: 唐霏, 舒洁, 赵帅, 徐勇. 油气田双金属复合管内检测技术研究进展[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 525-533. DOI: 10.12677/jogt.2025.473057

technology inside bimetallic composite pipes for oil and gas pipelines, and elaborates on the application and existing problems of mainstream technologies such as non-destructive testing technology, digital and intelligent detection technology, and automation and intelligent technology in the detection of bimetallic composite pipes. The future development trends such as the integration of multiple technologies, intelligent detection, and the research and development of high-precision sensors were discussed, aiming to provide references for improving the detection technology level of bimetallic composite pipes and ensuring the safe operation of oil and gas pipelines.

Keywords

Bimetallic Composite Pipe, Internal Detection Technology, Non-Destructive Testing, Intelligent Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着油气资源开发向深海、沙漠、高腐蚀等复杂环境拓展,对油气管道的安全性、可靠性和耐腐蚀性提出了更高要求。双金属复合管结合了基层金属良好的力学性能和复层金属优异的耐蚀性能,在成本效益方面具有显著优势,因此在油气集输、长输管道等领域的应用日益广泛[1]。

双金属复合管一般由基层和复层组成,基层是耐蚀合金管,具有耐腐蚀合金优异的耐蚀性能;复层是碳钢,可保证管道的整体强度和各项机械指标[2]。制造工艺主要有机械复合和冶金复合两大类。机械复合工艺包括爆燃复合、滚压复合等,通过物理压力使两层金属紧密贴合[3];冶金复合则借助焊接、热浸镀等方式实现两层金属原子间的结合,形成冶金结合界面[4]。双金属复合管广泛应用于高含硫、高含盐等强腐蚀环境的油气集输管道,以及海底油气管道、沙漠油气输送管道等特殊场景。由于长期接触腐蚀性介质,复层耐蚀性能下降导致穿孔泄漏以及焊缝缺陷引发的失效。这些失效形式需要通过有效的内检测技术及时发现和评估[5][6]。然而,由于双金属复合管由两种不同材质通过特定工艺复合而成,其结构和材料特性的差异使得内检测难度增大。准确掌握管道内部缺陷情况,及时发现并评估潜在风险,对于保障油气管道安全、稳定、高效运行至关重要。内检测技术作为实现管道完整性管理的关键手段,其发展对于双金属复合管在油气行业的持续应用和安全运营具有深远意义。

2. 无损检测技术

无损检测技术是一种在不破坏或不影响被检测物体使用性能的前提下,利用声、光、电、磁等特性,对材料、零件或设备进行缺陷检测、性能检测、几何形状和尺寸测量及组织结构检查的技术。它广泛应用于航空航天、石油化工、交通运输、机械制造、核能电力等多个领域,是确保产品质量、提高设备运行可靠性和保障人身安全的重要手段。

2.1. 漏磁检测技术

目前长输管道内检测主要以漏磁内检测为主,其工作原理是利用管道缺陷处磁力线的变化来探测和量化缺陷。在双金属复合管检测中,通常采用永磁体或电磁体对管道进行磁化,通过布置在检测单元上的传感器检测漏磁场信号,进而识别管道内的缺陷[7]。对于双金属复合管,由于基层多为铁磁性材料,

可被有效磁化,但复层会影响漏磁场的分布和检测灵敏度。该技术因其对管内环境要求较低、不需要耦合、适用范围广(可用于油和气管道)及价格低廉等优点,而成为目前应用最广泛也最成熟的技术[8]。实际应用中常采用多通道、不同磁极结构的漏磁检测装置,以适应复合管的特殊结构,提高检测精度。

中国石油集团石油管工程技术研究院刘琰等人通过有限元分析及牵拉试验,建立了双金属复合管漏磁内检测实验系统。利用该系统,对预制的内、外壁人工缺陷的双金属复合管样品进行了4次牵拉试验,在此基础上对双金属复合管漏磁内检测适用性进行分析。分析研究表明:在双金属复合管上可检测到法兰、环焊缝等管道特征,可检测到刺漏、内衬塌陷等管道缺陷,可检测出位于碳钢管管壁上的人工缺陷。如果双金属复合管的不锈钢内衬层因介质腐蚀发生破损,碳钢管管壁会因电偶腐蚀而加速腐蚀并很快导致刺漏失效,无法检测到位于不锈钢内衬层上的腐蚀缺陷就不能有效避免刺漏失效发生,因此单独的漏磁内检测技术不适用于双金属复合管不锈钢内衬层的检测,应采取电磁涡流加漏磁内检测的组合检测技术进行检测[9]。

针对双金属复合管基管磁化弱(受复层影响)、衬管磨损大(检测过程中检测装置与衬管摩擦)、缺陷量化难(漏磁场受复合结构干扰)等难题,研究人员进行了一系列技术改进。优化内检测器的磁路设计,采用高磁导率、低矫顽力的磁性材料,提高对基管的磁化效率,增强缺陷处的漏磁场信号;研发低硬度钢刷与探头组件体系,减少检测过程中对衬管的磨损,同时保证探头与管道内壁良好接触;首次创建提高条件下(考虑复层厚度导致检测探头与基管距离增加)缺陷尺寸量化模型,利用有限元模拟等手段分析漏磁场分布规律,结合实验数据校准,提高缺陷深度、长度等尺寸的量化精度。通过牵拉实验验证,改进后的漏磁检测技术对不锈钢衬层单次磨损小于0.1微米,标准缺陷样管基管体积型缺陷识别率超过85%,深度量化误差控制在壁厚的 $\pm 20\%$ 以内[10]。

2.2. 超声波检测技术

超声波检测利用高频声波在材料中的传播特性来检测缺陷,对于双金属复合管,可通过调整探头角度和频率来识别界面缺陷和覆层损伤。然而,超声波检测受材料晶粒结构和复合界面影响较大,信号解释复杂,且需要耦合剂,在实际应用中存在一定限制。

常规超声检测利用超声波在不同介质中传播时的反射、折射和衰减特性来检测缺陷。在双金属复合管中,超声波从探头发射,遇到缺陷或不同材质界面时会产生反射回波,通过分析回波的时间、幅度等参数判断缺陷位置和大小。然而,双金属复合管的复合结构带来诸多挑战。不同材质间的声阻抗差异大,导致超声波在界面处能量损失严重,影响检测信号的有效传输和接收;复合管的曲率和多层结构使得超声波传播路径复杂,容易产生多次反射和散射,干扰缺陷信号识别;此外,对于微小缺陷,由于超声信号分辨率限制,检测灵敏度有待提高。

为应对上述挑战,相控阵超声技术在双金属复合管检测中得到应用。相控阵超声通过控制多个超声换能器的发射和接收时间延迟,实现超声波束的灵活聚焦、偏转和扫描。在双金属复合管检测时,可根据管道结构特点和检测需求,动态调整超声束方向和聚焦位置,提高对不同位置和方向缺陷的检测能力。例如,在检测复合管焊缝时,能够精确检测焊缝内部的未熔合、裂纹等缺陷。此外,多通道超声检测技术也有所发展,通过同时发射和接收多个超声信号,增加检测信息量,提高检测效率和准确性,降低因信号干扰导致的误判率。

BRAY [11]采用空气耦合(LCR)超声检测技术开展管壁及焊缝应力检测。空气耦合超声检测技术避免了传统压电超声检测的技术壁垒,具有非接触、无须耦合剂的特点。HUANG [12]构建了空气耦合超声表面波检测系统,实现工件表面裂纹检测,根据超声回波能量判读裂纹的大小,但空气的流动、系统振动及温度等均对系统稳定性具有一定的影响。HATAFUKU [13]基于铁磁性材料的磁致伸缩反向效应,采用

纵波超声检测铁磁性金属中的残余应力。YANG [14] [15]分析了斜入射在单层和双层管道中的传播特性,采用斜探头入射的方式对管道防腐层破损进行检测。EDWARDS [16]采用电磁超声导波检测技术对内外表面裂纹缺陷

部分学者利用有界超声波束散射法来评估双金属复合圆管界面层力学性能的变化,该方法着重关注有界超声波束与浸没在水中的双金属复合圆管相互作用时所呈现出的独特散射行为,尤其是在存在缺陷的界面处。通过有限元(FE)模拟,证明了在对称收发配置下,当有界超声波束以特定角度斜向入射到复合管上时,散射场的声压幅值会随着界面退化程度的不同而发生显著变化。相反,在非临界入射角下,变化则微乎其微。与传统超声检测技术相比,该方法能够以极高的灵敏度和稳定性对界面层性能的变化进行定量评估,为复合材料结构的无损检测技术增添了有价值的新手段。

2.3. 涡流检测技术

涡流检测技术于 20 世纪 60 年代传入中国,广泛应用于管线、管材开口缺陷探伤。涡流检测技术采用电磁感应原理,当感应线圈贴近导体表面时,导体表面感应出涡流。当导体表面存在缺陷时,缺陷导致感应涡流的强度及涡流场分布产生变化,由此判断导体表面缺陷。由于导体表面存在趋肤效应,涡流只能检测导体表面缺陷,可利用该原理判断管道内外壁缺陷,同时可应用涡流测距原理实现测径功能,完成管壁变形缺陷的检测。涡流检测对管道表面和近表面缺陷敏感,检测速度快,且无需与管道直接接触,适用于快速筛查双金属复合管表面及近表面缺陷,如复层的点蚀、裂纹等[17]。

2.3.1. 脉冲涡流检测技术(PECT)

PECT 是一种以周期性方波信号作为激励源的涡流检测技术,相较于传统谐波 ECT 技术拥有更大的瞬时功率和更好的穿透性,更适于检测工件大面积腐蚀及厚度变化[18]。对于 PECT 传感器而言,由于常用的 HALL 元件、GMR、TMR 等磁敏感传感器所适用的磁场范围较小,而双金属复合管的分层缺陷以及壁厚减薄等损伤引起的感应磁场扰动范围较大易超出量程,故此本文选用绞线圈作为磁场检测传感器。同时,采用大激励线圈嵌套小接收线圈的结构(绝对式探头),可确保探头在能测量大范围磁场变化的同时拥有较高的高灵敏度[19]。在检测过程中,激励线圈感应出交变的初生磁场在双金属复合管表面诱导出同步交变且受复合管电导率、壁厚、磁导率等因素影响的电涡流[20]。该电涡流再感生出一个包含间隙与衬管厚度信息的次生磁场,并与初生磁场相互累加结合被检测线圈拾取产生感应电信号。最终通过分析研究反馈信号的变化得到复合管的结合质量变化,完成对复合管的检测[21]。

近似替代法是一种重要的研究工业管道 PECT 方法,一般在被检测管道直径与检测探头直径比较大的情况下使用此方法,将管道近似等效为多层平板结构。假定接收线圈只能接收其正下方涡流感应的磁场,因此当探头置于被测管道上时,检测线圈下表面所处的平面到管道外表面的距离不相等,存在一个额外的提离余量 Δh 。该提离余量会增加检测线圈的阻抗,抑制电涡流与接收线圈间的电磁耦合作用,使得检测信号受到一定影响。根据勾股定理计算出 Δh ,并可得出随着探头等效半径的增大提离余量 Δh 不断减小,最终管道曲率半径 R 趋近于无穷大即等效为板状工件。采用此方法将分层情况下的双金属复合管按照电磁属性划分为四层平板模型,整个模型从内往外依次为管内空气,衬管,分层时产生的间隙,基管和探头所处的空气五个部分。其中激励与接收线圈同轴放置,下端面平齐共同置于外空气中,为方便计算再将外空气再分为线圈下端面到基管上表面区域,线圈区域,线圈上端面以上的区域三部分。考虑到实际 PECT 中磁场较小,双金属复合管的基管和衬管磁导率可近似看作常数,因此假定模型的五个区域介质均匀、线性。

中油管道检测技术有限责任公司针对双金属复合钢管在使用过程中出现的内衬层腐蚀穿孔等缺陷问题,开展了基于脉冲涡流原理的双金属复合管道检测技术研究。研制了适用于双金属复合管道的专项复

合检测器，可基于脉冲涡流原理对管道进行金属损失检测。

受限于脉冲涡流原理，检测精度对传感器与被检管壁之间的提离较为敏感，在应用过程中提离大小受传感器支撑结构，检测器在役运行速度的平稳性，管道内的清洁度及凹陷变形和褶皱区的大小等多种因素的影响。需要在今后的研究中结合测试和工程实践不断进行改进完善和优化。

2.3.2. 电磁涡流检测技术

2019年后，电磁涡流管道内检测技术发展迅速，在各大气田均成功实施。其利用电磁感应原理，当导体中某些因素发生改变，影响其涡流的强度和分布，进而引起线圈感应电压的变化。电磁涡流内检测技术不需要耦合剂，以电磁感应原理为基础，故可广泛应用于能发生电磁感应的材料检测，适应性强[17]。

(1) 检测准备

① 管道调查：检测前需对待检管道进行情况摸底，基本参数：管道规格材质、管道建设时间及运行年限、管道设计温度压力、管道长度及走向等；运行参数：日输气量、输气温度及压力、日常清管情况、检测维修情况等；② 物资准备：内检测前需开展清管，推出管道中杂质及积液，需准备2~3个皮碗清管器(过盈量在5%~8%)用于检测前清管。清管后，开展内检测，需准备好电磁涡流检测器，确认皮碗过盈量满足要求，骨架、探头、里程轮的完好性，数据采集系统运行正常，电池电量充足等；③ 人员准备：上下游场站需安排清管队伍，进行收发球操作，站外管线上应专门安排人员进行听球，防止卡球丢球；④ 气源准备：作业前，需确认好清管及内检测动力源，采用井口原料气还是返输天然气。

(2) 清管

清管作业可将集输管道内杂质、积液、缓蚀剂等推出，满足后续内检测的要求。现场根据清管后清管器情况、推出积液情况，由内检测人员进行是否达到检测条件，可根据实际情况多次清管。

(3) 内检测

在确认清管达到要求、清管器无严重变形后，满足发送涡流检测器条件，将涡流检测器发出。检测器运行速度控制在0.5~15 m/s范围内，记录管道特征信号，后期根据软件和人工筛选获得检测管道腐蚀情况。

(4) 开挖验证

由于涡流检测灵敏度效应、运行的干扰等情况，需进行开挖验证。通过检测单位提供的缺陷金属损失列表，选点进行开挖，开展射线、超声等无损检测，分析内检测技术缺陷点识别的准确度，并修正完善最终报告，开展管道完整性分析、风险分析和管控措施建议。

2023年4月，中国石化西南油气分公司采气二厂利用生产场站停产检修契机，采用净化后燃料气作为动力源，推动电磁涡流检测器，对该含硫气田某条双金属复合管进行了电磁涡流内腐蚀检测。检测数据与开挖验证数据误差较大，表明目前电磁涡流内检测技术对双金属复合管道内检测还具有不适性。

在双金属复合管检测中，涡流检测存在一定局限性。由于复合管由两种不同导电性能的金属组成，涡流分布受两种金属相互作用影响复杂，难以准确区分缺陷信号和材质差异引起的信号变化；对于较深位置的缺陷，涡流信号衰减严重，检测深度有限。

3. 智能化检测技术与系统

双金属复合管智能化检测技术主要是在自动化与智能化、数字孪生与仿生以及智能监控与预测性维护等方面的应用，主要体现在提升检测精度与效率，保障管道安全运行，降低管道维护成本。

3.1. 自动化与智能化技术

国内双金属复合管内检测领域，自动化与智能化设备的研制取得了显著进展，正逐步改变传统检测

模式,提升检测效率与精度,为管道安全运行保驾护航。

电子科技大学自动化工程学院高斌团队联合企业缔造的“PIGPROX”机器人堪称一大突破。在 2021 年 9 月问世后,成功解决了多项棘手难题。在国内首条双金属复合管成功运行,一举解决了现有漏磁检测技术无法检测双金属管的难题。该机器人能够有效识别输油气管道诸如腐蚀、壁厚减薄、裂纹等问题,还能精准测定管道腐蚀程度并确定腐蚀具体位置,为油气管道全生命周期完整性管理提供了详实数据支持。截至目前,该项研究成果已成功投入产业化应用,在各大油气田成功检测管道 50 条以上,累计检测长度超过 600 公里。该团队在传感器设计上创新提出电磁多物理场耦合无源增强感知机理,实现均匀电磁差动激励以及无源谐振超低功耗激励感知信息接收,成功解决小口径集输管道复杂结构、变化提离、高速、长时续航影响下的缺陷信息高灵敏感知问题。同时,团队克服国外芯片供应受阻的困境,成功实现内检测核心硬件系统全国产化,研发出长度小于 270 毫米、重量低于 8 千克的全国产自主检测器,在低压、低流速、1.5D 弯管(管子的曲率半径为直径的 1.5 倍)、变径等复杂管道内也展现出极好的运行效果。

未来,国内双金属复合管内检测自动化与智能化设备研制将呈现出多维度的发展趋势。在技术融合层面,进一步深化多种检测技术的协同应用。比如,将漏磁检测、涡流检测与超声检测等技术进行深度融合,开发出综合性的检测设备,使其能在一次检测过程中,全面精准地识别双金属复合管从内衬到基管的各类缺陷,像内衬的微裂纹、点蚀,基管的壁厚减薄、大面积腐蚀等问题。同时,随着人工智能技术的不断发展,加大其在检测数据分析与处理中的应用深度。利用深度学习算法对大量检测数据进行挖掘与分析,实现对缺陷的自动分类、定量评估以及预测缺陷的发展趋势,从而为管道维护决策提供更具前瞻性的支持。

在设备性能提升方面,会着重提高设备的适应性与可靠性。研发能够适应更复杂工况的检测设备,如可在高温、高压、高含硫等极端环境下稳定运行的内检测机器人,确保在各类恶劣条件下都能实现精准检测。此外,还会提升设备的续航能力与数据传输能力,保证长距离管道检测时设备能持续稳定工作,并实现检测数据的实时、高速传输,便于后方技术人员及时分析处理。

3.2. 数字孪生与仿真技术

国外相关研究机构利用先进的建模技术和大量的实际检测数据,创建与双金属复合管实际状况高度吻合的数字孪生模型。该模型不仅能反映管道的几何结构、材料特性,还能精确模拟管道内流体的流动、温度分布以及应力变化等复杂物理现象。

通过物联网等技术将管道内检测设备获取的实时数据传输至数字孪生模型中,实现对管道运行状态的实时动态仿真。例如,当管道内的压力、流量等参数发生变化时,数字孪生模型能立即更新并呈现相应的变化情况,帮助工程师及时掌握管道的实际运行状况。

借助数字孪生模型进行各种虚拟实验和仿真分析,为管道的维护、修复以及运行优化提供决策支持。如通过模拟不同的腐蚀场景,预测管道的剩余寿命,制定合理的维护计划;模拟不同的流量调节方案,优化管道的运行效率,降低能耗。

3.3. 智能监控与预测性维护

通过在双金属复合管上部署多种类型的传感器,如压力传感器、温度传感器、应变传感器等,实现对管道全方位、多参数的实时监控。通过传感器融合技术,将不同传感器获取的数据进行整合分析,更准确地判断管道的运行状态,及时发现潜在的安全隐患。

同时利用大数据技术收集和分析大量的管道运行数据,包括历史检测数据、传感器监测数据等。结合人工智能算法,如机器学习、深度学习等,建立管道故障预测模型。通过对模型的训练和优化,实现对管道故障的提前预测,以便提前安排维护人员和资源,进行针对性地维护和修复,减少管道故障的发

生和停机时间。

此外,借助网络通信技术,实现对双金属复合管内检测系统的远程监控。维护人员可以通过手机、电脑等终端设备随时随地查看管道的运行状态和检测数据,当系统检测到异常情况时,能够自动发送报警信息给相关人员。同时,利用智能诊断技术对远程获取的数据进行分析和诊断,快速定位故障原因和位置,为现场维护提供准确的指导。

4. 当前内检测技术存在的问题

通过调研双金属复合管在无损检测技术以及智能化检测技术方面的调研以及案例分析,结合双金属复合管在石油、化工等领域的实际应用场景需求,发现双金属复合管在内检测方面还存在以下不足:

(1) 检测精度与可靠性不足

尽管现有内检测技术在不断改进,但对于双金属复合管复杂结构下的微小缺陷、隐蔽缺陷(如界面处的微小剥离、基管内部靠近界面的小腐蚀坑等)检测精度仍有待提高。不同检测技术在面对复合管多种失效形式时,存在漏检、误判情况。例如,漏磁检测在检测靠近复层的微小基管缺陷时,由于复层屏蔽作用,漏磁场信号微弱,易造成漏检;超声检测在复杂界面多次反射干扰下,对小缺陷的信号识别困难,导致误判。检测精度和可靠性不足,使得难以准确评估管道的剩余寿命和安全风险,给管道安全运行带来隐患。

(2) 检测效率与成本矛盾

双金属复合管通常应用于长距离油气输送管道,对检测效率有较高要求。目前一些高精度检测技术,如相控阵超声检测,检测过程复杂、检测速度较慢,难以满足长距离管道快速检测需求。同时,先进的检测设备研发成本高,检测过程中需要专业技术人员操作和数据分析,导致检测成本居高不下。在保证检测精度的前提下,提高检测效率、降低检测成本,是当前内检测技术面临的重要问题。

(3) 对复杂工况适应性差

油气管道运行工况复杂,双金属复合管可能面临高温、高压、高流速介质冲刷以及管道变形、弯曲等情况。现有内检测技术在复杂工况下的适应性有待加强。例如,在高温环境下,检测设备的传感器性能可能受温度影响发生漂移,导致检测数据不准确;高流速介质冲刷可能使检测装置在管道内运行不稳定,影响检测效果;对于存在较大变形或弯曲的管道,部分检测装置难以顺利通过,无法完成检测任务。

(4) 数据处理与分析能力滞后

内检测技术在检测过程中会产生大量数据,如何高效处理和准确分析这些数据,提取有价值的缺陷信息,是当前面临的又一问题。现有的数据处理方法多为人工分析或简单的软件辅助分析,对于复杂的检测信号和海量数据,处理速度慢、分析精度低。缺乏智能化、自动化的数据处理与分析系统,难以快速准确地评估管道的完整性状况,无法满足管道实时监测和快速决策的需求。

5. 双金属复合管内检测技术发展趋势

通过系统梳理双金属复合管内检测技术(涵盖漏磁、超声、涡流等主流技术)在石油、化工、油气输送等核心领域的实际应用情况、技术适配性及落地成效,并结合行业调研数据与现有技术瓶颈分析,本文在总结当前技术发展现状的基础上,进一步提出双金属复合管内检测技术未来将在以下几个方面呈现关键发展趋势:

(1) 多技术融合检测系统

为克服单一检测技术的局限性,未来将发展多技术融合的检测系统。如将漏磁检测的高灵敏度对铁磁性材料缺陷检测能力与超声检测对内部缺陷深度和尺寸的精确测量能力相结合,通过数据融合算法,

综合分析两种检测技术获取的信号,提高对双金属复合管缺陷的全面检测和准确量化能力。在一个检测装置上集成漏磁、超声、涡流等多种检测模块,根据管道不同部位和检测需求,灵活选择或同时使用多种检测技术,实现对复合管全方位、多层次的检测。同时,利用先进的传感器技术和信号处理技术,对不同检测技术产生的数据进行同步采集、处理和融合分析,提高检测效率和准确性。

(2) 智能化检测技术发展

随着人工智能、大数据、机器学习等技术的快速发展,智能化检测将成为双金属复合管内检测的重要趋势。利用机器学习算法对大量检测数据进行训练,建立缺陷识别和分类模型,使检测系统能够自动识别不同类型的缺陷(如腐蚀、裂纹、界面剥离等),并准确评估其严重程度。通过深度学习技术,让检测系统具备自学习能力,能够不断优化缺陷识别和评估算法,适应不同工况和管道结构下的检测需求。例如,基于卷积神经网络的图像识别技术可用于分析超声检测的扫描图像或涡流检测的信号图像,快速准确地识别缺陷;利用大数据分析技术,对管道全生命周期内的多源检测数据(包括内检测数据、运行工况数据、环境数据等)进行综合分析,预测管道缺陷的发展趋势,提前预警潜在风险,为管道维护决策提供科学依据。

(3) 高精度、高可靠性传感器研发

研发适用于双金属复合管内检测的高精度、高可靠性传感器是提高检测技术水平的关键。在漏磁检测方面,研发高灵敏度、低噪声的磁传感器,如巨磁电阻(GMR)传感器、隧道磁电阻(TMR)传感器等,提高对微弱漏磁场信号的检测能力,降低噪声干扰,从而提高对微小缺陷的检测精度。在超声检测领域,开发高性能的超声换能器,如宽频带、高分辨率的压电陶瓷换能器,提高超声信号的发射和接收效率,增强对复杂结构下缺陷的检测能力。对于涡流检测,研制新型的检测线圈和传感器,提高对不同导电性能材料中缺陷的检测灵敏度和分辨率。此外,还要注重传感器的环境适应性设计,使其能够在高温、高压、高湿度等恶劣环境下稳定工作,保证检测数据的可靠性。

(4) 适应复杂工况的检测装备改进

针对复杂工况,需改进检测装备的结构和性能。设计具有更强自适应能力的管道内检测器行走机构,使其能够在高温、高压、高流速、管道变形弯曲等复杂工况下稳定运行,确保检测过程的连续性和准确性。例如,采用智能变径机构,使检测器能够适应不同管径变化的管道;研发耐高温、高压的材料用于检测器外壳和内部组件,保证检测装置在恶劣工况下的结构完整性和电气性能稳定性。同时,优化检测装置的供电系统,采用高效、持久的能源供应方式(如新型电池技术、能量收集技术等),满足长距离、长时间检测需求。

(5) 数据处理与分析的深度挖掘

建立智能化的数据处理与分析平台,实现对双金属复合管内检测数据的深度挖掘。利用数据挖掘技术,从海量检测数据中提取潜在的缺陷特征和规律,发现以往人工分析难以察觉的异常情况。通过建立管道完整性评估模型,结合检测数据和运行工况数据,对管道的剩余寿命、安全可靠性能进行定量评估。采用可视化技术,将复杂的检测数据和分析结果以直观、易懂的方式呈现,如三维可视化缺陷展示、管道健康状态图谱等,为管道管理人员提供清晰、准确的管道状况信息,便于快速做出维护决策。同时,利用云计算技术,实现检测数据的存储、共享和远程分析,提高数据处理效率和协同工作能力。

(6) 标准规范的完善

随着双金属复合管内检测技术的发展,需要不断完善相关标准规范。目前,针对双金属复合管内检测的标准还不够健全,不同检测技术的操作流程、数据处理方法、检测结果评判标准等存在差异,导致检测质量难以统一衡量。未来将加强标准规范的制定和修订工作,组织行业专家、科研机构和企业共同参与,结合实际检测需求和技术发展水平,制定涵盖检测设备性能要求、检测工艺规范、数据处理与分析方法、检测结果评价标准等方面的统一标准体系。通过标准规范的完善,促进内检测技术的规范化发

展, 提高检测质量和行业整体水平, 保障双金属复合管在油气管道中的安全应用。

6. 结束语

双金属复合管在油气管道领域的广泛应用对其内检测技术提出了迫切需求。当前, 漏磁检测、超声检测、涡流检测等技术在双金属复合管内检测中各有应用, 但存在检测精度与可靠性不足、检测效率与成本矛盾、对复杂工况适应性差以及数据处理与分析能力滞后等问题。未来, 双金属复合管内检测技术将朝着多技术融合、智能化检测、高精度传感器研发、适应复杂工况的检测装备改进、数据处理与分析深度挖掘以及完善标准规范等方向发展。通过这些技术创新和发展, 有望提高双金属复合管内检测的准确性、可靠性和效率, 降低检测成本, 为油气管道的安全运行提供更加坚实的技术支撑, 促进油气行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 杨专钊, 王扬, 李安强, 等. 双金属复合管分类及其特性分析[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(1): 1-6.
- [2] 郭崇晓, 蒋钦荣, 张燕飞, 等. 双金属复合管内覆(衬)层应力腐蚀开裂失效原因分析[J]. 焊管, 2016, 39(2): 33-38.
- [3] 李晖, 杨秀梅, 朱英霞. 双金属复合管机械复合制备工艺研究进展[J]. 焊管, 2024, 47(12): 1-7.
- [4] Bi, Z.Y. and Yang, J. (2018) Transfer Welding Process and Microstructure and Properties of Titanium/Steel Clad Pipe. *Materials Science Forum*, **913**, 340-348. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.913.340>
- [5] 李忠林. 储油罐及工艺管线腐蚀检测及治理方案研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2010.
- [6] 左万君, 戴西斌, 吴昌玉. 漏磁检测在管道损伤探测中的应用[J]. 无损检测, 2024, 46(3): 56-63.
- [7] 于润桥, 万冠杰, 胡博, 等. 双金属复合管缺陷微磁检测技术研究[J]. 焊管, 2016(2): 29-32.
- [8] 庞家栋. 基于漏磁检测的管道损伤缺陷仿真与分类识别研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [9] 刘琰, 聂向晖, 周春. 双金属复合管漏磁内检测试验研究[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(3): 30-33.
- [10] Yang, L.Z., Zhang, J., Xing, Y.H., et al. (2021) Development of a Biaxial Grid-Coil-Type Electromagnetic Acoustic Transducer. *Measurement Science and Technology*, **32**, Article 025102. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abbc88>
- [11] Bray, D.E. (2002) Ultrasonic Stress Measurement and Material Characterization in Pressure Vessels, Piping, and Welds. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **124**, 326-335. <https://doi.org/10.1115/1.1480825>
- [12] Huang, Z., Wang, X., Xu, C., Wang, J., Li, P. and Rao, X. (2017) Research on Application of Air Coupled Ultrasonic Surface Wave Detection. 2017 *Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, Xi'an, 22-24 June 2017, 297-300. <https://doi.org/10.1109/fendt.2017.8584584>
- [13] Hatafuku, H., Sarudate, C. and Konno, A. (2002) Estimation of Residual Stresses in Magnetic Metals by Using Ultrasonic Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, **38**, 3309-3311. <https://doi.org/10.1109/tmag.2002.802299>
- [14] Yang, L.J. and Li, P. (2016) The Propagation Characteristics of Oblique Incident Ultrasonic Waves in Damage Coating Steel. 2016 *Chinese Control and Decision Conference*, Yinchuan, 28-30 May 2016, 1149-1153.
- [15] 杨理践, 张往, 邢好, 等. 一种管道中(0,1)模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
- [16] Edwards, R.S., Dixon, S., Fan, Y., Jian, X., Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. (2008) EMAT Measurements of In-And Out-of-Plane Ultrasonic Signals. *AIP Conference Proceedings*, **975**, 841-848.
- [17] 袁银春, 孙天礼, 李怡, 等. 电磁涡流内检测技术在含硫双金属复合管道的应用研究[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(9): 211-214.
- [18] 伍权. 铁磁性材料脉冲涡流检测信号处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [19] Takagi, T., Hashimoto, M., Fukutomi, H., Kurokawa, M., Miya, K., Tsuboi, H., et al. (1994) Benchmark Models of Eddy Current Testing for Steam Generator Tube: Experiment and Numerical Analysis. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **5**, 149-162. <https://doi.org/10.1177/138354169400500301>
- [20] 康小伟. 包覆层管道腐蚀脉冲涡流检测机理与方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [21] 陆阳, 李永健, 徐晓甲, 等. 基于脉冲涡流对包覆层管道检测技术应用[J]. 辽宁化工, 2017, 46(8): 812-814.