

# 循环造粒流化床处理水厂排泥水的试验研究

孙书博<sup>1,2</sup>, 谢益佳<sup>3</sup>, 黄廷林<sup>1,2</sup>, 邢翔轩<sup>1,2</sup>, 胡瑞柱<sup>1,2</sup>, 韩晓璐<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中国市政工程

中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 以西安市某自来水管厂的沉淀池排泥水为处理对象, 采用循环造粒流化床技术先进行工艺参数优化中试, 再进行生产性试验研究。中试结果表明, 循环造粒流化床的运行稳定性较高, 即使进水浊度在 200~800 NTU 范围内变化或进水上升流速在 25~70 cm/min 之间变化, 出水浊度仍可稳定保持在 10 NTU 以下; 工艺优化参数如下: 上升流速为 70 cm/min, 搅拌转速为 5~8 r/min, 助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)投加量为 4~5 mg/L。在中试的基础上进行生产性试验, 出水浊度始终稳定在 10 NTU 以下, 最佳间歇排泥间隔为 4 h, 出泥含水率为 95.8%, 处理成本为 0.1 元/m<sup>3</sup>。中试及生产性试验结果表明, 采用循环造粒流化床处理排泥水, 具有出水水质好、抗冲击负荷能力强、污泥浓缩效果好、处理成本低等优点。

**关键词:** 循环造粒流化床; 水厂排泥水; 浊度; 参数优化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)07-0012-07

## Treatment of Sludge Water in Waterworks by Circulating Granulation Fluidized Bed

SUN Shu-bo<sup>1,2</sup>, XIE Yi-jia<sup>3</sup>, HUANG Ting-lin<sup>1,2</sup>, XING Xiang-xuan<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhu<sup>1,2</sup>,  
HAN Xiao-lu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** A pilot test treating sludge water from the sedimentation tank of a waterworks in Xi'an City was carried out by using the circulating granulation fluidized bed technology to optimize the process parameters, and then a production test was carried out. According to the pilot test results, the circulating granulation fluidized bed had high operational stability. Even if the influent turbidity varied within 200~800 NTU or the influent upflow velocity varied between 25 cm/min and 70 cm/min, the effluent turbidity was always less than 10 NTU. The optimized parameters of the process were as follows: upflow velocity of 70 cm/min, stirring speed of 5~8 r/min, and PAM dosage of 4~5 mg/L. During the productive

operation under the above optimized conditions, the effluent turbidity was always less than 10 NTU, the optimal interval of intermittent sludge discharge was 4 hours, the moisture content of the discharged sludge was 95.8%, and the treatment cost was 0.1 yuan/m<sup>3</sup>. The results indicated that the treatment of sludge water by the circulating granulation fluidized bed had the advantages of good effluent quality, strong shock load resistance, good sludge concentration effect and low treatment cost.

**Key words:** circulating granulation fluidized bed; sludge water in waterworks; turbidity; parameter optimization

在我国自来水管厂的常规处理工艺中,沉淀池排泥水富集了原水中绝大部分的污染物,同时沉淀池排泥水占水厂总净水量的4%~7%<sup>[1-2]</sup>,出于节约水资源的目的,对沉淀池排泥水进行一定处理后回用于生产是目前大多数水厂的常用方法。但是沉淀池排泥水中除含有生产过程中所投加的各类化学药剂外,还富集了原水中的泥沙、胶体颗粒、藻类、细菌等大部分污染物<sup>[3]</sup>,目前大部分水厂在处理沉淀池排泥水的实践中存在处理水质不合格、出泥含水率过高等诸多问题。沉淀池排泥水浓度较低、沉淀性能较差,含固率仅为0.02%~0.05%<sup>[4]</sup>,导致采用高密度沉淀池、重力浓缩池、机械浓缩池等传统工艺处理时存在效果较差、效率较低、占地面积较大等缺点<sup>[5]</sup>;若以合适的回流比对排泥水进行回用,则会存在重金属富集和生物安全性等问题<sup>[6]</sup>,且对采用直接过滤工艺的水厂并不适用。西安建筑科技大学研发的第1代造粒流化床工艺是一种高效固液分离技术,相对于传统处理工艺,对沉淀池排泥水的处理效果较好且效率较高,该技术通过调整物理化学条件和动力条件,限制随机絮凝过程,形成大而密实的絮体,具有良好的固液分离效果<sup>[7-8]</sup>。西安市某自来水厂采用第1代造粒流化床处理沉淀池排泥水,工程运行参数如下:进水浊度为60~100 NTU,出水浊度为3 NTU,上升流速为15~45 m/h, PAM投加量为1 mg/L<sup>[9]</sup>。

循环造粒流化床是在第1代造粒流化床的基础上增加内循环,使流化床内存在一定浓度的污泥,保证流化床造粒区的稳定运行,从而保证该工艺系统的高效、稳定运行,达到较好的出水效果,具有运行负荷更高、抗冲击负荷能力更强、加药量更少、运行成本更低等优点。笔者通过中试及生产性试验考察了循环造粒流化床技术对沉淀池排泥水的处理效果,并对工艺参数进行优化,以期为后续水厂运行提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 沉淀池排泥水水质

西安市某自来水管厂的原水为水库水,采用斜管沉淀池处理工艺,设计处理水量为 $15 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,水厂在日常生产中产生了大量高浊度的沉淀池排泥水,试验期间的水质如下:浊度为200~800 NTU, pH值为7.73~8.12,含水率为99.8%,SS为1 892~2 031 mg/L,温度为8~11℃。

### 1.2 工艺流程与试验方法

该水厂沉淀池排泥水的处理工艺流程如图1所示。沉淀池排泥水排放到调节池内,在进入循环造粒流化床之前投加助凝剂阴离子型聚丙烯酰胺(PAM),循环造粒流化床出水收集于回用池,排泥进入储泥池。中试的循环造粒流化床主体装置高为1.8 m、直径为250 mm,处理量为1.1 m<sup>3</sup>/h。生产性试验中有2台循环造粒流化床设备,高度为6 m、直径为2 800 mm,单台处理量为120 m<sup>3</sup>/h。

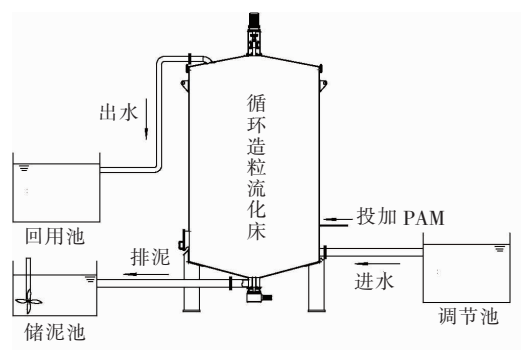


图1 水厂沉淀池排泥水的处理工艺流程

Fig.1 Treatment process of sludge water from sedimentation tank in waterworks

试验内容包括两方面:一是中试,以出水浊度为指标,优选出适宜的投药条件、搅拌转速、上升流速等工艺参数;二是生产性试验,以设备运行稳定性为指标,考察循环造粒流化床的运行稳定性、出泥含水率及排泥间隔。其中,浊度采用WGZ-200雷磁浊

度仪测定;出泥含水率采用重量分析法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 中试结果与分析

#### 2.1.1 PAM 投加量的优化

在试验过程中控制装置内部水流上升流速为 60 cm/min、搅拌转速为 7 r/min, PAM 投加量对浊度去除效果的影响如图 2 所示。可知, 当 PAM 投加量为 2~5 mg/L 时, 浊度去除率与 PAM 投加量呈正相关, 这是因为 PAM 的高分子链尚未完全覆盖初始粒子表面, 未达到饱和状态, 装置的处理效果受 PAM 投加量影响较大。继续增加 PAM 投加量, 导致絮体颗粒进一步增大, 当絮体颗粒增大到一定状态时, 悬浮层内部絮体无法继续维持流化状态, 从而影响到出水效果, 同时导致排泥桶堵塞, 影响流化床的整体运行状态。在进水浊度为 500~600 NTU 的情况下, 流化床的 PAM 投加量宜控制在 4~5 mg/L。

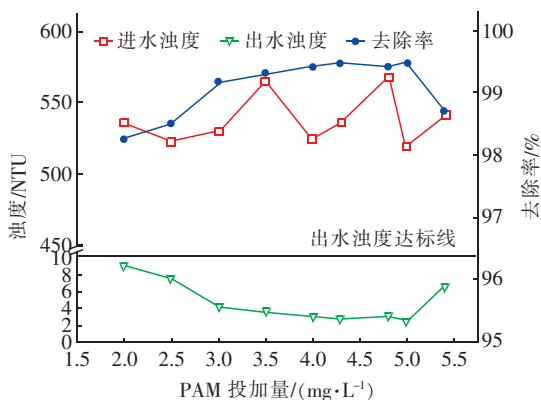


图2 不同PAM投加量对浊度去除效果的影响

Fig. 2 Effect of PAM dosage on turbidity removal

#### 2.1.2 搅拌转速的优化

在流化床设备中设置强制搅拌的作用主要有两个:一是为结团体的致密提供足够的动力;二是以系统持续稳定运行为目的, 保证循环造粒流化床中结团体成长粒度及布水的均匀性。因此需要保持一定的搅拌强度使系统得以稳定运行。循环造粒流化床中强制搅拌强度的计算公式<sup>[10]</sup>如下:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu_k V}} = 1.209 \times 10^{-4} \times \left\{ \frac{n^3 (\rho_w + \rho_e V_f)}{\mu [1 + 2V_f (\frac{1+V_f}{1-V_f})^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:  $G$  为搅拌强度,  $s^{-1}$ ;  $P$  为搅拌能量损耗,  $W$ ;  $\mu_k$  为水的“视在”黏滞系数,  $N \cdot s/m^2$ ;  $V$  为体积,

$m^3$ ;  $n$  为搅拌转速,  $r/min$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $1 \times 10^3 \text{ kg}/m^3$ ;  $\rho_e$  为结团体的有效密度,  $kg/m^3$ ;  $V_f$  为结团体颗粒体积浓度;  $\mu$  为水的运动黏滞系数,  $N \cdot s/m^2$ 。

搅拌转速  $n$  的  $3/2$  次方与  $G$  值成正比, 故有必要对搅拌转速进行优化。在试验过程中控制装置内部水流上升流速为 60 cm/min、PAM 投加量为 4.8 mg/L, 搅拌转速对浊度去除效果的影响见图 3。可以看出, 浊度去除率随着搅拌转速的增大呈先升高后降低的变化趋势, 当搅拌转速为 7 r/min 时, 对浊度的去除效果最好。搅拌转速较小时出水效果差, 主要是因为强制搅拌为颗粒提供的动力过小, 不足以使既成絮体与初始粒子完成碰撞, 以至于形成密度较低的结团体颗粒; 但当搅拌转速过大时, 搅拌所提供的动力过大, 会将水中絮体打碎, 导致结团絮体破碎, 出水浊度升高。综合考虑处理效果及能耗, 确定最佳搅拌转速为 5~8 r/min。

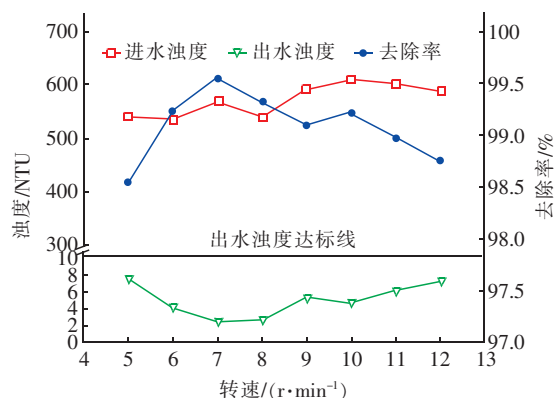


图3 不同搅拌转速对浊度去除效果的影响

Fig. 3 Effect of stirring speed on turbidity removal

#### 2.1.3 进水浊度冲击负荷的影响

沉淀池排泥水含固率不稳定, 系统停止运行时, 排泥水中的固体颗粒在调节池内积累, 会造成进水浊度随停机时间延长而升高, 因此有必要探究设备抵抗进水浊度冲击负荷的能力。控制上升流速为 70 cm/min、PAM 投加量为 4 mg/L、搅拌转速为 7 r/min, 不同进水浊度对设备处理效果的影响如图 4 所示。可知, 在该试验条件下, 进水浊度在 200~800 NTU 范围内变化时与设备对浊度的去除效果没有明显的相关关系, 出水浊度始终保持在 10 NTU (出水达标浊度) 以下, 满足水厂对出水浊度的要求, 由此可证明循环造粒流化床有较强的抗浊度冲击负荷能力。

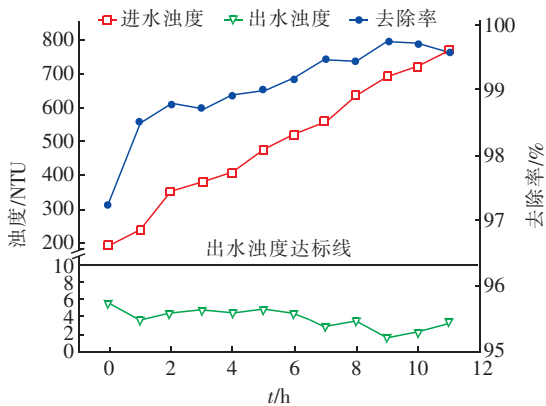


图4 进水浊度对浊度去除效果的影响

Fig. 4 Effect of influent turbidity on turbidity removal

### 2.1.4 上升流速冲击负荷的影响

考虑到水厂的沉淀池排泥水产量以及可能的高负荷间歇运行需求,对循环造粒流化床中试装置进行了上升流速冲击负荷试验研究(PAM投加量为4 mg/L、搅拌转速为7 r/min),结果见图5。

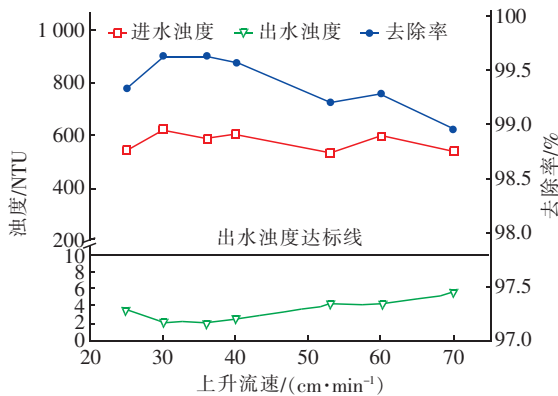


图5 上升流速对浊度去除效果的影响

Fig. 5 Effect of upflow velocity on turbidity removal

循环造粒流化床上升流速的提高,会使得水流剪切力增大,造成悬浮层体积浓度减小,悬浮层会达到新的动态平衡,这将导致絮体密度变小、颗粒在系统中的停留时间减少,从而影响出水水质。但上升流速越大,循环造粒流化床的处理能力就越强,有利于满足水厂对排泥水处理量的要求。从图5可以看出,在装置内水流上升流速从25 cm/min增加到30 cm/min的情况下,浊度平均去除率为99.3%,出水浊度变化较小;当上升流速增加到40 cm/min时,浊度去除率无明显变化,出水浊度仍保持在较低的水平,处理效率有所提高,导致这种现象的原因是在该上升流速条件下,水流剪切力较大,为结团体颗粒之间的碰撞提供了足够的动力,提高了结团体颗粒间

的碰撞效果,有利于絮体颗粒间的吸附,在保证较低浊度的同时使得循环造粒流化床的处理效率更高。当上升流速从40 cm/min增加到70 cm/min时,出水浊度升高,浊度去除率降低,这是由于絮体所受水流剪切力较大,会将絮体打碎,而破碎的絮体无法重新絮凝,絮体颗粒在系统中的停留时间较短,进而随水流流出反应器,导致处理效果变差。综上可知,在30~70 cm/min的上升流速条件下,循环造粒流化床中试装置的出水浊度均在10 NTU以下,可以满足水厂的要求。与第1代造粒流化床相比,循环造粒流化床的抗上升流速冲击负荷能力大幅提高,最大上升流速显著升高,处理能力增强。

### 2.1.5 循环造粒流化床的运行稳定性

在PAM投加量为4.8 mg/L、上升流速为60 cm/min、搅拌转速为7 r/min的条件下,循环造粒流化床的连续运行效果如图6所示。排泥水水温对出水浊度基本没有影响,出水浊度稳定保持在10 NTU以下。低温会影响结团体的絮凝效果,导致出水效果变差,故第1代造粒流化床的运行效果受水温的影响较大。循环造粒流化床内絮体颗粒密度较大,能更加充分地与水中颗粒结团絮凝,从而达到更好的处理效果。

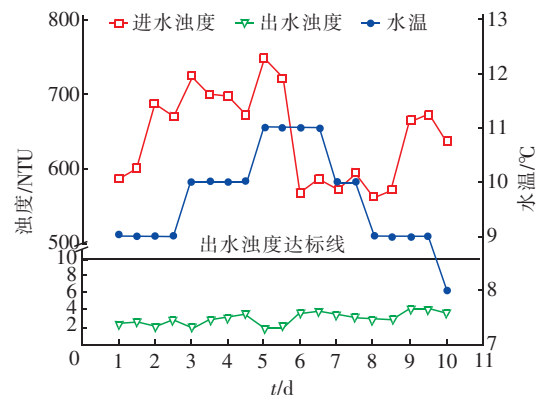


图6 循环造粒流化床中试装置的连续运行效果

Fig. 6 Continuous operation effect of pilot-scale circulating granulation fluidized bed

循环造粒流化床中试装置停运20 h后再重新启动,运行效果如图7所示。可以看出,流化床在启动初期出水浊度较高,但都保持在10 NTU以下,这可能是由于关闭系统后,系统内部悬浮层由于重力作用产生挤压,导致部分絮体破碎而引起的;浊度去除率从停运前的99.3%下降至启动初期的98.9%,经过2 h的重启恢复期,浊度去除率恢复到99.4%



以上。

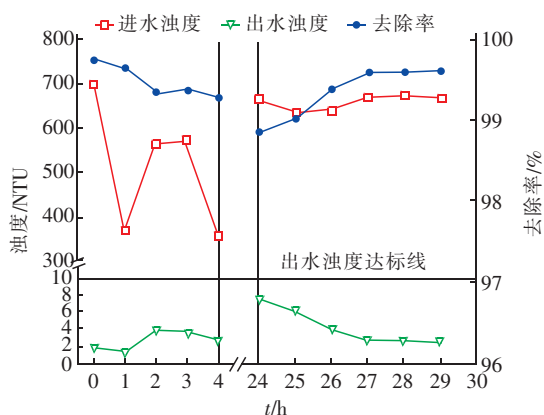


图7 流化床停运再重启的运行效果

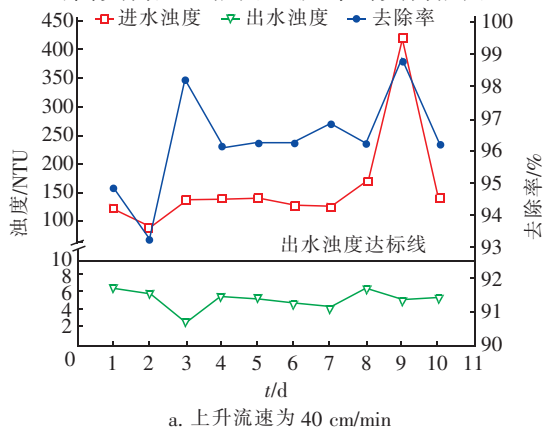
Fig. 7 Operation effect of circulating granulation fluidized bed during outage and restart process

## 2.2 生产性试验结果与分析

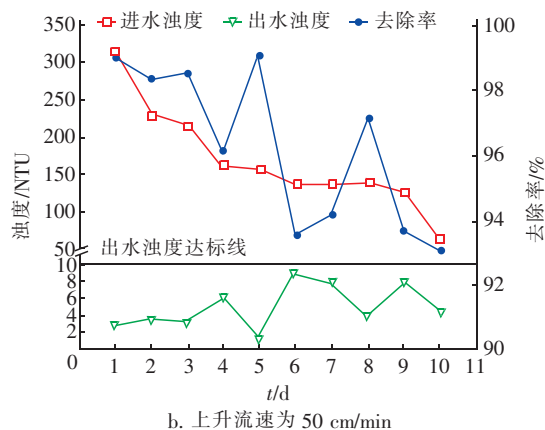
### 2.2.1 生产性试验的运行稳定性

该水厂的设计规模为  $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 采用循环造粒流化床工艺对排入调节池的沉淀池排泥水进行处理, 常规所需处理的排泥水量为  $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 考虑到水厂常规处理工艺的突发情况, 故该水厂采用两台  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  的循环造粒流化床。

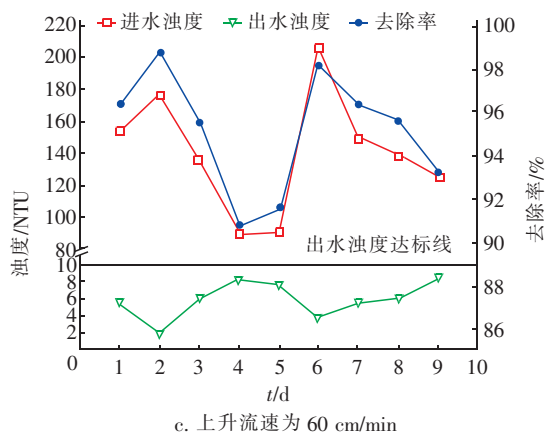
在生产性试验中, PAM 投加量为  $5 \text{ mg/L}$ 、搅拌转速为  $5 \text{ r/min}$ , 当上升流速分别为  $40$ 、 $50$ 、 $60 \text{ cm/min}$  时, 循环造粒流化床的处理效果如图8所示。结果表明, 在上升流速分别为  $40$ 、 $50$ 、 $60 \text{ cm/min}$  并且进水浊度波动较大的情况下, 循环造粒流化床依然能保证出水浊度稳定在  $10 \text{ NTU}$  以下, 出泥含水率均在  $96.2\%$  左右, 满足水厂的要求(水厂要求出泥含水率不高于  $97\%$ )。可见循环造粒流化床满足自来水厂对出水及出泥的要求, 在实际工程中具有极强的高负荷处理能力及抗冲击负荷能力。



a. 上升流速为  $40 \text{ cm/min}$



b. 上升流速为  $50 \text{ cm/min}$



c. 上升流速为  $60 \text{ cm/min}$

图8 不同上升流速下循环造粒流化床的运行效果

Fig. 8 Operation effect of circulating granulation fluidized bed at different upflow velocity

### 2.2.2 排泥间隔的优选

在生产性试验中, 循环造粒流化床采用间歇排泥的方式运行。为了确定循环造粒流化床适宜的排泥周期, 考察了循环造粒流化床的污泥浓缩效果, 运行参数如下: PAM 投加量为  $4 \text{ mg/L}$ 、上升流速为  $60 \text{ cm/min}$ 、搅拌转速为  $5 \text{ r/min}$ , 结果如图9所示。

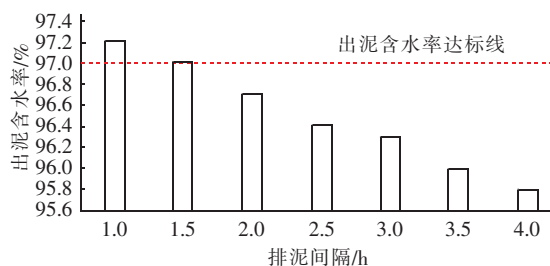


图9 排泥间隔对出泥含水率的影响

Fig. 9 Effect of sludge discharge interval on moisture content of discharged sludge

由图9可知, 出泥含水率与排泥间隔呈负相关。当排泥间隔  $> 3.5 \text{ h}$  时, 出泥含水率在  $96\%$  以下; 排

泥间隔过长会导致循环造粒流化床排泥区的污泥积满,进而影响出水水质(排泥水产泥量较大)。综合考虑出水水质及后续机械脱水污泥含水率的要求,确定排泥间隔为4 h。

### 2.3 运行成本分析

根据生产性试验结果,本系统的运行成本主要由动力费用和药剂费用组成。其中,设备功率合计为6 kW,电价为0.5元/(kW·h),PAM投加量约为5 mg/L、单价为18 000元/t,单台设备的处理量为120 m<sup>3</sup>/h,经计算,药剂费为0.09元/m<sup>3</sup>,动力费为0.01元/m<sup>3</sup>,运行成本合计为0.1元/m<sup>3</sup>。第1代造粒流化床的运行成本约为循环造粒流化床的1.5倍<sup>[9]</sup>,传统重力浓缩池的运行成本约为循环造粒流化床的2倍<sup>[11]</sup>。

### 3 结论

① 中试结果表明,循环造粒流化床处理水厂沉淀池排泥水时,其抗进水浊度和上升流速冲击负荷能力较强,且受水温影响较小,连续运行稳定性高,重新启动恢复期短,出水浊度满足水厂要求。在进水温度为8~11℃、PAM投加量为4 mg/L、搅拌转速为7 r/min的条件下,当上升流速在25~70 cm/min范围内变化或进水浊度在200~800 NTU之间变化时,出水浊度可稳定保持在10 NTU以下。

② 在循环造粒流化床生产性试验过程中,在上升流速为60 cm/min、PAM投加量为5 mg/L、排泥间隔为4 h的工况下,当进水浊度在200~800 NTU内变化时,出水浊度稳定保持在10 NTU以下,浊度去除率在99.3%以上,出泥含水率为95.8%,运行成本为0.1元/m<sup>3</sup>。相对于第1代造粒流化床及传统沉淀池排泥水处理工艺,循环造粒流化床具有上升流速高、出泥含水率低、处理效果好、稳定性高、经济成本低、占地面积小等优点。

### 参考文献:

- [1] 黄廷林,乐文健,何文杰,等. 高效固液分离技术处理给水厂排泥水的中试研究[J]. 给水排水,2009,35(2):25-28.  
Huang Tinglin, Le Wenjian, He Wenjie, *et al.* Research on high-efficient solid-liquid separation process in the water plant sludge water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35 (2): 25 - 28 (in Chinese).
- [2] 于海涛. 改进型重力浓缩池在给水厂排泥水处理中的应用[J]. 广东化工,2017,44(10):155-156.  
Yu Haitao. Application of improved gravity thickener in sludge drainage disposal project of water treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44 (10): 155 - 156 (in Chinese).
- [3] 韦甦,李探微,单骁勇,等. 净水厂排泥水的过滤特性研究[J]. 浙江工业大学学报,2004,32(5):546-550.  
Wei Su, Li Tanwei, Shan Xiaoyong, *et al.* Filtering features of sludge water from the water treatment plant [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2004, 32(5): 546 - 550 (in Chinese).
- [4] 许嘉炯. 净水厂生产排泥水处理工艺研究与设计[J]. 给水排水,2011,37(1):34-38.  
Xu Jiajiong. Research and design of the water treatment plant sludge wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37 (1): 34 - 38 (in Chinese).
- [5] 王军. 净水厂排泥水处理系统工艺设计[J]. 供水技术,2017,11(2):46-48.  
Wang Jun. Process design of sludge wastewater system in waterworks [J]. Water Technology, 2017, 11 (2): 46 - 48 (in Chinese).
- [6] 陶辉,王玲,徐勇鹏,等. 滤池反冲洗废水的直接回流利用研究[J]. 中国给水排水,2008,24(9):1-4.  
Tao Hui, Wang Ling, Xu Yongpeng, *et al.* Study on direct reuse of filter backwash wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 1 - 4 (in Chinese).
- [7] 聂小保,黄廷林,张刚. 造粒流化床处理深圳梅林水厂的生产废水研究[J]. 中国给水排水,2006,22(7):42-45.  
Nie Xiaobao, Huang Tinglin, Zhang Gang. Research on pelleting fluidized bed technology for treating wastewater from Meilin Water Plant in Shenzhen City [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22 (7): 42 - 45 (in Chinese).
- [8] 黄廷林,解岳,丛海兵,等. 水厂生产废水结团凝聚处理的中试研究[J]. 给水排水,2003,29(3):9-12.  
Huang Tinglin, Xie Yue, Cong Haibing, *et al.* Pilot study on pellet coagulation process treating wastewater in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(3): 9 - 12 (in Chinese).
- [9] 赵楠,黄廷林,胡瑞柱,等. 造粒流化床处理反冲洗废水的生产性试验研究[J]. 中国给水排水,2017,33(13):6-10.  
Zhao Nan, Huang Tinglin, Hu Ruizhu, *et al.* Full-scale

experimental research on pelleting fluidized bed for treatment of backwashing wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 6 – 10 (in Chinese).

- [10] 张刚. 结团絮凝工艺优化中试及生产性试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.

Zhang Gang. Pilot & Full Scale Investigation of Pellet Flocculation Blanket Process Optimization[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010 (in Chinese).

- [11] 贾秀明, 李艳萍, 史彦伟, 等. 污水厂污泥脱水系统升级改造设计与经济技术分析[J]. 工业水处理, 2017, 37(7): 103 – 106.

Jia Xiuming, Li Yanping, Shi Yanwei, *et al.* Upgrading modification design of the sludge dewatering system in a sewage treatment plant and its economic and technical analysis[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(7): 103 – 106 (in Chinese).



作者简介: 孙书博(1994 – ), 男, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 研究方向为造粒流化床高速固液分离技术处理废水。

E-mail: s15524289879@163.com

收稿日期: 2019 – 11 – 25

(上接第11页)

#### 参考文献:

- [1] 鞠兴华, 李燕敏. 二沉池反硝化模拟分析[J]. 能源与环境, 2017(6): 15 – 16.

Ju Xinghua, Li Yanmin. Simulation analysis of denitrification in secondary sedimentation tank [J]. Energy and Environment, 2017 (6): 15 – 16 (in Chinese).

- [2] 尹博涵, 黄宁俊, 王社平, 等. 城市污水处理厂运行除磷效果影响因素分析[J]. 给水排水, 2011, 37(12): 41 – 45.

Yin Bohan, Huang Ningjun, Wang Shaping, *et al.* Analysis on the influencing factors of phosphorus removal effect in municipal wastewater treatment plant operation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(12): 41 – 45 (in Chinese).

- [3] 杨小丽, 叶峰, 宋海亮, 等. 基于污水厂运行数据的低温生物脱氮强化研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 82 – 85, 88.

Yang Xiaoli, Ye Feng, Song Hailiang, *et al.* Enhanced biological nitrogen removal at low-temperature based on operation data of wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1): 82 – 85, 88 (in Chinese).

- [4] 左椒兰, 李奕君, 苏子杰, 等. 氧化沟工艺低氧同步脱氮启动研究[J]. 环境工程, 2013, 31(2): 22 – 26.

Zuo Jiaolan, Li Yijun, Su Zijie, *et al.* Startup study on nitrification and denitrification at low DO concentration in oxidation ditch [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2): 22 – 26 (in Chinese).



作者简介: 李磊(1986 – ), 男, 山西汾阳人, 硕士, 工程师, 主要从事市政给排水设计工作。

E-mail: 309171912@qq.com

收稿日期: 2019 – 10 – 19