

精细化工生产过程中危险源动态识别与预警机制

陈华山¹ 杨波²

1.润都制药（荆门）有限公司 湖北 荆门 448008

2.湖北中迅长青科技有限公司 湖北 荆门 448002

【摘要】：精细化工间歇柔性生产易出现工艺参数偏移，动态危险源演化速度快、多要素耦合放大事故危险，传统静态隐患排查难以适配现场管控需求。以中小型精细化工车间为研究对象，依据危化品安全管控规范界定静态、动态危险源边界，从物料、工艺、设备、人员、环境维度梳理危险演化路径，归纳企业辨识滞后、预警体系不完善、闭环管控缺失三类管理短板。结合中小企业低运维投入约束，构建“班前预判—班中巡检—班后复盘”全周期动态识别体系，建立三级动态危险源分级标准与浮动阈值分级预警机制，从人员、设备、制度层面提出配套管控方案。研究形成轻量化、可落地的动态风控模式，能够完善企业双重预防机制，为同类精细化工车间动态危险防控提供理论支撑与工程参考。

【关键词】：精细化工；动态危险源；危险辨识；分级预警；双重预防机制

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.078

引言

国内日化、医药中间体精细化工产业持续扩张，行业主体以中小民营企业为主，普遍采用间歇式反应工艺。产品迭代频繁导致工艺参数调整常态化，车间日内运行条件波动明显，动态危险源持续滋生，安全管控难度远高于连续化大宗化工生产线。据应急管理部事故统计报告，超六成精细化工车间安全事故由动态危险处置不及时引发。当前行业安全管理重心集中于储罐、厂房等静态危险源，针对生产过程衍生动态危险的分析、预警体系存在明显短板。

现有国内外研究存在明显分化，国外侧重大型化工园区全自动智能监测系统，设备投入高昂，国内研究多聚焦高端传感与智能算法，缺少适配中小企业人力主导、低投入运维的实操方案，基层车间动态风控落地研究存在空白^[1]。基于上述行业痛点，本文针对中小型精细化工车间开展实地调研，梳理动静危险源差异化管控逻辑，搭建低成本全周期动态识别与分级预警闭环体系。研究理论层面完善间歇化工动态危险演化理论。实践层面形成无需大规模设备改造的成套管控方案，助力中小企业合规落实危险分级管控与隐患排查治理双重预防机制。

1 精细化工动态危险源相关概述

1.1 精细化工生产基本特征

相较于大宗化工连续化流水线，精细化工以间歇式柔性生产为核心特点。中小厂区普遍使用搪瓷反应釜组织定制化生产，产品迭代周期短，每批次均可灵活调整投料配比、反应温

度与压力参数。生产所用原辅材料大多具备易燃、有毒、放热剧烈等特性，人工投料、介质转运、釜体清洗、设备启停交叉作业密集。车间日内环境温度、投料负荷、通风条件波动幅度较大，危险状态随工序推进持续变化，相较于固定设施的静态危险，动态危险源管控随机性更强。

1.2 静态与动态危险源界定

依据化工危险分级管控相关规范，按危险是否随生产作业变动将厂区危险源分为两类。静态危险源属于厂区投产后长期不变的固有危险，包含危化品固有理化危险、设备出厂本体缺陷、固定消防设施布局缺陷等，仅需在装置验收、年度大修阶段统一排查。动态危险源是生产工况变化衍生的临时性危险，由工艺参数调整、密封部件磨损、人员不规范操作、环境温度湿度变化共同催生，危险等级实时浮动，多条件互相反应叠加后管控难度显著高于静态危险源。

1.3 动态危险源特点与诱发维度

动态危险源具备瞬时生成、多因素联动互相反应、演化周期短、可控窗口期窄四项特征。危险诱因覆盖五大维度：物料维度受投料速率、原料纯度影响易出现配比失衡、挥发气体积聚；工艺维度人工随意调参易造成釜内温压偏离标准；设备长期运行会引发密封渗漏、监测仪表数据漂移；人员轮岗交接易出现操作简化、工况信息传递缺失；季节更替改变车间通风效果，加速有毒可燃介质聚集^[2]。单一维度隐患危害有限，多维度条件叠加后，隐患会快速升级为较大乃至重大安全危险，极易诱发泄漏、燃爆类事故。

作者简介：陈华山（1969.12.9），男，汉，湖北省仙桃市，注册安全工程师，本科，研究方向：化工工艺优化，化工过程安全。

2 危险源动态识别与预警现存管理问题

2.1 危险源辨识模式固化, 隐性动态隐患遗漏

多数中小精细化工企业仅依托装置验收、年度大修开展集中隐患排查, 未针对换料、工艺微调、管线检修等工况变更同步复核动态危险源。一线巡检多聚焦罐体、管线破损等显性缺陷, 易忽略投料流速异常、静电积聚、异种物料临时反应等瞬时隐性隐患。深层原因在于企业管控思维长期偏向静态重大危险源, 基层操作人员缺乏互相反应危险预判能力, 且监管抽查重心集中于固定仓储设施, 生产过程动态危险核查频次不足。

2.2 监测预警配套体系存在短板

企业普遍采用固定预警阈值, 未结合季节温湿度、装置负荷、物料批次动态调整参数, 高温高湿工况易出现预警误判、漏报。气体监测点位布设粗放, 设备拐角、临时物料堆放区、地下管线等区域缺少监测终端, 危险萌芽阶段无法采集有效数据。中控、现场报警、班组移动端联动存在信号延迟, 设备定期校验制度缺失, 探头老化、线路故障未能及时处理, 进一步降低预警可靠性。根源在于中小企业安全投入有限, 无力大规模增设监测设备, 行业缺少分场景标准化预警数值参考体系^[3]。

2.3 全流程闭环管控机制存在缺位

现有安全制度仅明确常规巡检权责, 未制定分级预警标准化处置流程, 员工收到预警后易出现处置滞后、违规调节工艺参数等行为。隐患整改仅消除现场显性问题, 未复盘危险演化全过程, 动态危险源台账长期沿用投产初期数据, 与实时生产工况脱节。其核心诱因是管理制度仅覆盖静态隐患, 缺失动态危险“识别—预警—处置—复盘”闭环条款, 缺少配套追责约束; 安全管理岗位配置不足, 无专人持续更新危险台账, 危险数据无法反向优化管控标准。

3 动态危险源全周期识别体系构建

3.1 体系搭建基本原则

结合中小厂区低运维投入约束、基层人员实操能力, 本文确定四项核心搭建原则。一是时序同步原则, 危险排查跟随每日开工、生产、停工全流程推进, 逐级落实操作工、班组长、专职安全员三级排查责任。二是全域覆盖原则, 识别范围覆盖投料反应、介质转运、设备清洗、临时检修全部作业工序, 消除辨识盲区。三是简易实操原则, 识别流程简化易懂, 适配轮岗员工快速掌握。四是轻量化改造投入原则, 依托现有巡检制度开展危险识别工作, 不新增大额设备改造投入, 控制常态化安全管理开支。四项原则相互支撑, 兼顾危险管控效率与企业运营成本。

3.2 三段式全周期动态识别流程

贴合车间每日完整生产节律, 建立班前预判、班中巡检、班后复盘三段式完整流程识别流程, 填补工艺调整阶段危险辨识空白^[4]。每日开工投料前开展班前预判, 结合当日生产物料理化特性、既定工艺温压参数, 预判温压波动、异种物料互相反应等高频动态危险源, 提前调整换热、通风设备完成前置防护, 预判记录需班组双人签字留存。生产稳态运行阶段采用中控数据实时监测、人工分区定点巡检双向核验模式, 重点监控仪表参数自主漂移、密封构件微量渗漏、人员简化操作等即时衍生隐患。当日全部生产工序停工清洗完毕后, 班组联合安全管理人员复盘全天工艺状态偏移、预警触发、隐患处置全过程, 统一登记当日新增动态危险源信息, 结合现场暴露危险优化次日防控方案, 形成完整识别。

3.3 动态危险源三级分级标准

结合属地危化品危险分级管控规范, 依据人员伤害程度、装置损毁范围、事故扩散覆盖范围, 划分三级动态危险源。一级为一般动态危险源, 仅造成阀门、密封垫小型构件磨损, 不存在人员中毒、爆炸危险, 依托岗位定点加密巡检即可平稳管控。二级为较大动态危险源, 可引发管道接口微量介质外泄, 压缩局部作业安全空间, 通过小幅下调反应温压、硬质围挡隔离危险区域即可快速控制危险态势。三级为重大动态危险源, 多因素共同作用条件下极易引发车间燃爆、群体性有毒气体中毒事故, 危险覆盖全域作业区域。隐患触发后必须启动装置联锁停机, 同步组织在岗人员全域疏散。分级标准与后文分级预警处置要求一一对应, 提升现场管控标准化水平^[5]。

4 闭环式动态分级预警机制构建

4.1 预警机制建设核心思路

本次预警机制以萌芽危险前置干预、分级精准管控、工况数据迭代优化为核心建设思路, 契合精细化工动态危险源快速演化规律。机制摒弃全厂统一固定预警阈值, 结合物料批次纯度、车间四季温湿度、装置运行负荷三类变量设置浮动预警区间。机制联动中控监测平台、现场巡检班组、安全管理部门三方主体压缩危险响应时长, 转变传统事后补救管控模式, 在隐患萌芽阶段提前介入干预, 降低动态危险源诱发安全事故的概率。

4.2 分级预警标准与现场处置规范

预警层级与三级动态危险源分级标准一一匹配, 配套标准化岗位处置流程, 规避操作人员自主处置行为的随意性。岗位提醒预警适配一级一般危险源, 中控后台推送低风险文字提示信息, 班组加密高危点位巡检频次, 无需调整生产工况。车间

分区管控预警适配二级较大危险源,现场分区启动低频声光警示装置,班组长到场下调釜体反应温度、降低投料速率,采用硬质围挡隔离危险片区,阻断危险向外扩散。全域停机应急预案适配三级重大危险源,监测系统自动启动装置联锁停机程序,车间立即组织在岗人员沿疏散通道全域撤离,安全管理部门同步启动车间泄漏、燃爆专项应急处置流程。

4.3 预警闭环管控运行逻辑

整套预警链路与厂区现有安全管理制度深度融合,形成可循环迭代的完整管控闭环。班组依托三段式识别流程持续采集现场动态危险源数据,中控监测平台对照分级标准自动匹配危险等级,分级推送对应层级预警信息。在岗作业人员严格按照标准化规程完成分级处置,隐患整改完成后由专职安全员现场复测监测数据,核验车间恢复安全作业条件。管理部门归档本次危险工况全流程数据,线上更新厂区动态危险源电子台账,反向优化下一生产批次危险识别与预警判定标准,循环迭代完善车间整体动态风控体系。

5 企业动态安全管控优化对策

5.1 常态化人员能力培育

企业按月组织动态危险源专项实操培训,减少晦涩理论条文宣讲,结合一线岗位作业场景讲解工艺调整下临时危险源辨别方法、分级预警标准化处置流程,补齐轮岗员工动态风控实操短板。培训摒弃单向授课模式,每季度搭配车间实景模拟演练,还原参数漂移、介质微量泄漏、车间静电积聚等典型作业场景,针对性提升员工临场分析、分级应急处置能力。同时完善岗位考核机制,将动态危险源辨识、预警处置执行情况纳入月度安全绩效考核,考核结果直接与岗位绩效挂钩,倒逼员工规范操作行为,从人为层面降低动态危险诱发概率。

5.2 监测设备周期性运维校准

监测硬件设备精度直接决定动态危险源识别、预警工作有

效性,企业需建立常态化设备运维核验制度。安全管理部门每季度开展全域监测设备校准工作,精准调校温度、压力、有毒可燃气体传感设备,及时更换老化传输线路、失效探测探头,完整留存设备校准记录,保障监测数据真实可追溯。结合车间历年隐患台账摸排装置拐角、临时物料堆放区、地下管线等监测空白点位,按需低成本加装小型探测终端,完善监测点位布设覆盖范围。安排专职仪表人员每日巡检中控数据传输系统,及时处理信号卡顿、传输延迟故障,构建稳定数据传输通路,从硬件层面减少预警误报、漏报频次。

5.3 动态修订安全管控制度

制度适配性是动态识别预警机制长效落地的核心保障,企业需跟随生产工艺条件偏移动态修订厂区安全生产管理制度。将批次换料、工艺小幅改性、管线临时检修、设备启停四类工艺调整作业纳入动态危险强制复核流程,明确班组长、安全员双人核验权责,未完成动态危险源分析并签字确认不得开展工作。依托月度生产复盘会议梳理当月危险波动规律,结合四季温湿度变化、产品工艺迭代灵活微调分级预警阈值,按月更新厂区动态危险源电子台账。完善预警闭环追责制度,针对预警处置滞后、巡检漏检、隐患整改敷衍等岗位行为落实分级追责,压实全员安全管控责任,保障整套识别预警体系长期稳定落地运行。

6 结论

本文针对中小精细化工间歇生产场景下动态危险源管控难题,完成动静危险源分类界定,梳理五大维度危险共同作用演化路径,系统剖析企业动态风控现存短板。结合厂区运维成本约束,搭建三段式全周期动态危险识别体系,配套三级动态危险源分级标准与分级闭环预警机制,同步从人员常态化培育、监测设备周期性校验、安全制度动态修订三个维度给出完整管控对策。整套管控体系依托企业现有巡检资源即可落地,改造投入低、实操性强,可有效降低泄漏、中毒、热失控燃爆等事故发生概率,完善企业双重预防管控体系。

参考文献:

- [1] 陈樑,朱君桦,金龙,等.时序数据驱动的化工过程风险动态预警研究[J].安全与环境学报,2023,23(10):3491-3501.
- [2] 宋建国.一种氟化反应产物生产的风险分析及安全技术措施[J].石油化工安全环保技术,2024,40(5):44-47+60+7.
- [3] 孙亚洲,彭涛.基于双控预防机制的化工安全生产管理研究[J].天津化工,2025,39(2):85-87.
- [4] 李健华.精细化工生产过程中的安全风险评估与优化策略研究[J].化工设计通讯,2024,50(8):160-162.
- [5] 郭怀斌.双控预防机制在化工安全生产管理中的要点分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):98-100.