

压力容器的结构优化设计及其具体实现

徐磊 张玉静 石文

山东大齐石油化工设计有限公司, 山东 淄博 255400

[摘要] 压力容器是工业中重要的设备, 其设计直接影响到安全性和经济性。为了提高压力容器的性能, 降低成本, 结构优化设计成为关键。文章介绍了压力容器的优化设计方法, 通过这些方法, 可以优化容器的结构, 提升安全性和效率, 同时减少材料和成本。还探讨了复合优化策略, 通过结合多种优化方法, 进一步提高设计效果。研究表明, 合理的优化设计可以显著提升压力容器的性能和经济效益。

[关键词] 压力容器; 结构优化设计; 具体实现

DOI: 10.33142/ec.v8i3.15638

中图分类号: TH122

文献标识码: A

Structural Optimization Design of Pressure Vessel and Its Concrete Realization

XU Lei, ZHANG Yujing, SHI Wen

Shandong Daqi Petro Chemical Design Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255400, China

Abstract: Pressure vessel is an important equipment in industry, and its design directly affects the safety and economy. In order to improve the performance of pressure vessel and reduce the cost, structural optimization design becomes the key. This paper introduces the optimization design methods of pressure vessels. Through these methods, the structure of vessels can be optimized, the safety and efficiency can be improved, and the materials and costs can be reduced. The composite optimization strategy is also discussed, and the design effect is further improved by combining various optimization methods. The research shows that reasonable optimization design can significantly improve the performance and economic benefits of pressure vessels.

Keywords: pressure vessel; structural optimization design; concrete realization

引言

压力容器在石油化工、能源、电力、航空航天等行业中扮演着至关重要的角色, 主要用于承受和存储高压气体或液体, 并确保在严苛工况下的安全运行。由于长时间处于高温、高压、腐蚀及复杂载荷等环境条件下, 其结构设计必须具备高度的合理性, 这直接影响到安全性、使用寿命以及经济性。随着现代工业需求的日益提升, 传统设计方法在材料利用、结构优化及能效提升方面逐渐暴露出局限, 这推动了压力容器优化设计的研究。优化设计不仅要求提高结构强度与稳定性, 同时, 在保障安全标准的前提下, 还力求减少材料消耗、降低制造成本、提升换热效率, 并延长使用寿命。近年来, 随着计算机仿真技术、智能优化算法以及先进制造技术的快速发展, 压力容器的优化设计迎来了新的机遇。从传统的试验设计法与经验优化法, 到基于有限元分析的结构优化, 再到拓扑优化与智能优化算法的应用, 现代优化方法显著提高了设计精度与工程适应性。同时, 通过复合优化策略的结合, 实施了多目标优化, 从而提升了设计的科学性与经济性。本文将围绕压力容器的结构优化设计展开详细研究, 首先分析优化设计的基本原则与要求, 其次, 探讨不同优化方法的特点, 包括传统优化方法、现代优化方法以及设计评价指标, 最后, 重点介绍有限元分析、拓扑优化、智能算法与复合优化策

略的应用实例, 旨在为压力容器设计提供科学、高效且具有工程实践意义的优化思路。

1 压力容器设计节能降耗的原则及要求

压力容器在工业生产和项目建设中至关重要, 直接关系到整体安全, 并间接影响使用者的生命安全。因此, 压力容器的设计工作受到了我国相关部门的高度重视, 并根据不同的生产过程制定了相应的法律法规和规范制度, 以确保生产流程的规范化。为了响应国家节能环保政策, 在进行压力容器设计时, 必须特别关注能源消耗问题, 致力于实现节能降耗, 同时提升压力容器的质量和安全性。压力容器的设计、安装以及在生产中的应用, 都需要在各个环节严格把控, 并遵循相关规范和条例, 确保整个过程的严谨性和规范性。在设计压力容器时, 必须结合实际情况, 特别关注质量和安全要求, 以节能降耗为基本设计原则, 执行相关设计任务。首先, 设计数据的审核至关重要。准确的数据能够有效提升设计方案的经济性, 因此必须严格控制数据的精准度和准确性, 避免因数据不准确而导致设计方案出现根本性错误, 从而造成能源的不必要浪费。其次, 材料的选择应严格按照设计方案中的要求进行, 特别是对特殊材料的选择, 应基于使用要求和功能特点采取相应措施, 以充分发挥材料的价值, 并在合理范围内提高材料的使用率 and 经济效益。

2 压力容器的优化设计方法

2.1 传统优化方法（如试验设计法、经验优化法）

在压力容器的结构设计中,传统优化方法发挥着至关重要的作用,主要包括试验设计法与经验优化法。通过合理规划实验方案,以尽量减少试验次数为目标,试验设计法能够获得优化的设计参数,并提高设计的可靠性和效率。正交试验法是这一方法中的常见技术之一,通过选择合适的控制因素与水平,并采用特定的试验组合方式,使得优化方案能够在较少的试验次数下得到,从而提升设计精度。另外,响应面法也是一种有效的试验设计手段,它通过建立数学模型来描述设计参数与目标性能之间的关系,并通过回归分析与优化算法寻求最优解,进而提高压力容器的安全性与经济性^[1]。另一方面,经验优化法更多依赖设计人员的实践经验及已有的工程案例。通过对比分析历史设计方案,适用于特定工况的优化策略能够被总结出来。例如,在传统设计中,压力容器的壁厚可能会被调整,或者不同材料的选择及焊接工艺的优化,能够用来减少应力集中、降低材料成本或提升耐用性。尽管传统优化方法在工程实践中被广泛应用,它们仍然依赖人工经验较多,试验成本较高,并且在面对复杂工况时,往往难以实现全局最优。

2.2 现代优化方法（如有限元分析、拓扑优化、智能优化算法）

在压力容器的结构设计中,现代优化方法扮演着越来越重要的角色,主要包括有限元分析、拓扑优化与智能优化算法等技术。有限元分析(FEA)是一种应用广泛的数值计算方法,通过将复杂的压力容器结构划分为多个有限单元,受力、应力分布以及变形特性得以模拟分析,从而可能存在的薄弱区域能够被识别出来,设计参数得以优化,以提高容器的安全性与使用寿命。通过有限元分析,设计人员能够在虚拟环境下进行多次优化迭代,试验次数与设计周期得以减少,从而降低了成本。拓扑优化作为一种先进的结构优化方法,采用数学优化算法自动寻找最佳材料分布方案。此方法不仅能确保压力容器满足强度与刚度要求,还能实现材料的最优利用,从而达成轻量化与节能减排的效果。例如,在高压容器的设计中,冗余材料区域能够被识别出来,结构重量得以减轻,制造成本得以降低,并且整体的力学性能得到了改善。智能优化算法,如遗传算法、粒子群优化算法及神经网络优化方法,则利用人工智能技术模拟生物进化或群体行为,为容器的多目标优化提供了高效的求解途径。这些算法能够在庞大的设计参数空间中快速搜索到最优解,并综合考虑诸如成本、安全性、使用寿命等多种约束条件,从而实现全局优化。与传统优化方法相比,现代优化技术能够更精确地控制设计变量,设计效率得以显著提高,同时,压力容器在复杂工况下能够展现出更优的性能,因此在工业领域得到了越来越广泛的应用。

2.3 压力容器优化设计的评价指标

压力容器优化设计的评价指标是衡量设计效果优劣的重要标准,通常涉及多个方面,如结构安全性、材料利用率、制造成本、运行能效及使用寿命等。结构安全性是最为关键的指标之一,压力容器必须符合国家及行业标准(如ASME、GB/T 150)中对强度、刚度及稳定性的要求,以确保在工作压力、温度变化及外部载荷的作用下,不会出现泄漏、塑性变形或结构失效。通过有限元分析与疲劳寿命预测,优化设计后压力容器的安全裕度及抗疲劳性能能够被量化评估。材料利用率对制造成本及结构轻量化有着直接影响。优化设计应在确保强度与稳定性要求的基础上,尽可能减少材料的使用量^[2]。例如,通过采用拓扑优化方法,非承载区域的冗余材料能够被去除,从而提升材料的使用效率。制造成本也是评价优化效果的一个重要维度,涉及材料采购、加工、焊接、检测及维护等多个环节。优化设计需要在保证安全性前提下,生产工艺得到简化,从而提高制造过程的经济性。在运行能效方面,优化设计应着重提高压力容器的换热效率、流体输送效率及保温性能,以减少能源消耗并提高运行效益。例如,换热管布置的优化或更合适的内壁涂层材料的选择,能够改善传热性能,提升整体能效。使用寿命则是衡量优化设计长期效益的关键指标,优化后的压力容器需具备较长的疲劳寿命及良好的耐腐蚀性,从而减少运行过程中的维护成本与设备更换频率。

3 压力容器优化设计的具体实现

3.1 基于有限元分析的结构优化

有限元分析(FEA)作为压力容器优化设计中重要的工具之一,通过数值计算模拟不同工况下容器的受力情况,分析应力分布、变形特性及潜在的失效模式,为结构优化设计提供了指导。在进行有限元分析时,首先需要建立压力容器的数学模型,并利用离散化技术将其划分为有限数量的单元,接着施加边界条件、载荷及材料属性,最终通过求解控制方程,计算各单元的应力、应变与位移分布,从而评估设计方案的安全性及合理性。在优化过程中,设计人员可以通过拓扑优化、尺寸优化及形状优化等方法,调整容器的结构参数。例如,在高压容器的设计中,壳体的厚度分布可以通过有限元分析进行优化,既能减少材料的使用,又能确保容器在工作压力下具备足够的强度与稳定性。此外,应力集中区域能够通过FEA识别出来,并通过调整焊缝布置、修改结构几何形状或改变加强筋的位置来减小应力峰值,从而提高容器的疲劳寿命。对于换热型压力容器,有限元分析能够优化管板结构与流道设计,从而减少热应力,并提升换热效率。

3.2 基于拓扑优化的轻量化设计

拓扑优化的轻量化设计是压力容器优化设计中的关键方法之一,目标是在确保安全性、刚度及使用寿命等关

键性能要求的前提下,尽可能减少材料使用,从而降低重量、生产成本与能源消耗,提升设备的经济性与运行效率。拓扑优化是一种基于数学的优化技术,通过计算与仿真分析,根据载荷分布、边界条件及目标约束条件,自动生成最佳的材料分布方案,从而使压力容器的结构变得更加合理与高效。在应用拓扑优化时,首先需要构建压力容器的有限元模型,并设定优化目标,如最小化质量、最大化刚度或提升承载能力。随后,通过迭代计算,不必要的材料区域会被去除,材料将被重新分布,以达到结构优化的目的。例如,在高压容器或储气罐的设计中,拓扑优化能够帮助调整壳体局部壁厚,去除低应力区域的冗余材料,同时在高应力区域增加支撑结构,从而增强容器的整体安全性与耐用性^[3]。对于复合材料或多材料组合的压力容器,拓扑优化能够设计出最佳的材料布局,充分发挥不同材料的优势,以实现高强度与低重量的优化目标。结合3D打印等先进制造技术,拓扑优化能够实现传统加工工艺无法制造的复杂轻量化结构,从而在保证安全性的同时,大幅度降低容器的重量与成本。

3.3 采用智能算法(如遗传算法、粒子群优化算法)的优化设计

智能算法,如遗传算法(GA)和粒子群优化算法(PSO),在压力容器的优化设计中扮演着重要角色。这些算法通过模拟自然界的进化过程或群体行为,为复杂的多目标优化问题提供了高效的求解方式。遗传算法作为一种全局优化方法,基于自然选择与遗传机制,通过对设计参数进行编码,采用选择、交叉与变异等操作,反复迭代优化,最终获得最优或近似最优的设计方案。例如,在压力容器的壁厚优化设计中,遗传算法能够根据材料特性、承压能力及制造成本等约束条件,自动搜索出最佳的壁厚分布,从而减少材料浪费的同时确保安全性。粒子群优化算法则模拟群体协作行为,如鸟群觅食,通过一组“粒子”在解空间中搜索最优解,特别适用于处理高维复杂问题。在压力容器的设计中,粒子群优化算法能够优化结构尺寸、支撑筋布置及焊缝位置等关键参数,从而提升整体性能。与传统的试验设计法与经验优化法相比,智能算法在面对复杂约束与多目标优化问题时展现出了显著的优势。全局最优解能够在较短时间内找到,局部最优解的陷阱得以避免,从而优化效率得以提高。此外,智能算法可与有限元分析、拓扑优化等技术结合,以实现更加精确与高效的设计。例如,在换热型压力容器的优化过程中,遗传算法与有限元分析相结合,可以自动寻找出最佳的换热管布置方案,从而提升换热效率并降低流动阻力。

3.4 复合优化策略的应用

复合优化策略在压力容器的设计中是一种高效的优化方法,它通过结合多种优化技术,如有限元分析、拓扑

优化与智能优化算法,综合利用各自的优势,从而达到更加优越的结构设计方案。在压力容器的优化过程中,单一的优化方法往往存在一定局限性。例如,有限元分析能够精确计算应力分布和结构变形,但直接提供最优设计方案却无法实现;拓扑优化能够有效减少材料使用,实现轻量化设计,但可能会产生复杂的结构形态,从而增加制造的难度;智能优化算法具有较强的全局搜索能力,可以在多目标优化问题中找到最优解,但计算量较大且收敛速度可能较慢。通过整合这些方法,复合优化策略能够显著提高优化效率,并获得更符合实际工程需求的设计方案^[4]。例如,在高压容器的优化设计中,拓扑优化可先用于确定材料分布的最佳区域,接着,有限元分析被用来对优化后的结构进行应力校核,以确保满足强度与稳定性要求。随后,遗传算法或粒子群优化算法可进一步优化关键设计参数,如壁厚、焊缝位置及支撑筋布置,从而提高安全性并降低制造成本。在换热型压力容器的设计中,智能优化算法可用于优化换热管布置方案,以提升换热效率,紧接着,有限元分析用于计算热应力分布,再进行壳体结构的优化,以确保容器的耐久性与稳定性。

4 结语

压力容器的结构优化设计在现代工业中扮演着至关重要的角色。通过优化设计,不仅可以提高设备的安全性与可靠性,还能够有效降低制造成本并提升能源利用效率。随着设计技术的不断发展,有限元分析、拓扑优化以及智能优化算法等现代优化方法已被广泛应用于压力容器设计中,极大地提升了设计的精度与效率。通过结合多种优化技术,复合优化策略进一步提升了设计过程的科学性与高效性。通过合理的优化设计,压力容器得以在复杂工作环境中更好地发挥作用,延长使用寿命并减少维护成本。随着计算能力的提升及智能化技术的进步,未来的压力容器优化设计方法将变得更加先进,能够更精准地满足各类工业需求。希望本文的研究能够为压力容器设计领域提供有价值的参考,并为实际工程应用提供切实可行的技术支持。

【参考文献】

- [1]赵明,张磊.压力容器设计中的节能降耗措施[J].石化技术,2020,27(3):229-231.
 - [2]高正成.压力容器设计中的节能降耗[J].科学技术创新,2023(15):47-50.
 - [3]隋大山,崔振山.压力容器的结构优化设计及其具体实现[J].机械设计与研究,2005(5):95-97.
 - [4]陈晨,李华,雷玉兰.压力容器参数化建模与结构优化设计新方法[J].广州化工,2017,45(7):116-118.
- 作者简介:徐磊(1983.3—),毕业院校:山东理工大学,所学专业:材料成型与控制工程,当前就职单位:山东大齐石油化工有限公司,职称级别:工程师。