

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 19. 007

长期运行均质滤料性能下降原因及恢复研究

杜伊明^{1,2,3}, 雷春元⁴, 黄廷林^{1,2,3}, 李凯^{1,2,3}, 李勤恒^{1,2,3},
卢磊⁵, 王志勇⁵, 王鹏飞⁵

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 西安市自来水有限公司, 陕西 西安 710002; 5. 西安市自来水有限公司乐游原水厂, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对西北地区某水厂均质滤料滤池出水浊度偏高、截污能力下降问题,以性能下降明显的滤池为研究对象,在中试滤柱系统对旧砂和新砂滤料的除浊性能进行了评价。结果表明,在同一运行条件下,旧砂滤柱出水浊度比新砂滤柱高0.2 NTU左右。滤料的特性测定结果显示,旧砂与新砂最大的区别是滤料级配和细砂占比的不同。进一步对比了装填旧砂、补充细砂后的旧砂、两种不同粒径级配的新砂等4个滤柱系统对浊度和颗粒物的去除效果。结果显示,级配相同但表面性质不同的滤料对浊度和颗粒物具有相同的去除效果,这说明旧砂过滤性能下降的主要原因是滤料级配发生了变化,根据级配缺失进行补砂可以恢复滤料的过滤性能。

关键词: 地表原水; 均质滤料; 过滤性能下降; 滤料级配

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0045-07

Reason for Performance Deterioration of Long-term Operating Homogeneous Filter Media and Recovery Measures

DU Yi-ming^{1,2,3}, LEI Chun-yuan⁴, HUANG Ting-lin^{1,2,3}, LI Kai^{1,2,3}, LI Qin-heng^{1,2,3},
LU Lei⁵, WANG Zhi-yong⁵, WANG Peng-fei⁵

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environmental Ecology, Xi'an 710055, China; 4. Xi'an Water Supply Co. Ltd., Xi'an 710002, China; 5. Leyou Water Treatment Plant of Xi'an Water Supply Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the issues of high effluent turbidity and the reduced pollution interception capacity of homogeneous filter media in a water treatment plant located in Northwest China, the turbidity removal performance of old sand and new sand filter media were evaluated in a pilot filter system, focusing on the filter with obvious performance degradation. Under the identical operating conditions, the effluent turbidity of the old sand filter was approximately 0.2 NTU higher than that of the new one. The test results

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100102)

通信作者: 黄廷林 E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

of the filter media characteristics demonstrated that the most significant disparity between the old sand and the new sand lay in the gradation of the filter media and the proportion of fine sand. The removal efficacies of four filter systems, packed with old sand, old sand supplemented with fine sand, and two new sands with distinct particle size gradations, were further compared. The filter media featuring the same gradation yet distinct surface properties exhibited the identical removal efficacy on turbidity and particulate matters, which implied that the principal cause for the degradation of the filtration performance of the old sand lay in the alteration of the filter media gradation, and the filtration performance of the media could be restored through sand filling in accordance with the loss of gradation.

Key words: surface raw water; homogeneous filter media; deterioration of filtration performance; gradation of filter media

在地表水常规处理中,过滤是非常重要的工艺单元之一。但是,随着滤池使用时间的增加,滤料的截污能力会出现一定程度的下降。笔者以西安市某水厂运行约20年的均质石英砂滤料为研究对象,对其过滤性能进行评价,并利用中试滤柱系统探究旧砂滤料过滤性能下降的原因和内在机理,给出旧砂滤料性能恢复的可行性方案,以为水厂滤池的过滤性能恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 中试系统与进水水质

中试系统位于西安市某水厂,系统进水采用该水厂的地表原水。中试系统见图1,包括供水系统、砂滤系统、反冲洗系统。其中,供水系统包括混合反应池、网格絮凝池、斜管沉淀池和加药系统。

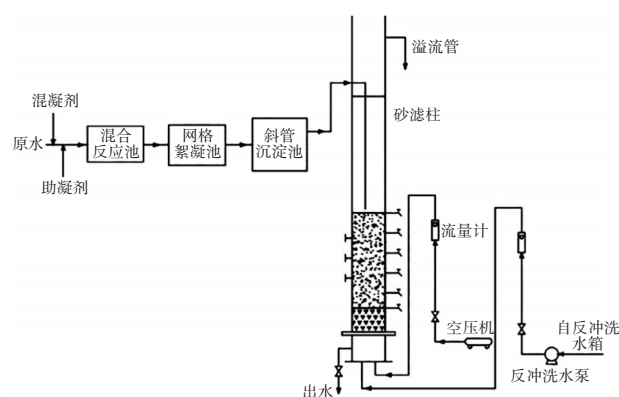


图1 中试滤柱系统

Fig.1 Schematics of pilot-scale filter system

原水经过絮凝沉淀以控制砂滤系统的进水浊度。砂滤系统有两组,第一组由两根不锈钢滤柱(A1、A2)组成,内径为400 mm、高为2.7 m;第二组由4根有机玻璃滤柱(1#~4#)组成,内径为100 mm、

高为2.7 m。滤柱从上到下依次为水头变化区、滤层、承托层和配水配气室。其中,配水配气室高度为150 mm;承托层厚度为150 mm,由粒径为8~15 mm的卵石构成;石英砂滤层厚度为110 cm,在滤层表面以上以及滤层表面以下10、30、50、70、90、110 cm深度处分别设置取样口。中试期间原水水质如下:pH为7.04~7.45,浊度为1.28~45.1 NTU, COD_{Mn} 为2.08~4.17 mg/L, NH_4^+-N 为0.17~0.41 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 旧砂与新砂滤料的除浊性能评价

根据水厂滤池出水浊度情况,选取4#滤池的旧砂滤料与新砂滤料分别填入中试滤柱A1和A2中。在运行周期内定时测定滤柱出水浊度,并测定沿程出水浊度和反冲洗水浊度。

根据水厂滤池运行参数确定滤柱运行条件如下:运行周期为24 h,滤速为8 m/h,在进水管加入3~6 mg/L助凝剂复合硅酸钠和10~15 mg/L混凝剂氯化铝铁,控制沉后水浊度在1.0~1.5 NTU。反冲洗参数如下:气冲4 min,强度为17 L/(s·m²);气水联合反冲7 min,气冲强度为17 L/(s·m²),水冲强度为5 L/(s·m²);水冲4 min,强度为5 L/(s·m²)。

1.2.2 旧砂与新砂滤料的特性分析

为探究旧砂滤料的特性变化,选择水厂运行较差的3个滤池(4#、10#和15#),测定旧砂滤料的含泥率、盐酸可溶率和球形度系数 $\psi^{[1]}$,并分析旧砂与新砂滤料的表面形貌和粒径级配(有效粒径 d_{10} 、限制粒径 d_{60} 、不均匀系数 K_{60} 等参数)。

1.2.3 旧砂滤料性能下降原因和恢复措施探究

为探明滤料级配和表面性质变化对其过滤性能的影响,并找到过滤性能恢复的方法,使用4根相

同的有机玻璃柱进行中试,运行条件与 1.2.1 节一致,滤料填充情况见表 1。其中,1#滤柱填充级配完整的新砂;2#滤柱填充使用水厂的跑砂(多为细砂)对旧砂进行补充后,与 1#滤柱新砂级配一致的旧砂补砂,这里的“细砂”指粒径<0.9 mm 和在 0.9~1.0 mm 范围的细砂;3#滤柱填充模拟跑砂后的新砂,级配与 4#滤柱填充的旧砂相同。通过控制变量法分别控制滤料表面性质和级配相同,考察各滤料的除浊性能,并在进水中加入 5 mg/L 的活性炭颗粒(200 目),对滤柱进、出水中的活性炭颗粒进行计数,考察各滤柱对活性炭颗粒的去除效果,进一步分析旧砂滤料过滤性能下降的主要原因和机理。同时,通过补砂试验(2#滤柱),给出旧砂滤料过滤性能恢复的方法。

表 1 滤料填充情况

Tab.1 Filter material filling

级配参数	1#滤柱	2#滤柱	3#滤柱	4#滤柱
	新砂 1 号	旧砂补砂	新砂 2 号	旧砂
d_{10}/mm	0.91	0.91	0.95	0.95
d_{60}/mm	1.16	1.16	1.25	1.25
K_{60}	1.27	1.27	1.32	1.32
细砂比例/%	29	29	16	16

2 结果与讨论

2.1 旧砂与新砂滤料的除浊性能评价

2.1.1 对浊度的去除效果

在一个运行周期内连续监测旧砂与新砂滤柱的出水浊度,结果如图 2 所示。可以看出,在整个运行周期内,旧砂滤柱的出水浊度始终比新砂滤柱高 0.2 NTU 左右,除浊效果差异明显。

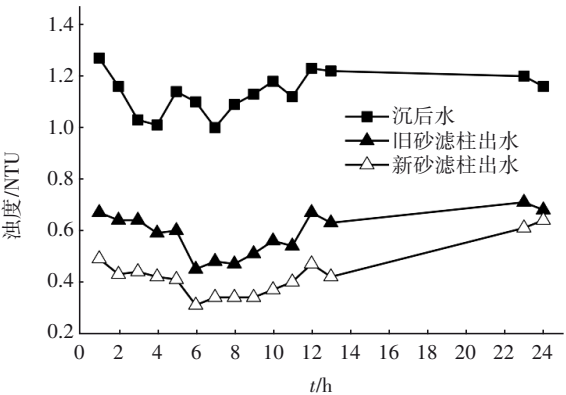


图 2 旧砂与新砂滤柱的出水浊度

Fig.2 Turbidity of effluent from filter column with old sand and new sand

2.1.2 沿程出水浊度变化

进一步测定了旧砂与新砂滤柱的沿程出水浊度变化,结果见图 3。可以看出,在整个滤层深度方向上,旧砂滤柱对浊度的去除效果明显低于新砂滤柱。均质滤料滤层自上而下的组成分布都相同,因此可以推测沿程出水浊度的差异可能是由于旧砂与新砂整体滤层的滤料粒径组成不同造成的。

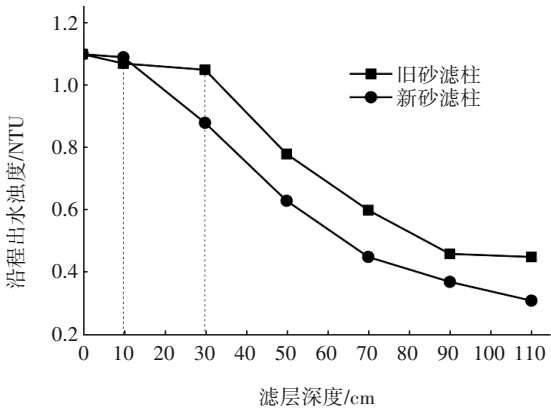


图 3 旧砂与新砂滤柱的沿程出水浊度

Fig.3 Turbidity of effluent along the filter column with old sand and new sand

2.1.3 反冲洗排水浊度变化

反冲洗排水浊度在一定程度上能够反映滤料的纳污能力^[2]。旧砂与新砂滤柱的反冲洗排水浊度变化情况如图 4 所示。可以看出,反冲洗排水浊度最高值出现在气水联合反冲洗阶段的中期。新砂滤柱反冲洗排水浊度在气水混冲阶段远高于旧砂滤柱,在单独水冲阶段也是如此,新砂滤料的纳污能力明显高于旧砂,这进一步说明旧砂和新砂滤料本身可能存在较大差异。

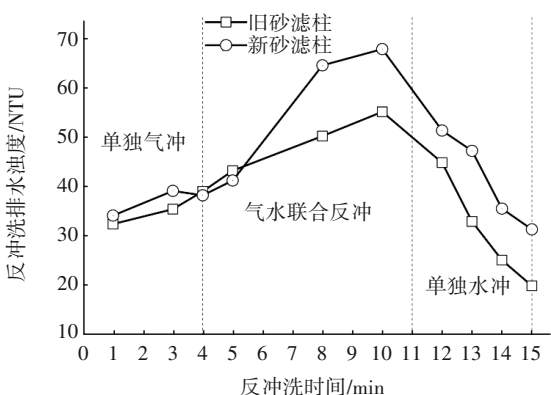


图 4 旧砂与新砂滤柱的反冲洗排水浊度

Fig.4 Turbidity of backwash water in filter column with old sand and new sand

2.2 旧砂与新砂滤料的特性分析

2.2.1 旧砂滤料的含泥率和盐酸可溶率

《水处理用滤料》(CJ/T 43—2005)标准中要求石英砂滤料含泥率 $<1\%$ 。而反冲洗后的滤料含泥率反映反冲洗无法正常剥离的杂质,通常以“含泥率 $\leq 0.2\%$ ”为标准来反映反冲洗效果。分别测定了反冲洗后4 $^{\#}$ 、10 $^{\#}$ 、15 $^{\#}$ 滤池不同深度处(15、30、45、60、80、105 cm)的滤料含泥率,结果如表2所示。可以看出,沿滤层深度方向的滤料含泥率均小于1%且区别不大,符合标准。但10 $^{\#}$ 和15 $^{\#}$ 滤池的滤料含泥率 $>0.2\%$,4 $^{\#}$ 滤池的滤料含泥率略低于0.2%,滤料截污能力不足或许与反冲洗效果不够好有一定关系。

表2 滤料含泥率

Tab.2 Sludge content of filter material

深度/cm	含泥率/%		
	4 $^{\#}$ 滤池	10 $^{\#}$ 滤池	15 $^{\#}$ 滤池
15	0.15	0.27	0.22
30	0.17	0.23	0.20
45	0.19	0.22	0.21
60	0.15	0.23	0.21
80	0.14	0.22	0.23
105	0.15	0.21	0.21

盐酸可溶率反映石英砂滤料的耐酸耐腐蚀性能和化学稳定性,《水处理用滤料》(CJ/T 43—2005)要求石英砂滤料的盐酸可溶率 $\leq 3.5\%$ 。4 $^{\#}$ 、10 $^{\#}$ 、15 $^{\#}$ 滤池不同深度滤料的盐酸可溶率的测定结果如表3所示。可以看出,各滤池滤料的盐酸可溶率均在规定范围内,说明使用时间的增加对滤料化学状态稳定性影响很小。

表3 滤料的盐酸可溶率

Tab.3 Hydrochloric acid soluble rate of filter material

深度/cm	盐酸可溶率/%		
	4 $^{\#}$ 滤池	10 $^{\#}$ 滤池	15 $^{\#}$ 滤池
15	0.13	0.10	0.14
30	0.13	0.10	0.25
45	0.12	0.10	0.15
60	0.12	0.20	0.30
80	0.11	0.30	0.14
105	0.15	0.20	0.16

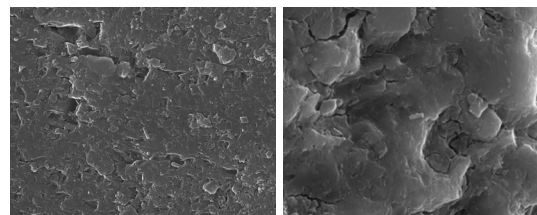
2.2.2 旧砂与新砂滤料的球形度系数 ψ

滤料颗粒形状对过滤性能的影响主要通过球形度系数来体现,颗粒的形状与球形越接近,球形

度系数就越大。水厂旧砂滤料(运行20年)的球形度系数 ψ 为0.91,新砂滤料的球形度系数 ψ 为0.79。由此说明,运行时间的增加提高了石英砂滤料的球形度系数,滤料颗粒的形状更接近球形,这对旧砂的过滤性能或许有一定影响。

2.2.3 旧砂与新砂滤料的表面特征

水厂旧砂与新砂滤料的表面形貌如图5所示。新砂滤料颗粒表面比较完整,颗粒表面粗糙且棱角分明;而旧砂滤料表面更光滑,粗糙度下降明显,且存在非常明显的破裂和缝隙。结合2.2.2节中球形度系数的变化,推测随着运行时间的延长,石英砂表面可能由于长期冲刷逐渐变得光滑,并且颗粒表面发生磨损破碎现象^[3]。石英砂颗粒的表面特征发生变化或许对石英砂过滤性能有一定影响^[4]。



a. 新砂滤料

b. 旧砂滤料

图5 新砂与旧砂滤料的表面特征

Fig.5 Surface characteristics of new sand and old sand

2.2.4 旧砂与新砂滤料的筛分和级配分析

分别对4 $^{\#}$ 、10 $^{\#}$ 、15 $^{\#}$ 滤池不同深度处(15、30、45、60、80、105 cm)以及深度混匀的滤料进行筛分,结果发现,在深度方向上,同一滤料的粒径级配和分布没有太大区别,说明在滤层深度方向上并未出现因水力分级而导致底部滤料截污能力不足的现象。

经过实际考察发现,水厂滤池有“跑砂”现象,对4 $^{\#}$ 、10 $^{\#}$ 、15 $^{\#}$ 滤池滤砂、新砂、建厂原砂、历史跑砂进行筛分,结果如图6所示。各滤料级配的差别主要出现在“细砂”部分,即粒径 <0.9 mm和在0.9~1.0 mm范围的占比,跑砂多为细砂。因此对不同滤砂的细砂占比进行比较,由筛分曲线确定了不同滤砂的 d_{10} 、 d_{60} 、 K_{60} ,结果见表4。《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)要求均质滤料 $d_{10}=0.9\sim 1.2$ mm、 $K_{60}<1.6$ 。可以看出,各滤池旧砂滤料的级配参数均在规定的范围内,其中4 $^{\#}$ 滤池的旧砂滤料与新砂的级配差距最大。结合4 $^{\#}$ 滤池实际出水浊度最高,猜测滤料除浊能力下降的主要原因可能是“跑砂”现象引起的滤料级配发生变化。

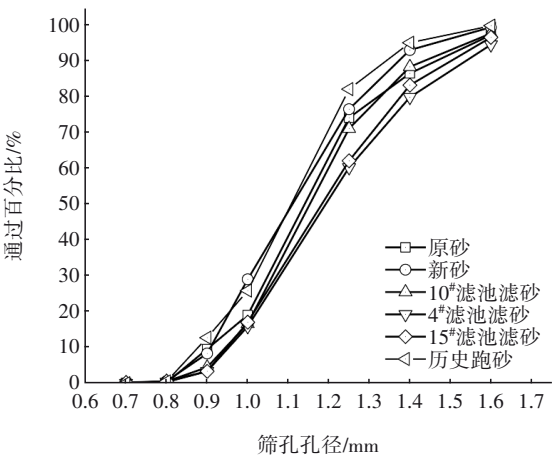


图6 不同滤料的筛分曲线

Fig.6 Sieving curves of different filter media

表4 滤料级配参数和细砂占比

Tab.4 Filter material grading parameters and proportion of fine sand

级配参数	4#滤池滤砂	10#滤池滤砂	15#滤池滤砂	新砂
d_{10}/mm	0.95	0.91	0.94	0.91
d_{60}/mm	1.25	1.16	1.24	1.16
K_{60}	1.32	1.27	1.32	1.27
细砂占比/%	15.8	16.4	16.8	29.0

2.3 旧砂滤料性能下降原因和恢复探究

2.3.1 浊度去除效果

连续监测4根滤柱的出水浊度,结果见图7。

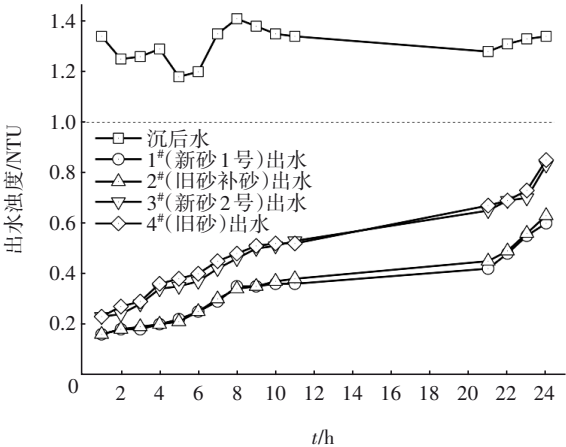


图7 不同滤柱的出水浊度

Fig.7 Turbidity of effluent from different filter columns

在整个运行周期内,滤料级配相同、表面性质不同的1#与2#(细砂占29%)滤柱出水浊度基本一致。细砂比例较小(16%)的3#与4#滤柱,滤料级配相同、表面性质不同,二者的出水浊度也基本保持一致,且始终高于1#与2#滤柱。而表面性质相同、级

配不同的1#和3#滤柱(新砂)及2#和4#滤柱(旧砂)的出水浊度具有明显差异。在运行周期末端,旧砂滤柱(2#、4#)的出水浊度仅仅比同一级配的新砂滤柱(1#、3#)高0.01 NTU左右,在浊度仪误差范围内。这说明石英砂颗粒表面性质的改变对除浊性能的影响可忽略不计,长期运行后石英砂滤料过滤性能下降的主要原因是滤料级配和粒径占比的变化,细砂比例更高的均质滤料除浊效果更好^[5-7]。

2.3.2 沿程出水浊度变化

各滤柱沿程出水浊度见图8。滤料级配相同、表面性质不同的滤柱,沿程出水浊度几乎相同;而滤料表面性质相同、级配不同的滤柱,沿程出水浊度具有明显差别,进一步说明旧砂截污能力下降的主要原因是级配缺失和细砂比例降低。

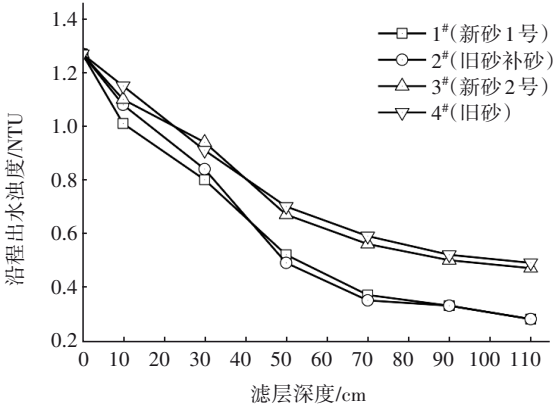


图8 不同滤柱沿程出水浊度

Fig.8 Turbidity of effluent along different filter columns

2.3.3 反冲洗排水浊度变化

各滤柱的反冲洗排水浊度测定结果见图9。

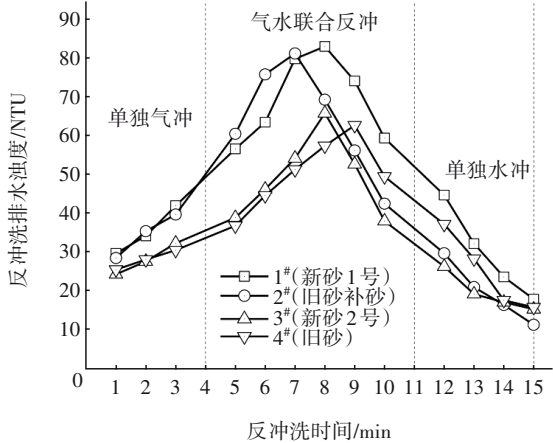


图9 不同滤柱反冲洗排水浊度

Fig.9 Turbidity of backwash water in different filter columns

由图9可知,滤料级配相同的滤柱,反冲洗排水浊度也基本接近,这说明级配相同的滤料在同一运行条件下具有相同的纳污能力^[2],而表面性质相同、级配不同的滤料层纳污能力具有明显的区别。

2.3.4 对粉末活性炭的去除效果

为进一步探究长期运行均质石英砂滤料过滤性能的下降原因和机理,以粉末活性炭为示踪颗粒物,在滤柱进水管加入粉末活性炭悬浮液,经过管道混合后进行过滤,考察不同滤柱对活性炭颗粒的去除效果。设置活性炭颗粒浓度在 $(70\sim 100)\times 10^4$ 个/L,采用光学显微镜进行计数,参考五点取样法^[8],采用十字交叉取样,每次取水样100 mL,使用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜进行过滤后,在滤膜(有效过滤面积为 $1\ 600\ \text{mm}^2$)上选取9个点进行取样,每个点取样面积为 $1\ \text{mm}^2$,取9个点的计数平均值,由此计算滤膜上的活性炭数量,从而计算每升水中的活性炭颗粒数。分别在运行1、3、6、8、10、22、24 h时对各滤柱进水和出水中的活性炭颗粒进行计数并计算去除率,结果如图10所示。

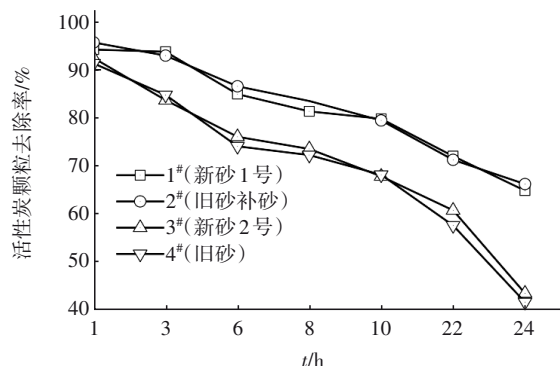


图10 不同滤柱对活性炭颗粒的去除

Fig.10 Removal rate of activated carbon particles by different filter columns

从图10可以看出,级配一致的滤料对粉末活性炭颗粒的去除率基本相同,细砂占比为29%的1#和2#滤柱对活性炭颗粒的去除率始终高于细砂占比为16%的3#和4#滤柱。这更加直观地说明,滤料的粒径级配尺寸可能是颗粒物去除效果的主要影响因素^[9],级配的缺失、细砂占比的减少使得旧砂滤料的过滤性能下降。

过滤作用主要有迁移和吸附两种机理,其中迁移作用主要取决于滤料颗粒的粒径和级配^[10-11]。因此认为,长期运行的石英砂滤料过滤性能下降主要是由于粒径级配变化引起过滤过程中迁移作用的

降低,迁移作用是影响水厂长期运行均质滤料过滤性能的主要内在机理。

由2#滤柱的试验结果可以看出,补砂后的旧砂恢复了与新砂1号相同的级配,二者对浊度和颗粒物的去除效果基本相同,这说明按照级配缺失进行补砂是非常有效的滤料性能改善方式,且较以往全部换砂的方式大大节约了成本^[12],以更加合理的方式恢复滤料过滤性能。

3 结论

① 同一条件下,运行20年的旧砂均质滤料出水浊度要比新砂滤料高0.2 NTU左右,纳污能力明显低于新砂滤料。

② 旧砂滤料的含泥率和盐酸可溶率测定结果表明,滤料的化学稳定性良好,反冲洗效果略有不足。旧砂颗粒较新砂更接近球形,表面更加光滑,粗糙度下降。

③ 旧砂与新砂均质滤料最大的差别是级配和粒径占比的不同。中试结果表明,级配相同、表面性质不同的滤料具有相同的截污效果,而表面性质相同、级配不同的滤料截污效果差异明显,滤料级配和粒径占比变化引起的迁移作用下降是旧砂滤料过滤性能下降的主要原因。

④ 按照级配缺失进行补砂,恢复滤料级配,可以有效恢复滤料的过滤性能,相比大规模换砂,可大大节约成本,对水厂均质滤料性能的恢复具有实际指导意义。

参考文献:

- [1] 张建锋,赵晨,张栋喆,等. V型滤池中气水反冲洗条件下滤层配置特征的变化[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(2): 270-273.
ZHANG Jianfeng, ZHAO Chen, ZHANG Dongzhe, et al. Revolution of filter media configurations with water and air scour backwashing in V-filter [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(2): 270-273 (in Chinese).
- [2] 林显增,张伟杰,邹振裕,等. V型滤池实现优化运行与维护的试验研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(5): 44-46.
LIN Xianzeng, ZHANG Weijie, ZOU Zhenyu, et al. Experimental study on operation optimization and maintenance of V-type filter [J]. China Water &

- Wastewater, 2012, 28(5): 44-46(in Chinese).
- [3] 杨华仙. 大型老旧水厂V型滤池改造实践[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 143-147.
- YANG Huaxian. Reconstruction practice of V-type filter in a large-scale old water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (20) : 143-147 (in Chinese).
- [4] 刘清霞,李国强,李景海,等. 微灌砂过滤器石英砂滤料颗粒粗糙度参数测算与分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 13-16.
- LIU Qingxia, LI Guoqiang, LI Jinghai, *et al.* Measurement and analysis of roughness parameters of quartz sand particles for sand filters in micro-irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (1) : 13-16 (in Chinese).
- [5] 周超. 深床过滤对水中颗粒物截留效果的实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- ZHOU Chao. Experimental Research on the Effect of Deep Bed Filtration on the Retention of Particles in Water[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [6] 彭进湖,何孙胃,陈丽珠,等. 细砂滤料的过滤性能及运行效果[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 40-45.
- PENG Jinhu, HE Sunwei, CHEN Lizhu, *et al.* Filtration performance and operation effect of fine sand filter [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1) : 40-45 (in Chinese).
- [7] 陈若娅,吴慧芳,李响,等. 粒径及滤层厚度对石榴石滤料的过滤性能影响研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(10): 1182-1187.
- CHEN Ruoya, WU Huifang, LI Xiang, *et al.* Study on the influence of particle size and filter thickness on filtration performance of garnet filter material [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41 (10) : 1182-1187 (in Chinese).
- [8] 王月. 混凝-沉淀工艺去除水中微塑料颗粒的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG Yue. Research on the Removal of Microplastic Particles from Water by Coagulation-Sedimentation Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese).
- [9] SEMBIRING E, FAJAR M, HANDAJANI M, *et al.* Performance of rapid sand filter-single media to remove microplastics [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2021, 21(5): 2273-2284.
- [10] 贾亚军,金同轨,张建锋. 过滤动力学浅析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2002, 34(2): 109-111.
- JIA Yajun, JIN Tonggui, ZHANG Jianfeng. A study on kinetics of filtration [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2002, 34(2): 109-111(in Chinese).
- [11] CESCO A, JIANG J. Filtration process and alternative filter media material in water treatment [J]. Water, 2020, 12(12): 3377.
- [12] 虞静静,何建荣,韦学玉,等. V型滤池运行与维护生产实例[J]. 市政技术, 2017, 35(3): 96-98.
- YU Jingjing, HE Jianrong, WEI Xueyu, *et al.* Case study of V-filter operation and maintenance [J]. Journal of Municipal Technology, 2017, 35 (3) : 96-98 (in Chinese).

作者简介:杜伊明(1994-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为地表水常规处理工艺中滤池滤料的性能优化。

E-mail:duyimingdu@163.com

收稿日期:2023-08-02

修回日期:2023-10-26

(编辑:刘贵春)