

探究球型封头压力容器的结构层次设计及缠绕成型工艺

邓建鹏 陈丰雨 王君哲

山东北方现代化学工业有限公司 山东 济南 250033

摘要：随着工业技术的不断发展，压力容器在各行业中的应用越来越广泛，特别是在高压、高温或腐蚀性环境下，对容器的性能和安全性要求极高。球型封头压力容器以其卓越的结构特点和安全性，在这些严苛条件下表现出色。本文旨在全面介绍球型封头压力容器的结构设计和缠绕成型工艺，以期对相关领域的工程师和技术人员提供有价值的参考信息。

关键词：球型封头；压力容器；结构层次设计；缠绕成型工艺

引言：封头是压力容器的重要元件，其产品质量的好坏直接关系到容器的安全性，本文详细介绍了球型封头压力容器的设计、结构和缠绕成型工艺；在结构设计部分，重点阐述了球形封头和筒身段的设计原则，包括纤维缠绕方法、经纬向抗力推导、缠绕角的确定、纤维量的计算以及经向抗力和薄膜张力的分析。并深入探讨了缠绕成型工艺的各个环节，包括纤维预浸料制备、缠绕参数的设定、缠绕操作以及固化处理；通过这些工艺步骤的精细控制，可以生产出具有优异性能和长久耐用性的压力容器。

1 球型封头压力容器的概述

球型封头压力容器是一种特殊类型的压力容器，其主要特点是采用球型封头作为容器的端部结构。这种封头具有良好的力学性能和高度的密封性，能够有效地保证容器的安全和稳定；在结构上，球型封头通常由两个圆弧面组成，形状类似于半球体^[1]。这种结构使得封头在承受内部压力时能够将压力均匀地分散到各个部位，从而提高容器的承压能力，球型封头压力容器在工业生产中具有广泛的应用，如高压容器、水处理设备、化学储存罐和石油储罐等。这些容器需要承受较大的压力和温度变化，因此要求封头具有良好的密封性和稳定性，球型封头的设计正好满足了这些要求，使得容器能够在各种恶劣环境下安全运行。此外，球型封头压力容器的制造材质也十分重要，常用的材质包括碳钢、不锈钢、铝合金等，这些材料具有良好的强度和耐腐蚀性，能够满足不同应用场合的需求。在制造工艺方面，可采用冷冲、热冲、冲焊、锻造等多种方法，其中锻造工艺是最常用的制造方法。

2 球型封头压力容器的结构层次设计

2.1 球形封头结构设计

2.1.1 纤维缠绕方法

在球形封头设计中，纤维缠绕技术是确保结构强度和稳定性的关键，理想情况下，如果纤维能够严格地沿着封头表面的大圆路径进行缠绕，那么结构的整体性能将达到最优。但在实际应用中，完美的大圆缠绕往往难以实现，这主要是由于技术限制和物理特性所决定的，为了实现尽可能接近理想状态的缠绕效果，我们依赖于纤维间的摩擦力，并通过精确控制缠绕过程中的张力和角度来确保纤维能够尽可能稳定地贴合在封头表面，形成我们所说的“包络纬度圈”。这种方法不仅提高了封头的结构强度，还有效地分散了内部压力，显著提升了整个容器的承压能力，为了实施这种缠绕方法，需要进行详细的施工计划和控制。第一，我们需要根据封头的形状和尺寸来确定纤维的起始点和终点，以及纤维的走向和间距。第二，我们会使用专业的缠绕机器或者手工操作来逐层缠绕纤维，确保每一层都紧密、均匀地贴合在封头表面。在整个过程中，我们会持续监控和调整缠绕张力和角度，以达到最佳的结构效果。

2.1.2 经纬向抗力推导

在球形封头表面缠绕的纤维，除了提供基本的结构支持外，还通过其在经纬向上的抗力来进一步增强封头的稳定性，为了精确计算和预测这些抗力，我们需要综合考虑多个关键因素。（1）包络纬度圈的半径是一个重要的参数，它决定了纤维在封头表面的分布和紧密程度。（2）球形封头表面任意点的纬度半径也是一个关键因素，它影响着纤维在不同位置的张力和稳定性。（3）缠绕纤维与经线的交角也是一个至关重要的变量，它决定了纤维在经纬向上的抗力分布。基于网络理论的基本公式，我们可以进行经纬向抗力的推导，这一过程中涉及到了复杂的数学计算和物理原理，包括力学平衡、纤维的弹性模量、泊松比等。通过这些计算，我们可以得到纤维在包络圈处的纬向抗力表达式，以及纤维的密度

等关键参数^[2]。这些具体数值对于缠绕纤维的施工至关重要，它们不仅提供了精确的设计指标，还是后续进行结构分析和优化的基础；通过精确控制这些参数，我们可以确保球形封头在承受压力时能够保持最佳的稳定性和强度。

2.2 筒身段结构设计

2.2.1 缠绕角的确定

确定缠绕角是筒身段结构设计的首要步骤，这一参数对于确保筒身段的力学性能和稳定性至关重要，我们采用了网络理论，这是一种高级的结构分析方法，能够帮助我们精确地计算出最佳的缠绕角度。（1）我们考虑了容器的工作压力，因为不同的压力会对纤维的缠绕角度产生不同的要求，在高压环境下，纤维需要更紧密地缠绕以提供更好的支撑。接着，我们评估了纤维材料的性质，包括其弹性模量、断裂强度等，以确保所选的缠绕角能够充分发挥材料的性能。（2）预期的载荷条件也是一个重要的考虑因素。我们分析了容器在使用过程中可能遇到的各种载荷情况，如静载荷、动载荷以及温度引起的热应力等；基于这些分析，我们进行了一系列的模拟实验和计算，最终确定了各包络圈螺旋缠绕层在筒身段的最佳缠绕角。这个最佳缠绕角不仅保证了纤维在受力时能够有效地分担压力，提高了筒身的整体承载能力，而且还考虑到了制造的可行性和成本效益。

2.2.2 纤维量的确定

在确定筒身段环向缠绕的纤维量时，我们进行了细致的考量与计算。第一，我们精确测量了筒身段的直径和长度，进而准确计算出其表面积；这一步骤至关重要，因为它为我们提供了确定纤维量的基础数据，表面积的大小直接决定了所需纤维覆盖的范围，进而影响纤维的使用量。第二，我们深入分析了工作压力对纤维量的具体需求。在高压工作环境下，筒身段需要更多的纤维来增强其结构强度和刚度，以确保容器的安全性和稳定性；因此，我们根据工作压力的大小，适当增加了纤维的用量。为了实现经济性和安全性的平衡，我们进行了一系列的综合优化计算，这些计算不仅考虑了纤维的成本，还充分考虑了筒身段的设计寿命和预期的载荷条件，我们通过对比不同纤维量下的成本效益和安全性，力求找到最经济的纤维用量，同时确保筒身段的安全性不受影响。经过深入分析和精确计算，我们最终确定了筒身段环向缠绕纤维的最佳用量，这一用量不仅满足了筒身段强度和刚度的设计要求，还充分考虑了材料的成本效益，有效避免了材料的浪费。这一优化结果将为我们的后续生产和应用提供有力的指导。

2.2.3 经向抗力及薄膜张力的计算

为了全面确保筒身段结构设计的合理性与安全性，我们对关键指标如经向抗力和薄膜张力展开了深入的计算与分析。这些研究都是建立在网络理论和纤维材料力学特性的坚实基础之上的，同时紧密结合了筒身在实际工作环境中可能遇到的各种复杂载荷条件。我们特别关注了纤维的缠绕方式和角度，对此进行了详尽的探究。通过这一研究，我们精确地得出了纤维在筒身段上所贡献的经向抗力^[3]。这一抗力是决定筒身结构是否稳固的核心要素，它对于保障容器能在高压环境下安全无误地运行起到了举足轻重的作用。不仅如此，我们还细致地剖析了筒身所承受的薄膜张力。这种张力主要来源于容器内部产生的压力，对筒身段的稳定有着不可小觑的影响。借助精确的计算模型，我们对薄膜张力给筒身结构带来的影响进行了全方位的评估，这为我们的结构设计提供了宝贵的数据支撑。当我们将计算结果与设计要求进行比对时，欣喜地发现筒身的实际承载性能与设计初衷不谋而合，这无疑是对我们结构设计合理性的有力印证。

3 球型封头压力容器的缠绕成型工艺

3.1 纤维预浸料制备

纤维预浸料制备是缠绕成型工艺中的一个关键环节，它为后续的缠绕过程提供了基础材料。在这个过程中，选择高质量的纤维材料是首要任务。碳纤维和玻璃纤维因其卓越的力学性能和耐久性而备受青睐，成为制备预浸料的常用材料；选定纤维材料后，接下来的重要步骤是选择与纤维相匹配的树脂。树脂的选择需考虑其与纤维的相容性、固化后的性能以及工艺性等因素，优质的树脂能够确保与纤维形成良好的界面结合，从而提高复合材料的整体性能；预浸润处理的目的是确保树脂能够均匀地浸透每一根纤维，增强纤维与树脂之间的结合力，为了实现这一目标，预浸料需要具备适当的粘性和流动性；粘性过低可能导致树脂与纤维结合不牢，而粘性过高则可能使缠绕过程中的纤维滑动困难，影响产品质量。此外，预浸料的制备还需注意环境的控制，包括温度、湿度等，以确保预浸料的质量稳定，最终制备出的预浸料应具有均匀的树脂含量、良好的浸透性和适中的粘性，为后续缠绕成型工艺奠定坚实基础。

3.2 缠绕参数设定

在缠绕成型工艺中，每一个参数的设定都至关重要，它们直接关系到产品的最终性能和质量。（1）缠绕角度的选择是一个技术与艺术的结合。这一角度不仅影响产品的环向和轴向强度，更能决定纤维在制品中的排列方式。角度小，纤维更加密集，环向强度自然得到

增强；角度大，纤维分布更为均匀，对轴向强度的提升大有裨益。因此，在选择缠绕角度时，我们必须深思熟虑，根据产品的实际应用场景和所需性能来做出最佳选择。（2）缠绕速度同样不容忽视。它好似烹饪中的火候，过快则容易“夹生”，纤维与树脂可能无法完美结合，留下气泡和空隙，影响产品的整体性能；过慢则耗时耗力，影响生产效率。掌握一个适中的缠绕速度，既能保证产品质量，又能确保生产效率，是每一位工艺师必须修炼的内功。（3）缠绕层数的确定同样考验着工艺师的智慧和经验。层数少，产品可能显得单薄，强度难以达标；层数多，虽然强度有了保障，但成本和重量也会随之增加。如何在这两者之间找到平衡，需要工艺师根据实际情况灵活调整，既要满足设计要求，又要控制成本。

3.3 缠绕操作

缠绕操作是压力容器制造过程中最为关键的环节，它要求技术人员具备高超的专业技能和精细的操作手法。在这一步骤中，模具的准备显得尤为重要，因为模具的形状和精度直接决定了最终产品的形状和尺寸精度；在缠绕过程中，技术人员需要密切关注每一层纤维的排列和贴合情况。他们必须确保每一层纤维都能够紧密、均匀地贴合在模具上，避免出现空隙或重叠现象，为了实现这一目标，技术人员需要精确地控制缠绕速度和张力，以保证纤维在缠绕过程中不会出现松弛或断裂的情况。多层缠绕技术是提高产品厚度、强度和耐用性的有效手段，但同时也增加了操作的难度，技术人员需要时刻调整缠绕张力，确保每层纤维之间的结合紧密而又不失柔韧性。过松的张力会导致纤维层之间结合不紧密，影响产品的整体结构和性能；而过紧的张力则可能损坏纤维，甚至导致整个产品的报废。除了对张力的精确控制外，技术人员还需要密切关注缠绕过程中的其他参数，如缠绕角度、缠绕速度等；因此，技术人员需要具备丰富的实践经验和敏锐的观察力，以便在缠绕过程中及时发现并解决问题。

3.4 固化处理

固化处理是缠绕成型工艺中的最后一道工序，也是确保产品质量的关键环节，在这一步骤中，树脂通过化学反应逐渐变得坚硬和耐用，从而固定住纤维的位置和形状，使产品具有稳定的结构和性能。固化温度和控制时间是固化处理中的核心要素，如果固化温度太低或时间太短，树脂可能无法完全固化，导致产品的强度、硬度和耐用性无法达到设计要求；而如果固化温度太高或时间太长，又可能引发树脂的降解、变形或产生内部应力等问题，从而影响产品的性能和使用寿命。为了确保固化处理的成功，技术人员需要对树脂的性质和固化过程中的各种变化有深入的了解，他们需要根据树脂的类型、产品的要求以及生产环境等因素来制定详细的固化方案。在固化处理过程中，技术人员还需要定期对产品进行质量检查，以确保其达到设计要求；如果发现产品存在质量问题或缺陷，技术人员需要及时采取措施进行修复或处理，以保证产品的质量和性能。通过严格的固化处理和质量控制措施，技术人员可以确保生产出的压力容器具有优异的性能和长久的耐用性，从而满足客户的需求和期望。

结语：综上所述，球型封头压力容器的设计和制造是一个复杂而精细的过程，涉及多个关键环节和参数的精确控制。通过深入理解和应用先进的结构设计原理和缠绕成型工艺，我们能够生产出高质量、高性能的压力容器，以满足现代工业对设备安全性、稳定性和耐久性的高要求。随着技术的不断进步和创新，我们期待球型封头压力容器在未来能够发挥更大的作用，为各行各业的发展提供有力支持。

参考文献

- [1]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.
- [2]王振林,孙浩,何芳,文颖慧,崔或菁,董杰涛,赵立伟.纤维增强树脂基复合材料制造技术研究进展[J].化学与黏合,2020,42(5):6.
- [3]刘雨鑫.轻量化——压力容器的发展方向[J].中国化工贸易,2020(10):213.