

加氢装置阀门选用与泄漏预防技术研究

杨雷^{1,2}

1. 河北飞天石化集团有限公司; 2. 河北飞天未来能源科技有限公司

摘要: 加氢工艺是石油炼制过程中的核心环节, 其高温、高压、临氢的苛刻工况, 对阀门的安全性 & 可靠性提出了极高要求, 而阀门的安全可靠运行直接关乎装置的生产效率与安全生产。作为加氢装置中控制流体流动的关键部件, 阀门需长期承受高温、高压、临氢、湿硫化氢腐蚀及操作参数 (温度、压力) 波动等严苛条件的考验。本文深入探讨了加氢装置阀门的常见故障及选用原则, 涵盖阀门损坏形式、类型、结构以及材料等方面的注意事项与选择要点; 结合阀门失效案例, 从材料氢脆、密封面损伤等维度剖析泄漏诱因, 分析阀门内漏的成因及解决措施; 同时系统阐述了防止阀门泄漏与内漏的综合技术策略, 旨在为加氢装置阀门的合理选用与可靠运行提供全面技术指导, 保障加氢装置安全稳定生产。

关键词: 加氢装置; 阀门选用; 泄漏预防; 内漏治理; 高温高压; 临氢环境

加氢装置通过将氢气与重质油在高温高压下进行化学反应, 转化为轻质燃料油, 显著提高了原油的收率与产品质量。然而, 加氢装置的运行条件极为苛刻, 涉及高温 (300 ~ 450℃)、高压 (10 ~ 20 MPa)、临氢以及硫化氢腐蚀等多种复杂因素^[1]。阀门作为控制流体流动的关键设备, 其性能直接关系到整个装置的安全性 & 可靠性。一旦阀门失效发生泄漏或内漏故障, 可能会引发火灾、爆炸等重大事故, 还可能导致物料损失、环境污染引发环境事故。

因此, 研究阀门的科学选型与泄漏防控技术对装置安全性和经济性至关重要。

1 阀门的常见故障

1.1 阀体渗漏

阀体渗漏故障原因: 1) 阀体铸造质量不达标, 阀体有砂眼或裂纹; 2) 焊接工艺不当而导致应力裂纹, 或阀体补焊过程中因操作不当产生拉裂。

相关处理措施: 1) 对疑似裂纹部位进行打磨处理后, 采用 4% 硝酸溶液浸蚀检测, 裂纹缺陷可通过该方式显现, 或直接采用渗透检测 (PT) 确认缺陷; 2) 针对检测发现的裂纹, 采取挖补焊接方式进行修复处理。

1.2 阀杆及与其配合的丝母螺纹损坏或阀杆头折断、阀杆弯曲

阀杆及与其配合的丝母螺纹损坏或阀杆头折断、阀杆弯曲故障原因: 1) 操作不规范, 开关阀门时用力过大, 或阀门卡涩、限位装置失效且过力矩保护装置未正常动作; 2) 阀杆与丝母的螺纹配合精度不足, 存在过松或过紧问题; 3) 阀门操作频次过高、使用年限过长, 导致部件自然老化损坏。

相关处理措施: 1) 改进操作, 不可用力过大; 检查限位装置, 检查过力矩保护装置; 2) 选用适配的阀杆与丝母材料, 严格控制装配公差, 保证配合精度; 3) 对损坏的阀杆、丝母等部件, 直接更换备品备件。

1.3 阀盖接合面漏

故障原因: 1) 螺栓紧固力矩不足, 或紧固过程中受力不均存在偏紧现象; 2) 密封垫片选型不符合工况要求, 或垫片存在破损、老化等损坏情况; 3) 阀盖与阀体的结合面加工存在缺陷, 如平整度不达标、划痕等。

处理措施: 1) 对螺栓进行重新紧固, 确保紧固力矩均匀, 使门盖与法兰间的间隙保持一致; 2) 更换符合工况要求的全新密封垫片; 3) 对阀门进行解体, 对门盖密封面进行研磨修复, 确保密封面精度达标。

1.4 阀门内漏

故障原因: 1) 阀门关闭操作不到位, 未实现完全密封; 2) 密封结合面 (如闸板与阀座接触面) 存在损伤, 具体损伤形式如图 1 所示; 3) 阀芯与阀杆的装配间隙过大, 导致阀芯下垂, 进而造成密封面接触不良; 4) 密封材料性能不达标如耐温、耐压性不足, 或阀芯因异物卡滞导致密封失效。

处理措施: 1) 规范操作流程, 对阀门进行重新开启后再关闭, 确保关闭到位; 2) 对阀门进行解体, 对阀芯与阀座的密封面进行重新研磨, 恢复密封精度; 3) 调整阀芯与阀杆的装配间隙至设计标准, 或直接更换受损的阀瓣部件; 4) 拆解阀门, 清除阀芯卡滞异物, 消除卡涩问题; 5) 更换适配工况的密封件, 或对密封面进行堆焊修复后重新研磨。

1.5 阀芯与阀杆脱离, 造成开关失灵

故障原因: 1) 阀门检修工艺不当, 维修操作不规范; 2) 阀芯与阀杆结合部位受介质腐蚀, 导致连接失效; 3) 阀门开关操作用力过猛, 造成阀芯与阀杆结合处机械损坏 (具体损坏形式如图 2 所示); 4) 芯止退垫片松脱, 或阀芯与阀杆连接部位出现磨损。

处理措施: 1) 阀门检修过程中, 加强对阀芯与阀杆连接部位的专项检查, 及时排查隐患; 2) 更换采用耐腐蚀材质制造的阀杆, 提升连接部位抗腐蚀能力; 3) 规范操作流程, 严禁强力开关阀门, 且阀门全开后不得继续强行开启; 4) 检查连接部位零部件状态, 更换受损的止退垫片、阀芯或阀杆等备品备件。

1.6 阀芯、阀座有裂纹

故障原因: 1) 阀芯、阀座密封面堆焊工艺不佳, 焊接质量未达标准; 2) 阀门两侧温度差异过大, 导致部件因热应力产生裂纹。

处理措施: 对裂纹部位进行补焊修复, 补焊后严格按照工艺要求进行热处理,

再通过车削加工平整密封面, 并进行研磨处理, 恢复其密封精度。

1.7 阀杆升降不灵或开关不动

故障原因: 1) 冷态下阀门关闭过紧, 受热后部件膨胀导致卡滞, 或阀门全开后紧固过度, 造成操作卡涩; 2) 填料压紧力过大, 导致阀杆运行阻力增加; 3) 阀杆装配间隙过小, 受热膨胀后无法正常活动; 4) 阀杆与丝母配合过紧, 或两者配合丝扣出现损坏; 5) 填料压盖安装偏差, 存在压偏现象; 6) 阀杆发生弯曲变形; 7) 介质温度过高, 阀杆润滑不良, 且长期使用后出现严重锈蚀。

处理措施: 1) 对阀体加热后用力缓慢试开或开足并紧时再稍关; 2) 适当松开填料压盖, 减小阀杆运行阻力后试开; 3) 按设计标准适当增大阀杆装配间隙, 避免热胀卡滞; 4) 对配合过紧或丝扣损坏的阀杆与丝母, 直接进行更换; 5) 重新调整填料压盖螺栓, 确保压盖安装平整, 无偏斜; 6) 对弯曲的阀杆进行校直处理, 无法校直的则予以更换; 7) 针对高温工况, 可采用纯净石墨粉作为阀杆润滑剂, 提升润滑效果。

1.8 填料泄漏

故障原因: 1) 填料材质选型不当, 无法适配工况要求; 或填料长期使用后老化失效; 2) 填料压盖未压紧, 或安装时存在压偏现象; 3) 填料加装方式不规范, 未按标准工艺操作; 4) 阀杆表面存在损伤, 加工精度不达标, 或存在弯曲、腐蚀、磨损等缺陷, 导致密封



图 2 阀杆疲劳断裂

配合不良。

处理措施: 1) 根据工况条件正确选型, 更换适配的填料; 2) 检查填料压盖状态, 重新紧固并调整, 避免压偏; 3) 严格按照标准工艺重新加装填料; 4) 对表面损伤、弯曲、腐蚀或磨损的阀杆进行修理, 无法修复的则予以更换。

2 加氢装置阀门选用原则

2.1 阀门类型选择

2.1.1 高温、高压临氢环境

在高温、高压临氢工况下, 闸阀、截止阀及止回阀为优先选用的阀门类型。其中, 闸阀具有流动阻力小、密封性能可靠的优势, 适用于需频繁开关的操作场景; 截止阀调节性能较好, 但存在关闭力矩大、阻力降偏高的特点, 需结合具体工况谨慎选型; 止回阀主要用于防止流体倒流, 保障工艺流程稳定运行。

需注意的是, Y 形截止阀因关闭力矩大、阻力降偏高, 且采购成本高于同规格闸阀, 故应用范围较窄; 球阀与蝶阀在高温、高压临氢环境下的运行可靠性较低, 同样极少采用。

2.1.2 中温、低压临氢环境

对于中温、低压临氢环境, 阀门类型选择应根据具体工况和介质特性进行综合考虑。一般情况下, 闸阀、截止阀和球阀均可选用, 但应优先考虑其密封性能和抗氢性能。

2.2 阀门结构要求

2.2.1 压力密封阀盖

DN50 及以上的阀门, 宜采用压力



图 1 闸阀闸板密封面损伤

密封阀盖。压力密封阀盖的特点是介质压力越高，密封比压越大，密封效果越好。对于大尺寸阀门，压力密封阀盖质量甚至只有法兰阀盖阀门的 60%。DN40 及以下的阀门仍采用法兰阀盖结构。

2.2.2 阀杆填料

考虑到临氢环境的特殊性，阀门应优先采用低逸散型结构设计。实践及试验数据表明，通过提高阀杆与填料函的加工精度、对填料进行适度预压缩处理、增设填料隔环（灯笼环）、采用填料压盖活载螺栓等技术措施，可有效降低填料部位的泄漏风险。

某加氢精制装置中，一台型号为 DN200 的循环氢压缩机入口闸阀，因日均开关频次高达 20 次，其阀座密封面（Stellite 6 堆焊层）在运行 6 个月 后，磨损深度达 0.8 mm，导致氢气泄漏率超标至 5 ppm 以上（设计要求 ≤ 1 ppm）。拆检后发现，密封面存在明显的硫化亚铁（FeS）磨粒磨损痕迹。

在相同工况条件下，更换为碳化钨（WC）喷涂密封面的阀门后，设备运行周期延长至 18 个月，氢气泄漏率稳定控制在 0.5 ppm 以下，且密封面硬度由 45 HRC 提升至 65 HRC，显著提升了阀门的耐磨性能与密封可靠性。

2.3 密封面加工精度

高温、高压临氢环境下的阀门密封面，包括阀瓣 / 阀座密封面、阀盖法兰 / 垫片密封面、填料箱及阀杆接触面等，对密封面的加工精度要求近乎苛刻。很多现场实例都证明了临氢环境下的机械密封是很困难的，因此对密封面的加工精度要求更高。

2.4 连接方式

管道元件的连接应尽可能采用焊接。阀门直径 ≥ DN50 时，选用对焊连接；直径 ≤ DN40 时，采用承插焊缝连接。对于 ≤ DN40 且要求焊后热处理的阀门，阀门在出厂时两端带长度 ≥ 100 mm 的短管，该短管的焊接和焊

缝的热处理在阀瓣密封面精加工前完成，以免因焊后热处理而影响阀瓣的密封。

2.5 材料纯度

临氢环境下，承压部件材料若存在气孔、夹杂等缺陷，会为氢原子的还原与积聚提供条件，进而更易导致材料出现鼓包、开裂等失效问题。因此，临氢工况对承压部件材料的纯净度提出了较高要求。

某炼厂加氢裂化装置反应器出口阀（操作条件：压力 15 MPa、温度 420 ℃、氢气浓度 85%），原采用 F22 锻钢材质阀体，运行 3 年后，阀体法兰颈部出现氢致裂纹（HIC）。经分析，氢气渗透导致碳钢材料韧性显著下降，冲击功由初始的 120J 降至 35J。后续进行材料改进，选用 ASTM A182 F316L 奥氏体不锈钢制作阀体，经 5 年运行未发生氢脆失效现象。

此外，依据 NACE TM0177 标准试验结果，镍基合金 Inconel 625 在含 500 ppm 硫化氢（H₂S）的工况下，其抗硫化物应力腐蚀开裂（SSCC）能力较普通 316L 不锈钢提升 80%。

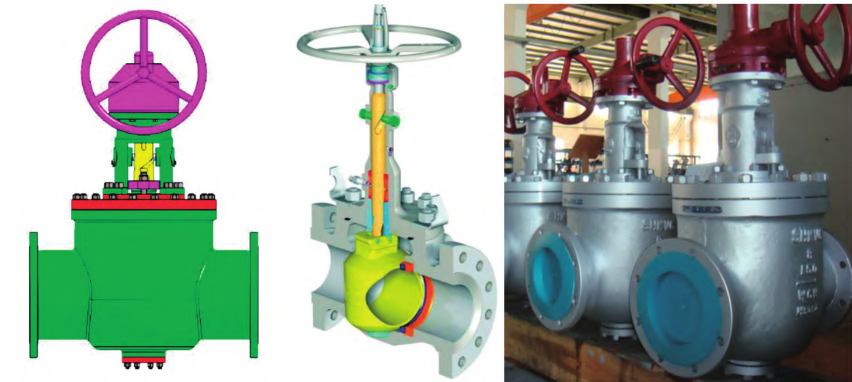


图 3 轨道球阀外形及内部结构

表 1 某加氢装置阀门泄漏原因分类及占比统计

泄漏原因	占比	典型表现与案例
氢脆失效	35%	阀体 / 阀杆氢致裂纹 (HIC)、冲击韧性下降 (如碳钢材料冲击功 < 40J)
密封面磨损	45%	密封面划痕 (深度 > 0.5mm)、硫化亚铁磨粒堆积 (FeS 含量 > 60%)
安装不当	20%	法兰螺栓预紧力不均 (偏差 > 15%)、阀座偏心 (同轴度 > 0.1mm) 导致密封失效

2.6 抗硫化物应力腐蚀开裂 (SSSC) 和抗氢致开裂 (HIC)

在湿硫化氢环境下，金属材料有发生氢鼓包 (HB)、硫化物应力腐蚀开裂 (SSSC)、氢致开裂 (HIC)、应力诱导裂纹扩展 (SOHIC) 等材料损伤的危险。应使阀门承压部件材料及主要内件材料满足 NACE MR0103 的要求，包括对材料纯净度的要求。

3 加氢装置阀门选用实例

高压阀门的设计与选型是高压加氢装置管道及材料设计的核心内容，需重点关注阀门铸件与锻件的选用、阀体材料的选型、阀盖密封型式的设计，以及密封面与阀杆的选择等关键环节。

以加氢装置新氢、循环氢系统中应用的轨道球阀（详见图 3）为例，此类阀门常用于新氢及循环氢压缩机出口、冷高分顶部紧急泄放管线、原料油混氢点等高压氢气管线的关键位置。该类型阀门在高压加氢装置新氢、循环氢系统中得到广泛应用，核心原因在于其充分考量了介质特性（主要为氢气、硫化氢）、介质温度、系统压力及高温硫化氢腐蚀

等工况需求，具备开关行程短、启闭迅速、启闭过程无摩擦、操作扭矩小、密封性能可靠、使用寿命长、可频繁操作、适配介质温差范围广、流量系数大、故障率低及可实现自清洗等显著优势^[2]。

4 加氢装置阀门防止泄漏与内漏的措施

根据阀门泄露和内漏等失效原因进行了统计，主要是密封面磨损造成的泄漏占比较大，见表 1。

4.1 防止泄漏的措施

选择合适的阀门类型：根据具体工况和介质特性，合理选择阀门类型，如闸阀、截止阀、球阀等，确保阀门在实际运行中的可靠性和密封性。

采用压力密封阀盖：对于大口径阀门，优先采用压力密封阀盖，利用介质压力增强密封效果，有效防止泄漏。

优化阀杆填料设计：选用耐高温、耐腐蚀的柔性石墨填料，采用多层填料结构并配备填料隔环，提高填料的密封性能和使用寿命。

提高密封面加工精度：确保阀瓣和阀座密封面的加工精度高，表面粗糙度低，无划痕、凹坑等缺陷，必要时进行研磨处理，以增强密封性能。

合理选择连接方式：管道连接优先采用焊接，阀门与管道的连接处要确保焊接质量，对于小口径阀门采用承插焊缝连接，保证连接处的密封性。

严格把控材料质量：阀门材料需满足 NACE MR0103 标准，具备良好的抗硫化物应力腐蚀开裂和抗氢致开裂性能，同时确保材料纯净度高，减少因材料缺陷导致的泄漏风险。

定期检查与维护：制定详细的阀门检查计划，定期检查密封面、填料、螺栓等关键部位，及时发现并处理潜在问题，如更换老化的填料、紧固松动的螺栓等。

严格的测试与检验：阀门在制造和安装过程中，要进行严格的压力测试和

表 2 内漏与外漏的关键区别

特征	内漏	外漏
泄漏位置	阀座密封面（内部）	阀体外部（阀杆、法兰、焊缝等）
介质去向	流入下游管道或设备	泄漏到环境中
检测工具	超声波检漏仪、压力表	肥皂水、气体检测仪、目视检查
风险	系统效率降低、能源浪费	环境污染、安全隐患（火灾、中毒）

泄漏测试，包括水压试验、气密性试验等，确保阀门在实际工作压力下无泄漏，符合相关标准要求。

4.2 防止内漏的措施

精准的阀门类型与设计选择：依据工况选择适宜的阀门类型，如高温、高压临氢环境优先选闸阀、截止阀和止回阀，其设计需符合 API 600、API 602 等标准，保障结构与密封性能。

确保密封面加工质量：阀瓣和阀座密封面的加工精度对防止内漏至关重要。要采用高精度加工设备和技术，确保密封面平整、光滑，无缺陷。同时，选择合适的密封面材料，如 STellite（司太立，钴基等硬质合金）等，以提高密封面的耐磨性和耐腐蚀性。

合理的阀门结构设计：对于压力密封阀盖阀门，要确保阀盖与阀体之间的密封结构合理，密封件安装正确，避免因结构设计不合理所导致的内漏。同时，要注意阀门内部零件的配合精度，减少因零件配合不良引起的内漏风险。

严格的材料质量控制：阀门材料须具备良好的抗氢性能和抗腐蚀性能。要选择符合标准要求的材料，如抗氢的奥氏体不锈钢等，同时严格控制材料的纯净度，避免因材料内部缺陷导致的内漏。

规范的安装与操作：阀门安装过程中，要按照规范要求进行操作，确保阀门安装位置正确，连接牢固。避免因安装不当造成阀门变形或密封面损坏，从而引发内漏。同时，在阀门操作过程中，要遵循操作规程，避免超压、超温等异常操作，减少对阀门密封性能的影响。

定期的检测与维护：建立完善的阀门检测与维护制度，定期对阀门进行检测，包括密封面检测、无损检测等，及

时发现内漏隐患。同时，对阀门进行维护保养，如定期更换密封件、修复密封面等，确保阀门的密封性能始终保持良好状态。

判断阀门是内漏还是外漏，需要通过不同的现象、检测方法及位置来区分。通过对比其特征和区别方法，见表 2，可以快速定位泄漏类型并采取针对性措施。

5 结论

加氢装置阀门的选用与泄漏预防是确保装置安全、稳定运行的关键环节。通过合理选择阀门类型、优化阀门结构设计、提高密封面加工精度、严格把控材料质量以及采取有效的安装、操作与维护措施，可以显著降低阀门泄漏与内漏的风险。在实际应用中，应根据加氢装置的具体工况和介质特性，综合考虑各种因素，制定科学合理的阀门选用与维护方案。同时，随着技术的不断进步和经验的积累，进一步提升加氢装置阀门的可靠性和密封性能，对于推动石油炼制行业的安全、高效发展具有重要意义。

参考文献：

[1] 全国化工设备设计技术中心站，全国锅炉压力容器标准化技术委员会压力管道分技术委员会. 工业阀门选用指南 [M]. 北京：化学工业出版社，2009:453-464.

[2] 沈红杰. 加氢裂化装置高压阀门的特点与选用 [J]. 石油化工腐蚀与防护，2025(5):40-43.