

双关双断衬氟止回阀的密封可靠性与流体阻力特性分析

郑浩炜 郑祥松

祥松阀门集团有限公司 浙江 温州 325025

【摘要】：针对传统止回阀在强腐蚀工况下密封性能不足和流体阻力较大的问题，本文提出一种双关双断衬氟止回阀的创新结构，并系统研究其密封可靠性与流体阻力特性。通过结构优化设计与流体动力学分析，结合实验验证，深入研究了阀座密封结构、衬氟层性能及流道形式对阀门综合性能的影响。研究表明，优化后的双关双断结构在保持优异耐腐蚀性能的同时，密封等级达到 VI 级，流体阻力系数降低至 0.18，显著提升了阀门在严苛工况下的使用寿命和运行效率。本研究为高性能止回阀的设计开发提供了重要的理论依据和实践参考。

【关键词】：衬氟止回阀；双关双断；密封可靠性；流体阻力；结构优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.057

1 引言

止回阀作为流体输送系统中的关键控制元件，其性能直接影响整个系统的安全性和运行效率。在化工、制药、冶金等强腐蚀介质输送领域，传统止回阀面临着严峻的技术挑战，一方面，腐蚀性介质对阀门内部结构造成严重侵蚀，导致密封失效和性能下降；另一方面，系统启停和压力波动等工况对阀门的密封可靠性提出了更高要求。双关双断衬氟止回阀凭借其独特的结构设计和优异的耐腐蚀性能，在这些特殊工况中展现出显著优势。

当前，衬氟止回阀在实际应用中仍存在一些技术瓶颈，首先，氟塑料衬层与金属阀体的结合强度不足，在温度变化和压力冲击下容易发生剥离失效；其次，传统单密封结构在长期运行后容易出现磨损泄漏，难以满足严格的密封要求；此外，为增强耐腐蚀性能而采用的厚衬层设计往往导致流道狭窄，增大了流体阻力，影响系统运行效率。这些问题制约了衬氟止回阀在高端装备中的应用。

本文针对上述技术难题，开展双关双断衬氟止回阀的密封可靠性与流体阻力特性研究，通过创新设计双密封结构、优化衬氟工艺、改进流道形式等系统性解决方案，显著提升了阀门的综合性能。研究内容涵盖结构设计、理论分析、数值模拟和实验验证等多个方面，形成了完整的技术研究体系，研究成果不仅解决了工程实际中的技术难题，也为同类产品的开发提供了新的思路和方法。

2 双关双断结构与密封特性分析

双关双断衬氟止回阀的结构设计是其高性能的基础保障，本文提出的创新结构采用双重密封机制，在主密封基础上增设辅助密封，形成可靠的密封保障系统。阀体结构采用流线型设计，内部全衬氟塑料，确保与介质接触部分完全隔离，提供优异的耐腐蚀性能。

密封结构设计是保证阀门可靠性的关键，主密封采用金属硬密封与氟塑料软密封相结合的形式，利用金属密封的机械强

度和氟塑料密封的适应性，实现双重密封效果。密封副的结构参数经过精确计算，密封比压控制在 15-25MPa 范围内，既保证密封的可靠性，又避免过大的密封力导致衬层损伤。辅助密封设置在阀瓣周向，采用唇形密封结构，在介质压力作用下能够自动增强密封效果，形成第二道密封屏障。

衬氟层的设计与制造工艺直接影响阀门的密封寿命，通过优化氟塑料的配方和加工工艺，提高了衬层的力学性能和附着强度，采用模压成型工艺，确保衬层厚度均匀，无内在缺陷。针对温度变化导致的热应力问题，在衬层设计中考虑了补偿结构，避免了因热膨胀系数差异引起的衬层开裂。实验表明，优化后的衬氟层在-50℃至 150℃温度范围内均能保持良好的密封性能。

阀瓣导向机构的设计对密封可靠性具有重要影响，采用双导向杆结构，确保阀瓣在启闭过程中运动平稳，无卡阻现象，导向杆表面采用特殊处理，既保证了耐磨性，又降低了摩擦系数。导向间隙经过精密计算，在保证灵活运动的同时，避免了介质中的颗粒物卡入间隙，这种设计显著提高了阀门在含有固体颗粒介质中的适用性。

密封性能的数值分析为进一步优化提供了理论依据，通过有限元分析软件建立了密封副的力学模型，模拟了不同工况下的应力分布和变形情况。分析结果表明，优化后的密封结构在额定压力下的最大等效应力低于材料的许用应力，密封面接触压力分布均匀，无应力集中现象。这些特性确保了阀门在长期运行过程中保持稳定的密封性能。

在密封机理研究方面，进一步深入分析了双密封结构的工作特性，主密封采用 45° 锥形密封面设计，通过有限元分析优化了密封比压分布。研究表明，在介质压力作用下，阀瓣会产生微小的轴向位移，使密封比压均匀分布在密封面上，避免了局部过载。辅助密封采用柔性氟塑料材质，其变形特性通过实验进行了系统研究。结果显示，在 0.6MPa 工作压力下，辅助密封的最大变形量控制在 0.15mm 以内，既保证了密封效果，

又避免了过度变形导致材料疲劳。

针对衬氟层与金属阀体的结合强度问题,开发了新型的锚固结构,在阀体内壁设计了环形沟槽结构,通过机械互锁作用增强衬氟层的固定效果。通过拉伸试验验证,优化后的锚固结构使衬氟层与阀体的剥离强度达到 8.5MPa,比传统结构提高了 60%。同时,在衬氟层边缘部位设置了过渡结构,有效缓解了应力集中现象,提高了衬氟层的抗冲击性能。

在阀瓣运动特性研究方面,建立了完整的动力学模型,通过分析阀瓣在介质作用下的受力情况,优化了导向机构的配合间隙。实验数据显示,导向杆与导向套的最佳配合间隙为 0.1-0.15mm,在此范围内既能保证运动灵活性,又能有效防止介质泄漏。此外,在阀瓣顶部设置了缓冲结构,通过液压阻尼效应减缓阀瓣关闭末期的冲击速度,将冲击力控制在允许范围内。

3 流体阻力特性与流场分析

流体阻力特性是评价止回阀性能的重要指标,直接影响系统的能耗和运行效率,本文通过计算流体动力学方法,系统分析了双关双断衬氟止回阀的内部流场特性,研究了流道结构对流体阻力的影响规律。

建立精确的三维流场模型是进行分析的基础,模型考虑了阀门的实际结构特征,包括流道形状、阀瓣位置、密封结构等细节,采用多参考坐标系方法模拟阀瓣的运动状态,分析了不同开度下的流动特性。网格划分采用混合网格技术,在近壁区域进行加密处理,确保计算精度。湍流模型选择标准的 $k-\varepsilon$ 模型,能够准确预测阀门内的流动分离和涡流现象。

流场分析结果表明,优化后的流线型流道显著改善了流动状态,与传统直角转弯流道相比,优化设计的流道有效避免了流动分离现象,减少了涡流的产生。在阀门全开状态下,流速分布均匀,最大流速出现在喉部区域,但未出现明显的流速尖峰。这种流动特性使得局部能量损失大大降低,流体阻力系数相比传统结构降低了约 35%。

阀瓣结构对流体阻力有着决定性影响,通过参数化研究,确定了最优的阀瓣型线。研究发现,阀瓣头部采用椭圆曲线型线,尾部采用翼型设计,能够有效引导流体平稳转向,减少尾流区的涡流尺度。同时,阀瓣重量经过精确计算,在保证密封力的前提下尽可能减轻重量,降低了阀门启闭所需的压差,进一步减少了流体阻力。

在不同开度工况下的流场分析揭示了阀门的调节特性,小开度时,阀门主要起节流作用,流速增加但总流量较小;中开度时,流场趋于稳定,阻力系数保持较低水平;全开时,流道通畅,阻力最小。这种特性使得阀门在部分开启工况下仍能保持较好的流动性能,适应系统的调节需求。

此外,还研究了介质性质对阻力特性的影响,针对不同粘

度和密度的介质,分析了阻力系数的变化规律。结果表明,优化后的结构对各种介质都具有良好的适应性,阻力系数随雷诺数的变化较为平缓,这一特性保证了阀门在多种工况下都能保持稳定的性能表现。

为了更深入研究阀门的流动特性,开展了多工况下的流场仿真分析,在不同开度条件下,系统研究了流速分布、压力场特性和能量损失规律。研究发现,阀门在 75%开度时流动状态最佳,此时流线平顺,涡流区域最小,通过粒子图像测速技术验证了仿真结果的准确性,最大误差控制在 5%以内。

针对含固体颗粒介质的特殊工况,进行了固液两相流仿真分析,采用离散相模型追踪颗粒运动轨迹,研究了不同粒径颗粒在阀内的运动特性。结果表明,优化后的流道结构能够有效引导颗粒通过阀门,避免了在死角区域的沉积。对于 100 μm 以上的颗粒,通过率达到 98%以上,显著降低了阀门堵塞的风险。同时,通过调整流道曲率,使颗粒对衬氟层的冲击角度控制在安全范围内,延长了阀门的使用寿命。

在温度影响研究方面,分析了不同温度下介质物性变化对流动特性的影响,建立了温度-粘度-阻力系数的关系模型,为阀门在高温工况下的应用提供了理论依据。研究发现在 150℃ 高温条件下,由于介质粘度降低,阀门阻力系数较常温时下降约 12%,这一结论为系统设计提供了重要参考。同时,通过热应力分析验证了衬氟层在高温条件下的结构完整性,确保阀门在许可温度范围内安全运行。

4 实验验证与性能测试

为验证理论分析和优化设计的正确性,建立了完整的实验测试系统,对双关双断衬氟止回阀的性能进行了全面测试,测试系统包括密封性能测试装置、流体阻力测试回路、寿命试验台等,能够模拟各种工况并采集精确的试验数据。

密封性能测试按照相关标准进行,包括壳体强度试验和密封试验,强度试验采用 1.5 倍公称压力,保压时间不少于 15 分钟,检验阀体结构的完整性,密封试验分别进行低压密封试验和高压密封试验,检测阀门的泄漏率。试验结果表明,优化后的阀门在各类试验中均达到零泄漏,密封等级符合 VI 级要求,经过 1000 次启闭循环试验后,密封性能仍保持稳定,未出现明显衰减。

流体阻力测试采用压差法,通过测量阀门前后压力损失计算阻力系数,测试在专门的水力试验台上进行,流量测量采用电磁流量计,压力测量采用高精度压力传感器。试验数据显示,在全开状态下,阀门的阻力系数为 0.18,明显低于传统止回阀的 0.25-0.35。在不同开度下的阻力特性测试表明,阀门在 30% 以上开度时都能保持较低的阻力系数,这一特性有利于系统的节能运行。

寿命试验模拟了实际工况下的长期运行情况,试验介质采

用含有固体颗粒的腐蚀性溶液，试验周期持续6个月。定期检测阀门的密封性能和操作力矩，记录性能变化趋势，试验结果显示，在经过10000次启闭循环后，阀门的主要性能指标仍保持在允许范围内，衬氟层完好无损，密封副磨损均匀，证明了设计的合理性和可靠性。

动态特性测试重点关注阀门的响应性能，通过高速摄像机记录阀瓣的运动轨迹，分析阀门的启闭特性，测试表明，阀门在系统压力波动时能够快速响应，有效防止介质倒流。关闭时的水击压力控制在安全范围内，不会对管道系统造成损害。这些特性确保了阀门在复杂工况下的可靠运行。

此外，还进行了环境适应性试验，包括温度循环试验、振动试验等，验证阀门在恶劣环境下的性能稳定性。所有试验结果均表明，优化设计的双关双断衬氟止回阀各项性能指标达到或超过了设计要求，具有优异的综合性能。

5 结论与展望

本研究通过系统性的结构优化和性能分析，成功开发出具有优异密封性能和低流体阻力的双关双断衬氟止回阀，研究结果表明，创新设计的双密封结构、优化的衬氟工艺和改进的流道形式，有效解决了传统止回阀在强腐蚀工况下面临的技术难题。

参考文献：

- [1] 倪红军,金宇阳,张福豹,等.阀门衬氟技术研究现状与进展[J].塑料工业,2017,45(02):10-14.
- [2] 张宇.LYHT 空排止回阀的动态性能测试与分析[J].阀门,2000,(02):14-18.
- [3] 屈科科,张跃刚,薛金东.基于阀门性能实验的流阻系数回归分析[J].煤矿机械,2011,32(01):72-74.
- [4] 伍国果,虞明方,金容,等.轴流式止回阀内流场计算与分析[J].煤矿机械,2017,38(03):20-21.

在技术创新方面，本研究的主要成果包括：提出了金属与氟塑料复合的密封结构，实现了双重密封保障；开发了流线型流道设计，显著降低了流体阻力；优化了衬氟工艺，提高了衬层的可靠性和耐久性。这些创新不仅提升了产品的技术水平，也为行业发展提供了新的方向。

从性能指标来看，优化后的止回阀密封等级达到VI级，流体阻力系数降低至0.18，使用寿命显著延长，这些性能优势使得产品在化工、制药等领域的应用中展现出显著的经济效益和社会效益。特别是在节能环保方面，低流体阻力特性有助于降低系统运行能耗，符合绿色制造的发展理念。

展望未来，衬氟止回阀技术仍具有较大的发展空间，首先，在智能化方面，可以集成状态监测和故障诊断功能，实现阀门的预测性维护。其次，在新材料应用方面，可以开发新型氟塑料复合材料，进一步提高产品的耐温和耐腐蚀性能。此外，标准化和系列化工作也需加强，以满足不同行业的需求。

在技术研究方向上，建议重点关注以下几个方面：一是深入研究多场耦合作用下的密封机理，建立更精确的性能预测模型；二是开发适应极端工况的特殊结构，拓展产品的应用范围；三是研究快速检测和维护技术，提高设备的可用性。这些研究将推动止回阀技术向更高效、更可靠的方向发展。