

叶晨阳, 王涛. 聚氨酯海绵悬浮过滤工艺对溢流污水处理协同调控的本征特性与运行参数[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 160-170, 180.

Ye C Y, Wang T. Intrinsic properties and operational parameters of polyurethane sponge suspended filtration process for coordinated control of overflow wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 160-170, 180.

## 聚氨酯海绵悬浮过滤工艺对溢流污水处理协同调控的本征特性与运行参数

叶晨阳, 王涛\*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要** 【目的】合流制溢流(CSO)是导致城市水体水质恶化的主要诱因之一。悬浮过滤工艺作为应对CSO的有效手段,其核心效能受滤料本征特性与工艺参数的协同调控机制尚未明晰。【方法】文章采用聚氨酯海绵滤料,考察了海绵的亲疏水性、密度、开孔比、几何尺寸以及滤速、填充高度和滤床清洗方式对过滤性能的影响,并评估了该系统在颗粒物浓度梯度进水下的处理表现。【结果】开孔比是影响过滤性能的关键,开孔比为50的海绵展现出最优综合性能,其对悬浮物(SS)平均去除率为62.2%,过滤2 h后水头损失为20 mm。亲水性海绵的溶胀效应显著提升了流动阻力,水头损失较疏水海绵高8.3倍。较小的尺寸(10 mm)相对大尺寸(20 mm)海绵对SS去除率可提高16.1%。在滤速为30~60 m/h,初始水头损失与滤速呈正相关( $r=0.33, p<0.001$ ),但SS去除率相对稳定。SS截留率随填充高度增加而显著提高( $r=0.36, p\leq 0.001$ )。反冲洗在首轮清洗周期可使初始水头损失恢复率达100%,显著优于直接排水方式(79.2%)。进水SS质量浓度在100~300 mg/L时,系统对SS、化学需氧量、总磷、总氮的去除率分别为46.8%~53.2%、22.1%~42.9%、12.2%~30.4%、38.9%~47.9%。【结论】文章为悬浮过滤工艺提供了滤料特性和运行参数调控策略,对实现高效、低能耗的溢流污水SS去除技术有重要的理论和工程价值。

**关键词** 合流制溢流污染控制 聚氨酯海绵 悬浮过滤 开孔比 滤速 水头损失

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0160-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.017

## Intrinsic Properties and Operational Parameters of Polyurethane Sponge Suspended Filtration Process for Coordinated Control of Overflow Wastewater Treatment

Ye Chenyang, Wang Tao\*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** [Objective] Combined sewer overflow (CSO) is one of the primary causes of urban water quality deterioration. While suspended filtration process serves as an effective approach for CSO control, the synergistic regulation mechanisms between intrinsic filter media characteristics and operational parameters on its core performance remain unclear. [Methods] This paper introduced polyurethane sponge media to systematically investigate the effects of hydrophilicity/hydrophobicity, density, porosity, geometric dimensions, filtration rate, bed height and cleaning method on filtration performance, with particular emphasis on system behavior under gradient particle concentration loading. [Results] Porosity was a critical parameter affecting filtration performance. 50 pores per inch sponge exhibited the optimal overall performance, achieving an average suspended solids removal rate of 62.2% with a head loss of 20 mm after 2 hours of filtration. Hydrophilic sponges showed significantly elevated flow resistance due to swelling effects, demonstrating 8.3 times greater head loss than their hydrophobic counterparts. Smaller sponge (10 mm) improved suspended solid(SS) removal by 16.1% compared to larger counterparts (20 mm). Within the filtration rate range of 30-60 m/h, initial head loss was

[收稿日期] 2025-04-23

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3200700)

[作者简介] 叶晨阳(1999—),男,硕士研究生,研究方向为溢流污染治理,E-mail:2232781@tongji.edu.cn。

[通信作者] 王涛(1996—),男,博士研究生,研究方向为溢流污染治理,E-mail:twang@tongji.edu.cn。

positively correlated with filtration rate ( $r = 0.33, p < 0.001$ ), while SS removal remained relatively stable. SS removal efficiency increased significantly with bed height ( $r = 0.36, p \leq 0.001$ ). Backwashing achieved a 100% recovery rate of initial head loss in the first cleaning cycle, significantly outperforming direct drainage (79.2%). When influent SS mass concentration ranged between 100–300 mg/L, the system achieved removal rates of 46.8%–53.2% for SS, 22.1%–42.9% for chemical oxygen demand, 12.2%–30.4% for total phosphorus, and 38.9%–47.9% for total nitrogen. [ **Conclusion** ] This paper provides insights into the regulation strategies for filter media properties and operational parameters in suspended filtration process, offering important theoretical and engineering value for the development of efficient, low-energy-consuming technologies for SS removal in overflow wastewater.

**Keywords** combined sewer overflow control polyurethane sponge suspended filtration pores per inch filtration rate head loss

随着我国城市化进程的加快,城镇管网设施逐步完善,点源污染得到基本控制,但是以合流制溢流污染为代表的城市面源污染对水环境的影响仍旧不容忽视<sup>[1]</sup>。溢流污水携带大量悬浮物(SS)、有机物、氮磷营养盐、重金属及病原体微生物,构成污染物迁移至城市受纳水体的关键传输途径<sup>[2-3]</sup>。

研究<sup>[4-5]</sup>表明,溢流污水中的SS与浑浊度、化学需氧量(COD)、总磷(TP)及重金属含量之间呈良好相关性。因此,如何高效去除SS是控制溢流污染的关键。基于固液分离原理,混凝沉淀、旋流分离和悬浮过滤是目前应用最为广泛的溢流污染控制技术。混凝沉淀通过化学药剂促使颗粒物絮凝沉降,对COD和TP的去除率在50%~80%,对SS的去除率高达70%~90%,但存在占地面积大、需持续药剂投加、运行成本高等不足<sup>[6-7]</sup>。旋流分离技术依托离心力场实现快速固液分离,但对粒径 $< 20 \mu\text{m}$ 的颗粒物去除率下降至35%,且对溶解态污染物基本无效<sup>[8-9]</sup>。悬浮过滤工艺采用纤维或海绵等轻质多孔滤料,在滤速为40 m/h条件下,浑浊度去除率可达74.8%~85.1%,具有处理效率高、能耗低、占地面积小等优势<sup>[10-11]</sup>。

悬浮过滤工艺现有研究聚焦于运行参数的影响,而忽视了滤料本征特性对污染去除和水头损失耦合关系<sup>[12-14]</sup>。聚氨酯海绵具有可控的孔径结构(开孔比为10~100)、高孔隙率和低密度特性,在相同水头损失下,滤速相比传统过滤介质(如石英砂)提高了约40%,在水处理领域得到广泛应用<sup>[15-16]</sup>。然而,海绵滤料的表面特性、孔结构参数和几何尺寸对其截留性能与水头损失增长率的耦合作用机制尚未完全阐明。

因此,本研究基于聚氨酯海绵悬浮过滤系统,重点分析海绵特性与运行参数对污染物去除率和水头损失的影响,并考察悬浮过滤在不同进水浓度下的

处理效能变化,优化系统运行性能。文章旨在为悬浮过滤工艺在工程中的滤料选型和参数优化提供指导意见,促进悬浮过滤工艺在溢流污染治理中的高效应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与材料

悬浮过滤试验装置系统(图1)组成:进水箱(容量为400 L)、搅拌机(转速为200 r/min)、蠕动泵(流量为137 L/h,可调)、流量计(精度为1 L/h)、有机玻璃滤柱、出水箱和测压板。滤柱有效高度为2 000 mm,内径为50 mm,滤床最大填充高度为1 500 mm。滤柱上部出水口下方安装圆形开孔板(孔径为5 mm)以防止悬浮滤料逃逸,滤柱底部设置带有拦网的排泥口以排出过滤柱内水和污泥并拦截滤料。进水箱配有搅拌机,防止SS沉淀和保证进水水质均匀。带刻度测压板用于记录滤柱的水头损失。

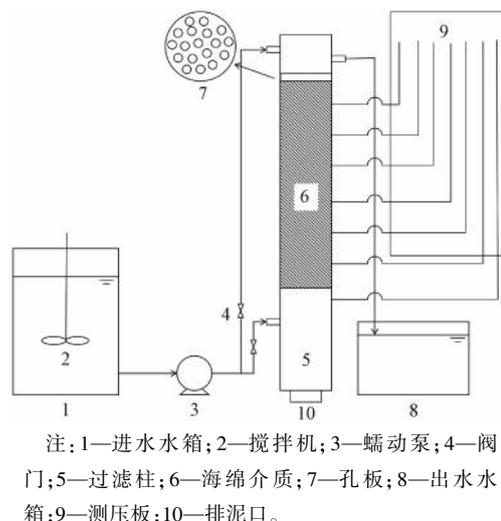


图1 过滤装置

Fig. 1 Filtration Device

本文选用市售聚氨酯海绵(源胜兴电子材料厂

家,过滤海绵产品系列),经超纯水超声清洗 30 min 后使用,其关键特征参数如表 1 所示。

表 1 聚氨酯海绵的关键特征参数

Tab. 1 Key Parameters of Polyurethane Sponge

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	开孔比	几何尺寸/mm	亲疏水性
20	30	10	亲水
22	30	10	疏水
24	30	10	疏水
30	30	10	疏水
45	30	10	疏水
24	20	10	疏水
24	40	10	疏水
24	50	10	疏水
24	60	10	疏水
24	50	15	疏水
24	50	20	疏水

## 1.2 模拟污水配制及水质特性

基于溢流污水颗粒组成和粒径分布,模拟溢流污水参考文献<sup>[17-18]</sup>方法配制。具体而言,采用污水处理厂初沉污泥(湿泥),经 20 目筛预处理后,用自来水稀释至 SS 质量浓度为  $(200 \pm 10) \text{ mg/L}$ 。

## 1.3 试验设计与运行控制

基于典型降雨事件的污染物冲刷曲线分析<sup>[19]</sup>,本研究确定 120 min 的过滤周期,以模拟溢流污染快速控制的场景需求。运行过程中每 15 min 同步采集进出水瞬时样。

研究内容主要分为 2 个部分。第一部分选取不同本征特性(亲疏水、密度为  $20 \sim 45 \text{ kg/m}^3$ 、开孔比为  $20 \sim 60$  和几何尺寸为  $10 \sim 20 \text{ mm}$ )的海绵进行过滤试验,确定滤料特性对悬浮过滤的影响。第二部分选取不同的运行参数,依次研究滤速( $30 \sim 60 \text{ m/h}$ )、

填充高度( $0.50 \sim 1.50 \text{ m}$ )、滤床清洗方式(直接排水和反冲洗)和进水 SS 质量浓度( $100 \sim 500 \text{ mg/L}$ )对悬浮过滤的影响。

滤床清洗采用以下 2 种方案:方案一为直接排水法,即过滤结束后开启滤柱底部排泥口阀门,静置排水 1~2 min,通过重力作用排出滤柱内液体及截留 SS;方案二为反冲洗法,在排水的基础上施加  $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的反冲洗水流自上而下冲洗滤床,历时达 3~4 min。

过滤性能评价体系包含采样污染物去除率、水头损失和滤床压缩比 3 个指标。水头损失通过测压板与出水液位差测得,污染物去除率和滤床压缩比的计算如式(1)~式(2)。

$$R_t = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{h_0 - h_t}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $R_t$ —— $t$ 时刻的污染物去除率;

$C_0$ ——进水平均污染物质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;

$C_t$ —— $t$ 时刻出水污染物质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;

$\varepsilon_t$ —— $t$ 时刻的滤床压缩比;

$h_0$ ——初始滤床高度,  $\text{m}$ ;

$h_t$ —— $t$ 时刻的滤床高度,  $\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 海绵本征特性的影响

#### 2.1.1 亲疏水性

通过对比试验研究了开孔比为 40 的亲水和疏水聚氨酯海绵在滤速为  $50 \text{ m/h}$ 、填充高度为  $1.00 \text{ m}$  工况下的过滤性能差异,结果如图 2 所示。

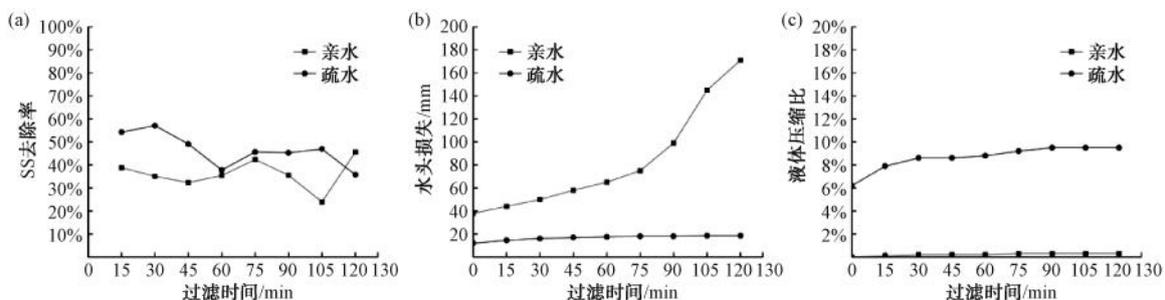


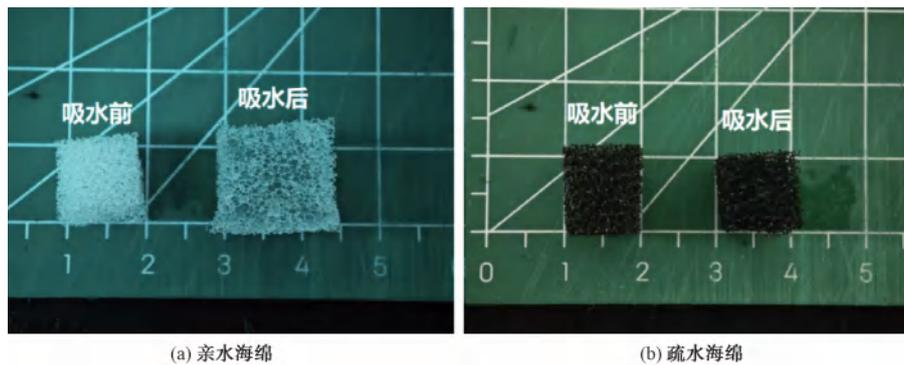
图 2 不同亲疏水性海绵的 SS 去除率、水头损失和滤床压缩比变化

Fig. 2 Variation of SS Removal Rates, Head Losses, and Filter Bed Compression Ratios of Sponges with Different Hydrophilic/Hydrophobic Properties

结果显示,在2 h的过滤周期内,疏水海绵对SS的平均去除率(48.6%)高出亲水海绵(35.3%) 13.3% [图2(a)]。亲水海绵水头损失达171.3 mm,较疏水海绵(18.5 mm)提升8.3倍[图2(b)],水头损失增速较疏水性高1.5~15.7倍。值得注意的是,疏水海绵过滤过程中出现明显滤床压缩现象,最大压缩比为9.5%,而亲水海绵滤床基本保持稳定[图2(c)]。

这种性能的差异主要源于材料特性的不同。随着压缩比的增加,海绵对SS的去除率会相应提

高<sup>[20]</sup>。疏水海绵在过滤过程中表现出的明显压缩特性有助于提升截留效率。相比之下,亲水海绵由于其良好的吸水性,在过滤过程中会发生吸水膨胀现象,内部孔径增大,从而降低了对SS的筛分效率<sup>[21]</sup>。对比观察发现,亲水海绵吸水后体积膨胀,孔径增大,而疏水海绵的体积和孔径在吸水前后基本保持不变(图3)。亲水海绵的吸水膨胀力与水流向上的压缩力相互抵消。因此,宏观上表现出滤床高度保持稳定的现象。



注:图中数值单位为cm。

图3 亲水海绵和疏水海绵吸水前和吸水后对比

Fig. 3 Comparison of Hydrophilic and Hydrophobic Sponges before and after Water Absorption

此外,亲水海绵表面易被水湿润的特性也会影响过滤性能。水分子与海绵骨架之间形成较强的氢键或极性相互作用,导致孔隙内有效流动路径变窄,增加了黏滞阻力,这是造成水头损失较大的主要原因<sup>[22]</sup>。值得注意的是,亲水海绵表面更易促进SS沉积形成致密泥饼,加剧了孔隙堵塞风险<sup>[23]</sup>。而疏水海绵表面排斥水分子,滤料表面形成的泥饼较为松散,水流可以更顺畅地通过孔隙,流动阻力相对较低<sup>[24]</sup>。考虑到本研究基于50 m/h的高速过滤条件,亲水海绵因显著的水头损失导致能耗较高,且泥饼的持续积累会使其运行能耗进一步升高,而疏水海绵的表面特性能有效抑制泥饼的致密化进程。

针对溢流污染瞬时负荷大的特点,滤料选型应侧重抗堵塞与动态截留性能。在高速过滤时,疏水海绵的低水头损失和动态压缩特性可有效应对SS冲击负荷,其疏水表面形成的松散泥饼更易被高速水流剥离,降低堵塞风险。因而,在工程应用中建议采用疏水海绵,兼顾瞬时截留与长期稳定性。

### 2.1.2 密度

海绵的密度是影响海绵压缩性能的关键参数,关系到过滤过程中的海绵抗压性和孔隙结构的稳定性<sup>[25]</sup>。为系统分析海绵密度对过滤性能的影响,本研究选用了密度分别为22、24、30、45 kg/m<sup>3</sup>的4种疏水聚氨酯海绵进行过滤试验,结果如图4所示。

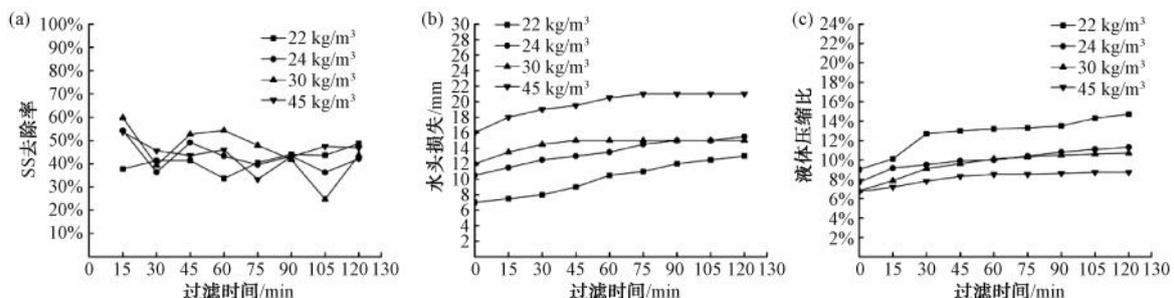


图4 不同密度海绵的SS去除率、水头损失和滤床压缩比变化

Fig. 4 Variation of SS Removal Rates, Head Losses, and Filter Bed Compression Ratios of Sponges with Different Densities

在密度为  $22 \sim 45 \text{ kg/m}^3$ , SS 去除率未呈现显著变化趋势[图 4(a)]. 密度为  $22, 24, 30, 45 \text{ kg/m}^3$  的海绵对 SS 平均去除率分别为  $41.36\%$ 、 $43.03\%$ 、 $42.53\%$ 、 $44.94\%$ 。这可能与海绵的孔隙结构特征及过滤时滤床结构的动态变化有关。海绵密度的差异源于材料骨架厚度或聚合物交联密度的不同,海绵密度越大骨架纤维越厚,孔径越小,对 SS 机械截留的效果越好<sup>[26-27]</sup>。但是实际过滤过程中低密度海绵在水流作用下产生的压缩变形补偿了其初始孔径大的不足。具体表现为低密度海绵( $22 \sim 24 \text{ kg/m}^3$ )自重较轻,在上向流过滤过程中更容易被水流托起,导致滤床被压缩[图 4(c)]. 这种压缩反而可能提高了实际过滤效率。

在水头损失方面,不同密度海绵表现出明显差异。高密度( $45 \text{ kg/m}^3$ )海绵较低密度( $22 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ )海绵水头损失增加  $10\% \sim 15\%$ 。低密度海绵初始孔径较大,展现出较低的水头损失,但随着过滤进行,滤床压缩导致水头损失快速增长。相比之下,高密度( $45 \text{ kg/m}^3$ )海绵虽然初始水头损失较高,但由于其抗压缩性强,水头损失随时间增长较为平缓[图 4(b)]<sup>[28]</sup>。本研究结果表明,在密度为  $22 \sim 45 \text{ kg/m}^3$ , 密度变化对 SS 去除率的影响有限,

但对过滤系统的能耗特性(水头损失)具有显著调控作用。

基于上述研究结果,本研究建议在实际工程应用中优先选用密度为  $24 \sim 30 \text{ kg/m}^3$  的聚氨酯海绵滤料,该密度区间在维持稳定 SS 去除率的同时,可有效平衡系统能耗特性。

### 2.1.3 开孔比

开孔比作为海绵孔隙结构的关键参数<sup>[29]</sup>,直接影响海绵过滤器的分离效率和水力学特性。本研究在滤速为  $50 \text{ m/h}$  和填充高度为  $1.00 \text{ m}$  下,考察了开孔比为  $20 \sim 60$  聚氨酯海绵(图 5)的过滤性能变化规律,结果如图 6 所示。

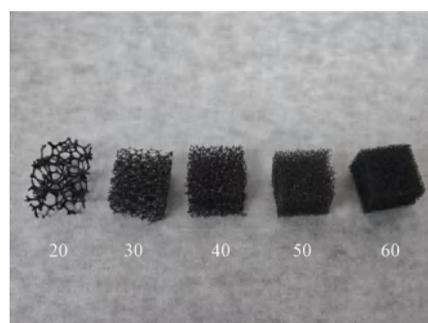


图 5 不同开孔比的聚氨酯海绵

Fig. 5 Polyurethane Sponge with Different Pores per Inch

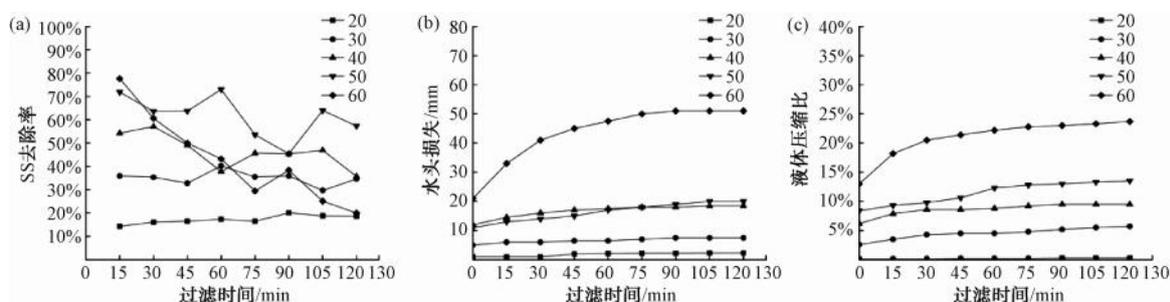


图 6 不同开孔比海绵的 SS 去除率、水头损失和滤床压缩比变化

Fig. 6 Variation of SS Removal Rates, Head Losses and Filter Bed Compression Ratios of Sponges with Different Pores per Inch

在过滤阶段的前  $15 \text{ min}$ , SS 去除率与开孔比呈正相关,当开孔比从  $20$  增至  $60$  时, SS 去除率从  $14.3\%$  逐渐升高至  $77.6\%$ 。但是值得注意的是,随着过滤时间的增加,海绵的开孔比与过滤性能存在明显的阈值效应。开孔比为  $60$  海绵表现出明显的性能衰减特征,运行  $120 \text{ min}$  后 SS 去除率较前  $15 \text{ min}$  时下降  $57.6\%$ [图 6(a)]。初始 SS 去除率随开孔比增大而升高,主要归因于高开孔比的海绵有着更小的孔径和更高的孔隙密度,机械筛分的能力更强<sup>[30]</sup>。但过小的孔径导致 SS 快速在孔隙内部

聚集,形成致密滤饼层。这种内部堵塞现象在滤床压缩[图 6(c)]的协同作用下进一步加剧,迫使水流通过海绵块间的大孔道,产生显著的“短流”效应,最终导致去除效率的下降<sup>[11]</sup>。

在水头损失方面,不同开孔比海绵表现出明显差异。开孔比为  $60$  海绵孔径较小,不仅初始水头损失较高,而且在运行过程中堵塞导致水头损失快速上升[图 6(b)]。相比之下,开孔比为  $50$  海绵展现出较好的过滤性能,其在保持稳定 SS 去除率(平均去除率为  $62.2\%$ )的同时,水头损失维持在较低水

平 (<20 mm)。

实际工程中滤料选型建议优先选用开孔比为 50 的海绵作为平衡选择。该规格在保持较高初始 SS 去除率的同时,具有较低且稳定的水头损失,能有效应对冲击负荷并避免快速堵塞。

### 2.1.4 几何尺寸

滤料的尺寸作为多孔介质过滤器的重要结构参

数,直接影响滤料的堆积特性和水流在滤床内的流动特性<sup>[31]</sup>。本研究在滤速为 50 m/h 和填充高度为 1.00 m 下对比了 10、15 mm 和 20 mm 3 种不同尺寸的海绵立方体滤料的过滤性能,结果如图 7 所示。

滤料几何尺寸从 20 mm 减小至 10 mm,SS 平均去除率从 30.8% 提升至 46.9%。这一现象主要是由于小尺寸的海绵堆积更紧密,有效减少了滤床中

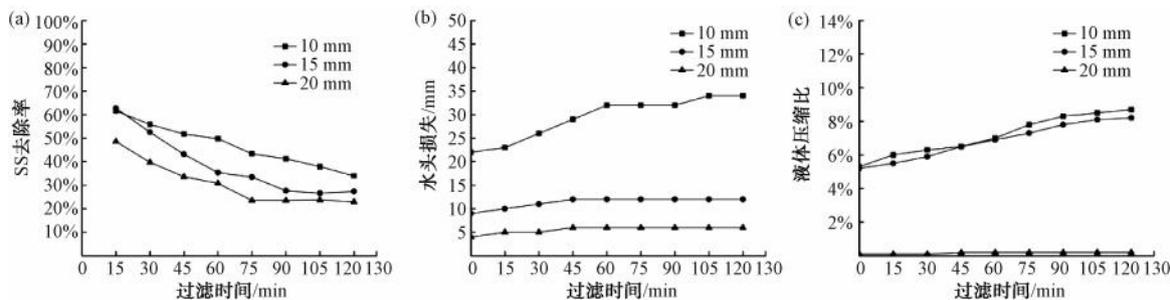


图 7 不同几何尺寸海绵的 SS 去除率、水头损失及滤床压缩比变化

Fig. 7 Variation of SS Removal Rates, Head Losses and Filter Bed Compression Ratios of Sponges with Different Geometric Dimensions

大孔隙通道,使水流分布更加均匀,从而降低了 SS 穿透的概率。此外,尺寸减小带来的比表面积增大,为 SS 提供了更丰富附着位点,增强了表面吸附和深层截留能力。

海绵的几何尺寸与水力学性能表现出明显的权衡效应。10 mm 海绵的初始水头损失较 20 mm 高出 4 倍,且随运行时间增长更为显著[图 7(b)]。这是由于小尺寸的海绵块间接触面增多,水流通过时的局部阻力上升<sup>[31]</sup>。并且随着 SS 在海绵块间缝隙处富集,容易形成局部滤饼层,导致水头损失

升高。

综合去除效率和水力学性能,本研究建议在实际应用中采用几何尺寸为 10~15 mm 的海绵滤料。

## 2.2 运行条件的影响

### 2.2.1 滤速

滤速是决定悬浮滤料过滤系统性能的关键运行参数<sup>[32]</sup>。为研究其影响机制,本研究采用开孔比为 50 的聚氨酯海绵作为过滤介质(填充高度为 1.00 m),系统考察了 30、40、50、60 m/h 4 个梯度滤速下的过滤性能变化规律,结果如图 8 所示。

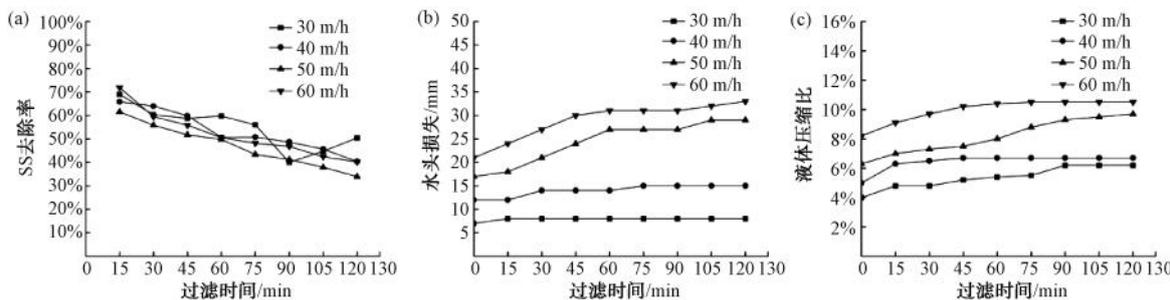


图 8 不同滤速下 SS 去除率、水头损失及滤床压缩比变化

Fig. 8 Variation of SS Removal Rates, Head Losses and Filter Bed Compression Ratios at Different Filtration Velocities

试验结果表明,在滤速为 30~60 m/h,SS 去除率保持相对稳定(波动<6%)[图 8(a)]。这一现象反映了滤速变化对过滤过程的双重作用机制:较高的滤速(50~60 m/h)产生的水力剪切作用可能促使

已截留的 SS 脱落,但同时增强了滤床的压缩效应<sup>[33-34]</sup>,60 m/h 时滤床最大压缩比达 10.5% [图 8(c)],有效改善了滤料的实际截留能力。这 2 种相反效应的动态平衡使得海绵的 SS 去除率在高

滤速下可以维持在较稳定的水平。

在水头损失上,滤速的影响则更为显著。随着滤速从 30 m/h 增至 60 m/h,初始水头损失呈现近线性的增长趋势(滤速每提升 10 m/h,水头损失增加 25%~30%),而长期运行中水头损失增长模式随滤速则有所区别,具体表现为在高滤速(50~60 m/h)下,过滤 2 h 后水头损失快速上升,在中等滤速(30~40 m/h)下,水头损失增长较为平缓[图 8(b)]。这主要归因于高速水流加速了 SS 向滤床深处的迁移和沉积,并且滤床压缩导致有效孔隙率降低,SS 在压缩区域累积导致局部阻力升高<sup>[35]</sup>。

在实际应用中,滤速的选择需兼顾处理能力和

运行稳定性。针对溢流污染瞬时流量大的特点,建议采用 40~50 m/h 的滤速,既能快速处理高峰流量,又能维持较高的 SS 去除率(波动<6%)。但滤速不宜超过 50 m/h,否则会导致水头损失急剧上升(60 m/h 时达 21 mm)和滤床过度压缩(>10%),增加反冲洗频率。这一范围既能利用滤床压缩效应提升截留能力,又可避免运行能耗的显著增加。

### 2.2.2 滤料的填充高度

滤料填充高度作为悬浮过滤系统的重要设计参数直接影响过滤接触时间和滤床结构特性。本研究通过设置 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 m 5 个梯度的填充高度,50 m/h 的滤速,系统考察了其对过滤性能的影响,结果如图 9 所示。

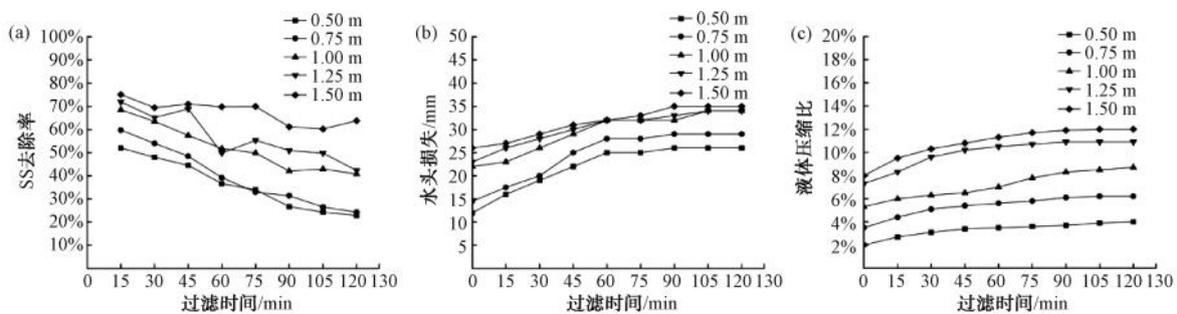


图 9 不同填充高度下 SS 去除率、水头损失和滤床压缩比变化

Fig. 9 Variation of SS Removal Rates, Head Losses and Filter Bed Compression Ratios at Different Bed Heights

试验结果显示,SS 去除率随滤料填充高度的增加呈现非线性增长的趋势[图 9(a)]。值得注意的是,在填充高度为 0.75~1.00 m 和 1.25~1.50 m 时,SS 去除率出现较为明显的提升(分别为 12.5% 和 10.8%)。这表明存在一个临界填充高度,超过该值后滤床的深层过滤效应开始显著增强<sup>[36]</sup>。当填充高度低于 0.75 m 时,滤料总量不足导致有效过滤路径段和 SS 截留容量有限,SS 去除率随过滤时间快速下降[图 9(a)]。

在水头损失方面,填充高度的影响呈现低水平时(0.50~0.75 m)的水头损失显著低于高水平(1.00~1.50 m),高填充高度组内部差异相对较小[图 9(b)]。这种变化规律与滤床压缩行为密切相关,填充高度越大,滤床整体压缩比越高(1.50 m 时最大压缩比为 12%),但单位高度的压缩梯度反而降低。

综合过滤效率、运行稳定性和经济性考量,本研究建议在实际应用中采用 1.00~1.25 m 的优化填充高度。这一区间既能保证较好的 SS 去除效果,又

能避免过高填充带来的成本增加和能耗上升。对于重力流处理系统,该高度设计可充分利用 1.50~2.00 m 的常规水位差实现无动力运行;当可利用水位差不足时,建议采用模块化下沉式设计,将过滤单元置于地下 1.50 m 处,通过空间换高程的方式减少能耗。

### 2.2.3 滤床清洗方式

滤床再生效率是决定悬浮过滤系统长期运行性能的关键因素。本试验设计了 2 种滤床清洗方式:直接排水法,仅通过重力排空装置内残余污水和松散沉积物;反冲洗法则采用 14 L/(m<sup>2</sup>·s)的反冲洗强度对滤床进行 3~4 min 的清洗。试验采用开孔比为 50 的聚氨酯海绵作为滤料,滤料填充高度为 1.00 m,在 50 m/h 的滤速下进行过滤。每次经过 2 h 过滤后,分别用上述 2 种方式清洗滤床,进行 4 次连续的过滤-清洗循环试验,结果如图 10 所示。

结果表明,直接排水法在首轮过滤清洗循环中表现出较好的恢复效果,SS 去除率和水头损失分别恢复至初始值的 96.0% 和 79.2%,然而,随着循环

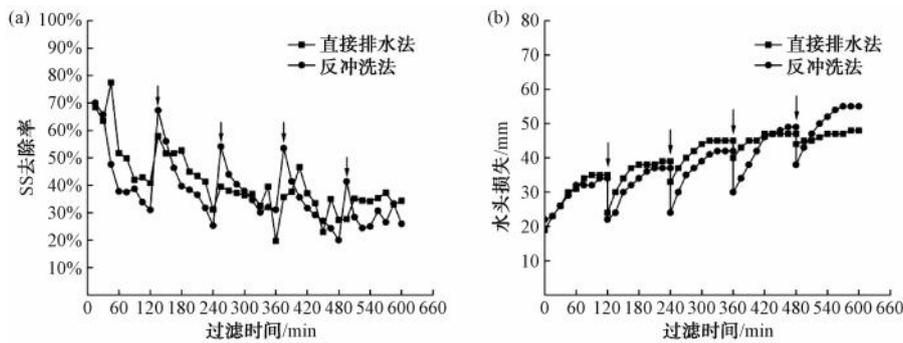


图 10 不同清洗方式下 SS 去除率与水头损失变化

Fig. 10 Variation of SS Removal Rates and Head Losses under Different Cleaning Methods

次数增加,其恢复效能呈现显著衰减趋势[图 10(a)]。这主要是在间歇进水期间,悬浮滤料起落过程中泥饼未能有效剥离,反而在滤料间隙重新分布形成不均匀的二次沉积,导致了滤床内部水力通道逐渐堵塞<sup>[37]</sup>。相比之下,反冲洗法则展现出较好的持续恢复能力。在第 2 次、第 3 次试验中,SS 平均去除率分别为 42.6%、38.0% (分别达到首轮 SS 平均去除率的 94.2% 和 83.9%),这得益于反冲洗过程产生的剪切力使泥饼破碎,随水流排出系统。但在后续的过滤反冲洗循环中,残余泥饼絮体会在滤料表面优先沉积,形成更致密的泥饼层,SS 去除率随过滤时间逐渐降低,水头损失快速升高<sup>[38]</sup>。

从工程应用角度看,这 2 种清洗方式各具优势。直接排水法操作简单、无需额外能耗,适用于短历时、低强度的溢流事件处理,能够实现滤床性能的快速恢复。而反冲洗虽然需要额外消耗的水(反洗水耗为 3%~5% 处理水量)和能量(能耗为 0.05~0.08 kW·h/m<sup>3</sup>),但在应对长历时、高强度的溢流污染时,通过优化反冲洗频率(建议每 1~2 个过滤周期反冲洗 1 次,每次持续 3~5 min)可恢复滤床过滤性能 90% 以上,能有效维持海绵滤料的长期使用性能。

### 2.3 海绵本征特性和运行条件对过滤性能的影响分析

为系统评估聚氨酯海绵的本征特性(亲疏水性,密度,开孔比和几何尺寸)和运行条件(滤速和填充高度)对过滤性能(SS 去除率和水头损失)的影响。通过单因素方差分析和 Spearman 相关性分析量化进行量化评估,结果如表 2、表 3 及图 11 所示。

单因素方差分析表明,开孔比( $F = 20.18, p <$

表 2 本征特性和运行条件对 SS 去除率影响的单因素方差分析结果

Tab. 2 Results of Single-Factor Analysis of Variance Regarding influence of Intrinsic Characteristics and Operation Conditions on SS Removal Rates

参数	样本量	F 值	自由度	p 值	效应量( $\eta^2$ )
亲疏水性	16	8.88	1	0.01	0.388
密度	32	0.55	3	0.651	0.056
开孔比	40	20.18	4	<0.001	0.698
几何尺寸	24	4.44	2	0.025	0.297
滤速	32	1.03	3	0.393	0.1
填充高度	40	12.10	4	<0.001	0.58

表 3 本征特性和运行条件对水头损失影响的单因素方差分析结果

Tab. 3 Results of Single-Factor Analysis of Variance Regarding Influence of Inherent Characteristics and Operation Conditions on Head Losses

参数	样本量	F 值	自由度	p 值	$\eta^2$
亲疏水性	16	498.35	1	<0.001	0.973
密度	32	64.99	3	<0.001	0.874
开孔比	40	230.48	4	<0.001	0.963
几何尺寸	24	239.27	2	<0.001	0.958
滤速	32	126.11	3	<0.001	0.931
填充高度	40	8.81	4	<0.001	0.502

0.001) 和滤料的填充高度( $F = 12.1, p < 0.001$ )对 SS 去除率的影响具有显著性(表 2),其中海绵开孔比对 SS 去除率的影响最为显著( $\eta^2 = 0.698$ )。亲疏水性的影响虽然达到统计学显著性( $p = 0.01$ ),但影响程度较小( $\eta^2 = 0.388$ ),且亲水海绵的 SS 平均去除率仅比疏水海绵低 6.6% [图 2(a)]。在密度为 22~45 kg/m<sup>3</sup>,密度对 SS 去除率的影响未达显著性( $p = 0.651$ )。所有参数均显著影响水头损失( $p <$

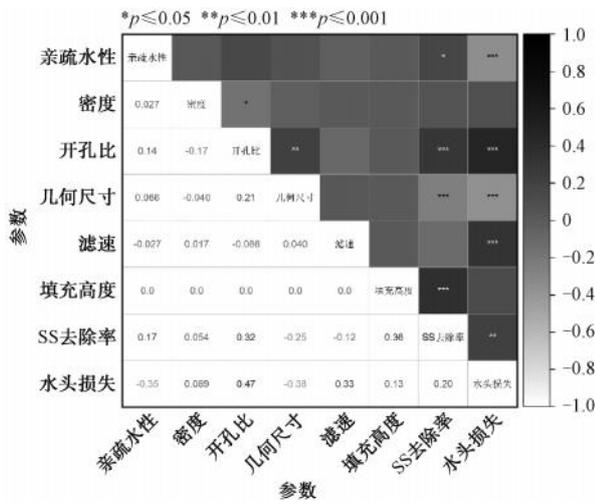


图 11 相关性分析海绵本征特性和运行条件对过滤性能的影响

Fig. 11 Correlation Analysis of Sponge Intrinsic Properties and Operation Conditions on Filtration Performance

0.001),影响程度存在差异(表 3)。亲疏水性对水头损失的影响最为突出 ( $F = 498.35, p < 0.001, \eta^2 = 0.973$ ),亲水性海绵的初始水头损失及增长速率均高于疏水性海绵。海绵的裁剪尺寸 ( $F = 239.27, p < 0.001, \eta^2 = 0.958$ )和开孔比 ( $F = 230.48, p < 0.001, \eta^2 = 0.963$ )对水头损失的影响程度次之。

Spearman 相关性分析进一步显示(图 11),海绵亲疏水性与水头损失呈现显著负相关 ( $r = -0.35, p \leq 0.001$ ),支持了亲水海绵过滤时产生更大流动阻力的结论。海绵的开孔比与 SS 去除率呈正相关 ( $r = 0.32, p \leq 0.001$ ),与水头损失亦呈正相关 ( $r = 0.47, p \leq 0.001$ ),印证了高开孔比的海绵在提升 SS 去除率的同时会产生更高的能耗,同时也要注意过高的开孔比会导致滤层局部堵塞,造成水头损失升高和 SS 去除率降低。海绵的几何尺寸与 SS 去除率 ( $r = -0.25, p \leq 0.001$ )和水头损失 ( $r = -0.25, p \leq 0.001$ )都呈负相关,表明较小的海绵尺寸可以提高 SS 去除效果,但会增加水头损失。滤速对水头损失 ( $r = 0.33, p \leq 0.001$ )有显著正相关,填充高度对 SS 去除率 ( $r = 0.36, p \leq 0.001$ )有显著正相关。

上述结果表明,在实际应用海绵悬浮过滤系统时,建议选择开孔比为 40~50 以平衡效率与能耗。对于高 SS 浓度的进水,疏水海绵可以减少表面堵塞,保持高滤速的同时维持较低的水头损失。当水头损失增长过快时,可以通过降低滤速进行调节;当

SS 去除率下降时,则可适当增加填充高度以维持稳定的去除效果。

## 2.4 悬浮过滤在不同进水浓度下的运行效果

为研究悬浮过滤工艺在不同进水水质下的过滤性能,对比了不同进水浓度的 SS、COD、TP、总氮(TN)去除率,分析进水水质对过滤去除 SS 及其他污染物的协同效应。试验采用密度为  $24 \text{ kg/m}^3$ ,开孔比为 50,几何尺寸为 10 mm 的疏水聚氨酯海绵作为滤料,在 1 m 填充高度、50 m/h 滤速下进行过滤试验。试验进水水质如表 4 所示,试验结果如图 12 所示。

表 4 试验进水水质

Tab. 4 Characteristics of Experimental Influent Quality

试验组别	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
进水 1	100±8	80.0±4.7	13.5±1.0	9±1
进水 2	212±13	157.0±9.7	15.4±1.5	16±3
进水 3	313±29	178.0±10.1	10.4±1.3	15±1
进水 4	507±18	405.0±33.0	31.5±3.4	24±5

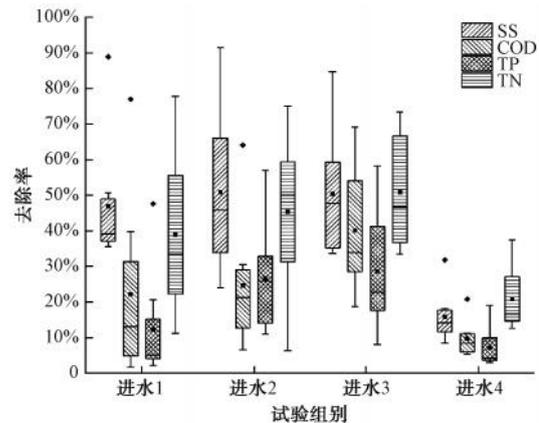


图 12 不同进水时 SS、COD、TP、TN 去除率

Fig. 12 Removal Rates of SS, COD, TP and TN under Different Influent Conditions

当进水 SS 质量浓度从  $100 \text{ mg/L}$  增加至  $500 \text{ mg/L}$  时,SS 去除率呈现先升高后降低的趋势。在  $100 \sim 300 \text{ mg/L}$ ,SS 平均去除率稳定在  $46.8\% \sim 53.2\%$ ,此时泥饼呈现疏松多孔结构,厚度随进水浓度增加而缓慢增长,对过滤兼具机械筛分和吸附截留双重作用;而当进水 SS 质量浓度升至  $500 \text{ mg/L}$  时,平均去除率骤降至  $15.8\%$ ,此时泥饼快速增厚且结构致密化,显著加剧水流通道堵塞。这一现象表明滤床在中等负荷(SS 质量浓度  $\leq 300 \text{ mg/L}$ )下

可维持高效截留能力,此时形成的泥饼作为动态过滤介质参与截留过程;但在高负荷(SS质量浓度为500 mg/L)下滤床截污容量快速饱和,致密泥饼层导致有效过滤面积减少,SS突破滤床,出水水质变差<sup>[39]</sup>。

COD、TP、TN去除率与SS去除率变化呈正相关性。当进水SS质量浓度在100~300 mg/L时,COD、TP、TN的去除率分别为22.1%~42.9%、12.2%~30.4%、38.9%~47.9%。在进水SS质量浓度为500 mg/L时,其平均去除率分别降至9.6%、7.2%和20.8%,显著低于低浓度进水情况。在实际应用中,针对高浓度进水,建议采用预沉淀或提高滤床反冲洗频率以维持系统的稳定性。

### 3 结论

本研究揭示了滤料本征特性与运行参数对悬浮过滤截留性能与水头损失的耦合作用机制,为优化海绵悬浮过滤设计提供了理论依据,为工程应用中滤料特性选择提供了试验依据。主要结论如下。

(1)亲疏水性不同的海绵过滤性能表现出显著差异。疏水海绵因抗吸水膨胀特性,其SS平均去除率较亲水海绵高13.3%,水头损失增长更慢,更适用于高滤速(40~60 m/h)工况的长期稳定运行。

(2)开孔比和几何尺寸是影响海绵过滤性能的关键滤料特性。开孔比低于50时,SS去除率与开孔比正相关(最优组开孔比为50的去除率为62.2%);高于50则产生短流效应导致运行稳定性下降。海绵的几何尺寸从20 mm减小至10 mm,SS平均去除率从30.8%提升至46.9%,但小尺寸会显著增加水头损失。密度(22~45 kg/m<sup>3</sup>)对SS去除率无显著影响,但高密度滤料水头损失增加10%~15%。

(3)滤速每提升10 m/h,水头损失增加25%~30%,但SS去除率波动<6%;填充高度增至1.00 m可提升SS去除率。反冲洗[强度为14 L/(m<sup>2</sup>·s),历时为3~4 min]可恢复滤床过滤性能90%以上;直接排水法适用于瞬时溢流污染应急处理。

(4)该系统在进水SS质量浓度为100~300 mg/L时,对SS、COD、TP、TN去除率分别为22.1%~42.9%、12.2%~30.4%、38.9%~47.9%;当进水SS质量浓度高于500 mg/L,截污容量超载导致SS、COD、TP、TN去除率骤降至15.8%、9.6%、

7.2%、20.8%。

### 参考文献

- [1] 李俊奇,李小静,王文亮,等.合流制溢流污染的影响及其控制技术[J].给水排水,2024,50(4):46-53.  
Li J Q, Li X J, Wang W L, et al. Influence of combined sewer overflows control and development trend of control technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(4): 46-53.
- [2] 佃柳,郑祥,郁达伟,等.合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J].水资源保护,2019,35(3):76-83,94.  
Dian L, Zheng X, Yu D W, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 76-83, 94.
- [3] 刘宇轩,高雅弘,王振北,等.城镇合流制排水系统溢流污染控制综述[J].环境工程,2023,41(12):32-47.  
Liu Y X, Gao Y H, Wang Z B, et al. Review of overflow pollution control of urban combined drainage systems [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(12): 32-47.
- [4] 彭亮.武汉市白沙洲大道雨水径流水质特征及污染物指标相关性分析[D].武汉:武汉科技大学,2013.  
Peng L. Water quality characteristics of stormwater runoff and correlation analysis of pollutants index in Baishazhou Avenue, Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [5] 卫宝立.高速公路路面颗粒物特性及与路面径流污染相关性研究[D].青岛:中国海洋大学,2013.  
Wei B L. Research on the characteristics of highway road particles and the relationships between road particles and highway runoff pollution [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [6] 张力,张善发,周琪.化学强化一级处理工艺处理上海合流污水溢流水的中试研究[J].净水技术,2010,29(3):18-21.  
Zhang L, Zhang S F, Zhou Q. Pilot scale experiment on chemically enhanced primary treatment (CEPT) for combined sewer overflows (CSOs) in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2010, 29(3): 18-21.
- [7] Xie C Y, Li X Y, Tang Z Z, et al. Enhanced combined sewer overflow treatment by rapid magnetic flocculation-magnetic sedimentation: efficiency and mechanism [J]. Environmental Science-Water Research & Technology, 2024, 10(7): 1586-1594.
- [8] 夏海琛,朱羽廷,董滨,等.城市污水和污泥细微砂旋流去除技术综述[J].给水排水,2022,48(s1):546-553.  
Xia H C, Zhu Y T, Dong B, et al. Review of vortex grit-removing technology of fine grit of municipal sewage and sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 546-553.
- [9] Lee D H, Min K S, Kang J H. Performance evaluation and a sizing method for hydrodynamic separators treating urban

- stormwater runoff[J]. *Water Science and Technology*, 2014, 69 (10): 2122-2131.
- [10] Hyun K, Kang Y T. Performance of inclined-plate settler and activated carbon sponge-cube media filter for the treatment of urban stormwater runoff from an industrial complexes[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2023, 27(9): 3686-3693.
- [11] Kandra H S, Deletic A, Mccarthy D. Assessment of impact of filter design variables on clogging in stormwater filters[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(7): 1873-1885.
- [12] Hwang Y, Seoyounggyo, Kim H, et al. Optimization of operation and backwashing condition for an upflow stormwater filtration system utilizing ceramic media[J]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 2017, 39(8): 478-488.
- [13] 贾梦飞, 章改, 齐鲁, 等. 溢流污水快速过滤工艺的运行效能与机理研究[J]. *环境工程*, 2024, 42(9): 63-73.  
Jia M F, Zhang G, Qi L, et al. Research on operational efficiency and mechanism of rapid filtration process for overflow sewage[J]. *Environment Engineering*, 2024, 42(9): 63-73.
- [14] 朱红生, 李阳, 杨云安, 等. 悬浮快速过滤工艺处理晴天污水效果初探[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2020, 37(2): 187-193.  
Zhu H S, Li Y, Yang Y A, et al. Preliminary study on the effect of suspension rapid filtration process on sewage treatment in sunny days [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2020, 37(2): 187-193.
- [15] Park K Y, Maeng S K, Kim K, et al. A high filtration system with synthetic permeable media for wastewater reclamation[J]. *Water Science and Technology*, 2006, 53(7): 185-190.
- [16] Chmielowski K, Pawelek J, Dacewicz E. Treatment of high strength domestic sewage on filters filled with polyurethane foam with addition of effective microorganisms [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2020, 46(1): 21-32.
- [17] Zhang Wei, Li Tian. Particle size distributions in combined sewer overflows in a high-intensity urban catchment in Shanghai, China[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 56(3): 655-664.
- [18] 杨天. 高速漂浮填料滤池对合流制溢流污染控制效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.  
Yang T. Research on the control efficiency of high speed floating filler filter for combined sewer overflow pollution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [19] Li L Q, Shan B Q, Yin C Q. Stormwater runoff pollution loads from an urban catchment with rainy climate in China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6(5): 672-677.
- [20] Maeng S K, Ahn K H, Kim K P, et al. Compressible synthetic dual-medium filtration of wastewater effluents for water reuse [J]. *Water Practice and Technology*, 2006, 1 (3): wpt2006050.
- [21] Bulejko P. Numerical comparison of prediction models for aerosol filtration efficiency applied on a hollow-fiber membrane pore structure [J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(6). DOI: 10.3390/nano8060447.
- [22] Zhuang D, Wang Y F, Wang S C, et al. Enhanced environmental stress resistance and functional properties of the curcumin-shellac nano-delivery system: Anti-flocculation of poly-gamma-glutamic acid [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268: 131607. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131607.
- [23] Maximous N, Nakhla G, Wan W. Comparative assessment of hydrophobic and hydrophilic membrane fouling in wastewater applications[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 339(1/2): 93-99. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.04.034.
- [24] Hu H B, Wen J, Bao L Y, et al. Significant and stable drag reduction with airings confined by alternated superhydrophobic and hydrophilic strips [J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1603288.
- [25] Marvi-Mashhadi M, Lopes C S, Llorea J. Effect of anisotropy on the mechanical properties of polyurethane foams: An experimental and numerical study [J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 124: 143-154. DOI: 10.1016/j.mechmat.2018.06.006.
- [26] Sternberg J, Sequerth O, Pilla S. Structure-property relationships in flexible and rigid lignin-derived polyurethane foams: A review [J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 25: 100643. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100643.
- [27] Sibiriyakov B, Leite L W B, Sibiriyakov E. Porosity, specific surface area and permeability in porous media [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 186: 104261. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104261.
- [28] Gunashekar S, Pillai K M, Church B C, et al. Liquid flow in polyurethane foams for filtration applications: A study on their characterization and permeability estimation [J]. *Journal of Porous Materials*, 2015, 22(3): 749-759.
- [29] Yang C P, Chen H, Zeng G M, et al. Modeling variations of medium porosity in rotating drum biofilter [J]. *Chemosphere*, 2009, 74(2): 245-249.
- [30] Bao S, Engh A, Syvertsen M, et al. Inclusion (particle) removal by interception and gravity in ceramic foam filters [J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(23): 7986-7998.
- [31] Steinwinder J, Beckingham L E. Role of pore and pore-throat distributions in controlling permeability in heterogeneous mineral dissolution and precipitation scenarios [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7): 5502-5517.
- [32] Barhate R S, Loong C K, Ramakrishna S. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 283 (1/2): 209 - 218. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.06.030.

(下转第 180 页)

- Liu Z G. Measurement and analysis of domestic wastewater pollutant production per capita in urban residential quarters[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(4): 90-95, 138.
- [13] 孙永利, 张维, 郑兴灿, 等. 城镇居民人均日生活污水污染物产生量测算之产污规律[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(6): 1-6.
- Sun Y L, Zhang W, Zheng X C, et al. Emission regularity of daily domestic sewage pollutant production of urban residents per capita[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6): 1-6.
- [14] 伍彬, 张鸣, 李一平, 等. 华南地区城镇居民生活污水排放规律及污染物排放量[J]. *环境工程*, 2022, 40(12): 196-201, 280.
- Wu B, Zhang M, Li Y P, et al. Discharge law of domestic wastewater and pollutants discharge of urban residents in South China[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(12): 196-201, 280.
- [15] 范丽华, 宋艾林. 取样方式对废水中化学需氧量测定的影响[J]. *广州化工*, 2025, 53(6): 150-152.
- Fan L H, Song A L. Effect of sampling method on determination of chemical oxygen demand in wastewater [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2025, 53(6): 150-152.
- [16] 赵思索, 李钢, 李一平, 等. 华南某市典型用地类型污水排放特征监测与分析[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(1): 115-122.
- Zhao S S, Li G, Li Y P, et al. Monitoring and analysis of sewage discharge characteristics of typical land use types in a city in south China[J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(1): 115-122.
- [17] 郑可, 付浩, 李一平. 基于南方城市化粪池前后水质变化特征的若干思考[J]. *给水排水*, 2023, 49(10): 20-27.
- Zheng K, Fu H, Li Y P. Research on the characteristics of water quality changes before and after septic tank in southern cities [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(10): 20-27.
- [18] 宋耀美, 宁克明, 高祯, 等. 深圳市建筑小区取消化粪池可行性研究[J]. *广东化工*, 2021, 48(14): 184-186.
- Song J M, Ning K M, Gao Z, et al. Feasibility study on canceling septic tank in building district of Shenzhen City [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(14): 184-186.
- [19] 陈杰龙, 张洁. 污水提质增效中截流井的优化思路[J]. *科技创新与应用*, 2024, 14(31): 133-137.
- Chen J L, Zhang J. Optimization idea of intercepting well in sewage quality improvement and efficiency improvement [J]. *Technology Innovation and Application*, 2024, 14(31): 133-137.
- [20] 凌耀忠, 胡和平, 万晶晶, 等. 污水系统提质增效对策研究: 以H岛污水系统为例[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(16): 24-28.
- Ling Y Z, Hu H P, Wan J J, et al. Study on solutions for quality and efficiency improvement of waste water system—Taking H island waste water system as an example [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(16): 24-28.

(上接第 170 页)

- [33] Farizoglu B, Nuhoglu A, Yildiz E, et al. The performance of pumice as a filter bed material under rapid filtration conditions [J]. *Filtration & Separation*, 2003, 40(3): 41-47.
- [34] Lee J J, Cha J H, Ben A R, et al. Fiber filter as an alternative to the process of flocculation-sedimentation for water treatment [J]. *Desalination*, 2008, 231(1/2/3): 323-331. DOI: 10.1016/j.desal.2007.11.051.
- [35] Hwang Y, Seo Y, Kim H, et al. Evaluation of solids removal and optimisation of backwashing for an upflow stormwater filtration system utilising novel floating fibrous media [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(14): 2132-2144.
- [36] French D. Granular filter media: Evaluating filter bed depth to grain size ratio[J]. *Filtration + Separation*, 2012, 49(5): 34-36.
- [37] Jin L, Ong S L, Ng H Y. Fouling control mechanism by suspended biofilm carriers addition in submerged ceramic membrane bioreactors[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 427: 250-258. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.09.016.
- [38] Ramsay L, Du F, Lund M, et al. Grain displacement during backwash of drinking water filters [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2021, 21(1): 356-367.
- [39] Gitis V, Rubinstein I, Livshits M, et al. Deep-bed filtration model with multistage deposition kinetics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 163(1/2): 78-85. DOI: 10.1016/j.cej.2010.07.044.