

论述与研究

溶气气浮的微气泡影响因素及其与絮体的结合特性

刘颖, 金鑫, 金鹏康, 刘美艳, 王晓昌
(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过微观分析系统对气浮工艺中的气载絮体进行观测,分别研究了气浮过程中微气泡和气载絮体的特性以及 Zeta 电位对气载絮体平衡接触角的影响。在 0.40 MPa 和 30% 回流比的工作条件下,气泡平均粒径较小,其尺寸主要分布在 40 ~ 110 μm 之间,占整体数量 90% 以上。投加混凝剂聚合氯化铝(PAC)后,在 0.40 MPa 时气载絮体尺寸最大,主要尺寸分布在 0.45 ~ 0.95 mm 之间,二维分形维数最小,结构更为松散轻薄。在此基础上通过投加不同浓度的混凝剂控制溶液的 Zeta 电位来探究其对平衡接触角的影响,发现不同于传统混凝在等电点处达到最优混凝效果,气浮工艺是在 Zeta 电位为 17 mV 时平衡接触角达到最大值,此时的气载絮体中气泡与絮体的结合更为理想,更利于提升气浮工艺的分离效果。

关键词: 气浮; 气载絮体; 微气泡; 尺寸分布; 平衡接触角

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0001-05

Characteristics of Microbubbles and Microbubble-flocs in Dissolved Ozone Flotation Process

LIU Ying, JIN Xin, JIN Peng-kang, LIU Mei-yan, WANG Xiao-chang
(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the characteristics of microbubble-flocs and effect of Zeta potentials on microbubble-flocs in the flotation, the microbubble analysis system was developed for microbubble-flocs observation in the dissolved ozone flotation (DOF) process. The results showed that the average microbubble size was the smallest with the saturator pressure of 0.40 MPa and reflux ratio of 30%, and the microbubble size was mainly between 40 - 110 μm , accounting for more than 90%. Polyaluminium chloride (PAC) was added to the process in different saturator pressure. It was found that the size of the microbubble-flocs was the biggest with the saturator pressure of 0.40 MPa, and the main dimensions were between 0.45 mm and 0.95 mm. Meanwhile, because of the smallest fractal dimension, the floc structure was fluffy and thin. Through applying different PAC dosage, the effect of Zeta potential on the contact angle was obtained. The results showed that optimal Zeta potential for flotation process was 17 mV in this study because the contact angle reached the highest, which indicated favorable separation performance due to the good contact between microbubbles and flocs.

Key words: dissolved ozone flotation (DOF); microbubble-floc; microbubble; size distribution; contact angle

气浮工艺在污水处理方面已投入使用多年,20世纪20年代便在瑞典开始应用^[1],70年代成为芬兰处理地表水的主流工艺^[2],80年代被英国用来处理含藻水^[3],截止到2010年,美国和加拿大拥有150个采用气浮技术作为主体工艺的污水处理厂^[4]。其基本原理是利用系统在水中产生高度分散的微气泡,与目标去除物及其聚合体结合,形成表面密度小于水的气载絮体,气载絮体在浮力作用下上浮到液相表面形成稳定的浮渣层,并最终随着浮渣层的去除而从液相主体中分离。其具有处理效率高、出水效果好、对水质适应性广等优点,有效提升了难以自然沉降悬浮物的分离效果,因此在许多行业的水处理中得到了广泛的应用。气载絮体是气浮反应的重要组成部分,是气浮反应中固液分离效率的主要影响因素,大量尺寸合适且均匀的微气泡可以提高气泡和絮体的接触面积,使其更易进入絮体内部空隙,形成理想的气载絮体,从而提高气浮反应性能^[4]。

对于气载絮体的研究,Oliveira等^[5]在2010开发了一种名为Aerated Flocs Characterisation(AFC)的新技术,用于表征在多相体系中通过絮凝浮选作用形成的充气絮凝物,至此,关于絮凝气浮技术的机制探索有了新突破。Rodrigues等^[6]在此项技术基础上采用Flocs Generator Reactor(FGR)反应器对气载絮体进行了进一步研究,发现涂覆在气泡上的絮体之间通过架桥等作用而产生较高的上升速率,这也揭示了在水和废水处理中能够快速絮凝浮选的原因。但由于设备材料的局限性,并未对气载絮体进行较多的微观研究。因此,笔者采用水处理中的气浮工艺耦合显微观测系统对净水过程中形成的气载絮体进行观测,探索微气泡形成的最佳条件以及投加混凝剂后处理效果与气载絮体的关系。

本研究目的为通过微观分析系统探究形成合适微气泡的最佳工况,进一步分析气载絮体与浊度去除率的关系,以及不同Zeta电位时气载絮体的平衡接触角的变化情况。首先,在溶气压力为0.30、0.40和0.50 MPa以及回流比为30%、40%和50%条件下对微气泡进行微观拍摄分析,进而确定出反应器的最佳运行条件。然后投加混凝剂,对比分析

0.30、0.40和0.50 MPa溶气压力下气载絮体与浊度去除率的关系,在此基础上,选择不同浓度梯度的混凝剂投加量,探究不同脱稳状态对气载絮体的影响。

1 材料与方法

1.1 微观分析系统

图1为微观分析系统。该系统由臭氧气浮工艺耦合显微技术组成,能够观察絮体流态并以图像的形式记录,以此评估和表征多相混合系统(水/絮体/气泡混合系统)。臭氧气浮工艺由进水系统、加药系统、溶气系统和逆流式臭氧气浮分离柱(简称气浮柱)组成。进水系统由贮水桶(500 L)、微型直流水泵构成;加药系统由加药泵和储药桶构成;溶气系统由溶气泵、臭氧发生器、真空表、压力表等构成;臭氧气浮柱是高为40 cm、内径为20 cm的有机玻璃柱,有效容积为12.5 L。显微观测系统由体式显微镜、电脑和观察容器三部分组成。观察容器上部为10 cm×10 cm×15 cm的立方体,下部是长为45 cm、内径为5 cm的圆柱体,由于光的折射和反射影响,立方体顶面由玻璃材料加工,侧面与底面以及下部连接柱体使用有机玻璃材料加工。

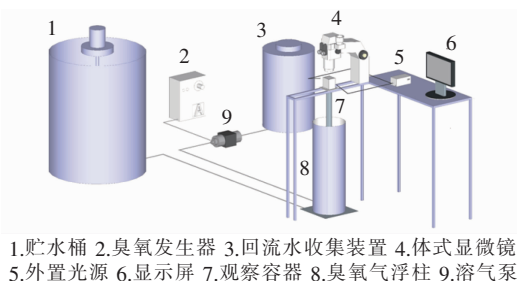


图1 微观分析系统

Fig.1 Microscopic analysis system

在原水存放装置内投入高岭土配制试验用水,混合搅拌均匀后由水泵泵入管道系统,泵后投加混凝剂聚合氯化铝(PAC),在管道内充分混合后从臭氧气浮柱底部进入,同时回流水经过溶气泵加压进入臭氧气浮柱底部,释放压力后产生大量微气泡,形成充满微气泡的“白水”,“白水”结合原水混凝后产生的微小絮体在柱体内形成气载絮体。气载絮体持续通过臭氧气浮柱进入观察容器,进而保证得到足够的有效数据。

1.2 试验用水水质

试验采用高岭土配水,浓度为0.5 g/L,混凝剂采用聚合氯化铝。

1.3 分析项目及方法

气泡/气载絮体图像采用尼康体式显微镜进行观察和拍摄;Zeta 电位采用 Zeta 电位仪进行测量;气泡/气载絮体尺度以及气载絮体的平衡接触角采用 NIS - Elements D 3.2 软件进行测量;浊度通过便携式浊度仪测定。

2 结果与讨论

2.1 气压和回流比对微气泡的影响

影响水中微气泡尺寸分布的因素较多,其中溶气压力与回流比为主要因素,通过观测未投加混凝剂时的气泡,比较得到最佳溶气压力与回流比。测量分析三种溶气压力下(0.30、0.40 和 0.50 MPa)的气泡尺寸,每种溶气压力下气泡测量数量均在 1 000 个以上。图 2 为不同溶气压力下气泡尺寸分布。在 0.30 MPa 条件下气泡的尺寸主要分布在 40 ~ 150 μm 之间,占全部数量的 90% 以上,0.40 和 0.50 MPa 条件下绝大部分气泡的尺寸较小,主要分布在 40 ~ 110 μm 之间,占全部的 90% 左右。因为相比于尺寸大的气泡,在接触区进行反应时,较小的气泡更易进入絮体并被其包裹,且根据斯托克斯公式可知,小气泡的上升速度低于大气泡,在浮选装置中具有更长的停留时间,因此增加了气泡与絮体碰撞的可能性^[7]。由于大气泡上升速率快,在与絮体进行碰撞时携有较强剪切力,导致絮体极易破碎。因为 0.40 MPa 和 0.50 MPa 溶气压力下产生的气泡平均粒径相差不大,考虑节能方面因素,确定最优溶气压力为 0.40 MPa。

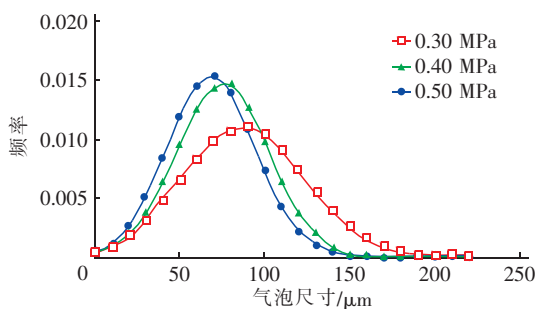


图2 不同溶气压力下气泡尺寸分布

Fig.2 Bubble size distribution in different saturator pressure

为促进投加絮凝剂情况下气泡和絮体的有效结合,探究气泡尺寸分布很有必要。在 0.40 MPa 溶

气压力时探究三种回流比(30%、40%、50%)下气泡尺寸分布情况。图 3 为不同回流比下气泡尺寸分布。在 30% 回流比下,气泡尺寸主要分布在 40 ~ 110 μm 之间,而回流比为 40% 和 50% 时,气泡尺寸均增大,主要分布在 50 ~ 150 μm 之间,分析认为随着回流比增加,气泡的数量浓度随之增大^[4],但气泡之间发生的聚并作用加剧,较多小气泡合并在一起形成大的气泡,导致气泡数量浓度降低。在接触浮选中气泡与絮体结合的主要形式有碰撞和粘附等,Flint 等研究表明气泡与絮体之间碰撞和粘附的可能性与气泡的数量浓度呈正相关,由此可得 30% 回流比最利于气浮反应进行。

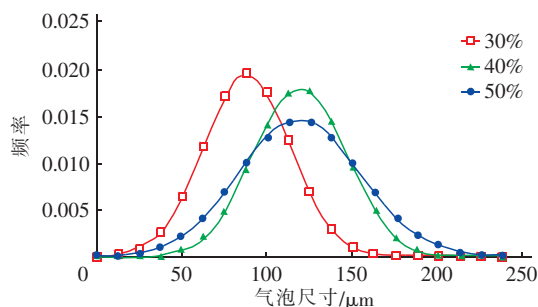


图3 不同回流比下气泡尺寸分布

Fig.3 Bubble size distribution in different reflux ratio

2.2 不同溶气压力下气载絮体对除浊率的影响

通过在不同溶气压力下投加混凝剂对浊度去除效果进行观察,并对此现象产生原因进行深入研究,混凝剂投加量为 80 mg/L。在 0.30、0.40 和 0.50 MPa 三种溶气压力下浊度去除率分别为 58%、65% 和 59%,即在 0.40 MPa 的情况下去除效果最优。图 4 为不同溶气压力下气载絮体的微观照片,可知在 0.40 MPa 溶气压力下得到的气载絮体尺寸最大。

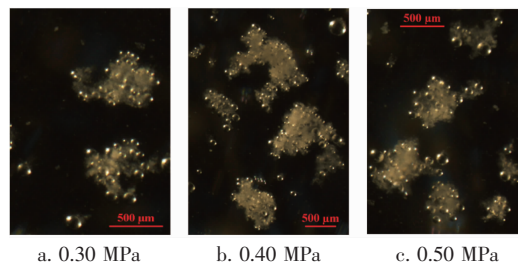


图4 不同溶气压力下气载絮体微观照片

Fig.4 Microbubble-flocs in different saturator pressure

图 5 为不同溶气压力下气载絮体的尺寸分布,每种溶气压力下气载絮体测量数量均在 300 个以上。由图 5 可知,溶气压力为 0.30 MPa 时产生的气

载絮体尺寸主要分布在 0.30 ~ 0.70 mm 之间,占总数的 95% 以上;溶气压力为 0.50 MPa 时产生的气载絮体尺寸主要分布在 0.35 ~ 0.85 mm 之间,占总数的 93% 以上;而溶气压力为 0.40 MPa 时产生的气载絮体尺寸主要分布在 0.45 ~ 0.95 mm 之间,占总数的 94% 以上,且此条件下正态分布曲线的期望值最大,即 0.40 MPa 条件下气载絮体的平均粒径最大,与图 4 结果相同。气载絮体尺寸越大,上升速率越快^[4],从而减少分离区停留时间,提高浊度去除效果,因此在 0.40 MPa 时处理效果最好。

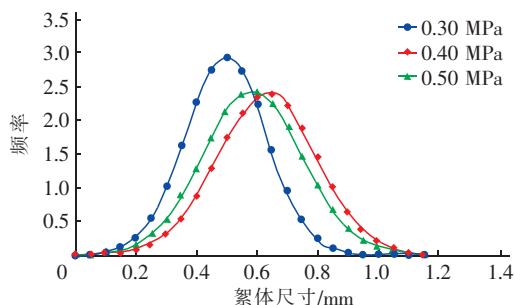


图5 不同溶气压力下气载絮体的尺寸分布

Fig.5 Microbubble-flocs size distribution in different saturator pressure

气载絮体的形成与絮体的结构和气泡的大小有关,絮体结构越松散,越易与气泡结合,更易形成较好的絮体。二维分形维数可以表征絮体的结构分布,二维分形维数越接近于 1,絮体颗粒的结构就越松散,更易与气泡结合^[5]。Chakraborti 等^[8]认为可以通过絮体颗粒投影面积和直径的关系来表征二维分形维数,其关系式为:

$$A \propto r^{D_2} \quad (1)$$

式中 A ——絮体颗粒的投影面积, μm^2

r ——絮体颗粒粒径, μm

D_2 ——二维分形维数

分别对 A 和 r 取对数作图,斜率即为二维分形维数。溶气压力为 0.30、0.40 和 0.50 MPa 时气载絮体的二维分形维数分别为 1.591 3、1.551 7 和 1.561 8,可见在溶气压力为 0.40 MPa 的情况下,二维分形维数最接近于 1。综上所述,0.40 MPa 的溶气压力是气浮反应的最适条件,在此工况下气载絮体更为松散蓬大,处理效果最优。

2.3 不同脱稳状态对气载絮体的影响

在气载絮体中,若气泡包含在絮体内部则上浮过程中不会脱落,且其形成浮渣后不易下沉,即为理

想气载絮体。为此要求有良好的混凝效果,且微气泡要尽可能多地碰撞粘附于絮体。李敏等研究认为 Zeta 电位较高的体系,质点间排斥力较大,处于相对稳定状态,不易发生聚沉;而 Zeta 电位较低的体系,质点间排斥力较小,处于不稳定状态,易发生聚沉;在等电点处质点间排斥力最小,胶体稳定性最低,最易发生聚沉。因此 Zeta 电位可作为初步判断混凝效果的指标参数,但其对气载絮体结合情况有何影响尚未探究。

有研究表明,微气泡能否与絮体发生有效结合,主要影响因素为絮体的表面性质,若絮体易被水润湿,则为亲水性,反之为疏水性,而絮体润湿性程度常用平衡接触角大小表示。平衡接触角是气、液、固三相接触时气-液界面张力线与固-液界面张力线之间的夹角,当夹角 $< 90^\circ$ 时为亲水性物质,夹角 $> 90^\circ$ 时为疏水性物质。通过测量混凝剂投量为 15、20、25、30、35、40、50、60、70 和 80 mg/L 时溶液 Zeta 电位(在反应器入口处取样)及相应的气载絮体平衡接触角,探究不同 Zeta 电位时气载絮体平衡接触角的变化。结果见图 6。当 Zeta 电位为负值时,气载絮体平衡接触角小于 90° ,随着混凝剂投量的增加,Zeta 电位由负值变为正值,气载絮体平衡接触角逐渐大于 90° 。与此同时,气载絮体平衡接触角在等电点 A 附近发生明显变化,在等电点 A 之后变化趋势有所减缓,但在电位到达 17 mV 时突然由 100° 增大至 110° ,最终保持稳定。

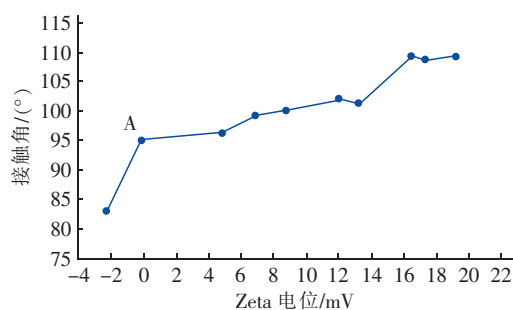


图6 不同 Zeta 电位与气载絮体平衡接触角的关系

Fig.6 Relation between different Zeta potential and contact angle of microbubble-flocs

图 7 为不同脱稳状态下气载絮体示意。Zeta 电位在 -2 mV 时,因混凝剂投加量不足而导致未能形成大片絮体,絮体小而少且无法与气泡进行充分结合;随着混凝剂投加量增多,Zeta 电位由负值变为正值,平衡接触角由小于 90° 逐渐变为大于 90° ,介于

95°~100°之间,絮体逐渐变大但整体仍处于稀疏状态,如图7(b)所示;当混凝剂的投加量达到60 mg/L即Zeta电位为17 mV时,平衡接触角迅速增大之后达到平稳,此时絮体能够与多数气泡结合,形成较大的气载絮体。虽然当Zeta电位为正值时,气载絮体平衡接触角都大于90°,均表现出一定的疏水性,但是对其作出比较后发现当Zeta电位为17 mV时平衡接触角达到最大值,混凝效果与气载絮体结合情况均可达到最优,气泡与絮体更易发生有效附着,形成更理想的气载絮体,更利于气浮反应进行。

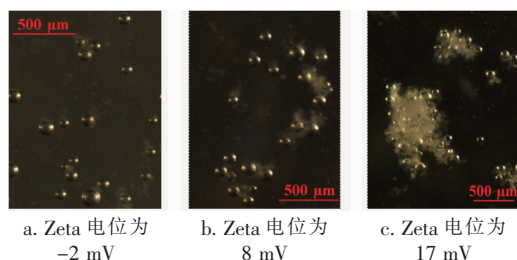


图7 不同脱稳状态下气载絮体示意

Fig. 7 Picture of microbubble-flocs in different destabilization

3 结论

① 溶气压力为0.40 MPa时,气泡尺寸分布在40~110 μm之间,占全部数量90%以上,且能耗小于0.50 MPa的,因此0.40 MPa的溶气压力最合适。在此基础上改变不同回流比得到30%回流比下的气泡平均粒径最小,且微气泡数量浓度较大,可有效增强微气泡与絮体结合。由此可得气浮工艺最佳组合为0.40 MPa溶气压力和30%回流比。

② 在0.40 MPa溶气压力条件下气载絮体平均粒径最大,二维分形维数最小,气载絮体结构更为松散蓬大,处理效果最优。

③ Zeta电位对气载絮体结合的影响与对传统混凝效果的影响不尽相同,并未在等电点处形成最佳气载絮体。且当Zeta电位为正值时气载絮体的平衡接触角更易形成钝角,当Zeta电位为17 mV时,平衡接触角达到最大值,此时的气载絮体中气泡与絮体的结合更为理想。

参考文献:

[1] Haarhoff J. Dissolved air flotation: progress and prospects

for drinking water treatment[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2008, 57(8): 555-567.

[2] Heinanen J, Jokela P. Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland[J]. Water Sci Technol, 1995, 31(3/4): 225-238.

[3] Gregory R. Summary of general developments in DAF for water treatment since 1976[A]. Proceedings Dissolved Air Flotation Conference[C]. London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, 1997.

[4] Edzwald J K. Dissolved air flotation and me[J]. Water Res, 2010, 44(7): 2077-2106.

[5] Oliveira C, Rodrigues R T, Rubio J. A new technique for characterizing aerated flocs in a flocculation-microbubble flotation system[J]. Int J Miner Process, 2010, 96(1/4): 36-44.

[6] Rodrigues R T, Rubio J. DAF—dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry[J]. Int J Miner Process, 2007, 82(1): 1-13.

[7] de Rijik S E, van der Graaf J M, den Blanken J G. Bubble size in flotation thickening[J]. Water Res, 1994, 28(2): 465-473.

[8] Chakraborti R K, Atkinson J F, Van Benschoten J E. Characterization of alum floc by image analysis[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34(18): 3969-3976.



作者简介:刘颖(1992-),女,陕西大荔人,硕士研究生,主要研究方向为臭氧气浮中絮体表面物化特性与微气泡作用机制。

E-mail: 1327717082@qq.com

收稿日期:2017-12-20