

文章编号: 1674 - 5566(2010)06 - 0841 - 07

# 一体式过滤净化机在循环水养殖系统中的应用效果

鲍旭腾<sup>1</sup>, 徐皓<sup>2</sup>, 倪琦<sup>2,3</sup>

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;  
3. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092)

**摘要:** 本装置综合了物理过滤和生物净化两种基本水处理功能, 进行一体化集成与结构设计, 并在循环水养殖状态下进行了试验。试验显示, 本装置的 TSS 去除率为  $(58.5 \pm 17.8) \%$ ; 养殖水体中:  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。经过两个月的养殖, 鱼体生长良好, 养殖密度从养殖初的  $27.22 \text{ kg/m}^3$ , 达到试验结束时的  $35.20 \text{ kg/m}^3$ , 均重增重率为  $34.6\%$ , 均重特定生长率为每天  $0.496\%$ , 成活率  $95.9\%$ 。结果表明, 本装置同时具有较好的物理和生物净化功能, 能较好地应用于高密度养殖系统中; 其结构简单, 工作时, 能有效去除截留在过滤筛上的固体颗粒物, 减少了反冲洗结构和反冲洗水量损失; 间歇式的运行特点, 其能耗较低。本装置精简了循环水养殖系统设备, 降低了能耗, 并取得了良好的水处理效果。

**关键词:** 循环水养殖系统; 水处理; 物理过滤; 生物净化; 一体机

中图分类号: S 953 文献标识码: A

## Study on integrated bio-purificatory filter in recirculating aquacultural systems

BAO Xu-teng<sup>1</sup>, XU Hao<sup>2</sup>, NI Qi<sup>2,3</sup>

(1. College of Engineering & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;  
2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200092, China;  
3. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This device combines the two basic functions of physical filtration and biological purification to integrate and structural design for integration, and was tested in the RAS. The results indicate that the TSS removal rate was  $(58.5 \pm 17.8) \%$ ; the toxic substances in water were controlled at low concentrations, i. e.,  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ . During the two month experiment, fish grew well, its breeding density was increased from the test primary of  $27.22 \text{ kg/m}^3$  to the test end of  $35.20 \text{ kg/m}^3$ , growth rate averaged  $34.6\%$ , weight specific growth rate of  $0.496\% / \text{d}$ , the survival rate of  $95.9\%$ . The study shows that the device has both of the physical filtration and biological purification function, can be well used in high-density culture systems; it has a simple structure and it can well remove the solid particulate matter effectively, reducing backwashing structure and the loss of backwashing water; with intermittent operational

收稿日期: 2010-03-23

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03B06)

作者简介: 鲍旭腾(1983-), 男, 硕士研究生, 专业方向为养殖工程技术。E-mail: baoxuteng@126.com

通讯作者: 徐皓, 021-65976990, E-mail: xuhao@fmiri.com

characteristics, it has low power consumption. This device streamlined recirculating aquaculture system equipment, reduces power consumption, and achieved a good water treatment.

**Key words:** Recirculating aquaculture system; water treatment; physical filtration; biofilter purification; integrated bio-purificatory filter

循环水养殖是未来水产养殖模式的发展方向<sup>[1-2]</sup>。目前,循环水养殖模式在国外发达国家已得到普遍应用,国内起步较晚,相关研究相对比较滞后<sup>[3]</sup>。循环水养殖水处理设备的小型化、系统的优化以及节能减排,是重要的研究和发展方向<sup>[4]</sup>。悬浮颗粒物的去除设备和氨氮、亚硝态氮等有毒有害物质的降解设备,是其优化和改进主要内容。

转鼓微滤机是一种高效去除悬浮颗粒物的主要设备之一,应用较广。其优点是:过滤效果稳定、不易堵塞、处理量较大,适于规模化生产系统的应用。缺点是:造价较高、运行和压力反冲洗需要能耗<sup>[5-7]</sup>。

生物净化装置有很多<sup>[8]</sup>,其中,流化床过滤器具有稳定的处理效果,是较新的装置,已开始应用,但需要消耗一定的使滤料流化的水动力,并占有较大的体积<sup>[9-10]</sup>。生物转盘具有降解效果稳定的特点,但因其结构相对复杂,造价高,并需要旋转动力,使用较少<sup>[11-13]</sup>。

一些生物过滤装置同时具有物理过滤的功能,但在高密度的养殖系统中,还很少有研究报告。目前,国外有研究的塑料填珠过滤器(Propeller washed biofilter),同时具有物理过滤和生物净化功能,但其需要机械动力、液压或气压等对滤料进行反冲洗和需要额外增氧进行有效生物净化,其物理处理效果较好,生物净化较弱,且投资较大,耗能也较大,在循环水养殖系统的推广应用有待研究<sup>[14]</sup>。

本研究集成的一体化装置,将生物转盘和流化床生物过滤器的优良性能在转鼓式微滤机的基础上进行集成和结构设计,并通过实验性循环水养殖系统的构建,获得了一体式过滤净化装置在高密度循环水养殖系统中的应用效果。

## 1 材料与方 法

### 1.1 系统和设备

#### 1.1.1 一体式过滤净化机

一体式过滤净化机,简称一体机。其功能原

理图如图 1 所示,由一个具有不锈钢滤板的转鼓安装在装有水体的箱体中,通过电机带动减速装置转动运行。转鼓内外都装有生物载体滤料,运行时,在转鼓导流板及水流的作用下,滤料翻滚,具有流化床生物净化装置的流化水动力功能。转鼓内装有翻动板可以将滤料在转鼓运动时带出水面与空气接触。养殖污水从一体机顶部进入转鼓,通过滤板的物理过滤去除悬浮颗粒物,再经过转鼓内外生物滤料生物膜的生物净化作用,最后流回鱼池。滤板截留的污物通过导流板流入集污槽。在转鼓转动时,内外滤料的相互碰撞作用可以进一步清除滤孔上的堵塞物。

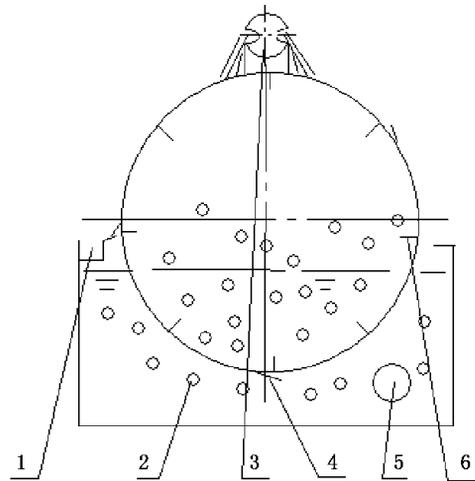


图 1 一体机原理图

Fig. 1 Schematic of integrated bio-purificatory filter

1. 集污槽; 2. 滤料; 3. 进水口; 4. 导流板; 5. 出水口; 6. 翻动板。

试验用一体机转鼓直径为 0.8 m, 鼓长 0.4 m, 电机额定功率 1.15 kW, 转速为 2 r/min, 转鼓滤板表面线速度为 0.084 m/s。选用不锈钢长腰孔冲孔板, 腰孔宽度 0.2 mm, 长度 5 mm, 开孔率 30%, 采用长腰孔长边方向与转鼓切向方向相同的安装方式。在两片滤板相接处装有硅胶条作为排污导流板, 其与集污槽上的硅胶板软接触, 转鼓转动时将截留在滤板上的固体颗粒物带入集污槽中。

进水管直径为 50 mm, 中间两侧打两排通

孔,通孔孔径为直径 24 mm,进水高度,即进水管与滤板的最近距离为 15 cm。循环泵 24 h 持续工作,一体机转鼓间歇运转。一体机水位保持在转鼓直径的 45% ~ 50% 之间。转鼓内部装有生物滤料量为 0.08 m<sup>3</sup>,转鼓外部装有生物滤料量为 0.02 m<sup>3</sup>。滤料采用 PE 材料的塑料粒子(图 2),粒径为 10 × 10 mm,密度为 0.91 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为 500 ~ 600 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>。

### 1.1.2 系统

试验在中国水产科学研究院渔业水体净化技术与系统研究重点开放实验室进行。试验系统如图 3 所示,主要由一个养殖池(蓄水量约 1.24 m<sup>3</sup>);一个旋流器(蓄水量约 0.025 m<sup>3</sup>),旋流器的主要作用是去除较大粒径(≥100 μm)的固体颗粒物,为后续的一体机做预处理,也为水泵池减少

颗粒物含量,减少颗粒物被抽水打碎;一个水泵池(蓄水量约 0.063 m<sup>3</sup>);一个水泵(扬程 4.5 m,功率 0.135 kW);一个一体机(功率 1.15 kW,蓄水量约 0.338 m<sup>3</sup>)串联构成。系统的总水量约为 1.67 m<sup>3</sup>。

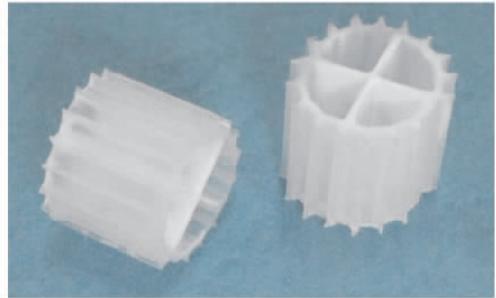


图 2 生物滤料

Fig. 2 Bio-filter plastic particles

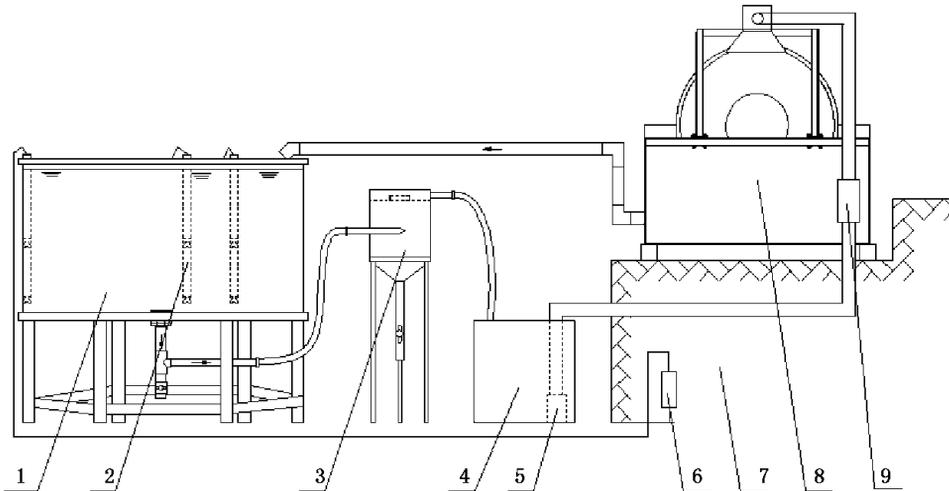


图 3 一体机试验系统图

Fig. 3 Schematic drawing of integrated bio-purificatory filter experimental installation

1. 鱼池; 2. 进气管; 3. 旋流器; 4. 水泵池; 5. 循环泵; 6. 气流量计; 7. 台阶; 8. 一体机; 9. 流量计。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验基本参数

试验用鱼为澳洲宝石斑鱼(*Scortum barcoo*),一次性投放 221 条,共 33.75 kg,每条均重 0.153 kg,养殖密度为 27.22 kg/m<sup>3</sup>。投饲量为鱼体重量的 1% ~ 1.5%,每天上下午各一次,分别为上午 8:00,下午 14:00。每天上午 10:00 取水样各 500 mL,取水点分别为鱼池中部,鱼池底部,一体机进水口,一体机出水口。所取水样主要用于测量氨氮、亚硝酸氮、硝酸氮以及水中悬浮颗粒物的含量。以测出一体机对 TSS 的去除水平和对氨

氮、亚硝酸氮、硝酸氮的降解能力。

水温保持在 21 °C ~ 28 °C 之间;用曝气石在养殖池中增氧,使水中溶氧 ≥ 3.5 mg/L; pH 值由纯碱(NaHCO<sub>3</sub>)调节,保持在 6.2 ~ 7.5。日换水量为 10%;循环量为 0.8 m<sup>3</sup>/h,即系统水循环约为 2 小时/次。

### 1.2.2 测量方法

(1) 水质参数的测量见表 1 所示<sup>[15-16]</sup>。

(2) 使用电能综合分析测量仪(DZFC)测量平均实际功率,记录运行时间,再通过焦耳定律计算出耗电量。

表1 各水质测量点的测量方法  
Tab.1 The measurement of water quality measurement points

测量参数	测量方法
水温	电极法
pH	玻璃电极法
DO	膜电极法
TAN	纳氏试剂光度法测量
NO <sub>2</sub> -N	N-(1-奈基)-乙二胺光度法测量
NO <sub>3</sub> -N	锌镉还原法测量
TSS	103~105℃烘干的不可滤残渣法测量
碱度	电位滴定法测量

注:测量点为鱼池中部、底部和一体机进、出水口。

1.2.3 计算方法

TSS 去除率:  $\eta_{TSS} = (\text{进水 TSS 浓度} - \text{出水 TSS 浓度}) / \text{进水 TSS 浓度} \times 100\%$  (1)

均重特定生长率:  $SGR = 100\% \times [(\ln \text{末均重} - \ln \text{初均重}) / \text{养殖时间}]$  (2)

均重增重率:  $MR = 100\% \times [(\text{末均重} - \text{初均重}) / \text{初均重}]$  (3)

存活率:  $SR = 100\% \times [(\text{初养殖数} - \text{末养殖数}) / \text{初养殖数}]$  (4)

2 结果与分析

2.1 一体式过滤净化机对 TSS 的去除效果

TSS 是一体机处理的主要内容之一。试验测得一体机的去除率如表 2 所示,其去除率约为 58.48% ± 17.63%。

表2 一体机 TSS 去除率

Tab.2 TSS removal efficiency of outside filter-type drum filter

测量次数	TSS 进水含量( mg/L)	TSS 出水含量( mg/L)	TSS 去除率( %)
1	38	5.5	85.52
2	88.5	22.5	74.58
3	110	47.5	56.82
4	44	14.5	67.05
5	43.5	20	54.02
6	53	37.5	29.25
7	50	40	20
8	141	31	78.01
9	37.5	23.5	37.33
10	60.5	27.5	54.55
11	66.5	29.5	55.64
12	90	50	44.44
13	45.5	18.5	59.34
14	21	4.5	78.57
15	85	35	58.82
16	36.5	11	69.86
17	28.5	13	54.39
18	122	31	74.60
X ± SD			(58.48 ± 17.63) %

2.2 一体式过滤净化机的生物净化效果

一体机的生物净化功能主要是通过硝化细菌的作用将氨氮和亚硝态氮转化为毒性较小的硝态氮。试验测得的生物净化处理的相关数据如图 4、图 5 所示:

如图 4 所示,系统在 20 天后生物净化开始稳定,此时,氨氮( NH<sup>+</sup>-N) 含量维持在 ≤ 2 mg/L; 亚硝态氮( NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N) 含量维持在 ≤ 0.5 mg/L。如图 4 所示,硝态氮( NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 呈曲折上升趋势。

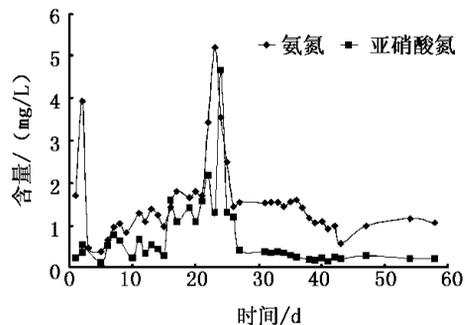


图4 氨氮和亚硝态氮的每日测量数据图  
Fig.4 The daily data of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen

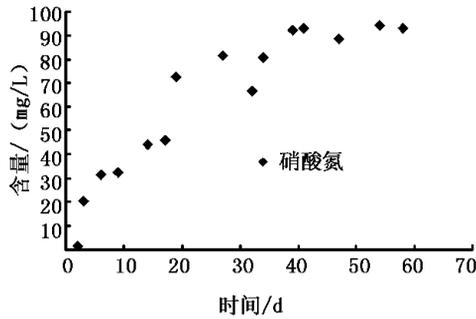


图5 硝酸氮测量数据散点图

Fig. 5 The data of nitrate nitrogen

### 2.3 能耗

通过电能综合分析测量仪测出一体机运行时的实际功率均值为 0.05 kW, 见表 3。

表3 功率测量

Tab.3 Power measurement

数	1	2	3	4	均值
数值/kW	0.07	0.06	0.04	0.03	0.05

对转鼓静置 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h、3 h, 分别观测转鼓上的积污情况, 当静置为 1~2 h 左右时积污较好, 能将滤板上的滤料带入集污槽中, 当静置达到 3 h 时, 堵塞情况较严重, 水流沿转鼓直接流向集污槽。因此本系统选择以静置 1 h 计。对转鼓运转时间的确定, 使转鼓运转 1~10 min, 观测当运行 2~5 min 时, 滤板清理情况较好。因此设定一体机为每 1 h 间隔运行 2~5 min, 则每天运行消耗电能可由焦耳定律算出:

2 min:  $(2/60) \times 0.05 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (h)} = 0.04 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。即一体机每天总电耗为 0.04 kW·h。

5 min:  $(5/60) \times 0.05 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (h)} = 0.1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。即一体机每天总电耗为 0.1 kW·h。

### 2.4 养殖情况

经过 60 d (2009 年 5 月 20 日~2009 年 7 月 21 日) 的养殖中, 宝石斑鱼健康成长, 如表 4 所示。9 条死鱼中, 其中一条死于鱼池中, 其余皆为夜间受惊扰, 跳出鱼池缺氧而死。养殖密度从试验时的  $27.22 \text{ kg/m}^3$ , 增长到试验结束时的  $35.20 \text{ kg/m}^3$ 。在试验结束后, 仍按试验时的养殖方式养殖到 2009 年 8 月 8 日, 鱼总重达到 51 kg, 212 条, 养殖密度达到  $41.13 \text{ kg/m}^3$ 。

表4 养殖情况

Tab.4 Culture consequence

	条数(条)	重量(kg)	均重(kg)
养殖初	221	33.75	0.153
养殖末	212	43.65	0.206
均重特定增长率	0.496% /d		
均重增重率	34.6%		
存活率	95.9%		

## 3 讨论

### 3.1 物理过滤

(1) 与微滤机相似的处理效果: 试验测得, 在选用不锈钢长腰孔冲孔板, 腰孔宽度 0.2 mm, 长度 5 mm, 开孔率 30%, 采用长腰孔长边方向与转鼓切向方向相同的安装方式; 采用转鼓直径为 0.8 m; 转速为 2 r/min, 滤板表面线速度为 0.084 m/s 的运行速度; 进水 TSS 浓度为 30~70 mg/L 的情况下, 一体机的 TSS 去除率为  $58.48\% \pm 17.63\%$ 。与宿墨等<sup>[5]</sup>优化状态下的微滤机相比, 具有相似的去污效果。其微滤机选用 200 目 (70 μm) 不锈钢滤网, 转鼓直径 0.8 m, 转速 2.3 r/min, 进水浓度 30~50 mg/L, TSS 去除率为  $54.9\% \pm 10.42\%$ 。

需要说明的是, 宿墨等<sup>[5]</sup>试验中鱼池出水直接进入微滤机过滤, 本试验中先经过旋流器, 再进入一体机, 中间多了旋流器对大颗粒物的去除功能, 可能有一定的影响。

(2) 较微滤机节省了反冲洗结构: 一体机在静置时, 具有反向使用的弧形筛的作用效果<sup>[17]</sup>。一体机从转鼓外部上部进水, 水流自流的带动和颗粒物自重作用使固形物带出转鼓, 收集到集污槽中; 另外, 在导流板和集污槽上装有硅胶条作为软接触, 有利于利用硅胶条对滤网的刮除作用。同时, 由内外生物滤料的棱角对滤孔的摩擦碰撞, 从而进一步去除孔眼上的堵塞物。一体机较微滤机减少了反冲洗结构和排污水量损失。

微滤机反冲本身也存在缺陷, 由于其内部进水的方式, 不利于将水体中未粘附于滤网上的固体颗粒物带出水面到达反冲洗位置, 而使其不断地在转鼓内翻转, 从而打碎颗粒, 使处理更加困难。一体机在进水方式上减少了颗粒物的翻转打碎。

(3) 转鼓间歇运转, 能耗降低: 一体机电能消耗主要为主机运行消耗, 且为间歇式运行; 微滤机除了主机消耗外还有反冲洗泵的能量消耗。在本试验中, 一体机测量的平均实际功率为 0.05 kW, 由于间歇性的运行, 每隔 1 h 运行 2 ~ 5 min, 每天总电耗为 0.04 ~ 0.1 kW·h, 与宿墨等<sup>[5]</sup>微滤机每天能耗约为 6.902 kW·h 相比, 节能比达到 98%, 极大地降低了水处理的能耗。

### 3.2 生物净化

需要说明的是, 本系统试验前已经用锦鲤养殖做了 1 个月的系统运行, 生物膜生长较好。进行本试验时, 由于全部换水, 生物膜受到较大干扰, 开始几天氨氮、亚硝态氮数据变化较大(图 4)。系统在 20 ~ 23 d 时, 氨氮、亚硝态氮含量升高较快, 其可能的原因是那几天测量采用的试剂有问题, 或者另有不明的原因。在稳定后的系统中, 氨氮、亚硝酸盐含量数值都在合理的范围内,  $\text{NH}_4^+ \text{-N} \leq 2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NO}_2^- \text{-N} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。说明一体机有着较好的生物降解能力, 具有稳定的处理效果, 满足了高密度循环水养殖的要求。

(1) 生物净化效果稳定: 生物膜的降解作用主要通过硝化反应实现。影响硝化反应的因数主要有: 氨氮浓度、溶解氧浓度、有机物含量、pH 值、碱度、水温、水力停留时间等。

据刘飞等<sup>[18]</sup>, 对 7 min、13 min、20 min、28 min 做不同温度和氨氮浓度下的对照试验, 其生物过滤器的最佳水力停留时间为 20 min, 并认为一定的水温、氨氮浓度条件下, 水力停留时间对氨氮去除速率的影响呈双曲线, 存在一个使氨氮去除速率最大的水力停留时间。又据罗国芝等<sup>[19]</sup>, 一般的生物滤器停留时间为 30 min 左右。本试验中, 平均水力停留时间约为 25 min(体积/流量), 处于较好的水力停留时间范围内。

据资料, 在氨氮浓度处于低浓度( $\leq 3.8 \text{ mg/L}$ )下, 生物过滤器的氨氮去除率与氨氮浓度成正比。本试验稳定状态下, 进水氨氮浓度 $\leq 2 \text{ mg/L}$ , 处于低浓度的情况。

同时, 溶解氧浓度(平均为 4 mg/L 左右)、水温(21.57 ~ 26.76 °C)、pH 值(6.60 ~ 7.60)、碱度(最小值 51.81, 最大值 113.05, 均值 80)、有机物含量(COD 含量 $\leq 60 \text{ mg/L}$ )都控制在合理的范围内, 这些因素都保证了一体机较好的生物净化处理效果。

(2) 单位体积滤料负荷大, 利用了转鼓内外空间: 内外滤料总体积约为 0.1 m<sup>3</sup>, 总表面积为 50 ~ 60 m<sup>2</sup>, 在试验系统中, 以 30 kg/m<sup>2</sup> 的养殖密度, 日投饲 1.5% 计, 根据有关公式<sup>[18]</sup>算得所需滤料的总表面积为 30 m<sup>2</sup>。因此, 按照使用滤料量计算, 本试验情况下, 其养殖规模可以相应扩大, 而不会对生物净化负荷产生影响。

(3) 利用微滤机结构条件, 不需专门配置结构和动力: 转鼓转动, 不仅对内部滤料翻动使之具有生物转盘的特性, 也对转鼓外部滤料进行搅动, 使之具有流化床生物净化装置的功能。生物转盘运行速度一般为 1.5 ~ 2 r/min<sup>[20]</sup>。本试验选用 2 r/min 的转速, 不仅与相同直径的微滤机相对应(具有相同线速度), 也与生物转盘的转速相对应, 进一步保证了一体机较好的生物处理效果。

(4) 转鼓转动, 实现滤料的自清洗功能: 一体机不仅可以很好地实现生物转盘和硫化床的处理效果, 同时, 生物滤料在翻动时碰撞摩擦, 也实现了自清洗的功能, 保证了生物膜的稳定, 促使微生物硝化反应的高效进行; 另外, 转鼓内外滤料相互碰撞, 还能将堵塞在滤孔上的堵塞物去除。

### 3.3 存在问题

(1) 去污问题: 试验测量 TSS 去除率的数据中, 标准差较大, 一方面是由于测量误差所致, 另一方面可能在于一体机在转动时, 水流的带动作用, 会有一部分截留的固体颗粒物被带入集污槽外的箱体中, 从而使测量值相差较大。因此, 在改进的设计中, 应更加完善截留污物的去除功能。

(2) 处理量问题: 一体机在转鼓上部外部的进水方式, 限制了其进水流量。当流量过大时, 水会在滤网孔上相互挤压, 而不利于穿过滤孔, 从而减少了水流的处理量; 又由于转鼓本身有一定弧度以实现弧形筛功能, 也容易使水流直接沿弧面流走。因此, 一体机的水处理量较微滤机小很多。另外, 生物净化的水力停留时间也对一体机的流量有所限制。

### 参考文献:

- [1] 徐皓, 倪琦, 刘晔. 我国水产养殖设施模式的发展研究[J]. 渔业现代化, 2007, 34(6): 1-6.

- [2] 徐皓. 我国渔业装备与工程学科发展报告(2005-2006) [J]. 渔业现代化, 2007, 34(4): 1-8.
- [3] 吴凡, 刘晃, 宿墨. 工厂化循环水养殖的发展现状与趋势 [J]. 科学养鱼, 2008, (9): 72-74.
- [4] 徐皓, 张建华. 我国水产养殖工程学科发展报告(2007-2008) [J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 1-6.
- [5] 宿墨, 刘晃, 宋红桥, 等. 转鼓微滤机颗粒去除率及能耗的运行试验研究 [J]. 渔业现代化, 2008, 35(5): 9-12.
- [6] 刘鹰, 杨红生, 张涛, 等. 微滤机: 中国, 02158869. 4 [P]. 2003-07-16.
- [7] 花兆泰. 海水专用微滤机: 中国, 02273649. 2 [P]. 2003-05-28.
- [8] 朱松明. 循环水养殖系统中生物过滤器技术简介 [J]. 渔业现代化, 2006, (2): 16-20.
- [9] 战培荣, 刘伟, 曹广斌, 等. 流化床生物滤器去除养鱼循环水中氨和亚硝酸盐的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 81-87.
- [10] 白利平. 过滤器和工厂化循环水养殖 [J]. 渔业现代化, 2005, (4): 13-14.
- [11] Yang C P, Suidan M T, Zhu X. Biomass accumulation patterns for removing volatile organic compounds in rotating drum biofilters [J]. Water Science and Technology, 2003, 48(8): 89-96.
- [12] 余泰, 亚布阿特斯. 生物转盘及使用其作污水处理的方法: 中国, 200410058138. 3 [P]. 2006-02-22.
- [13] 江伟, 江远清. 生物转盘处理水产养殖废水的氨氮研究 [J]. 北京水产, 2002, (3): 11-13.
- [14] Ronald F. Malone, Lance E. Beecher. Use of floating bead filter to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems [J]. Aquaculture Engineering, 2000, 22: 57-73.
- [15] 宋仁元, 张亚杰, 王维一, 等. 水和废水标准检验法 [M]. 15 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 金瑞明. 弧形筛的原理、结构和使用 [J]. 纸和造纸, 1995, (3): 36-36.
- [18] 刘飞, 胡光安, 韩舞鹰. 水力停留时间、水温与氨氮浓度对浸没式生物滤池氨氮去除速率的效应 [J]. 淡水渔业, 2004, 34(1): 3-6.
- [19] 罗国芝, 谭洪新, 朱学宝. 闭合循环水养殖车间水处理核心单元的处理效率 [J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 68-72.
- [20] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, *et al.* Recirculating Aquaculture Systems [M]. 2nd. Ithaca: Cornell Univ Press, 2002.