

# 化工管道密封失效机理及安装过程中的泄漏防控策略

吴海君 (陕西化建工程有限责任公司, 陕西 西安 712100)

**摘要:** 化工管道密封系统的可靠性直接影响装置运行安全及经济效益, 因密封失效造成的泄漏常引发介质损失、环境污染等安全事故, 本文以某化工工程项目为研究对象, 分析管道密封失效的重点机理, 融合工程实行中的技术瓶颈, 提出有针对性的安装阶段泄漏防控工艺改良方略。建立包含密封选型、安装工艺及质量控制的全流程防控体系, 该成果为化工管道安装中加强密封可靠性给出了工程实践参照, 对保证化工装置平稳运行有着重要价值。

**关键词:** 化工管道; 密封失效机理; 泄漏防控

**中图分类号:** TQ055.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0163-03

## Mechanism of Sealing Failure in Chemical Pipeline and Leakage Prevention Strategies during Installation Process

Wu Haijun (Shaanxi Chemical Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The reliability of chemical pipeline sealing system directly affects the operation safety and economic benefits of the device. Leakage caused by sealing failure often leads to safety accidents such as medium loss and environmental pollution. This article takes a certain chemical engineering project as the research object, analyzes the key mechanism of pipeline sealing failure, integrates the technical bottlenecks in the implementation of the project, and proposes targeted strategies for improving the installation stage leakage prevention and control process. Establishing a full process prevention and control system that includes sealing selection, installation process, and quality control provides engineering practice reference for strengthening sealing reliability in chemical pipeline installation, and has important value in ensuring the smooth operation of chemical plants.

**Keywords:** chemical pipeline; Sealing failure mechanism; Leakage prevention and control

化工行业所涉介质大多具备腐蚀性、毒性以及易燃易爆等特点, 管道作为输送介质的重点通道, 其密封效能是保证装置持续稳定运行的重要保障, 一旦密封失效引发泄漏, 不光致使资源损耗, 还可能诱发火灾、爆炸或中毒等严重安全事故, 并对生态环境造成重大损害。最近几年, 国内化工领域因管道密封泄漏所致事故占比超过 23%, 突显加强密封系统可靠性的迫切需求, 目前工程实践中, 管道密封安装多倚重传统经验, 对失效机理理解不深, 防控手段缺乏针对性, 让密封失效问题频发, 本文依托某化工工程项目, 深度分析密封失效的内在机制, 系统归纳安装环节的技术瓶颈, 并提出有着针对性与可实行性的泄漏防控工艺方针。经工程应用验证, 有效增进了密封系统的可靠性, 为同类项目给出技术参照。

### 1 工程概况

该工程系服务于大型石化设施的管道网络, 重点功能在于输送原油精炼全流程中的多种物料, 含有原油、石脑油、轻质燃料油、有机化工中间产物以及具强腐蚀性的酸碱类流体, 系统设计承压能力介于 0.6 至 10.0MPa, 适用温度范围为零下 20℃至 350℃; 管径规格包含 DN50 至 DN800, 管材依据介质特性差异化选用 20# 碳素钢、304 跟 316L 奥氏体不锈钢。管

道连接主要使用法兰连接, 占比高达 78%, 其余为螺纹与焊接方式, 密封结构包含垫片、填料及机械密封等形式, 其中法兰垫片密封应用最广, 包含各类工况的关键部位, 该工程管道总长约 8600m, 含密封节点 3200 余个, 其密封系统可靠性直接关乎装置能否长期稳定运行。施工场地条件多变, 部分工段露天实行, 易受气温波动、风沙侵扰; 加之部分管线须于高处或受限空间内装配, 让密封作业难度增进, 质量控制考验加重。

### 2 化工管道密封失效核心机理解析

#### 2.1 密封面损伤诱发失效

密封面是密封系统的核心接触区域, 其表面粗糙度、平整性与完好程度直接决定密封效果, 在某工程管道施工中, 密封面受损主要由两方面因素引发: 其一为材料固有加工瑕疵, 部分法兰密封面在制造阶段即存在划痕、凹陷等缺陷, 当缺陷深度逾 0.2mm 时, 将干扰密封介质所建立的连续性密封层; 其二为运输装配环节的人为失误, 运输仓储期间未设置有效防护, 作业人员未配置专用防护器具实行法兰对位, 让密封面与工器具发生磕碰而留痕, 或在表面清洁过程中使用砂纸不当打磨, 造成表面粗糙度超出设计限定值。若密封面粗糙度 Ra 超过 3.2 μm, 垫片比较难充分填

表1 某工程不同工况密封失效原因及频次统计

工况类型	设计参数 (温度/压力)	密封型式	主要失效原因	失效频次 (次/年)	失效占比
高温高压	280℃ /9MPa	柔性石墨垫片	选型适配性不足、垫片回弹率下降	6	30%
狭小空间	150℃ /4MPa	缠绕式垫片	安装操作受限、法兰偏斜、预紧力不均	5	25%
腐蚀性介质	80℃ /2MPa	丁腈橡胶 / 氟橡胶垫片	密封件耐久性不足、介质浸蚀	7	35%
振动环境	200℃ /6MPa	金属缠绕垫片	管道振动、螺栓松动、密封件磨损	2	10%
合计	-	-	-	20	100%

满其间隙，让介质沿缝隙渗漏，引发密封功能丧失。

## 2.2 介质侵蚀导致密封性能衰减

该工程所输送介质含多种腐蚀性组分，囊括 15% ~ 25% 盐酸、20% ~ 30% 氢氧化钠溶液以及含硫物质等，此类介质可凭借化学溶解与电化学作用侵蚀密封元件及接触面，让密封效能持续弱化，针对橡胶材质垫片，强酸环境易诱发溶胀跟老化，致其硬度减少、回弹性减弱；当 Shore A 硬度由初始 75 跌至 50 以下时，即丧失可靠密封能力，强碱则易引发微裂纹，显著削弱其抗拉性能。金属密封件在含硫环境中易发生应力腐蚀开裂，尤其当温度高于 200℃、压力超过 5MPa 的高温高压条件下，腐蚀速率明显加快。

## 3 工程安装过程中密封泄漏关键技术难题

### 3.1 高温高压工况密封选型适配性不足

某工程高温高压管道段（温度逾 250℃、压力超 8MPa）面对密封元件匹配度偏低的难题，初期使用的柔性石墨垫片在此严苛条件下持续运行后，发生石墨颗粒剥落，让密封界面填充不密实，继而产生渗漏途径，实测说明：该垫片于 280℃、9MPa 工况下服役 30 天后，压缩回弹性能由初始 15% 衰减至 8%，已低于密封功能所需阈值。另外，部分法兰密封面使用凸面结构，在高压条件下易造成密封压力分布失衡，边缘区域应力过度集中，让垫片发生局部损伤；针对含氢介质工况，所选密封材料未顾及氢脆敏感性，长期服役后内部萌生细微裂纹，削弱整体密封性能，密封元件与实际运行参数适配性不足，让该段管道泄漏风险频发，平均约每 60 天即出现一次潜在泄漏，严重威胁装置长周期稳定运行。

### 3.2 狭小空间管道密封安装操作受限

该工程部分管线布设于设备夹层、框架柱间隙等受限区域，空间狭小让密封施工难度增大，构成泄漏治理的核心瓶颈，法兰对接时因缺乏适配的调平器具，易出现倾斜，实测部分节点偏差达 0.3mm/m，逾

越设计限值 0.2mm/m；螺栓紧固阶段则受操作空间制约，不易均匀施力，个别螺栓预紧力仅达设计标准的 70%，无法满足密封所需的压紧要求。除了上述内容以外，受限于作业空间狭小，密封面清洁作业比较难全面实施，粉尘、油污等污染物易滞留于密封界面，削弱其密封效能，已安装的该区域密封节点中，25% 经检测未达清洁标准，其中 12% 已发生微渗漏，操作空间局促让施工质量管控困难，变成泄漏风险突出区段。

### 3.3 管道振动导致密封系统稳定性下降

在某工程项目中，邻近泵体、压缩机等动力装置的管路系统，因设备运转引发的振动干扰，让密封性能明显弱化，实测显示，该段管道振动加速度达  $5\text{m/s}^2$ ，主频带集中于 15Hz 至 40Hz 区间；持续振动让法兰连接螺栓发生松脱，预紧力持续减少，个别螺栓降幅已达到原设计值的 30%。另外，振动还加速了密封面与密封元件的磨损进程，致使垫片偏移、形变，实际有效密封接触面积随之缩减，除了上述内容以外，管道振动会诱发密封界面发生周期性微幅错动，进而破坏由密封介质建立的连续保护膜，让介质易于经由缝隙渗漏。统计显示，该区域 60% 的密封失效事件源于振动影响，典型形式含有螺栓预紧力衰减所致泄漏及密封元件疲劳磨损引发的泄漏，所以，振动干扰已变成制约该部位密封可靠性加强的核心瓶颈跟防控焦点。

表 1 说明，该工程密封失效主要集中于腐蚀性介质、高温高压及空间受限三类工况，合计占比达 90%，在腐蚀性介质环境下失效最频繁，年均 7 次（35%），主因是密封材料抗腐蚀能力薄弱，高温高压工况占比 30%，症结在于密封结构选型跟实际运行条件匹配度偏低；空间受限工况因装配操作困难，占比 25%，振动环境虽发生率较低，仍属核心防控对象。据此，后续泄漏治理应准确锚定上述高发场景，强化措施的针对性跟实效性。

## 4 安装过程泄漏防控工法优化策略

### 4.1 高温高压工况密封选型与预紧工法优化

针对高温高压环境下密封件匹配度偏低的难题,改良了密封结构选型并升级了预紧工艺,在选型层面,以金属缠绕式增强石墨垫片替代原有柔性石墨垫片;该新型垫片由 316L 不锈钢带跟柔性石墨复合缠绕制成,具备卓越的耐温耐压能力,在 280℃、9MPa 工况下压缩回弹率达 18%,显著高于原垫片的 8%,且服役周期延长至一年以上。除了上述所说,法兰密封面使用凹凸结构,其配合精度控制在 0.02mm 以内,显著改良密封压力分布的均匀性,防止边缘应力集中,预紧工艺改良引入液压拉伸预紧技术,取代传统扳手紧固方式,利用液压拉伸器同步拉伸螺栓,保证各螺栓预紧力高度一致,偏差不超过  $\pm 5\%$ 。详细实行流程如下:先对法兰密封面实行精密加工,让它表面粗糙度控制在  $Ra \leq 1.6 \mu m$  以内,再装配金属缠绕增强型石墨垫片,并严格校准其中心位置,防止偏斜;随后安装液压拉伸装置,按组别同步施加预紧力,设定值为设计载荷的 1.1 倍,最后卸除拉伸设备,开展螺栓预紧力复检。经此工艺精进,高温高压环境下密封失效次数由年均 6 次减少至 1 次,整体密封稳定性大幅增强。

### 4.2 狭小空间密封安装精准操作工法应用

为解决受限空间内安装作业困难的考验,创新性地建立并实行了狭小区域密封安装精确定位工艺,其关键在于使用特制微型施工装备及高精度定位系统,显著增强装配精度与可靠性,定制化装备包含便携式法兰调平仪、微型力矩扳手及弹性清洁刷:便携式法兰调平仪体积缩减至传统型号的三分之一,质量低于 2 千克,适用于受限空间,可精确测定法兰倾斜度,分辨率达 0.01mm/m,微型力矩扳手力矩调节区间为  $10N \cdot m \sim 500N \cdot m$ ,示值误差不超过  $\pm 3\%$ ,保障密闭区域螺栓预紧力准确施加;弹性清洁刷选用高分子柔性材质,能有效伸入狭窄缝隙清除密封面异物,清洁效能增加四成。该精确定位装置使用磁吸式法兰校准器,借助磁场吸附作用实现法兰临时稳固,保障其同轴度误差不超过 0.1mm/m,施工流程如下:先以柔性清洁刷全面清除密封面污物,再利用白光干涉仪检验其洁净程度,杜绝任何残留,随后装配磁吸式法兰定位装置,校准法兰方位,并借助便携式找平仪测定倾斜度,直至达标,继而安放密封垫圈,借助专用导引设备保障其中心对齐;最终使用微型扭矩扳手,依对角线顺序分三阶段拧紧螺栓,施加扭矩分别为设计值的 50%、80% 及 100%,实现预紧力均匀分布。该工艺实行后,狭小区域密闭装配一次合格率由 75% 升

至 98%,渗漏风险发生率控制在 3% 以内。

### 4.3 振动环境管道密封防松减振一体化工法

为解决管道振动引发的密封系统失稳问题,提出集减振与防松功能于一体的融合工艺,在减振方面,使用橡胶阻尼支架(阻尼系数不低于 0.3)跟金属波纹柔性接头协同作用:前者可高效耗散振动能量,使振动加速度由  $5m/s^2$  压降至  $1.5m/s^2$  以内;后者具备 10mm 位移补偿能力,有效隔断振动向密封区域的传导途径,继而全面增强密封结构的稳定性跟可靠性。防松方案融合双螺母锁紧与预紧力动态监测:主螺母跟锁紧螺母间靠着界面摩擦阻力抑制松脱,同时在螺栓头部集成无线应力传感装置,持续获取预紧力数值,一旦衰减幅度逾 5%,系统即刻触发预警,施工流程如下:先于管道振源邻近区域布设阻尼型减振支座,支座间隔控制在 3 至 5m 范围内,继而在密封连接部位前后各 1m 处装配金属波纹式柔性接头,保证其与管轴线同轴误差不得超过 0.5mm,随后以双螺母结构固定螺栓,依设计预紧力施拧并最终锁紧防松螺母;最后布设无线应力传感装置,并完成其跟监控平台的联调联试。实行该工艺后,密封节点处螺栓因振动致使的松脱问题完全杜绝,年均密封失效次数由 2 次归零,整体密封可靠性大幅增强。

## 5 结语

工程实践验证显示,经改良的防控工艺能显著减少密封失效次数,增强密封系统的可靠性,尤其在腐蚀性介质及高温高压等高发失效工况下,密封失效频率降幅均逾 70%,本研究为化工管道安装中的密封泄漏防控给予了切实有效的技术途径,对保障装置长周期稳定运行、减少安全风险及增强经济效益有着重要工程应用价值。将来可加强密封系统长效服役性能监测,融合大数据分析手段,建立失效预警机制,持续增强其智能防控能力。

### 参考文献:

- [1] 王绪梅,刘秀敏,吴桂芬,等.化工工程工艺管道安装安全风险控制措施分析[J].山西化工,2025,45(08):192-194+233.
- [2] 濮俊.化工管道安装过程中的质量控制要点与技术问题[J].当代化工研究,2025,(15):191-193.
- [3] 高吉祥,孙洪凯,赵星.化工装置干气密封管道试压安全技术研究[J].流程工业,2025,(07):16-18.
- [4] 李虎.化工管道装置中泵类设备安装常见问题研究[J].化学工程与装备,2024,(10):111-113.
- [5] 刘九竹,孙沛,唐玮.化工管道设计风险和优化方法分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):17-19.