

给水厂砂滤池滤速变化对过滤性能的影响研究

王 玮¹, 王小侏², 史永浩^{2,3}, 范江涛⁴, 张建锋¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084;
3. 南京市规划和自然资源局高淳分局, 江苏 南京 211300; 4. 延安水务环保集团延河供水公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 基于生产滤池中滤速变化特征, 采用模型滤柱研究了滤速波动对滤后水浊度和滤层截留絮体分布的影响; 通过生产实测, 分析讨论了实际运行的 V 型滤池中滤速变化特征及其对滤后水浊度的影响。实验研究结果表明: 滤速波动的振幅和频率影响滤后水浊度和截留絮体分布, 在一定范围内振幅越大、频率越高, 滤后水浊度变化幅度越大、絮体在滤层的分布越均匀。生产实测表明: 滤速增加对滤后水浊度的影响在过滤后期较初期明显, 在滤速增幅和增长率基本一致的条件下, 过滤后期滤速增加会引起滤后水浊度升高; 小于 2.0 (m/h)/h 的滤速增长率, 无论是在过滤初期还是过滤后期都未引起显著的滤后水浊度增加; 成组布置的滤池组(格数 ≥ 10)中, 由其他滤池反冲洗引起的单格滤池强制滤速特征并不明显。

关键词: V 型滤池; 滤速; 浊度; 絮体分布; 水处理

中图分类号: TU991.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0453-06

Influence of fluctuating variation of filtration rate on sand filter performance

WANG Wei¹, WANG Xiaomao², SHI Yonghao^{2,3}, FAN Jiangtao⁴, ZHANG Jianfeng¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control,
School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Gaochun Branch of Nanjing Municipal Planning and Natural Resources Bureau, Nanjing 211300, China;

4. Yan'an Water Environmental Protection Group Yanhe Water Supply Co. Ltd. Yan'an 716000, China)

Abstract: Based on the fluctuating characteristics of filtration rate changes in production filters, a model filter column was used to study the effects of filtration rate fluctuations on the turbidity of filtered water and the distribution of intercepted flocs in the filter layer. The characteristics of filtration rate fluctuation in the actual Type V-filter and the influence on the turbidity of the filtered water were analyzed and discussed based on the measurement of filtered water. The results showed that the amplitude and frequency of filtration rate fluctuation affected the turbidity of filtered water and the distribution of intercepted flocs in the filter, and within a certain range, the larger the amplitude and the higher the frequency, the greater the variation of turbidity of filtered water and the more uniform the distribution of flocs in the filter layer. In practical operations, the increase of the filtration rate had a bigger impact on the turbidity fluctuation of the filtered water in the later filtration stage than that in the initial stage. With the same increases and growth rate of filtration rate, the turbidity of the filtered water in the later filtration stage increased significantly. The increase of filtration rate within a smaller rate (less than 2.0 (m/h)/h) did not induce the turbidity of the filtered water to fluctuate substantially either in the initial or later stage of filtration. The impact on the increase of forced filtration rate for a filter unit caused by the backwashing of other filter unit(s) in the filter group (units ≥ 10) was not obvious.

Key words: type V-filter; filtration rate; turbidity; flocs distribution in filter; water treatment

收稿日期: 2021-09-01 修回日期: 2023-04-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501-002)

第一作者: 王 玮(1999—), 男, 硕士生, 主要从事水处理理论与技术方向的研究。E-mail: 515638596@qq.com

通信作者: 张建锋(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事水处理与技术方面的研究。E-mail: zhangjianfeng@xauat.edu.cn

过滤是常规水处理工艺中截留水中悬浮胶体和微生物的最后一道屏障,对于保障供水安全和净水工艺稳定运行至关重要^[1-2]。过滤效果受滤料种类、级配、滤层厚度、滤速、水力波动、待滤水质等多因素影响,其中滤速影响尤其明显^[3-8]。根据过滤原理^[1],絮体粘附力和水流剪力的相对大小,决定了杂质颗粒与滤料之间粘附和脱落的程度,当滤速较低时,水流剪力较弱,滤层能够有效截留杂质颗粒,此时滤后水浊度较低、水质较好;当滤速较高时,水流剪力较强,原来附着在滤料表面的杂质颗粒被剥落下来,在滤层厚度一定的情况下会导致滤后水浊度增大、水质变差。因此,精细的滤速控制有助于保障出水水质。

目前国内应用广泛的V型滤池以恒水位恒滤速方式运行,但其滤速并非恒定不变。一方面,由于要维持滤池中水位的大致恒定,出水阀随水位的实时调节会引起滤池中滤速的周期性波动;另一方面,同一进水渠相连的其他滤池格反冲洗和水厂进水流量波动等也会引起滤速的间歇性波动^[9-10]。国内外以往的研究和监测多关注于恒定滤速或间歇性滤速波动^[11-18],目前关于V型滤池中周期性滤速变化、以及在此基础上叠加由于反冲洗或进水流量产生间歇性波动之后对滤后水浊度影响的研究缺失。基于供水水质安全不断提升的生产要求,有必要对此开展研究分析。本文通过模型滤柱试验和生产滤池实时监测,研究了模拟不同波动幅度和频率条件下模型滤柱出水浊度和滤层截留絮体分布的特征,通过监测实际生产滤池的出水浊度,分析讨论了实际生产V型滤池滤速波动原因及其对滤后水浊度的影响。以期生产滤池的高效运转提供依据。

1 材料与方法

1.1 方法简介

研究分为两个部分:(1)高岭土絮凝后模型滤柱试验中的波动滤速影响研究;(2)生产滤池的滤速波动及影响监测分析。在模型试验中,通过设置波动滤速与恒定滤速条件,探究两者对出水浊度以及滤层中截留絮体分布规律的影响差异;在生产性研究中,通过连续监测滤速和滤后水浊度,探究滤速变化对滤后水浊度的影响。浊度测定采用哈希2100P型便携式浊度仪和TU5300在线浊度仪。

1.2 高岭土絮凝过滤试验的波动滤速研究

选用2根有机玻璃柱作为模型滤柱,分别标识为A滤柱和B滤柱。模型滤柱内径234 mm,截面

积 $S=0.043\text{ m}^2$,装填 $d_{10}=0.96\text{ mm}$ 均质滤料,滤层厚度 $L=800\text{ mm}$ 。原水由高岭土悬浊液与自来水人工配制而成,加入聚合氯化铝(PAC)混凝剂通过管式反应器反应得到浊度为2.0 NTU左右的待滤水。A滤柱的进水流量分为 Q_1 和 Q_2 两部分,其中 Q_1 为恒定流量, Q_2 通过一个虹吸出水管长度可调节的装置实现出水流量的周期性波动, Q_1 和 Q_2 叠合实现滤速在一个平均流量基础上的周期性波动。A滤柱中采用A-1、A-2、A-3、A-4四种波动滤速(均值为8.0 m/h)过滤,波动幅度分别为7.23~8.77、7.60~8.40、7.23~8.77和6.72~9.18 m/h,波动周期分别为17.5、12.5、6.0和4.5 min,见图1。B滤柱为8.0 m/h恒速过滤作为对照。

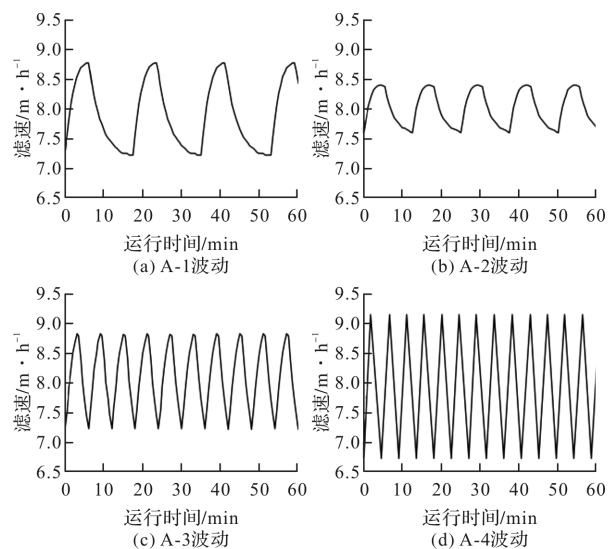


图1 四组波动滤速的周期变化特征

Fig. 1 Periodic variation characteristics of four wave filtration rate

1.3 滤层絮体分布的推求

通过分析滤层截留絮体分布规律,可以考察滤速波动对滤层截留悬浮颗粒性能的影响。在以往的研究中,一般使用不同滤层深度上体积比沉积量(σ_v),即单位体积滤层中所截留的絮体体积来表示滤层中絮体分布,但滤层各深度体积比沉积量很难直接测定。本研究利用已有数学模型^[19],即公式(1),通过测定水头损失增长梯度(H/H_0)推算截污滤层各深度 σ_v 。

$$\frac{H}{H_0} = \left(1 + \frac{\sigma_v}{(1-\epsilon_0)}\right)^{3.6} \left(1 - \frac{\sigma_v}{\epsilon_0}\right)^{-1} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为截污滤层初始空隙率,一; σ_v 为体积比沉积量, cm^3/cm^3 ; H_0 为清洁滤层水头损失,cm; H 为同一厚度截污滤层水头损失,cm。

本试验所选滤料 $\epsilon_0=0.44$,选择不同 σ_v 计算

相应 H/H_0 制表, 得出 σ_v 和 H/H_0 曲线关系. 将四组试验 H/H_0 值转化为滤层内体积比沉积量 σ_v , 即可求得四组波动滤速下体积比沉积量分布情况.

1.4 实际生产中的滤速变化研究

试验在广东某地表水厂进行, 滤池为采用均质滤料 $d_{10} = 0.95 \text{ mm}$ 的 V 型滤池, 滤层厚度 1.2 m , 设计滤速 9.12 m/h , 采用气水反冲洗, 其流程为: 气冲 ($16.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 3.0 min → 气冲 ($16.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) + 水冲 ($4.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 共 3.0 min → 水冲 1 ($4.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 3.3 min → 水冲 2 ($8.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 3.3 min → 静置稳定 3.0 min → 进水, 反冲洗过程总历时约 24 min . 水厂滤池组布设如图 2 所示.

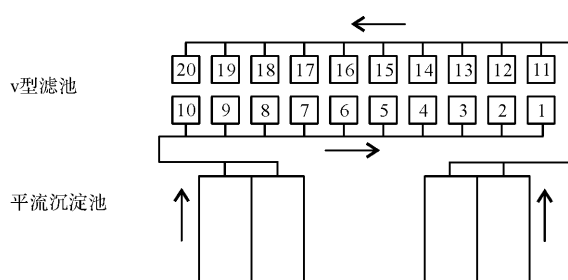


图 2 滤池布设图

Fig. 2 Arrangement of filters

受滤池进水和出水形式布设限制, 难以直接安装管道流量计对滤速进行测定, 考虑到薄壁堰流的堰前水位和过堰流量密切相关, 因此利用堰前水位监测来推求过堰流量和滤速. 选择 16 号滤池, 分别在滤池进水溢流堰处和滤后水封井处安装超声波液位计测定堰前水位高度, 并连接计算机实时记录过堰流量和滤速. 堰流量 Q 和滤速 V 的计算公式见式(2)和(3)^[20].

$$V = \frac{Q}{3600A} = \frac{m_0 b \sqrt{2gH}^{\frac{3}{2}}}{3600A} \quad (2)$$

$$m_0 = 0.403 + 0.053H/P \quad (3)$$

式中: Q 为滤池进水流量, m^3/s ; V 为滤速, m/h ; b 为堰宽, m ; H 为堰前水头, m ; A 为滤池面积, m^2 ; m_0 为流量系数; P 为堰高, m .

2 结果与分析

2.1 高岭土滤柱试验结果

(1) 波动滤速对滤后水浊度的影响

试验滤柱出水浊度变化情况见图 3, 结果表明: 在运行周期的前 5 个小时, 波动滤速和恒滤速的出水浊度情况基本相同; 但在运行周期的最后 4 h, 相对于恒定滤速过滤, 波动滤速的出水浊度变化幅度较大. 其原因在于: 运行初期清洁滤层

空隙率大, 此时水流剪力较小, 粘附作用占优势, 水中悬浮物主要被滤层上部分截留, 波动中的高滤速可以把悬浮物带入较深滤层, 但不足以带出滤层, 因此出水浊度受滤速波动影响不明显. 随着运行时间的推移, 滤层截留的悬浮物逐渐增加, 剪切力相对于粘附力逐渐明显, 于是悬浮颗粒开始向下层推移, 下层滤料的截留作用得到发挥. 此时, 高滤速将部分悬浮物带出滤层, 最终表现为过滤出水浊度波动变化幅度增大^[2].

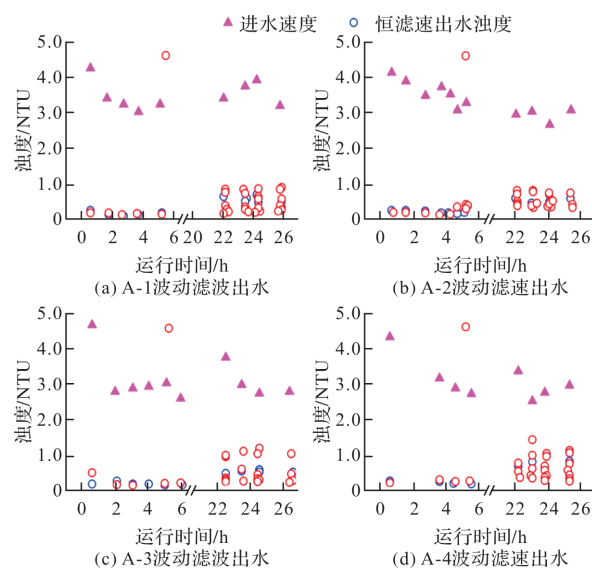


图 3 波动滤速试验出水浊度变化

Fig. 3 Variation of effluent turbidity in fluctuating filtration rate test

对比四组试验滤柱运行周期最后四小时出水浊度值的变化, 可以发现: 四种滤速波动条件下, 波动幅度最小的 A-2 组中, 出水浊度变化幅度为 0.49 NTU , 其浊度峰值为 0.83 NTU ; 相同波动振幅的 A-1、A-3 组, 高频率波动的 A-3 的出水浊度变化幅度大, 变化幅度为 0.92 NTU , 浊度峰值 1.19 NTU , 而 A-1 出水浊度变化幅度为 0.63 NTU , 峰值为 0.91 NTU ; 振幅最大、频率最高的 A-4 的出水浊度变化幅度为 1.11 NTU , 峰值为 1.41 NTU . 以上表明, 波动滤速的振幅和频率会导致滤池出水浊度波动差异, 振幅大、频率高的波动滤速其滤池出水浊度高, 浊度变化幅度大. 造成以上特征的原因在于: 振幅大的波动滤速, 剪切力变化幅度大, 较大的剪切力导致附着在滤料或杂质颗粒表面的悬浮固体剥落的数量增加, 从而导致滤后水浊度升高; 频率高的波动滤速, 其剪切力增加速度快, 本身已被粘附的悬浮固体剥落的比较集中, 表现为滤后水浊度变化幅度大^[21].

(2)截留絮体分布的比较

图 4 给出了体积比沉积量 σ_v 与滤层深度之间的关系. 在波动滤速和恒滤速下, 滤层中絮体分布呈现上多下少的趋势, 但在滤层上部, 恒滤速 (B) 条件下滤层截留絮体比波动滤速多, 在滤层深处则相反.

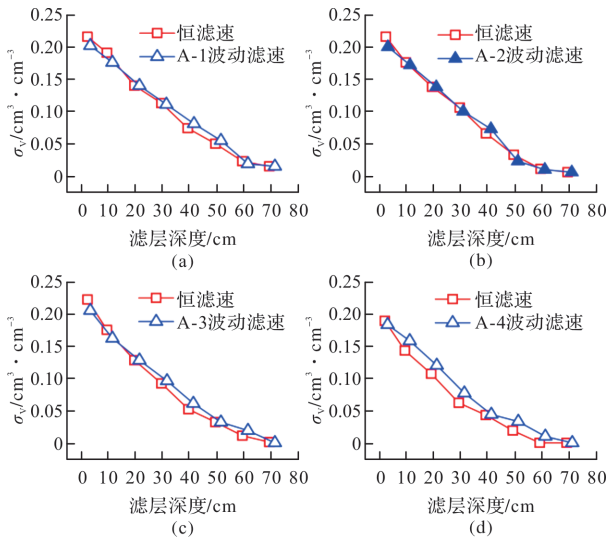


图 4 σ_v 与滤层深度关系

Fig. 4 Relationship between σ_v and filter depth

在滤层深处考察絮体分布特征, A-3 波动滤速与恒滤速 B 的偏差比 A-1 与 B 的偏差明显, 滤速振幅最小的 A-2 絮体分布与 B 偏差最小, 而振幅最大的 A-4 与 B 偏差最大. 这表明: 波动滤速会使滤层中絮体穿透性增强, 从而可以更充分发挥整个滤层的截污作用; 波动滤速振幅越高, 频率越大, 对絮体在滤层中的分布影响就越大. 恒滤速条件下絮体的粘附力和水流剪切力大小相对稳定, 絮体被粘附的位置也是随着运行时间的推移, 逐渐向下层推移, 但在波动滤速条件下, 还需要考

虑滤速波动产生的水流速度梯度周期变化, 这使得截留絮体在滤层中的穿透力增强、分布更均匀^[21]. 随着滤速波动的频率和幅度加大, 使得滤层絮体分布差异更加显著.

2.2 实际生产滤速波动特征

选取的滤池生产系列中同一进水廊道衔接的滤池共 10 格, 按照生产调度, 每格滤池的运行周期约为 35 h. 监测结果见图 5.

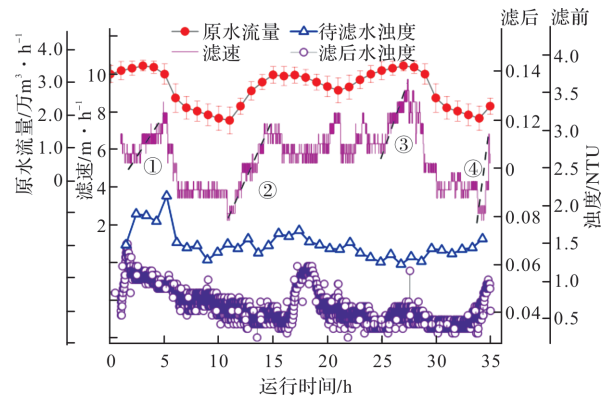


图 5 实际生产中滤池滤速和出水浊度变化

Fig. 5 Changes of filter rate and effluent turbidity in actual production

从 16# 滤池滤速的测量结果来看, 并没有呈现每 3~4 小时明显周期性变化特征(图 5), 这说明同一进水渠道相连接的其他滤池的反冲洗造成流量重新分配时, 监测滤池(16#)的滤速, 即强制滤速的变化特征并不明显, 这与同组滤池个数较多的特征相吻合.

为探究滤速增加对滤后水浊度的影响, 在监测滤池一个工作周期内选择滤速上升期、即图 5 中 ①、②、③、④所示的四个时间段进行分析, 其对应的滤速变化特征见表 1.

表 1 16# 滤池中滤速上升段的特征

Tab. 1 Characteristics of filtration rate during rising period in 16# filter unit

编号	滤速/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$			时间特征			速增加率/ $(\text{m} \cdot \text{h})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
	起	终	增加值	起	终	时长/min	
①	5.25	8.53	3.28	01:51:30	04:03:30	132	1.49
②	2.20	7.37	5.17	10:15:30	13:34:30	199	1.56
③	5.76	9.74	3.98	25:01:30	27:08:30	127	1.88
④	2.20	6.82	4.62	34:21:30	34:52:30	31	8.94

四个时间段的滤速和滤后水浊度的变化特征显示: 过滤前期的 ①、②段滤速增加率接近, ②段滤速升幅超 ①段 57.6%、起点滤速为 ①段 41.9%, 在待滤水浊度间断上升的情况下, ①、②段内滤后水浊度未见明显增加; 过滤中后期第 ③段内随着滤速从 5.76 m/h 增加至 9.74 m/h, 滤后水的浊度从

0.031 NTU 上升到 0.044 NTU; 时间段 ①和 ③的起点滤速和增幅接近, 但与 ①段的滤后水浊度下降特征相反, ③段滤后水浊度升高; 在过滤末期的 ④段, 尽管滤速增加的起点值 (2.20 m/h) 较低, 但过大的滤速增加率导致滤后水浊度从 0.031 NTU 急速升至 0.054 NTU. 在 ①至 ④的四组滤速上升

段，滤后水浊度增加值分别为 -0.021 、 0.013 、 0.013 、 0.022 NTU。这些特征表明：在实际滤池运行中，①滤层成熟期完成后过滤性能逐渐好转，此时一定范围内的滤速增加不会造成滤后水浊度上升的问题；②在过滤后期，随着滤层中截污量的增加，滤速升高会导致过滤性能下降，这在反冲洗前的过滤末期尤为明显。此结论与高岭土絮凝模型过滤试验结果吻合。

进厂原水流量、16 # 滤池滤速、待滤水及滤后水四个要素监测数据的 Person 相关性分析表明（见表 2），滤后水浊度主要受滤速和待滤水浊度影响，相对而言，滤速的影响更加显著。

表 2 生产要素的相关性系数

Tab. 2 Pearson correlation coefficient of production factors

	滤后水浊度	滤速	待滤水浊度	原水流量
滤后水浊度	1			
滤速	-0.57^*	1		
待滤水浊度	-0.36^*	0.20	1	
原水流量	0.07	-0.13	0.28	1

注：* 在 0.05 的水平下相关显著。

生产滤池中滤速的波动包括周期性波动及间歇性波动，前者主要受滤池运行控制方式决定，后者则与进厂原水流量波动和其他滤池反冲洗有关。实际监测期水厂的总取水量显示，该厂取水泵房临近入海口、受潮汐作用影响，进厂水流量的周期性日变化特征明显。水厂进水流量与 16 # 滤池滤速的相关系数为 0.13，为弱相关。在整个水厂稳定运行期间，与进厂原水流量变化特征相比较，单格滤池滤速受前端絮凝池、沉淀池工况（主要是排泥过程）以及同廊道其他滤池进水流量扰动的影响明显。因此，在实际运行管理中，单格滤池出水流量受取水泵站流量变化的影响不明显，即在滤池管理中不能仅关注原水流量的变化，单格滤池的流量负荷应该独立计量。

另外，生产滤池滤后水浊度变化受影响因素较多，不仅与滤速有关，同时还受到诸如原水浊度、前处理效果等的影响。例如滤池在运行 15 h 后出现浊度升高的情况，经过核查确认为该时间段内平流沉淀池排泥引起待滤水浊度升高，从而导致滤后水浊度升高。

3 结论

通过监测波动滤速下模型滤柱的出水浊度和滤层沉积量分布，对比分析了波动滤速与恒滤速条件对滤后水浊度和滤层截留絮体分布的影响，

考察了实际生产 V 型滤池中滤速波动原因及其对滤后水浊度的影响。结果表明：

(1)滤速波动的振幅和频率影响滤柱出水浊度和滤层絮体分布，在一定范围内振幅越大、频率越高，滤柱出水浊度变化幅度越大，絮体在滤层的分布越均匀；

(2)实际生产中，滤速升高及待滤水浊度间断性升高在过滤周期后期对滤后水浊度的影响较过滤初期明显；在相同滤速增幅和增加率条件下，相对于过滤初期，过滤后期滤后水浊升高；小于 $2.0\text{ (m} \cdot \text{h}^{-1})/\text{h}$ 的滤速增加率无论是在过滤初期还是过滤后期都未明显引起滤后水浊度增加；

(3)生产滤池的滤速波动受滤池进水量的影响，同一进水廊道衔接滤池格数较多（格数 ≥ 10 ）的情况下，同组其他滤池反冲洗对单格滤池滤速的扰动不明显。

参考文献 References

[1] 严熙世，范瑾初. 给水工程[M]. 第四版. 北京：中国建筑工业出版社，1999：315-357.
YAN Xushi, FAN Jinchu. Water supply engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture Publishing Press, 1999:315-357.

[2] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000：278-300.
XU Baojiu. Water treatment theories and principles [M]. Beijing: China Architecture Publishing Press, 2000:278-300.

[3] 余健，何元春，曾光明，等. 影响常规过滤因素的实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2002，29(3):108-113.
YU Jian, HE Yuanchun, ZENG Guangming, et al. Study on the influence on the performance of conventional filtration[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2002, 29(3):108-113.

[4] PARK N S, KIM S S, PARK D H, et al. The optimal composition of the filter-media for coping with daily flow-rate fluctuation[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(5):1492-1496.

[5] ADRIATI Y, PALLU M S, SELINTUNG M, et al. Relevance between filtration rate and filter media thickness in downflow filter systems[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Oranburg:IOP Publishing, 2020, 419(1):012130.

[6] ERICKSON Andrew J, JOHN S Gulliver, PETER T Weiss. Capturing phosphates with iron enhanced sand filtration [J]. Water Research, 2012, 46 (9): 3032-3042.

- [7] LETTERMAN Raymond D. An overview of filtration [J]. Journal-American Water Works Association, 1987,79(12):26-32.
- [8] SZE Y S, ARIS A, ZAIDI N S, et al. Performance of sand filtration system with different sand bed depth for polishing wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Treatment Techniques, 2021, 9(2):452-457.
- [9] 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.
- [10] 石啸. V 型滤池恒水位控制及滤池自动反冲洗控制方案[J]. 净水技术, 2015,34(S1):53-56.
SHI Xiao. V filter constant water level control and backwashing automatic control[J]. Water Purification Technology, 2015,34(S1):53-56.
- [11] 罗旭胜. 常规过滤影响因素的试验研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2008,17(1): 21-24.
LUO Xusheng. Trial research on influence element of regular filter of running water[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2008, 17 (1): 21-24.
- [12] 柯乐, 叶挺进, 李涛, 等. 给水厂滤池运行规律及其科学管理探索[J]. 给水排水, 2017, 53(9): 24-27.
KE Le, YE Tingjin, LI Tao, et al. Exploration of operation rules and scientific management of waterwork's filters[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(9):24-27.
- [13] 王海鸥, 王全勇, 孙东洋, 等. 北方某城镇净水厂滤池的运行评估[J]. 净水技术, 2020,39 (s1):68-73.
WANG Haiou, WANG Quanyong, SUN Dongyang, et al. Evaluation on operation of water treatment plant's filter in northern towns[J]. Water Purification Technology, 2020,39(s1):68-73
- [14] 曾洁, 陈正福, 吴尚书, 等. 炭砂滤池对农村饮用水中浊度及细菌的去除效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2736-2741.
ZENG Jie, CHEN Zhengfu, WU Shangshu, et al. Removal effect of turbidity and bacteria in rural drinking water by GAC-sand filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10):2736-2741.
- [15] 曾扬, 魏瑜冰. 水厂 V 型滤池配水均匀度优化[J]. 城镇供水, 2017(6): 12-15.
ZENG Yang, WEI Yubing. Optimization of water distribution uniformity of V-type filter in water plant[J]. City and Town Water Supply, 2017(6):12-15.
- [16] PARK N S, KIM S S, CHAE S H, et al. The effect of fluctuation in flow rate on the performance of conventional and membrane water treatment for a smart water grid [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 47(1-3): 17-23.
- [17] SABIRI Nour-Eddine, MONNIE Elodie, RAIMBAULT Virgine, et al. Effect of filtration rate on coal-sand dual-media filter performances for microalgae removal [J]. Environmental Technology, 2017, 38 (3): 345-352.
- [18] 张建锋, 张栋喆, 周超, 等. 滤层配置特征对砂滤池过滤性能的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014,46(5):737-741.
ZHANG Jianfeng, ZHANG Dongzhe, ZHOU Chao, et al. Effect of filter media configuration characteristics on the performance efficiency in quartz sand filter [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(5):737-741.
- [19] 张建锋, 王晓昌, 金同轨. 均质滤料过滤阻力的数学模型[J]. 环境科学学报, 2003,23(2):246-252.
ZHANG Jianfeng, WANG Xiaochang, JIN Tonggui. Mathematical model of head loss in uniform media filter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003,23(2): 246-252.
- [20] 中华人民共和国水利部. 明渠堰槽流量计计量检定规程: JJG(水利) 004—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Verification regulation of open channel weirs and flumes for flow measurement: JJG 004—2015[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [21] ELLIS J B. Water quality and treatment[M]. New-york: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

(编辑 吴海西 沈 波)