

# 基于先进制造技术的密封结构开发与优化

王振远 邹瑜

中集安瑞醇（南通）科技有限公司 江苏 南通 226000

**摘要：**本文探讨了压力容器中经典密封结构与基于先进制造技术的新型密封结构的开发与优化。经典密封结构如垫片密封、机械密封和填料密封，在极端工况下存在局限性。新型密封结构利用3D打印、激光加工和精密铸造等先进技术，开发了仿生、智能和复合密封结构，提高了密封性能、耐温耐压能力和耐磨耐腐蚀性。文章对比分析了新型与经典密封结构的性能、成本和工艺差异，并指出了未来密封结构开发的多学科交叉融合、智能化与数字化、绿色环保与可持续发展以及极端工况适应性等方向。

**关键词：**压力容器；新型密封结构；经典密封结构；对比分析

**引言：**随着现代工业的快速发展，压力容器在各类工业领域中扮演着至关重要的角色。其密封性能直接关系到设备的安全运行和介质的无泄漏传输。传统经典密封结构虽在一定程度上满足了工业需求，但在极端工况下的局限性愈发明显。因此，探索和开发基于先进制造技术的新型密封结构显得尤为重要。本文旨在对比分析经典密封结构与新型密封结构的性能、成本和工艺差异，并探讨未来密封结构的发展方向，以期为工业安全生产和环保可持续发展提供有益的参考。

## 1 经典密封结构概述

### 1.1 垫片密封结构

垫片密封结构是压力容器中最常见的经典密封结构之一，主要由法兰、垫片和螺栓组成。其密封原理是通过螺栓预紧力使垫片产生弹性变形，填充法兰密封面的微观缺陷，从而阻止介质泄漏。根据垫片材料的不同，可分为非金属垫片（如橡胶垫片、石棉垫片）、金属-非金属组合垫片（如缠绕垫片、金属包覆垫片）和金属垫片（如金属平垫片、金属齿形垫片）。非金属垫片具有良好的柔韧性和密封性，适用于低压、中温、腐蚀性较弱的介质，但耐温、耐压性能有限；金属-非金属组合垫片结合了金属和非金属材料的优点，具有较好的综合性能，应用较为广泛；金属垫片则适用于高温、高压、强腐蚀性等恶劣工况，但对密封面的加工精度要求较高。

### 1.2 机械密封结构

机械密封结构是一种旋转轴用的接触式动密封，主要由动环、静环、弹性元件、密封腔等部件组成。其工作原理是依靠动环和静环的端面在流体压力和弹性元件的作用下紧密贴合，并作相对滑动，从而达到密封的目的。机械密封具有密封性能好、泄漏量小、使用寿命长、适用范围广等优点，广泛应用于泵、压缩机等旋转

设备的密封。在压力容器中，常用于搅拌器轴封等需要旋转密封的部位。然而，机械密封结构复杂，制造和安装精度要求高，成本也相对较高。

### 1.3 填料密封结构

填料密封结构是通过在密封腔体内填充软质填料（如石棉盘根、聚四氟乙烯盘根等），利用压盖的轴向压力使填料变形，填满轴与密封腔体之间的间隙，从而实现密封。填料密封结构具有结构简单、成本低、安装维护方便等优点，适用于压力较低、转速不高的场合。但填料密封存在泄漏量较大、摩擦功耗高、需要定期更换填料等缺点，在现代工业中，其应用范围逐渐被其他密封结构所取代。

### 1.4 经典密封结构的应用局限

随着工业生产向高压、高温、高转速、强腐蚀等极端工况发展，经典密封结构的局限性日益凸显。垫片密封结构在高压、高温工况下，垫片容易发生老化、变形、蠕变松弛等现象，导致密封失效；机械密封结构在高速旋转工况下，端面磨损加剧，密封可靠性下降，且对密封介质的清洁度要求较高；填料密封结构由于泄漏量大、摩擦功耗高，难以满足现代工业对环保和节能的要求。此外，经典密封结构的制造工艺相对传统，难以实现复杂结构的高精度加工，限制了密封性能的进一步提升<sup>[1]</sup>。

## 2 基于先进制造技术的新型密封结构开发

### 2.1 先进制造技术对密封结构开发

#### 2.1.1 3D打印技术

3D打印技术（增材制造技术）具有无需模具、可制造复杂结构、材料利用率高、生产周期短等优点，为新型密封结构的开发提供了全新的途径。通过3D打印技术，可以制造出具有复杂内部流道、梯度材料分布的密

封元件，实现密封结构的轻量化和功能集成化。例如，利用3D打印技术制造多孔结构的密封垫片，可通过调整孔隙率和孔径大小，优化垫片的弹性和密封性；打印具有仿生结构的密封环，能够提高密封环的耐磨性和自适应能力。

### 2.1.2 激光加工技术

激光加工技术具有精度高、加工速度快、非接触式加工等特点，可用于密封结构的表面处理、微细结构加工和焊接等环节。通过激光表面处理技术（如激光淬火、激光熔覆），可以在密封元件表面形成具有特殊性能的涂层，提高密封元件的耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳性能。利用激光微细加工技术，可以在密封面上加工出微米级的沟槽、纹理等结构，改善密封面的接触状态，增强密封效果。此外，激光焊接技术可实现密封结构的高精度焊接，提高密封结构的整体强度和可靠性。

### 2.1.3 精密铸造技术

精密铸造技术能够制造出尺寸精度高、表面质量好、结构复杂的密封零件。通过熔模铸造、陶瓷型铸造等精密铸造工艺，可以生产出形状复杂的金属密封壳体、密封环等部件，减少机械加工余量，提高生产效率。同时，精密铸造技术还可以实现多种材料的复合铸造，满足密封结构对不同性能的需求。例如，在密封环的铸造过程中，可将耐磨材料和耐腐蚀材料复合在一起，提高密封环的综合性能。

## 2.2 新型密封结构类型与特点

### 2.2.1 仿生密封结构

仿生密封结构是模仿自然界中生物的结构和功能原理开发的新型密封结构。例如，模仿荷叶表面的微纳结构，在密封面上制造出具有超疏水、自清洁性能的表面，可有效防止介质在密封面附着和腐蚀，提高密封结构的使用寿命；借鉴章鱼吸盘的吸附原理，设计出具有自适应密封能力的吸盘式密封结构，能够根据压力和介质的变化自动调整密封力，实现高效密封。仿生密封结构具有独特的性能优势和良好的应用前景，但目前其研究和应用仍处于起步阶段，需要进一步深入探索和完善。

### 2.2.2 智能密封结构

智能密封结构是集成了传感器、执行器和控制单元的新型密封结构，能够实时监测密封状态，并根据监测结果自动调整密封参数，实现密封性能的自适应优化。例如，在密封结构中嵌入压力传感器、温度传感器和位移传感器，实时监测密封面的压力、温度和变形情况，当检测到密封性能下降时，控制单元自动调节螺栓预紧力或驱动弹性元件变形，恢复密封性能<sup>[2]</sup>。智能密封结构

还可以与工业物联网系统集成，实现远程监控和故障预警，提高压力容器的运行安全性和可靠性。

### 2.2.3 复合密封结构

复合密封结构是将两种或两种以上不同材料、不同结构形式的密封元件组合在一起，发挥各自的优势，实现更好的密封效果。例如，将金属密封环与橡胶密封圈组合使用，金属密封环提供高强度和耐高温性能，橡胶密封圈则保证良好的密封弹性和适应性，适用于高温、高压、腐蚀性介质的密封。复合密封结构还可以通过优化各密封元件的组合方式和参数匹配，实现密封性能的协同优化。

## 3 新型密封结构与经典密封结构对比分析

### 3.1 性能对比

在密封性能方面，新型密封结构具有明显优势。仿生密封结构和智能密封结构能够根据工况变化自动调整密封性能，有效减少介质泄漏；复合密封结构通过材料和结构的优化组合，提高了密封的可靠性和稳定性。相比之下，经典密封结构在极端工况下的密封性能容易下降，泄漏风险较高。在耐温、耐压性能上，新型密封结构采用先进的材料和制造工艺，能够适应更宽的温度和压力范围。例如，利用3D打印技术制造的金属基复合材料密封元件，具有优异的高温强度和抗氧化性能；而经典密封结构中的垫片密封，在高温、高压下容易出现材料老化和变形，影响密封效果。在耐磨、耐腐蚀性能方面，新型密封结构通过表面处理技术和材料创新，显著提高了抗磨损和抗腐蚀能力。如激光熔覆技术制备的耐磨、耐腐蚀涂层，可大幅延长密封元件的使用寿命；经典密封结构中的填料密封，由于填料材料的耐磨性和耐腐蚀性有限，需要频繁更换填料，增加了维护成本和停机时间。

### 3.2 成本对比

从制造成本来看，经典密封结构由于制造工艺成熟、结构简单，其原材料成本和加工成本相对较低。而新型密封结构采用先进制造技术和高性能材料，制造成本较高。例如，3D打印技术制造的复杂结构密封元件，虽然具有优异的性能，但设备投资大、材料成本高，导致单件产品成本较高。在维护成本方面，经典密封结构如填料密封、垫片密封，需要定期更换密封元件，维护频繁，维护成本较高；新型密封结构中的智能密封结构和仿生密封结构，由于密封性能稳定、使用寿命长，可大幅减少维护次数和维护成本<sup>[3]</sup>。从全生命周期成本角度分析，虽然新型密封结构的初始投资较高，但考虑到其长期的可靠性和低维护成本，在一些对密封性能要求

高、运行周期长的场合，新型密封结构的全生命周期成本可能低于经典密封结构。

### 3.3 工艺对比

经典密封结构与新型密封结构在制造工艺上存在显著的差异。经典密封结构的制造主要依赖于传统的机械加工、冲压、铸造等工艺。这些工艺经过长时间的发展和应用，已经相当成熟，对设备和技术的要求相对较低。然而，这也限制了其在复杂结构和高精度加工方面的能力，使得经典密封结构在应对一些特殊需求时显得力不从心；相比之下，新型密封结构则采用了更为先进的制造技术。例如，3D打印技术能够一体化制造复杂结构，打破了传统工艺的局限性。而激光加工技术则能够实现微米级甚至纳米级的高精度加工，这对于密封结构来说至关重要，因为密封性能往往对表面质量和尺寸精度有着严苛的要求。尽管如此，先进制造技术也并非完美无缺。3D打印技术在成型精度和表面质量方面仍有待提高，而激光加工设备则因其高昂的价格和高技术要求而限制了新型密封结构的大规模应用。因此，在实际应用中，我们需要根据具体需求和条件来选择合适的制造工艺，以实现最佳的密封效果和经济效益。

## 4 压力容器密封结构开发方向

### 4.1 多学科交叉融合

未来的密封结构开发将更加注重多学科交叉融合，综合运用材料科学、力学、热力学、流体力学、仿生学、电子信息技术等多学科知识，从材料、结构、功能等多个层面进行创新。例如，结合材料科学的最新成果，开发具有特殊性能的新型密封材料；利用仿生学原理，设计具有自修复、自清洁、自适应能力的密封结构；借助电子信息技术，实现密封结构的智能化监测和控制。通过多学科交叉融合，有望开发出性能更加优异、功能更加丰富的新型密封结构。

### 4.2 智能化与数字化

随着工业互联网、大数据、人工智能等技术的发展，密封结构的开发将朝着智能化和数字化方向发展。智能化密封结构将集成更多的传感器和智能控制单元，实现对密封状态的实时监测、故障诊断和自适应调节。同时，利用数字化设计和仿真技术，在密封结构设计阶段进行虚拟建模和性能模拟，优化密封结构的设计方案，减少物理试验次数，提高开发效率和质量。此外，通过建立密封结构的数字孪生模型，实现对密封结构全

生命周期的管理和优化<sup>[4]</sup>。

### 4.3 绿色环保与可持续发展

在环保要求日益严格的背景下，密封结构的开发将更加注重绿色环保和可持续发展。一方面，开发环保型密封材料，减少密封材料对环境的污染，如采用可降解材料替代传统的石棉等有害材料；另一方面，优化密封结构的设计和制造工艺，提高材料利用率，降低能源消耗，减少生产过程中的废弃物排放。此外，还将加强密封结构的回收和再利用研究，实现密封结构的可持续发展。

### 4.4 极端工况适应性

随着工业生产领域的不断拓展，深海探测、太空探索、高温高压环境作业以及强辐射区域操作等极端工况对密封结构的适应性提出了更为严峻的挑战。为了适应这些极端环境，未来的密封结构开发必须将研究重点放在极端工况下的密封机理与失效模式上。这意味着需要研发出具有出色耐高温、耐高压、耐辐射性能的密封材料，以确保密封结构在极端条件下仍能保持稳定。同时，设计具有特殊防护功能的密封结构也至关重要，以满足深海、太空等特殊环境下的密封需求，确保在极端工况下设备的正常运行与操作人员的安全。

## 结束语

综上所述，基于先进制造技术的新型密封结构在提升压力容器密封性能方面具有显著优势，尽管其制造成本相对较高，但长期运行中的可靠性和低维护成本使其成为高性能要求的优选方案。未来，随着技术的不断进步和多学科的深入融合，密封结构将更加智能化、绿色化和适应极端工况，为工业安全生产和环保可持续发展提供有力支撑。密封结构的持续优化和创新，将推动制造业向更高质量、更高效率的方向发展。

## 参考文献

- [1] 张福琪. 基于先进制造技术的工业用精密硬质合金制品生产研究[J]. 冶金管理, 2023(17):37-39.
- [2] 连哲楠, 郭英杰, 霍超, 等. 基于接触式压脚的机器人制孔垂直度优化研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3):418-426.
- [3] 郭占斌, 迟心蕊, 付程. 先进制造技术与机械制造工艺的优化措施分析[J]. 造纸装备及材料, 2023(10):127-129.
- [4] 张凯, 邱飞龙, 李建峰. 先进制造技术与工艺优化在机械制造中的应用[J]. 科技经济导刊, 2020, 163(22): 155-156.