

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.034

曝气和射流的气泡分布与综合式泡沫分离效果研究

季明东 李建平 叶章颖 朱松明

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为提高循环水养殖中细微悬浮颗粒物的泡沫分离效率, 试验研究了水体盐度、进气量对曝气和射流气泡分布的影响, 根据相关泡沫分离理论, 提出结合曝气和射流协同作用的综合式泡沫分离, 并分析了颗粒物去除效果。结果表明: 随着水体盐度增加, 曝气和射流气泡的索特平均直径(SMD)减小, 持气率增大; 随着进气量减少, 曝气和射流气泡的SMD减小, 持气率也减小; 曝气气泡的SMD一般大于射流。在试验条件下, 综合式泡沫分离的持气率可达0.100, 而曝气式、射流式分别为0.031、0.074; 颗粒物去除率达到55.84%, 曝气式、射流式分别为19.06%、39.67%, 且曝气式对粒径小于50 μm 的颗粒物去除较好, 而射流式使得较大粒径颗粒物破碎成2~30 μm 的颗粒物。综合式泡沫分离可以节约能耗, 总体减少了由射流产生的粒径2~15 μm 细微颗粒物。

关键词: 循环水养殖; 细微颗粒物; 泡沫分离; 气泡; 颗粒物粒径

中图分类号: S238; S959 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)09-0304-07

OSID:



Aeration and Venturi Jet-based Bubble Distribution and Effects of Integrated Foam Fractionation

JI Mingdong LI Jianping YE Zhangying ZHU Songming

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Removing suspended solids, including uneaten feed and feces, is the crucial water treatment process for maintaining the stable operation in recirculating aquaculture system (RAS). The accumulating of fine particles in recirculating water is unavoidable. It has been a main bottleneck for the fast development of RAS. Considering the low efficiency of foam fractionation, the bubble distribution of aeration and venturi jet were studied. Results showed that both for aeration and venturi jet, with the increase of water salinity, the Sauter mean diameter (SMD) was decreased and the gas holdup was increased. With the decrease of air inflow, the SMD and gas holdup were decreased. In general, the SMD of aeration was larger than that of venturi jet. The analysis of relevant flotation theories revealed that the key factor of foam fractionation for fine particle was bubble-particle collision probability mainly depended on the bubble diameter and particle size. The surfactant was basic condition, and it affected bubble-particle adhesion probability, foamability and foam stability. However, the surfactant, as well as the size of fine particles, was uncontrolled in RAS. It suggested that bubble characteristics may be the leading factor for the foam fractionation of fine particles. In addition, bubbles with different diameters showed different removal effects of fine particles. Then, an integrated foam fractionation of the synergy between aeration and venturi jet was therefore proposed. The gas holdup could reach 0.100 (aeration and venturi jet alone were 0.031 and 0.074, respectively), and the removal efficiency of fine particles could reach 55.84% under experimental conditions (aeration and venturi jet alone were 19.06% and 39.67%, respectively). The aeration-based foam fractionation had a good effect on the removal of fine particles which were smaller than 50 μm . The venturi jet-based foam fractionation probably led to the breakup of relatively large particles, and the increasement of fine particles that were 2~30 μm . Nevertheless, the integrated foam fractionation could avoid energy consumption and generally reduce the amounts of fine particles that were 2~15 μm produced by venturi jet. As a consequence, the integrated foam fractionator can be designed and applied to the management of fine particles in actual RAS.

Key words: recirculating aquaculture; fine particle; foam fractionation; bubble; particle size

收稿日期: 2020-01-06 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701703, 2019YFD0900500)和浙江省重点研发计划项目(2019C02084)

作者简介: 季明东(1992—), 男, 博士生, 主要从事设施水产养殖技术与装备研究, E-mail: mdji@zju.edu.cn

通信作者: 朱松明(1962—), 男, 教授, 主要从事农业生物环境工程与食品非热加工新技术研究, E-mail: zhusm@zju.edu.cn

0 引言

2018年,中国水产品养殖总量4 991万t,占水产品总量的77.3%^[1],其中以池塘、浅海等传统养殖模式为主,这种养殖方式面临着水污染、效益低和病害等问题。循环水养殖(Recirculating aquaculture system, RAS)是现代设施水产养殖的典型模式,对促进渔业转型升级和渔业现代化具有重要意义^[2-3]。RAS中粪便、残饵和生物絮体等固体颗粒废物的去除是水处理系统的首要环节^[4]。由于水体湍流扰动和生物降解作用等,未能及时去除、粒径较大的悬浮颗粒物会破碎成较小的细微悬浮颗粒物,简称细微颗粒物^[5-6]。绝大多数细微颗粒物粒径小于100 μm^[7-8],一般难以通过沉淀、微滤等方法去除。养殖循环水中细微颗粒物会逐渐积累,对系统运行、水质和养殖生物产生不利影响^[8-10]。目前细微颗粒物去除效率低,不能满足密集化养殖的需要,已成为制约RAS发展和养殖效益提高的重要瓶颈^[10-11]。

泡沫分离作为一种简单、低成本的细微颗粒物去除技术已被广泛应用^[12-13]。目前,关于泡沫分离的研究主要包括对养殖水质的改善作用以及运行参数的优化,由于缺乏相应的理论基础,细微颗粒物去除效率通常较低^[14-15]。研究表明,曝气式、搅拌式和射流式泡沫分离产生的气泡对不同粒径颗粒物的去除效果有所差异^[16-18],因此气泡特性对细微颗粒物泡沫分离具有重要影响。本文结合相关泡沫分离理论,研究水体盐度、进气量对曝气和射流气泡分布的影响,以期提高细微颗粒物的去除效率。

1 曝气和射流的气泡分布

1.1 试验系统和方法

图1为气泡发生试验系统。以透明有机玻璃制成泡沫分离装置,设有进水和出水口。外径25 mm、内径10 mm、长30 cm的微孔纳米曝气管,固定在泡沫分离装置的内部。曝气管曝气与文丘里管射流出水的高度相同,即气泡在泡沫分离装置内出现的高度基本一致。功率为138 W的增氧泵(ACO-008型),产生的气体经过调气阀和流量计(SIARGO-MF5712型,量程为0~200 L/min)通入曝气管。6分文丘里管的公称直径为25 mm,射流水泵的功率为280 W,空气经过调气阀和流量计(SIARGO-MF5706型,量程为0~10 L/min)被吸入文丘里管的进气口。在泡沫分离装置的液面O以下约15 cm处垂直设置标尺,其长度为1 cm。拍摄气泡所用的数码相机为索尼A7M3,搭配索尼FE90 mm F2.8微

距镜头,6组功率为17 W的飞利浦LED灯作光源。

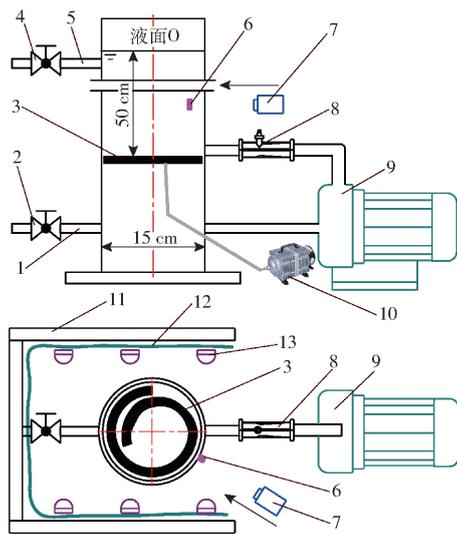


图1 气泡发生试验系统原理图

Fig. 1 Experimental system for bubble generating

1. 出水口
2. 出水球阀
3. 曝气管
4. 进水球阀
5. 进水口
6. 标尺
7. 相机
8. 文丘里管
9. 射流水泵
10. 曝气增氧泵
11. 支架
12. 白色幕布
13. LED灯

根据实际水产养殖情况,设计了4种水体盐度,0%、15‰、20‰和25‰,通过海水晶和淡水合成,水体温度为25℃,pH值为8.2。首先分别在曝气管曝气进气量约为37.60 L/min、文丘里管射流进气量约为3.32 L/min的条件下,依次引入4种盐度的水体,水位达到液面O,拍摄各水体盐度的气泡,通过直尺测定在气泡发生时实际液位到初始液面O的高度 h (水位上升高度,单位cm)。另外在水体盐度20‰的条件下,通过曝气管的调气阀分别使得曝气进气量约为23.05、10.50 L/min,以及通过文丘里管的调气阀分别使得射流进气量约为2.17、1.03 L/min,拍摄各进气量的气泡,同样通过直尺测定在气泡发生时实际液位到初始液面O的高度 h 。由于曝气和射流产生的气泡上浮,可认为泡沫分离装置中绝大多数气泡在曝气管的上方,气泡和颗粒接触区的高度为50 cm(初始液面O与曝气管距离),再结合 h ,估算不同试验条件下的持气率 ε (气泡与水的体积比)。

通过ImageJ软件完成图像处理。打开所需处理的气泡图像,先将RGB图像分割颜色通道(Split channels)转换成8 bit图像,设定全局阈值进行二值化,找到独立的气泡,再进行模糊过滤,从而能准确辨别气泡边界,拍摄的气泡图像中均有设置的标尺,从而可统计气泡的尺寸。各试验条件下处理的气泡图像均超过5幅,气泡尺寸数据在Excel 2016中统计和处理,气泡尺寸分布图在OriginPro 9.1中完成,各气泡尺寸分布的索特平均直径(Sauter mean

diameter, SMD) D_{32} 计算式为

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (1)$$

式中 D_i ——第 i 个气泡直径, mm

1.2 不同水体盐度的气泡分布

曝气、射流在 4 种水体盐度的气泡尺寸分布分别如图 2、3 所示, 气泡的 SMD 和持气率如表 1 所示。随着水体盐度的增加, 曝气和射流气泡尺寸分

布的峰值直径均降低(向左偏移), 并且气泡的 SMD 减小, 持气率增大。对于同一水体盐度, 曝气气泡的 SMD 和持气率大于射流。在水体盐度为 0 时, 射流气泡的 SMD 为 2.078 1 mm, 而持气率较小, 为 0.011; 虽然曝气气泡的持气率为 0.132, 但 SMD 较大(2.640 8 mm), 这可能是淡水 RAS 中泡沫分离效率低的重要原因, 即由于缺少电解质, 形成气泡时表面张力低, 因而气泡尺寸大^[13]。另外水体盐度从 0 到 25‰, 射流气泡的 SMD 减小和持气率增大幅度大于曝气, 说明水体盐度对射流气泡分布的影响可能大

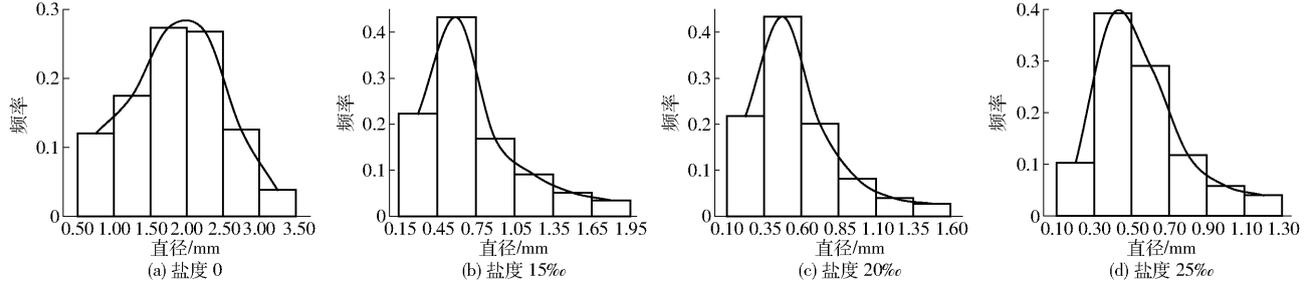


图 2 曝气在不同水体盐度的气泡尺寸分布

Fig. 2 Bubble size distribution of aeration in different water salinities

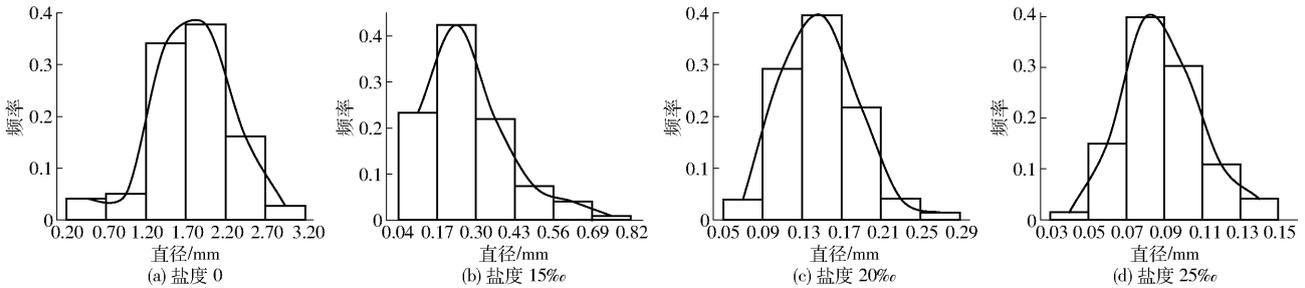


图 3 射流在不同水体盐度的气泡尺寸分布

Fig. 3 Bubble size distribution of venturi jet in different water salinities

表 1 不同水体盐度的 SMD 和持气率

Tab. 1 SMD and gas holdup of different water salinities

盐度/ ‰	曝气		射流	
	SMD/mm	持气率	SMD/mm	持气率
0	2.640 8	0.132 ± 0.002	2.078 1	0.011 ± 0.001
15	2.408 8	0.141 ± 0.001	0.469 9	0.052 ± 0.003
20	1.987 7	0.152 ± 0.002	0.170 1	0.074 ± 0.001
25	1.668 2	0.162 ± 0.002	0.097 7	0.097 ± 0.003

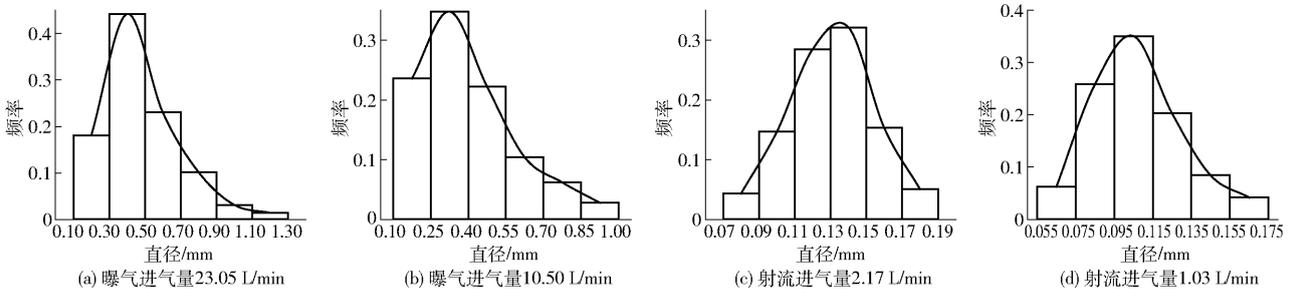


图 4 曝气和射流在不同进气量的气泡尺寸分布

Fig. 4 Bubble size distribution of aeration and venturi jet in different air inflows

于曝气。

1.3 不同进气量的气泡分布

在水体盐度 20‰ 下, 曝气进气量为 23.05、10.50 L/min 和射流进气量为 2.17、1.03 L/min 形成的气泡尺寸分布如图 4 所示, 气泡的 SMD 和持气率如表 2 所示。随着进气量的减少, 结合图 2、3 和表 1 可得, 曝气和射流气泡尺寸分布的峰值直径均降低, 气泡的 SMD 减小, 且持气率也减小。此外曝

表2 不同进气量的 SMD 和持气率

Tab.2 SMD and gas holdup of different air inflows

曝气进气量/ SMD/ (L·min ⁻¹) mm			射流进气量/ SMD/ (L·min ⁻¹) mm		
持气率			持气率		
23.05	1.356 4	0.088 ± 0.002	2.17	0.141 4	0.070 ± 0.001
10.50	0.659 9	0.031 ± 0.001	1.03	0.122 1	0.065 ± 0.001

气气泡的 SMD 和持气率减小幅度大于射流,说明进气量对曝气气泡分布的影响可能大于射流,这是曝气气泡尺寸较大引起的。

2 泡沫分离理论与综合式泡沫分离

在矿业浮选和废水处理领域,通常将泡沫分离(气浮)过程分为气泡与颗粒的碰撞、黏附和脱附3个过程^[19-21]。单颗粒通过单气泡的分离效率为

$$E = E_c E_a (1 - E_d) \quad (2)$$

式中 E ——分离效率, %

E_c ——碰撞效率, %

E_a ——黏附效率, %

E_d ——脱附效率, %

气泡与颗粒在气浮区内相互靠近发生碰撞,颗粒直径、气泡尺寸这两个因素表现为气泡对颗粒的截留效应在早期碰撞机理的研究中占主导地位,而颗粒重力和惯性作用对碰撞效率的影响较小^[21]。随着微湍流理论发展,斯托克斯定律表明碰撞过程中气泡和颗粒之间会形成液膜,流体动力学阻力增大进而会抑制碰撞效率。当前微湍流对碰撞作用还不能定量描述,但试验证实较大的湍动能和湍流耗散率可以抑制细微颗粒随流线运动,从而提高碰撞效率^[21-22]。

气泡与颗粒在碰撞接触之后,颗粒在气泡表面滑动,其间的液膜在表面力作用下变薄,当达到临界厚度时液膜破裂,随后气泡、颗粒和水体溶液形成三相接触线并不断扩大至气泡颗粒絮体形成稳定的润湿周边。接触时间为颗粒可在气泡表面的滑动时间,诱导时间为液膜变薄达到临界厚度所需时间,且仅当接触时间大于诱导时间,才能发生有效黏附^[23-24]。根据胶体稳定性理论,黏附过程中表面力主要是范德华力和静电双层力。由于液膜厚度极小,范德华力通常是排斥力;另外研究测得气泡和颗粒表面常带负电,静电双层力也是排斥力。因而气泡和颗粒之间势必还存在疏水作用力,表现为吸引力且是黏附过程的主导驱动力^[23]。颗粒疏水性强,会增大疏水作用力,减小诱导时间,从而提高黏附效率。

气泡与颗粒碰撞、黏附后形成的气泡颗粒絮体在外力作用下会发生脱附。由于细微颗粒脱附力较小,脱附效率较低^[20,25]。另外气泡颗粒絮体在气

浮区内上升到气液分离界面时,会形成一定厚度的液膜所包围的气泡聚集体即产生泡沫,起泡性和形成泡沫的稳定性是泡沫分离效率的关键^[26]。表面活性剂可以吸附在气泡液膜上降低表面张力,也可以在气液分离界面上增大水体溶液的表面粘度,从而提高起泡性和稳定性^[26-27]。

总体上细微颗粒物的泡沫分离,脱附效率较低,起泡性和稳定性受表面活性剂的影响;黏附效率主要受气泡和颗粒表面特性的影响,而颗粒表面特性也取决于表面活性成分。研究表明细微颗粒物泡沫分离效率较低的主要原因是碰撞效率低^[28-29]。另外在 RAS 中表面活性剂一般无法控制,因而认为对于细微颗粒物泡沫分离的优化,关键是提高碰撞效率。试验得出细化气泡提高泡沫分离效率时需要较长的水力停留时间,并且细微颗粒物泡沫分离效率存在极值,这可能与表面活性剂含量有关,或者细化气泡使得微湍流发生变化,气泡与颗粒物的碰撞效率受到影响^[18]。

调查发现当前海水 RAS 实际生产中的大型泡沫分离器,由于水体循环流量大,分离高度往往不够(即高径比小),此时常配2台或以上的射流水泵和文丘里管组合,但是养殖管理者会因射流功率大或效果不明显而减少使用,这势必影响细微颗粒物去除。水处理装备运行能耗高无疑也是限制 RAS 的重要因素,而一般情况下曝气形成气泡的运行成本相对低于射流。在水体盐度为 15‰~25‰时,曝气气泡的尺寸大于射流,且曝气进气量较高时可获得较大的持气率;另外由于大尺寸气泡内附加压强较小,在气液分离界面上形成泡沫后的稳定性较好^[26]。据此认为可以结合曝气和射流的优势,以曝气形成大尺寸气泡,射流形成细微气泡,同时获得较大的持气率。此外一般曝气形成气泡的湍动能较大,这可能有利于细微颗粒物与气泡之间的碰撞效率。

在泡沫分离装置中,同时开启曝气和射流形成混合气泡。在曝气进气量为 37.60、23.05 L/min 时,气泡尺寸大,若与射流气泡混合时可能存在较多的气泡合并,并且混合形成的气泡尺寸较大,可能会不利于细微颗粒物与气泡之间的碰撞。因而在试验条件下,曝气和射流协同作用的综合式泡沫分离选择曝气进气量 10.50 L/min 和射流进气量 3.32 L/min,形成混合气泡的 SMD 为 0.574 0 mm,持气率为 0.100,气泡尺寸分布如图 5 所示。

3 曝气、射流与综合式泡沫分离效果

3.1 试验设计

在珍珠龙胆石斑鱼的 RAS 中,取孔径 60 μm 微

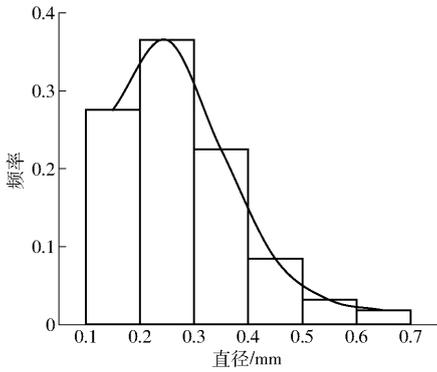


图5 曝气与射流混合的气泡尺寸分布

Fig.5 Bubble size distribution of mixing aeration and venturi jet

滤处理后的养殖水体引入储水桶中,经搅拌均匀后作为泡沫分离原样。在泡沫分离装置中分别进行曝气式(进气量 10.50 L/min)、射流式(进气量 3.32 L/min)与综合式(曝气进气量 10.50 L/min 和射流进气量 3.32 L/min),共 3 组泡沫分离批处理试验,水力停留时间为 2 min,每组重复 3 次。

原样和泡沫分离后水样的颗粒物质量浓度按照国家标准方法(GB 17378.4—1998)测定。对于曝气式泡沫分离,增氧泵的功率为 138 W,与曝气管组合时最大进气量为 37.60 L/min,因此认为进气量 10.50 L/min 的功率为 38.54 W(在实际生产中,由三相电漩涡风机等产生相同气压和风量所需的功率低于该值)。射流式泡沫分离射流水泵的功率为 280 W。因而对于综合式泡沫分离,曝气进气量 10.50 L/min 和射流进气量 3.32 L/min 所需的总功率为 318.54 W。颗粒物去除率和单位去除率所需的能耗功率计算式为

$$\eta = \frac{C_o - C_{out}}{C_o} \times 100\% \quad (3)$$

$$\phi = \frac{P}{\eta} \quad (4)$$

式中 η ——颗粒物去除率, %

C_o ——原样的颗粒物质量浓度, mg/L

C_{out} ——泡沫分离后的颗粒物质量浓度, mg/L

ϕ ——单位去除率能耗, W/%

P ——泡沫分离的气泡发生功率, W

原样和泡沫分离后水样的颗粒物粒径分布(Particle size distribution, PSD)通过丹东百特仪器有限公司的 Bettersizer3000PLUS 型激光粒度仪测定。该仪器可测定水样中颗粒物的折射率, PSD 测量结果的重复性和准确性为 0.5%, 可测粒径范围是 0.01 ~ 3 500 μm 。将试验测得的颗粒物粒径体积分布范围 1 ~ 250 μm , 划分为 100 个呈对数增加的粒径区间 I 。为分析曝气、射流和综合式泡沫分离

的不同粒径颗粒物去除效果,计算原样和泡沫分离后水样的 I 粒径区间颗粒物体积分数差(颗粒物粒径体积分布差),计算式为

$$\Delta V_I = V_{I-o} - V_{I-out} \quad (5)$$

式中 ΔV_I —— I 粒径区间的体积分数差, %

V_{I-o} ——原样的 I 粒径区间体积分数, %

V_{I-out} ——泡沫分离后的 I 粒径区间体积分数, %

3.2 颗粒物去除效果

表 3 为颗粒物质量浓度和去除率(包括单位去除率能耗)。图 6 为原样和泡沫分离后的颗粒物粒径体积分布及差值。结合表 3 和图 6, 3 个处理原样的颗粒物质量浓度之间相差较小且颗粒物粒径体积分布相似,因而认为试验条件下曝气、射流和综合式泡沫分离的原样相似。

表 3 颗粒物质量浓度和去除率

Tab.3 Solids mass concentration and removal efficiency

处理	颗粒物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		颗粒物去除率/%	单位去除率能耗/($\text{W} \cdot \%^{-1}$)
	原样	泡沫分离后		
曝气	34.50 ± 2.83	27.92 ± 1.26	19.06 ± 2.00	2.04 ± 0.22
射流	34.67 ± 1.41	20.91 ± 1.11	39.67 ± 0.63	7.06 ± 0.11
综合	34.23 ± 1.67	15.11 ± 1.33	55.84 ± 1.49	5.71 ± 0.15

在试验条件下,曝气式泡沫分离后水样的颗粒物质量浓度较高,颗粒物去除率较小,这是由于曝气式气泡的 SMD 较大且持气率较小。根据泡沫分离理论,由于射流式气泡的 SMD 小于曝气式且持气率大于曝气式,在气泡尺寸较小、数量多时碰撞效率较高^[21-22],因而射流式泡沫分离的颗粒物去除率高于曝气式。另外综合式泡沫分离,虽然气泡的 SMD 大于射流式而小于曝气式,但持气率接近于曝气式与射流式之和,认为综合式泡沫分离由于同时包括曝气和射流形成气泡,结合了曝气式和射流式泡沫分离的优势,因而综合式泡沫分离后水样的颗粒物质量浓度较低,颗粒物去除率也接近于曝气式与射流式之和。

对于曝气式泡沫分离,粒径小于 50 μm 的颗粒物体积分数差不小于 0(图 6a),此外认为曝气对颗粒物的破碎作用较弱,因而曝气式泡沫分离对粒径小于 50 μm 的颗粒物去除较好。这与 CHEN 等^[16]研究的(气石)曝气式泡沫分离结果基本一致。根据泡沫分离理论,这可能由于气泡尺寸较大,易吸附较小粒径细微颗粒物(重力较小)形成稳定的气泡颗粒絮体,且这部分颗粒物表面也可能更易含有表面活性物质^[26]。另外粒径 60 ~ 200 μm 的颗粒物体积分数差小于 0,一方面由于曝气式泡沫分离对粒径小于 50 μm 的颗粒物去除较好,另一方面可能是

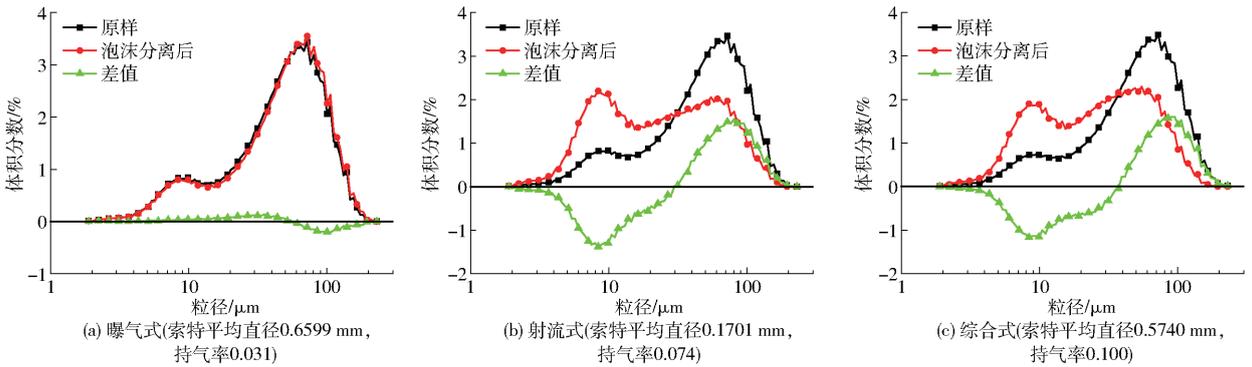


图6 原样和泡沫分离后的颗粒物粒径体积分布及差值

Fig. 6 Particle size-volume distribution of original sample and fractionated water along with its distribution difference

气泡颗粒絮体在上升过程中破裂合并,引起了颗粒物凝聚。

对于射流式泡沫分离,粒径 $2 \sim 30 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数差小于0(图6b),若颗粒物在泡沫分离前后密度均匀的情况下,结合颗粒物质量浓度,表明射流式泡沫分离会使得较大粒径的颗粒物破碎成粒径 $2 \sim 30 \mu\text{m}$ 的颗粒物(由射流水泵和文丘里管射流引起),这可能也是粒径 $30 \sim 200 \mu\text{m}$ 颗粒物体积分数减小的原因之一。另外,由于气泡尺寸较小,界面能高,气泡数量多(持气率相对较大)可能也有利于较大粒径颗粒物的去除。

对于综合式泡沫分离,粒径 $2 \sim 40 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数差小于0;比较图6b和图6c,综合式泡沫分离后水样中粒径 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数小于射流式,虽然本试验条件下的射流对综合式泡沫分离的影响较大,但是综合式也包括了曝气,因而提高了对粒径 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 颗粒物的去除。

总体上,曝气式泡沫分离虽然颗粒物的单位去除率能耗较低,但是去除率也较低;而射流式泡沫分离虽然去除率相对较高,但是会对较大粒径的颗粒物产生破碎作用(单位质量粒径较小的细颗粒具有较大的表面积,并与养殖循环水的接触面积大,向水中释放可溶性废物的效率高,且研究证实细颗粒水平与细菌活性呈线性正相关^[30-32],因而破碎产生的

细颗粒可能对系统性能和养殖生物安全生长不利),而且单位去除率能耗也较高,导致运行成本增加。本试验条件下的综合式泡沫分离,颗粒物去除率较高,同时减少了射流产生的较小粒径细微颗粒物,并且单位去除率能耗也降低。因而认为对于海水RAS实际生产在达到水体循环流量的条件下,可通过综合式泡沫分离来提高细微颗粒物去除率,并且降低系统的运行成本。

4 结论

(1)提出了结合曝气和射流协同作用的综合式泡沫分离。盐度对射流气泡分布的影响较大,而进气量对曝气气泡分布的影响较大。曝气气泡的SMD大于射流气泡的SMD(除水体盐度为0)。在试验条件下,综合式泡沫分离的持气率达到0.100。

(2)曝气式泡沫分离对粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 的颗粒物去除效果较好;射流式泡沫分离对较大粒径的颗粒物产生破碎作用,使粒径 $2 \sim 30 \mu\text{m}$ 的颗粒物相比于原样增加;综合式泡沫分离减轻了由射流产生的破碎作用,即去除了部分粒径 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 的细微颗粒物。

(3)综合式泡沫分离的颗粒物去除率接近曝气式与射流式去除率之和,并且节约了能耗。在海水RAS实际生产中,可通过综合式泡沫分离器的设计应用达到降低成本、提高细微颗粒物去除率的目的。

参 考 文 献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2019.
- [2] 沈加正,史明明,阮震杰,等. 变速流操作调控循环水养殖系统水质效果研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):309-314. SHEN Jiazheng, SHI Mingming, RUAN Yunjie, et al. Effects of variable flow rates on water qualities in recirculating aquaculture system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 309-314. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160742&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.042. (in Chinese)
- [3] 尹宝全,曹闪闪,傅泽田,等. 水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):1-13. YIN Baoquan, CAO Shanshan, FU Zetian, et al. Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.001. (in Chinese)
- [4] CRIPPS S J, BERGHEIM A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems[J].

- Aquacultural Engineering, 2000, 22(1-2): 33-56.
- [5] VAN R J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 49-56.
- [6] WONG K, PIEDRAHITA R H. Settling velocity characterization of aquacultural solids[J]. Aquacultural Engineering, 2000, 21(4): 233-246.
- [7] DOLAN E, MURPHY N, O'HEHIR M. Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 56:42-50.
- [8] COUTURIER M, TROFIMENCOFF T, BUIL J U, et al. Solids removal at recirculating salmon-smolt farm[J]. Aquacultural Engineering, 2009, 41(2): 71-77.
- [9] DAVIDSON J, SUMMERFELT S T. Solids removal from a coldwater recirculating system-comparison of a swirl separator and a radial-flow settler[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 33(1): 47-61.
- [10] BADIOLA M, MENDIOLA D, BOSTOCK J. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 51(6): 26-35.
- [11] MARTINS C I M, EDING E H, VERDEGEM M C J, et al. New development in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability[J]. Aquacultural Engineering, 2010, 43(3): 83-93.
- [12] SUZUKI Y, MARUYAMA T, NUMATA H. Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: towards zero emission[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 29(3): 165-182.
- [13] 郑瑞东,李田,刘鹰.泡沫分离法在工厂化养殖废水处理中的应用研究[J].渔业现代化,2005,32(2):33-35.
- [14] 单建军,宋奔奔,庄保陆,等.泡沫分离法在罗非鱼半咸水循环水系统中的水质净化研究[J].渔业现代化,2013,40(3): 1-4.
- SHAN Jianjun, SONG Benben, ZHUANG Baolu, et al. Water purification effect of foam fraction method in a brackish recirculating aquaculture system[J]. Fishery Modernization, 2013, 40(3): 1-4. (in Chinese)
- [15] BARRUT B, BLANCHETON J P, CALLIER M, et al. Foam fractionation efficiency of a vacuum airlift—application to particulate matter removal in recirculating systems[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 54:16-21.
- [16] CHEN S, TIMMONS M B, BISOGNI J J, et al. Suspended solids removal by foam fractionation[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1993, 55(2): 69-75.
- [17] BRAMBILLA F, ANTONINI M, CECCUZZI P, et al. Foam fractionation efficiency in particulate matter and heterotrophic bacteria removal from a recirculating seabass (*Dicentrarchus labrax*) system[J]. Aquacultural Engineering, 2008, 39(1): 37-42.
- [18] 季明东,李建平,叶章颖,等.泡沫分离器去除养殖循环水中不同粒径细微颗粒物的效果[J].农业工程学报,2018, 34(19):202-207.
- Ji Mingdong, Li Jianping, Ye Zhangying, et al. The experimental research of fine particles foam fractionation in recirculating aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 202-207. (in Chinese)
- [19] RALSTON J, DUKHIN S S. The interaction between particles and bubbles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1999, 151(1-2): 3-14.
- [20] WANG G, NGUYEN A V, MITRA S, et al. A review of the mechanisms and models of bubble-particle detachment in froth flotation[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 170: 155-172.
- [21] BRABCOVA Z, KARAPANTSIOS T, KOSTOGLU M, et al. Bubble-particle collision interaction in flotation systems[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 473: 95-103.
- [22] NGUYEN A V, AN-VO D A, TRAN-CONG T, et al. A review of stochastic description of the turbulence effect on bubble-particle interactions in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 156: 75-86.
- [23] XING Y, GUI X, PAN L, et al. Recent experimental advances for understanding bubble-particle attachment in flotation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 105-132.
- [24] ALBIJANIC B, OZDEMIR O, NGUYEN A V, et al. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation[J]. Advance in Colloid and Interface Science, 2010, 159(1): 1-21.
- [25] WANG G, EVANS G M, JAMESON G J. Bubble-particle detachment in a turbulent vortex I: experimental[J]. Minerals Engineering, 2016, 92: 196-207.
- [26] WANG J, NGUYEN A V, FARROKHPAY S. A critical review of the growth, drainage and collapse of foams[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2016, 228: 55-70.
- [27] KRUGLYAKOV P, KARKASHEV S, NGUYEN A V, et al. Foam drainage[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2008, 13(3): 163-170.
- [28] TAO D. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles—a review[J]. Separation Science and Technology, 2004, 39(4): 741-760.
- [29] SOKOVNIN O M, ZAGOSKINA N V, ZAGOSKIN S N. Determination of the collision probability between bubbles and nonspherical particles in flotation[J]. Chemical Engineering Technology, 2014, 37(11): 1964-1974.
- [30] MCMILLAN J D, WHEATON F W, HOCHHEIMER J N, et al. Pumping effect on particle sizes in a recirculating aquaculture system[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(1): 53-59.
- [31] FERNANDES P M, PEDERSEN L F, PEDERSEN P B. Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2015, 65: 17-26.
- [32] GREGERSEN K J J, PEDERSEN P B, PEDERSEN L, et al. Micro particles and microbial activity in Danish recirculating rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farms[J]. Agricultural Engineering, 2019, 84:60-66.