

天然气长输管线全焊接球阀密封性能研究

张琳 姜锦波 杨凡(国家管网集团西北公司西安输油气分公司,陕西 西安 710018)

摘要:天然气长输管道的安全可靠性取决于全焊接球阀的密封可靠性。球阀密封的失效会影响能量传输效率和环境保护效果。本文在实际运行条件下系统研究了球阀密封对失效的原因,并考虑了密封材料、结构设计、制造工艺及实际管道运行条件。通过结合理论分析与工程实践,能够为密封性能提供更具针对性的技术干预措施和管理建议。

关键词:天然气长输管线;全焊接球阀;密封性能;阀座密封;可靠性

中图分类号:TE974 文献标识码:A 文章编号:1674-5167(2025)031-0099-03

Research on the sealing performance of fully welded ball valves for natural gas long-distance pipelines

Zhang Lin, Jiang Jinbo, Yang Fan(National Pipeline Network Group Northwest Company Xi'an Oil and Gas Branch,Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: The safety and reliability of natural gas long-distance pipelines depend on the sealing reliability of fully welded ball valves. The failure of ball valve seals can affect energy transmission efficiency and environmental protection effectiveness. This article systematically studies the causes of failure of ball valve seals under actual operating conditions, considering sealing materials, structural design, manufacturing processes, and actual pipeline operating conditions. By combining theoretical analysis with engineering practice, more targeted technical intervention measures and management suggestions can be provided for sealing performance.

Keywords: natural gas long-distance pipelines; Fully welded ball valve; Sealing performance; Valve seat sealing; reliability

随着我国长距离天然气管道建设规模的持续扩大,全焊接球阀作为管道系统里重要的控制装置,其密封性能的可靠性已然成为能源运输安全的核心技术指标之一。当前,球阀密封失效的风险将因极端压力波动和腐蚀性介质而得到验证,所以必须借助系统性研究来开发有效的解决方案。本研究先是针对密封对的接触力学性能展开分析,结合长距离管道的实际工作环境,着重对影响密封性能的关键因素进行探讨。研究目的在于探索先进密封材料以及新型结构设计的应用潜力,进而构建一套系统性、综合性的技术框架,该框架用于在工程实践中提升密封性能,以此为行业技术改进提供支持。

1 全焊接球阀密封性能的理论基础

1.1 全焊接球阀的密封原理与结构特点

全焊接球阀作为天然气长输管线的关键控制设备,其密封性能直接关系到输送系统的安全稳定运行。该类阀门的整体阀体采用焊接连接方式,避免了传统法兰连接可能存在的泄漏风险,特别适用于高压大口径工况。其核心密封机制依赖于阀座与球体之间精密匹配形成的预紧比压,在管线投入运行后介质压力会进一步推动阀座压向球体,形成双重密封效应。实际施工过程中作业团队需要严格把控焊接工艺质量,避免热影响区对密封元件的损伤,同时注重安装过程中

的同心度校准,确保阀门在埋地环境下长期保持零泄漏状态^[1]。

1.2 阀座密封副的接触力学与失效机理

阀座密封副的接触力学行为直接决定了全焊接球阀的密封可靠性。在管道施工阶段,密封副的预紧比压需要精确计算以适应现场工况,其接触应力分布必须保证即使在压力波动时仍能维持有效密封。密封材料的蠕变特性与应力松弛现象可能引起初始预紧力衰减,施工过程中需充分考虑介质温度与压力对密封面匹配度的长期影响。实际安装时需要控制管道应力对阀体的外部载荷,避免附加力矩导致密封副产生不均匀变形。密封副的失效往往始于微观磨损的累积,因此在阀门选型阶段就应重视材料抗磨损性能与工况的适配性。

1.3 天然气长输管线工况对密封的特殊要求

天然气长输管线的实际运行工况对全焊接球阀密封性能提出了区别于普通阀门的特殊要求。天然气介质在高压输送过程中产生的压力波动会形成周期性载荷,密封结构必须保持足够的弹性补偿能力以适应这种动态变化。管线启停阶段存在的温度梯度变化可能导致阀体与密封材料产生不同的热膨胀,设计时需要预留恰当的热变形补偿余量。输送介质中可能携带的微量硫化氢与二氧化碳等酸性组分要求密封材料具备

优异的耐腐蚀特性。冬季低温环境对橡胶类密封材料的低温弹性保留率提出挑战，极端情况下可能影响密封副的贴合效果。山区地段管道存在的潜在地质灾害风险要求阀门密封系统在管道轻微变形时仍能维持正常工作。这些特殊工况条件都需要在阀门设计选型阶段予以充分考虑，具体影响因素如下表所示。施工团队在安装调试过程中需要针对不同区段的工况特点采取相应的预防性措施^[2]。

1.4 密封性能的评价指标体系

对于全焊接球阀的质量控制而言，建立科学完善的密封性能评价指标体系有着重要意义。必须遵循国际通用的气泡级泄漏标准来进行密封等级的划分，不同压力等级的阀门要对应相应的密封试验规范。对阀门在模拟工况下的启闭循环次数进行考察的寿命周期指标，能反映密封材料的耐久性能。评价阀门在温度压力波动条件下密封稳定性的工况适应性指标，涉及密封副的弹性恢复能力与结构完整性。包含高压气密封试验与低压灵敏性试验的现场验收测试，用来验证阀门在实际安装状态下的密封可靠性。型式试验还得考核阀门在极端工况下的性能表现，为产品选型提供数据支撑。由这些评价指标共同构成的完整的密封性能评估框架，对制造企业与施工团队开展质量控制工作能起到指导作用。

2 影响全焊接球阀密封性能的关键问题

2.1 密封材料性能与工况匹配性问题

在长输管线里，全焊接球阀长期服役表现与密封材料的选择直接相关。针对不同材质的密封件，其对温度压力的适应范围有着显著差别，就像聚合物材料于低温环境易脆化，而金属密封在高温工况下或许会出现应力松弛现象。鉴于输送介质含有酸性组分，密封材料需具备良好耐腐蚀特性来维持表面完整性。施工团队在安装前，要仔细核对设计图纸中的材料规格，确保密封件材质和管线输送介质特性完全契合。对于特殊工况段落的阀门安装，建议增添材料验证测试环节，实地考查密封材料在具体工况下的适用性。材料供应商应提供完整的技术参数证明，涵盖耐温范围、耐腐蚀性能以及机械强度指标。

2.2 极端压力与温度波动对密封比压的影响

输送介质中夹带的固体颗粒在高速流动状态下会对密封表面产生持续的冲刷作用。这些微小颗粒在密封副相对运动时嵌入软质密封材料表面形成贯穿性划痕。含有酸性组分的天然气介质与密封材料发生化学腐蚀反应导致表面完整性破坏。腐蚀产物在密封接触区域的堆积影响密封副的紧密贴合效果。管道施工过程中遗留的焊渣或杂质在投产初期加剧了对密封面的

磨损风险。

2.3 固体颗粒冲刷与介质腐蚀导致的密封损伤

天然气输送过程中携带的焊渣和管道内壁剥落物形成固体颗粒流，这些杂质随介质流动时持续冲击阀座密封面。软质密封材料表面逐渐出现微观划痕，随着运行时间积累形成贯穿性磨损通道。含有硫化氢的酸性介质与金属阀座材料产生电化学腐蚀，表面生成的腐蚀产物降低了密封面的光洁度。腐蚀坑洞与冲刷痕迹在密封接触区域形成复杂的损伤形貌，破坏了密封副的线性接触特性。管道投产前吹扫作业若未彻底清除施工残留物，会在运行初期加速密封面的磨损进程。长期运行后密封表面的复合损伤表现为材料流失与表面粗糙度增加的特征，影响密封比压的均匀分布^[3]。

2.4 制造与装配偏差对密封面吻合度的挑战

制造过程中的精度控制直接影响全焊接球阀密封面的吻合质量。机械加工环节存在的尺寸公差导致球体圆度与阀座密封面之间存在微观不匹配现象。装配作业时各部件间的同轴度偏差会改变密封副的理论接触轨迹，影响预紧力的均匀分布。管道安装时产生的附加应力传递至阀体可能引起结构变形，破坏原有的密封面配合状态。焊接施工的热输入量控制不当会造成局部热影响区变形，改变密封副的相对位置关系。现场调试阶段的多次启闭操作可能加剧初始存在的轻微不吻合状况，导致密封比压分布不均。

3 提升全焊接球阀密封性能的技术措施

3.1 新型密封材料与表面强化技术的应用

在长输管道施工实践中，聚四氟乙烯材料凭借其稳定的化学特性与宽广的耐温范围成为阀座密封件的优选材料。该材料在零下四十五度至二百三十度工况范围内保持稳定的弹性模量，其分子结构有效抵抗天然气中酸性组分的侵蚀。碳化钨喷涂技术在金属密封面形成致密的耐磨层，喷涂作业时控制层厚在零点三至零点五毫米范围，施工过程中采用磁性测厚仪实时监测涂层均匀性。阀门组装前对强化处理后的密封面进行着色探伤检测，确保表面不存在影响密封性能的微观缺陷。材料进场验收时核验材质证明文件，现场抽样送检确认材料物性指标符合设计规范。施工记录完整记载密封件批次编号及安装位置，建立可追溯的质量档案。

3.2 先进密封结构设计

双阻断泄放结构在施工阶段需要重点控制两道独立密封副的装配精度，安装团队使用激光对中仪保证阀球与阀座的同轴度偏差不超过零点零五毫米。泄放管路采用不锈钢管螺纹连接方式，施工时按照扭矩要求逐级紧固并采用密封胶带增强密封可靠性。压力监

测接口预留标准测试接头，其安装位置避开管线应力集中区域且便于后期操作维护。在线检测时通过泄放阀连接压力仪表，观察两道密封间的压力变化情况判断主密封状态。该结构在管线试压阶段可分别测试每道密封的承压能力，施工记录需详细记载各密封副的测试数据^[4]。

3.3 精密加工与智能装配工艺控制

精密加工工艺要求阀球圆度误差控制在零点零二毫米以内，数控机床采用金刚石刀具进行最终精加工工序。智能装配系统通过液压伺服装置控制阀杆安装过程的垂直度，实时监测压装曲线避免异常力值损伤密封部件。密封副配对工序采用蓝油接触印痕检验法，确保阀球与阀座接触带宽度达到设计标准。装配车间保持恒温恒湿环境，所有紧固作业使用数字扭矩扳手记录实际扭矩值。关键工序配备影像测量仪抽检零部件尺寸，建立加工质量数据库实现全过程追溯。现场安装时采用激光对中仪调整阀门与管道法兰的平行度，最大限度减少安装应力对密封性能的影响。

3.4 状态监测与预测性维护技术应用

在长输管道运行期间安装声学传感器监测阀门启闭过程的噪声特征，其声波频谱变化可反映密封副的磨损状态。维护团队定期通过双阻断泄放阀测量密封腔压力数据，建立压力衰减曲线与密封性能的对应关系。智能诊断系统整合阀门动作次数与工况参数，当监测数据超出预设阈值时自动生成维护提醒。现场人员使用便携式检测仪器采集密封部位的温度与振动数据，补充完善状态监测数据库。历史运行数据经过趋势分析算法处理后可预测密封件的剩余使用寿命，为计划性检修提供决策依据。

4 天然气长输管线全焊接球阀密封性能研究的优化建议

4.1 加强密封失效机理与寿命预测研究

研究团队应当系统收集不同服役年限的退役阀门密封部件，运用微观检测设备观察密封表面的磨损形貌与损伤特征，建立密封失效模式的图谱库。实验室需要搭建模拟长输管道实际工况的试验平台，该平台能够复现压力波动与温度变化的综合作用环境，记录密封材料在模拟工况下的性能演化数据。工程技术部门结合现场维护记录与实验室数据，归纳密封失效与工况参数之间的定量关系，形成基于实际运行条件的失效判据。基于大量实验数据开发密封寿命预测模型，该模型需要整合材料性能参数、运行工况变量及环境因素等多重影响因子。现场人员在阀门安装阶段布置应力传感器监测阀体受力状态，为寿命预测提供真实的载荷谱输入。

4.2 推动高性能密封材料的国产化研发

国内密封材料制造企业应当与管道工程建设单位建立产学研合作机制，针对长输管线实际工况，进行专用密封材料配方的联合开发。材料研发过程中，需要重点考察在压力交变条件下的弹性恢复特性，以及在不同温度区间的尺寸稳定性表现。第三方检测机构应建立完善的密封材料评价实验室方面，测试项目需将介质相容性试验和长期老化性能验证包含。在新建管道项目里，施工单位要安排国产密封件的试点应用，对安装调试过程中的性能数据详细记录，并与进口产品进行对比分析。材料生产企业根据现场试用反馈持续优化产品配方和工艺参数，形成持续改进的产品优化机制。行业主管部门可在组织制定密封材料技术标准和验收规范方面，为国产密封件在重大管道工程中的规模化应用，提供技术依据^[5]。

4.3 完善密封性能测试与行业标准体系

针对当前全焊接球阀现场应用中密封性能评价标准与实际工况存在差异的情况，建立科学且全面的测试验证体系有着现实的紧迫性。行业主管部门应当牵头联合阀门制造企业以及相关技术机构，对现有技术规范中关于密封性能测试的条款内容进行重新梳理，着重补充适应长输管线特殊运行环境的测试项目。检测中心负有建立区域性阀门长期性能数据库的责任，收录像北方冬季低温密封件脆化案例、沿海盐雾腐蚀数据等典型失效样本，为定期修订试验标准提供实证方面的支撑。

5 结语

本文系统性地探讨了天然气长输管道中全焊接球阀的密封性能特性，识别了影响密封可靠性的关键因素及技术挑战。本文提到的密封材料优化方法、结构设计改进以及智能维护技术，为提升球阀密封性能提供了切实可行的实施路径。未来研究应当把重点放在密封失效机制的深入分析以及寿命预测模型的优化上，目的是将国内密封技术提升到国际先进水平，从而为中国能源基础设施建设提供可靠的技术支撑。

参考文献：

- [1] 李树勋,把桥环,贺连娟,等.天然气长输管线全焊接球阀的密封研究[J].润滑与密封,2007,32(1):4-4.
- [2] 刘杏,杨武.天然气长输管线应力腐蚀破裂的敏感环境条件[J].机械工程材料,2002:11-12.
- [3] 范永亮.天然气长输管线的自动化现状及发展前景[J].中国石油和化工标准与质量,2014(10):1-1.
- [4] 何鹏程.天然气长输管线施工技术及运行管理[J].油气田地面工程,2013(9):11-11.
- [5] 王同浩.天然气长输管线泄漏检测与定位系统的实施[D].北京化工大学,2006:7-8.