

To explore the application of protective layer analysis method in the major hazard tank area of chemical enterprises

Xianlin Zhang¹ Haitao Xu²

1. Shaanxi Liangtai Safety Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

2. Sichuan Tiancheng Safety Technology Evaluation and Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

The major hazard tank area of chemical enterprises is an area with high safety risk and serious accident consequences. In chemical industry production, many factors can trigger the initial event, such as mechanical failure, human error, abnormal changes in process parameters, or external force majeure. Layer of Protection Analysis (LOPA), as a semi-quantitative risk assessment method, plays an important role in the risk management of major hazard tank areas in chemical enterprises. In this paper, the basic principle and analysis steps of LOPA are described in detail, and its application in the major hazard tank area of chemical enterprises is discussed through specific cases, aiming at providing a set of scientific and effective risk management tools for enterprises.

Keywords

protective layer analysis; Chemical enterprises; Major hazard tank area

探究保护层分析法在化工企业重大危险源罐区的应用

张先琳¹ 徐海涛²

1. 陕西良泰安全技术有限公司, 中国·陕西 西安 710000

2. 四川天成安全科技评估咨询有限公司, 中国·四川 成都 610000

摘要

化工企业重大危险源罐区是安全风险高、事故后果严重的区域。并且在化学工业生产中,多种因素均有可能触发初始事件,例如机械故障、人为操作错误、工艺参数异常变化或外部不可抗力等因素。保护层分析法(Layer of Protection Analysis, LOPA)作为一种半定量风险评估方法,在化工企业重大危险源罐区的风险管理中发挥着重要作用。本文详细阐述了LOPA的基本原理、分析步骤,并通过具体案例探讨了其在化工企业重大危险源罐区的应用,旨在为企业提供一套科学、有效的风险管理工具。

关键词

保护层分析法; 化工企业; 重大危险源罐区

1 引言

化工行业作为国民经济的支柱产业之一,近年来在我国取得了迅猛发展,为经济增长、社会就业和科技创新作出了巨大贡献。然而,化工生产过程涉及大量易燃易爆、有毒有害的危险化学品,生产工艺复杂,操作条件苛刻,使得化工企业面临着诸多安全风险。保护层分析(Layer of Protection Analysis, LOPA)作为一种半定量的风险评估方法,近年来在化工领域逐渐得到广泛应用。它基于事故场景,通过识别和分析阻止事故发生或减轻事故后果的独立保护层(Independent Protection Layers, IPLs),量化评估各保护层的失效概率,进而确定现有保护措施能否将风险降低至可

接受水平^[1]。与传统的定性风险分析方法相比,LOPA能够提供更为精确的风险量化结果,为企业决策提供有力的数据支持;与复杂的定量风险分析方法相比,LOPA又具有操作相对简便、成本较低的优势,易于被企业工程技术人员掌握和应用。这对于预防罐区重大事故的发生,减少人员伤亡、财产损失以及环境污染具有重要的现实意义。

2 保护层分析法(LOPA)核心理论

保护层分析(LOPA)作为一种半定量的风险评估方式,其关键在于通过事故情景来解析潜在风险。这种方法通常利用初始事件后果的严重性以及该事件发生的频率来大致描绘出风险状况^[2]。以化工厂储罐区域为例,储罐阀门泄漏、管道破裂或是泵设备故障等情况都有可能成为引发事故的原因。如果缺乏有效的安全防护措施,一旦这些起始事件发生,就极有可能沿着特定路径演变成火灾、爆炸或者有物

【作者简介】张先琳(1985-),女,中国陕西兴平人,本科,工程师,从事安全工程研究。

质泄漏等重大灾难。LOPA 可以被看作是一种特殊的事件树分析方法，在这一过程中，从源头处开始的每一个事件都可能导致不良后果，而系统内部设置的各种防护屏障则像是一道道防线，目的是阻止事故进一步恶化。其中一些防护措施可以直接防止潜在危险的发生，起到预防作用；另一些则是在事故发生后尽可能减少损失，发挥减缓影响的作用。当某一防护层按照设计预期正常工作时，就能有效避免更严重的后果出现。

3 化工企业重大危险源罐区特点剖析

3.1 储存物质高危特性

在化工企业的重大危险源储罐区域，存放着大量具有易燃、易爆、有毒或腐蚀性的化学品。例如，汽油和柴油等燃料物质因其高度可燃性和爆炸性，在泄漏后若遇明火，则极有可能导致严重的火灾及爆炸事件；而苯与硫化氢这类化合物不仅毒性强烈，还能造成材料的腐蚀，给人体健康以及自然环境带来极大威胁。鉴于上述特性，这些储存设施及其相关操作环节均面临着较高的安全隐患。

3.2 罐区设施复杂隐患

罐区设施涵盖了一系列关键组件，如储罐、管道、泵及阀门等，它们共同组成了一个错综复杂的系统。其中，储罐作为主要的危险化学品储存装置，其结构与材料选择对于保障安全至关重要。例如，如果储罐的焊接工艺不达标或防腐措施执行不到位，则可能会导致泄漏事故的发生。在长期使用过程中，管道和阀门因受到内部介质腐蚀以及外部压力变化等因素的影响，也容易发生泄漏或破裂等问题。另外，罐区内配置的电气设备及其仪表控制系统同样存在潜在风险，例如电气装置防爆性能不足或者控制仪表失效等情况均有可能诱发安全事故。

3.3 事故后果严重性

在化工行业，大型危险源储罐区域若遭遇事故，通常会导致极其严重的后果。这类事件不仅可能引起火灾或爆炸，进而导致容器破裂和物料外泄，从而引发更大范围的灾难性事件，还可能造成大量的人员伤亡与财产损失。此外，有毒有害物质的泄漏还会对周围环境及居民健康产生持久的影响，例如土壤与水源污染，以及人体中毒等问题。一个典型的案例是 2015 年天津港“8·12”瑞海公司危险品仓库特别重大火灾爆炸事故，该事件共造成 165 人死亡、8 人失踪、798 人受伤，并且直接经济损失高达 68.66 亿元人民币，给社会带来了难以估量的精神创伤与经济损失。

4 LOPA 在化工企业重大危险源罐区的应用实例

4.1 案例选取说明

为了进一步研究保护层分析法（LOPA）在化工行业重要危险源区域的实际应用成效，我们选取了一家典型的石油化工企业作为案例研究对象。该企业的主营业务包括石化产

品的制造与储藏，其罐区占地大约 50,000 平方米，存放着多种具有易燃、易爆及毒性特性的化学品，例如液化石油气、苯、甲苯以及二甲苯等，总储存容量达到了 100,000 立方米。区域内布置了超过 100 个不同类型的容器，包括球形罐体、水平放置的罐体和气体存储柜，这些设施能够承受从常压到高压范围内的各种储存条件^[1]。

4.2 风险场景识别

4.2.1 初始事件确定

经过对化工企业罐区的细致研究，我们确定了几个可能导致安全事故的关键因素。其中，储罐压力超标是一个较为普遍的问题，其主要原因有：物料输入速率失控，例如由于输送泵出现故障或调节阀门失灵导致短时间内大量物料涌入储罐，从而引起内部压力急剧增加；对于需要在低温条件下保存且易挥发的物质来说，如果冷却系统发生故障，会导致存储物温度上升，蒸汽压力随之增大，进而产生超压现象；另外，在极端天气条件下，尤其是夏季高温期间，如果没有适当的遮阳和隔热措施来保护罐区，则储罐会因环境温度升高而膨胀，内部压力亦将显著提升。

4.2.2 事故场景构建

根据前述初始事件，进一步探讨潜在的事故演变情景。以储罐压力超标为例，如果安全阀未能及时释放多余压力，那么随着内部压力持续增加至超出储罐设计极限时，将导致物理性爆炸的发生。此过程中会瞬间释放出巨大的能量，形成强大的冲击波，对周围的储罐、管道及相关设施造成严重破坏，并且爆炸产生的碎片可能飞散到远处，从而诱发次生灾害；此外，储罐内泄漏出来的易燃或易爆物质会迅速与外界空气混合，形成可燃性气体云团。一旦这些气体遇到任何形式的火源——例如电气设备工作时产生的火花、未完全熄灭的明火或是爆炸本身带来的高温区域就会触发大规模火灾。借助风力作用，火势可以迅速扩散，最终影响整个储罐区域，甚至威胁到邻近的企业和居民区的安全^[4]。

4.3 保护层分析

4.3.1 既有保护措施梳理

这家化工企业在其罐区实施了多层次的安全保护策略，这些措施涉及工艺设计、自动化控制、安全装置、人员操作规程以及应急响应预案等关键领域。在工艺设计层面，储罐采用了创新的双层壁构造，这种结构不仅具有优异的抗腐蚀能力，还能够有效抵御内部物料对罐体的侵蚀作用，从而显著延长了储罐的服务寿命，并降低了潜在的泄漏风险；此外，管道系统的设计也充分考虑到了所输送物料的具体性质，通过选用耐腐蚀性好、能承受高温高压条件的管材，并采取科学合理的布局方案，有效地减少了因磨损或连接处松动而导致的问题；罐区的整体规划严格遵守安全间距规范，确保每个储罐与周围建筑、设施及其他不同危险等级的储罐之间保持适当的安全距离，以此来预防一旦发生事故时可能产生的连锁反应及危害范围扩大。

4.3.2 IPL 判定与分级

根据独立保护层 (IPL) 的定义及其特性,对罐区已识别的各项保护措施进行了评估。经过细致审查后发现,基本过程控制系统 (BPCS) 在硬件配置、软件设置以及运行逻辑方面均与潜在的初始事件保持了必要的独立性,并能够持续稳定地监控和调节工艺参数,防止这些参数超出安全界限,因此可以被认定为一个有效的 IPL。同样地,安全仪表系统 (SIS) 采用了三重冗余架构设计,具备全面的自我诊断功能,在从设计到安装再到日常运营及定期维护的过程中严格遵守相关行业标准,确保了其专属性、独立运作能力、高度可靠性和良好的可追溯性,从而也被确认为一种高效的 IPL^[5]。此外,防火堤和围堰的设计建造均达到了规范要求,在日常使用过程中未观察到任何可能削弱其防护效果的问题或缺陷,如结构损伤或形状变化等,证明它们能够在发生泄漏时有效阻止物料扩散,故也视为 IPL 之一。对于安装位置恰当、检测精度高且报警机制可靠的可燃气体与有毒气体探测报警设备而言,这类装置能迅速向操作人员发出泄漏警告,属于 IPL 的重要组成部分;而针对超压情况的安全阀、爆破片等压力释放设施,则因其正确的选型及定期校准保养,在储罐内部压力异常升高时能够按照预设条件及时开启泄压通道,亦被视为合格的 IPL。基于上述分析,还进一步依据各 IPL 措施的实际可靠度和有效性对其进行了等级划分。特别指出的是,鉴于 SIS 系统的三重冗余设计显著提高了其稳定性,加之过往事故模拟测试及实际应用中所展示出超过 99.9% 的安全连锁响应准确性,表明该系统在预防事故扩大化方面发挥了极其重要的作用,故将其归类为具有最高可靠性级别的 IPL。

4.4 风险量化评估

在风险量化评估中,初始事件频率的准确性对于后续分析至关重要。针对该化工企业的罐区,我们对储罐超压这一初始事件的年度发生概率进行了综合考量。首先,通过对企业过去十年内设备故障记录的研究,发现有两起案例是因为冷却系统失效而导致储罐压力超出安全范围,据此推算出由冷却系统故障引起的超压事件大约每年发生 0.2 次;其次,根据行业组织发布的统计资料,在相同类型、物料及工艺条件下,由于物料供给流速失去控制而引发的压力过高现象平均每年约为 0.3 次;另外,考虑到当地气候特征以及现有遮阳隔热设施的有效性,专家们估计极端气温上升导致储罐内部压力升高的可能性为每年 0.1 次左右。结合上述所有因素,

预测该企业罐区内储罐超压事件的年发生率大约为 0.6 次。

4.5 结果应用与优化建议

根据 LOPA 分析得出的结果,企业应当优先考虑对关键设备实施升级和改造。对于储罐超压的风险管理,如果安全仪表系统 (SIS) 被认为在可靠性方面存在不足,则应探索其冗余设计的进一步优化方案,如增加备用电源或增加冗余传感器的数量,以确保即使在极端条件下也能保持系统的稳定运行。

除此之外,还需要根据 LOPA 分析识别出的新风险场景及风险等级变化,对应急预案进行全面修订。细化应急响应流程,明确在不同事故阶段各部门、各岗位的具体职责与任务分工。例如,在储罐泄漏事故初期,现场操作人员如何快速准确地判断泄漏源、泄漏量及物料特性,及时采取初步控制措施,如关闭相关阀门、启动泄漏收集装置等;安全管理部门如何迅速组织周边人员疏散,划定警戒区域,协调应急救援资源调配;工程技术人员如何对泄漏设备进行紧急抢修,防止泄漏扩大等,确保应急响应的及时性与有效性。

5 结语

综上所述,通过对某典型化工企业罐区的深入剖析,充分展示了 LOPA 在化工企业重大危险源罐区风险评估与管理中的显著应用成效。在风险场景识别环节,精准定位储罐超压、泄漏、液位异常以及设备故障等关键初始事件,并构建出全面且细致的事事故场景,为后续精准防控奠定坚实基础。保护层分析过程中,对罐区既有保护措施进行系统梳理,严谨判定并合理分级各独立保护层,如将安全仪表系统 (SIS) 归为高可靠性 IPL,防火堤和围堰列为较高可靠性 IPL 等,为风险量化评估提供可靠依据。

参考文献

- [1] 王海娥.保护层分析法在化工企业重大危险源罐区的应用研究[J].现代职业安全,2023,(09):71-74.
- [2] 康映雪.精细化工装置风险评估模型的建立及应用分析[D].东北石油大学,2023.
- [3] 李洋,盖盈盈.保护层分析(LOPA)与HAZOP分析结合的应用研究[J].山东化工,2022,51(12):201-203.
- [4] 路笃辉,李兵,王新慧,丁彦龙,吕鸿刚.化工领域优化的安全保护层模型及保护层分析理论研究[J].中国特种设备安全,2021,37(04):12-17.
- [5] 闫放,张舒,许开立.化工危险源定量保护层分析[J].中国安全科学学报,2019,29(01):100-105.