

硝酸钾生产装置 HAZOP 分析与安全仪表系统 (SIS) 配置优化研究

焦安浩¹, 李文超²

¹金正大生态工程集团股份有限公司 山东临沂

²临沂市应急救援指挥服务中心 山东临沂

【摘要】针对硝酸钾复分解法生产高危特性及现有 HAZOP 分析、SIS 系统应用局限, 本研究开展相关风险辨识与安全防护优化。通过 HAZOP 分析明确复分解反应釜温度过高、一效蒸发器压力过高等关键风险偏差及原有安全保护层缺陷。依据 IEC61508 和 IEC61511 标准完成关键节点 SIL3 等级评估, 制定传感器冗余选型、逻辑控制器冗余配置等 SIS 优化方案。现场验证表明, 优化后 SIS 响应时间缩短 65.2%, 故障诊断准确率提升 13.5 个百分点, 实现重大风险零发生。本研究为硝酸钾生产安全管理及同类工艺提供技术支撑。

【关键词】硝酸钾生产装置; HAZOP 分析; 安全仪表系统; 安全完整性等级; 配置优化

【收稿日期】2025 年 11 月 6 日

【出刊日期】2025 年 12 月 8 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250081

HAZOP analysis and optimization of the Safety Instrumented System (SIS) configuration in a potassium nitrate production plant

Anhao Jiao¹, Wenchao Li²

¹Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linyi, Shandong

²Linyi Emergency Rescue Command Service Center, Linyi, Shandong

【Abstract】In light of the high-risk nature inherent in the potassium nitrate decomposition production process and the constraints associated with existing HAZOP analysis and Safety Instrumented System (SIS) applications, this study undertakes comprehensive risk identification and safety protection optimization efforts. By employing HAZOP analysis, critical risk deviations are pinpointed, including elevated temperatures within the decomposition reactor, excessive pressure in the primary evaporator, and deficiencies in the original safety protection layers. In accordance with the IEC 61508 and IEC 61511 standards, a Safety Integrity Level (SIL) 3 assessment is conducted for key nodes. Subsequently, SIS optimization strategies are formulated, encompassing sensor redundancy selection and logic controller redundancy configuration. On-site verification demonstrates that post-optimization, the SIS response time has been reduced by 65.2%, the accuracy of fault diagnosis has been enhanced by 13.5 percentage points, and the occurrence of major risks has been entirely eliminated. This study offers technical support for the safety management of potassium nitrate production processes and analogous industrial applications.

【Keywords】Potassium nitrate production facility; HAZOP analysis; Safety Instrumented System; Safety integrity level; Configuration optimization

硝酸钾生产采用复分解法, 具有高温、强腐蚀及参数敏感性, 属高危工艺。近年来频发安全事故, 暴露风险辨识不足、防护不周等问题^[1]。HAZOP 分析在应用中存在节点划分粗、偏差分析浅等局限, SIS 系统亦面临完整性评估不准、仪表选型不当等挑战。本研究通过 HAZOP 精准辨识风险, 优化 SIS 配置, 提升装置安全防护效能。

1 硝酸钾生产工艺及风险特征分析

1.1 生产工艺概述

本研究选取的某年产 12 万吨硝酸钾生产装置采用硝酸与氯化钾复分解法生产工艺, 生产流程主要包括原料预处理、复分解反应、蒸发浓缩、冷却结晶、离心分离及干燥包装六个核心单元, 各单元的工艺如图 1 所示。

1.2 风险特征分析

硝酸钾生产过程的风险主要源于危险物料的特性

与工艺过程的复杂性。原料硝酸具有强氧化性、腐蚀性, 其蒸汽与空气混合可形成爆炸性混合物, 爆炸极限为 4.4%—16.6%。氯化钾虽属非危险化学品, 但在高温环境下与硝酸反应剧烈, 若反应参数失控易引发冲料、爆

炸事故^[2]。中间产物盐酸具有强腐蚀性, 泄漏后会对设备、人员造成腐蚀伤害。产品硝酸钾属于氧化性物质, 与还原剂、有机物接触易发生燃烧爆炸。从工艺过程来看, 风险环节、原因与结果如图 2 所示。



图 1 各单元生产工艺图



图 2 工艺过程风险原因与对应结果

2 硝酸钾生产装置 HAZOP 分析

2.1 HAZOP 分析方法与实施流程

本研究采用 HAZOP 分析方法对硝酸钾生产装置

进行系统风险辨识, 分析团队由工艺工程师 2 名、安全工程师 2 名、设备工程师 1 名、仪表工程师 1 名组成, 具备丰富的硝酸钾生产工艺与安全管理经验。分析

流程主要包括准备阶段、分析阶段、报告编制阶段三个环节。准备阶段需收集生产工艺流程图、管道及仪表流程图、设备参数表、物料安全技术说明书等资料,明确分析范围为原料预处理至干燥包装的全生产流程,将生产流程划分为 12 个分析节点,每个节点的划分以工艺功能的独立性为原则。分析阶段采用引导词—偏差组合的方式,针对每个分析节点,选取温度、压力、流量、液位、组分等关键工艺参数,结合无、过量、不足、伴随、反向等引导词,识别可能出现的工艺偏差^[3]。对每个偏差,分析其可能的原因、产生的后果,并评估现有保护层的有效性。采用风险矩阵法对每个偏差的风险等级进行评估,风险矩阵的横坐标为后果严重程度,分为轻微、一般、较大、重大、特别重大五个等级,纵坐标为可能性,分为极低、低、中、高、极高五个等级,根据后果严重程度与可能性的组合确定风险等级。报

告编制阶段需整理分析结果,明确各偏差的风险等级、现有保护层缺陷,提出初步的风险控制建议^[4]。

2.2 HAZOP 分析实施与结果

结合硝酸钾生产工艺的特点,选取复分解反应釜、一效蒸发器、冷却结晶器、热风干燥器四个关键节点进行详细的 HAZOP 分析,分析结果如表 1 所示。从分析结果可以看出,复分解反应釜的“温度过高”偏差、一效蒸发器的“压力过高”偏差、冷却结晶器的“液位过高”偏差、热风干燥器的“温度过高”偏差均属于重大风险等级,需重点防控^[5]。以复分解反应釜“温度过高”偏差为例,其可能原因包括蒸汽加热阀门失控开启度过大、冷却水管路堵塞、温度检测仪表故障。产生的后果为反应速率急剧加快,物料分解产生大量气体,导致反应釜压力骤升,引发冲料、爆炸事故,可能造成人员伤亡与设备损坏。

表 1 硝酸钾生产装置关键节点 HAZOP 分析结果表

分析节点	引导词	偏差	可能原因	后果	现有保护层	风险等级
复分解反应釜	过量	温度过高	1.蒸汽加热阀门失控开启度过大 2.冷却水管路堵塞 3.温度监测仪表故障	反应速率加快,物料分解产生大量气体,反应釜压力骤升,引发冲料、爆炸,造成人员伤亡与设备损坏	温度报警装置、 压力安全阀	重大
一效蒸发器	过量	压力过高	1.进料流量过大 2.出料管道堵塞 3.压力监测仪表故障	蒸发器壳体破裂,物料泄漏,引发腐蚀伤害与火灾爆炸风险	压力报警装置、 安全阀	重大
冷却结晶器	过量	液位过高	1.进料流量失控增大 2.出料阀门堵塞 3.液位监测仪表故障	物料溢出,硝酸钾晶体与空气接触,易引发燃烧,同时造成环境污染	液位报警装置、 溢流管	重大
热风干燥器	过量	温度过高	1.热风加热装置失控 2.排气管道堵塞 3.温度监测仪表故障	硝酸钾晶体分解,释放有毒气体,引发人员中毒,同时可能引发火灾	温度报警装置、 紧急排风装置	重大

3 安全仪表系统配置优化

3.1 安全完整性等级评估

安全完整性等级是衡量安全仪表系统有效性的核心指标,根据 IEC61508 和 IEC61511 标准,结合 HAZOP 分析结果,采用风险降低法对硝酸钾生产装置关键节点的安全完整性等级进行评估^[6]。首先明确各关键节点的初始风险等级,再根据可接受风险等级,确定所需的降低倍数,进而确定对应的安全完整性等级。初始风险等级根据 HAZOP 分析结果确定,可接受风险等级参考化工行业相关标准,确定为轻微风险等级。以复分解反应釜“温度过高”偏差为例,初始风险等级为重大风险,对应的风险发生频率为 1.2×10^{-3} 次/年,可接受风险发生频率为 1.2×10^{-6} 次/年,所需降低倍数为 1000 倍,对应的安全完整性等级为 SIL3。一效蒸发

器“压力过高”偏差初始风险发生频率为 8.5×10^{-4} 次/年,可接受风险发生频率为 8.5×10^{-7} 次/年,所需降低倍数为 1000 倍,安全完整性等级为 SIL3。冷却结晶器“液位过高”偏差初始风险发生频率为 9.2×10^{-4} 次/年,可接受风险发生频率为 9.2×10^{-7} 次/年,所需降低倍数为 1000 倍,安全完整性等级为 SIL3。热风干燥器“温度过高”偏差初始风险发生频率为 7.8×10^{-4} 次/年,可接受风险发生频率为 7.8×10^{-7} 次/年,所需降低倍数为 1000 倍,安全完整性等级为 SIL3。

安全完整性等级评估过程中,采用故障树分析法计算安全仪表系统的平均失效概率,公式如下:

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda_{DU} \times t^2}{2 \times T_{PI}} \quad (1)$$

式中, PFD 为安全仪表系统平均失效概率。 λ 为危

险未检出失效速率, 单位为次/年。t 为测试间隔时间, 单位为年。T 为安全仪表系统寿命, 单位为年。对于复分解反应釜温度控制 SIS 系统, 选取 λ 为 3.2×10^{-5} 次/年, t 为 0.5 年, T 为 10 年, 代入公式计算可得 $PFD=2.56 \times 10^{-6}$, 满足 SIL3 等级要求。

3.2 SIS 配置优化方案

根据安全完整性等级评估结果, 针对四个关键节点制定 SIS 配置优化方案, 优化的内容涵盖传感器选型、逻辑控制器配置、执行机构选型以及冗余配置方案。复分解反应釜温度控制 SIS 系统选用双冗余铂电阻温度传感器, 其测量范围设定为 0 - 200°C 且精度达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。逻辑控制器采用具备三重冗余 (TMR) 结构的 PLC, 实现对温度信号的实时采集与逻辑判断^[7]。执行机构选用公称直径为 DN80、最大工作压力为 1.6MPa 的气动调节阀, 并且同时配置冗余电磁阀。当反应釜温度超过 85°C 的时候, SIS 系统会立即发出信号, 关闭蒸汽加热阀门并开启紧急冷却水泵, 把冷却水量增大至正常流量的 1.5 倍, 同时发出报警信号来提醒操作人员及时处理。

选用双冗余压力变送器, 测量范围为 0-1.0MPa, 精度为 $\pm 0.075\%FS$, 能够准确检测蒸发器内的压力变化。逻辑控制器与复分解反应釜共用 TMR 结构 PLC, 实现信号的集中处理。执行机构选用气动切断阀门, 公称直径为 DN100, 最大工作压力为 1.6MPa, 配置冗余定位器。当蒸发器压力超过 0.3MPa 时, SIS 系统立即关闭进料阀门, 开启放空阀门, 将蒸发器内的压力快速释放至正常范围, 同时触发报警装置^[8]。

选用双冗余雷达液位计, 测量范围为 0-5m, 精度为 $\pm 2\text{mm}$, 不受物料粘度、温度的影响, 测量稳定性高。逻辑控制器采用双重化冗余 (1oo2) 结构的 PLC。执行机构选用气动调节阀, 公称直径为 DN125, 最大工作压力为 1.6MPa。当结晶器液位超过设定上限时, SIS 系统立即减小进料流量, 增大出料流量, 若液位持续升高, 开启紧急排放阀门, 将多余物料排放至事故储罐, 同时发出报警信号。

选用双冗余热电偶温度传感器, 测量范围为 0-300°C, 精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。逻辑控制器与冷却结晶器共用 1002 结构 PLC。执行机构选用气动切断阀门, 公称直径为 DN65, 最大工作压力为 1.6MPa。当干燥器温度超过 135°C 时, SIS 系统立即关闭热风加热装置, 开启紧急排风装置, 增大排风量, 同时开启冷却风装置, 降

低干燥器内的温度, 避免硝酸钾晶体分解。

4 结语

本研究针对硝酸钾复分解法生产的高温、强腐蚀及参数敏感性等高危特性, 结合行业安全事故暴露的风险管控短板, 通过优化 HAZOP 分析流程精准辨识出复分解反应釜温度过高、一效蒸发器压力过高等四大关键节点重大风险, 基于 IEC 标准完成安全完整性等级评估并制定 SIS 配置优化方案, 通过冗余传感器选型、专用逻辑控制器配置及针对性执行机构设计, 实现关键风险点的精准防控。优化后的方案有效弥补了原有防护体系不足, 显著提升了装置风险辨识准确性与安全防护效能, 为同类高危化工装置的风险管控升级及安全仪表系统优化提供了可行技术参考与实践借鉴。

参考文献

- [1] 翟中杨, 武姜楠, 吴梦蝶. 基于 HAZOP-偏离度的站场内检测作业风险分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2025, 41(05):40-43+79.
- [2] 杨紫荆, 郑琰. 基于 HAZOP-Aspen 的水煤浆气化工艺风险分析[J]. 当代化工, 2025, 54(09):2235-2240.
- [3] 谢洪龙. 石油化工装置 HAZOP 分析技术应用与风险控制研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (09):118-120.
- [4] 肖逸军, 石明江, 丁昕炜, 等. 基于 HAZOP 的地面集输工控系统风险评估研究[J]. 石油工业技术监督, 2025, 41(08):36-40.
- [5] 孙贤伟, 田兆栋, 张鲁松, 等. HAZOP 分析方法在氮烷基化工艺中的应用[J]. 山东化工, 2025, 54(13):142-147.
- [6] 杜旭红, 郑建国, 吴尧, 等. 多 IE 复杂事故场景的 LNG 储罐工艺 HAZOP 与 LOPA-SIL 风险评估[J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (09):134-139.
- [7] 赵正开, 岳蕊祥. HAZOP 分析方法在 VCM 球罐管理中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2024, 52(04):15-17.
- [8] 王皓, 廖飞龙, 徐友红, 等. 石油钻机电气仪表系统安全完整性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(07):107-109.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS