

高温高压化工压力管道在复杂工况下的无损检测技术突破

吴兴昌 刘波 (东营市特种设备检验研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 在化工产业里, 高温高压化工压力管道是保障生产稳定的关键设施。然而, 因其运行工况复杂, 管道检测面临诸多难题, 传统无损检测技术难以满足需求。本文详细剖析高温、高压、强腐蚀等复杂工况对管道检测的影响, 全面梳理传统检测技术的局限, 深入探讨多技术融合、智能化检测、新型检测技术等方面的突破, 结合实际应用案例, 为提升化工压力管道检测水平提供思路, 助力化工行业安全、高效发展。

关键词: 高温高压; 压力管道; 无损检测

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 020-0151-03

Breakthroughs in Non-Destructive Testing Technology for High-Temperature and High-Pressure Chemical Pipelines under Complex Operating Conditions

Wu Xingchang, Liu Bo (Dongying Special Equipment Inspection Institute, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: In the chemical industry, high-temperature and high-pressure pipelines are critical infrastructure for ensuring stable production. However, due to complex operating conditions, pipeline inspection faces numerous challenges, and traditional non-destructive testing (NDT) methods often fall short. This paper thoroughly analyzes the impact of high temperature, high pressure, and strong corrosion on pipeline inspection, systematically reviews the limitations of conventional NDT techniques, and explores advancements in multi-technology integration, intelligent inspection, and novel detection methods. Supported by practical case studies, the study provides actionable insights to enhance inspection standards for chemical pipelines, thereby promoting safer and more efficient development in the chemical industry.

Keywords: high-temperature and high-pressure; pressure pipelines; non-destructive testing (NDT)

1 高温高压化工压力管道的工况特点与失效形式

1.1 工况特点

高温高压化工压力管道的服役工况极为复杂。就温度而言, 化工管道内部介质的温度普遍偏高, 像合成氨工艺的管道, 反应温度常年稳定在400~500℃。而在压力方面, 管道承受的压强跨度大, 常规区间为10~100MPa, 石油加氢裂化这类工艺场景下, 管道压力甚至会突破100MPa。此外, 管道输送的介质多为硫酸、氢氧化钠等物质, 它们或易燃易爆, 或具有强腐蚀性, 不仅会直接腐蚀管道内壁, 致使壁厚减薄, 还可能与管道材料发生化学反应, 改变材料微观结构, 造成管道性能劣化, 严重影响管道的安全稳定运行, 进而给管道的无损检测工作带来巨大挑战。

1.2 失效形式

在此如此复杂的工况下, 高温高压化工压力管道主要存在以下几种失效形式:

1.2.1 腐蚀失效

化工压力管道在服役过程中, 长期与具有腐蚀性的介质密切接触, 同时又暴露于复杂多变的外部环境, 在内外双重作用下, 极易发生腐蚀。腐蚀形态复杂多样, 涵盖全面腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀。全面腐蚀会使管道壁厚整体均匀减薄, 致使管道的承压能力持续下降。局部腐蚀中的点蚀、缝隙腐蚀等, 虽影响面

积不大, 但腐蚀发展迅速, 腐蚀深度较深, 往往会造成管道穿孔, 引发介质泄漏。应力腐蚀则是拉应力与腐蚀介质相互协同, 致使管道萌生裂纹, 裂纹持续扩展, 最终导致管道破裂, 严重威胁化工生产安全。

1.2.2 疲劳失效

在日常运行期间, 管道持续遭受周期性压力波动、频繁的温度变化, 以及设备运转带来的机械振动等复杂外力的共同作用。这些因素相互叠加, 致使管道产生交变应力。一旦交变应力超越管道材料固有的疲劳极限, 管道表面和内部的薄弱部位, 就会因微观结构持续受损, 逐渐萌生疲劳裂纹。随着管道运行时间不断增加, 裂纹如同在管道内部埋下的“定时炸弹”, 不断扩展延伸, 严重削弱管道结构强度, 最终导致管道疲劳断裂, 危及管道系统的安全稳定运行。

1.2.3 蠕变失效

当管道长期处于高温环境中, 其材料内部微观结构会发生一系列变化, 进而引发蠕变现象。具体来说, 即便在恒定应力的持续作用下, 管道材料也会随着时间推移, 缓慢且持续地产生塑性变形。随着高温运行时长的增加, 若管道蠕变变形突破临界限度, 不仅会使管道尺寸发生显著改变, 造成管道与其他部件的连接松动, 影响管道的正常运行, 还会在管道内部形成应力集中区域, 削弱管道的整体强度, 严重时直接

引发管道破裂，给化工生产埋下重大安全隐患。

2 传统无损检测技术在复杂工况下的局限性

2.1 检测方法概述

传统的无损检测技术在化工压力管道检测中应用广泛，主要包括超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测等方法。

在管道无损检测领域，超声检测凭借超声波在介质内的独特传播特性，借助对管道内部超声波反射、折射和散射信号的分析，准确识别管道是否存在缺陷。比如管道内部的裂纹、空洞等，都能通过超声信号的异常反馈来判断。

射线检测采用X射线或 γ 射线穿透管道，由于射线在遇到缺陷时的衰减程度不同，会在底片上呈现出各异影像，检测人员据此识别管道缺陷。磁粉检测专门针对铁磁性材料，当在管道表面施加磁粉时，缺陷处因漏磁场的存在，会吸附磁粉，形成清晰可见的磁痕，进而展示缺陷情况。渗透检测将含有色染料或荧光剂的渗透液涂覆于管道表面，渗透液会渗入缺陷内部，去除多余渗透液并涂显像剂后，缺陷内的渗透液被吸附，缺陷的形状和位置得以清晰显现。涡流检测利用交变磁场在管道中产生的涡流效应，一旦管道表面或近表面存在缺陷，涡流就会发生变化，从而被检测系统捕捉发现。

2.2 复杂工况下的局限性

2.2.1 高温对检测的影响

当管道长期处于高温环境运行时，管道材料内部的晶体结构、原子间距等微观层面发生显著变化，致使其物理性能改变。典型表现为弹性模量降低，材料刚性减弱，热膨胀系数增大，致使材料在温度变化下伸缩幅度变大。这些变化对无损检测带来极大挑战。在超声检测中，材料性能改变会导致超声波在管道内的传播速度与衰减特性大幅波动，干扰检测信号的准确性，使检测结果产生偏差。射线检测时，高温会使底片产生灰雾，严重降低底片的对比度，细微缺陷难以在影像中清晰呈现，造成漏检。磁粉检测方面，高温让磁粉性能下降，降低其对缺陷处漏磁场的响应能力，导致检测灵敏度降低。

2.2.2 高压对检测的影响

高压工况下，管道内部会承受巨大的应力，致使管道发生不可忽视的变形。管道一旦变形，检测工作的难度便显著增大。以超声检测为例，变形改变了管道的内部结构，超声波在传播过程中，原本既定的传播路径被打乱，部分声波甚至会因管道变形产生异常反射、折射，进而使检测信号发生偏差，严重影响检测结果的准确性。

2.2.3 腐蚀介质对检测的影响

化工管道输送的腐蚀介质，不仅会对管道本身造成损害，还会严重侵蚀检测设备和检测探头。设备长期接触这些介质，关键部件被腐蚀，极大缩短了设备的正常使用寿命。

与此同时，腐蚀过程中产生的各种产物会附着在管道表面，形成一层干扰层。当开展检测作业时，这层干扰层会阻碍检测信号的正常传输，严重影响检测结果的可靠性。比如在渗透检测环节，腐蚀产物有可能堵塞管道表面缺陷，致使渗透液无法顺利渗入，让原本存在的缺陷难以被发现，最终造成漏检。

3 复杂工况下无损检测技术的突破

3.1 多技术融合检测

鉴于单一无损检测技术难以满足复杂化工管道检测的多元需求，近年来，多技术融合检测法成为行业关注热点，在实际应用中不断推广。该方法创新性地将多种检测技术整合，让各项技术优势互补，显著提升管道缺陷检测的精准度与全面性。

超声检测和射线检测的联合应用，便是成功范例。超声检测凭借高灵敏度，能够快速捕捉管道内部细微缺陷。射线检测则借助成像直观的特点，清晰呈现缺陷的具体形状和空间位置。实际检测时，先用超声对管道进行全覆盖扫描，锁定可能存在缺陷的区域，再通过射线对这些区域细致分析，就能获得缺陷精确信息。针对铁磁性材料管道表面和近表面缺陷检测，磁粉检测与涡流检测的结合堪称绝佳方案。磁粉检测擅长发现表面开口缺陷，涡流检测对近表面缺陷则更为敏感。二者结合，可对管道表面及近表面缺陷进行无死角排查，大幅提高检测效率与可靠性。

3.2 智能化检测技术

伴随人工智能、大数据与物联网技术的蓬勃兴起，无损检测领域迎来智能化革新，智能化无损检测技术由此诞生。这一技术依托海量检测数据，运用大数据分析和人工智能算法，对管道缺陷展开自动识别、分类以及评估，显著提升检测工作的效率与精度。

以超声检测为例，深度学习算法在其中发挥关键作用。技术人员事先构建丰富的超声信号样本库，涵盖各类典型缺陷的信号特征，让深度学习模型反复学习、训练。模型借此掌握不同缺陷信号的特性，在实际检测时，能迅速、精准地分析采集到的超声信号，不仅判断管道有无缺陷，还能给出缺陷的类型、大小和位置等详细信息。

物联网技术为无损检测带来全新模式，赋予检测设备远程监控与数据传输功能。检测人员只需通过手机、电脑等终端，就能实时查看检测数据与设备状态，

第一时间分析、处理检测结果。物联网技术还实现检测数据的云存储,为后续数据挖掘和分析提供便利,极大提升检测工作的灵活性和数据利用价值,帮助检测人员全方位洞察管道健康状况,为管道维护和管理提供有力支持。

3.3 新型检测技术的应用

3.3.1 太赫兹检测技术

太赫兹技术作为无损检测领域的新兴成员,在非金属管道检测方面展现出独特优势,成功攻克了诸多传统检测技术难以解决的难题。太赫兹波不仅穿透能力强、分辨率高,还对人体安全无害,这使得其在聚乙烯等非金属管道母材和焊接缺陷检测中表现卓越。

中国石油工程材料研究院凭借技术创新,研发出国内首套石油化工用聚乙烯管道太赫兹在线自动检测设备。该设备利用太赫兹波特性,对聚乙烯管道热熔接头进行全方位三维扫描成像,能实时且直观地呈现接头的整体缺陷情况。经实际验证,该设备对聚乙烯管道热熔焊接接头中夹杂、气孔等常见缺陷的检出率超95%,且尺寸检测误差控制在50 μm 以内。这套设备的诞生,填补了国内在该领域的技术空白,为非金属管道无损检测开辟了新路径,有力推动了检测技术在石油化工非金属管道应用中的升级。

3.3.2 管道内检测技术

在油气输送过程中,复杂油气管道内部检测难题长期存在,不少管道因工况复杂,常规检测手段难以施展。沈阳仪表院聚焦这一痛点,成功研发出一款适应性极强的管道内检测器,攻克了复杂油气管道不敢检、不能检的行业难题。这款内检测器堪称技术集成的典范,它集成了磁、电涡流、角位移等15种高精度传感器,凭借独特的结构设计,能360°紧密贴合管道内壁,对管道展开无死角智能检测。在性能方面,这款内检测器成绩斐然。其最大变形量可达40%,介质驱动所需最小压力降至0.8MPa,典型缺陷智能识别率高达94%,比国际先进水平高出4个百分点。不仅如此,这款内检测器还实现了谱系化拓展,覆盖直径159mm至1422mm的36种不同口径管道。凭借卓越的性能和广泛的适用性,这款内检测器有效突破了复杂油气管道内检测瓶颈,为油气管道安全运行提供了可靠保障。

4 无损检测技术突破的实际应用案例

4.1 某石化企业的应用

某石化企业生产装置中的高温高压化工压力管道,长期在严苛工况下运行,安全风险较大。为保障管道安全,企业引入多技术融合检测与智能化检测技术。检测伊始,采用超声与射线检测相结合的策略。

超声检测凭借高灵敏度,迅速扫描管道,初步锁定潜在缺陷位置;射线检测则对可疑区域进行精确定位,清晰呈现缺陷影像。随后,采集到的检测数据被传输至智能化检测系统。系统借助深度学习算法,对数据深度剖析,自动精准识别缺陷的类型、大小与位置。

通过这一创新检测模式,企业成功检测出管道多处裂纹和腐蚀缺陷,并及时修复,避免了安全事故。此外,智能化检测技术显著提升检测效率,减轻检测人员工作负担,筑牢了企业安全生产防线。

4.2 某化工园区的应用

某化工园区的地下化工压力管道,承担着输送各类化工原料的重要任务,因长期深埋地下,检测难度极大。为解决这一难题,园区引入太赫兹检测技术和管道内检测技术。在实际检测时,针对地面上的管道接头,利用太赫兹检测设备,凭借其高分辨率的特性,快速且精准地找出接头处可能存在的缺陷。而对于深埋地下的管道,部署管道内检测器。该检测器在管道内自主运行,像一位尽职的“侦察兵”,全方位收集管道内部的详细信息。得益于这两种技术的联合使用,化工园区地下管道检测实现了无死角覆盖,及时发现并处理了管道存在的缺陷,有效避免了潜在安全隐患,为化工园区管道的安全稳定运行奠定了坚实的基础。

5 结论与展望

近年来,化工行业发展迅猛,高温高压化工压力管道作为化工生产的“血管”,运行工况愈发复杂。在此背景下,无损检测技术实现显著突破。多技术融合检测,将超声、射线等多种方法优势互补,大幅提升检测精度;智能化检测依托AI技术,自动识别缺陷,提升检测效率;新型检测技术,如太赫兹检测、管道内检测技术的应用,拓宽了检测范围,为管道安全运行筑牢防线。

但不可忽视,无损检测技术前行的道路上仍荆棘丛生。在超高温、超高压和强辐射等极端工况下,检测设备性能易受影响,检测可靠性与稳定性欠佳。面对新型材料管道和具有复杂结构的管道,现有检测技术在缺陷识别、精准定位等方面还力不从心。

展望未来,无损检测技术将迈向智能化、微型化、多功能化的新征程。持续深化人工智能、大数据、物联网等前沿技术在该领域的应用,实现检测全过程自动化,并提升数据挖掘分析能力。大力开展新检测原理和方法的研究,以满足化工行业对检测技术的更高要求。此外,加快无损检测标准的制定与完善,规范检测市场秩序,保障检测质量。多方协同发力,无损检测技术必将为化工行业安全稳健发展注入强大动力。