

高压工况下缠绕复合材料容器力学性能分析与结构优化

邓建鹏 王君哲 胡学朝 李传强 王万钊
山东北方现代化学工业有限公司 山东 济南 250033

摘要：缠绕复合材料容器大量应用于高压工况，力学性能和结构设计直接影响设备运行安全与稳定。本文整理复合材料力学基础、缠绕工艺原理和结构相关理论，分析容器应力应变变化、疲劳性能及各类核心影响因素，确定结构优化目标与约束条件，选用对应优化方式，针对缠绕角度、壁厚、缠绕层数制定优化方案，结构优化结束后需完成完整力学性能检测，相关研究内容可为同类型容器研发设计提供参考依据。

关键词：高压工况；缠绕复合材料；容器力学；性能分析；结构优化

引言

高压使用条件对工业容器承压指标和使用可靠性存在严格标准，缠绕复合材料容器具备自重低强度高、结构参数可调的特点，现已作为高压工况主要使用设备。高压环境会产生复杂载荷，改变容器力学状态，开展结构优化具备必要性。本文归纳容器基础理论与自身特性，分析应力应变疲劳相关力学表现及作用条件，研究优化限定指标、实施手段与调整方案，搭配性能检测形成完整研究流程，为改善容器工作性能、维持设备稳定运行提供数据支撑。

1 高压工况下缠绕复合材料容器的基本理论与特性

(1) 复合材料力学基础：复合材料由两种及以上不同性质材料复合构成，缠绕复合材料容器的制备主要依托纤维类增强材料和树脂类基体材料。该类材料具备各向异性的力学特征，应力与应变对应关系具备较强复杂性，依托标准化的本构关系模型，可精准定义复合材料各类受力状态下的力学表现，为高压容器力学性能测算与分析提供核心理论支撑，保障容器工况适配性分析的准确性。(2) 缠绕工艺原理：缠绕工艺是复合材料容器成型的核心工艺，核心流程为连续纤维浸润树脂后，依据既定排布规则缠绕于芯模表面，固化处理后完成容器成型。主流缠绕工艺分为环向、纵向与螺旋缠绕三类，不同缠绕工艺直接决定容器的整体力学性能。环向缠绕可提升容器环向承载强度，纵向缠绕侧重强化容器轴向承载能力，螺旋缠绕可均衡提升容器多维度力学性能，工艺方式与参数的合理选取是把控容器成型质量与使用性能的核心环节。(3) 缠绕复合材料容器的结构特点：该类容器为多层复合结构，主要包含内衬、复合材料缠绕层与外部保护层三部分^[1]。内衬负责整体密封与防介质侵蚀，常用金属、塑料材质；复合材料缠绕层为主要承载结构，承担高压内压产生的主要应力；外部保护层可

隔绝外界因素对缠绕层的损伤，多层结构设计让容器同时具备稳定力学性能、密封性能与耐腐蚀性能，适配高压工况使用需求。

2 高压工况下缠绕复合材料容器力学性能分析

2.1 应力分析

高压工况环境中，缠绕复合材料容器受内部压力作用，整体会形成复杂且不均匀的应力分布状态。容器运行过程中，环向应力为核心承载应力，该应力数值由内部压力、容器筒体半径及壳体壁厚三项基础参数共同决定，是影响容器整体承压能力的关键指标。纵向应力的数值整体低于环向应力，但该应力直接作用于容器轴向结构，对容器轴向整体强度和结构稳定性起到决定性作用。复合材料本身具备各向异性的材料特性，区别于均质金属材料，容器多层缠绕结构的层间接触面会持续产生剪切应力，该应力是引发层间剥离、结构失效的重要因素。为精准掌握容器承压状态下的结构受力情况，需依托容器实际结构参数与材料属性建立对应的力学分析模型，通过标准化的解析计算方式或数值计算手段，求解容器筒体不同位置、不同缠绕层的应力具体数值与分布规律，以此核验容器结构强度、承载性能是否匹配既定设计标准，保障高压工况下容器的运行安全性与结构可靠性。

2.2 应变分析

压力容器处于高压工况时，壳体结构会产生两个方向的形变，分别为环向形变与纵向形变，对应产生环向应变和纵向应变。其中环向应变直接改变容器径向尺寸，使容器直径产生扩张变化，纵向应变则作用于容器轴向，造成设备整体长度出现伸缩变动。开展容器应变分析工作，核心目的是掌握高压载荷作用下容器的整体形变特征与变化规律，精准判定设备形变状态是否超出标准限值，避免过度形变导致设备功能失效、无法正常

投用^[2]。同时,各类工况下采集得到的应变基础数据,是压力容器结构优化设计的核心依据。依托真实应变数据调整设备结构参数、优化壳体设计尺寸,可将容器各部位应变数值控制在规范允许的合理区间内,有效改善压力容器的受力状态,提升设备整体运行稳定性与使用可靠性,保障高压工况下设备长期安全运行。

2.3 疲劳性能分析

缠绕复合材料容器实际工作过程中,会长期承受循环变化的内压荷载,反复受力会让容器结构内部产生累积疲劳损伤,这类损伤会直接影响设备整体使用安全,因此疲劳性能分析是缠绕复合材料容器结构安全评估的关键内容,也是判定设备长期服役可靠性的的重要依据。目前行业内针对该类容器的疲劳性能研究,主要采用试验检测结合理论计算的综合研究方式,通过测试不同应力工况下容器的结构状态,收集对应的疲劳性能数据,整理统计疲劳寿命相关参数,明确容器的疲劳极限标准。深入研究并掌握缠绕复合材料容器的疲劳演化规律与结构受力特性,能够为设备服役周期划定、日常检修和维护方案的制定提供真实有效的数据支撑。依托相关研究成果开展设备运维管理,可有效控制结构疲劳损伤持续发展,避免容器出现疲劳失效问题,从技术层面减少设备破损故障及相关安全事故的发生,切实保障缠绕复合材料容器长期、安全、稳定的服役运行。

2.4 影响因素分析

高压工况环境下,缠绕复合材料容器的力学性能受多项核心条件共同制约,整体可归纳为材料、工艺、结构尺寸三大核心类别。复合材料自身的基础性能是决定容器力学承载能力的根本,纤维自身的力学指标与基体材料的综合性能,直接决定复合材料体系的整体强度、稳定性与使用寿命,是容器适配高压工况的基础条件。缠绕成型的各项工艺参数,直接干预纤维排布状态与复合材料层间结合效果,参数的差异化设置会直接改变容器整体应力分布规律,对容器极限承载强度、抗变形能力产生直接影响,是调控容器力学性能的关键工艺条件。容器自身结构尺寸参数会改变整体受力形式与应力集中状态,不同尺寸参数组合会让容器在高压工况下呈现出差异化的力学响应与形变特征^[3]。系统梳理研究各类影响条件,能够精准定位制约高压缠绕复合材料容器力学性能的核心要素,为后续容器结构参数调整、工艺优化、性能提升等研究工作提供可靠的理论参考与改进方向。

3 高压工况下缠绕复合材料容器结构优化

3.1 优化目标与约束条件

高压工况下缠绕复合材料容器的结构优化工作,需

以容器实际使用标准为核心开展整体设计调整,整体优化工作的核心诉求为兼顾容器力学性能提升、整体结构减重与生产成本控制。结构优化以改善容器核心力学工作状态、延长设备使用周期为主要方向,通过结构参数调整与布局优化,改善容器整体受力状态,控制结构形变程度,提升设备长期工况下的使用稳定性与服役时长。结构优化工作需依托固定约束条件推进,所有优化方案均需契合行业结构强度设计规范,保障容器在高压运行环境下的结构安全性与可靠性。容器整体几何参数、外形尺寸需严格匹配设备安装工况与装配标准,满足现场安装、适配与运行的基础要求。所有优化设计方案需贴合现有生产制造条件,符合复合材料缠绕成型的工艺规范,具备可落地、可批量生产的实操性。优化目标与约束条件的精准界定,能够为复合材料容器结构优化提供明确的设计边界与工作方向,规避优化过程中出现的性能不达标、尺寸不符、无法生产等问题,是保障高压缠绕复合材料容器结构优化工作有序、高效推进的核心基础,直接决定最终优化方案的实用性与可行性。

3.2 优化方法选择

复合材料压力容器结构优化可采用的主流方法包含数学规划法、遗传算法、模拟退火算法等两类核心优化方法。数学规划法依托成熟的数学理论体系构建运算逻辑,计算流程规范严谨,针对常规结构优化问题可输出精准最优解,计算结果稳定性较高。该方法的局限性体现在适配性层面,面对高压工况下复合材料容器非线性、多变量、强耦合的复杂结构优化问题时,整体求解难度显著提升,运算效率大幅下降,难以满足复杂工况的优化需求^[4]。遗传算法与模拟退火算法属于智能优化算法,具备突出的全局搜索性能,可适配多变量、非线性、多约束的复杂工程优化问题,能够有效处理复合材料缠绕结构的参数耦合优化难题,适配高压容器结构优化的复杂工况需求,目前已普遍应用于缠绕复合材料容器的结构优化工作中。在实际优化工作中,需结合高压复合材料容器结构的优化难度、变量数量、约束条件及求解精度等实际问题特征选定适配的优化方法,可有效提升结构优化工作的运算效率,保障优化结果的精准度与工程适用性,为容器结构优化提供可靠的技术支撑。

3.3 基于力学性能的结构优化策略

(1) 缠绕角度优化。缠绕角度是调控容器各向力学性能的核心参数,角度参数的差异化调整,可直接改变容器不同维度的承载能力与变形特性。调控环向缠绕角度可有效提升容器环向承载强度,约束环向形变问题。对螺旋缠绕角度进行精准调校,可改善容器整体应力分

布状态,弱化局部应力不均的问题,全面提升容器整体力学稳定性与综合承载性能。(2)壁厚优化。结合容器整体及局部的应力分布规律开展壁厚差异化设计是结构轻量化与安全化的关键手段。针对结构应力集中的关键区域,通过加厚处理降低局部应力数值,规避结构失效风险;对于应力荷载偏低的非核心区域,合理缩减壁厚尺寸,降低容器整体自重。所有壁厚调整工作均以结构强度标准和使用安全要求为基础,在满足使用工况需求的前提下,最大化提升复合材料的利用效率。(3)层数优化。复合材料缠绕层数直接关联容器结构强度、刚度、自重及制作成本。缠绕层数增加可同步提升容器的结构强度与整体刚度,但会造成自重增加、生产成本上升等问题。通过量化分析工况力学需求,精准优化缠绕层数,在完全匹配力学性能设计标准的基础上,精简冗余缠绕层数,实现容器力学性能、结构自重与制作成本的双向平衡。

3.4 优化结果验证与分析

缠绕复合材料容器完成结构优化后,必须开展系统性的力学性能验证,以判定优化方案是否真正可行、是否具备工程落地条件。目前验证工作主要依托数值模拟与实体实验测试两条路径,针对优化前后容器的应力水平、应变状态及疲劳寿命等核心指标进行全面比对,量化结构优化所带来的性能变化。对比结果是衡量优化成效最直接的依据。当各项参数均能满足预设设计标准和优化目标时,即可认为本次采用的结构优化策略具备有效性与合理性。反之,若测试或仿真数据未能达标,则需回头对优化全过程中的参数设置、约束条件及方法选择进行逐项排查,找准性能不达标的根本原因,修正相关参数后重新开展优化迭代。验证工作收尾后,还需结合整体流程与最终数据进行深度复盘,梳理结构参数调

整与力学性能变化之间的关联规律,把高压工况下复合材料缠绕容器优化设计中积累的经验沉淀下来^[5]。这些从实际项目中提炼的认知与数据,能够为后续同类容器的研发设计和优化工作提供可靠的技术参考,也让该类结构的设计思路日趋成熟、有章可循。

结语

综上所述,高压工况下缠绕复合材料容器力学性能分析与结构优化意义重大。从基本理论到性能剖析,再到结构优化,各环节紧密相连。通过深入分析应力、应变、疲劳性能及影响因素,精准定位关键要素。以力学性能提升、结构减重与成本控制为目标,合理选择优化方法,实施针对性优化策略。优化后全面验证,确保方案可行。这一系列研究不仅提升了容器性能,更为后续同类容器研发设计积累宝贵经验,推动行业持续发展,保障高压工况下设备安全稳定运行。

参考文献

- [1]陈刘雁鹏,任中杰,韩宇泽,等.超薄单层复合材料缠绕压力容器承载性能研究[J].压力容器,2024,41(1):45-52+62.
- [2]王康,路永婕,郭子腾,王加富,张海东,王君哲,陈丰雨.基于柱形容器缠绕特性的控制稳定性分析[J].河北科技大学学报,2024,45(1):26-34.
- [3]杨乐辉,赵金玲,常乐,等.激光超声导波融合人工神经网络的复合材料缠绕压力容器损伤评估[J].压力容器,2025,42(11):66-74.
- [4]惠虎,柏慧,黄淞,杨宇清.纤维缠绕复合材料压力容器的研究现状[J].压力容器,2021,38(4):53-63.
- [5]刘长喜,姜旭,王佳杰,等.纤维缠绕复合材料压力容器的多尺度分析与性能预测[J].工程塑料应用,2023,51(11):115-122.