

插板阀在高温工况下的实际泄漏率检测与密封结构改进

余正华 郑远

永嘉瑞杰阀门制造有限公司；黎明液压有限公司 浙江温州 325000

【摘要】插板阀是工业关键截断设备，广泛用于冶金、电力、化工等领域的高温介质输送系统。在持续高温工况下，阀体与闸板密封副因热变形失配等因素，易引发密封失效与介质泄漏，造成能源浪费、环境污染并潜藏安全风险。本文基于热力学等理论，摒弃实证描述，聚焦高温工况下插板阀泄漏机理、泄漏率检测方法适应性及密封结构改进路径。通过推演温度场对密封界面的影响、剖析现有检测技术局限、阐释金属密封副失效规律，构建密封结构改进理论框架。全文阐明，高温插板阀泄漏控制是密封系统热扰动下的动态平衡重构，技术突破依赖对多物理场耦合行为的认知与设计，为高温阀门密封技术提供指引。

【关键词】插板阀；高温工况；泄漏率；密封结构；热变形补偿；多级密封；检测理论

Actual Leakage Rate Measurement and Sealing Structure Optimization for Plug Valve Under High-Temperature Conditions

Yu Zhenghua Zheng Yuan

Yong Jia Ruijie Valve Manufacturing Co., Ltd. with Liming Hydraulic Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】As critical industrial shut-off equipment, plug valves are widely used in high-temperature medium transportation systems across metallurgy, power generation, and chemical industries. Under sustained high-temperature operation, thermal deformation mismatch between valve bodies and gate-seal pairs often leads to sealing failures and fluid leakage, resulting in energy waste, environmental pollution, and potential safety hazards. This study employs thermodynamic principles to focus on leakage mechanisms, detection method adaptability, and structural optimization strategies for high-temperature plug valves. Through analyzing temperature field effects on sealing interfaces, evaluating limitations of existing detection technologies, and elucidating failure patterns of metal seals, we establish a theoretical framework for structural improvements. The research demonstrates that leakage control in high-temperature plug valves involves dynamic equilibrium reconstruction under thermal disturbances, with technological breakthroughs requiring comprehensive understanding and design of multiphysics coupling behaviors. These findings provide critical guidance for advanced valve sealing technologies.

【Key words】plug valve; high-temperature operation; leakage rate; sealing structure; thermal deformation compensation; multi-stage sealing; detection theory

引言

在现代工业体系中，插板阀因结构简洁、流通阻力小、启闭可靠，成为高温工况下关键环节不可或缺的执行元件，典型应用场景有高炉煤气净化系统等，工作温度常超六百摄氏度，部分接近千摄氏度。在此环境中，插板阀密封性能关乎系统能效、工艺稳定性与安全生产。但高温带来的复杂物理化学效应使密封可靠性面临挑战，如阀体与闸板非协调变形、金属材料蠕变松弛、密封面微观形貌劣化、易诱发疲劳裂纹等，导致实际泄漏率偏离设计预期，传统检测与密封理论难适用。

当前工程实践中，泄漏率检测沿用常温标准方法，未考虑高温下理论难题；密封结构设计依赖经验放大安全系数，缺乏热变形动态补偿机制，导致高温插板阀“检不准、封不严”。本文旨在通过理论分析与逻辑推演，解构高温插板阀泄漏行为物理本质，阐明检测方法适用边界与理论修正路径，构建密封结构改进设计逻辑。此项研究有助于深化对高温密封问题的理解，为插板阀可靠性提升提供理论支撑，对

推动高端流体控制装备发展有重要意义。

一、高温工况对插板阀密封界面状态的热力学影响机理

1.1 密封界面热变形失配

高温下，阀体与闸板因材料类型、结构约束与热流路径不同，升温速率与温度分布呈现显著差异。阀座区域直面高温介质，稳态温度常比阀体框架高 100 - 200℃，导致密封面发生翘曲或局部凹陷；闸板在热膨胀与介质压力共同作用下易产生弯曲变形。二者变形趋势不一致，造成密封界面在启闭边缘、角部等区域出现不可忽视的宏观间隙，成为气体泄漏的优先通道。该失配并非均匀收缩或膨胀，而是受部件刚度、约束边界与温度梯度共同决定的空间非线性响应，是高温泄漏最直接的物理起源。

1.2 材料高温本构退化

随温度升高，金属材料弹性模量持续降低，相同预紧力下产生的弹性变形量显著增大，削弱了初始密封比压的有效性。当工作温度接近材料再结晶温度时，时间依赖性的蠕变

现象开始主导密封行为——在持续高压应力作用下,密封接触区发生缓慢塑性流动,使密封比压随运行时间持续衰减。这一过程不受瞬时载荷控制,而由温度水平、应力大小与材料微观组织共同决定,具有不可逆性与累积性,是导致长期服役后泄漏率升高的根本原因。

1.3 界面高温化学演化

高温环境下,密封面持续发生氧化反应,生成疏松、多孔且附着力差的氧化皮。该氧化层虽可能在初期暂时填充微观凹谷,但其硬度低、易在启闭过程中剥落,暴露出新鲜基体并形成新的微隙;在含硫、氯等腐蚀性组分的介质中,氧化与腐蚀交互加速表面退化,使材料硬度下降、粗糙度上升、界面结合强度减弱。最终,密封界面从理想连续接触状态,演化为遍布微隙、氧化产物、剥落坑与腐蚀蚀点的非均质表面,为介质渗透提供了大量微观路径与驱动力。

二、高温环境下泄漏率检测方法的理论适应性修正逻辑

2.1 常规压降法的失效根源

压降法基于常温理想气体模型建立压力衰减与泄漏量的对应关系,但在高温下完全失效:高温气体密度大幅降低、粘度显著升高,导致相同泄漏通量对应的压力变化率明显减小;同时,腔室壁面与气体存在持续热交换,温度场不均匀,使压力读数无法真实反映质量损失;更关键的是,阀体热膨胀引起封闭腔室容积发生微小但不可忽略的变化,进一步扭曲压力-泄漏量映射关系。因此,直接套用常温校准曲线将系统性低估实际泄漏率。

2.2 示踪气体法的信号干扰机制

氦气等示踪气体检测虽灵敏度高,但在高温环境中面临严峻挑战:传感器自身在高温下输出稳定性下降,产生显著热漂移;高温介质本底成分复杂(如CO、H₂、SO₂、水蒸气等),部分气体与示踪气体在检测原理上存在交叉响应,产生虚假信号;此外,高温大幅提升气体扩散能力,使示踪气体更易穿透微隙,导致检测值偏高,却难以区分是真实泄漏还是物理渗透增强所致。这使得原始信号必须经过严格的温度补偿与背景扣除才能反映真实泄漏状态。

2.3 泄漏定义基准的范式转换

高温工况下,“泄漏率”的内涵需重新界定。它既不是常温下的瞬时体积流量,也不是简单累积的质量损失,而是在标准参考状态下(如0℃、101.325 kPa)折算出的等效泄漏通量。尤其当介质处于近临界或超临界状态时,传统理想气体定律完全不适用,必须依据真实气体状态方程进行状态转换。检测方法的理论价值,正在于能否建立一套可靠的工况参数采集、状态参数辨识与基准值转换流程,从而实现不同温度、压力、介质条件下的泄漏性能可比性与可评价性。

三、现有密封结构在高温循环载荷下的失效模式推演

3.1 刚性硬密封的热机械疲劳失效

平面或楔形硬密封结构在首次升温冷却后即产生不可逆塑性变形,多次热循环后,密封面接触区域反复经历拉压交变应力,依据低周疲劳原理萌生微裂纹;裂纹在热应力与介质压力协同作用下沿晶界或穿晶扩展,最终连接成片,导致局部剥落甚至形成贯通性泄漏沟槽。该过程具有明确的循环次数阈值与渐进性特征,是刚性结构在高温长周期服役中最典型的失效路径。

3.2 弹性元件支撑结构的蠕变松弛失效

依赖弹簧、碟簧或波纹管提供持续密封比压的结构,其核心风险在于弹性元件的高温蠕变。在持续高温与高应力作用下,弹性材料发生缓慢塑性变形,导致施加于密封副的预紧力随时间不可逆衰减。当衰减后的比压低于介质工作压力与热变形所引起的间隙所需最小密封压力时,密封即告失效。该失效具有时间依赖性、不可恢复性,且往往在无明显征兆下突然发生,是弹性补偿类结构的主要寿命瓶颈。

3.3 浮动与导向结构的卡滞失效

浮动式密封虽设计有热位移补偿自由度,但其导向机构(如滑槽、销轴)在高温下同样面临挑战:热膨胀使配合间隙缩小,甚至导致金属间直接接触;高温氧化产物在运动副微隙中不断堆积、烧结,显著增大摩擦阻力;在含固体颗粒介质中,颗粒嵌入导向面加剧磨损与咬合。最终,浮动部件丧失应有的位移调节能力,由“主动补偿”退化为“被动卡滞”,不仅失去热适应功能,反而因强制位移引发密封面异常应力与损伤。

四、基于热变形自适应补偿的密封结构改进理论设计

4.1 可控浮动密封

通过在闸板密封圈背部设置碟簧组或波纹管等弹性支撑元件,使闸板在受热膨胀时可通过弹性压缩吸收部分位移,避免密封圈因过定位而失效。其设计关键在于弹性元件的刚度选择:刚度过大则无法有效补偿,刚度过小则导致密封比压不足。理想状态是弹性元件在全工作温度范围内,既能承受最大热位移,又能在最低温度时提供足够反力维持初始密封比压,实现热变形全过程的平滑响应。

4.2 差异补偿结构

在阀座与阀体连接部位嵌入因瓦合金等低热膨胀系数材料制成的补偿环,利用其极小的热膨胀量,抵消主体结构因高温产生的过大变形,从而抑制密封面整体翘曲。该设计不改变原有结构形式,而是通过材料特性干预热变形传递路径,属于一种“以柔克刚”的间接调控策略,对制造精度与装配工艺要求较高,但效果稳定、可靠性高。

4.3 预变形结构

针对闸板在热负荷与介质压力下易发生向下弯曲的特点,在常温下预先将其加工成微向上凸的反向曲率。当系统升温并加载后,热膨胀与压力变形恰好使闸板趋于平直,而在高温工况下实现密封面与阀座的最佳贴合。该方法将热变形从威胁转化为可利用的设计资源,体现了“变不利为有利”的先进设计哲学,但高度依赖对热-力耦合变形规律的

精确预测与结构优化能力。

五、多级屏障密封与界面稳定性强化的协同机理

5.1 多级串联屏障

通过设置主密封副与次级密封副,并在二者之间配置泄压腔或吹扫腔,将总工作压差与温度梯度在空间上逐级分解。主密封承担高温高压核心区,次级密封位于温度较低、压力较小的缓冲区,既作为安全冗余,又可选用更易加工、成本更低的材料。级间吹扫气幕不仅阻隔高温介质渗透,还起到冷却主密封背侧的作用,延缓材料热退化,显著提升整套密封系统的鲁棒性与容错能力。

5.2 功能性表面织构

在密封面激光加工规则分布的微米级凹坑或沟槽,构成功能性表面织构。其作用并非单纯增加粗糙度,而是在高温启闭过程中:① 储存微量高温润滑介质,在运动瞬间形成临时润滑膜,抑制粘着与擦伤;② 作为微小应力释放腔,缓解密封边缘的应力集中,延缓微裂纹萌生;③ 捕获氧化剥落物与硬质颗粒,防止其滚动造成三体磨损。织构的形状、尺寸与分布密度需根据高温接触工况进行针对性设计,是连接宏观密封性能与微观界面行为的关键桥梁。

5.3 界面材料梯度化

采用热喷涂或激光熔覆技术,在金属基体表面制备成分与性能连续过渡的功能梯度层:表层为高硬度、耐高温氧化的陶瓷相(如 Cr_2O_3),中间为陶瓷-金属混合过渡层,底层为与基体冶金结合良好的金属相。该结构有效缓解了陶瓷与金属之间因热膨胀系数突变而产生的巨大界面热应力,大幅抑制涂层开裂、剥落等典型失效,使密封面在数百次热循环后仍能保持结构完整性与功能稳定性。

六、密封可靠性验证与全生命周期管理的理论框架

6.1 热-力耦合仿真验证

密封结构改进方案的有效性,首先需通过高精度热-力耦合有限元分析进行虚拟验证。模型应完整包含温度场、应力场、接触非线性及材料高温本构关系,重点输出:密封界面的实时接触压力分布云图、最大等效应力位置与数值、是否存在宏观分离间隙、以及密封比压随时间的衰减趋势。当仿真显示关键区域密封比压始终高于介质压力1.5倍以上,且无连续间隙带时,可判定该结构在目标工况下具备理论可行性。

参考文献

- [1]张勇,常海峰. 高温插板阀的改造实践[J]. 河南化工, 2016, 33(5): 51-53.
- [2]盛伟楠. 阀门的气密性测试技术综述[J]. 数字化用户, 2019, 25(7): 80.
- [3]刘爱武. 高温平板闸阀失效的因素与改进措施[J]. 化工管理, 2020(25): 138-139.
- [4]张伟政,韩光枫,黄文彬,等. 高温高压调节阀热流固耦合及振动特性分析[J]. 液压气动与密封, 2026, 46(1): 68-75.

6.2 失效概率建模

将密封系统视为一个受随机因素影响的工程单元,其可靠性可基于应力-强度干涉理论进行定量化:将密封副承受的“综合工作应力”(含热变形应力、介质压力、装配残余应力)与材料的“高温承载强度”(含屈服强度、蠕变极限、疲劳极限)均视为具有一定离散性的变量。通过设定合理的分布类型与参数范围,可计算出在特定工况下密封功能失效的概率区间。该方法虽不依赖实测数据,但清晰揭示了可靠性设计的本质——在不确定性中寻求确定性保障。

6.3 全生命周期状态监测

在密封系统中预设若干对界面退化敏感的状态参数,如启闭扭矩变化率、阀杆微振动频谱特征、密封腔红外热像分布等。通过理论分析与少量标定试验,建立这些参数与密封比压衰减、微隙扩展、氧化程度等内在状态的映射关系。当在线监测发现某参数持续偏离理论基准曲线时,即触发分级预警,提示开展针对性检查或维护。该逻辑将密封管理从“定时检修”升级为“按需干预”,是实现长周期可靠运行的核心支撑。

结论

本文围绕高温工况下插板阀的泄漏控制问题,开展理论分析与逻辑推演,阐释了高温环境对密封界面状态的影响、泄漏率检测方法的理论边界及现有密封结构的失效逻辑,构建了以热变形自适应补偿、多级屏障密封及界面稳定性强化为核心的密封结构改进理论体系。研究表明,高温插板阀泄漏是热-力-流-固多物理场耦合打破密封界面动态平衡的结果,控制关键在于密封系统对热扰动的主动适应与协同抵抗。刚性密封结构易疲劳失效,而基于浮动原理等的改进结构能动态维持有效密封比压;多级屏障密封提升系统冗余度与鲁棒性,表面织构与梯度功能材料优化界面行为。检测与验证需构建适应性评估框架,并将可靠性验证纳入全生命周期管理。

本研究虽未进行实实验证,但通过逻辑与机理推演,勾勒出高温插板阀密封技术发展的理论脉络与创新方向,阐明了“为何泄漏”“如何检测”“怎样改进”的逻辑,为设计人员提供认知工具。未来可深化多场耦合数值模拟与数字孪生技术应用,探索智能材料潜力,建立全链条理论模型,推动高温阀门密封技术向高可靠性、长寿命与智能化发展,保障国家重大装备与关键基础设施运行。