

文章编号: 1004 - 7271 (2008) 01 - 0113 - 05

· 研究简报 ·

泡沫分离器在循环水养殖系统中的 水处理效果

孙大川, 吴嘉敏

(上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090)

摘要:对泡沫分离器生产运用中的注意事项进行了探讨,并对生产中不同工况下的水处理效果进行比较,结果表明泡沫分离器对水体中微小悬浮颗粒、溶解有机物有良好去除效果,并能脱去部分氨氮。在不同工况下,随着进水流量的减小,泡沫分离器对这三种水质指标的去除效率逐渐增加,分别由水力停留时间为 2.5 min 时的 45.15%、18.71%、8.50%,增加到水力停留时间为 3.8 min 时的 72.66%、34.11%、18.89%;同时,泡沫分离器不同工况对流经水体的溶解氧和 pH 都能有很好的调节作用。

关键词:循环水养殖系统;不同工况;水处理效果;泡沫分离器

中图分类号:S 951 文献标识码:A

Water treatment efficiency of foam fractionator in the recirculating aquaculture system

SUN Da-chuan, WU Jia-min

(College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: In this paper, the water treatment efficiency of foam fractionator under different work conditions was studied; at the same time, the working principle and the functions of it were discussed. The result of experimentation indicated that the foam fractionator was in effect at removing of micro-suspended solids and COD, and also could take off some $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Under the different conditions, the water treatment efficiency of foam fractionator also increased along with the reducing of the water influent. The removal rates of SS, COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ are increased respectively from 45.15%, 18.71% and 8.50% at 30 m^3/h influent (HRT: 2.5 min) to 72.66%, 34.11% and 18.89% at 20 m^3/h influent (HRT: 3.0 min); besides those, the foam fractionator also have good modulation and stabilization functions to DO and pH.

Key words: recirculating aquaculture system; different working conditions; water treatment efficiency; foam fractionator

泡沫分离器(foam fractionator)是国内外循环水养殖系统中普遍采用的新型水处理设备^[1-4]。它利用泡沫分离原理,可有效地从养殖系统中去除溶解有机物、固体悬浮颗粒、氨氮,并能去除腐殖物质增加

收稿日期:2007-03-04

基金项目:上海市农委“四新”推广项目(沪农科推字(2004)第1-6-5号);国家科技支撑计划(2006BAD03B06);上海市重点学科建设项目(Y1101)

作者简介:孙大川(1981-),男,江苏徐州人,助教,主要从事设施渔业水处理及健康养殖工艺方面的研究。E-mail: dachuans@sohu.com

通讯作者:吴嘉敏, Tel: 021-65710018

水质清澈程度,去除有机酸稳定 pH,另外还可以增加溶解氧,若与臭氧发生器联合使用,同时还可以起到杀菌消毒的作用^[5-6]。关于泡沫分离器的水处理效果,国内外已多有报道^[5-8],本实验根据生产性养殖系统的水质特征,研究了泡沫分离器的运行控制参数,为生产性养殖系统的运行管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 系统介绍

采用上海水产大学设施渔业研究所设计的宜昌三峡现代渔业有限公司循环水养殖系统(图 1)。设施渔业车间占地 1 500 m²,其中单个生产系统中养殖面积 250 m²,系统水处理单元构成:固液分离装置、流着净化渠、生物滤器(浮球式和浸没式)、泡沫分离器(结构如图 2 所示)以及紫外消毒装置。其中泡沫分离器是生物滤器之后的三级水处理单元。

1.2 本试验中泡沫分离器相关技术参数

接触反应器的主体 PVC 材质外壳直径 90 cm,总高 250 cm,其中接触室主体高 200 cm,有机玻璃泡沫收集槽高 50 cm;进水口直径 10 cm,进水沿接触室内壁切线方向冲击进入,在接触室内形成旋转水流,使气-液接触时间延长,进水量可控,最大进水流量为 30 m³/h,最小为 20 m³/h,进水提水用离心泵功率 1.5 kW,扬程 2 m,最大流量 45 m³/h;进气管直径 5 cm,连接文氏管制造气泡,气泡直径 0.8 mm 左右,产泡负压 0.3 Pa,产泡进水用离心泵功率 2.2 kW,扬程 3 m,流量 12.5 m³/h;连接管件均为 PVC 材质。

1.3 养殖品种及日常管理

系统养殖品种为澳洲宝石鱼(*Scortum barcoo*),放养密度为 50 尾/m³(宝石鱼平均规格约 300 g)。日投饵率为鱼体重的 3%~4%,所用饵料为统一配合饲料。养殖水体溶氧维持在 6~8 mg/L,水温(25±0.5)℃,pH 6.5~7.5。

1.4 试验设计

实验设计:连续 10 d,每天下午 2:00 投饵后 1 h 开启泡沫分离器,进水流量分别调整至 30 m³/h、25 m³/h 和 20 m³/h 三种工况,以流量、接触室体积计算其对应的水力停留时间(HRT)分别为:2.5、3.0 和 3.8 min,运行稳定后于进出水口采集水样,每样设一个重复。每次工况转换前放空接触室内的水,待开启稳定工作 5 min 后采水样。

测定指标有 SS、COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、pH、DO 和温度。

1.5 检测方法

SS:重量法,为防止有机物组分在过热中挥发,烘干时温度控制在 60℃ 烘干时间为 2 h,其它程序符合 GB/T 11901-89; COD:重铬酸钾法; NH₄⁺-N:奈氏试剂法; NO₂⁻-N:重氮-偶氮比色法; pH: Phep HI98127 型酸度计, DO 和温度: YSI550A 多功能溶氧仪。

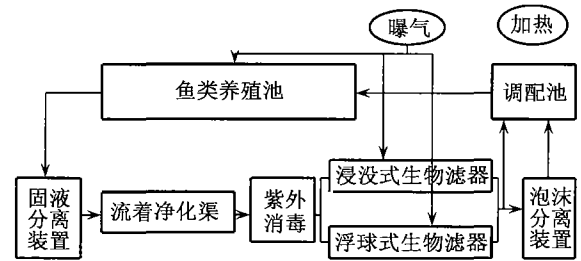


图 1 RAS 结构配置

Fig. 1 Structure of system

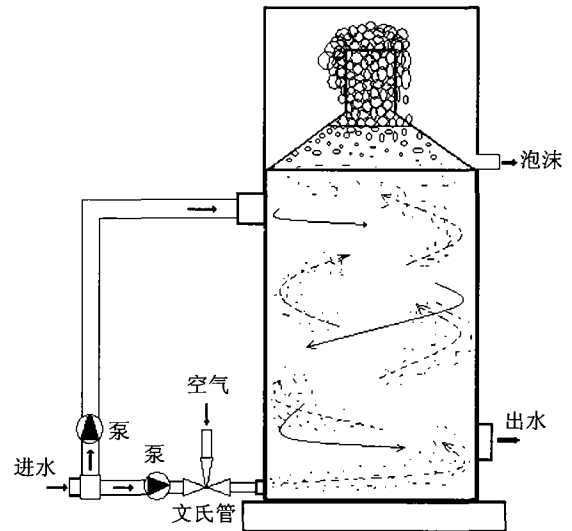


图 2 泡沫分离器示意图

Fig. 2 The main structure of the foam fractionator

2 结果

2.1 在不同工况下对水中微小固体悬浮颗粒的去除效果

由表 1 数据比较分析得出,在不同工况下,随着水力停留时间的延长,泡沫分离器对不同规格微小固体悬浮颗粒物的去除效率逐渐增加。当水力停留时间增加到 3.8 min 时,泡沫分离器对 60 μm 和 20 μm 以上悬浮颗粒物的去除率分别达到 72.66% 和 67.60%,由方差分析得出,各工况之间对微小固体悬浮颗粒物的去除率差异性达到极显著水平(60 μm 以上 SS 去除率: $F = 7.639 > F_{0.05} = 3.354$, $P < 0.05$; 20 μm 以上 SS 去除率: $F = 4.219 > F_{0.05} = 3.354$, $P < 0.05$)。

表 1 不同工况下泡沫分离器对不同规格固体悬浮颗粒物的去除效果

Tab. 1 The removal rate of micro-suspended solids by foam fractionator under different conditions

工况	60 μm 以上 SS			20 μm 以上 SS		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)
2.5 min	8.2 \pm 1.4	4.5 \pm 1.0	45.15 ^a	10.3 \pm 2.3	5.5 \pm 1.4	45.63 ^a
3.0 min	8.2 \pm 1.4	3.0 \pm 1.4	65.95 ^b	10.3 \pm 2.3	4.1 \pm 1.5	60.55 ^b
3.8 min	8.2 \pm 1.4	2.4 \pm 1.4	72.66 ^c	10.3 \pm 2.3	3.4 \pm 1.6	67.60 ^c

注:进出水口数值表示为平均值 \pm 标准差,检测指标去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度) / 进水口浓度,指标变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度,水样数为 20。以上去除效率及指标变化均为平均值,注角字母不同,表示存在差异

2.2 在不同工况下对流经水体中其它水质指标的影响

2.2.1 各工况下泡沫分离器对 COD、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除效果

养殖水体中的 COD、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 是养殖系统中的常测指标。由表 2 数据比较得出,在不同工况下,随着进水流量的减小,泡沫分离器对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除效率逐渐增加,当水力停留时间由 2.5 min 增加到 3.8 min 时,泡沫分离器对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率分别由 18.71% 和 8.50% 增加到 34.11% 和 18.89%,由方差分析得出,各工况之间对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率差异性也达到极显著水平(COD 去除率: $F = 7.041 > F_{0.05} = 3.354$, $P < 0.05$; NH_4^+ -N 去除率: $F = 14.098 > F_{0.05} = 3.354$, $P < 0.05$)。在测试中,泡沫分离对流过接触室水体中的 NO_2^- -N 的浓度基本没有影响,最大去除率仅为 1% 左右。

表 2 不同工况下泡沫分离器对几种水质指标的处理效果

Tab. 2 The water treatment efficiency and index change by foam fractionator under different conditions

工况	COD 浓度			DO 浓度			pH		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	变量 (mg/L)	进水	出水	变量
2.5 min	12.66 \pm 1.08	10.24 \pm 0.93	18.71 ^a	5.37 \pm 0.49	6.97 \pm 0.33	1.60	6.6 \pm 0.12	6.7 \pm 0.12	0.1
3.0 min	12.66 \pm 1.08	9.19 \pm 0.82	26.86 ^b	4.50 \pm 0.71	6.60 \pm 0.52	2.10	6.6 \pm 0.12	6.7 \pm 0.14	0.1
3.8 min	12.66 \pm 1.08	8.27 \pm 0.79	34.11 ^c	5.65 \pm 0.68	7.39 \pm 0.15	1.74	6.5 \pm 0.04	6.6 \pm 0.04	0.1
工况	NH_4^+ -N 浓度			NH_2^- -N 浓度					
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)			
2.5 min	0.278 \pm 0.025	0.254 \pm 0.019	8.50 ^a	0.091 \pm 0.013	0.091 \pm 0.013	0.15 ^a			
3.0 min	0.278 \pm 0.025	0.238 \pm 0.017	14.21 ^b	0.091 \pm 0.013	0.091 \pm 0.012	0.11 ^a			
3.8 min	0.278 \pm 0.025	0.225 \pm 0.013	18.89 ^c	0.091 \pm 0.013	0.090 \pm 0.014	1.34 ^b			

注:进出水口数值表示为:平均值 \pm 标准差,检测指标去除率 = (进水口浓度 - 出水口浓度) / 进水口浓度,指标变量 = 出水口浓度 - 进水口浓度,水样数为 20。以上去除效率及指标变化均为平均值,注角字母不同,表示存在差异

2.2.2 各工况下泡沫分离器对其它水质参数的影响

由于气泡在上浮过程中可以向周围水体中散逸氧气,所以泡沫分离器对流经水体的溶解氧有很好的调节作用,不同工况下出水 DO 都有不同程度的增加,增量在 2 mg/L 左右。另外,泡沫分离器对 pH

有一定的稳定作用,各工况下出水 pH 都能达到 0.1 个单位的增加。

3 讨论

泡沫分离 (foam fraction) 就是利用气泡在封闭接触容器中上浮过程中吸附和去除养殖水体中溶解有机物 (COD) 和悬浮颗粒有机物 (suspended solids) 的一种方法。气泡在容器液体上层形成泡沫,并积累有机废物,它们溢出接触反应器后被一并去除。被去除的物质具有表面活性并带有电荷,它们的一端有极性,另一端无极性。极性端带有电荷,可以吸附在水分子上,成为亲水端;非极性端排斥水分子,成为疏水端。这些表面活性分子聚集在气-水界面,它们的疏水端与空气接触。当气泡上升过程中,疏水端就插到气泡里,带有电荷的另一端就暴露于水中,吸引水中带相反电荷的物质。这些带电荷的物质再在外面使其它带有与其相反电荷的物质粘附于它们表面。带电荷的气泡既可以吸附带负电的微小颗粒,也可以吸附带正电的微小颗粒^[9-10]。很多研究表明,泡沫分离器在循环水养殖系统中有良好的水质净化效果^[5-10],它对微小 SS 和溶解有机物有很好的去除效果,泡沫上聚集的大部分是溶解有机物和粒径小于 30 μm 的微小颗粒物^[10],而另有报道说循环水养殖系统中占数量 90% 的固体颗粒物都是粒径小于 30 μm 的微小颗粒,并且研究指出这些固体颗粒物中携带的营养物质包括 7% ~ 32% 的 TN, 30% ~ 84% 的 TP, 在水中停留的时间越长,越有碎裂成更小颗粒,并向水体溶解污染物质的趋势,这样也就越难去除^[11-12]。

另外,泡沫分离器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有一定去除效果,但相比系统中的核心水处理单元-生物滤器,泡沫分离器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果贡献不大^[13-16],它对水体氨氮中非离子氨的去除主要靠的是空气剥离,对离子铵和亚硝氮仅有少量氧化,若添加臭氧,则去除效果十分明显^[5-7]。本实验中泡沫分离器是作为生物滤器之后的二级水处理单元,进水中的底物浓度已经比较低,是否随着进水中底物浓度的升高会增加泡沫分离器对几项水质指标的处理效率还有待进一步研究。

在泡沫分离去除水体中有害物质的同时,也会使水中微量元素流失^[7,9-10],这点对淡水系统影响不大,若是海水系统,则需要补充离子元素,在饲料中添加鱼虾必须的微量元素。

泡沫分离器的水处理效果有赖于液体化学性质(如有机物负载和成分)、表面张力、温度、粘性、pH、盐度、气泡规格、气-液比率,以及接触时间^[10]。这些因素中,除了气泡规格外,其余大多不受养殖者的控制。温度和 pH 可以控制到一定程度,pH 增加时,泡沫的产生及相应的有机物去除都会增加,海水系统产生泡沫比淡水系统更容易就是很好的证明,pH 分别在 8.3 和 5.3 时,有机物去除率前者可达后者的 2 倍^[9]。但这些参数的调整更多是为了满足鱼类的需要而不是泡沫分离器的工作效果。气泡的规格可由使用的空气扩散装置的类型来控制。气泡越小,它能为表面活性物质吸附提供的表面积就越大,同时由于小气泡在水中上升时受到液体的摩擦,会上升得更慢,这样就增加了空气-液体的接触时间。为使泡沫产生最大化,进而废物去除最大化的原则:1,使泡沫上升的距离最大化;2,使气泡与水接触的时间最大化;3,产生的泡沫要尽可能的小,这样可以减小上升速度;4,接触室里留存的气体量最大化,有报道说气体存留量接近接触反应器容积的 25% 比较好^[10]。

参考文献:

- [1] 张明华,杨 菁.海水工厂化养殖水处理系统的装备技术研究[J].海洋水产研究,2003,2:30-34.
- [2] 北京市水产研究所.工厂化——中国农村创新的探索与实践[M].北京:科技出版,1999:120-131.
- [3] Huguenin J E,Colt. Design and operating guide for aquaculture seawater systems[M]. Elsevier, Amsterdam, 1989:168-170.
- [4] Heinsbroek L T N, Kamstra A. Design and performance of water recirculation systems for eel culture[J]. Aquacultural Engineering, 1990, 9:171-207.
- [5] 谭洪新,周 琪,朱学宝.泡沫分离-臭氧消毒装置的水处理效果研究[J].上海环境科学,2003,22(12):987-990.
- [6] Krumins V, Ebeling J, Wheaton F. Part-day Ozonation for nitrogen and organic carbon control in recirculation aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2001, 24:231-241.
- [7] 宋德敬,尚 静,姜 辉,等.蛋白质分离器中的不同臭氧浓度对工厂化养殖净水效果的试验[J].水产学报,2005,29(5):719-

- 723.
- [8] Weeks N C. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solid from fish culture water[J]. *Aquacultural Engineering*, 1992, 11: 251 - 256.
- [9] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, *et al.* Recirculating aquaculture systems(2nd Edition)[M]. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002, 157 - 204.
- [10] Thomas B. Lawson. Fundamentals of aquacultural engineering[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995, 192 - 247.
- [11] Foy R H, Rosell R. Fractionation of phosphorus and nitrogen loadings from a Northern Ireland fish farm[J]. *Aquaculture*, 1991, 96: 31 - 42.
- [12] Bergheim A, Cripps A, Lileved H, *et al.* Sludge removal from salmonid tank effluent using rotating micro-sieves[J]. *Aquacultural Engineering*, 1993, 12: 97 - 109.
- [13] 罗国芝, 谭洪新, 朱学宝. 闭合循环水产养殖系统中生物过滤器的水处理效果研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(002): 203 - 208.
- [14] 江 伟, 江清远. 生物转盘处理水产养殖废水中的氨氮研究[J]. *北京水产*, 2002, 3: 12 - 13.
- [15] Kuo-Feng Tseng, Kuo-Lin Wu. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 31: 17 - 30.
- [16] Jae-Koan Seo, Il-Hyong Jung, Mi-Ryung Kim, *et al.* Nitrification performance of nitrifiers immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a marine recirculating aquarium system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24: 181 - 194.

《上海水产大学学报》(双月刊) 征稿简则(2007年4月修订)

《上海水产大学学报》为上海水产大学主办、以水产科学技术为主的综合性学术刊物。主要刊载渔业资源、水产养殖与增殖、水产捕捞、水产品保鲜与综合利用、渔业水域环境保护、渔船、渔业机械与仪器、渔业经济与技术管理以及水产基础研究等方面的论文、研究简报,少量刊载综述文章。

一、来稿注意事项

1. 来稿文责自负。要求论点明确,数据可靠,简明扼要,文字精练(包括文章题名、图、表和文献的运用),用第3人称撰写。着重撰述作者的新方法、新观点和新成果等。
2. 来稿请访问本刊的网页,进行网上投稿,网址:<http://kjgk.shfu.edu.cn/dxxb/default.htm>,本刊只接受网络投稿。本刊对来稿有删改权,必要时退作者修改、精减并清稿。若作者投稿3个月后未收到本编辑部任何通知,可自行处理此稿,请勿一稿多投。
3. 对录用的文章将收取一定的版面费,文章刊登后,将酌致稿酬,并赠送若干册当期的本刊。
4. 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据——数字化期刊群》等,作者著作权使用费与印刷版稿酬一次付给。

二、对稿件的编辑出版要求

1. 论文稿书写的顺序:题名,作者署名,作者单位(写至二级)及所在地和邮编,中文摘要(250字左右),关键词(3~8个,研究对象的词应排列在前),中图分类号,英文部分题名、作者署名、作者单位(写至二级)及所在地和邮编、**Abstract**(与中文摘要相对应,以学术刊物上惯用的文体和句型撰写)、**key words**(与中文关键词相对应),正文,参考文献。首页脚注处请注明:①收稿日期;②基金项目:资助者(编号),并附立项或得奖批文的复印件。③作者简介:姓名(出生年-),性别(民族——汉族可省略),籍贯,职称,学位,研究方向,电话、电子信箱。
2. 插图和照片要清晰。表力求简明,采用“三线表”的形式,其内容勿与图及文字表述重复。图、表不单列,在文稿的相应页面内均应留有适当部位并写明图题、表题,其题目均须汉英对照。
3. 文中的学术名词、名称或术语,度量衡及其符号均应符合国家标准。
4. 参考文献只列确引的、最主要的、国内外公开发表的文献。每条文献中,作者姓名不超过三人者,全部照录;超过者,则第三人之后从略,加“等”或“*et al.*”之类的相应文种的外文缩写。“参考文献:”列于正文后,独占一行。所列文献一律采用标准化的顺序编码制,即把序号置于方括号内,并视引文的具体情况将序号作为上角标,或作为引文中的组成部分。每条文献应按类型注明其标识,参考文献类型及标识:

参考文献类型	期刊	普通图书	会议录	学位论文	报告	报纸	标准	专利	汇编	数据库	计算机程序	电子公告
文献类型标识	J	M	C	D	R	N	S	P	G	DB	CP	EB