

HAZOP、LOPA 和 SIL 分析评价方法 在环氧乙烷储罐中的应用

钟小丰（中建安装集团有限公司，江苏 南京 210000）

摘要：应用危险与可操作性分析（HAZOP）、保护层分析（LOPA）与安全完整性等级（SIL）3种分析评价方法对环氧乙烷存储系统进行全面风险评价。首先，利用HAZOP分析识别存储系统工艺过程当中可能会出现的问题与危险因素，同时结合风险矩阵开展风险测评，提出改进方案及措施。其次，使用LOPA分析从定量角度测评当前使用的保护方式，并通过SIL评估当前的安全仪表系统设计是否合理，是否可以有效控制事故风险。使用这三种分析评价方法，可以全面地评估环氧乙烷储罐的风险，并提出相应的安全改进措施。

关键词：HAZOP；LOPA；SIL；环氧乙烷

中图分类号：TQ086；X937

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）029-0133-03

Application of HAZOP, LOPA, and SIL Analysis and Evaluation Methods in Ethylene Oxide Storage Tanks

Zhong Xiaofeng (China Construction Installation Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: This study applies three analysis and evaluation methods—Hazard and Operability Analysis (HAZOP), Layer of Protection Analysis (LOPA), and Safety Integrity Level (SIL)—to conduct a comprehensive risk assessment of an ethylene oxide storage system. First, HAZOP analysis is used to identify potential operational issues and hazardous factors in the storage system's process, combined with a risk matrix for risk evaluation, and to propose improvement plans and measures. Second, LOPA analysis is employed to quantitatively assess the existing protection measures, while SIL evaluation is applied to determine whether the current safety instrumented system design is reasonable and effectively controls accident risks. The use of these three analysis and evaluation methods enables a comprehensive assessment of the risks associated with ethylene oxide storage tanks and proposes corresponding safety improvement measures.

Keywords: HAZOP; LOPA; SIL; ethylene oxide

近些年来，随着各级政府和监管部门对安全管理的重视程度不断提升，针对化工安全管理颁布实施多项通知和指导意见，为安全管理活动有效开展提供全方位支持。环氧乙烷是国家重点监管的危险性化学用品，必须要依照相关通知和指导意见，开展危险与可操作性分析（HAZOP），结合自动化控制应用现状，明确关键节点安全完整性等级，通过系统性分析采取针对性处理措施，以此在有效提升储罐安全水平基础上，有效提升企业整体运行安全性。

1 HAZOP 与 LOPA 分析方法简介

1.1 HAZOP 分析方法

HAZOP（Hazard and Operability Study，危险与可操作性分析）是在化工、石化等领域广泛应用的系统性分析方法，重点通过识别工艺系统或操作过程中的潜在危险和可操作性问题，由结构化、多学科团队的深入讨论，结合引导词和工艺参数，精准分析故障因素，并根据评估结果提出改进措施^[1]。HAZOP分析核心要素包括如下几个方面：①引导词，主要是用于激发团队联想偏离正常工况的可能性，如无、过量、减少、

相反、异常等；②工艺参数，也就是所需要分析的物理或操作变量，如流量、温度、压力、液位、组分等；③由引导词与参数组合形成的异常状态，如无流量、温度过高等；④节点，将整体工艺流程划分为若干个独立单元，便于逐段进行分析。

1.2 LOPA 分析方法

LOPA（Layer of Protection Analysis）是一种半定量的风险分析方法，在应用于化工安全风险领域时，重点评估保护措施的有效性，风险的可容忍性，通过识别和验证安全仪表功能，优化资源配置，实现更为有效的安全保障^[2]。在化工产业安全生产管理中，LOPA分析方法的应用，重点关注三个方面：①事故场景的精准确定，确保每个场景都能够描述一个特定的危险事件链，以此作为分析的基础单位。②明确独立保护层，也就是在一个能够在初始事件发生后，能独立阻止不良后果发生的设备、系统或行为。③频率和概率，频率是指初始事件发生的频率，概率则是指每个独立保护层失效，无法执行功能的概率。通过这些方面的深入分析，能够实现对风险可接受水平的评

估,通过加强独立保护层方式,将风险控制在可接受水平内。

LOPA 分析方法的具体应用,需要进行结构化的团队讨论,在前期需要明确所需要分析的工艺单元、后果类型,明确分析重点,由工艺工程师、安全工程师、操作主管等人员组成团队。根据频率-后果矩阵或可容忍风险线,定义风险容忍标准。收集 HAZOP 报告、会议记录、操作规程、设备数据表、以往事故报告等基础资料,明确 LOPA 规则,确保团队成员能够统一对规则的理解。通常情形下,在进行分析时,是基于 HAZOP 分析识别出高风险场景,选择可能导致严重后果或现有保护措施有效性存疑的场景,以初始事件、可能原因、不良后果为形式,清晰选定所定义的场景。检查操作规程、管道及仪表流程图,列出该场景下可能存在的、能够探测或响应初始事件并阻止不良后果的保护措施。评估保护层的有效性,确定初始事件频率,计算后果发生频率,并评估风险水平,根据评估结果提出改进建议。

1.3 SIL 分析方法

SIL (安全完整性等级) 分析方法是在功能安全标准框架下,针对安全仪表功能进行定量评估的方法,其目的在于确定 SIF 是否达到设计所要求的安全完整性等级,以确保将风险控制在可容忍范围内,有效规避安全事故发生所带来的损失^[3]。安全完整性等级的具体评定有多种方式,本研究中提出以 LOPA 分析方法进行确定。

2 环氧乙烷储罐应用实例

2.1 环氧乙烷储罐工艺简介

环氧乙烷自卸车站经卸车泵送至环氧乙烷储罐,并通过出料泵送至车间。环氧乙烷储罐为压力罐,并设有外盘管夹套冷冻水;本文分析的环氧乙烷储罐的尺寸为 3.2m×11.0m,存储体积为 98m³ 的卧式储罐。

2.2 HAZOP 分析方法的应用

将环氧乙烷存储系统划分为 3 个节点来进行分析,选取了“液位”“压力”“温度”“流量”等作为引导词,识别和分析存在的危害。HAZOP 分析结果见表 1。

环氧乙烷储罐主要存在以下 4 个危险点及问题。

①环氧乙烷储罐进料量过多→超过设备容量→进入尾气管线,部分汽化→导致火灾爆炸事故,造成多人伤亡,环境影响,财产损失。②人员操作失误将低温水阀门误关闭→环境温度过高自聚风险→设备超压物料进入环境→遇火源引起火灾爆炸,导致多人伤亡,环境影响,财产损失。③氮气气源压力过高→环氧乙烷储罐压力过高→设备超压,物料进入环境→遇火源引起火灾爆炸,导致多人伤亡,环境影响,财产损失。④液位计故障,出料量过多→环氧乙烷储罐抽空→氮气进入车间反应釜→导致后续设备超压→物料进入环境,遇火源导致火灾爆炸,造成多人伤亡,环境影响,财产损失。

2.3 LOPA 和 SIL 分析方法的应用

将两种方法相结合,明确 SIF 回路最低可靠性需求,分析结果如表 2 所示,以此实现对生产风险的有

表 1 HAZOP 分析工作表 (选取部分)

| 序号 | 偏离 | 原因 | 后果 | 原始风险 | 现有措施 | 现有风险 | 建议项 | 剩余风险 |
|----|----------|-----------------|---|------|---|------|--|------|
| 1 | 储罐进料流量过大 | 人员操作失误,进料量过多 | 进料量过多,可能超过设备容量,进入尾气管线,部分汽化,可能导致火灾爆炸事故,造成多人伤亡,环境影响,财产损失 | 很高 | 储罐设有 DCS 液位高报警,高高联锁关闭进料阀、停卸车泵 尾气设有水喷淋,并设有液位高报警 | 高 | 储罐设置 SIS 联锁液位,液位高高关闭罐根紧急切断阀、停环氧乙烷卸车泵,根据 LOPA 分析确定 SIL 等级 | 中 |
| 2 | 储罐温度过高 | 人员操作失误,低温水阀门误关闭 | 环境温度过高可能自聚风险,设备超压,物料进入环境,遇火源引起火灾爆炸,导致多人伤亡,环境影响,财产损失 | 很高 | 储罐设有 DCS 温度高报警 环氧乙烷储罐设有爆破片+安全阀 | 中 | 储罐设置 SIS 联锁温度,温度高高关闭罐根紧急切断阀、停卸车泵,根据 LOPA 分析确定 SIL 等级 | 中 |
| 3 | 储罐压力过高 | 氮气气源压力过高 | 储罐压力过高,设备超压,物料进入环境,遇火源引起火灾爆炸,导致多人伤亡,环境影响,财产损失 | 很高 | 储罐设有 DCS 压力高报警,压力高打开尾气调节阀; 储罐设有爆破片+安全阀 | 中 | 储罐设置 SIS 联锁压力,压力高高关闭罐根紧急切断阀、打开泄压阀、停卸车泵,根据 LOPA 分析确定 SIL 等级 | 中 |
| 4 | 储罐液位过低 | 液位计故障,出料量过多 | 储罐抽空,氮气进入车间反应釜,可能导致后续设备超压,物料进入环境,遇火源导致火灾爆炸,造成多人伤亡,环境影响,财产损失 | 很高 | 储罐设有 DCS 液位低报警、低低联锁关闭出料阀 储罐设有爆破片+安全阀 | 高 | 储罐设置 SIS 联锁,液位低低关闭罐根紧急切断阀,根据 LOPA 分析确定 SIL 等级 | 中 |

表 2 LOPA 分析工作表 (选取部分)

| 初始事件 | | 风险控制目标 | | 条件修正 | | | | 独立保护层 (IPLs) | | | | | 考虑了全部独立保护层后仍然导致事故后果的可能性 (含现有及新增) | 风险评估 | | |
|------------------|-------|--------|-------|--------|------|---------|----------|--------------|----|-----------------------|-------------------------------|-------|----------------------------------|----------|-----------------------|----------|
| 描述 | 频率 | 后果严重程度 | 可接受频率 | 运营时间修正 | 可燃性 | 操作人员在现场 | 发生死亡的可能性 | 修正后事故频率 | 分类 | 类别 | 描述 | 失效概率 | | 还需要降低的系数 | SIL 评估结论 | SIL 等级要求 |
| 人员操作失误, 低温水阀门误关闭 | 1E-01 | 5 级灾难性 | 1E-06 | 100% | 100% | 16% | 100% | 1.6E-02 | 现有 | 操作人员根据 DCS 报警采取应急响应行动 | 储罐 A 设有 DCS 温度高报警 | 1E-01 | 1.6E-05 | 1.6E+01 | 未满足风险控制目标要求, 需要增加 IPL | SIL-1 |
| | | | | | | | | | 现有 | 安全阀 | 储罐 A 设有爆破片 + 安全阀 | 1E-02 | | | | |
| 氮气气源压力过高 | 1E-01 | 5 级灾难性 | 1E-06 | 100% | 100% | 16% | 100% | 1.6E-02 | 现有 | DCS 控制回路 | 储罐 A 设有 DCS 压力高报警, 压力高打开尾气调节阀 | 1E-01 | 1.6E-05 | 1.6E+01 | 未满足风险控制目标要求, 需要增加 IPL | SIL-1 |
| 液位计故障, 出料量过多 | 1E-01 | 5 级灾难性 | 1E-06 | 100% | 100% | 16% | 100% | 1.6E-02 | 现有 | DCS 控制回路 | 反应釜设有 DCS 压力高报警关闭进料阀 | 1E-01 | 1.6E-05 | 1.6E+01 | 未满足风险控制目标要求, 需要增加 IPL | SIL-1 |

效控制。

3 结论

基于 HAZOP 方法系统分析环氧乙烷存储系统运行情况, 能够精准识别所存在的安全隐患, 并更加全面深入的把握潜在风险和管控措施, 确保生产管理人员能够系统性掌握安全运行现状^[4]。结合分析过程中发现的安全隐患及安全管理等方面问题, 有针对性采取安全处理措施, 能够有效提升环氧乙烷储罐操作安全性, 消除安全隐患可能带来的事故及损失, 以此为化工企业安全管理工作开展提供坚实支撑。

在安全隐患分析中, 重点针对安全仪表功能回路进行初始事件、后果及现有保护措施等, 进行深层次的 LOPA 分析, 利用定性分析与定量分析相结合方式, 精准确定环氧乙烷储罐运行温度、压力、液位连锁控制回路等各个方面的安全完整性等级 (SIL), 能够为改进优化安全管理方式提供精准参考^[5]。在安全管理工作中, 从环氧乙烷储罐发生泄漏所造成后果的严重性及危害程度出发, 建议将环氧乙烷储罐运行中相关安全功能设置转为 SIS 系统, 与现有 DCS 控制系统独立运行, 以此实现风险致因及作用路径的有效隔离。同时适应新型管理模式运行特征, 还需要编制完善的安全要求规格书, 完善功能安全体系, 以确保安全仪表系统能够在全生命周期内保持良好运行状态。

环氧乙烷储罐安全管理是化工企业生产运营安全管理体系的重点内容, 本研究中提出的 HAZOP 定性

分析和 LOPA 半定量分析相结合的评估模式, 能够全面、精准分析设备实际运行中潜在的危险因素和危险源, 并提出相应的保护措施。结合 SIL 评估, 全面把握安全仪表系统运行状态, 能够更为有效的提升储罐区风险防控能力, 为安全风险管理和隐患排查提供有效支持。对化工企业安全生产管理人员而言, 必须切实转变传统理念, 以精细化理念为指引, 全面加强风险分析和安全评估的重视程度, 提前采取针对性处理措施, 将安全隐患控制在萌芽状态, 以此为安全生产提供坚实保障。

参考文献:

[1] 王东浩 .HAZOP、LOPA 和 SIL 评价方法在无水三氯化铝生产装置的应用 [J]. 氯碱工业, 2023, 59(7): 32-38.

[2] 王伟, 刘文远, 高燕军 .HAZOP 评价方法在液氯充装中的应用 [J]. 氯碱工业, 2020, 56(11): 43-45.

[3] 李宏, 张建平, 赵静 .HAZOP-LOPA-SIL 集成分析技术在加氢装置中的应用研究 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1782-1789.

[4] 陈刚, 王明哲 . 基于 HAZOP 与 LOPA 的 SIL 定级在丙烯腈装置安全仪表系统设计中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(3): 265-269.

[5] 刘华, 周涛, 杨晓林 .HAZOP 与 LOPA 联合分析在液化烃储罐区风险控制中的应用 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 171-176.