

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160917

逆向-同向流气浮工艺构建与运行特性

王永磊^{1,2}, 刘宝震^{1,2}, 张克峰^{1,2}, 李梅^{1,2}, 贾瑞宝³, 宋武昌³, 李军⁴

(¹ 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南 250100; ² 山东省绿色建筑协同创新中心, 山东 济南 250100;

³ 山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250021; ⁴ 北京工业大学建筑工程学院北京市水质科学与

水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 针对传统溶气气浮 (DAF) 工艺中气泡对絮体颗粒捕集、黏附效率低, 泡絮体黏附不稳定等问题, 基于泡絮碰撞黏附理论, 研发了集逆向流与同向流于一体的 DAF 工艺 (CCDAF)。该工艺溶气水分两次投加, 接触室分为碰撞接触室和黏附接触室。试验结果表明, CCDAF 工艺显著提高了泡絮黏附效率和泡絮体稳定性, 对浊度、藻类平均去除率达到 96.4%、96.50%, 出水颗粒物以 2~7 μm 粒径为主。工艺主要去除大分子、疏水性有机物, COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 平均去除率分别达到 37.6%、46.3%和 32.11%, CCDAF 比同向流及逆向流 DAF 除污染效能更加显著。泡絮黏附机理分析表明, CCDAF 工艺逆向流碰撞区主导作用机制为碰撞黏附及共聚作用, 同向流接触区为碰撞黏附及网捕、包卷和架桥作用。

关键词: 混凝; 浮选; CCDAF; 吸附; 泡絮碰撞黏附; 溶气气浮

中图分类号: TU 991

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 12—5252—07

Construction and operation characteristics of countercurrent-cocurrent dissolved air flotation

WANG Yonglei^{1,2}, LIU Baozhen^{1,2}, ZHANG Kefeng^{1,2}, LI Mei^{1,2}, JIA Ruibao³, SONG Wuchang³, LI Jun⁴

(¹ College of Environmental and Municipal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, Shandong, China;

² Shandong Province Co-Innovation Center of Green Building, Jinan 250100, Shandong, China;

³ Shandong Province City Water Supply and Drainage Water Quality Monitoring Center, Jinan 250021, Shandong, China;

⁴ Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,

College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Conventional dissolved air flotation (DAF) has the problems of low efficiency for microbubble meshing and particle adhesion, and unstability of the adhesion between microbubbles and particles. In this work, a novel countercurrent-cocurrent dissolved air flotation (CCDAF) was developed, of which the contact room was consisted of collision and adhesion contact room, and each room was introduced dissolved air water. The results showed that the CCDAF significantly enhanced the adhesion efficiency of microbubbles-floc. The average removal efficiency of turbidity and algae were 96.4% and 96.50%, respectively. The diameter of particles for effluent was mainly ranged in 2—7 μm . Most of the removed substance was macromolecules and hydrophobic

2016-07-04 收到初稿, 2016-08-28 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王永磊 (1977—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 山东省科技发展计划项目 (2014GSF120003); 住房和城乡建设部科学技术项目计划项目 (2014-K5-026); 山东省自然科学基金项目 (ZR2016EEM32); 山东建筑大学博士基金项目 (XNBS1511)。

Received date: 2016-07-04.

Corresponding author: Prof. WANG Yonglei, wyl1016@sina.com

Foundation item: supported by the Shandong Province Science and Technology Development Projects (2014GSF120003), Ministry of Housing and Urban-Rural Development Technology Projects (2014-K5-026), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2016EEM32) the Doctoral Fund of Shandong Jianzhu University in 2015 (XNBS1511).

organic compounds. COD_{Mn} , UV_{254} , DOC had achieved 37.6%, 46.3% and 32.11%, respectively, indicating the significantly higher removal efficiency of CCDAF than the traditional DAF. The analysis of the removal mechanism between microbubbles and particles showed that the collision, adhesion and copolymerization in countercurrent room and collision, adhesion, wrapped, meshing and adsorption-bridging in cocurrent-contact room were probably the reasons to enhance the removal efficiency of this CCDAF.

Key words: coagulation; flotation; CCDAF; adsorption; microbubbles-floc collision and adhesion; DAF process

引 言

在给水处理领域, 溶气气浮工艺 (dissolved air flotation, DAF) 已广泛应用于高藻、微污染水及低温低浊水的处理^[1-3]。气浮接触区是微气泡与絮体颗粒混合、碰撞、黏附的主要场所, 其运行效果好坏直接影响着气浮净水效果的优劣^[4-6]。传统 DAF 工艺中加压溶气水的实际消耗量远远高于根据水中固体颗粒浓度确定的加压溶气水的理论消耗量^[7-8]。因此, 传统 DAF 工艺在接触室构造、水流特征、泡絮黏附方式等方面还有很大的优化空间, 提高泡絮黏附效率^[9-11]。根据溶气水与原水流向和接触方式, DAF 工艺分为同向流 DAF 工艺和逆向流 DAF 工艺 (图 1、图 2)。工程上所称的平流式 DAF 工艺, 实质上为同向流 DAF 工艺, 单设一级接触室, 微气泡与原水同向流动, 气泡与絮体接触机会少, 气泡附着效果不理想^[12]。为了提高气泡与颗粒黏附效率, 近年来发展了逆向流 DAF 工艺, 微气泡与原水逆向流动, 泡絮碰撞接触充分, 微气泡层起到过滤作用, 但逆流气浮存在抗冲击负荷低、泡絮体黏附效率低、出水不稳定、池体较深等缺点^[13-14]。为了解决 DAF 工艺对颗粒黏附效率较低、捕集效果不理想、泡絮体黏附不稳定等问题, 基于微气泡与絮体颗粒碰撞黏附机理, 对 DAF 工艺接触室进行改进, 结合同向流与逆向流 DAF 工艺优点, 研发了集逆

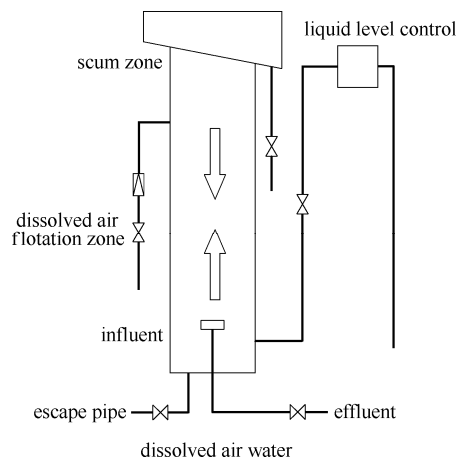


图 2 逆向流 DAF 工艺

Fig.2 Countercurrent DAF process

向流与同向流于一体的 DAF 工艺 (countercurrent-cocurrent dissolved air flotation, CCDAF), 并对 CCDAF 工艺参数优化和运行特性进行研究, 为 CCDAF 工艺的推广应用提供技术支持。

1 CCDAF 工艺构建及试验方法

1.1 CCDAF 工艺构建

不论是同向流 DAF 工艺还是逆向流 DAF 工艺, 微气泡与絮体颗粒在水中黏附过程及黏附结合机理主要遵循碰撞黏附机理^[6], 气泡与絮体颗粒之间的碰撞黏附过程分解为碰撞、黏附两个子过程^[15]。针对同向流及逆向流 DAF 工艺的优缺点, 集逆流碰撞与同向流黏附工艺于一体而提出一种新型气浮工艺——CCDAF 工艺 (图 3)。

CCDAF 工艺气浮池包括逆流碰撞接触室、同向流黏附接触室、气浮分离室。与传统 DAF 工艺不同之处在于: 气浮接触室分为两级, 分别为碰撞接触室和黏附接触室, 微气泡与原水分别发生逆流碰撞和同向流碰撞, 溶气水分两次投加。

CCDAF 的工艺运行过程如下: 原水经过微絮凝反应后, 首先进入碰撞接触室, 在碰撞接触室, 微气泡与原水逆向流动, 完成了微气泡与悬浮物的充分碰撞, 由于絮凝过程为微絮凝方式, 因此在气

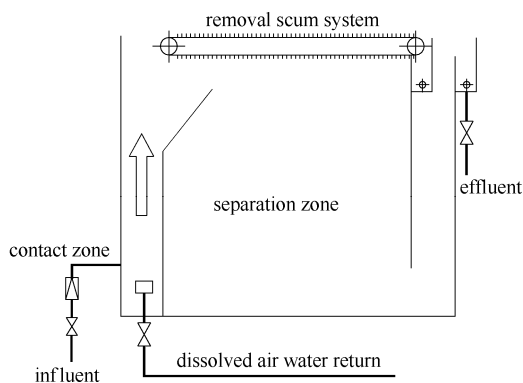


图 1 同向流 DAF 工艺

Fig.1 Cocurrent DAF process

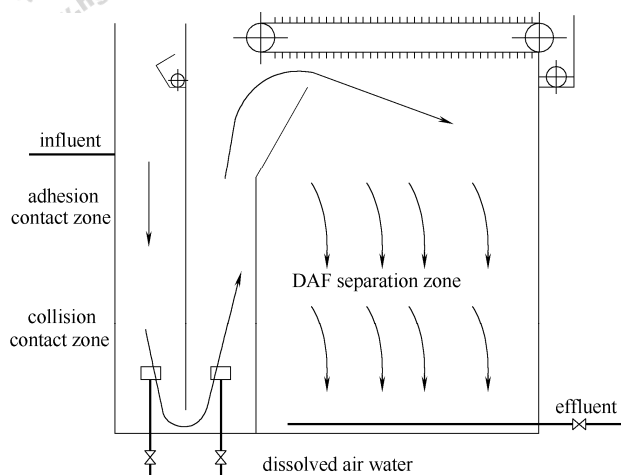


图3 CCDAF 气浮池示意图

Fig.3 Sketch map of CCDAF tank

浮池内絮体继续进行凝聚,微气泡参与凝聚过程而和絮粒共聚并大,从而产生共聚作用,形成泡絮共聚体,上浮的少量浮渣通过接触室溢流口排走。泡絮共聚体进入黏附接触室,在黏附接触室,微气泡与原水同向流动接触,完成有效黏附过程,形成密度小于水的泡絮体上浮进入气浮分离室,浮渣由机械排渣系统收集。原水顺次流经碰撞接触室和黏附接触室,延长了微气泡与悬浮物的碰撞黏附时间,显著提高了微气泡-颗粒的相互作用,强化了微气泡的黏附能力,增强了泡絮体的稳定性,使微气泡-颗粒碰撞效率显著增强,对原水水质变化的适应能力显著增强。

CCDAF 工艺可以根据原水水质的变化,通过选择开启不同释放器,实现同向流气浮池、逆向流气浮池和 CCDAF 工艺气浮池的灵活切换,具有应对水质变化适应性强、结构简单、效率高、运行方便等优点,便于传统絮凝/气浮池的改造与新型气浮池的新建,应用前景广阔。

1.2 试验装置

试验装置(图4)为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 混凝系统采用混合、二级絮凝,分设一级絮凝池和二级絮凝池。CCDAF 气浮池长宽高为 $0.83 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 1.45 \text{ m}$, 接触室 HRT 为 2 min, 碰撞接触室和黏附接触室水流速分别为 $15 \sim 25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $5 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。混凝絮凝剂为 PAFC, 投药量 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 絮凝采用二级絮凝,絮凝时间均为 4 min, $G_1=52 \text{ s}^{-1}$, $G_2=25 \text{ s}^{-1}$, 回流比 12%, R_1/R_2 取值 1/2。

1.3 原水水质

原水取自南水北调山东受水区济宁段京杭运河,原水水质见表1。

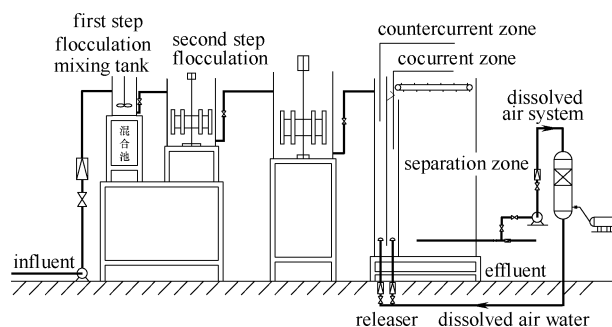


图4 CCDAF 工艺组合装置

Fig.4 Experimental apparatus of CCDAF process

表1 原水水质

Table 1 Raw water quality

Item	Index
pH	8.08—8.24
turbidity/NTU	13.3—25.2
DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.95—7.78
particulate matter/CNT $\cdot \text{mL}^{-1}$	85058—96736
COD _{Mn} / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5.65—7.26
UV ₂₅₄ / cm^{-1}	0.145—0.152
NH ₃ -N/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.352—0.458
algae $\times 10^{-7}/\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	2.35—6.75

1.4 分析方法

藻细胞计数采用显微镜镜检计数法,有机物相对分子量分布采用杯式超滤法,颗粒计数利用颗粒计数仪(杭州绿洁 GREAN IBR Versa Count)测定,试验其他指标检测均采用《水和废水检测分析方法》(第四版增补版)。

2 试验结果及讨论

2.1 浊度及颗粒物去除效能

原水浊度成分主要有细小黏土、有机物、浮游生物等悬浮物和胶体物等。气浮前凝聚预处理投加 PAFC,使水中细小悬浮物或胶体微粒互相吸附、脱稳结合而成较大絮体,经过泡絮黏附而上浮去除^[16-18]。CCDAF 工艺对浊度去除一直相当稳定(图5),气浮出水浊度在 $0.48 \sim 1.23 \text{ NTU}$ 之间,平均为 0.726 NTU ,平均去除率达到 96.4%。由于 CCDAF 混凝前处理采用微絮凝,产生絮体尺寸相对较小,溶气水分级回流,微气泡直接参与絮体混凝过程,微气泡和絮粒共聚并大,增强了凝聚过程和泡絮体的稳定性。

为了考察 CCDAF 工艺对不同粒径颗粒物去除特征,试验设计不同水源水质下,分别考察出水中

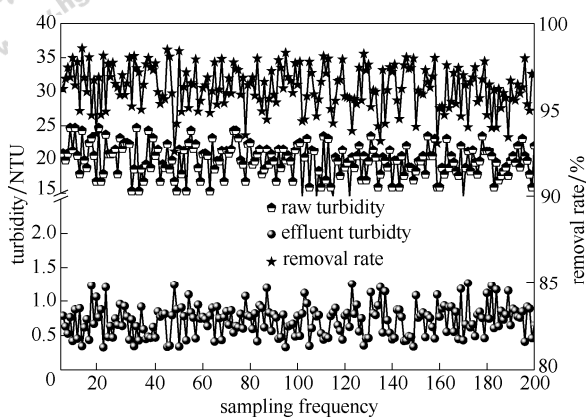


图 5 CCDAF 除浊效能

Fig.5 Turbidity removal efficiency of CCDAF

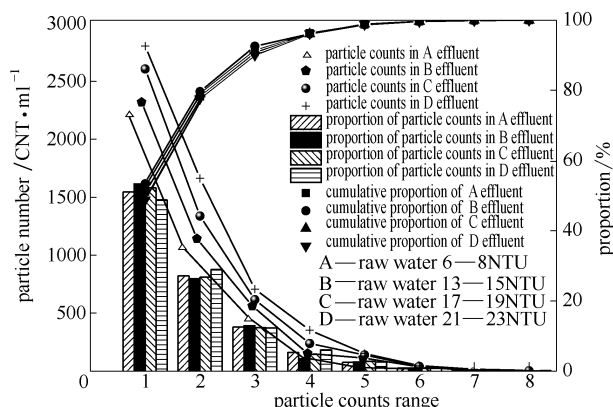


图 6 CCDAF 工艺出水颗粒数特征

Fig.6 Particle counts feature of CCDAF process in effluent

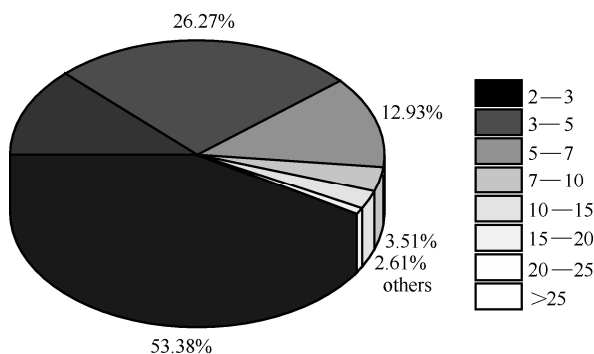


图 7 CCDAF 工艺出水颗粒数分布情况

Fig.7 Particle number distribution of CCDAF process in effluent

颗粒数分布。由图 6、图 7 可知, 气浮出水颗粒物主要以 2~7 μm 颗粒粒径为主, 占总颗粒数的 90% 以上, 气浮出水平均颗粒数为 4323 $\text{CNT} \cdot \text{ml}^{-1}$ 左右。气浮出水颗粒物粒径分布表明, 气浮出水中小粒径颗粒数量占较大比例, 这与原水中颗粒物成分有较大关系, 由于原水为运河中上层水源, 原水中颗粒物大部分为悬浮或胶体态的细小黏土、有机物及藻类等, 不含较大泥砂成分。

2.2 有机物的去除效能

CCDAF 工艺出水 COD_{Mn} 在 3.37~4.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, UV_{254} 在 0.0751~0.0806 cm^{-1} , DOC 在 4.21~4.82 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 的平均去除率分别为 37.6%、46.3% 和 32.4% (图 8)。CCDAF 工艺对有机物去除效果: $\text{UV}_{254} > \text{COD}_{\text{Mn}} > \text{DOC}$, 原因为 UV_{254} 代表含苯环或共轭双键的芳香类或者是烃类有机物, 为大分子、疏水性有机物, 在混凝气浮过程中, 部分大分子芳香族难降解有机化合物更容易黏附在颗粒、絮体、气泡表面。另外, 对于被胶体颗粒黏附包裹的大分子有机物也可以在混凝阶段脱稳凝聚、聚合, 吸附在矾花表面, 最终在微气泡的黏附作用下去除^[19-20], 因此去除效果较好。 COD_{Mn} 反映的有机物包括悬浮态、胶体态和溶解态有机物^[21], 气浮工艺的去除对象主要是悬浮、胶态物质, 因此悬浮态和胶体态有机物随之去除, 而对小分子有机物去除有限^[22]。DOC 代表溶解性有机物, 不利于被微气泡所黏附, 因而去除率相对较低^[23]。

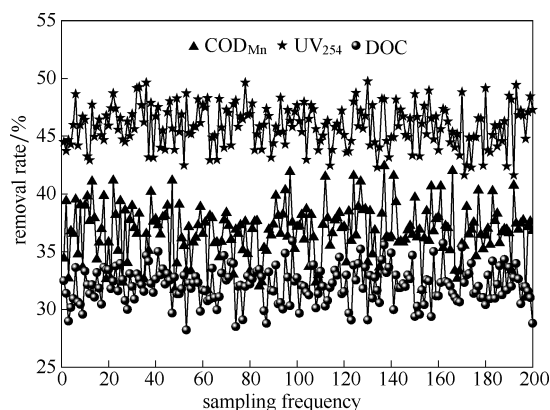


图 8 CCDAF 工艺对有机物去除效能

Fig.8 Organic matter removal rate of CCDAF process

CCDAF 对有机物去除率较高的原因可能与原水有机物成分及特征有关, 为进一步探析其去除有机物特征, 试验分析了进水中有机物分子量分布(图 9), 原水中分子量 $3 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 的有机物约占 50%, 分子量大于 3×10^3 的有机物约占 70%, 可见原水有机物分子量较大, 且组分较高, 由此导致 CCDAF 对有机物去除率较高。由图 10 可以看出, CCDAF 工艺对于分子量大于 3×10^3 的有机物具有较好的去除效果, 其平均去除率达到 35.4%, 其中大于 30×10^3 的有机物去除率达到 72.1%, 对于分子量小于 1×10^3 的有机物, 基本没有去除效果, 去除率不到 10%, 且 CCDAF 工艺出水较原水小分子

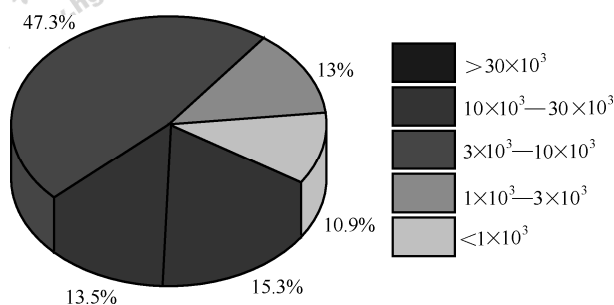


图 9 原水中不同分子量有机物分布

Fig.9 Organics molecular mass distribution in raw water

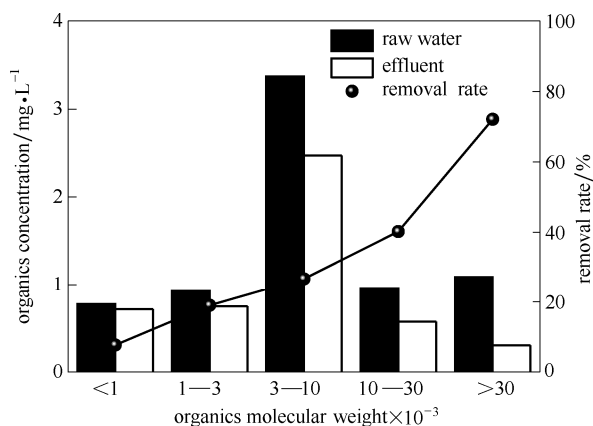


图 10 CCDAF 工艺对不同分子量有机物去除特性

Fig.10 Organics removal characteristics of CCDAF process

有机物具有增多趋势。

2.3 除藻效能

试验期间原水藻计数为 $(2350 \sim 6750) \times 10^4$ cells $\cdot$ L $^{-1}$, 气浮出水藻计数为 $(83 \sim 210) \times 10^4$ cells $\cdot$ L $^{-1}$, 平均去除率为 96.50% (图 11)。铜绿微囊藻细胞的平均粒径为 $3.29 \mu\text{m}$ ^[24]。微气泡粒径在 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间, 由于藻带负电荷、细胞膜外存在强烈附着的水层, 混凝后减弱带电性和水化层, 形成带正电的藻絮体^[25], 通常微气泡表面带负电, 表面

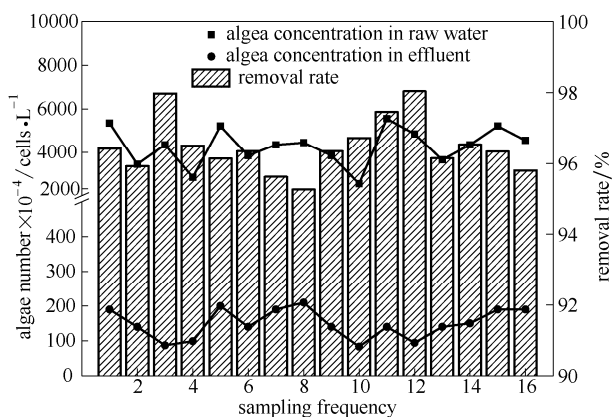


图 11 CCDAF 工艺对藻类的去除效能

Fig.11 Algae removal rate of CCDAF process

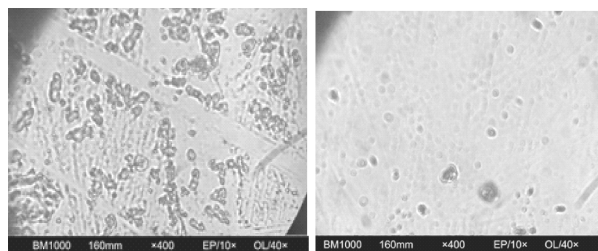


图 12 CCDAF 前后藻数量变化

Fig.12 Changes in number of algae before (a) and after (b) CCDAF process

电位为 $-30 \sim -50$ mV, 吸附水体中带正电的物质^[26]。经泡絮体碰撞共聚、同向流、逆向流接触后, 藻附着在气泡或絮体上, 共聚并大达到较高的除藻率。从图 12 中可以看出, CCDAF 后藻数量明显减少。

2.4 CCDAF 与同向及逆向流 DAF 效能对比

为了考察对比 CCDAF 与同向及逆向流 DAF 工艺的除污染效能, 利用 CCDAF 组合装置 (图 4), 在总溶气水量不变的情况下, 调节回流比, R_1/R_2 为 $1/2$ 时, 运行 CCDAF 工艺。 R_1 关闭时运行同向流 DAF 工艺, R_2 关闭时运行逆流 DAF 工艺。

由图 13 可知, CCDAF 工艺相比同向流及逆向流 DAF 工艺具有更好的除污染效能, 在除浊方面, CCDAF 工艺较同向流、逆向流 DAF 工艺去除率分别提高 5.0%、8.8%。对有机物去除规律, 与对浊度基本一致, CCDAF 效果最好, 同向流次之, 逆向流最差。由图 14 可知, 对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 3 个指标, CCDAF 较同向流 DAF 分别提高 4.1%、5.0%、0.58%, 较逆向流 DAF 分别提高 6.4%、8.1%、2.58%。

近几年关于气浮工艺处理微污染水源的研究中, 贾伟建等^[27]利用混凝-气浮工艺处理低浊高藻水

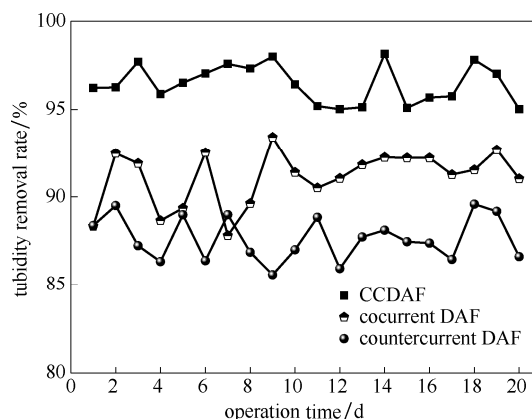
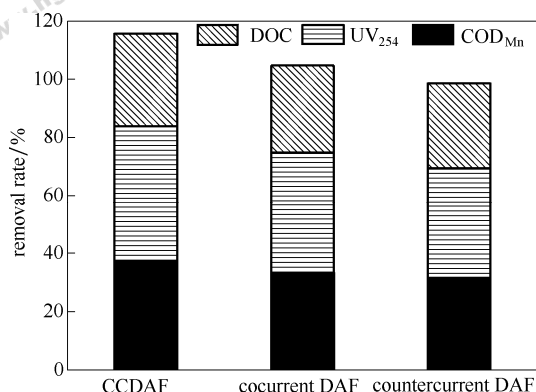


图 13 3 种工艺去除浊度对比

Fig.13 Turbidity removal comparison of three processes

图 14 3 种 DAF 工艺去除 COD_{Mn}、UV₂₅₄、DOC 对比Fig.14 Removal comparison of COD_{Mn}, UV₂₅₄ and DOC for three processes

库水, 原水浊度为 13~22NTU, 对藻类和浊度的去除率仅为 93.7%和 95.6%。相比之下 CCDAF 工艺的处理效果分别提高了 2.8%和 0.8%。刘善培^[28]、王启山等^[29]在强化混凝气浮工艺处理污染原水的研究中, 原水浊度为 5.62~5.74NTU, 气浮工艺对浊度去除率仅为 90.1%, 可以看出 CCDAF 工艺明显优于传统气浮工艺, 净水效果显著。

2.5 机理分析

传统 DAF 净水机理为原水经混凝预处理之后与通入的微气泡进行碰撞黏附, 气泡与絮粒主要发生碰撞黏附、网捕、包卷和架桥作用^[30]。CCDAF 工艺与传统气浮净水工艺不同, 由于溶气水分两次回流, 初级絮凝时间短, 微气泡直接参与絮体混凝过程, 微气泡和絮粒共聚并大, 共聚作用产生的絮体气泡夹在絮粒中间, 如图 15 所示, 微气泡发挥了凝聚作用, 使微气泡牢固地镶嵌在絮体内部, 泡絮体在上浮的过程中不易脱附, 浮渣稳定且不易下沉。在溶气水初次回流过程中, 微气泡与颗粒黏附主要机理为微气泡与絮体的碰撞黏附和共聚黏附作用, 在第二次通入溶气水后, 净水机理主要为微气泡与絮体颗粒的碰撞黏附, 以及微气泡-泡絮体-颗粒物之间的网捕、架桥和包卷作用。

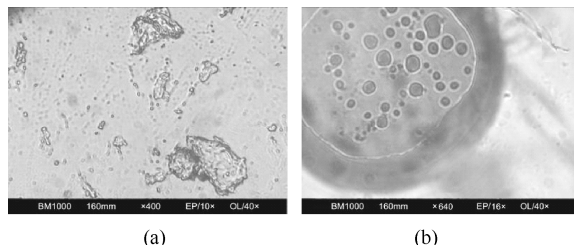


图 15 共聚泡絮体的显微镜观察

Fig.15 Microscope observation of bubble-flocs copolymerization

(a) microstructure of bubble-flocs; (b) copolymerization bubble-flocs

3 结 论

(1) 针对传统 DAF 工艺对颗粒黏附效率较低、捕集效果不理想、泡絮体黏附不稳定等问题, 研发了集逆向流与同向流于一体的气浮工艺 (CCDAF), 显著提高了泡絮体黏附效率和泡絮体稳定性; CCDAF 工艺与传统 DAF 工艺不同之处在于: 气浮接触室分为两级, 分别为碰撞接触室和黏附接触室, 溶气水分两次投加。

(2) CCDAF 工艺对浊度、藻类平均去除率为 96.4%、96.50%, 出水颗粒物以 2~7μm 颗粒粒径为主。工艺主要去除大分子、疏水性有机物, 对 COD_{Mn}、UV₂₅₄、DOC 平均去除率分别达到 37.6%、46.3%和 32.11%。

(3) CCDAF 比同向流及逆向流 DAF 除污染效能更加显著。对于浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄、DOC 指标, CCDAF 较同向流 DAF 分别提高 5.0%、4.1%、5.0%、0.58%, 较逆向流 DAF 分别提高 8.8%、6.4%、8.1%、2.58%。

(4) CCDAF 工艺泡絮体黏附主导作用机制: 逆向流碰撞区为碰撞黏附及共聚作用, 同向流接触区为碰撞黏附及网捕、包卷和架桥作用。

References

- [1] ZHANG X, HEWSON J C, AMENDOLA P, *et al.* Critical evaluation and modeling of algal harvesting using dissolved air flotation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, **111** (12): 2477-2485.
- [2] ZHU I X, BATES B J, ANDERSON D M. Removal of *Prorocentrum* minimum from seawater using dissolved air flotation [J]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2014, **2** (1): 47-56.
- [3] 胡辉. 低温低浊黄河水强化混凝研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [4] HU H. Enhanced coagulation of Yellow River water at low temperature and turbidity [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [5] YANG R Q, WANG H F, LIU J C. Jet flotation column system structure design and numerical simulation of two-phase flow [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **616**: 655-661.
- [6] AHMAD K D. Flotation of chalcopyrite fine particles in the presence of hydrodynamic cavitation nanobubbles [J]. *Nashrieh Shimi Va Mohandesi Shimi Iran*, 2014, **32** (4): 81-91.
- [7] YU H W, QI S W, SHENG G Z, *et al.* Improvement of operational mode of counter-current dissolved air flotation process [C]//Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 838-841.
- [8] FIROUZIM, NGUYEN A V, HASHEMABADI S H. The effect of microhydrodynamics on bubble-particle collision interaction [J]. *Minerals Engineering*, 2011, **24** (9): 973-986.
- [9] KIM M S, KWAK D H. Evaluation of initial collision-attachment efficiency between carbon dioxide bubbles and algae particles for separation and harvesting [J]. *Water Science & Technology*, 2014, **69** (12): 2482-2491.

- [9] 桑义敏, 陈家庆, 韩严和, 等. 气浮工艺中气泡-颗粒碰撞效率和理论计算模型研究 [J]. 工业水处理, 2014, **34** (2): 5-10.
SANG Y M, CHEN J Q, HAN Y H, *et al.* Bubble-particle collision efficiency in flotation and its theoretical model [J]. Industrial Water Treatment, 2014, **34** (2): 5-10.
- [10] LAKGHOMI B, LAWRYSHYN Y, HOFMANN R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: importance of stratified flow and bubble size [J]. Water Research, 2015, **68**: 262-272.
- [11] EDZWALD J K. Dissolved air flotation and me [J]. Water Research, 2010, **44** (7): 2077-2106.
- [12] RAEI M, MARCETTO M. High-rate dissolved air flotation for water treatment [J]. Water Science & Technology, 2001, **43** (8): 43-49.
- [13] 郭瑾珑, 王毅力. 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.
GUO J L, WANG Y L. Countercurrent co-flocculation flotation-new water treatment method [J]. China Water & Wastewater, 2002, **18** (7): 12-16.
- [14] GUO J, WANG Y, LI D, *et al.* Counterflow co-flocculation flotation for water purification [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2003, **38** (5): 923-934.
- [15] ZHANG H, LIU J, CAO Y, *et al.* Effects of particle size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride [J]. Powder Technology, 2013, **246**: 658-663.
- [16] LI Y, ZHAO W, GUI X, *et al.* Flotation kinetics and separation selectivity of coal size fractions [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2013, **49** (2): 387-395.
- [17] 贾瑞宝, 孙韶华, 宋武昌, 等. 受污染引黄水库水净化技术研究与工艺优化 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 41-151.
JIA R B, SUN S H, SONG W C, *et al.* Purification Technology and Optimization of Polluted Yellow River Reservoir Water [M]. Beijing: China Architecture and Technology Press, 2015: 41-151.
- [18] KHIADANI M, KOLIVAND R, AHOOGHALANDARI M, *et al.* Removal of turbidity from water by dissolved air flotation and conventional sedimentation systems using poly aluminum chloride as coagulant [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, **52** (4/5/6): 985-989.
- [19] 徐江宁. 微泡气浮对水处理的作用机理和实验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
XU J N. Mechanism of micro-bubble air flotation in water treatment process and flotation experiment [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [20] 刘晓聪, 邓慧萍, 潘若平, 等. 混凝/PAC/超滤工艺去除水中天然有机物的研究 [J]. 中国给水排水, 2012, **28** (9): 59-61.
LIU X C, DENG H P, PAN R P, *et al.* Removal of natural organic matter in water by coagulation/PAC/ultrafiltration process [J]. China Water & Wastewater, 2012, **28** (9): 59-61.
- [21] SANTO C E, VILAR V J P, BOTELHO C M S, *et al.* Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **183**: 117-123.
- [22] VIZCARRA T G, HARMER S L, WIGHTMAN E M, *et al.* The influence of particle shape properties and associated surface chemistry on the flotation kinetics of chalcopyrite [J]. Minerals Engineering, 2011, **24** (8): 807-816.
- [23] THORNTON A J. The application and future development of adaptive control to the froth flotation process [J]. Tetrahedron, 2015, **67** (42): 8195-8203.
- [24] 方晶云. 蓝藻细胞及藻类有机物在氯化消毒中副产物的形成机理与控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
FANG J Y. Cyanobacteria algae cells and the formation mechanism of the organic matter in the chlorination by-products and control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [25] 张声, 刘洋, 张晓健, 等. 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池处理高藻水源水的研究 [J]. 环境科学, 2004, **25** (5): 52-56.
ZHANG S, LIU Y, ZHANG X J, *et al.* Treating of algae-laden raw water with GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2004, **25** (5): 52-56.
- [26] 刘善培, 王启山, 何文杰, 等. 混凝/气浮与混凝/沉淀工艺处理微污染原水的对比 [J]. 中国给水排水, 2007, **23** (9): 89-91.
LIU S P, WANG Q S, HE W J, *et al.* Comparison between coagulation/DAF and coagulation/sedimentation processes for treatment of micropolluted raw water [J]. China Water & Wastewater, 2007, **23** (9): 89-91.
- [27] 贾伟建, 张克峰, 王永磊, 等. 混凝-气浮处理低浊高藻水库水的试验研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2015, (1): 41-46.
JIA W J, ZHANG K F, WANG Y L, *et al.* Study on the treatment of low turbidity and high algal reservoir water by coagulation-floitation process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, (1): 41-46.
- [28] 刘善培. 强化混凝气浮工艺处理微污染原水的中试研究 [D]. 天津: 南开大学, 2007.
LIU S P. Pilot test of enhanced coagulation-dissolved air flotation treating micro-polluted source water [D]. Tianjin: Nankai University, 2007.
- [29] 吴玉宝, 王启山, 王玉恒, 等. 混凝-气浮除藻工艺中各参数的优化 [J]. 中国给水排水, 2008, **24** (3): 95-99.
WU Y B, WANG Q S, WANG Y H, *et al.* Optimization of parameters in coagulation/flotation process for algae removal [J]. China Water & Wastewater, 2008, **24** (3): 95-99.
- [30] EDZWALD J, HAARHOF J. Dissolved Air Flotation for Water Clarification [M]. McGraw Hill Professional, 2011.