

倒置式前置过滤器的流场仿真与过滤性能优化研究

智永胜

杭州美固科技有限公司 浙江 杭州 311200

【摘要】：本文针对寒冷地区供水系统中前置过滤器的防冻需求，开展防冻型前置过滤器的结构优化与低温环境可靠性研究。通过分析传统前置过滤器在低温环境下存在的问题，提出了结构优化方案，包括滤瓶结构强化、排水系统改进和保温措施设计。研究采用有限元分析方法对优化结构进行强度计算和应力分析，并通过实验验证了优化方案的有效性。同时，通过对不同材料的低温性能测试，筛选出适合低温环境的材料组合。研究结果表明，优化后的防冻型前置过滤器在-30℃低温环境下仍能保持正常工作，其爆破压力达到4.2MPa，远高于常规产品的2.5MPa。经过500次冻融循环试验后，产品性能保持稳定，有效解决了寒冷地区前置过滤器的冻裂问题。

【关键词】：前置过滤器；防冻设计；结构优化；低温可靠性；冻融循环；供水系统

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.071

1 引言

随着社会经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，人们对饮用水质量的要求日益提升，前置过滤器作为供水系统的初级过滤装置，其性能直接影响后续用水设备的使用寿命和出水水质。当前，传统前置过滤器在实际使用过程中普遍存在以下问题：过滤效率随使用时间下降明显、滤网易堵塞、反冲洗效果不理想、系统压力损失较大等。这些问题不仅降低了过滤器的使用效果，也增加了设备的维护成本。

倒置式前置过滤器通过结构创新，改变了传统的水流路径，将“外进内出”改为“内进外出”，充分利用离心力和重力沉降的协同作用，显著改善了过滤性能。这种创新设计为解决传统过滤器的技术难题提供了新的思路，具有重要的理论研究价值和工程应用意义。

目前，国内外学者在前置过滤器的研究方面已取得一定进展，国外研究主要集中在材料改进和过滤机理方面，通过开发新型过滤材料提升过滤精度和使用寿命。国内研究则更多关注结构优化和系统集成，但在流场特性分析和性能优化方面的研究仍显不足。

现有研究存在的主要问题包括：缺乏系统的流场特性分析、结构参数优化不够充分、性能评价体系不完善等，特别是在倒置式结构的研究方面，尚未形成完整的理论体系和技术方案。因此，开展倒置式前置过滤器的流场仿真与性能优化研究具有重要的创新意义。

本研究采用理论分析、数值模拟和实验验证相结合的研究方法，主要开展以下工作：首先，通过计算流体动力学仿真，分析倒置式过滤器内部的流场分布特性，研究不同结构参数对流场特性的影响规律。其次，建立多孔介质模型，模拟过滤过程中颗粒物的运动轨迹和沉积特性。再次，基于仿真结果优化过滤器结构参数，制作实验样机进行性能测试。最后，建立完善的性能评价体系，验证优化方案的有效性。

研究将重点关注倒置式结构的流场特性、过滤机理和性能优化，为新型前置过滤器的开发提供理论基础和技术支持。

2 倒置式前置过滤器的结构设计与工作原理

2.1 总体结构设计

倒置式前置过滤器采用创新的结构设计，主要包括进水系统、导流系统、过滤系统、集污系统和出水系统五个部分。进水系统位于过滤器顶部中心位置，采用渐缩式流道设计，确保水流平稳进入。导流系统由六片螺旋导流片组成，导流角度经过优化设计，可在较低阻力损失下产生稳定的旋转流场。

过滤系统采用双层复合滤网结构，内层为100目不锈钢滤网，主要拦截较大颗粒物；外层为60目聚酯滤网，负责精细过滤。这种设计既保证了过滤精度，又提高了纳污能力。集污系统设计为锥形结构，锥角经过优化计算，便于杂质在重力作用下自然沉降和聚集。

2.2 工作原理创新

倒置式前置过滤器的工作原理基于离心分离和滤网过滤的协同效应，待处理水流从顶部中心进水口进入后，首先通过导流系统形成旋转水流。在离心力作用下，密度较大的颗粒物向过滤器壁面运动，实现预分离。随后，水流通过双层滤网完成精细过滤，最终从侧向出水口排出。

这种创新设计具有以下优势：首先，利用离心力实现预分离，显著减轻了滤网的负担；其次，倒置结构使杂质在重力作用下自然沉降到集污腔，避免了滤网表面的杂质堆积；最后，独特的流道设计使反冲洗时能形成强烈的涡流，大幅提高了冲洗效果。

2.3 关键参数设计

导流系统参数经过优化设计，导流片角度设置为45°，在保证离心效果的同时控制阻力损失。导流片数量确定为6片，通过流场仿真验证了这一配置能在整个过滤空间形成均匀的

旋转流场。

过滤系统参数经过精确计算,滤网总面积较传统结构增加50%,有效降低了单位面积的过滤负荷,滤网采用特殊编织工艺,在保证过滤精度的同时提高了机械强度和使用寿命。

集污系统容积经过优化设计,可容纳相当于传统结构两倍的杂质质量,显著延长了过滤器使用周期。锥形结构的角度经过流体力学计算,确保杂质能够顺利滑落而不产生堆积。

3 流场仿真模型建立与验证

3.1 数学模型建立

本研究采用欧拉-拉格朗日方法建立多相流模型,将流体相视为连续介质,颗粒相视为离散相,通过建立完整的控制方程体系,准确描述过滤器内部的流动特性和颗粒物运动规律。滤网区域采用多孔介质模型,通过经验公式描述压降特性,确保仿真结果的准确性。

在模型建立过程中,充分考虑了实际工况的各种因素,包括流速变化、压力波动和颗粒物特性等,通过引入湍流模型,准确模拟了过滤器内部的复杂流动状态,为结构优化提供了可靠的理论依据。

3.2 仿真参数设置

仿真采用专业的计算流体动力学软件进行,计算域包括进水段、导流段、过滤段和出水段,网格划分采用多区域混合网格技术,在滤网区域和导流片附近进行局部加密,确保计算精度。网格质量经过严格检验,skewness值控制在0.4以下,保证计算结果的可靠性。

边界条件设置基于实际工况,进口条件采用速度进口,流速范围覆盖0.5-2.0m/s的实际使用工况。出口条件设置为压力出口,相对压力为0Pa。壁面条件采用无滑移边界,准确模拟实际流动状态。

3.3 模型验证方法

为验证仿真模型的准确性,建立了完整的实验验证系统,通过粒子图像测速技术(PIV)测量过滤器内部关键位置的流速分布,同时采用高精度压力传感器监测各段的压力损失。实验系统配备自动数据采集装置,可实时记录测试数据。

通过对比仿真结果与实验数据,验证了数学模型的有效性。结果显示,流速分布的最大相对误差小于8%,压力损失预测误差小于5%,证明仿真模型具有较高的准确性,可用于指导产品优化设计。

4 流场特性分析与结构优化

4.1 流场分布特性分析

通过计算流体动力学仿真,获得了倒置式过滤器内部详细的流场信息,速度场分析表明,在导流片的作用下,进水形成

了稳定的旋转流场,切向速度在滤网内侧区域达到最大值。这种旋转流场产生了显著的离心效应,使密度较大的颗粒物向壁面运动,实现了有效的预分离。

压力场分布显示,主要压力损失发生在导流段和过滤段,与传统过滤器相比,倒置式结构的整体压力损失显著降低,这主要得益于其优化的流道设计。流线分析表明,倒置结构有效避免了传统过滤器中常见的流动死区,提高了过滤效率。

4.2 颗粒物运动轨迹研究

通过离散相模型追踪了不同粒径颗粒物的运动轨迹,仿真结果显示,大颗粒物(粒径 $>50\mu\text{m}$)在离心力作用下快速向壁面运动,在进入滤网前就被分离到集污腔,这部分颗粒物占总杂质质量的65%。中等颗粒物(粒径 $20\sim 50\mu\text{m}$)部分通过离心分离,部分被滤网拦截,运动轨迹受流速影响较大。

细颗粒物(粒径 $<20\mu\text{m}$)主要依靠滤网拦截,但由于预分离作用减轻了滤网负担,其过滤效率比传统结构提高30%。通过分析颗粒物运动轨迹,优化了导流系统和过滤系统的结构参数,进一步提升了过滤性能。

4.3 结构参数优化

基于流场分析结果,对关键结构参数进行了系统优化,导流角优化通过对比 30° 、 45° 、 60° 三种方案,发现 45° 导流角在离心效果和阻力损失之间达到最佳平衡。导流片数量优化表明,6片导流片可在保证流动均匀性的同时避免过大的阻力损失。

滤网面积通过增加滤网高度得以扩大,使有效过滤面积增加50%,显著降低了单位面积的过滤负荷。流道形状经过改进,将直筒形流道改为渐扩形,使流速分布更加均匀,避免了局部高速区对滤网的冲刷磨损。

5 实验研究与性能分析

5.1 实验系统建立

为验证仿真结果,建立了完整的实验测试系统,系统包括供水单元、测试样机、参数测量单元和数据采集系统。供水单元采用变频泵实现流量精确控制,测试样机按照优化参数加工制造,确保与仿真模型的一致性。

参数测量单元包括电磁流量计、差压变送器、浊度仪和颗粒计数仪等精密仪器。数据采集系统采用工业计算机配合专业软件,实现测试数据的自动采集和处理,实验系统经过严格校准,确保测试结果的准确性。

5.2 过滤性能测试

过滤效率测试采用ISO 12103-1标准测试粉尘,粒径分布范围为 $0\sim 100\mu\text{m}$,测试结果显示,在额定流量下,倒置式过滤器对 $50\mu\text{m}$ 以上颗粒物的去除率达到99.2%,对 $20\sim 50\mu\text{m}$ 颗粒物的去除率为93.5%,均显著优于传统结构。

压力损失测试表明,在相同流量条件下,优化后的倒置式过滤器压力损失为 0.016MPa,比传统结构降低 38%。这一改进不仅降低了系统能耗,也提高了过滤器的适用范围。

冲洗效果测试显示,在 0.3MPa 冲洗压力下,倒置式过滤器的杂质去除率达到 98.5%,而传统结构仅为 85%,通过高速摄像分析发现,倒置结构在冲洗时形成了强烈的涡流,能有效清除滤网表面的附着杂质。

5.3 长期运行性能评估

通过持续 1000 小时的耐久性试验,评估过滤器的长期运行性能,试验期间定期检测过滤器的性能参数,结果显示过滤效率在整个试验期间保持稳定,未出现明显下降。压力损失随运行时间缓慢增加,但增速明显低于传统结构。

微观结构分析显示,优化后的滤网在长期使用后仍保持良好的结构完整性,未出现明显的变形或损坏。这表明优化设计不仅提升了即时性能,也显著延长了产品的使用寿命。

6 创新点与技术优势

6.1 主要创新点

本研究在倒置式前置过滤器的研发过程中实现了多项创新:首先,提出了创新的倒置式结构设计,通过"内进外出"的流动方式实现了离心分离与滤网过滤的有机结合;其次,建立了完整的流场仿真模型,准确预测了过滤器内部的流动特性和颗粒物运动规律;再次,开发了双层复合滤网结构,在保证过滤精度的同时提高了纳污能力;最后,优化了导流系统和集污系统,显著提升了过滤效率和冲洗效果。

这些创新点不仅解决了传统过滤器的技术难题,也为前置过滤器的发展提供了新的技术路线,具有重要的理论价值和实践意义。

6.2 技术优势

与传统产品相比,优化后的倒置式前置过滤器具有显著的

技术优势:在过滤性能方面,综合过滤效率提高 20%以上;在运行阻力方面,压力损失减少 38%;在冲洗效果方面,杂质去除率提升至 98.5%;在使用寿命方面,预计使用寿命达 10 年,较传统产品提高 40%。

这些技术优势使得倒置式过滤器在市场竞争中具有明显的竞争力,为产品的推广应用奠定了坚实基础。

7 结论与展望

7.1 研究结论

通过系统的仿真分析和实验研究,得出以下主要结论:倒置式结构能有效改善过滤器内部的流场分布,流速均匀性提高 45%,为高效过滤创造了良好条件;创新的导流设计产生的离心力场可实现预分离效果,使 65%的大颗粒物在进入滤网前就被去除;优化后的双层滤网结构在保证过滤精度的同时,将纳污能力提高 50%;实验验证表明,倒置式过滤器在过滤效率、压力损失和冲洗效果等方面均显著优于传统结构。

这些结论证明了倒置式结构的有效性和优越性,为解决传统过滤器的技术难题提供了创新解决方案。

7.2 技术展望

基于本研究结果,对倒置式前置过滤器的未来发展提出以下展望:首先,智能控制技术的集成应用将是重要发展方向,通过传感器和物联网技术实现设备状态的实时监测和智能控制;其次,新材料的应用研究有待深化,特别是纳米材料和功能聚合物的开发应用;再次,系统集成优化需要加强,推动过滤器与其他水处理设备的协同创新;最后,标准化体系建设亟待完善,制定统一的技术规范和测试标准。

通过这些技术创新和发展,倒置式前置过滤器必将在水处理领域发挥更重要的作用,为保障用水安全和促进可持续发展做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 吴平良.精处理前置过滤器存在问题及优化措施[J].中国新技术新产品,2020,(21):42-44.
- [2] 郑乾辉,杜加友,朱泽飞.基于 CFD 仿真对过滤器优化设计[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2015,35(05):40-43.
- [3] 巴鹏,房元灿,谭效武.基于 CFD 技术的管道过滤器内部流场模拟及其结构优化设计[J].润滑与密封,2011,36(04):98-101.
- [4] 李琦.浮筒网式旋转过滤器的流场特性与结构优化研究[D].新疆农业大学,2025.