

高温高压阀门密封失效与修复改进

吴星龙, 刘瑜

中广核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ERA.2025090031

摘 要 : 高温高压阀门在石油化工、能源电力等领域发挥着关键的作用, 但现阶段其密封失效问题依然严重地影响了系统的安全稳定运行。为此本文系统地分析了高温高压阀门密封失效的原因, 其中涵盖了材料性能不足、结构设计缺陷、复杂工况影响以及安装维护不当等方多个面, 随后介绍了直观检查、压力测试、无损检测和在线监测等多种检测诊断方法, 再阐述了密封面研磨、堆焊、密封件更换及激光修复等修复技术。在此基础上, 才提出优化材料选择与处理、改进结构设计、规范安装维护以及智能监测预警等预防改进措施。希望通过全方位的研究, 能够为解决高温高压阀门密封失效问题提供系统性的技术方案, 从而提升设备的可靠性与安全性。

关 键 词 : 高温高压阀门; 密封失效; 检测诊断; 修复技术; 预防改进

Sealing Failure and Repair Improvement of High-temperature and High-pressure Valves

Wu Xinglong, Liu Yu

CGN Nuclear Power Operation Co.,Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : High-temperature and high-pressure valves play a crucial role in fields such as petrochemicals and energy power. However, at present, the problem of their sealing failure still seriously affects the safe and stable operation of the system. For this purpose, this paper systematically analyzes the reasons for the sealing failure of high-temperature and high-pressure valves, covering multiple aspects such as insufficient material properties, structural design flaws, the influence of complex working conditions, and improper installation and maintenance. Subsequently, various detection and diagnosis methods such as visual inspection, pressure testing, non-destructive testing, and online monitoring are introduced. The repair techniques such as grinding of sealing surfaces, surfacing welding, replacement of sealing parts and laser repair were further elaborated. On this basis, preventive and improvement measures such as optimizing material selection and processing, improving structural design, standardizing installation and maintenance, and intelligent monitoring and early warning were proposed. It is hoped that through all-round research, a systematic technical solution can be provided for addressing the sealing failure problem of high-temperature and high-pressure valves, thereby enhancing the reliability and safety of the equipment.

Keywords : high-temperature and high-pressure valves; seal failure; detection and diagnosis; repair technology; preventive improvement

引言

在现代工业领域当中, 高温高压阀门作为流体控制系统的核心设备, 已然被广泛地应用于石油化工、火力发电、核电、煤化工等行业。它们在高温、高压、强腐蚀等恶劣的工况下, 承担着截断、调节、止回等重要功能, 因此对保障生产流程的连续性、稳定性以及系统安全是至关重要的。但由于工作环境的复杂性和严苛性, 使得高温高压阀门密封失效问题频发。所以本文将从多个角度入手, 对高温高压阀门密封失效与修复改进展开了全面分析, 以期对相关领域提供理论支持和实践指导。

一、高温高压阀门密封失效原因分析

（一）材料因素

1. 材料性能不足

当材料的高温强度、硬度、抗氧化及抗腐蚀能力达不到使用要求时，会造成密封性能的降低。比如在较高的温度下，随着温度的增加，其强度下降，密封表面更易发生塑性变形，从而导致密封结构的失效；部分材料耐高温氧化性能差，易发生氧化膜剥落，严重影响密封性能。而在强腐蚀性的介质中，如果材料的抗腐蚀能力较弱，则会受到介质的腐蚀，使其表面产生凹坑、沟槽等缺陷，从而导致密封失效^[1]。

2. 材料选择不当

由于工作环境的不同，阀门的材质也有特殊的要求，如果选用不当，就不能适用于工作环境。例如在高温、高压和含有腐蚀性介质的条件下，如果选择一般的碳素钢材料，碳素钢容易被腐蚀，密封表面迅速丧失其密封作用；再如，在超高压条件下，如果采用强度不够的材质，阀体及密封件会因为无法承受压力而断裂，从而导致泄露。另外，由于其与其它元件的热膨胀系数不匹配，当温度发生改变时可能会出现热应力，造成密封表面的变形，从而影响密封性能^[2]。

3. 材料质量缺陷

如果材料本身有缺陷，就有可能对密封件造成破坏，例如金属内部存在气孔、夹渣、疏松等内部缺陷，会使其强度、致密度下降，且在高温、压力等条件下，极有可能出现裂纹，进而引发密封失效^[3]。

（二）结构设计因素

1. 密封结构不合理

密封结构的设计对其密封性能有很大的影响，在高温、高压条件下，有些密封结构不能有效地补偿密封环的磨损与变形。如常规的平板式密封结构，其在高温、高压条件下，各端面间的接触压力很难达到均匀，极易产生局部渗漏。但有些密封结构的自紧性较差，当压力上升时，其比压就得不到相应的提高，从而得不到较好的密封效果。另外，密封结构的复杂性对其可靠性也有一定的影响，结构越复杂，越容易出现密封的弱点，从而增大密封失效的危险^[4]。

2. 密封面加工精度低

密封表面的加工精度直接影响密封性能，如果端面不平整，有刮痕、凹痕等缺陷，则在较大的密封压力下，有可能从这些细小的缝隙中漏出。如果端面的平直度和平行度误差太大，会引起端面的局部接触，从而使密封失效，在高温、高压条件下，微裂纹将被放大，从而加快其失效过程。

3. 螺栓预紧力不均

螺栓预紧力对阀门的密封性起着至关重要的作用，在阀门的装配中，如果螺栓的预紧力不均衡，就会造成密封表面的受力不

均匀，造成局部密封的比压不够以及渗漏。另外，长期服役于高温、高压环境中，易产生热膨胀和应力松弛，造成预紧力降低，进而影响密封性能；螺栓预紧不当也会引起阀体零件的变形，从而降低其使用寿命，降低其密封性^[5]。

（三）工况因素

1. 温度变化

高温、高压阀门在使用时，由于温度的急剧变化，会对其密封性能造成很大的影响。在高温环境下，材料会出现热膨胀现象，如果密封结构设计不当，零件间的配合间隙将会改变，从而造成密封表面的变形；当温度下降，物料收缩，密封面上就会产生裂缝。

2. 压力波动

在高温、高压条件下，压力波动是导致密封失效的主要原因，当系统工作时，由于压力的急剧上升和下降，会对阀门的密封部分造成冲击。在长时间的交变载荷下，密封件将出现疲劳裂纹，并伴随着裂纹的扩展而发生破坏。

3. 介质冲刷

被输送的介质，特别是含有固体颗粒、杂质的介质，会对阀门的密封部位产生冲刷效果。这些粒子在高速运动时，会不停地冲击封严，对封严造成冲刷和磨损。当磨损加剧时，密封表面的平坦、光洁度会被破坏，密封性能会不断降低，最后会出现漏液现象^[6]。

（四）安装与维护因素

1. 安装不当

在安装时，如果操作不当，将对阀门的密封性能产生直接的影响，例如安装过程中没有清洗干净，有杂质、油污等，都会破坏密封表面的紧密性，造成渗漏；如果阀门和管路之间的联接螺栓不正确，预紧力没有满足规范，就会造成密封面的受力不均匀；如果在安装时受到撞击、敲打等损坏，则会造成密封件的变形和开裂。另外，如果阀门在管路中受到不适当的外力或震动，也会对其密封性能产生不利影响。

2. 维护保养不到位

在高温、高压条件下，对阀门密封进行定期的维修和维修是十分必要的，如果不进行维修，在长时间的使用中，密封件将会发生磨损和老化，得不到及时的修补和替换，进而降低密封件的密封性能^[7]。

二、高温高压阀门密封失效的检测诊断方法

（一）直观检查法

直观检查法是最基本也是最常见的一种检测方法，对阀门外表面进行目测，观察有无介质渗漏，密封面有无磨损、开裂、腐蚀等缺陷；检查阀门接头的螺栓有无松动、密封垫有无破损；仔细聆听阀门运转时，有无不正常的声音，确定密封部位有无损

坏。这种直观检查法操作简便、成本低廉，但仅能探测出表面较明显的缺陷，很难在较小范围内检测出微小缺陷及早期密封失效等问题^[8]。

（二）压力测试法

1. 气压测试

气压试验就是向气门内注入压缩空气，并在规定的压力下停留一段时间，通过观察气门外的压力降及有无气泡确定气门有没有漏气。空气压力试验具有操作简单、快速等优势，但其内部气体分子尺寸很小，很难被检测到，同时空气压力试验也具有很大的安全隐患，一旦泄露就会引起爆炸。

2. 水压测试

液压试验就是将水注入到阀门中，在一定的压力下，通过观察阀门外壁的压力变化及有无漏水现象来判断其密封情况。相对于空气压力试验，水压试验具有更高的安全性，而且水的高密度使其可以发现较小的渗漏。

（三）无损检测法

1. 渗透检测

渗透检测是指将含有有色染料或荧光试剂的渗透液通过毛细效应覆盖在气门密封面上，并将其渗透至缺损处，随后移除过多的渗透液，再施以显影剂，将渗透液从缺损处吸出，实现对缺陷部位及形态的准确定位。因此渗透探伤是一种可以探测表面缺陷的无损检测方法，它对微小裂纹和气孔等缺陷的检测非常敏感，但不能探测到其内部缺陷。

2. 超声检测

超声波探测技术是基于超声波在各种介质中的传输规律，将超声波作用于缺陷表面，使其发生反射、折射、散射等现象，并对其进行处理，从而实现对其内部缺陷的诊断。超声波检测具有探测内部裂纹、夹渣等缺陷的能力，具有探测深度大、灵敏度高等优点，但对缺陷进行定性与定量分析，对检测结果有很大的要求，并且容易受到操作者的熟练程度和经验的影响。

3. 射线检测

射线探伤是指用 X、Y 射线透过阀体的密封件，依据缺陷对光线的吸收与衰减，在底片或检测器上形成不同的图象，以判别缺陷的种类、位置及大小。射线探测技术可以直接显示缺陷，对内部缺陷的探测精度很高，但是其危害大，对保护方法要求高，而且测试费用高。

（四）在线监测技术

1. 声发射监测

声发射检测技术是通过安装于气门表面的声发射传感器，采集气门内部裂纹扩展、摩擦和泄漏等产生的声波信号，对其进行分析和处理，从而判定气门有无密封损坏等问题。声发射监测技术可对阀门进行实时、在线的监控，并能及时发现微小的故障，具有良好的动态损伤探测能力，但易受外界噪音的影响，需通过先进的信号处理方法来提高检测精度^[9]。

2. 红外热成像监测

红外热像监控技术是基于被测对象的表面温度场和热辐射之间的对应关系，采用红外热成像技术对阀门进行热像检测。红外热像技术具有非接触、速度快、可视化等特点，可以实现对阀门的无损检测，但其测量结果易受环境温湿度等因素的影响。

三、高温高压阀门密封失效的修复技术

（一）密封面研磨修复

对有轻微磨损或刮伤的端面，可用磨削法进行修补，密封面研磨修复是利用磨削刀具、磨料等方法，对密封表面进行机械或人工磨削，消除表面缺损，使其达到表面平整、光洁的目的。在磨削时，应根据特定的磨削技术，选用适当的磨具及磨料颗粒尺寸，以保证磨削表面的精度。

（二）堆焊修复

对磨损严重，易产生大坑或裂缝的密封面，采用堆焊技术进行修补是解决这类问题的有效途径。堆焊修补就是将一种或几种金属材料进行堆焊，再对其进行机械加工，以达到所要求的尺寸和精度。因此为了确保堆焊层与基材的粘结强度及密封性，应针对不同的工作条件及原有的密封表面特性，需要选用不同的堆焊材料。

（三）密封件更换

气门密封件的老化和破损是造成气门密封性能下降的主要原因，这种情况下，可以通过对其进行更换。在更换密封件之前，必须对密封件的种类、规格、材料进行正确的鉴别，并根据工作条件选用合适的密封件。在进行密封安装时，应对密封部件进行全面的清洗，以确保没有任何杂质、油污等杂质，并按适当的安装方式及程序进行密封安装，确保其安装位置准确、密封可靠。

（四）激光修复技术

激光修补是一种新的修补技术，其修补精度高、热影响范围小并且修补速度快，其采用高能激光束，使充填材料在封严表面快速熔合，形成高质量修补层，通过调节激光功率、扫描速度、光斑直径等参数，实现对修补层厚度、形貌及性能的有效调控。

四、高温高压阀门密封性能的预防改进措施

（一）优化材料选择与处理

工作人员应针对特定的工作环境，选用具有优良性能的阀门材质。例如在高温、高压和强腐蚀性的环境中，应优先选择耐高温合金、耐蚀不锈钢和特殊陶瓷；在密封方面，选用弹性好、耐高温、耐腐蚀的材料，如橡胶、聚四氟乙烯等。通过合理的热处理、表面处理等措施，改善材料的综合性能。

（二）改进结构设计

在设计时，要对其进行优化，以改善其密封性，采用自紧密

封结构，随着被测流体压力的增加，其比压也随之增加，从而确保在各种压力条件下均能达到较好的密封效果。通过对端面的形状、大小进行合理的设计，改善端面的接触精度，改了端面的均匀性。同时强化对端面的加工过程的控制，有效地改善零件的加工精度，降低零件的表面质量^[10]。

（三）规范安装与维护

工作人员需要制订一套严格的安装工艺规范，保证安装工艺的标准化和准确性，在安装之前，应仔细清洗阀门及管路，并检查其密封表面及密封情况；在安装时，应按预先确定的次序及预紧螺钉，以确保各密封面受力均匀，并且建立健全的阀门维修体系，定期检查、清洁、润滑、紧固。

（四）智能监测与预警

采用现代传感技术、信息技术、大数据分析等技术，建立一

套基于计算机的高精度的阀门监控系统。另外，采用压力传感器、温度传感器、振动传感器和声发射传感器等传感器，对阀门工作状态下的压力、温度、振动、泄漏等进行实时监测。

五、结束语

高温高压阀的密封失效是制约其安全稳定的重要因素，通过对其失效机理的深入剖析，采取科学、合理的检测诊断手段、有效的维修手段和有效的防范手段，可以有效提高其密封性能与可靠性。在工程实践中，要根据工作条件、服役要求等多方面的因素，对其进行正确的检验诊断与维修，并对其进行严密的防范与改善，最终建立起一种完善的高温高压阀门密封故障防控系统。

参考文献

- [1] 车磊. 面向高温高压失效零件的增材修复工艺研究及可修复性评价 [D]. 新疆维吾尔自治区：新疆大学，2018.
- [2] 赵嘉逸，高俊峰，崔永硕，等. 基于某锅炉用闸阀闸板面密封失效研究 [J]. 液压气动与密封，2025，45(01):14-20.
- [3] 韩勛. 屏蔽式电动闸阀及控制系统的设计与研究 [D]. 辽宁省：大连工业大学，2021.
- [4] 唐元清. 硬密封固定球阀结构有限元分析及优化 [D]. 甘肃省：兰州理工大学，2016.
- [5] 夏传虎. 高温高压闸阀. 浙江省，凯喜姆阀门有限公司，2020-12-01.
- [6] 徐国辉. 高压阀门自密封泄漏原因分析及处理措施 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2021，41(02):19-21.
- [7] 王志远. 高压阀门密封性试验及防护装置仿真分析 [D]. 河南科技大学，2023.
- [8] 赵宇，贾树勋，侯新，等. 高压自密封阀门四开环改进 [C]// 中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集—13. 冶金设备与工程技术. 鞍钢股份有限公司能源管控中心；，2023:47-49.
- [9] 叶建伟，叶建中，潘建瓯，等. 高温高压球阀组合结构密封性能研究 [J]. 液压气动与密封，2024，44(07):68-74.
- [10] 蒋朝，张克强，何胜卫，等. 高压阀门自密封泄漏原因分析及处理措施 [J]. 阀门，2025，(04):416-421.