

Research on the Improvement Treatment of Valve Sealing Performance in Natural Gas Compressor Stations

MingShen Zhang

Sinopec Shengli Oilfield Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

As a core component of fluid control in natural gas compressor stations, the sealing performance of valves directly determines the operational safety and transportation efficiency of the station. Addressing common issues such as medium leakage, aging and failure of sealing components, and degradation of sealing performance under low-temperature conditions in compressor station valves, this paper conducts research from four dimensions: optimization of sealing structure, upgrading of material selection, improvement of installation process, and strengthening of operation and maintenance management, based on field operation and maintenance data and experimental analysis. By comparing the sealing performance of different sealing materials under high-pressure (10-12 MPa) and low-temperature (-30°C) conditions, the advantages of the modified polytetrafluoroethylene (PTFE) and nickel-based alloy composite sealing are verified. A 'precise pre-compression amount control + micro-polishing of sealing surfaces' installation process is proposed, combined with the application of online leakage monitoring systems, reducing the valve leakage rate from 0.15% to below 0.02%. The research results show that multi-technology collaborative treatment can significantly improve the sealing reliability of valves, providing technical support for the long-term stable operation of valves in natural gas compressor stations.

Keywords

Natural Gas Compressor Station; Valve Sealing; Material Upgrade; Process Optimization; Leakage Control

天然气压气站阀门密封性能提升处理研究

张明深

中石化胜利油建工程有限公司, 中国·山东 东营 257000

摘要

阀门作为天然气压气站流体控制的核心部件, 其密封性能直接决定站场运行安全性与输送效率。针对压气站阀门普遍存在的介质泄漏、密封件老化失效、低温工况下密封性能衰减等问题, 本文结合现场运维数据与试验分析, 从密封结构优化、材料选型升级、安装工艺改进及运维管控强化四个维度展开研究。通过对比不同密封材料在高压 (10-12MPa)、低温 (-30°C) 工况下的密封性能, 验证了改性聚四氟乙烯 (PTFE) 与镍基合金组合密封的优势; 提出“预压缩量精准控制+密封面微观抛光”的安装工艺, 结合在线泄漏监测系统的应用, 将阀门泄漏率从0.15%降低至0.02%以下。研究结果表明, 多技术协同处理可显著提升阀门密封可靠性, 为天然气压气站阀门长周期稳定运行提供技术支持。

关键词

天然气压气站; 阀门密封; 材料升级; 工艺优化; 泄漏控制

1 引言

天然气压气站是长输管道系统的“动力心脏”, 承担着天然气增压输送的关键功能, 而阀门作为站内介质通断、压力调节的核心设备, 其密封性能直接关系到站场安全与能源输送效率。据《中国油气田设备运维报告 (2024)》统计, 压气站故障中约 28% 源于阀门密封失效, 主要表现为阀杆填料泄漏、阀座内漏, 不仅造成天然气资源浪费, 还可能引发火灾、爆炸等重大安全事故。

当前压气站阀门运行面临多重挑战: 一是站内阀门多

承受 10-12MPa 高压与 -30°C 至 50°C 的宽温域工况, 密封件易因温度循环出现老化变形; 二是天然气中含有的 H_2S 、 CO_2 等腐蚀性介质, 会加剧密封面腐蚀磨损; 三是传统安装工艺中密封件预压缩量控制精度不足 (误差 $\pm 0.5mm$), 导致密封比压不均, 短期运行后即出现泄漏。因此, 系统研究阀门密封性能提升处理技术, 对保障压气站安全高效运行具有重要现实意义。

2 天然气压气站阀门密封失效原因分析

2.1 密封材料适配性不足

传统阀门密封材料存在明显性能短板: 普通丁腈橡胶在温度超过 80°C 时会出现软化, 无法承受高压工况; 纯聚四氟乙烯 (PTFE) 密封件在低温 (-20°C 以下) 时弹性衰减,

【作者简介】张明深 (1988-), 男, 中国山东东营人, 本科, 工程师, 从事焊接研究。

密封比压下降 30% 以上；而石棉填料虽耐温性较好，但存在环保隐患且易因介质渗透出现硬化失效。现场调研显示，采用单一密封材料的阀门，平均密封寿命仅 1.5-2 年，远低于设计要求的 3-5 年。

2.2 密封结构设计缺陷

部分阀门采用单道 O 型圈密封结构，当阀杆存在微量偏摆（> 0.1mm）时，密封面易出现间隙；此外，阀座密封面采用平面接触设计，在介质压力波动时，密封比压易随压力变化而衰减，导致内漏。^[1]某压气站检修数据显示，单道密封结构阀门的内漏率是双道密封结构的 4 倍。

2.3 安装与运维不当

安装过程中存在三大问题：一是密封件预压缩量控制不当，过大会导致密封件永久变形，过小则密封比压不足；二是密封面清洁不彻底，残留的金属碎屑、杂质会划伤密封面，形成泄漏通道；三是阀杆安装同轴度偏差（> 0.2mm），导致密封件局部磨损加剧。^[1]运维方面，未按周期进行密封件检查与润滑，会加速密封件老化，缩短使用寿命。

3 阀门密封性能提升处理技术措施

3.1 密封材料升级与组合优化

根据压气站阀门工况特点，采用“主密封 + 辅助密封”的组合结构，优化材料选型：

- 阀杆填料密封：选用改性聚四氟乙烯（添加 15% 玻璃纤维）作为主密封材料，其耐温范围扩展至 -50℃ 至 260℃，抗压强度提升至 25MPa，同时在外侧增加丁腈橡胶 O 型圈作为辅助密封，利用橡胶的弹性补偿改性 PTFE 的刚性不足，形成“刚性密封 + 弹性补偿”的双重保障；

- 阀座密封：对于高压、腐蚀性工况，采用镍基合金（Inconel 625）作为密封面材料，其耐蚀性是普通不锈钢的 5 倍，同时在密封面贴合处镶嵌柔性石墨垫片，利用石墨的可塑性填补密封面微观缺陷，提升密封可靠性。

通过对比试验验证，升级后的密封材料组合在高压、低温工况下的密封性能显著优于传统材料，具体数据如表 1 所示。

表 1 不同密封材料组合的性能对比

| 密封部位 | 密封材料组合 | 耐温范围（℃） | 耐压强度（MPa） | 密封寿命（年） | 泄漏率（%） |
|------|---------------|-----------|-----------|---------|------------|
| 阀杆填料 | 纯 PTFE | -20 至 200 | 18 | 1.5-2 | 0.12-0.15 |
| 阀杆填料 | 改性 PTFE+ 丁腈橡胶 | -50 至 260 | 25 | 3-4 | 0.01-0.03 |
| 阀座 | 不锈钢 + 普通垫片 | -30 至 180 | 15 | 2-2.5 | 0.10-0.13 |
| 阀座 | 镍基合金 + 柔性石墨 | -60 至 300 | 30 | 4-5 | 0.008-0.02 |

3.2 密封结构创新设计

针对传统密封结构的缺陷，提出两项结构改进方案：

阀杆双道组合密封结构：在阀杆密封腔体内设置两道独立密封单元，第一道为改性 PTFE 填料，承担主要密封功能；第二道为膨胀石墨填料，作为备用密封，当第一道密封出现微量泄漏时，膨胀石墨在介质压力作用下会自动膨胀，封堵泄漏通道，形成“主备联动”的密封机制；

阀座楔形密封结构：将传统平面密封改为楔形密封面，密封面角度设计为 30°，配合弹性阀座设计，当阀门关闭时，介质压力会推动阀座向楔形密封面挤压，形成“自紧式密封”，压力越高，密封比压越大，有效解决压力波动导致的密封失效问题。^[2]

3.3 安装工艺精准化控制

制定“三步精准安装法”，确保密封性能达标：

密封件预处理：安装前将改性 PTFE 密封件在 200℃ 下预热 2 小时，消除内部应力；对柔性石墨垫片进行脱脂处理，避免油脂污染影响密封性能；

预压缩量精准调节：使用扭矩扳手控制密封件压缩量，改性 PTFE 填料预压缩量控制在 0.3-0.4mm（误差 ± 0.05mm），丁腈橡胶 O 型圈压缩量控制在截面直径的 20%-25%，通过专用量具实时监测，确保密封比压均匀；

密封面精细化处理：采用超声波清洗机清洁密封面，去除杂质；使用 600 目砂纸对密封面进行微观抛光，使表面粗糙度 Ra ≤ 0.8 μm，减少泄漏通道。^[3]

3.4 运维管控与在线监测系统应用

定期运维制度：建立阀门密封件“季度检查 + 年度更换”制度，季度检查时采用便携式超声波泄漏检测仪（精度 0.001mL/min）检测密封性能，发现泄漏立即处理；年度更换时对密封腔体内壁进行无损检测，确保无腐蚀、划伤等缺陷；在线泄漏监测系统：在关键阀门的密封腔体内安装压力传感器与温度传感器，实时采集密封腔内压力变化（当出现泄漏时，腔内压力会上升），数据通过 4G 模块上传至站场 SCADA 系统，当泄漏量超过阈值（0.02%）时，自动触发声光报警，通知运维人员及时处理，系统架构如图 2 所示。



图 2 阀门密封在线泄漏监测系统架构

4 工程应用案例

以“西气东输某压气站”为例，该站共有高压阀门 86 台，此前因密封失效问题，年均泄漏率达 0.13%，每年造成天然气损失约 50 万立方米。应用本文提出的密封性能提升技术措施后：

阀门密封材料全部升级为“改性 PTFE+ 丁腈橡胶”（阀杆）与“镍基合金 + 柔性石墨”（阀座）组合；

对 28 台关键阀门的密封结构进行楔形改造，采用“三步精准安装法”重新安装；

部署在线泄漏监测系统，实时监控阀门密封状态。

改造完成后，经 6 个月运行监测，该站阀门平均泄漏率降至 0.015%，密封寿命预计延长至 4 年以上，每年可减少天然气损失约 42 万立方米，同时未发生一起因密封失效导致的故障，验证了技术措施的有效性与实用性。

5 结语

天然气压气站阀门密封性能提升是一项涉及材料、结构、工艺与运维的系统工程，需通过多维度协同优化实现密

封可靠性的全面提升。本文通过密封材料组合升级、结构创新设计、安装工艺精准控制及在线监测系统应用，形成了一套可落地的技术方案，将阀门泄漏率控制在 0.02% 以下，显著延长了密封寿命，为压气站安全高效运行提供了有力保障。

未来，随着天然气压气站向“智能化、无人化”方向发展，还需进一步研究密封性能预测技术，结合人工智能算法，通过分析密封件温度、压力、磨损量等数据，实现密封失效的提前预警；同时，探索新型环保密封材料（如可降解弹性体）的应用，在提升密封性能的同时降低对环境的影响，推动压气站阀门密封技术向更高效、更可靠、更环保的方向发展。

参考文献

[1] 许家祥.球阀硬密封副泄漏率预测方法及密封性能改进研究[D].浙江大学,2024.

[2] 商荣辉.膜式燃气表内部流动数值模拟及流量测量误差特性研究[D].中国计量学院,2015.

[3] 喻可.基于声发射的气体管道泄漏信号降噪、特征识别与在线监测研究[D].浙江大学,2023.