

朱琦炫, 陶辉, 罗雲鑫, 等. V型滤池运行效能下降诊断与优化——基于滤料运行参数的多因素分析[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 55-63.
Zhu Q X, Tao H, Luo Y X, et al. Diagnosis and optimization of V-type filter operational performance decline —— Based on multi-factor analysis of filter material and operation parameters [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 55-63.

V型滤池运行效能下降诊断与优化——基于滤料运行参数的多因素分析

朱琦炫^{1,2}, 陶辉^{1,2,*}, 罗雲鑫^{1,2}, 谢剑根³, 高俊³

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 江苏省城镇供水安全保障中心, 江苏南京 210098; 3. 江苏长江水务股份有限公司, 江苏扬州 225002)

摘要 【目的】针对江苏省某大型水厂($3.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$) V型滤池运行周期(48 h缩短至20~23 h)、滤速(9 m/h下降至6.98~7.35 m/h)导致能耗升高10%~15%及水质波动问题, 本文通过评估滤料特征与多因素分析, 优化运行参数, 以恢复滤池效能, 保障经济稳定运行。【方法】研究通过筛分滤料(表层0~0.1 m、中层0.5~0.7 m、底层1.1~1.2 m)分析级配特征, 检测生物量以评估微生物对滤层堵塞的影响; 利用X射线能谱分析(EDS)表征元素组成以判断滤料老化程度; 测定配水均匀性来诊断各滤格进水分配失衡问题; 并结合中试优化运行参数。【结果】滤料有效粒径(d_{10})由0.9~1.2 mm降至0.72~0.77 mm, 不均匀系数(K_{80})由1.2~1.3增至1.8~1.9; 表层生物量为 $6 \times 10^5 \text{ CFU/g}$ (底层为 $1 \times 10^4 \text{ CFU/g}$); 东、西面配水均匀度分别为75.7%和70.2%; 含泥量为1.4%~1.7%, 表层纳污量(0.5%)显著高于深层(<0.15%); 西面9年滤料二氧化硅质量分数(95.64%)低于东面4年滤料(97.58%)。【结论】建议水厂分级补砂优化级配、定期消毒控制生物膜、增设水头损失在线监测。中试及试运行表明, 分级补砂后运行周期由21 h提升至36 h, 滤速恢复至8.6 m/h; 消毒后表层生物量下降80%, 水头损失降低约10%; 在线监测可有效预警运行状态, 避免超负荷风险。本文为同类水厂滤池的优化改造提供了系统的技术路线和数据支撑, 对保障饮用水处理系统的长效稳定运行具有参考意义。

关键词 水厂; 砂滤池; 滤料级配; 配水均匀度; 生物膜; 微絮凝

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0055-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.006

Diagnosis and Optimization of V-Type Filter Operational Performance Decline —— Based on Multi-Factor Analysis of Filter Material and Operation Parameters

Zhu Qixuan^{1,2}, Tao Hui^{1,2,*}, Luo Yunxin^{1,2}, Xie Jiagen³, Gao Jun³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Security Support Center for Urban Water Supply of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Yangtze Water Affairs Co., Ltd., Yangzhou 225002, China)

Abstract [Objective] This paper addresses the issues of a 10%–15% increase in energy consumption and water quality fluctuations caused by the shortened filter run duration (from 48 h to 20–23 h) and reduced filtration rate (from 9 m/h to 6.98–7.35 m/h) in the V-type filters of a large water treatment plant (WTP) in Jiangsu Province ($3.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$). By evaluating filter media characteristics and conducting multi-factor analysis, this paper aims to optimize operational parameters, restore filter performance, and ensure economical and stable operation. [Methods] This paper conducted sieve analysis of filter media at different depths (0–0.1 m, 0.5–0.7 m, 1.1–1.2 m) to evaluate gradation characteristics. Biomass was quantified to assess the impact of microbial accumulation on filter clogging. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) was used to characterize elemental

[收稿日期] 2025-06-11

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC3208204)

[作者简介] 朱琦炫(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为饮用水处理与生产废水回收, E-mail: 1377199827@qq.com。

[通信作者] 陶辉(1981—), 男, 教授, 研究方向为饮用水处理理论与技术、膜科学与技术, E-mail: taohui@hhu.edu.cn。

composition, indicating the degree of media aging. Water distribution uniformity was measured to diagnose imbalanced inflow among filter cells. Pilot-scale experiments were further conducted to optimize operational parameters. [**Results**] The effective grain size (d_{10}) of the filter media decreased from 0.9–1.2 mm to 0.72–0.77 mm, while the uniformity coefficient (K_{80}) increased from 1.2–1.3 to 1.8–1.9. Surface layer biomass reached 6×10^5 CFU/g (compared to 1×10^4 CFU/g in the bottom layer). Backwash water distribution uniformity on the east and west sides was 75.7% and 70.2%, respectively. The mud content ranged from 1.4% to 1.7%, with surface layer sediment retention (0.5%) significantly higher than that in deeper layers (<0.15%). The silica dioxide content of the 9-year-old filter media on the west side (95.64%) was lower than that of the 4-year-old media on the east side (97.58%). [**Conclusion**] It is recommended that the WTP implement: stratified sand supplementation to optimize the gradation; periodic disinfection to control biofilm; and installation of online head loss monitoring. Pilot-scale and trial operation results show that after stratified sand supplementation, the filter run duration increased from 21 h to 36 h, and the filtration rate recovered to 8.6 m/h. Following disinfection, the surface layer biomass decreased by 80%, accompanied by an approximate 10% reduction in head loss. Online monitoring can effectively provide early warning of operational status and avoid the risk of overloading. This paper provides a systematic technical route and data support for the optimization and retrofitting of similar filter systems in WTPs, offering valuable reference for ensuring the long-term and stable operation of drinking water treatment systems.

Keywords water treatment plant (WTP); sand filter; filter media gradation; water distribution uniformity; biofilm; micro-flocculation

砂滤工艺作为饮用水处理流程中的关键工艺,其运行效能直接影响供水安全与处理成本。随着运行年限的增加,滤料性能的下降已成为影响水厂稳定运行的普遍因素^[1-2],表现为过滤周期缩短^[3]、产水量下降^[4]及能耗上升等典型特征。目前,水厂滤池大多采用V型滤池及均质石英砂滤料。V型滤池有布水均匀和气水反冲洗的特点,既提高了滤池的反冲洗效果又节约了用水量,且均质石英砂滤料较以往使用的其他滤料,截污能力大大增强^[5-6]。随着滤池运行时间的增长,各种问题逐渐出现,导致滤池过滤性能下降,出现出水水质变差的现象。国内外学者们通过长期研究发现,在V型滤池长期运行中影响滤池过滤效果的主要因素有滤速和滤层设计^[7-9]、滤料表面性质及使用时间^[10]、反冲洗效果^[11-12]及跑砂现象^[13]。

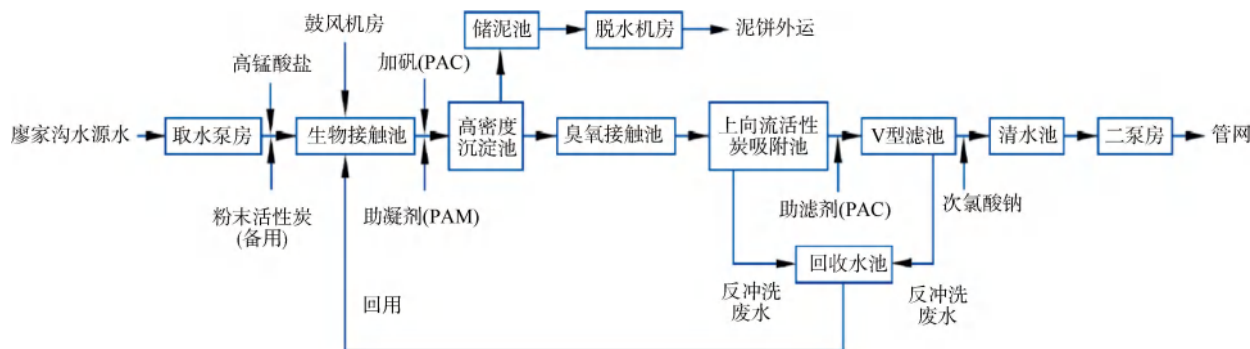
江苏省某大型水厂(设计规模为 3.5×10^5 m³/d)的V型滤池在长期运行中出现一定性能衰减、滤速出现低于设计标准的现象,这一现象在微絮凝强化过滤工艺基础上尤为值得关注^[14-15]。本文采用现场实测与实验室分析相结合的方法,系统考察了滤料级配、生物膜特征、滤料组成元素和配水均匀度等多项滤料特征,以期为滤池性能退化提供新的理论视角。

1 材料与方法

1.1 水厂概况

1.1.1 水处理工艺流程

该水厂供水规模为 3.5×10^5 m³/d,水源取自淮河入江水道廖家沟万福取水口。水厂采用“生物接触氧化池-高密度澄清池-臭氧接触池-生物活性炭池-V型滤池-消毒”的饮用水处理工艺。其中,水厂采用上向流生物活性炭池。上向流生物活性炭池



注:PAC—聚合氯化铝;PAM—聚丙烯酰胺。

图1 水厂水处理流程

Fig. 1 Water Treatment Process of the WTP

充分发挥了活性炭吸附和生物降解的协同效应,尤其在臭氧联用时,能广泛去除多种污染物,但也存在跑炭、生物膜脱落等难以避免的问题。

1.2 砂滤池运行情况

1.2.1 砂滤池概况

该水厂设置有 V 型滤池 2 座,每座分 10 格滤池,双排对称布置,共 4 组平行的处理线,砂滤池平面如图 2 所示。水厂设计规模为 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,全年供水量平均值为 $2.76 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,全年供水量最大值为 $3.13 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

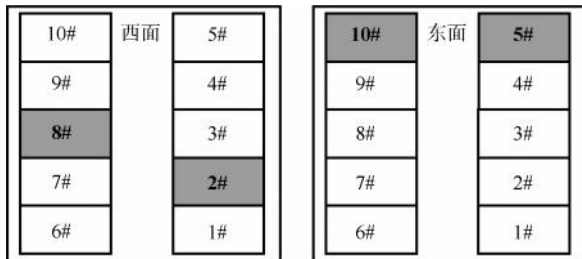


图 2 水厂砂滤池平面示意图

Fig. 2 Plan of the Sand Filter Pool

根据水厂运行经验,相较其他滤格,西池 8#和东池 10#在运行周期内排水阀开度多 10%~30%,运行末期产水能力下降,导致滤格运行周期降至 20~23 h;西池 2#和东池 5#存在配水渠进口流量与实际进水流量不一致,进水流量较低等现象。故选取以上 4 个滤格作为本文跟踪研究对象,滤格具体位置如图 2 所示。

该水厂砂滤池单格尺寸为 $7.9 \text{ m} \times 15.0 \text{ m}$ 、有效过滤面积为 94.5 m^2 、有效水深为 3.45 m、设计滤速为 9 m/h 。滤料为天然石英砂,有效粒径为 $0.9 \sim$

1.2 mm 、不均匀系数 (K_{80}) 为 1.25、滤层厚度为 1.20 m 、承托层石英砂粒径为 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 、厚度为 0.05 m 。采用恒水位(西面 1.2 m、东面 1.3 m)过滤。

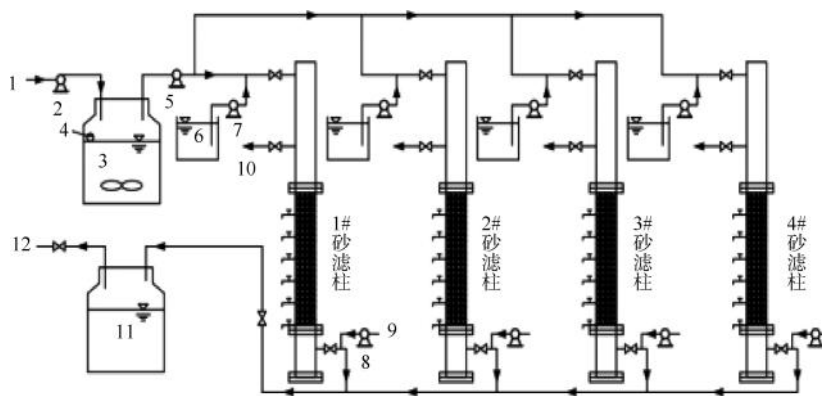
1.2.2 砂滤池运行参数

依据水池中水位的变化调节出水阀的开启度来实现等速的恒水位过滤。滤速测定选择在过滤周期刚刚结束而反冲洗尚未开始的滤池水位下降阶段,此时滤池进水阀、反冲洗排水阀保持关闭状态,排水阀开启度最大。经测定,西 2#、西 8#、东 5#和东 10#滤速分别为 $(7.19 \pm 0.48) \text{ m/h}$ 、 $(6.98 \pm 0.74) \text{ m/h}$ 、 $(7.00 \pm 0.53) \text{ m/h}$ 、 $(7.35 \pm 0.63) \text{ m/h}$ 。结果表明各滤池平均滤速差异在 $\pm 0.50 \text{ m/h}$,可以认为各滤池滤速基本保持一致,但各滤速均低于设计滤速 9 m/h 。

水厂微絮凝投加 PAC 与高密度澄清池所用絮凝剂一致,PAC 中氧化铝 (Al_2O_3) 的质量分数为 10%。PAC 溶液进入溶解池加水稀释至 20%,稀释后 Al_2O_3 质量分数为 2%,在万福闸开闸泄洪期间,受原水水质变差影响,PAC 溶液稀释至 30%,稀释后氧化铝质量分数为 3%。在上向流活性炭池出水流入中间水渠,通过 2 根 DN1800 钢管与 2 座 V 型滤池相连,在每根出水钢管中安装环形不锈钢加药管(DN40),投入助滤剂 PAC。根据日供水量和处理水质的变化,调节 PAC 投加流量,通过单位换算得到实际 PAC 投加量为 $1.5 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 。

1.3 砂滤中试装置

为了对水厂砂滤工艺进行运行参数优化,在水厂建立砂滤工艺模拟中试装置进行试验,流程示意图和现场图分别如图 3~图 4 所示。



注:1—进水;2—潜水泵;3—进水箱;4—液面启动;5—进水泵;6—药剂;7—加药泵;8—反冲洗泵;9—反冲洗进水;10—反洗废水;11—储水箱;12—出水。

图 3 砂滤工艺中试流程图

Fig. 3 Pilot-Scale Flowchart of the Sand Filtration Process



图 4 砂滤工艺中试现场装置图

Fig. 4 Diagram of the Pilot-Scale Setup for the Sand Filtration Process

生产中的生物活性炭池出水通过水泵加压,从砂滤柱的上端接口流入砂滤柱,在此之上,必要时通过加药泵利用文丘里管向进水中投加药剂,出水由储水桶收集作为砂滤柱反冲洗进水。砂滤柱的用于气冲的气体通过空气压缩机产生。通过控制蠕动泵的转速控制水中的药剂投加量,砂滤柱的流量可通过进水泵进行调节。

该中试装置由 4 根砂滤柱组成,材料采用有机玻璃,在砂滤柱底部的承托层均采用 10 cm 砾石,承托层上分别填入均质石英砂,填料与水厂实际工艺完全相同。各装置的具体规格参数如表 1 所示。

表 1 中试试验装置设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Pilot-Scale Experimental Unit

| 设计参数 | 数值 |
|-------|-------|
| 砂滤柱高度 | 3.5 m |
| 砂滤柱直径 | 10 cm |
| 承托层高度 | 10 cm |
| 砂层高度 | 1.2 m |

2 结果和讨论

2.1 滤料特征分析

2.1.1 滤料厚度

V 型滤池因其高自动化程度和稳定的处理效果,在净水工艺中广泛应用。然而在实际生产运行

过程中,滤池的气-水反冲洗过程存在不同程度滤料流失^[16-17](跑砂)等问题。

该水厂于 2015 年和 2019 年分别对西面和东面滤池补砂,砂层厚度补充至设计值 1.20 m,东、西面 V 型滤池的滤层厚度测量结果如表 2 所示。由表 2 可知,西滤池投入生产 9 年,砂层厚度下降明显。西滤池 85% 的滤格滤料跑失率超过 10%,其中 3# 南侧最高,滤料跑失率达到 22.5%,需对滤头进行检查,建议尽快补砂。东面滤池砂层厚度均在允许范围内,10# 南侧下降 10%,建议补砂并检查滤头;7# 南侧砂厚超 5.8%,可人工翻砂至北侧。

表 2 砂层厚度测试结果

Tab. 2 Test Results of Sand Layer Depth

| 滤池序号 | 方位 | 西面滤池 | | 东面滤池 | |
|------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 砂厚度/ m | 滤料 跑失率 | 砂厚度/ m | 滤料 跑失率 |
| 1# | 南侧 | 1.09 | 9.2% | 1.19 | 0.8% |
| | 北侧 | 1.08 | 10.0% | 1.19 | 0.8% |
| 2# | 南侧 | 1.04 | 13.3% | 1.21 | -0.8% |
| | 北侧 | 1.04 | 13.3% | 1.22 | -1.7% |
| 3# | 南侧 | 0.93 | 22.5% | 1.17 | 2.5% |
| | 北侧 | 1.01 | 15.8% | 1.19 | 0.8% |
| 4# | 南侧 | 1.04 | 13.3% | 1.17 | 2.5% |
| | 北侧 | 1.06 | 11.7% | 1.15 | 4.2% |
| 5# | 南侧 | 1.09 | 9.2% | 1.18 | 1.7% |
| | 北侧 | 1.01 | 15.8% | 1.17 | 2.5% |
| 6# | 南侧 | 1.02 | 15.0% | 1.21 | -0.8% |
| | 北侧 | 1.03 | 14.2% | 1.20 | 0.0 |
| 7# | 南侧 | 1.03 | 14.2% | 1.27 | -5.8% |
| | 北侧 | 1.04 | 13.3% | 1.10 | 8.3% |
| 8# | 南侧 | 1.00 | 16.7% | 1.18 | 1.7% |
| | 北侧 | 1.04 | 13.3% | 1.10 | 0.8% |
| 9# | 南侧 | 1.03 | 14.2% | 1.16 | 3.3% |
| | 北侧 | 1.05 | 12.5% | 1.10 | 8.3% |
| 10# | 南侧 | 1.06 | 11.7% | 1.08 | 10.0% |
| | 北侧 | 1.01 | 15.8% | 1.16 | 4.2% |

注:V 型滤池设计滤料厚度为 1.20 m,砾石厚度为 0.05 m;测量值为 V 型槽下端与砂层表面垂直距离(设计值为 0.40 m);砂层厚度下降 10% 时,必须补砂,且 1 年最多 1 次。

2.1.2 滤料级配

滤料级配直接影响滤池截留浑浊度和颗粒物性能^[18],因此需优选适宜滤料级配,进而延缓滤池的堵塞,增长砂滤池运行周期,同时提高滤池抗负荷冲

击的能力。随机选取东面、西面各 1 格滤池,沿滤池深度分别取表层(0~0.1 m)、中层(0.5~0.7 m)和底层(1.1~1.2 m)砂样,对砂样干燥后使用筛分法确定石英砂滤料的 d_{10} 和 K_{80} ($K_{80} = d_{80}/d_{10}$),其中, d_{10} 表示滤料中 10% 的颗粒直径小于该值; d_{80} 表示滤料中 80% 的颗粒直径小于该值,滤池滤料规格检测结果如表 3 所示。

表 3 不同滤池滤料规格

Tab. 3 Different Specifications of Filter Media for Different Filter Pools

| 滤池编号 | 滤料深度/m | 设计滤料规格 | | 实测滤料规格 | |
|-------|---------|--------------------|----------|--------------------|----------|
| | | d_{10}/mm | K_{80} | d_{10}/mm | K_{80} |
| 东池 8# | 0~0.1 | | | 0.77 | 1.85 |
| | 0.5~0.7 | 0.90~1.20 | 1.2~1.3 | 0.74 | 1.84 |
| | 1.1~1.2 | | | 0.74 | 1.82 |
| 西池 5# | 0~0.1 | | | 0.72 | 1.91 |
| | 0.5~0.7 | 0.90~1.20 | 1.2~1.3 | 0.72 | 1.89 |
| | 1.1~1.2 | | | 0.73 | 1.91 |

东池 8# 和西池 5# 滤池中现状滤料级配的检测结果表明,东、西面的滤池中,滤料样品有效粒径 $d_{10} = 0.72 \sim 0.77 \text{ mm}$, 相比设计滤料规格 $d_{10} = 0.90 \sim 1.20 \text{ mm}$ 显著降低,这一变化引起过流阻力(水头损失)增加,对实际生产中滤池的产水能力造成影响,运行周期由 48 h 降低至 24 h。同时,不同深度滤料的 d_{10} 和 K_{80} 值相近,差异不明显。均匀系数 K_{80} 数值相比设计滤料规格 K_{80} 增加约 50%,该数据说明滤料粒径差别很大,分布极不均匀。并且滤池不同深度的滤料变细,滤料间孔隙率减小,运行中表层滤料孔隙很快被截留的大絮体充满,仅仅是表层滤料发挥了功能,中、下部滤料未能发挥作用导致滤池运行周期缩短;近 10 年的使用,滤料发生破碎、形体改变,导致滤池功能下降、运行周期缩短、产水量降低。

2.1.3 滤料含泥量

本文将运行周期结束后,在反冲洗后的含泥量作为滤池运行过程中的重要参考指标,试验结果如图 5[实际生产中不同滤池条件下,沿进水方向滤层不同深度处(20、60 cm 和 100 cm)的反冲洗后含泥量实际情况]所示。

由图 5 可知,东、西滤池含泥量随深度增加均呈下降趋势,但二者在表、中层(20、60 cm)存在显著差异。东滤池表、中层含泥量约为 $1.64\% \pm 0.02\%$, 高于西滤池的 $1.52\% \pm 0.03\%$,可能与东滤池运行年

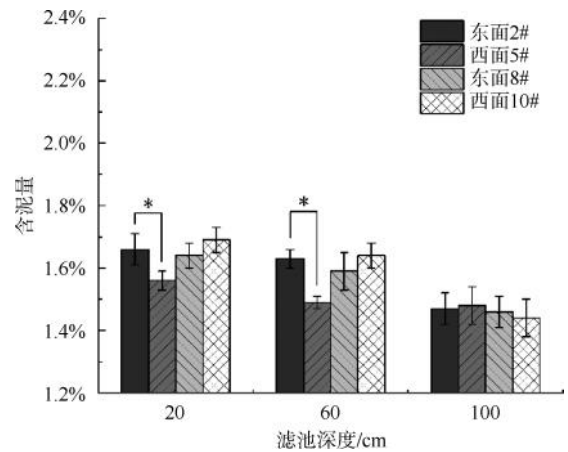


图 5 不同滤池滤料含泥量随滤层深度的变化

Fig. 5 Variation of Mud Content in Different Filter Media with the Filter Layer Depth

限较短、上层滤料纳污能力更强有关。滤料深层(100 cm)含泥量无显著差异,说明滤池深层截污能力基本一致。整体上看,测得的滤池不同深度含泥量为 1.4%~1.7%。不同砂层含泥量区别较大,表层含泥量较高,含泥量的高低往往和水中杂质类型相关,滤前投加 PAC。深层含泥量较低,可能是水厂采用微絮凝技术投加 PAC 后,高分子架桥凝聚为絮凝主导作用,水中杂质颗粒所形成的絮体被表层滤料所截留,杂质颗粒难以随水流向深层流动,导致颗粒穿透深度不够,因此深层滤料含泥量较低,深层滤料的截污能力未得到充分利用^[19]。

2.1.4 滤料破碎率和磨损率

破碎率和磨损率是石英砂滤料质量优劣的一个重要指标,通常情况下,石英砂滤料在运行生产过程中破碎率和磨损率会发生一些变化,影响滤池正常运行。根据《水处理用滤料》(CJ/T 43—2005)规定,滤料的破碎率及磨损率之和 < 2%。不同滤池滤料破碎率和磨损率测量结果如表 4 所示。根据测量发现,4 格滤池破碎率和磨损率之和为 0.74%~1.58%,均满足规定要求。

表 4 不同滤池滤料破碎率和磨损率变化

Tab. 4 Changes in the Breakage Rate and Wear Rate of Filter Media in Different Filter Pools

| 滤池编号 | 破碎率 | 磨损率 | 合计 |
|--------|-------|-------|-------|
| 东面 2# | 0.60% | 0.46% | 1.06% |
| 东面 8# | 0.46% | 0.28% | 0.74% |
| 西面 5# | 0.58% | 0.64% | 1.22% |
| 西面 10# | 1.03% | 0.55% | 1.58% |

2.1.5 滤料纳污量

本节采用反冲洗前后含泥量的差值来表征滤料的纳污量。纳污量测定结果如图 6 所示,4 格滤池呈现的趋势基本一致,随滤池深度增加,滤料纳污量由 0.5% 左右逐渐递减至低于 0.15%。总体来说,东滤池表、中层纳污量($0.43\% \pm 0.1\%$) 高于西滤池($0.35\% \pm 0.09\%$),也印证了表、中层滤料在微絮凝作用下的优势截污性能。随着深度增加,东西滤池纳污量差异逐渐减小,至底层(100 cm)趋于一致(约为 0.13%),说明滤池深层纳污能力不受使用年限影响,主要受滤料级配与运行方式控制。根据过滤理论,在过滤刚开始不久,悬浮固体大部分是由表面滤料截留,随着过滤时间增加,去除悬浮固体的任务也转移到下层^[20]。水厂采用微絮凝强化过滤技术,PAC 吸附架桥所形成的大颗粒进一步增加了表层纳污量,悬浮固体难以穿透滤层进入深层,深层滤层尚未完全发挥纳污能力,就必须进行反冲洗^[21]。

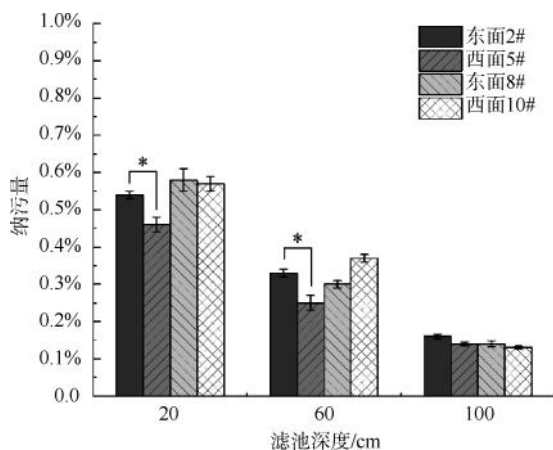


图 6 不同滤池滤料纳污量随滤层深度的变化

Fig. 6 Variation of the Dirt-Holding Capacity of Filter Media in Different Filter Pools with the Filter Layer Depth

2.1.6 滤料元素组成

利用 X 射线能谱分析(EDS)测定了不同滤池的滤料表面元素的组成,结果如图 7 所示。4 格滤料元素组成绝大部分为二氧化硅(SiO_2);东面 2#、东面 8#、西面 5# 和西面 10# 滤料 SiO_2 质量分数分别为 97.88%、97.58%、96.76% 和 95.64%,此外还含有少量的 Al、Ca、Mn、Mg 和 Fe 等元素,这些元素可能随着运行时间的不断增加,逐渐负载在石英砂表面。东面滤池 SiO_2 质量分数相较于西面滤池更高,这是因为东面滤池于 2019 年进行补砂,而西面滤池的滤料使用近 10 年。这说明,随着石英砂使用年限

的增大,滤料元素组成中 SiO_2 质量分数逐渐降低。

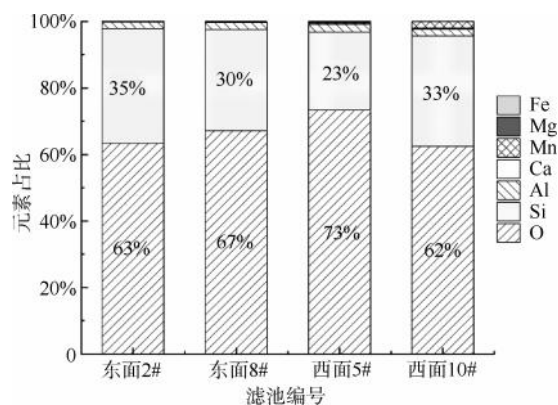


图 7 不同滤池的滤料表面元素组成

Fig. 7 Surface Element Composition of Filter Media in Different Filter Pools

2.1.7 滤料上微生物生长特性

本节采用脂磷法检测滤料上微生物,在滤池运行稳定后分别测定 4 格滤池不同深度的 3 个取样点异养菌数量(HPC),以单位石英砂的湿重(WW)上的异养菌落数(CFU)计,研究水厂砂滤池运行稳定后不同滤格的滤料上附着生物量的数量关系,检测结果如图 8 所示。

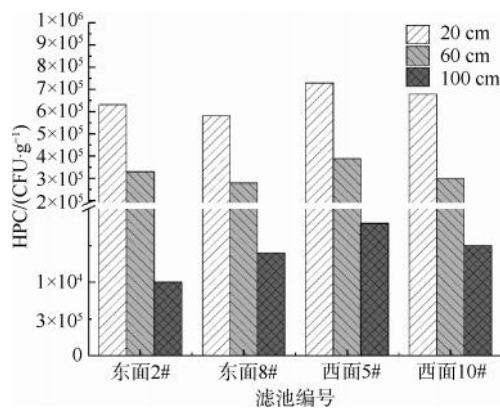


图 8 不同滤池滤料各段生物量对比

Fig. 8 Comparison of Biomass in Each Section of Filter Media in Different Filter Tanks

4 个滤池不同高度的生物量分布规律相似,各高度均有异养菌,滤池砂层表层生物量约为 6×10^5 CFU/g,底层为 1×10^4 CFU/g,表层生物量是底层的 60 倍。分析认为,上向流生物活性炭池的出水存在生物膜老化脱落现象,导致炭池出水微生物较多,氨氮和有机物较少^[22]。石英砂表面光滑,不利于微生物附着,但炭后水中的微生物被表层石英砂截留,且表层溶解氧充足,有利于微生物生长,因

此表层生物量较高。底层的有机物、氨氮和溶解氧较少,导致底层生物量较低。

2.1.8 滤池配水均匀度

进水均匀度测定通常采用容积法。该方法通过测试各滤格进水流量(q_1, q_2, q_3, \dots),得到最大流量(q_{\max})和最小流量(q_{\min}),配水均匀度(η)计算如式(1)。

$$\eta = \frac{q_{\min}}{q_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

其中: q_{\min} ——最小流量, m^3/h ;

q_{\max} ——最大流量, m^3/h ;

η ——配水均匀度。

测得滤池进水流量和均匀度如表5所示。东面滤池的最大进水流量为 $943 \text{ m}^3/\text{h}$ 、最小进水流量为 $714 \text{ m}^3/\text{h}$ 、配水均匀度为75.7%;西面滤池的最大进水流量为 $1161 \text{ m}^3/\text{h}$ 、最小进水流量为 $815 \text{ m}^3/\text{h}$ 、配水均匀度为70.2%。东面滤池配水均匀度较高,可能的原因是东面滤池运行水位更高,配水渠首末的水位差更大,起端断面流速更小,这一原因也导致东面进水流量相比西面更低。为提高滤池的配水均匀性,可以在配水堰上设置堰顶高程的调节装置,根据滤池的不同负荷人为调节堰高。

表5 滤池进水流量和均匀度
Tab. 5 Inflow Rate and Uniformity of the Filter Tank

| 滤池序号 | 进水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | |
|------|--|------|
| | 东面 | 西面 |
| 1# | 849 | 1255 |
| 2# | 880 | 938 |
| 3# | 913 | 1028 |
| 4# | 714 | 975 |
| 5# | 599 | 917 |
| 6# | 875 | 1133 |
| 7# | 889 | 1153 |
| 8# | 943 | 815 |
| 9# | 862 | 1177 |
| 10# | 762 | 1161 |

2.2 滤料特性统计分析

多元回归分析发现,滤料的 d_{10} 与水头损失之间存在显著的正相关关系。随着 d_{10} 的降低,水头损失显著增加,回归分析得出式(2)。

$$h = 0.15 + 0.65d_{10} \quad (2)$$

其中: h ——水头损失, m ;

d_{10} ——有效粒径, mm 。

由式(2)可知,滤料粒径的减小导致了流体通过滤层的阻力增大,从而影响了滤池的产水性能。实际而言,当滤池滤料 d_{10} 降至 0.7 mm 时,水头损失的增加幅度达到约18%。

通过主成分分析(PCA)对滤池的生物膜生长与滤料特性进行综合分析。结果表明,滤料表面特性和生物膜的附着性是导致滤池性能退化的关键因素。具体分析结果表明,生物膜的附着量与滤料的 d_{10} 和 K_{80} 之间具有显著的负相关关系。第一主成分(PC1)解释了约72%的总方差,主要受生物膜厚度和 SiO_2 质量分数的影响。这意味着滤料粒径越小、生物膜量越大时,滤池运行周期越短,且滤料表面的孔隙更容易被堵塞,从而增加水流阻力并影响长期过滤性能。

2.3 滤池运行优化措施与评估

2.3.1 消毒清洗

水厂砂滤池存在滤料表面和池壁生物膜生长现象,应定期对滤料进行消毒清洗,消毒过程参照《城镇供水厂运行、维护及安全技术规程》(CJJ 58—2009)的要求。在中试试验中对滤池表层进行次氯酸钠消毒(投加质量浓度为 10 mg/L 、接触时间为 30 min),滤料表层微生物量由 $6 \times 10^5 \text{ CFU/g}$ 降至 $1.2 \times 10^5 \text{ CFU/g}$,下降幅度约为80%,水头损失降低约10%。每次消毒的药剂成本约为1800元,操作周期控制在半年一次较为合理。

2.3.2 分级补砂

采用分级补砂的方式,如在补砂过程中增加大粒径石英砂进行补充,利用滤池反冲洗过程实现补砂和现用滤砂的混匀。

通过对西滤池试运行补砂措施前后运行数据的对比发现,按照“抽出旧砂 80 cm 并添加新砂”的方式实施后,运行周期由平均 21 h 提高至 36 h ,滤速恢复至 8.6 m/h ,水头损失降低约15%。但在操作过程中,滤池需停运约 36 h 进行砂料抽换与反冲洗调试,直接产水损失约为 $4.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ (以平均供水量 $2.76 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 计,影响约为1.6%),经济成本约为3.2万元(人工、设备及砂料费用)。因此,该措施适用于运行周期显著缩短的老旧滤池,不宜过于频繁

实施。

2.3.3 增设水头损失监测设备

在东池试点安装在线水头差压计后,监测数据显示滤池阻力上升趋势与实际运行周期基本一致,能够及时监测到滤池运行状态。设备一次性投入约2万元,年均维护费用约为1500元,能有效避免因迟滞反冲洗导致的超负荷运行风险。

3 结论与建议

本文对砂滤池滤料运行状态进行评估分析,从而确定其运行问题所在,以期为后续砂滤池运行优化技术研究提供科学依据。

通过滤料特征分析可知,滤池除浊性能下降原因为砂层厚度不足、颗粒变小、均匀系数增大、微生物生长明显、纳污量不均和水头损失增长过快等。西滤池的滤料使用已有9年,砂层厚度明显下降,需尽快补砂,东滤池滤料仅使用4年,可人工翻砂调节东滤池砂层厚度。滤池滤料级配显著发生改变, d_{10} 减小至0.72~0.77 mm, K_{80} 增加至1.8~1.9,建议在补砂过程中增加大粒径石英砂进行补充,利用滤池反冲洗过程实现对补砂和现用滤砂的混匀。炭后水含有大量微生物,导致滤层微生物生长明显,建议对滤料消毒清洗。定期的生物膜清洗,优化滤料的粒径分布,特别是增加较大粒径的石英砂,可以减缓水头损失的增加并延长滤池的使用周期。中试消毒试验(投加10 mg/L次氯酸钠、接触30 min)证实,该措施可使表层生物量下降80%(至 1.2×10^5 CFU/g),并伴随水头损失降低约为10%。破碎率和磨损率之和为0.74%~1.58%、 SiO_2 质量分数高于95%和含泥量为1.4%~1.7%等均满足相应指标。

其他建议:1)及时补砂并定期测试。补砂方案建议将现有滤砂抽出80 cm后,再将新砂均匀平铺在滤池中,最后回填旧砂至砂层厚度为1.20 m,并定期对滤池滤砂级配进行检测。中试及西滤池试运行结果表明,采用“抽出旧砂80 cm并添加新砂”的分级补砂方案后,滤池运行周期从21 h显著延长至36 h,滤速由7.35 m/h恢复至8.6 m/h,水头损失降低约15%。该措施能有效重构滤层结构,恢复其纳污能力和产水效率;2)增加水头损失监测设备。在东池试点安装的在线水头差压计已验证其有效性,该设备能及时监测到滤池阻力上升趋势,与运行周期变化一致。投入约2万元即可实现对单格滤池的

连续监控,有效避免超负荷运行风险,便于调整砂滤池运行参数,保障砂滤池长效稳定运行。

参考文献

- [1] 杜伊明. 石英砂滤料长期使用过程中性能下降原因及其恢复研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
Du Y M. Research on the reasons of performance decline and recovery of quartz sand filter material during long-term use[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [2] 杜伊明, 雷春元, 黄廷林, 等. 长期运行均质滤料性能下降原因及恢复研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(19): 45-51.
Du Y M, Lei C Y, Huang T L, et al. Reason for performance deterioration of long-term operating homogeneous filter media and recovery measures[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(19): 45-51.
- [3] 郑效旭, 邵志平, 邢朝阳, 等. 某工业水厂用水端反渗透膜堵塞原因及对策[J]. 中国给水排水, 2024, 40(21): 67-72.
Zheng X X, Shao Z P, Xing Z Y, et al. Reasons and countermeasures for reverse osmosis membrane fouling at water end of an industrial water plant[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(21): 67-72.
- [4] Bai X, Samari-Kermani M, Schijven J, et al. Enhancing slow sand filtration for safe drinking water production: Interdisciplinary insights into Schmutzdecke characteristics and filtration performance in mini-scale filters[J]. Water Research, 2024, 262: 122059. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122059.
- [5] 蔡宙. V型滤池的研究与设计探讨[J]. 科技信息, 2010(20): 686.
Cai Z. Discussion on research and design of V-type filter[J]. Science & Technology Information, 2010(20): 686.
- [6] 刘国才. 强化过滤及V型滤池设计要点[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(s1): 223-225.
Liu G C. Enhanced filter & design important of V-filter[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(s1): 223-225.
- [7] Yu M J, Ahn S K, Chung S H, et al. Evaluation of the rapid filtration system with particle size distribution and Cryptosporidium in different operating conditions[J]. Water Supply, 2006, 6(1): 129-139.
- [8] 王群, 李涛, 叶琳嫣, 等. 粒径及厚度对双层滤料滤池过滤的影响[J]. 给水排水, 2012, 38(2): 27-31.
Wang Q, Li T, Ye L Y, et al. Effect of particle size and thickness on filtration of double-layer filter media[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(2): 27-31.
- [9] 王莹. 低浊度进水条件下快滤池设计参数的优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wang Y. Design parameters optimization of rapid sand filter

- under the condition of influent with low-turbidity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] 霍长芝, 陈文杰. V型均质石英砂滤料试验研究[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2018(13): 139-140.
Huo C Z, Chen W J. Experimental study on V-type homogeneous quartz sand filter material [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018(13): 139-140.
- [11] 陈金荣, 王洪云. V型滤池反冲洗配水配气系统的设计研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(6): 38-41.
Chen J R, Wang H Y. Design of backwash air and water distribution system in V-type filter [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(6): 38-41.
- [12] 陆蔚. V型滤池反冲洗时间对流程水水质影响[J]. 城市建设, 2013, 10(6): 151-152.
Lu W. V-filter backwash time affect the process water quality [J]. Urbanism and Architecture, 2013, 10(6): 151-152.
- [13] 车太杰. 石英砂滤料流失改进技术[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(8): 18-19.
Che T J. Improvement technology of filtering medium losing of quartz sand [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(8): 18-19.
- [14] 周晓龙. 微絮凝强化过滤处理超低浊度水的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
Zhou X L. Application on ultra-low turbidity water by enhanced micro-filtration [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [15] 马天. 微絮凝-砂滤保障再生水的生物安全性研究[J]. 中国市政工程, 2023(6): 40-43, 98-99.
Ma T. Study on biological safety of micro-flocculation sand filtration to ensure regenerated water [J]. China Municipal Engineering, 2023(6): 40-43, 98-99.
- [16] 王翼. V型滤池改造为反硝化深床滤池的实践与思考[J]. 城镇供水, 2024(3): 58-63.
Wang Y. Practice and consideration of transforming V-type filter tank into denitrifying deep-bed filter Tank [J]. City and Town Water Supply, 2024(3): 58-63.
- [17] 陈荣艳. 四川省某给水厂设计运行总结[J]. 城镇供水, 2022(4): 37-39.
Chen R Y. Summary of design and operation of a waterworks in Sichuan Province [J]. City and Town Water Supply, 2022(4): 37-39.
- [18] 雷培树, 李露, 蔡世颜, 等. 国内外水处理滤料级配表示方法对比研究[J]. 给水排水, 2022, 48(6): 1-7.
Lei P S, Li L, Cai S Y, et al. Comparative study on representation of particle size distribution for water treatment filter in China and abroad [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(6): 1-7.
- [19] 史忠伟, 孙力平, 向传宝, 等. S-K型管式混合器-微絮凝高速过滤的实验研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2): 471-476.
Shi Z W, Sun L P, Xiang C B, et al. Experimental study on S-K-combined tube mixer in process of microfloc high rate filtration [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(2): 471-476.
- [20] 史永浩. 快滤池滤速研判及预氧化对滤池过滤性能的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
Shi Y H. Study of the filter rate and of the pre-oxidation for performance enhancement of the rapid sand filter [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [21] 全光辉. 城镇污水处理厂MSBR工艺节能经验及措施探讨[J]. 广州化工, 2024, 52(10): 112-114, 138.
Quan G H. Exploration of energy-saving experience and technical measures of modified Se-quencing bath reactor in urban sewage treatment plant [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(10): 112-114, 138.
- [22] 宋欣, 李燕君, 黄慧, 等. 臭氧-上向流BAC工艺对常规及新污染物的控制效果[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3): 1-8.
Song X, Li Y J, Huang H, et al. Control of conventional and emerging contaminants by ozone-upflow biological activated carbon process [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3): 1-8.