

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.015

# 混凝—气浮—过滤深度处理 A<sup>2</sup>O 工艺二沉池出水

杨 墨<sup>1,2</sup>, 刘 毛<sup>3</sup>, 邓 涛<sup>2</sup>, 王旭峰<sup>4</sup>, 杨 开<sup>5</sup>, 马 放<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519099; 4. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023; 5. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 以武汉市某污水处理厂 A<sup>2</sup>O 工艺二沉池出水为原水,进行了混凝—气浮—过滤深度处理工艺中试研究。结果表明:①在表面负荷为 8~12 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)条件下,该深度处理工艺出水 COD 为 17 mg/L、浊度 <0.5 NTU、TP <0.1 mg/L;②表面负荷对出水水质的影响不大,当分流比为 15%、混凝剂(聚合硫酸铝铁)投加量为 10 mg/L 时,处理效果最优,对浊度、COD、TP 的去除率分别为 94%、63%和 90%;③当分流比较小(10%)时,增加混凝剂用量可以降低出水浊度与 COD,当分流比较大(20%)时,混凝剂用量不再是限制因素,对出水浊度和 COD 影响不大;④混凝—气浮工艺可去除大部分悬浮物、COD 和 TP,保证了更好的过滤效果与较长的过滤周期。混凝—气浮—过滤工艺的处理效果优于污水处理厂既有高密度沉淀池+精密过滤器深度处理工艺。

**关键词:** 二沉池出水; A<sup>2</sup>O 工艺; 深度处理; 混凝; 气浮; 过滤; 分流比; 投药量  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0089-06

## Advanced Treatment of Effluent from Secondary Sedimentation Tank of A<sup>2</sup>O Process by Coagulation – Dissolved Air Flotation – Filtration

YANG Mo<sup>1,2</sup>, LIU Mao<sup>3</sup>, DENG Tao<sup>2</sup>, WANG Xu-feng<sup>4</sup>, YANG Kai<sup>5</sup>, MA Fang<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519099, China; 4. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China; 5. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A pilot study on advanced treatment process of coagulation – dissolved air flotation (DAF) – filtration was carried out in a wastewater treatment plant in Wuhan, and its influent was secondary sedimentation tank effluent of an A<sup>2</sup>O process. When surface load was 8 – 12 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), COD in the effluent of the advanced process was 17 mg/L, turbidity and TP in the effluent of the advanced process were less than 0.5 NTU and 0.1 mg/L. Surface load had little effect on effluent quality. The optimum operational condition was obtained when the recycling ratio was 15% and the dosage of coagulant (polymeric aluminum ferric sulfate) was 10 mg/L, and removal rates of turbidity, COD and TP were 94%, 63% and 90%, respectively. When recycling ratio was relatively small

(10%), increasing coagulant dosage could reduce turbidity and COD in the effluent. When recycling ratio was large (20%), the coagulant dosage was no longer a limiting factor, and it had little impact on turbidity and COD in the effluent. In this process, coagulation - DAF process removed most of the suspended solids, turbidity and COD, in which good filtration efficiency and longer filtration cycle were obtained. This process achieved better treatment efficiency than the existing advanced treatment process of high-density sedimentation tank and precision filter.

**Key words:** effluent from secondary sedimentation tank;  $A^2O$  process; advanced treatment; coagulation; dissolved air flotation; filtration; recycling ratio; coagulant dosage

目前国内普遍存在污水处理厂提标升级(由GB 18918—2002 一级B提升至一级A)的技术需求,其技术目标是进一步去除二沉池出水中的悬浮物(SS)、有机物(COD)及总磷(TP)等污染物<sup>[1]</sup>。由于后两类污染物中有相当一部分是以SS或附着于SS的形式存在,大都伴随SS的去除而被同步分离,因而采用物化分离成为目前国内污水厂提标的主流技术路线<sup>[2]</sup>。作为水的物化处理技术之一,气浮工艺早在20世纪70年代就已有工程应用<sup>[3]</sup>,具有受悬浮物性质状态影响小、分离速度快、处理效果稳定等技术特点<sup>[4-6]</sup>。迄今为止,虽然气浮法用于城市污水深度处理的研究及工程案例尚不多见,但由于二沉池出水中SS主要为难以沉淀去除的细小菌胶团、胶体悬浮物等<sup>[7-8]</sup>,因此从理论上说,相对于其他物化分离工艺,气浮法可能更适用于处理这类悬浮物,具有潜在的技术经济竞争力<sup>[9]</sup>。

武汉市现有污水深度处理工艺主要是高效沉淀池+精密过滤器,在某些条件下处理效果不够理想;本研究由当地排水公司立项,旨在作为城市污水深度处理的技术储备。本研究以武汉市某污水厂二沉池出水为原水进行混凝—气浮—砂滤深度处理工艺实验,研究气浮工艺的技术特性及其与现有工艺效果的差异,并获得溶气水分流比、混凝剂投加量及表面负荷这3个重要参数的优选值;同时,对该污水厂实际深度处理工艺出水水质进行检测,并与本工艺进行比较分析。

该污水处理厂处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,按一级A标准考核,其二级处理工艺为 $A^2O$ +二沉池,深度处理工艺采用高密度沉淀池+精密过滤器。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验模型

采用分流式溶气气浮法。气浮实验模型如图1所示,分为絮凝区、接触区、分离区、集水区等,气浮

池出水后接一套小型过滤装置对部分气浮池出水进行砂滤处理,工艺流程如图2所示。混凝剂为液态聚合硫酸铝铁(PAFS),采用污水处理厂储药池内浓度为200 mg/L原液配制。

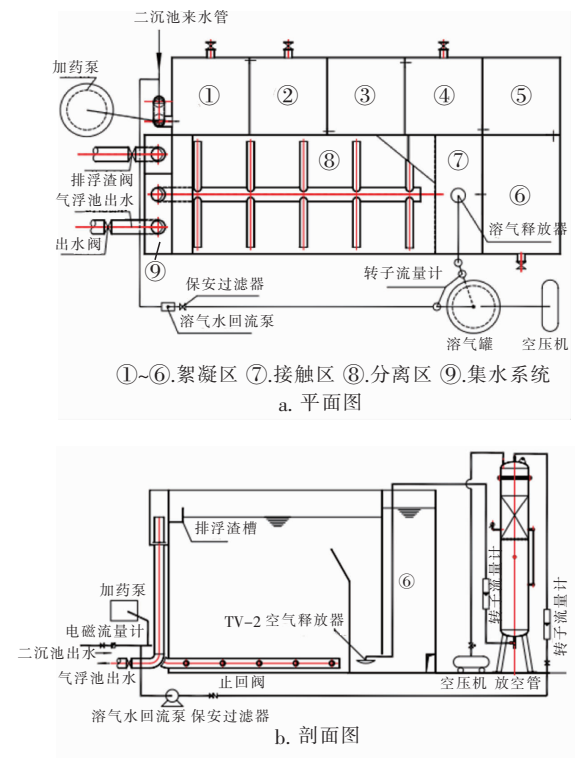


图1 气浮单元实验模型的平面和剖面图

Fig. 1 Plan and cross section view of testing model

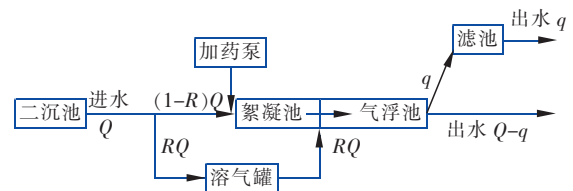


图2 处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of treatment process

图2中, $Q$ 为气浮池进水流量, $R$ 为溶气水分流

比(分流比=溶气水量/进水量), $q$  为部分气浮池出水进入砂滤池的流量。

## 1.2 设计参数

进水流量为  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ 、处理量为  $432 \text{ m}^3/\text{d}$ 、表面负荷为  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、溶气罐压力为  $0.25 \sim 0.35 \text{ MPa}$ 、滤池滤速为  $10 \text{ m/h}$ 、絮凝池停留时间为  $15 \text{ min}$ 、接触区停留时间为  $1.4 \text{ min}$ 、分离区停留时间为  $10.6 \text{ min}$ 、气浮池排渣周期为  $24 \text{ h}$ 、滤池反冲洗周期为  $24 \text{ h}$ 。

## 1.3 分析项目及方法

检测水样:原水(即二沉池出水)、气浮池出水、滤池出水及污水厂精密过滤器出水。

分析项目与方法:浊度(为方便实时检测以浊度替代 SS)、COD 及 TP。其中,COD 采用 HACH COD 预制试剂( $0.7 \sim 40 \text{ mg/L}$ )测定;TP 采用钼酸铵分光光度法测定;浊度采用 HACH DP2100 便携式浊度仪现场检测。

仪器:HACH DRB200 消解仪、HACH DR2800 便携式分光光度计、HACH DP2100 便携式浊度仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 分流比对出水水质的影响

当表面负荷为  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、投药量为  $15 \text{ mg/L}$  时,考察了不同分流比(6%、9%、12%、15%、18%)下,原水、气浮池出水与滤池出水浊度。结果表明,不同分流比下,当原水浊度在  $5 \text{ NTU}$  上下浮动时,气浮池出水浊度随分流比的增大而减小,但过滤对出水浊度的消减增量较小,出水浊度较为恒定,且小于  $0.5 \text{ NTU}$ 。气浮对原水浊度的去除率在 83% 以上,滤池对原水浊度的累计去除率在 92% 以上。当分流比  $< 15\%$  时气浮池对浊度的去除率随着分流比的增大而显著增大;当分流比  $> 15\%$  时,对浊度的去除率则略微有所下降。

当表面负荷为  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、投药量为  $15 \text{ mg/L}$  时,不同分流比条件下,原水 COD 浓度在  $17 \sim 21 \text{ mg/L}$  之间变化,气浮池出水 COD 浓度随分流比的增加而增大,但增幅不大;过滤对 COD 的消减量有限,COD 的去除以气浮为主。当分流比  $< 15\%$  时,气浮池、滤池对 COD 的累计去除率均随着分流比的增大而增大,最小去除率分别为 40%、46%,最大去除率分别为 52%、53%。

气浮池出水 COD 浓度与浊度表现出相同的变化趋势,对出水 COD( $y$ )、浊度( $x$ )进行线性相关性

分析得出: $y = 0.0915x - 0.3165$  ( $R^2 = 0.9, n = 5$ ),有较好的相关性;对 COD、浊度的绝对去除量(原水浓度减去气浮出水浓度)进行线性分析得出: $y = -0.2897x + 20.905$  ( $R^2 = 0.4104, n = 5$ ),相关性较差。表明混凝过程以去除非溶解性 COD 为主。

不同分流比下,滤池出水 TP 浓度略低于气浮池出水,当原水 TP 约为  $0.4 \text{ mg/L}$  时,气浮池和滤池出水 TP 约为  $0.05 \text{ mg/L}$ 。TP 去除率随分流比的变化不大(10% 以内),最终 TP 去除率约为 85%。

综上所述,分流比对气浮池出水浊度和 COD 有一定的影响,对 TP 的影响很小,最佳分流比为 15%。气浮池对浊度的去除起主要作用,而滤池使得出水浊度进一步降低和稳定。

## 2.2 加药量对出水水质的影响

### 2.2.1 加药量对出水浊度和 COD 的影响

当分流比为 15%、表面负荷为  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,不同加药量(0、1、3、5、10、20  $\text{mg/L}$ )下原水、气浮池出水与滤池出水浊度和 COD 的变化见图 3。

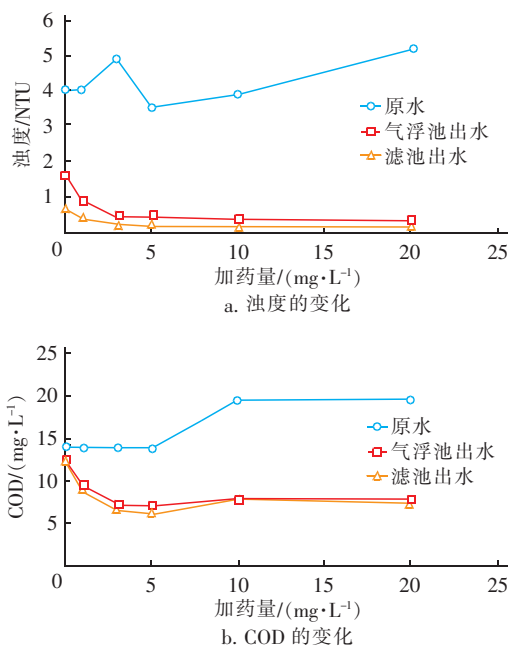


图 3 不同加药量下进出水浊度和 COD 的变化

Fig. 3 Change of turbidity and COD under different coagulant dosages

由图 3(a)可以看出,原水浊度在  $4 \text{ NTU}$  上下浮动,当加药量  $< 3 \text{ mg/L}$  时,气浮池、滤池出水浊度随加药量的增加呈现出明显的下降趋势;当加药量  $> 3 \text{ mg/L}$  时,出水浊度比较稳定( $< 1 \text{ NTU}$ ),下降趋势不明显。气浮池和滤池能够达到的最小浊度分别为

0.3 和 0.14 NTU(加药量为 20 mg/L,对应浊度去除率分别为 94%、97%)。由于悬浮物的浮升主要取决于黏附微气泡的多少(密度降低),而受其粒度的影响效小,因此当混凝剂的投加量超过改变悬浮物的表面性质(有利于气泡附着)的基本量后,处理效果提升的边界效应效小。

由图 3(b)可以看出,随着加药量的增加,气浮池、滤池出水 COD 浓度均呈下降趋势,且投药量 < 5 mg/L 时,下降趋势明显;当投药量 > 5 mg/L 时,出水 COD 值趋于稳定。气浮池、滤池出水 COD 最小值分别为 7.1、6.2 mg/L。气浮池、滤池对 COD 的累计最大去除率分别为 59%、63%。

同样,对气浮池出水 COD( $y$ )、浊度( $x$ )进行线性相关性分析得到: $y = 3.9377x + 5.9997$  ( $R^2 = 0.9260, n = 6$ ),有较好的相关性;对 COD、浊度的绝对去除量进行线性分析得到: $y = 3.2083x - 4.3636$  ( $R^2 = 0.5432, n = 6$ ),相关性差。

## 2.2.2 加药量对出水 TP 的影响

实验结果表明,TP 去除率随着加药量的增加而增加,当加药量由 0 增大至 30 mg/L 时,对 TP 的去除率由 75% 增至 92%。由于原水 TP 浓度变化较大,出水 TP 浓度也表现出相同的趋势(如图 4 所示)。原水与滤池出水浓度之差即为绝对去除量,可以看到 TP 的绝对去除量也随着加药量的增大而增大。TP 的去除与浊度、COD 的去除表现出不同的趋势,这主要是因为它们的去除机理不同。在本实验中,污水中以悬浮态存在的磷在混凝作用下随着 SS 的去除而去除,而以溶解态存在的磷酸盐中的磷则与混凝剂中的铝离子、铁离子反应生成磷酸铝、磷酸铁等结晶物,并最终上浮至气浮池浮渣层中通过刮渣得到去除。

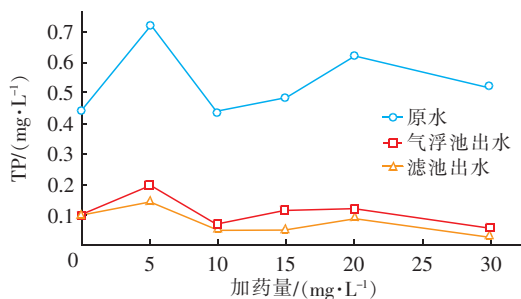


图 4 不同加药量下进出水 TP 浓度的变化

Fig.4 Change of TP under different coagulant dosages

综合分析,当分流比为 15%、表面负荷为 10

$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,混凝剂投加量为 10 mg/L 可同时取得较好的浊度、COD 和 TP 去除效果,去除率分别为 97%、63%、90%。气浮池出水 COD 与浊度有较好的线性关系。值得说明的是,由于去除 SS 及 COD 所需的投药量较小,而除磷量与投药量成正比,故实际投药量应以除磷要求为主。

## 2.3 表面负荷对出水水质的影响

### 2.3.1 表面负荷对出水浊度和 COD 的影响

当分流比为 15%、混凝剂投加量为 10 mg/L 时,考察不同表面负荷下出水浊度的变化。结果表明,原水浊度在 3~3.5 NTU 之间浮动,在表面负荷由  $8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  增加到  $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的过程中,无论是气浮池还是滤池出水浊度变化都非常小,分别为 0.5、0.2 NTU,去除率为 83%~94%。

原水 COD 浓度在 10~15 mg/L 之间浮动,气浮池、滤池出水 COD 浓度的变化趋势与原水一致,表面负荷对 COD 去除效果的影响不明显。

### 2.3.2 表面负荷对出水 TP 的影响

实验结果表明,当分流比为 15%、混凝剂投加量为 10 mg/L 时,原水 TP 浓度在 0.4~0.5 mg/L 之间浮动,表面负荷发生变化时气浮池和滤池出水 TP 浓度相对稳定,约为 0.05 mg/L,去除率在 85%~90% 之间。

综上所述,在该实验范围内表面负荷对系统出水水质影响不大,最高可取  $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

## 2.4 实验条件下气浮工艺与污水厂既有工艺比较

对实验期间不同工艺参数下得到的数据进行整理(共 27 组),结果如表 1 所示。可知,对于出水浊度、COD、TP 这 3 个指标,无论是平均值还是标准差均远远低于污水处理厂既有工艺出水,说明相对于沉淀,气浮法用于分离二沉池出水中细小轻质悬浮物的针对性更强。因此单从处理效果来看,气浮工艺更具优势。

表 1 实验条件下气浮工艺与污水厂既有工艺效果比较

Tab.1 Comparison of dissolved air flotation process under a continuous test and existing treatment process for WWTP

项 目	浊度		COD		TP	
	平均值/ NTU	标准 差	平均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	标准 差	平均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	标准 差
原水	5.2	0.7	18.9	1.4	0.30	0.06
气浮池出水	0.7	0.3	10.4	1.8	0.06	0.06
滤池出水	0.2	0.1	9.4	1.7	0.04	0.03
水厂出水	1.7	0.8	13.1	2.7	0.14	0.07



在上述单因素实验所得的最优运行参数,即表面负荷为 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)、分流比为 15%、混凝剂投加量为 10 mg/L 条件下运行 2 h 后进行取样,并送到第三方检测单位进行了污水厂出水主要考核指标的检测,结果如表 2 所示。第三方检测数据表明,二沉池出水经气浮或气浮—过滤处理后,SS、COD、

TP 等污染物浓度均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 要求,若按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)考核,可达到Ⅲ类水(湖库)标准;浊度远远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值;但对 TN 几乎无去除效果。

表 2 第三方检测水质

Tab. 2 Water quality tested by third-party

项 目	检测值			一级 A	Ⅳ类地表水	Ⅲ类地表水	GB 5749—2006
	原水	气浮出水	过滤出水				
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	27	17	17	50	30	20	—
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	6.13	3.61	3.87	10	6	4	—
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.14	0.04	0.04	0.5	0.1	0.05	—
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	19.7	18.1	18.3	15	1.5	1.0	—
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.20	2.23	2.7	8	1.5	1.0	—
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	14	3	1	10	—	—	—
浊度/NTU	2.86	0.45	0.18	—	—	—	1
色度/倍	4	2	2	—	—	—	—

在土建设备投资方面,气浮池和沉淀池的工艺构造接近,在表面负荷率相同的情况下,土建投资相差不大;气浮池多了一套溶气水系统,而高效沉淀池设有斜管,投资远大于溶气水系统设备。在运营费用方面,从实验结果看,气浮表面负荷率在 8~12 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),与用于饮用水的斜管沉淀池负荷相同,投药量在 10 mg/L,低于现状投药量;相对沉淀工艺,运行成本增加部分主要是溶气水加压能耗,约为 0.026 kW·h/m<sup>3</sup>,相对运行成本占比不大。

3 结论及建议

混凝—气浮—过滤作为 A<sup>2</sup>O 阶段的后续深度处理工艺,运行效果稳定可靠,在由生化阶段保证 TN 去除效果的前提下,最终出水水质可以满足一级 A 排放要求。深度处理出水浊度<0.5 NTU、COD 为 17 mg/L、TP<0.1 mg/L(去除率分别在 90%、50%、60%以上),主要在气浮池中得到去除。工程应用时,可根据实际需求选择是否需设置过滤单元。单一地改变分流比或加药量时,气浮池出水浊度与 COD 存在线性关系。优化工艺参数如下:表面负荷为 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)、分流比为 15%、投药量为 10 mg/L。最优工况下的浊度去除率为 94%、COD 去除率为 63%、TP 去除率为 90%。

由于实验条件的限制,本阶段未研究气浮浮渣的处理。目前工程案例中浮渣通常与二沉池排泥混合处理,进一步可将气浮浮渣处理与现有深度处理

工艺中排泥水处理进行比较。

参考文献:

[1] 张向营. 城镇污水厂提标改造工艺探讨与选择[J]. 低碳世界,2017(33):6-7.  
Zhang Xiangying. Discussion and selection of upgrading reconstruction process of wastewater treatment plant[J]. Low Carbon World,2017(33):6-7(in Chinese).  
[2] 刘亦凡,陈涛,李军. 中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J]. 中国给水排水,2016,32(16):36-41.  
Liu Yifan, Chen Tao, Li Jun. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater,2016,32(16):36-41(in Chinese).  
[3] Edzwald J K. Dissolved air flotation and me[J]. Water Research,2010,44(7):2077-2106.  
[4] 王毅力,汤鸿霄. 气浮净水技术研究及进展[J]. 环境科学进展,1999,7(6):94-103.  
Wang Yili,Tang Hongxiao. Research and advance in the floatation technique used in water and wastewater purification [J]. Advances in Environmental Science, 1999,7(6):94-103(in Chinese).  
[5] 朱兆亮,曹相生,孟雪征,等. 气浮净水工艺述评[J]. 环境科学与技术,2008,31(8):55-58.  
Zhu Zhaoliang, Cao Xiangsheng, Meng Xuezheng, et al. Review on air flotation technology for water and

- wastewater treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(8): 55–58 (in Chinese).
- [6] 高惠, 麻宝刚. 溶气系统气浮装置设计参数的选定[J]. 给水排水, 2006, 32(S1): 208–209.  
Gao Hui, Ma Baogang. Selection of design parameters of dissolved air-floatation device [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(S1): 208–209 (in Chinese).
- [7] 陆进. 论污水深度处理技术的发展趋势[J]. 北方环境, 2011, 23(5): 19–20.  
Lu Jin. Study on the development of wastewater treatment technologies [J]. Northern Environment, 2011, 23(5): 19–20 (in Chinese).
- [8] 何圣兵, 孟凡良, 王宝贞, 等. 溶气气浮法与沉淀法的处理效果比较[J]. 中国给水排水, 2002, 18(5): 42–44.  
He Shengbing, Meng Fanliang, Wang Baozhen, et al. Comparison on the treatment effects of dissolved-air flotation and sedimentation processes [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(5): 42–44 (in Chinese).
- [9] 胡锋平, 邓荣森, 王涛, 等. 溶气气浮技术的发展及其在城市污水处理厂中的应用[J]. 给水排水, 2004, 30

(6): 27–30.

Hu Fengping, Deng Rongsen, Wang Tao, et al. Development and application of DAF in municipal wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(6): 27–30 (in Chinese).



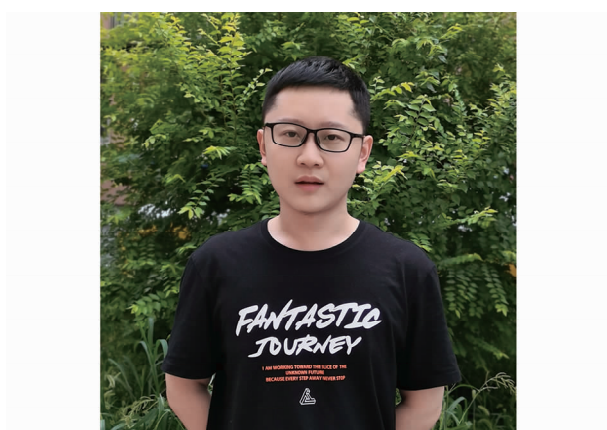
作者简介: 杨墨(1987–), 女, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为污水处理技术。

E-mail: 420719220@qq.com

收稿日期: 2019–08–18

(上接第88页)

- [14] 张海云, 李爱民, 蔡建国. 磺酸基修饰复合功能树脂对水中对氨基苯酚的吸附行为研究[J]. 离子交换与吸附, 2007, 23(3): 267–273.  
Zhang Haiyun, Li Aimin, Cai Jianguo. Adsorption of *p*-aminophenol onto bifunctional resin modified by sulfonic groups [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2007, 23(3): 267–273 (in Chinese).
- [15] 王福连, 高乃云, 徐斌, 等. 颗粒活性炭吸附去除黄浦江原水中有机物的研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(11): 1–5.  
Wang Fulian, Gao Naiyun, Xu Bin, et al. Removal of organics with different molecular weights from Huangpu River raw water by granular activated carbon adsorption [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(11): 1–5 (in Chinese).



作者简介: 刁寒(1995–), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向为水体除磷技术。

E-mail: 1171859981@qq.com

收稿日期: 2019–08–09