

深海高压环境下水下节流阀密封性能优化设计与试验验证

于小涛 王涛 刘化国 贾鹏 罗添发
威飞海洋装备制造有限公司 山东东营 257000

摘要: 随着海洋油气资源勘探不断向深水、超深水区域拓展,海底装备在高压、高腐蚀、高风险环境中的长期稳定运行成为关键技术挑战。其中,水下节流阀作为水下采油树的核心组件之一,其密封性能直接关系到整个生产系统的安全性与稳定性。本文围绕深海高压工况下水下节流阀的密封设计需求,系统分析了现有密封结构的不足,提出了基于材料选型、结构优化及多场耦合分析的密封性能提升策略。结合有限元仿真与物理试验,对新型密封结构进行了多工况验证,结果表明优化设计可有效提高节流阀在极端环境下的密封可靠性,为后续水下关键装备国产化与工程应用提供了理论依据与实践参考。

关键词: 深海高压; 水下节流阀; 密封性能; 结构优化; 试验验证

引言

全球能源需求持续增长促使海洋油气资源开发不断向更深远海区域推进。深海作业环境下,水下装备需长期稳定运行于高压、低温、高腐蚀等极端工况,对其密封、耐压与控制性能提出更高要求。水下节流阀作为井口流量调节、压力控制及远程启闭的关键装置,其密封性能直接关系到整个采油系统的安全性与稳定性。一旦泄漏,不仅可能造成油气流失与海底污染,还会引发系统失压、作业中断等严重后果。目前普遍采用金属—弹性体复合结构应对深水挑战,但传统材料在高压、低温与流体冲刷下容易失效,密封面亦易产生磨损、裂纹等问题,加之深海作业维护困难,密封系统亟需更高可靠性。水下节流阀(又称“油嘴”),作为水下采油树不可或缺零部件之一,是深海油气开发装备生产系统的重要组成部分,服役温度可达 $-29 \sim 121^{\circ}\text{C}$,承压 $69 \sim 103.4 \text{ MPa}$,在控制平台可发出指令远程驱动节流阀的开启和关闭,并可实时监测节流阀在海底泥面位置的开度数据。为此,本文聚焦深海高压环境下水下节流阀的密封可靠性问题,结合密封失效机制与多物理场耦合仿真,提出结构优化方案并开展试验验证,力图建立更稳定高效的密封系统,为深海油气开发提供理论支持与工程基础。

基金项目: 海洋油气深水节流阀关键技术与国产化研制(项目编号: YDZX2023118)。

一、深海工况对节流阀密封性能的挑战与影响因素分析

(一) 高压低温环境下的密封失效机制

深海环境通常伴随着极高的静水压力和较低的温度,对水下节流阀的密封结构和材料性能构成极大挑战。随着作业水深的增加,节流阀密封腔体所承受的外压可超过 100 MPa ,而密封材料若设计不当,容易出现体积压缩、密封面变形以及应力集中等问题,导致密封性能下降。尤其是传统弹性体密封材料,在高压挤压下易发生“冷流”或永久变形,影响其复原能力和密封功能。此外,深海低温环境(最低可达 -29°C)使橡胶类材料面临低温脆化、弹性下降等风险,极易出现硬化裂纹,导致介质泄露,进而引发系统故障甚至环境污染。

另一方面,密封副之间的摩擦与配合在深海环境中也更为敏感。密封面在压力加载与卸载过程中的频繁接触,使其产生磨损、疲劳裂纹与金属屑附着等现象,进一步恶化密封状态。尤其在节流阀需要频繁启闭或长时间维持微开度运行的情境下,密封面的动态稳定性成为影响整体寿命的关键因素。加之深海作业维护机会极少,一旦密封结构失效,现场更换或维修难度巨大,因此密封材料的低温韧性、耐压性能以及结构设计中的力学缓冲能力必须综合考虑,以确保其在深海环境中的长期可靠性与运行安全。

(二) 流体特性及颗粒冲蚀对密封的影响

深海油气井口输出流体中往往混合有砂粒、腐蚀性组分及不稳定组分,这些因素对节流阀密封区域构成持续冲击和侵蚀。一方面,颗粒介质高速流经密封副时,

会产生明显的冲蚀磨损,削弱密封接触面形貌,导致微泄漏逐步扩大甚至结构性破坏。另一方面,海底油气流体常富含 H_2S 、 CO_2 等腐蚀性成分,会对金属密封面产生点蚀、应力腐蚀开裂等现象,尤其在局部高应力或温差梯度区域更为严重,降低了密封系统整体的安全冗余。

此外,节流阀在长周期服役过程中,流体温度、压力的频繁波动也会引起密封结构热胀冷缩效应,从而造成密封面间隙变化和接触不均,影响密封接触应力分布。若设计中未考虑这些动态干扰因素,将大大降低密封的稳定性与一致性。因此,节流阀密封系统必须兼顾抗冲蚀、耐腐蚀与适应动态压力变化的能力,形成稳定、持久的多重密封保障体系,为水下采油系统的高可靠运行提供坚实支撑。

二、密封结构优化设计与仿真分析策略

(一) 多因素协同下的密封结构优化路径

针对深海高压复杂环境下节流阀密封性能面临的多重挑战,结构优化设计应从力学支撑、应力分布与密封冗余三个核心维度出发,构建稳定高效的密封体系。传统的“O”型圈或“V”型密封结构虽具有一定弹性补偿能力,但在承受高压与低温循环载荷时常发生压溃、翻边或密封面错位等问题。因此在优化设计中,可引入金属-非金属复合密封结构,将弹性体用于密封补偿与柔性贴合,金属构件用于提供结构支撑和抗压防护,从而实现刚柔结合的密封模式。

在结构布置上,通过增加多道密封副并采用对称型密封槽,有助于在压力激增或瞬时卸载时保持密封力均衡。密封唇口角度与密封接触线宽度的微调也极为关键,可有效调控密封载荷传递路径,避免密封副在高压下出现接触不稳定或载荷突变。此外,在节流阀壳体内部设定缓冲腔、限压槽等结构,也能对瞬时液压波动起到阻尼作用,从结构层面提升系统的抗扰动能力。优化过程中需充分考虑密封件加工公差、装配应力及现场使用条件的综合影响,以确保设计具有实际可操作性与工程适应性。

(二) 基于有限元仿真的多场耦合验证方法

在密封结构优化阶段,引入有限元仿真手段可显著提升设计的精准性与效率。尤其是在深海高压低温环境下,密封件所处工况不仅包括机械载荷,还涉及热场变化与流体冲刷,因此建立多物理场耦合模型成为关键。通过ANSYS、Abaqus等仿真平台,可对密封副结构在不同压力、温度梯度下的应力分布、变形量及接触状态进行预测,评估其在全生命周期内的密封稳定性。

仿真过程中可设置典型极限工况,如开启状态下的最大压力冲击、关闭状态下的低温静压保持、流体砂粒冲刷周期作用等,逐一测试密封面在不同荷载路径下的响应特性。特别是对于复合材料密封结构,通过材料模型参数的逐层设置,可预测其在变形缓冲、压缩回弹过程中的失效边界,从而为实际产品开发提供理论参考。此外,还可利用仿真数据反向调整结构参数,缩小试验成本与周期,实现从“经验迭代”向“数据驱动”的设计模式转型,为后续试验阶段提供精确初始条件与性能预期。

三、水下节流阀密封性能试验设计与测试结果分析

(一) 试验系统搭建与测试方案设计

为验证优化后的水下节流阀密封结构在深海高压工况下的性能稳定性,需构建可模拟真实工况的综合性能测试平台。本次试验系统包括高压液压加载装置、低温环境模拟装置、流体输送与测控系统、密封监测模块四部分,可模拟温度范围 $-40 \sim +130^{\circ}C$ 、压力范围 $0 \sim 120$ MPa,并具备远程启闭控制与实时数据采集功能。测试节流阀样机采用优化结构,包括双唇复合密封副、预载密封腔体与抗腐蚀涂层处理壳体,全面反映结构优化效果,并采用模块化设计,便于快速拆装与多组数据测试。

试验方案按工作状态设置多个测试工况,分别涵盖:①稳态高压密封性能测试;②低温环境下启闭循环测试;③压力突变响应试验;④混合流体砂粒冲蚀试验;⑤连续启闭动作疲劳试验等。试验过程中采用多点同步监测策略,通过布设应力传感器、温度传感器、位移传感器与开度编码器,可实现对节流阀密封部位在静态和动态工况下的状态精准记录。泄漏量采用微量气泡法与压力保持时间法双重检测,确保试验数据真实可靠且可重复。整个试验流程严格遵循API 6A与ISO 10423等国际标准,并结合企业自研试验规范执行,保证测试结果具备工程参考价值 and 推广适应性。

(二) 试验结果分析与密封优化验证

试验结果表明,所优化设计的水下节流阀在不同温压组合工况下均保持优良密封性能。在高压测试阶段(90 MPa,常温),密封副无渗漏现象,压力保持24小时内降幅小于0.2 MPa,远优于传统结构的0.6 MPa表现,说明结构密封性提升显著;在低温测试阶段($-30^{\circ}C$, 60 MPa),弹性体密封结构未出现开裂或硬化现象,启闭次数超过3000次后仍具完整回弹性,密封效能未出现明显衰减,说明其低温适应性良好。尤其在冲蚀试验中,复合材料密封副耐冲击性能较强,唇口磨损量低于设计容限,说明结构防护设计有效延缓了介质磨损和腐蚀疲劳。

在动态循环工况下, 节流阀密封副在频繁启闭动作中仍保持稳定接触应力分布, 未出现因疲劳导致的密封失效现象。通过高频启闭测试验证, 该结构具备良好的耐久性和抗疲劳性能。与此同时, 远程启闭控制系统响应灵敏, 节流阀位置回馈精度达 $\pm 1\%$, 系统闭合时间及回弹响应均保持在设计范围内, 说明优化结构与智能控制系统具备良好的协同兼容性。综合各阶段数据与各类环境测试结果, 充分验证了本次优化设计的可靠性与工程适应性, 表明其具备深海高压工况下的推广前景与批量应用基础。

四、工程应用前景与密封系统的持续优化方向

(一) 面向工程场景的应用推广潜力分析

随着全球深水油气开发步伐的加快, 对高性能水下节流阀的需求不断增长。本文所提出的密封优化设计方案及试验验证结果, 为水下关键装备的国产化提供了有力支撑。在满足 API 6A、ISO 13628 等国际标准基础上, 该节流阀在深海高压、低温、腐蚀和冲蚀等典型极端环境中表现出较强的适应能力, 具备在南海、东海及海外深水油田推广应用的技术成熟度。尤其在配套智能控制系统之后, 节流阀可实现远程精确启闭与密封状态实时监测, 显著提升油气生产的安全性与自动化水平, 契合“智能油田”发展趋势。

从装备供应链角度看, 该结构设计便于标准化制造、模块化集成与快速更换, 降低了后期维护难度和整体生命周期成本。在深海油田长周期无人值守运行的背景下, 该结构的可靠性优势尤为突出, 具备更高的工程运维效率。此外, 该密封结构设计理念还可扩展至其他水下关键设备, 如水下安全阀、水下节流管汇、水下连接器等, 形成以高可靠密封技术为核心的模块化装备集成体系, 推动我国海底生产系统的自主化和技术升级, 提升整体竞争力。

(二) 未来密封系统的技术发展方向

尽管本文在密封结构设计与试验验证方面取得了阶段性成果, 但要应对未来深水开发更加复杂和极端的应用需求, 仍需在材料、结构与系统集成方面持续创新与突破。一方面, 应积极开发适用于深海多场耦合环境的新型密封材料, 如纳米复合弹性体、自修复涂层材料、具有温敏响应能力的功能性材料等, 以增强抗老化、耐低温、耐腐蚀和抗冲蚀性能。另一方面, 在密封结构方面, 可探索智能化密封理念, 例如集成微型传感器实现密封状态的实时检测、反馈与预警, 构建“自感知+自调节”型密封系统, 实现从“静态密封”向“主动响应

密封”的跨越, 全面提升运行安全边界。

此外, 随着数字化转型加速, 数字孪生、AI辅助仿真优化、虚拟试验台等新一代技术应纳入密封系统研发流程, 实现基于大数据驱动的快速迭代、个性化设计与极限工况预测, 提高研发效率和产品适应性。面对未来更大水深、更高压力、更复杂介质条件的挑战, 密封系统将成为决定海洋油气装备安全性与可靠性的核心环节。未来应强化材料学、力学、海洋工程等多学科交叉协同研究, 构建涵盖材料-结构-系统-应用全链条的高端密封技术体系, 全面支撑我国海洋能源开发由“跟跑”迈向“并跑”乃至“领跑”的战略转变。

结论

水下节流阀作为深海油气生产系统中的关键控制部件, 其密封性能的稳定性与可靠性直接关系到整个采油系统的安全运行。本文针对深海高压、低温、冲蚀与腐蚀等极端工况, 提出了一种基于复合材料与结构优化设计的节流阀密封方案, 并通过有限元多场耦合仿真与物理试验验证其性能表现。结果表明, 优化结构具备良好的耐压、抗低温与动态启闭稳定性, 适应多种复杂工况, 满足深水作业密封安全要求。研究不仅为水下节流阀的工程应用提供了理论依据与实践支持, 也为其他海底关键装备的密封系统设计提供了可借鉴的技术路径。未来应进一步推动材料创新、智能监测与系统集成发展, 全面提升我国深海装备的核心竞争力与自主化水平。

参考文献

- [1] 王彬, 王武海, 陈沛沛, 等. 一种长距离高效驱动水下可回收式节流阀的设计[J]. 中国海上油气, 2023, 35(03): 192-203.
- [2] 程子云, 张玉, 张玉龙, 等. 水下采油树节流阀卡箍式连接器强度分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 169-175. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2019.01.021.
- [3] 王光雪, 李卫强, 龚光辉. 水下节流阀流量系数试验装置和方法[J]. 化工管理, 2025(1): 136-139. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2025.01.032.
- [4] 王武海, 于小涛, 孙雪飞, 等. 一种水下节流阀压力和温度补偿装置[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(9): 190-194, 201. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2024.09.052.
- [5] 张哲, 安晨, 魏代锋, 等. 水下节流阀砂粒冲蚀数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(6): 160-172. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.06.017.