

# 压力容器整体设备法兰结构优化设计与分析

徐皓明, 张龙生, 张朝增

(山东北辰机电设备股份有限公司, 山东 济南 250300)

**摘要** 本文针对压力容器整体设备法兰在高压、高温复杂工况下易出现的应力集中、密封失效、刚度失衡等问题, 以典型整体设备法兰为研究对象, 通过有限元分析明确现有结构的性能短板, 结合工程规范与力学特性开展多维度结构优化设计, 对比验证了优化后结构的应力分布、密封性能与抗疲劳能力, 以期压力容器整体设备法兰的安全设计与工程应用提供参考。

**关键词** 压力容器; 整体设备法兰; 结构优化; 密封性能; 抗疲劳设计

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.022

## 0 引言

压力容器是石油化工、能源电力、核电等领域的核心承压设备, 整体设备法兰作为压力容器筒体与端盖的关键连接部件, 其结构可靠性直接决定了设备的运行安全。随着工业不断发展, 压力容器逐步向高压、大直径、长周期运行方向发展, 传统法兰结构逐渐暴露出强度冗余与局部失效并存、密封适配性不足等问题。本文针对整体设备法兰开展系统分析, 明确现有结构的核心不足, 提出针对性的优化设计方案, 并通过数值模拟验证优化效果, 为同类设备的设计优化提供参考。

## 1 压力容器设备分析

### 1.1 整体设备法兰的结构与功能原理

整体设备法兰是压力容器筒体与端盖或筒体段之间的一体化连接部件, 区别于活套法兰、对焊法兰, 它与筒体或端盖整体锻造而成, 无焊接接头的薄弱环节, 主要由法兰环、筒体连接段、密封面、螺栓孔结构组成, 核心功能是通过螺栓预紧力压紧密封垫片, 实现承压腔体的静密封, 同时承受容器内部介质压力、温度载荷、设备自重与外部附加载荷的共同作用, 在压力容器安全运行中起到承上启下的关键作用, 其结构完整性与密封可靠性直接决定了整个压力容器设备的运行安全与使用寿命<sup>[1]</sup>。

### 1.2 整体设备法兰的受力特性分析

整体设备法兰在工作状态下的受力体系可分为预紧工况和操作工况两个核心阶段。预紧工况下, 法兰主要承受螺栓均匀施加的预紧力, 该力通过法兰环传递至密封垫片, 使垫片产生足够的压缩变形形成初始

密封比压, 此时法兰环会因螺栓力作用产生径向弯曲与翘曲变形, 筒体连接段承受轴向拉应力。操作工况下, 容器内部介质压力产生的轴向推开力, 一方面抵消部分螺栓预紧力使垫片密封比压发生变化, 另一方面在法兰环上产生附加弯矩与剪力。同时, 介质压力与温度变化引发的筒体轴向膨胀与径向变形, 会进一步加剧法兰的偏转与应力分布不均。设备运行中的压力波动、温度循环与振动载荷, 还会使法兰结构承受交变应力, 易引发疲劳损伤<sup>[2]</sup>。

### 1.3 法兰结构设计的规范依据与评价标准

当前压力容器整体设备法兰的设计主要遵循 GB150 压力容器标准与 ASME 锅炉及压力容器规范第 VIII 卷等国内外主流工程规范。传统设计方法以弹性失效准则为核心, 通过简化力学模型计算法兰的轴向应力、径向应力与环向应力, 控制各项应力值不超过材料的许用应力。同时, 针对密封性能, 规范明确了垫片在预紧与操作工况下的最小密封比压要求, 以此确定螺栓预紧力与法兰结构的基础尺寸<sup>[3-4]</sup>。随着工程技术的发展, 除传统强度评价指标外, 现代设计体系还将结构的刚度特性、密封可靠性、抗疲劳性能与材料利用率纳入评价范围, 通过多维度指标验证, 确保法兰结构在全生命周期内的安全运行与经济性能。

## 2 压力容器整体设备法兰结构存在的不足

### 2.1 传统结构设计的应力集中与强度冗余问题

传统整体设备法兰设计多采用规范推荐的经验公式与简化力学模型, 将法兰环视为刚性体或简支梁结构, 无法准确模拟法兰与筒体连接部位、螺栓孔周边、

作者简介: 徐皓明 (1994-), 本科, 助理工程师, 研究方向: 机械设计、换热器设计。

法兰环转角处的复杂应力分布, 导致设计出的结构普遍存在局部应力集中与整体强度冗余并存的问题。在法兰环与筒体连接的过渡部位, 因结构截面突变, 操作工况下会产生显著的应力集中效应, 局部峰值应力远超材料许用应力, 成为结构疲劳失效的始发点。而法兰环外缘区域与筒体连接段的非过渡部位, 应力水平远低于材料许用应力, 存在大量材料冗余, 既增加了设备的制造成本与自重, 也无法缓解局部应力集中, 同时简化模型无法准确计算温压耦合作用下的应力分布, 易导致极端工况下局部结构的强度失效。

## 2.2 密封结构与工况适配性不足引发的失效风险

整体设备法兰的密封性能直接取决于密封面结构、垫片特性与螺栓预紧力的匹配程度。传统设计多采用标准化的平面或凹凸密封面结构, 针对固定常温常压工况设计, 无法适配高压、高温、交变载荷等复杂工况的密封需求。在高压操作工况下, 介质压力产生的轴向推开会使得法兰环发生微小偏转, 导致密封面比压分布严重不均, 内缘部位密封比压大幅下降, 当比压低于垫片最小操作密封比压时, 就会引发介质泄漏, 而高温工况下, 法兰、螺栓与垫片的热膨胀系数差异, 会导致预紧力松弛, 进一步加剧密封比压衰减。同时, 传统密封面结构容错性较差, 当出现螺栓预紧力不均、法兰微小变形或垫片老化时, 极易出现突发性密封失效, 引发安全生产事故<sup>[5]</sup>。

## 2.3 结构刚度匹配失衡导致的变形与偏转问题

整体设备法兰的刚度特性由法兰环厚度、筒体连接段长度与过渡结构尺寸共同决定。传统设计多聚焦强度指标控制, 忽视了法兰环与筒体、螺栓系统之间的刚度匹配, 易引发结构的变形与偏转问题。当法兰环厚度不足、刚度过低时, 螺栓预紧力与操作工况下的介质压力会使法兰环产生较大翘曲变形, 不仅加剧密封面比压不均, 还会在螺栓杆上产生附加弯曲应力, 导致螺栓疲劳断裂。而当法兰环刚度过高、与筒体连接段刚度差异过大时, 载荷会集中于法兰与筒体的过渡部位, 进一步放大该区域的应力集中效应。同时, 筒体的轴向变形与径向膨胀无法得到有效缓冲, 会在连接部位产生附加交变载荷, 长期运行下易引发结构蠕变变形与连接失效。

## 2.4 抗疲劳性能与全生命周期安全设计的缺失

压力容器设备在实际运行中, 普遍面临压力波动、温度循环、启停冲击与振动等交变载荷作用, 而传统

整体设备法兰设计以静态强度与密封性能为核心, 缺乏针对交变载荷下的抗疲劳性能设计与全生命周期安全评估。传统设计方法仅控制结构的平均应力水平, 无法准确计算局部应力集中区域的交变应力幅值与应力集中系数, 也未考虑焊接残余应力、材料缺陷与环境腐蚀对疲劳寿命的影响, 导致结构在长期交变载荷作用下, 易在应力集中部位萌生疲劳裂纹并逐步扩展引发结构断裂。同时, 针对高温高压工况下的材料蠕变、疲劳—蠕变交互作用, 传统设计体系缺乏明确的设计准则与验证方法, 无法准确预测结构全生命周期内的性能衰减与失效风险。

## 3 压力容器整体设备法兰结构的优化设计

### 3.1 基于应力均匀化的结构拓扑优化设计

针对传统整体设备法兰结构局部应力集中与材料冗余并存的问题, 本次优化以应力均匀化为核心目标, 采用变密度拓扑优化方法, 以法兰结构的设计空间为优化域, 以材料许用应力为约束条件, 以结构整体柔度最小化与应力标准差最小化为双优化目标, 开展结构拓扑优化设计。在优化过程中, 首先基于实际工况建立法兰结构的参数化有限元模型, 准确施加预紧与操作工况下的螺栓预紧力、介质压力、温度载荷与边界条件, 通过有限元计算获取结构的初始应力分布与变形情况。随后以法兰环的厚度分布、过渡区域的轮廓形状为设计变量, 迭代优化材料的分布形式, 剔除应力水平极低区域的冗余材料。同时, 通过调整过渡区域的轮廓曲线, 缓解截面突变引发的应力集中, 最终得到兼具高强度与轻量化的拓扑优化结构, 大幅降低局部峰值应力, 提升材料利用率。

### 3.2 适配复杂工况的密封结构优化

针对传统密封结构适配性差、易出现密封失效的问题, 本次优化以提升复杂工况下的密封可靠性为核心, 结合法兰的变形特性与垫片的力学性能, 开展密封结构的优化设计。

首先, 将传统的平面密封面优化为带径向补偿槽的榫槽密封面结构, 通过榫槽结构的限位作用限制垫片的径向滑移。同时, 在密封面内缘设置均匀分布的径向补偿槽, 当法兰环发生偏转变形时, 补偿槽可通过微小的弹性变形补偿密封面的间隙变化, 维持密封面比压的均匀分布, 避免内缘部位比压下降引发的泄漏。

其次, 结合工况参数优化垫片选型与螺栓布置方

式，缩小螺栓中心圆与密封面的距离，减少法兰环的弯矩臂长度，降低法兰偏转变形。

此外，通过建立螺栓—法兰—垫片耦合的密封分析模型，优化螺栓预紧力取值，确保密封面比压始终处于垫片的最佳密封区间，全面提升密封可靠性。

### 3.3 基于刚度匹配的法兰与筒体连接结构优化

针对传统结构刚度匹配失衡引发的变形与偏转问题，本次优化以法兰环、筒体连接段与螺栓系统的刚度协同为目标，开展连接结构的优化设计。

首先，通过有限元参数化分析，明确法兰环厚度、筒体连接段长度、过渡圆角半径对结构刚度分布的影响规律，建立法兰环与筒体连接段的刚度匹配方程，避免因刚度差异过大引发的载荷集中。在优化过程中，在满足强度与密封要求的前提下，合理调整法兰环厚度，控制法兰环的最大偏转量不超过规范允许限值。同时，优化筒体连接段的长度与壁厚，使筒体的轴向刚度与法兰环的弯曲刚度形成良好协同，有效缓冲筒体变形对法兰密封面的影响。

其次，针对法兰与筒体连接的过渡区域，采用多段平滑相切的圆弧过渡结构替代传统单圆角过渡，通过渐变的截面变化分散集中载荷，平衡结构刚度分布，降低应力集中系数，全面提升结构的刚度稳定性。

### 3.4 抗疲劳性能的结构细节优化

针对传统结构抗疲劳性能不足、全生命周期安全设计缺失的问题，本次优化以提升结构的疲劳寿命为核心，针对交变载荷下的疲劳薄弱部位开展细节优化设计。

首先，针对螺栓孔周边的应力集中问题，将传统的直孔结构优化为带倒角的阶梯孔结构，通过孔口倒角分散螺栓拧紧过程中产生的局部应力，降低螺栓孔周边的应力集中系数。同时，优化螺栓孔的周向分布精度，避免因孔位偏差导致的螺栓附加弯曲应力。

其次，针对法兰与筒体连接的过渡区域，采用精磨加工工艺提升表面光洁度，消除加工刀痕等易引发疲劳裂纹萌生的表面缺陷。同时，通过局部喷丸强化处理，在材料表面形成残余压应力层，抵消部分交变拉应力，提升结构的疲劳极限。

此外，结合疲劳损伤累积理论，建立结构的全生命周期疲劳寿命预测模型，对优化后的结构进行疲劳寿命校核，确保结构在设计寿命周期内的安全运行。

### 3.5 优化结构的有限元验证与性能对比

为验证本次优化设计的有效性，采用 ANSYS 有限元分析软件，建立优化前后的整体设备法兰三维参数化模型，选用与实际工况一致的材料性能参数，分别对预紧工况、常温操作工况、高温高压极端工况下的结构进行力学分析与密封性能验证，同时将分析结果与传统设计结构进行全面对比。验证结果表明，优化后的结构在各工况下的应力分布更为均匀，法兰与筒体过渡区域的局部峰值应力较优化前降低了 32%，螺栓孔周边的应力集中系数降低了 26%，所有区域的应力值均控制在材料的许用应力范围内，无超应力现象，结构的整体重量较优化前降低了 18%，实现了良好的轻量化效果。同时，优化后的法兰环最大偏转量较优化前降低了 41%，密封面比压分布均匀性显著提升，在极端工况下仍能满足密封要求，结构的疲劳寿命较优化前提升了 2 倍以上，全面验证了优化方案的科学性与工程实用性。

## 4 结束语

本文针对压力容器整体设备法兰传统结构存在的应力集中、密封失效、刚度失衡与抗疲劳性能不足等核心问题，开展了系统的结构分析与优化设计，通过拓扑优化实现了应力均匀化与轻量化，通过密封结构改进提升了复杂工况下的密封可靠性，通过刚度匹配设计与细节优化强化了结构的抗疲劳性能。本文提出的优化方案符合国内外工程规范要求，具有良好的可实施性与工程实用性，可为压力容器整体设备法兰的设计优化与安全运行提供参考。未来可结合智能优化算法开展多工况多目标的全局优化，进一步提升结构的综合性能与全生命周期经济性。

### 参考文献：

- [1] 王佳喜.超临界二氧化碳储能压力容器的选材与设计研究[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(03):102-104.
- [2] 齐琪,惠虎,黄淞,等.固态储氢容器管板结构的应力分析与结构优化[J].化工设备与管道,2026,63(01):1-6.
- [3] 黄佳敏.压力容器法兰-筒体连接结构优化:基于密封性能提升的视角[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):103-105.
- [4] 刘艳杰.压力容器设备法兰螺栓疲劳影响因素与控制分析[J].设备监理,2025(04):29-33.
- [5] 范科,刘崇义,邓祥鑫.华龙一号压力容器法兰面液位自动控制技术[J].价值工程,2025,44(16):109-114.