

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.006

# 气浮工艺中气载絮体尺寸分布及其浮力效率研究

金鑫<sup>1,2</sup>, 魏一雄<sup>1</sup>, 刘梦稳<sup>1</sup>, 史勇<sup>1</sup>, 金鹏康<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对气浮工艺中气载絮体微观特性对上浮性能的影响,基于气浮工艺对蒙脱石和二氧化硅无机悬浊体系的处理特性,通过构建模拟絮体动态观测系统,探究了不同絮体尺寸条件下,气泡尺寸和气泡数量的分布规律,揭示了微气泡与絮体的结合特性。结果表明,混凝剂的投加量会影响气载絮体的尺寸,进而改变气浮处理效果;在最佳混凝剂投加量条件下,气载絮体尺寸主要分布在350~1 500  $\mu\text{m}$ 。基于上述气载絮体尺寸分布规律,采用玻璃球作为模拟絮体,探究了不同尺寸模拟絮体与微气泡的结合特性,发现模拟絮体黏附的微气泡尺寸主要分布在100~300  $\mu\text{m}$ ,且絮体上附着的微气泡数量随反应时间逐渐减少,而微气泡尺寸逐渐增大。通过计算模拟絮体浮力效率发现,气载絮体的浮力效率与絮体粒径整体上成反比,且随时间呈现先增长后稳定的状态,在30~40 min达到最大值。

**关键词:** 气浮; 气载絮体; 浮力效率; 无机悬浊质

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0037-06

## Size Distribution and Buoyancy Efficiency of Microbubble-flocs in Dissolved Air Flotation Process

JIN Xin<sup>1,2</sup>, WEI Yi-xiong<sup>1</sup>, LIU Meng-wen<sup>1</sup>, SHI Yong<sup>1</sup>, JIN Peng-kang<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper constructed a simulated floc dynamic observation system, explored the distribution of bubble size and bubble number under different floc size conditions, and revealed the binding characteristics of microbubbles and flocs based on the characteristics of dissolved air flotation process for treating montmorillonite and silica inorganic suspension, so as to investigate the influence of micro-characteristics of microbubble-flocs on flotation performance of dissolved air flotation process. The dosage of coagulant affected the size of the microbubble-flocs, and then change the air flotation treatment performance. Under the optimal dosage of coagulant, the size of the microbubble-flocs was mainly distributed in the range of 350~1 500  $\mu\text{m}$ . Based on the size distribution of microbubble-flocs, the binding characteristics between simulated flocs (glass particles) with different sizes and microbubbles was

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170052、52230001、52070151); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-120); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-06)

通信作者: 金鹏康 E-mail: pkjin@xjtu.edu.cn

explored. The size of the microbubbles adhered to the simulated flocs mainly distributed in the range of 100–300  $\mu\text{m}$ , and the number of microbubbles attached to the flocs gradually decreased with the reaction time. However, the size of microbubbles gradually increased. According to the calculation of the buoyancy efficiency of the simulated flocs, the buoyancy efficiency of microbubble-flocs was inversely proportional to the floc size, and it increased first and then remained stable with the reaction time, which reached the maximum value in 30–40 minutes.

**Key words:** dissolved air flotation; microbubble-flocs; buoyancy efficiency; inorganic suspension

溶气气浮源于选矿业中的浮选法,是水处理中一种高效固液分离方法<sup>[1]</sup>,具有占地面积小、混凝预处理投药量少、水力停留时间短等优点,且随着处理效果的提升,其在水处理各个领域得到了广泛应用<sup>[2-5]</sup>。在气浮工艺中,气载絮体是影响固液分离效果的主要因素,大量微气泡附着可使其具有较大的上浮速度,此外气载絮体上浮时可以携带水中孤立的气泡或絮体,有效去除污水中的微絮体和细小颗粒,提高气浮效果。

对于气浮工艺的微观特性研究,Rodrigues等<sup>[6]</sup>结合显微观测技术和图像分析技术提出了一种新的微气泡尺寸测量方法,通过分析水体停止流动后拍摄的照片对微气泡的尺寸进行估算,对于气浮工艺的进一步优化具有较好的实际意义;郭书雅等<sup>[7]</sup>对电絮凝过程中絮体微观形态进行实时原位记录和分析,发现絮体分形维数与絮体形态呈正相关,而与浊度呈负相关;刘颖等<sup>[8]</sup>通过微观分析系统探究了不同脱稳条件下气载絮体的微观形态,发现气浮工艺与传统混凝工艺不同,其在Zeta电位为正时气载絮体平衡接触角易形成钝角,有利于气泡与絮体的结合,提高气浮效果。上述研究只是从去除效果和气载絮体表面特性等角度定性描述了絮体与微气泡的结合特性,尚未对两者的结合特性进行定量分析,这在一定程度上制约了气浮工艺的进一步优化和溶气气浮过程的准确调控。为此,笔者首先构建了溶气气浮中试装置与微观观测系统,探究了蒙脱石和二氧化硅两种悬浊质体系中,不同混凝剂投加量条件下的气浮效果与气载絮体的尺寸分布;随后利用模拟絮体,对比分析了不同尺寸模拟絮体上微气泡的尺寸和数量,进而确定微气泡在模拟絮体上的附着规律,在此基础上,结合气载絮体浮力效率计算,定量分析了气载絮体的上浮特性。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

溶气气浮实验装置如图1所示,主要由进水系统、溶气系统和气浮装置三部分组成。原水与溶药罐出水混合,由进水泵加入管道混合器,在此处迅速完成絮凝过程,然后与溶气水一同从装置底部进入气浮柱体,在接触区充分混合,溶气水释压后产生的大量微气泡与原水中的絮体发生碰撞、黏附形成气载絮体,气载絮体上浮至液面通过刮渣排出系统。溶气气浮装置的操作条件如下:进水流量为100 L/h,管道混合时间为30 s,空气投加量为3.6 L/h,水力停留时间为40 min,回流比为30%,回流水流量为36 L/h。

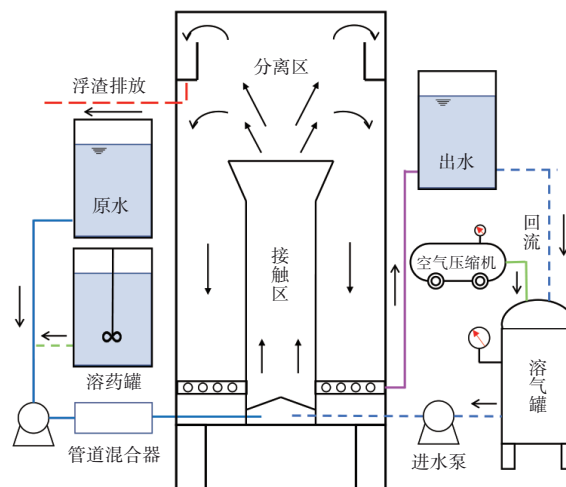


图1 溶气气浮实验装置

Fig.1 Dissolved air flotation experimental device

溶气气浮微观观测系统如图2所示,运行流程与气浮工艺装置相似,区别在于其多了一个微观观测系统。微观观测系统由Nikon SMZ1270i体视显微镜、显示器和观察容器组成。在进行气载絮体形态特征的表征时,气载絮体溶液通过气浮柱上升至

观察容器1中,体视显微镜置于观察容器正上方,单孔双光纤卤素灯冷光源(21 V, 150 W)分别放置于CCD相机的对面和侧面,为图像捕捉提供合适的对比度。在研究单个气载絮体上黏附气泡尺寸和数量的分布情况时,将模拟絮体吊入观察容器2的固定深度处,溶气水通过气浮柱上升至观察容器2中,体视显微镜置于观察容器2的侧面,光源置于观察容器2的两侧,为图像捕捉提供合适的对比度。

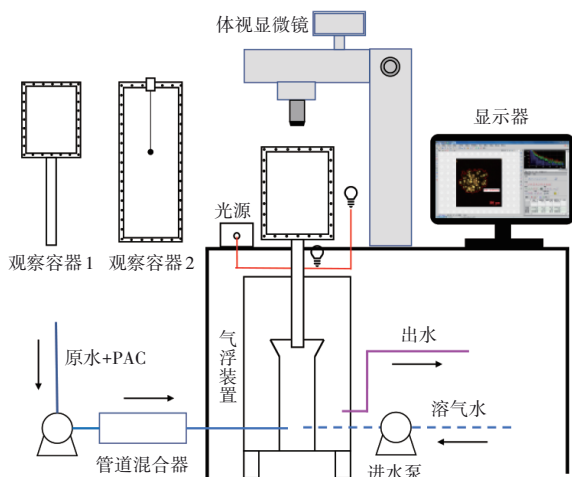


图2 溶气气浮微观观测系统

Fig.2 Microscopic observation system for dissolved air flotation

## 1.2 实验用水

蒙脱石悬浊体系原水由蒙脱石粉配制,浊度为20 NTU, pH为 $7.5 \pm 0.05$ ;二氧化硅悬浊体系原水由二氧化硅粉末配制, pH为 $8.0 \pm 0.05$ ,浊度为20 NTU。

## 1.3 分析项目及方法

本实验涉及的测定项目包括浊度、气载絮体尺寸、模拟絮体上附着的微气泡尺寸和数量。其中,浊度采用便携式浊度仪测定;气载絮体和微气泡图像采用Nikon SMZ1270i体视显微镜进行观察和拍摄;拍摄采集的图像借助图像分析测量软件(NIS-Elements D 3.2)测量气载絮体尺寸、气泡尺寸、气泡数量等参数,气载絮体平均粒径按当量直径计算,见式(1)。

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

式中: $d$ 为气载絮体的平均粒径,m; $A$ 为气载絮体的面积, $m^2$ 。

将模拟絮体单位面积所受到的浮力定义为浮

力效率( $\eta$ ),计算方法如下:

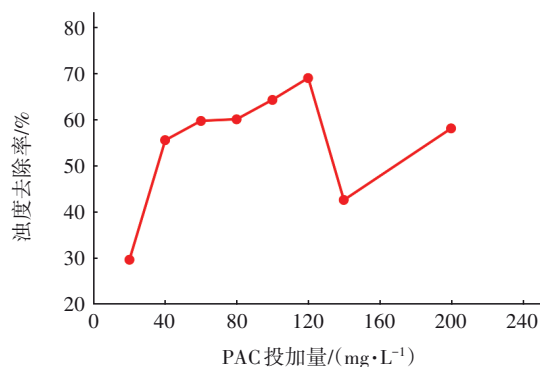
$$\eta = \frac{F_b + F_s - F_G}{S} \quad (2)$$

式中: $F_b$ 为黏附气泡产生的浮力,N; $F_s$ 为模拟絮体自身的浮力,N; $F_G$ 为模拟絮体自身的重力,N; $S$ 为模拟絮体的表面积, $m^2$ 。

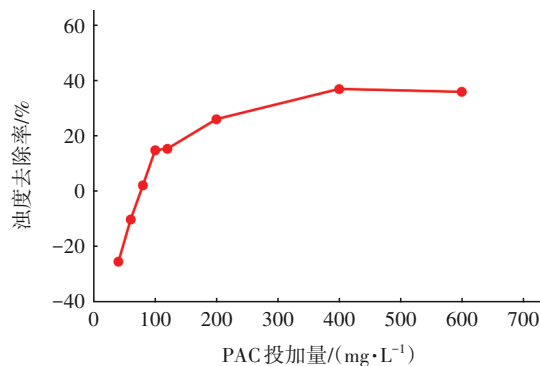
## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝剂投加量的影响

为了研究气浮工艺中气载絮体尺寸与固液分离效果之间的关系,对比了不同聚合氯化铝(PAC)混凝剂投加量下,蒙脱石和二氧化硅两种无机悬浊体系的浊度去除效果和气载絮体尺寸分布。各混凝剂投加量下无机悬浊体系的浊度去除效果如图3所示。



a. 蒙脱石悬浊体系



b. 二氧化硅悬浊体系

图3 不同混凝剂投加量下的浊度去除率

Fig.3 Turbidity removal rate at different coagulant dosages

在两种悬浊体系中,当混凝剂投加量较小时,浊度去除率均随混凝剂投加量的增加而升高。在蒙脱石悬浊体系中,当混凝剂投加量为100和120 mg/L时浊度去除率明显优于其他投加量,去除率稳定在60%~70%。二氧化硅悬浊体系中的浊度去除率较低,当混凝剂投加量为400和600 mg/L时,浊度

去除率达到最大并稳定在40%左右。二氧化硅表面的负电性较高,当混凝剂投加量较少时,其水解形成的聚合阳离子难以中和二氧化硅与微气泡表面的负电荷,使得微气泡与絮体的碰撞黏附性能较差,体系中只形成了少量的气载絮体,导致混凝剂投加量为40~60 mg/L时浊度不降反升。

为进一步明晰无机悬浊体系的浊度去除特性,需要对气载絮体的形貌进行探究。在蒙脱石悬浊体系中,各混凝剂投加量下气载絮体的微观照片如图4所示(二氧化硅悬浊体系的类似)。可以看出,在低混凝剂投加量下形成的絮体较小,与微气泡结合性能较差,整体上处于稀疏状态;随着混凝剂投加量的增加,形成的絮体逐渐变大,气泡与一个絮体碰撞结合后,另一端又结合另一个絮体,形成“絮体-气泡-絮体”结构的气载絮体。

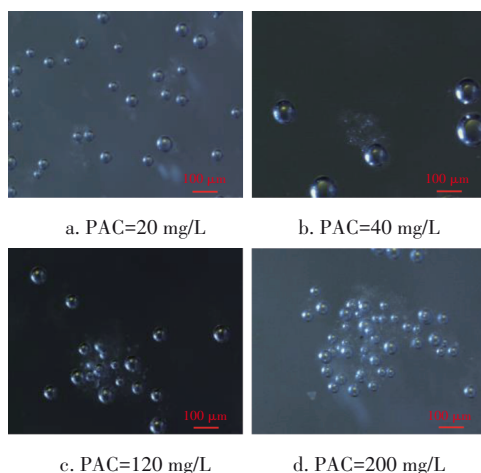


图4 在蒙脱石悬浊体系中不同混凝剂投加量下气载絮体的微观照片

Fig.4 Microscopic images of microbubble-flocs at different coagulant dosages

统计各混凝剂投加量条件下气载絮体的尺寸分布,结果如图5所示。在两种无机悬浊体系中,各混凝剂投加量下尺寸为500~750  $\mu\text{m}$ 的气载絮体均占比较高,在最佳混凝剂投加量下气载絮体尺寸主要分布在350~1 500  $\mu\text{m}$ ,占全部数量的90%左右。随着混凝剂投加量的增加,小尺寸气载絮体数量逐渐减少,大尺寸气载絮体数量有所增加,分析认为,在混凝预处理过程中,混凝剂水解产物会中和絮体表面的负电荷,使絮体自身疏水性有所增强,更易于与气泡黏附,形成气载絮体<sup>[8]</sup>。气载絮体也可以通过吸附架桥和网捕卷扫作用形成粒径更大的气

载絮体。

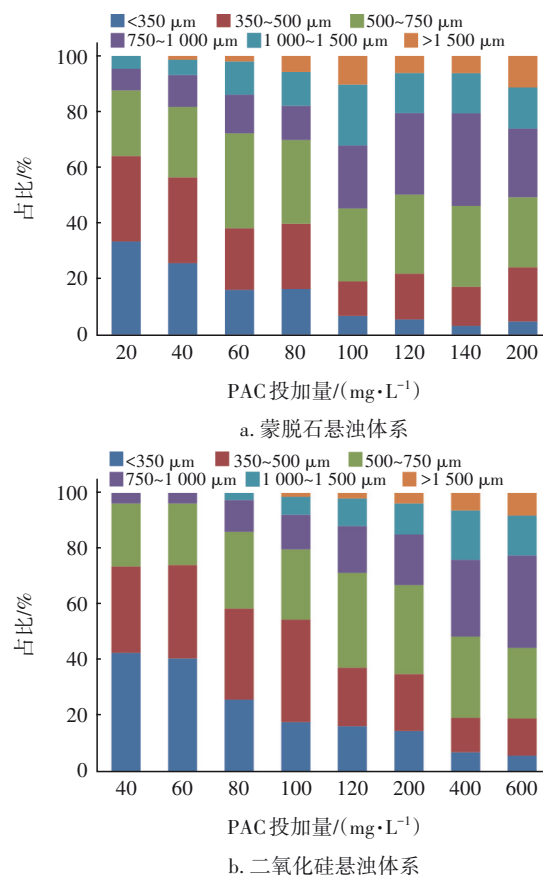


图5 不同混凝剂投加量下气载絮体的尺寸分布

Fig.5 Microbubble-flocs size distribution at different coagulant dosages

## 2.2 模拟絮体尺寸的影响

在气浮工艺中,溶气过程产生的微气泡与絮体的有效碰撞是实现固液分离的基础<sup>[9]</sup>。基于上述两种无机悬浊体系在最佳混凝剂投加量时气载絮体的尺寸分布情况,选择直径为0.35、0.50、0.75、1.00和1.50 mm的模拟絮体来研究絮体尺寸对微气泡附着情况的影响。0.50 mm模拟絮体的微观照片如图6所示,在初期,气泡间的相互作用力会促进气泡间的聚并,模拟絮体上黏附的微气泡经过碰撞合并后体积迅速增大,而气泡粒径变大后,气泡之间的相互作用力又会阻碍气泡间的聚并,气泡体积的增长逐渐保持平稳。

在气浮过程中,尺寸较小的气泡上升速度小于大气泡,在气浮装置中停留时间更长,因此增加了气泡与絮体碰撞的几率<sup>[10]</sup>。此外,受絮体表面积限制,絮体上附着气泡的尺寸会影响附着的气泡数量,进而影响气载絮体的上升速度。不同粒径模拟



絮体上附着的微气泡尺寸分布如图7所示。针对不同絮体粒径,微气泡的尺寸主要分布在100~300  $\mu\text{m}$ 之间,且粒径越大,小气泡占比越大。气泡尺寸越小,气泡数量越多,气泡间的碰撞效率越高。随着絮体粒径的增大,附着的微气泡数量增多,气泡间的聚并作用加剧,使得大尺寸气泡占比也逐渐增大。

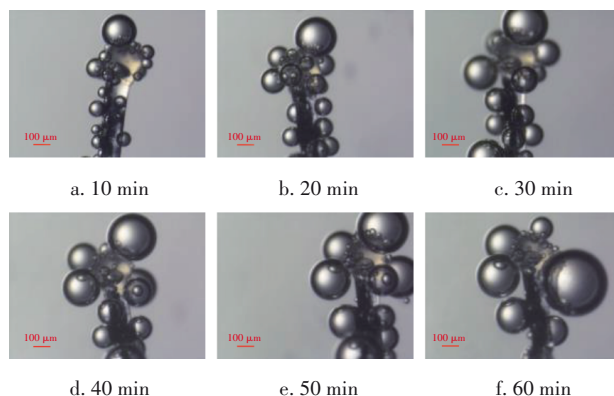


图6 0.50 mm模拟絮体的微观照片

Fig.6 Microscopic photos of 0.50 mm simulated flocs

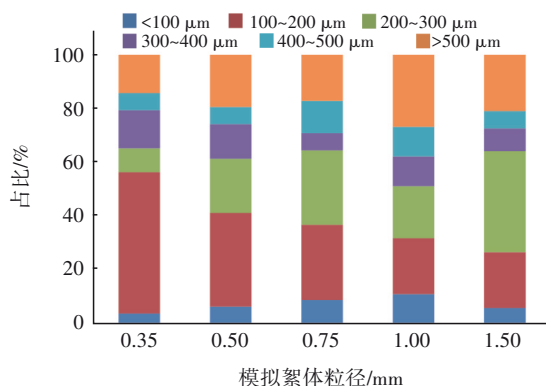
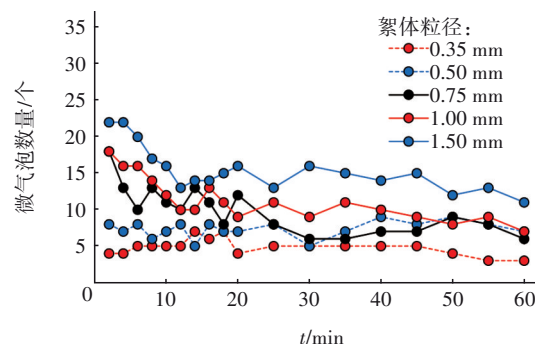


图7 不同粒径模拟絮体上附着微气泡的尺寸分布

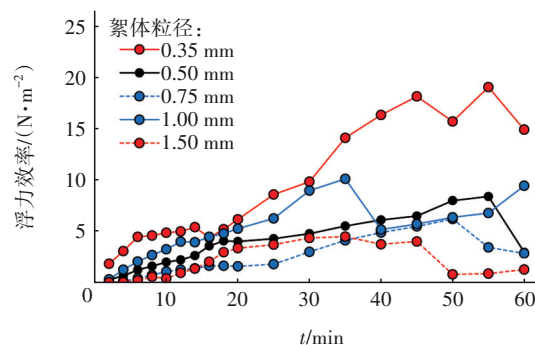
Fig.7 Size distribution of microbubbles attached to simulated flocs with different sizes

气浮固液分离效果主要取决于气载絮体的上浮速度,而其上浮速度主要受絮体上黏附气泡数量的影响,在絮体粒径一定时,絮体上黏附的气泡越多,气载絮体的密度就越小,上浮速度就越快。Haarhoff等<sup>[11]</sup>认为气载絮体上黏附的气泡数量取决于与絮体发生碰撞的气泡数量和絮体的表面积。Lundh等<sup>[12]</sup>认为气泡与絮体的碰撞黏附概率取决于初始黏附概率和絮体粒径。本研究统计了不同尺寸模拟絮体上附着的微气泡数量,结果见图8(a)。随着时间的推移,气泡由于碰撞聚并作用以及受絮体表面积的限制,使得絮体上附着的微气泡数量逐

渐减少。部分气泡在流体紊流、气泡与气泡以及气泡与絮体的碰撞下脱离模拟絮体,随后又黏附上新的气泡,继续聚并、生长和分离,因此图中曲线不是平滑的而是有所起伏的。同时发现,大尺寸絮体由于其表面积大,可以吸附更多的小气泡,整体上,不同尺寸絮体上黏附的气泡数量符合:1.50 mm>1.00 mm>0.75 mm>0.50 mm>0.35 mm。



a. 不同粒径模拟絮体上附着的微气泡数量



b. 不同粒径模拟絮体的浮力效率

图8 不同粒径模拟絮体与微气泡的结合性能

Fig.8 Binding characteristics of microbubbles with different simulated flocs

为进一步研究气泡与絮体的结合特性,本研究分析了不同粒径模拟絮体的浮力效率,结果如图8(b)所示,浮力效率排序为:0.35 mm>0.50 mm>1.00 mm>0.75 mm>1.50 mm,浮力效率与絮体粒径整体成反比。气泡与絮体之间的作用可分为碰撞、黏附、聚并和脱附。初期气泡与絮体颗粒的碰撞黏附作用大于脱附作用,导致了浮力的增长,后期的碰撞黏附作用与脱附作用基本相当,因此浮力效率随时间先增加后逐渐稳定,浮力效率在30~40 min达到最大值。

### 3 结论

① 在两种悬浊体系中,随混凝剂投加量的增加,小尺寸气载絮体减少,大尺寸气载絮体增加,浊

度去除率升高,说明不同混凝剂投加量会影响体系中的气载絮体尺寸,从而影响气浮处理效果。

② 不同粒径絮体上附着的微气泡尺寸主要分布在100~300  $\mu\text{m}$ ,絮体尺寸越大,附着的小气泡占比就越大,微气泡数量随反应时间逐渐减少。

③ 不同粒径模拟絮体的浮力效率排序为:0.35 mm>0.50 mm>1.00 mm>0.75 mm>1.50 mm,浮力效率与絮体直径整体上成反比。浮力效率随时间先增长后稳定,在30~40 min达到最大值。

#### 参考文献:

- [1] 范欣. 絮凝气浮中气泡分布与絮凝剂配伍性研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.  
FAN Xin. Experimental Study of Bubble Size Distribution and Flocculants Compatibility in Flocculating Flotation [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010 (in Chinese).
- [2] AGARWAL A, NG W J, LIU Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment [J]. Chemosphere, 2011, 84(9): 1175-1180.
- [3] 徐晓然, 唐曾晖, 李振兴, 等. 气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺设计和工程应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 791-798.  
XU Xiaoran, TANG Zenghui, LI Zhenxing, *et al.* Design and engineering application of the integrated flotation and sedimentation unit [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 791-798 (in Chinese).
- [4] 许晓明. 进水以高浓度工业废水为主的污水处理厂扩建工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 71-75.  
XU Xiaoming. Design of expansion project of a WWTP with industrial wastewater as the main feed water [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 71-75 (in Chinese).
- [5] 金鹏康, 韩冬, 金鑫, 等. 多级臭氧气浮一体化装置对污水厂出水的处理效果[J]. 中国给水排水, 2015, 31(15): 12-15.  
JIN Pengkang, HAN Dong, JIN Xin, *et al.* Dual-step ozone induced flotation process for advanced treatment of effluent from WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 12-15 (in Chinese).
- [6] RODRIGUES R T, RUBIO J. New basis for measuring the size distribution of bubbles [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(8): 757-765.
- [7] 郭书雅, 陈文娟, 靖波, 等. 油田废水处理中絮体/气泡的形态及分形特征[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 38-42, 52.  
GUO Shuya, CHEN Wenjuan, JING Bo, *et al.* Morphological change and fractal characteristics of flocs/bubbles in treatment of oilfield wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(4): 38-42, 52 (in Chinese).
- [8] 刘颖, 金鑫, 金鹏康, 等. 溶气气浮的微气泡影响因素及其与絮体的结合特性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 1-5.  
LIU Ying, JIN Xin, JIN Pengkang, *et al.* Characteristics of microbubbles and microbubble-flocs in dissolved ozone flotation process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 1-5 (in Chinese).
- [9] DOCKKO S, HAN M Y. Fundamental characteristics of bubbles and ramifications for the flotation process [J]. Water Science & Technology, 2004, 50(12): 207-214.
- [10] EDZWALD J K. Dissolved air flotation and me [J]. Water Research, 2010, 44(7): 2077-2106.
- [11] HAARHOFF J, EDZWALD J K. Modelling of floc-bubble aggregate rise rates in dissolved air flotation [J]. Water Science & Technology, 2001, 43(8): 175-184.
- [12] LUNDH M, JONSSON L, DAHLQUIST J. The influence of contact zone configuration on the flow structure in a dissolved air flotation pilot plant [J]. Water Research, 2002, 36(6): 1585-1595.

作者简介: 金鑫(1987- ), 男, 陕西兴平人, 博士, 教授, 研究方向为污废水深度处理与资源化。

E-mail: jinxin@xjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-06

修回日期: 2023-03-18

(编辑: 刘贵春)