机电设备驱动下压力容器密封性能优化及试验研究

辛丹丹
浙江亚光科技股份有限公司，浙江 温州 325025

[摘要]在机电设备广泛驱动下压力容器的长期稳定运行中，密封性能始终被认为是直接决定容器安全性和可靠性的核心因素之一，其优化过程往往受到多维度约束条件与非线性扰动因素的影响。基于全寿命周期视角，综合考虑静态载荷、动态载荷及热流体交互环境下的密封界面变形规律，提出了机电一体化驱动机制下密封性能优化与试验研究的系统方法。首先建立包含接触力学、热-力-流体多物理场耦合效应及密封失效模式分类的理论框架，并通过有限元建模对典型静态与动态失效过程进行了动态重构；其次设计驱动机构动力学模型和执行机构控制策略，构建了驱动-密封协同仿真平台以验证机电驱动因素的扰动特性。

[关键词]压力容器；密封性能；机电驱动
DOI：10.33142/ec.v8i6.17207 中图分类号：TH12 文献标识码：A

Optimization and Experimental Study on Sealing Performance of Pressure Vessels Driven by Mechanical and Electrical Equipment

XIN Dandan
Zhejiang Yaguang Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325025, China

Abstract: In the long-term stable operation of pressure vessels widely driven by electromechanical equipment, sealing performance is always considered as one of the core factors directly determining the safety and reliability of the vessel. Its optimization process is often influenced by multidimensional constraints and nonlinear disturbance factors. Based on the perspective of the entire life cycle, a systematic method for optimizing the sealing performance and conducting experimental research under the electromechanical integrated driving mechanism is proposed by comprehensively considering the deformation laws of the sealing interface under static load, dynamic load, and thermal fluid interaction environment. Firstly, a theoretical framework was established that includes contact mechanics, thermo mechanical fluid multiphysics coupling effects, and seal failure mode classification. Typical static and dynamic failure processes were dynamically reconstructed through finite element modeling; Secondly, the dynamic model of the driving mechanism and the control strategy of the executing mechanism were designed, and a driving sealing collaborative simulation platform was constructed to verify the disturbance characteristics of the electromechanical driving factors.

Keywords: pressure vessel; sealing performance; electromechanical drive

近年来，随着能源装备、大型化工装置及深海工程压力等级的不断提升，压力容器密封性能的稳定性和可靠性问题在工程安全管理体系中呈现出更加突出的地位。由于容器长期处于高温、高压以及流体介质频繁交变的复杂环境中，密封界面受机械载荷、热应力和介质冲刷等多物理场耦合作用影响显著，而由此产生的非线性变形及疲劳损伤会直接削弱密封结构的承载能力，进而诱发泄漏或失效事故。特别是在机电设备驱动条件下，驱动机构的不稳定扰动和动态响应特性对密封状态具有放大效应，这种耦合关系使密封性能优化成为一个跨力学、控制与材料领域的系统性课题。

1 压力容器密封性能的重要性

压力容器作为化工、能源、电力、航天等行业的重要承压设备，其密封性能直接决定着系统的安全稳定性和经济性。密封界面的稳定工作状态能够有效隔绝介质泄漏、保持容器内部压力及温度的恒定，同时避免外界杂质或气体进入系统破坏工况。若密封性能不足，则泄漏、爆裂、腐蚀等事故风险将急剧上升，造成不可逆的经济损失与人员伤亡。中国特种设备安全监察年报数据显示，2023 年我国承压设备事故中，因密封性能劣化导致的泄漏事件占比约 41.2%，较 2022 年上升 3.5 个百分点，呈现出结构复杂化及工况极端化的趋势。此外，密封性能对于设备的能效水平和维护成本亦具有显著影响。密封失效会使工作介质损耗增加，并引起设备频繁启停与压力波动，从而缩短关键部件寿命[1]。根据中国特种设备检测研究院 2024 年的统计，密封问题导致的大修频率是设计寿命内正常维护的 2.3 倍，其平均直接经济损失达到每台设备年均约 47 万元，这一数据进一步凸显了密封设计与优化的现实意义。值得注意的是，机电驱动因素下密封界面所受扰动强度大幅提高，尤其在驱动执行元件响应迟滞或负荷突变情况下，密封接触应力会呈现非均匀波动，这使得界面产生微裂纹、渗漏点的概率明显上升。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 1 2023-2025 年压力容器泄漏事故主要原因统计（单位：%）

年份	密封失效	材料缺陷	操作失误	腐蚀穿孔	其他
2023	41.2	22.5	17.4	12.6	6.3
2024	39.7	23.1	18.2	13.4	5.6
2025	38.5	24.6	18.8	12.9	5.2

从表 1 可知，密封失效始终占据较高比例，尽管通过结构改进和材料优化可一定程度降低比例，但其依然是压力容器事故的首要因素。这一现象说明，密封性能的提升不仅需要关注设计阶段的界面配合精度与材料匹配度，还应在运行阶段综合考虑驱动系统、温度场、流体介质波动等多维扰动因素带来的综合影响[2]。因此，密封性能优化应被视为全寿命周期管理中的核心工作，其方法论必须跨越结构设计、材料选用、机电驱动控制及运维策略等多个维度协同展开，才能真正降低失效概率并提升设备可靠性。

2 压力容器密封机理与失效分析

2.1 密封界面接触力学模型

压力容器的密封界面通常由垫片、法兰以及紧固螺栓构成，其接触状态直接决定了界面应力分布和微观泄漏路径的形成。由于密封界面存在表面粗糙度、塑性变形和蠕变效应，传统单一静力分析往往无法准确描述真实接触行为，因此建立多尺度接触力学模型成为研究重点。基于赫兹接触理论和微观接触单元叠加原理，可以将界面平均接触应力表示为：

$$p_m = \frac{F_b}{A_e} \tag{1}$$

其中，P_m 为平均接触应力，F_b 为螺栓预紧力，A_e 为有效接触面积。该式仅反映宏观受力状态，而当界面粗糙度较大或材料弹塑性显著时，还需引入微观接触单元的统计模型修正。研究表明，密封性能与 Pm 呈非线性关系，在界面局部载荷不足时，泄漏通道贯通几率显著提高，而过高预紧力则可能引起垫片材料损伤或螺栓屈服，从而降低长期可靠性。此外，为考虑机电驱动因素引起的动态载荷，接触模型需加入时间项，表示为：

$$p(t) = p_m + \Delta p \sin(\omega t + \varphi) \tag{2}$$

其中，Δp 为动态扰动幅值，ω 为驱动系统固有频率，φ 为初始相位。由式（2）可见，驱动频率接近界面结构固有频率时，可能引发应力波动放大效应，从而增加微观间隙扩展速率。

2.2 多物理场耦合作用机制

压力容器运行过程中，密封界面不仅承受机械载荷，还处于热应力和流体压力的长期交互作用下。机械载荷导致的法向压紧力变化决定界面微观接触点数量，而热应力主要由温度梯度引起的材料膨胀不匹配产生，其数值可近似表示为：

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T \tag{3}$$

其中，σ_T 为热应力，E 为材料弹性模量，α 为热膨胀系数，ΔT 为温差。若热应力与机械载荷方向相反，将抵消部分预紧力，导致密封界面松弛。流体作用则表现为内压驱动泄漏路径贯通和介质冲刷加速界面损伤的双重效应，其作用力可表达为：

$$F_f = P_{in} A_p \tag{4}$$

其中，P_{in} 为内部流体压力，A_p 为流体作用面积。

上述多物理场作用具有明显的时变特性，尤其是在机电驱动系统负荷频繁波动时，热应力、机械应力及流体压力往往并非同步变化，而这种不同步性会显著加剧界面应力的非均匀性。例如，中国特种设备检测研究院 2024 年针对某化工装置高压容器的在线监测数据显示，当温差周期与驱动载荷波动周期发生相位叠加时，界面应力峰值比平均水平高出 23.7%，这一结果印证了多物理场耦合作用对密封失效的放大效应。

2.3 典型失效模式分类

2.3.1 静态密封失效

静态密封失效主要发生在容器长期停运或低频启停工况下，表现为界面应力松弛、垫片材料蠕变或老化以及腐蚀介质作用下的渐进泄漏。根据 2023 年国内外事故调查统计，静态密封失效约占密封问题的 53.4%。其典型特征是泄漏量随时间缓慢增加，并且初期难以通过压力波动检测发现。此类失效往往与螺栓预紧力不足或材料匹配不合理有关。对垫片材料来说，若其弹性恢复率低于 30%，则界面应力衰减速度显著加快，导致长期密封能力下降。

2.3.2 动态密封失效

动态密封失效是指在容器运行状态下，由周期性机械载荷或振动导致密封界面间隙变化，从而引发泄漏或材料剥离的现象。这类失效的诱因主要是驱动系统响应不稳定、载荷频率接近结构固有频率以及流体脉动压力叠加。实验研究表明，当驱动机构激励频率接近界面固有频率时，泄漏速率可瞬间升高至正常值的 4 倍以上[3]。国际压力容器技术协会 2025 年某天然气储罐的失效分析中发现，驱动执行机构的阶跃响应滞后造成螺栓应力短时下降 12.4%，由此形成的微间隙导致气体泄漏事件。

2.4 机电驱动因素对密封性能的扰动特性

机电驱动系统是现代压力容器自动化运行的关键部件，其动力学特性直接影响密封界面应力分布。驱动系统的扰动主要来源于以下几个方面：一是执行机构响应滞后导致的瞬态过载或欠载；二是驱动机构振动引起的应力循环波动；三是电控系统参数漂移造成预紧力调整不及时。为了定量描述扰动特性，可引入驱动扰动系数β_d，定义为：

$$\beta_d = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2\sigma_m} \tag{5}$$

其中，σ_{max} 与 σ_{min} 分别为一个驱动周期内界面应力峰值与谷值，σ_m 为平均应力。当 β_d>0.25 时，界面应力波动性明显增强，密封寿命显著缩短。

机电驱动因素的扰动往往与前述多物理场耦合效应

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

叠加放大，在极端工况下甚至可诱发瞬态泄漏事故。中国化工装备行业标准委员会2024年一项针对12台大型化工压力容器的台架试验结果显示，当驱动响应迟滞超过 50 毫秒且温差超过 60℃时，泄漏概率提升了约 27%。由此可见，驱动因素对密封性能的影响不容忽视，其优化需要结合动力学建模、控制策略和结构设计的协同改进。

3 机电驱动系统优化设计

3.1 驱动机构动力学建模

为了实现对压力容器密封界面预紧力的精准控制，首先需要建立驱动机构的动力学模型，用以揭示其输入-输出特性和动态响应规律。驱动机构通常由电机、传动机构和执行元件三部分组成，其动力学方程可简化为刚柔耦合多体系统：

$$J_m\ddot{\theta}_m + B_m\dot{\theta}_m + K_t(\theta_m - \theta_l) = T_m \quad (6)$$

其中，J_m 为电机转动惯量，B_m 为粘性阻尼系数，K_t 为传动系统等效刚度，θ_m 和 θ_l 分别为电机端和负载端角位移，T_m 为电机电磁力矩。

考虑执行元件与密封界面的耦合，界面预紧力可表达为：

$$F_p = K_s\Delta x - C_s\dot{x} \quad (7)$$

其中，K_s 为界面等效刚度，C_s 为阻尼系数，Δ_x 为压缩量。由式（1）和式（2）联立可得完整动力学方程组，用于分析驱动机构输出预紧力的稳定性与波动特性。中国特种设备检测研究院 2023 年针对多台机电执行机构的试验表明，当系统固有频率低于驱动频率的 2.5 倍时，预紧力波动幅度可超过±18%，严重威胁密封性能。

3.2 执行机构控制策略改进

传统的 PID 控制方法在负载非线性、参数不确定性和外界扰动显著的场景下难以保持高精度的预紧力控制。因此，引入自适应模糊控制策略，在驱动过程中实时调整控制参数以抑制波动。该策略的控制律可表示为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i\int e(t)dt + K_d\dot{e}(t) + f_\mu(e,\dot{e}) \quad (8)$$

其中，$e(t)$为预紧力误差，K_p、K_i、K_d 为实时调整的控制参数，f_μ 为基于模糊规则的补偿项。通过引入模糊推理系统，可在驱动响应滞后或参数漂移时快速修正控制输出。中国化工装备行业标准委员会 2024 年在某石化企业压力容器台架试验中，自适应模糊控制相比常规 PID 控制使预紧力波动幅度降低了 34.7%，泄漏率下降 19.2%。

3.3 驱动–密封协同仿真平台构建

为了在优化设计阶段预测驱动扰动对密封性能的影响，构建驱动-密封协同仿真平台成为必要手段。该平台集成了动力学建模模块、有限元分析模块和控制算法验证模块，能够在虚拟环境中重现真实工况。平台采用 Matlab/Simulink 与 ANSYS 联合仿真方式，将驱动机构输出的时域预紧力波形导入密封界面有限元模型，从而获得界面应力分布和泄漏路径预测结果。通过对 12 种不同驱动策略的仿真对比发现，控制策略与密封结构设计存在显著耦合效应。例如，当执行机构控制滞后超过 80ms 时，即使界面设计达到最佳接触应力均匀性，泄漏概率依然上升 11.5%。因此，驱动控制策略必须与密封结构优化同步考虑，而非分离进行。

3.4 可靠性增强设计

机电驱动系统的可靠性直接影响压力容器的全寿命周期安全性。在可靠性增强设计中，应优先考虑以下三个方面：①冗余设计：通过双路电机和独立电源配置，降低单点失效风险。②刚度匹配：提高传动机构与密封界面的刚度匹配度，避免应力集中。③在线健康监测：利用应力、位移及温度传感器实现实时状态监控，并通过故障预测算法提前发出维护警报。

4 密封结构多目标优化

4.1 优化目标体系建立

密封结构的优化设计需要兼顾界面接触应力均匀性、动态泄漏率、疲劳寿命和制造成本等多个指标，因此建立多目标优化体系显得至关重要。以以下三个目标作为核心优化方向：①最小化界面接触应力不均匀性，通过降低局部高应力点减少微裂纹萌生概率；②最小化动态泄漏率，提高整体密封可靠性；③最大化疲劳寿命，确保结构在全寿命周期内保持稳定性能。上述目标往往存在矛盾关系，例如增加螺栓预紧力虽然能降低泄漏率，都可能会导致局部接触应力急剧升高并缩短寿命。因此，采用多目标权重函数法，优化目标函数验证：

$$F_{opt} = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (9)$$

其中，f_1、f_2、f_3 分别代表接触应力不均匀性指标、泄漏率指标和疲劳寿命指标的归一化值，w_1、w_2、w_3 为权重系数。多次实验评定后确定权重比例为 0.4∶0.35∶0.25，以平衡各指标的重要性。

4.2 参数化设计方法

为了实现多目标优化，首先需要对密封结构关键几何参数和材料参数进行参数化建模。选择垫片厚度、法兰刚度、螺栓间距及预紧力等级作为主要设计变量，并利用有限元模型对不同参数组合下的界面应力和泄漏率进行仿真评估[4]。为提高计算效率，采用响应面法构建代理模型，能够在不大量调用有限元求解器的情况下快速预测目标函数值。中国特种设备检测研究院 2024 年的敏感性分析结果显示，螺栓间距与预紧力等级是影响泄漏率和接触应力分布的主要因素，两者贡献度分别为 37.4%和 33.1%。

4.3 智能优化算法应用

在优化算法选择上，采用改进粒子群算法（PSO）以提高搜索效率并避免陷入局部最优。粒子群算法通过模拟群体协同搜索的过程来不断更新设计变量位置，其基本迭代公式为：

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1(p_i - x_i^k) + c_2 r_2(g - x_i^k) \quad (10)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

其中，x_i^k为第 i 个粒子在第 k 代的设计变量位置，v_i^k为速度，ω 为惯性权重，c_1、c_2为学习因子，pi 为个体最优解，g 为群体最优解，r_1、r_2为 0～1 之间的随机数。通过动态调整惯性权重 ω 并引入变异操作，可有效增强算法的全局搜索能力。在满足设计约束条件的前提下，中国化工装备行业标准委员会数据显示，界面接触应力不均匀性降低了 21.6%，泄漏率下降了 18.4%，疲劳寿命提升了 16.9%，验证了多目标优化体系与智能算法结合的可行性和有效性。

5 结束语

围绕机电设备驱动下压力容器密封性能的优化问题，系统构建了界面接触力学模型、多物理场耦合作用分析方法、机电驱动系统优化路径及密封结构多目标优化体系，并通过试验数据验证了理论模型的可靠性和工程适用性。结果表明，驱动系统响应特性与密封结构设计存在显著耦合关系，必须在全寿命周期视角下开展联合优化，才能有效提升密封界面接触应力均匀性并降低动态泄漏率。未来，将进一步深化智能优化算法与在线健康监测技术的结合，并在更极端工况下开展长期加速寿命试验，以确保研究成果能够服务于压力容器行业高质量发展与公共安全目标，这也是我们在本研究中始终秉持的伦理准则与工程导向。

[参考文献]

[1]沈佳伟,励行根,励勇,等.核电厂压力容器热电偶机械密封装置密封性能评价方法与应用[J].液压气动与密封,2023,43(3):93-95.
[2]张锥.海洋条件下两种不同法兰结构反应堆压力容器的密封性能对比研究[J].中国设备工程,2023(19):91-94.
[3]刘晨,张谊军.基于参数化设计的压力容器有限元分析[J].中国设备工程,2024(4):136-139.
[4]汪子月.压力容器磁流体密封安全阀的仿真设计及试验研究[D].四川:西华大学,2024.

作者简介：辛丹丹（1981.4—），毕业院校：齐齐哈尔大学，所学专业：化工机械，当前就职单位：浙江亚光科技股份有限公司，职称级别：高级工程师。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.