

# 生产型企业重大伤亡事故的三维防御体系

唐洪峰, 李功龙

鲁西化工集团股份有限公司, 山东 聊城 252211

DOI:10.61369/ERA.2026080011

**摘 要 :** 生产型企业重大伤亡事故往往源于工艺偏差、设备劣化与操作失误的时序叠加。本文提出“工艺防失控、设备防失效、操作防失误”三维防御体系: 工艺维度立足危险源辨识与安全操作边界界定, 配置多重独立保护层; 设备维度聚焦基于风险的完整性管理与在线监测, 确保关键屏障功能可靠; 操作维度通过强制确认、刚性许可与行为纠偏, 压缩人因失误转化为灾难后果的空间。三维措施相互渗透, 构成纵深递进的保护层结构, 为遏制重特重大事故提供系统化框架。

**关 键 词 :** 三维防御; 工艺安全; 设备完整性; 防失误

## Three-dimensional Defense System for Major Casualty Accidents in Production Enterprises

Tang Hongfeng, Li Gonglong

Luxi Chemical Group Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252211

**Abstract :** Major casualty accidents in production enterprises often result from the cumulative effect of process deviations, equipment deterioration, and operational errors. This paper proposes a three-dimensional defense system: "Process Safety Control, Equipment Integrity Protection, and Operational Error Prevention". The process dimension focuses on hazard source identification and the definition of safety operation boundaries, and configures multiple independent protective layers; the equipment dimension focuses on risk-based integrity management and online monitoring to ensure the reliability of key barriers; the operation dimension uses mandatory confirmation, rigid authorization, and behavioral correction to reduce the space for human error to turn into disaster consequences. The three-dimensional measures interpenetrate each other, forming a deep and progressive protective layer structure, providing a systematic framework for curbing major and extremely serious accidents.

**Keywords :** three-dimensional defense; process safety; equipment integrity; error prevention

### 引言

对近年来生产型企业重大伤亡事故的剖析表明, 灾难性后果极少由单一因素触发, 而更多表现为工艺参数偏离、关键设备失效与现场操作失误在特定时序下的危险叠加。然而, 很多企业的安全实践仍然把工艺管理、设备维护以及人员行为当作是彼此分割开的职能模块, 使得层与层之间的衔接之处暴露出系统性的防御盲区。基于此, 本文提出了“工艺防止失控、设备防止失效、操作防止失误”的三维防御体系, 分别从危险物质能量源头的主动约束、关键保护屏障的完整性保障以及人因失误链的压缩阻断这三个维度来展开论述, 希望能够为构建纵深递进、相互渗透的事故预防结构提供方法论方面的支撑。

### 一、从源头消除危险物质与能量的异常释放

#### (一) 工艺过程危险源的系统辨识与安全操作边界的确定

在关于工艺防失控这件事情方面, 其前提是在于要对系统进行危险源的辨识并且要严格地去进行安全操作边界的界定。在进行辨识的时候, 需要把主副反应、不稳定中间体、杂质以及设备腐蚀、密封失效等这些工程因素都覆盖到, 以此来揭示那些可能会引发泄漏、燃爆的危险物质与能量释放的路径。在这个基础之

上, 要结合工艺热力学以及设备约束, 针对温度、压力、加料速率等这些关键参数去划定正常操作限、报警限和联锁触发限这三级边界。这个边界能够对操作规程起到支撑作用, 并且可以作为安全仪表系统保护阈值设定的直接依据<sup>[1]</sup>。

#### (二) 反应失控、物料泄漏与压力失衡的多重防护措施配置

针对反应失控、物料泄漏与压力失衡这三类典型的危险情况, 必须要配置结构比较分明的多重防护措施, 从而让单一措施

的失效不会导致灾难性的后果。对于放热反应，应该在高温、高压触发点的位置设置急冷注入或者反应抑制剂这样的直接干预手段，同时要把耐压设计和紧急泄放作为被动防护的补充，构成“抑制—泄放—隔离”这样的组合。针对物料泄漏的情况，必须从设备本体的密封完整性方面入手，并且要辅以可燃气体与有毒物质检测系统和紧急切断阀联动的机制，确保一旦发生泄漏就能够被探测到并且进行隔离。压力失衡防护则需要把安全阀和爆破片按照标准泄放能力进行独立的配置，并且要在联锁回路当中加入冗余泄压路径，从而实现超压保护不依赖于人工的干预<sup>[3]</sup>。

### （三）工艺变更、异常工况处置与停开车环节的专项风险管控

工艺变更、异常工况处置与停开车环节是工艺安全管理当中的薄弱节点，必须要执行专项的风险管控。对于工艺变更，应该建立分级审查的程序，凡是涉及到操作条件、设备或者控制逻辑的任何调整，都必须要在实施之前完成危险辨识以及保护层的评估，确保变更之后安全屏障没有被削弱，并且操作规程要同步进行修订。异常工况处置需要预先编制具有针对性的响应预案，明确偏离标准运行状态的时候的诊断路径、退守步骤以及紧急切断权限，防止人员在紧迫的情境之下凭借经验盲目地进行干预。停开车环节则应该制定经过确认的详细操作顺序，规定盲板状态切换、物料排净置换和联锁投用等关键节点的确认点，防止因为步骤的遗漏或者顺序的颠倒而引发物料错流或者压力异常。上述这三类环节只有在严密受控的状态之下推进，才能够阻断非正常状态下事故的发生链条<sup>[3]</sup>。

### （四）安全仪表系统在工艺偏离状态下的独立保护功能验证

安全仪表系统是在工艺失控状态时的独立保护层，它功能的完整以及可靠必须要通过严格验证来保证，绝对不可以只凭借设计阶段的假设就认定它有效。验证工作应该证明这个系统在传感、逻辑运算还有最终执行元件各个环节都独立于基本过程控制系统，不会受到共同失效的影响，而且在工艺参数碰到设定的联锁阈值的时候能够准确、及时地把工艺引到预定安全状态。这种独立性不只是体现在硬件配置和逻辑隔离方面，更加需要通过全回路在线测试来检验，要确认从信号触发到阀门动作的整个链条不存在隐蔽故障。验证周期应该根据风险等级和安全完整性等级的要求来确定，要对每一个联锁回路的检验测试覆盖率和诊断覆盖率进行记录，并且在偏离预期的时候进行追溯修正。只有让安全仪表系统一直处于功能可以使用的待命状态，才能够在工艺出现异常偏离的时候实现不依靠人员干预的自动保护<sup>[4]</sup>。

## 二、确保关键屏障在生命周期内的结构完整与功能可靠

### （一）基于风险等级的设备分级管理与失效后果预先评估

设备防止失效的起始点，在于按照风险等级对设备进行分级

管理，并且提前评估它失效可能引发的后果。分级应以失效发生概率与潜在危害程度两项维度进行交叉衡量，将直接关联重大泄漏、爆炸或毒性物质释放的高风险设备列为管控重点。对于这类设备，必须详细分析它在承压、接触腐蚀介质以及疲劳循环条件下的降级机理，预估泄漏孔径、结构破裂等失效模式以及它对人员和环境的波及范围。评估结论应该直接变成针对性的检验策略、预防性维修周期以及备件储备方案，保证资源集中在风险最高的薄弱节点，避免防护力量平均分配。若失效后果评估停留于定性判断而缺乏量化纵深，设备管理便失去了清晰的风险导向，难以实现真正的事前预防<sup>[5]</sup>。

### （二）关键机泵、容器与管道系统的腐蚀、疲劳与缺陷在线监测

关键机泵、容器和管道系统在持续运行的时候承受介质腐蚀、交变载荷和外部环境侵蚀，它们的损伤常常在没有明显先兆的情况下积累到临界状态，所以必须建立在线监测体系，实现缺陷的早期发现和趋势跟踪。对于承受腐蚀性介质的压力容器和管道，应该优先采用壁厚定点超声检测和在线测厚比对，捕捉减薄速率异常；对于高速旋转机泵，就需要通过振动频谱分析、轴位移监测和润滑系统磨粒检测，识别不平衡、不对中以及轴承早期损伤特征<sup>[6]</sup>。

### （三）安全阀、紧急切断阀与联锁装置的定期校验与强制隔离机制

安全阀以及紧急切断阀还有联锁装置，这是防止设备失效朝着灾难性泄漏演变的最后一道机械方面的屏障，它的动作可靠程度完全依靠定期校验以及强制隔离这样的机制严格执行。校验周期须根据阀门在工艺介质中的结垢倾向、腐蚀速率及动作频次来确定。安全阀应该定期去做离线定压的试验，或者借助在线校验的手段，来验证整定的压力以及回座的密封性能；紧急切断阀就必须通过全行程动作时间的测试以及阀座泄漏的检测，来确认它在有需求的时候能够迅速地关断。和校验同样重要的是强制隔离机制的施行——当上面所说的装置需要停役进行维修的时候，必须要通过盲板隔离或者双阀隔断，并且监测中间空腔的压力，以此确保被保护的设备和检修的一端可靠地隔离，防止介质倒窜或者误动作所带来的致命风险<sup>[7]</sup>。校验的记录以及隔离确认的签字程序绝对不可以只做表面文章，不然这个屏障看起来好像存在，实际上已经丧失了阻断事故连锁反应的能力。

### （四）维修作业、备件替代与设备启停过程中的失效风险专项阻断

维修的作业、备件的替代以及设备启停的环节，这些是设备失效发生频率比较高的时期，必须设定专门的风险阻断措施，避免因为人为因素或者条件的变更而造成屏障缺失。备件替代之前应该进行严格的规格对比以及等效性的审查，对于涉及密封、承压、仪表量程以及材料兼容性的替换零件，必须在安装之前确认它的技术参数和原来的设计是一致的，杜绝因为部件替代不恰当而引入隐蔽的缺陷。维修的过程中，被修复的设备必须完全脱离运行的系统，并且实施能量的隔离，作业完成之后按照顺序恢复，并且执行泄密性的试验和功能的测试，确认保护装置像安全

阀、连锁回路等没有意外的旁路或者设定的偏移。设备长时间停用之后启机之前，必须通过一项一项地检查确认材料的状态没有变差、仪表回路信号的通路是完好的，从而在平稳的工况条件之下完成启机，防止因为应力突然变化或者机构卡住而造成瞬间失效<sup>[8]</sup>。

### 三、压缩人因偏差转化为灾难性后果的可能性

#### （一）关键操作步骤的强制确认、互锁与防误动的界面设计

操作防止失误的首要防线，在于对关键的操作步骤施加强制的确认、程序的互锁以及防止误动的界面设计，确保单一的疏忽不会被执行。强制确认要求操作者在执行开阀、投料、旁路连锁等动作之前，完成对目标设备位号、当前的工况以及操作后果的单独核对，把验证而不是单纯的重复念诵作为确认的标准。程序互锁则是把工艺逻辑嵌入到操作的流程当中，当前步骤没有完成预定条件的确认的时候，系统拒绝进入到下一个阶段，使得越序的行为没有办法实施。在界面的层面，应该把操作按钮在视觉上进行分层、把阀门控制的指令和保护功能分开设置，防止因为视觉上的错误辨认或者触碰的失误而引发关键的机能<sup>[9]</sup>。

#### （二）作业许可刚性化、应急响应标准化与行为纠偏常态化的防失误机制

非一般的作业以及不正常的情境属于操作出现失误的高发生

区域，必须要通过把许可变得刚性化、让应急达到标准化以及使纠偏实现常态化的方式来进行阻断。针对能量隔离、上锁挂牌与动火等高风险作业，应建立不可逾越的书面审批程序，将隔离点确认、残余能量释放验证及锁具唯一性管控列为强制步骤。对于异常征兆的识别以及报警的响应，就需要按照预先设定好的诊断路径还有处置的时间顺序来执行，从而避免操作人员凭借个人的经验进行临时的决断<sup>[10]</sup>。

### 四、结论

综上所述，生产型企业重大伤亡事故的深层原因，并非某一要素的孤立失效，而是工艺偏差、设备劣化与操作失误在防御盲区中的危险交汇。这篇文章所构建的三维防御体系，把工艺防止失控当作是源头的约束、把设备防止失效当作是纵深的保障、把操作防止失误当作是前端的压缩，把原本分割开的管理模块整合成为功能相互补充的有机整体。三维的措施只有相互渗透、协同运作，才能够形成具有实际阻断效能的防御机制。生产类型的企业应该以这个作为导向，持续地审视并且补强各个维度之间的衔接缺口，让事故预防真正具备抵御多重失效的系统性能力。

### 参考文献

- [1] 谢洪龙. 石油化工装置 HAZOP 分析技术应用与风险防控研究 [J]. 化工安全与环境, 2024, 22(8): 35-42.
- [2] 李丽霞, 王明贤. 工艺过程危险有害因素辨识的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 110-116.
- [3] 赵阳, 周志强. 安全仪表系统 SIL 定级及 LOPA 的应用研究 [J]. 石油化工自动化, 2023, 59(1): 12-18.
- [4] 汤伟, 郑晓虎, 王孟效, 等. 一种基于 HAZOP-LOPA 的碱回收燃烧工段安全仪表系统设计方法 [J]. 中国造纸, 2022, 41(3): 88-94.
- [5] 袁小军. 风险管理的新动向——API 581 基于风险的检验新版探讨 [J]. 流程工业, 2024, 15(13): 45-51.
- [6] 王伟, 赵岩. 石化装置承压设备声发射在线监测与腐蚀评估技术 [J]. 无损检测, 2022, 44(5): 60-66.
- [7] 张吉东, 李明远. 安全阀定期校验方案的探讨 [J]. 石油化工安全技术, 2023, 24(5): 20-25.
- [8] 王志刚, 杨海龙. 石化企业上锁挂牌安全管理程序的构建与实施 [J]. 安全, 2022, 43(8): 72-78.
- [9] 陈向荣, 吴天亮. 化工企业能量隔离与上锁挂牌管理的实践与展望 [J]. 山西化工, 2023, 43(2): 55-61.
- [10] 刘永强, 李哲. 人因失误与人不安全行为相关原理的分析与探讨 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 1-7.