

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.009

新型上向流轻质滤料滤池在常规工艺中的运行效能

刘 强¹, 姚 颖², 刘泽山³, 刘思瑶¹, 李雨萱¹, 汤文静¹

(1. 徐州工程学院 环境工程学院, 江苏 徐州 221111; 2. 生态环境部 对外合作与交流
中心, 北京 100035; 3. 江苏永冠给排水设备有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 采用一种以聚苯乙烯泡沫滤珠为滤料的新型上向流轻质滤料滤池中试装置处理某大学校园内的湖水,将滤速控制在8 m/h,重点关注进出水中浊度、色度、COD_{Mn}、氨氮和叶绿素a的变化情况,并与石英砂滤池(滤速为7 m/h)的处理效能进行对比;同时,比较了运行前与冲洗后的清洁滤层过滤水头损失,并对其冲洗方法进行了评价。结果表明,由于上向流过滤方式和聚苯乙烯泡沫滤珠具有良好的粒径均匀性,新型滤池对湖水表现出了较好的处理效能,对浊度、色度、COD_{Mn}、氨氮和叶绿素a的平均去除率分别为95.9%、84.6%、35.0%、24.5%和75.2%,比石英砂滤池分别提高了3.3%、0.9%、5.6%和12.9%;“气冲-泄空-水冲”的新型冲洗方法简单有效,冲洗后的平均清洁滤层过滤水头损失为8.1 cm,仅比运行前提高了3.8%。

关键词: 滤池; 冲洗; 轻质滤料; 聚苯乙烯泡沫滤珠; 石英砂

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0058-06

Operational Efficiency of a Novel Upflow Biostyrene Filter in Conventional Drinking Water Process

LIU Qiang¹, YAO Ying², LIU Ze-shan³, LIU Si-yao¹, LI Yu-xuan¹, TANG Wen-jing¹

(1. School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111, China; 2. Foreign Environmental Cooperation Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China; 3. Jiangsu Yongguan Water Supply and Drainage Equipment Co. Ltd., Xuzhou 221116, China)

Abstract: A novel pilot-scale upflow biostyrene filter packed with polystyrene foamed beads was employed to treat the lake water in a university campus. The filtration velocity was regulated at 8 m/h, and the variations of turbidity, chroma, COD_{Mn}, ammonia nitrogen, and chlorophyll a in the influent and effluent were monitored. The treatment efficiency of this filter was compared with that of a quartz sand filter with a filtration velocity of 7 m/h. Meanwhile, the filtration head loss of the clean filter layer prior to operation and after washing was compared, and the washing method was evaluated. Owing to the excellent uniformity of particle size achieved by the upflow filtration method and polystyrene foamed beads, the novel filter demonstrated a remarkable treatment efficiency on the lake water. The average removal efficiencies of turbidity, chroma, COD_{Mn}, ammonia nitrogen, and chlorophyll a were 95.9%, 84.6%, 35.0%, 24.5%, and 75.2% respectively. In contrast to the quartz sand filter, they were increased by 3.3%, 0.9%, 5.6%, and 12.9% respectively. The novel washing method, “air flush-venting-water flush”, was simple and effective, and the average clean filter layer filtration head loss after flushing was 8.1 cm, which was only 3.8% higher than that before operation.

基金项目: 徐州市重点研发计划项目(KC22098、KC19105); 江苏省建设系统科技项目(2019ZD001082、2019ZD035); 江苏省科技副总项目(FZ20210338); 江苏省产学研合作项目(BY2022754)。

9.0%, 5.6%, and 12.9% respectively. The new flushing approach of “air blowing-emptying-water flushing” was straightforward and effective. The average filtration head loss of the clean filter layer after flushing was 8.1 cm, which was merely 3.8% higher than that before operation.

Key words: filter; washing; biostyrene; polystyrene foamed bead; quartz sand

常规工艺是我国饮用水处理的主流工艺,滤池是其中非常重要的工艺单元。传统滤池大多以石英砂为滤料,水流方向一般为下向流。这类滤池存在建造费用高、滤层截污能力有限、冲洗阻力大、运行能耗高等缺点。采用密度比水小的轻质滤料^[1-3]制备而成的上向流滤池有望能够解决上述问题。

与石英砂相比,聚苯乙烯泡沫滤珠(简称泡沫滤珠)具有密度小、价格便宜、粒径均匀性好、运输与安装方便等优点,在交通不便的偏远农村地区尤其有竞争优势。但是,多年来泡沫滤珠滤池却一直未能在饮用水处理领域得到大规模推广应用。究其原因,难冲洗是其最大问题。由于密度非常小($15\sim 20\text{ kg/m}^3$),泡沫滤珠在水的浮力作用下紧密挤压在滤板下,上向流冲洗时会进一步受到挤压,滤层中截留的污染物难以被有效清除;而若采用下向流冲洗方式,则需要很高的冲洗强度,动力费用过高。目前,泡沫滤珠滤池的冲洗方法主要为脉冲^[4],这种冲洗方式的操作程序较为复杂,且冲洗时间有限,冲洗强度不易控制,冲洗效果并不理想。

针对传统泡沫滤珠滤池的冲洗难题,提出了一种新型泡沫滤珠滤池及冲洗方法(专利号:ZL202110930415.9),并采用中试装置处理某大学校园内的湖水,对其运行效能进行分析,重点关注新型滤池对浊度、色度、 COD_{Mn} 、氨氮和叶绿素a等指标的去除效果及新型冲洗方法的效能。

1 材料与方法

1.1 试验装置

泡沫滤珠滤池中试装置为DN400有机玻璃圆柱,通过隔板将装置分为上、下两部分,上部为清水池,下部为滤池,如图1所示。待滤水通过原水管进入滤池底部,自下而上先后经过配水区(高度为500 mm)、泡沫滤珠滤层(泡沫滤珠的堆积密度为 20 kg/m^3 ,粒径为 $1.0\sim 2.0\text{ mm}$, $K_{80}=1.17$,厚度为700 mm),然后通过短柄滤头进入滤板上方的清水区(高度为500 mm);当清水区被水充满后,滤后水在压力作用下经集水槽、联络管进入上部清水池(有效水深为

1 000 mm)。为保证充足的冲洗水量,在清水池旁边串联了一个有效容积为 0.5 m^3 的清水箱。实际工程应用中,下部可采用多组滤池并联的方式,上部共用清水池。

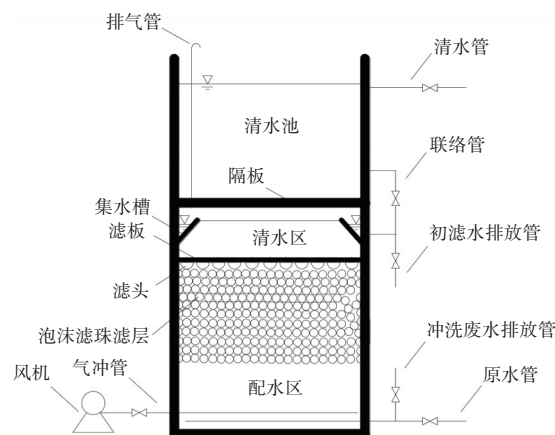


图1 泡沫滤珠滤池结构示意图

Fig. 1 Structure of foamed bead filter

泡沫滤珠滤池中试装置的设计滤速为 8 m/h ,设计水量为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 。过滤结束后对滤池进行冲洗,具体方法为:①关闭原水管和联络管上的阀门,开启风机进行气冲,气冲强度为 $8\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,气冲时间为3 min;②打开冲洗废水排放管上的阀门,泄空池内的冲洗废水,泄空时间约为4 min;③停止气冲,打开联络管上的阀门进行水冲,水冲强度为 $6\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,同时调整冲洗废水排放管上的阀门,使池中水位逐渐上升,直至淹没滤板,此阶段用时约为4 min;④保持水冲强度不变,继续冲洗3 min,冲洗结束。

待滤水为某一体化饮用水处理设备中的沉淀池出水,该设备的工艺流程为混凝-网格式絮凝池-斜管沉淀池-无阀滤池,设计水量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 。其中,混凝剂采用聚合氯化铝(有效含量为30%),投加量为 10 mg/L ;网格式絮凝池的絮凝时间为20 min;斜管沉淀池的沉淀时间为30 min;无阀滤池的滤料为石英砂,粒径为 $0.90\sim 1.35\text{ mm}$, $K_{80}=1.78$,滤层厚度为700 mm,设计滤速为 7 m/h 。试验中所用石英砂和泡沫滤珠如图2所示。

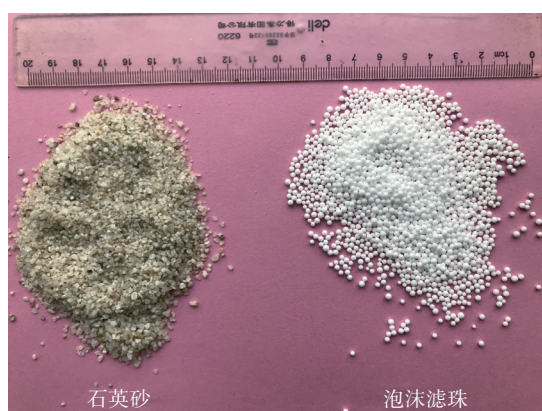


图2 石英砂和泡沫滤珠照片

Fig.2 Photos of quartz sands and foamed beads

1.2 原水水质

一体化饮用水处理设备的原水为某大学校园内的湖水。水质情况如下:浊度为8.83~13.32 NTU,平均值为11.36 NTU;色度为30~50度,平均值为38.8度;COD_{Mn}为6.73~8.52 mg/L,平均值为8.31 mg/L;氨氮为0.51~0.73 mg/L,平均值为0.64 mg/L;叶绿素a为19.31~23.53 μg/L,平均值为21.67 μg/L;pH为7.38~7.58,平均值为7.45;水温为20.1~24.8℃,平均值为22.7℃。

泡沫滤珠滤池与无阀滤池(砂滤池)的待滤水均为一体化饮用水处理设备中的沉淀池出水。待滤水水质如下:浊度为8.44~10.91 NTU,平均值为9.48 NTU;色度为30~40度,平均值为32.4度;COD_{Mn}为6.12~7.86 mg/L,平均值为7.08 mg/L;氨氮为0.43~0.62 mg/L,平均值为0.53 mg/L;叶绿素a为17.53~20.12 μg/L,平均值为18.07 μg/L;pH为7.33~7.53,平均值为7.42;水温为20.1~24.9℃,平均值为22.8℃。

1.3 试验方法

同时运行一体化饮用水处理设备和泡沫滤珠滤池中试装置,每隔1 h取样并检测两种滤池进出水的浊度、色度、COD_{Mn}、氨氮和叶绿素a等指标。针对泡沫滤珠滤池,自过滤出水开始计时,每隔5 min取样检测出水浊度,连续检测60 min,确定初滤水的最佳排放时间。检测泡沫滤珠滤池投入运行前和冲洗后的清洁滤层过滤水头损失并进行比较分析,对其冲洗效果进行评价。

1.4 分析项目及方法

COD_{Mn}采用高锰酸盐指数法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;色度采用铂钴比色法测

定;叶绿素a采用分光光度法测定;浊度采用浊度仪测定;pH采用pH计测定;过滤水头损失通过过滤前后的测压管水头差表征;水温采用温度计测定。

2 结果与讨论

2.1 对浊度的去除效果

两种滤池出水浊度的变化如图3所示。可以看出,刚开始过滤时,由于滤层未被完全压实,滤料颗粒间的空隙较大,滤层对水中悬浮物的截留能力较差,因此两种滤池的出水浊度均较高,泡沫滤珠滤池的出水浊度为0.35 NTU,石英砂滤池的为0.51 NTU。随着过滤时间的延长,滤层逐渐被压实,滤后水浊度逐渐降低。过滤1 h后,两种滤池的出水浊度均降到了最低值,泡沫滤珠滤池的出水浊度为0.03 NTU,石英砂滤池的为0.12 NTU。继续过滤,滤池出水浊度缓慢升高。当过滤24 h后,两种滤池的出水浊度均达到最高值,泡沫滤珠滤池的出水浊度为0.85 NTU,石英砂滤池的为1.63 NTU。整个过滤期间,待滤水平均浊度为9.48 NTU,泡沫滤珠滤池平均出水浊度为0.39 NTU,石英砂滤池的为0.70 NTU。泡沫滤珠滤池对浊度的平均去除率为95.9%,比石英砂滤池提高了3.3%。

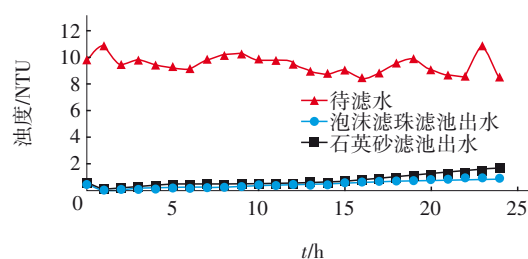


图3 两种滤池出水浊度的变化

Fig.3 Change in turbidity of effluent from two kinds of filters

一体化饮用水处理设备的沉淀池出水水质较差。湖水平均浊度为11.36 NTU,沉淀池出水平均浊度为9.48 NTU,沉淀池对浊度的平均去除率仅为16.5%,这归因于原水中的藻类。经混凝形成的含藻絮体密度与水十分接近,沉速很慢,难以在沉淀池中快速实现固液分离,但却能通过过滤被有效去除。滤池对水中悬浮物的去除主要是通过迁移和吸附作用来实现。水中悬浮物在沉淀、拦截、惯性、扩散和水动力等作用下迁移到滤料表面,然后在范德华引力、静电引力、某些化学键和特殊的吸附力,以及絮凝颗粒的吸附架桥等作用黏附到滤料表

面。试验中所用泡沫滤珠的粒径明显大于石英砂。一般情况下,粒径越大,滤料颗粒之间的空隙也越大,滤层对悬浮物的截留能力就越差。但是,泡沫滤珠滤池却比石英砂滤池表现出了更好的除浊效果,这可能与泡沫滤珠的粒径均匀性更好以及采用上向流过滤方式有关。在滤料粒径均匀性更好的同时,采用上向流过滤方式能够充分实现“反粒度”过滤,最大限度地发挥整个滤层的截污能力。

2.2 对色度的去除效果

泡沫滤珠滤池和石英砂滤池对色度均表现出了良好的去除效果,如图4所示。待滤水的平均色度为32.4度,泡沫滤珠滤池和石英砂滤池出水的平均色度均为5度,两种滤池对色度的平均去除率均为84.6%。天然水体中含有腐殖质、泥土、浮游生物、藻类等致色物质,这些物质经混凝后会形成絮体,并通过沉淀和过滤作用被去除。由于泡沫滤珠滤池和石英砂滤池均能有效去除水中的含藻絮体等致色物质,因此两种滤池均表现出了良好的除色效果。虽然泡沫滤珠滤池对水中悬浮物的截留能力更强,但却没有表现出更好的除色效果,这可能是检测人员对色差的辨识能力有限所致。

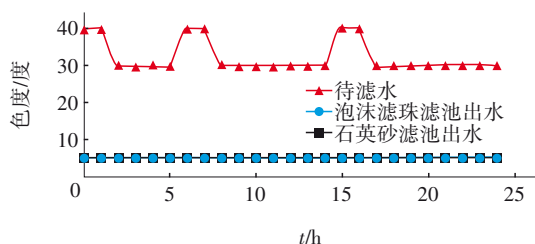


图4 两种滤池出水色度的变化

Fig.4 Change in chroma of effluent from two kinds of filters

2.3 对 COD_{Mn} 的去除效果

两种滤池出水 COD_{Mn} 的变化如图5所示。可以看出,泡沫滤珠滤池和石英砂滤池对 COD_{Mn} 均有一定的去除效果。待滤水的平均 COD_{Mn} 浓度为7.08 mg/L,泡沫滤珠滤池出水的平均 COD_{Mn} 浓度为4.60 mg/L,石英砂滤池的为5.24 mg/L。泡沫滤珠滤池对 COD_{Mn} 的平均去除率为35.0%,比石英砂滤池提高了9.0%。一般来说,滤池对有机物的去除方式主要有两种:一种是通过生长在滤料表面的生物膜对有机物进行生物降解, COD_{Mn} 去除效果与生物膜量直接相关^[5];另一种是通过截留水中的腐殖质、浮游生物、藻类等悬浮物来实现。试验中使用的泡沫滤

珠和石英砂都是新料,且运行时间较短(约1个月),滤料表面没有生长生物膜,因此两种滤池对 COD_{Mn} 的去除只能是通过截留水中悬浮物来实现。由于泡沫滤珠滤池对含藻絮体等悬浮物的截留能力更强,因此对 COD_{Mn} 也表现出了更好的去除效果。

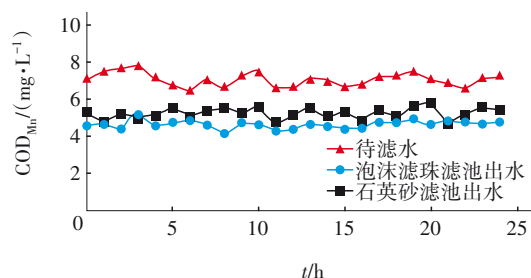


图5 两种滤池出水 COD_{Mn} 的变化

Fig.5 Change in COD_{Mn} of effluent from two kinds of filter

2.4 对氨氮的去除效果

两种滤池对氨氮的去除效果均一般(见图6),当待滤水的平均氨氮浓度为0.53 mg/L时,泡沫滤珠滤池和石英砂滤池出水的平均氨氮浓度分别为0.40、0.43 mg/L。泡沫滤珠滤池对氨氮的平均去除率为24.5%,比石英砂滤池提高5.6%。滤池对氨氮的去除方式主要有两种:一种是通过硝化细菌在好氧条件下将氨氮转化为硝态氮,有研究表明,世代周期较长的硝化细菌更容易在生物膜中繁殖^[6];另一种是通过去除水中含有氨氮的悬浮物来实现。因为试验中泡沫滤珠和石英砂表面都没有生长生物膜,所以两种滤池对氨氮的去除只能是通过去除悬浮物来实现。由于泡沫滤珠滤池对悬浮物的截留能力更强,因此对氨氮也取得了更好的去除效果。

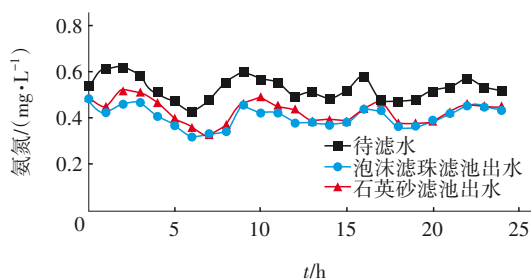


图6 两种滤池出水氨氮的变化

Fig.6 Change in ammonia nitrogen of effluent from two kinds of filters

2.5 对叶绿素a的去除效果

泡沫滤珠滤池和石英砂滤池对叶绿素a的去除效果均较好,待滤水的叶绿素a平均浓度为18.07

$\mu\text{g/L}$, 泡沫滤珠滤池出水的叶绿素 a 平均浓度为 $4.49 \mu\text{g/L}$, 石英砂滤池的为 $6.82 \mu\text{g/L}$ (见图7)。泡沫滤珠滤池对叶绿素 a 的平均去除率为 75.2%, 比石英砂滤池提高了 12.9%。富营养化是我国水环境当前面临的主要问题, 主要表现为藻类大量繁殖, 严重时会发生水华。藻类会对自来水厂的生产运行造成严重干扰, 例如含藻絮体结构较为松散、沉速较慢、难以在沉淀池中快速实现固液分离, 使得滤池易堵塞, 出厂水有严重的臭味, 同时还容易生成消毒副产物等。气浮^[7]和预臭氧强化混凝^[8]可以有效去除藻类, 壳聚糖改性絮凝剂^[9]和超声波强化絮凝沉淀^[10]也对藻类有较好的去除效果。虽然一体化处理设备的沉淀池对含藻絮体的去除效果很差, 但由于滤层对含藻絮体的高效截留作用, 泡沫滤珠滤池和石英砂滤池均取得了较好的除藻效果。同时, 由于泡沫滤珠具有更好的粒径均匀性并采用了上向流过滤方式, 因而对含藻絮体的截留能力更强, 除藻效果更好。

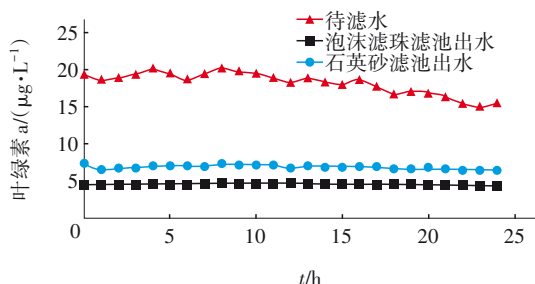


图7 两种滤池出水叶绿素 a 的变化

Fig.7 Change in chlorophyll a of effluent from two kinds of filters

2.6 初滤水排放时间分析

试验中发现, 当过滤开始前滤池的水位差别较大、泡沫滤珠滤层的压实程度明显不同时, 滤后水在前 5 min 的出水浊度会有较大的差异 (见图8)。若过滤开始前滤池的水位较高, 滤层处于完全淹没状态, 泡沫滤珠会在水的巨大浮力作用下紧密挤压于滤板之下。过滤开始后出水浊度为 0.58 NTU, 此时的出水应为上次冲洗末期的冲洗水; 继续过滤, 出水浊度迅速下降, 第 5 分钟的出水浊度降到了 0.03 NTU; 一直到第 60 分钟, 出水浊度仍未超过 0.05 NTU。因此, 此种情况下的初滤水可不排放。

若过滤开始前滤池的水位较低, 滤层较大程度地暴露于空气中, 泡沫滤珠会因受到的浮力较小而相对松散, 滤料间的空隙较大。过滤开始后, 泡沫

滤珠在浮力作用下逐渐上移并最终挤压于滤板之下。在此过程中, 部分待滤水会在滤层被压实之前穿透滤池。经检测, 初始出水浊度为 8.12 NTU, 此时的出水应为上次冲洗末期的冲洗废水。继续过滤, 出水浊度迅速降低 (第 5 分钟降至 0.37 NTU, 第 10 分钟降至 0.02 NTU)。因此, 这种情况下前 5 min 的初滤水必须排放掉。将滤速分别提高到 12 和 16 m/h, 也得出了相同的结论。

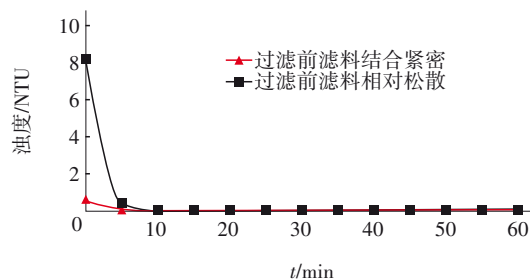


图8 泡沫滤珠滤池初滤水浊度的变化

Fig.8 Change in turbidity of initial water from foamed bead filter

2.7 冲洗效果

泡沫滤珠滤池首次投入运行前的清洁滤层过滤水头损失为 7.8 cm, 过滤到第 24 小时的过滤水头损失为 52 cm, 多次运行并冲洗以后的清洁滤层过滤水头损失为 8.1 cm。与首次投入运行前相比, 运行并冲洗后的清洁滤层水头损失仅升高了 3.8%, 表明气冲-泄空-水冲的冲洗方法非常有效。气冲可以使泡沫滤珠振动、旋转并相互摩擦, 将表面吸附的污染物剥落下来; 泄空可以排出高浓度冲洗废水, 且可使泡沫滤珠下落并变得松散; 水冲可以对泡沫滤珠进行进一步的漂洗。因此, 该方法能够有效冲洗泡沫滤珠滤池, 且操作简便、动力费用较低。

3 结论

① 由于采用了上向流过滤方式以及具有更好的粒径均匀性, 泡沫滤珠滤池表现出了良好的水质净化性能, 对浊度、色度、 COD_{Mn} 、氨氮和叶绿素 a 的平均去除率分别为 95.9%、84.6%、35.0%、24.5% 和 75.2%, 比石英砂滤池分别提高了 3.3%、0.9.0%、5.6% 和 12.9%。

② 若过滤开始前泡沫滤珠滤层处于完全淹没状态, 滤料结合较为紧密, 则初滤水可以不排放; 若过滤开始前泡沫滤珠滤层大部分暴露于空气中, 滤料结合较为松散, 则前 5 min 的初滤水必须排放掉。

③ 气冲-泄空-水冲的新型冲洗方式能够有效恢复泡沫滤珠滤池的过滤性能,多次运行并冲洗后的平均清洁滤层过滤水头损失为 8.1 cm,仅比首次投入运行前提高了 3.8%。

参考文献:

- [1] 李美玲. 轻质硅藻土陶粒的制备及其在 BAF 中的应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
LI Meiling. Study on Preparation of Lightweight Diatomite Ceramsite and Application in BAF [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [2] 吴苏清. 超轻污泥陶粒曝气生物滤池深度处理工业废水的研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.
WU Suqing. Preparation and Application of Ultra-lightweight Ceramic in Industrial Advanced Wastewater Treatment by Biological Aerated Filter [D]. Jinan: Shandong University, 2012(in Chinese).
- [3] 杨尚. 凹凸棒石/聚乙烯醇固定化载体的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
YANG Shang. Study on Preparation and Properties of Attapulgite/Polyvinyl-alcohol Immobilized Carrier [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [4] 任媛媛, 缙倩雯, 陆少鸣. 轻质滤料生物滤池对微污染原水的中试研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 603-606.
REN Yuanyuan, GOU Qianwen, LU Shaoming. Research on performance of biostyr filter used for treatment of micro polluted water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(3): 603-606 (in Chinese).
- [5] LIU Q, YAO Y, XU D L. Mechanism of membrane fouling control by HMBR: effect of microbial community on EPS [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(5):1681.
- [6] 陈如勇, 张晓霞, 周家中, 等. MSBR 改为三级 A/O-MBBR 连续流工艺的应用效果[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 108-114.
CHEN Ruyong, ZHANG Xiaoxia, ZHOU Jiazhong, *et al.* Pratical application effect of retrofitted MSBR into three-stage A/O-MBBR continuous flow process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (14): 108-114 (in Chinese).
- [7] 刘强, 闫猛, 赵昌爽, 等. 气浮/活性炭/膜一体化工艺处理微污染湖泊水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(9): 57-59.
LIU Qiang, YAN Meng, ZHAO Changshuang, *et al.* Integrated process flotation, activated carbon and membrane for treatment of micro-polluted lake water[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(9): 57-59 (in Chinese).
- [8] 季华, PERRIN Didier, 杨燕华. 预臭氧/混凝/气浮工艺去除水库原水中的藻类[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 60-62.
JI Hua, PERRIN Didier, YANG Yanhua. Removal of algae from raw water of reservoir with pre-ozonation/coagulation/flotaion process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 60-62(in Chinese).
- [9] 向斯, 刘世昌, 赵以军, 等. pH 值及黏土密度对壳聚糖改性絮凝剂除藻效果的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1520-1525.
XIANG Si, LIU Shichang, ZHAO Yijun, *et al.* Effect of pH and clay density on the algae-removing efficiency using chitosan-modified flocculant [J]. China Environmental Science, 2015, 35(5): 1520-1525 (in Chinese).
- [10] 李姣, 田小方, 赵以军, 等. 低功率密度超声波强化絮凝沉降除藻技术研究[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 88-93.
LI Jiao, TIAN Xiaofang, ZHAO Yijun, *et al.* Algae-removal by low power ultrasound enhanced flocculation [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(2): 88-93 (in Chinese).

作者简介: 刘强(1972-), 男, 山东济南人, 博士, 教授, 研究方向为饮用水深度处理。

E-mail: liuqiang_1207@163.com

收稿日期: 2023-08-31

修回日期: 2023-11-16

(编辑: 任莹莹)