

危化品化工装置工艺变更安全评价方法研究

覃绍波

新疆东明塑胶有限公司 新疆 昌吉 831100

【摘要】：化工装置工艺变化属于造成生产安全事故的又一重要因素。危化品生产过程中，工艺参数、设备配置、控制系统或者操作程序的改变，都会造成原来的安全部分失衡，产生新的危险因素。本文主要以工艺变更安全评价的方法论为研究对象，对HAZOP分析、What-if检查、风险矩阵、LOPA等主流评价方法在工艺变更场景中的适用性和操作要点进行了系统的分析，主要论述了变更前后风险状态的对比逻辑、偏差识别方法的选择依据、评价结果向变更决策转化的问题。

【关键词】：危化品；化工装置；工艺变更；安全评价；HAZOP

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.025

1 引言

化工装置工艺变更属于生产运行中的一种常态性工作。由于生产周期的拉长、原料品质的起伏、设备性能的衰减、市场需求的改变等种种因素的影响，化工企业不可避免地要对原有的工艺参数、设备配备、控制方案或者操作程序作出调整^[1]。这些变化可以提高装置的适应性以及经济性，但是也会产生新的安全隐患。近些年来，多起危化品生产安全事故的调查显示，工艺变更管理不到位是造成事故的一个重要原因，即在变更之前没有做充分的安全评价，在变更之后没有对操作人员进行有效的培训，在变更引入的新风险没有被识别和控制的情况下，直到事故发生时才意识到变更破坏了原有的安全平衡^[2]。

2 化工装置工艺变更的类型与风险特征

2.1 工艺变更的主要类型

化工装置工艺变更种类繁多，根据变更对象及影响范围的不同，可以分为如下四种类型。

工艺参数变更是最常见的一种形式，温度、压力、流量、液位、浓度、pH值等操作参数的改变都属于工艺参数的变化。此类变更一般都在原设备能力之内，看上去是微小的调整，但是会对反应速率、热平衡、相平衡等造成连锁反应^[3]。

设备配置变更包含设备型号改变、管道重新安排、阀门种类替换、控制系统更新等。此类变更改变装置的物理结构，会致使系统水力特性、传热效率或者控制响应速度产生影响。

物料路径变更指的是原料种类或者规格发生改变，或者物料的走向发生变化。物料的变化会改变反应路径、副产物的产生或者腐蚀性，物料路径的改变会改变装置内各个区域的负荷分布^[4]。

操作程序变更指的是开车、停车、正常操作或者应急操作步骤的改变。此类变更影响人的行为，若程序没有很好地体现新的操作要求，操作人员就会在不知情的情况下执行错误的操作顺序，偏离安全边界^[5]。

不同的变更类型对于安全评价的侧重点要求也不同，工艺参数变更要重视参数偏离的后果及响应时间，设备配置变更要

重视新设备同原有系统之间的匹配情况，物料变更要重视反应路径的变化以及副产物的产生，操作程序变更要重视人机界面和人因可靠性。

2.2 工艺变更的风险特征与评价难点

工艺变更安全评价同新建装置的安全评价相比，存在特有的难题。变更具有有限性，即变更一般只影响装置的某一部分，在评价时要准确地确定变更的边界以及分析范围。范围界定过窄会造成相邻系统受到影响，范围界定过宽会造成分析效率低、资源浪费。风险具有隐蔽性，变更引入的风险在原有的危险源清单里没有，或者以新的组合形式出现。操作人员对于变更后的新的风险没有直接的经验，依靠原有的认知进行操作的行为可能会进入新的危险区域。保护措施具有惯性，即变更为原有安全联锁、泄压系统、报警设置等保护措施已经不再适用的情况下，改造范围刚好避开这些保护设施，造成无法发现的盲区。

3 HAZOP 分析方法在工艺变更评价中的应用

3.1 HAZOP 分析的基本原理及其在变更场景中的适用逻辑

HAZOP分析依靠系统地使用引导词，找出工艺参数的偏离之处，剖析偏离的缘由、影响以及已有的保护手段，综合评判风险，并给出改善提议。主要用引导词加参数组合的方式进行，比如压力过高、温度过低、流量中断等。新建装置安全评价中，HAZOP分析一般会将所有的工艺节点都做全覆盖的分析，工作量巨大但是覆盖面广。在工艺变更场景下，HAZOP分析的应用逻辑要转变成“聚焦变更、追踪影响”，即把变更对象当作核心节点，把变更可能影响的上下游系统当作辐射范围，创建起“变更节点+受影响节点”的分析边界，防止对没有受到影响的装置部分实施重复分析。靶向式HAZOP明显改善了分析速度，而且保证了所有的变更影响都被考虑到。

从具体的操作上来说，变更场景下HAZOP分析要重视变更导致的偏差在系统中传播的路径以及衰减特性。当某换热器的冷却水流量由于管道改造而减小时，除了换热器出口温度的变化之外，还会沿着物料流向传递到后面反应器，引起反应速

率和放热曲线的变化,从而影响下游分离单元的工况。因此变更 HAZOP 分析节点选取要按照物料、能量流向顺藤摸瓜式追踪,直到偏差影响被系统缓冲或者消除为止。

3.2 HAZOP 在工艺变更评价中的关键操作要点

分析范围的准确确定为变更 HAZOP 打下了基础。原则上分析范围应包括变更直接涉及的设备、管道、仪表和控制回路,变更对上下游工艺单元的影响也要考虑进去。界定方法就是绘制变更影响边界图,以变更对象为中心,沿着物料和能量的流向向外扩展,直到某一点处变更的影响被现有的控制系统或者物理容量完全吸收为止。边界确定要依靠有经验的工艺工程师来完成,依靠工艺仿真以及工程判断,保证既不过度覆盖,又不漏掉关键路径。

引导词的选择策略要依照变更类型来改变。新建装置的 HAZOP 一般用完整的引导词清单(无、过量、减少、反向、部分、伴随等)。在变更场景中,根据变更的性质有选择地重点使用部分引导词。对于温度设定值的改变,重点分析温度+过高所引起的连锁偏差,对于温度+过低的偏差可以简化。该种“定向聚焦”的方式,在保证分析系统性的同时,可以大幅缩短分析时间,使得变更 HAZOP 更符合工程实际的时间窗口要求。

分析深度的把握对变更 HAZOP 效率和效果起着决定性的作用。原则上,对于变更直接涉及的工艺节点应该做完整的偏差识别分析,对于间接影响的节点重点分析与该变更传播路径直接相关的偏差,其他的偏差可以简要提及或者注明“与变更无关”。分析深度分层处理,使评价工作同变更风险水平相匹配。

4 What-if 及其他评价方法的协同应用

4.1 What-if 检查法的特点与适用场景

What-if 检查法是提出假设,然后分析假设成立与否的逻辑方法。”来识别工艺系统存在的风险,是简化了的定性风险辨识方法。其操作方式灵活,可以由有经验的分析团队用头脑风暴加结构化检查的方式来进行。与 HAZOP 的系统性偏差识别不同的是,What-if 更关注非正常但是可能发生的情况,因此更适合用在变更安全评价的预分析阶段。

在工艺变更评价过程中,用 What-if 代替 HAZOP 分析之前使用,也可以用在变更规模较小的场景中直接作为主要评价方法。用作预分析工具的时候,What-if 快速扫描变更所导致的异常事件被筛选出来,得到高风险场景,给后面 HAZOP 分析指明重点方向。在变更规模较小的场合下,What-if 可以作为独立的评价手段,直接给出风险识别的结果以及相应的建议措施,不需要执行全部的 HAZOP 流程。这样一种“分级评价”策略可以较好地解决评价的深浅与投入之间的矛盾。

What-if 检查法的缺点也十分明显,分析质量很大程度上

取决于参与人员的经验水平,检查问题的设计缺少标准化的引导框架,容易漏掉复杂的偏差或者多变量组合偏差。因此,在关键工艺设备、重大变更或者高风险物料的情况下,What-if 一般被用作辅助的方法而不是取代 HAZOP 的主要方法。

4.2 LOPA 与风险矩阵在风险排序中的应用

HAZOP、What-if 的主要输出是风险场景清单及相应的建议措施,但是定性分析很难回答,在众多识别出的风险场景中,哪些应该被优先处理呢?LOPA、风险矩阵可以将定性的风险判断变成半定量的风险排序。

保护层分析法(LOPA)以 HAZOP/What-if 识别出的风险场景为基础,对已经存在的保护层(基本过程控制系统、安全联锁、物理防护、泄压系统等)对风险事件削减效果的分析,判断现有的保护措施是否足够,计算剩余风险频率是否达到可接受的标准。在变更评价场景中,LOPA 特别适合解决两类问题,第一类是变更造成原来保护层失效或者降低的时候,检查剩余保护是否足够,第二类是变更之后出现新的风险需要增加额外的保护措施的时候,确定需要采取的安全完整性等级。

风险矩阵给出了一种更为直接的风险表述方式。将变更事件后果严重程度与发生可能性组合成风险等级,使非安全专业的管理人员、变更审批人员能迅速把握变更所牵涉的安全风险,从而提升变更审批决策的科学性。

5 安全评价方法的选择策略与流程整合

5.1 变更分级与评价方法匹配

不同规模的工艺变更对安全评价的深浅、繁简要求也不同。创建变更分级和评价方法匹配矩阵,可以使得企业从管理流程上选择合适的评价方法。变更分级一般可以按变更对工艺参数的影响程度、设备改造范围、安全风险潜势等来划分,在实践中与企业的变更管理制度相衔接,使安全评价的开展同变更审批程序有效融合起来,防止由于流程冗余或者缺乏而导致安全受到实质性的威胁。

合理的匹配方法既可以防止由于重大变更评价深度不够而导致的风险,又可以防止因为微小变更的过多分析而影响到正常的装置运行或者局部调整。对影响范围清楚的变更内容可以采用快速通道的方式,在保证评价质量的基础上缩减安全评价的时间窗口,使变更管理流程的可行性和风险辨识的充分性相协调。

5.2 多方法协同的评价流程框架

化工装置工艺变更安全评价的最优实践一般采用多种方法组合使用而不是单一方法单独使用。根据以上分析,可以构建起一个分层递进、多法并用的评价流程框架。

第一层:变更预筛与 What-if 扫描。变更申请提出之后,安全评价团队使用 What-if 方法对变更所造成的安全影响进行

快速扫描,找出高风险场景和重要关注点,按照扫描结果来决定后续评价的深浅。

第二层:靶向 HAZOP 分析。对 What-if 扫描出的高风险场景,以变更节点、受影响节点为范围,用引导词、参数组合来开展系统性的偏差识别与分析,弥补 What-if 遗漏的系统性偏差。

第三层:LOPA 与风险矩阵评估。对 HAZOP 分析中发现的风险场景展开保护层分析,对风险等级及剩余风险水平加以量化,给变更审批以及防护措施的设计给予支撑。

第四层:变更审批与措施跟踪。评价结果形成安全评价报告,随变更审批流程一起提交审批。审批通过之后,对评价出的建议措施一项一项落实并加以检验,从而形成评价结果向变更管理的闭环。

该流程框架适合于对中大型工艺变更的评价工作,对小型变更做简化处理,重大变更则要增加专家评审环节。核心就是确定“评价深度匹配变更风险、多方法协同覆盖全面”的基本方向,防止因为过于流程化而造成形式审核,使安全评价结果真正服务于变更决策的实际需要。

参考文献:

- [1] 王宇鹏,刘琪.全链条治理系统化提升守护化工安全——张家港市危化品安全监管工作实践[J].江苏应急管理,2025(7):12-14.
- [2] 李建明.化工危化品储存安全管理与事故应急管理[J].化工管理,2024:108-110.
- [3] 宋景伟,周贺奎.化工工程项目中的危化品安全管理策略研究[J].奥秘,2025(27):273-275.
- [4] 朱鹏鸿,宋宁.化工企业危化品储存的安全管理研究[J].中国化工贸易,2025(3):163-165.
- [5] 刘彦.化工企业危化品储存安全管理及事故防范对策研究[J].化工管理,2025(32):73-76.

6 结论

第一,工艺变更安全评价同新建装置安全评价存在着本质的区别,它是在有限变更的条件下,准确找到变更对现有系统的影响范围及传播途径。HAZOP 的引导词—参数偏差识别框架在变更时要适应的,即用“聚焦变更是跟踪影响”的分析主线来代替全面的分析,在保证完整的前提下提高评价效率,用靶向分析替代全覆盖分析。

第二,用什么做预筛选工具,对工艺变更的安全评价进行快速筛选,可以找到高风险场景,也可以给 HAZOP 分析指明方向。LOPA、风险矩阵给风险排序、防护措施的设计提供半定量的依据。不同的评价方法有各自的适用范围,变更规模越小,What-if 所占的比例就越大,变更越复杂、风险潜势越高,HAZOP 和 LOPA 的介入程度就越深。

第三,多方法协同的评价流程框架包含变更预筛、靶向 HAZOP、LOPA 评估、审批跟踪等主要方面,可以很好地满足工艺变更安全评价的需求。在此框架之下,评价的深度同变更的风险等级相适应,从而形成由“快速扫描”到“系统剖析”再到“风险量化”的评价过程,既保证了评价的质量又不会因为过多的分析而影响到变更的实施进度,给化工企业工艺变更安全管理以及风险控制赋予可行的方法支持。