

复杂化工工艺中管道布置优化与风险评估

司艳艳 (淄博邦达安全技术咨询有限公司, 山东 淄博 255000)

元春雷 (淄博爱创信息科技有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 复杂化工工艺具有介质腐蚀性强、操作参数波动大、管线密集且关联度高的特点, 管道作为物料输送与工艺衔接的核心载体, 其布置合理性直接影响生产效率、安全稳定性与经济成本。本文分析管道布置核心约束条件, 提出了多目标优化策略, 构建出多维度风险评估体系, 采用定性定量相结合方法识别隐患并制定防控措施。为管道布置设计与风险管控提供实践指导。

关键词: 复杂化工工艺; 管道布置; 多目标优化; 风险评估; 安全管控

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0151-03

Optimization of Pipeline Layout and Risk Assessment in Complex Chemical Processes

Si Yanyan (Zibo Bangda Safety Technology Consulting Co., Ltd. Zibo Shandong 255000, China)

Yuan Chunlei (Zibo Aichuang Information Technology Co., Ltd. Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: Complex chemical processes have the characteristics of strong medium corrosion, large fluctuations in operating parameters, dense pipelines and high interdependence. As the core carrier for material transportation and process connection, the rationality of pipeline layout directly affects production efficiency, safety stability and economic cost. This paper analyzes the core constraints of pipeline layout, proposes a multi-objective optimization strategy, builds a multi-dimensional risk assessment system, and uses a combination of qualitative and quantitative methods to identify risks and formulate control measures. It provides practical guidance for pipeline layout design and risk management.

Keywords: Complex chemical process; Pipeline layout; Multi-objective optimization; Risk assessment; Safety management

现代化工产业向大型化、精细化、集约化发展, 复杂化工工艺应用日益广泛, 其涉及多种易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性介质, 工艺流程繁琐且操作参数波动大, 对管道系统提出严苛要求。管道作为物料输送、能量传递的关键枢纽, 贯穿整个生产流程, 其布置需兼顾工艺合理性、空间经济性与运行安全性。因此, 开展复杂化工工艺管道布置优化与风险评估研究, 破解设计痛点, 构建科学优化方案与风险防控体系, 对提升工艺运行效率、降低安全风险、控制成本, 推动化工产业高质量发展具有重要现实意义。

1 复杂化工工艺管道布置的核心特征与约束条件

复杂化工工艺管道布置相较于普通化工管道, 具有显著的复杂性与特殊性, 核心特征体现在三方面。一是管线密集且关联度高, 其涵盖多个工艺单元, 需大量管道衔接, 不同管线的介质性质、操作参数差异大且相互关联, 单条管线布置不合理或故障易影响整个工艺系统运行。二是介质适配要求严苛, 涉及的易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性介质, 对管道材质、密封方式、布置间距有明确差异化要求, 需针对性布置以防范泄漏事故。三是空间布局受限且施工难度大, 化工装置多建于工业园区, 占地面积有限, 管道布置

需兼顾设备、检修、消防等多重需求, 架空、埋地等敷设方式进一步增加了设计与施工难度。

复杂化工工艺管道布置需遵循工艺、安全、空间、经济四大核心约束, 各类约束相互关联, 共同决定布置的合理性与可行性。工艺约束是首要前提, 需遵循物料流向, 规避逆流、积液等问题, 针对高温高压、易结晶介质管线采取补偿、伴热等措施, 匹配设备出入口与操作参数, 保障工艺顺畅稳定。安全约束是核心底线, 需严格控制各类管线的安全间距, 避开火源热源, 规范管线防护与密封, 预留检修和应急空间, 防范爆炸、泄漏等事故。空间约束源于占地面积限制, 需合理利用空间规避冲突, 优化架空、埋地及多层管廊布置, 提升空间利用率与检修便利性。经济约束旨在控制全流程成本, 需缩短管线长度、减少施工难度, 在满足工艺安全要求的前提下优选高性价比材质与工艺, 降低投资、运行及维护成本, 实现经济效益最大化。

2 复杂化工工艺管道布置多目标优化策略

2.1 管道路径多目标优化

路径规划是管道布置优化的核心, 需在满足工艺与安全约束的前提下, 实现管线最短、能耗最低、施工便捷。结合工艺物料流向与设备布局, 优先采用直

线布置，减少转弯次数与管线长度，降低流体阻力；多管线并行区域采用集约化管廊布置，避免空间浪费与施工复杂。针对不同介质实施差异化规划：高温、高压、强腐蚀性管线优先选择短路径、少转弯方案，避开人员密集区与关键设备；易燃易爆、有毒有害管线远离火源热源，必要穿越时采取防护措施并设置紧急切断装置；易结晶、易凝固管线缩短长度、合理设坡，配套伴热保温以避免积液结晶。同时预留管线扩展空间，借助三维建模排查空间冲突，保障规划科学性与后期改造便利性。

2.2 管道空间协同优化

空间协同优化核心是实现管道与设备、建筑物及其他管线的空间协调，提升利用率并兼顾运维便利。管道布置需紧密匹配设备摆放与出入口方位，缩短连接长度、减少管件用量，便于设备操作检修。多层管廊按介质特性与重要性分层布置：上层布设高温、高压、易燃易爆管线，便于散热与应急；中层布设普通工艺管线，方便日常运维；下层布设伴热保温与公用工程管线，减少相互影响，同时合理设计管廊宽高，预留敷设与检修空间。架空管线控制架设高度，避开交通与操作区域，与建筑物、电缆桥架保持安全距离；埋地管线按介质分区敷设，避开地下管网，标注走向埋深；穿跨越管线采用标准化方式并设置防护装置，保障安全运行。

2.3 介质适配性优化

介质适配性优化是管道安全运行的关键，需结合介质特性优化材质、密封方式与布置细节。材质选择严格匹配介质：强腐蚀性介质优先选用不锈钢、聚四氟乙烯等耐腐蚀材质；高温高压介质选用耐高温高压合金材质；易燃易爆、有毒有害介质选用密封性能好、强度高的材质并配套可靠密封装置。密封与连接方式按需优化：高压、强腐蚀性管线采用焊接连接保障密封强度；需频繁检修管线采用法兰连接便于拆卸；易燃易爆、有毒有害管线采用双重密封提升可靠性。

2.4 施工与运维优化

施工与运维优化需兼顾全生命周期需求，降低施工难度与运维成本。施工优化重点是减少复杂穿跨越、高空作业与地下挖掘，降低安全隐患，便于管材运输安装与施工人员操作，确保施工质量、缩短工期、控制成本。运维优化需预留充足检修空间，关键及易损管线布置在便于检测维护的位置，设置检测接口与检修平台；架空管线设攀爬梯架，埋地管线预留检修井，方便后期检修抢修；同时优化布置便于介质吹扫、置换与清洗，减少管道积垢腐蚀，延长管道使用寿命、降低运维成本。

3 复杂化工工艺管道布置风险评估体系构建与实施

3.1 风险识别：多维度排查风险隐患

风险识别是风险评估的基础，核心是全面排查管道布置过程中可能存在的各类风险隐患，明确风险来源与表现形式。结合复杂化工工艺特点，从设备、操作、环境、设计四个维度开展全面识别，确保无遗漏、有针对性。设备维度风险源于管道及配套设备缺陷，包括材质选型不当、壁厚不足、管件质量不合格、密封及补偿装置失效、伴热保温设施故障等，易引发管道腐蚀、泄漏、应力开裂等问题，配套设备故障也会影响管道系统正常运行。

操作维度风险源于人员操作不当与管理不善，如安装施工不规范、焊接质量不达标、维护检修不到位、工艺参数调整不合理、应急处置不及时，以及人员安全意识薄弱、操作技能不足，均会增加风险发生概率。环境维度风险源于外部环境影响，包括极端气候、地质条件、外力破坏及周边危险环境等，易导致管道变形、破裂、泄漏。

设计维度风险源于布置设计不合理，如路径规划不当、安全间距不足、介质适配性差、检修空间预留不足等，会增加能耗与维护难度，提升安全隐患发生率。风险识别可结合现场排查、专家访谈、案例分析等方法，结合实际工况建立风险清单，明确风险核心信息，为后续分析评价奠定基础。

3.2 风险分析：定性与定量结合剖析风险本质

风险分析作为风险评估体系中的核心内容，其核心目标在于全面拆解各类风险的生成根源、作用范畴及演变趋势，为后续风险评价工作的高效推进提供坚实的科学依据。在定性分析层面，重点聚焦于风险形成机制、影响边界及关联特性的解析，采用专家评估法与因果分析法相结合的方式，明确各类风险的影响因素及连锁传导机制；针对人员安全意识不足、设计方案合理性欠缺等难以进行量化统计的风险类型，通过定性分析的方式精准界定其核心特征与实际影响范围。定量分析则主要致力于对风险发生概率及潜在损失程度的量化核算，运用风险矩阵法与层次分析法，建立风险发生概率高、中、低三级评分体系，同时从人员伤亡、财产损失、环境影响三个维度制定标准化的损失程度评分标准，通过专家打分的方式计算得到风险值（ $\text{风险值} = \text{发生概率} \times \text{损失程度}$ ），以此划分风险的量化等级。

3.3 风险评价：分级管控风险隐患

风险评价的核心是根据分析结果划分风险等级，明确风险优先级，为分级管控提供依据。结合复杂化

工管道风险特征,将风险划分为重大、较大、一般、低风险四个等级,分级标准如下:重大风险(风险值 ≥ 80),发生概率高、损失大,可能引发重大安全事故,需立即停工整改;较大风险($60 \leq$ 风险值 < 80),发生概率与损失较大,可能引发较大安全事故,需限期整改;一般风险($30 \leq$ 风险值 < 60),发生概率与损失中等,需加强常规管控;低风险(风险值 < 30),发生概率与损失小,常规监控即可。评价过程中需结合实际工况与安全管理要求,综合评定各类风险,明确重大、较大风险的点位与范围,建立风险分级清单,实行分级管控、重点防控。

3.4 风险防控:针对性制定防控措施

风险评估的最终目的是实现有效的风险防控,按照“分级管控、重点防控”原则,根据不同等级风险制定具有针对性的措施,实现智能闭环管控,减少损失和风险发生率。对于重大风险,立即组织专业人员全面排查整改,更换不合格管材、管件及配套设备,优化布置设计,整改后经全面检测验收合格方可恢复运行。

对于较大风险,明确整改责任与期限,优化管道布置与操作流程,加强运行检测监控与定期维护,规范人员操作,及时处置潜在隐患。对于一般风险,纳入日常安全管理,加强常规检测与维护,规范操作行为,开展安全宣传教育,定期排查整改,防止风险升级。对于低风险,加强日常巡查,及时处置轻微隐患,规范运行维护流程,保证风险可控。

4 实例应用验证

为验证本文提出的复杂化工工艺管道布置优化策略与风险评估体系的可行性与有效性,选取某大型复杂化工企业的合成氨工艺管道系统作为实例,开展应用验证。该合成氨工艺属于典型的复杂化工工艺,涉及高温、高压、易燃易爆、有毒有害介质(如氨气、氢气、氮气),管道系统密集,关联度高,原有管道布置存在路径冗长、能耗过高、部分管线安全间距不足、维护检修不便等问题,且存在一定的安全风险隐患。

按照本文提出的管道布置优化策略,对该合成氨工艺管道系统进行优化:一是优化路径规划,结合工艺物料流向与设备布局,缩短管线长度约120m,减少转弯次数18处,降低流体阻力与运行能耗;二是优化空间协同,对多层管廊进行分层分类布置,按照介质特性划分上层(高温、高压介质管线)、中层(普通工艺管线)、下层(伴热、保温管线),解决空间冲突问题,提升空间利用效率;三是优化介质适配,对强腐蚀性、易燃易爆介质管线进行材质升级与密封

优化,更换不合格管材与密封装置,提升管道密封可靠性;四是优化施工与运维,预留足够的检修空间,设置检修平台与检测接口,便于后期维护检修。

优化完成后,采用本文构建的风险评估体系对该管道系统进行风险评估:通过多维度风险识别,排查出原有风险隐患16项,其中设备维度4项、操作维度5项、环境维度3项、设计维度4项;通过定性与定量结合的风险分析,计算各类风险的风险值;通过风险评价,划分风险等级,其中重大风险1项、较大风险3项、一般风险8项、低风险4项;按照风险分级管控原则,制定针对性的防控措施,对重大风险与较大风险进行重点整改,对一般风险与低风险进行常规管控。

应用验证结果表明,优化后的合成氨工艺管道系统,运行能耗降低约8%,施工与维护成本降低约10%,管道布置的合理性与安全性显著提升;通过风险评估与防控,16项风险隐患全部得到有效处置,重大风险与较大风险全部清零,一般风险与低风险处于可控范围,管道系统运行稳定性显著提升,未发生任何安全事故。实例应用验证了本文提出的管道布置优化策略与风险评估体系的可行性与有效性,能够为复杂化工工艺管道布置设计与风险管控提供实践指导。

5 结论

复杂化工工艺管道的特点是管线密集、介质适配要求高、空间受限等,因此需实现多目标协同优化;提出的多目标优化策略,如:路径规划、空间协同等,可有效缩短管线长度、降低能耗成本,提升布置的合理性;通过定性与定量相结合的方式,构建出四环节风险评估体系,可以精准识别隐患、分级管控风险,提升运行安全性。实例应用验证评估体系的可靠性,为管道布置设计与风险管控提供实际支撑。未来,可以结合数字化技术进一步提升智能化管理水平,助力化工产业高质量安全运行。

参考文献:

- [1] 侯贵军. 化工装置管道布置优化研究[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(6): 56-57, 85.
- [2] 翟洪洪. 化工工程中设备及管道布置的技术研究[J]. 天津化工, 2025, 39(2): 162-164.
- [3] 张成明, 李青. 化工装置管道布置优化研究[J]. 汽车博览, 2021(20): 198-199.
- [4] 刘强. 配管布局优化对化工装置安全性的影响[J]. 化工管理, 2025(20): 118-121.
- [5] 孙赫. 石油化工多层管廊管道布置方法优化研究[J]. 化工管理, 2025(31): 161-164.