

复合材料在氢气储运容器中的应用研究

吕航

安徽华东化工医药工程有限责任公司上海分公司 上海 201315

摘要: 复合材料在氢气储运容器中的应用研究,旨在解决氢能利用中氢气储存和运输环节的安全性和效率问题。基于此,本文简要介绍了复合材料概述,分析了复合材料在氢气储运容器中的应用现状,并针对复合材料氢气储运容器的关键技术进行了讨论,以期对相关工作人员提供参考和借鉴。

关键词: 复合材料; 氢气储运容器; 应用

引言: 氢能作为一种零碳能源,具有来源丰富、洁净环保、燃烧值高等优点,被誉为21世纪最具发展潜力的二次能源。然而,氢能的广泛应用受到氢气储存和运输技术的限制。氢气的高压储存存在安全隐患,且传统金属材料制成的储氢容器存在重量大、氢脆等问题。因此,研究复合材料在氢气储运容器中的应用,对于提高氢气储存的安全性和效率具有重要意义。

1 复合材料概述

复合材料的定义并不唯一,但普遍接受的观点认为,复合材料是通过人工复合的方式,将含有一定数量比的两种或两种以上的组分(或称组元),组成多相、三维结合且各相之间有明显界面的特殊性能材料。这些组分可以是金属、非金属、有机高分子等不同类别的材料。复合材料的性能不仅取决于各组分材料的性能,更取决于它们的组合方式、比例、分布以及界面相互作用。复合材料的基体材料通常分为金属和非金属两大类,金属基体常用的有铝、镁、铜、钛及其合金,它们提供良好的导电性、导热性和较高的机械强度。非金属基体则主要有合成树脂、橡胶、陶瓷、石墨、碳等,它们往往具有较轻的质量、良好的耐腐蚀性和可加工性。而增强材料则主要包括玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维等高性能纤维,以及碳化硅纤维、石棉纤维等无机纤维,它们的主要作用是增加复合材料的强度和刚度。复合材料的分类方式多样,按组成可分为金属与金属复合材料、非金属与金属复合材料、非金属与非金属复合材料;按结构特点可分为纤维增强复合材料、夹层复合材料、细粒复合材料和混杂复合材料;按功能则可分为结构复合材料和功能复合材料两大类。结构复合材料主要用于承受载荷,而功能复合材料则用于实现特定的功能,如导电、超导、磁性、压电、阻尼、吸波等。

2 复合材料在氢气储运容器中的应用现状

2.1 缠绕工艺: 湿法缠绕与干法缠绕

复合材料在氢气储运容器中的应用已经取得了显著的进展,其中缠绕工艺作为关键的技术环节,对容器的性能和安全性具有至关重要的影响。缠绕工艺主要分为湿法缠绕和干法缠绕两种,这两种工艺在氢气储运容器的制造过程中各有优劣,共同推动着复合材料储氢技术的发展。一方面,湿法缠绕工艺是复合材料氢气储运容器制造中较为传统的一种方法,在这种工艺中,碳纤维或玻璃纤维等增强材料首先通过树脂胶槽进行浸润,然后在模具上进行缠绕。这种工艺的优点在于,浸润后的纤维可以紧密地贴合在模具上,形成较为均匀的纤维层,从而提高容器的整体强度和稳定性。此外,湿法缠绕工艺相对简单,易于操作,因此在早期复合材料储氢容器的制造中得到了广泛应用。另一方面,干法缠绕工艺与湿法缠绕的主要区别在于,纤维在缠绕之前已经预先与树脂进行了浸润处理,形成了预浸带^[1]。这种预浸带在缠绕过程中可以直接使用,无需再通过树脂胶槽进行浸润。因此,干法缠绕工艺可以大大提高缠绕效率,同时减少VOCs的排放,更加符合环保要求。此外,由于预浸带的纤维和树脂比例可以精确控制,因此干法缠绕工艺可以制备出密度和厚度更加均匀的缠绕层,从而进一步提高容器的整体性能。然而,干法缠绕工艺也存在一些挑战。例如,预浸带的制备需要高精度的设备和工艺控制,以确保纤维和树脂的均匀浸润。在实际应用中,湿法缠绕和干法缠绕工艺各有其适用场景。对于小型或中型的氢气储运容器,湿法缠绕工艺可能更为合适,因为其操作相对简单,成本较低;而对于大型或高压的氢气储运容器,干法缠绕工艺则可能更具优势,因为其可以制备出更加均匀和稳定的缠绕层,从而提高容器的整体性能和安全性。

2.2 储氢气瓶的成型工艺与结构设计

在成型工艺方面,复合材料储氢气瓶主要采用了纤维缠绕成型和整体模压成型两种方法。纤维缠绕成型是

通过将预浸渍的纤维带（如碳纤维或玻璃纤维）按照特定的角度和张力的缠绕在模具上，然后经过固化处理，形成具有高强度和高刚性的气瓶壳体。这种方法具有工艺简单、生产效率高、成本相对较低等优点。然而，纤维缠绕成型也存在一定的挑战，如缠绕过程中纤维的排列和张力的控制、层间结合力的保证等，这些都需要精确的控制和严格的工艺参数。整体模压成型则是将预浸渍的复合材料布或预成型件放入模具中，通过加热和加压的方式，使复合材料在模具内成型并固化。这种方法可以制备出形状复杂、尺寸精确的气瓶，且气瓶的整体性能更加均匀和稳定。但整体模压成型对模具的要求较高，且生产成本相对较高。而在结构设计方面，复合材料储氢气瓶的设计需要综合考虑多个因素，包括容器的容积、工作压力、使用环境、安全性能等。首先，气瓶的内胆通常采用金属材料（如铝合金或不锈钢），以承受氢气的压力和防止氢气泄漏。内胆的形状和尺寸需要根据气瓶的容积和使用需求进行精确设计。其次，气瓶的缠绕层是复合材料储氢气瓶的关键部分，它决定了气瓶的整体强度和稳定性。缠绕层的设计需要选择合适的纤维种类、纤维的排列方式、缠绕的层数和角度等参数，以优化气瓶的力学性能。此外，气瓶的端盖和密封结构也是设计中的重要环节，它们需要保证气瓶的密封性和安全性。端盖通常采用金属材料制成，并通过螺纹或法兰等方式与内胆和缠绕层连接。密封结构则需要采用可靠的密封材料和密封技术，以防止氢气泄漏。

2.3 复合材料储氢气瓶的优缺点分析

复合材料储氢气瓶的显著优点之一在于其高强度与轻量化特性，相比传统金属储氢容器，复合材料储氢气瓶采用了碳纤维、玻璃纤维等高强度、低密度的增强材料，结合高性能树脂基体，实现了结构强度的显著提升与整体重量的有效降低。这种轻量化设计不仅提高了车辆的燃油经济性和续航能力，还降低了运输成本，对于推动氢能源在交通领域的广泛应用具有重要意义。此外，复合材料的耐腐蚀性能优越，能够有效抵抗氢气及外界环境的侵蚀，延长了气瓶的使用寿命，减少了维护成本^[2]。在安全性方面，复合材料储氢气瓶也表现出色。其独特的层状结构设计，通过纤维的精心排列与树脂的固化作用，形成了优异的抗冲击与防爆性能。即使在极端条件下，如高温、高压或快速泄压等，复合材料储氢气瓶也能保持结构的完整性，有效防止氢气泄漏或爆炸事故的发生。同时，复合材料的气密性极佳，通过精密的制造工艺与密封技术，确保了氢气在存储过程中的稳定与安全。然而，复合材料储氢气瓶也存在一些不容忽

视的缺点。其一，制造成本相对较高，高性能纤维与树脂基体的原料成本、复杂的制造工艺以及高精度的质量控制要求，都使得复合材料储氢气瓶的初期投资较大。并且，尽管复合材料的耐腐蚀性能优越，但在长期的使用过程中，仍可能受到环境因素的影响，如紫外线辐射、湿度变化等，导致材料性能退化，进而影响气瓶的安全性与使用寿命。其二，虽然复合材料在轻量化、高强度等方面具有显著优势，但其复杂的成分与结构使得回收处理变得困难。传统的回收方法往往难以有效分离纤维与树脂，导致资源浪费与环境污染。因此，如何开发环保、高效的复合材料回收技术，成为当前亟待解决的问题。

3 复合材料氢气储运容器的关键技术

3.1 内胆设计技术

在复合材料氢气储运容器的研发与制造过程中，内胆设计技术无疑是一个至关重要的环节，内胆作为氢气储运容器的核心部件，不仅直接承担着氢气的存储任务，还关系到容器的整体安全性、耐用性和性能表现。因此，内胆设计技术不仅要求具备高度的专业性和创新性，还需要充分考虑到实际应用场景中的多种因素。在材料方面，内胆通常采用高强度、耐腐蚀、耐高压的金属材料，如不锈钢、铝合金等，这些材料具有优异的力学性能和化学稳定性，能够在极端条件下保持结构的完整性和密封性。并且，内胆的壁厚、形状和尺寸等参数也需要根据具体的存储需求和压力等级进行精确设计，以确保其能够承受预期的氢气压力和外部载荷^[3]。在结构优化方面，内胆设计技术注重提高容器的整体性能和安全性。通过采用先进的制造工艺和成型技术，如精密铸造、焊接、热处理等，可以确保内胆的制造精度和表面质量，降低制造过程中的缺陷和应力集中现象。此外，内胆的结构设计还需要考虑到氢气的渗透性和扩散性，采取有效的密封措施和防渗透技术，以防止氢气泄漏和环境污染。而除了材料和结构优化外，内胆设计技术还需要充分考虑到容器的轻量化需求，在氢能源产业中，轻量化是提高能源利用效率和降低运输成本的关键因素之一。因此，内胆设计需要在保证安全性和耐用性的前提下，尽可能减少材料的使用量和重量，这可以通过采用更轻质的金属材料、优化内胆的形状和尺寸、以及开发新型的制造工艺和技术等手段来实现。在实际应用中，内胆设计技术还需要考虑到容器的使用环境和条件。例如，在低温储氢系统中，内胆需要能够承受极低的温度和压力变化，同时还需要考虑材料的低温脆性和密封性的变化。在高温环境中，内胆则需要具备良好的

耐热性能和抗氧化性能，以防止材料老化和性能退化。

3.2 密封与检测技术

3.2.1 密封结构的设计与优化

密封结构是防止氢气泄漏的第一道防线。在复合材料氢气储运容器的设计中，密封结构的设计至关重要。首先，需要选择合适的密封材料，这些材料应具有良好的耐腐蚀性、耐高压性和耐低温性，以确保在极端条件下仍能保持稳定的密封性能。其次，密封结构的设计应考虑到容器的形状、尺寸和工作压力等因素，确保密封面能够紧密贴合，防止氢气泄漏。此外，还应考虑密封结构的可维护性和可更换性，以便在必要时进行检修或更换。在优化密封结构时，可以采用先进的数值模拟技术，对密封面的应力分布、变形情况进行精确分析，从而优化密封结构的设计参数，提高密封性能。同时，还可以通过实验验证的方式，对密封结构的性能进行实际测试，确保其满足设计要求。

3.2.2 泄漏检测方法标准

泄漏检测是确保复合材料氢气储运容器安全性的重要手段。目前，常用的泄漏检测方法包括压力衰减法、气泡法、质谱仪检测法等。这些方法各有优缺点，应根据实际情况选择合适的检测方法。例如，压力衰减法适用于检测容器整体的泄漏情况，而气泡法则更适用于检测局部泄漏点。质谱仪检测法则可以精确测量泄漏氢气的浓度和速率，为评估泄漏风险提供重要依据^[4]。在制定泄漏检测标准时，应充分考虑容器的使用环境和条件，以及氢气的特性和安全性要求。标准应明确检测方法的适用范围、检测精度、检测周期等关键参数，以确保检测结果的准确性和可靠性。并且，还应建立相应的泄漏风险评估体系，对检测出的泄漏风险进行量化评估，为采取相应的安全措施提供依据。

3.2.3 氢气渗透性测试与评估

氢气渗透性测试是评估复合材料氢气储运容器密封性能的重要手段。通过测试容器在不同压力、温度和时间内条件下的氢气渗透率，可以了解容器的密封性能和氢气泄漏风险。在测试过程中，应严格控制测试条件，确保测试结果的准确性和可比性。同时，还应采用先进的测试技术和设备，提高测试精度和效率。在评估氢气渗透性测试结果时，应综合考虑容器的材料、结构、制造工艺和使用环境等因素，对测试结果进行综合分析。通过评估，可以了解容器的密封性能和氢气泄漏风险，为采取相应的改进措施提供依据。例如，如果发现容器的氢气渗透率较高，可以采取优化密封结构、提高材料性能或加强制造工艺等措施来降低泄漏风险。

结语

综上所述，复合材料在氢气储运容器中的应用展现出广阔的前景。通过选择合适的复合材料，可以显著提高氢气储存的安全性和效率，降低容器的重量，提高系统的耐压性能和密封性能。然而，复合材料的应用也面临一些挑战，如制造成本高、高温下易脆化等。未来的研究应继续探索降低制造成本、提高耐高温性能的方法，同时改进密封结构，提高系统的密封性能。

参考文献

- [1] 明伟. 增强复合材料铣削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2019(14):76-80.
- [2] 樊锐. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 航空制造技术, 2019(12):34-37.
- [3] 李小波. 芳纶纤维增强复合材料的机械加工实例研究[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(6):47, 62.
- [4] 于长有. 纤维增强复合材料的机械加工技术研究[J]. 科技与创新, 2019(24):149, 151.