

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.009

V型滤池反冲洗参数优化及工程验证

颌亚玮¹, 朱方俊¹, 冯伟华², 高宏程², 余文庆¹, 刘宏远¹,
张 奔¹, 王立彪², 龙虹池²

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州余杭水务控股集团有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘 要: V型滤池因其滤层截污能力强、反冲洗周期长、出水水质好等优点在水厂广泛应用,但运行中反冲洗参数不合理则会影响滤料稳定,造成能耗过大等问题。为此,进行了V型滤池中试(产水量为24 m³/d)、生产性试验(产水量为2.5×10⁴ m³/d)及长期运行研究。中试结果表明,气水联合反冲洗阶段,在保持滤层微膨胀状态下,气水联合反冲洗水冲强度/单独水冲强度(v_w/v_{mf})为0.40~0.60时,对滤料颗粒上杂质具有较强的剥离作用。生产性试验结果表明,气水联合反冲洗阶段,当 v_w/v_{mf} 降至0.49时,单独气冲强度可由8.8 L/(s·m²)降至6.6 L/(s·m²)。在常温期和低温期,优化后生产性试验的滤池出水浊度稳定在0.1 NTU以下,满足要求的同时解决了滤池的跑砂问题;较水厂原运行方案,优化后单池反冲洗节水率达23.2%,节电率达49.5%,节能效果显著。

关键词: V型滤池; 气水联合反冲洗; 滤料流失

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0061-07

Optimization and Engineering Verification of Backwashing Parameters of V-shaped Filters

XIE Ya-wei¹, ZHU Fang-jun¹, FENG Wei-hua², GAO Hong-cheng², YU Wen-qing¹,
LIU Hong-yuan¹, ZHANG Ben¹, WANG Li-biao², LONG Hong-chi²

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Hangzhou Yuhang Water Affairs Holding Group Co. Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: V-shaped filters are extensively utilized in waterworks owing to their robust interception capacity of the filter layer, extended backwashing cycle, and superior effluent quality. Nevertheless, during operation, if the backwashing parameters are improperly configured, this may compromise the stability of the filter media and lead to issues such as excessive energy consumption. This paper carried out a pilot test of the V-shaped filter (with a water production capacity of 24 m³/d), a production test (with a water production capacity of 2.5×10⁴ m³/d), and a long-term operational research. During the combined air-water backwashing phase, when the filter layer was in a slightly expanded state, and the ratio of combined air-water backwashing water flushing intensity to individual water flushing intensity (v_w/v_{mf}) ranged from 0.40 to 0.60, a strong stripping effect on impurities adhered to the filter medium particles could be obtained. The results of the production test indicated that individual air flushing intensity could

基金项目: 杭州余杭环境控股集团有限公司创新课题(ZSFI2209285-2022); 教育部产学研合作协同育人项目(ZY24011060006)
通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn

be reduced from $8.8 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ to $6.6 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ during the combined air-water backwashing phase when the v_w/v_{mf} was decreased to 0.49. During both the normal temperature period and the low-temperature period, the effluent turbidity of the filter in the optimized production test remained consistently below 0.1 NTU, satisfying the requirements while simultaneously addressing the issue of sand leakage in the filter. In comparison with the original operational plan of the waterworks, the optimized operation scheme had a total water saving rate of 23.2%, and a power saving rate of 49.5%, demonstrating remarkable energy saving effect.

Key words: V-shaped filter; combined air-water backwashing; filter medium loss

V型滤池因其滤层截污能力强、反冲洗周期长、出水水质好等优点在水厂广泛应用^[1],其运行包括过滤和反冲洗两部分,其中高效的反冲洗是保证过滤效果的关键。气水联合反冲洗是目前国内外水厂广泛采用的冲洗方式,其良好的冲洗效果已被诸多实践所证明^[2-4],但在国内实际工程应用中,普遍存在反冲洗参数不合理造成滤料流失和能耗过大等问题^[5-6]。在浙江省某水厂(产水量为 $40\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) V型滤池的运行过程中,多次于反冲洗水中发现大量滤料,反冲洗结束后滤床表面平整度较差,且气水联合反冲洗过程能耗较大。针对这些问题,笔者进行规模为 $24 \text{ m}^3/\text{d}$ 的V型滤池中试,并在该大型水厂的V型滤池(单池产水量为 $2.5\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)进行优化研究,以期V型滤池的优化运行提供参考。

1 试验装置与方法

本研究分为两阶段:①采用中试装置进行反冲洗参数优化研究;②根据中试结果在某大型水厂的V型滤池进行生产性试验和长期运行研究。

1.1 中试

中试装置见图1。



图1 中试装置示意

Fig.1 Schematic of pilot plant

该装置处理规模为 $24 \text{ m}^3/\text{d}$,砂滤池采用下向

流,池体为圆柱状,直径为500 mm;池内滤料为级配石英砂, $d_{10}=0.55 \text{ mm}$, $K_{80}<2$,滤床厚1.0 m;下部承托层粒径为2~8 mm,厚0.4 m。

1.2 生产性试验

滤池采用均质石英砂滤料,有效粒径为0.85 mm,单格有效过滤面积为 136 m^2 ,反冲洗周期为52 h;滤池支撑层为粗砂,厚100 mm,粒径为2~3 mm;滤池配水、配气系统采用长柄滤头。水厂中滤池的反冲洗参数如下:单独气冲强度为 $8.8 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,冲洗时间为4 min;气水联合反冲洗强度(气+水)为 $(4.5+4.9) \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,冲洗时间为6 min;单独水冲强度为 $8.0 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,冲洗时间为4 min。

在某水厂中选取相邻的两座滤池进行生产性试验,其中一座作为空白对照,采用原冲洗方式,另一座作为试验对象。先开展反冲洗试验,该阶段两座滤池的过滤周期固定为48 h;在此基础上开展长期运行研究,该阶段两座滤池的过滤周期均为52 h。

1.3 试验相关参数

反冲洗效果通过反冲洗排水浊度评价,采用台式浊度仪进行测定;过滤性能通过滤池出水浊度评价,采用滤池出水处配备的在线浊度仪进行测定;滤池冲洗膨胀率的测定方法参考《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》(2018版),膨胀率=滤层膨胀高度/滤料厚度 $\times 100\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 中试

2.1.1 单独空气反冲洗优化

① 反冲洗时间

图2为单独空气反冲洗阶段排水浊度随时间的变化。可知,在空气冲洗1~2 min时,排水浊度均已达到最大值,即在特定的气冲强度下,1 min内已完成对滤料颗粒上杂质的剥离,后续的空气冲洗主要

用于滤料的循环移动,其循环移动的快慢对整个滤床清洗至关重要^[7]。从现有水厂运行数据来看,单独气冲常用时间分布在 1.5~5 min,其中大多数水厂单独气冲时间为 3 min^[8]。因此,此次试验单独空气反冲洗时间取 3 min。

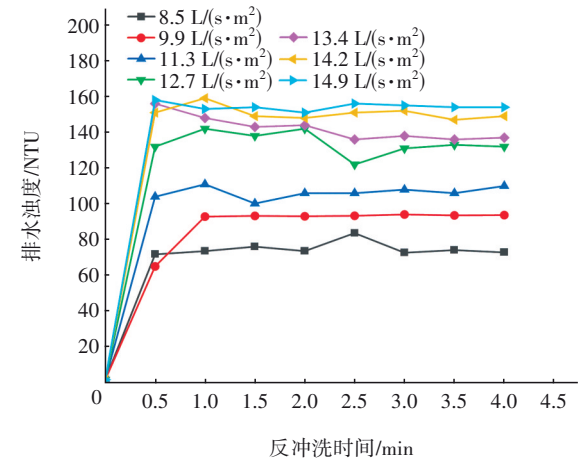


图2 单独空气反冲洗阶段排水浊度随时间的变化
Fig.2 Variation of drainage turbidity with time during individual air backwashing phase

② 反冲洗强度
由图 2 可知,不同气冲强度下排水浊度的变化规律相似,在气冲 1 min 后排水浊度基本达到最大,随着气冲强度增大,排水浊度也逐渐增大;当气冲强度为 13.4、14.2、14.9 L/(s·m²) 时,排水浊度峰值基本相同。过高的反冲洗强度对冲洗效果提升不明显,而且可能导致滤料流失和能耗增加,因此,单独气冲强度取 13.4 L/(s·m²)。

2.1.2 单独水反冲洗优化

① 反冲洗时间
单独水冲强度取统一的优化值 6.38 L/(s·m²),由不同试验组在全流程气水联合反冲洗试验单独水反冲洗阶段排水浊度随时间的变化可知,单独水反冲洗时间为 4 min (9~13 min) 时各组排水浊度均小于 10 NTU,且浊度趋于稳定不再发生明显变化。单独水反冲洗的主要作用是将前两个阶段剥离下来的杂质及时排出,同时将滤床残留空气排出。当排水浊度小于 10 NTU 时,滤池冲洗可以结束^[9]。因此,此次单独水反冲洗时间取 4 min。

② 反冲洗强度
研究^[10]表明,当滤床处于微膨胀状态(膨胀率小于 10%) 时,反冲洗效果较好。由不同水冲强度下滤床膨胀率的测定结果可知,水冲强度为 4.25 L/

(s·m²) 时,膨胀率为 0;水冲强度为 4.96 L/(s·m²) 时,膨胀率为 3.6%;水冲强度为 5.67 L/(s·m²) 时,膨胀率为 5.4%;水冲强度为 6.38 L/(s·m²) 时,膨胀率为 9.8%;水冲强度为 7.09 L/(s·m²) 时,膨胀率为 12.6%。综上,为保证单独水反冲洗阶段滤池处于微膨胀状态,同时结合该水厂运行经验,确定单独水冲强度为 6.38 L/(s·m²)。

2.1.3 气水联合反冲洗优化

① 反冲洗时间
将气水联合反冲洗阶段排水浊度随时间的变化与文献中浊度的理论变化曲线^[8,11] 进行对比,当反冲洗时间为 0~350 s 时,实测值与理论变化曲线趋势基本一致,为后续该水厂的反冲洗计算模拟提供了可能;当反冲洗时间大于 350 s 时,气体对杂质进行了有效剥离,并且水对杂质的输送作用达到最大,此时排水浊度基本趋于稳定。因此,此次试验气水联合反冲洗时间取 6 min。

② 反冲洗强度
气水联合反冲洗阶段,水冲强度 v_w 为最小流态化流速 v_{mf} 的 25%~50% 时,反冲洗效果最好。结合上述确定的单独水冲强度,即最小流态化流速 $v_{mf}=6.38$ L/(s·m²),同时考虑现场中试设备因素,确定气水联合反冲洗中水冲强度范围为 1.83~4.67 L/(s·m²)。为保证滤料层处于微膨胀状态,取不同气水反冲洗强度组合下滤床膨胀率为 5%~10% 的组别进行下一步试验。表 1 为各组反冲洗试验参数。各组的单独气冲、气水联合反冲洗、单独水冲时间相同,分别为 3、6、4 min。

表 1 反冲洗试验参数
Tab.1 Backwashing test parameters

试验组 序号	单独气冲 强度/(L· s ⁻¹ ·m ⁻²)	气水联合反冲洗			单独水冲 强度/(L· s ⁻¹ ·m ⁻²)
		v_w/v_{mf}	水冲强度/ (L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	气冲强度/ (L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	
a	13.4	0.73	4.67	6.5	6.38
b	13.4	0.62	3.96	6.5	6.38
c	13.4	0.62	3.96	7.9	6.38
d	13.4	0.51	3.25	9.3	6.38
e	13.4	0.51	3.25	10.7	6.38
f	13.4	0.51	3.25	11.4	6.38
g	13.4	0.51	3.25	12.2	6.38
h	13.4	0.40	2.54	12.2	6.38
i	13.4	0.34	2.19	12.2	6.38

图 3 为各试验组排水浊度随时间的变化。当

$v_w/v_{mf}=0.40\sim0.60$ 时,对比d~g组,在水冲强度相同的情况下,随着气冲强度的升高,滤料颗粒上杂质的剥离速度加剧;a~c组的 $v_w/v_{mf}>0.60$,将其与d~h组的排水浊度进行对比,可知整体效果无明显差别;i组的 $v_w/v_{mf}<0.40$,将其与g、h组进行对比,可知在优化后的冲洗时长条件下,i组的排水浊度难以趋于稳定,冲洗效果较差。因此,从能耗角度来看, v_w/v_{mf} 宜取0.40~0.60。

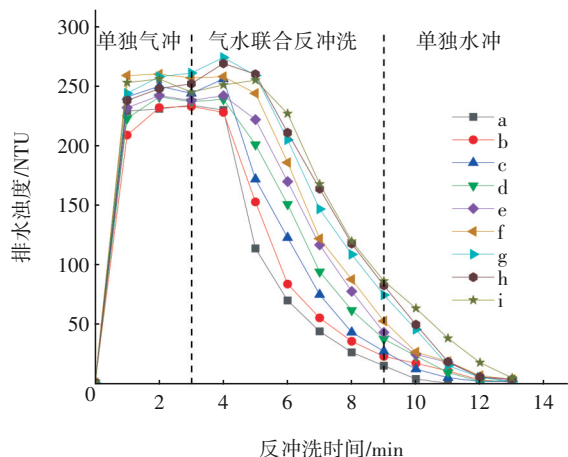


图3 不同试验组排水浊度随时间的变化

Fig.3 Variation of drainage turbidity in different test groups with time

2.2 生产性试验

根据中试结果并结合该水厂实际情况进行生产性试验,进一步优化反冲洗参数。

2.2.1 反冲洗时间优化

结合中试结果,单独空气反冲洗、气水联合反冲洗的冲洗时间分别采用3、6 min。

图4为原水厂反冲洗排水浊度随时间的变化。可知,单独水反冲洗阶段,在反冲洗3 min时即达到排水浊度小于10 NTU的要求,而中试确定的4 min反冲洗时间较长,易造成水资源浪费。因此,生产性试验的单独水反冲洗时间采用3 min。

表2为优化前后的滤池反冲洗参数。

图5为原水厂与优化后反冲洗排水浊度随时间的变化。可知,在单独空气反冲洗阶段,两座滤池排水浊度随时间变化的趋势相同;在气水联合反冲洗阶段,两座滤池的冲洗时间和强度一致,该阶段冲洗结束后,排水浊度均降至相近水平,进一步验证优化单独空气反冲洗时间不会增加后续反冲洗阶段的负荷;在单独水反冲洗阶段,优化后滤池在

水反冲洗结束后排水浊度为4.55 NTU,小于10 NTU,即单独水反冲洗时间为3 min即可满足要求。综上,优化后的反冲洗时间在保证滤池反冲洗效果和过滤性能的同时,耗水量和能耗更低。

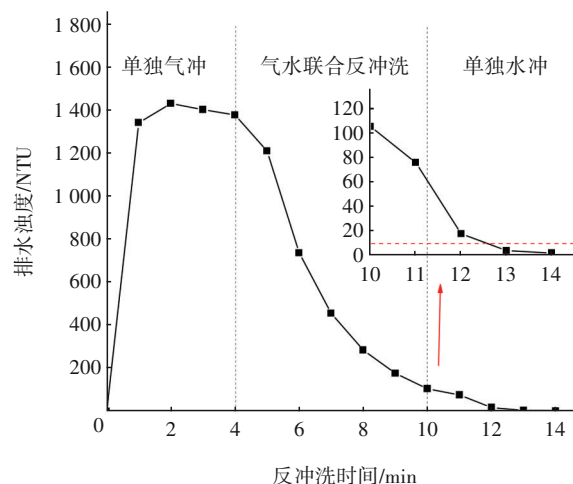


图4 原水厂排水浊度随时间的变化

Fig.4 Variation of drainage turbidity of original waterworks with time

表2 优化前后滤池反冲洗参数

Tab.2 Parameters of filter backwashing before and after optimization optimization

项目		单独气冲	气水联合反冲洗	单独水冲
优化后	冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	8.8	气:4.5;水:4.9	8.0
	冲洗时间/min	3	6	3
原水厂	冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	8.8	气:4.5;水:4.9	8.0
	冲洗时间/min	4	6	4

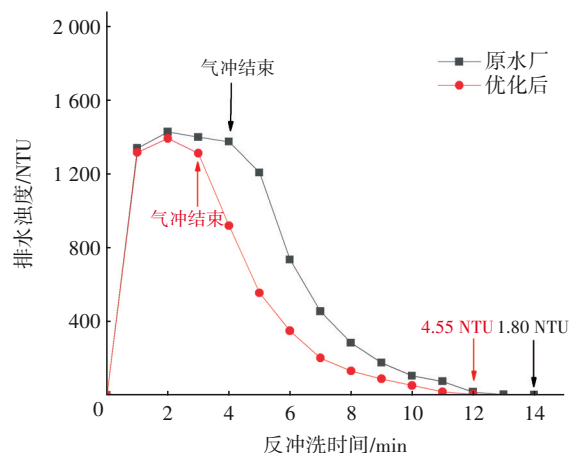


图5 原水厂与优化后排水浊度随时间的变化

Fig.5 Variation of drainage turbidity of original waterworks and optimization with time

2.2.2 反冲洗强度优化

经膨胀率测试,生产性试验中单独水反冲洗阶段的滤床膨胀率为9.7%,满足微膨胀状态要求,故单独水冲强度无需调整,为8.0 L/(s·m²)。由于中试的单独气冲强度优化值、气水联合反冲洗强度优化值与生产性试验存在差异,因此,生产性试验的反冲洗强度优化主要分为两部分:单独气冲强度和气水联合反冲洗中气/水冲冲洗强度。

① 单独气冲强度

表3为单独空气反冲洗阶段滤池冲洗情况。单独气冲强度通过滤床运动状态、滤床水层浊度确定,由于工程试验条件限制,无法观测到整个滤床的运动情况,因此采用滤床表层水的扰动情况作为判断依据。由表3可知,当气冲强度为4.4~8.8 L/(s·m²)时,滤床冲洗均匀性好且气泡对水层的扰动强,选取气冲强度为4.4、6.6、8.8 L/(s·m²)进行试验。由单独空气反冲洗阶段排水浊度随时间的变化可知,当气冲强度从8.8 L/(s·m²)降至6.6 L/(s·m²)时,水层浊度仅下降4.3%,而降至4.4 L/(s·m²)时水层浊度下降25.1%,故生产性试验中单独气冲强度的最优值为6.6 L/(s·m²)。从清洗方式考虑,优化后的1台定频鼓风机(50 Hz)和1台变频鼓风机(25 Hz)与原冲洗方式的2台定频鼓风机(50 Hz)相比,在保证冲洗效果的同时能耗更低,且空气反冲洗强度的降低有利于减少滤料流失。

表3 单独空气反冲洗阶段滤池冲洗情况

Tab.3 Filter flushing conditions during individual air backwashing phase

项目	反冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)							
	2.1	2.6	3.6	4.4	6.6	7.1	8.0	8.8
滤床冲洗均匀性	不均匀	不均匀	不均匀	较均匀	均匀	均匀	均匀	均匀
气泡扰动情况	微弱	微弱	较弱	较强	强	强	强	剧烈

② 气水联合反冲洗中气/水冲冲洗强度

由中试结果可知,气水联合反冲洗中水冲强度宜为最小流态化强度的0.40~0.60,即 $v_w/v_{mf}=0.40\sim0.60$ 。原冲洗方式中水冲强度为4.9 L/(s·m²), $v_w/v_{mf}=0.61$ 。膨胀率试验结果表明,当水冲强度为3.2~4.9 L/(s·m²)时,气冲强度为3.6 L/(s·m²)可保证滤床处于微膨胀状态,为此次生产性试验优化值。表4为原水厂和生产性试验的滤池反冲洗

参数。

表4 原水厂和生产性试验的滤池反冲洗参数

Tab.4 Parameters of filter backwashing of original waterworks and full-scale test

项目		单独气冲	气水联合反冲洗	单独水冲
原水厂	冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	8.8	气:4.5;水:4.9	8.0
	冲洗时间/min	4	6	4
	v_w/v_{mf}	0.61		
试验1	冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	6.6	气:3.6;水:4.9	8.0
	冲洗时间/min	3	6	3
	v_w/v_{mf}	0.61		
试验2	冲洗强度/(L·s ⁻¹ ·m ⁻²)	6.6	气:3.6;水:3.9	8.0
	冲洗时间/min	3	6	3
	v_w/v_{mf}	0.49		

结果表明,当 $v_w/v_{mf}=0.61$ 时,原水厂和试验1两座滤池气水联合反冲洗阶段排水浊度随时间的变化趋势相似,经单独水反冲洗后,试验1滤池的排水浊度为2.57 NTU,满足排水浊度小于10 NTU的要求。当 $v_w/v_{mf}=0.49$ 时,整个反冲洗过程排水浊度变化规律和试验1相似,经单独水反冲洗后,试验2滤池的排水浊度为2.65 NTU,同样满足要求。从清洗方式考虑,气水联合反冲洗阶段,当 $v_w/v_{mf}=0.49$ 时,由原冲洗方式的1台水泵(50 Hz)和1台定频鼓风机(50 Hz)优化为1台水泵(40 Hz)和1台变频鼓风机(25 Hz),优化后的冲洗方式可以保持与之前相同的冲洗效果,且能耗更低。

由两座滤池在两个过滤周期内的出水浊度可知,在进水浊度有较大波动的情况下(2.19~12.93 NTU),两座滤池均可保证出水浊度稳定在0.10 NTU以下。因此,采用优化后的冲洗方式仍可保证滤池维持良好的过滤性能。

若继续降低气水联合反冲洗阶段的水冲强度,可能导致输泥能力不足和滤床循环速度慢等问题,甚至引起滤床部分区域在多个反冲洗周期得不到有效的清洗和再循环,进而导致滤床局部区域产生泥球和板结的现象,影响滤池过滤性能。因此,采用 $v_w/v_{mf}=0.49$ 的冲洗方式,在保证滤池反冲洗效果和良好过滤性能的同时是更为经济的。

2.3 长期运行研究(常温期和低温期)

图6为两座滤池分别采用原冲洗方式和优化后冲洗方式在常温期和低温期连续运行3个月的出水

浊度。其中,图6(a)为低温期,试验时间为12月—2月,水温为8.0~13.0℃;图6(b)为常温期,试验时间为7月—9月,水温为27.0~33.0℃。可知,低温期的进水浊度远高于常温期,但采用优化后冲洗方式两个时期的滤池出水浊度均稳定在0.1 NTU以下。因此,认为优化后的冲洗方式在高反冲洗负荷的情况下,仍可取得良好的反冲洗效果,恢复滤池的过滤性能,且在节能降耗方面更具优势。

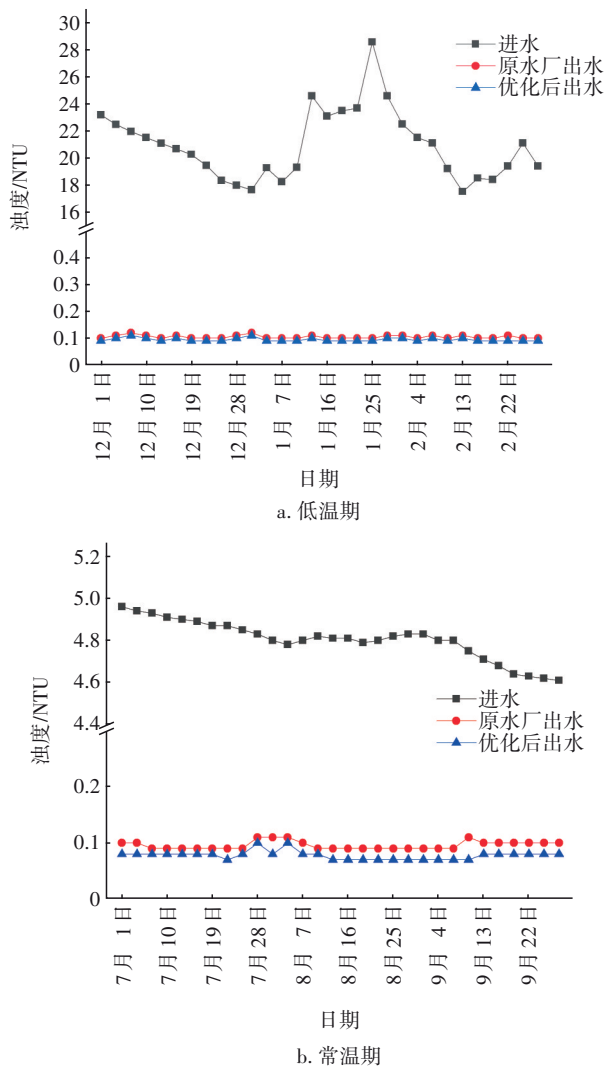


图6 低温期和常温期的滤池出水浊度

Fig.6 Drainage turbidity of filter during low temperature period and normal temperature period

图7为长期运行下两座滤池反冲洗结束后的滤床表面状态。可知,水厂在采用原冲洗方式时,反冲洗结束后明显看到排水槽壁上有较多滤料滞留,即反冲洗过程存在滤料流失的风险^[6];优化后滤池在反冲洗结束后,排水槽壁上明显无滤料的滞留,

即优化后的冲洗方式极大地降低了滤料流失风险。



a. 原清洗方式

b. 优化后

图7 滤床表面状态

Fig.7 Surface conditions of filter bed

2.4 节能降耗分析

水厂滤池以原冲洗方式运行时,存在反冲洗用水量、滤料流失严重等问题,冲洗强度过大是滤料流失的主要原因,而水厂原采用的是定频鼓风机,无法调整气冲强度。因此,建议该水厂购置110 kW鼓风机的变频器以降低单独空气反冲洗和气水联合反冲洗阶段的气冲强度,通过反冲洗强度及时间的优化调整,降低滤池反冲洗用水量和耗电量,优化后单池反冲洗节水率达23.2%,节电率高达49.5%,节能降耗效果明显,从长期运行角度考虑,对降低水厂运行成本有着积极意义。

3 结论

① 在中试条件下,单独空气反冲洗阶段,气冲强度取 $13.4 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 较合适,冲洗时间宜为3 min;气水联合反冲洗阶段, v_w/v_{mf} 宜取0.40~0.60,冲洗时间宜为6 min,不仅对滤料颗粒上杂质的剥离作用较强,而且具有较好的输泥能力;单独水反冲洗阶段,根据膨胀率试验得出水冲强度为 $6.38 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 、冲洗时间为4 min时,可及时将剥离下来的杂质排出池外。

② 在生产性试验中,单独空气反冲洗阶段气冲强度由 $8.8 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 降至 $6.6 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,气水联合反冲洗阶段气冲强度由 $4.5 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 降至 $3.6 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 后,有效解决了滤池跑砂问题;气水联合反冲洗阶段, v_w/v_{mf} 由0.61调整至0.49时,在保证滤池良好反冲洗效果的同时,降低了整个反冲洗过程的用水量,实现了节能降耗。

③ 在工程应用中,滤池采用优化后的冲洗方式在常温期和低温期运行时,出水浊度可与原冲洗方式达到相同水平,且在长期运行过程中未发现滤池存在跑砂现象;同时,较原运行方式,优化后的节能降耗效果明显,水厂单池反冲洗节水率达

23.2%,节电率达49.5%。

参考文献:

- [1] 吕靖,王倩,陈志平. 南京城北水厂V型滤池优化运行实践[J]. 中国给水排水, 2013, 29(18): 68-71.
LÜ Jing, WANG Qian, CHEN Zhiping. Study on optimal operation of V-type filters in Nanjing Chengbei Waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(18): 68-71 (in Chinese).
- [2] HOSLETT J, MASSARA T M, MALAMIS S, *et al.* Surface water filtration using granular media and membranes: a review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1268-1282.
- [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] 肖帆,于宏静,刘小东,等. 改善V型滤池跑砂的工程装置设计研究与实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 53-59.
XIAO Fan, YU Hongjing, LIU Xiaodong, *et al.* Design and practice of an engineering device for improving sand loss in V-type filters [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 53-59 (in Chinese).
- [5] 李双陆,张传贵. V型滤池反冲洗中存在的问题及解决方法[J]. 城镇供水, 2002(1): 10-11.
LI Shuanglu, ZHANG Chuangui. Existing problems and solution method of flush in V-type filter [J]. City and Town Water Supply, 2002(1): 10-11 (in Chinese).
- [6] 陈金荣,王洪云. V型滤池反冲洗跑砂原因分析及解决方法[J]. 中国给水排水, 2014, 30(10): 42-44.
CHEN Jinrong, WANG Hongyun. Cause analysis and solution for sand loss during V-type filter backwashing [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(10): 42-44 (in Chinese).
- [7] HUNCE S Y, SOYER E, AKGIRAY Ö. On the backwash expansion of graded filter media [J]. Powder Technology, 2018, 333: 262-268.
- [8] 赵礼英. 新水质标准下普快滤池运行特征及反冲洗优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHAO Liying. Operation Characteristics and Backwash Optimization Research of the Rapid Filter under the New Standards for Drinking Water Quality [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [9] 张娟. V型滤池气水反冲洗过程的优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
ZHANG Juan. Optimization of V-filter during Simultaneous Air-Water Backwashing [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010 (in Chinese).
- [10] 潘建仲,刘绪宗,于超英,等. 均质滤床气水反冲洗工艺参数优选[J]. 中国给水排水, 2002, 18(8): 62-63.
PAN Jianzhong, LIU Xuzong, YU Chaoying, *et al.* Optimization of gas water backwashing process parameters of homogeneous filter bed [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(8): 62-63 (in Chinese).
- [11] 刘俊新,李圭白. 滤池气水反冲洗时排水浊度变化的数学模式[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1989(4): 60-67.
LIU Junxin, LI Guibai. The mathematical model of the changes of drainage turbidity in the filter during simultaneous air scour and water backwash [J]. Journal of Harbin Institute of Architecture and Technology, 1989(4): 60-67 (in Chinese).

作者简介: 颀亚玮(1988-),男,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。

E-mail: xyw@zjut.edu.cn

收稿日期: 2024-07-06

修回日期: 2024-08-16

(编辑: 沈靖怡)