连续化化工工艺运行中的隐患分析与安全管控

孟琦[1]，邵传波[2]
1.鲁西化工集团股份有限公司煤化工分公司，山东 聊城 252211
2.鲁西化工集团股份有限公司硅化工分公司，山东 聊城 252211
DOI:10.61369/ETQM.2026080035

摘　　要： 连续化工艺依赖稳态运行，但进料扰动、换热衰减与设备退化等因素可导致失稳，且集成化与长周期服役放大了局部故障的后果。需系统辨识反应热累积、输送异常、设备腐蚀、仪表共因失效及人因与组织管理盲点等隐患。在此基础上，从本质安全设计、全过程监测预警、操作规程与设备完整性管理三个维度构建纵深防御体系，通过对隐蔽征兆的主动揭示、保护措施有效性的持续验证以及工艺退化的前瞻干预，使安全防线始终运行于受控区间。
关 键 词： 连续化工艺；隐患辨识；安全管控；纵深防御

Analysis of Hazards and Safety Management in Continuous Chemical Process Operations

Meng Qi[1], Shao Chuanbo[2]
1.Luxi Chemical Group Co., Ltd. Coal Chemical Branch, Liaocheng, Shandong 252211
2.Luxi Chemical Group Co., Ltd. Silicon Chemical Branch, Liaocheng, Shandong 252211

Abstract: Continuous processes rely on steady-state operation, but factors such as feed disturbances, heat exchange attenuation, and equipment degradation can lead to instability. Moreover, integration and long-term service amplify the consequences of local faults. It is necessary to systematically identify hazards such as reaction heat accumulation, transportation anomalies, equipment corrosion, instrument common cause failures, human factors, and organizational management blind spots. Based on this, a three-dimensional defense system is constructed from the dimensions of intrinsic safety design, full-process monitoring and early warning, operation procedures, and equipment integrity management. Through the proactive revelation of hidden signs, the continuous verification of protective measures effectiveness, and the forward intervention against process degradation, the safety defense line always operates within the controlled range.
Keywords: continuous process; hazard identification; safety management; depth defense

引言

连续化的生产工艺因为其稳态运行、高度集成以及长周期运转的特性，已经成为化工行业的典型生产方式。然而，反应热产生的累积、设备发生的退化、仪表存在的共因失效以及人因出现的误判等隐患问题，常常以隐蔽的形态逐渐地累积在正常运行的表象之下，一旦突破了安全的边界，就很容易引发连锁的失控情况。因此，在分析连续化工艺内在风险特征的基础上，系统辨识物料输送、设备完整性、安全仪表及组织管理等环节的潜在危险源，并从本质安全设计、全过程监测预警和规程能力建设三个维度构建纵深管控体系，对保障装置持续安全运行具有迫切的理论价值和工程实践意义。本文就针对此展开探讨。

一、连续化工艺运行的内在特征与安全挑战

（一）连续化工艺的稳态本质与失稳风险

连续化工艺在运行方面，其内在特征是处于稳态，它的设计方面有这样的要求，就是物料输送、热量传递以及反应转化在时间序列上要保持稳定，从而实现温度、压力、流量还有组成等参数能够可控恒定。这种稳态本质虽保障了生产效率与产品质量，但同时也使系统对各类偏离高度敏感。在实际运行的时候，进料品质出现微量的波动、换热能力有渐进的衰减、设备性能发生缓慢的退化或者外界公用工程存在瞬时的扰动，这些情况都有可能突破工艺自身的调节范围，进而导致操作点偏离预定的区间。一旦稳态被打破，系统容易出现反应热异常累积或者物料分配急剧

作者简介：孟琦（1987.08-），男，汉族，山东省东阿县人，学历本科，职称：中级注册安全工程师（化工）。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

变化的情况，在高度集成的流程当中很容易快速传播，在缺乏有效干预的情况下会从局部偏离演变成整体性失稳，严重的时候可能会引发反应失控、设备超压等危险后果[1]。

（二）高度集成化对局部故障容忍度的降低

连续化工艺为了提高热效率和物料利用率，普遍采用多单元紧密串联并且进行能量集成的流程设计，这就导致各设备之间的相互依存度明显升高。某一环节出现轻微的性能偏移，比如换热效率有渐进的衰减或者输送流量有微小的波动，都会因为缺乏中间缓冲而直接传递到下游，并且可能沿着循环回路反向扰动上游，从而引起全流程参数漂移。故障不再只是局限于单台设备或者局部区域，而是会迅速演变成系统性问题。原本相对独立的安全保护措施，在高度耦合的条件下也可能相互牵制或者形成新的风险传递路径。这种集成特性让系统对于局部故障的容纳能力大幅下降，任何一个冗余度被突破都需要在极短的时间内得到纠正，否则就可能和其它扰动叠加，引发难以控制的危险连锁，对工艺安全设计以及运行控制策略的鲁棒性构成严峻的考验[2]。

（三）长时间、不间断运行带来的设备退化与参数漂移

连续化工艺为了追求产能和经济效益，常常要求以长周期、不间断的方式来运行，这就让设备和仪表长期处于服役状态，不可避免地要经历渐进性退化的过程。工艺介质对设备内壁持续进行冲刷和腐蚀，以及换热面上缓慢累积污垢，导致传热系数和流动阻力逐渐偏离设计基准。运转部件因为磨损而间隙增大，引发振动和内漏。与此同时，检测仪表和执行机构在长期运行中产生零点漂移和灵敏度衰减，使得控制系统所依据的参数和真实工艺状态之间出现偏移。这些变化具有隐蔽性和累积性，通常在日常监控中很难被及时察觉[3]。

二、运行过程中隐患的系统辨识

（一）工艺反应与物料输送隐患

连续化工艺中，反应过程的受控状态高度依赖热量平衡与物料组成的稳定。传热能力不足时，反应产生的热量不能及时移除，逐渐累积并使局部温度持续攀升，一旦越过临界值便可能引发反应失控。进料中杂质的偶然引入或浓度的细微波动，会直接改变反应动力学特性，造成放热速率偏离设计区间。同时物料输送环节的异常在连续化流程中往往迅速传导并放大。在多相流条件下，气、液、固相间的复杂作用易引发堵塞、偏流与气蚀。堵塞造成局部断料与压力异常，偏流使各通道流量分配失衡，致使部分区域停留时间偏离设计值；气蚀则因气泡溃灭产生的冲击波持续损伤叶轮和管壁，削弱输送能力。关键输送设备如泵或压缩机突发停机时，物料循环瞬间中断，上游憋压与下游断供并存，强制关联单元进入非正常工况，沿流程形成连锁反应，全线参数在短时间内大幅偏离安全区间[4]。

（二）设备完整性衰退与公用工程干扰隐患

设备长时间进行运行的过程当中，完整性出现衰退的情况以及公用工程受到干扰的情况通常会构成隐蔽并且破坏性比较强的隐患。工艺介质持续冲刷与腐蚀导致管道及容器壁厚缓慢减薄，承载能力不断下降，达到临界状态时可能毫无预兆地破裂。换热设备因为结垢、结焦从而形成了局部的热阻，传热出现恶化的情况引发壁面出现过热点，既损害了材质具备的强度，又可能会诱导物料出现分解或者聚合的情况。塔器以及反应器内构件出现松动、脱落的情况就会让流道发生不规则的变形，造成气液分布不均匀，在局部产生高温区或者死区，进一步加剧了结焦以及腐蚀的情况[5]。

（三）安全仪表系统缺陷与人因组织管理盲区

安全仪表系统虽然为连续化工艺提供了关键的保护，但是其自身存在的缺陷以及人因组织管理存在的盲区经常会形成隐蔽的风险敞口。传感器在长期运行中出现的漂移、冻结等现象，会输出虚假正常信号，掩盖工艺参数的渐进偏离；最终执行元件的卡涩、内漏与响应滞后，则使联锁动作无法按设计预期完成。联锁回路因为共用组件引入的共因失效情况，可能会导致多个保护层在同一事件当中同时丧失。而联锁设定的值如果没有随着设备出现退化或者工艺出现变更及时地进行修订，就会与实际的安全边界慢慢地分离。就人因因素而言，长期稳态运行容易造成警惕性衰减与对自动化的过度依赖，使异常征兆难以被及时识别。非常规工况处置方案的不完备，则可能在突发情景中诱发误判断与错误干预，进一步扩大事故后果[6]。

三、安全管控体系的构建与实施

（一）本质安全设计与纵深防御体系构建

构建有效的安全管控体系，需从本质安全设计与纵深防御两个维度进行前置投入。在开展工艺危害分析这个工作当中，应该做到准确地识别出初始事件并且为这个初始事件匹配上相应的独立保护层，同时要针对安全操作极限以及裕度开展定量化的界定工作，从而使得偏离容限在运行之前就能够获得明确的约束。从源头上来看，要优先去采用反应路径低温、低压化改造这样的措施并且选择温和的工艺条件，以此来降低过程焓值以及失控烈度。在运行的过程当中则要通过采取在线危险物料存量的最小化这样的措施，来压缩可能释放的能量规模。除此之外，关键设备以及管道的选材和设计工作应该遵循耐故障规范，在预期工况以及偏离条件的情况下都要维持结构的完整性[7]。

（二）全过程监测预警与安全保护系统可靠性

全过程的监测预警以及安全保护系统的可靠性，是实现早期干预以及阻止事故扩大的核心环节。对于关键安全参数应该设置多重冗余测量，并且建立偏差诊断逻辑，从而让单一仪表故障不会掩盖真实的工艺状态，也能够通过比对以及表决机制识别出异常趋势。借助工艺动态模型，能够对运行数据进行实时解析，在偏差还没有触及报警阈值之前捕捉到早期征兆，为操作人员争取到响应时间。在线分析技术则直接测定关键组分浓度，为安全操作提供即时的物性约束。与此同时，联锁逻辑须通过独立于控制系统的验证与周期性实效测试，确保其在触发条件下准确动作[8]。泄放系统需要从阻塞预防、排放物安全处置以及反力评估这三个方面进行系统保障。紧急停车序列则应该针对各类扰动情

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

景完成完备性校验，确认它的逻辑覆盖以及时序配合能够适应实际过程当中可能出现的复杂演变[9]。

（三）操作规程、人员能力与设备完整性管理

作为安全管控体系的执行终端，操作规程、人员能力与设备完整性管理相互支撑，缺一不可。正常操作以及应急操作应该开展一体化规程设计，把稳态调节、偏差处置以及紧急停车序列放在统一的逻辑框架之下，明确各个阶段的切换条件以及动作要求，消除因为规程割裂所导致的误判以及迟滞。针对长期平稳运行当中容易出现的技能钝化以及自动化依赖，需要依托高仿真工况模拟系统，定期开展岗位能力保持以及再训练，让操作人员对异常征兆保持敏锐识别并且熟练执行干预。在设备层面，推行以风险为基准的检验策略，结合在线腐蚀监测以及周期测厚数据，动态调整检测资源投向。对动设备建立运行状态曲线，跟踪振动以及温度等参数趋势，在劣化转折点之前介入预知性维护[10]。上面所说的这三项管理要素协同运作，构成抵御隐蔽退化以及突发扰动的坚实执行层防线。

四、结论

综上所述，连续化工艺的安全状况不能仅以”未发生事故”作为评判依据。反应热产生的累积、设备壁厚出现的减薄、仪表存在的共因失效以及人员技能出现的退化等隐患问题，常常在稳态运行的表面情况之下隐蔽地累积起来，一旦突破了临界的条件就有可能迅速地发展成为失控的事件。所以，安全管控必须要从被动的应对转变为主动的干预：系统地辨识关键参数出现的早期偏离情况，周期性地验证独立保护层的实际有效性，并且对工艺以及设备的退化实施前瞻性的校正。把本质安全的设计、多重的监测预警、保护系统的可靠性验证以及一体化的操作规程紧密地衔接起来，才能够让安全防线一直运行在已知并且受控的区间范围之内，真正地构筑起抵御隐蔽退化以及耦合扰动的纵深防御屏障。

参考文献

[1]徐小军 . 信息化技术在化工工艺生产过程与安全管理中的应用研究 [J]. 聚酯工业，2024，3(12):64-132.

[2]虞晓冬 . 石油化工企业安全评价技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2024，7(3):21-56.

[3]李献忠 . 石油化工企业电气消防安全管理存在的问题与应对措施研究 [J]. 消防界 (电子版)，2024，12(33):53-213.

[4]王琨 . 龙岩化工园区应急管理优化研究 [J]. 福建农林大学，2022，2(3):34-55.

[5]张景臣；杨蕾 . 扬州化工园区承包商特殊作业安全管理调研与思考 [J]. 劳动保护，2023，2(23):45-122.

[6]丁强 . 精细化工生产企业的安全管理技术策略研究 [J].2024 智慧施工与规划设计学术交流会论文集，2024，4(2):53-323.

[7]刘广宇 . 化工企业检维修作业安全管理 [J]. 化纤与纺织技术，2024，12(9):34-67.

[8]王建平，李强 . 连续化化工工艺运行中的隐性风险辨识与防控策略 [J]. 化工安全与环境，2023，36(4)：28-32.

[9]张明，刘志远 . 反应热累积与传热失效背景下连续工艺的安全极限界定 [J]. 化学工程与装备，2024，52(7)：105-109.

[10]陈卫东 . 化工装置长时间连续运行下的设备退化监测与预知性维护 [J]. 石油化工设备技术，2022，43(5)：41-45.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.