

Erosion Failure Analysis and Structural Optimization of High Temperature Swing Type Check Valve Seal Surface

Jianping Zhan

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

Abstract

This study investigates erosion failure mechanisms of rotary check valve sealing surfaces under high-temperature and high-pressure nuclear power plant operating conditions. The research first analyzes the structural characteristics and operational principles of valves in nuclear environments, identifying core performance parameters of sealing surfaces. Through field failure case studies and sample testing, it reveals typical morphological features and evolution patterns of erosion-induced failures. Based on failure mechanism analysis, the study proposes structural optimization strategies for nuclear power plant sealing surfaces. These findings provide technical support for ensuring long-term safe and stable operation of critical nuclear power plant equipment.

Keywords

nuclear power plant; high-temperature swing check valve; sealing surface; erosion failure; structural optimization

高温旋启式止回阀密封面冲蚀失效分析及结构优化研究

占建平

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

本文聚焦于核电高温高压工况下旋启式止回阀密封面的冲蚀失效分析研究。首先, 剖析阀门在核电特殊环境中的结构特性与工作原理, 明确密封面的核心性能参数; 结合现场失效实例与样本检验, 揭露密封面冲蚀失效的典型形貌特征与演变规律; 基于失效原理剖析, 提出针对核电工况的密封面结构优化计划。为保障核电站关键装置的长周期安全稳定运行提供技术支持。

关键词

核电站; 高温旋启式止回阀; 密封面; 冲蚀失效; 结构优化

1 引言

近年来, 中国核电产业发展迅猛, 装机规模全球第一, 未来一段时间还将积极有序推进核电发展。在核能事业大发展过程中, 中国的核电技术得到了长足的进步, 三代核电技术成功应用, 设备国产化率再上新台阶。设备国产化率的提高对中国核电技术的自主化应用以及设备保障起到了决定性作用, 是打破国外垄断的利器。聚焦于设备的缺陷分析及结构优化, 可以让我们在实践中发现设备设计、制造、运行过程中存在的问题, 为我们在设备设计制造优化指明方向, 对设备国产化能力提升有及其重要的作用。在核电站一、二回路体系中, 高温旋启式止回阀广泛运用于蒸汽管道、给水加热器进出口等关键部位, 承担着防止介质倒流、保障核安全的重要作用。其工作环境常伴随高温、高压, 且介质种类

多样, 包含含硼水、高温湿蒸汽、可能携带腐蚀产物的流体等。这些介质中潜在的固态颗粒(如腐蚀产物、磨损碎屑)在高速流过阀门时, 会对密封面造成持续冲刷与侵蚀。密封面作为阀门实现零泄漏或极低泄漏密封的核心部位, 其性能退化直接造成阀门功能失效, 可能引发介质倒流、热量异常传导、放射性介质泄漏扩散等严重后果, 威胁机组运行安全与效率。因此, 开展适用于核电站工况的高温旋启式止回阀密封面冲蚀失效剖析及结构优化研究, 深入揭露其失效根源并提出高效、可靠的解决办法, 对提升中国核电机组关键装置的自主化水准、运行可靠性及经济性具有紧迫的现实意义与重要的应用价值。

2 核电用高温旋启式止回阀工作原理及密封面特性

2.1 核电用高温旋启式止回阀结构特点

旋启式止回阀具有结构简单维修方便的特点, 同时其设备启闭利用介质动力及本身的阀瓣重力实现, 无需额外驱

【作者简介】占建平(1990), 男, 中国江西上饶人, 工程师, 本科, 从事核电站阀门, 管道研究。

动机构，具有高稳定性的特点。核电用高温旋启式止回阀在继承通用设计的基础上，必须严格满足核级设备的安全分级、质量保证、抗震以及长寿命（通常要求与电站寿命同期）等特殊要求。其结构设计高度重视材料选用、制造工艺与可靠性，核心组件包含阀体与阀盖、阀座、阀瓣与摇杆机构以及密封副。阀体与阀盖通常采用锻造低合金钢或不锈钢，并执行严格的无损检测，其流道设计意在减少流动阻力与湍流，同时兼顾热应力与地震载荷下的结构完整性。阀瓣与摇杆、销轴等进行装配，作为关键运动副结构，需开展表面硬化处理并配备自润滑轴套组件，全部承压边界材质还需考量抗辐照脆化影响效应。密封副作为关键密封构件，一般选用硬质合金堆焊工艺手段，并严格把控工艺质量水平、加工精密程度、表面粗糙度状况以及硬度匹配情况，从而满足核电工况对于密封可靠性的极高标准要求 [1]。虽然旋启式止回阀结构简单，但是其部件的制造偏差要求极高，特别是其摇座、摇杆等转动部件要求精密配合，若配合不佳可能导致阀门卡涩，进而影响阀门启闭功能，可能导致阀门无法按要求开启或者关闭，最终影响系统功能。

2.2 核心工作机理分析

核电阀门的工作机理虽然和常规阀门相似，然而其面临的工况环境更具严苛性。在启闭特性层面，阀门一般依托介质压差驱动力使阀瓣实现开启动作，并借助自重力量、弹簧辅助结构（部分设计构造）以及反向压差作用达成快速关闭效果。核电系统特别强调阀门在事故工况条件下依然能够迅速、可靠地执行关闭操作，以此阻止事故范围扩大，所以对阀瓣转动惯量数值、摇杆比例关系以及关闭速度参数等提出了更为精确的计算分析与验证确认要求。在流动状态与冲刷作用方面，核电站二回路的湿蒸汽介质或者一回路辅助系统的含硼水质可能携带氧化铁颗粒物质、结构材料磨损微粒等杂质成分，当这些介质流经全开状态的阀门时，会对阀瓣背面区域、阀座密封面周边部位以及阀腔内壁表面产生持续冲刷作用。而当阀门处于部分开度状态或者接近关闭状态时，节流效应会导致局部流速急剧升高，进而进一步加剧对密封边缘部位的冲蚀破坏作用。除此之外，持续高温环境可能改变材料力学性能特征，使其更易于发生塑性变形现象或者脆性剥落问题，从而加速失效进程发展。另外，在阀门装配过程需对其传动部件轴孔配合间隙、阀瓣限位件配合间隙、嵌入深度等进行检查，确保其各部件装配要求满足设计要求，从而保障阀门的灵活启闭，确保阀门密封副配合紧密。

2.3 密封面关键特性参数

核电阀门对密封面的性能要求极为严苛，其关键特性参数涵盖多个维度层面。表面完整性要求达到极高水准，粗糙度数值通常需要控制在 $Ra \leq 0.4 \mu m$ 甚至更低范围，以此确保金属与金属之间的紧密密封效果，并且表面必须不存在裂纹、气孔等缺陷问题，防止其在冲蚀环境条件下成为裂纹源头所在。材料性能方面，密封面需要具备优异的高温硬度

性能（例如 HRC40 以上指标）与耐磨性能以抵抗颗粒切削作用，司太立合金虽然得到广泛应用，但是其在长期高温环境及含硼水等特定化学环境中的性能演变情况需要重点予以关注；同时材料还需要具备良好的耐腐蚀性能、抗辐照性能以及抗热疲劳能力，以应对腐蚀作用、辐照影响以及启停过程中的温度波动状况。结构参数同样具有关键意义，密封面锥角角度（通常处于 $5^\circ - 20^\circ$ 区间）和宽度尺寸需要经过精确设计过程，以平衡密封比压数值与介质冲击角度大小，并确保在最小驱动压差条件下实现有效密封效果；阀瓣与阀座密封面的硬度数值需要进行合理匹配（例如硬度差值控制在 HRC 2-5 范围之内），达成密封可靠性与抗咬合性的最佳结合状态 [2]。

3 密封面冲蚀失效现场调研与失效特征分析

3.1 现场调研方案设计

择取多个运行核电机组内易出现冲蚀失效的高温旋启式止回阀作为目标。方案融合核电特性，系统采集阀门设计规范、运行历程、大修检查记录、介质化学分析及运行参数等数据。借助换料大修时机，拆卸已反馈泄漏或计划性检修的阀门，获取包含不同运行时长与介质的密封面样本。最终，综合运用根本原因解析（RCA）方式，辨别冲蚀与其他失效模式，将焦点置于冲蚀主导的失效事例展开深入剖析。

借助现场缺陷检查、硬度测试等多样技术办法，针对密封副失效的实体开展系统的微观形貌状况与材料性能特征表征分析。探究过程中看到，由于高速流体产生的持续冲击作用和介质当中存在的微小固体颗粒形成的共同影响之下，密封表面位置首先呈现局部材料出现流失情况，并慢慢拓展进而造就典型的冲蚀沟槽形态和蜂窝状凹坑结构。特别是处于高含氧量环境或者 pH 值产生波动的水化学条件范畴内，材料具备的耐冲蚀性能会进一步产生下降态势，对密封失效进程起到了加速推进效果。

进一步结合运行参数进行分析显示，阀门的频繁启闭操作、系统承受的压力出现大幅波动情形、流量产生显著变动状况以等均可能造成局部流速出现异常升高现象，进而形成严重的紊流状况和空化现象，由此明显提升冲蚀发生的速率。除材料进行的选型工作和热处理实施的工艺过程可予以进一步优化处理外，运行阶段开展的水化学控制事项、固体颗粒物实施的管控工作以及对阀门在微小开度状态下进行长期工作的情况予以避免，属于缓解冲蚀失效问题的关键可执行操作环节内容。

3.2 失效密封面样本检测与分析

对现场失效密封面样本实施的系统检测涵盖宏观与微观分析。宏观查验呈现典型失效特征：沿介质流动方向的深浅不一痕迹，是颗粒切削的直接依据；密封面中部或靠近流道一侧出现的蜂窝状或火山口状凹陷，源自颗粒反复冲击或空化作用。微观分析可观察到塑性犁沟、脆性脱落坑及二次

裂纹等形态；金相分析则常发现涂层与基体结合界面的微裂纹、孔隙等瑕疵，这些瑕疵在冲蚀作用下扩展并造成涂层失效，同时高温可能引发组织粗化与性能变劣；硬度梯度测试用于评估涂层硬度维持状况及热影响区软化程度 [3]。

3.3 冲蚀失效模式与失效规律总结

结合核电高温、高压及多相流介质的工况特点，密封面冲蚀失效主要体现为以下几种模式：最关键的固体颗粒冲蚀，即由系统内腐蚀产物（如 Fe_3O_4 ）和磨损碎屑等硬质颗粒随高速介质冲击密封面，其严重程度受颗粒硬度、尺寸、浓度、冲击速度与角度（通常 $20^\circ - 30^\circ$ 最易侵蚀塑性材料）影响，尤其在给水系统含氧或 pH 控制欠佳时更为严重。在湿蒸汽或可能发生闪蒸的区域，高速液滴冲击会引发液滴/闪蒸流冲蚀，形成点状蚀坑，并与颗粒冲蚀叠加增强破坏效果。在含硼水等化学环境中，冲蚀与腐蚀形成协同效应，冲蚀破坏表面钝化膜，加速新鲜金属腐蚀，腐蚀产物被冲刷后又暴露新基体，高温更推动该恶性循环。此外，在阀门接近关闭或特定开度时，局部低压可能诱发空泡损伤，空泡溃灭产生的微射流和冲击波也会破坏材料表面。初期潜伏时期，密封面光洁，损伤不显著；中期加速时期，表面出现微观痕迹或点坑，粗糙度上升并形成应力集中，颗粒易嵌入堆积，冲蚀速率加快，涂层瑕疵开始扩展；后期即步入严重失效时期，造就宏观沟槽凹坑，密封线产生断裂，泄漏数量呈现显著增长，甚至出现涂层大范围剥离情况，阀门功能随之丧失。

4 高温旋启式止回阀密封面结构优化设计

4.1 优化目标与约束条件

面对核电应用的特殊需求条件，密封面优化目标确定为：大幅提升抗冲蚀寿命长度，力求在设备定期维修周期之内冲蚀深度不超出维修极限范围，并且达成多周期免维护状态；保证在正常、异常以及事故工况之下都能够符合高等级密封泄漏率要求；同时兼顾方案的经济性与可维护性能。优化流程需要严格依照核安全法规与标准，保障与现有阀门接口相兼容，避免对系统管道进行大规模改造活动。所采用的强化工艺必须成熟可靠，确保批次质量保持稳定，而且材料与构造必须具备良好的环境适应能力，能够承受设计寿期之

内的辐照等方面影响。

4.2 密封面结构优化方案设计

提出的“材料体系升级—几何构造优化—运行防护辅助”复合优化方案涵盖多个方面措施办法：材料层面，选用抗辐照的高强基体材料物质，并且应用超音速火焰喷涂碳化钨涂层、激光熔覆或者物理气相沉积硬质薄膜等先进涂层技术手段，以大幅提升表面硬度和耐磨性能。几何构造上，通过优化密封面型线（例如采用多段弧面形式）、设计抗冲蚀导流构造以及精细调整密封副参数数值，改善流场分布状况，降低介质对密封面的直接冲击作用。运行防护方面，则考虑严格控制设备检修过程产生的碎屑遗留至系统内，减少冲蚀颗粒物。整个方案目的在于系统性提升阀门的抗冲蚀寿命与运行可靠性能。

5 结语

本研究针对核电站高温高压工况之下旋启式止回阀密封面冲蚀失效问题展开了系统性分析工作，主要结论显示：该失效现象是固体颗粒冲击、液滴侵蚀与高温腐蚀环境协同作用产生的复杂结果，其进程具备阶段性特征，并且直接受到系统水化学、介质流速以及颗粒特性因素影响。传统司太立堆焊密封面在极端工况之下抗冲蚀能力存在不足，失效主要表现为沿流向的沟槽、蜂窝状凹坑以及涂层剥离现象，根源在于材料高温性能存在局限、密封面几何形状对流动引导效果不佳以及缺乏主动防护手段。为此提出的“材料—构造—防护”复合优化方案具备针对性特点，包括采用 HVOF 碳化钨涂层或者激光熔覆技术提升表面性能，优化密封面型线与流道构造以改善流场状况并降低冲击力量，以及检修过程控制颗粒物遗留系统内，目的在于从根源之处延缓冲蚀进程，提升阀门长周期运行可靠性能。

参考文献

- [1] 飞竹玲,师广义.旋启式止回阀专利技术综述[J].广东化工,2018,45(11):166-168+181.
- [2] 栾胜伟.旋启式止回阀的改进设计方法探析[J].产业创新研究,2020,(12):139-140.
- [3] 飞竹玲,师广义.旋启式止回阀专利技术综述[J].广东化工,2018,45(11):166-168+181.