

石油化工流程安全风险识别与防控研究

李尚琦

河北安科检测检验有限公司, 河北 石家庄 050200

[摘要]石化工业存在高温高压、易燃易爆、不间断生产的特点,过程的安全隐患种类繁多易变,一旦出现事故将会带来严重的人员伤害、财产损失以及环境破坏。文章从化学工艺工程角度出发,基于石油化工工程建设经验积累,对石油化工生产过程中的安全风险特征进行了详细的论述,在危险与可操作性分析(HAZOP)、故障树分析(FTA)两种常用的风险辨识手段基础上,对物料、工艺参数、设备、人为操作四个方面的主要安全风险进行了具体分析并提出了包括工艺设计改进、设备安全保障、自动化监控、应急救援及教育培训的综合管控策略。

[关键词]石油化工; 流程安全; 风险识别; HAZOP 分析; 防控措施

DOI: 10.33142/sca.v9i3.19361

中图分类号: TQ086

文献标识码: A

Research on Identification and Prevention of Safety Risks in Petrochemical Processes

LI Shangqi

Hebei Anke Testing and Inspection Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050200, China

Abstract: The petrochemical industry is characterized by high temperature and pressure, flammability and explosiveness, and uninterrupted production. There are various types of safety hazards in the process, and once an accident occurs, it will bring serious personal injury, property damage, and environmental damage. Starting from the perspective of chemical process engineering and based on the accumulated experience in petrochemical engineering construction, this article provides a detailed discussion on the safety risk characteristics in the petrochemical production process. Based on two commonly used risk identification methods, Hazard and Operability Analysis (HAZOP) and Fault Tree Analysis (FTA), the main safety risks in materials, process parameters, equipment, and human operation are analyzed in detail, and comprehensive control strategies including process design improvement, equipment safety guarantee, automation monitoring, emergency rescue, and education and training are proposed.

Keywords: petrochemical industry; process security; risk identification; HAZOP analysis; prevention and control measures

近年来随着装置大型化的发展,原料劣质化越来越明显,运行周期延长等,使得流程安全面临的挑战愈发严峻。据统计从2015年到2025年,我国石化行业大大小小的事故多达几百起,单次事故造成的直接经济损失高达数亿元,并伴有严重的环境与社会影响。这些事故暴露出在风险识别深度、防控措施有效性以及应急响应能力等方面仍存在薄弱环节。在此背景下,如何系统、科学、准确地辨识出石油化工过程中的各种安全隐患并建立相应全流程风险防控体系,也成为当前学界和工程界的热点问题。

1 石油化工流程安全风险概述

石油化工工艺是以石油、天然气作为原料,在一系列物理与化学反应作用下,得到燃料、化工原料以及产品的一种复杂的工业生产过程,代表性工艺有常减压蒸馏、催化裂化、加氢处理、蒸汽裂解等。这些流程通常具有“常

压塔底温度达到350~370℃的高温环境,裂解炉管温度高达1100℃左右,加氢装置操作压力达到15~20MPa的高压环境、介质易燃易爆,例如氢气、液化气、乙烯等、工艺流程连贯性强”的特征^[1]。这些特点本身便带来了很大的安全隐患。

从系统工程的角度来说,石油化工过程的安全风险不是由某一个因素引起的,它是设备、工艺、介质、人员、环境等相互影响、共同作用造成的。据统计,在石油化工业重大事故中,设备故障发生率大约为25%~30%,由于腐蚀和疲劳导致事故发生频率约为25%~30%,人为误操作事故发生率为40%~45%,工艺设计及变更管理不当事故发生率为15%~20%^[2]。这表明,风险管控必须贯穿于装置的设计、建设、运行、维护乃至报废的全生命周期。在当下“双碳”政策以及产业升级的要求下,装置规模化、

工艺复杂化给流程的安全性带来了更大的挑战。所以，整体上把握住风险并且做好相应的防范工作，是维护企业平稳运行的基本前提也是推动整个行业高质量发展的重要途径。

2 石油化工流程安全风险识别方法

风险辨识是安全工作的核心，在石化行业已有一定规模的定性和半定量风险辨识方法体系，本文主要介绍两种使用频率最高的方式。

2.1 危险与可操作性分析

HAZOP 是一套结构化、系统化的风险辨识技术，重点是利用一组反向提示词与工艺参数相配合，系统识别工艺流程中可能出现的偏离设计意图的情况，并分析偏离产生的具体原因、推导可能导致的后果及现有安全措施是否足够应对。

在石化炼油项目中，HAZOP 分析就是项目初期以及投产后必须要做的工作之一。如表 1 所述，在某个大型乙烯装置中“脱乙烷塔进料流量”的节点上，运用引导词的方法可以发现潜在的风险偏差如“无进料量”，或者“进料量过大”等问题并相应地给出建议，比如增加低流量联锁以及流量调节阀复位等措施。

由 HAZOP 产生的风险矩阵以及行动计划，将成为下一步工程设计改进及安全保障实施的基础支撑，如图 1 所示，在某催化重整装置的 HAZOP 分析中，识别出的高风险场景主要集中在反应单元和分馏单元，这为后续的重点防护提供了明确方向。

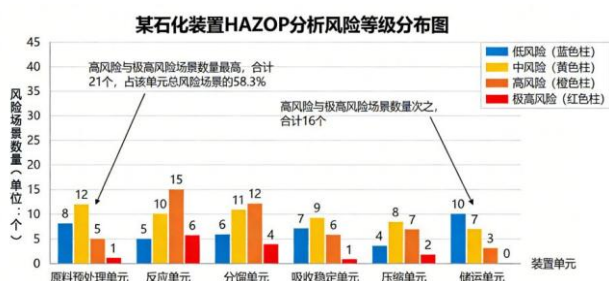


图 1 某石化装置 HAZOP 分析风险等级分布图

2.2 故障树分析

相比 HAZOP 的归纳法而言，FTA 是演绎法，是以某一个不期望事件的发生为出发点，由上至下去逐步拆分引

发该事件的一系列直接原因，直到分解出基本事件：设备损坏、误操作等。FTA 可进行量化计算出顶上事件发生几率以及发现系统中的弱点。例如，“加氢反应器超压爆炸”，可以创建故障图。通过分析可知它的基本事件有：泄压阀失灵、压力控制失灵、操作人员未采取措施等。在研究某个高压加氢装置的故障树基础上，经过计算得出“压力控制器失灵”“泄压阀拒动”这两个基本事件是造成超压最主要原因，它们的重要性系数都达到了 0.32 和 0.28^[3]。直接为企业对于核心仪表做“三取二”的冗余设计提供了依据。FTA 与 HAZOP 互相配合。HAZOP 重视全盘排查，发现偏差问题；FTA 着重对于重大隐患进行详细分析，给出量化参考建议。二者相结合形成了流程风险管理的基本结构。

3 石油化工流程主要安全风险分析

通过对风险辨识的经验总结，石油化工工艺过程主要的安全风险有如下四个方面的内容。

3.1 物料风险

石化过程中的物料大多是易燃易爆有毒有害的物品。危险在于：一是一次泄漏危险：物料从管线，容器泄漏出来遇到火源就会发生燃烧爆炸事故。二是二次反应危险：烯类单体在高温下容易发生自聚，如果工艺控制不好就会出现剧烈聚合；三是腐蚀危险：石油中含有的硫化物、盐分，在高温条件下产生 H₂S、HCL 等具有腐蚀性的气体，造成设备壁厚减薄。

表 2 某炼化企业主要物料特性及风险统计

物料名称	闪点 (°C)	爆炸极限 (V%)	火灾危险类别	主要风险类型	近三年泄漏事件占比
液化石油气	-74	1.5~9.5	甲 A	泄漏、爆炸	35%
汽油	-50	1.4~7.6	甲 B	泄漏、火灾	28%
氢气	可燃气体	4.0~75.6	甲 A	泄漏、爆炸	22%
硫化氢	可燃气体	4.3-46.0	甲 A	中毒、腐蚀	15%

根据表 2 可知，某公司近 3 年的泄漏事故中，液化石油气 (LPG) 和汽油占总量的 63% 以上，是物料风险管理的重点。

表 1 某石化装置 HAZOP 分析示例 (部分)

节点	引导词	偏离	可能原因	后果	安全措施	建议措施
脱乙烷塔进料	空白	无流量	上游泵故障、阀门误关	塔内聚合、再沸器干锅	流量指示报警	增设低流量联锁，切断进料
脱乙烷塔进料	过量	流量过大	调节阀故障、控制系统失效	塔液位过高，塔压波动	流量控制回路	流量控制回路冗余设计
反应器 R-101	反向	物料倒流	止回阀失效、压差逆转	催化剂损坏、超压	双止回阀	增设压差监控与切断阀联锁

3.2 工艺参数风险

工艺参数失控常常是发生化工设备事故的主要原因，它的实质就在于主要的操作参数超出额定值之后，会导致装置中原料、热量以及压力达到失衡的状态，使得整个系统的稳定性遭到破坏从而进入到一个危险的状态，进而出现设备损坏、爆炸、中毒、着火等一系列事故的发生。常见的异常因素主要有：温度超标、压力过大、流量过大以及液位过高等问题。其中高温会造成化学反应失控，同时还会导致设备的金属强度降低，密封能力下降，从而造成管线、容器热应力断裂；高压会引起装置物理性爆炸，出现容器爆破、管道破裂、安全阀不断动作等一系列现象，产生大量的易燃物泄漏的问题；流量超大会打乱装置原料分配的比例，造成反应的时间减少，产品品质下降，极端情况可能会出现反应器飞温、催化活性丧失的情况。液位高会引起塔器、分离器液体携带到气相系统，发生压缩机液击、叶片损毁的问题；液位低会引起泵抽空、强烈震动并且可能会引起气体窜入后端系统，造成系统的压力波动、运行状况失常，如某加氢精制装置，反应器入口温度为重要监控目标，在此过程中，由于仪表失灵或者人为失误造成的温度超标达 20℃ 以上时，会使得催化剂结焦速率剧增，床层热点无法进行调控，最后将会带来反应器超温、泄压阀开启甚至是催化剂烧毁，严重的还会导致装置停运乃至发生重大安全事故的情况。

3.3 设备风险

设备是工艺过程的物质依托。其危险性表现在以下几个方面：腐蚀和冲刷是最普遍的破坏方式，尤其是弯头及三通管件处，物料流动对其冲刷会造成壁厚减薄。疲劳破坏：在交变应力下（如往复式压缩机、离心泵的振动，以及装置频繁启停的影响），设备焊接接头、接管根部等应力集中位置容易出现裂纹；密封失效：法兰、阀门、机泵的动、静密封点是最容易发生泄漏的位置之一。在进行石油化工检测工作时，经常会遇到因高温硫化物而引起的管线壁厚显著减薄的情况。对某常压塔顶回流管线采用超声波检测，运行三年后，该管壁厚由原来 10mm 下降为 6.5mm，减薄率高达 35%，已经远远超过正常的腐蚀裕度，若不及时更换，会有穿孔泄漏的危险。另外，设备的本质安全水平，如安全阀的定期校验、紧急切断阀的完好性，直接决定了事故状态下能否有效遏制事态扩大。

3.4 人为操作风险

虽然自动化程度日益提高，但人为因素仍然是事故链中的重要一环。据统计，40% 以上的石化行业事故都与人的操作有关。主要有以下几点：违章操作，如罐内含氧量

未达标就进行动火；误操作，如阀门关错、DCS 参数设置出错；应急处置不当，在遇到非正常工况时，由于紧张或缺乏经验等原因，没能及时辨识事故隐患并采取合理的处置方法，从而导致“小问题”升级为“大灾难”；维修作业风险：设备检修过程中能量隔离不彻底，无票证作业造成人员中毒窒息及机械伤害频繁发生。

4 石油化工流程安全风险防控措施

针对以上风险一定要建立以“预防为主、防治结合”为原则的全方位防范机制。

4.1 工艺设计优化

从根本上消除或者减少危害是最直接最有效的预防方式。第一，在工艺路线的选择上，优先使用安全化设计，比如选用低毒、低反应活性的材料代替高危材料等；第二，在工程设计中严格执行《石油化工企业设计防火标准》（GB 50160）等相关规定合理布置设备，留有足够的防火距离；第三要增加多道保护层，有：工艺设计（合理的设计裕度）、基本过程控制系统（BPCS，如 PID 控制）、安全仪表系统（SIS，如 ESD 系统）以及物理防护（防爆墙、泄压设施等）等。采用多层次保护，在某一层次失效的情况下，下一层级依然可以起到防止事故发生的作用。

4.2 设备安全防护

设备的完整性管理是防范风险的根本保障。一方面要制定以风险为导向的检验（RBI）方案，对腐蚀严重以及存在较大风险的设备部位，利用在线腐蚀监测、定点测厚、定期无损检测（如相控阵超声、射线检测）等方式，动态掌握设备状态的变化。如图 2 所示，可通过腐蚀监测系统实时监测重要管线的腐蚀速率变化，从而指导预防性维修；另一方面要强化重要设备的管理，管控好安全阀、爆破片、紧急切断阀等安全附件，定期进行校验、维修，保证随时可用；第三是要实施设备全寿命周期管理，涵盖设备选型、采购、投运到报废的全过程跟踪，做到有据可查。

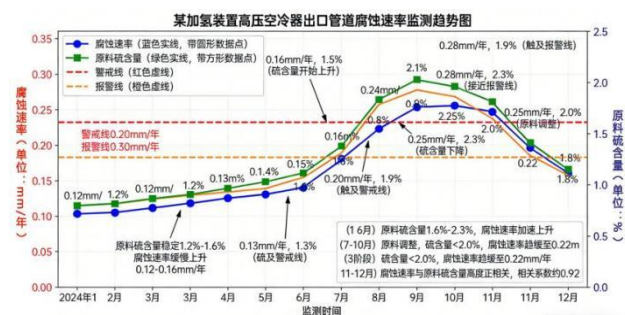


图 2 某加氢装置高压空冷器出口管道腐蚀速率监测趋势图

4.3 自动化控制与监测

提高自动化程度是最有效的降低人为失误和进行精

确控制的技术措施之一。一方面是加强基础过程控制系统,能够对重要操作变量进行自动调整和越限提示;另一方面是针对 HAZOP/LOPA 的结果单独配置安全仪表系统(SIS)来完成连锁保护的功能。比如高压加氢装置就需要配备“三取二”的压力高连锁,有两个甚至两个以上压力测量点达到连锁值的时候就会连锁停车、开启放空阀泄压,在几秒钟内把设备的压力降到允许的范围内,避免出现危险情况。另外,推行先进智能化监控手段,比如使用红外热成像监控高温设施的异常点,使用声波成像探测气体泄露情况,利用人员跟踪技术和电子围栏防范现场操作风险等手段开展全天候、无死角、智能化的风险管控。

4.4 应急管理培训

应急管理是风险管理的最后一道屏障。一是要建立具有较强实用价值并能够落到实处的应急预案并且分级分类覆盖装置级、车间/部门级及公司级各个层面,经常性的开展应急实战演练;应急演练应注重“双盲”方式,测试应急抢险力量能否做到迅速反应,联合协作,及时救援等。二是要加强教育培训工作,培训的内容不能仅仅是掌握好操作流程,还需要学习了解工艺风险、异常工况的判断以及处理方法等,在仿真培训平台(OTS)上对操作员进行停工开车、应急处置等一系列的模拟练习可以提高他们在非正常工况下应急处置的能力^[4]。最后,营造积极的安全文化,让每位员工都愿意报告隐患及未遂事故,打造“人人参与、不断完善”的良好安全文化环境。

5 结束语

石化装置运行安全风险管理是一项庞大而系统的工程。本文首先阐述了风险的概念,系统讲解了 HAZOP、FTA 等风险辨识方法,详细分析了物料、工艺参数、设备、人员操作四个方面的主要风险类别,最后提出了从工艺设计优化、设备健康监测、自动化智能化管控到应急处置能力的全过程综合性管控策略。只有做到风险辨识全过程覆盖、各个环节防控到位,并充分利用现代化、智能化的技术手段,才能彻底防范重特大安全事故的发生,实现本质安全与可持续发展目标。未来,在大数据、人工智能与流程工业深度融合的背景下,以数字孪生为基础的预测型风险管理技术是值得深入探讨的研究主题。

[参考文献]

- [1]冒佳磊.基于大数据的石油化工设备安全风险评估[J].化纤与纺织技术,2026,55(1):137-139.
- [2]古忠维.石油化工安全生产风险控制技术探讨[J].当代化工研究,2025(14):194-196.
- [3]王继伟,郭莹,姜淞文.石油化工安全生产风险控制关键技术[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(5):17-19.
- [4]聂存良.石油化工领域安全生产风险控制的关键技术解析与应用[J].石化技术,2025,32(7):28-30.

作者简介:李尚琦(1993.10—),女,毕业院校燕山大学,本科,所学专业化学工程与工艺,当前就职单位河北安科检测检验有限公司,职务检测部职员,助理工程师。