

化工工艺设计对设备安全的影响分析

练 峰 毛军国 李金娥

浙江丽水有邦新材料有限公司 浙江 丽水 323000

摘 要：化工工艺设计是决定设备安全稳定运行的核心源头，直接关乎化工生产整体安全。本文以工艺设计与设备安全的内在关联为切入点，从工艺路线、参数管控、布局配套、介质适配四大维度，系统分析工艺设计不合理引发的设备磨损、超压泄漏、腐蚀失效等安全隐患，结合化工生产实际工况，提出针对性的工艺优化对策，旨在从设计源头规避设备安全风险，提升化工设备运行稳定性与本质安全水平。

关键词：化工工艺设计；设备安全；影响

引言：化工生产具有高压、高温、介质腐蚀性强、易燃易爆的高危特性，设备安全是化工安全生产的核心保障。而化工工艺设计作为项目建设的前置核心环节，其设计合理性直接决定设备选型、运行工况与损耗速度，是设备安全运行的源头关键。当前部分工艺设计存在参数不合理、布局不规范、介质适配性差等问题，极易诱发设备故障与安全事故。基于此，本文深入探究工艺设计对设备安全的具体影响，为工艺优化与设备安全管控提供参考。

1 化工工艺设计与设备安全相关理论基础

1.1 化工工艺设计核心概述

(1) 化工工艺设计的定义与核心流程：化工工艺设计是化工项目建设前期的核心基础性环节，贯穿项目筹备与落地的关键阶段。该工作并非单一环节设计，而是覆盖化工生产全流程的系统性设计工作，主要包含工艺路线择优选择、生产工艺参数精准确定、生产流程整体布局、生产介质科学匹配以及辅助配套系统统筹设计等核心内容，是保障后续设备安装、生产运行有序开展的前提条件。(2) 化工工艺设计的基本原则：化工工艺设计需严格遵循四大核心原则，分别为安全性、经济性、可行性与合规性。其中，安全性是重中之重，本质安全为工艺设计的首要核心准则。设计过程中需在保障生产安全、规避事故风险的基础上，兼顾项目建设成本与运行经济效益，同时贴合场地条件、技术水平及行业规范，确保设计方案落地可行、合法合规。

1.2 化工设备安全核心内涵与评价指标

(1) 化工设备安全核心内涵：化工设备安全是化工安全生产的核心载体，具体指各类化工设备在常态化工艺运行工况下，具备稳定承压、耐介质腐蚀、密闭防泄漏、阻燃防爆、耐高温高低温冲击等综合性能，能够持续保持稳定运行状态，从设备层面规避故障停机、介质

泄漏、燃爆等各类安全事故的发生。(2) 设备安全核心评价指标：化工设备安全状态可通过多项关键指标量化评价，主要涵盖设备运行稳定性、生产介质适配性、承压安全系数、设备腐蚀损耗率、日常故障发生率以及安全冗余度等。各项指标相互配合，可全面反映设备的安全性能与使用寿命，为设备运维、更换改造提供数据支撑^[1]。

1.3 工艺设计与设备安全的内在关联

(1) 工艺设计决定设备选型标准：工艺设计确定的生产介质、运行温度、工作压力、化学反应速率等核心参数，是设备材质、结构形式、规格型号选型的核心依据，直接决定设备是否适配生产工况。(2) 工艺设计布局影响设备运行安全：工艺管线排布、设备安装间距、生产流程衔接等布局设计，直接影响设备散热、泄压排气、日常检修及应急防护能力，不合理布局易埋下安全隐患。(3) 工艺参数设计管控设备损耗速度：科学合理的工艺参数可有效降低设备疲劳损耗、减缓介质腐蚀与老化速度，大幅延长设备安全运行周期，降低设备故障引发的安全风险。

2 化工工艺设计对设备安全的具体影响分析

2.1 工艺路线设计对设备安全的影响

(1) 反应工艺路线的影响：化工反应工艺路线的复杂程度直接决定设备的运行负荷与故障概率。若工艺设计中反应流程过于繁琐，多台设备串联运行，会大幅提升设备联动工作负荷，设备长期处于高负荷运行状态，极易出现零部件磨损、性能衰减等问题，进而增加联动故障、停机失效的安全风险。同时，反应物料配比的工艺设计是核心关键，配比参数设计不合理、配比精度控制标准缺失，会导致化学反应剧烈失衡，引发体系瞬时超压、超温现象，使设备超出额定运行工况，长期反复运行易造成设备变形、密封失效，埋下设备损坏与安全事故隐患。(2) 分离提纯工艺路线的影响：分离、精馏

是化工生产物料提纯的核心工序，工艺设计的合理性直接影响设备运行状态。多级分离、连续精馏工艺若流程设计不当、工序衔接不合理，会造成生产介质残留、杂质持续堆积在设备及管线内部。长期积累的杂质会加剧设备内壁磨损、堵塞流道，导致设备换热、传质效率大幅下降，造成局部工况失衡，不仅会影响生产效率，还会引发局部超温超压、介质淤积等安全隐患，逐步降低设备安全运行稳定性^[2]。

2.2 工艺参数设计对设备安全的影响

(1) 温度参数设计影响：温度是化工生产核心工艺参数，与设备安全运行密切相关。若工艺设计的运行温度超出设备材质耐受极限，会持续加速设备金属材料老化、脆化与形变，破坏设备结构稳定性。高温工况下，部分化工介质会发生分解、聚合等副反应，产生高压气体或腐蚀性物质，极易引发设备鼓包、开裂甚至爆裂事故，严重威胁设备运行安全与生产稳定性。(2) 压力参数设计影响：工艺承压设计冗余不足是设备安全的重大隐患。化工生产工况存在动态波动性，压力设计未预留充足安全余量时，生产波动会引发设备瞬时超压，造成密封点泄漏、壳体炸裂等事故。此外，压力梯度设计不合理，会使设备与管线长期承受交变压力负荷，反复的应力冲击会造成设备疲劳损伤、管线松动，逐步引发设备结构性损坏。(3) 流量与配比参数设计影响：介质流量、物料配比的精准设计是设备稳定运行的基础。参数设计失衡会导致物料输送不均，造成设备局部过载、空载空转等异常工况。同时，流速异常会加剧介质对设备内壁的冲刷磨损，长期运行会损耗设备壁厚、破坏防腐层，大幅缩短设备安全使用寿命，提升故障发生概率。

2.3 工艺布局与配套设计对设备安全的影响

(1) 设备空间布局设计影响：设备间距、高低等级的空间布局设计，直接影响生产区域安全环境。布局不合理会导致设备区域通风不畅、散热受阻，高温、易燃易爆气体无法及时扩散，削弱设备防爆泄压能力。同时，紧凑、不合理的布局会增加设备日常检修、维护作业难度，设备微小隐患无法及时排查整改，长期累积易引发重大安全事故。(2) 管线与阀门工艺设计影响：管线管径选型、走向排布以及阀门规格、安装位置的设计合理性至关重要。设计不当易造成介质流动受阻、局部滞留，引发系统压力骤升骤降，导致管线高频振动、接口松动，最终出现介质泄漏问题，泄漏介质会腐蚀、冲击主体设备，牵连整套生产系统安全运行^[3]。(3) 安全配套工艺设计影响：泄压、放空、冷却、应急阻断等配套工艺是设备异常工况的核心防护保障。若配套工艺设

计缺失、规格不匹配或布局不合理，当设备出现超温、超压、介质泄漏等异常情况时，无法及时泄压降温、阻断危险源，会导致异常工况持续恶化，进一步扩大安全事故的影响范围与危害程度。

2.4 工艺介质适配设计对设备安全的影响

(1) 介质腐蚀适配设计影响：化工生产介质多具备酸碱腐蚀性、易燃易爆性等特性，介质与设备材质的适配设计是防腐防漏的关键。若工艺设计未结合介质特性匹配对应的设备材质与防腐工艺，腐蚀性介质会持续侵蚀设备内壁，造成设备内壁变薄、局部穿孔、结构失效，破坏设备密闭性与稳定性，引发介质泄漏事故，极易诱发中毒、燃爆等次生安全事故。(2) 介质相变工艺设计影响：化工介质会随温度、压力变化发生气化、液化、结晶等相变现象，对设备运行稳定性影响极大。工艺设计若未充分考量介质相变特性，未设置对应的防控措施，介质在设备内部易出现结垢、结晶、冻堵等问题，会堵塞设备管路、阻碍介质正常流通，造成设备压力失衡、换热失效，彻底破坏设备稳定运行状态，诱发各类设备故障与安全隐患。

3 基于设备安全的化工工艺设计优化对策

3.1 优化工艺路线，强化本质安全设计

(1) 简化冗余工艺流程：在化工工艺设计过程中，应立足设备安全视角，全面梳理生产全流程，精简繁琐、冗余的串联工艺环节。针对多设备联动的复杂生产系统，合理合并重复工序、删减无效流程，有效降低多台设备同步运行的工作负荷，减少设备长期高负荷运转带来的性能损耗。同时，精简后的工艺能够弱化设备之间的联动耦合性，从根本上降低设备故障连锁传导风险，避免单一设备故障引发整套系统停机或安全事故，全面提升化工生产设备及整体系统的运行稳定性与可靠性^[4]。(2) 优选安全型工艺路线：工艺路线的选型是设备本质安全的源头保障，设计阶段需摒弃高风险生产模式，优先选取反应条件温和、操作可控性强、安全系数高的绿色安全工艺路线。主动规避高温、高压、强反应、高腐蚀的高危复杂工艺，减少设备极端工况运行频次。通过优化反应、分离、提纯等核心工序的工艺形式，降低设备承压、耐温、抗腐蚀等性能负荷，从工艺源头削减设备安全隐患，实现工艺设计与设备安全的深度适配。

3.2 精准管控工艺参数，匹配设备安全阈值

(1) 科学设定工艺参数阈值：工艺参数的合理设定是保护设备安全的核心手段，设计人员需结合设备材质性能、结构强度、额定工况、耐受极限等核心参数，

系统测算并精准划定温度、压力、物料流量、反应配比等关键参数的安全运行范围。在参数设计中预留充足的安全冗余,充分考虑生产波动、设备老化、工况切换等不确定因素,避免参数临界运行。通过标准化参数阈值设计,有效规避参数异常波动引发的设备变形、腐蚀加剧、疲劳损伤、密封泄漏等问题,保障设备长期安全运行。(2)搭建参数动态调控体系:为解决人工操作带来的参数偏差、调控滞后等问题,工艺设计需融入智能化、自动化调控模块,搭建全流程参数动态调控体系。依托在线监测设备,实现对生产温度、压力、流量等参数的实时采集、动态监测与智能分析,系统可根据工况变化自动微调工艺参数,确保各项指标始终稳定在安全区间。该设计可有效弥补人工调控的滞后性与主观性,减少参数失衡引发的设备过载、冲刷、磨损等问题,提升工艺运行与设备安全的适配性^[5]。

3.3 规范工艺布局与配套安全设计

(1)标准化设备与管线布局:严格遵循化工安全生产设计规范,对生产设备、输送管线进行标准化布局规划。结合设备运行特性合理把控设备间距、安装高度与层级布局,预留充足的通风散热、防爆泄压空间以及设备检修作业区域。同时优化管线走向与排布方式,减少弯道、死角与过长管线,保障介质输送顺畅,避免管线应力集中、介质滞留等问题,从空间布局层面消除设备运行安全隐患。(2)完善安全配套工艺系统:安全配套工艺是设备异常工况的重要防护屏障,需针对性优化泄压、放空、紧急切断、冷却降温、惰性气体保护等配套工艺设计。针对反应釜、精馏塔、高压储罐等高危核心设备,增设双重安全防护工艺与应急装置,强化异常工况处置能力。当设备出现超温、超压、泄漏等故障时,配套系统可快速启动应急处置,及时释放压力、阻断危险源、降温控险,有效遏制隐患升级,降低事故危害。

3.4 匹配介质特性,优化设备适配工艺

(1)按需适配材质与工艺:充分结合生产介质的强腐蚀、易燃易爆、易相变等特殊理化特性,针对性优

化生产工艺与设备适配方案。根据介质类型科学匹配设备材质,对腐蚀性介质增设防腐涂层、内衬防护等工艺处理环节,对易结晶、易结垢介质优化预处理工艺,提前去除杂质与易结晶组分。通过介质与工艺、设备的精准适配,杜绝介质腐蚀、结垢、穿孔等设备失效问题,从源头规避介质引发的安全事故。(2)优化介质输送工艺:结合设备耐受性能优化介质输送工艺,合理调控介质输送流速、压力梯度,避免流速过快造成设备内壁高强度冲刷磨损,同时缓解压力骤变带来的设备交变应力损伤。优化管线输送流程,消除介质滞留死角,规避介质长期滞留引发的结晶、沉积、冻堵等问题,持续保障设备与管线系统的完整性与稳定性,延长设备使用寿命,全面提升基于设备安全的工艺设计优化水平。

结束语

本文全面分析了化工工艺设计各模块对设备安全的影响机制,明确工艺路线、参数、布局及介质适配等设计因素是设备故障与安全事故的主要诱因。只有立足设备安全需求优化工艺设计,精简冗余流程、精准把控参数、完善配套设施、匹配介质特性,才能从源头消除设备安全隐患。持续优化工艺设计体系,是提升化工设备运行稳定性、实现化工行业安全长效发展的重要保障。

参考文献

- [1]胥学松.化工工艺设计中安全危险的识别与控制措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):154-156.
- [2]陈建勋,孔燕燕.化工工艺安全设计中的危险因素及防范措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,14(22):132-135.
- [3]王正林,王昌芸.安全设计在精细化工企业工艺设计中的重要性[J].天津化工,2023,37(6):126-128.
- [4]强兴庆,刘美艳,乔亚龙,刘坤.化工工艺设计对设备安全的影响[J].化学工程与装备,2023,10(6):236-239.
- [5]徐唯唯,吴婷.化工工艺设计中的安全问题及控制措施探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(3):123-125.