

天然气净化压力容器埋藏缺陷的检验检测和修复

史亮

胜利通海油田服务股份有限公司

摘要：本文围绕天然气净化装置压力容器超标缺陷的检测与修复问题，开展了多技术联合检测与修复工艺优化研究。针对常规检测方法精度不足的现状，提出了以超声检测为核心、结合磁粉检测与射线检测的综合检测方案，显著提升了缺陷识别的准确性与可靠性。通过对典型缺陷的成因与危害分析，制定了差异化修复策略，优选激光焊接、冷焊堆焊与激光熔覆等高效修复技术，实现了不停产条件下的缺陷快速修复。研究成果有效提升了压力容器的安全性与运行保障水平，具有良好的工程应用价值与推广前景。

关键词：超标缺陷；现场检测；在线监测；超声检测；修复技术

天然气净化装置中的压力容器是保障系统安全与稳定运行的关键设备，但受腐蚀、疲劳等因素影响，易出现超标缺陷，威胁装置运行安全。针对压力容器缺陷进行高效检测与修复，已成为保障设备安全、延长使用寿命的重要技术需求。本文围绕天然气净化装置压力容器的超标缺陷，分析缺陷类型与成因，研究先进检测方法与修复技术，旨在提升装置安全水平，降低安全风险，为工程实践提供技术支撑。

1 超标缺陷现场检测及在线监测过程及方法

1.1 检测体系优化

1.1.1 国内现有在线检测方法

天然气作为关乎民生与国家经济的重要能源，净化过程中关键压力容器长期处于连续运行状态，周期性检查面临巨大挑战。声发射监测虽具实时性和敏感性，但受环境噪声影响较大，定位精度不足，应用受限。为实现埋藏缺陷的可靠检测，采用 TOFD 检测方法，通过可视化图谱准确识别在役缺陷及扩

展情况。针对多台主吸收塔超标缺陷问题，需结合现场实际，优化无损检测体系，整合多技术手段，实现高效、精准、低漏检率的全方位检测与在线监测，保障设备长期安全运行。

目前，国内针对超标缺陷的在线检测方法主要包括超声检测（UT）、射线检测（RT）以及涡流检测（ET）等技术，见表 1。各方法在灵敏度、适用范围、检测效率等方面各有特点。超声检测以其穿透性强、实时性好、适用性广等优势被广泛应用于焊缝、板材、管道等金属结构的在线缺陷监测。近年来，激光超声、相控阵超声等新型技术也逐步应用于在线检测，提高了自动化与智

能化水平。为了实现高效、准确地在在线监测，需结合工艺特点对检测体系进行优化整合^[1]。

1.1.2 检测方法及工艺筛选

在检测方法及工艺筛选过程中，应根据材料种类、结构特点、缺陷类型与检测环境进行针对性选择。超声检测适用于内部缺陷检测，射线检测则适合对复杂结构内部探伤，但存在辐射风险。磁粉与涡流检测则更适合表面及近表面缺陷检测。综合考虑检测灵敏度、作业安全性与检测效率，本项目优先选用超声检测作为主导工艺，同时辅以必要的射线与表面检测技术。通过试验验证与比对分析，筛选出最优检测方案，确保

表 1 埋藏超标缺陷检测监测各类方法对比

检测方法	优点	缺点	量化方式	精度
超声检测	面积型缺陷如未熔合、裂纹、分层效果好	对于不规则工件的检测存在困难	长度和高度	长度 1 mm 高度 1.5 mm
射线检测	气孔、夹渣、疏松等体积型缺陷检出率高，可对缺陷定位、定量、定性	分层、裂纹检测效果差，对人体有伤害	只能显示缺陷的长度和宽度	长度和宽度 1 mm
TOFD 检测	所有缺陷类型都可检测，定量精度高，对缺陷深度位置进行精确定位	人员要求高，仪器复杂	长度和高度	长度 1 mm 高度 0.1 mm

缺陷检测的可靠性与可操作性。

1.2 检测工艺指导文件

1.2.1 主要检测依据

检测工艺指导文件的制定需严格依据国家与行业相关标准与规范,如《超声检测方法》(GB/T 11345—2023)《焊接接头无损检测通用技术要求》(GB/T 3323—2024)《压力容器无损检测》(NB/T 47013)等。同时,结合企业内部工艺标准与产品特性,确保指导文件既满足规范性要求,又具备实际可操作性。依据文件明确检测项目、技术参数、质量判定标准及操作流程,为现场检测与在线监测提供系统性、规范化的技术支撑,确保检测结果的准确性与一致性。

1.2.2 设备主要参数

检测设备的主要参数包括频率范围、灵敏度、分辨率、扫描速度与探测深度等。超声检测设备须具备高频率(2.5 ~ 10 MHz)、高灵敏度(≥ 60 dB)与多通道相控阵功能,以适应不同检测工况。对于在线检测,还须具备自动化数据采集、实时成像与缺陷识别能力。射线检测设备需关注射线源类型(X射线、 γ 射线)、辐射剂量与曝光时间等参数,确保检测效果与安全性。磁粉与涡流检测设备则需根据工件尺寸与表面状态优化参数设定,提升检测效率与可靠性。

1.3 超声检测(UT)工艺操作指导书

1.3.1 检测设备与器材

超声检测设备主要包括相控阵超声检测仪、标准试块、探头(直探头、斜探头)、耦合剂、扫描机构与数据处理终端等。相控阵设备具备多通道、高分辨率成像能力,适用于复杂结构与深层缺陷的检测。标准试块用于设备校准与灵敏度验证,确保检测数据的准确性。探头类型根据检测需求选用,直探头适用于平面区域,斜探头用于焊缝与倾斜面检测。耦合剂保证超声波良好传播,扫描机构实现自动化检测,提高检测效率与数据一致性^[2]。

1.3.2 检测准备

检测前需完成设备性能检查、标准试块校准与检测区域表面处理。首先检查检测仪器电源、接口、探头连接与信号响应,确保设备状态良好。使用标准试块进行灵敏度校验与零位校正,确认检测参数符合工艺要求。检测区域需去除油污、锈蚀与杂物,保证表面平整,提升超声波耦合效果。根据检测部位与工艺规范,合理布置探头与扫描路径,设置合适的检测参数(增益、声程、扫查速度等),为正式检测做好充分准备。

1.3.3 检测方法

超声检测采用脉冲回波法与相控阵扫描相结合的方式。根据工件结构特点选择合适的探头类型与入射角度,确保超声波覆盖检测区域。检测过程中,控制扫查速度与耦合质量,实时观察回波信号与成像图谱,识别缺陷特征并记录相关数据。针对重点部位与疑似缺陷区域,需进行多角度、多通道复测,确保检测结果的准确性与可靠性。检测完成后,按照工艺标准对缺陷性质、尺寸与位置进行评估,并出具检测报告。

2 现场埋藏缺陷成因分析

2.1 取样

天然气净化装置中的压力容器易受腐蚀、疲劳等影响产生缺陷,威胁装置安全与稳定。开展超标缺陷的检测与修复,是保障设备安全、延长使用寿命的关键。现场埋藏缺陷的分析始于科学取样,取样过程要根据施工标准和检测要求进行。首先,选择具有代表性和典型性的检测位置,并根据施工图样或地质报告确定潜在缺陷区域。然后,采用合适的工具进行取样如图1所示,确保样本在性质、尺寸和环境等方面的典型性。此外,取样过程中应严格控制土壤或混凝土的扰动,避免人为因素对分析结果产生干扰。为确保检测的准确性,必要时可以多次取样,并在不同深度和方位进行取样,最终获得充分反映缺陷



图1 现场截取试样

特征的数据。

2.2 缺陷定位及显示

缺陷定位与显示是现场检测与评估的核心环节,能够为后续缺陷分析提供重要依据。常见的缺陷定位方法包括射线检测、超声检测和渗透检测,每种方法具有其独特的优点和适用场景。

2.2.1 射线检测定位

射线检测通过发射高能射线穿透材料,依赖于缺陷区域与正常区域在射线吸收上的差异进行定位。缺陷区域的密度较低,吸收射线的能力较弱,因此在影像上呈现为暗区。通过调节射线源的角度、能量和曝光时间,可以获取精确的缺陷位置和形态。射线检测适用于检测较深、较难发现的埋藏缺陷,特别是在金属结构和混凝土中,广泛应用于管道和焊接接头等部位^[3]。

2.2.2 超声检测定位

超声检测利用声波在材料中的传播特性,依赖于反射波的时延差异来定位缺陷。超声波在材料内部遇到不同的介质界面时会产生反射,从而形成回波。通过分析回波的强度和时间差异,可以确定缺陷的尺寸、深度和位置。此方法适用于精确检测结构材料中的裂缝、空洞及层间脱落等隐蔽缺陷,且具有高分辨率。

2.2.3 渗透检测显示

渗透检测主要通过液体渗透到缺陷区域来揭示缺陷的表面特征。采用荧光或显色渗透液涂抹在材料表面,经过

一定时间后,渗透液会渗入表面裂纹或孔洞中,形成明显的色差,便于检查人员观察和记录。此方法特别适用于检测表面裂纹、气孔等浅层缺陷,适合在金属、塑料及涂层等材料表面进行使用。

2.3 缺陷分析

缺陷分析是确定缺陷成因的关键步骤,需结合多种检测方法的结果进行综合判断。通过分析缺陷的位置、形态、大小以及分布等特征,可以初步推测缺陷的形成原因。例如,结构承受过大的外力可能导致裂缝的出现,材料疲劳或腐蚀可能导致空洞和裂纹的产生。对于不同类型的缺陷,需要采取不同的分析模型,如力学模型、化学腐蚀模型等,以确定缺陷的产生机制。此外,分析时还需考虑环境因素,如温湿度变化、施工工艺及材料质量等因素。

2.4 缺陷性质的判定与讨论

缺陷性质的判定与讨论是对缺陷进行定性与定量评估的重要步骤。通过检测数据、取样分析和理论模型的结合,可以明确缺陷的性质,如裂纹、腐蚀、空洞等,进一步判定其对结构安全性和使用功能的影响。例如,深度较浅的裂缝可能对结构强度影响较小,而深度较大的裂缝则可能导致严重的力学性能下降。在缺陷性质判定过程中,还需综合考虑缺陷的扩展趋势及未来可能产生的风险,以制定合适的修复与加固措施^[4]。

3 设备在线修复及整体热处理技术研究

3.1 在线修复技术研究

在线修复技术是在设备不拆卸、不停产的前提下,通过精准检测、焊接修复、机械矫正与表面强化等手段如图2所示,对设备磨损、裂纹、变形等缺陷进行原位修复的高效技术。通过超声相控阵、红外热像等无损检测手段实现缺陷精准定位,结合激光焊接、冷焊堆焊等低热输入技术修复裂纹和磨损部位,同时运用便携式数控加工设备和激光测

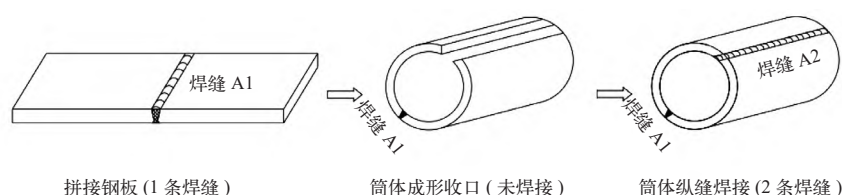


图2 对接后弯曲成型

量进行高精度矫正,恢复设备几何精度。表面强化方面,采用冷喷涂、激光熔覆等技术重建耐磨层,提升设备服役性能。该技术具备“免拆卸、低干扰、精度高、周期短”等优势,广泛应用于电力、冶金、石化等大型关键设备的在线维护,显著降低了修复成本与停机损失。

3.2 热处理技术研究

整体热处理技术通过对设备或大型部件实施系统性加热与保温,消除服役过程中产生的焊接残余应力、热应力与形变应力,提升材料组织稳定性与力学性能。主要包括整体退火、去应力退火、局部感应加热与均热处理等工艺,结合在线加热与恒温控制技术,确保设备受热均匀、应力释放充分。面对大型设备空间受限、温控要求高、受力变形复杂等技术难点,依托智能仿真分析、高效保温材料与远程监控系统,不断优化热处理工艺与安全性。未来将通过智能热处理仿真、绿色节能工艺与智能闭环控制,推动设备热处理技术向高效、精准、智能化方向发展。

3.3 修复效果跟踪评价

修复效果的跟踪评价是确保设备在线修复与整体热处理质量的重要环节,涵盖质量检测、服役性能监测与全生命周期管理。通过超声波、X射线、红外热像等无损检测手段,全面评估修复区域缺陷消除效果与几何精度恢复情况,结合硬度、组织与残余应力检测验证材料性能。服役阶段则依托振动、温度、应力传感器构建在线监测系统,实时掌握设备运行状态,结合大数据分析 with 智能诊断,实现剩余寿命预测与趋势预判。最终通过“检测-评价-反馈-

优化”闭环管理,建立可量化、可追溯的修复效果评价体系,保障设备安全运行与运维决策科学性。

4 结论

本文针对超标缺陷的现场检测与修复问题,提出了基于超声检测的多技术联合检测方法,优化了工艺流程,提高了缺陷识别的精准性。通过成因分析,明确了缺陷治理的关键因素,结合激光焊接、冷焊堆焊与激光熔覆等技术,实现了不停产条件下的高效修复,保障了天然气净化装置的安全运行。研究成果为压力容器缺陷检测与修复提供了可行的技术方案,具备良好的工程应用价值和推广前景。

参考文献:

- [1] 王鹏,崔伟,马金龙,等.压力容器小径支管角焊缝相控阵检测埋藏缺陷回波特性研究[J].压力容器,2024,41(04):72-79.
- [2] 王凤玲.超期服役金属固定式压力容器的检验技术研究[J].设备管理与维修,2024(06):10-12.
- [3] 赖永泉.基于失效和损伤模式的压力容器检验技术[J].中国特种设备安全,2024,40(05):50-53.
- [4] 王平杰,邓渝,蒲洋.第二级主吸收塔检验及缺陷分析[J].化工管理,2020(33):104-105.