

化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全联锁控制参数优化

马龙¹ 杜亚君²

1. 三江化工有限公司; 2. 嘉兴鸿泰安全科技有限公司

摘要: 氮封装置是保证化工储罐安全运行的重要设备, 氮封装置的可靠性影响着储罐区的整体安全。本文通过故障树分析等方法对化工储罐区氮封装置的失效模式进行深入研究, 找到多种可能的失效因素, 并结合实际案例进行详细地阐述。同时, 还针对安全联锁控制参数, 运用数学模型和实际运行数据进行优化, 给出了优化前后的参数对比及效果评估。本研究结果对提高化工储罐区氮封装置的可靠性与安全性、预防事故的发生以及保证化工生产的稳定进行具有重要的指导意义。

关键词: 化工储罐区; 氮封装置; 失效模式; 安全联锁; 参数优化

在化工生产过程中, 储罐区是储存各种化学品的关键部位, 储罐区的安全运行非常重要。许多化学品具有易燃易爆、易氧化等特性, 与空气接触时容易发生火灾、爆炸等严重事故。氮封装置是指氮气充填于储罐气相空间以保持微正压, 从而起到隔绝空气的作用, 防止罐内物料氧化、挥发和爆炸性混合气体的形成, 大大提高了储罐的安全性。但是氮封装置在实际运行中可能会产生各种失效现象, 不能正常发挥保护作用。据有关统计, 一些化工企业因氮封装置失效发生安全事故, 造成了较大的人员伤亡和财产损失^[1]。因此, 进一步研究氮封装置的失效模式, 对安全联锁控制参数进行优化, 对化工储罐区安全稳定运行有着十分重要的现实意义。

1 化工储罐区氮封装置工作原理

1.1 氮封装置基本组成

氮封装置通常由供氮系统、泄氮系统、压力监测与控制系统及相关的管道、阀门等组成。供氮系统主要由

氮气源, 如液氮储罐、制氮机、减压阀、过滤器和供氮阀等组成, 用以减压、过滤后, 根据储罐内压力变化向罐内补充氮气^[2]。泄氮系统则由泄氮阀以及相关管道组成, 当储罐内压力超过设定上限时, 泄氮阀打开将多余氮气排出, 使罐内压力控制在正常范围内。压力监测与控制系统通过压力传感器对储罐内的压力进行实时监测, 并根据设定的压力值控制供氮阀、泄氮阀的开启、关闭。

1.2 工作机制

正常情况下, 储罐内压力在设定的微正压范围内, 一般为 50 ~ 1 500 kPa。当储罐内物料减少, 气相空间加大, 压力降到供氮设定值(如 55 kPa)时, 压力传感器传递信号给控制系统, 控制系统启动供氮阀, 氮气由氮气源经供氮系统进入储罐, 罐内压力回升; 当罐内压力达到泄氮设定值(如 1.5 kPa)时, 压力传感器再次给控制系统以信号, 控制系统将泄氮阀打开, 罐内的多余氮气排出, 压力随之下降^[3]。如此循环, 通过供氮阀和泄氮阀的自动

调节, 储罐内压力始终维持在设定的微正压范围内, 实现对储罐内物料的氮封保护。譬如某石化企业的苯储罐区, 氮封装置供氮为 0.6 kPa, 泄氮为 1.3 kPa。储罐向外输送苯时, 储罐内气相空间增大, 压力逐渐降低。当压力降至 0.6 kPa 时, 供氮阀自动开启, 氮源源不断地进入储罐, 压力开始回升。当压力上升到 1.3 kPa 时, 泄氮阀自动打开, 多余氮气排出, 压力稳定在设定范围内, 保证了苯储罐的安全运行。

2 氮封装置失效模式识别

2.1 基于故障树分析 FTA 的失效模式识别方法

故障树分析是自上而下的演绎推理方法, 通过建立故障树, 将系统顶事件(如氮封装置失效)分解成各层次的中间事件和底事件, 从而找出引发本事件的全部可能原因及其组合。在氮封装置失效模式识别中, 以“氮封装置失效”为顶事件, 从硬件故障、软件故障、人为因素以及环境因素等方面进行分析, 构建故障树。

2.2 主要失效模式及原因分析

2.2.1 阀门故障

供氮阀和泄氮阀是氮封装置最重要的执行部件，其故障是氮封装置失效最常见的原因之一。阀门故障可能表现为阀门开关失灵、阀门漏气及阀门运行迟滞等，有时阀门内密封件磨损老化，造成阀门漏水，使氮气不能按照设定要求维持罐内压力。据统计，某化工园区 50 起氮封装置失效事件中，有 20 起由阀门故障引发，占 40%。压力传感器用于对储罐内压力的实时监测，若出现测量不准确、信号传输中断等故障，控制系统将不能正确判断罐内压力，导致供氮阀和泄氮阀不能正常动作。例如由于电磁干扰，压力传感器可能会输出错误的压力信号，导致氮封装置误动作。氮气源如液氮储罐液位过低、制氮机故障等氮气供应不足或中断，导致氮封装置无法正常工作。又如某企业液氮储罐阀门发生泄漏，液氮迅速挥发导致液位骤降，若未能及时发现和处理，氮封装置将因氮气供应不足而失效^[4]。

2.2.2 软件故障致使失效

氮封装置控制系统软件负责接收压力传感器信号、处理数据和控制阀门动作。如果软件出现漏洞、程序出现错误、受到病毒攻击等，就会导致控制系统失灵。软件在处理数据过程中出现溢出错误，控制系统输出错误的控制指令，导致阀门误操作。

2.2.3 人为失效

操作人员在日常维护和操作过程中若操作不当，则可能导致氮封装置失效。例如氮封装置检修后，阀门未正确安装或压力设定值未调整在正确位置，使氮封装置无法工作；对氮封装置缺乏定期维护和保养，如未及时清除阀门内的杂质、未对压力传感器进行校准，也会引起设备性能的下降，最终导致失效^[5]。如某企业连续两年没有对氮封装置的压力传感器进行校准，

导致传感器测量误差越来越大，最终导致氮封装置失效。

2.2.4 环境因素导致的失效

化工储罐区环境复杂，有大量腐蚀性气体和液体。长期暴露在这样的环境中，氮封装置的金属部件容易腐蚀，从而造成设备的损坏。例如氮封装置的阀门和管道在含有硫化氢气体的环境中将受到严重的腐蚀，缩短设备的使用寿命。氮封装置温度过高或过低，湿度过大，也易导致电子元件、密封件性能受到影响。例如在高温下密封件容易老化变形，造成阀门泄漏；在潮湿环境中电子元件容易受潮短路，影响控制系统正常工作^[6]。

3 安全联锁控制参数优化

3.1 安全联锁控制参数

安全联锁控制参数是氮封装置安全可靠运行的重要保证，合理的参数设置能保证氮封装置在各种工况下都能及时、准确地反映，保持储罐内的压力稳定，防止事故发生。例如设定过低的供氮压力，可能导致储罐在压力迅速下降时，不能及时补充足够的氮气，使罐内产生负压，出现储罐吸瘪事故；设定过高的泄氮压力，可能导致储罐在压力超常上升时，不能及时泄压，出现储罐超压破裂的事故。因此，优化安全联锁控制参数十分重要。

3.2 优化方法及过程

基于数学模型的优化：利用储罐的容积、物料进出流量、氮气供应流量、压力变化等建立氮封装置的数学模型，通过求解与分析，确定最佳的安全联锁控制参数。收集氮封装置实际运行过程中的大量数据，例如氮封在不同

工况下的压力、流量、阀门开关状态等。利用数据挖掘，统计分析等数据分析方法，找出当前参数设置存在的问题，根据分析结果进行优化。例如通过统计分析一段时期储罐压力波动数据，发现目前供氮和泄氮压力设定值之差过小，使阀门动作频繁，影响设备的寿命。在此基础上，适当增大供氮和泄氮压力设定值之间的差值，优化后的参数可使阀门动作更加合理，减轻设备磨损^[7]。

3.3 优化前后参数对比及效果评估

以 A 化工企业的乙醇储罐区氮封装置为例：优化前，供氮压力设定值为 0.5 kPa，泄氮压力设定值为 1.0 kPa；优化后，供氮压力设定值调整为 0.6 kPa，泄氮压力设定值调整为 1.2 kPa。同时，对氮气流量控制参数也进行了优化：优化前，氮气流量根据储罐压力简单线性调节；优化后，采用基于模型预测控制的方法，根据储罐内物料进出流量、压力变化趋势等因素实时动态调节氮气流量。具体参数对比见表 1。

通过对比优化前后氮封装置的运行效果，发现优化后取得了显著的改进。优化后，储罐内压力波动明显减小，压力稳定性得到大幅提高。在相同的物料进出工况下，优化前储罐内压力波动范围在 0.3 ~ 1.2 kPa，优化后压力波动范围缩小至 0.5 ~ 1.0 kPa，有效降低了因压力波动过大对储罐和设备造成的损害。同时，阀门动作次数明显减少，供氮阀和泄氮阀的平均每天动作次数从优化前的 50 次和 30 次分别减少至优化后的 30 次和 20 次，延长了阀门的使用寿命，降低了设备维护成本。此外，由于氮气流量控制

表 1 氮封装置安全联锁控制参数优化

参数名称	优化前	优化后
供氮压力设定值 /kPa	0.5	0.6
泄氮压力设定值 /kPa	1.0	1.2
氮气流量控制方式	简单线性调节	基于模型预测控制

更加精准，氮气消耗也有所降低，优化后氮气平均日消耗量从优化前的1 000 m³降至800 m³，节约了生产成本。具体效果对比见表2。

化工储罐区氮封装置优化前后运行效能数据，直观展现了优化措施带来的显著成效。从储罐内压力波动范围来看，优化前压力波动区间为0.3 ~ 1.2 kPa，较大的波动幅度增加了储罐超压或形成负压的风险，可能导致储罐变形、物料泄漏等问题；而优化后压力波动范围缩小至0.5 ~ 1.0 kPa，这表明优化后的安全联锁控制参数使氮封装置能够更精准地调节压力，有效保障了储罐压力稳定，降低了安全隐患。

供氮阀和泄氮阀平均每天动作次数的减少，意味着阀门的磨损程度降低，设备使用寿命得以延长。优化前，供氮阀和泄氮阀频繁动作，不仅增加了设备维护成本，还可能因部件疲劳引发故障；优化后，动作次数分别从50次降至30次、30次降至20次，这得益于更合理的压力设定和先进的氮气流量控制方式，使得阀门无需频繁开启关闭，提高了设备运行的可靠性。氮气平均日消耗量从1 000 m³降至800 m³，降低了20%，这一数据的变化带来了直接的经济效益，同时也体现了优化后氮封装置在氮气利用效率上的提升，减少了能源浪费，符合绿色化工生产的要求。

综合来看，这些数据充分证明了对氮封装置安全联锁控制参数优化及相关改进措施的有效性，为化工储罐区的安全稳定运行提供了有力支撑。

4 案例分析

4.1 化工企业氮封装置失效事故案例

精细化工企业位于化工园区内，主要从事有机中间体的生产与储存，其储罐区占地面积达2万m²，共设有30个储罐，用于储存甲苯、苯乙烯、等易燃易爆化学品。某日凌晨2点，该企业的一座容积为2 000 m³的甲苯储罐突发火灾事故。事故发生时，该储罐处于物料输出状态，正通过管道向生产车间输送甲苯。事故发生后，企业立即启动应急预案，当地消防部门迅速赶赴现场进行救援。经过3 h的紧张扑救，火势终于得到控制，但此次事故仍造成了3人重伤，直接经济损失达800余万元，储罐及周边设施严重损毁。经专业事故调查组深入调查，事故的直接原因是该储罐氮封装置失效。

事故前，储罐甲苯继续输出，气相空间不断扩大，压力逐渐降低。正常情况下，当压力降到供氮设定值0.6 kPa时，供氮阀应自动开启补充氮气。但由于供氮阀阀芯被管内残留的铁锈、焊渣等杂质卡死而不能正常开启，氮气无法进入储罐。随着甲苯的不断输出，罐内压力不断下降，最终形成负压，大量空气被吸入储罐，与甲苯蒸气形成爆炸性的混合气体。凌晨2点左右，储罐附近电气设备发生电火花，引燃爆炸性混合气体，爆炸引发火灾。进一步查阅企业设备维护记录发现，该储罐氮封装置自2021年安装后，仅进行过2次表面检查，未按照设备维护手册要求每季度进行一次全面拆解清洗与阀芯检查。事发前最近一次维护记录显示，操作人员仅将阀门外部简单擦拭，未对阀芯等

关键部件进行检查，没有及时发现阀芯被杂质卡死的问题。

4.2 失效原因分析与优化措施实施

4.2.1 失效原因分析

在化工生产过程中，管道安装、设备检修等环节不可避免地会产生铁锈、焊渣等杂质。这些杂质随着管道内的气体或液体流动，很容易进入氮封装置的供氮阀内部。该企业在储罐建设和设备安装过程中未彻底完成管道清洁与吹扫，导致杂质残留。同时，供氮阀本身密封性能和抗杂质能力较差，阀芯与阀座间隙大，杂质进入后容易卡死阀芯，最终导致供氮阀无法正常开启^[8]。

此外，企业在设备维护管理方面存在严重漏洞。一方面是操作人员安全意识淡薄，没有对氮封装置维护重要性认识，没有严格按照维护规程执行操作。另一方面，企业缺乏有效的监督考核机制，对于设备维护工作的检查流于形式，对维护不到位的问题没有及时发现和纠正。同时，企业对操作人员的培训不到位，对氮封装置的特殊结构和维护要点没有进行专业的培训，导致操作人员在维护过程中，无法判断设备隐患^[9]。

4.2.2 优化措施实施

企业应投入资金对氮封装置供氮阀和泄氮阀进行全面升级，采用进口高性能气动薄膜调节阀。该阀采用特殊密封材料和结构设计，密封性能、抗杂质能力都更优异，阀芯与阀座间隙加工精密，有效避免杂质卡死。同时，在供氮阀和泄氮阀前端分别安装了高精度Y型过滤器，过滤精度5 μm，可以对管道内的杂质进行拦截。此外，还应定期对氮气源系统进行全面检查，更换老化的液氮储罐阀门，对制氮机进行深度维护保养，保证氮气供应稳定可靠。

企业应加强操作人员的安全培训和技能提升，邀请设备厂家技术人员

表2 化工储罐区氮封装置优化前后运行效能对比

评估指标	优化前	优化后
储罐内压力波动范围/kPa	0.3 ~ 1.2	0.5 ~ 1.0
供氮阀平均每天动作次数/次	50	30
泄氮阀平均每天动作次数/次	30	20
氮气平均日消耗量/m ³	1 000	800

和行业专家对操作人员进行专题培训，培训内容涉及氮封装置的工作原理、维护要点、常见故障判断与处理等。培训结束后组织严格考核，考核合格后方可上岗操作。同时，重新制定详细、可操作的设备维护操作规程，明确规定氮封装置一季度进行一次全面拆解清洗，每月进行一次压力传感器校准，每周进行一次阀门动作测试。建立严格的监督考核机制，由安全管理部门和设备管理部门组成联合调查组，定期对设备维护工作进行检查和考核，对维护工作不到位的人员进行严肃处理，将考核结果与绩效奖金挂钩。

企业应结合实际运行数据，运用数学模型对安全联锁控制参数进行优化。将供氮压力设定值从 0.6 kPa 提高到 0.7 kPa，泄氮压力设定值从 1.3 kPa 提高到 1.5 kPa，增大供氮和泄氮压力设定值的差值，使氮封装置在压力波动时有充足的调节空间。同时优化氮气流量控制参数，采用基于人工智能算法的自适应控制策略，实时动态地调节储罐内物料进出流量，压力变化速率等因素，提高氮封装置的响应速度和稳定性^[10]。

4.3 优化效果验证

通过半年的优化措施实施和对氮封装置运行情况的不间断监测与数据分析。结果表明，优化后氮封装置的可靠性明显提高。在相同生产工况下，氮封装置故障次数由优化前的年均 5 次降低至 1 次，故障率降低 80%。储罐内压力稳定性得到了有效地保证，压力波动范围始终控制在合理范围内，一直没有发生负压、超压报警情况。通过对氮气消耗的统计分析，优化后氮气平均日消耗量从优化前的 1 000 m³ 降低到 800 m³，降低了 20%，每年可节约氮气成本约 50 万元，同时也减轻了氮气排放对环境的影响，达到了经济效益和安全效益的双提升。

表 3 数据清晰呈现了氮封装置优

表 3 氮封装置优化效果核心评估指标对比

评估指标	优化前	优化后
氮封装置平均每年故障次数 / 次	5	1
储罐内压力波动范围 /kPa	超出合理范围次数较多 始终控制在合理范围内	
氮气消耗降低比例 (%)	-	20

化前后在核心指标上的显著变化。在可靠性方面，平均每年故障次数从 5 次大幅降至 1 次，降幅达 80%，这表明硬件升级与维护管理的强化显著提升了装置稳定性，降低了突发故障风险，减少了因故障导致的非计划停机时间，保障了储罐区的连续安全运行。压力控制维度上，优化前压力频繁超出合理范围，存在超压泄漏或负压吸瘪的潜在危险；优化后压力始终受控，说明调整后的安全联锁参数与控制策略能精准响应压力变化，维持储罐压力稳定，有效规避了因压力异常引发的安全事故。经济性表现同样突出，氮气消耗降低 20%，意味着企业在保障安全的前提下，大幅减少了氮气采购成本与资源浪费，体现了优化措施在成本控制和能源利用效率上的双重优势。这些数据充分证明，通过系统性优化，氮封装置在安全性能、运行稳定性和经济效益上均实现了质的提升。

5 结论

本文通过对化工储罐区氮封装置的深入研究，识别出了多种失效模式，包括硬件故障、软件故障、人为因素和环境因素导致的失效，并利用故障树分析等方法对失效原因进行了详细分析。在此基础上，针对安全联锁控制参数，采用基于数学模型和实际运行数据的优化方法，对供氮压力、泄氮压力、氮气流量控制等参数进行了优化。通过案例分析验证了优化措施的有效性，优化后氮封装置的可靠性和安全性得到了显著提高，储罐内压力稳定性增强，阀门动作次数减少，氮气消耗降低，取得了良好的经济效益和安全效益。

参考文献:

[1] 檀香逸, 陆荣海, 苗世茂, 等. 大型化工储罐区固定式泡沫灭火系统设计——以福建某大型化工项目为例[J]. 今日消防, 2025,10(02):106-108.

[2] 韩雷. 浅谈石油化工储罐区管道工艺与配管工艺[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025,45(02):190-192.

[3] 姜浩. 化工储罐区的管道工艺与配管工艺研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51 (01):100-102.

[4] 向抒林, 陈炜, 程伟, 等. 石油化工储罐区巡检机器人研究现状与展望[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024,41(06):1-8.

[5] 王娟. 化工储罐区管道工艺与配管工艺分析[J]. 山西化工, 2023, 43 (12):121-123.

[6] 刘宇. 石油化工储罐区管道工艺与配管工艺[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42 (15):143-144.

[7] 张世英, 李隆飞. 结合EPC项目对某沿海化工储罐区防腐地面做法的优化[J]. 天津化工, 2022, 36 (04):133-135.

[8] 尤小会. 大型化工储罐区管道工艺与配管技术分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41 (14):195-196.

[9] 王道远. 石油化工储罐区管道工艺与配管工艺[J]. 辽宁化工, 2020, 49 (07):865-866+878.

[10] 孟颖. 大型石油化工储罐区消防安全系统的设计[J]. 化工设计通讯, 2018, 44 (12):31.