

基于负压抽滤与联动自洁的智能污水处理系统研究

罗奕瑾* 任晋怡 崔 原 张晓雅 兀磊峰
(山西工程科技职业大学)

DOI: 10.65285/ZRKXLT.V11I1.002

摘 要: 随着城市化进程加速和工业废水排放标准的日益严格,传统污水处理工艺面临着能耗高、维护频繁、过滤介质易堵塞等突出问题。本研究提出了一种基于负压抽滤与联动自洁的新型智能污水处理系统,通过构建负压驱动过滤单元与智能反冲洗模块的协同工作机制,实现了污水处理过程的低能耗运行与过滤介质的自动再生。系统采用分布式负压抽滤阵列作为核心过滤单元,利用真空泵组在膜组件或滤料层两侧建立稳定的负压梯度,驱动污水高效透过过滤介质。本研究为中小型污水处理设施的高效、低耗、智能化运行提供了新的技术路径。

关键词: 负压抽滤; 联动自洁; 智能控制; 污水处理

Research on an Intelligent Wastewater Treatment System Based on Negative-Pressure Filtration and Interlinked Self-Cleaning Mechanisms

Yijin Luo*, Jinyi Ren, Yuan Cui, Xiaoya Zhang, Leifeng Wu
Shanxi University of Engineering Science and Technology

Abstract: With the acceleration of urbanization and increasingly stringent discharge standards for industrial wastewater, traditional wastewater treatment processes are confronted with prominent problems such as high energy consumption, frequent maintenance and easy clogging of filtration media. This study proposes a new intelligent wastewater treatment system based on negative-pressure filtration and interlinked self-cleaning. By constructing a collaborative working mechanism of negative-pressure-driven filtration unit and intelligent backwashing module, the system realizes low-energy-consumption operation of wastewater treatment and automatic regeneration of filtration media. Taking the distributed negative-pressure filtration array as the core filtration unit, the system uses vacuum pump sets to build a stable negative-pressure gradient on both sides of membrane modules or filter media layers, so as to drive wastewater to pass through filtration media efficiently. This research provides a new technical path for the efficient, low-consumption and intelligent operation of small- and medium-sized wastewater treatment facilities.

Keywords: negative-pressure filtration; interlinked self-cleaning; intelligent control; wastewater treatment

前言:

(一) 研究背景

水资源短缺与水环境污染已成为制约全球可持续发展的关键瓶颈。据统计,我国城镇污水年排放量超过 700 亿立方米,且随着工业化和城镇化进程的推进,污水成分日趋复杂,对处理技术提出了更高要求。传统的污水处理工艺,如活性污泥法、生物膜法及常规重力过滤技术,虽然在污染物去除方面取得了显著成效,但在运行过程中普遍存在能耗高、占地面积大、过滤介质易堵塞、维护管理繁琐等问题。特别是过滤单元作为污水深度处理的核心环节,其运行效率直接决定了出水水质与系统稳定性。

在过滤技术领域,负压抽滤作为一种利用负压梯度驱动流体透过过滤介质的分离技术,近年来受到了广泛关注。相较于传统的加压过滤和重力过滤,负压抽滤具有能耗低、结构紧凑、操作灵活等显著优势。其核心原理在于通过在过滤介质下游建立低于大气压的压力环境,利用两侧压差驱动污水中的洁净组分透过膜或滤料层,而污染物则被截

留于介质表面或内部孔隙中。然而,负压抽滤在实际应用中同样面临着膜污染与滤层堵塞的挑战,随着运行时间的延长,截留污染物逐渐累积,导致过滤阻力急剧上升、通量衰减,最终影响系统处理效率。

(二) 国内外研究现状

国外在负压抽滤技术的研究起步较早。Smith 等(2019)提出了一种真空驱动膜生物反应器(VMBR),通过优化膜组件构型与曝气方式,有效缓解了膜污染问题,但其反冲洗策略仍依赖固定周期,缺乏对实际污染状态的动态响应。李明等(2023)提出基于压差反馈的变频抽滤系统,实现了抽滤功率的自适应调节,但未解决滤层深度污染后的高效再生问题。

(三) 研究目的与意义

针对现有技术的不足,本文提出一种基于负压抽滤与联动自洁的智能污水处理系统。该系统的主要创新点在于:构建了“负压抽滤—压差监测—智能判断—联动自洁”的闭环控制架构,实现过滤与清洗过程的协同优化;设计了

气水联合反冲洗与超声辅助清洗相结合的复合自洁模块，显著提升滤层再生效率；开发了基于物联网的智能运维平台，支持远程监控、故障诊断与自适应参数优化。本研究旨在为中小型污水处理设施提供一种高效、低耗、少维护的技术解决方案，对推动污水处理行业的智能化转型具有重要的理论意义与实践价值。

二、系统总体设计

（一）系统架构

本系统采用模块化设计理念，整体由预处理单元、负压抽滤单元、联动自洁单元、智能控制单元和出水监测单元五大部分组成，各单元之间通过管道、电缆及通信网络实现物质流、能量流与信息流的有机融合。

预处理单元设置于系统前端，主要包括格栅除污机、调节池和混凝沉淀装置，用于去除污水中的大颗粒悬浮物、调节水质水量，并为后续负压抽滤创造稳定的进水条件。负压抽滤单元作为系统的核心处理模块，由多组并联的负压抽滤阵列构成，每组阵列包含过滤腔体、滤料层（或膜组件）、真空泵组及气液分离装置。联动自洁单元集成于抽滤单元内部，包括反冲洗水泵、空压机、超声换能器阵列及排污阀组，可在智能控制单元的指令下执行多模式清洗程序。智能控制单元以可编程逻辑控制器（PLC）为核心，搭载多参数传感器网络、人机交互界面（HMI）和物联网通信模块，实现全过程的自动化监控与优化决策。出水监测单元配备在线水质分析仪，实时检测出水 COD、SS、浊度、氨氮等关键指标，并将数据反馈至控制单元用于闭环调节。

（二）工艺流程

污水首先进入预处理单元，经格栅拦截大颗粒杂物后流入调节池，通过搅拌与均质处理稳定水质水量。随后，污水由提升泵送入负压抽滤单元。在真空泵组的作用下，过滤腔体内形成稳定的负压环境（通常为 0.03 至 0.08MPa），污水在压差驱动下透过滤料层，洁净水被抽吸至气液分离罐，经脱气处理后达标排放或进入后续深度处理单元；而悬浮物、胶体等污染物则被截留在滤层表面，逐渐形成滤饼层。

随着过滤过程的持续，滤饼层厚度增加，过滤阻力上升，表现为跨膜压差（TMP）增大或抽滤流量衰减。智能控制单元通过实时监测压差传感器和流量计的数据，结合预设的污染判定算法，动态评估滤层污染状态。当污染指标达到设定阈值时，系统自动触发联动自洁程序：首先关闭进水阀与抽真空阀，开启排污阀；随后启动气洗程序，利用空压机向滤层底部注入压缩空气，通过气泡上升过程中的剪切与扰动作用剥离滤饼层；接着启动水力反洗，反冲洗水泵将洁净水或储水池中的清水以反向流态注入滤层，将松散的污染物冲出；对于顽固性污染，系统可启动超声辅助清洗，利用高频超声空化效应深入滤层孔隙，瓦解附着的有机污染物与无机结垢。清洗完成后，排污阀关闭，系统恢复抽滤运行。

三、负压抽滤模块设计

（一）负压抽滤原理

负压抽滤的本质是利用过滤介质两侧的压力差作为传质驱动力，实现固液分离。根据达西定律（Darcy's Law），在层流条件下，滤液通量（ J ）与跨膜压差（ ΔP ）成正比，与滤层阻力（ R ）和滤液黏度（ μ ）成反比。

其中，总滤层阻力 R 由滤料本身阻力（ R_m ）和滤饼层阻力（ R_c ）两部分组成，即 $R=R_m+R_c$ 。在运行初期， R_c 较小，系统通量较高；随着污染物不断沉积， R_c 逐渐增大，导致通量衰减。传统重力过滤依赖水头差驱动， ΔP 通常仅为 0.01 - 0.05MPa，过滤速率受限；而加压过滤虽可获得较高 ΔP ，但需配备高压泵，能耗显著增加。负压抽滤通过真空泵在滤层下游建立负压， ΔP 可达 0.03 - 0.08MPa，兼具较高的驱动力与较低的能耗优势，因为真空泵主要克服气体流动阻力，而非直接输送大量液体。

（二）滤料层构型优化

滤料层是负压抽滤单元的核心组件，其构型设计直接影响过滤精度、纳污容量与清洗再生性能。本系统采用梯度复合滤料结构，自上而下依次为：粗滤层（粒径 2 - 4mm 的无烟煤，厚 150mm）、精滤层（粒径 0.5 - 1.2mm 的石英砂，厚 300mm）和承托层（粒径 4 - 8mm 的砾石，厚 150mm）。这种梯度设计使得污染物主要在粗滤层表面及内部被截留，延缓了精滤层的堵塞，延长了整体过滤周期。

在膜过滤应用场景中，系统可选用中空纤维微滤膜或超滤膜组件，膜材质为聚偏氟乙烯（PVDF），具有优异的化学稳定性与机械强度。膜组件采用浸没式布置，膜丝垂直悬挂于过滤腔体内，下端自由摆动，可在曝气或水流作用下产生轻微摆动，减缓污染物在膜表面的沉积。

四、联动自洁机制设计

（一）污染状态智能识别

联动自洁的前提是精准判断滤层污染状态。本系统采用多参数融合的智能识别策略，综合以下指标进行污染判定：

跨膜压差（TMP）变化率：通过安装在滤层上下游的压力传感器实时计算 TMP。当 TMP 达到初始值的 1.5 倍或单位时间内 TMP 上升速率超过设定阈值（如 0.5kPa/min）时，判定为重度污染。

抽滤流量衰减率：通过电磁流量计监测实际通量。当实际通量低于初始通量的 70% 时，触发清洗预警。

运行时间累积：作为辅助判据，设定最大连续运行时间上限（如 72 小时），防止因传感器故障导致清洗程序长期不触发。

出水浊度突变：当出水浊度突然升高，表明滤层可能出现穿透或破损，需立即停机检查。

控制单元将上述参数输入模糊逻辑控制器，输出污染等级（轻度、中度、重度），并据此选择相应的清洗模式与强度。

（二）复合自洁工艺

针对不同污染等级，系统设计了三级联动自洁工艺：

一级气洗(轻度污染):仅启动空压机,以0.1-0.2MPa的气压向滤层底部注入空气,气水比控制在3:1至5:1。上升气泡在滤料颗粒间产生剪切力,剥离表面松散滤饼,清洗历时3-5分钟。

二级气水联合反洗(中度污染):在气洗基础上叠加水力反洗。反冲洗强度设定为12-15L/(m²·s),气洗与水洗交替进行或同步进行。气水联合作用可显著提升清洗效率,反洗历时5-8分钟。

三级超声辅助深度清洗(重度污染):对于长期运行后渗入滤层深层的有机污染物或无机结垢,常规气水反洗难以彻底去除。系统在滤层侧壁布置超声换能器阵列,工作频率为28-40kHz,功率密度为0.5-1.0W/cm²。超声空化效应产生的微射流与局部高温高压可瓦解污染物与滤料表面的结合力,配合气水反洗实现深度再生。超声清洗历时2-3分钟,为避免对滤料造成损伤,采用间歇式工作模式(工作5秒、停2秒)。

五、实验与性能分析

(一) 实验装置与方法

为验证系统的处理效能与运行稳定性,搭建了一套处理规模为5m³/h的中试实验装置。实验用水取自某城镇污水处理厂二沉池出水,主要水质指标为:COD80-120mg/L,SS30-60mg/L,氨氮15-25mg/L,浊度15-30NTU。

实验设置三个对比工况:(A)本系统(负压抽滤+联动自洁);(B)传统重力砂滤池(固定周期反洗);(C)常规真空过滤(无智能自洁,定时反洗)。每组工况连续运行30天,监测进出水水质、能耗、反冲洗耗水量及运行周期等参数。

(二) 污染物去除效果

实验结果表明,本系统对各项污染物均表现出优异的去除性能。在稳定运行阶段,出水COD平均为8.7mg/L,去除率92.3%;出水SS平均为1.2mg/L,去除率96.8%;出水氨氮平均为2.1mg/L,去除率88.5%;出水浊度稳定在1.0NTU以下。负压抽滤提供的稳定驱动力确保了滤层对细微颗粒的高效截留,而梯度复合滤料的设计进一步提升了纳污能力。

对比工况B(重力砂滤)的COD去除率为78.5%,SS去除率为89.2%,均低于本系统,主要原因是重力驱动下过滤速率受限,对胶体类污染物的去除不充分。对比工况C(常规真空过滤)的去除率与本系统接近,但其运行周期明显缩短,通量衰减更快。

(三) 运行稳定性与自洁效果

运行周期是衡量过滤系统稳定性的关键指标。本系统在智能联动自洁机制的保障下,平均连续运行周期达到76小时,最长可达82小时;而对比工况C的平均运行周期仅为28小时,需频繁停机反洗。本系统的清洗触发基于实际污染状态,避免了不必要的清洗,同时复合自洁工艺确保了每次清洗后滤层通量恢复率超过95%。

反冲洗耗水量方面,本系统单次反洗耗水量约为处理水量的2.8%,而对比工况B和C分别为4.5%和5.2%。气水联合反洗与超声辅助清洗的高效性显著降低了清洗用水需求,这对于水资源紧缺地区具有重要意义。

结语:

本文针对传统污水处理过滤单元能耗高、易堵塞、维护频繁等问题,提出并研究了一种基于负压抽滤与联动自洁的智能污水处理系统,得出以下主要结论:

负压抽滤技术以较低的能耗提供了稳定的过滤驱动力,配合梯度复合滤料或膜组件,可实现对COD、SS、氨氮等污染物的高效去除,出水水质稳定达标。基于多参数融合的联动自洁机制能够精准识别滤层污染状态,智能触发气洗、气水联合反洗或超声辅助清洗等多级清洗程序,显著延长连续运行周期,降低反冲洗耗水量。以PLC为核心、融合物联网技术的智能控制系统,实现了污水处理全过程的自动化监控、自适应优化与远程运维,提升了系统的运行稳定性与管理效率。中试实验验证了系统的技术可行性与经济合理性,其在污染物去除率、运行周期、能耗控制等方面均优于传统工艺,具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 张伟,王磊,陈刚.真空转鼓过滤机在污泥脱水中的应用研究[J].环境工程学报,2022,16(3):891898.
- [2] 李明,赵强,刘洋.基于压差反馈的变频抽滤系统设计与实验[J].中国给水排水,2023,39(8):4551.
- [3] 陈志华,周建平.超声空化技术在膜清洗中的应用进展[J].膜科学与技术,2021,41(2):156164.
- [4] 刘建国,孙丽华.基于PLC的污水处理自动控制系统设计[J].自动化与仪器仪表,2022,(5):7882.
- [5] 国家环境保护总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB189182002[S].北京:中国环境出版社,2002.

作者简介:罗奕瑾(2004.11-),女,汉、山西太原、本科、研究方向为建筑工程技术。