

# 压力容器用整体设备法兰结构优化设计分析

刘寅

蓝星工程有限公司

DOI : 10.12238/jpm.v5i7.7008

**[摘要]** 压力容器中的法兰结构是其关键部件，尤其在换热器中尤为重要。法兰的设计不仅决定了压力容器的密封性能，还影响其整体结构强度和稳定性。传统的法兰设计方法通常依赖于经验和手工计算，效率低下且准确性不高。本文将介绍基于有限元法的压力容器设备法兰结构优化策略，探讨法兰密封的模块化设计方法，并结合具体实例分析设计输入条件和计算模型，旨在为法兰结构优化设计提供科学的理论依据和实践指南。

**[关键词]** 设备法兰；整体法兰；结构优化；设计分析

## Analysis of optimized design of integral equipment flange for pressure vessel

Liu Yin

Blue Star Engineering Ltd

**[Abstract]** The flange structure in the pressure vessel is the key component, especially in the heat exchanger. The design of the flange not only determines the sealing performance of the pressure vessel, but also affects its overall structural strength and stability. Traditional flange design methods usually rely on experience and manual calculation, and are inefficient and inaccurate. This paper will introduce the optimization strategy of flange structure of pressure vessel equipment based on finite element method, discuss the modular design method of flange seal, and analyze the design input conditions and calculation model combined with specific examples, aiming to provide scientific theoretical basis and practical guide for the optimization design of flange structure.

**[Key words]** equipment flange; overall flange; structure optimization; design analysis

压力容器中的整体设备法兰是关键部件，尤其在换热器中尤为重要。根据设计压力、设计温度、材质等选择法兰时，通常依据 NB/T 47020~47027 标准。然本文以具体实例，利用 VBA 编程，通过大量数据计算和分析，探讨变量与应力和刚度之间的关系，为设备法兰设计优化提供理论依据和技术支持。

### 1 压力容器设备法兰设计的有限元法优化策略

#### 1.1 法兰结构初始设计计算

在压力容器设计中，法兰结构的初始设计计算是整个优化过程的基础。初始设计阶段主要依据 GB/T 150.3-2011 标准，采用经典的计算方法进行法兰尺寸和结构的确定。首先，根据

设备的设计压力、设计温度、材料性质以及工艺参数等条件，计算出法兰的基本尺寸参数。初始设计过程中需要考虑到法兰的轴向应力、径向应力、切向应力以及综合应力，这些应力参数对法兰的结构安全性和稳定性具有重要影响。

具体步骤包括确定法兰的外径和内径，计算法兰的厚度和螺栓数量等参数。使用 Excel 及 VBA 软件，可以快速进行这些计算，提高效率的同时确保计算结果的准确性。在实际操作中，通过大量数据分析和多次试算，可以初步确定法兰的各项参数，为后续的有限元分析和优化设计提供基础数据。

#### 1.2 建构法兰参数化有限元分析模型

在完成法兰结构的初步设计后，下一步是建立法兰的参数化有限元分析模型。有限元分析 (FEA) 是一种数值计算方法，通过将法兰结构离散化为有限数量的单元，模拟其在不同载荷和边界条件下的应力和变形情况。利用有限元分析，可以深入了解法兰在工作状态下的力学行为，识别出设计中的薄弱环节。

参数化建模是指通过定义一系列可变参数，如法兰厚度、螺栓直径、螺栓数量等，建立一个可调整的模型。这样可以方便地进行多次模拟和优化。使用软件如 ANSYS 或 ABAQUS，可以进行高效的有限元分析。通过调整参数并进行多次模拟，可以逐步优化法兰结构，确保其在满足强度和刚度要求的同时，达到最优的重量和材料利用率。最终，基于有限元分析的结果，对初始设计进行调整和优化，形成最终的法兰设计方案。

## 2 压力容器设备法兰密封的模块化设计

### 2.1 确立初始条件

压力容器法兰的密封性能直接影响设备的安全运行。在进行法兰密封设计时，首先需要确立初始条件，这包括法兰的工作环境、介质类型、工作压力和温度等。确定初始条件后，需要选择合适的密封垫片材料和结构形式。常见的密封垫片材料有石墨、橡胶、金属等，不同材料适用于不同的工况。垫片的选择还需考虑其应力分布和压缩回弹性能，以确保在各种工作条件下都能保持良好的密封效果。同时，法兰连接螺栓的选择和布置也需要根据初始条件进行优化，确保螺栓预紧力分布均匀，以提高密封性能。

### 2.2 设计动态构件

在确立初始条件后，下一步是进行法兰密封的模块化设计，特别是动态构件的设计。动态构件主要包括法兰密封面、垫片和螺栓等部件。这些部件的设计需要综合考虑设备的运行状态和外部环境变化。

首先，法兰密封面的设计需要保证其在不同载荷下的接触应力均匀分布。可以通过有限元分析模拟不同载荷下的密封面应力分布情况，优化密封面形状和尺寸。其次，密封垫片的设计需要考虑其材料特性和结构形式，通过实验和模拟相结合的方法，选择最适合的垫片材料和厚度，确保密封性能稳定可靠。在模块化设计中，通过预先定义各种构件的参数化模型，可以灵活调整设计方案，快速响应不同的设计需求，提高设计效率和准确性。

## 3 设计输入条件

本文所讨论的换热器设备法兰的设计输入条件，基于工艺数据和 NB/T 47020~47027 标准，具体表 1 所示：

表 1 设计输入条件

项目	数值
计算压力, MPa	2
设计温度, °C	250
壳体材料	Q345R
壳体直径, mm	500
轴向外载荷, N	0
腐蚀余量, mm	3
外力矩, N·mm	0
法兰材料	16Mn
垫片外径, mm	563
垫片内径, mm	525
垫片比压力, MPa	69
螺栓材料	35CrMoA
螺栓直径	M24
螺栓数量	20
Le, mm	26
LA, mm	34

通过明确以上设计输入条件，可以为法兰的优化设计提供详细的基础数据。在实际设计过程中，可能还需要根据具体工况进行适当调整，以确保设计的法兰能够满足使用要求。

## 4 计算依据及模型

计算依据为 GB/T 150.3-2011 第 7 章法兰。通过 VBA 软件进行大量数据计算和分析。计算结果如下：

### 4.1 厚度与应力和刚度的关系

当小端厚度  $\delta_0=7$ ，大端厚度  $\delta_1=24$ ，锥段高度  $h=51$ （即锥段坡度  $\alpha=18.43^\circ$ ）时，法兰厚度  $\delta_f$  与轴向应力  $\sigma_H$ 、径向应力  $\sigma_R$ 、切向应力  $\sigma_T$ 、综合应力  $\sigma$  及刚度系数  $J$  的关系如图 3.1 所示。

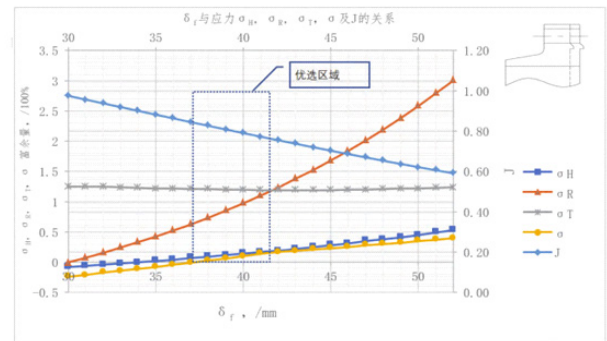


图 3.1  $\delta_f$  与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及  $J$  的关系曲线图

### 4.2 高度与应力和刚度的关系

当  $\delta_1=24$ ， $\delta_f=45$ ， $\alpha=18.43^\circ$  时， $h$  与应力  $\sigma_H$ 、 $\sigma_R$ 、 $\sigma_T$ 、 $\sigma$  及  $J$  的关系如图 3.2 所示。

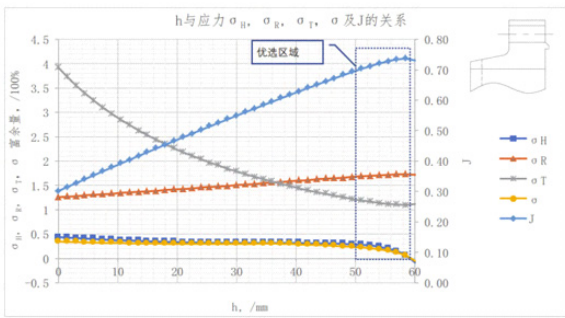


图 3.2 h 与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及 J 的关系曲线图

4.3 坡度与应力和刚度的关系

当  $\delta_1=24$ ,  $\delta f=45$ ,  $h=55$  时,  $\alpha$  与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及 J 的关系如图 3.3 所示。

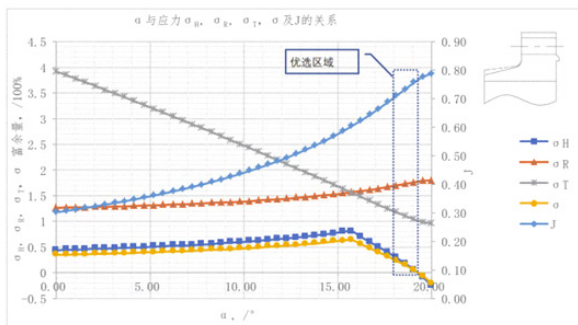


图 3.3  $\alpha$  与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及 J 的关系曲线图

4.4 大端厚度与应力和刚度的关系

当  $\delta_0=7$ ,  $\delta f=45$ ,  $\alpha=18.43^\circ$  时,  $\delta_1$  与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及 J 的关系如图 3.4 所示。

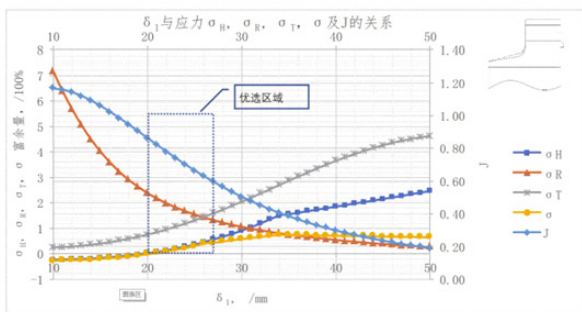


图 3.4  $\delta_1$  与应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma$  及 J 的关系曲线图

5 结果分析

5.1  $\delta_1$  (大端厚度)

大端厚度  $\delta_1$  对各类应力和刚度系数均有显著影响。随着  $\delta_1$  的增加, 轴向应力  $\sigma_H$  和综合应力  $\sigma$  的富余量均表现出缓慢增加的趋势。这表明, 在增大大端厚度的情况下, 法兰的抗轴向应力和综合应力的能力有所提升。然而, 径向应力  $\sigma_R$  则在初期显著下降, 随后缓慢下降, 表明增大  $\delta_1$  会减少径向应力的富余量, 提升法兰的抗径向应力能力。切向应力  $\sigma_T$  在  $\delta_1$  增加时显著上升, 显示出较高的敏感性。此外, 刚度系数 J 显

著下降, 意味着法兰的整体刚度在增大  $\delta_1$  时有所降低。

5.2 h (锥段高度)

锥段高度 h 的变化对各应力和刚度系数的影响较为复杂。随着 h 的增加, 轴向应力  $\sigma_H$ 、综合应力  $\sigma$  和切向应力  $\sigma_T$  均表现为缓慢下降的趋势, 而径向应力  $\sigma_R$  则缓慢增加。这意味着在增加锥段高度时, 法兰的抗轴向和综合应力能力有所减弱, 但抗径向应力能力增强。刚度系数 J 随着 h 的增加显著上升, 表明法兰的刚度显著提高。

5.3  $\delta f$  (法兰厚度)

法兰厚度  $\delta f$  对应力和刚度系数的影响较为直接。随着  $\delta f$  的增加, 轴向应力  $\sigma_H$  和综合应力  $\sigma$  均缓慢增加, 显示出法兰的抗这两种应力的能力增强。径向应力  $\sigma_R$  显著增加, 表明法兰的抗径向应力能力显著提升。切向应力  $\sigma_T$  受  $\delta f$  的影响较小, 变化不显著。刚度系数 J 则显著下降, 表明法兰的刚度在增大法兰厚度时有所降低。

5.4  $\alpha$  (锥段坡度)

锥段坡度  $\alpha$  对各应力和刚度系数的影响表现出非线性特点。随着  $\alpha$  的增加, 轴向应力  $\sigma_H$  和综合应力  $\sigma$  在初期缓慢增加, 而后显著下降。这表明在特定坡度范围内, 法兰的抗轴向和综合应力能力会先增强后减弱。径向应力  $\sigma_R$  和切向应力  $\sigma_T$  均表现出缓慢上升的趋势, 显示出法兰的抗这两种应力的能力随坡度增加而增强。刚度系数 J 则表现为先缓慢上升后显著上升的趋势, 表明法兰的刚度在特定坡度范围内显著提高。

6 结论

本文通过详细探讨压力容器设备法兰的设计输入条件、有限元法优化策略以及密封模块化设计, 系统地分析了法兰结构优化的关键因素。利用 Excel 及 VBA 软件进行初步设计计算, 并结合有限元分析 (FEA) 方法, 对法兰结构在不同工况下的应力和刚度进行了全面评估。通过参数化建模和多次模拟, 本文揭示了各变量对法兰性能的影响规律, 为法兰的优化设计提供了科学依据和技术支持。未来工作中, 还可以进一步细化参数分析和优化方法, 以提升法兰设计的精度和效率, 推动压力容器设备法兰设计技术的不断进步。

[参考文献]

[1]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.  
 [2]乐观,熊光明,张庆红. CPR1000 反应堆压力容器主螺栓孔螺纹力学分析研究[J].压力容器, 2019, 36(02): 16-21.  
 [3]李金波,孙冬来,吕甜甜,等. 压力容器设备法兰设计的优化策略分析 [J]. 化工管理, 2018, (06): 185.  
 [4]朱永峰.压力容器带法兰结构的疲劳分析[J].山东化工, 2016, 45(13): 178-180+183.