

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 01. 007

# 北方某水厂气浮工艺处理南水北调水源水的适应性

王 玥, 刘 朵, 郑雅文, 林 琳, 曹 贺  
(北京市自来水集团有限责任公司 第九水厂, 北京 100101)

**摘 要:** 针对北方某水厂侧向流斜板沉淀工艺对南水北调水源水(简称“南水水源水”)处理效果不佳的问题,探索了气浮工艺处理南水水源水的可行性。通过探究影响气浮中试系统运行效果的因素,综合考虑气浮工艺的处理效果及能耗,确定中试系统的回流比为7%~9%、溶气压力为0.25 MPa。与该水厂沉淀工艺相比,气浮工艺对南水水源水质的季节性变化适应较好,并且对水质剧烈波动具有良好的耐冲击性,运行期间气浮池出水浊度为0.21~0.75 NTU、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为0.6~1.6 mg/L。气浮工艺对藻类的去除效果优于现行沉淀工艺,在南水水源水中藻类数量为 $(65.6\sim 543.7)\times 10^4$ 个/L条件下,气浮工艺和沉淀工艺的除藻率分别为82.9%~97.7%、29.3%~86.8%。气浮工艺可有效降低出水残余铝浓度,出水铝浓度为0.20~0.33 mg/L,比沉淀工艺出水低50%左右,但二者对消毒副产物的去除效果无显著差别。

**关键词:** 沉淀; 气浮; 南水北调水源水; 高藻

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0046-06

## Adaptability of Air Flotation Process for Treating Source Water from South-to-North Water Transfer Project in a Waterworks in North China

WANG Yue, LIU Duo, ZHENG Ya-wen, LIN Lin, CAO He  
(Ninth Waterworks, Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** Due to the poor treatment performance of source water from the South-to-North Water Transfer Project by the lateral flow inclined plate sedimentation process in a waterworks in North China, the feasibility of treating the source water through air flotation process was examined. By exploring the factors influencing the operation effect of the pilot-scale air flotation system and considering the treatment efficiency and energy consumption of the process, the reflux ratio of the system was determined to range from 7% to 9%, and the dissolved air pressure was 0.25 MPa. Compared to the sedimentation process of the waterworks, the air flotation process was more adaptable to the seasonal variation of the source water quality and had a superior resistance to sharp fluctuations in water quality. The turbidity of the effluent from the air flotation process was 0.21~0.75 NTU, and the  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  was 0.6~1.6 mg/L during operation. In the source water with algae density of  $(65.6\sim 543.7)\times 10^4$  count/L, the removal efficiencies of algae by air flotation and sedimentation processes were 82.9%~97.7% and 29.3%~86.8% respectively. The air flotation process could effectively reduce the residual aluminum in the effluent, and the effluent aluminum concentration was 0.20~0.33 mg/L, which was about 50% lower than that of the sedimentation process. However, there was no significant difference in the removal performance of disinfection by-products between the two processes.

**Key words:** sedimentation; air flotation; source water from the South-to-North Water Transfer Project; high concentration algae

北方某水厂设计规模为 $50\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,采用侧向流斜板沉淀工艺,清水区液面负荷为 $6.0\sim12.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,主要处理南水北调中线水源水(简称“南水水源水”),该水源水具有藻类数量多、有机物浓度高、pH高、碱度低等特点。此外,由于明渠输水,南水水源水温度呈季节性变化,具有冬季低温低浊、夏季高温高藻的特点。冬季水体黏度、剪切力增大,而水中胶体杂质较少、凝聚碰撞的机会较少,因此不易形成絮粒,即使形成,也轻而松散,易破碎、难沉降,导致沉淀池“跑矾花”现象严重,出水浊度甚至高于原水,滤池过滤周期严重缩短。此外,水中藻类随季节不同而发生改变,特别是夏季藻类数量较多,混凝剂投加量较大,藻类与混凝剂形成的絮体质量轻且不易沉淀,沉淀池运行一段时间后,

板箱积泥板结严重,导致过水断面变小,沉淀效果变差,需要频繁冲洗板箱,人工成本较高。

目前,国内外有许多针对低温、低浊、高藻地表水的处理技术<sup>[1-2]</sup>,其中气浮工艺被广泛应用<sup>[3-4]</sup>,我国诸多水厂采用该工艺进行技术改造,解决处理能力下降、滤池过滤周期短、出水臭味严重、藻类难处理等生产运行问题<sup>[5-6]</sup>。为了解决北方某水厂沉淀工艺的生产运行问题,以其进水为处理对象,进行气浮工艺中试研究。

1 试验装置与方法

1.1 现行工艺流程及原水水质

北方某水厂进水为南水水源水,水质随季节及沿线降雨情况而频繁波动,不同水质期的指标检测结果见表1。水厂现行工艺流程见图1。

表1 南水水源水水质

Tab.1 Quality of source water from the South-to-North Water Transfer Project

水质期	时间	浊度/NTU	温度/℃	pH	COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	藻类数量/(10 <sup>4</sup> 个·L <sup>-1</sup> )
高温高藻期	5月下旬—9月中旬	1.53~5.40	15~28	7.7~9.0	1.6~3.1	0.03~0.16	157.7~796.4
常规水质期	4月上旬—5月下旬	0.65~1.44	13~23	7.4~8.3	1.0~2.6	<0.03	130.4~268.9
	9月中旬—11月中旬	0.96~4.51	13~25	8.0~8.5	1.1~3.0	0.03~0.06	107.1~328.5
低温低浊期	11月中旬—次年4月上旬	0.39~1.30	0~12	7.8~8.5	0.8~2.6	<0.03	46.6~259.7



图1 北方某水厂的工艺流程

Fig.1 Process flow of a waterworks in northern China

1.2 试验装置

气浮工艺中试系统见图2。

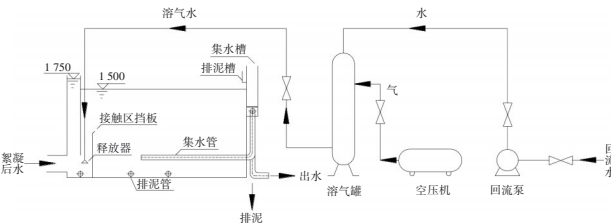


图2 气浮工艺中试系统

Fig.2 Pilot-scale system of air flotation process

气浮池尺寸为 $2.8\text{ m}\times1.2\text{ m}\times2.5\text{ m}$ ,有效水深为 $1.5\text{ m}$ ,分离区面积为 $1.5\text{ m}^2$ 。采用间歇进气、部分回流式加压溶气气浮工艺,回流比为 $5\%\sim10\%$ 。溶气罐内部填料为聚丙烯阶梯环,工作压力为 $0.20\sim$

$0.35\text{ MPa}$ 。溶气释放器采用TV-Ⅲ型释放器,水力排渣,排渣周期为 $10\text{ min}/8\text{ h}$ 。

1.3 试验方法

气浮中试系统承接该水厂絮凝池出水,经气浮工艺处理后,出水排入厂区内排泥井。中试系统的混凝剂采用水厂实际运行中投加的药剂,即聚合氯化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为 $10\%$ )和氯化铁( $\text{FeCl}_3$ 含量为 $40\%$ ),两者均为液体,总投加量为 $12\sim55\text{ mg/L}$ (投加量均以商品原液计)。为了更贴近实际生产运行情况,设定设备进水量为 $25\sim30\text{ m}^3/\text{h}$ ,分离区液面负荷为 $16\sim20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,高于设计规范值 $5.4\sim7.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。在气浮装置稳定运行状态下,考察气浮池运行效果的影响因素,并对比气浮与沉淀两种工艺对浊度、藻类、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、消毒副产物的去除效果,以及出水中药剂残留情况。

1.4 检测项目及方法

浊度采用浊度仪测定;pH采用便携式pH计测

定;COD<sub>Mn</sub>采用酸性高锰酸钾滴定法测定;铝采用铬天青S分光光度法测定;消毒副产物采用填充柱气相色谱法测定;藻类数量采用显微镜计数法测定。

## 2 气浮中试系统的影响因素

气浮出水水质主要受回流比和溶气压力的影响。根据溶气气浮机理,当回流比、溶气压力增大时,溶气水中的气泡粒径随之减小,而溶气率、气泡量随之增加,微气泡与水体中絮体颗粒的碰撞更加剧烈,异向絮凝作用更加显著<sup>[7-8]</sup>。为了确定气浮工艺最优运行参数,在常规水质期中中试系统回流比调整范围设定为6%~10%,溶气压力调整范围设定为0.20~0.35 MPa。

### 2.1 回流比对浊度及藻类去除效果的影响

气浮中试系统的回流比对浊度及藻类去除效果的影响如图3所示。

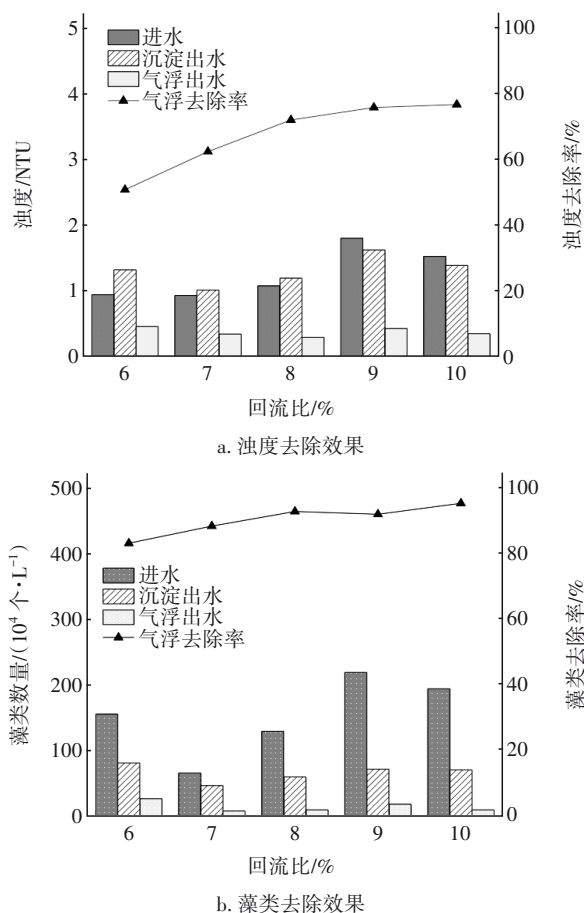


图3 回流比对浊度及藻类去除效果的影响

Fig.3 Effect of reflux ratio on removal of turbidity and algae

由图3可知,随着回流比的增加,气浮工艺对浊度及藻类的去除率随之上升。当回流比为10%时,

气浮工艺出水浊度均值可降至0.35 NTU,去除率达到76.7%;出水藻类数量为 $9.6 \times 10^4$  个/L,去除率为95.0%。但是回流比越大,系统能耗也越大,秉承降本增效的理念,综合考虑污染物去除效果和能耗,确定中试系统的回流比为7%~9%。

### 2.2 溶气压力对浊度及藻类去除效果的影响

溶气压力对浊度及藻类去除效果的影响如图4所示。当溶气压力由0.20 MPa升至0.25 MPa时,浊度去除率呈上升趋势;当溶气压力继续提高至0.30~0.35 MPa时,浊度去除率稳中有降。藻类去除效果的变化趋势与浊度类似,当溶气压力为0.20 MPa逐渐升至0.30 MPa时,藻类去除率呈小幅增长趋势,继续提高溶气压力至0.35 MPa后,去除率未出现明显变化,保持在97.5%左右。由此可见,溶气压力越大,气浮工艺的处理效果不一定越好,因此选择中试系统的溶气压力为0.25 MPa,并根据实际水质变化进行调整。

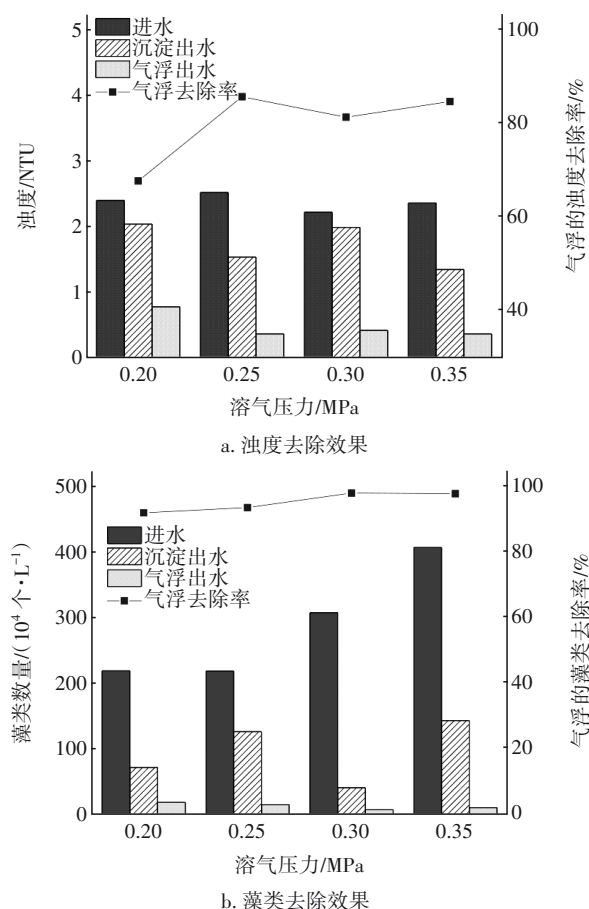


图4 溶气压力对浊度及藻类去除效果的影响

Fig.4 Effect of dissolved air pressure on removal of turbidity and algae

### 3 运行效果与分析

#### 3.1 不同工艺对浊度的去除效果

两种工艺对浊度的去除效果如图5所示。气浮工艺在低温低浊期以及短期浊度异常升高时对浊度的去除效果优于现行侧向流斜板沉淀工艺,设备整体运行稳定,出水浊度保持在0.21~0.75 NTU。3月—4月上旬,南水水源水呈现低温低浊特点,水体黏度增大、胶体颗粒数量减少,不利于形成絮体,而沉淀工艺需要增大絮体颗粒尺寸及质量来实现对污染物的去除,因此在实际生产运行中,该水厂混凝剂总投加量较大,为24~36 mg/L。大剂量的混凝剂形成的絮体大且密实,气浮池内的絮体则需要更大的浮力上浮,通过提高回流比至9%~10%、溶气压力至0.30 MPa,来提高水中溶解气体含量、增大分离区气泡密度,维持出水浊度在0.50 NTU以下。4月中旬南水水源水温度回升至15℃,水质进入常规水质期,将回流比调整为7%左右、溶气压力为0.25 MPa,气浮工艺出水浊度为0.21~0.50 NTU,整体保持较优的处理效果。

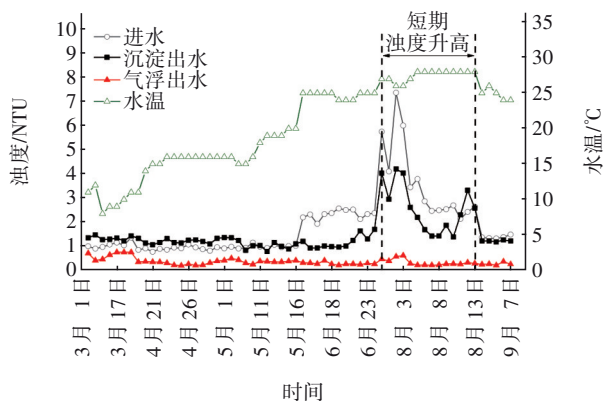


图5 两种工艺对浊度的去除效果

Fig.5 Removal of turbidity by two processes

7月下旬—8月上旬,南水水源水质受上游暴雨影响出现剧烈波动,平均浊度最高达到7.37 NTU,水中杂质以泥沙为主。沉淀池受冲击影响较大,混凝剂总投加量达到44~50 mg/L,出水浊度保持在1.38~4.21 NTU,对后续滤池运行造成极大压力。相较于沉淀工艺,气浮工艺在水质剧烈波动以及加药量大幅度调整的条件下运行稳定,南水水源水浊度升高期间调整回流比为7.5%~8.5%、溶气压力为0.30 MPa,出水水质未出现明显波动,出水浊度在0.21~0.61 NTU,浊度去除率在90%以上,表现出良好的耐冲击能力。

#### 3.2 不同工艺对COD<sub>Mn</sub>的去除效果

南水水源水的COD<sub>Mn</sub>较低,系统运行期间最高值为2.8 mg/L。两种工艺对COD<sub>Mn</sub>的去除效果见图6。气浮工艺对COD<sub>Mn</sub>的去除效果优于沉淀工艺,出水COD<sub>Mn</sub>为0.6~1.6 mg/L,平均去除率为44.8%,而沉淀工艺对COD<sub>Mn</sub>的平均去除率仅为17.8%。气浮工艺对水中不同分子质量的有机物均有一定的去除效果,其中对胶体类有机物的去除率较高,这类物质憎水性强,易于吸附在絮体上,可随着絮体上浮被排出系统<sup>[9]</sup>。而水厂沉淀池板箱间以及池底部积泥较多,水体流速快,絮体以及未完全吸附在絮体上的有机物则随水流出,这可能是该工艺COD<sub>Mn</sub>去除率低于气浮工艺的主要原因。

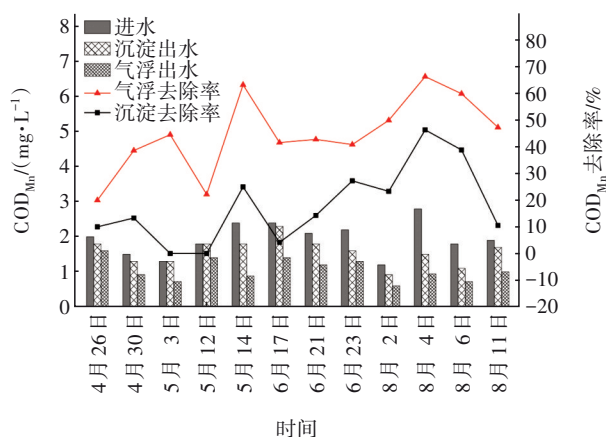


图6 两种工艺对COD<sub>Mn</sub>的去除效果

Fig.6 Removal of COD<sub>Mn</sub> by two processes

#### 3.3 不同工艺对藻类的去除效果

两种工艺对藻类的去除效果如图7所示。南水水源水中的藻类以硅藻、绿藻为主,藻类数量随季节变化明显,夏季进入高温高藻期,水中藻类数量显著增加。由于藻类密度小,与混凝剂形成的絮体轻、沉降慢,且实际生产中沉淀池内的水力停留时间较短,不足以使絮体沉淀,故沉淀池对藻类的去除率较低。试验期间,南水水源水的藻类数量为(65.6~543.7)×10<sup>4</sup> 个/L,沉淀工艺对藻类的去除率为29.3%~86.8%,平均去除率仅为58.3%。相关研究显示,藻类表面具有良好的疏水性能,容易与微气泡黏附形成密度较小的结合体,更利于依靠浮力去除<sup>[10]</sup>,因此相较于沉淀工艺,气浮工艺对藻类的去除效果更优且更加稳定,去除率为82.9%~97.7%。



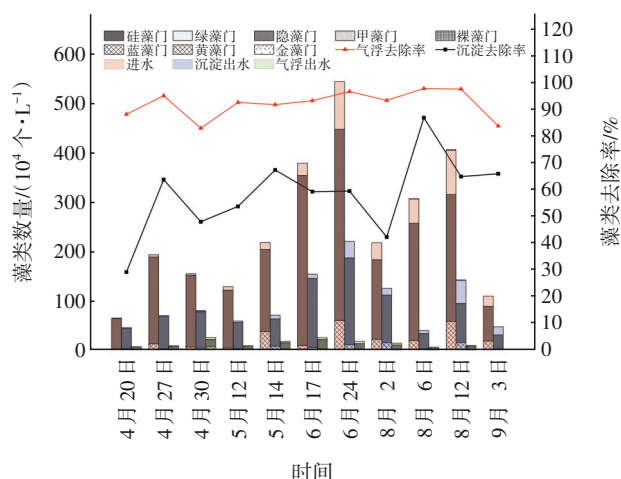


图7 两种工艺对藻类的去除效果

Fig.7 Removal of algae by two processes

### 3.4 不同工艺出水中铝残留情况

在净水工艺运行过程中,混凝剂易以单体或小聚合体的形式与溶解性有机物形成有机络合态的铝或细小絮体,在沉淀、过滤等工艺过程中不易被去除而残留在饮用水中<sup>[11]</sup>。相关研究表明,出水残余铝浓度受温度、pH、混凝剂投加量以及水质条件等诸多因素影响<sup>[12]</sup>,因此出水残余铝的控制一直是水处理工艺中的重点和难点。该水厂目前主要通过调整混凝剂投加比例、各工艺单元pH来控制出厂水残余铝浓度,但这种方式极易导致出水水质波动、滤池过滤周期缩短,对工艺运行产生较大影响。

两种工艺出水残余铝浓度如图8所示。

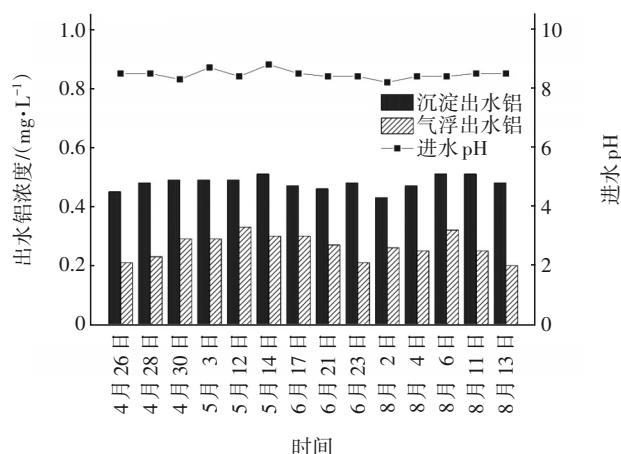


图8 两种工艺出水铝浓度

Fig.8 Aluminium concentration in effluent from two processes

南水水源水pH保持在8.20~8.80,整体处于较高水平,由于沉淀池的板箱间积泥较多,池内水流

速度较快,大量絮体随水流出,故沉淀池出水残余铝浓度高于气浮工艺,达到0.41~0.51 mg/L。而气浮工艺能够通过微气泡的黏附作用将大部分细小、轻质絮体向上排出,有效降低出水中残余铝浓度,气浮出水铝浓度为0.20~0.33 mg/L,比沉淀工艺低50%左右。

### 3.5 不同工艺出水的消毒副产物浓度

两种工艺出水的消毒副产物浓度如表2所示。中试期间沉淀工艺与气浮工艺对消毒副产物的去除效果无显著区别,工艺出水消毒副产物浓度均处于较低水平。

表2 两种工艺出水的消毒副产物浓度

Tab.2 Concentration of disinfection by-products in effluent from two processes

项目		三氯甲烷	二氯一溴甲烷	一氯二溴甲烷	三溴甲烷
4月27日	沉淀出水	0.024 0	0.002 8	<0.000 3	<0.000 3
	气浮出水	0.023 3	0.002 8	<0.000 3	<0.000 3
4月29日	沉淀出水	0.027 0	0.002 9	<0.000 3	<0.000 3
	气浮出水	0.027 3	0.002 8	<0.000 3	<0.000 3
5月13日	沉淀出水	0.031 7	0.003 3	<0.000 3	<0.000 3
	气浮出水	0.029 6	0.003 1	0.000 3	<0.000 3
6月24日	沉淀出水	0.014 2	0.001 8	<0.000 3	<0.000 3
	气浮出水	0.014 2	0.001 9	<0.000 3	<0.000 3
9月7日	沉淀出水	0.010 8	0.002 2	0.001 0	<0.000 3
	气浮出水	0.011 4	0.002 5	0.001 1	<0.000 3

注: 三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷的浓度限值分别为0.06、0.06、0.1、0.1 mg/L。

## 4 结论

① 气浮工艺的回流比越大,其对浊度及藻类的去除率越高;但溶气压力越大,对浊度及藻类的去除率不一定越大。综合考虑出水水质以及能耗,选择气浮工艺的回流比为7%~9%、溶气压力为0.25 MPa,并根据水质情况进行调整。

② 气浮中试装置对南水水源水质的季节性变化适应性较好,能有效去除浊度、藻类及 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,对于原水浊度和藻类数量异常升高水质突变情况具有较强的耐冲击能力,运行效果明显优于该水厂现行的侧向流斜板沉淀工艺。

③ 气浮工艺出水铝浓度为0.20~0.33 mg/L,比沉淀工艺出水低50%左右;但两种工艺对消毒副产物的去除效果无显著区别,出水消毒副产物浓度均处于较低水平。

## 参考文献:

- [1] 彭伟,刘耀群,丁仕林,等. 低温低浊水处理的研究现状[J]. 辽宁化工, 2021, 50(5): 637-640.  
PENG Wei, LIU Yaoqun, DING Shilin, *et al.* Research status of low temperature and low turbidity water treatment [J]. Liaoning Chemical Industry, 2021, 50(5): 637-640 (in Chinese).
- [2] HARSHAVARDHAN M, SETHUMATHAVAN V, SARAVANAN R. Removal of harmful algae in natural water by semiconductor photocatalysis: a critical review [J]. Chemosphere, 2022, 302: 134827.
- [3] 沈虎,王永磊,鞠玲,等. 城镇给水厂气浮工艺运行性能与经济性分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 47-55.  
SHEN Hu, WANG Yonglei, JU Ling, *et al.* Performance and economic analysis of air flotation process in urban water supply plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 47-55 (in Chinese).
- [4] EDZWALD J K. Chapter 6 - dissolved air flotation in drinking water treatment [J]. Interface Science and Technology, 2006, 10: 89-107.
- [5] 马骏,张作宇. 天津市杨柳青水厂改扩建工程介绍[J]. 供水技术, 2022, 16(4): 44-46.  
MA Jun, ZHANG Zuoyu. Introduction to the reconstruction and expansion project of Tianjin Yangliuqing Waterworks [J]. Water Technology, 2022, 16(4): 44-46 (in Chinese).
- [6] 徐晓然,孙志民,李鲁新,等. 中山市南头一水厂传统工艺升级改造工程案例[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 114-116, 119.  
XU Xiaoran, SUN Zhimin, LI Luxin, *et al.* Upgrading of traditional process in Nantou Waterworks in Zhongshan City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 114-116, 119 (in Chinese).
- [7] 黄廷林,赵阳,文刚. 西北地区低温低浊地表水气浮工艺中试研究[J]. 给水排水, 2015, 41(11): 41-45.  
HUANG Tinglin, ZHAO Yang, WEN Gang. Pilot study on air flotation to treat the low turbidity surface water in low temperature in northwest [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(11): 41-45 (in Chinese).
- [8] 李景明,樊玉光. 基于压力溶气的微气泡生成过程能质传递特性研究[J]. 化工技术与开发, 2016, 45(8): 57-59.  
LI Jingming, FAN Yuguang. Research on energy & mass transmission in process of bubble generation through pressurized dissolved gas [J]. Technology & Development of Chemical, 2016, 45(8): 57-59 (in Chinese).
- [9] 贾伟建,张克峰,王永磊,等. 混凝-气浮处理低浊高藻水库水的试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(1): 41-46.  
JIA Weijian, ZHANG Kefeng, WANG Yonglei, *et al.* Study on the treatment of low turbidity and high algal reservoir water by coagulation-flotation process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30(1): 41-46 (in Chinese).
- [10] 刘芳. 溶气气浮除污染效能及其运行稳定性强化措施[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
LIU Fang. Pollutant Removal Efficiency and Operation Stability Enhancement on Dissolved Air Flotation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
- [11] 李勖卓,程继夏,顾军农,等. 铁-铝盐混凝剂混合投加工艺控制溶解性残余铝的机理[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 580-587.  
LI Mengzhuo, CHENG Jixia, GU Junnong, *et al.* Mechanism of controlling dissolved residual aluminum in simultaneous addition of iron and aluminum salt coagulants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 580-587 (in Chinese).
- [12] 王志红,崔福义. pH值和水温对残余铝的影响试验研究[J]. 广东工业大学学报, 2003, 20(3): 71-75.  
WANG Zhihong, CUI Fuyi. Correlation of water temperature and pH value with residual aluminum in water plant [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2003, 20(3): 71-75 (in Chinese).

作者简介:王玥(1981- ),女,北京人,本科,工程师,  
从事水处理技术与水厂运行管理工作。

E-mail:75137644@qq.com

收稿日期:2023-10-15

修回日期:2024-01-15

(编辑:刘贵春)