

# 沉淀与气浮工艺单元处理太湖原水效果比较

胡澄澄 高乃云 楚文海

(同济大学污染控制与资源化国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 针对典型的太湖湖泊水源水, 通过中试对比混凝沉淀和混凝气浮两种工艺对太湖原水的处理效果。试验表明, 气浮工艺单元对低温低浊水的浊度、UV<sub>254</sub> 的去除率分别比沉淀工艺平均高 14.94 个百分点、7.51 个百分点, 对高温高藻水则平均高出 5.77 个百分点、5.62 个百分点。气浮工艺较沉淀工艺能更好地去除藻类和藻毒素。对于 COD<sub>Mn</sub>、DOC、土臭素(GSM)、二甲基异冰片(MIB) 的去除效果, 气浮工艺单元略高于斜管沉淀。气浮工艺单元对各粒径等级的颗粒物去除率基本在 90% 以上。

**关键词** 斜管沉淀 气浮工艺 低温低浊 藻 有机物 颗粒数

## Comparison of the treatment effects between sedimentation and dissolved air flocculation for the Taihu Lake raw water

Hu Chengcheng, Gao Naiyun, Chu Wenhai

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The pilot treatment effects between coagulation-sedimentation process and coagulation-dissolved air flocculation (DAF) process for the raw water of Taihu Lake were compared. The experiment results showed that turbidity and UV<sub>254</sub> removal rates for the low temperature and turbidity raw water treatment by DAF were 14.94 percentage point and 7.51 percentage point respectively higher than those by sedimentation process; while for the high temperature and rich algae raw water treatment by DAF were 5.77 percentage point and 5.62 percentage point higher than those by sedimentation process respectively. The experiment results indicated that DAF was obviously more effective for algae and microcystin removals than sedimentation process. While for COD<sub>Mn</sub>, DOC, GSM, MIB removals, DAF was only a little bit more effective than tube sedimentation process. The particle removals with different particle sizes by DAF were more than 90%.

**Keywords:** Tube sedimentation process; DAF; Low temperature and turbidity; Algae; Organic matter; Particle counts

随着经济的快速发展, 我国湖泊富营养化问题愈发严重, 湖泊型饮用水源面临高藻、臭味等突出问题, 饮用水安全保障形势十分严峻, 对人们生产、生活造成极大的损害<sup>[1]</sup>。作为饮用水水源地的太湖, 同样存在着季节性藻类高发和低温低浊现象, 传统

处理工艺受到挑战。利用微小气泡与絮体结合使絮体上浮而达到固液分离的气浮工艺单元(以下简称气浮工艺), 对藻类与低温低浊水有较好的处理效果<sup>[2]</sup>。本文针对典型的湖泊水体, 通过中试考察气浮和沉淀两种工艺对太湖原水的净化效果, 分析比较两种工艺在处理湖泊水体时存在的优缺点。

### 1 试验方法和材料

#### 1.1 试验装置

两套独立的中试装置由有机玻璃制成, 分别是

“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ08B06, 2007BAC26B03); 国家科技重大专项资助(2008ZX07421-002); 上海市科委重点科技项目(072312001)。

由进水水箱、机械搅拌絮凝池、斜管沉淀池、滤柱等组成的混凝沉淀工艺(见图 1a);以及由进水水箱、机械搅拌絮凝池、气浮池、滤柱等组成的混凝气浮工艺(见图 1b);设计产水量均为  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

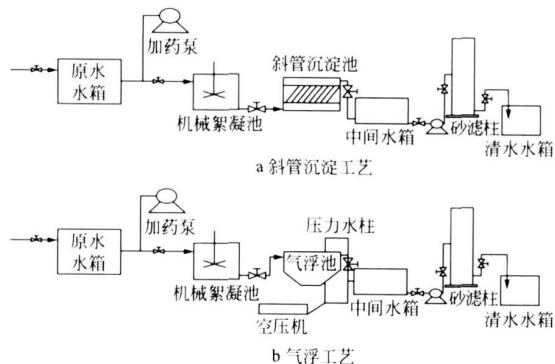


图 1 斜管沉淀、气浮工艺中试流程

混凝沉淀工艺设三级絮凝池,尺寸为  $1.2 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ;一级絮凝桨板转速为  $100 \text{ r/min}$ ,二级为  $30 \text{ r/min}$ ,三级为  $10 \text{ r/min}$ 。斜管沉淀池尺寸为  $1.5 \text{ m} \times 0.7 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ ,斜管长度为  $0.5 \text{ m}$ ,倾斜角为  $45^\circ$ 。

混凝气浮工艺絮凝池,尺寸为  $0.42 \text{ m} \times 0.42 \text{ m} \times 0.61 \text{ m}$ ;上下两个桨板,转速为  $50 \text{ r/min}$ 。气浮池直径为  $0.7 \text{ m}$ ,池高  $1 \text{ m}$ 。气浮系统溶气罐为间歇式进气、连续式进水,回流比为  $10\% \sim 15\%$ ,工作压力为  $0.24 \sim 0.34 \text{ MPa}$ 。气浮池采用 TS 型释放器,连续刮渣。

试验用混凝剂为硫酸铝,气浮工艺混凝剂投加量为  $15 \sim 20 \text{ mg/L}$ ,沉淀工艺为  $20 \sim 30 \text{ mg/L}$ ,气浮工艺投药量比沉淀工艺平均少  $20\%$  左右,原因是气浮工艺稳定运行时,对絮体颗粒尺寸的要求较沉淀工艺低。

### 1.2 试验仪器和方法

各工况稳定时,在气浮池和沉淀池分别取样,进行浊度、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC 的测定。在高藻期进行为期一周的连续取样,测试藻类个数、总藻毒素(TMC)、土臭素(GSM)、二甲基异冰片(MIB)等指标。

浊度采用美国 HACH 公司 2100P 型浊度仪测定; $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用酸性高锰酸钾滴定法测定;DOC 采用日本岛津公司生产的 DOG- $\text{V}_{\text{CPH}}$  测定仪测定; $\text{UV}_{254}$  检测采用北京莱伯泰科仪器有限公司的紫外

可见分光光度计测定。TMC 用高效液相色谱仪(LG-2010AHT, 岛津, 日本)测定;色谱柱为 shim-pack VP-ODS( $150 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm i.d.}$ );GSM、MIB 采用 GG-MS-QP2010 S230V 测定(岛津, 日本)。颗粒数由 IBR 型颗粒计数仪测定。藻类计数采用镜检法测定。

### 1.3 原水水质

试验用水为太湖原水,试验期间原水情况见表 1。

表 1 试验期间原水情况

水温/ $^\circ\text{C}$	浊度/NTU	TDS/ $\text{mg/L}$	$\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{mg/L}$	$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$
0~31	5.04~77.0	0.25~0.29	3.39~7.48	0.069~0.116

注:TDS 指溶解性总固体。

## 2 污染物去除效果比较

### 2.1 浊度

低温低浊期原水温度在  $0 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,浊度在  $5 \sim 15 \text{ NTU}$ 。气浮工艺在低温低浊期( $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右)对浊度的去除率为  $75\% \sim 91\%$ ,平均为  $85.16\%$ ;沉淀工艺对浊度的去除率为  $55\% \sim 82\%$ ,平均为  $70.67\%$ ,气浮工艺对浊度的去除率比沉淀工艺平均高  $14.49$  个百分点。气浮工艺可以使出水浊度降至  $1 \text{ NTU}$  以下,沉淀出水在  $3 \text{ NTU}$  左右(见图 2)。

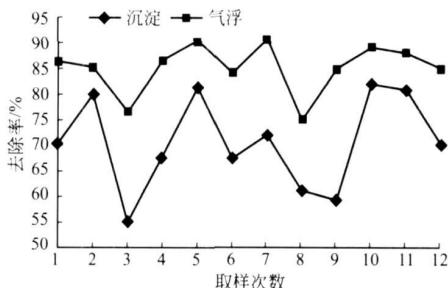


图 2 低温低浊期气浮和沉淀工艺对浊度的去除率

高温高藻期原水温度在  $20 \sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ,浊度在  $20 \sim 77 \text{ NTU}$ 。气浮工艺在高温高藻期( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右)对浊度的去除率为  $89\% \sim 97\%$ ,平均为  $95.23\%$ ;沉淀工艺对浊度的去除率在  $81\% \sim 95\%$ ,平均为  $89.46\%$ ,气浮工艺对浊度的去除率比沉淀工艺高  $5.77$  个百分点。气浮出水浊度在  $2 \text{ NTU}$  左右,沉淀出水在  $3 \text{ NTU}$  左右(见图 3)。

低温低浊期,气浮工艺对浊度去除的优势更明

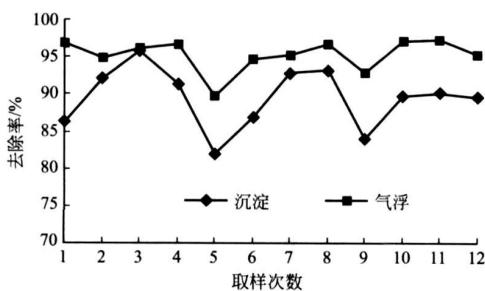


图3 高温高藻期气浮和沉淀工艺对油度的去除率

显,这与两种工艺对絮体颗粒需求的不同有关。气浮工艺对絮体颗粒尺寸的要求没有沉淀工艺严格,针尖大小的絮体即可<sup>[3]</sup>;而沉淀工艺则需要较大尺寸的絮体颗粒。低温低浊水粘度较大,颗粒周围的水化膜较厚,颗粒的亲水性加强,布朗运动减弱,从而使得颗粒在水中稳定地存在,不易形成大颗粒;水的粘滞系数的增大,使得能够经沉淀去除的颗粒需要更大的粒径尺寸;混凝剂的聚合反应速度的降低,也不利于胶体颗粒间的吸附架桥。低温低浊水中的胶体颗粒物数量较少,而且主要以细而均匀的胶体颗粒为主,其 Zeta 电位负值很高,碰撞效率很低,并且低温时,水中溶解气体多,加絮凝剂后形成密度较低的絮体,有时大量气体吸附于絮体周围,易于上浮<sup>[4,5]</sup>。因此,沉淀工艺需要通过加大投药量来提高出水水质,而对于气浮工艺絮体更利于与微气泡粘附被去除。

高温高藻期原水经混凝后可以形成足够大的絮体,除浊效果主要受藻类的影响。首先,藻类形成的絮体较轻,利于气浮处理<sup>[6]</sup>;其次,由于混凝作用致使藻类死亡,藻类残体在斜管内壁粘附,排泥后沉淀池上部会有油腻状藻类残体漂浮,缩短了排泥周期,减少了沉淀池稳定出水时间。

## 2.2 有机物

### 2.2.1 对 COD<sub>Mn</sub>、DOC 的去除

原水 COD<sub>Mn</sub> 为 3.39~7.48 mg/L, DOC 为 6.2~8.9 mg/L 时,比较气浮和沉淀两种工艺对 COD<sub>Mn</sub> 和 DOC 的去除率(见图 4)。气浮工艺对 COD<sub>Mn</sub> 和 DOC 的平均去除率较沉淀工艺分别高出 6.5 个百分点和 8.85 个百分点。

### 2.2.2 低温低浊期与高温高藻期对 UV<sub>254</sub> 的去除

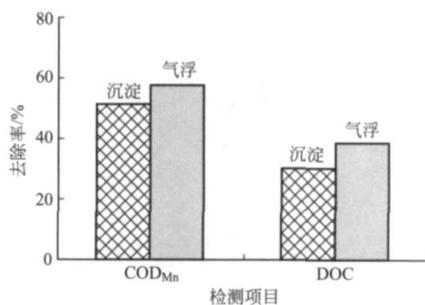


图4 气浮和沉淀工艺对 COD<sub>Mn</sub> 和 DOC 的去除率

UV<sub>254</sub> 是衡量水中有机物指标的一项重要控制参数,用于所有具有紫外吸收性能的有机物成分总浓度的指示。UV<sub>254</sub> 可以作为三卤甲烷(THMs) 先驱物等指标的替代参数<sup>[7]</sup>。此处通过考察各工艺不同时期对 UV<sub>254</sub> 的去除情况,反映其对 THMF<sub>P</sub> 可能的去除情况。

低温低浊期原水的 UV<sub>254</sub> 为 0.069~0.082 cm<sup>-1</sup>, 高温高藻期为 0.077~0.116 cm<sup>-1</sup>。如图 5 所示,低温低浊期与高温高藻期气浮工艺对 UV<sub>254</sub> 的去除率较沉淀工艺分别高出 7.51 个百分点和 5.62 个百分点。但是低温低浊期各工艺对 UV<sub>254</sub> 的去除,与高温高藻期相比都有很大下降,这可能因为含共轭双键或苯环的有机物多为亲水性有机物,而在低温低浊情况下,胶体颗粒数目较少,颗粒相互碰撞聚集的机会减少,胶体的溶剂化作用增强,颗粒周围水化作用突出,妨碍其凝聚。

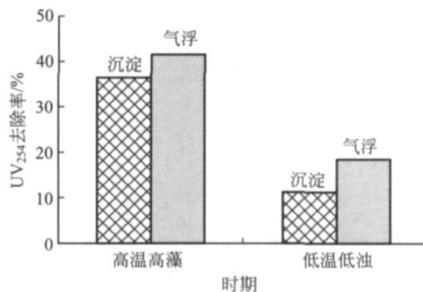


图5 不同时期气浮和沉淀工艺对 UV<sub>254</sub> 的去除率

### 2.3 高温高藻期对藻类、TMC 以及 GSM、MIB 的去除

#### 2.3.1 对藻类和 TMC 的去除

太湖流域的藻类随季节不同种类不同,高藻期则主要以蓝藻和绿藻为主,一般在 3000 万~8000 万个/L。气浮工艺对藻的去除率为 85%~95%,沉淀工

艺为 70%~88%，气浮工艺平均高出 11 个百分点。原水总藻毒素含量为 0.18~0.31  $\mu\text{g/L}$ ，气浮工艺和沉淀工艺对 TMC 的平均去除率为 41.94%、22.58%，气浮工艺平均高出 19.35 个百分点(见图 6)。

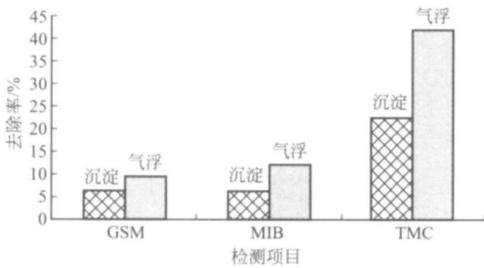


图 6 气浮和沉淀工艺对 GSM、MIB 以及 TMC 的去除率

藻类密度一般较小，投加混凝剂后形成的絮凝体不易沉淀；与此同时有些藻类分泌黏液易引发后絮凝现象，在沉淀池中微小絮体容易上浮，而气浮工艺形成的微小气泡快速黏附絮体颗粒上浮，达到良好的除藻效果<sup>[8,9]</sup>。混凝工艺在搅拌过程中破坏藻细胞而增大胞外微囊藻毒素<sup>[10]</sup>的浓度，而气浮工艺对絮体颗粒尺寸的要求小于沉淀工艺，混凝强度不如沉淀工艺剧烈；同时气浮工艺对藻细胞直接去除较多，因此对总藻毒素的去除效果较沉淀工艺好。

### 2.3.2 对 GSM、MIB 的去除

藻类高发会导致有机物浓度增加，产生臭味。原水中 GSM 为 1.02~15.72  $\text{ng/L}$ ，MIB 为 0~22.12  $\text{ng/L}$ ；气浮工艺对 GSM、MIB 的平均去除率比沉淀工艺分别高出 3.39 个百分点、5.55 个百分点(见图 6)。气浮和沉淀工艺对臭味物质的去除有限，需要增加吸附、氧化等预处理来提高对臭味物质的去除能力。

### 2.4 颗粒数

在超低浊度情况下，水中含有的稳态微颗粒难以由浊度值来生动体现，而粒径为微米级的颗粒恰为细菌、微生物和藻类等，其对城市供水水质的安全性产生极大的隐患。水中大于 2  $\mu\text{m}$  的颗粒数超过 100 个/ $\text{mL}$  时，水中存在两虫的几率很大<sup>[11]</sup>。分别对两种工艺去除各粒径区间颗粒数情况进行比较，发现对各粒径颗粒物的去除中，气浮工艺都不同程度地优于沉淀工艺(见图 7)，通过颗粒数的去除情况也反映出气浮在去除藻类上的优势。

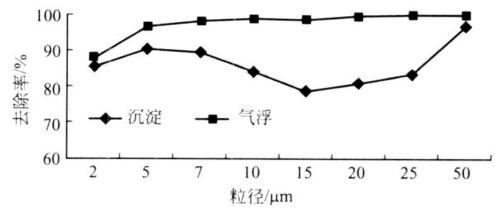


图 7 气浮和沉淀工艺对颗粒物的去除率

## 3 结论

(1) 气浮工艺对太湖原水浊度的去除效果优于沉淀工艺，低温低浊时期效果更加明显，平均高出 14.49 个百分点；气浮工艺对藻类、TMC 的去除有较大优势。

(2) 高温高藻期两种工艺对有机物的去除效果优于低温低浊期，气浮工艺对有机物的平均去除率比沉淀工艺高 6 个百分点；两种工艺对 GSM、MIB 的去除能力有限。

(3) 两种工艺对各粒径区间颗粒数的去除率反映其对水中悬浮微粒的去除情况，气浮工艺在各粒径等级均优于沉淀工艺。

(4) 气浮工艺投药量较沉淀工艺少，出水效果稳定快，稳定时间长，占地面积比沉淀工艺小。在充分考虑气浮工艺排泥臭味问题，管理维护以及回流消耗等问题基础上，以湖泊水为水源水的各地方水厂新建或改建可考虑建设气浮池。

### 参考文献

- 高乃云, 严敏, 乐林生. 饮用水强化处理技术. 北京: 化学工业出版社, 2005
- Edzwald J K. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, 1995, 31 (34) : 1~ 24
- Han M, Kim W, Dockko S. Collision efficiency factor of bubble and particle in DAF: Theory and experimental verification. *Water Science and Technology*, 2001, 43(8): 139~ 144
- Braul L, Viraraghavan T, Corkal D. Cold water effects on enhanced coagulation of high DOC, low turbidity water. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2001, 36(4): 701~ 717
- 霍明昕, 刘馨远. 低温低浊水质特性的分析. *中国给水排水*, 1998, 14 (6): 33~ 34
- Sohn B Y, Park T J, Oh B S, et al. A case Study of the DAF-based drinking water treatment plant in Korea. *Separation Science and Technology*, 2008, 43 (15): 3873~ 3890
- Eaton A D. Measuring UV-Absorbing organics: A standard method. *AWWA*, 1995, 87(2): 86~ 90

# 砂滤池对颤蚓的拦截和去除效果研究

聂小保<sup>1,2</sup> 黄廷林<sup>1</sup> 张金松<sup>3</sup> 张爽<sup>1</sup> 李伟<sup>1</sup> 李晓钰<sup>1</sup>

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055;

2 长沙理工大学水利学院, 长沙 410076; 3 深圳市水务(集团)有限公司, 深圳 518031)

**摘要** 中试条件下研究了砂滤池对颤蚓的拦截效果,并考察了滤速、过滤周期和反冲洗强度等对颤蚓拦截和去除效果的影响。结果表明:砂滤池对颤蚓的拦截效果与颤蚓体长和滤料粒径有关,颤蚓体长越大、滤料粒径越小,则拦截效果越好;滤速是颤蚓迁移的主要动力,滤速的提高会增大颤蚓泄漏风险;过滤周期的延长将促进颤蚓的迁移,适当缩短过滤周期有利于水厂颤蚓泄漏风险控制;反冲洗可以实现颤蚓从净水工艺中的彻底去除,反冲洗强度越大,颤蚓的去除效果越好。从试验结果来看,为有效控制颤蚓泄漏风险,滤池滤速和过滤周期宜分别控制在 11.1 m/h 和 12 h 以下,反冲洗强度则控制在 25 L/(s·m<sup>2</sup>) 左右,此时颤蚓去除率为 97.7%。

**关键词** 颤蚓 砂滤池 拦截 去除

颤蚓是自然水体中一类常见的底栖类寡毛纲动物,在全球淡水水域内广泛分布,由于其耐污能力较强,往往是大多数水体中底栖动物的优势种属<sup>[1,2]</sup>。水体的富营养化使得颤蚓在水库、湖泊类水源水体中大量孳生繁殖<sup>[3]</sup>,进入水厂后,由于其穿透能力较强,可以穿透整个净水工艺进入供水管网<sup>[4,5]</sup>。尽管目前并没有证据表明颤蚓等蠕虫会威胁到公众健康<sup>[6]</sup>,但大多数人常常把这些生物的存在和饮用水不卫生联系起来,引起他们对水质信心的下降。颤蚓等无脊椎动物往往能携带大量的细菌,有研究表明,一个无脊椎动物携带的细菌总数达 10~4 000 个<sup>[7]</sup>。

因此水厂必须采取有效的颤蚓风险控制技术,避免水厂颤蚓及其虫卵的泄漏。滤池作为净水工艺中拦截颤蚓的最后一道屏障,在水厂颤蚓风险控制中起着至关重要的作用,因此有必要进行砂滤池对颤蚓拦截和去除作用的深入研究,并探讨砂滤池操作运行条件对颤蚓拦截和去除的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验在中试系统中完成。中试系统规模为 100~150 L/h,工艺流程为“机械混凝—平流沉淀—石英砂过滤”,流程示意如图 1 所示。各净水单元均为有机玻璃制造,其中过滤单元设两组,每组滤柱均为单层均质石英砂滤柱,内径 90 mm,滤床高度 700 mm。滤料规格为细砂:粒径  $d_{\min} = 0.95$  mm,

国家重大科技专项课题(2009ZX07423-003);教育部创新团队支持项目(IRT0853)。

8 Henderson R K, Parsons S A, Jefferson B. Successful removal of algae through the control of zeta potential. *Separation Science and Technology*, 2008, 43(7): 1653~1666

9 Henderson R K, Parsons S A, Jefferson B. Surfactants as bubble surface modifiers in the flotation of algae: Dissolved air flotation that utilizes a chemically modified bubble surface. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4883~4888

10 黎雷,高乃云,殷娣娣,等.控制饮用原水中藻类、藻毒素的水厂处理. *中国给水排水*, 2008, 24(6): 20~23

11 Lechevallier W, Williamch. Examining relationships between particle counts and giardia, cryptosporidium, and turbidity. *AWWA*, 1992, 84(12): 54~60

○ 通讯处: 200092 上海市四平路 1239 号同济大学环境学院明净楼 209 室 高乃云

电话: (021) 65982691

E-mail: gaonaiyun1@126.com

收稿日期: 2009-08-14

修回日期: 2009-11-12