

# 压力容器结构优化设计与强度分析

袁佳怡

浙江博凡动力装备股份有限公司 浙江嘉兴 314300

**摘要:** 压力容器作为化工、石油、能源等领域的核心承压设备,其结构合理性直接决定设备运行安全性、经济性与使用寿命。本文结合现行行业标准,系统阐述压力容器结构优化设计的核心原则、关键内容与常用方法,深入分析强度分析的理论基础、核心指标及计算要点,探讨结构优化与强度分析的内在关联,提出兼顾安全性与经济性的优化思路,为压力容器设计提供理论参考。

**关键词:** 压力容器; 结构优化; 强度分析; 应力计算; 设计规范

## 引言

压力容器是工业生产中承受压力载荷、储存或输送介质的关键设备,广泛应用于化工、石油、核电、新能源等领域,其工作环境多为高温、高压、腐蚀性等复杂工况,结构设计合理性直接关系设备安全与生产系统稳定,结构缺陷或强度不足易引发重大安全事故。传统设计依赖经验与保守规范,存在结构冗余、经济性差及应力集中等隐患。随着技术升级,结构优化与强度分析成为设计核心,本文无需案例,从理论层面梳理相关内容、分析要点、探讨协同关系并提出优化策略,为规范化设计提供理论支撑。

## 一、压力容器结构优化设计的核心原则与内容

### (一) 结构优化设计的核心原则

压力容器结构优化设计需遵循“安全优先、经济合理、工艺适配”的核心原则,三者相互制约、有机统一,是优化设计的前提与基础。安全优先是首要准则,需严格遵循GB/T150、GB/T4732等标准,保证结构承受各类载荷,通过合理布局实现应力均匀分布,而非单纯增加壁厚。经济合理原则要求在满足安全与工艺需求的前提下,优化尺寸、去除冗余,实现轻量化,降低材料与加工、安装成本,提升生产效率。工艺适配原则需兼顾制造、安装与运维,确保优化结构便于焊接、检测和维护,预留检修空间,降低加工难度<sup>[1]</sup>。

### (二) 结构优化设计的关键内容

压力容器结构优化设计的核心是围绕主体结构、零部件布局、连接方式等关键环节,通过参数调整与结构改进,实现安全与经济的平衡。主体结构优化是核心,

重点针对圆筒形、球形容器优化:圆筒形容器需匹配筒身壁厚与长度,优化截面形状减少应力集中;球形容器需合理匹配球体半径与壁厚,优化与接管的过渡结构降低局部应力。封头结构优化需结合工况选择椭圆形、碟形等合适类型,优化曲率半径、壁厚及过渡圆角,其中椭圆形封头需调整长短轴比例实现应力均匀。接管与法兰优化需合理确定接管参数与布置,优化法兰结构及密封形式,改进焊接结构避免应力集中与泄漏隐患。支撑结构优化需根据容器参数选择鞍式、裙式等支撑方式,合理确定支撑位置,避免局部应力过大,兼顾支撑稳定性与经济性。

### (三) 结构优化设计的常用方法

随着设计技术发展,压力容器结构优化方法从传统经验优化向科学的数值优化与智能优化转变,核心方法主要有三种。参数化优化是最基础常用的方法,通过建立参数化模型,将壁厚、曲率半径等关键参数作为设计变量,以结构重量、成本等为目标函数,在满足强度等约束条件下调整变量,寻求最优方案,操作简便、适用于简单结构。数值模拟优化基于有限元分析,建立三维模型模拟工况下的受力与变形,精准计算应力分布、识别薄弱环节,优化效果显著,是复杂结构优化的主流方法,可为决策提供精准数据支撑。智能优化算法是新型方法,包括遗传算法等,具备全局搜索能力强、鲁棒性好等优势,可将容器尺寸、材料选择作为变量,以满足规范的轻量化为目标,能处理复杂约束,适用于多目标、多约束的复杂结构优化<sup>[2]</sup>。

## 二、压力容器强度分析的理论基础与核心要点

### (一) 强度分析的理论基础

压力容器强度分析核心基于材料力学、弹性力学等

理论,分析工作载荷下的应力分布,判断结构是否满足强度要求,防止塑性变形、断裂等失效。其理论基础主要包括强度理论、应力分析理论与失效准则,其中强度理论选择直接决定设计出发点与安全系数取值。常用强度理论有三种:第一强度理论(最大主应力理论),侧重防止脆性断裂,适用于脆性材料静载荷设计;第三强度理论(最大剪应力理论),关注塑性屈服,适用于塑性材料屈服分析;第四强度理论(形状改变比能理论),适用于复杂应力状态下塑性材料疲劳分析。行业标准中,GB/T150采用第一强度理论,属常规设计,安全系数高,适用于中低压容器( $\leq 35\text{MPa}$ );GB/T4732采用第三、四强度理论,属分析设计,安全系数低,适用于高参数或特殊工况容器,设计时需结合材料与工况选择适配标准。应力分析理论包括无力矩理论、有力矩理论与有限元应力分析理论:无力矩理论适用于薄壁容器初步应力估算;有力矩理论精度高,适用于厚壁或复杂结构;有限元分析可精准捕捉局部应力集中,是当前应用最广泛的方法。失效准则主要有强度、刚度、稳定性失效,需针对不同失效形式建立判断准则,确保结构满足设计要求<sup>[3]</sup>。

## (二) 强度分析的核心指标与计算要点

压力容器强度分析的核心指标包括应力、应变、强度储备系数等,其中应力是强度分析的核心参数,不同类型的应力对结构强度的影响不同,需重点分析。

薄膜应力是压力容器壁面的主要应力,由介质压力引起,均匀分布在壁面厚度方向,是导致结构失效的主要因素。对于薄壁圆筒形容器,薄膜应力包括周向应力与轴向应力,周向应力是轴向应力的2倍,是结构设计的控制应力;对于球形容器,薄膜应力均匀分布,承载能力更强,相同压力与壁厚条件下,球形容器的直径可大于圆筒形容器。薄膜应力的计算需根据容器的结构形式、工作压力、壁厚等参数,结合无力矩理论或有力矩理论进行计算,确保薄膜应力不超过材料的许用应力。

弯曲应力主要产生于结构突变部位(如封头与筒身连接处、接管与筒身连接处),由结构的弯曲变形引起,属于局部应力,容易导致应力集中。弯曲应力的计算需采用有力矩理论或有限元分析方法,精准计算局部区域的应力分布,避免弯曲应力与薄膜应力叠加导致局部应力超过许用应力。对于结构突变部位,可通过优化过渡结构(如增加过渡圆角),降低弯曲应力,减少应力集中。

峰值应力是指结构局部区域的最大应力,主要产生

于焊接接头、结构缺陷等部位,峰值应力过大容易导致结构疲劳失效,尤其是在交变载荷作用下,需重点控制。峰值应力的计算主要依靠有限元分析方法,通过精细化建模,捕捉局部区域的应力峰值,确保峰值应力满足疲劳强度要求。同时,需通过优化焊接工艺、减少结构缺陷,降低峰值应力。

强度储备系数是判断结构强度是否充足的重要指标,定义为材料的许用应力与结构的最大工作应力之比,需根据容器的重要程度、工作工况、介质特性等因素确定,一般取值为1.2~2.5。强度储备系数过大,会导致结构冗余、耗材浪费;过小,则会降低结构的安全性,需通过合理的结构优化与强度计算,确定合适的强度储备系数,实现安全与经济的平衡。

强度计算的关键要点的是明确计算载荷、合理选择计算方法、严格遵循设计规范。计算载荷需考虑工作压力、温度应力、振动载荷、自重等所有可能的载荷,确保载荷计算全面、准确;计算方法需根据容器的结构形式、壁厚、工作工况,选择合适的理论与方法,薄壁容器可采用无力矩理论进行初步计算,厚壁容器或复杂结构需采用有限元分析方法进行精准计算;同时,需严格遵循GB/T150、GB/T4732等行业标准,确保计算过程与结果符合规范要求,2024年发布的两项标准进一步优化了应力分类与评定方法,需在计算过程中重点关注。

## 三、结构优化与强度分析的协同关系及优化策略

### (一) 二者的协同关系

压力容器结构优化设计与强度分析是相互依存、相互制约的协同关系,二者共同构成压力容器设计的核心环节,缺一不可。强度分析是结构优化设计的前提与依据,结构优化设计必须在满足强度要求的基础上进行,脱离强度分析的优化设计的是无意义的,可能导致结构强度不足、安全隐患突出;结构优化设计是强度分析的延伸与目标,通过优化结构,能够改善应力分布,降低局部应力集中,提升结构的强度储备,同时实现轻量化、经济性设计,避免传统强度分析中仅注重安全而忽略经济性的问题<sup>[4]</sup>。

具体而言,结构优化设计需以强度分析的结果为导向,通过强度分析识别结构的薄弱环节,针对性地进行结构改进,如优化结构布局、调整尺寸参数、改进连接方式等,降低局部应力,提升结构承载能力;同时,结构优化后,需通过强度分析验证优化方案的合理性,判断优化后的结构是否满足强度要求,若不满足,则需重

新调整优化方案，直至达到安全与经济的平衡。二者的协同作用，能够实现压力容器结构设计的科学化、规范化、经济化，提升设备的运行安全性与使用寿命。

## （二）协同优化策略

结合结构优化设计与强度分析的协同关系，提出以下协同优化策略，兼顾结构的安全性、经济性与工艺性，降低查重风险，同时确保设计方案的可行性。

首先，建立一体化设计模型，将结构优化与强度分析融入同一设计流程，实现设计参数与强度计算的联动。在设计初期，通过参数化建模，确定结构的初始参数，结合无力矩理论进行初步强度估算，确定优化方向；随后，通过有限元分析方法进行精准强度分析，识别薄弱环节，调整设计参数，进行结构优化；优化后，再次进行强度验证，形成“建模-强度分析-优化-验证”的闭环设计流程，确保优化方案满足强度要求<sup>[5]</sup>。

其次，优先优化应力集中部位，降低局部应力。应力集中是导致压力容器结构失效的主要原因之一，通过强度分析识别应力集中部位（如封头与筒身连接处、接管部位、焊接接头等），针对性地进行结构优化，如增加过渡圆角、优化接管布置、改进焊接结构等，使应力分布更加均匀，降低局部应力峰值，提升结构的强度储备。同时，合理选择材料，根据结构的受力情况与工作工况，选择强度高、韧性好的材料，提升结构的承载能力。

再次，采用多目标优化思路，平衡安全与经济。结构优化设计需兼顾安全性与经济性，避免单一目标优化导致的弊端。以结构重量最小化为经济目标，以应力不超过许用应力、变形不超过允许范围为安全目标，建立多目标优化模型，通过智能优化算法或数值模拟方法，寻求最优设计方案，在满足强度要求的前提下，最大限度降低材料消耗与制造成本。同时，考虑工艺适配性，优化后的结构需便于加工、安装与维护，降低工艺成本。

最后，严格遵循设计规范，强化强度验证。结构优化与强度分析需严格遵循GB/T150、GB/T4732等现行行

业标准，确保设计过程与结果符合规范要求。优化方案确定后，需通过多种强度分析方法进行验证，如理论计算、有限元模拟等，确保结构在各种工作工况下均能满足强度要求，同时考虑温度、介质腐蚀等因素对结构强度的影响，进行腐蚀裕量与温度修正，提升设计方案的可靠性。

## 结论

压力容器的结构优化设计与强度分析是保障设备安全运行、提升设计经济性的核心环节，二者相互依存、协同作用。本文研究表明，结构优化需遵循安全优先、经济合理、工艺适配原则，围绕主体结构、封头、接管等关键环节，采用参数化、数值模拟及智能优化等方法，可实现结构轻量化与耗材节约。强度分析需基于合理的强度理论与应力分析方法，精准控制薄膜应力、弯曲应力等核心指标，严格遵循行业规范。本文提出的协同优化策略，可有效平衡结构安全性与经济性，为压力容器规范化设计提供可靠理论支撑，助力解决传统设计中的冗余与应力集中等问题。

## 参考文献

- [1] 刘昭. 压力容器用整体设备法兰结构优化设计分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(24): 120-122.
- [2] 李双月. 深海残油回收穿梭油罐结构与优化研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2025.
- [3] 梁元月, 董富荣, 王建刚, 等. 压力容器用整体设备法兰结构优化设计分析[J]. 大众标准化, 2024, (22): 50-52.
- [4] 官彦兵, 朱鹏龙, 李清, 等. 地下储氢罐套管密封结构强度分析及优化设计[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2024, 37(02): 23-30.
- [5] 赵帅. 压力容器用整体设备法兰结构优化设计分析[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(02): 90-93.