

化工反应釜安全运行与风险防控措施分析

高彭, 庞丽丽, 许浩, 凌瑞昕
鲁西化工集团股份有限公司, 山东 聊城 252211
DOI:10.61369/ETQM.2026060034

摘 要 : 反应釜作为化工生产的核心单元设备, 它的安全运行直接关联到生产连续性以及本质安全水平。针对工艺过程、设备完整性以及人为操作这三方面风险因素进行系统性识别, 应该从工艺安全信息规范化、关键参数监测联锁、设备全生命周期完整性管理这三个维度构建运行管控体系。在此基础上, 融合源头预防设计、自动化智能化过程控制、应急处置措施以及人员能力建设, 形成覆盖设计、操作、维护、应急全流程的风险防控工程。数智技术为反应釜可靠运行赋能。

关 键 词 : 反应釜; 安全运行; 风险防控; 全流程管理

Analysis of Safety Operation and Risk Prevention Measures for Chemical Reaction Vessels

Gao Peng, Pang Lili, Xu Hao, Ling Ruixin
Luxi Chemical Group Co., Ltd. Liaocheng, Shandong 252211

Abstract : The reaction vessel, as a core unit equipment in chemical production, its safe operation is directly related to the continuity of production and the level of inherent safety. Systematic identification of risk factors in the process, equipment integrity, and human operation should be carried out from three dimensions: standardization of process safety information, monitoring and interlock of key parameters, and full life cycle integrity management of equipment. On this basis, integrating source prevention design, automated and intelligent process control, emergency response measures, and personnel capability building, a risk prevention and control project covering the entire process of design, operation, maintenance, and emergency response should be formed. Digital and intelligent technologies empower the reliable operation of the reaction vessel.

Keywords : reaction vessel; safe operation; risk prevention and control; full-process management

引言

大型化工反应釜广泛用于石油、精细化工、医药化工等领域, 内部化学反应复杂, 长期处于高温 (部分超 300℃)、高压 (可达 10MPa 以上)、强腐蚀 (如酸碱、有机溶剂) 环境, 设备结构 (如釜体、搅拌系统等) 易发生故障。反应釜作为化工生产当中的核心单元设备, 集合了混合、反应、传热等多重功能于一体, 它的运行状态直接关系到生产连续性、产品质量以及本质安全水平。当前化工行业面临着工艺复杂性日益增加以及高温、高压、强腐蚀等极端工况普遍存在的严峻挑战, 历史上多起安全事故对反应釜风险管控提出了更高的要求。系统识别运行风险因素并且采取有效的防控措施, 已经成为保障化工生产安全亟待解决的关键问题。

一、反应釜运行风险因素的系统性识别

(一) 工艺过程风险

工艺过程的风险是反应釜运行风险因素识别中的核心部分。反应热失控的风险表现为放热反应过程中热量积聚, 若搅拌系统失效或冷却能力不足, 局部过热会迅速导致温度失控, 进而可能引发暴聚、分解甚至爆炸事故。工艺参数偏离表现为温度、压力、液位等关键指标超出设计限值, 这类偏离通常由控制系统故

障、仪表显示不准确或操作干预不当导致, 若不及时纠正, 将直接破坏反应平衡状态。物料的危险性体现在原料、中间体或产物自身具有燃爆特性、不相容性质以及在特定条件下的自分解倾向, 这些构成了潜在化学能释放的源头^[1]。上述这三类风险因素在工艺过程中常常相互交错在一起, 单一环节出现失效的情况就有可能引发连锁的反应, 对反应釜的安全运行构成直接的威胁。

(二) 设备与机械完整性风险

设备与机械完整性的风险是反应釜运行风险识别的另外一个

作者简介: 高彭 (1988.10-), 男, 汉族, 山东聊城人, 本科, 中级注册安全工程师, 研究方向: 化工行业全场景安全管控体系落地与技术迭代, 石油化工企业系统性安全风险防控体系建设。

关键的方面。本体结构失效主要表现为釜体、夹套及盘管在长期使用中因腐蚀减薄、疲劳开裂或原始材质缺陷而发生的泄漏甚至破裂事故，其中应力腐蚀与晶间腐蚀在高温高压及强腐蚀介质环境下尤为明显。搅拌系统故障方面，搅拌轴断裂、机械密封泄漏、叶轮脱落等问题不仅会导致混合效果丧失，还会因局部反应物积聚引发温度分布不均与反应速率失衡，使原本可控的反应过程迅速恶化。附属装置失效表现为安全阀、爆破片及紧急泄压系统等安全附件误动作或拒动作，前者造成非计划停车与物料损失，后者在超压工况下无法泄放，使设备本体面临超出设计压力的风险。上述这三类风险相互关联，任何一个环节的机械完整性出现缺失的情况都有可能成为事故链的起始点^[2]。

（三）人为与操作管理风险

人为与操作管理风险是反应釜运行风险因素中最活跃且难以完全消除的变量。操作程序缺陷表现为投料顺序颠倒、投料速率控制不当、关键步骤操作错误等问题，这些问题通常源于操作规程缺乏可执行性，或操作人员对工艺原理理解不足，直接导致反应条件偏离设计预期。检维修作业的风险集中体现在设备打开前未按规定进行清洗置换、未采取有效的能量隔离与物料隔离措施，致使易燃易爆介质与点火源在作业区域意外相遇，这类事故在化工行业安全事故中占比较高。应急响应能力不足方面，初期异常工况识别迟缓、应急处置措施失效或执行不到位，使本可控控制在初期的小范围偏差演变为失控事故。上述风险因素反映出人在制度执行、技能掌握以及应急判断等方面存在的局限性，是反应釜安全管理当中需要持续关注的重点的领域^[3]。

二、基于本质安全的运行管理控制体系

（一）工艺安全信息与操作规程的规范化

工艺安全信息与操作规程的规范化，是构建反应釜运行管理控制体系的重要基石。一份完整的反应风险评估报告，应涵盖对反应热力学与动力学参数的精确测定，包括反应热焓、绝热温升速率、失控反应的最大压力等关键数据，这些信息为确定安全操作边界、设计泄放系统及制定紧急处置方案提供了科学依据。操作规程的制定应建立在对上述工艺安全信息充分掌握的基础上，其内容需细化至每一个具体操作步骤，明确投料顺序、速率控制、升温降温曲线等关键参数，同时必须完整覆盖正常生产、开车启动、停车检修及异常工况处置等各类运行场景。操作规程具备可执行性，体现在操作指令具有明确性、逻辑具有严谨性以及和实际设备控制系统具有匹配度，要避免出现模糊的表述或者无法执行的指令^[4]。上面所说的两项工作进行协同推进，确保了工艺操作实现标准化以及可追溯性，为后续安全仪表系统的配置以及设备完整性管理奠定了必要的基础。

（二）关键安全参数的监测与联锁保护

关键安全参数进行监测以及联锁保护，是确保反应釜运行一直处于受控状态的核心技术手段。温度和压力作为反映反应进程最为直接的工艺参数，其监测点的设置应该遵循冗余的原则，采用不同测量原理或者独立安装的仪表相互作为备用，以避免单一

仪表失效导致数据失真，确保采集的信息真实地反映釜内实际的工况。在这个基础之上构建起来的安全仪表系统承担着异常工况下进行自动处置的功能，当监测参数达到预设的安全联锁阈值的时候，系统不需要人工干预就可以触发相应的联锁动作，其中包括切断进料、启动紧急冷却、停止搅拌或者开启泄压通道，直到执行紧急停车的程序^[5]。安全仪表系统的设计需要依据反应风险评估的结果确定联锁逻辑以及安全完整性等级，确保其在有需求的时候能够可靠地动作。上面所说的监测以及联锁机制进行协同运作，实现了从参数感知到风险处置的闭环控制，大大降低了人为响应延迟所带来的事故扩大的风险。

（三）设备全生命周期完整性管理

设备全生命周期完整性管理是保障反应釜长期安全运行的系统性工程。制造和安装阶段需要严格地执行设计规范以及验收标准，确保设备材质、焊接质量以及结构形式和设计工况相匹配，从源头消除先天存在的缺陷。服役期间实施基于风险的检测策略，根据介质腐蚀性、操作压力以及历史失效数据，科学地确定检测部位以及周期，定期开展壁厚测定、无损检测以及失效分析，及时发现并且评估腐蚀减薄、裂纹扩展等潜在的缺陷。预防性维护计划的建立主要聚焦于机械密封、搅拌器以及安全阀等关键的部件，依据设备运行的时长以及工况特点确定维护周期，采取主动更换和状态监测相结合的方式，避免因为局部部件突然失效导致整台设备非计划停车^[6]。上面所说的措施进行协同实施，实现了设备从投用到退役整个过程的风险可控。

三、全流程风险防控策略与技术应用

（一）源头预防：设计与选型阶段的风险消减

源头预防是在设计与选型阶段实现风险消减的根本性策略。在对反应器设计开展优化工作的方面，应该优先去采用具备本质安全特性的设计原则，通过开展稀释反应体系的操作来让物料浓度下降、控制反应温度处于安全的范围区间、选用具有较低危险性的替代原料等这类措施，从工艺的源头之处减少或者消除存在的潜在危害。具体来说，对于具有强放热特点的反应，可以采取半间歇类型的操作模式，以此来控制热量释放的速率，对于具有不稳定特性的物料，就通过创造低温条件来抑制其出现分解的倾向。对设备的材质以及结构形式进行选型的时候，需要和工艺介质具有的腐蚀特性、操作时的温度压力以及物料的粘度等实际的工况情况做到精确的匹配，防止因为在材质选择方面出现不恰当情况，从而导致腐蚀速度加快，或者因为结构设计存在缺陷，造成传热出现不均匀、混合效果不够好的问题。实施上述这些源头预防的措施，能够把风险在设备投入使用之前就消解掉，和之后再增设安全防护的装置相比较，具有更高的可靠性以及经济性^[7]。

（二）过程控制：自动化与智能化监控手段

在过程控制当中，自动化以及智能化的监控手段，为反应釜的安全运行提供了具有动态性质的保障。应用先进过程控制系统，突破了传统单回路控制所具有的局限，通过开展多变量协调

以及进行模型预测的操作,实现对温度、压力、流量以及搅拌转速等关键参数进行精准调节,让反应过程一直保持在设定好的安全窗口范围之内,同时依靠历史数据以及实时趋势分析,提前识别出参数漂移所预示的潜在异常情况^[9]。引入智能巡检以及在线监测技术,进一步拓展了人的感知能力,通过布置振动传感器、声发射探针以及红外热成像设备,对搅拌轴运行的状态、机械密封出现泄漏的征兆以及釜体壁温的分布情况进行持续的监测,把设备状态评估从周期性的离线检测转变为实时在线的诊断以及预警。集成应用上述这些技术,实现了从被动进行响应到主动开展预防的转变,显著提高了对异常工况的早期识别率以及干预的时效性^[9]。

（三）应急处置：泄压、泄放与紧急中止措施

应急处置的措施,是风险防控体系当中阻止事故进一步扩大的最后一道屏障。合理配置泄压系统,要求依据反应风险评估所确定下来的泄放量,选用具有适当口径以及合适数量的安全阀或者爆破片,保证在超压的工况之下能够快速泄放釜内的介质,把压力控制在设备设计的限值范围之内,防止因为压力积聚,导致釜体出现破裂的情况。设计紧急中止的措施,则需要针对具体工艺所具有的特点,预先设置好紧急冷却系统,以便能够快速移走反应热,或者配置好紧急泄料的管线,把反应物料转移到安全的容器当中,对于聚合等链反应体系,还可以采用反应抑制技术,注入阻聚剂来中止反应的进程^[10]。必须通过模拟验证以及定期测试来确认上述这些系统的有效性,保证其在真正需要的时候能够可靠地触发。应急处置和监测连锁系统形成了纵深防御的态势,前者负责把运行参数维持在正常的范围之内,后者则在异常情况升级的时候承担起最终的安全兜底功能。

（四）人员能力与安全文化建设

人员的能力以及安全文化的建设属于风险防控体系当中决定各项制度能不能够有效落地的最为核心的要素。基于岗位胜任力所开展的专项技能培训,需要针对操作、维修、管理等不同岗位来设置具有差异化情况的培训方面的内容,重点去强化异常工况的早期识别的能力以及标准化处置的技能,通过进行模拟演练以及定期考核来确保培训效果能够转化成为实际岗位的能力。变更管理制度的建立以及落实则要求针对工艺、设备、人员等任何可能会对安全运行产生影响的变更实施全过程的风险评估以及审批管控,避免因为变更而引入新的风险因素或者破坏原有防护措施的有效性。上面所说的两项工作的持续推进,形成了人员素质和制度约束相互强化的良性机制,为反应釜的安全运行提供了可靠的人力保障以及组织基础。

四、结论

综上所述,反应釜安全运行的本质是在于构建覆盖设计、操作、维护、应急整个过程的系统性防控工程。从源头预防阶段的本质安全设计,到运行阶段的关键参数监测以及连锁保护,再到设备全生命周期的完整性管理,每一个环节都需要形成闭环管控。应急处置作为最后一道防线,和日常管理共同构成纵深防御体系。随着数字化、智能化技术在工艺控制、设备诊断以及人员培训等领域的深度应用,反应釜风险防控正在由经验驱动朝着数据驱动转变,由被动响应朝着主动预警演进,为提升本质安全水平以及运行可靠性提供了更为坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 马可望,孟丽杰.化工反应釜内衬失效机理分析及防腐技术创新路径[J].四川化工,2023,26(4):45-48.
- [2] 毕延帅.基于多传感器融合的化工反应釜安全预警系统设计分析[J].仪器仪表用户,2024,31(2):32-35.
- [3] 殷新来.精细化工反应釜温度失控快速抑制方法[J].化工设计通讯,2022,48(1):77-80.
- [4] 孙瑞军,马云亮,崔金城.化工反应釜智能监控技术在精益生产质量控制中的应用[J].流程工业,2023,42(5):28-31.
- [5] 张洪进.具备循环功能的化工安全反应釜结构优化设计[J].流程工业,2024,43(1):19-22.
- [6] 李成党,鲁良,张雪.化工设备中自控与反应釜液位控制系统的智能化改造实践[J].化工安全与环境,2022,35(3):41-44.
- [7] 谢文良.化工装置中高温高压反应釜的安全控制研究[J].化工设计通讯,2023,49(5):62-65.
- [8] 彭安芹.具有双向混合与节能功能的化工反应釜结构优化研究[J].流程工业,2024,43(3):15-18.
- [9] 吴红胜.大型化工反应釜故障诊断与高效维修技术探索[J].2025年第八届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集,2022,1(6):112-115.
- [10] 李宗亚.石油化工反应釜搅拌器的设计改进[J].现代盐化工,2023,50(4):55-58.