

# 化工设备结构强度优化与轻量化设计探讨

刘芳杏 徐江涛

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

**摘要:** 化工设备设计在满足TSG 21、GB/T 150等压力容器法规和标准的前提下, 兼顾结构优化与轻量化设计目标。本文围绕压力容器设计理论、分析设计与轻量化设计方法, 系统分析影响结构强度关键因素, 构建强度优化设计流程; 探讨轻量化设计的材料选型、结构优化及与强度要求的协调路径; 建立“强度约束—轻量化优化—协同平衡”的协同设计机制。通过理论融合与系统化设计方法, 实现化工设备在满足强度、刚度及稳定性要求前提下的轻量化目标, 为提升设备综合性能与经济性提供工程实践参考。

**关键词:** 压力容器; 化工设备; 结构强度优化; 轻量化设计; 协同机制

引言: 化工设备是石油、化工、煤化工等流程工业的核心装备, 其结构设计直接关系到装置运行的安全性与经济性。随着GB/T 150—2024《压力容器》、GB/T 4732.1~4732.6-2024《压力容器分析设计》等标准规范的更新, 对设备结构设计的合规性、可靠性与经济性提出了更高要求。

传统设计方法往往采用“安全系数叠加”的保守思路, 导致设备壁厚偏大、重量超标, 不仅增加制造成本, 也给吊装、运输及基础设计带来额外负担。如何在满足强度、刚度及疲劳寿命要求的前提下, 实现结构轻量化, 已成为压力容器设计领域的重要研究方向。

本文立足压力容器设计规范, 结合设计方法与结构优化技术, 系统探讨化工设备强度优化与轻量化设计的协同路径, 为工程设计提供理论与实践支撑。

## 1 压力容器设计理论与技术支撑

### 1.1 压力容器结构设计基础理论

化工设备的结构设计以压力容器设计理论为核心, 涵盖弹性力学、板壳理论、极限设计理论与疲劳设计理论等内容。根据GB/T 150或GB/T 4732等标准规范, 设备结构设计需满足强度、刚度、稳定性及密封性要求, 并充分考虑介质特性、操作压力、设计温度及腐蚀裕量等工况参数<sup>[1]</sup>。

### 1.2 结构强度设计方法

结构强度分析是设备优化设计的基础。当前工程实践中, 常用的化工设备结构强度设计主要采用以下技术手段:

一是常规设计方法: 基于第一强度理论, 通过公式计算薄膜应力与弯曲应力, 控制最大应力 $\leq$ 许用应力, 是GB 150、ASME VIII-1的计算依据; 适用于规则结构如圆筒、球壳、标准封头、锥壳等回转壳体。

二是分析设计方法: 依据数值模拟, 获取局部应力分布及位移分布, 对应标准: GB/T 4732、ASME VIII-2; 适用于结构复杂、开孔密集、厚壁容器、疲劳分析、复杂载荷工况。

通过上述方法, 可精准识别结构受力薄弱环节, 为结构冗余梳理与优化提供量化依据。

### 1.3 轻量化设计理论

设备轻量化设计以结构优化与材料合理选用为支撑, 在满足强度、刚度、稳定性及使用寿命的前提下, 最大限度降低结构重量。其核心路径包括以下:

一是材料轻量化: 选用高强度、低密度材料, 如在设计参数和设备介质允许的前提下Q370R替代Q345R, 或采用轻量化复合材料/复合板结构。

二是结构轻量化: 通过结构优化、尺寸优化、形状优化等手段, 去除冗余结构或减小壁厚。如采用球形封头代替椭圆形封头, 用更合理曲率降低应力水平; 减少设备上大开孔、采用整体补强/锻件补强, 避免局部过厚与应力集中<sup>[2]</sup>。

三是工艺轻量化: 采用高强钢薄壁成型、焊接工艺优化等方式, 减少材料消耗。通过焊后热处理、优化焊接顺序等, 减小焊接残余应力, 提升实际承载能力。

轻量化设计遵循“功能适配、强度达标、经济性合理”的原则, 确保优化方案工程可行。

## 2 化工设备结构强度优化设计

### 2.1 结构强度影响因素分析

化工设备结构强度受材料特性、结构几何参数、工况条件及制造工艺等多重因素综合影响。材料性能如屈服强度、抗拉强度、冲击韧性、耐腐蚀性, 直接决定结构承载能力与使用寿命; 结构几何参数如壁厚、直径比、开孔尺寸、补强结构, 影响应力分布与局部应力集

中；工况条件如设计压力、设计温度、介质腐蚀性、循环载荷，决定应力水平与疲劳寿命；制造工艺如焊接质量、热处理状态、成型精度，影响残余应力与结构完整性。上述因素相互作用，共同决定设备结构强度水平，是强度优化设计的关键考量对象。

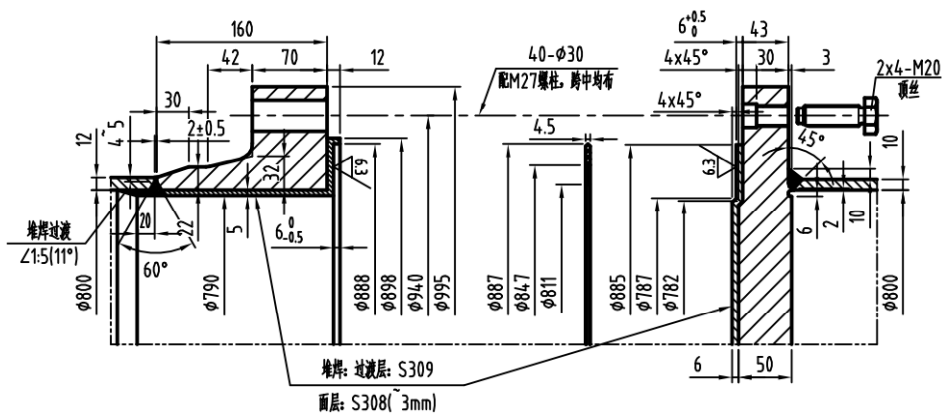
### 2.2 强度优化设计思路与方向

强度优化设计以提升承载能力、减少冗余为核心，贴合实际工况特点。围绕结构受力合理性，针对应力集

中、结构冗余、受力不均等问题制定方案。聚焦薄弱环节强化、结构布局优化、材料适配调整，在保障安全前提下实现强度与效率协同提升。依托设计理论，兼顾实用性与经济性，既解决强度短板，又避免过度设计造成的资源浪费，确保方案贴合实际应用场景。以下为工程实例中管壳式换热器的设备法兰及管板采用碳钢锻件基层加堆焊不锈钢代替不锈钢锻件的应用：

设备法兰与管板连接详图

不按比例



该结构中，碳钢锻件承担强度，不锈钢承担耐腐蚀。这种复合结构让两种材料各司其职，实现了“1+1>2”的力学性能协同效应。

### 2.3 强度优化设计方法选择

强度优化设计方法的选择需结合设备结构特点、工况条件及优化目标，依托工程力学、有限元分析等技术，筛选适配的优化方法。常用方法包括应力分析法、结构优化法、尺寸优化法等。应力分析法通过精准的应力分布，定位薄弱环节并实施针对性优化；结构优化法通过调整结构形态，实现应力合理分布；尺寸优化法通过科学调整结构尺寸，在保证强度的前提下简化结构形式。选择过程应结合设备实际工况，优先选用成熟、适配性强的设计方法，确保优化设计科学可行，符合化工设备设计的行业规范与技术要求。

### 2.4 强度优化设计流程设计

强度优化设计需遵循规范流程，确保衔接顺畅、逻辑严谨。首先开展结构强度检测与受力分析，精准识别薄弱环节与应力集中部位，为优化提供数据支撑。结合检测结果与工况要求，确定优化目标与重点方向，筛选适配的优化方法。实施阶段注重结构细节调整，兼顾强度提升与设备功能完整性。设计完成后进行强度复核，

排查潜在问题，确保优化后结构符合运行要求，形成“检测分析—目标确定—优化实施—复核完善”的闭环流程，保障优化设计落地见效。

## 3 化工设备轻量化设计

### 3.1 轻量化设计核心思路

化工设备轻量化设计核心思路立足设备功能需求与化工生产工况特殊性，设计思路需打破传统厚重化设计惯性，聚焦结构冗余精简与材料高效利用，在坚守设备强度、刚度及使用寿命底线的基础上，摒弃不必要的结构增重，实现轻量化与实用性的协同推进<sup>[3]</sup>。选用高强度材料，在降低壁厚同时保持承载能力；通过应力分析识别非承载区域，去除不必要的加厚与加强；结合成型工艺能力，优化结构形态。从而实现设备重量减轻与结构性能稳定的有机统一。

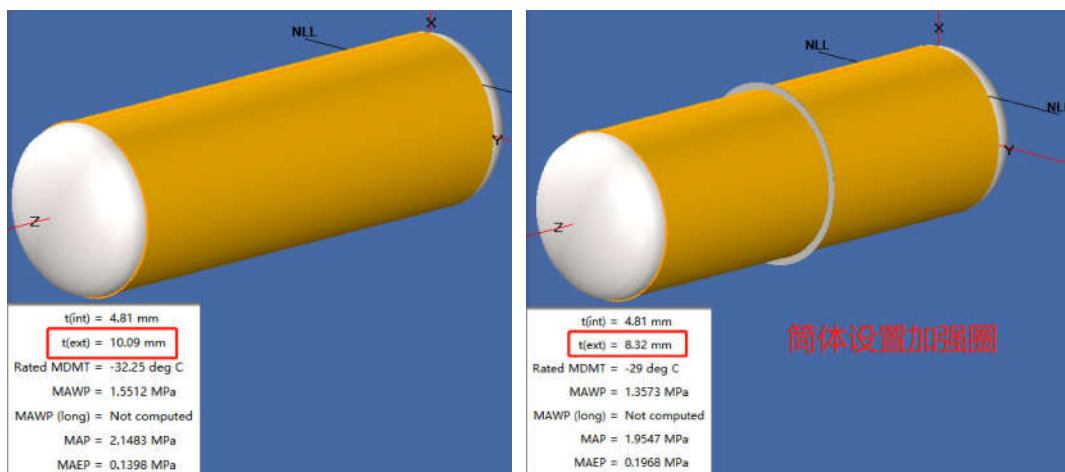
### 3.2 轻量化设计材料选择与适配

轻量化设计材料选择与适配是实现轻量化目标的关键，需结合材料力学、材料科学相关理论，兼顾材料轻量化特性与设备运行要求。材料选择需优先考量高强度、低密度、耐腐蚀的材料，兼顾材料力学性能与化工工况适配性，实现性能与轻量化的精准匹配。

### 3.3 轻量化结构设计方法

轻量化结构设计方法需依托结构优化设计理论与化工机械设计技术,结合设备结构特点,筛选适配的设计方法实现结构减重。常用设计方法有:结构优化通过调整布局,降低应力区域材料,保留传力路径;尺寸优化通过科学调整结构截面尺寸,优化壁厚分布,实现应力

均匀化;形态优化通过优化结构外形,优化结构外形,减少局部应力集中;薄壁结构设计,采用加强圈等替代厚壁。需结合工程实际经验,确保设计方法能够有效落地。以下为工程实例中卧式储罐筒体设置加强圈以降低筒体厚度的应用:



该储罐设计中,当不设置筒体加强圈时,筒体所需名义厚度最新为12mm,筒体重量约1651kg;当在筒体中部设置一个加强圈时,筒体所需名义厚度最新为10mm,筒体与加强圈重量合计为1399kg,较前者减少252kg,达到轻量化设计的目标。

### 3.4 轻量化设计与结构强度的平衡路径

轻量化设计与结构强度的平衡路径是破解二者矛盾的核心,需依托强度优化与轻量化融合理论,构建科学的平衡机制。轻量化与结构强度的平衡需遵循以下路径:一是强度优先原则:以强度分析结果为基准,明确不可减薄的关键受力区域;二是分级优化策略:在非关键区域实施轻量化,在关键区域保持或强化结构;三是动态校核机制:每轮轻量化调整后,及时进行强度复核,确保不突破底线。

### 4 强度优化与轻量化设计的协同机制

强度优化与轻量化设计并非相互独立,而是相互关联、协同推进的整体。协同设计逻辑以“强度达标、轻量化适配、经济性合理”为核心导向,构建基于多目标融合的设计逻辑体系。压力容器强度优化与轻量化设计通过材料、结构、评定方法形成协同机制:以高强高韧材料提升许用应力、降低基础壁厚,借助应力分类与弹塑性分析实现应力精细化控制,同时优化壳体形状与局部结构以降低应力水平,通过强度约束,为轻量化划定底线,确保设备满足GB/T 150及TSG 21等标准要求;在

满足强度、安定性与疲劳要求的前提下,充分挖掘材料承载潜力,通过材料与结构创新,最大限度降低自重;最后综合评估材料成本、制造成本与运行能耗,实现安全裕度与结构轻量化的统一,确保综合效益最优。

### 结束语

化工设备结构强度优化与轻量化设计实践是一个复杂且系统的工程。通过深入剖析相关理论与技术,明确强度优化与轻量化设计的思路、方法及流程,并构建二者协同机制,能有效解决强度与轻量化之间的矛盾。通过多学科理论融合与系统化设计方法,可在满足TSG 21、GB/T 150、GB/T 4732等强制性规范要求的前提下,实现设备结构强度达标与轻量化的协同优化。在实际设计中,需综合考量设备工况、材料特性等多方面因素,确保设计方案科学合理。这不仅有助于提升化工设备的性能与质量,还能为化工行业的生产与发展提供有力支持,推动行业向更高效、节能的方向迈进。

### 参考文献

- [1] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T 150—2024 压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [2] 国家市场监督管理总局. TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 北京: 新华出版社, 2016.
- [3] 张妍,和勇. 化工项目非标设备制造工程造价编制要点[J]. 化工管理, 2021(26):3-4.