

油田压力容器的检验与研究

徐仁朋

中国石油化工股份有限公司河南油田分公司 河南 南阳 473132

摘要：油田压力容器是油气生产的核心设备，长期处于高温高压、强腐蚀工况，易产生腐蚀、焊接等各类缺陷，直接威胁生产安全。本文结合油田压力容器的分类、服役特点及缺陷成因，系统研究常规与新型检验技术的应用，优化不同类型容器的检验方案，构建全流程检验质量控制体系，通过实例验证技术有效性，开展设备剩余寿命评估，为油田压力容器安全稳定运行提供技术支持与实践参考，助力油气行业安全生产提质增效。

关键词：油田；压力容器；检验与研究

引言：随着油气勘探开发向深层延伸，油田压力容器服役工况愈发复杂，高温高压、腐蚀性介质及连续运行负荷使其缺陷隐患频发，设备失效易引发安全事故与经济损失，加强其检验研究具有重要现实意义。当前传统检验技术存在局限性，新型检验技术应用不够成熟，检验质量控制体系仍需完善。基于此，本文围绕油田压力容器的缺陷分析、检验技术、质量控制展开研究，破解检验难题，为设备安全管控提供科学方案。

1 油田压力容器相关基础理论与常见缺陷分析

1.1 油田压力容器的分类与服役特点

(1) 分类：按用途可分为分离器、储罐、反应容器等核心类型，其中分离器用于油气分离，储罐多用于原油及成品油储存，反应容器用于油田化学反应工艺；同时可按压力等级分为低压、中压、高压容器，按材质分为碳钢、不锈钢、合金容器等辅助分类，不同类型容器结构差异明显，如分离器多设内部隔板，储油罐侧重密封结构设计。(2) 服役特点：长期处于高温高压工况，适配油田生产的工艺需求；频繁接触原油、天然气等腐蚀性介质，易引发材质损伤；需长期连续运行，设备负荷稳定且持续，易产生疲劳损伤；同时受井下及地面湿度、温度波动等环境因素影响，进一步降低设备性能稳定性。

1.2 油田压力容器常见缺陷类型及特征

(1) 腐蚀类缺陷：包括全面腐蚀、局部腐蚀（如绝热层下腐蚀CUI）、应力腐蚀裂纹。全面腐蚀呈均匀性，表面无明显凸起凹陷，降低整体壁厚；局部腐蚀集中在特定区域，CUI多发生在绝热层覆盖处，易形成点蚀孔洞；应力腐蚀裂纹呈细而长的线性分布，易引发突发性断裂，危害极大。(2) 焊接类缺陷：主要有气孔、裂纹、未熔合、未焊透。结合油田容器焊接工艺，气孔多分布在焊缝表面或内部，呈圆形或椭圆形；裂纹多产生

于焊缝及热影响区，呈线性；未熔合、未焊透多发生在焊缝根部，需通过无损检测识别，影响焊缝强度。(3) 其他缺陷：疲劳裂纹多产生于设备受力集中部位，由长期循环负荷导致；变形多因制造或运行过载引发，影响密封性能；密封失效多因密封件老化或安装不当，导致介质泄漏，威胁生产安全^[1]。

1.3 油田压力容器缺陷产生的主要原因

(1) 材质因素：材料选择不合理，如碳钢容器用于强腐蚀工况，耐腐蚀性能不足；材质本身存在夹杂、气孔等质量缺陷，降低容器承载能力，缩短使用寿命。(2) 制造与安装因素：焊接工艺不规范，如焊接电流、电压控制不当；安装精度不足，导致容器结构错位、应力集中，为后期缺陷发展埋下隐患。(3) 运行与维护因素：操作参数超标，压力、温度超出设计范围；日常维护不到位，防腐涂层破损未及时修补；防腐措施失效，加速缺陷产生与扩展。(4) 环境因素：油田井下及地面存在大量腐蚀性介质，温度波动、湿度变化频繁，加剧容器材质磨损与腐蚀，加速缺陷发展。

2 油田压力容器检验技术研究与应用

2.1 油田压力容器检验的基本要求与标准依据

(1) 检验基本要求：严格遵循安全性、科学性、全面性三大原则，确保检验过程不引发设备损坏或安全事故，检验方法科学合理、数据精准可靠，检验范围覆盖容器本体、焊接接头、密封部件等所有关键部位。检验时间周期需按规范执行，压力容器年度检查每年至少1次；安全状况等级为3级的固定式金属压力容器定期检验一般每3-6年1次；停机检验结合设备检修同步开展，排查各类潜在缺陷，确保检验符合要求。(2) 标准依据：国内标准GB150《压力容器》、TSG21《固定式压力容器安全技术监察规程》。

2.2 常规检验技术的应用与优化

(1) 宏观检验: 1) 目视检查: 压力容器目视检查指检验人员仅通过肉眼对其进行的检验, 通常包括对压力容器的外观, 焊缝布置, 防腐层, 腐蚀, 焊缝表面缺陷, 机械损伤等方面的检验; 2) 放大镜检查: 指借助放大镜, 对压力容器表面肉眼检查过程中发现的有怀疑的部位进行的检验, 一般多用于接管角焊缝等肉眼难于发现缺陷的部位。3) 手电筒照射检查: 用手电筒紧贴压力容器表面平行照射, 根据照射光的明暗变化显现出的压力容器表面变形, 如凹陷, 鼓包等, 此方法多用于内表面检验。4) 焊缝检测尺测量: 焊缝检测尺是压力容器外观检验常用的一种测量工具, 主要用于测量压力容器焊缝余高, 咬边深度, 焊缝宽度, 腐蚀深度等, 在压力容器出厂检验及现场运行检验均有广泛应用。5) 内径伸缩尺测量内径伸缩尺是用于测量压力容器内径及开孔组焊接管的筒体等的测量工具, 多用于压力容器制造厂的出厂检验, 运行中压力容器的最大和最小直径差检验可采用内径伸缩尺进行测量。6) 内窥镜检查内窥镜检查是指依靠内窥镜技术对压力容器内部缺陷进行的检验, 此方法多用于无法进入的压力容器内部, 无法用肉眼直接观测的部位及受空间限制无法靠近的部位。此方法简单易操作, 能真实反映压力容器内部的真实情况, 一般多用于压力容器的全面检验中。(2) 壁厚测定: 壁厚测定是指对压力容器受压元件厚度的测量, 用于确定受检压力容器能否满足安全使用要求, 是压力容器检验过程中常用的检验方法, 超声波测厚仪则是压力容器测厚检验中使用频率最高的仪器。根据受检压力容器温度范围, 选取普通测厚仪及高温专用测厚仪, 高温专用测厚仪应配合高温专用耦合剂及高温专用探头使用。超声波测厚操作简单快捷, 读数直观, 基本不受客观环境影响, 不会对压力容器结构及材料造成损害。根据压力容器的不同, 测厚位置的选取应具有代表性且应测够足够的测厚点数^[2]。(3) 无损检验技术的应用: 超声波检测(UT)利用超声波反射原理, 检测焊接接头内部裂纹、未焊透等缺陷, 优化检测频率和探头角度, 适配油田容器厚壁、高强度材质的检测需求; 射线检测(RT)通过射线穿透成像, 清晰显示内部缺陷形状和大小, 重点用于关键焊接部位检测; 磁粉检测(MT)针对铁磁性材质, 检测表面及近表面裂纹, 优化磁化强度参数, 提高微小裂纹检出率, 三者结合实现全方位无损检测^[2]。渗透检测(PT)是一种以毛细管作用原理为基础的无损检测技术, 主要用于检测非疏孔性的金属或非金属材料表面开口缺陷。检测时, 将溶有荧光染料或着色染料的渗透液施加到零部件表面, 由于毛细作用, 渗透液渗入

到细小的表面开口缺陷中, 清除附着在工件表面的多余渗透液, 经干燥后再施加显像剂, 缺陷中的渗透液在毛细现象的作用下被重新吸附到零件表面上, 就形成放大的缺陷显示, 即可检测出缺陷的形貌和分布状态。声发射检测法(AE)是一种基于材料或结构内部发生变形、损伤(如裂纹萌生、扩展、相变、滑移等)时, 会以弹性波形式释放能量(即声发射信号)的物理现象, 通过采集、分析这些信号来评估材料或结构完整性、损伤程度及发展趋势的无损检测技术。当材料或结构受到外力作用(如载荷、温度变化、压力波动等)时, 其内部的微观缺陷(如空位、位错)或宏观缺陷(如裂纹)会发生运动或扩展, 导致局部区域的应力释放。这种应力释放过程会激发周围介质产生弹性波, 该弹性波即为声发射信号。声发射信号会沿材料或结构传播至表面, 通过安装在表面的声发射传感器将机械振动信号转换为电信号, 再经前置放大器、数据采集卡等设备进行信号调理和数字化, 最终由分析软件对信号的特征参数(如幅值、上升时间、持续时间、计数、能量等)或波形进行分析, 从而判断缺陷的存在、位置、类型及活性。

2.3 新型检验技术在油田压力容器中的应用探索

(1) 智能化检验技术: 无人机巡检用于大型储油罐、高空容器的外部检验, 搭载高清摄像头和红外探测设备, 实现远距离、无接触检测, 规避高空作业风险; 机器人检测用于井下、狭小空间等难接近部位, 通过柔性机械臂携带检测设备, 精准排查内部腐蚀、裂纹等缺陷, 大幅提升检验安全性和效率, 降低人工劳动强度。

(2) 在线监测技术: 腐蚀速率在线监测通过安装腐蚀传感器, 实时采集介质腐蚀性数据, 计算腐蚀速率, 及时预警腐蚀隐患; 应力在线监测利用应变片等设备, 监测容器受力集中部位的应力变化, 结合工况参数, 预判疲劳裂纹发展趋势, 实现缺陷早发现、早处理, 减少非计划停机, 保障生产连续性^[3]。(3) 数字化检验技术: 建立检验数据信息化管理系统, 整合外观、无损、耐压等各类检验数据, 实现数据实时录入、查询和追溯; 结合数据分析技术, 对检验结果进行深度分析, 预判缺陷发展规律, 优化检验周期和方案, 打破传统检验的局限性, 提升检验管理的精细化、智能化水平。

2.4 不同类型油田压力容器的检验重点与方案适配

(1) 分离器检验重点: 聚焦内部腐蚀(尤其是介质接触部位的局部腐蚀)、焊接接头缺陷(如未焊透、裂纹)及压力边界完整性, 适配UT与RT组合检测方案, UT重点检测焊接接头内部缺陷, RT辅助验证缺陷大小和分布, 同时配合外观检验排查表面腐蚀, 确保分离器运行安

全。(2) 储罐检验重点: 以罐壁腐蚀、底板焊接缺陷、密封性能为核心, 优化外观检验与泄漏检测结合的方案, 外观检验重点排查罐壁点蚀、鼓包等缺陷, 底板采用真空试漏、气密性检测等方法排查泄漏, 配合磁粉检测排查底板焊接裂纹, 提升储油罐检验的针对性^[4]。(3) 反应容器检验重点: 重点检测高温高压工况下的疲劳裂纹和腐蚀损伤, 采用在线监测与定期无损检验相结合的方式, 在线监测实时掌握应力、腐蚀变化, 定期采用UT、RT检测疲劳裂纹, 结合耐压试验验证容器承载能力, 适配高温高压的服役特点, 保障反应容器稳定运行。

3 油田压力容器检验质量控制与缺陷的处理

3.1 油田压力容器检验质量控制体系构建

(1) 检验前质量控制: 严格审核检验人员资质, 确保其具备相应检验资格证书, 熟悉油田压力容器检验标准与工艺; 对检验所用的超声波检测仪、射线机等设备进行全面校准, 保证检测精度达标; 结合容器服役工况、既往缺陷情况, 编制详细检验方案, 明确检验项目、流程及风险点, 融入风险检验内容, 确保检验准备工作全面到位, 为检验工作有序开展奠定基础。(2) 检验过程质量控制: 全程监督检验人员严格执行操作规范, 尤其是无损检验环节, 严控探头角度、检测频率等参数, 确保操作精度; 规范检验数据记录, 对检测数据进行双人复核, 重点核对缺陷位置、尺寸等关键信息, 避免数据偏差, 保障缺陷判定的准确性, 杜绝漏检、误检问题。(3) 检验后质量控制: 按照标准规范编制检验报告, 明确检验结果、缺陷情况及结论; 对识别出的缺陷进行分级评估, 结合容器运行需求提出科学合理的处理建议; 将检验报告、数据记录等资料整理归档, 建立完善的检验数据追溯体系, 实现检验全流程可追溯, 为后续检验、维护提供依据。

3.2 一般缺陷的常规处理方法

3.2.1 裂纹修复

(1) 补焊修复: 适用于长度和深度较小的裂纹缺陷。步骤: ① 裂纹打磨清除 (采用角磨机或碳弧气刨,

打磨后用 PT/MT 验证裂纹清除彻底); ② 预热处理; ③ 焊接修复; ④ 焊后热处理; ⑤ 复检。(2) 挖补修复: 适用于裂纹较长或深度较大的缺陷, 切割去除缺陷区域, 更换新的板材并焊接。

3.2.2 腐蚀减薄处理

(1) 堆焊防护: 对腐蚀严重区域堆焊耐蚀合金, 提高表面耐蚀性; (2) 衬里修复: 采用玻璃钢、聚四氟乙烯等耐腐蚀材料衬里, 适用于均匀腐蚀的容器内壁; (3) 报废处理: 剩余壁厚 < 计算壁厚, 且无法修复时, 按规定报废。

3.2.3 变形与泄漏处理

(1) 塑性变形: 轻微变形可通过矫正工艺修复, 严重变形需更换部件; (2) 泄漏处理: 法兰泄漏可更换密封垫片、紧固螺栓; 接管泄漏采用带压堵漏技术 (如注胶堵漏), 紧急处理后停机修复。

结束语

本文通过对油田压力容器基础理论、检验技术及质量控制的系统研究, 介绍了各类典型缺陷的特征与成因和常规检验技术, 探索了智能化、在线化等新型技术的应用路径, 构建全流程质量控制体系。未来应重点发展智能化、数字化检测技术, 深化腐蚀机理研究, 完善技术标准体系, 实现从“事后维修”向“预测性维护”的转变, 为油田安全生产提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 孙恒颇. 压力容器焊接工艺评定常见问题分析及对策[J]. 黑龙江科技信息, 2022, 12(7): 35-38.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG 21-2016.
- [3] 沈康伟. 压力容器焊接质量控制技术探讨[J]. 化学工程与装备, 2023, 20(5): 138-141.
- [4] 李子正, 赵一恒. 压力容器焊接常见缺陷的产生和防治措施[J]. 中国石油和油田标准与质量, 2022, 33(10): 232-236.