

# HAZOP与风险矩阵结合技术在氧储存系统中的应用

董锁堂<sup>1</sup>, 张琦<sup>2</sup>, 郭化生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>青岛特殊钢铁有限公司安全管理部, 山东 青岛

<sup>2</sup>青岛特殊钢铁有限公司炼钢事业部, 山东 青岛

<sup>3</sup>空气化工产品(中国)投资有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2025年5月9日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月6日

## 摘要

为系统识别氧储存系统运行过程中潜在风险及其严重程度, 提出了HAZOP + 风险矩阵相结合的分析方法。HAZOP是一种定性分析方法, 能够有效发现工艺设计或生产过程中存在的问题, 风险矩阵是一种半定量分析方法用于评定风险等级, 从而指导企业根据风险等级采取针对性改进措施。研究表明, 液氧储槽的液位过高、温度过高以及压力过高或过低是导致液氧泄漏的主要风险点。针对这些风险, 本文提出了设置液位高高联锁、温度低低联锁、压力自动控制等改进措施, 并确认了液氧储槽的弱项设计在压力低时能保护储槽不发生吸瘪后果。

## 关键词

HAZOP, 风险矩阵, 氧储存系统, 液氧储罐, 潜在风险, 风险等级

# Application of HAZOP and Risk Matrix Combination Technology in Oxygen Storage System

Suotang Dong<sup>1</sup>, Qi Zhang<sup>2</sup>, Huasheng Guo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Safety Management Department, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Steelmaking Division, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Air Products and Chemicals (China) Investment Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: May 9<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2025; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To identify the potential risks and their severity during the operation of the oxygen storage system, an integrated analysis method combining HAZOP (Hazard and Operability Study) and risk matrix is proposed. HAZOP is a qualitative analysis method that can effectively identify issues in process design or production. The risk matrix is a semi-quantitative analysis method used to assess risk levels, thereby guiding enterprises to take targeted improvement measures based on the risk levels. The research results indicate that high liquid levels, high temperature, and excessively high or low pressure in the liquid oxygen storage tank are the main risk points leading to liquid oxygen leakage. In response to these risks, this paper proposes improvement measures such as high-high level interlock, low-low temperature interlock, and automatic pressure control. It also confirms that the weak roof design of the liquid oxygen storage tank can protect the tank from being sucked in when the pressure is low.

## Keywords

HAZOP, Risk Matrix, Oxygen Storage System, Liquid Oxygen Storage Tank, Potential Risks, Risk Level

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

氧储存系统是工业生产、医疗供氧及航空航天等领域的关键设施，其安全性直接关系到人员生命健康和重大财产保障。液氧(LOX)因其高密度和易储存特性被广泛应用，但其强氧化性、低温特性及相态变化带来的潜在风险不容忽视。我国近年来随着空分装置的大型化和高压化发展，氧储存系统的安全管控面临更高挑战。2019年河南省三门峡市河南能源化工集团义马气化厂发生液氧贮槽破裂事故，液氧泄漏引发爆炸，该事故造成15人死亡、15人重伤。然而，传统风险评估方法在系统性偏差识别与风险等级量化方面存在局限性，亟需探索综合分析方法以提升风险管控的科学性[1]。

危险与可操作性分析(Hazard and Operability Study, HAZOP)作为一种系统化的定性工艺危害分析工具，能够识别并评估工艺设计和操作中的潜在危险与可操作性问题。其核心在于“引导词”的使用，如“多”“少”“无”“反”“其他”等，分析团队使用引导词从不同角度思考可能发生的偏差[2]。HAZOP分析通常以表格形式呈现，包含偏离描述、原因分析、潜在后果、现有安全措施及建议措施等关键信息。这一方法不仅有助于发现设计缺陷，还能优化操作流程，提升工艺生产过程的安全性和可操作性。由英国帝国化学工业集团于20世纪60年代提出，其通过“引导词-偏差-后果-防护”的逻辑框架，广泛应用于化工、能源等领域的风险评估[3]。如，屈姣等(2024)结合HAZOP与ALPHA模型，量化了氯乙烯罐体泄漏的影响范围[4]；潘炜等(2024)通过SDG-HAZOP方法，识别新型火炸药精制工序风险[5]；赵鸿博等(2024)通过HAZOP-LOPA集成方法，识别出氨制冷系统的关键工艺风险[6]。然而，传统HAZOP分析高度依赖专家经验，对风险等级的量化分级缺乏统一标准，可能导致风险排序主观性强、改进措施优先级模糊等问题。陈凯伟等(2024)在乙炔发生器风险评估中也指出，HAZOP的定性特征难以直接量化风险发生的可能性与严重程度[7]，这一局限在氧储存系统多相态转换、弱项结构失效等复杂场景中尤为突出。

为弥补上述缺陷，风险矩阵(Risk Matrix)作为半定量工具被引入工业安全领域。该方法由美国空军

电子系统中心于 1995 年提出,通过构建可能性(Likelihood)与后果严重度(Severity)的二维矩阵,将风险划分为“可接受”“需缓解”或“不可接受”等级[8]。近年来,风险矩阵法在多领域广泛应用,如在基础设施领域方面,李兰娟等结合层次分析法(AHP)与风险矩阵法,构建城镇供水管道三级风险评估体系,量化管材老化、压力波动等风险指标,提出基于服役年限的管道初筛策略,为分级管控提供科学依据[9];贺肖等针对压力管道改良传统风险矩阵,通过强化后果严重性权重构建分级管控模型,验证了该方法对复杂系统风险动态评估的适配性[10];在交通与能源领域,胡园园等提出公路收费项目社会稳定风险综合指数法,通过风险矩阵量化地方债务、交通影响等非技术性风险,结合等效折算死亡人数优化后果评估模型[11];吕明利等在电力作业中构建风险评估指标体系,利用风险矩阵量化触电、设备故障等风险等级,提出针对性优化措施[12]。化工高危企业方面,颜陈光在丁二烯罐区设计中融合 HAZOP 分析与风险矩阵,通过定性偏差识别与半定量等级判定优化工艺设计,验证了该方法对多参数耦合风险的系统管控能力。研究表明,HAZOP 与风险矩阵的集成应用可显著提升风险分析的全面性与决策效率。HAZOP 的定性偏差识别与风险矩阵的半定量评估具有互补性,前者系统梳理工艺潜在偏差,后者则为风险分级提供量化依据[13]。赵谦和徐建东将风险矩阵和 HAZOP 分析结合用于蓄热式热氧化炉的风险评估,半定量结果结果为安全控制与企业管理提供了理论基础[14]。蒋武等基于 HAZOP 与风险矩阵方法,进行了煤气柜系统的安全评价,风险集中在活塞升降速度异常、倾斜及油位低等导致的煤气泄漏,并提出改进措施[15]。

基于上述研究,本文将风险矩阵这一半定量分析工具引入到 HAZOP 分析过程,形成了一种更为全面的、深入的风险评估方法。针对上述问题,提出 HAZOP 与风险矩阵的协同分析方法,通过建立包含温度、压力、液位等核心参数的 HAZOP 分析节点,结合风险矩阵等级划分,重点突破传统方法在氧储存分析中的技术瓶颈。这种结合应用的优势在于,它能够帮助企业更加清晰地认识到工艺过程中潜藏的各类风险,包括那些可能因 HAZOP 分析中的定性描述而被忽视或低估的风险。基于这一全面、深入的风险认知,企业可以更加精准地制定风险管控措施,优化资源配置,从而提高生产装置的安全性和可靠性。因此,在 HAZOP 分析的基础上引入风险矩阵,能够使企业在复杂多变的工业环境中,更加稳健地应对各种潜在风险,确保安全生产活动的平稳运行。

## 2. HAZOP + 风险评估

首先利用 HAZOP 方法识别出工艺过程中可能偏离正常操作条件的各种情景,对应的可能后果。随后,通过引入风险矩阵,根据事故后果的严重等级和事故发生频率对 HAZOP 分析的结果进行研判。风险矩阵通过构建一个二维空间,将事故后果的严重性和发生频率分别作为横轴和纵轴,来划分风险等级,实现风险的量化评估[16]。在这一框架下,每一个由 HAZOP 分析识别出的风险点都会被赋予一个具体的风险等级。这一等级隐含了风险的严重程度及发生的可能性,从而为企业管理者提供了更为清晰、直观的风险认知。

## 3. 风险矩阵制定

不同国家、不同行业所采取的风险矩阵不尽相同,常见的风险矩阵通常将事故发生的概率及后果划分为 3~6 级,国际采用 5 \* 5 矩阵,中石化应用的 7 \* 8 矩阵等,本文根据冶金行业的特点及国家相关制度适用于 5 \* 7 风险矩阵,具体见表 1。该风险矩阵根据曾经发生过的事故频率将可能性划分为 7 个等级,具体见表 2。根据事故造成的人员伤害、财产损失、环境破坏 3 个方面将事故严重程度划分为 5 个等级,具体见表 3。

风险等级的划分标准:

风险指数(R)通过列、行相乘,即风险指数(R) = 可能性(L) \* 严重度(S),依据风险指数 R 的评分分值,将其划分为多个等级。分值 1~9 为低风险,10~18 为中风险,19~25 为高风险,26~35 为很高风险。

**Table 1.** Risk matrix table

**表 1.** 风险矩阵表

5	低	中	中	高	高	很高	很高
4	低	低	中	中	高	高	很高
3	低	低	低	中	中	中	高
2	低	低	低	低	中	中	中
1	低	低	低	低	低	低	中
	1	2	3	4	5	6	7

**Table 2.** Grade of possibility rules

**表 2.** 可能性分级规则

可能性(L)分级	定性描述	定量描述
		发生的频率F(次/年)
1	世界范围内未发生过	$F \leq 10^{-6}$
2	世界范围内发生过/本行业未发生过	$10^{-5} > F \geq 10^{-6}$
3	世界范围内发生多次/本行业发生过	$10^{-4} > F \geq 10^{-5}$
4	系统内发生过/本行业发生多次	$10^{-3} > F \geq 10^{-4}$
5	系统内发生多次/本企业发生过	$10^{-2} > F \geq 10^{-3}$
6	作业场发生过/本企业发生多次	$10^{-1} > F \geq 10^{-2}$
7	在设备设施中经常发生(至少每年发生)	$1 \geq F \geq 10^{-1}$

**Table 3.** Graded severity rules

**表 3.** 严重性分级规则

严重度(S)分级	人员	财产	环境
1	医疗处理,不需住院;短时间身体不适	一次造成直接经济损失人民币不足 50 万元	事故影响仅限于生产区域内,没有对周边环境造成影响
2	工作受限;轻伤	一次造成直接经济损失人民币 50 万元以上、200 万元以下	因事故造成周边环境轻微污染,没有引起群体性事件
3	严重伤害;职业相关疾病	一次造成直接经济损失人民币 200 万元以上、500 万元以下	因事故造成跨县级行政区域纠纷,引起一般群体性影响
4	1~2 人死亡或丧失劳动能力;3~9 人重伤	一次造成直接经济损失人民币 500 万元以上、1000 万元以下	因事故造成跨地级行政区域纠纷,使得当地经济、社会活动受到影响
5	3 人以上死亡;10 人以上重伤	一次造成直接经济损失人民币 1000 万元以上	事故使得区域生态功能部分丧失或濒危物种生存环境受到污染

#### 4. 氧储存系统的 HAZOP + 风险矩阵分析应用

本文以某钢厂氧储存系统为分析实例,详细介绍整个分析步骤和结果,如图 1 所示。

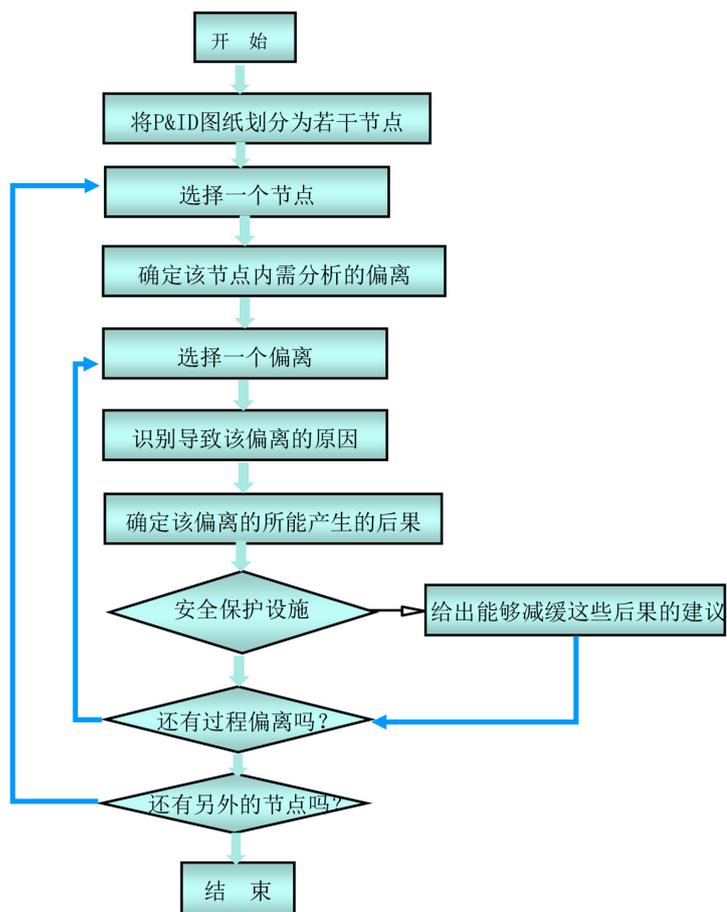


Figure 1. HAZOP analysis process

图 1. HAZOP 分析流程

#### 4.1. 工艺流程描述

精馏塔产生的氧气部分进入氧气管网，部分液化储存在液氧储槽，氧系统设置 2 座 4100 m<sup>3</sup> 精馏塔，1 座 2250 m<sup>3</sup> 液氧储槽，2 座 1500 m<sup>3</sup> 球罐。

#### 4.2. 分析前准备

HAZOP 分析的前期筹备涵盖了明确分析目标与分析范畴、搜集详尽的分析资料以及组建专业分析小组三大核心环节。具体而言，分析对象与范围被精确界定为包含 1 座 2250 m<sup>3</sup> 液氧储槽、2 座 1500 m<sup>3</sup> 氧气球罐及其配套辅助设施在内的整个工艺系统。为确保分析的准确性和全面性，前期广泛搜集了包括管道与仪表流程图(P&ID)、设备及管道规格数据总览、联锁逻辑因果关系图等一系列关键技术文档，这些资料为深入理解工艺流程、识别潜在风险点提供了坚实的基础。此外，评价小组的构建由来自安全工程、设备管理、仪表控制、工艺流程等多个领域的专家组成，确保了 HAZOP 分析的深度与广度。

#### 4.3. 分析过程

本文将氧储存系统作为一个节点，分析主要工艺参数流量、温度、压力等产生偏差的原因和偏差造成的影响及后果，利用风险矩阵评定风险等级，结合已有安全措施，分析剩余风险，并提出针对性的措施建议，分析结果见表 4。

**Table 4.** HAZOP analysis of oxygen storage tank system**表 4.** 氧储罐储存系统 HAZOP 分析

节点名称		氧储存系统								
节点描述		氧储存系统, 包括液氧储槽 T611, 液氧泵, 氧气球罐 A/B, 液氧管线								
设计意图		接收精馏塔产生的液氧, 在低温-182℃, 压力 0.27 Bar 的条件下储存, 通过液氧泵输出气化, 氧气进入球罐中, 作为缓冲, 供给炼铁高炉和炼钢转炉使用。								
序号	偏离	原因	后果	L	S	R	安全措施	R1	建议措施	R2
1	液氧储槽 T611 的液位过高	液氧储槽进口流量大于出口流量	液氧储槽 T611 的压力过高, 液氧储槽内罐超压破裂, 液氧泄漏到外罐, 液氧大量气化, 造成液氧储槽外罐破裂, 氧泄漏到环境中, 存在火灾爆炸升级事故	6	4	高	1. 设置液氧储槽液位监测及报警; 2. 液氧储槽设有安全阀 PSV6101A/6101B; 3. 液氧储槽设有爆破片 PSE6102	中	设置液氧储槽液位高高联锁 LIAS6310/6311 切断液氧储槽进口阀 V11	低
2	液氧储槽 T611 的温度过高	环境温度高/外层保温失效	液氧储槽 T611 的压力过高, 液氧储槽内罐超压破裂, 液氧泄漏到外罐, 液氧大量气化, 造成液氧储槽外罐破裂, 氧泄漏到环境中, 存在火灾爆炸升级事故	6	4	高	1. 设置液氧储槽 T611 溢出管出口温度监测及报警; 2. 液氧储槽设有安全阀 PSV6101A/6101B; 3. 液氧储槽设有爆破片 PSE6102	中	设置液氧储槽 T611 溢出管出口温度低低联锁 TALL6009 切断液氧储槽进口阀 V11	低
3	液氧储槽 T611 的压力过高	精馏塔液位控制回路阀故障, 导致进液氧储槽阀门 LV21 开大, 液氧储槽 T611 的进料流量过大, 液氧储槽 T611 的液位过高	液氧储槽内罐超压破裂, 液氧泄漏到外罐, 液氧大量气化, 造成液氧储槽外罐破裂, 氧泄漏到环境中, 存在火灾爆炸升级事故	6	4	高	1. 设置液氧储槽设有压力监测及报警; 2. 液氧储槽设有安全阀 PSV6101A/6101B; 3. 液氧储槽设有爆破片 PSE6102	中	设置液氧储槽压力自动控制 PIC6202	低
4	液氧储槽 T611 的压力过低	精馏塔液位控制回路阀故障, 导致进液氧储槽阀门 LV21 开大, 液氧储槽 T611 的出料流量过大	液氧储槽吸瘪损坏, 氧泄漏到环境中, 存在火灾爆炸升级事故	6	4	高	1. 液氧储槽设有吸入安全阀 PSV6101A/6101B	中	确认液氧储槽为弱顶设计, 压力低时罐顶会破坏, 保护储槽不发生吸瘪后果	低

注: R 为风险指数、L 为事故发生可能性、S 为事故发生严重度。

分析结果:

在采取已有的安全措施下, 剩余等级为中风险, 应按照“ALARP”原则, 尽可能采取措施降低风险, 直至我们所能接受的低风险。针对液氧储槽 T611 的液位过高, 建议设置液氧储槽 T611 液位高高联锁 LIAS6310/6311 切断液氧储槽进口阀 V11; 液氧储槽 T611 的温度过高, 建议设置液氧储槽 T611 溢出管

出口温度低低联锁 TALL6009 切断液氧储槽进口阀 V11；液氧储槽 T611 的压力过高，建议设置液氧储槽设有压力自动控制 PIC6202；液氧储槽 T611 的压力过低，建议液氧储槽为弱项设计，压力低时罐顶会破坏，保护储槽不发生吸瘪后果等措施进一步降低风险。

## 5. 结论

本文在 HAZOP 定性分析的基础上引入风险矩阵这一半定量分析工具，对氧储存系统进行全面性系统性的工艺危害分析，总结分析得出以下结论：

(1) 针对液氧储槽 T611 的液位过高，建议设置液氧储槽 T611 液位高高联锁 LIAS6310/6311 切断液氧储槽进口阀 V11。

(2) 液氧储槽 T611 的温度过高，建议设置液氧储槽 T611 溢出管出口温度低低联锁 TALL6009 切断液氧储槽进口阀 V11。

(3) 液氧储槽 T611 的压力过高，建议设置液氧储槽设有压力自动控制 PIC6202。

(4) 液氧储槽 T611 的压力过低，建议液氧储槽为弱项设计，压力低时罐顶会破坏，保护储槽不发生吸瘪后果能有效防范重大事故发生。

HAZOP+ 风险矩阵分析方法能够系统全面地对氧储存系统进行风险分析，评定风险等级，并结合可接受程度，指导企业采取针对性的改进措施。

## 参考文献

- [1] 王志雄, 刘勇. HAZOP 分析技术在化工工艺安全管理中应用研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(6): 160-162.
- [2] 中国化学品安全协会. 危险与可操作性分析(HAZOP)应用指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 28-41.
- [3] Fuentes-Bargues, J.L., González-Gaya, C., González-Cruz, M.C. and Cabrelles-Ramírez, V. (2016) Risk Assessment of a Compound Feed Process Based on HAZOP Analysis and Linguistic Terms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.08.019>
- [4] 屈姣, 赵华丽, 罗振敏, 等. 基于 HAZOP 和 ALOHA 的氯乙烯罐体泄漏风险及影响范围的研究[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(10): 43-48.
- [5] 潘炜, 董国强, 赵江平, 等. 基于 SDG-HAZOP 方法的新型火炸药精制工序风险分析[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(8): 71-76.
- [6] 赵鸿博, 徐晓虎, 孔方, 等. 基于 HAZOP-LOPA 的氨制冷系统设备与工艺风险分析[J]. 安全, 2024, 45(8): 14-20.
- [7] 陈凯伟, 孙苏帆. HAZOP 分析方法在密闭式低压乙炔发生器上的应用[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(7): 8-11.
- [8] Dunj6, J., Fthenakis, V., V6lchez, J.A. and Arnaldos, J. (2010) Hazard and Operability (HAZOP) Analysis. A Literature Review. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
- [9] 李兰娟, 孟珊. 基于层次分析法和风险矩阵法的城镇供水管道安全风险评估[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 52-59.
- [10] 贺肖, 王恋. 基于改良风险矩阵法的压力管道安全风险分级管控研究[J]. 化工管理, 2025(2): 100-104.
- [11] 胡园园, 等. 基于风险矩阵的一级公路收费项目社会稳定风险评估[J]. 公路与汽运, 2025, 41(2): 128-134.
- [12] 吕明利, 等. 基于风险矩阵的电力作业风险量化评估与优化[J]. 智慧中国, 2025(3): 88-89.
- [13] 颜陈光. HAZOP 分析和风险矩阵在丁二烯罐区设计的分析应用[J]. 安全、健康和环境, 2024, 24(3): 16-20.
- [14] 赵谦, 徐建东. HAZOP 与风险矩阵结合半定量分析方法在 RTO 安全控制中的应用[J]. 山东化工, 2024, 53(5): 212-217.
- [15] 蒋武, 杨俊涛, 黄梓文, 等. HAZOP 与风险矩阵结合的安全分析在煤气柜系统中的应用[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(7): 37-40.
- [16] 韦其晋, 张淼, 袁朝新, 等. HAZOP 与风险矩阵结合的半定量安全分析在冶金熔炼炉中的应用[J]. 湖南有色金属, 2018, 34(5): 64-67+80.