

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.006

# 半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤处理农村饮用水

谢丰莹<sup>1</sup>, 李爽<sup>1</sup>, 张雪娇<sup>1</sup>, 周同高<sup>2</sup>, 胡璐瑶<sup>2</sup>, 陈雪明<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058; 2. 永康市水资源供水管理中心, 浙江 永康 321300)

**摘要:** 南方一些偏远山区由于海拔高、距离远,城镇供水管网难以延伸到位,而单村供水站主要存在浊度难以稳定达标、自用水率高的问题。为此,研发了一种半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术以处理农村饮用水,考察了其过滤性能与节水效果,并在浙江省永康市舟山镇舟一村进行应用示范。实验研究结果表明,在原水浊度为20 NTU、PAC投加量为1.5 mg/L、滤速为8 m/h、水温为25 °C的条件下过滤28 h,平均出水浊度在0.2 NTU以下;在气冲强度为17 L/(m<sup>2</sup>·s)、水冲强度为4 L/(m<sup>2</sup>·s)的条件下进行气-水反冲洗,自用水率为0.96%,较单水反冲洗节约耗水67.2%。实际应用结果表明,运行3个月共计91个周期,平均出水浊度在0.5 NTU以下,过滤器最高允许液位达4~5 m,自用水率为1.37%。

**关键词:** 农村饮用水; 半封闭式过滤; 气-水反冲洗; 接触絮凝; 节水

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0040-07

## Semi-closed Air-water Backwashing Contact Flocculation Filtration for Treatment of Rural Drinking Water

XIE Feng-ying<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>, ZHANG Xue-jiao<sup>1</sup>, ZHOU Tong-gao<sup>2</sup>, HU Lu-yao<sup>2</sup>, CHEN Xue-ming<sup>1</sup>

(1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Yongkang Water Resources and Water Supply Management Center, Yongkang 321300, China)

**Abstract:** Due to the high altitude and long distance in some remote mountainous areas in south China, it is difficult to extend the urban water supply network in place, while the single village water supply station mainly has the problems such as difficulty in stably meeting the turbidity standard and high self-use water consumption rate. Therefore, a semi-closed air-water backwashing contact flocculation filtration technology was developed and applied to rural drinking water treatment. The filtration and water-saving performances were investigated, and a demonstration project was carried out in Zhouyi Village, Zhoushan Town, Yongkang City, Zhejiang Province. The experimental results showed that the average turbidity of the effluent was below 0.2 NTU after filtration for 28 h when the raw water turbidity was 20 NTU, the PAC dosage was 1.5 mg/L, the filtration rate was 8 m/h, and the water temperature was 25 °C. When the aeration rate and backwash flow rate of air-water backwashing system were 17 L/(m<sup>2</sup>·s) and 4 L/(m<sup>2</sup>·s), respectively, the self-use water consumption rate was 0.96%, and 67.2% of the water

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408800)

通信作者: 陈雪明 E-mail: chenxm@zju.edu.cn

consumption was saved compared with that of single water backwashing. The actual application results showed that the average effluent turbidity was less than 0.5 NTU, the maximum allowable liquid level of the filter was 4–5 m, and the self-use water consumption rate was 1.37%.

**Key words:** rural drinking water; semi-closed filtration; air-water backwashing; contact flocculation; water conservation

我国南方一些偏远山区由于海拔高、距离远,城镇供水管网难以延伸到位,因此常采取单村供水。据报道<sup>[1]</sup>,截至2020年底,浙江省单村供水站总数超过9 000座。单村供水工程是我国农村饮用水供给中的薄弱环节<sup>[2]</sup>,其处理工艺大多套用常规的“混凝—沉淀—过滤”<sup>[3]</sup>,出水浊度难以稳定达标<sup>[4]</sup>。失效后,过滤器普遍采用水力反冲洗,耗水量大,自用水率常超过10%。此外,部分单村供水工程还存在处理设施陈旧、自动化程度不足、处理流程不完备、管理难度大等问题<sup>[5]</sup>。

单村供水工程多以水库水或山塘水为水源,浊度相对较低,以浙江省永康市为例,多数水源水的浊度常年仅5~20 NTU。这类水具有颗粒物密度低、粒径小的特点,处理难度较大<sup>[6]</sup>。有关低浊水的处理,国内外已进行大量研究,主流的处理工艺有混凝气浮<sup>[7]</sup>、污泥回流<sup>[8]</sup>、强化混凝<sup>[9]</sup>、接触絮凝过滤<sup>[10]</sup>等。其中接触絮凝过滤因所需设备简单、运行操作方便、投资费用低,具有较大技术优势<sup>[11]</sup>,但该技术也存在滤料层易堵塞、水头损失上升快、过滤器需要频繁反冲洗、自用水率高的显著缺陷。

针对偏远山区单村供水工程现状,笔者研发了一种半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术,以期提高除浊效率,同时从延长过滤周期和降低反冲洗用水量两方面大幅降低处理设施的自用水率。首先探究了该技术的运行参数影响、原水适用范围以及反冲洗和节水效果;在此基础上,研发了撬装式成套设备,并在永康市舟山镇舟一村进行应用示范,考察了其在实际工程中的净水节水效果和运行稳定性,以期为保障偏远地区饮用水安全提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验所用装置主体为两个结构相同的亚克力有机玻璃过滤柱,内径为100 mm,内填充粒径为0.8~1.2 mm的石英砂滤料,填充高度为900 mm;下

端装有水帽,水帽缝隙为0.2 mm;上盖板开有用于排气的小孔。实验装置见图1。

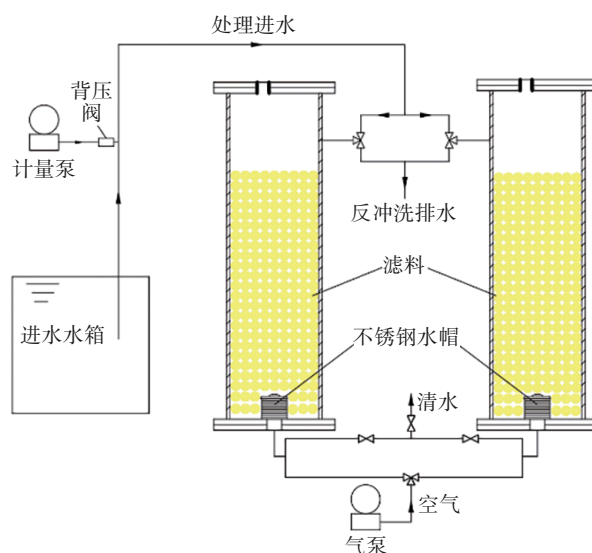


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematics of experimental setup

半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术的节水 and 净水优势主要通过两方面得以实现。其一在于过滤器独特的半封闭结构:在反冲洗阶段,排气孔打开,保持气体畅通;在制水阶段,排气孔关闭,此时过滤器处于完全封闭状态,相当于压力式过滤器,这有利于提高最大允许水头损失,与敞开式过滤器、无阀滤池等相比能显著延长制水周期,从而大幅降低自用水率。其二在于将单一的水力反冲洗改为气-水反冲洗,使反冲洗水流速大大降低,既大幅节省反冲洗用水量,进一步节水,又能有效提高反冲洗效果,保证水质。

### 1.2 运行流程

实验装置的运行包含过滤和反冲洗两个过程。过滤时,顶部排气孔关闭,两个过滤柱同步制水。原水和絮凝剂的混合液从进水总管进入,经两个三通阀再分别进到两个过滤柱中,在自上而下流经过滤柱的过程中发生接触絮凝,出水经底部水帽收集后排出。絮凝剂的投加由计量泵完成。

随着过滤不断进行,滤料层中截污量增多,水头损失增大,出水水质恶化,当浊度无法满足出水标准时停止制水,对过滤柱进行反冲洗。首先打开其中一个过滤柱顶部的排气孔,压缩空气与另一过滤柱的过滤出水自下而上冲洗滤料层,冲洗后的水从反冲洗排水管排出。以上过程在两个过滤柱中交替进行。

### 1.3 进水配制

进水配制方法为:取适量浙江大学校内河流水和底泥至预备水箱中,充分搅拌后静置,量取适量上层液,稀释至目标浊度后,注入进水水箱。进水的主要指标包括浊度、pH和水温,其中浊度依据实验需求稀释至5、10、20、50和100 NTU, pH调至7,水温保持在25℃。在装置运行过程中,不断对进水箱中的原水进行搅拌,以维持进水水质稳定。

### 1.4 分析项目与方法

原水、出水及反冲洗水浊度采用便携式浊度仪测定;pH采用便携式pH分析仪测定;水头损失采用抗震压力表测定。

## 2 结果与讨论

为考察半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术提高最大允许水头损失的效果,实验未设置水头损失限值,而依照过滤出水浊度控制制水周期。根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),同时考虑到后续消毒、管网输送等环节可能对浊度产生的影响,设定出水浊度限值为0.5 NTU。

### 2.1 运行参数影响

#### 2.1.1 絮凝剂种类影响

实验分别以聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铁(PFS)、硫酸铝和氯化铁作为絮凝剂,同时设置空白对照,对比了各自运行10 h的平均出水浊度。在进水浊度为20 NTU、pH为7、滤速为8 m/h、水温为25℃、絮凝剂投加量为1.5 mg/L(PAC以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 计,其余絮凝剂均以有效成分计)的条件下,实验结果如图2所示。可见,投加絮凝剂的实验组10 h浊度去除率均能达到96%以上,远高于空白组,这主要是由于絮凝剂能使水中的颗粒脱稳,改善其表面性能,从而提高处理效果。对比4种絮凝剂,PAC和PFS的浊度去除效果相较硫酸铝和氯化铁更好,这也证实了高分子絮凝剂在除浊效能方面更优<sup>[12-13]</sup>,其中,投加PAC时的处理效果最佳,浊度去除率达

99.13%。

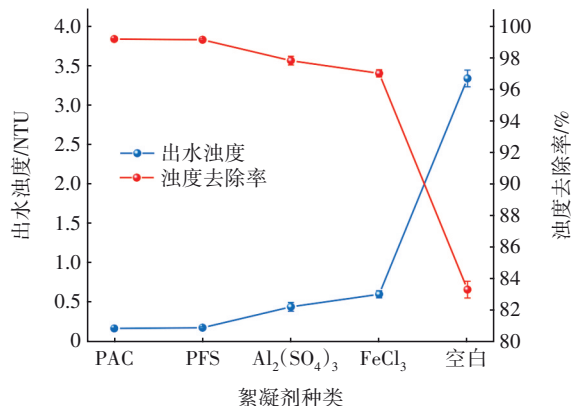


图2 絮凝剂种类对浊度去除效果的影响

Fig.2 Effect of flocculant types on turbidity removal

#### 2.1.2 絮凝剂投加量影响

絮凝剂投加量是决定过滤效果、影响药剂成本的重要参数。在进水浊度为20 NTU、pH为7、滤速为8 m/h、水温为25℃的条件下,考察了PAC投加量分别为0.5、1.5、2.5和3.5 mg/L时的出水浊度及水头损失变化情况,结果见图3。

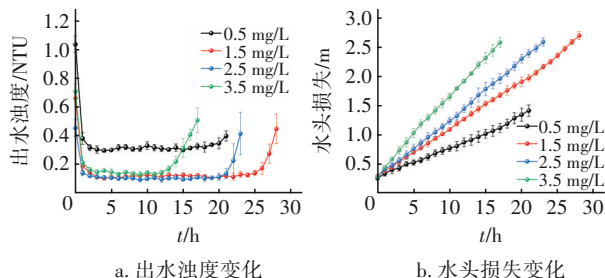


图3 PAC投加量对出水浊度和水头损失的影响

Fig.3 Effect of PAC dosage on effluent turbidity and head loss

由图3可知,PAC投加量对出水浊度、过滤周期和水头损失均会产生显著影响。根据图3(a)可知,当投药量从0.5 mg/L增至1.5 mg/L时,浊度下降明显,此时平均出水浊度为0.16 NTU,过滤周期为28 h,过滤停止时的水头损失达2.7 m;当投药量增大至2.5 mg/L时,浊度继续下降但幅度较小,而过滤周期有所缩短。根据图3(b)可知,水头损失随着投药量的增加而快速增长。这是由于在较小的投药量下,形成的絮体体积较小、数量较少,容易直接穿透滤层,导致出水水质较差;适当增大投药量,能改善絮凝性能,达到良好的净水效果;而当投药量过大时,形成的絮体体积较大,上层滤料在截留大量絮体后被堵塞,形成滤饼过滤模式<sup>[14]</sup>,水头损失迅

速增长,滤层在较短时间内被穿透。

此外,实验结果还表明,当继续加大投药量至 3.5 mg/L 时,不仅进一步加快了滤料的失效,而且平均出水浊度也略有上升,这可能是由于超量的絮凝剂引起胶体颗粒电荷性发生改变,从而使胶体颗粒重新稳定,影响絮凝和过滤效果<sup>[15]</sup>。这说明过量投加絮凝剂不但会造成药剂成本的升高、水头损失的迅速增长,还会降低净化效果。因此,适量投加絮凝剂至关重要,综合考虑 PAC 投加量以 1.5 mg/L 为宜。

### 2.1.3 滤速影响

滤速对出水水质、过滤周期和产水量至关重要。在进水浊度为 20 NTU、PAC 投加量为 1.5 mg/L、pH 为 7、水温为 25 °C 的条件下,依据《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),考察了滤速为 6、8、10 m/h 时的出水浊度及水头损失变化情况。结果见图 4。

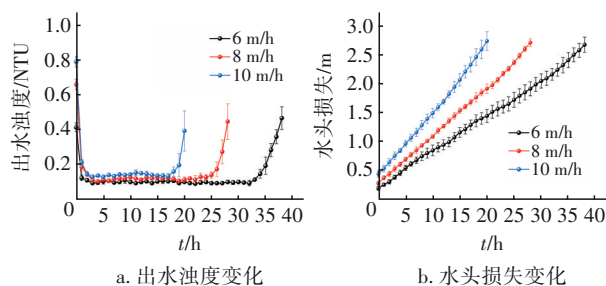


图4 滤速对出水浊度和水头损失的影响

Fig.4 Effect of filtration rate on effluent turbidity and head loss

由图 4 可知,滤速越低,过滤周期越长,出水浊度越低,水头损失增长越缓慢。这主要是由于较低的滤速更有利于滤料表面絮体的截留,出水水质相对较好;同时单位时间内截留杂质更少,因此水头损失上升相对缓慢,且到达滤层穿透的时间更长。但是,滤速的选择并非越低越好,过低的滤速会减少处理水量,而为保证一定制水量,势必将增大过滤面积,从而导致设备体积增大、占地面积增加、投资成本上升,因此滤速的选取需要综合考虑水质、水量等多方面的因素。

不同滤速下的过滤性能如表 1 所示,各滤速下水头损失的差异较小,但制水周期变化明显,降低滤速有助于提高周期产水量。以上结果可为实际工程的滤速选择提供参考,本研究选取滤速为 8 m/h,该滤速在保证出水浊度的前提下,能够保持较高产水量。

表1 不同滤速的过滤性能对比

Tab.1 Comparison of filtration performance at different filtration rates

滤速/(m·h <sup>-1</sup> )	水头损失/m	制水周期/h	平均出水浊度/NTU	周期产水量/L
6	2.67	38	0.13	3 579.6
8	2.71	28	0.16	3 516.8
10	2.74	20	0.19	3 140.0

### 2.2 适用范围考察

以浙江省永康市为例的单村供水站水源水常年浊度约为 5~20 NTU,属于低浊水,但强降雨等特殊情况的发生可能会导致水源短时间内呈现较高浊度状态。为考察半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术对不同进水浊度的处理能力,从而明确其对进水水质的适用范围,设置了 5、10、20 NTU 三组低浊度进水和 50、100 NTU 两组较高浊度进水。实验条件如下:滤速为 8 m/h、PAC 投加量为 1.5 mg/L、pH 为 7、水温为 25 °C,结果见图 5。

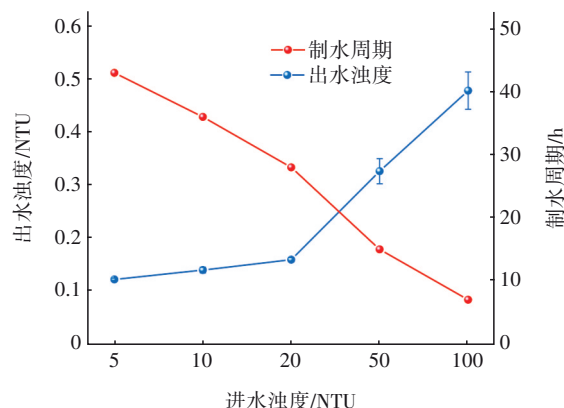


图5 不同进水浊度的处理效果

Fig.5 Treatment effect of different influent turbidity

由图 5 可知,对于 5~20 NTU 的低浊进水,制水周期长达 28~43 h,平均出水浊度均低于 0.2 NTU;当进水浊度增大至 50~100 NTU 时,制水周期仍可维持在 7~15 h,平均出水浊度均低于 0.5 NTU。由此可见,半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术适用范围较广,不仅对于 5~20 NTU 的低浊水具有极佳的处理效果,而且对于降雨时浊度为 50~100 NTU 的进水也具备良好的处理能力。

### 2.3 反冲洗与节水效果

反冲洗是维持有效过滤的重要过程,对过滤器成熟阶段出水浊度、过滤效果等产生重要影响<sup>[16]</sup>。与单水反冲洗相比,气-水反冲洗在降低耗水量、提

高反冲洗效果方面具有显著优势<sup>[17]</sup>。为了对比两种反冲洗方式的耗水情况,在进水浊度为20 NTU、制水周期为28 h、滤速为8 m/h、PAC投加量为1.5 mg/L、pH为7的过滤条件下进行了研究,单水反冲洗的水冲强度为15 L/(m<sup>2</sup>·s),气-水反冲洗选用“气冲(1 min)+气-水反冲+水冲(1 min)”的三段式冲洗方式,气冲强度为17 L/(m<sup>2</sup>·s)、水冲强度为4 L/(m<sup>2</sup>·s)。实验结果见图6。

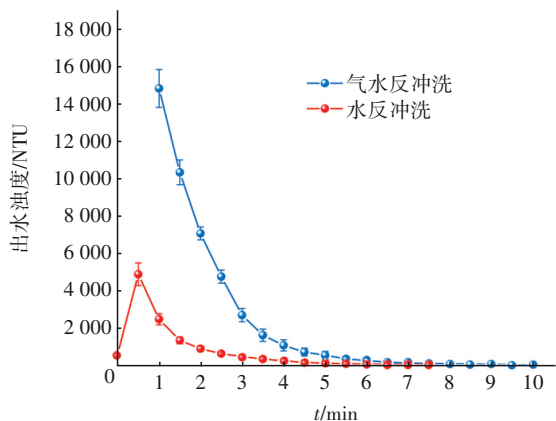


图6 两种反冲洗方式的出水浊度变化

Fig.6 Turbidity change of effluent from two backwashing methods

当反冲洗出水浊度低于30 NTU时,认为反冲洗完成。由图6可知,气-水反冲洗时的反冲洗水浊度在有出水时即为峰值,而后快速下降,之后下降趋势逐渐平缓。这是由于1 min的气冲利用气流首先令滤料振动<sup>[18]</sup>,使杂质破碎并从中脱落,因此反冲洗水初始浊度最高,而后随着杂质不断在碰撞摩擦中从颗粒物表面被剥离排出,出水浊度降低,反冲洗完成时间为10 min。在整个气-水反冲洗过程中,表层滤料在气流的推动下发生一定搅动,而滤料整体仅有轻微的膨胀。单水反冲洗需要以大于最小流化速度的流速,使得滤料层达到流化状态<sup>[19]</sup>,最高反冲洗水浊度即出现在此时,因此初始浊度较低,在0.5 min浊度出现峰值后也迅速下降并逐渐平稳,反冲洗完成时间为7.5 min。在整个水反冲洗过程中,由于水流强度大,滤料膨胀十分明显,而这也对过滤柱的高度提出了更高要求,不利于降低成本。此外,对比二者的自用水量,单水反冲洗为2.93%,气-水反冲洗为0.96%,较单水反冲洗节约耗水67.2%,气-水反冲洗节水效果显著。此外,半封闭式过滤的结构提高了过滤器的最大允许水头

损失,在保证水质的前提下,能尽可能延长制水周期,这能够实现在气-水反冲洗基础上的进一步节水。

### 3 技术应用

#### 3.1 背景

技术应用地位于浙江省永康市舟山镇舟一村,供水服务人口约1 400人,设计供水规模为200 m<sup>3</sup>/d,实际运行制水量约240 m<sup>3</sup>/d。供水水源为水库水,水体pH接近中性,测试期间浊度在5~12 NTU之间,水温在15℃左右。

#### 3.2 净水系统

净水系统采用撬装式设计,主要包含两个结构相同的不锈钢过滤器和次氯酸钠发生器。过滤器内径为1 000 mm,填充粒径为0.8~1.2 mm的石英砂,考虑到实际水体更为复杂,将填充高度增加至1 200 mm;顶部排气孔优化为依靠浮力作用关闭、重力作用打开的自动排气阀;配备智能化控制系统,可实现制水自动启停、过滤器自动反冲洗以及加药量自动优化调节的目的。

#### 3.3 净水效果

采用水质、液位和制水时间联合控制模式,出水浊度、过滤器液位与制水时间的上限值分别设定为1 NTU、5 m与24 h,PAC平均投加量为1.75 mg/L。运行3个月共计91个周期,工程应用净水效果见图7。

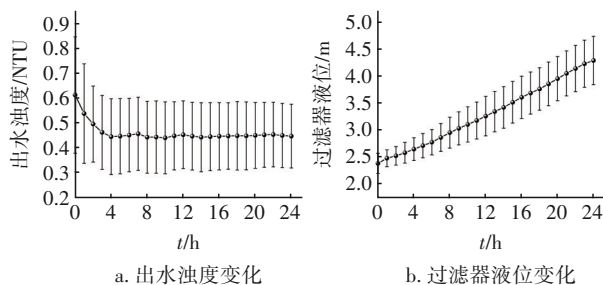


图7 工程应用净水效果

Fig.7 Water purification effect of engineering application

由图7可知,91个周期均为时间控制周期,运行至24 h时,出水浊度小于1 NTU,过滤器液位也未超过5 m,这表明过滤器在制水周期上仍有较大延长的余地。

根据图7可知,过滤初始的平均浊度为0.61 NTU,随着过滤的进行,出水浊度逐渐降低,运行约4 h后基本稳定,这是由于过滤刚开始的一段时间为滤床成长期,当滤料表面截留一定颗粒后,才进入

较为稳定的过滤成熟期,这与前述实验研究结果一致。由图7中的误差线可知,在91个周期中,出水浊度和过滤器液位存在一定的波动且总体出水浊度较前述实验偏高,这一方面是由于季节、天气等因素易引起自然水源水质发生变化,另一方面是由于该水源水温较低,而低温会减缓杂质颗粒的运动,对颗粒碰撞、絮凝剂的扩散和水解、絮体的结构等产生不利影响<sup>[20]</sup>。另外,实际工程必须充分考虑药剂成本问题,因此在能够满足供水水质标准的前提下,应尽量降低药剂使用量,这也有利于避免出水中的铝过量<sup>[21]</sup>。总体而言,净水系统平均出水浊度为0.46 NTU,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中1 NTU以下的要求。

除浊度指标外,其他出水指标经第三方检测也均达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),具体如下:总大肠杆菌等未检出,菌落总数小于100 CFU/mL;余氯为0.3~1.0 mg/L;pH为6.6~7.8;色度小于5度;无任何臭和味,无肉眼可见物。

### 3.4 反冲洗与节水效果

采用气-水反冲洗,其中反冲洗水流量与制水时总流量相同,反冲洗出水浊度变化见图8。

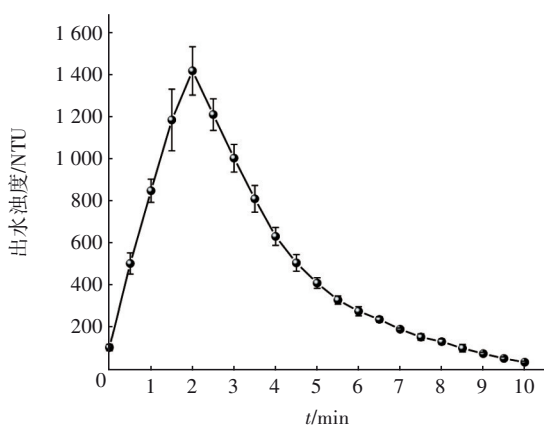


图8 反冲洗出水浊度变化

Fig.8 Turbidity change of backwashing effluent

由图8可知,反冲洗出水浊度呈现先迅速升高后又迅速下降再缓慢下降的趋势。这是由于在实际应用中,制水与反冲洗为无间歇的连续过程,刚切换至反冲洗状态时的出水主要为过滤器内积存的水,因此初始浊度较低;而随着反向空气和水流的进入,截留在滤料表面及孔隙中的杂质在滤层间的碰撞、剪切作用下被剥离,故而出水浊度迅速上升,而后浊度先迅速下降再缓慢下降,这与前述实

验研究结果一致。反冲洗至10 min时,出水浊度为33 NTU,基本达到与前述实验相同的结束条件。制水时长以24 h计,系统自用水率为1.37%,节水效果显著。

## 4 结论

① 半封闭气-水反冲洗接触絮凝过滤技术既能高效除浊,又能显著节水。在进水浊度为20 NTU、PAC投加量为1.5 mg/L、滤速为8 m/h、水温为25 °C的条件下过滤28 h,平均出水浊度小于0.2 NTU,自用水率仅为0.96%。

② 该技术对5~100 NTU的原水均具备处理能力,且当原水水质越好时,制水周期越长,反冲洗频次越低。

③ 在浙江省永康市舟山镇舟一村进行技术应用,运行3个月的平均出水浊度在0.5 NTU以下,自用水率为1.37%,在实践中也展现出良好的净水和节水效能。

## 参考文献:

- [1] 邱昕恺,卢成,周殷盈. 南方地区单村供水工程净化设备应用效果比较研究[J]. 浙江水利科技, 2022, 50(3): 70-73.  
QIU Xinkai, LU Cheng, ZHOU Yinying. Comparative study on the application performance of integrate potable water purification equipments in single-village water stations of southern China[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2022, 50(3): 70-73 (in Chinese).
- [2] 姜鸿烈,薛军,徐立军. 山区农村饮用水厂(站)的运维策略研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 36-41.  
JIANG Honglie, XUE Jun, XU Lijun. Research on operation and maintenance strategy of rural drinking water plants (stations) in mountainous areas[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 36-41 (in Chinese).
- [3] SONG W K, GAO Z Y, HU M, et al. Development and technology of rural drinking water supply in China[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(S2): 187-198.
- [4] LIU Z H. Status and prospects of rural drinking water in China[J]. Advanced Materials Research, 2011, 281: 263-266.
- [5] LI W. Study of rural drinking water safety engineering management [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 484/485: 558-561.
- [6] CHEN T, XU Y P, LIU Z Q, et al. Evaluation of

- drinking water treatment combined filter backwash water recycling technology based on comet and micronucleus assay [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 42: 61–70.
- [7] 王安爽,李梅,王永磊,等. 混凝气浮与混凝沉淀工艺处理低温低浊水水库水试验对比[J]. *工业安全与环保*, 2015, 41(10): 7–9.
- WANG Anshuang, LI Mei, WANG Yonglei, *et al.* Test comparison between coagulation-DAF and coagulation-sedimentation processes for treatment of low temperature and turbidity reservoir water [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2015, 41 (10): 7–9 (in Chinese).
- [8] 朱艳旭,李孟,包宇飞,等. 沉淀池污泥回流强化低浊水处理研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(5): 124–127.
- ZHU Yanxu, LI Meng, BAO Yufei, *et al.* Effects of the returned sludge on the enhanced treatment of low-turbidity water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(5): 124–127 (in Chinese).
- [9] LIAO L N, ZHANG P. Preparation and characterization of polyaluminum titanium silicate and its performance in the treatment of low-turbidity water [J]. *Processes*, 2018, 6(8): 125.
- [10] 刘国才. 悬浮球填料接触絮凝工艺用于处理低温低浊水[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(20): 109–111.
- LIU Guocai. Suspended ball-filler contact flocculation process for low-temperature and low-turbidity water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28 (20): 109–111 (in Chinese).
- [11] 鄢闰辛,邓世俊,张雪娇,等. 两段式接触过滤法净化低浊水研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(2): 119–123.
- YAN Runxin, DENG Shijun, ZHANG Xuejiao, *et al.* Research on purification of low turbid water by two-stage contact filtration [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(2): 119–123 (in Chinese).
- [12] ZARCHI I, FRIEDLER E, REBHUN M. Polyaluminium chloride as an alternative to alum for the direct filtration of drinking water [J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(9/12): 1199–1209.
- [13] GREGORY J, DUPONT V. Properties of flocs produced by water treatment coagulants [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(10): 231–236.
- [14] 王琳,张克峰,王永磊,等. 炭砂滤池直接过滤处理低温低浊水的试验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2015, 30(2): 135–140.
- WANG Lin, ZHANG Kefeng, WANG Yonglei, *et al.* Treatment of low temperature and low turbidity raw water with sand carbon filter by direct filtration [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2015, 30 (2): 135–140 (in Chinese).
- [15] 鄢闰辛. 两段式接触过滤法净化低浊水研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 37.
- YAN Runxin. Purification of Low Turbidity Water by Two-stage Contact Filtration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 37 (in Chinese).
- [16] SLAVIK I, JEHLICH A, UHL W. Impact of backwashing procedures on deep bed filtration productivity in drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2013, 47(16): 6348–6357.
- [17] 王知远,吴慧芳,贺江,等. 石榴石滤料的过滤性能及反冲洗试验研究[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(9): 1620–1627.
- WANG Zhiyuan, WU Huifang, HE Jiang, *et al.* Filtration and backwashing of garnet media [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31 (9): 1620–1627 (in Chinese).
- [18] NAKAMURA K, NAKAMURA J, MATSUMOTO K. Filtration and backwashing behaviors of the deep bed filtration using long length poly-propylene fiber filter media [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, 94: 31–36.
- [19] FITZPATRICK C S B. Observations of particle detachment during filter backwashing [J]. *Water Science & Technology*, 1993, 27(10): 213–221.
- [20] XIAO F, ZHANG B J, MA J, *et al.* Effects of low temperature on floc fractal dimensions and shape factors during alum coagulation [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2009, 58(1): 21–27.
- [21] LIN J, IKA A R. Effect of Al speciation on residual turbidity and Al minimization by coagulation with single and dual dosing [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2019, 68(1/2): 51–62.

作者简介: 谢丰莹(1997–), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为给水与废水处理。

E-mail: fyxie@163.com

收稿日期: 2022-11-01

修回日期: 2022-12-03

(编辑: 沈靖怡)