



文章栏目：“水中污染物非均相分离与控制”专题

DOI 10.12030/j.cjee.202101162

中图分类号 TU991

文献标识码 A

徐晓然, 唐曾晖, 李振兴, 等. 气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺设计和工程应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 791-798.

XU Xiaoran, TANG Zenghui, LI Zhenxing, et al. Design and engineering application of the integrated flotation and sedimentation unit[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 791-798.

## 气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺设计和工程应用

徐晓然, 唐曾晖, 李振兴, 李俊义, 周午阳, 孙志民\*

广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广州 510060

第一作者: 徐晓然(1986—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 给水处理与水污染控制。E-mail: xuxr001@126.com

\*通信作者: 孙志民(1959—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 给水排水设计与科研。E-mail: 1426754080@qq.com

**摘要** 当水体中藻类含量高、浊度低时, 所形成的絮体沉淀性不好, 沉淀工艺处理效果差, 但气浮工艺处理效果相对较好; 而当原水浊度高时, 气浮工艺处理效果差, 而沉淀工艺处理效果却很好。为解决季节性水源水质变化对供水生产的影响, 结合上述 2 种工艺特点, 在给水处理工程中设置同时包含气浮和沉淀工艺的构筑物, 开发出新型气浮-沉淀工艺。该工艺的构造可满足 2 种工艺运行要求, 亦可根据水源水质在同一构筑物内切换气浮或沉淀运行模式, 能节省用地和建设成本。珠海三灶水厂改造工程项目(处理量  $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) 即该工艺的技术应用案例, 其生产运行结果表明: 当运行气浮模式时, 平均除藻率可达 96.9%, 平均除浊率可达 94.1%; 当运行沉淀模式时, 除浊率为 98.5%。

**关键词** 气浮; 沉淀; 新型气浮-沉淀工艺; 除藻; 除浊

受气候和人类活动的影响, 许多饮用水水源的水质存在季节性变化, 呈现出春季和秋季藻类含量高、冬季浊度低、夏季汛期浊度高的特征。给水生产中常见的沉淀工艺能有效处理浊度较高的原水, 但当原水藻类含量较高或低温低浊时, 除藻除浊效果较差; 另一方面, 气浮工艺可有效处理藻含量较高或低温低浊的原水, 但当原水浊度较高时, 除浊效果较差。因此, 给水生产中需同时建设气浮和沉淀 2 种工艺的构筑物, 以应对受季节影响较大的水源水处理。

为节省用地和建设成本, 孙志民等<sup>[1]</sup>将气浮工艺和沉淀工艺耦合在一个构筑物内, 形成侧向流斜板浮沉池。该工艺已成功应用于自吉林市第一水厂 ( $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>、吉林市第四水厂二期 ( $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>、新疆库尔勒市自来水公司水厂 ( $3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[3]</sup>、大庆石化总厂水气厂生活水厂 ( $2.04 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[4]</sup>、三明市下洋水厂二期 ( $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[5]</sup> 等给水厂。然而, 随着侧向流斜板浮沉池的深入应用, 其构造上的一些缺陷暴露出来<sup>[6-7]</sup>: 原本考虑兼顾气浮与沉淀出水要求, 共用一个出水集水系统, 而出水流态表明, 气浮在底部集水、沉淀在顶部集水才能保证出水颗粒物最少、出水水质最优; 原本考虑采用多折斜板结构, 以便增加斜板面积, 提高侧向流斜板的沉淀效率, 但

收稿日期: 2021-01-26; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50678041); 广东省省部产学研合作专项(2012B091000055)

实际运行时,斜板折叠处积泥严重,不仅影响斜板沉淀排泥,而且对絮体颗粒上浮形成阻碍,影响浮渣形成;原本考虑底部采用穿孔管排泥,使系统实现均匀排泥,故设置较矮的集泥区,而长期运行中穿孔管的排泥效果较差,池体底部积泥较多;而又因集泥区高度较矮,气浮接触区挡墙高度不足,导致溶气水与絮体颗粒接触时间不足,影响了气浮对絮体颗粒的去除效果。

为解决上述问题,在侧向流斜板浮沉池的基础上,重新构建池体结构、优化布置,形成基于气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺。本文剖析新型工艺的原理、运行方式和设计要点,并以珠海三灶水厂( $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )的升级改造为应用案例,评估该工艺的生产运行状况,以期为给水厂应对水源水质的季节性变化提供参考。

## 1 新型气浮-沉淀工艺的优化内容、运行方式及设计要点

### 1.1 新工艺的优化内容

为减少传统侧向流斜板浮沉池(图1)暴露出的缺陷,改进池体结构、优化布置,形成新型气浮-沉淀工艺(图2)。工艺优化的内容包括:1)分别设置独立的气浮和沉淀出水集水系统,以保证气浮和沉淀出水的最佳水力条件,气浮和沉淀不同模式时单独出水、互不干扰,保证出水水质稳定;2)采用单折结构斜板,以减轻运行沉淀工艺时斜板的积泥程度、优化运行气浮工艺时的水力条件;3)设置机械刮泥结构和装置,用以提高排泥效率,避免因池底部积泥引起的水质恶化问题;4)增加接触区挡墙高度,使溶气水与絮体颗粒充分接触,形成状态良好的浮渣,有利于气浮出水的水质提升。

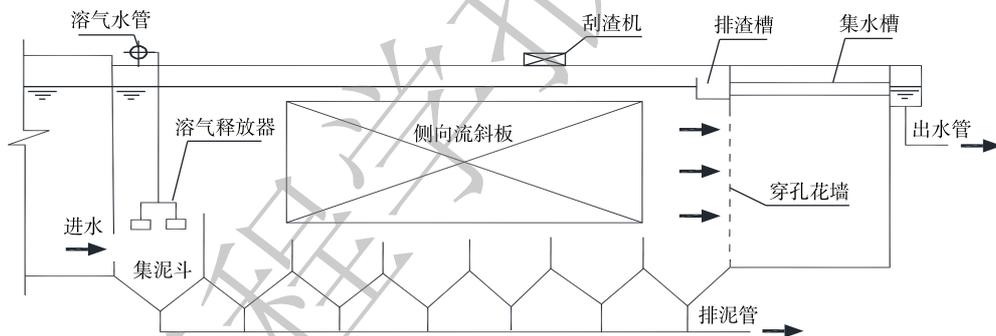


图1 侧向流斜板浮沉池造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of Side flow inclined plate flotation and sedimentation unit

### 1.2 工艺运行方式

气浮模式的运行条件:1)运行沉淀工艺处理效果较差,从而影响供水水质时;2)对供水水质要求提高时;3)在春秋季节原水藻含量较高( $>3 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ )或浊度较低( $<40$  NTU)时。沉淀模式的运行条件:1)当运行气浮工艺处理效果较差,从而影响供水水质时;2)考虑节省运行电费、操作简单时;3)在夏季暴雨原水浊度较高( $\geq 40$  NTU)时<sup>[8]</sup>。

#### 1.2.1 气浮模式

气浮模式工艺(图3)中,絮凝后的水流经配水穿孔花墙后进入接触区,与溶气释放器注入的溶气水充分混合<sup>[9]</sup>;溶气水释放的微小气泡与原水中的絮凝体等颗粒充分黏附,形成微小气泡与絮凝体的聚集体颗粒,即带气絮粒;颗粒随水流向上漂浮,一部分上浮至水面形成浮渣,一部分进入侧向流斜板模组内,沿斜板滑动上浮至水面形成浮渣;刮渣机定期将水面浮渣刮至排渣槽排出;杂质颗粒上浮分离后,澄清的水沿斜板缝隙流向池底部,经过气浮穿孔集水管进入气浮出水渠,并通过气浮出水管流入滤池<sup>[10]</sup>。

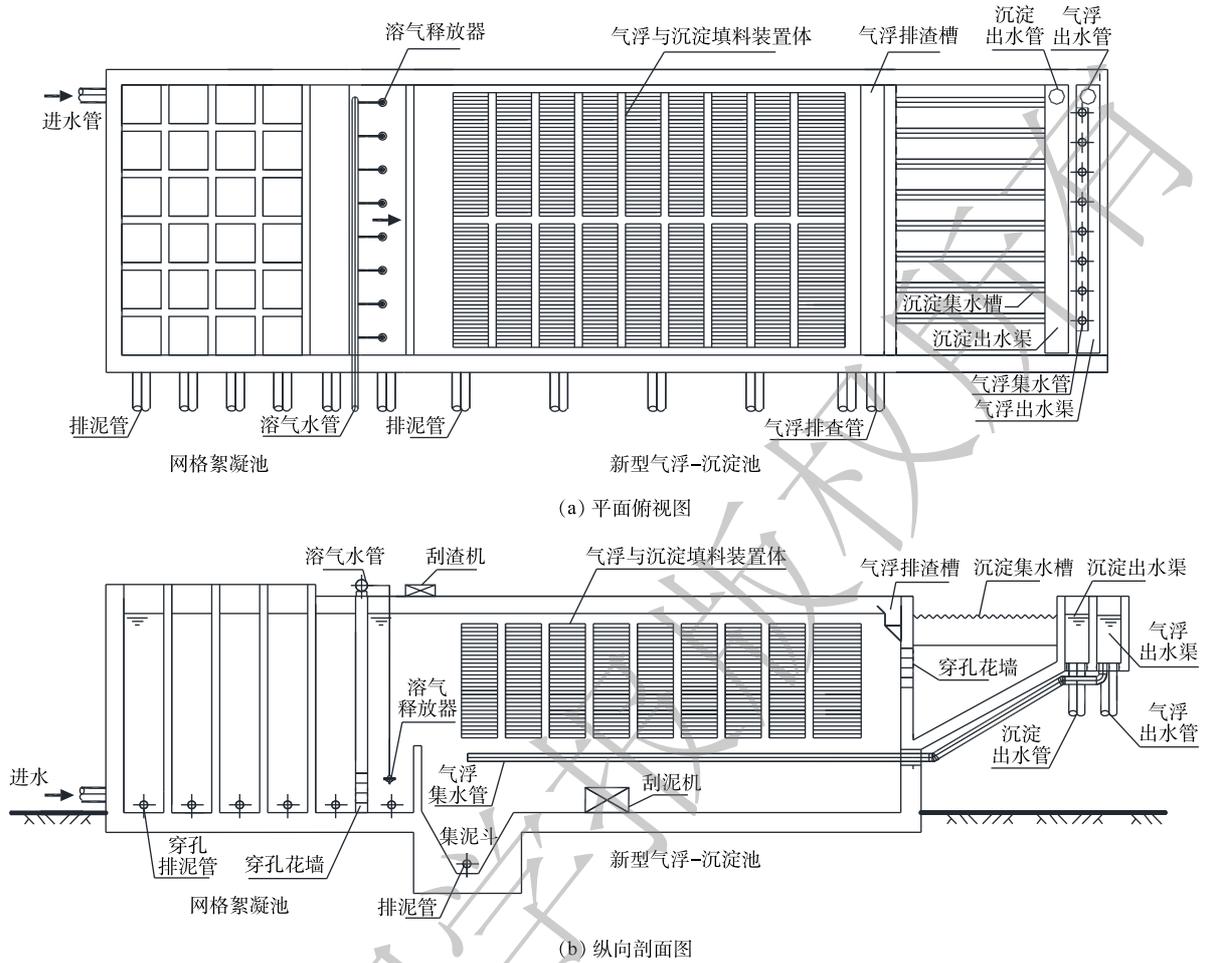


图 2 新型气浮-沉淀池构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of IFSU

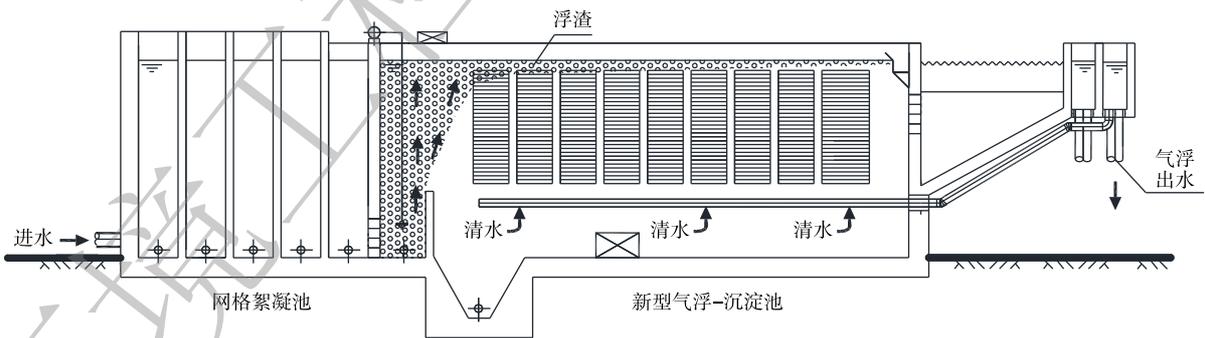


图 3 新型气浮-沉淀池运行气浮工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the air floatation process of IFSU

1.2.2 沉淀模式

沉淀模式工艺(图 4)中絮凝后的水流经配水穿孔花墙后进入接触区, 然后进入侧向流斜板模组; 进入模组后, 絮凝体等杂质颗粒沉降到斜板上, 沿斜板下滑至积泥区, 由刮泥机刮至集泥斗后, 通过管道排出; 絮凝体等杂质颗粒沉淀分离后, 澄清的水沿斜板缝隙流出侧向流斜板模组, 经过上部末端的沉淀出水穿孔花墙, 依次进入沉淀集水槽、沉淀出水渠, 最后通过沉淀出水管流入滤池。

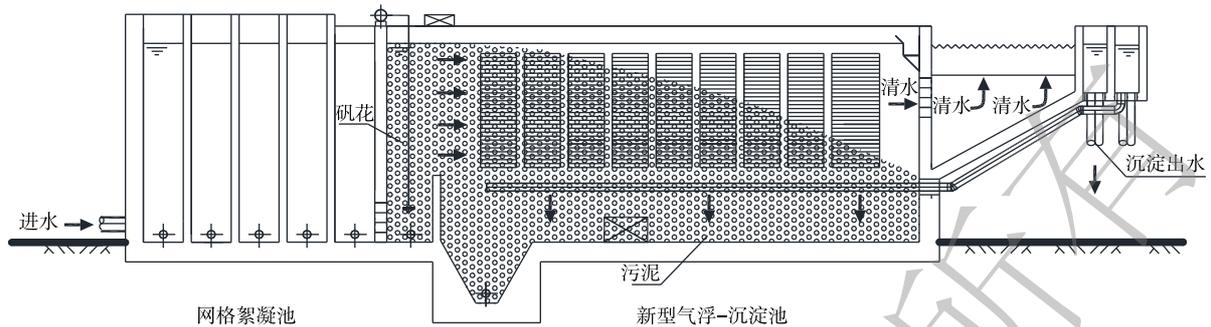


图4 新型气浮-沉淀池运行沉淀工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sedimentation process of IFSU

### 1.3 工艺设计要点

1) 进出水设计要点：①为减少絮凝体破碎，进水配水穿孔花墙过孔流速宜小于  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；②为保证配水均匀，同时降低沿程水头损失，气浮穿孔集水管内流速不宜超过  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；③为避免沉淀后絮凝颗粒被带出，沉淀出水穿孔花墙水流速度宜小于  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；④为应对处理水量的波动，沉淀出水集水槽溢流率不宜超过  $200 \text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 。

2) 气浮模式工艺设计要点：①为使释放器在最佳性能范围内运行，溶气压力宜采用  $0.3\sim 0.45 \text{ MPa}$ ；为实现气浮工艺运行的经济性，回流比宜选取  $8\%\sim 10\%$ ；②为保证溶气水与絮体颗粒物有足够的接触时间，形成形态较好的带气絮粒，气浮接触区水流上升速度宜采用  $10\sim 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，接触区内停留时间不宜少于  $60 \text{ s}$ ；③为保障气浮工艺具有较强的抗冲击负荷能力，分离区表面负荷率宜为  $2.88\sim 5.4 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ；④为提高气浮溶气效率，压力溶气罐宜采用阶梯环为填料，填料层高度宜采用  $1.0\sim 1.5 \text{ m}$ ，罐高度宜为  $2.5\sim 3.5 \text{ m}$ <sup>[11]</sup>；⑤为实现出水水质和工程投资之间较好的平衡，气浮分离区的长度宜采用  $15\sim 20 \text{ m}$ 。

3) 沉淀模式工艺设计要点：①考虑到水库水絮体沉降速度较小，颗粒沉降速度  $\mu$  宜采用  $0.8\sim 0.15 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，斜板间水流流速  $v$  宜采用  $5\sim 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ；②考虑到应对水质和水量的冲击，斜板需保证一定的富余量，有效系数  $\eta$  宜选用  $0.7\sim 0.8$ ；③综合考虑不同水质情况下斜板的处理效果，侧向流斜板(气浮与沉淀填料装置)模组，斜板倾斜角宜采用  $50^\circ\sim 60^\circ$ 、斜板间距宜采用  $50\sim 80 \text{ mm}$ <sup>[12]</sup>；④为实现最优水力条件，应在侧向流斜板(气浮与沉淀填料装置)模组底部设置阻流墙、进出处设置缓冲区；⑤为确保排泥效果，宜采用刮泥机排出沉淀污泥；为确保排渣效果，宜采用刮渣机排除气浮浮渣。

## 2 应用实例及成本分析

### 2.1 工程实例

本研究中，以珠海三灶水厂改造作为工程应用实例，评估新型气浮-沉淀工艺的运行效果及建设成本。该厂原采用重力式单阀滤池直接过滤工艺，但随着原水水质的变化和国家标准提高，其出厂水质已不能满足供水水质要求。经过多次论证，改造主体工艺确定为新型气浮-沉淀工艺(见图5)。水厂净水工艺流程见图6，改造后的处理规模为  $2\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。



图5 珠海三灶水厂改造工程新型气浮-沉淀工艺构筑物外观

Fig. 5 Appearance of IFSU in the DWTP of Zhuhai Sanzao

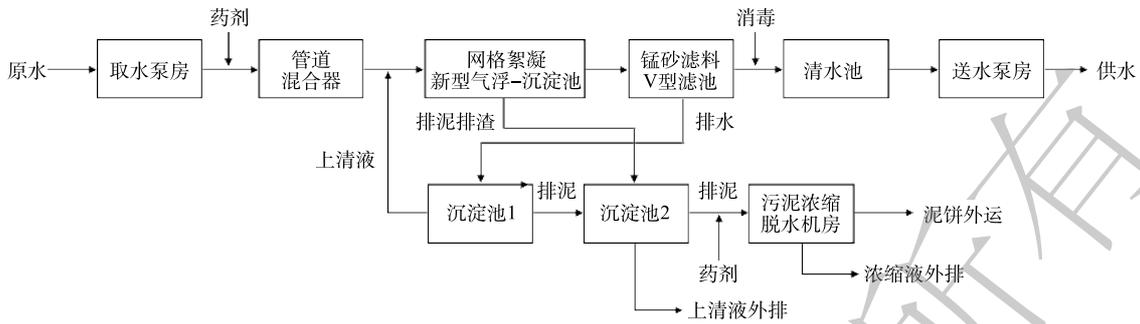


图 6 珠海三灶水厂改造工程工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of the treatment process of the Zhuhai Sanzao DWTP

## 2.2 运行效果

珠海三灶水厂原水为水库水。水质特点为：春秋季节藻类高、浊度低；冬季浊度低；夏季暴雨导致浊度高；春秋与冬季铁锰高。当春秋季节原水藻类高、浊度低，或者浊度低、运行沉淀工艺处理效果较差，影响供水水质时，则切换运行气浮工艺，以满足供水水质要求；当夏季降雨或暴雨、原水浊度较高，气浮工艺运行效果差影响供水水质时，则切换运行沉淀工艺，以满足供水水质要求；另外，采用锰砂滤料滤池，解决原水铁锰含量高问题。改造后的工艺处理效果如下文所述。

### 2.2.1 除藻效果

当原水藻含量超过  $3 \times 10^6$  个  $\cdot L^{-1}$  时，运行气浮模式，溶气压力 0.35~0.4 MPa，回流比 8%。由图 7 数据可知，系统运行较为稳定，进水藻含量为  $940 \times 10^4 \sim 7798 \times 10^4$  个  $\cdot L^{-1}$ ，出水藻含量为  $32 \times 10^4 \sim 112 \times 10^4$  个  $\cdot L^{-1}$ ，除藻率为 94.70%~99.14%，锰砂滤料 V 型滤池滤后水藻含量  $9.61 \times 10^4 \sim 25.98 \times 10^4$  个  $\cdot L^{-1}$ 。

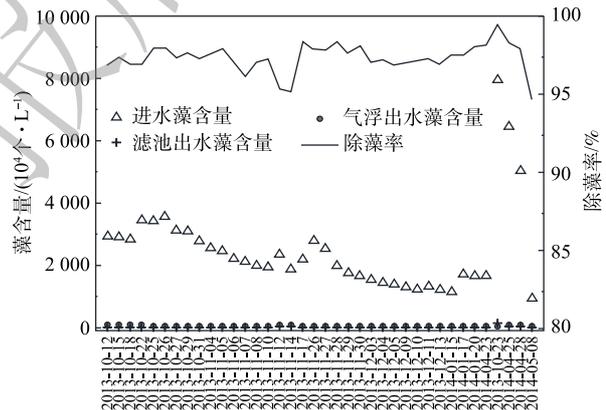


图 7 气浮工艺的除藻效果

Fig. 7 Result of algae removal in the mode of the air flotation process

### 2.2.2 除浊效果

当原水浊度低于 40 NTU 时，运行气浮模式除浊，溶气压力 0.35~0.4 MPa，回流比 8%。由图 8 可知，系统运行较为稳定，进水浊度 5.12~24.50 NTU，出水平均浊度为 0.5 NTU，除浊率为 90.23%~97.95%，锰砂滤料 V 型滤池滤后水浊度为 0.03~0.14 NTU。

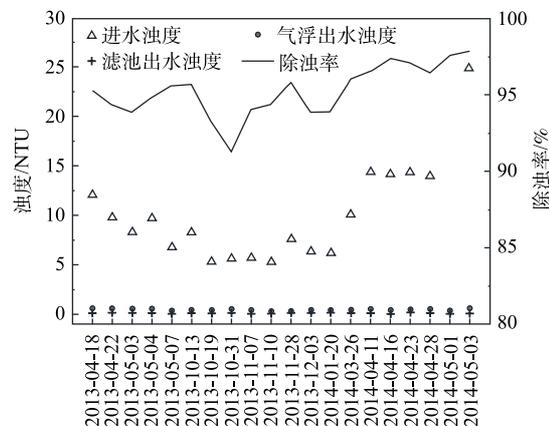


图 8 运行气浮模式除浊效果

Fig. 8 Result of turbidity removal in the mode of the air flotation process

当进水浊度高于 40 NTU 时，尤其当汛期时原水浊度急剧升高时，则运行沉淀模式。由图 9 数据可知，系统运行较为稳定，进水浊度 174~220 NTU，出水平均浊度为 3 NTU，除浊率为 98.36%~98.60%，锰砂滤料 V 型滤池滤后水浊度小于 0.5 NTU。

### 2.2.3 $COD_{Mn}$ 去除效果

在系统运行气浮和沉淀 2 种模式时，分别监测了进出水中的高锰酸盐指数。该指标可反

映系统对有机物的去除效果。运行气浮模式时(见图10(a)),进水COD<sub>Mn</sub>为2.45~7.04 mg·L<sup>-1</sup>,出水COD<sub>Mn</sub>为1.26~3.00 mg·L<sup>-1</sup>,COD<sub>Mn</sub>去除率为29.49%~72.35%。运行沉淀模式时(见图10(b)),进水COD<sub>Mn</sub>为2~7.22 mg·L<sup>-1</sup>,出水COD<sub>Mn</sub>为1.3~4.3 mg·L<sup>-1</sup>,COD<sub>Mn</sub>去除率为18.1%~72.35%。运行结果表明,气浮模式对COD<sub>Mn</sub>的去除效果比沉淀工艺模式更加稳定。

### 2.2.4 氨氮去除效果

在系统分别运行气浮和沉淀2种模式时,监测了进出水的氨氮含量。该指标可反映系统对引起水体富营养化的有机物去除效果。运行气浮模式时(见图11(a)),进水氨氮含量为0.02~0.34 mg·L<sup>-1</sup>,出水氨氮含量0~0.06 mg·L<sup>-1</sup>,氨氮去除率为82.35%~100%;运行沉淀模式时(见图11(b)),

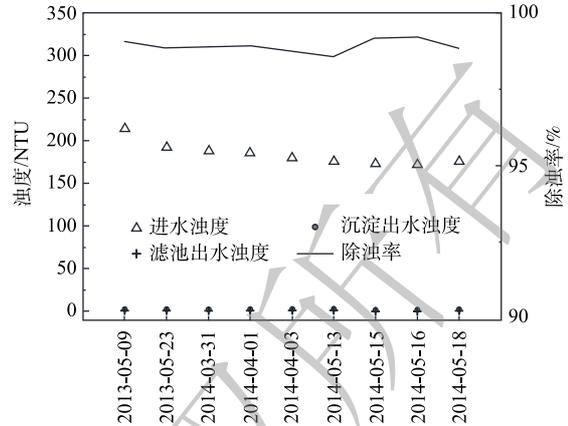
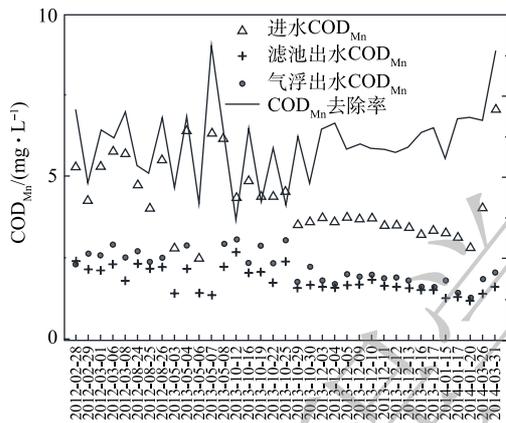
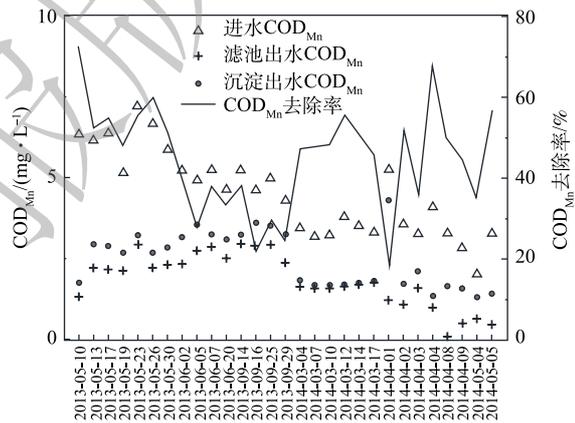


图9 运行沉淀模式除浊效果

Fig. 9 Result of turbidity removal in the mode of the sedimentation process



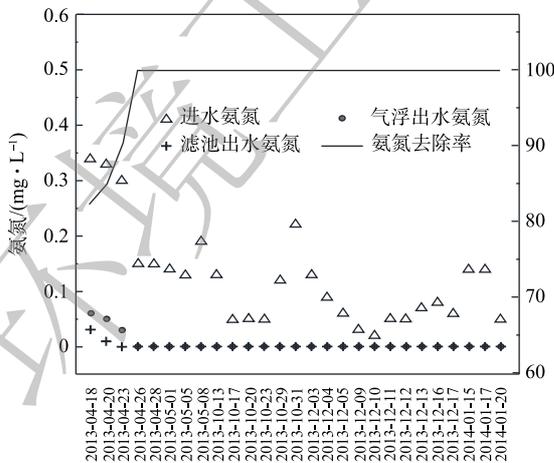
(a) 运行气浮模式



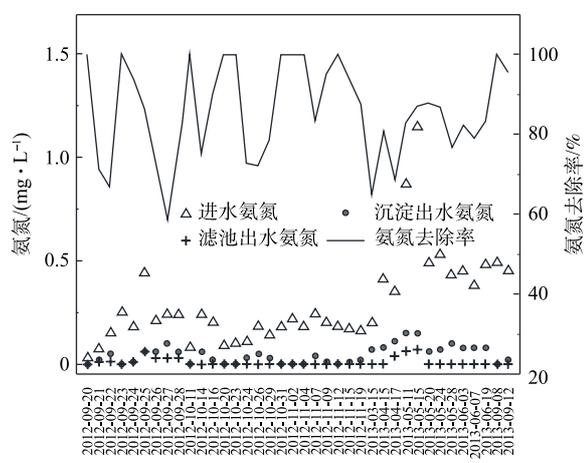
(b) 运行沉淀模式

图10 COD<sub>Mn</sub>处理效果

Fig. 10 Result of COD<sub>Mn</sub> removal



(a) 运行气浮模式



(b) 运行沉淀模式

图11 氨氮处理效果

Fig. 11 Result of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal

进水氨氮含量为 0.03~1.15 mg·L<sup>-1</sup>, 出水氨氮含量为 0~0.49 mg·L<sup>-1</sup>, 氨氮去除率为 44.58%~100%。运行结果表明, 气浮模式对氨氮的去除效果比沉淀模式稳定。

### 2.3 新型气浮-沉淀工艺与同类型工艺的效果及土建费用对比

济南玉清水厂与珠海三灶水厂的源水特征比较类似。两个水厂源水均为水库水, 常年低浊, 藻类、有机物、臭味物质呈季节性升高<sup>[13-14]</sup>。表 1 为珠海三灶水厂与济南玉清水厂的除藻、除浊效果对比。通过对比类似水源水质的同类型工艺处理效果可知, 运行新型气浮-沉淀工艺, 藻类去除率不低于 95%, 浊度去除率不低于 92%, 与沉淀串联气浮工艺的处理效果相当。土建费用方面, 在相同规模 (2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>) 下, 同时实现气浮与沉淀 2 种工艺, 新型气浮-沉淀池所需的占地面积最少, 仅为 309 m<sup>2</sup>; 而“絮凝+平流沉淀+气浮”组合池的占地面积为 713 m<sup>2</sup>, 是新型气浮-沉淀池的 2.31 倍<sup>[15]</sup>。通过对比可知, 在保证相同处理效果的前提下, 新型气浮-沉淀工艺可减少用地面积, 降低工程造价, 还可减少构筑物的闲置。

表 1 两种工艺的水厂处理效果对比

Table 1 Comparison of algae removal effect of the two treatment processes

水厂	处理规模/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	工艺类型	进水平均藻含量/ (10 <sup>4</sup> 个·L <sup>-1</sup> )	出水平均藻含量/ (10 <sup>4</sup> 个·L <sup>-1</sup> )	除藻率	进水平均 浊度/NTU	出水平均 浊度/NTU	除浊率
济南玉清水厂 <sup>[13-14]</sup>	20	平流沉淀串联 气浮工艺	474	21	95.6%	5.34	0.23	95.69%
珠海三灶水厂	2	新型气浮- 沉淀工艺	940~7 798	32~112	96.6%~98.6%	5.12~220	0.37~3.00	92.8%~98.6%

## 3 结语

新型气浮-沉淀工艺经过多年的发展, 已在全国多地应用, 主要有珠海三灶水厂 (2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)、中山长坑水库水厂 (0.6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)、韶关市演山水厂 (在建, 6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)、廉江市九洲江水厂 (在建, 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>)。新型气浮-沉淀工艺相比原侧向流斜板浮沉池工艺, 改进了出水集水系统、斜板结构及布置方式、刮泥方式和接触区高度。珠海三灶水厂的生产运行实践表明, 新型气浮-沉淀工艺对于地表水源水季节性水质变化适应性较强, 在除藻和除浊方面均表现出较高的去除效率, 同时占地面积较小, 节约工程造价。

## 参考文献

- [1] 孙志民, 李至时, 陈淑勤, 等. 侧向流斜板浮沉固液分离方法及装置: CN92104174.8[P]. 1998-03-18.
- [2] 李至时, 孙志民, 陈树勤. 侧向流斜板浮沉池[J]. 给水排水, 1993, 29(2): 6-9.
- [3] 王成. 侧向流斜板浮沉池的排泥改造[J]. 城镇供水, 2000(4): 20-21.
- [4] 孟凡良, 崔福义, 许占祥. 浮沉池技术在大庆石化总厂给水处理中的应用[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2003, 19(5): 553-556.
- [5] 郭星庚. 三明市日产50000米<sup>3</sup>浮沉池设计运行初探[J]. 福建建设科技, 1998(2): 30-31.
- [6] 孙志民. 新型气浮-沉淀固液分离工艺及中试研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [7] 孙志民, 张锐坚, 徐晓然, 等. 水处理用气浮与沉淀固液分离装置: CN201721916936.4[P]. 2018-11-02.
- [8] ZHANG R J, SUN Z M, CUI B. Improvement on algae and turbidity removal in an integrated flotation and sedimentation unit using side flow-inclined plate settlers: Evidence from a full-scale field experiment[J]. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 2018, 67: 84-98.
- [9] 孙志民, 张锐坚, 唐曾晖, 等. 新型气浮-沉淀工艺[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.

- [10] LI L, SUN Z, ZHANG R. Numerical simulation of sedimentation processes in a novel air flotation-sedimentation tank[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, 18: 41-46.
- [11] 孙志民, 丛宝华. 气浮与沉淀填料装置: CN2865823[P]. 2007-02-07.
- [12] 关继海, 徐景颖, 韩超. 侧向流斜板浮沉池的设计[J]. 给水排水, 1999, 35(5): 36-38.
- [13] 贾瑞宝, 宋武昌, 刘衍波, 等. 高藻引黄水库水常规工艺强化集成技术研究与示范[J]. 给水排水, 2012, 48(11): 27-33.
- [14] 李浩, 贾瑞宝, 李世俊. 济南玉清水厂强化常规处理工艺改造设计及运行分析[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(14): 90-93.
- [15] 徐晓然, 孙志民. 新型气浮-沉淀工艺建设经济性研究[J]. *广东化工*, 2015, 42(8): 138-141.

(责任编辑: 靳炜)

## Design and engineering application of the integrated flotation and sedimentation unit

XU Xiaoran, TANG Zenghui, LI Zhenxing, LI Junyi, ZHOU Wuyang, SUN Zhimin\*

Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China

\*Corresponding author, E-mail: 1426754080@qq.com

**Abstract** Conventional flocculation and sedimentation processes are suitable for handling raw water of high turbidity, and dissolved air flotation (DAF) has an edge in treating algal-rich raw water. To address the influence of seasonal variation of the quality of raw water to the treatment process, a novel integrated flotation and sedimentation unit (IFSU) is proposed. The main advantage of the IFSU is that it can run flotation or sedimentation processes in a single unit. In these systems, flotation is induced when algal-rich or low-turbidity water is present, while sedimentation is induced when treating high-turbidity water. The IFSU has been successfully applied to the rehabilitation project of Zhuhai Sanzao drinking water treatment plant (DWTP) with treatment volume of about  $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Results show that the average algal and turbidity removal rate are up to 96.9% and 94.1%, respectively when running the air flotation process. The turbidity removal rate is about 98.5% when running the sedimentation process.

**Keywords** flotation; sedimentation; integrated flotation and sedimentation unit(IFSU); algal removal; turbidity removal