

# 逆向-同向流气浮工艺的数值模拟与优化

林清丽<sup>1</sup>, 王永磊<sup>2</sup>, 王萌萌<sup>3</sup>

(1. 山东职业学院 城市轨道交通系, 山东 济南 250104; 2. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 3. 中国城市建设研究院有限公司 山东分院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 逆向-同向流气浮(CCDAF)工艺是集逆流碰撞与同向流粘附于一体的新型气浮工艺,其构造形式、几何尺寸和工艺参数是实现逆流碰撞、同向流粘附的必要条件。为此,建立了8个CCDAF池模型,流量均为 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,利用Fluent软件对CCDAF池流场进行数值模拟及工艺优化。模拟结果表明,在接触室上升流速为 $10\text{ mm/s}$ 、分离室分离速度为 $1.5\text{ mm/s}$ 、溶气压力为 $0.45\text{ MPa}$ 、回流溶气水分配比 $R_1:R_2$ 为 $1:1$ 左右的条件下,CCDAF池内流态最佳,接触室内气体分布均匀,分离室内气相呈阶梯式均匀分布,无明显扰动回流,气相分布合理。根据模拟结果建立 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 的中试装置,试验结果表明,CCDAF的除污效果显著,明显优于同向流及逆向流气浮工艺。

**关键词:** 气浮; 逆流; 同向流; 流场模拟; 工艺优化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0028-07

## Numerical Simulation and Optimization of Countercurrent-cocurrent Dissolved Air Flotation Process

LIN Qing-li<sup>1</sup>, WANG Yong-lei<sup>2</sup>, WANG Meng-meng<sup>3</sup>

(1. Department of Urban Rail Transit, Shandong Polytechnic, Jinan 250104, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. Shandong Branch, China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** Countercurrent-cocurrent dissolved air flotation (CCDAF) process is a new dissolved air flotation (DAF) process which integrates countercurrent collision and cocurrent adhesion, and the structure, geometric size and process parameters are the necessary conditions for realizing countercurrent collision and cocurrent adhesion. Eight CCDAF models were established with flow rate of  $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ , the flow field of CCDAF tank was numerically simulated and the process was optimized by Fluent software. The flow pattern of the CCDAF tank was the best, when the upflow velocity of the contact chamber was  $10\text{ mm/s}$ , the separation velocity of the separation chamber was  $1.5\text{ mm/s}$ , the dissolved pressure was  $0.45\text{ MPa}$ , and the distribution ratio of reflux dissolved air water ( $R_1:R_2$ ) was about  $1:1$ . The gas distribution in the contact chamber was uniform, and the gas phase in the separation chamber was stepped uniformly distributed without obvious disturbance reflux, indicating that the gas phase distribution was reasonable. According to the simulation results, a pilot plant of  $0.5\text{ m}^3/\text{h}$  was built. Pilot test results

showed that CCDAF had good pollutants removal performance and was obviously better than the cocurrent flow and countercurrent flow DAF processes.

**Key words:** dissolved air flotation; countercurrent flow; cocurrent flow; flow field simulation; process optimization

在给水处理领域,溶气气浮工艺(DAF)已被广泛用于微污染水及低温低浊水的处理<sup>[1-2]</sup>。气浮接触区是微气泡与絮体颗粒混合、碰撞、粘附的主要场所,其运行效果直接影响气浮净水效果<sup>[3-4]</sup>。传统的平流式 DAF 工艺,实质上为同向流 DAF 工艺,微气泡与原水流向相同,气泡与絮体接触较少,气泡附着效果不理想<sup>[5]</sup>。为了提高气泡与颗粒之间的粘附效率,近年来发展了逆向流 DAF 工艺,微气泡与原水反向流动,气泡和絮体充分碰撞,但逆向流气浮也存在一些缺点,比如抗冲击负荷低、泡絮体粘附效率低、出水水质不稳定、池体较深等<sup>[6-7]</sup>。针对 DAF 工艺存在的以上问题,王永磊等人<sup>[8-9]</sup>结合同向流与逆向流 DAF 工艺的优点,研发了一种逆向-同向流气浮(CCDAF)工艺,在该工艺中,原水顺次流经碰撞接触室和粘附接触室,强化了微气泡的粘附能力,增强了泡絮体的稳定性。

逆向-同向流气浮池的构造形式、几何尺寸和工艺参数是实现逆向流碰撞、同向流粘附的必要条件,为此,笔者在前期研究的基础上,利用计算流体力学(CFD)模拟技术对 CCDAF 池流场进行数值模拟,从水力学角度优化 CCDAF 池的几何尺寸及工艺参数,旨在为 CCDAF 工艺的工程应用提供数据支持与技术参考。

## 1 CCDAF 工艺模型构建及数值模拟方法

### 1.1 CCDAF 工艺模型构建

逆向-同向流气浮池如图 1 所示,主要包括 3 部分:逆向流碰撞接触室、同向流粘附接触室和气浮分离室。与传统 DAF 工艺的不同之处在于:气浮接触室分为碰撞接触室和粘附接触室两个阶段;溶气水分两次投加。在碰撞接触室中,微气泡与原水发生逆向流动,实现了微气泡与悬浮物的完全碰撞,与絮体凝聚并大,然后随出水进入粘附接触室;在粘附接触室中,微气泡与原水同向流动并相互接触,碰撞接触室的部分微气泡随水流进入粘附接触室,这增大了粘附接触室的微气泡浓度,增强了微气泡与悬浮物的粘附效果,形成了稳定的泡絮体并上浮至气浮分离室。

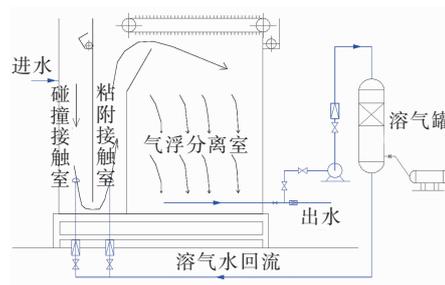


图 1 逆向-同向流气浮工艺示意

Fig. 1 Schematics of counter-current-cocurrent dissolved air flotation process

为了方便对 CCDAF 工艺进行 CFD 数值模拟,对 CCDAF 池边界条件和池体进行了简化,原水从进水口 1 进入接触室 1,回流溶气水分别通过进水口 2 和进水口 3 回流至接触室 1 和 2,接触室 1 和 2 的回流比分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 。CCDAF 池简图及模型如图 2 所示。

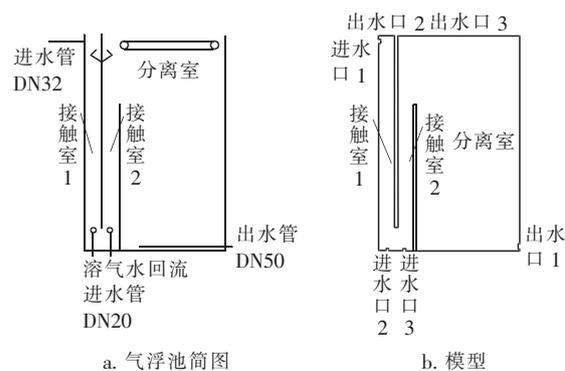


图 2 CCDAF 池简图及模型

Fig. 2 Simplified diagram of CCDAF tank and its model

### 1.2 数值模拟方法

首先利用前处理软件 ICEM CFD 14.5 建立结构化网格,然后定义模型,之后利用计算软件 Fluent 14.5 进行迭代计算及后处理。计算收敛后,输出气相流迹图、气相体积分布云图,采用 Mixture 模型研究气浮池内的微气泡流态,进行流态分析。

本研究建立了 8 个 CCDAF 工艺模型,模型流量为  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,接触室上升流速取  $10 \sim 25 \text{ mm/s}$ ,分离室分离速度取  $1.5 \sim 2.5 \text{ mm/s}$ ,溶气水总回流比取 10%。模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab.1 Parameters of model

模型编号	接触室上升流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	分离室分离速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	尺寸(长×高)/(m×m)	网格数/个
1	10	1.5	1.30×1.35	69 392
2	10	2.0	1.05×1.80	74 432
3	15	2.0	1.43×1.80	101 432
4	20	2.0	1.80×1.80	128 432
5	10	2.5	0.90×2.25	79 472
6	15	2.5	1.20×2.25	106 784
7	20	2.5	1.50×2.25	133 472
8	25	2.5	1.80×2.25	160 534

1.3 检测项目及方法

浊度、COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub>、DOC 等指标均遵照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定。

2 CCDAF 池流场模拟与优化

2.1 几何尺寸优化

① 气相流轨迹图分析

气相流轨迹图显示的是溶气水中气体的流动轨迹。在溶气压力为 0.45 MPa、溶气水总回流比为 10%、R<sub>1</sub>:R<sub>2</sub> 为 1:1 的条件下,CCDAF 工艺的气相流轨迹图如图 3 所示。可以看出,微气泡质点依次经过逆向流碰撞区、同向流接触区及气浮分离区,模型质点轨迹基本一致。气浮池内水流状态整体良好,接触区的流速较大,而分离区的流速明显减小,流态平稳。气浮池内形成了有助于泡絮碰撞粘附和泡絮体上浮去除的良好环境,池体的长高比对质点运动产生了较大影响。

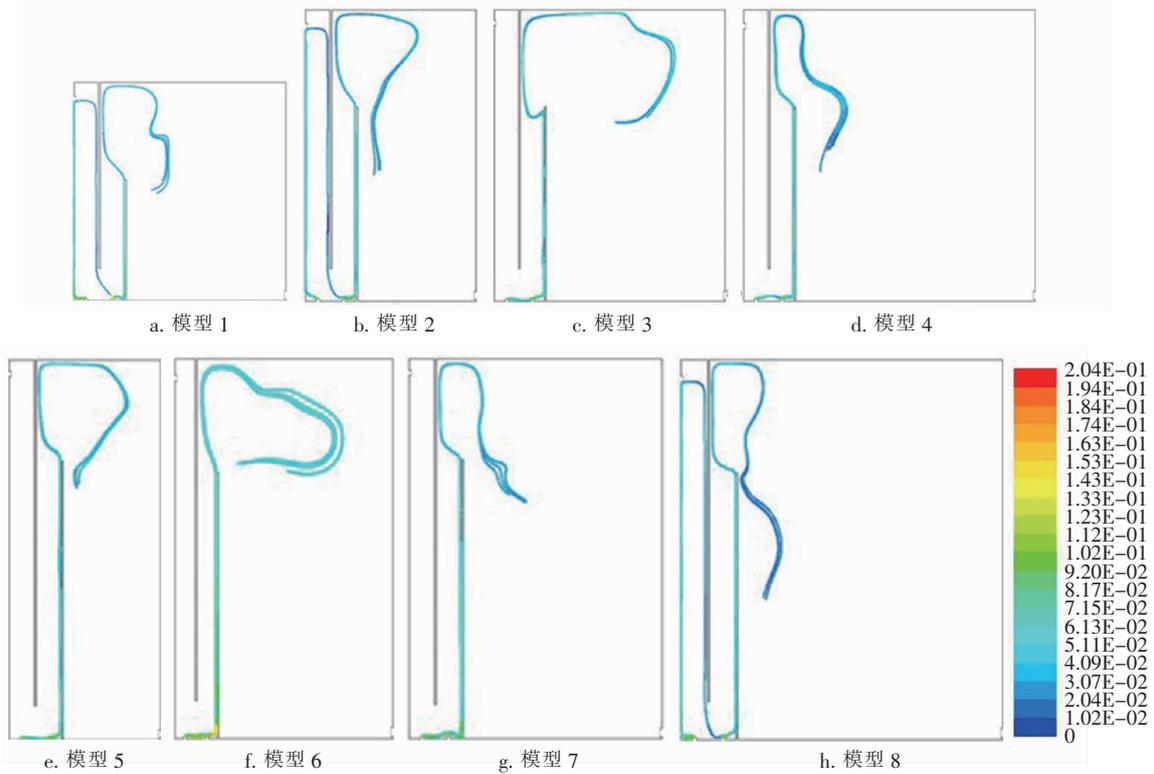


图 3 CCDAF 池各模型的气相流轨迹图

Fig.3 Gas phase flow trajectory diagram of each model of CCDAF tank

模型 3、4、5、6、7 中由进水口 2 进入的溶气水大部分受水流影响而进入接触室 2,进入接触室 1 的气体量相对较少,这导致接触室 1 内气相流不明显,微气泡与絮体碰撞接触效果相对较弱。而模型 1、2、8 中由进水口 2 进入的溶气水大部分进入接触室 1,其气相流质点轨迹明显,泡絮逆向碰撞接触效果显著,泡絮体经过接触区碰撞接触与粘附接触后,进

入分离区,分离区流态平稳,为泡絮体上浮创造了良好的水力环境,减少了泡絮体破碎、脱附现象。

8 个模型中,接触室 2 右侧挡板处气相流质点流速较快,进入分离室后,气体在下降过程中受水流作用都出现了不同程度的回流现象,且均回流至进水口处。其中模型 5、6、8 的紊流、回旋、漩涡现象明显,这极易对已形成的泡絮体产生扰动,致使泡絮体

破碎从而影响泡絮体的粘附稳定性,对气浮效果不利。分离室内流场的稳定有利于泡絮体稳定粘附且不易发生脱附现象。模型1、2、3中气相流线轨迹平滑,不易产生扰动,有利于泡絮体上浮及去除。

综上分析可知,模型1、2能够实现泡絮体逆向

碰撞、同向粘附以及分离室粘附稳定,是较为适宜的工艺尺寸模型。

## ② 气相体积分布云图分析

气相体积分布云图反映的是气浮池内不同位置的气相体积。各模型的气相体积分布云图见图4。

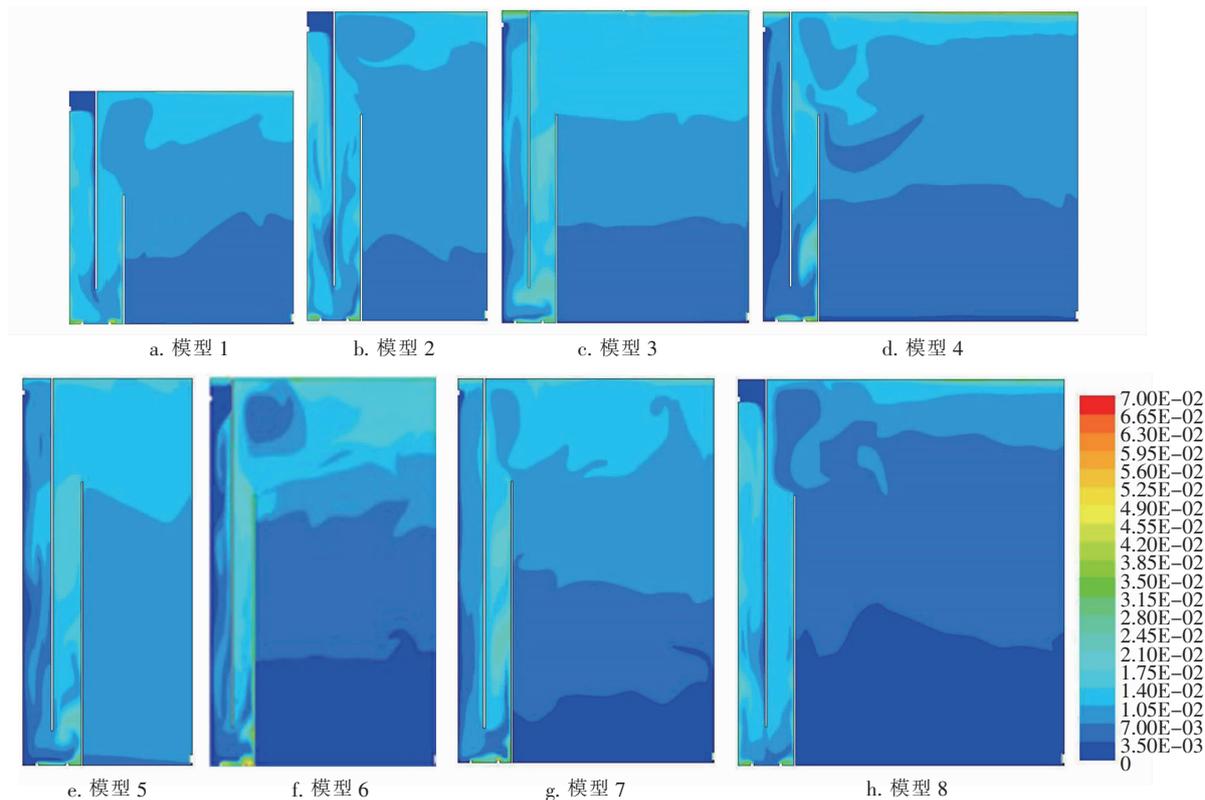


图4 CCDAF池各模型的气相体积分布云图

Fig. 4 Gas phase volume distribution cloud map of each model of CCDAF tank

从图4可以看出,CCDAF池的接触室1、接触室2以及分离室内布满微气泡,接触室的微气泡数量较多,其中接触室2内的气泡数量要高于接触室1,微气泡在分离室的上部聚集,各区域扰动程度及微气泡分布情况受气浮池的几何尺寸及流速大小影响,存在较大差异。

模型1、8中接触室1和2的气相分布较为均匀,流态稳定,无明显干扰回流等不利形态;模型2、3、4、5、6、7中,接触室1和2内气流分布不均匀,扰动较为显著。另外模型3、4、5、6、7中接触室1内气体量相对较少,不利于微气泡与絮体碰撞。在气浮分离室中,模型1、3、5的微气泡分布较为均匀,利于泡絮体在稳定的流态环境中上浮去除,分离室上部气泡数量较多,聚集了厚厚的一层微气泡,微气泡数量从上到下逐渐降低,且沿池深方向逐渐递减,微气

泡层起到较好的过滤作用。而模型2、4、6、7、8均存在不同程度的气相分布不均匀现象,且在分离室入口处存在涡流或湍流现象,形成扰动,易致使已形成的泡絮体发生破碎。

从气相体积分布来看,模型1的接触室内气体分布均匀,流态稳定,分离室内气相呈阶梯式均匀分布,无明显扰动回流,气相分布合理,故模型1为CCDAF工艺设计的推荐模型。

综上,确定模型1为最佳模型,其接触室上升流速为10 mm/s,分离室分离速度为1.5 mm/s,尺寸为 $B \times L \times H = 150 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm} \times 1350 \text{ mm}$ 。

## 2.2 工艺参数优化

### ① 溶气压力优化

溶气压力和回流溶气水分配比是CCDAF工艺的两个重要参数,直接影响工艺的运行效果。以模

型 1 为流场模拟对象,首先优化 CCDAF 工艺的溶气压力,模拟 0.30 ~ 0.50 MPa 压力下的气相流,得到气相体积分布云图如图 5 所示。

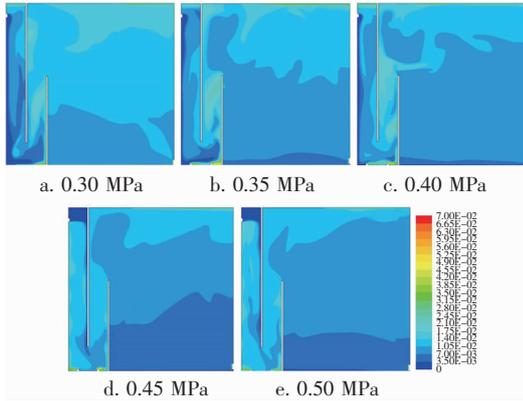


图 5 不同溶气压力下 CCDAF 池的气相体积分布云图  
Fig.5 Gas phase volume distribution cloud map of CCDAF tank under different dissolved air pressures

由图 5 可知,当溶气压力 < 0.45 MPa 时,进水口 2、3 的溶气微气泡大部分在水流作用下流向接触室 2,导致接触室 1 和 2 内的微气泡分布不均匀,尤其是接触室 2 内,气相流扰动较大,造成了微气泡与絮体接触效果不佳,同时气浮分离室的微气泡层分布也极不均匀,不利于泡絮体稳定上浮。当压力达到 0.45 MPa 及以上时,进水口 2 的溶气水在压力作用下沿进水口侧池壁上升进入接触室 1,接触室 1 内充满了均匀微气泡层,达到了泡絮碰撞效果,另外气浮接触室、分离室内的气相分布相对较为均匀,利于微气泡与絮体碰撞粘附以及泡絮体稳定上浮,因此,CCDAF 工艺推荐的溶气压力为 0.45 MPa。

② 回流溶气水分配比( $R_1: R_2$ ) 优化

在溶气压力为 0.45 MPa 的条件下,对模型 1 的回流溶气水分配比进行优化,模拟不同分配比下 CCDAF 池的气相流态,气相体积分布云图见图 6。

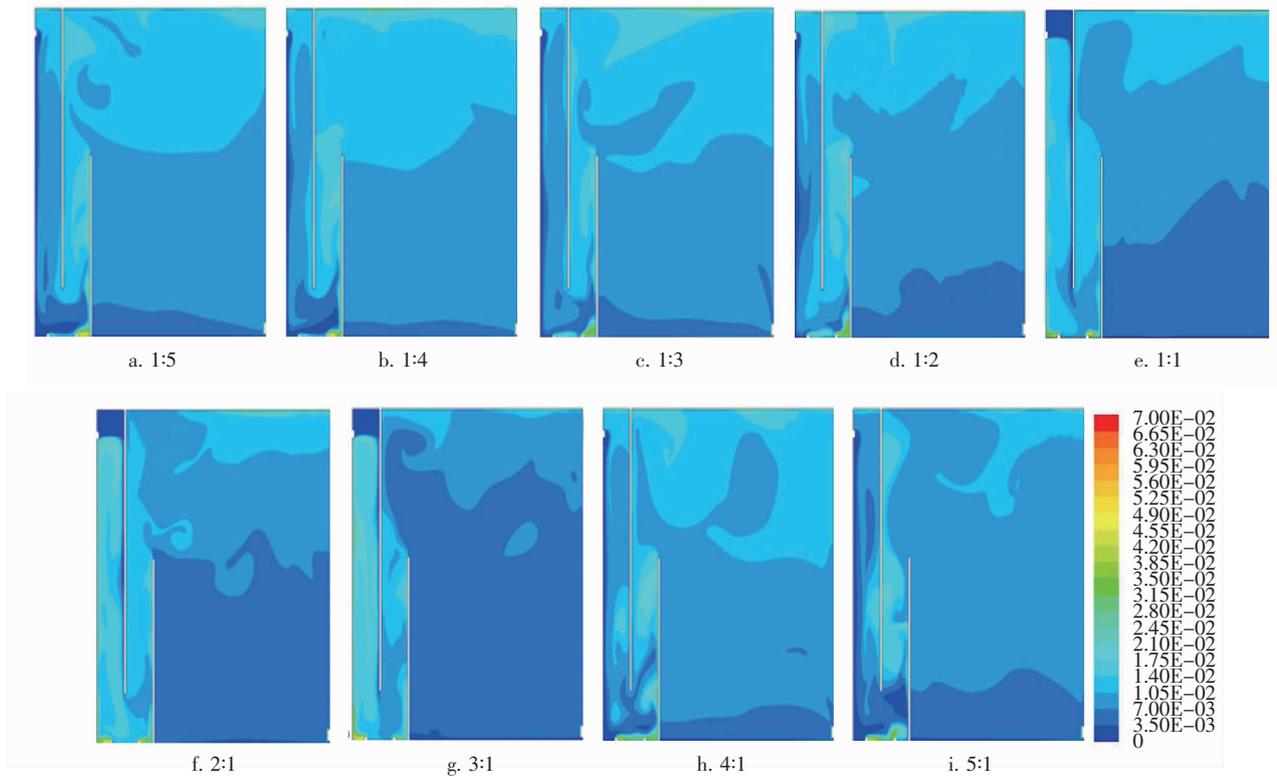


图 6 不同回流溶气水分配比下 CCDAF 池的气相体积分布云图

Fig.6 Gas phase volume distribution cloud map of CCDAF tank under different distribution ratios of reflux dissolved air water

从图 6 可以看出,当分配比  $R_1: R_2$  较小时,大部分从进水口 2 进入的回流溶气水在水流作用下水平流入接触室 2,接触室 2 中的微气泡数量明显多于接触室 1,但是接触室 2 内的微气泡分布不均匀。

由于接触室 1 中的微气泡数量较少,逆向碰撞接触效果较弱。当  $R_1: R_2$  为 1 : 5 时,分离室入口端出现两个明显的涡流区,对已形成的泡絮体产生破坏作用。当  $R_1: R_2$  达到 1 : 1 时,接触室 1 和 2 内的微气

泡数量基本相当,分布也较为均匀,从进水口2进入的回流溶气水沿进口侧池壁上升,在水流作用下与待处理的水充分接触并共同向下流动,进入接触室2。当 $R_1:R_2$ 为2:1、3:1时,接触室1内的微气泡数量大于接触室2,分离室内的流态均有一定扰动,且随着分配比的增大而加重,同时由于大量微气泡聚集在接触室1内,导致分离室内气相分布体积逐渐减小。当 $R_1:R_2$ 达到4:1及以上时,接触室1和2内的流态复杂,紊流加剧,不利于泡絮体粘附。综上,将 $R_1:R_2$ 控制在1:1左右较为适宜。

### 3 CCDAF 工艺中试运行效果

#### 3.1 试验装置

根据 CFD 模拟及优化结果,建立 CCDAF 中试装置,尺寸为 $B \times L \times H = 0.15 \text{ m} \times 1.30 \text{ m} \times 1.35 \text{ m}$ ,其中,两个接触室长度均为 0.15 m,分离室长度为 1.00 m。控制溶气压力为 0.45 MPa、溶气水总回流比为 10%、 $R_1:R_2$  为 1:1。当 $R_1$ 关闭时,为同向流 DAF 工艺;当 $R_2$ 关闭时,为逆向流 DAF 工艺,比较 3 种 DAF 工艺的除污效能。

#### 3.2 原水水质

试验原水取自南水北调山东受水区济宁段京杭运河取样点,试验在 4 月—12 月进行,原水温度在 5.0 ~ 25.0 °C 之间,pH 值为 8.37 ~ 8.55,浊度为 13.2 ~ 25.4 NTU, $UV_{254}$  为 0.143 ~ 0.151  $\text{cm}^{-1}$ ,DOC 为 6.96 ~ 7.75 mg/L, $COD_{Mn}$  为 5.67 ~ 7.25 mg/L。

#### 3.3 试验结果与讨论

3 种 DAF 工艺对原水的净化效果见图 7。可以看出,与同向流及逆向流 DAF 工艺相比,CCDAF 工艺的除污效能更好。CCDAF 工艺对浊度的去除率比同向流和逆向流 DAF 工艺分别提高了 5.0%、8.8%,对有机物的去除规律与浊度基本一致,均为 CCDAF 工艺最好、同向流 DAF 工艺次之、逆向流 DAF 工艺最差。CCDAF 工艺对  $COD_{Mn}$ 、 $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别比同向流 DAF 工艺高了 4.1%、5.0% 和 0.58%,比逆向流 DAF 工艺高 6.4%、8.1% 和 2.58%。贾伟建等人<sup>[10]</sup>利用混凝-气浮工艺处理低浊高藻水库水,原水浊度为 13 ~ 22 NTU,对藻类和浊度的去除率分别为 93.7% 和 95.6%;刘善培<sup>[11]</sup>采用强化混凝气浮工艺处理微污染原水,当原水浊度为 5.62 ~ 5.74 NTU 时,气浮工艺对浊度的去除率为 90.1%。由此可见,CCDAF 工艺较传统气浮工艺更有优势,净水效果显著。

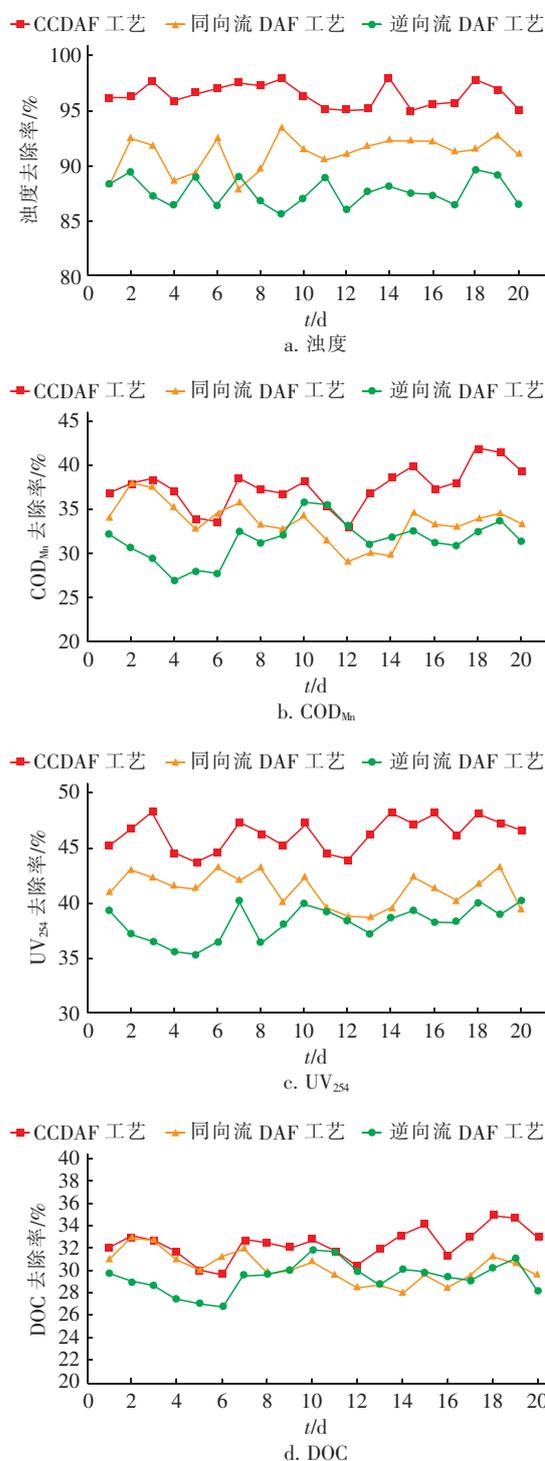


图 7 3 种气浮工艺对浊度、 $COD_{Mn}$ 、 $UV_{254}$ 、DOC 的去除效果对比

Fig. 7 Removal effect comparison of turbidity,  $COD_{Mn}$ ,  $UV_{254}$  and DOC by three DAF processes

## 4 结论

① 通过对 8 个 CCDAF 池模型进行流场模拟及参数优化,发现 CCDAF 池内水流状态整体良好,

流态稳定,能够实现泡絮体逆向碰撞、同向粘附。在流量为  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$  时,CCDAF 池的接触室上升流速为  $10 \text{ mm/s}$ ,分离室分离速度为  $1.5 \text{ mm/s}$ ,最优池型尺寸为:  $B \times L \times H = 150 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm} \times 1350 \text{ mm}$ 。在溶气压力为  $0.45 \text{ MPa}$ 、回流溶气水分配比  $R_1:R_2$  为  $1:1$  左右时,接触室内气体分布均匀,分离室内气相呈阶梯式均匀分布,无明显扰动回流,气相分布合理。

② 利用模拟优化结果,建立  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$  的中试装置,试验结果显示,CCDAF 工艺的除污效果显著,明显优于同向流及逆向流 DAF 工艺,对浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、DOC 的去除率分别比同向流 DAF 工艺高  $5.0\%$ 、 $4.1\%$ 、 $5.0\%$ 、 $0.58\%$ ,比逆向流 DAF 工艺高  $8.8\%$ 、 $6.4\%$ 、 $8.1\%$ 、 $2.58\%$ 。

#### 参考文献:

- [1] Zhu I X, Bates B J, Anderson D M. Removal of *Prorocentrum minimum* from seawater using dissolved air flotation[J]. J Appl Water Eng Res, 2014, 2(1): 47 - 56.
- [2] 胡辉. 低温低浊黄河水强化混凝研究[D]. 郑州:郑州大学, 2013.  
Hu Hui. Enhanced Coagulation of Yellow River Water at Low Temperature and Turbidity [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013 (in Chinese).
- [3] Yang R Q, Wang H F, Liu J C. Jet flotation column system structure design and numerical simulation of two-phase flow[J]. Adv Mater Res, 2013, 616/618: 655 - 661.
- [4] Wang Y, Wang Q, Zhuo S, et al. Improvement of operational mode of counter-current dissolved air flotation process [A]. Proceedings of the 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation[C]. Washington D C: IEEE, 2010.
- [5] Raeli M A P, Marchetto M. High-rate dissolved air flotation for water treatment [J]. Water Sci Technol, 2001, 43(8): 43 - 49.
- [6] 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.  
Guo Jinlong, Wang Yili, Li Dapeng, et al. Counter current co-flocculation flotation-new water treatment method[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(7): 12 - 16 (in Chinese).
- [7] Guo J, Wang Y, Li D, et al. Counterflow co-flocculation flotation for water purification[J]. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng, 2003, 38(5): 923 - 934.
- [8] 王永磊, 刘宝震, 张克峰, 等. 逆向-同向流气浮工艺构建与运行特性[J]. 化工学报, 2016, 67(12): 5252 - 5258.  
Wang Yonglei, Liu Baozhen, Zhang Kefeng, et al. Construction and operation characteristics of countercurrent-cocurrent dissolved air flotation [J]. CIESC Journal, 2016, 67(12): 5252 - 5258 (in Chinese).
- [9] Wang Y L, Wang N, Jia R, et al. Research on CFD numerical simulation and flow field characteristics of countercurrent-cocurrent dissolved air flotation [J]. Water Sci Technol, 2018, 77(5/6): 1280 - 1292.
- [10] 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, 30(1): 41 - 46.  
Jia Weijian, Zhang Kefeng, Wang Yonglei, et al. Study on the treatment of low turbidity and high algal reservoir water by coagulation-flootation process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30(1): 41 - 46 (in Chinese).
- [11] 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 Shanpei. Pilot Study on Micro-polluted Raw Water Treatment by Enhanced Coagulation - DAF Process [D]. Tianjin: Nankai University, 2007 (in Chinese).



作者简介:林清丽(1978 - ),女,山东平邑人,硕士,讲师,研究方向为水处理理论与技术等。

E-mail: 597542397@qq.com

收稿日期: 2019 - 09 - 18