

# 纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计

邓建鹏 王君哲 陈丰雨

山东北方现代化学工业有限公司 山东 济南 250033

**摘要:** 纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计, 通过引入可靠性理论与统计学原理, 以同一失效概率为标准, 对传统安全系数法进行替代。实验验证显示, 该方法设计的压力容器结构(如纤维缠绕壁厚)与实测结果高度吻合, 且设计值显著低于传统方法。研究表明, 纤维强度的离散程度对可靠性设计有显著影响, 传统方法忽视其随机分布特征值导致设计不合理。该可靠性设计在确保安全性的同时, 实现了经济性的优化, 为复合材料压力容器的设计提供了科学依据。

**关键词:** 纤维缠绕; 复合材料; 可靠性设计

引言: 随着工业技术的不断进步, 纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器因其优异的力学性能、耐腐蚀性和轻量化特性, 在航空航天、能源储存等领域得到广泛应用。然而, 其复杂的多层次结构和材料性能的离散性对可靠性设计提出了更高要求。本文旨在探讨纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计方法, 通过综合考虑材料性能、结构参数及环境因素, 确保其在预定工况下的稳定可靠运行, 为相关领域的工程实践提供理论支持和技术指导。

## 1 纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器概述

纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器, 作为现代材料科学与工程技术结合的杰出代表, 具有诸多显著优势。这类压力容器主要通过纤维缠绕工艺及编织工艺成型, 主要由具有密封性的内衬和高强度的纤维缠绕层组成, 形成了一种薄壁且高强度的结构。其内层主要是内衬结构, 用于确保容器的密封性, 防止内部存储的高压气体或液体泄漏, 并保护外部纤维缠绕层不受腐蚀。外层则是由树脂基质增强的纤维缠绕层, 主要承担压力容器中的大部分压力负荷。这种结构不仅提升了容器的承载能力, 还显著减轻了整体质量, 相较于传统的金属压力容器具有更高的比强度和良好的可设计性。在材料选择上, 碳纤维、芳族聚酰胺(Aramid)等高性能纤维因其优异的物理和化学性能而备受青睐。碳纤维以其高强度、高模量、低密度及良好的耐腐蚀性和热稳定性, 成为纤维缠绕复合材料压力容器的理想选择<sup>[1]</sup>。而芳族聚酰胺则以其高强度、高模量、良好的冲击性能和化学稳定性, 在特定场合下也展现出卓越的性能。除此之外, 纤维缠绕复合材料压力容器的结构设计灵活多样, 包括圆筒形、球形、环形和矩形等多种类型, 能够满足不同领域和场合的需求。例如, 圆筒形容器因其结构简单、制

造成本低而被广泛应用于工业生产; 而球形容器则因其受力状态最理想、容器壁可做得最薄, 在航天器等特殊场合具有独特优势。随着材料科学和工程技术的不断进步, 这类压力容器的性能和应用范围还将不断拓展和提升。

## 2 可靠性设计中的材料性能参数确定

### 2.1 纤维材料性能参数

在可靠性设计中, 纤维材料性能参数的确定至关重要, 它直接关系到产品的安全性、耐久性和整体性能。(1) 物理性能指标是纤维材料性能参数的基础。这包括纤维的长度、细度、比重、光泽、吸湿性、热性能、电性能等。长度和细度直接影响纤维的加工性能和最终产品的物理性能; 比重则与材料的密度和重量有关; 光泽则影响产品的外观质感; 吸湿性则关系到产品的舒适度和使用环境适应性; 热性能和电性能则决定了材料在特定条件下的稳定性和安全性。(2) 机械性能指标是衡量纤维材料力学性能的关键。断裂强度、断裂伸长率、初始模量、回弹性及耐多次变形性等参数, 直接关系到材料在受力条件下的表现。断裂强度反映了材料抵抗断裂的能力; 断裂伸长率则表征了材料的韧性和延展性; 初始模量则体现了材料在小形变下的刚度; 回弹性则关乎材料在受到外力作用后恢复原状的能力; 耐多次变形性则评估了材料在多次受力后的疲劳性能。(3) 稳定性指标也是不可忽视的。高温和低温的稳定性、对光和大气稳定性、对化学试剂的稳定性及对微生物作用的稳定性等, 这些参数决定了材料在不同环境条件下的可靠性和耐久性。特别是在极端环境下, 这些性能参数的稳定性尤为关键。

### 2.2 聚合物基体材料性能参数

在可靠性设计中, 聚合物基体材料性能参数的确定是确保复合材料整体性能稳定与可靠性的核心环节。聚

合物基体材料的力学性能参数是评估其承重与抗变形能力的基础。这包括拉伸强度、拉伸模量、压缩强度、弯曲强度等，这些参数直接反映了材料在受到外力作用时的稳定性和耐久性。在可靠性设计中，需要确保这些参数满足或超过设计标准，以确保复合材料在复杂工况下仍能保持稳定的结构性能。另外，耐热性参数对于在高温环境下工作的复合材料尤为重要。聚合物基体材料的热变形温度、热稳定性以及长期热老化性能等，都直接关系到复合材料在高温条件下的可靠性和耐久性<sup>[2]</sup>。在可靠性设计中，需要充分考虑材料的耐热性参数，以避免因高温导致材料性能下降或失效。最后，加工性能参数也是确定聚合物基体材料性能参数时需要考虑的重要因素。良好的加工性能不仅可以提高生产效率，还可以降低生产成本。在可靠性设计中，需要综合考虑材料的流动性、固化速度、成型温度等加工性能参数，以确保复合材料在加工过程中能够保持稳定的性能和质量。

### 2.3 纤维基体界面性能参数

在可靠性设计中，纤维与基体界面性能参数的确定对于确保复合材料整体性能的稳定性和可靠性至关重要。这些界面性能参数直接关系到纤维与基体之间的结合强度、界面传递效率以及复合材料的整体力学性能。

#### 2.3.1 界面结合强度

界面结合强度是衡量纤维与基体之间结合紧密程度的关键指标。它直接影响到复合材料在受力时纤维与基体之间是否能够有效地传递载荷。界面结合强度的测定通常通过单纤维拔出试验、微脱粘试验等方法进行。这些方法能够模拟复合材料在受力过程中纤维与基体之间的相互作用，从而评估界面结合强度的可靠性。

#### 2.3.2 界面断裂韧性

界面断裂韧性反映了纤维与基体界面在受到外力作用时抵抗断裂的能力。它对于复合材料在复杂工况下的耐久性和可靠性具有重要意义。界面断裂韧性的测定可以通过断裂力学试验等方法进行，这些方法能够揭示界面在断裂过程中的力学行为，为复合材料的可靠性设计提供重要依据。

#### 2.3.3 界面化学稳定性

界面化学稳定性是指纤维与基体界面在特定环境条件下（如高温、潮湿、化学腐蚀等）保持其结合强度和力学性能的能力。这对于复合材料在恶劣环境下的应用尤为重要。界面化学稳定性的评估需要考虑纤维与基体材料的化学相容性、界面反应产物的稳定性等因素。

#### 2.3.4 界面微观结构

界面微观结构对于纤维与基体之间的结合强度和力

学性能具有重要影响。通过扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）等先进技术手段，可以观察和分析界面微观结构的形貌、相组成以及界面层的厚度等特征。这些信息有助于深入理解界面性能的本质，为复合材料的可靠性设计提供更为准确的依据。

## 3 可靠性设计中的优化方法

### 3.1 结构设计与优化

结构设计应首先满足产品的基本功能需求，确保其在预定工况下能够正常工作。在设计中充分考虑材料的性能、环境的影响以及可能的失效模式，确保结构具有足够的可靠性。在保证可靠性的前提下，优化结构设计以降低制造成本和维护费用。设计便于维修和更换的结构，以提高产品的可维护性和延长使用寿命。接着，利用有限元分析软件对结构进行模拟分析，评估其在不同工况下的应力、应变和位移等参数，找出潜在的设计弱点并进行优化。通过拓扑优化算法，在给定的设计空间和约束条件下，寻找材料的最佳分布方式，以最小化结构重量或最大化结构刚度等为目标。针对多个设计目标（如重量、强度、刚度、成本等）进行综合考虑，通过多目标优化算法寻找最优解或折衷解。对结构中的关键参数进行灵敏度分析，了解这些参数对结构性能的影响程度，从而指导优化设计的方向。通过物理试验验证优化后的结构设计是否满足预期的性能指标和可靠性要求<sup>[3]</sup>。最后，以纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器为例，其结构与优化需要考虑以下几个方面：选择合适的内衬材料（如金属或高分子材料）和厚度，以确保容器的密封性和耐腐蚀性。根据容器的承载需求和工作环境，确定纤维的类型、层数、缠绕角度和缠绕张力等参数，以优化结构的力学性能和可靠性。优化纤维与基体之间的界面结合强度，以提高复合材料的整体性能。通过优化缠绕工艺参数（如缠绕速度、温度、压力等），提高复合材料的成型质量和生产效率。

### 3.2 可靠性设计方法

可靠性设计方法不仅关注产品结构的优化，还深入至材料选择、制造工艺、环境适应性及故障预测与预防等多个层面。这些方法首先强调失效模式与影响分析（FMEA），通过识别潜在的失效模式，评估其对系统性能的影响，从而确定优先级并制定预防措施。FMEA不仅限于单一组件，而是对整个系统进行全面审查，确保从设计源头消除或减轻潜在的可靠性问题。其次，采用可靠性分配与预计技术，将系统的总可靠性目标逐层分解至各个子系统、组件乃至零件，确保每个层级都达到预定的可靠性水平。这一过程需结合历史数据、专家经验

和仿真分析,以实现科学、合理的可靠性分配。当主系统或元件发生故障时,冗余部分能够迅速接管工作,确保系统功能的连续性。然而,冗余设计也需权衡成本与效益,避免过度设计带来的资源浪费。除此之外,环境适应性设计也是可靠性设计的重要方面。产品需在不同环境条件下(如温度、湿度、振动、电磁干扰等)保持稳定的性能。因此,在设计过程中需充分考虑环境因素对产品的影响,并采取相应的防护措施。最后,可靠性设计还强调故障预测与健康管理(PHM)技术的应用。通过实时监测产品的运行状态,预测潜在的故障风险,并提前采取措施进行干预,以减少非计划停机时间和维修成本。PHM技术结合大数据分析和智能算法,为产品的可靠性管理提供了强有力的支持。

### 3.3 数值模拟与优化

在可靠性设计的优化方法中,数值模拟与优化通过构建高精度的数学模型和仿真环境,对产品的结构、材料、工作环境等进行全面模拟,以预测和评估其可靠性表现。一方面,数值模拟技术能够精确模拟产品在各种工况下的受力情况、热传导、流体流动等复杂物理过程,揭示潜在的失效机制和性能瓶颈。工程师可以据此调整设计参数,如材料厚度、结构布局、工艺参数等,以实现性能与可靠性的双重优化<sup>[4]</sup>。另一方面,优化算法与数值模拟技术相结合,能够自动搜索最佳设计方案。这些算法能够处理大量设计变量和约束条件,通过迭代计算找到满足可靠性要求且成本最低的设计方案。这一过程不仅提高了设计效率,还确保了产品的可靠性和经济性。最后,数值模拟与优化方法还具备高度的可重复性和可扩展性。工程师可以轻松地修改设计参数或仿真条件,重新进行模拟和优化,以适应不同的设计需求和场景。这种灵活性使得数值模拟与优化成为可靠性设计中不可或缺的工具。

### 3.4 试验验证与优化

在可靠性设计的优化过程中,试验验证与优化通过实际试验来验证设计方案的可行性和可靠性,并基于试验结果对设计进行进一步优化,以确保产品最终满足预定的可靠性要求。根据产品的特性和工作环境,设计覆

盖多种工况和应力水平的试验方案。这包括环境应力筛选试验、耐久性试验、加速寿命试验等,以全面评估产品的可靠性表现。在受控条件下执行试验,确保试验数据的准确性和可靠性。这要求选择适当的试验设备和仪器,严格按照试验方案进行操作,并记录详细的试验数据<sup>[5]</sup>。利用统计工具和技术对试验数据进行深入分析,识别潜在的失效模式和影响因素。通过对比试验数据与预期目标,评估产品的可靠性水平,并找出设计中存在的问题和不足之处。基于试验验证的结果,对设计进行有针对性的优化。这包括调整结构参数、改进材料选择、优化工艺流程等,以提高产品的可靠性和耐久性。同时,还需要考虑成本效益和可行性等因素,确保优化方案的经济性和实用性。

### 结语

总之,纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计是一个复杂而关键的过程,要求在设计阶段就充分考虑材料性能的离散性、结构参数的优化以及环境因素的影响。未来,随着材料科学和计算技术的发展,我们将继续深化对复合材料压力容器可靠性设计的理解,为相关领域的工程应用提供更加精准和高效的设计方案。

### 参考文献

- [1]徐洁洁,王栋,肖荣诗,黄婷.纤维增强热塑性树脂基复合材料与金属激光连接研究进展[J].焊接学报,2021,42(10):73-86+102.
- [2]刘红彪,李鹏展,张路刚,齐方利,谭林怀,卫宪,刘畅.聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料的抗压强度数值预测方法研究[J].水道港口,2021,42(04):538-544.
- [3]朱弘康,林常,蔡舒,徐树英,潘莉莎.PVA纤维类型对应硬化地聚合物基复合材料力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2021,40(11):3693-3701.
- [4]宋绪丁,庞利沙.碳纤维树脂基复合材料及成型工艺与应用研究进展[J].包装工程,2021,42(14):81-91.
- [5]王凯,刘寒松,肇研.连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术研究进展[J].航空制造技术,2021,64(11):41-49.