

分段回流式逆流气浮工艺处理高藻水的研究

王玉恒^{1,2}, 王启山², 吴玉宝², 岳琳², 杨健康²

(1. 东北大学秦皇岛分校环境科学与工程系, 秦皇岛 066004; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要: 利用逆流气浮工艺处理高藻水, 分别采用溶气水单段回流与分段回流的方式. 结果表明, 与单段回流相比, 采用分段回流可以增强气泡/絮体聚合体悬浮层的拦截作用, 减小悬浮层的厚度而增加过渡层的厚度, 延长过渡层中小絮体与气泡的碰撞接触时间; 在其它运行参数相同的情况下, 单段回流时最大水力负荷达到 11 m/h, 而分段回流时最大水力负荷可达 17 m/h, 处理负荷提高了 50% 以上, 处理效率大幅度增加; 采用分段回流时, 两释放器的回流量之比以及悬挂式释放器与原水进水口的距离对处理效果有显著影响. 较为合理的布置为: 固定式释放器 S 与原水进水口距离为 180 cm, 悬挂式释放器 P 与原水进水口的距离在 60~90 cm 之间. P 与 S 的流量比控制在 2~3 之间.

关键词: 逆流气浮; 分段回流; 高藻水; 水力负荷

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)11-3071-06

Treatment of High Algae-laden Water by Step-Recycle Counter Current Flotation

WANG Yu-heng^{1,2}, WANG Qi-shan², WU Yu-bao², YUE Lin², YANG Jian-kang²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: High algae-laden water was treated respectively by single-recycle and step-recycle counter current flotation. The results indicate that step-recycle mode of dissolved air water can strengthen capturing of bubbles and flocs association suspension bed, and extend the collision time of smaller floc and bubble because of reducing the thickness of suspension bed and increasing that of transition bed. Given the condition that other parameters were same, the biggest hydraulic loading of single-recycle could reach 11 m/h, and that of step-recycle could reach 17 m/h which is increased by 50%. Efficiency of treatment was improved by a large margin. The recycle ratio of two releasers and position of the pensile releaser influenced removal effect remarkably. The distance between settled releaser and inlet of raw water is 180 cm, and the range of distance between pensile releaser and inlet of raw water is 60-90 cm. The flow of pensile releaser is 2-3 times as much as settled releaser.

Key words: counter current; step-recycle; high algae-laden water; hydraulic loading

近年来, 水体的富营养化现象加剧, 造成了多方面的危害, 不仅破坏了水生生态系统的平衡, 也对人畜饮用水安全构成了严重威胁^[1, 2]. 由于藻类比重小, 稳定性高, 使水中的浊度色度增加, 混凝后形成的絮体较轻, 难于下沉, 这些水质特征加大了处理难度. 气浮工艺作为一种高效快速的固液分离技术, 其工艺原理较适合处理高藻、低浊、微污染水源水^[3].

逆流气浮是在紊流气浮理论的基础上发展而来的一种新型气浮工艺^[4~7], 工艺流程是: 混凝后携带絮粒的原水从池体上部流入, 溶气回流水由池底进入, 气泡由下而上浮起, 经过气浮处理后的出水由池底流出^[7]. 与传统的并流气浮方式相比, 其优点在于: 气泡在上升过程中就会与下行的絮体进行反复的碰撞接触, 这种相向而流的方式增加了相互碰撞的机会和次数, 延长了接触时间, 提高了处理效率.

本研究利用逆流气浮工艺处理天津市某高藻期河水, 并采用溶气水分段回流的方式, 以改善出水水质, 提高处理效率.

1 材料与方法

1.1 试验设备及工艺流程

溶气系统由空压机(型号 ZW-0.05/7, 宁波制造)、高压泵(台州泵业有限公司)、溶气罐(自制不锈钢罐)等组成, 溶气罐压力在 0.45~0.5 MPa. 絮凝剂采用蠕动泵(台州万福泵业有限公司, 15WZ10-10)投加, 高藻水靠增压泵(台州万福泵业有限公司, BT00-100W)提升.

气浮反应柱用透明有机玻璃制成, 内径为 12.5 cm, 有效高度为 230 cm, 原水进水口距排渣口 30 cm, 原水进水口与出水口距离为 200 cm, 在原水进水口以下 10 cm 处至出水口以上 30 cm 处每隔 20 cm 打一圆孔作为采样口, 以最底端采样口作为 1 号采样口, 依次向上排列, 共 9 个采样口.

收稿日期: 2007-11-18; 修订日期: 2008-01-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601140)

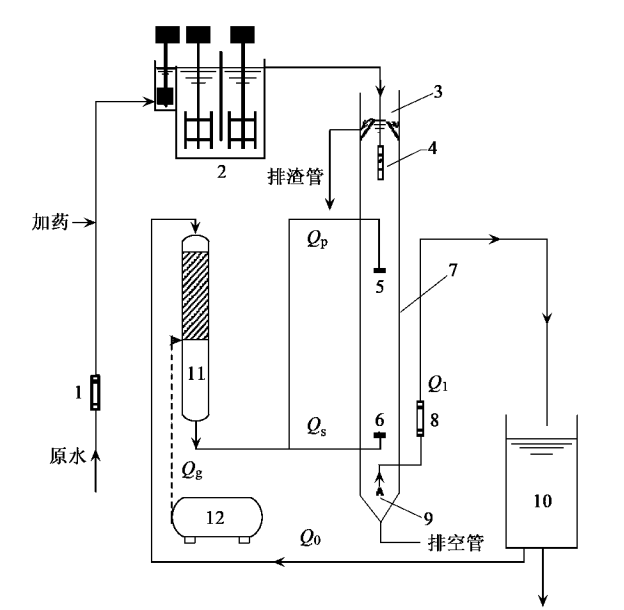
作者简介: 王玉恒(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: sun_wangyh@sina.com

采用溶气水分段回流的方式时,第 1 段溶气水从气浮柱底端的固定式释放器 S(简称 S)流出,S 与 原水进水口距离为 180 cm(与第 1 采样口距离为 10 cm);第 2 段溶气水从气浮柱中间位置的悬挂式释放器 P(简称 P),P 的位置可在 S 与 原水进水口之间任意调整.本试验采用的释放器具有特殊结构,溶气水 可从多个出口流出.其优点是:产生的气泡更加微 细,减少了大气泡的产生,增加了气泡的数量,从而 具有更多表面自由界面能从而增强了气泡的吸附性 能^[8];空间分布更加均匀,减小了释放器附近流体的 湍流强度,水力剪切力对聚合体的破坏作用减弱,便 于其上浮排出.

工艺流程如图 1 所示.用泵将高藻水提升至机 械搅拌混凝反应池,高藻水与絮凝剂经过快速混合, 水中的颗粒脱稳后进入 2 级絮凝池,经降速絮凝反 应后,携带絮体颗粒的原水经布水器从上方进入气 浮反应柱;溶气回流水与原水逆向流动,在运行过程 中,气浮柱上部会形成气泡/絮体聚合体的悬浮层, 可以拦截随水流下行的絮体颗粒^[9],悬浮层中的聚 合体密度随粘附气泡数量的增加而降低,最终上浮 到气浮柱顶部的排渣口溢流排出;穿过悬浮层的小 颗粒在下行过程中又被上升的微气泡拦截,形成新 的聚合体,并随着浮力的增加而浮升;出水由底部的 出水口排出.

1.2 试验试剂与原水

絮凝剂:聚合氯化铝(PAC)GB 15892-1995,天津



1. 进水流量计;2. 混凝反应池;3. 排渣口;4. 布水器;5. 悬挂式释放器;6. 固定式释放器;7. 气浮反应柱;8. 出水流量计;9. 出水口; 10. 中间水箱;11. 溶气罐;12. 空压机压缩机; Q_0 为清水流量; Q_g 为空气流量; Q_p 为释放器 P 的流量; Q_s 为释放器 S 的流量

图 1 逆流气浮工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of counter current flotation process

乐泰化工试剂厂,黄色粉末状固体, Al_2O_3 含量为 28%,碱化度为 (65% ~ 85%),使用时配制成 10 mg/mL 的溶液.

原水:取自天津市某高藻期河水,其水质特征如 表 1 所示.

表 1 原水水质特征

Table 1 Characteristic of raw water quality

水质指标	温度/℃	浊度/NTU	色度/度	藻数 $\times 10^4$ /个 $\cdot L^{-1}$	pH	叶绿素 a/ $\mu g \cdot L^{-1}$	UV ₂₅₄	TOC/ $mg \cdot L^{-1}$
范围	17 ~ 28	12 ~ 20	15 ~ 20	2 000 ~ 6 000	8.1 ~ 8.4	50 ~ 120	0.11 ~ 0.19	5 ~ 11

1.3 检测指标与方法

浊度:采用 HACH 2100N 浊度仪进行测定.叶绿 素 a^[10]:利用真空泵和 0.45 μm 滤膜将一定量的水样 过滤浓缩后,用 90% 乙醇提取,将上清液置于 1 cm 光 程的比色皿中,利用分光光度计分别测定不同波长下 的吸光度,最后利用公式计算叶绿素 a 的含量.

$$\begin{aligned} \text{叶绿素 a}(\mu g/L) = & [11.64 \times (A_{663} - A_{750}) \\ & - 2.16 \times (A_{645} - A_{750}) + 0.10 \\ & \times (A_{630} - A_{750})] \times V_1 / (V \cdot \delta) \end{aligned}$$

式中, V 为水样体积, A 为吸光度, V_1 为提取液定容 后的体积, δ 为比色皿光程.

2 结果与分析

2.1 小试试验

通过前期的小试试验确定 PAC 最佳投药量范 围为 40 ~ 50 mg/L(11.2 ~ 14.0 mg/L,以 Al_2O_3 计),可 根据原水水质适当调整;快速混合 G 值为 500 s^{-1} , 一级絮凝反应 G 值为 100 s^{-1} ,二级絮凝反应 G 值 为 20 s^{-1} ;溶气水回流比为 10%.在逆流气浮实验中 均采用以上参数值.

2.2 单段回流试验

本阶段试验只采用释放器 S(距原水进水口 180

cm),溶气水从气浮反应柱底端流出.水力负荷对出水水质的影响如图 2 所示.从中可见,当水力负荷在 11 m/h 以下时,出水浊度在 1 NTU 以下,去除率在 90% 以上,叶绿素 a 的去除率也达到 90% 以上,出水水质较为稳定,水质较好;当水力负荷超过 11 m/h

后,随着水力负荷的增加,出水水质明显变差,去除效率急剧下降,当水力负荷达到 13.7 m/h 时,出水浊度和叶绿素 a 浓度分别为 2.87 NTU 和 23.36 $\mu\text{g/L}$,去除率只有 80.5% 和 67.7% .

图 3 为不同水力负荷下气浮反应柱内浊度的变

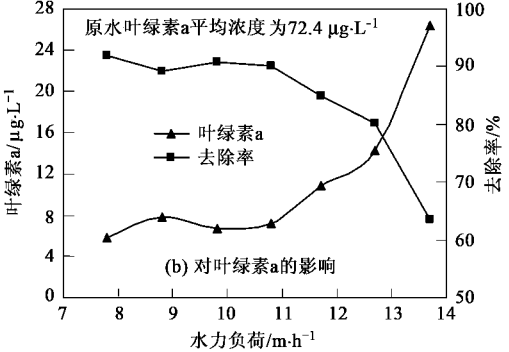
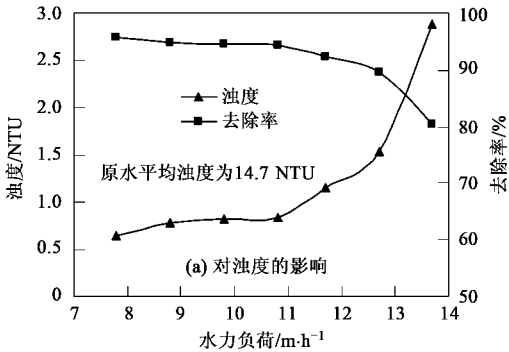


图 2 单段回流水力负荷对出水水质的影响

Fig.2 Effect of hydraulic loading on effluent quality by single-recycle

化规律.从中可见,气浮柱内由下至上水样浊度逐渐增大.当水力负荷较小时,1~5 号口水样浊度缓慢增大,而从 5~6 号口,水样的浊度增幅突然加大,之后浊度变化又趋于缓慢.这说明 6 号口(原水进水口以下 70 cm 处)至原水进水口段形成了气泡/絮体聚合体的悬浮层,由于上升的聚合体及气泡的共同作用,悬浮层拦截了大部分下行的絮体颗粒,并最终浮升至排渣口被去除,因此悬浮层的浊度较大,甚至超过原水浊度;1 号口(距溶气水进口 10 cm)至悬浮层底部为过渡层,在过渡层中,穿过悬浮层的较小颗粒

在下行过程中与上升的微气泡碰撞粘附,颗粒粘附微气泡逐渐增多并长大,浮力的增加使其上升至悬浮层;在溶气水进口附近为气泡形成层,浊度已降至很低,剩余颗粒继续与微气泡相互作用,1 号口的水样浊度为 3.17 NTU,出水浊度则降至 0.821 NTU.

随着水力负荷的增加,悬浮层逐渐向下移动,过渡层变短,当水力负荷达到 13.7 m/h 时,如图 3(b)所示,悬浮层已降至溶气水进口以上 30 cm 处,悬浮层对颗粒物的拦截作用变差,过渡层中颗粒物增多,出水水质较差.

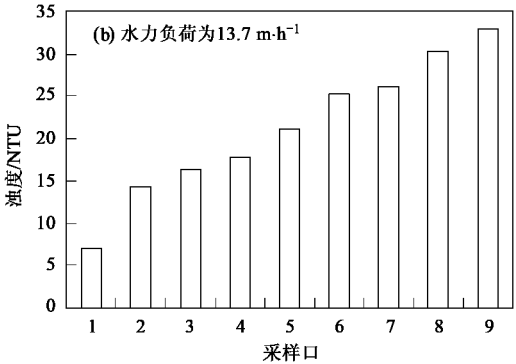
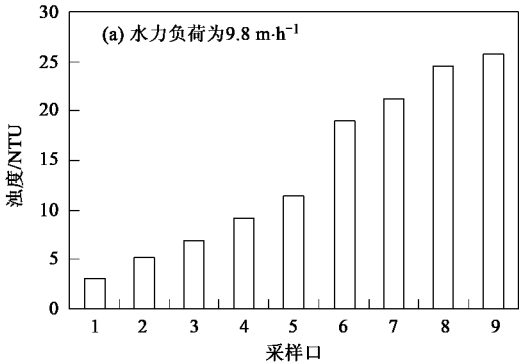


图 3 单段回流气浮柱内浊度变化规律

Fig.3 Change of turbidity in flotation cylinder by single-recycle

2.3 分段回流逆流气浮试验

本阶段试验同时采用释放器 S 与 P,在投药量、混凝条件、溶气水回流比不变的条件下,研究其对高藻水的处理效果.

2.3.1 理论分析

为了提高逆流气浮的处理效率,一方面应增强悬浮层的拦截作用,尽量减少进入过渡层的小絮体数量.另一方面,由气泡与絮体的粘附结合机制可

知^[8]: 尺寸较大的絮体, 粘附点越多, 更容易与气泡相结合, 粘附得也越牢固; 而尺寸较小的絮体剩余憎水基团较少, 相应的粘附点较少, 应延长小絮体与气泡的接触时间, 增加其碰撞几率. 所以, 在逆流气浮过程中, 适当地减小悬浮层的厚度而增加过渡层的厚度, 可以延长过渡层中小絮体与气泡的碰撞接触时间, 使两者结合得更加牢固, 容易浮升.

2.3.2 正交实验

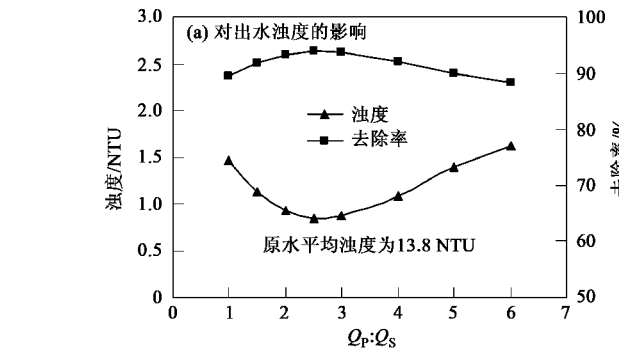
选取 S 与 P 的流量比 $Q_s:Q_p$ 为因素 A, P 与原水进水口的距离 L_p (cm) 为因素 B, 水力负荷(m/L) 为因素 C, 以出水浊度为指标, 选用 $L_9(3^4)$ 正交表设计实验. 原水平均浊度为 14.6 NTU.

如表 2 所示, 以第 7 组实验为例, 当 $Q_s:Q_p$ 为 0.5, L_p 为 90 m, 水力负荷为 13.7 m/h 时, 其出水浊度为 0.825 NTU, 出水水质较好, 与相同水力负荷下单段回流时的出水(浊度为 2.87 NTU)相比, 出水

表 2 分段回流正交实验 $L_9(3^4)$ 表

Table 2 Orthogonal experimental design of step recycle

试验编号	A	B	C	出水浊度/NTU
1	1	90	11.7	0.802
2	1	120	12.7	1.51
3	1	60	13.7	1.38
4	2	90	12.7	1.05
5	2	120	13.7	1.88
6	2	60	11.7	1.13
7	0.5	90	13.7	0.825
8	0.5	120	11.7	0.740
9	0.5	60	12.7	0.883



水质明显提高. 这说明采用逆流气浮处理高藻水时, 溶气水分段回流的处理效果明显好于单段回流.

通过对表 3 进行显著性分析可知, 两释放器流量比对实验结果影响最大, 当 S 与 P 的流量比为 0.5 时, 其它两因素发生改变对出水水质无明显影响, 水质较好, 这说明当 P 的流量大于 S 的流量时, 气浮效果更好.

表 3 直观分析表

Table 3 Intuitionistic analysis

项目	A	B	C
浊度均值 1	1.231	0.892	0.891
浊度均值 2	1.353	1.377	1.148
浊度均值 3	0.816	1.131	1.362
极差	0.537	0.485	0.471

2.3.3 两释放器流量比($Q_p:Q_s$)试验

本阶段试验进水的水力负荷为 14.6 m/h, P 与原水进水口距离为 90 cm, 在其它运行条件不变的情况下, 采用不同 $Q_p:Q_s$, 考察两释放器流量比对出水水质的影响. 从图 4 可以看出, 随着 $Q_p:Q_s$ 的增大, 出水浊度与叶绿素 a 浓度先降低后升高. 当 P 的流量为 S 的 2~3 倍时, 出水浊度在 1 NTU 以下, 叶绿素 a 浓度在 10 $\mu\text{g/L}$ 左右, 去除率分别达到 93% 和 80% 以上, 出水水质较好; 继续增大 $Q_p:Q_s$, 出水水质又逐渐变差. 这说明总回流量一定的情况下, 适当增大释放器 P 的流量, 可以改善出水水质, 提高处理效率.

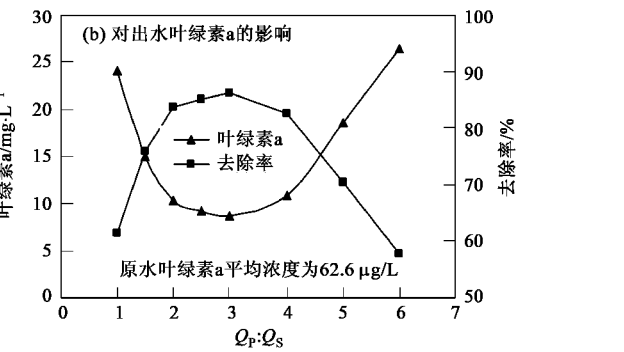


图 4 $Q_p:Q_s$ 对出水水质的影响

Fig.4 Effect of $Q_p:Q_s$ on effluent quality

2.3.4 P 与原水进水口距离 L_p 试验

原水平均浊度为 15.2 NTU, 水力负荷为 12.7 m/h, $Q_p:Q_s$ 在 3 左右, 其它条件不变, 考察 L_p 对处理效果的影响. P 所在位置对应的采样口如表 4

所示.

从表 5 可以看出, 当 L_p 在 60~90 cm 之间时, 出水浊度小于 1 NTU, 处理效果较好; 而 P 与原水进水口距离太近或太远, 都会导致出水水质变差.

表 4 P 所在位置对应的采样口

Table 4 Sampling hole corresponding to position of P

P 与原水进水口的距离/ cm	120	90	60	30
对应的采样口	No. 3 ~ No. 4 中间	No. 5	No. 6 ~ No. 7 中间	No. 8

表 5 P 处于不同位置时出水浊度以及气浮柱内浊度变化/NTU

Table 5 Effluent turbidity and change of turbidity in cylinder with different position of P/NTU

L_P /cm	出水	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
120	1.31	3.33	4.60	7.77	16.4	20.2	21.9	25.9	27.1	29.0
90	0.788	2.11	3.03	4.51	9.45	19.8	21.6	22.5	23.7	27.4
60	0.902	2.35	2.84	3.17	5.04	8.18	12.3	21.4	23.0	27.7
30	1.48	3.54	4.31	5.59	7.74	8.27	10.1	14.6	19.8	23.6

2.3.5 水力负荷试验

原水平均浊度和叶绿素 a 浓度分别为 14.4 NTU 和 75.18 $\mu\text{g/L}$, P 与原水进水口距离为 90 cm, $Q_P:Q_S$ 在 2.5 ~ 3 之间, 其它条件不变. 由图 5 可见, 水力负

荷在 17 m/h 以下时, 出水水质稳定, 浊度在 1 NTU 左右, 叶绿素 a 浓度在 10 $\mu\text{g/L}$ 以下, 去除率分别在 92% 和 85% 以上, 出水水质较好; 当水力负荷超过一定范围, 出水水质明显变差.

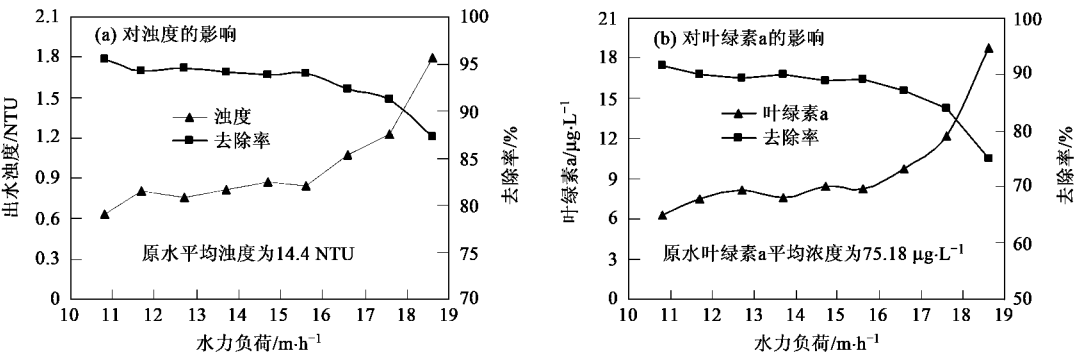


图 5 分段回流水力负荷对出水水质的影响

Fig.5 Effect of hydraulic loading on effluent quality by step recycle

3 讨论

3.1 两释放器流量比对处理效果的影响

由图 6 可见, 由于 P 的位置恰好位于 5 号口处, P 释放的微气泡拦截了大部分下行的絮体, 悬浮层相应位于 5 号口以上, 过渡层位于 4 号口以下, 而在 4 号口与 5 号口之间形成边界层, 这是由于水流的向下流动, 致使悬浮层中的部分带气絮体以及 P 释放的部分气泡被携带至此处, 过渡层中的带气絮体也浮升至此处, 在边界层中完成各类絮体间以及絮体与气泡间的碰撞粘附作用.

P 与 S 的流量比决定了悬浮层的拦截效果. 当 P 与 S 的流量比由 1 增至 3 时, 对比图 7(a) 和图 7(b), 从水样 4 和水样 5 的浊度差异可以看出, 随着 $Q_P:Q_S$ 增大, 两采样口浊度差变大, 这是由于随着 P 流量的增大, 释放出更多的微气泡, 从而增加了悬浮层

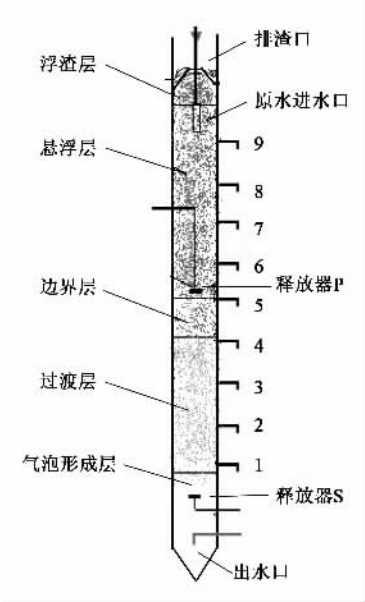


图 6 分段回流时气浮柱内各层分布

Fig.6 Distribution of layers in cylinder with step recycle

的气泡数量,更多的絮体被拦截,拦截效果提高,穿过悬浮层的小絮体数量减少,在试验中也可以观察到聚合体的浮升速率明显加快.当 P 流量增至 S 流量的 6 倍时,对比图 7(b)和图 7(c),悬浮层的拦截

效果并无明显变化,进入过渡层中的小絮体数量相当,但由于 S 释气量过小,过渡层中的小絮体不能与足够数量的微气泡粘附合,致使过多颗粒物进入出水中,处理效果变差.

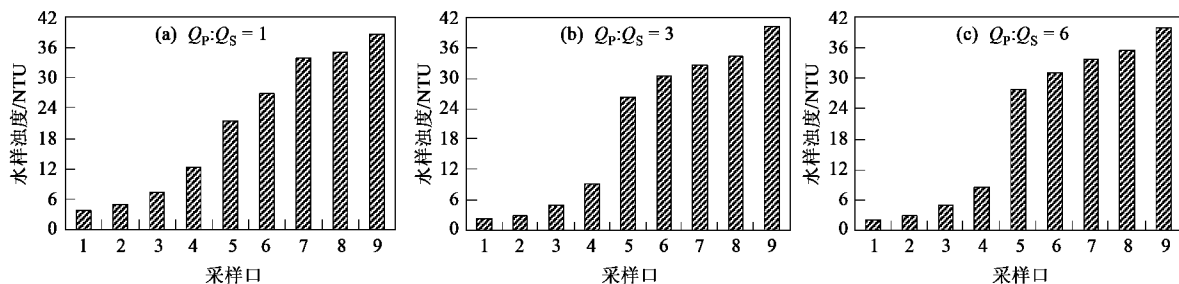


图 7 采用不同 $Q_p:Q_s$ 时气浮柱内的浊度变化

Fig. 7 Change of turbidity in cylinder with difference of $Q_p:Q_s$

3.2 P 与原水进水口距离对处理效果的影响

P 的位置决定了悬浮层和过渡层的厚度.从表 4 及表 5 可以看出,当 L_p 为 120 cm 时,悬浮层厚度较大,层内聚合体浮升距离也较大,相应地过渡层厚度较小,小颗粒与微气泡碰撞接触时间短,不能充分结合而浮升,致使出水中的颗粒物增多,水质较差;当 L_p 在 60~90 cm 之间时,处理效果较好,这是由于 P 与原水进水口距离较近,促进了大颗粒絮体与气泡粘附结合,聚合体上浮速度加快,浮升距离缩短,便于浮渣的迅速排出,也加速了悬浮层的更新,同时,过渡层增厚,有利于小颗粒与气泡的碰撞粘附;当 L_p 为 30 cm 时, P 太靠近原水进水口以及排渣口,大量气泡还来不及与絮体粘附结合就浮升至排渣口排出,悬浮层拦截效果变差,穿过悬浮层的絮体增多,出水水质变差.

4 结论

(1) 采用溶气水单段回流式逆流气浮工艺处理某高藻期河水,当 PAC 投药量为 40~50 mg/L (11.2~14.0 mg/L, 以 Al_2O_3 计),快速混合 G 值为 $500 s^{-1}$,一级絮凝反应 G 值为 $100 s^{-1}$,二级絮凝反应 G 值为 $20 s^{-1}$,溶气水回流比为 10% 时,最大水力负荷达到 11 m/h,浊度与叶绿素 a 的去除率分别达到 90% 和 85% 以上.

(2) 采用溶气水分段回流式逆流气浮处理该高藻水,运行参数与单段回流时相同,最大水力负荷可达 17 m/h,浊度与叶绿素 a 的去除率分别达到 90% 和 85% 以上.与采用单段回流时相比,其最大水力

负荷提高了 50% 以上,处理效率大大增加.

(3) 采用分段回流时,两释放器的回流量比以及悬挂式释放器的与原水进水口的距离对处理效果有显著影响.较为合理的布置为:固定式释放器 S 与原水进水口距离为 180 cm,悬挂式释放器 P 与原水进水口的距离在 60~90 cm 之间;P 与 S 的流量比控制在 2~3 之间.

参考文献:

- [1] 刘慧,王春丽.水体富营养化及其防治[J].应用能源技术,2006,(5):24-27.
- [2] 殷琨.水体富营养化的影响及其防治技术[J].中国资源综合利用,2006,24(5):19-22.
- [3] 李都望,詹健,黄晓东,等.气浮技术控制影响因素的探讨[J].江西科学,2006,24(1):47-50.
- [4] Kiuru H J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions)[J]. Wat Sci Tech, 2001, 43(18):1-17.
- [5] Scriven R J, Ouki S K, Daggart A S, et al. The impact of physical-chemical water treatment on a novel flotation/filtration process[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(10-11): 211-215.
- [6] Officer J, Ostrowski J A, Woollard P J. The design and operation of conventional and novel flotation systems on a number of impound water types [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2001, 1(1):63-69.
- [7] Eades A, Brignall W J. Counter-current dissolved air flotation/filtration[J]. Wat Sci Tech, 1995, 31(3/4):173-178.
- [8] 陈冀孙,胡斌.气浮净水技术的研究与应用[M].上海:上海科学技术出版社,1985.
- [9] 郭瑾珑,王毅力,李大鹏,等.逆流共聚气浮水处理工艺研究[J].中国给水排水,2002,18(7):12-16.
- [10] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.