

基于 HAZOP 分析的某自动生产线安全评价

刘超¹, 赵荣², 王莹², 田淑宝², 王端^{1*}

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西太原 030051;

2. 山西北方兴安化学工业有限公司, 山西太原 030003)

摘要:通过危险与可操作性分析(HAZOP),对某企业的自动包装工艺生产线进行安全评价。通过确立节点、节点偏差分析、整体分析等步骤分析了可能出现的安全事故和引发后果的严重程度。研究表明,除静电堆积外,大多数风险事件均为低风险事件。对于静电堆积,做好生产线定期检修和提高人工操作规范性是有效的预防措施。

关键词:自动包装;HAZOP 分析;节点;偏差;静电堆积

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0292-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.048

Safety evaluation of an automatic production line based on HAZOP analysis

LIU Chao¹, ZHAO Rong², WANG Ying², TIAN Shu-bao², WANG Duan^{1*}

(1.School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2.Shanxi Beifang Xing'an Chemical Industry Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

Abstract:A safety evaluation of the automatic packaging production line of an enterprise is conducted through Hazard and Operability Analysis (HAZOP). Possible safety accidents and the severity of their consequent impacts are analyzed through steps such as establishing nodes, analyzing node deviations, and conducting overall analysis. The research shows that except for electrostatic accumulation, most risk events are classified as low-risk. For electrostatic accumulation, regular maintenance of the production line and improved standardization of manual operations are effective preventive measures.

Key words: automatic packaging; HAZOP analysis; node; deviation; electrostatic accumulation

随着时代发展,固体推进剂包装技术的地位愈发重要。在国内外研究中,都将其融入到固体推进剂的整体研发系统里,从而最大程度保证固体推进剂的质量和可靠使用。目前大多数推进剂包装还采用人工操作,往往存在安全风险高、劳动强度大、标准化程度低等问题。推进剂自动包装工艺的产生较好地解决了这些问题,而对于自动生产工艺的风险评估和防控也显得尤为重要。

近年来,危险与可操作性分析(hazard and operability analysis, HAZOP)经过不断地完善发展已成为化工行业应用最广泛的安全评价方法之一。监管部门也在大力推行 HAZOP 分析法,对 HAZOP 分析的范围和深度要求不断提高^[1]。国家安监部门在相关文件中明确要求:对涉及重点监管危险化学品、重点监管危险化工工艺和危险化学品重大危险源的生产储存装置在进行工艺风险分析时必需强制性采用该分析方法^[2]。HAZOP 在固体推进剂制造工艺上已有广泛应用。徐鹏^[3]将固体推进剂制造工艺

分为“吸收”、“压延”、“压伸”和“切药”4 节点,利用 HAZOP 分析得出“压延”、“压伸”是工艺中的风险较大节点。刘小琴^[4]通过用 HAZOP-LOPA-SIL 分析体系,分析高燃速固体推进剂生产系统的捏合工序,确定了摩擦碰撞、静电以及电气火花引燃物料这 3 个重大风险点。对于推进剂包装方面的研究多集中于优化结构设计,依靠模拟仿真和试验对各种性能等做出验证。徐飞扬等^[5]进行 2 种制式包装推进剂的对比试验,结果表明降低包装强度可减少推进剂的危险性。郭思硕等^[6]通过对包装模型开展静态放置和动态跌落仿真研究,对包装结构的力学性能和安全性能做出评价。本文中着眼于生产系统,利用 HAZOP 分析法,对固体推进剂自动包装工艺生产线进行全面安全评价。评估存在的风险和可能出现的危害并提出相应的安全措施。

1 自动生产线简述

该生产线用于推进剂的自动化包装生产,可大

收稿日期:2025-12-09;修回日期:2026-03-04

作者简介:刘超(2000-),男,硕士生;王端(1973-),男,硕士,研究员,研究方向为先进火工品技术,通讯联系人,wangduan41931@aliyun.com。

大提高包装的自动化水平,减少工作人员数量和劳动强度,在优化生产效率的同时提高生产安全性。生产工作流程可概括为:通过智能生产线将生产好的推进剂药柱用托盘盛放到机械臂旁,进行内外包装后装箱,在箱体标记后进行堆垛。该生产

线首尾工序还需要人工完成:通过转运小车将生产好的推进剂药柱转运至上料缓冲区,在完成装箱堆垛后,再次通过叉车作业将已码好垛的推进剂包装箱成批量运输至指定位置。生产系统布局如图1所示。

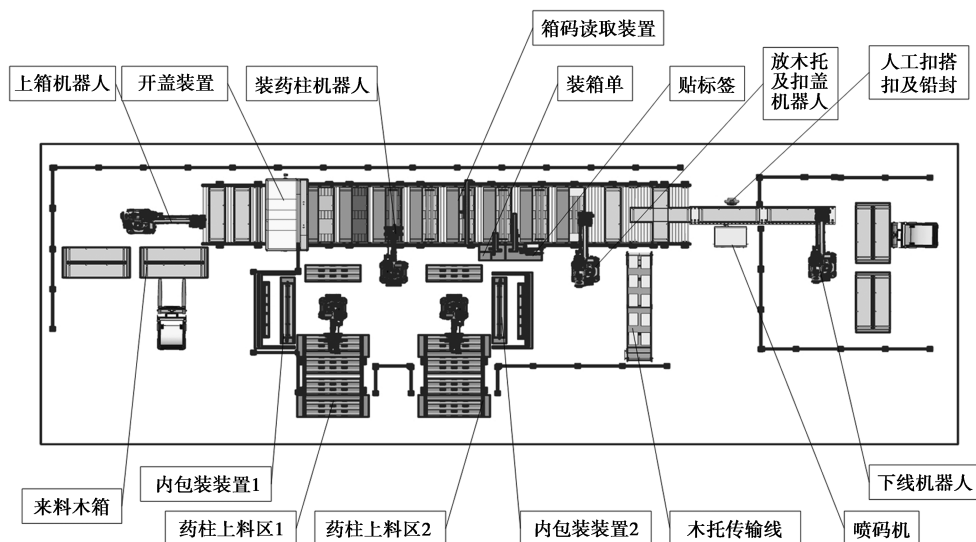


图1 自动包装生产系统布局

2 HAZOP 分析

2.1 方法简介

HAZOP 分析是以系统工程为基础的一种分析方法。系统化和结构化、启发性和实用性是其鲜明的特点。该方法是以引导词为基础,对工艺参数可能发生的偏差进行系统性的辨识和分析,评估偏差带来的后果并提出相应的改进措施。通过 HAZOP 分析,企业可以及时发现和消除潜在的安全隐患,降低事故风险,保障员工的生命财产安全。

HAZOP 分析步骤如下。

(1) 确定节点,将系统划分为若干节点。划分时,要考虑其实际意义和独立性。确保节点的划分既不过于简单又不过于冗杂。

(2) 确定节点分析指标,如设备的运行状况、出料系统的实际流量、包装系统的静电堆积等。

(3) 确定偏差,偏差一般为:引导词+工艺参

数=偏差。引导词一般为“过高”、“过低”、“异常”等。工艺参数取自实际生产加工的过程,如温度、压力、流量等。

(4) 偏差分析,分析引起偏差的原因、偏差可能带来的后果,对不足之处提出新的安全措施建议。

(5) 整体分析。按节点进行分析;选择该节点的一个工艺参数;使用引导词建立有意义的偏差;分析偏差的原因、危害后果、已有的安全措施是否充分,提出新的安全措施建议。将所有节点进行风险矩阵分析,得到风险较大的节点,也就是重点风险防控对象。

2.2 节点划分

根据 HAZOP 分析法的原理,将生产流程做分段处理。主要由药柱上料转运模块、药柱自动内包装模块、自动装箱模块、码垛模块组成。将每一个模块视作一个节点,将首尾的人工操作工序合为一个节点,共计 5 个节点,节点具体描述如表 1 所示。

表 1 柔性包装工艺流程节点划分

| 节点序号 | 节点名称 | 节点描述 |
|------|----------|--|
| 1 | 人工作业系统 | 人工将推进剂药柱、包装纸、空箱运输至指定位置。完成装箱堆垛后,通过人工叉车作业将已码好垛的推进剂包装箱成批量运输至指定位置。 |
| 2 | 药柱上料转运系统 | 药柱上料转运系统包括推进剂药柱转运小车、托盘、定位装置等。小推车搭载药柱托盘进行药柱送料,小车配备定位导向装置。 |

续表

| 节点序号 | 节点名称 | 节点描述 |
|------|-----------|---|
| 3 | 药柱自动内包装系统 | 包含取料机器人、药柱取料视觉定位、药号识别视觉、自动内包装机构、自动包装纸上料机构、药柱缓存区等。取料机器人在视觉系统的引导下将推进剂药柱搬运至自动内包装模块内,包装纸上料模块同时供料,自动内包装模块开始对推进剂药柱进行包装,药号识别视觉对药柱侧面、端面药号进行识别,在完成包装后,取料机器人再将推进剂药柱运至缓存区。 |
| 4 | 自动装箱系统 | 包含包装箱输送链、装箱机器人、装箱视觉定位、箱号视觉识别、装箱单打印及投放装置、贴标装置、扣盖装置、扣盖机器人、缓存工位等。系统启动后通过箱体传输线分上下 2 层同时运输空箱和箱盖,装箱机器人在视觉定位系统的引导下,从缓冲区将存放的药柱装入箱体内,并放入装箱信息单,完成后进行扣盖,在包装箱外贴上标签。 |
| 5 | 机械手码垛系统 | 利用码垛机器人将封装好的药柱包装箱抓取堆放到上料缓存位,堆垛完成后由运输线输送至叉车取料位。 |

2.3 工艺偏差

在确定工艺偏差时,要与实际可能发生的安全事故结合。该生产线主要的安全问题是推进剂引起的燃爆事故,分析点火源与可燃物是确定偏差的依据。生产线绝大部分为无人操作区,点火源的主要来源为静电火花,可将部分工艺偏差制定为静电过大、静电堆积。对于可燃物,推进剂粉末、推进剂碎屑是主要来源。推进剂之间相互摩擦、碰撞,推进剂与设备之间的摩擦、碰撞都会产生碎屑。所以可将推进剂的状态异常、推进剂数量异常、设备故障、运输线效率低、机械臂抓取力过大等制定为工艺偏差。

2.4 风险分析标准

本次 HAZOP 分析工作依据国家标准《危险与可操作性分析(HAZOP 分析)应用导则》(AQ/T 3049—2013)^[7],及团体标准《危险与可操作性分析质量控制与审查导则》(T/CCSAS 001—2018)^[8],并参照生产单位风险可承受标准进行。本次 HAZOP 分析立足于上述标准,参考其他学者的划分依据,将风险发生的概率由不可能到可能分为 7 个等级,将事故严重程度分为 5 个级别,得到表 2 所示的风险矩阵^[9]。

表 2 风险矩阵

| 风险度 (RS) | 事故发生概率(由不可能到频繁发生) | | | | | | |
|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | $10^{-7} \sim 10^{-6}$ | $10^{-6} \sim 10^{-5}$ | $10^{-5} \sim 10^{-4}$ | $10^{-4} \sim 10^{-3}$ | $10^{-3} \sim 10^{-2}$ | $10^{-2} \sim 10^{-1}$ | $10^{-1} \sim 1$ |
| 事故严重等级(由轻到重) | A | B | C | D | E | | |
| | 1 | 2 | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 10 | 15 |

将风险度(RS)分为 4 个等级。

(1) $RS \geq 30$ 为重大风险项,需立即停产整改。未完成整改前禁止生产。

(2) $20 \leq RS < 30$ 为较大风险项,必须限期采取有效的措施降低风险等级。

(3) $10 \leq RS < 20$ 为一般风险项,当难以实施有效的技防措施时,允许采取行政管理手段及配备 PPE 等降低风险。

(4) $RS < 10$ 为低风险项,但需要对具体作业人员进行风险告知。

2.5 重点猜想

静电火花是推进剂和火炸药事故中的常见因素^[10]。一般通过摩擦产生和堆积 2 方面途径形成点火源,在分析时将其列为重点。在燃烧要素里,推进剂碎屑是可燃物的来源,其产生同样与摩擦有关。设备与设备之间、设备与产品之间、产品相互之间的摩擦都是考虑的重点。在生产系统首尾两端仍需人工参与,大量的事故案例说明,发生事故与操作人员违规操作、安全意识不足有直接关系^[11],所以操作人员的不安全行为也是风险防控的重点。

3 HAZOP 分析结果

将前文划分的 5 个节点进行逐一分析,表 3~表 7 依次为所列偏差和分析结果。共列举了 14 项可能出现的偏差,比较其风险等级,只有人工作业流程的静电过多是一般风险事件。剩下 13 项中,风险等级最高的是 7,共计 4 项,分别是上料系统和包装系统的静电过多、推进剂药柱数量和包装纸的状态异常。前两者是提供点火源,后者则是提供可燃物,说明将燃烧要素作为重点风险排查的思路是正确的。静电过多、推进剂状态异常、人工操作失误是 3 大主要影响因素。

表3 人工作业系统节点HAZOP分析

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|-----------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----|------|------|
| 1 | 推进剂上料效率过低 | 由于人工操作不当,如放置位置偏差、漏放等,导致推进剂摆放错误或遗漏。 | 可能导致推进剂数量出现偏差,降低工作效率,增大潜在的起火风险。 | 需要对操作人员进行专业培训,确保其熟练掌握操作流程和注意事项。 | 5 | A | 5 |
| 2 | 静电过多 | 静电泄放装置出现故障,积累静电。操作人员没有进行静电消除。 | 增大因静电堆积引起点火的风险。 | 保持设备静电泄放通道正常。工作人员穿戴防静电服,进入工作区前消除静电。 | 3 | C | 10 |

表4 药柱上料转运系统HAZOP分析

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 建议安全措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|---------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----|------|------|
| 1 | 静电过大 | 机械手误操作产生静电。推进剂与运输线摩擦起电。 | 增大因静电而意外起火的风险。 | 采用符合规范的材料制作并定期检验托盘和更换导电橡胶等,做好设备电气保护。 | 2 | C | 7 |
| 2 | 推进剂数量异常 | 上下层液压升降失效,药柱可能因未被及时取走而进入下层输送线。 | 推进剂药柱进入下层输送线,与空托盘一起进入回收区,可能引起爆炸火灾事故。 | 设置药柱定期检测液压机内压力并更换液压油存取探测报警系统。 | 2 | C | 7 |

表5 药柱自动内包装系统HAZOP分析

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 建议安全措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|---------|--|------------------------------------|----------------------------------|----|------|------|
| 1 | 静电过大 | 导电橡胶的老化失效 | 静电发生堆积,带来燃爆事故隐患。 | 定期检查并更换导电橡胶。 | 2 | C | 7 |
| 2 | 推进剂状态异常 | 夹爪气缸的失效导致夹爪抓取过程受阻,造成推进剂破损、脱落。 | 损坏推进剂,影响其性能。产生推进剂碎屑。 | 定期对夹爪气缸进行气压检测与工作程序优化,确保气缸平稳高效运行。 | 3 | C | 3 |
| 3 | 推进剂数量异常 | 光线不足、镜头污染、校准不当或软件算法错误都可能导致定位不准确。 | 影响放置与包装,可能降低运输线效率和包装效率。 | 定期清洁镜头、校准视觉系统和更新软件算法。 | 2 | A | 1 |
| 4 | 运输线效率过低 | 龙门输送机构可能因导轨污染、滑块磨损或驱动电机故障而卡滞,进而影响整个包装线的流畅运行。 | 降低工作效率,造成推进剂堆积,增大因摩擦、碰撞起火的风险。 | 定期清洁导轨、检查滑块和驱动电机的状态。 | 4 | B | 5 |
| 5 | 包装纸状态异常 | 包装纸材质或尺寸不符、卷纸机构运动不同步、软毛刷磨损。 | 包装纸破损、影响工作效率,降低包装纸的保护作用,增大意外起火的风险。 | 确保包装纸材质和尺寸符合标准、同步机构运动并更换磨损的软毛刷。 | 5 | B | 7 |

表6 自动装箱系统HAZOP分析

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 建议安全措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|------------|--|--|--|----|------|------|
| 1 | 包装箱输送链运行异常 | 输送链上有杂物堆积,表面有油污影响运转速度。输送链润滑状况不佳或松紧度调试没有达到最佳状态。 | 导致与机器人的工作节奏不匹配,可能引发物体跌落,甚至在特定情境下如涉及火药等敏感物质时,导致爆炸等严重事故。 | 定期检查输送链的张紧度和润滑状况以确保其顺畅运行,及时清理输送链上的杂物和灰尘以保持输送面的清洁,以及定期对输送链进行全面的维护和保养,及时更换磨损严重的部件。 | 4 | B | 5 |

续表

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 建议安全措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|-----------|--|----------------------------------|---|----|------|------|
| 2 | 装箱推进剂数量偏低 | 机器人定位不准确、动作迟缓、抓取失败。 | 造成缓存工位堆积、无法流转。 | 定期对机器人进行校准和调试。检查机器人的传感器和执行器,确保其正常工作。加强机器人的维护保养,及时更换磨损的部件。 | 1 | B | 2 |
| 3 | 扣盖失败 | 扣盖装置出现故障,扣盖机器人传动部件出现故障,不能准确、稳定地完成扣盖动作。 | 包装箱密封失效,不能起到保护作用。增大潜在因意外发生起火的风险。 | 定期检查扣盖装置和扣盖机器人的紧固件和传动部件,确保其紧固和灵活。对扣盖机器人进行定期校准和调试,确保其扣盖动作的准确性和稳定性。 | 3 | B | 3 |

表 7 机械手码垛系统 HAZOP 分析

| 序号 | 偏差 | 原因 | 后果 | 建议安全措施 | 概率 | 严重程度 | 风险等级 |
|----|-----------|-------------------------------|--|--|----|------|------|
| 1 | 包装箱码垛失败 | 机器人定位模糊;机器人夹爪损坏或松动,无法有效抓取包装箱。 | 包装箱码垛无法平稳牢固,存在坍塌掉落的风险。可能砸伤工作人员、降低工作效率。 | 定期检查机器人的传感器和执行器,确保其正常工作;备用夹爪组件,以便在夹爪损坏时及时更换。 | 2 | B | 2 |
| 2 | 码垛传输线速度过低 | 输送线驱动装置故障,输送线松紧度未调试至最佳状态。 | 输送线停滞或速度不一致,会导致输送线上的包装箱滑落或堆积。 | 定期检查输送线的驱动装置和传动部件,确保其正常工作;备用驱动装置和传动部件,以便在故障时及时更换;定期检查输送线的张紧度和对齐情况,确保其平稳运行。 | 3 | B | 3 |

4 结论

(1) 推进剂上料环节和人工防爆叉车转运环节都有静电堆积起火的风险,且因为工人的不规范操作行为和不安全操作意识都会增大风险发生的概率。所以要加强对人工环节的重视程度,需要对操作人员进行专业培训,确保熟练掌握操作流程和注意事项。对于可能出现静电堆积的环节要认真排查。尤其是转运和包装环节,及时更换导电橡胶等易损耗材料。大型设备和机器人等做好接地处理,定期检查静电泄放路径。

(2) 专业人员要定期对生产设备进行检查和维修,排查一切存在的不安全状态,保证设备以最佳状态运行。对各类软件系统也要定期调试、校准。加强机器人的维护保养,及时更换磨损的部件。

(3) HAZOP 分析法作为一种安全有效的风险管控方法,为从设计到生产都奠定了安全基础。因其繁复的分析流程和投入较多的人力成本,企业往往忽视甚至并不开展 HAZOP 分析。认真开展 HAZOP 分析并做好风险管控是未来化工领域安全研究的重要方向^[12]。

参考文献

[1] 陈行水,刘云.HAZOP 分析在精细化工液氯储存中的应用[J].

山东化工,2025,54(8):267-269.

- [2] 丁慧娟.HAZOP 评价方法在氯化氢合成工序中的应用分析[J].氯碱工业,2025,61(1):30-35.
- [3] 徐鹏.工艺危害分析(PHA)在火炸药及其制品生产过程中的应用研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [4] 刘小琴.固体推进剂生产过程的系统风险评估与安全优化研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [5] 徐飞扬,姚亚东,吴星亮,等.制式包装设计压力对无水肼液体推进剂危险等级分类影响试验[J].含能材料,2022,30(11):1099-1105.
- [6] 郭思硕,西轩亚,赵荣,等.推进剂包装结构设计力学性能仿真分析[J].包装工程,2025,46(1):249-256.
- [7] 中华人民共和国应急管理部.AQ/T 3049—2013 危险与可操作性分析(HAZOP 分析)应用导则[S].北京:中国安全生产科学研究院,2013.
- [8] 中国化学品安全协会.T/CCSAS 001—2018 危险与可操作性分析质量控制与审查导则[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [9] 武晓飞,杨浩,马东亮.HAZOP 分析方法在超高压临氢系统中的应用[J].工业安全与环保,2024,50(5):62-66.
- [10] 彭琪琪,张周梅,杨森.基于 BZA-2、FTA、AHP 对固体推进剂捏合工序燃爆事故的风险分析[J].安全与健康,2024,(3):49-53,60.
- [11] 张超,严铁军.HAZOP 分析方法在武钢焦化三回收作业区生产中的应用[J].工业安全与环保,2022,48(4):74-77.
- [12] 吴重光.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.■