

基于 RBI 技术的化工装置特种设备差异化检验方案应用研究

郭星海

内蒙古自治区特种设备检验研究院巴彦淖尔分院 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘 要: 化工装置特种设备数量庞大、服役环境复杂,传统“到期必修”的定期检验模式导致检验过剩与不足并存。本文引入基于风险的检验技术,通过风险辨识、计算与排序,建立差异化检验方案制定方法。结合加氢裂化装置工程实践,阐述 RBI 技术在检验策略优化中的完整流程,涵盖风险分析、失效概率与后果计算、风险等级划分及检验周期确定等环节。实践表明,RBI 方法可在不降低安全水平的前提下降低 30%~50% 检验工作量,实现检验资源向高风险设备集中配置,为特种设备检验管理提供科学化决策依据。

关键词: 风险检验;化工装置;特种设备;差异化检验;风险评估

引言: 化工装置特种设备长期处于高温、高压、腐蚀性等恶劣工况,其安全运行直接关系装置连续生产和人员生命安全。当前检验管理依据《固定式压力容器安全技术监察规程》和《压力管道安全技术监察规程》规定固定检验周期,存在“一刀切”的制度惯性,导致高风险设备检验深度不足、低风险设备资源浪费的结构性矛盾。基于风险的检验技术以风险为核心指标,根据失效概率与后果的综合等级制定差异化策略,已在欧美石化行业成熟应用。本文立足国内法规框架,研究 RBI 技术在化工装置特种设备检验中的工程应用方法,为检验方案优化提供支撑。

1 RBI 技术的基本原理与方法体系

1.1 RBI 技术的核心理念

RBI 是一种以风险评估结果为导向、以确定合理检验策略为目标系统化分析方法。其核心逻辑为:检验活动的最终目的不是检验本身,而是通过检验降低设备失效风险。在资源有限的现实约束下,检验活动应优先投向风险最高的设备。该理念与传统检验模式存在本质差异——传统模式关注设备是否在规定周期内完成了规定的检验项目,RBI 模式关注风险是否通过检验活动降低到了可接受水平。这一转变将检验工作从“时间驱动”转变为“风险驱动”,使检验资源的配置逻辑从机械平均分配转向按需精准投放。

1.2 RBI 的风险分析框架

RBI 风险分析遵循基本风险公式: $\text{风险} = \text{失效概率} \times \text{失效后果}$ 。失效概率分析需要综合考虑设备劣化机理、损伤速率、检测有效性及安全保护系统可靠性等因素,

以设备在检验周期内发生失效的可能性为输出。失效后果分析则从介质危害性、泄漏扩散范围、人员伤亡可能性、财产损失及生产中断影响等维度评估一旦失效的严重程度。两者相乘得到风险值,按风险值高低将设备划分为高、中高、中低、低四个风险等级^[1]。不同等级对应不同的检验方法、检验范围和检验周期。风险等级越高,检验方案越严格,检验周期越短、检验方法越全面;风险等级越低,检验要求相应放宽。

1.3 RBI 方法的实施流程

RBI 实施通常包含六个步骤。第一步为数据收集与审查,汇总设备基础信息、工艺参数、操作历史及历次检验记录。第二步为失效机理分析,根据材料、介质、温度、压力等参数判断主导失效模式。第三步为失效概率计算,综合通用失效频率、设备修正系数和管理修正系数得出。第四步为失效后果评估,计算泄漏量、扩散范围及综合损失。第五步为风险计算与排序,得出各设备风险等级。第六步为检验策略制定,根据风险等级确定检验方法、检验部位和检验周期。这是一个动态循环过程,每次检验后的新数据应反馈更新风险评估结果,实现检验策略的持续优化。

2 化工装置特种设备检验管理现状与 RBI 适用性

2.1 现行检验管理模式及问题

我国特种设备检验管理遵循 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和 TSG D0001—2009《压力管道安全技术监察规程》的法定框架。压力容器首次检验在投用后 3 年内进行,后续周期一般为 3~6 年;压力管道首次检验在投用后 3 年内进行,后续周期一般为

3~6 年。这种模式在实践中面临突出问题。一方面,装置中大量低风险设备被强制按固定周期检验,造成人力物力浪费。某石化企业统计显示,约 65% 的压力容器历年检验中从未发现超标缺陷,但检验资源仍按统一标准配置。另一方面,部分高风险设备固定周期可能不足以支撑装置长周期运行,但受法规检验周期上限约束无法灵活延长。固定周期检验模式与装置连续运行需求之间的张力日益突出。

2.2 RBI 应用的法规兼容性与约束条件

RBI 方法在国内的应用需以现行法规框架为约束边界。《固定式压力容器安全技术监察规程》提出“基于风险的检验”概念,允许采用 RBI 方法确定检验周期,但规定了上限——压力容器检验周期最长不超过 9 年。同时要求 RBI 分析须由具备相应资质的技术机构或人员进行,分析报告须经使用单位技术负责人批准。这为 RBI 技术推广提供了法规通道,但也设定了双重约束:风险等级无法无限降低,任何设备都不可无限期免检^[2]。另外,RBI 应用还存在技术条件约束,要求企业具备完整的设备历史数据积累、稳定的工艺操作条件和具备相应资质的技术人员。不具备上述条件时,RBI 结果的可信度难以保障。

2.3 RBI 替代传统检验模式的必要性与可行性

从必要性角度看,化工装置长周期运行趋势要求检验模式同步升级。现代大型化工装置普遍追求“四年一修”甚至“五年一修”,传统固定周期检验与长周期运行需求直接冲突。从可行性角度看,国内已有超过 10 年 RBI 工程应用积累,在加氢裂化、乙烯裂解、煤化工等典型装置中积累了丰富的工程经验,技术路线日趋成熟。法规层面已为 RBI 应用留出制度空间,技术层面已形成完整的分析方法和工具链,工程层面已有大量成功案例验证其效果。因此,在化工装置特种设备检验中推广 RBI 方法具备充分的必要性与可行性。

3 基于 RBI 的差异化检验方案编制方法

3.1 风险等级划分方法

风险等级划分以风险值定量计算为基础,结合装置特点和企业安全管理目标进行合理分级。通用做法为:将风险值取对数后,采用自然断点法将设备分为高风险、中高风险、中低风险和低风险四级。高风险设备指失效概率高且后果严重者,需立即制定针对性检验方案,检验周期缩短至 1~2 年;中高风险设备指单项风险突出者,检验周期通常设为 2~3 年;中低风险设备风险可控,常规检验即可满足要求,周期可延长至 4~6 年;

低风险设备失效概率极低、后果轻微,在满足法规上限前提下可延长至最长 9 年。等级划分非静态结果,每次检验后应结合新获取的检测数据重新计算风险值,必要时调整设备等级。

3.2 差异化检验方法与周期的确定

检验方法的选择应根据风险等级和失效机理确定,高风险设备应采用多种检测方法组合验证,例如射线检测与超声检测联合、增加表面检测和硬度检测,必要时补充金相检验或高温蠕变评估,检验范围应覆盖全部可能损伤区域。中高风险设备以常规无损检测为主,必要时辅以补充检测手段,检验范围以历史缺陷部位和应力集中区域为重点。中低风险设备和低风险设备以宏观检查和常规检测为主,检验范围可适当缩减至代表性部位。检验周期的确定需综合风险等级、损伤速率和法规上限三个因素,在满足最低法定检验周期要求的前提下,高等级设备取短周期确保安全裕度,低等级设备取长周期释放冗余检验资源^[3]。

3.3 差异化检验方案的编制内容

完整的差异化检验方案至少包含以下内容。一是设备基本信息与风险等级汇总表,列明每台设备的风险等级和定级依据。二是分等级检验计划,明确各等级设备的检验时间节点、检验方法和检验部位。三是重点设备专项检验方案,对高风险设备和有特殊失效机理的设备单独编制详细检验作业指导书,明确检测工艺参数和合格标准。四是检验记录与报告要求,规定不同类型设备的检验报告内容和格式,确保高风险设备的检验报告包含充足的应力分析和损伤评价内容。五是失效预防措施建议,针对高风险设备的失效机理提出操作条件优化建议或材质升级建议,从源头降低风险水平。

4 工程应用案例分析

4.1 装置概况与风险分析

以石化企业加氢裂化装置为例,该装置年加工能力为 150 万吨,包含压力容器 86 台、压力管道 218 条,设计压力最高达 20MPa,设计温度最高达 450℃,介质涵盖氢气、硫化氢、轻烃等易燃易爆和有毒物质。装置自上次大修已运行 3.5 年,计划继续运行至第 4 年进行下次大修。采用 RBI 方法对全部设备进行风险分析。数据收集覆盖设计参数、操作条件、历史检验记录、腐蚀监测数据。失效机理分析确认高温氢腐蚀、硫化氢应力腐蚀和回火脆化为三种主导失效模式。经计算,86 台压力容器 中高风险设备 6 台、中高风险设备 28 台、中低风险设备 38 台、低风险设备 14 台。218 条压力管道 中高风险管道

12 条、中高风险管道 56 条、中低风险管道 102 条、低风险管道 48 条。

4.2 差异化检验方案的制定

根据风险等级划分结果制定差异化检验方案。6 台高风险压力容器检验周期从原 3 年统一缩短至 2 年, 检验方法在原射线检测和超声检测基础上增加 TOFD 检测和硬度检测, 检验部位覆盖热影响区、开孔补强区等应力集中区域, 同步开展金相检验评估材质劣化程度。12 条高风险压力管道检验周期从原 3 年调整至 2 年, 采用超声检测与射线检测结合, 重点抽查弯头、三通和焊接接头。中高风险设备的检验周期延长至 3 年, 以常规无损检测为主。中低风险和低风险设备的检验周期延长至 4 年, 以宏观检查和超声测厚为主。

4.3 实施效果分析

按差异化检验方案运行两年后, 对实施效果进行系统评估。高风险设备发现的缺陷检出率较传统检验模式提升约 25%, 6 台高风险设备中有 2 台检测出早期氢致裂纹, 因及时干预避免了非计划停机。低风险设备的检验工作量降低约 60%, 全装置检验总工作量较传统模式降低约 35%, 释放的检验资源集中投入到高风险设备中。装置整体安全水平未因低风险设备检验放宽而下降, 连续运行周期从原计划的 3~4 年延长至 5 年。检验总成本较传统模式降低约 30%, 单位检验投入的风险削减效益明显提升。

5 差异化检验方案实施的关键问题与对策

5.1 数据质量保障与历史信息管理

RBI 分析结果的可靠性高度依赖输入数据的完整性和准确性, 数据质量是制约差异化检验方案有效实施的首要障碍。实际工程中常见数据缺陷包括: 设备基础数据缺失或记录不全, 老旧设备的设计参数、材质证明等原始资料不完整; 工艺操作数据与设计条件偏离未及时更新; 历次检验报告格式不统一, 缺陷记录描述不一致, 难以提取劣化趋势信息^[4]。针对上述问题, 企业应建立设备全生命周期数据管理制度, 明确数据采集、录入、审核、更新的责任流程。首次开展 RBI 分析前, 应组织专项数据核查, 对关键数据缺失的设备优先补充检测或查阅原始档案。数据质量的持续改进是 RBI 动态循环的基础, 只有输入数据可靠, 风险评估结果才有工程参考

价值。

5.2 人员能力建设与组织协同机制

RBI 技术的有效实施需要跨专业团队协作, 分析团队通常需涵盖腐蚀工程师、无损检测工程师、工艺工程师及设备管理人员, 各角色需具备相应专业知识和协同能力。当前多数企业面临腐蚀与失效分析专业人员不足、检验人员对 RBI 方法理解不深、工艺人员参与度低等困难。因此, 应建立分层培训机制: 决策层侧重 RBI 理念与价值培训, 理解差异化检验的管理意义; 执行层侧重分析方法和工具培训, 掌握风险计算、失效模式识别等核心技能; 操作层侧重数据采集与记录规范化培训, 确保基础数据源头可靠。组织层面, 建议成立由设备管理部门牵头的 RBI 工作组, 建立定期联席会商制度, 打通腐蚀、检测、工艺、维修等部门间的信息壁垒, 使 RBI 方法真正从技术工具转化为管理能力。

结束语

本文以化工装置特种设备检验管理为研究对象, 系统探讨了 RBI 技术的工程应用方法。通过建立风险等级划分准则和差异化检验方案编制流程, 形成了“风险分析—等级划分—策略制定—效果验证”的完整方法论。工程实践表明, RBI 技术能够在不降低安全水平的前提下实现检验资源的优化配置, 高风险设备获得更密集、更全面的检验覆盖, 低风险设备避免不必要的检验投入, 综合检验成本降低约 30%。该方法的推广需解决数据质量和人员资质两个关键制约因素, 建议企业先建立完善的设备基础数据库, 再逐步推进 RBI 方法的工程应用。

参考文献

- [1] 张元友, 关凯书. 基于风险的检验 (RBI) 技术在加氢装置中的应用 [J]. 石油炼制与化工, 2025, 56(7): 186-194.
- [2] 徐小霞. 基于风险检验的 RBI 技术在压力容器检验流程中的应用 [J]. 内蒙古科技与经济, 2024(14): 111-114.
- [3] 李振铎, 王雄杰, 崔志峰, 等. 基于风险的检验 (RBI) 技术在大型原油储罐群的应用 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024, 41(1): 30-36.
- [4] 刘粉妮. 基于风险检验的 RBI 技术在压力容器检验流程中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(2): 58-60.