

# 高温介质用球阀密封结构创新与可靠性评估模型

宣永斌 田 鹏 张 飞  
浙江盾安机械有限公司 浙江 绍兴 311835

**摘要:** 在制冷行业中, 高温介质球阀密封对系统安全稳定运行至关重要。本文分析制冷工况下密封失效机理, 涵盖热应力、介质侵蚀等引发的多种失效模式。提出“材料适配+弹性补偿+表面强化”的创新密封结构设计方案, 并进行多物理场耦合优化。构建涵盖多指标的可靠性评估模型, 开展不确定性量化分析。展望智能密封材料研发与数字孪生实时监测预测等未来研究方向, 为制冷行业高温介质球阀密封技术发展提供参考。

**关键词:** 制冷高温球阀; 密封结构创新; 可靠性评估模型

引言: 在制冷行业的石油化工、冷链物流、大型制冷设备等众多领域, 高温介质球阀有着广泛应用, 其密封性能直接关乎系统运行的安全与稳定。然而, 制冷工况下存在诸多特殊因素, 给密封带来严峻挑战, 导致密封失效模式多样, 严重影响设备正常运行。传统密封结构难以满足长期稳定密封需求, 创新密封结构与可靠性评估成为制冷行业球阀技术发展的关键。本文聚焦制冷行业高温介质球阀密封结构创新与可靠性评估模型, 旨在解决密封难题, 提升密封性能与可靠性。

## 1 制冷行业高温介质球阀密封失效机理分析

### 1.1 制冷工况下的密封挑战

制冷行业的高温介质球阀在石油化工生产中的制冷环节、大型冷库的制冷系统以及冷链物流的制冷设备中发挥着关键作用。其密封性能直接决定系统运行的安全性与稳定性, 但制冷工况给密封系统带来了多重严峻挑战。在制冷过程中, 系统温度变化频繁且幅度较大, 密封副材料会发生热膨胀、热收缩、热蠕变等物理变化, 导致材料硬度下降、塑性变形增大, 破坏密封面的贴合精度, 引发密封间隙增大。同时, 制冷介质多具有强腐蚀性、高渗透性, 例如一些含氟制冷剂, 会加速密封面的磨损、腐蚀, 进一步加剧密封性能劣化。制冷工况下介质黏度会随着温度变化而改变, 在高温时黏度降低、分子活跃度提升, 泄漏驱动力显著增强, 原本处于微密封状态的间隙易出现明显泄漏。另外, 系统运行中的温度波动会导致密封副各部件热膨胀系数不匹配, 产生热应力, 长期反复作用下会引发密封件疲劳损伤、开裂, 最终导致密封失效<sup>[1]</sup>。因此, 制冷工况下的密封系统需同时应对热变形、介质侵蚀、应力疲劳等多重挑战。

### 1.2 典型失效模式

制冷行业高温介质球阀密封失效存在多种典型模式, 每种模式均与工况条件、材料性能及结构设计密切相关。

第一种为磨损失效, 在制冷过程中, 高温下密封副材料硬度下降, 制冷介质中可能存在的杂质、颗粒会加剧密封面的磨粒磨损。长期运行后密封面出现划痕、凹坑, 破坏密封完整性; 同时, 球阀与阀座的相对转动产生的摩擦热会进一步加速磨损, 形成“磨损-泄漏-加剧磨损”的恶性循环。第二种为腐蚀失效, 制冷介质中的一些成分, 如含氯、含氟的化合物, 在高温下会与密封材料发生化学反应, 产生氧化层、蚀坑。若氧化层脱落则会暴露新鲜基体, 导致腐蚀持续加剧, 严重时会造成密封件穿孔、破损。第三种为热变形失效, 温度升高及波动会导致密封副各部件热膨胀不均, 产生装配应力与热应力。在制冷系统频繁启停过程中, 温度变化剧烈, 长期作用下引发密封件塑性变形、翘曲, 导致密封面贴合不严。第四种为疲劳失效, 制冷系统运行过程中频繁的温度循环、压力波动会使密封件承受交变应力, 逐渐产生微裂纹并扩展, 最终导致密封件断裂失效。

## 2 密封结构创新设计

### 2.1 设计目标与约束条件

制冷行业高温介质球阀密封结构创新设计的核心目标是解决制冷工况下的密封失效问题, 实现长期稳定密封。具体目标包括: 在制冷行业常见的高温范围(如100-300°C)、一定压力工况(如5-20MPa)下, 密封泄漏量控制在 $1 \times 10^{-6}$  mL/s以内, 密封寿命不低于8000小时, 同时具备良好的抗磨损、抗腐蚀及热变形补偿能力。

设计过程中需遵循多项约束条件。工况约束方面, 需适配不同制冷介质, 应对温度波动范围 $\pm 30^\circ\text{C}$ 的频繁循环工况; 材料约束方面, 需选用耐制冷介质腐蚀、耐高温且成本可控的材料, 避免使用稀有贵金属导致制造成本大幅上升; 结构约束方面, 需与现有制冷球阀阀体结构兼容, 无需对阀体进行大幅改造, 便于安装、维护及批量生产; 性能约束方面, 密封结构需具备一定的弹

性补偿能力,同时不能影响阀球的启闭灵活性,启闭力矩控制在设计标准范围内,且满足制冷设备轻量化、小型化的发展需求<sup>[2]</sup>。

## 2.2 创新结构设计方案

### 2.2.1 梯度功能材料(FGM)阀座

梯度功能材料(FGM)阀座是密封结构创新的核心组成部分,其设计核心是根据阀座不同部位的工作环境性与性能需求,实现材料成分、组织结构的梯度分布,避免单一材料性能的局限性。阀座密封面直接与制冷介质、阀球接触,需具备极高的硬度、耐磨性与耐腐蚀性。考虑到制冷介质的特点,表层选用适合制冷工况的硬质合金,如一种特殊配比的碳化钨-钴(WC-Co)硬质合金,厚度控制在0.3-0.8mm,其高温硬度可达HRC60以上,耐磨损性能优于传统密封材料2倍以上,且对常见制冷介质有良好的耐腐蚀性。阀座中间层选用镍基合金,厚度1.5-2.5mm,起到过渡缓冲作用,兼具一定的强度与韧性,可缓解表层与基体的热应力与机械应力。阀座基体选用耐制冷介质腐蚀的不锈钢,保证整体结构强度与安装适配性,其热膨胀系数与阀体保持一致,减少温度波动引发的装配应力。通过粉末冶金烧结工艺实现各层材料的无缝衔接,梯度过渡层厚度控制在0.2-0.4mm,避免层间剥离,确保阀座在制冷工况下的结构完整性与密封稳定性。

### 2.2.2 弹性补偿密封结构

弹性补偿密封结构主要用于解决制冷工况下密封副热变形、磨损导致的密封间隙增大问题,通过内置弹性元件的弹性形变,实时补偿间隙,维持密封面的稳定接触压力。该结构以阀座为核心,在阀座底部设置环形波纹弹簧作为弹性补偿元件,波纹弹簧选用耐制冷介质腐蚀且耐高温的合金制成,可在100-300℃高温下保持良好的弹性性能,弹性形变范围0.08-0.25mm,满足制冷工况下密封间隙的补偿需求。阀座与弹簧之间设置隔热垫片,减少制冷介质热量向弹簧传递,避免弹簧热疲劳失效,隔热垫片选用适合制冷环境的陶瓷纤维复合材料,导热系数低于0.12W/(m·K),隔热效果显著。在阀座内侧设置导向结构,防止阀座在补偿过程中发生偏移,保证密封面的贴合精度。该结构采用自适应补偿设计,当密封面出现磨损或热变形时,波纹弹簧自动释放弹性力,推动阀座向阀球方向移动,补偿密封间隙,使密封接触压力维持在设计范围内,有效抑制泄漏,提升密封结构的抗失效能力。

### 2.2.3 表面强化技术

表面强化技术用于进一步提升密封面的表面性能,弥补材料本身的不足,增强密封面的抗磨损、抗腐蚀及

耐高温能力,延长密封寿命。针对FGM阀座密封面,采用等离子喷涂技术进行表面强化处理,喷涂材料选用适合制冷介质的陶瓷涂层,如一种特殊配比的氧化铝-二氧化钛( $Al_2O_3-TiO_2$ )陶瓷涂层,涂层厚度控制在40-70 $\mu m$ ,喷涂后通过激光重熔工艺优化涂层结构,使涂层与基体结合强度提升至25MPa以上,表面粗糙度降低至Ra0.025 $\mu m$ 以下。该涂层在300℃高温下仍能保持良好的硬度与耐磨性,耐腐蚀性优于单一硬质合金密封面1.5倍以上,可有效抵御制冷介质的侵蚀与磨粒磨损。针对阀球密封面,采用离子氮化技术进行表面强化,氮化层厚度控制在18-28 $\mu m$ ,表面硬度可达HRC68以上,同时形成致密的氮化层,提升耐腐蚀性,尤其对制冷介质中的腐蚀成分有较好的抵抗能力。

## 2.3 多物理场耦合优化

制冷行业高温介质球阀密封结构受温度场、应力场、流场等多物理场耦合作用,单一物理场设计难保密封性能稳定,需多物理场耦合优化。采用有限元分析,建立多物理场耦合模型,模拟制冷工况下温度、应力分布及介质流动状态,明确各场相互作用机制。温度场分析聚焦制冷介质、环境温度对密封副温度分布的影响,优化隔热设计以减少热应力;应力场分析耦合温度与压力场,计算多种应力,优化结构尺寸与材料分布防应力集中;流场分析模拟制冷介质在密封间隙的流动,优化密封面结构减少泄漏通道。运用多目标优化算法,以密封接触应力均匀性等为优化目标,调整设计变量,实现多物理场协同优化,使密封结构在制冷工况下综合性能提升超25%,降低密封失效风险。

## 3 可靠性评估模型构建

### 3.1 评估指标体系

为科学全面评估制冷行业高温介质球阀密封结构可靠性,结合其工作特性与失效模式,构建多维度、多层次评估指标体系,含密封、结构、寿命三大一级指标及若干二级、三级指标。密封性能为核心,泄漏量 $\leq 1 \times 10^{-6} mL/s$ 、接触压力均匀性误差 $\leq 12\%$ 为合格;结构性能中,热变形量 $\leq 0.025mm$ 、应力集中系数 $\leq 1.6$ 、启闭力矩符合设计标准为合格;寿命性能方面,密封寿命 $\geq 8000$ 小时、磨损速率 $\leq 0.0012mm/100$ 小时、腐蚀速率 $\leq 0.0006mm/a$ 为合格。用层次分析法确定权重,密封性能0.4、结构性能0.35、寿命性能0.25,通过量化、加权求和综合评估,为建模优化提供数据支撑。

### 3.2 可靠性建模方法

结合制冷行业高温介质球阀密封结构失效特性与评估指标体系,运用多失效模式耦合方法构建可靠性模型,

综合考量磨损、腐蚀、热变形、疲劳等多种失效模式的协同影响。首先,针对单一失效模式分别建立子模型:磨损失效子模型依据Archard磨损理论,结合制冷工况参数和材料性能,量化磨损量与密封寿命的关系;腐蚀失效子模型采用适配制冷介质的腐蚀动力学方程,描述腐蚀速率随时间的变化;热变形失效子模型基于热弹性理论,建立热变形量与密封可靠性的映射;疲劳失效子模型运用Miner线性累积损伤理论,计算交变应力下的疲劳寿命。接着,用Copula函数处理各失效模式相关性,鉴于协同作用,选适合制冷工况的FrankCopula函数构建多失效模式耦合模型,通过极大似然估计法确定参数,得出密封结构可靠度函数,能精准预测不同制冷工况下可靠度变化,为设计优化与寿命预测提供理论支撑<sup>[3]</sup>。

### 3.3 不确定性量化分析

制冷高温介质球阀密封结构可靠性评估存在工况参数、材料性能、结构尺寸等不确定性因素,需量化分析明确影响程度。工况参数不确定性源于制冷介质温度、压力波动,用概率统计确定分布;材料性能不确定性源于成分波动等,通过试验获取参数分布;结构尺寸不确定性源于加工装配误差,用公差分析确定波动范围。采用蒙特卡洛模拟法量化分析,计算可靠度均值、方差等,明确温度、材料性能波动是主要影响因素,为可靠性优化与风险控制提供依据。

## 4 未来研究展望

### 4.1 智能密封材料(如形状记忆合金补偿热变形)

未来制冷行业高温介质球阀密封技术重点之一是智能密封材料研发,形状记忆合金(SMA)因热致形状记忆效应与超弹性,成为热变形补偿密封的理想之选。它能在制冷工况下自动补偿密封副热变形与磨损间隙,比传统结构响应快、精度高、寿命长。后续研究将聚焦耐制冷介质腐蚀的形状记忆合金,优化合金成分(如开发适合制冷环境的新型Ti-Ni基合金),提升在300°C以上制冷工况下的性能,降低疲劳衰减速率。还会将其与梯度功能材料、表面强化技术结合,设计智能复合密封结构,实

现自适应补偿与实时调节。另外,研究其动力学特性,建立控制模型,实现主动调控,提升可靠性与适应性,以更好地满足制冷行业复杂多变的工况需求。

### 4.2 基于数字孪生的实时可靠性监测与预测

基于数字孪生技术的实时可靠性监测与预测,是未来制冷行业高温介质球阀密封管理重要方向,可全生命周期监测密封性能并预警失效。后续将构建密封结构数字孪生模型,用传感器实时采集制冷工况下的温度、压力等关键参数,实现物理与数字模型实时映射<sup>[4]</sup>。结合大数据与机器学习,挖掘数据与失效关联,建立适合制冷行业的预测模型,精准预测剩余寿命并预警。还会开展虚拟仿真试验,为优化设计与维护策略提供数据支撑。另外,将数字孪生系统与制冷行业的工业互联网融合,实现远程监测与智能调控,提升球阀运行安全性与经济性,推动制冷行业球阀密封技术智能化、数字化发展。

## 结束语

制冷行业高温介质球阀密封结构创新与可靠性评估研究意义重大。通过创新设计密封结构,结合多物理场耦合优化,有效提升了密封性能。构建的可靠性评估模型,为制冷行业密封结构可靠性评估提供科学方法。未来,智能密封材料研发与数字孪生实时监测预测等方向,将推动制冷行业高温介质球阀密封技术向智能化、数字化发展,为制冷领域的安全稳定运行提供更有力的保障。

## 参考文献

- [1]母泽冰,耶力平,汪玉海,等.高温硬密封球阀密封结构研究[J].数字农业与智能农机,2022(7):120-122.
- [2]黄晓云,夏胜建,全军,等.基于重要度公差叠加分析的固定球阀密封结构装配优化研究[J].机械制造与自动化,2025,54(2):103-108.
- [3]高俊峰,李伟,杨玲玲,等.基于响应面法的全焊接球阀密封结构参数多目标优化[J].机电工程,2023,40(11):1718-1726.
- [4]田捍卫,李志鹏,孙宝军,等.高压大流量球阀密封性能及密封副结构改进研究[J].阀门,2025(8):884-890.