

高温服役压力容器现场检验难点及可靠性评价研究

闫育辉 杨倩茹

石油天然气兰州工程质量监督站

甘肃兰州 730060

摘要：高温服役压力容器是石油化工、煤化工等领域的核心承压设备，长期处于高温、高压、腐蚀性介质耦合的服役环境，现场定期检验是防控失效风险的核心手段。针对当前现场检验存在的工况约束多、检测方法适配性差、可靠性评价精度不足等问题，本文结合一线检验经验，梳理了高温压力容器现场检验的三类核心难点，从非接触检测技术选型、工况预处理、校准体系构建三个维度提出检验优化方案，构建了多源数据融合、风险分层定级、寿命动态修正的可靠性评价体系。研究成果可为相关设备的现场检验与安全评估提供工程参考，提升承压设备运行的安全性与经济性。

关键词：高温服役压力容器；现场检验；可靠性评价；非接触无损检测；剩余寿命评估

引言

高温服役压力容器广泛应用于加氢反应、重整、煤气化等核心工艺单元，长期承受高温高压与硫化氢、氢气等腐蚀性介质的耦合作用，一旦发生失效事故将造成重大人员伤亡与财产损失。根据现行承压设备安全技术规范要求，此类设备需定期开展检验，但相较于实验室离线检测，现场检验受到服役余热、工况约束、作业空间等多重限制，常规检测方法的精度与可靠性大幅下降。现有研究大多聚焦于常温条件下的压力容器检验与评价方法，针对高温现场复杂工况的适配性研究相对不足，难以满足实际工程需求。本文结合多年现场检验实操经验，系统梳理高温服役压力容器现场检验的核心难点，提出适配性检验技术优化方案，并构建针对性可靠性评价体系，为一线检验工作提供实操参考。

1 高温服役压力容器现场检验的核心难点

1.1 工况耦合带来的检验前置约束

高温压力容器停车后若直接降温至常温开展检验，反复升降温会导致铬钼钢、不锈钢等常用材料出现热疲劳损伤，大幅缩短设备使用寿命，因此多数企业要求检验保留一定服役余热，设备本体温度普遍高于常规检验适用阈值。同时，容器内部易残留硫化氢、挥发性烃类等有毒易燃易爆介质，全容器置换周期长、成本高，局部检验区域的介质隔离难度较大。此外，设备外层的硅酸铝保温层若全部拆除，后续开车阶段的热补偿成本极高且易引发保温层失效，仅能开展局部拆检，大幅缩小检验覆盖范围。

1.2 常规无损检测方法的适配性不足

常规超声检测依赖耦合剂，温度超过 100℃时耦合剂会快速挥发失效，且高温状态下材料声速、声衰减系数发生明显变化，未校准的检测结果误差可达 30%

以上。磁粉检测仅适用于铁磁性材料，设备温度接近居里点时磁导率大幅下降，缺陷磁痕清晰度不足。渗透检测的渗透剂与显像剂耐温上限普遍低于 150℃，高温下渗透剂快速挥发无法进入微小缺陷，检测灵敏度大幅降低。射线检测则受到现场作业空间、周边设备运行的辐射防护约束，多数工况下无法实现全焊缝扫查。

1.3 检验数据的离散性与溯源困难

现场检验受设备温度、环境风速、作业空间等条件波动影响，同一区域不同时段检测结果偏差明显，人员操作、参数设置的差异会进一步放大数据离散性。同时，现场检验难以携带标准试块开展实时校准，多数检测数据无法通过溯源验证准确性。此外，现有设备历史检验数据多为常温条件下的检测结果，与高温状态下的缺陷扩展速率、材料性能退化规律无法直接匹配，难以支撑后续可靠性评价。

2 高温服役压力容器现场检验的适配技术优化

2.1 非接触式无损检测技术的选型应用

针对带保温层的高温检验场景，优先选用脉冲涡流检测技术，无需拆保温层即可实现 300℃以下工况的壁厚减薄、表面裂纹扫查，精度可满足壁厚偏差 5% 以内的检验要求。500℃以上的高温场景，选用激光超声检测技术，通过脉冲激光激发弹性波，无需耦合剂即可实现内部埋藏裂纹、氢致损伤的定量检测。针对表面氧化层脱落、局部过热等缺陷，选用红外热成像检测技术，快速扫查大面积区域的温度异常点，锁定缺陷疑似区域后再开展精细化检测。

2.2 检验前置的工况预处理方案优化

采用阶梯式降温策略，控制降温速率在 15℃/h 以内，既避免快速降温引发热疲劳损伤，又将设备温度控制在检测适用区间，平衡检验精度与设备损伤防控需求。针对介质残留问题，采用“全容器惰性气体置换 + 检验区域盲板隔离”的预处理方案，无需将容器内部介质浓度降至绝对安全阈值，仅对检验作业的局部区域做严格隔离与置换，大幅缩短预处理周期。保温层拆检遵循“风险区域优先”原则，仅对焊缝、接管角焊缝、变径段等缺陷高发区域做局部拆除，其余保留保温层，降低后续开车热补偿成本。

2.3 现场检验的标准化校准体系构建

提前制备与设备同材质、同热处理工艺的高温校准试块，检验前将试块置于设备本体同温区域静置 30min 以上，校准检测设备的声速、灵敏度等参数，消除高温引发的检测系统误差。制定统一的现场检验操作规范，明确超声扫查速度、探头耦合压力、激光检测焦距等操作参数要求，降低人员操作带来的随机误差。构建现场检验数据实时上传系统，将检测数据与设备的材质、服役工况、历史缺陷等信息绑定存储，为后续可靠性评价提供完整数据支撑。

3 高温服役压力容器的可靠性评价体系构建

3.1 多源检验数据的融合处理逻辑

将现场检测的壁厚、裂纹缺陷、材料硬度、介质腐蚀速率等数据纳入统一数据库，采用格拉布斯检验法剔除异常数据，同一区域的多次检测数据取中位数作为有效值，消除单次检测随机误差。结合材料的高温持久强度曲线、腐蚀疲劳扩展模型，将检测数据映射为材料性能退化、缺陷扩展的量化指标，为可靠性评价提供基础数据支撑。

3.2 分层次的失效风险定级方法

根据缺陷类型、尺寸、扩展速率与设备的服役工况，将失效风险分为三个等级：一级为高风险，即裂纹深度超壁厚 1/3、壁厚减薄量超设计最小壁厚 10%、

存在氢致开裂等严重材料损伤,直接判定为不合格,需立即返修;二级为中风险,即缺陷尺寸在允许范围内但扩展速率超常规值、局部材料硬度异常,判定为监督运行,检验周期缩短至常规的 1/2;三级为低风险,即无明显缺陷、材料性能无明显退化,按常规周期检验即可。针对临氢、高硫等强腐蚀工况的设备,额外增加氢损伤、硫化物应力腐蚀的专项评价,调整风险定级阈值。

3.3 剩余服役寿命的动态修正机制

基于融合后的检验数据,采用损伤累积模型计算设备剩余服役寿命,针对不同工况设置差异化安全系数:强腐蚀工况取 1.5 以上,普通高温工况取 1.2,避免极端工况突发失效。建立寿命动态修正机制,每次现场检验后根据最新的检测数据更新腐蚀速率、缺陷扩展速率参数,重新计算剩余寿命;若后续服役工况出现温度、压力、介质成分调整,立即开展补充评价并修正寿命阈值,确保评价结果匹配实际服役状态。

结束语

高温服役压力容器的现场检验与可靠性评价是保障承压设备安全运行的核心环节,实施质量直接关系生产企业安全稳定运行。本文结合一线检验实操经验,系统梳理了工况约束、检测方法适配性不足、数据离散三类核心难点,从非接触检测技术选型、工况预处理、标准化校准三个维度提出现场检验优化方案,构建了多源数据融合、风险分层定级、寿命动态修正的可靠性评价体系,可有效提升高温压力容器现场检验准确性与评价可靠性。

参考文献:

- [1]雷艳.压力容器检验中的可靠性与安全性评估研究[J].产品可靠性报告,2024,(1):131-133.
- [2]薛祥东,胡光忠,王平,等.基于数字孪生的高温高压容器寿命预测[J].科学技术与工程,2024,24(15):6320-6328.
- [3]潘曙平,甘磊.临氢环境下承受交变载荷的压力容器合于使用评价及缺陷成因分析[J].化工机械,2023,50(3):402-406.