

Application of new modified filter media in advanced wastewater treatment

Wenjing Xin

Beijing Northern Drainage Equipment Industry Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

In order to strengthen the effectiveness of municipal wastewater advanced treatment, the development of high-efficiency filter materials is the core point. This study focuses on the preparation process and characterization methods of new modified filter materials, systematically analyzes the regulation principle of surface functionalization technology on material structure and adsorption performance, and creates a multi-process system with modified filter materials as the core to explore its practical application effect in removing dissolved organic matter, nitrogen and phosphorus nutrients and trace organic pollutants. This type of filter material shows significant pollutant reduction ability and stable operation function. The research results provide new material support for the reuse and discharge of municipal wastewater to meet the standards. It has significant engineering promotion significance.

Keywords

Municipal sewage ; Modified filter material ; Deep processing ; Pollutant removal ; Surface functionalization technology

新型改性滤料在污水深度处理中的应用

辛文晶

北京北排装备产业有限公司, 中国·北京 100000

摘要

为强化市政污水深度处理的成效, 开发高效滤料是核心要点, 本研究以新型改性滤料制备工艺及表征方法为中心展开, 系统分析表面功能化技术对材料结构及吸附性能的调控原理, 创建以改性滤料为核心的多元工艺体系, 探究其在去除溶解性有机物、氮磷营养盐和微量有机污染物方面的实际应用效果, 该类滤料展现出显著的污染物削减能力和稳定的运行功能, 研究成果为市政污水再生利用及排放达到标准提供新型材料支持, 具备显著的工程推广意义。

关键词

市政污水; 改性滤料; 深度处理; 污染物去除; 表面功能化技术

1 引言

随着城市化推进速度加快以及水资源短缺问题愈发凸显, 市政污水深度处理技术成为维护水环境安全、实现资源最大化利用的关键办法, 常规处理工艺没办法高效去除溶解性有机物、氮磷营养盐和新兴微量污染物, 这阻碍了再生水品质的提高, 新型改性滤料依仗出色的吸附表现和良好的工艺适应能力, 在多级净化系统之中展现出广泛应用的潜力, 对其结构调控机制和污染物去除效能展开研究, 具备重要理论与工程意义。

2 新型改性滤料的制备与表征方法

2.1 表面功能化改性的主流技术路径

新型滤料的表面功能化改性多采用负载型、掺杂型或

共价键合型方式, 以提升对目标污染物的亲和力与反应活性, 在市政污水深度处理领域针对难降解有机物与氮磷营养盐的去除需求, 常选用金属氧化物负载、氨基化修饰或碳材料复合增强的路径进行定向改性, 在天然沸石或陶粒表面负载 FeOOH 可显著提升对磷酸根的吸附容量, 静态等温实验中其最大吸附量可达 18.4 mg P/g 。采用溶胶凝胶法或共沉淀法实现纳米尺度的均匀分布可增强表面反应活性并保持良好的机械稳定性。部分研究引入有机硅基团或季铵盐结构修饰滤料表面, 增强对溶解性有机物的电荷中和与疏水作用, 拓展其在混合污染物体系中的适用性^[1]。

2.2 关键物理化学性质的表征分析

改性处理后的滤料在比表面积、孔隙结构及表面性质方面均表现出明显优化特征, 整体呈现出多孔骨架发育充分、反应位点分布均匀及界面亲和性增强的工程应用优势。滤料表面形成以介孔结构为主的多级孔道体系, 有利于水体污染物在滤层中的传质扩散与充分接触, 提升单位体积材料的有效作用面积。表面功能化处理使滤料具备稳定的表面活

【作者简介】辛文晶(1998—), 女, 中国山西朔州人, 本科, 助理工程师, 从事水处理技术研究。

性基团分布特征,增强对有机污染物及营养盐组分的吸附能力与选择性亲和作用。在不同水质条件下,滤料表面电性表现出良好的环境适应性,有利于维持连续运行过程中的吸附稳定性。经有机硅类改性后,滤料表面呈现一定疏水特征,可强化对疏水性有机污染物的富集能力,同时保持良好的水力通透性能,为深度处理系统长期运行提供可靠材料基础^[2]。

2.3 改性对滤料结构与性能的影响机制

表面功能化改性不仅改变滤料的化学组成,还在微观尺度上重构其孔隙结构与吸附行为,负载型改性常导致表面形成非连续覆盖层,若颗粒团聚或负载过度,会造成比表面积下降与孔道堵塞,从而影响污染物的传质扩散速率,在市政污水实际工况中滤速通常为 5–10 m/h,结构优化应在保证足够反应位点数量的同时维持合理的水力通透性,掺杂型改性则可能在骨架结构中引入异质晶相,改变表面电荷分布与酸碱性质间接提升对阴离子或中性有机物的选择性吸附能力^[3]。实验研究表明在等量投加条件下,经 Zn-Al LDH 改性的无机滤料对磷的去除率较未改性样品提升约 62.3%,吸附过程表现出拟二级动力学行为。结构变化与性能表现之间的耦合关系说明改性路径选择应结合目标污染物特性与运行环境,避免性能提升带来的结构副作用影响系统稳定运行。

3 市政污水深度处理中典型污染物的去除效能

3.1 对溶解性有机物与难降解有机物的去除特性

市政污水中的溶解性有机物主要以小分子腐殖酸、低分子蛋白类及亲水性中性有机物为主,难降解有机物多为芳香族、卤代烃类及部分药物残留,这些组分在常规活性污泥系统中去除效率较低,导致出水 $UV_{(254)}$ 和 COD_{Cr} 值居高不下,新型改性滤料的开发侧重于增强与此类污染物的电荷作用、 $\pi-\pi$ 作用以及疏水吸附能力,根据表面官能团的定向引入可构建针对性复合吸附机制,研究表明经氨基改性的磁性颗粒材料在弱酸至中性 pH 条件下对腐殖酸类物质的吸附能力提升显著,最大吸附容量由 17.2 mg/g 增至 45.6 mg/g。采用石墨烯氧化物与铁氧化物复合修饰的多孔陶粒对苯酚类有机物表现出良好去除能力,反应速率常数提高 2.7 倍,吸附等温线更接近 Langmuir 模型,说明其表面吸附点呈现出较强的单层饱和特性^[4]。在动态滤柱实验中,滤速控制在 6 m/h 条件下,改性滤料在运行周期内对溶解性 COD 保持 75% 以上的去除率,紫外吸光值从 0.178 降低至 0.041。表面电性与官能团分布对吸附速率与选择性有明显调控作用,不同改性技术路径应根据目标有机物类别及其极性特征进行匹配优化,以提升滤料的选择性去除效率和使用周期。

3.2 对氮、磷等营养盐的深度削减效果

氮和磷是导致水体富营养化的主要营养盐组分,市政污水中以铵态氮、硝酸盐氮与正磷酸盐为主要存在形式,其

低浓度高迁移性的特性决定了常规处理方式难以实现稳定去除,新型改性滤料常根据引入高价金属离子或双金属氢氧化物以增强与营养盐之间的静电吸附与沉淀反应能力,其中 Fe、Al、La 等金属的负载型改性路径在磷去除中应用较为广泛,在等温吸附试验中,采用 Fe-Mn 双金属氧化物修饰的滤料对磷酸根的饱和吸附量可达 32.8 mg P/g,远高于天然滤料的 7.4 mg P/g,反应动力学分析显示其吸附过程主要符合拟二级模型,反应活化能降低明显,有利于在低温条件下保持反应速率,氮的深度去除则更多依赖于功能材料对铵离子的选择性吸附或对硝酸盐的还原转化能力,Mg-Zr 复合氢氧化物改性材料在 pH 为 6.5–7.0 范围内对 NH_4^+-N 去除率可稳定保持在 84% 以上,吸附容量达 25.6 mg/g。滤料表面 Zeta 电位调控对氮磷吸附性能的直接表现为弱碱性条件下阳离子型吸附点数目增加提升对负离子型磷酸根的亲合作用并促进内层络合反应形成,动态连续流运行实验中经三价铁负载的陶粒滤料在 30 d 周期内出水总磷浓度稳定低于 0.05 mg/L 体现的长期稳定运行能力,营养盐削减效率控制关键在于材料反应位点稳定性与反复再生能力及过高金属负载比例可能引发滤料表面钝化或絮体结构破坏对长期滤速与通水性能的影响。

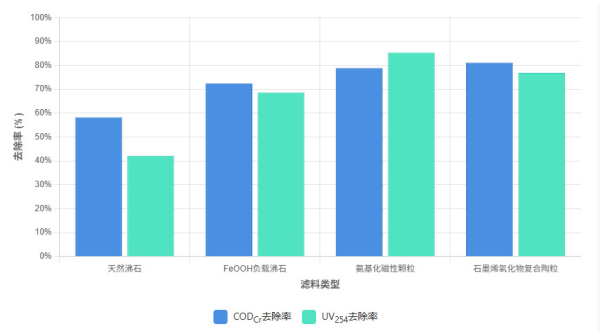


图1 不同改性滤料对溶解性有机物的 COD_{Cr} 与 $UV_{(254)}$ 去除效率对比图

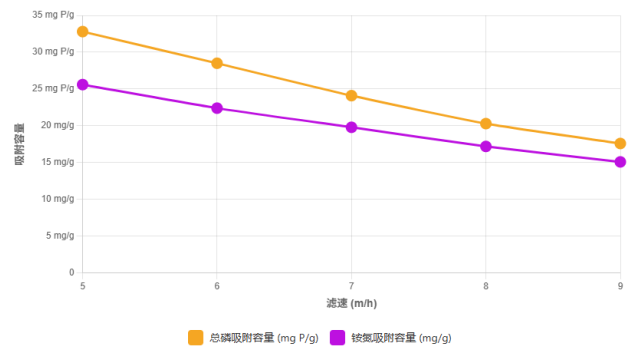


图2 改性滤料对总磷与铵氮的等温吸附容量及滤速影响关系图

3.3 对新兴微量污染物的控制能力

市政污水中含有抗生素、内分泌干扰物、表面活性剂和微塑料等新兴微量污染物,常规生物处理难以有效降解。

为此,研究重点转向开发多功能协同去除滤料,通过在滤料表面引入多种作用位点实现物理截留和化学吸附。碳基改性陶粒对双酚 A 的吸附容量为 63.2 mg/g,明显高于传统陶粒的 21.5 mg/g,且在 pH 6.0 下去除效率高达 92.7%。对于四环素类抗生素,改性滤料通过引入羧基或磺酸基团增强吸附能力,分布系数提高至 3500 L/kg。双功能负载型滤料在动态滤柱实验中对三氯生去除率超过 85%,并且连续运行 20 天后去除效率稳定。滤料孔径应集中在 10–20 nm,以平衡反应位点暴露与截留效率,部分新型滤料还结合光催化功能同步降解有机污染物^[5]。

4 工艺设计与运行实例

4.1 作为深度处理单元的工艺组合模式

新型改性滤料常作为市政污水深度处理的终端抛光单元,嵌入传统二级或三级处理系统下游,进一步削减难降解污染物。工艺组合设计注重选择性吸附与反应协同,确保出水水质稳定达标。滤池常与高效沉淀池、臭氧氧化或膜组件串联,减轻前段悬浮物负荷,保障滤料稳定运行。常见配置包括重力式下向流滤池、上向流式多级反应床及集成反应—吸附—过滤装置。上向流工艺便于反洗和更换功能材料,适用于中小型水厂。滤池结构中反应区与储能层的比值保持 1.5 : 1 至 2.0 : 1,工艺设计强调低阻损、高通量和易维护性,布水均匀性影响滤速与吸附速率。

4.2 改性滤料在工程运行中的关键性能特性

在市政污水深度处理工艺中,新型改性滤料表现出良好的水力通透性与运行稳定性,能够在较宽运行负荷范围内维持稳定的污染物削减能力。滤料多孔骨架结构有利于水流均匀分布,避免局部短流与堵塞现象发生,降低系统运行压损增长速率。表面功能化改性赋予材料较强的污染物亲和能力,使其在高负荷进水条件下仍可保持稳定吸附与反应效率。运行过程中滤料抗冲刷能力强,反冲洗后结构完整性良好,可实现多周期重复使用而不出现明显性能衰减。同时,滤料对进水水质波动具有较强缓冲适应能力,在高浓度有机物或营养盐瞬时冲击条件下仍能维持出水水质稳定,为城市

污水深度处理系统长期连续运行提供可靠保障。

4.3 工程应用案例及溢流污染治理成效

新型改性滤料已在多个市政污水深度处理与再生水利用工程中得到实际应用,并在常规深度净化与溢流污染控制场景中展现出良好效果。以某北方城市再生水厂为例,在原有生物处理与高效沉淀单元后增设改性滤料反应滤池作为终端深度处理设施,用于削减难降解有机物及营养盐残留,同时兼顾雨季溢流污染应急处理需求。当强降雨导致进水水质短时波动及污染负荷上升时,改性滤料系统可作为缓冲净化单元对高浓度有机物和氮磷组分进行快速削减,有效降低溢流排放对受纳水体的冲击风险。工程运行表明,该滤料工艺在长期连续运行条件下保持稳定水力性能与污染物去除能力,未出现明显堵塞与吸附饱和现象,维护周期长、能耗水平低,出水水质可稳定满足一级 a 排放及部分再生水回用要求。

5 结语

新型改性滤料在市政污水深度处理中展现出良好的污染物削减能力与工艺适应性,能有效提升出水水质稳定性与系统运行效率,针对不同类型污染物构建多功能复合材料体系,有助于实现高选择性吸附与协同净化,结合工程应用验证结果滤料在多种工况下均表现出较强的稳定性与可持续性,为再生水利用和水环境安全提供了高效可靠的技术支撑,具备广泛推广应用前景。

参考文献

- [1] 卢才通,周雄. 海上油田采油平台污水处理工艺研究[J]. 化工管理,2025,(03):77-79+104.
- [2] 陈永娇. 国内外石英砂滤料研究对油田含油污水处理的启示[J]. 江汉石油职工大学学报,2023,36(06):54-55+89.
- [3] 郝添翼,曲婷,王海媚,等. 曝气生物滤池滤料改进研究[J]. 应用化工,2023,52(07):2112-2116.
- [4] 许铮,王彦飞,李思敏,等. 生物砂滤池深度处理污水厂尾水的研究现状及展望[J]. 工业用水与废水,2023,54(02):10-13+58.
- [5] 吕昱,禹丽娥,刘京都,等. 基于改性滤料对微污染水的生物处理技术与探讨[J]. 环保科技,2020,26(01):50-55.