

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.007

砂滤池新旧滤料掺混试验研究及生产性应用

刘佳博^{1,2}, 白天宇^{1,2}, 罗文倩³, 岳士鹏⁴, 张怡然^{1,2}, 张志刚^{1,2},
马 娇^{1,2}

(1. 天津泰达水业有限公司, 天津 300457; 2. 天津泰达津联自来水有限公司, 天津 300457; 3. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000; 4. 天津华宇膜技术有限公司, 天津 300457)

摘 要: 砂滤池过滤是目前水处理工艺中常用的技术手段,其中滤料作为关键材料需要定期检测以符合水处理标准。以天津市某净水厂砂滤池旧滤料为研究对象,与不同有效粒径的新滤料进行掺混,通过过滤试验对比旧滤料、标准粒径滤料、掺混滤料的过滤效果及运行参数,通过筛分试验探讨滤料掺混更新的可能性并进行生产性应用。结果表明,新、旧滤料以相同比例混合后对出水浊度、耗氧量等指标有较好的去除效果,对比旧滤料运行情况,其出水浊度更稳定。实际生产中将旧滤料与有效粒径为0.75~0.85 mm的细滤料进行掺混,当掺混比为15%~20%时,能够满足水处理滤料有效粒径标准,可有效恢复水厂老旧滤池的过滤性能,相比整体更换滤料能明显降低成本。

关键词: 砂滤池; 滤料; 掺混; 过滤性能

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0047-06

Experimental Investigation and Practical Application of Blending Old and New Filter Media in Sand Filter

LIU Jia-bo^{1,2}, BAI Tian-yu^{1,2}, LUO Wen-qian³, YUE Shi-peng⁴, ZHANG Yi-ran^{1,2},
ZHANG Zhi-gang^{1,2}, MA Jiao^{1,2}

(1. Tianjin TEDA Water Industry Co. Ltd., Tianjin 300457, China; 2. Tianjin TEDA Tsinlien Water Supply Co. Ltd., Tianjin 300457, China; 3. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China; 4. Tianjin Huayu Membrane Technology Co. Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: Sand filter filtration is a widely adopted technology in current water treatment processes, wherein the filter media, as a critical component, requires regular testing to ensure compliance with the water treatment standards. The old filter media from the sand filter in a water purification plant in Tianjin was blended with new filter media featuring different effective particle sizes. Through filtration experiments, the filtering performance and operational parameters of the old filter media, standard filter media, and mixed filter media were systematically compared. Additionally, the feasibility of mixing for upgrading the filter media was evaluated via screening tests, followed by practical application in production. After the new and old filter media were mixed in equal proportions, the effluent demonstrated

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404002)

通信作者: 张怡然 E-mail: zyrzmw@163.com

improved performance in terms of turbidity and oxygen consumption removal. Additionally, the effluent turbidity remained more stable compared to the operation using only the old filter media. In full-scale application, blending the old filter media with fine filter media having the effective particle size of 0.75–0.85 mm could meet the effective particle size standard for water treatment filter media when the mixing ratio was maintained at 15%–20%. This approach effectively restores the filtration performance of the existing filters in water treatment plants while significantly reducing production costs compared to complete replacement of the filter media.

Key words: sand filter; filter media; blending; filtering performance

随着我国低碳、绿色经济的兴起和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的颁布,净水厂生产运行在保证供水水质安全的前提下,也逐步追求经济化和效益化^[1]。在自来水生产过程中,石英砂滤池作为地表水的常规处理工艺手段,已经广泛应用于我国大部分水厂。然而随着滤池运行时间的推移,均质石英砂滤料会出现老化、级配粒径变化等问题。已有研究表明,砂滤料有效粒径 d_{10} 的改变会影响出水浊度,并导致滤池运行周期的改变^[2-3]。另外,在滤池过滤时由于原水中悬浮颗粒在滤料空隙内的不断累积,当空隙内沉积颗粒的阻力大于滤料的附着力时,颗粒物才会继续向更深层的滤料表面附着,因此砂滤池往往会出现滤料表层局部含泥量较大的现象,在对滤池进行反冲洗时会使得滤料颗粒产生较大磨损,进一步可能会导致滤池截留水体杂质的效果变差。由于目前国内大部分水厂仍采用传统砂滤池过滤工艺,面对滤料老化、过滤性能降低的问题,只能采取增加深度处理的膜工艺或者更换新滤料的手段,工程成本较高。为了节约净水厂提质改造的成本,可以通过在保留部分旧滤料的基础上,适当掺混新砂滤料使滤池恢复过滤效果,从而满足出厂水水质达标的要求。

笔者以天津市某净水厂V型砂滤池表层旧滤料(有效粒径为1.05~1.10 mm)为基础,分别与不同级配参数的新滤料掺混后作为研究对象,通过过滤试验对比旧滤料、标准粒径滤料、掺混滤料在运行时出水浊度、耗氧量和水头损失等指标的变化情况,探究重新级配后掺混滤料的运行状况,旨在为实际生产中砂滤池滤料更换提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验过滤系统设置在天津某净水厂,进水为该

水厂经过炭吸附脉冲澄清池(UCR)处理后的出水。过滤系统装置见图1。系统包括原水箱、原水泵、反洗泵、反洗水箱、空压机和3根滤柱(从左至右分别为1#、2#、3#),同时配备自控系统。其中每根滤柱可分三层进行滤料填充,每层设有刀闸阀、卸料口、取样点,方便滤料的更换和出水浊度测定。过滤系统运行时进水流量为150 L/h,反冲洗时间为气洗60 s、气水洗480 s、漂洗360 s,反冲洗流量为60 L/h。

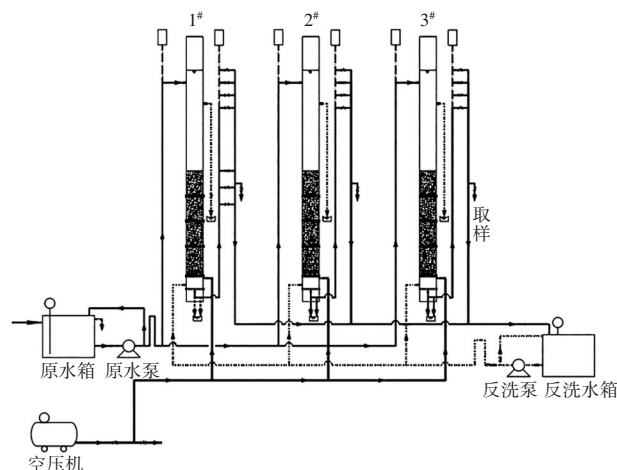


图1 过滤装置示意

Fig.1 Schematic diagram of filtration device

1.2 试验方法

1.2.1 不同有效粒径石英砂滤料的过滤性能

向滤柱中分别加入3种不同有效粒径的滤料。1#滤柱填充水厂滤池表层旧滤料(有效粒径为1.05~1.10 mm),2#滤柱填充新滤料1(有效粒径为0.90~1.00 mm),3#滤柱填充新滤料2(有效粒径为0.60~0.70 mm),3根滤柱高度均为120 cm。

当过滤系统运行稳定后,对3根滤柱出水进行采样并连续监测浊度、耗氧量和水头损失。浊度采用哈希便携式浊度仪测定,耗氧量采用水浴-酸性高锰酸钾滴定法测定。

1.2.2 不同掺混比例石英砂滤料的过滤性能

试验过滤系统参数与 1.2.1 节保持一致,1[#]滤柱全部填入水厂滤池旧滤料,2[#]滤柱全部填充新滤料,3[#]滤柱的填充滤料与水厂滤池旧滤料按照 1:1 (体积比)进行掺混。运行稳定后,对 3 根滤柱出水进行采样并连续监测浊度、耗氧量和 水头损失。

1.2.3 不同掺混比例石英砂滤料筛分试验

过滤系统运行结束后,结合 1.2.1 和 1.2.2 节的试验结果,对不同掺混比例的滤料进行筛分试验。取 300 g 待测滤料置于恒温箱烘干后,取 100 g 样品放在摇筛机进行摇筛。每组筛子按照筛孔的孔径(1.25、1.0、0.9、0.8、0.6、0.5、0.2 mm)大小排列,摇筛约 15 min 后,每分钟的筛出量不超过样品总量的 0.1% 时为止。对各筛上样品进行称量。保证所有筛子上剩余砂子质量与筛后砂子质量的总和相比于筛分前样品质量相差不超过 1%。

2 结果与讨论

2.1 不同有效粒径石英砂滤料的过滤性能

过滤系统的进水浊度为 0.60~0.70 NTU,耗氧量为 1.0~1.7 mg/L。对 3 根滤柱的滤后水定期测定浊度和耗氧量,直至过滤时间过长导致过滤性能严重下降,不同有效粒径滤料的过滤效果如图 2 所示。由图 2(a)可知,当过滤时间为 17.5 h 时,3 根滤柱出水浊度均能满足水厂内控标准(0.3 NTU),3[#]滤柱出水浊度最低,为 0.22 NTU。当过滤时间延长至 41.0 h 时,1[#]滤柱出水浊度为 0.39 NTU,在 3 根滤柱中最高,2[#]滤柱次之,为 0.33 NTU,3[#]滤柱仍可维持在 0.3 NTU。当过滤时间进一步延长至 65.5 h 时,1[#]和 2[#]滤柱滤后水浊度进一步升高,3[#]滤柱出水浊度仅有小幅升高,为 0.31 NTU,仍维持较好的过滤性能。当过滤时间为 89.5 h 时,1[#]滤柱滤后水浊度大于进水,表明经过约 90 h 过滤后,滤柱击穿,此时 2[#]和 3[#]滤柱的滤后水浊度也有大幅升高,过滤性能明显下降。由此可见,当滤料有效粒径较小时,对水中颗粒物的去除效果较好。彭进湖等^[4]通过控制滤前浊度,发现细砂滤料的滤后浊度远远小于常规石英砂滤料出水浊度。由图 2(b)可知,3 根滤柱滤后水耗氧量的变化规律与浊度相似,随着过滤时间的延长,3 根滤柱对耗氧量的去除率均呈现先升高后下降的趋势。当过滤时间达到 41.0 h 时,3[#]滤柱对耗氧量的去除率最高,可达 50%。当过滤时间为

89.5 h 时,3 根滤柱滤后水的耗氧量均高于进水耗氧量,进一步说明经过约 90 h 的过滤出现了滤柱击穿的现象。

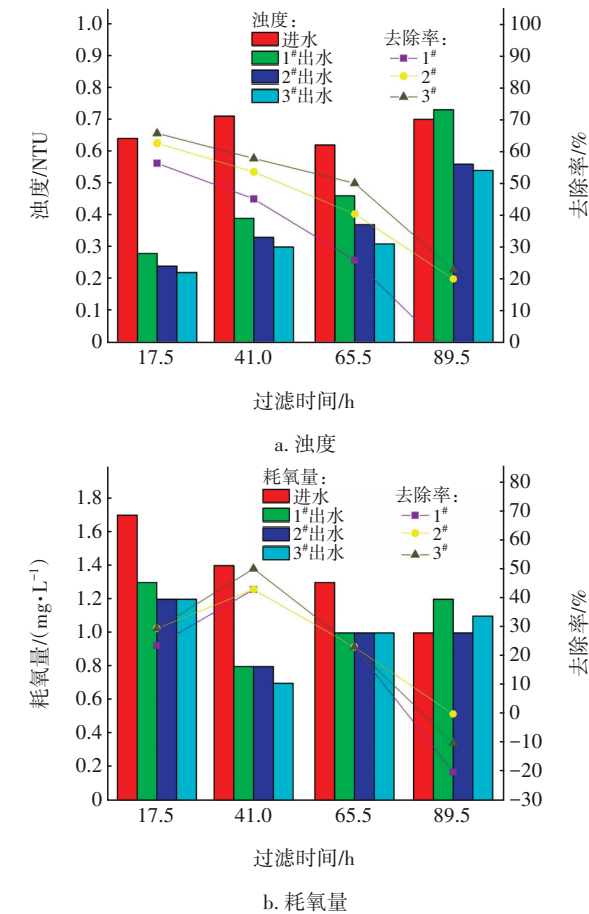


图 2 不同有效粒径滤料的过滤效果
Fig.2 Filtration effect of filter media with different effective particle sizes

对运行期间 3 根滤柱的水头损失进行跟踪记录,结果见表 1。

表 1 不同有效粒径滤料过滤试验的滤柱水头损失

Tab.1 Head loss of filter columns in filtration experiments with different effective particle sizes

过滤时间/h	1 [#] 滤柱水头 损失/cm	2 [#] 滤柱水头 损失/cm	3 [#] 滤柱水头 损失/cm
17.5	20	10	10
41.0	30	10	18
65.5	50	28	35
89.5	55	35	60

由表 1 可知,随着过滤系统运行时间的延长,水头损失也在逐步升高,其中细粒径的 3[#]滤柱水头损失在运行 89.5 h 后达到 60 cm。由上述分析可知,

采用比国标规定的标准粒径滤料($d_{10}=0.90\sim 1.00$ mm)细的滤料($d_{10}=0.60\sim 0.70$ mm)进行过滤,亦可达到较好的过滤效果,可为后续考察细滤料与原滤料组合成掺混滤料进行过滤的可行性提供依据。

2.2 不同掺混比例石英砂滤料的过滤性能

根据上述分析可知,采用细滤料与原滤料进行掺混的方式进行滤料更换具备一定的可行性。通过将细滤料与原滤料进行掺混,与标准粒径滤料和原滤料的过滤效果进行对比,分析不同掺混比例石英砂滤料的过滤性能。在进水浊度为 $0.15\sim 0.30$ NTU、耗氧量为 $0.8\sim 1.5$ mg/L条件下,对3根滤柱的滤后水定期进行浊度和耗氧量的测定,过滤时间在90 h左右,结果如图3所示。

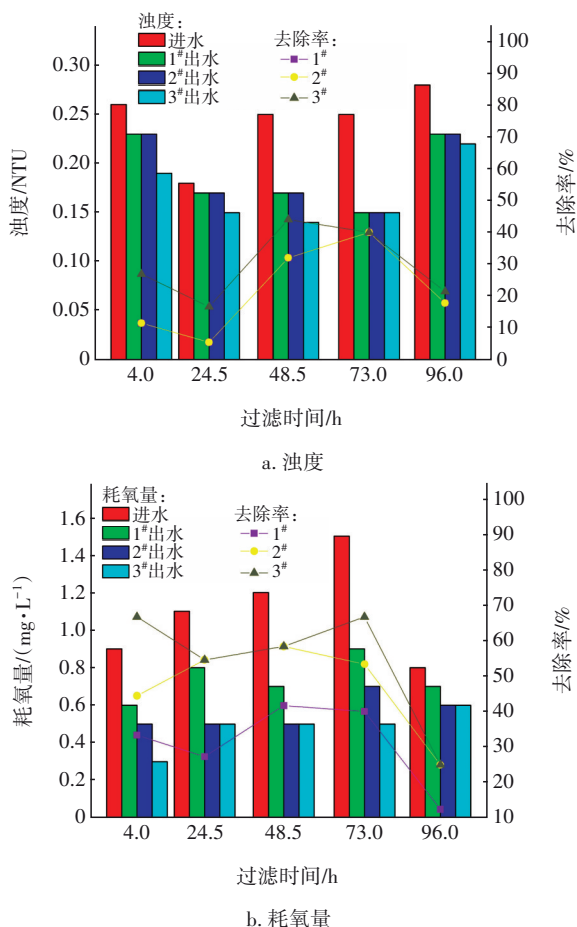


图3 不同掺混比例滤料的过滤效果

Fig.3 Filtration effect of filter media with different mixing ratios

由图3(a)可知,在前48 h左右的过滤时间内,填充掺混滤料的3#滤柱对浊度的去除效果最好,在48.5 h时浊度去除率达到最高(44%),这一现象与

王志勇等人^[5]的结果一致,经过掺混细砂滤料进行级配恢复后,滤池运行前4个月浊度去除率较低,但随着运行时间的延长,滤池截污能力明显增强。随着过滤时间的延长,3根滤柱对浊度的去除效果均有所下降,但在整个96 h的过滤时间内,填充掺混滤料的3#滤柱对浊度的去除效果均最好。由图3(b)可知,填充掺混滤料的3#滤柱对耗氧量的去除效果最好,在前73 h的过滤时间内均可达到50%以上,最高可达67%。说明原旧滤料与细滤料掺混后,滤料的有效粒径变小,随着细颗粒滤料的加入,颗粒之间的间隙也变小,水中一些有机杂质较难通过,使滤料整体的含污能力提高,增加了滤池的运行周期^[6-7]。当过滤时间为96 h时,3根滤柱对耗氧量的去除率均明显下降,说明随着过滤时间的延长,滤柱的过滤性能下降。

对运行期间3根滤柱的水头损失进行跟踪记录,结果见表2。可知,随着滤柱运行时间的延长,掺混滤料在运行过程中的水头损失小于1#滤柱的旧滤料,但大于2#滤柱的标准滤料。由于在本试验条件下,水头损失远小于滤池设计最大水头损失,因此对实际滤池的运行周期并不产生影响,说明对滤料进行掺混更换是可行的。

表2 不同掺混比例过滤试验的滤柱水头损失

Tab.2 Head loss of filter columns in filtration experiments with different mixing ratios

过滤时间/h	1#滤柱水头损失/cm	2#滤柱水头损失/cm	3#滤柱水头损失/cm
4.0	5	0	0
24.5	18	10	10
48.5	35	13	20
73.0	60	35	40
96.0	>60	45	60

2.3 不同掺混比例石英砂滤料的筛分

不同掺混比例下混合滤料的有效粒径和不均匀系数见表3。可知,当旧滤料掺混有效粒径为 $0.60\sim 0.70$ mm的细滤料时,随着新滤料掺混比例的降低,混合滤料的有效粒径逐渐增大,向 $0.90\sim 1.00$ mm的标准粒径范围靠拢。在长期使用过程中,理论上随着滤料高度的增加,净水厂滤池滤料的粒径会增大,因此滤池中旧滤料整体的有效粒径将大于小试中使用的表层旧滤料^[8]。结合上述试验结果并调研滤料更换厂家提供的历史资料,实际生产滤池

拟采用有效粒径为0.75~0.85 mm的细滤料进行掺混,掺混比在20%以内。

表3 不同掺混比下混合滤料的有效粒径和不均匀系数

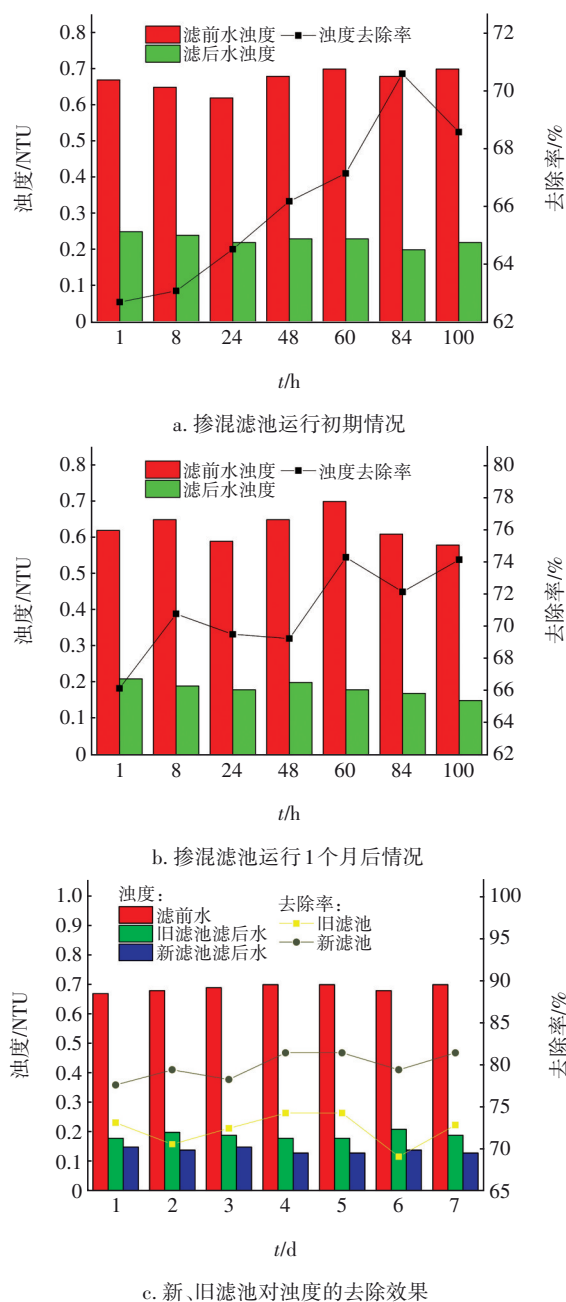
Tab.3 Effective particle size and non-uniformity coefficient of mixed filter media with different mixing ratios

掺混比	有效粒径 d_{10}/mm	d_{80}/mm	不均匀系数 K_{80}
旧:新=1:3	0.736	1.202	1.63
旧:新=1:1	0.773	1.367	1.77
旧:新=3:1	0.810	1.412	1.74
旧:新=4:1	0.812	1.400	1.72

2.4 生产性应用试验滤料掺混后过滤效果

对天津某净水厂部分砂滤池进行滤料掺混更换现场试验。先将原有旧滤料抽出90 cm后,将新滤料与旧滤料按照交替层铺的方式完成更新,同时通过滤池反冲洗将新、旧滤料掺混均匀,滤料最终厚度为120 cm。对掺混后的滤池进行取样后送往相关检测中心进行级配检测,结果显示按一定比例掺混后的新、旧滤料能够达到国家规定的有效粒径标准,各项指标均符合《水处理用滤料》(CJ/T 43—2005)标准值。

在掺混滤料滤池运行初期及正常运行1个月,对其出水浊度以及未更换滤料的旧砂滤池出水浊度进行监测,对比滤料掺混更换后新砂滤池与未更换滤料的旧砂滤池过滤效果,结果如图4所示。由图4(a)可知,在滤料掺混后初期运行时,滤前浊度为0.60~0.70 NTU,滤后浊度为0.22~0.25 NTU,浊度去除率在62.7%~70.6%。随着运行时间的延长,滤料经过进一步熟化后,对浊度的去除率达到66.1%~74.3%,如图4(b)所示。说明随着滤料的不断使用,新、旧滤料经过反冲洗磨合后,砂粒之间的孔隙也会逐渐变小,增大了对水中杂质的拦截效果,能够有效降低滤后水浊度^[9]。滤料掺混生产性试验正常进行1个月,在滤池进水水质相同(0.70 NTU左右)的情况下,更换滤料后的新砂滤池出水浊度稳定在0.15 NTU以内,过滤周期为48 h;未更换滤料的旧砂滤池出水浊度为0.18~0.20 NTU,过滤周期为36 h。综上所述,新、旧滤料掺混后滤池的过滤效果在一定程度上优于旧砂滤池,同时也解决了旧滤料有效粒径经过长期运行后附着的杂质过多造成粒径增大的问题。



c. 新、旧滤池对浊度的去除效果
图4 生产性应用后滤池过滤效果

Fig.4 Filtration effect of filter after full-scale application

3 结论

① 采用旧滤料、标准粒径滤料和小粒径滤料进行过滤,随着过滤时间的延长,滤后水浊度和耗氧量均呈现先下降后上升的现象。相比于旧滤料和标准粒径滤料,有效粒径为0.60~0.70 mm的细砂滤料过滤效果最好。

② 旧滤料与有效粒径为0.60~0.70 mm的细滤料进行1:1掺混后,过滤效果优于旧滤料和标准粒径滤料,且能有效提高滤池的运行周期。

③ 实际生产中将旧滤料与有效粒径为0.75~0.85 mm的细滤料进行掺混,掺混比在15%~20%时可以实现滤池整体滤料有效粒径在0.90~1.00 mm范围内,从而控制旧滤料的粒径级配,有效恢复水厂旧滤池的过滤性能,相比滤料整体更换能够明显降低经济成本。

参考文献:

- [1] 张怡然,李晨,张建柱,等.《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)解析[J]. 供水技术,2022,16(5):38-43.
ZHANG Yiran, LI Chen, ZHANG Jianzhu, *et al.* Interpretation on the Standards for Drinking Water Quality(GB 5749—2022)[J]. Water Technology, 2019, 16(5):38-43(in Chinese).
- [2] 许仕荣,安浩颖,黄茂林.均质滤料滤池反冲洗数值模拟及优化[J]. 安全与环境学报,2023,23(6):2111-2118.
XU Shirong, AN Haoying, HUANG Maolin. Numerical simulation and optimization of uniform media filter backwashing in filter [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6):2111-2118(in Chinese).
- [3] 梁越,周洋,吕平毓,等.颗粒级配影响滤层系统细颗粒迁移试验研究[J]. 水利水电技术,2020,51(4):152-158.
LIANG Yue, ZHOU Yang, LÜ Pingyu, *et al.* Experimental study on fine particle migration in filter layer system affected by particle gradation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4):152-158 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 王志勇,杜伊明,周娟,等.均质滤料级配恢复在净水厂的应用[J]. 供水技术,2022,16(6):39-43.
WANG Zhiyong, DU Yiming, ZHOU Juan, *et al.* Application of homogeneous filter material grading restoration in waterworks [J]. Water Technology, 2022, 16(6):39-43(in Chinese).
- [6] 冯硕,张晓健,陈超,等.炭砂滤池在饮用水处理中的研究现状及前景[J]. 中国给水排水,2012,28(4):16-19.
FENG Shuo, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao, *et al.* Research status and prospect of GAC-sand dual media filters used in drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(4):16-19(in Chinese).
- [7] 王玮,王小伟,史永浩,等.给水厂砂滤池滤速变化对过滤性能的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(3):453-458.
WANG Wei, WANG Xiaomao, SHI Yonghao, *et al.* Influence of fluctuating variation of filtration rate on sand filter performance [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(3):453-458 (in Chinese).
- [8] 张建锋,赵晨,张栋喆,等.V型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 & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(2):270-273(in Chinese).
- [9] 张晓娜,胡小芳,何嘉莉,等.不同粒径砂滤池处理微污染水源水的运行效果评价[J]. 中国给水排水,2024,40(1):45-50.
ZHANG Xiaona, HU Xiaofang, HE Jiali, *et al.* Evaluation of operational performance of filter packed with different particle size sands for treating micro-polluted source water [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(1):45-50 (in Chinese).

作者简介:刘佳博(1995—),男,陕西延安人,硕士,工程师,主要研究方向为给水处理。

E-mail:646143389@qq.com

收稿日期:2024-07-10

修回日期:2024-09-30

(编辑:任莹莹)