

# 化工装置安全泄放系统工艺设计与设备选型优化

肖 佳

天津葆光工程科技有限公司 天津 300100

**【摘要】**：本文针对化工装置安全泄放系统在工艺设计与设备选型中存在的工况辨识不全、泄放量计算偏差及设备与系统压力失配等核心问题，提出基于全场景 HAZOP/LOPA 分析的泄放工况分级方法、多相流动态泄放模型与简化校核准则，并结合背压控制与排放路径优化策略。通过耦合热力学、流体力学与设备性能参数，建立从泄放源头到终端的全流程匹配逻辑，形成面向典型装置的差异化配置模式。研究实现了泄放能力精准评估与设备选型合理适配，在保障极端工况下系统可靠动作的同时兼顾维护可达性，有效提升了安全泄放系统的工程适用性与本质安全水平。

**【关键词】**：安全泄放系统；多相流泄放计算；设备选型优化；背压控制；HAZOP/LOPA 分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.002

## 引言

随着化工工艺向高参数、高危险性方向发展，安全泄放系统作为防止超压事故的最后一道防线，其设备适配性与设计精度面临更高要求。传统设计方法常因对复杂工况覆盖不足、多相流模型简化过度及设备选型孤立于系统动态特性，导致泄放能力与实际需求脱节。尤其在间歇反应、多相体系或高压临氢等特殊场景中，微小的设计偏差可能引发连锁失效。因此，亟需打破工艺计算与设备选型之间的壁垒，将风险识别、动态模拟与工程布置有机融合，构建以系统响应可靠性为核心的集成化设计路径，为现代化工装置提供兼具安全性、合规性与可操作性的泄放解决方案。

## 1 化工装置安全泄放系统工艺设计与设备选型优化的核心问题剖析

### 1.1 泄放工况辨识不全导致设计基础条件缺失

泄放工况辨识不全导致设计基础条件缺失，主要体现在对复杂工艺系统中潜在超压源的遗漏或误判。例如，在多相反应、间歇操作或串联单元中，未能识别因阀门误关、泵出口堵塞、换热器结垢或仪表失灵所引发的连锁超压情形。部分项目仅依据稳态操作数据设定泄放参数，忽视了瞬态过程如启动、停车、切换及异常扰动下的动态压力变化<sup>[1]</sup>。对于存在自加速分解反应或气体快速生成的工艺，若未结合反应动力学模型和热力学数据进行定量分析，将难以准确界定最大泄放速率与相态组成。此外，外部火灾工况下设备受热面积、暴露时间及介质汽化潜热等关键参数若未按规范逐一核算，也会造成泄放能力低估，使安全阀或爆破片选型偏离实际需求，最终削弱整个泄放系统的有效性与合规性。

### 1.2 泄放量计算偏差与相态处理不当引发能力不足

泄放量计算偏差与相态处理不当引发能力不足，主要源于对多相流泄放过程的简化假设与实际工况脱节。在气液两相或闪蒸体系中，若仅采用单相气体或液体模型进行泄放速率估算，将显著低估所需泄放面积。例如，高压饱和液体在泄放过

程中迅速闪蒸，形成气液混合流，其密度、流速及临界流条件与纯相态存在本质差异。部分设计未依据热力学模型准确判断泄放介质的相态演变路径，导致泄放量计算失真。同时，在涉及化学反应失控或外部火灾场景时，未能动态耦合温度、压力与组分变化对汽化速率的影响，使得峰值泄放负荷被低估。此外，忽略背压波动对安全阀开启特性及排量系数的影响，也会造成设备实际泄放能力无法满足工艺需求，进而埋下超压失效隐患。

### 1.3 设备选型与系统压力平衡失配造成泄放失效

设备选型与系统压力平衡失配造成泄放失效，主要体现在安全阀、爆破片等泄放装置的设定压力、背压容忍度及排放能力与工艺系统动态压力特性不匹配。在复杂管网中，多个泄放点共用火炬或放空系统时，若未进行全系统压力梯度模拟，容易导致局部背压过高，使弹簧式安全阀无法正常开启或回座异常。部分设计选用非平衡式安全阀用于高变背压工况，造成有效开启压力漂移，实际泄放流量远低于预期。同时，爆破片与安全阀串联配置时，若未校核组合装置的最大允许超压与系统最大工作压力之间的裕度，可能因压降累积引发误动作或响应滞后。此外，在高压差或低温介质场景下，阀门材质、流道结构与相变特性未协同考虑，易诱发冰堵、冲蚀或密封失效，进一步削弱系统整体泄放可靠性。

## 2 面向泄放可靠性的工艺设计改进方法

### 2.1 基于全场景辨识的泄放工况分级确定

基于全场景辨识的泄放工况分级确定，需系统梳理化工装置在运行、启停、异常及事故等全生命周期内可能触发安全泄放的各类工况。通过 HAZOP、LOPA 等风险分析方法，识别不同泄放源的物理化学特性、操作条件变化范围及潜在超压机制，将泄放场景划分为常规操作波动、设备故障、控制失效、外部火灾、化学反应失控等典型类别。在此基础上，依据泄放频率、后果严重度、介质危险性 & 系统响应时间等维度，对各类工况进行量化评估与优先级排序，形成多层次泄放工况清

单。该分级结果直接指导后续泄放路径设计、泄放量计算边界设定及安全阀/爆破片等关键设备的选型参数，确保泄放系统覆盖所有可信超压场景，避免因工况遗漏导致保护能力不足或过度设计。

## 2.2 多相泄放流量的动态计算与简化校核准则

多相泄放流量的动态计算与简化校核准则，聚焦于气液两相或含固体颗粒等复杂介质在超压泄放过程中的非稳态流动特性<sup>[2]</sup>。传统单相模型难以准确反映实际泄放行为，需引入动态两相流模型，结合热力学平衡或非平衡假设，对泄放过程中压力、温度、相分率及流速随时间的变化进行数值模拟（见图1）。关键参数包括临界流条件下的质量通量、相间滑移比、管道摩擦压降及加速压降等。为兼顾工程实用性，在确保安全裕度前提下，可采用 DIERS 方法或 Omega 法等简化准则进行校核，通过特征参数如泄放入口处的气相质量分数、系统容积和反应放热速率，快速估算最大泄放负荷。此类简化方法适用于初步设计阶段或缺乏详细物性数据的情形，同时为后续高精度动态模拟提供边界条件和验证基准，有效提升泄放系统设计的可靠性与经济性。



图1 多相泄放流量动态计算与简化校核流程示意图

## 2.3 泄放系统背压控制与排放路径结构优化

在化工装置安全泄放系统中，背压控制直接影响安全阀的开启性能与排放效率。背压过高可能导致阀门无法及时开启或回座异常，进而引发超压风险。为有效控制背压，需对火炬管网系统进行水力计算，合理设置阻火器、分液罐及管道坡度，减少流动阻力；同时采用平衡波纹管式安全阀或先导式泄放装置，以增强对变动背压的适应能力。排放路径结构优化则聚焦于缩短泄放管线长度、减少弯头数量，并确保排放方向避开人员通道与关键设备区域。通过三维建模与动态模拟手段，可识别潜在积液、堵塞或振动点，进而调整管线支撑与布局。此外，多源泄放工况下应设计独立或分段排放路径，避免相互干扰造成局部超压，从而提升整体泄放系统的响应速度与运行可靠性。

## 3 安全泄放装置选型的关键约束与匹配依据

### 3.1 泄放介质物性与动作特性对阀门型式的限制

泄放介质的物理化学性质对安全泄放装置的型式选择具

有决定性影响。对于高黏度或易结晶介质，常规弹簧式安全阀易因堵塞或卡涩失效，宜选用全启式先导阀或爆破片组合装置以确保可靠开启；腐蚀性强的介质如含硫化氢或氯离子流体，则需采用哈氏合金、蒙乃尔或衬氟材质的阀门结构，防止密封面劣化。高温工况下，金属热膨胀可能改变设定压力，需配置带散热片的阀盖或波纹管隔离设计。对于两相流或闪蒸工况，介质在泄放过程中可能发生相变，造成流动不稳定，此时应优先考虑具有稳定排放特性的平衡式安全阀或配合爆破片使用。此外，介质的毒性、可燃性等级也直接影响排放方式的选择，剧毒或高危介质通常要求密闭排放并配套火炬或吸收系统，避免直接向大气释放。这些物性参数与动作响应特性共同构成阀门选型的技术边界条件。

### 3.2 先导式与弹簧式安全阀在复杂工况下的适用边界

在高温、低温或腐蚀性介质等复杂工况中，先导式与弹簧式安全阀的适用边界进一步受到材料兼容性、热膨胀效应及密封性能的制约。先导式安全阀因具备独立的导阀系统，可在主阀体远离高温区域布置，有效降低热应力对整定精度的影响，适用于超临界流体或深冷工况下对启闭压差要求严格的场景；但其多通道结构在低温环境中易因结冰或冷脆导致动作失灵<sup>[3]</sup>。弹簧式安全阀整体结构简单，在极端温度下可通过选用特殊合金弹簧和波纹管密封适应工况，尤其在频繁热循环系统中表现出良好的稳定性，但高温会加速弹簧蠕变，影响长期设定压力准确性。对于含固体颗粒或易结晶介质，弹簧式因无细小控制孔道而更不易堵塞；而先导式在洁净、高粘度或高背压变动的气体系统中，能通过外部引压实现稳定控制。选型时需结合泄放相态、操作温度窗口及介质化学特性进行匹配。

### 3.3 爆破片与安全阀组合结构对泄放能力的协同影响

在化工装置安全泄放系统中，爆破片与安全阀组合结构对泄放能力的协同影响主要体现在动态响应特性与流体通路连续性两个方面。爆破片作为一次性快速开启元件，可在超压瞬间迅速破裂形成全流通截面，有效消除背压对安全阀开启的抑制作用；而安全阀则承担后续持续泄放任务，维持系统压力在可控范围。二者串联布置时，爆破片的破裂压力需精准匹配安全阀的设定压力，避免因压差过大导致泄放滞后或过早触发。同时，组合结构中的连接管路几何形状、内壁粗糙度及介质相态变化均会影响实际泄放流量，尤其在高黏度或含固体颗粒工况下，需校核组合装置整体的最小有效流通面积是否满足 API Standard 520 等规范要求。此外，爆破片破裂后的碎片不得阻碍安全阀正常启闭，结构设计上常采用无碎片型爆破片或加装隔离腔以保障协同可靠性。

## 4 工艺设计与设备选型耦合优化的工程实现途径

### 4.1 从泄放源头到终端的全流程匹配设计逻辑

化工装置安全泄放系统中，泄放源头至终端的全流程匹配

设计需各环节参数与功能高效协同。泄放源工艺条件含最大操作压力、介质物性及失控反应速率,需精准转化为泄放量、泄放温度等边界条件,作为设备选型核心输入<sup>[4]</sup>。管道设计需兼顾两相流特性、压降限制及动态响应,保障泄放路径无瓶颈且畅通。火炬或放空系统的处理能力、背压特性及燃烧效率需契合上游泄放工况,规避背压升高引发的泄放失效。安全阀、爆破片等泄放元件的动作压力与复位特性需适配系统泄放策略,杜绝误启或滞后。热力学模型、流体力学模拟与设备性能曲线的耦合分析是匹配设计核心,多工况迭代校核可保障各类异常场景下泄放可靠,构建起响应迅速、功能完备的安全泄放通路。

#### 4.2 典型装置类型对应的泄放配置推荐模式

典型化工装置安全泄放系统配置需结合工艺特性与潜在超压场景差异化设计。连续精馏塔顶部设先导式安全阀并配套火炬排放管线,再沸器蒸汽侧设独立泄放路径,防范热输入失控引发超压<sup>[5]</sup>。反应釜结合放热特性采用爆破片与安全阀串联结构,前者快速响应剧烈压力上升,后者处理后续稳态泄放,氮气密封系统维持惰性环境。储罐区依介质挥发性和操作压力搭配呼吸阀与紧急泄压人孔,低温储罐集成真空泄放功能应对抽空工况。聚合反应器考虑粘稠介质堵塞风险,采用全启式安全阀并加大入口管径,增设冲洗接口保障通道畅通。加氢装置高压临氢环境下,安全阀选用抗氢脆材料,双阀冗余布置提升可靠性,各类装置泄放配置均匹配物料特性、操作参数及失效模式,保障超压工况有效保护。

#### 参考文献:

- [1] 王薇.化工设计中常用的安全泄放装置[J].化工管理,2020,(10):129-130+148.
- [2] 苏爱平,常冠杰,刘华玲.煤化工装置安全事故成因及预防措施研究[J].流程工业,2025,(03):46-49.
- [3] 靳杰,刘亚,王富宝.化工科研试验装置安全风险管控实践与分析[J].中国安全科学学报,2024,34(S1):122-128.
- [4] 石锡攀,朱军涛,王文海.苯乙烯化工厂安全泄放回收系统的应用研究[J].内蒙古石油化工,2025,51(05):19-22.
- [5] 耿强.苯乙烯安全泄放回收系统设计与优化[J].石油化工设计,2022,39(04):32-35+39+78.

#### 4.3 选型决策中的可靠性优先与维护可达性权衡

安全泄放设备选型需遵循可靠性优先准则,优先选用经工程实践检验、密封性能优异且启闭状态稳定的先导式安全阀及爆破片组合装置,适配极端工况下的动作需求。高可靠性结构设计容易造成构造繁琐,挤占现场运维操作空间,集成式控制组件安置于狭小区域会加大校验检修及故障排查难度。设备布局规划应兼顾检修通道预留、拆装空间预留与辅助接口布设,优选模块化构造且核心构件支持在线更换的设备型号。腐蚀及易结焦介质工况可采用全封闭构造延长服役周期,搭配冲洗吹扫与隔离防护手段保障运维安全。高温高压环境需严控材质规格与密封方式,兼顾保温拆装对运维周期造成的影响,依托三维配管模型开展干涉校验与作业仿真,平衡设备运行可靠性与后期维护便捷性。

#### 5 结语

安全泄放系统作为化工装置本质安全的重要屏障,其工艺设计与设备选型的协同优化直接关系到全生命周期内的运行可靠性与风险可控性。通过精准识别泄放工况、科学计算多相泄放流量、合理匹配设备特性与系统压力动态,并在选型中统筹可靠性与维护可达性,可有效避免因设计偏差或配置失当导致的超压失效。工程实践中,需依托系统化分析方法与数字化设计工具,将规范要求、工艺特性和设备性能深度融合,构建响应及时、结构合理、维护便捷的泄放体系,为化工装置安全稳定运行提供坚实保障。