

耐负压衬氟蝶阀的结构设计与负压工况下力学性能研究

郑祥松 郑浩炜^(通讯作者)

祥松阀门集团有限公司 325025

【摘要】针对传统衬氟蝶阀在负压工况下易发生衬层剥离和结构失效的问题,本研究提出一种新型耐负压衬氟蝶阀的创新结构设计方案,通过优化阀体加强筋布置、改进衬氟层锚固结构、创新阀杆密封系统等关键技术,显著提升了阀门在负压工况下的结构稳定性和密封可靠性。采用有限元分析方法系统研究了阀门在负压条件下的应力分布和变形特性,并通过实验验证了优化设计的有效性。研究结果表明,优化后的衬氟蝶阀在-0.1MPa负压工况下,最大变形量控制在0.15mm以内,衬层与阀体结合强度提升40%,密封性能达到零泄漏标准,本研究为耐负压衬氟阀门的开发提供了重要的理论依据和实践指导。

【关键词】衬氟蝶阀; 负压工况; 结构设计; 力学性能; 有限元分析

Structural Design and Mechanical Performance Study of Negative-Pressure Resistant Fluorine-Coated Butterfly Valves**

Zheng Xiangsong Zheng Haowei^(Corresponding Authors)

Xiangsong Valve Group Co., Ltd. 325025

【Abstract】Addressing the common issues of lining delamination and structural failure in traditional fluorine-coated butterfly valves under negative pressure conditions, this study proposes an innovative structural design for a new negative-pressure-resistant fluorine-coated butterfly valve. By optimizing key technologies—including the arrangement of valve body stiffeners, improving the fluorine-coating anchoring structure, and innovating the valve stem sealing system—the structural stability and sealing reliability of the valve under negative pressure are significantly enhanced. A finite element analysis was employed to systematically investigate the stress distribution and deformation characteristics of the valve under negative pressure conditions, with experimental validation confirming the effectiveness of the optimized design. The results demonstrate that the improved valve exhibits a maximum deformation of ≤ 0.15 mm under -0.1 MPa negative pressure, a 40% increase in bonding strength between the lining and valve body, and sealing performance meeting zero-leakage standards. This study provides crucial theoretical foundations and practical guidance for the development of negative-pressure-resistant fluorine-coated valves.

【Key words】fluorinated butterfly valve; negative pressure operating condition; structural design; mechanical properties; finite element analysis

一、引言

衬氟蝶阀作为流程工业中重要的控制设备,以其优异的耐腐蚀性能和较低的成本优势,在化工、制药、环保等领域得到广泛应用。然而,在真空系统、抽吸管道等负压工况下,传统衬氟蝶阀面临着严峻的技术挑战,负压环境会在阀门内部产生外向张力,容易导致氟塑料衬层与金属阀体分离,进而引发密封失效和结构损坏,这一技术瓶颈严重制约了衬氟阀门在负压系统中的推广应用。

目前,衬氟阀门在负压工况下的失效主要表现为以下几个方面的技术问题:首先,衬氟层在负压作用下产生的剥离应力超过材料结合强度,导致衬层起泡、脱层;其次,阀体结构在外部大气压和内部真空的共同作用下产生过度变形,影响阀门的密封性能和使用寿命;此外,阀杆密封系统在负压条件下容易发生泄漏,导致外部空气进入系统,破坏真空环境。这些问题不仅影响系统的正常运行,还可能引发安全事故。

近年来,国内外学者在衬氟阀门技术方面开展了一系列研究,在结构设计方面,研究人员通过增加衬层厚度、优化锚固结构等措施提高衬层的抗剥离能力;在材料方面,开发了新型的氟塑料合金和复合材料,提高了衬层的力学性能;在制造工艺方面,改进了衬氟成型工艺,增强了衬层与阀体的结合强度。然而,专门针对负压工况的系统研究仍然较少,特别是在阀门整体结构优化和力学性能分析方面还存在明显不足。

本研究从工程实际需求出发,针对衬氟蝶阀在负压工况下的特殊要求,开展系统的结构设计和力学性能研究,通过创新设计阀体加强结构、优化衬层锚固方式、改进密封系统等措施,全面提升阀门在负压条件下的工作性能。采用理论分析、数值模拟和实验验证相结合的研究方法,深入探讨阀门在负压环境下的力学特性和失效机理,为开发高性能耐负压衬氟阀门提供完整的技术方案。

二、耐负压结构设计

2.1 阀体结构优化设计

阀体作为蝶阀的主要承压部件,其结构设计直接影响阀门在负压工况下的力学性能,传统衬氟蝶阀的阀体多为平板式结构,在负压作用下容易产生较大变形,导致衬层受力不均而失效,针对这一问题,本研究提出了加强筋网络结构设计,通过合理布置径向和环向加强筋,显著提高了阀体的抗变形能力。

加强筋的设计采用非均匀分布原则,在应力集中区域增加筋板密度和高度,通过有限元分析确定最优的筋板参数:径向筋板高度为阀体壁厚的1.2倍,厚度为壁厚的0.8倍;环向筋板间距控制在阀体直径的0.15倍以内。这种设计使得阀体在-0.1MPa负压下的最大变形量从传统结构的0.35mm降低到0.12mm,变形均匀性提高了60%。同时,在阀体法兰连接处设置了特殊的抗变形结构,通过增加法兰厚度和优化螺栓孔布置,有效防止了法兰密封面的变形。

阀体流道采用渐缩渐扩的流线型结构,在保证流通能力的前提下,减少了流动阻力和压力损失,流道表面的衬氟层厚度经过精确计算,在易磨损区域适当增加厚度,提高了衬层的使用寿命。此外,阀体与管道的连接方式也进行了优化,采用平面密封与径向密封相结合的双重密封结构,确保了连接部位的密封可靠性。

2.2 衬氟层锚固结构创新

传统的衬氟阀门多采用简单的机械嵌合方式,在负压作用下容易发生衬层剥离,本研究开发了多重锚固结构,通过机械锚固、化学结合和热应力补偿的协同作用,显著提高了衬层的抗剥离能力。

机械锚固结构采用双向锁紧设计,在阀体内表面加工特殊形状的锚固槽,锚固槽的截面为梯形结构,深度为衬层厚度的0.3倍,槽间距根据应力分析结果进行优化分布,这种设计使得衬层在负压作用下产生的是压应力而非拉应力,大大提高了衬层的稳定性。同时,在阀体与衬层的结合界面设置微织构结构,通过激光表面处理技术在金属表面形成规则的微观凹凸结构,增加了结合面积和机械互锁效应。

化学结合方面,开发了专用的过渡层材料,该材料由改性氟塑料和特种粘接剂组成,具有良好的相容性和粘接强度,过渡层的应用使得衬层与阀体的结合强度达到15MPa以上,比传统工艺提高了50%。此外,针对温度变化引起的热应力问题,在衬层设计中设置了应力补偿结构,通过特殊的波纹设计吸收热变形,避免了因温度波动导致的衬层损坏。

2.3 阀杆密封系统改进

传统蝶阀的阀杆密封多采用单一密封结构,在负压条件下密封效果不理想,本研究提出了三重密封方案,包括主密封、副密封和应急密封,形成了可靠的密封保障体系。

主密封采用柔性石墨与氟塑料复合的密封结构,利用柔性石墨的自润滑性和氟塑料的耐腐蚀性,实现了良好的密封效果和较长的使用寿命,密封面的比压经过精确计算,控制在0.5-0.8MPa范围内,既保证了密封的可靠性,又避免了过大的摩擦力。副密封设置在阀杆中部,采用唇形密封结构,

在负压作用下能够自动增强密封效果,应急密封则是在前两道密封失效时启动,通过注入密封脂实现临时密封,为设备维修争取时间。

阀杆的导向结构也进行了优化设计,采用上下双向导向结构,导向套采用耐磨复合材料制造,表面进行特殊处理以降低摩擦系数。导向间隙控制在0.08-0.12mm范围内,既保证了阀杆的运动灵活性,又防止了介质泄漏。

三、负压工况下力学性能分析

3.1 有限元模型建立

为了准确分析衬氟蝶阀在负压工况下的力学性能,建立了包含阀体、衬层、阀杆和密封件的完整三维有限元模型,模型采用实体单元进行网格划分,在应力集中区域进行网格细化,确保计算精度,材料参数根据实验数据确定,考虑了氟塑料的非线性特性和温度影响。

边界条件的设置模拟了阀门的实际工作状态,在法兰连接面施加固定约束,在阀体内表面施加-0.1MPa的均布载荷,同时考虑重力作用和温度载荷的影响。接触关系包括衬层与阀体的粘结接触、密封面的摩擦接触等,均采用合适的接触算法进行模拟。

3.2 应力分布特性分析

通过有限元分析得到了阀门在负压工况下的应力分布规律,结果表明,优化后的阀体结构应力分布更加均匀,最大应力出现在阀体与法兰过渡区域,其值为89MPa,低于材料的屈服强度。衬层表面的应力水平较低,最大拉应力为3.2MPa,远低于氟塑料的抗拉强度。

特别值得关注的是衬层与阀体结合面的应力状态,分析显示,结合面的剪应力分布均匀,最大剪应力为1.8MPa,小于材料的许用值。在锚固槽区域,应力集中系数从传统结构的2.5降低到1.8,显著提高了衬层的抗疲劳性能,这些结果表明优化设计有效改善了阀门的应力状态,提高了结构可靠性。

3.3 变形特性研究

阀门的变形特性直接影响其密封性能和工作可靠性,分析结果显示,在-0.1MPa负压作用下,阀体的最大变形发生在中心区域,变形量为0.12mm,变形模式为对称分布。法兰密封面的平面度变化控制在0.05mm以内,确保了密封的有效性。

衬层的变形分析显示了其独特的力学行为,由于氟塑料的弹性模量较低,衬层的变形量相对较大,但通过合理的锚固设计,变形呈现均匀分布特征,避免了局部过度变形。阀杆系统的变形分析表明,双向导向结构有效控制了阀杆的挠度,最大挠度值为0.08mm,保证了阀门的操作灵活性。

3.4 疲劳寿命预测

基于应力分析结果,对阀门进行了疲劳寿命预测,采用应变寿命方法,考虑了负压循环载荷的作用。预测结果表明,在正常工作条件下,阀门的疲劳寿命达到 10^5 次循环以上,

满足工业应用的要求。同时,通过敏感性分析确定了影响寿命的关键参数,为后续优化提供了方向。

四、实验验证与性能测试

4.1 实验系统建立

为了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。系统包括负压模拟装置、应力应变测量系统、密封性能检测装置等,能够模拟阀门在实际工况下的工作状态。负压模拟装置采用真空泵组和压力控制系统,可在 -0.1MPa 至 0MPa 范围内精确控制压力,应力应变测量采用电阻应变片和光纤光栅传感器,实现了关键部位应力状态的实时监测。

4.2 结构性能测试

结构性能测试主要包括刚度测试和强度测试,刚度测试通过施加阶梯式负压载荷,测量阀体的变形情况,测试结果显示,在 -0.1MPa 载荷下,阀体最大变形量为 0.13mm ,与有限元分析结果吻合良好。强度测试采用超载法,逐步增加负压值直至 -0.15MPa ,阀门未出现永久变形和结构损坏,证明了设计的可靠性。

衬层结合强度测试采用拉拔试验法,测量衬层与阀体的剥离强度,测试结果表明,优化后的衬层结合强度达到 16.2MPa ,比传统结构提高了 45% 。同时,通过加速老化试验评估了衬层的长期性能,经过 1000 小时的热循环试验后,结合强度仍保持在初始值的 90% 以上。

4.3 密封性能验证

密封性能测试包括阀座密封测试和阀杆密封测试。阀座密封测试采用气泡检测法,在 -0.1MPa 负压下保压 30 分钟,未检测到泄漏现象,阀杆密封测试采用氦质谱检漏法,泄漏率小于 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m} / \text{s}$,达到零泄漏标准。

动态密封性能测试模拟了阀门在启闭过程中的密封特性,测试结果表明,在经过 10000 次启闭循环后,阀座密封性能仍保持稳定,阀杆密封的泄漏率无明显增加。

4.4 工况适应性测试

为了评估阀门在不同工况下的性能,进行了系列工况适应性测试。包括温度循环测试(-20°C ~ 150°C)、压力波动测试(0 ~ -0.1MPa 循环)和介质腐蚀测试等。测试结果显示,阀门在各种工况下均能保持稳定的性能,证明了设计的广泛适应性。

参考文献

- [1]汪晓峰,叶益帆.下展式衬氟(带测温)装置的放料阀[J].仪器仪表用户,2016,23(12):68-69+90.
- [2]鲁春艳.阀门执行器箱体加强筋优化设计与分析[J].机械工程与自动化,2021,(06):1-3+6.
- [3]沈民侠,沈永增,杨勇,等.耐负压自控阀的关键性能优化与应用研究[J].科技资讯,2025,23(12):80-82.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2502-5042-0710.
- [4]缪克在,吴超俊,孙志民,等.高压阀门压力自密封结构设计与分析[J].石油化工设备,2024,53(06):48-51.

五、工程应用与效益分析

优化设计的耐负压衬氟蝶阀在多个工业领域得到了成功应用,在化工行业的真空精馏系统中,阀门连续运行 12 个月未出现故障,使用寿命比传统产品提高了 3 倍以上。在制药企业的无菌输送系统中,阀门的零泄漏特性确保了系统的洁净度要求,提高了产品质量。

经济效益分析显示,虽然新型阀门的初始投资比传统产品高约 20% ,但由于使用寿命的延长和维护成本的降低,其全生命周期成本降低了 35% 。特别是在连续生产系统中,减少停机时间带来的效益更为显著。

此外,新型阀门的推广应用还带来了显著的社会效益,其优异的密封性能减少了介质泄漏对环境的污染,提高了生产过程的安全性,长寿命设计降低了设备更换频率,减少了废旧设备处理带来的环境压力。这些效益符合现代工业绿色发展的要求,具有重要的社会意义。

六、结论与展望

本研究通过系统的结构设计和力学性能分析,成功开发出具有优异耐负压性能的衬氟蝶阀,研究表明,优化后的阀门在结构强度、密封性能和可靠性等方面均显著优于传统产品。主要创新点包括:提出了加强筋网络结构设计,提高了阀体的抗变形能力;开发了多重锚固结构,增强了衬层的抗剥离性能;创新设计了三重密封系统,确保了阀门的密封可靠性。

有限元分析为结构优化提供了理论指导,实验验证证明了设计的有效性,阀门在 -0.1MPa 负压工况下表现出良好的力学性能,最大变形量控制在 0.15mm 以内,衬层结合强度达到 16MPa 以上,密封性能满足零泄漏要求。

展望未来,耐负压衬氟阀门技术仍具有较大的发展空间。建议重点关注以下几个研究方向:首先是智能化技术的应用,通过集成传感器和监测系统,实现阀门的状态监测和预测性维护;其次是新材料的开发,研究具有更高强度和更好耐温性的氟塑料复合材料;此外,标准化和模块化设计也是重要的发展方向,可以提高产品的适用性和降低制造成本。

在制造工艺方面,需要进一步研究精密的衬氟成型技术和质量控制方法,提高产品的一致性和可靠性。这些努力将有助于满足流程工业对高性能阀门不断增长的需求,为相关产业的发展提供有力支撑。