

紫外线-活性炭复合滤芯在校园直饮水系统中微生物污染控制中的应用研究

关一鸣 楚新成 蒙钊泽 郭星煊 张珈瑞 王鸿达 叶子旭
(长春建筑学院城建学院)

摘要: 本研究聚焦紫外线-活性炭复合滤芯在校园直饮水系统中对微生物污染的控制效能,系统分析了当前校园水环境中存在的微生物风险机理及传统净化手段的局限性,阐释了紫外线杀菌与活性炭吸附在微生物拦截与灭活中的协同机制。在深入剖析滤芯运行周期中杀菌效率衰减、生物膜再生、运维成本负担及水质适配难题的基础上,提出以寿命监测驱动的动态更换机制、抗生物附着涂层技术、标准化运维体系与区域化水质数据库构建为核心的系统化对策。研究旨在为校园饮水系统构建高效、稳定、低风险的终端微生物控制路径提供技术参考与决策支撑。

关键词: 紫外线活性炭复合滤芯; 校园饮水安全; 微生物污染控制; 定制化运维机制

一、校园直饮水系统中微生物污染的现实背景

校园直饮水系统作为保障学生饮水安全的重要设施,其微生物污染问题日益受到关注。尽管我国城市集中式饮用水水源水质达标率已达到 94.2%,但在供水管网和终端设备中,仍存在微生物再污染的风险。管道老化、腐蚀和结垢可能导致裂缝和破损,细菌等微生物可通过裂缝侵入管道繁殖,形成二次污染。此外,饮水设备如水龙头和饮水机等终端设施,若维护不当,也可能成为微生物滋生的温床。世界卫生组织指出,全球至少有 17 亿人使用的饮用水源受粪便污染,粪便污染导致的饮用水微生物污染对饮用水的安全构成最大威胁。在校园环境中,学生对饮水安全的认知不足,可能进一步加剧微生物污染带来的健康风险。

二、紫外线与活性炭复合技术的协同机制

紫外线与活性炭复合技术作为典型的物理-吸附联合净化手段,其协同效应体现在微生物灭活与有机载体去除的多维互补机制中。紫外线主要依赖波长为 254nm 的 UVC 辐射破坏细菌与病毒的 DNA/RNA 双链结构,通过嘧啶二聚化诱发基因突变,阻断其复制能力,瞬时达到高效灭活效果,尤其对嗜温性细菌与耐氯微生物具显著抑制作用。活性炭则凭借高比表面积与微孔结构,在液固界面上形成高度动态的分子吸附势场,可有效捕捉微生物分泌的胞外聚合物(EPS)与生物膜前体,阻断其黏附基础并降低生物膜形成的初始阈值。两者耦合构建的复合滤芯不仅实现污染物浓度的空间梯度递减,还可通过紫外照射活性炭孔道表面,提高炭体抗菌能力,进而打破传统滤材表面微生态稳态,抑制异养菌群的再生与定殖。研究表明,紫外照射可诱导活性炭释放表面羟基自由基与活性氧物种,在非接触反应区域形成氧化屏障,从而增强对内毒素与亲水性有机污染物的协同降解能力,显著延长滤芯的微生物控制寿命。该技术的机制性优势在于其物理破坏与物理吸附的双重非选择性,可在不依赖化学药剂条件下,实现微生物污染物的深度去除与系统性拦截。

三、紫外线-活性炭复合滤芯在校园场景中应用的关键问题

(一) 复合滤芯运行周期内杀菌效率衰减速率较快

紫外线-活性炭复合滤芯在校园饮水系统中的实际应用面临杀菌效率随运行周期显著衰减的技术瓶颈,其本质源于多重物理化学机制的耦合衰退效应。一方面,紫外模块中 UVC 辐射强度随灯管使用时长呈指数级衰减,特别是在石英套管表面形成无机垢层与生物膜后,其光通量会被显著削弱,导致紫外剂量低于微生物致死阈值,失去瞬时灭活功能;另一方面,活性炭在连续流动环境中易被水中有机物饱和覆盖,导致其微孔体积封堵、表面电位点钝化,从而降低对细菌代谢物与胞外聚合物的吸附能力,进而削弱对细菌黏附基质的截留效应。此外,在校园高频使用场景下,水流扰动与间歇性停滞交替作用使得

活性炭表面更易形成微生态稳定区,促发耐 UV 菌群的自组织与选择性富集,加速形成对紫外辐射具抗性或修复能力的微生物群落。工程数据表明,在连续运行 90 日后,滤芯末端出水中耐热大肠菌群检出率显著升高,杀菌效率较初始状态衰减超过 60%,表明系统微生物屏障功能已趋临界失效状态。

(二) 滤芯表面微生物再生与生物膜形成引发的二次污染

滤芯表面微生物再生与生物膜形成所引发的二次污染问题构成紫外线-活性炭复合系统中最隐蔽且最具复杂性的微生态干扰机制,其根源在于滤芯工作界面长期处于富营养、湿润与弱光照条件下,极易成为细菌黏附与聚集的理想介质。活性炭表面具备大量微孔与官能团位点,为细菌提供物理庇护与化学锚定支撑,而紫外线虽具瞬时灭活效能,却无法穿透已形成的成熟生物膜基质,导致残存微生物群体在滤芯表面实现局部再生。此类再生群体往往表现出较强的多糖分泌能力和胞外酶活性,可加速 EPS 基质扩展,最终构建出稳定、抗药性强的生物膜结构,形成“屏蔽层”效应,显著削弱紫外杀菌辐射的作用范围与强度。研究显示,滤芯运行 60 天后表面生物膜中革兰氏阴性菌群落占比上升至 80%以上,且表达出多种紫外 DNA 损伤修复通路相关基因,说明其已具备高度环境适应性与抵抗性。同时,生物膜中可吸附重金属、内毒素与抗性基因片段,在水流扰动下可能释放形成次级污染物团簇,对下游饮用系统构成潜在健康风险。

(三) 滤芯更换频次及运维成本对高校后勤系统造成负担

紫外线-活性炭复合滤芯的高频更换需求与其所引发的运维成本攀升问题,已成为制约其在校园饮水系统中可持续应用的核心障碍。由于滤芯中紫外光源存在辐射衰减与灯体老化的不可逆周期性,其有效杀菌寿命往往不超过 3000 小时;同时,活性炭材料在高通量连续运行下对有机负荷的吸附能力急剧下降,特别是在水源水质波动剧烈或富营养化背景下,滤芯有效寿命显著缩短,需频繁更换以维持终端出水质量达标。高校后勤系统在设施数量大、覆盖面广、人流密集的背景下,滤芯更换工作不仅涉及批量采购与存储物流成本,更需耗费大量人力在周期检测、滤芯拆装与运行参数校正等精细化操作环节中,极易造成设备运维效率下降与人力资源错配。调研显示,一所中型高校在部署紫外-活性炭终端净化装置后,每年仅滤芯更换及附属运维支出即占校园饮水系统总运营费用的 42%以上,显著高于传统物理过滤与单一紫外系统。

(四) 不同校区水质特性对滤芯适配性的差异化挑战

不同校区水质特性的复杂异质性对紫外线-活性炭复合滤芯的适配性构成系统性挑战,表现为水源理化指标、微生物群落结构及有机负荷组成在空间尺度上的高度变异,直接影响滤芯材料的拦截效率与寿命曲线。在南方地区地表水占比高、藻类密度大,易导致滤芯表面快速被天然有机物(NOM)覆盖,

造成活性炭微孔堵塞与紫外透射率下降;而北方地区地下水源多钙镁离子富集,硬度升高使石英管表面碳酸盐类垢膜快速形成,显著折减 UVC 辐射强度并诱导滤芯内局部微生物耐光适应性增强。部分校区供水中余氯浓度波动频繁,易与活性炭发生表面氧化反应,降低其吸附性能并引发界面电荷极性反转,改变滤芯对细菌细胞壁表面作用力,导致截留效率非线性波动。此外,水温、pH 值、电导率等指标的联动变化还可能通过影响微生物应激响应机制与吸附平衡常数,改变滤芯运行环境中的微生态稳定性,诱发特定条件下的反向渗透或二次污染释放行为。

四、紫外线-活性炭复合滤芯在校园饮水系统应用对策

(一) 基于滤芯寿命监测模型构建动态更换机制提升杀菌效率

构建基于滤芯寿命监测模型的动态更换机制,是提升紫外线-活性炭复合滤芯杀菌效率的关键路径,其本质在于由静态周期性更换模式转向以运行状态感知与性能衰减预测为基础的精准干预策略。滤芯寿命不仅取决于时间维度的使用周期,更受到 UVC 辐照强度衰减曲线、有机物负荷吸附饱和度、微生物群落富集态势等多源异质因子的耦合影响,因此亟需引入多参数融合的预测性寿命评估模型。该模型应整合传感器采集的出水浊度、菌落总数、紫外透过率(UVT)与活性炭吸附滞后响应等动态指标,结合数据驱动的劣化速度函数与临界阈值判定逻辑,实现对滤芯杀菌能力的实时量化与退化趋势建模。同时,可引入机器学习算法对不同水质场景下的滤芯响应模式进行多维特征拟合,构建适配性更强的寿命预测网络,实现按需更换与预警维护的智能化转型。在实际应用中,该机制可与饮水设备物联网平台对接,形成滤芯性能数字孪生体,确保滤芯更换操作在杀菌效能临界点前精准触发,避免杀菌失效区间的隐性风险暴露,显著提高系统运行的微生物安全边界与资源调配效率。

(二) 通过滤芯抗生物附着涂层技术降低生物膜形成风险

通过在紫外线-活性炭复合滤芯表面引入抗生物附着涂层技术,可有效打破生物膜形成的初始黏附阶段与群体感应反馈回路,从材料表征层面切断微生物定植基础,进而实现微生物再生阻断的前置化控制。该类涂层通常基于氟硅聚合物、自组装单分子层(SAMs)、石墨烯衍生物或抗菌金属氧化物构建,通过调控滤芯表面自由能、电荷密度与粗糙度参数,在纳米尺度形成微弱排斥势垒,使细菌细胞壁与材料表面接触时间缩短、接触面积减小,从而降低细胞外聚合物(EPS)在表面的锚定概率。部分高性能涂层同时具备释放型与接触杀菌双重机制,例如银掺杂 TiO₂ 或 ZnO 涂层可在紫外激发下持续释放 ROS(活性氧种)及金属离子,直接破坏附着微生物的膜结构与代谢途径,抑制其群体感应基因表达,阻断生物膜成熟过程。在动态水环境中,该类功能涂层亦表现出优异的耐流蚀性能与抗污染稳定性,显著延缓滤芯表面生态系统的构建周期。工程验证表明,经抗生物附着涂层处理的滤芯,其生物膜形成时间延后约 48% 以上,菌落密度峰值降低超过 1.5 log 单位,有效延长滤芯微生物控制寿命并降低二次污染风险,为校园饮水系统构建长效稳定的终端微生物屏障提供材料层级的技术支撑。

(三) 建立标准化运维流程与成本分摊机制提升运行经济性

建立标准化运维流程与成本分摊机制,是提升紫外线-活性炭复合滤芯在校园饮水系统中运行经济性的制度性支点,其关键在于构建以性能衰减阈值为核心、以运维行为流程化为路径、以资源统筹配置为导向的系统化管理架构。传统后勤模式多依赖经验驱动与人工巡检,导致滤芯维护节奏与实际退化进程存在显著时差,引发过保运行与资源浪费并存的低效状态。应在设备运行初期即嵌入数字化运维节点,统一滤芯更换判断依据,

包括紫外照度衰减曲线、出水菌落数、单位流量压差增长率等量化指标,建立响应流程清单与运维节点任务标准,并引入模块化记录平台实现全过程追溯与任务责任清晰化。在此基础上,应构建校级、院级与使用单位三级成本分摊模型,依据实际使用频率、设备部署密度与水质波动强度等多因子数据,形成动态预算分配体系,避免滤芯更换费用集中于某一级财务体系导致的资源瓶颈。同时,可引入合同能源管理(EMC)或运维外包机制,通过与专业水务运营方签订基于性能结果的服务协议,将技术风险与成本压力转化为市场激励机制,从而形成降本增效的良性反馈回路。

(四) 构建区域化水质数据库实现滤芯参数的定制化匹配优化

构建区域化水质数据库以实现滤芯参数的定制化匹配优化,是应对校园饮水系统中水质异质性挑战的基础性工程举措,其核心在于通过系统化水质信息采集、动态归档与结构化建模,为滤芯材料选型、结构设计与运行策略提供数据驱动的精确支撑。在高校分布高度分散、水源类型多样的现实条件下,水质参数如溶解性有机碳(DOC)、浊度、电导率、微生物总量及残余消毒剂浓度存在显著区域差异,直接影响活性炭的吸附效率、紫外穿透深度及微生物灭活动力学曲线。通过建设包含时间序列、空间标签与指标关联的水质数据库,可实现对各校区水质演变趋势的纵向分析与横向比对,进而为滤芯模块提供以目标污染物优先级、光衰敏感性与孔隙结构响应特性为导向的定制化设计依据。数据库应融合在线监测系统与定期人工采样数据,通过边缘计算与大数据分析技术构建水质变异预测模型,联动材料供应链与设备生产环节,推动滤芯从单一规格向差异化适配模式转变,实现材料利用效率最大化与更换周期的精确规划。

参考文献:

- [1]魏乐成.炭基生物渗滤系统强化抗生素与抗性基因污染控制机理研究[D].浙江大学,2024.
- [2]王青云.活性炭活化过氧化物控制超滤膜有机污染效能与机制[D].西安建筑科技大学,2024.
- [3]谭炜宇.原位高级氧化技术用于外置式膜生物反应器的膜污染控制研究[D].汕头大学,2022.

作者信息:

1. 关一鸣(2005.2——),男,汉族,籍贯:山东泰安
学校:长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读

研究方向:给排水科学与工程

2. 楚新成(2006.1——),男,汉族,籍贯:吉林和龙
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程

3. 蒙钊泽(2004.11——),男,汉族,籍贯:天津武清
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程

4. 郭星焕(2005.6——),男,朝鲜族,籍贯:吉林龙井
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程

5. 张珈瑞(2004.1——)男 汉族 籍贯:甘肃天水
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程

6. 王鸿达(2005.1——),男,汉族,籍贯:吉林辽源
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程

7. 叶子旭(2005.5——),男,汉族,籍贯:吉林长春
长春建筑学院城建学院给排水科学与工程 23 级本科在读
研究方向:给排水科学与工程