

Application of Enhanced Air Flotation Method to Remove Algae in Membrane Desalination Pretreatment

He Huang¹, Shikai Li^{2*}

¹Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group, Hefei Anhui

²College of Resources and Environment, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: huanghe@ahedi.com.cn, *395411228@qq.com

Received: Nov. 22nd, 2019; accepted: Dec. 10th, 2019; published: Dec. 17th, 2019

Abstract

At the conventional membrane desalination process, insufficient investigations were carried on the negative impact of algae pollution on the desalination results. A serious situation of reverse osmosis membrane pollution occurs when algae outbreaks. A specially designed enhanced air flotation process is used as a pretreatment process for the reverse osmosis membrane. After the pretreatment system, the volume concentration of microbubbles has been greatly increased, the microbubble particle size is more reasonable, and the dispersion ability is stronger. The algae removal rate can generally reach more than 99%, which is greatly improved compared with the conventional air flotation process. The effluent after air flotation pretreatment is strengthened, and the algae removal ability is further enhanced by using an algicide. The optimally designed air flotation process has broad application prospects as a membrane desalination pretreatment technology.

Keywords

Membrane Desalination, Air Flotation, Pretreatment, Algae

强化气浮法在膜法海水淡化预处理中去除藻类的应用

黄 和¹, 李世凯^{2*}

¹中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥

²武汉大学资源与环境学院, 湖北 武汉

*通讯作者。

Email: huanghe@ahedi.com.cn, *395411228@qq.com

收稿日期: 2019年11月22日; 录用日期: 2019年12月10日; 发布日期: 2019年12月17日

摘要

针对目前膜法海水淡化工艺中, 对藻类污染负面影响预计不足, 导致藻类爆发时, 反渗透膜污染严重的情况, 提出使用特殊设计的强化气浮法作为反渗透膜的预处理工艺, 经过改造后的预处理系统, 微气泡体积浓度大幅提升, 微气泡粒径更合理、分散能力更强, 对藻类去除率普遍可达到99%以上, 相对常规气浮方法有大幅提升。强化气浮预处理后的出水, 使用抑藻剂进一步强化藻类的去除能力。优化设计的气浮工艺作为膜法海水淡化预处理技术具有广阔的应用前景。

关键词

膜法海水淡化, 气浮, 预处理, 藻类

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

按照国际水务情报(GWI)脱盐与水再利用报告统计[1], 到2017年底, 全球累计脱盐(海水淡化、苦咸水淡化)水厂合同产能为 78,100,000 m³/d, 其中海水淡化为 57,150,000 m³/d, 全球不同类型海水淡化技术和分布区域的产能分布, 如图 1(a)、图 1(b)所示。由图 1 可以看出, 目前在世界范围内海水淡化处理系统中, 有超过一半以上的海水淡化厂采用反渗透膜法海水淡化工艺, 反渗透膜法海水淡化技术已经成为了海水淡化技术的主流技术。

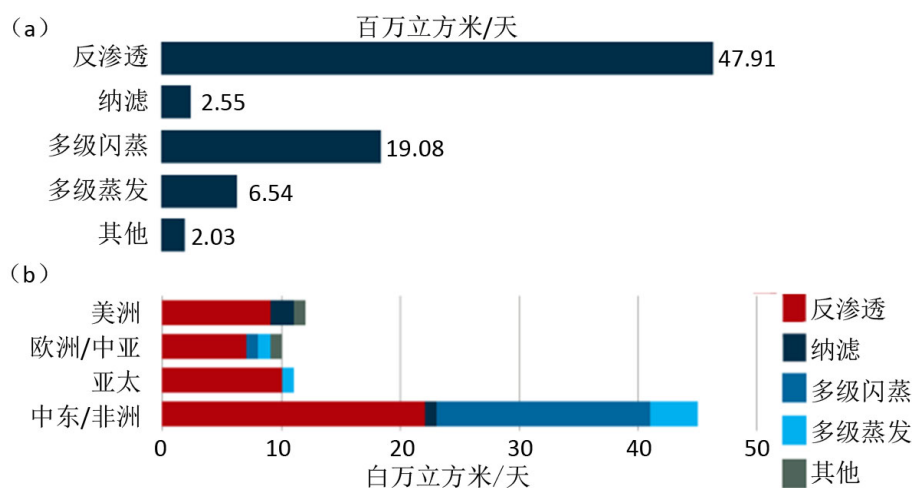


Figure 1. (a) Cumulative capacity distribution of different types of seawater desalination technology around the world; (b) Production capacity distribution of various seawater desalination technologies in the global region

图 1. (a) 全球不同海水淡化技术类型累计产能分布; (b) 全球区域各类海水淡化技术产能分布

长期以来沿海地区经济发展较快, 工业生产和居住人口的不断增长所产生的市政污水和工业废水经污水处理站处理后就近排放至海水中, 海水中的油类污染物、有机物和 SS 等都呈逐年增加的趋势, 使得沿海海域的水质受到污染, 导致海水的富营养化、藻类过度繁殖[2]。污染物的增加使得反渗透膜的污堵趋势更加严重, 危害系统的稳定运行。目前, 膜法海水淡化工程设计时往往忽略藻类爆发情况下, 系统的稳定运行。评价常规的混凝沉淀或气浮方法的处理效果, 仅仅考虑浊度等因素, 而实际运行过程中, 仍然会出现浊度很低的水, 进入反渗透膜系统后, 对膜系统产生严重污堵的情况, 这是由于藻类去除效果不佳引起的。开发更加安全、可靠的海水淡化预处理工艺势在必行。

2. 反渗透膜法海水淡化预处理工艺

反渗透膜法海水淡化预处理的目的是防止反渗透膜的污堵和膜的性能劣化, 主要包括悬浮物的去除, 防止盐类的沉积结垢、金属氧化物和胶体的去除, 有机物污染物的去除等[3]。

目前, 典型的大型反渗透膜法海水淡化采用的工艺路线, 见图 2。

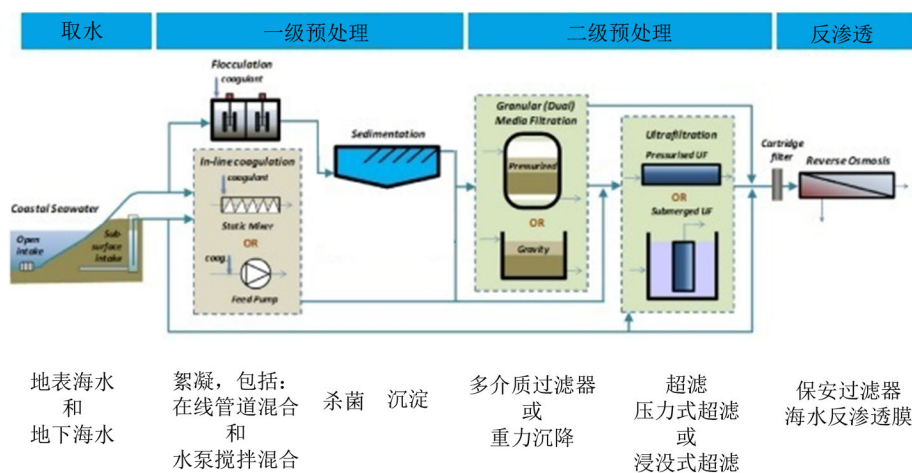


Figure 2. Typical large-scale sea water reverse osmosis membrane desalination process
图 2. 典型的大型反渗透膜法海水淡化预处理采用的工艺路线

由图 2 可以看出, 传统的反渗透膜法海水淡化工艺, 预处理工艺流程相对复杂。随着沿岸地区海水的污染和富营养化日趋严重, 给反渗透膜系统的稳定运行提出了挑战。特别是藻类的爆发时期, 经过杀菌分解后的藻类残留物会直接穿透多介质过滤器、超滤系统, 而附着在反渗透膜表面, 从而导致反渗透膜的污堵、产水量下降、产水水质劣化, 影响用户的使用。藻类微生物在反渗透膜表面的污染, 见图 3。



Figure 3. Algae microbial pollution of seawater desalination on reverse osmosis membrane
图 3. 海水淡化反渗透膜的藻类污染

反渗透膜海水淡化系统的核心是反渗透膜,理论上,常规的絮凝沉淀、杀菌、多介质过滤和超滤膜过滤,可以满足反渗透膜进水对浊度指标的要求,但是往往会忽略了藻类微生物的危害。实际上,消除藻类微生物的危害是反渗透膜法海水淡化项目成功与否的关键因素之一。按照常规的经验,添加杀菌剂可以抑制藻类微生物的污染,但是经过充分杀菌后的系统,反渗透膜仍然会被严重污染,整个系统运行仍然不稳定。这正是由于经过杀菌后,藻类微生物残余物孢子污染反渗透膜导致的。

海水淡化工程公司在进行海水淡化设计时,往往关注重点在海水的浓度、盐分分布、温度等特性上,往往会忽略了藻类的这个关键问题。2009年,在天津市大港区海洋石化园区内建设的当时中国最大的反渗透膜法海水淡化厂,该项目采用常规预处理后使用超滤膜作为反渗透膜的预处理工艺,在实际运行过程中,当夏秋季渤海湾海水中藻类含量上升时,反渗透膜污堵情况明显呈上升趋势,系统无法稳定运行。全球海域中以叶绿素-a浓度为为基础的藻类平均分布图,见图4。

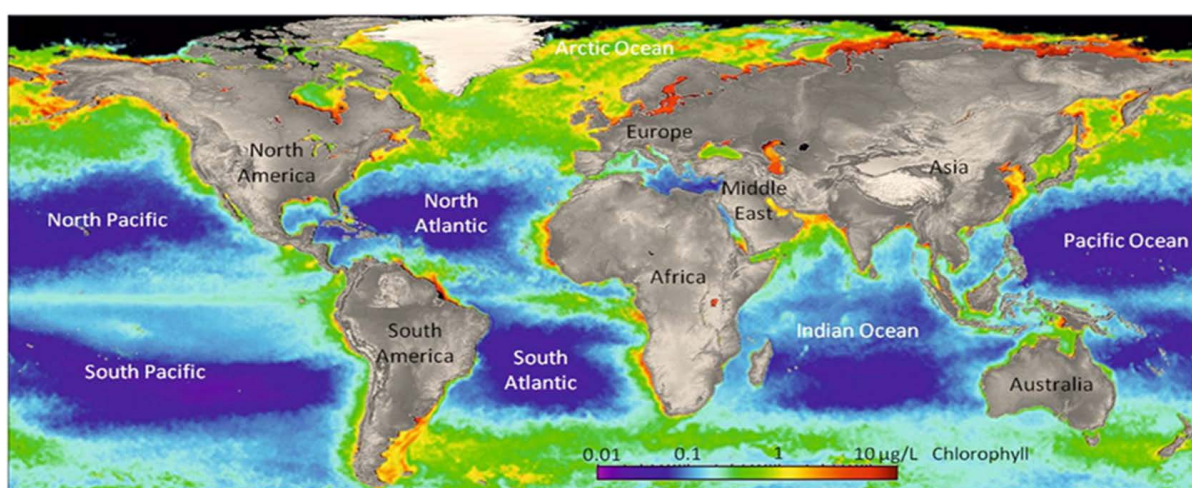


Figure 4. The average distribution of algae in the global sea area

图 4. 全球海域藻类平均分布图

由图4可以看出,藻类分布主要在内海地区和沿海地区,在工业密集和人口集中的沿海地区尤其严重,为保证海水反渗透的运行,预处理工艺中对藻类微生物的有效去除至关重要[4]。本文对强化气浮法在膜法海水淡化预处理中去除藻类的应用进行讨论。

3. 方法

气浮是一种技术集成度较高的固液分离工艺,实现气浮分离的过程的必要条件是使污染物能够粘附在气泡上,这是一个涉及到气、液、固三相介质分离的问题[5]。任何两相之间都有界面,当气泡和颗粒共存于水中,即液、气、颗粒三相介质共存的情况下,每两相之间的界面上都存在这各自的界面张力和界面能。一般的规律是疏水性颗粒易与气泡粘附,而亲水性颗粒难与气浮粘附。一般的气浮设备运行包括凝聚、气浮、撇渣、沉淀、刮泥等工艺步序,实际运行过程中由于气浮设备产生的气泡粒径较大、均一性不佳,气泡分散性不好等因素,使得气浮效果不佳。

3.1. 强化气浮法的形式

强化气浮法的特点是溶气水、污水、药剂三者在一个特别设计的多级序批式混凝反应器中,将微气泡引入到药剂的絮凝反应中,产生适合气浮密度小于水的“夹气泡絮体”,流入气浮接触区。在浮力的作用下,结合微气泡本身形成的“气泡过滤层”,“泡絮体”上升至液面过程中,利用自身的浮力和“气

泡过滤层”的拦截, 形成浮渣, 完成固液分离。强化气浮工艺, 如图 5 所示。

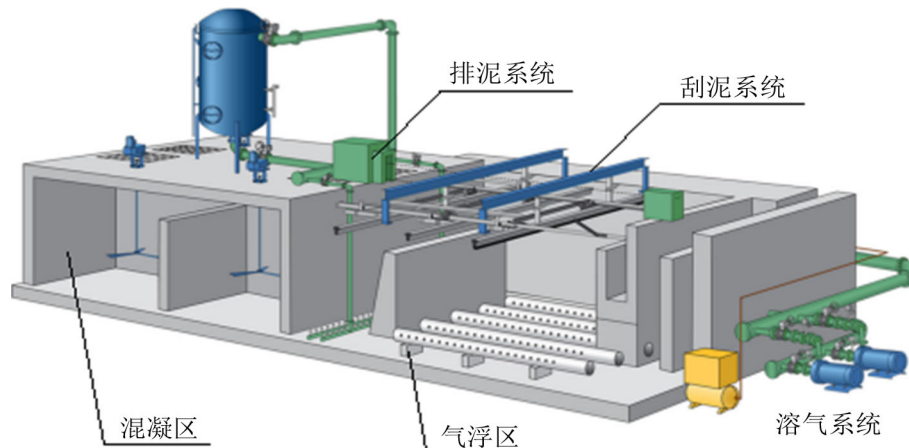


Figure 5. Schematic diagram of the enhanced air-float process
图 5. 强化气浮工艺示意图

强化气浮法的主要目的是减小气泡粒径、保证气泡均一性和增强气泡分散性, 以提高气浮工艺整体的固液分离能力。

3.2. 强化气浮法实现藻类固液分离的原理

3.2.1. “微气泡”的形成过程

通过溶气系统中的回流水泵产生的高压水通过射流器时形成负压, 从而吸入空气。空气和高压水在核心组件的特殊设计结构内发生瞬间气化、气液物化和过饱和溶解过程。同时使空气和水之间产生最大的接触面积, 在高压和气体浓度差的作用下, 空气在极短时间内(约 0.1 秒)内完成溶解过程。溶解空气的高压水在特殊的释放器中通过“消能”产生大量直径小于 5 微米的微小气泡群。

3.2.2. 絮体颗粒形成过程

待处理水体中的絮体主要来源有两个地方, 一是水中本身存在的一些细小颗粒物, 二是加入的絮凝药剂反应过程中, 形成的絮体。加药絮凝反应过程中掺入了微小气泡, 水中的微小颗粒, 在网状高分子包裹作用下, 絮体颗粒形成过程中和微小气泡群混合变成更大的絮体过程中, 絮体内部包裹了 1~5 微米的气泡, 形成了“泡絮体”, 这个“泡絮体”比重更小, 更加容易上浮。

3.2.3. 絮体颗粒分离过程

强化气浮溶气装置产生的纳微米气泡, 通过特殊设计的设备结构, 在固液分离区形成一定厚度的“微米气泡过滤层”。“气泡滤层”的建立, 过滤拦截技术的机理, 类似滤饼层过滤技术, 但是其更厚, 过滤拦截能力更强, 更易实现对水体中固体悬浮物、藻类等污染物进行过滤净化。

3.3. 强化气浮工艺核心技术

3.3.1. 高效的溶气系统

通过采用特定“高压空气溶入设备”、“双射流高速螺旋运动气液混合技术”等技术, 提升溶气效率, 使其溶气率达到 95%以上, 微气泡平均粒径小于 5 微米。

3.3.2. 强化气浮设备内部的特殊设计

在强化气浮池内利用特殊的设计, 构建接触区、分离区、排泥区及清水收集区等四大功能区。利用

此四大功能区创造适合微小气泡群附着和拦截水中微小絮体颗粒物的科学环境, 提升气浮处理效果。

接触区: 采用了高效布水系统, 其由分配板、分配槽、稳流板组成, 实现微小气泡群充分与水中絮体颗粒物接触, 附着和拦截水中微小絮体颗粒物, 形成比重小于 1.0 的“泡絮体”;

分离区: 采用了“气泡过滤技术”, 利用过滤拦截技术的机理, 类似滤饼层过滤技术, 过滤拦截能力更强, 实现对水体中固体悬浮物、藻类等污染物进行过滤净化;

排泥区: 实现浮渣高效排除, 保证排出浮渣的干度(含水率可小于 98%), 污泥量的减少可以大大减少后续污泥处置费用, 且不影响其他系统的正常运行和废水处理效果;

清水收集区: 实现“清水”均匀高效的收集, 提高系统的有效处理负荷。

4. 案例与讨论

新加坡 Tuas 的 SingSpring 海水淡化厂淡水产水量 136,000 m³/d, 工艺流程见图 6, 其中, 预处理采用常规气浮工艺, 2015 年改造成强化气浮工艺。

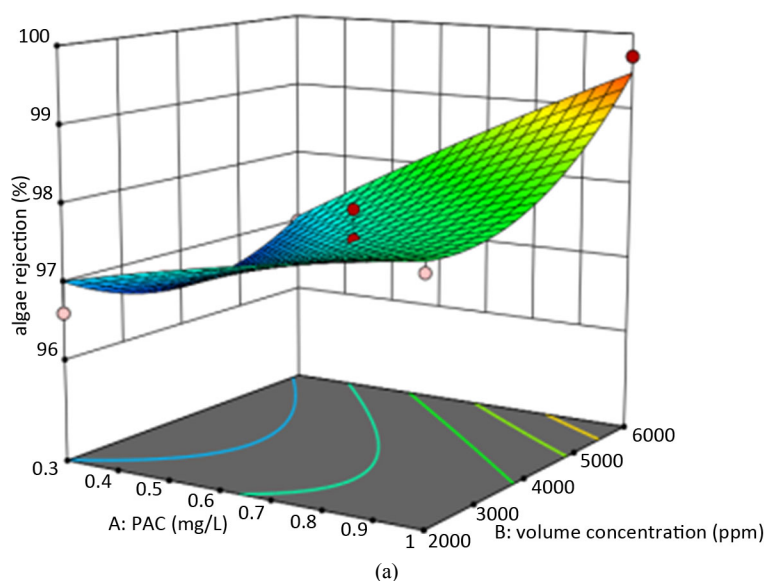


Figure 6. SingSpring desalination plant process at Tuas Singapore

图 6. 新加坡 Tuas 的 SingSpring 海水淡化厂工艺流程图

4.1. 改造前后对藻类去除效率对比

对比分析 2014 年及 2015 年预处理系统对藻类去除效果, 见图 7(a)和图 7(b)。



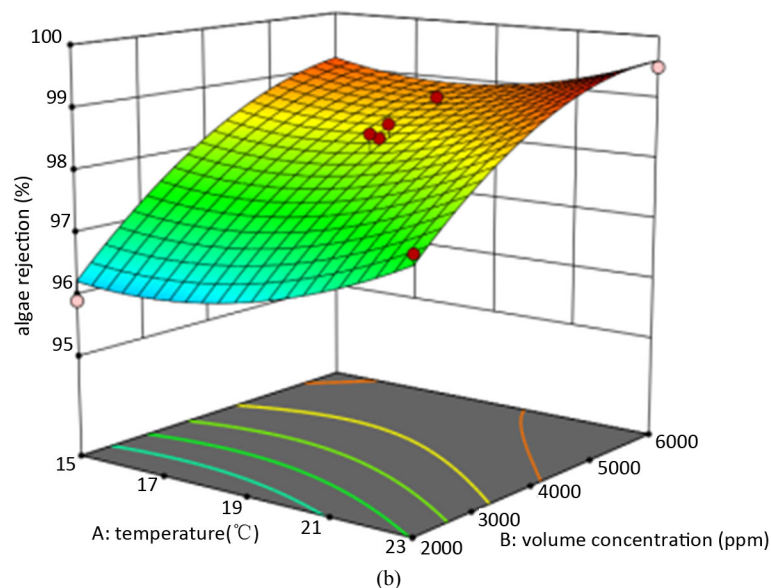


Figure 7. The effect of strengthening air-flotation system on the removal of algae. (a) The effect of concentration of coagulant and air bubbles; (b) The effect of temperature of seawater and air bubbles concentration

图 7. 强化气浮系统改造后对藻类去除效果的影响。(a) 混凝剂和气泡体积浓度对藻类去除率的影响; (b) 海水温度和气泡体积浓度对藻类去除率的影响

对比 2014 年和 2015 年两年度, 气浮设备改造前后的藻类去除情况。图 7(a)表示的是 2014 年和 2015 年同时期, 海水温度类似条件下, 不同的微气泡体积浓度和混凝剂 PAC 的投加量对海水藻类的去除效果。由图 7(a)中的趋势可以看出, 海水温度相同的条件下, 藻类的去除效率随着微气泡体积浓度的上升而逐渐上升, 聚合氯化铝(PAC)的投加浓度上升, 对藻类的去除具有类似的效果, 藻类的去除率都达到了 96% 以上, 但是微气泡体积浓度的影响程度更大, 最大藻类去除效率达到了 99.3%。因此 2015 年强化气浮系统改造后, 由于微气泡分散性和气微泡体积浓度的上升使得藻类的去除效果更佳。

图 7(b)表示的是在 PAC 投加量维持在 0.8 mg/L 条件下, 不同的微气泡体积浓度和海水温度(冬季和夏季)对海水藻类的去除效果。由图 7(b)中的趋势可以看出, 微气泡体积浓度对藻类的去除能力的影响仍然占主导地位, 最大藻类去除效率达到了 99.5%。对比冬季和夏季海水温度不同情况下藻类的去除效率, 可以发现, 温度的上升对藻类的去除效率有正面影响, 但影响效果明显较微气泡体积浓度。

通过对预处理气浮系统的强化改造, 对各功能区进行特殊设计, 大大提升微气泡体积浓度, 其产生的微气泡粒径均匀、分散性强, 提升气浮处理效果, 实现海水中藻类物质的去除, 同时降低进入后续膜系统的藻类残余物, 确保后续膜处理系统的稳定运行。

在 2015 年新加坡海域藻类爆发期间, SingSpring 海水淡化厂由于采用改造后的强化气浮法作为预处理工艺, 整个水厂没有出现停机情况。相比之下, 周边其他海水淡化厂, 反渗透系统均出现不同程度的污堵, 影响系统的稳定产水。

4.2. 气浮处理后的抑藻工艺

虽然强化气浮工艺改造后, 在优化的工艺参数条件下, 藻类的去除率可达到 99% 以上, 但是由于藻类的浓度含量达到了 $\times 10^4$ CUF/mL 数量级, 因此, 经预处理后的产水中的藻类的浓度仍可达到 $\times 10^2$ CUF/mL 以上。在环境条件适宜的情况下, 藻类仍会以指数级增长。这就是很多海水淡化项目, 虽然预

处理效果良好, 但反渗透膜运行污堵情况依然严重的原因。

因此, 在夏季等季节, 藻类繁殖极快, 预处理不能完全将藻类孢子去除, 在高海水温情况下, 经过良好的气浮预处理工艺, 在后续工艺中极可能再发生藻类污染反渗透膜的情况, 因此在反渗透膜工艺前的抑藻工艺尤为重要, 一般采用药剂方法对预处理后的出水进行抑藻。

5. 结论

1) 海水淡化设计中藻类的去除效率, 对整个膜法海水淡化稳定至关重要, 藻类去除率指标, 应纳入膜法海水淡化设计考量的重要参数;

2) 强化气浮工艺可以增加微气泡体积浓度, 强化气浮去除海水中藻类的效果, 藻类去除率可达 99% 以上;

3) 海水淡化预处理工艺后的抑藻工艺, 可减少后续膜系统污堵的风险;

4) 设计优化的气浮工艺在未来反渗透膜法海水淡化预处理系统中应用前景广阔。

参考文献

- [1] 国际水务情报(GWI). 脱盐与水再利用报告统计[R]. 上海, 2017.
- [2] 程方. 渤海近岸海域反渗透海水淡化预处理工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [3] 高从堦, 陈国华. 海水淡化技术与工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [4] van Craenenbroeck, W., Van den Bogaert, J. and Ceulemans, J. (1993) The Use of Dissolved Air Flotation for the Removal of Algae. The Antwerp Experience. *Water Supply*, **11**, 123-133.
- [5] 刘芳. 溶气气浮除污染效能及其运行稳定性强化措施[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.