

导流式移动床生物膜反应器流速选择及流态分析

张成林^{1,2}, 倪琦^{2,3}, 徐皓^{2,3*}, 管崇武^{2,3}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 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. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092)

摘要: 水力条件对反应器内生物膜的生长及流态形式起着决定性作用。实验分别用 0.15, 0.25, 0.35 m/s 的水流流速对内径为 44 mm 的管状生物膜反应器进行水力冲击, 观察不同生物滤料的挂膜情况, 并利用计算流体力学软件对导流式移动床生物膜反应器流态进行数值模拟。结果显示, 在低流速的水力冲击下, 生物滤料的挂膜效果最好, 平均厚度约为 70 μm , 且不同结构生物滤料的挂膜情况无明显差异; 反应器的模拟曝气速度为 0.6 m/s 时, 其内部的综合流动及挂膜效果最佳。因此可知, 生物膜的生长情况与同种材质生物滤料的结构形状无关, 但与滤料所处的水力情况有关, 膜厚度随着水流速度的增大而减小; 移动床生物膜反应器的曝气量大小及结构形状是影响其流态的重要因素。本研究可以为此类反应器的设计与高效运行提供基础数据。

关键词: 生物滤料; 生物膜厚度; 流态模拟; 移动床生物膜反应器

中图分类号: S 969.32⁺⁷

文献标识码: A

随着水产养殖业的发展及社会对环境保护的日益重视, 养殖废水的重复利用成为必然趋势。生物处理是废水处理的核心环节, 其主要分为两个阶段: 生物膜的生长阶段和微生物对废水的反应处理阶段, 其中生物膜的生长情况直接对第二阶段的处理效果产生影响。因此, 研究生物膜的生长机理及影响因素, 对处理养殖废水有重要意义。

生物膜反应器主要依靠生物滤料作为载体为微生物提供附着生长条件, 生物滤料的存在状态与生物膜生长状态是反应器构建的关键。近几年来, 国内外研究人员对影响生物膜生长的因素做出了较多研究, 朱松明等^[1]在 2001 年于华盛顿州立大学水产养殖研究实验室利用挠性塑料管作为生物膜载体, 来研究不同雷诺数对生物膜的动力学影响, 结果表明, 水力情况是决定生物膜生长及水体总氨氮去除率的重要因素。2002 年, SANDU 等^[2]利用直径不同的圆柱形容器, 以

ABS 塑料珠子作为生物膜载体, 测试不同流速对生物膜厚度及硝化效率的影响, 结果显示, 生物膜的厚度随着水流速度的增加而减小。2007 年, 楼菊青等^[3]在研究移动床生物膜反应器水力特性的实验中指出, 过快的水流循环速度会造成挂膜困难甚至会导致生物膜大量脱落, 从而降低效率。

移动床生物膜反应器是由挪威 KALDNES M 和 SINTEF 研究机构联合研发的一种生物膜污水处理技术^[4-5], 在反应器构建中, 水流速度的选择是关键, 过低的流速会影响移动床滤料的流动状态, 造成滤料运动不充分; 过高的流速则会影响生物膜的附着生长。水产养殖废水属于微污染水体, 其营养水平相对较低, 水流对移动床生物膜反应器中生物膜形成的影响还未见报道。本实验旨在通过控制水流流量, 对比研究在不同流速下滤料表面生物膜的附着生长情况, 同时使用 Fluent 软件对移动床生物膜反应器的流动状态进行数值模拟分析, 采用理论分析与实验数据优化结合的

收稿日期: 2010-08-31 修回日期: 2010-11-15

资助项目: 国家鲜鲈类产业体系项目 (nycytx-50-G04); 公益性行业 (农业) 科研专项 (nyhyzx07-046-鲜鲈工程化); 农业部“引进国际先进科学技术”自由申报项目 (2008-Z9)

通讯作者: 徐皓, E-mail: xuhao@fmiri.ac.cn

方式,在保证实验结果准确的前提下,有效减少实验次数,最终得到移动床生物膜反应器最佳水力工况,为其在水产养殖废水净化处理中的应用提供优化设计依据。

1 材料与方 法

1.1 实验系统

本实验于农业部渔业装备与工程重点开放实验室中进行。为了方便观察生物膜的生长状况,

实验系统(图1)采用亚克力有机玻璃管(内径为44 mm,高500 mm)作为装载生物滤料容器,通过LZB-50S型塑料流量计控制管内水流流量,管路采用PVC管材和透明塑料软管连接,由潜水泵从容积为1.2 m³的水池中进行循环供水;水温通过置于水池中的加热棒进行调控,曝气增氧由实验室的罗茨鼓风机提供。实验数据采集分析使用YSI-566多参数水质测定仪及722分光光度计等。

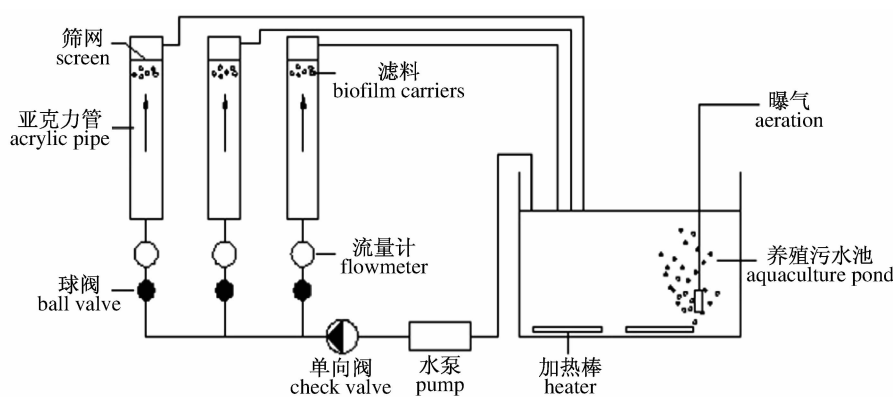


图1 各组实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

1.2 实验方法

实验设计 本实验共设置4组平行对照系统,统一供水,但分别装填不同结构类型的聚乙烯材质生物滤料(表1)(图2),以观察滤料对生物膜产生的影响。每组包括3个亚克力有机玻璃管生物膜反应器,于其上部各装填40 mm高度的同种类型生物滤料,通过流量计调节保证管状反应器内的流速分别维持在0.15、0.25、0.35 m/s,以实现不同水力冲击的目的。此外为避免水产养殖废水中固体悬浮物(TSS)对实验结果产生影响,

实验用水人工模拟养殖废水配置,废水配方依照ZHU等^[6]研究反应器中生物膜硝化作用实验用水,具体营养成分见表2,在保证微生物生长所需营养的同时使初始氨氮浓度为2 mg/L,并根据实验情况定期更换部分水体以维持氨氮浓度;曝气及加热于蓄水池中进行,保持溶氧浓度为6~9 mg/L,水温维持在(22±2)℃;利用NaHCO₃控制水体碱度,使pH值处于7~8,以模拟水产养殖系统排水的基本状态。

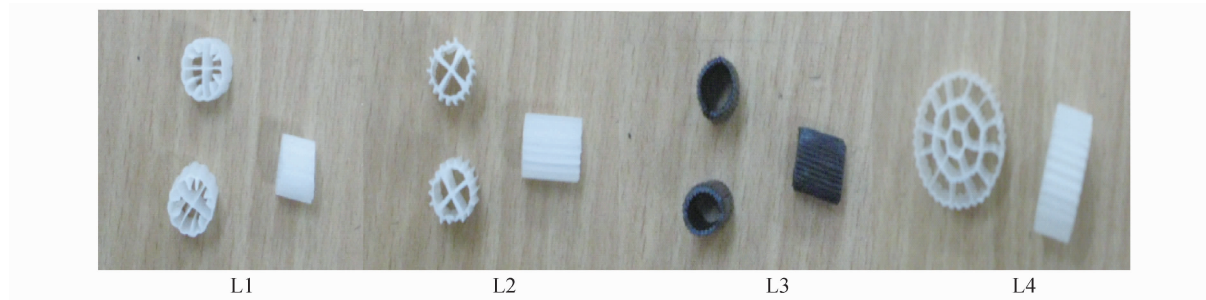


图2 生物滤料

Fig.2 Biofilm carriers

表 1 生物滤料参数对照

Tab. 1 The comparison of characters about biofilm carriers

项目 item	L1	L2	L3	L4
材质 material	HDPE	PE	PE	PE
直径(mm) diameter	11	10	8	25
长度(mm) length	10	15	10	9
密度(g/cm ³) density	0.96	0.96	0.98	1
比表面积(m ² /m ³) surface area	550	450	550	350

表 2 基质营养的组成成份

Tab. 2 Composition of synthetic substrate

成份 composition	质量(g) mass
NH ₄ Cl	1 377
NaHCO ₃	3 500
MgSO ₄ · 7H ₂ O	36
Na ₂ HPO ₄	159
KH ₂ PO ₄	153
FeCl ₃ · 6H ₂ O	5

注:溶液浓度根据不同实验工况进行稀释。

Notes: Concentration according to different experimental conditions.

实验水质测量及方法 实验稀释水源为经过曝气的自来水, pH 值约为 7.1, 溶氧浓度在 4.8 mg/L 左右, 实验运行阶段为两个月。在系统运行期间, 每天上午 9 时对蓄水池内水体的温度、pH 值、溶解氧浓度(DO)、氨氮浓度(TAN)、亚硝氮浓度(NO₂-N)等各项指标进行测定记录, 测定间隔为 24 h。各水质指标的测定方法^[7]分别为: 温度、pH 值、溶解氧浓度测定使用 YSI-566 多参数水质测定仪; 氨氮浓度采用纳氏试剂分光光度法测定; 亚硝氮浓度采用重氮-偶氮比色法测定。

由于实验系统中生物膜的生长需要消耗大量的营养源, 实验水体必须采取定期添加 NH₄Cl 等化学药品或更换水体等方式来维持氨氮浓度。本实验在生物滤料挂膜期间, 每天根据水质指标变化趋势来判断生物膜的生长状况, 并于水质指标测定后添加适量 NH₄Cl 等, 模拟养殖水体每天稳定的氨氮输出量, 使氨氮浓度保持在 2 mg/L。

评价指标 滤料表面附着的生物膜主要由硝化细菌、亚硝化细菌等组成^[8], 在生物膜生长初期, 亚硝化细菌占主导地位, 每天需消耗大量的氨氮, 而亚硝氮整体呈现积累的趋势, 而后硝化细菌也逐渐生长成熟, 氨氮浓度上升并趋于稳定, 亚硝氮浓度下降并趋于稳定, 标志着生物膜基本成熟。本实验利用电子显微镜来精确测定不同水力条件冲击下生物膜的生长状态及厚度, 从而判断

最佳生长条件。实验结束后, 根据所得数据, 与后期进行的移动床生物膜反应器流态模拟情况相结合, 最终获得理想水流速度。

移动床生物膜反应器流态模拟 本实验研制的矩形导流式移动床生物膜反应器(图 3)呈长方体, 长度为 1 m, 高度为 1.4 m, 宽度为 0.5 m, 水深为 1.2 m, 升流区与降流区的面积比为 2/3, 导流板低隙高度为 0.25 m, 反应器四角倒成斜面以方便水体循环。

该反应器是典型的多相流模型(Mixture 模型), 拟采用二维不可压缩流体运动 N-S 方程对其流态进行模拟, 其中湍流计算部分采用标准 k-ε 模型。受限于不可压缩流体 N-S 方程的应用条件, 在使用 FLUENT 软件进行流态模拟之前需对移动床生物膜反应器模型做出几点假设与简化:

- (1) 流体是连续的, 忽略曝气及生物滤料对流态的影响。
- (2) 将固相和液相假设为统一混合相, 模型简化为气液两相流。
- (3) 所有涉及到的场, 例如压强, 速度, 密度, 温度等, 全部是可微的。
- (4) 反应器中的导流板在模型建立时利用布尔运算去除, 并做固壁处理。
- (5) 利用曝气作为流体运动的动力源, 忽略进出水对流态的影响。

2 结果与分析

2.1 水质变化情况

实验运行期间, 温度、pH 值、溶解氧浓度变化幅度较小, 温度保持在 20~24 °C, pH 值为 6.9~8.1, 溶解氧浓度为 6.5~9.4 mg/L。系统运行第 5 天, 氨氮、亚硝氮浓度开始发生变化, 分别为 1.86 mg/L 和 0.094 mg/L, 期间定期添加 NH₄Cl 和 NaHCO₃ 来维持水体氨氮浓度及 pH 值; 实验进行到第 28 天, pH 值出现大幅度降低现象, 氨氮、亚硝氮浓度明显波动; 第 35 天后各项指标逐渐趋于稳定, 生物膜基本成熟。整个实验过程氨氮、亚硝氮浓度变化见图 4, 分析其变化曲线可以看出, 在实验运行初期(0~7 d), 氨氮、亚硝氮浓度只发生了微弱的变化, 到实验中期(8~35 d), 生物膜开始生长, 每天消耗大量的氨氮, 亚硝氮浓度则呈上升趋势, 到实验后期(36~60 d), 生物膜基本成

熟,氨氮浓度、亚硝氮浓度趋于稳定。

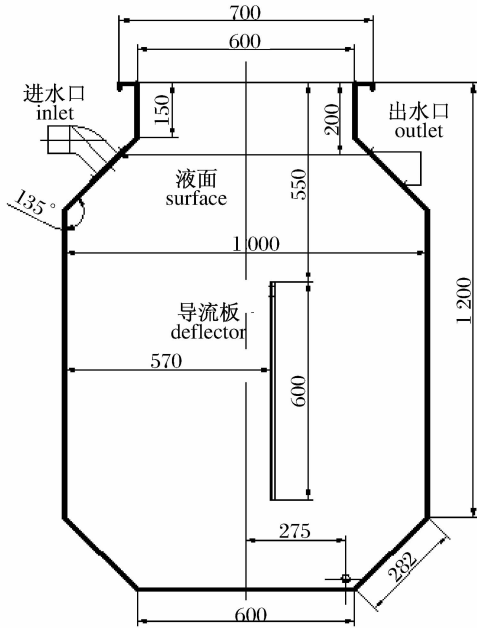


图3 导流式移动床生物膜反应器
结构简图(尺寸单位:mm)

Fig. 3 Diversion moving bed biofilm reactor
structure(unit: mm)

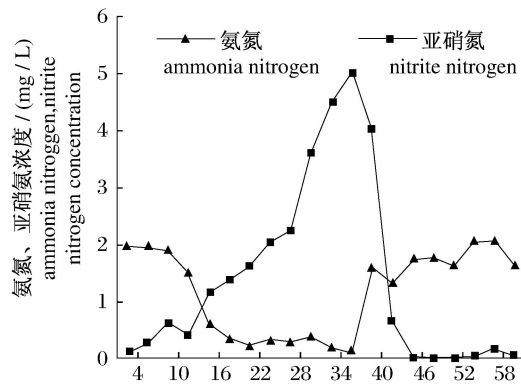


图4 氨氮、亚硝氮浓度变化

Fig. 4 Changes of NH_4^+-N and NO_2^--N

2.2 生物膜生长情况

因生物滤料外表面存在相互摩擦现象,通常以滤料内表面生物膜附着厚度为基本评价标准。实验结束后,使用电子显微镜观察滤料内表面生物膜的附着情况,可以发现,4组对照中不同类型生物滤料上生物膜的附着厚度在同一水力条件下基本相同,但同种生物滤料的生物膜厚度则随着水力条件的变化而变化(表3)。以L1生物滤料为例,在反应器内流速为0.15 m/s时,其附着生

物膜厚度达到65 μm (图5),而当流速为0.25 m/s和0.35 m/s时,生物膜厚度则分别为32 μm 和20 μm 。实验结果表明,生物膜的生长情况与生物滤料的类型无关,但与滤料所处的水力情况有关,膜厚度随着水流速度的增大而减小。

表3 不同速度下滤料挂膜厚度对照

Tab. 3 The comparison of biofilm thickness in
different velocity

水流流速(m/s) flow rate	生物膜厚度(μm) biofilm thickness			
	L1	L2	L3	L4
0.15	65	68	69	65
0.25	32	27	24	29
0.35	20	22	18	19

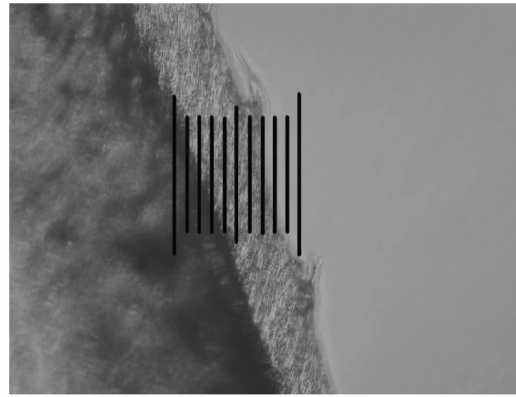


图5 生物膜厚度(1单元=10 μm)

Fig. 5 Biofilm thickness(1 unit = 10 μm)

2.3 流态模拟结果分析

数学模型建立后,于右侧底部设置曝气孔。在流态模拟过程中,初始曝气速度的选择至关重要,其既要保证滤料的挂膜效果,又要满足反应器正常循环所需要的动力。在初始速度大小的选择上,进行了多次模拟,结果显示,当曝气速度低于0.5 m/s时,降流区的生物滤料移动速度仅为0.025~0.075 m/s,基本处于静止状态,严重影响该区域的自清洗效果;当曝气速度高于1.2 m/s时,反应器中运动死角及滤料相对静止区域面积减小,但过快的流速会抑制生物滤料的挂膜。由此,结合前文流速实验的相关结果,将模拟曝气速度优化为0.6 m/s,此时反应器中最高有效流速为0.3 m/s,最低有效流速为0.06 m/s,涡流区域面积约占10%,可最大化的保证反应器的生物处理效率。图6和图7分别为流态模拟后的速度矢量图及流速等值线图。

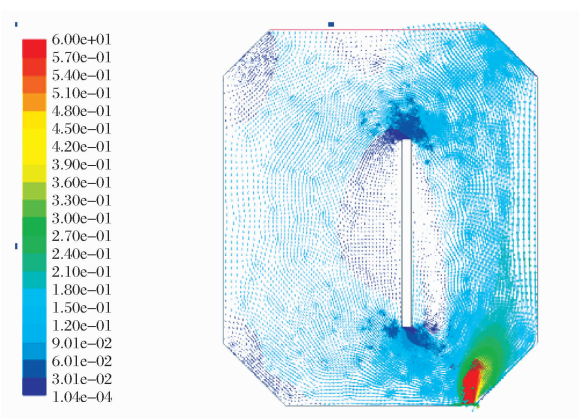


图6 模拟速度矢量图

Fig. 6 Simulation of velocity vectors

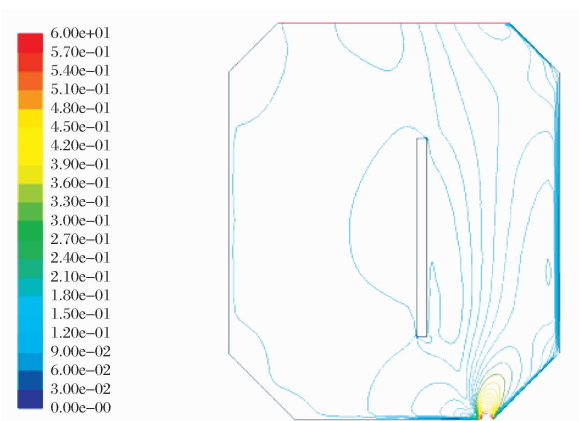


图7 模拟速度等值线图

Fig. 7 Simulation of velocity contours

分析其模拟结果可以发现,反应器右侧升流区在气流的带动下速度总体维持在较稳定水平,约为 0.24 ~ 0.3 m/s,但在靠近导流板处会出现明显的速度滞缓区域。此外,在反应器的左上方以及导流板的左侧部分会有涡流区,在加大曝气量的条件下,该区域面积会减小但不会消失,究其原因,可能在水流惯性及导流板双重作用下,导致该区域成为动力盲区。反应器左侧降流区速度在 0.06 ~ 0.12 m/s,该速度适宜生物膜的生长且不会发生堵塞。为验证模拟结果的准确性,本实验同时进行导流式移动床生物膜反应器的实际运行效果测试,填充率选择 40%,在进水氨氮浓度为 2 mg/L、水力停留时间为 15 min、曝气速度为 0.6 m/s 的初始条件下,运行 30 d 后反应器中 L1 型滤料内表面的实际平均挂膜厚度约为 80 μm ,氨氮去除率达到了 45%,具有良好的净化效果。

3 讨论

3.1 流速与挂膜效果关系

生物膜反应器一般通过控制膜的厚度来保证反应器的效率^[9],因此水流速度的选择就至关重要。在滤料挂膜实验中,由于前期受系统波动的影响,导致生物膜从生长到成熟共耗时 35 d,比经典淡水膜成熟时间稍长^[10-11],但其基本生长规律与前人的研究类同。在流速为 0.15 m/s 时,滤料的平均挂膜厚度约为 70 μm ,根据雷诺数公式:

$$Re = \frac{ud}{\nu}$$

式中, Re 为雷诺数; u 为水的平均流速(m/s); d 为圆管直径(m); ν 为水的运动粘度。可以得出,亚克力有机玻璃管生物反应器中的雷诺数约为 6 500,流态属于紊流;当流速为 0.35 m/s 时,生物膜平均厚度仅为 20 μm 左右,该结果也证明了周平等^[12]于 1994 年得到的结论:在紊流比较剧烈的生物膜反应器中,生物膜厚度通常小于 400 μm 。上述结论可以看出,随着水流速度的增大,滤料挂膜效果受到明显影响,过快的水流速度造成生物膜附着困难,膜厚度降低,无法保证反应器的高效性。楼菊青^[3]指出,当载体运动速度小于 0.45 m/s 时,膜损失在 10% 以下;当速度大于 0.55 m/s 时,水流紊动剧烈,生物膜受到较大冲击,不利于生长。因此,在保证反应器正常运行的基础上,有效降低生物膜载体的运动速度将会提高挂膜效果,从而保证生物高效性及反应器的效率。本实验的矩形导流式移动床生物膜反应器,结合实验分析得出,在 0.6 m/s 的曝气速度下,升流区载体运动速度以不大于 0.3 m/s、降流区速度不小于 0.06 m/s 为宜。

3.2 流态与移动床生物膜反应器结构关系

影响移动床生物膜反应器水力特性的主要因素有反应器的长高比、升流区与降流区的面积比,以及导流板的低隙高度等^[13-14]。季民等^[15]曾经对无导流板的移动床生物膜反应器进行过流态模拟,得到反应器内存在多个小循环且有较大运动死角的结论后,建议反应器需采取导流措施进行强制循环。在本流态模拟实验中,由于设置了导流板,整个反应器内呈现一个大的循环趋势,但运动死角现象依然存在。模拟数据显示,导流板两侧是最大的涡流区,由此

可见,简单加入导流板并不能彻底改善反应器内的流态,需综合考虑曝气位置以及导流板、反应器形状等因素。例如,近年研制的内循环移动床生物膜反应器^[16],便是将导流板改为导流筒,内筒为升流区,外筒为降流区,曝气装置位于内筒底部。此种结构改变了传统反应器单方向循环的方式,使生物滤料流化状态更好,从而很好的消除了运动死角。

3.3 移动床生物膜反应器性能提升途径

据有关报道,反应器内的循环速度越大,越有利于流体通过剪切作用脱出过厚的生物膜,保持较高的微生物活性,加快微生物表面介质的更新,更好的发挥其代谢作用^[17]。但通过滤料挂膜实验可以发现,过高的循环速度使生物滤料表面的生物膜厚度很小,微生物多以悬浮态存在,难以附着生长,从而导致微生物大量流失。因此,提升移动床生物膜反应器的性能,保证生物膜厚度与微生物活性,首先要选择合适的曝气速度与位置,保证降流区的流速有利于生物膜的附着生长且不会发生堵塞,而升流区的生物膜能处于高活性状态;其次,优化反应器结构,尽量减少涡流区域面积与运动死角,增大反应器的有效处理区域;合理设计导流板形状以及进出水口位置,如设置进水方向与水流循环方向一致,这样既可防止水流相向运动产生冲击,又可作为反应器水流循环的动力,节约能源的同时优化了流态,具有积极意义。

生物滤料作为移动床生物膜反应器中微生物的载体,同样对反应器的性能产生显著影响。分析滤料挂膜实验的数据可以看出,生物滤料的挂膜厚度与其结构形状无关,但生物膜反应器中微生物的数量直接影响着其处理效率,因此在结构密度类似的情况下,高比表面积将作为选择滤料的首要因素,尤其是使摩擦不到的内部比表面积最大化,是近年来研究的热点,如欧洲开发的多孔型泡沫填料和 KMT 型悬浮滤料,便是近几年滤料发展的杰出代表^[18]。同时,滤料在水流带动下存在相互摩擦现象,滤料外表面结构设计及材料密度选择就至关重要,不规则的棱状外表面可以减少滤料之间的接触面积从而降低摩擦区域,而选择密度接近于水体的滤料材质,或通过添加辅助材质(如钙粉)等,则可以保证滤料在水体中分布的均匀性,减小保证滤料均匀移动时所需能量,可有效避免滤料过度摩擦现象。

3.4 不足与建议

水产养殖中的生物处理以及流态分析是有着实际应用意义的技术,具有广泛的发展前景。本文由于受实验条件的限制,研究深度尚有欠缺,尤其在对水流冲击的速度选择方面以及移动床生物膜反应器结构优化方面仍有待改进和深入。在流态模拟方面,由于存在过多的假设条件,模拟结果与实际情况有着或多或少的差别,实验方式仍需长时间的探索优化。此外,由于研究时间紧,本次实验并没有对生物膜厚度与生物膜活性的关系做出深入分析,影响了结论的完整性,有必要在今后的研究中加强此方面的探讨力度。

参考文献:

- [1] ZHU S M, CHEN S L. Impacts of Reynolds number on nitrification biofilm kinetics [J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24: 213 - 229.
- [2] SANDU S I, BOARDMAN G D, WATTEN B J. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26: 41 - 59.
- [3] 楼菊青. 新型移动床生物膜反应器水力特性的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(9): 31 - 35.
- [4] HEM L, RUSTEN B, ODEGARRD H. Nitrification in a moving bed biofilm reactor [J]. *Wat Res*, 1994, 28(6): 1425 - 1433.
- [5] RUSTEN B, HEM L, ODEGARRD H. Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving bed biofilm reactor [J]. *Water Environment Research*, 1995, 67(1): 65 - 74.
- [6] ZHU S M, CHEN S L. An experimental study on nitrification biofilm performances using a series reactor system [J]. *Aquacultural Engineering*, 1999, 20: 245 - 259.
- [7] 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.
- [8] 张秀红, 周集体, 郭海燕, 等. 生物膜反应器脱氮性能及其硝化细菌的研究 [J]. *化工环保*, 2007, 27(3): 209 - 213.
- [9] 李丽, 焦伟堂. 外循环三相生物流化床载体挂膜的研究 [J]. *化工时刊*, 2005, 19(7): 5 - 8.
- [10] FOWLER H W, MCKAY A J. *Micobial Adhesion to Surface* [M]. London: Academic Press, 1980.
- [11] 周平, 何嘉汉, 钱易, 等. 内循环生物流化床反应器载体挂膜特性的研究 [J]. *环境科学学报*, 1998, 18

- (1):68-72.
- [12] 周平,王世和. 生物膜厚度对流化床反应器性能影响分析[J]. 环境科学,1994,15(2):1-5.
- [13] KARGI F, EKER S. Wastewater treatment performance of rotating perforated tubes biofilm reactor with liquid phase aeration[J]. Water, Air and Soil Pollution,2002,138(1-4):375-386.
- [14] 高廷耀. 水污染控制工程(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,1989.
- [15] 季民,董广瑞,霍金胜,等. 移动床生物膜反应器水力特性的数值模拟[J]. 中国给水排水,2002,18(5):14-17.
- [16] 于鹏飞,张兴文,秦伟杰,等. 内循环移动床生物膜反应器的研究与应用[J]. 环境科学与技术,2008,31(11):120-123.
- [17] 缪应祺. 水污染控制工程[M]. 南京:东南大学出版社,2002.
- [18] 陈洪斌,屈计宁,何群彪. 悬浮填料生物膜工艺的研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(4):514-520.

· 期刊介绍 ·

《中国渔业质量与标准》

《中国渔业质量与标准》经新闻出版总署批复将于2011年5月创刊(刊号:CN 11-6018/S)。该刊是由农业部主管、中国水产科学研究院主办的综合性学术刊物。其宗旨是刊载我国渔业领域质量安全和标准等方面的政策法规、技术资讯及研究成果,搭建渔业质量与标准工作沟通交流的平台,提高渔业质量和标准水平,促进渔业可持续发展。主要收录水产品质量安全领域和标准管理等方面的具有创新性和学术价值的研究论文。内设栏目包括政策与法规、学科建设与发展、研讨与交流、检验与检测、标准化工作、质量管理与认证、海外博览、前沿观察等。主要读者对象为渔业行政管理人员、科研单位、教学、推广和生产技术人员等。

《中国渔业质量与标准》创刊之际,亟需高质量论文,对学术水平高、具有创见性的稿件优先发表,稿酬从优。欢迎广大渔业科技工作者赐稿。

国内统一刊号:CN 11-6018/S

电 话:010-68690728

传 真:010-68673907

E-mail:cafsqs@cafs.ac.cn

编辑部主任:刘巧荣

副主任:穆迎春

地 址:北京丰台区永定路南青塔150号

邮 编:100141

Flow rate selection and flow analysis for the Diversion Moving Bed Biofilm Reactor

ZHANG Cheng-lin^{1,2}, NI Qi^{2,3}, XU Hao^{2,3*}, GUAN Chong-wu^{2,3}

(1. *Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;*

3. *Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China)*

Abstract: With the development of aquaculture industry and the community's increasing attention to environmental protection, aquaculture wastewater reuse has become an inevitable trend. As a key factor in aquaculture wastewater treatment, hydraulic condition plays critical roles in biofilm growth and water flow pattern within the reactors. Researching the relationship between biofilm growth and water flow pattern will be conducive to improve the efficiency of wastewater treatment. In the present study, aiming to know the effect of flow velocity on biofilm growth, four types of polyethylene (PE) biofilm carriers and twelve tubular biofilm reactors with a diameter of 44 mm which were made of acrylic material were chosen. Each kind of the biofilm carrier was enclosed into three tubular biofilm reactors and lashed with flow velocity of 0.15 m/s, 0.25 m/s, 0.35 m/s, respectively, the biofilm carrier's loading height was 40 mm, flow velocity was controlled by plastic flowmeters and the pipe connection used polyvinyl chloride (PVC) pipes and transparent plastic hose. In order to avoid suspended solids (TSS) in aquaculture wastewater having an impact on the experimental results, this study used artificial water, the concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ was 2 mg/L, DO was 6–9 mg/L and pH was 7–8. At the same time, the flow pattern of Diversion Moving Bed Biofilm Reactor was simulated by Computational Fluid Dynamic software to observe the state of water flow at different aeration rates. After sixty days, the biofilm thickness of different types of biofilm carriers in different flow velocity were observed with electron microscope. The result showed that the biofilm thickness decreased with the increasing of flow velocity, the thickest biofilm with the thickness of 70 μm occurred at the lowest velocity of 0.15 m/s and the thinnest biofilm with the thickness of 20 μm occurred at the highest velocity of 0.35 m/s. There were no significant differences in biofilm thickness among different structures of biofilm carriers. When the simulation of aeration rate of reactor was set at 0.6 m/s, its integrated flow pattern and biofilm growth situation were the best, the flow velocity in down-flow area was 0.06–0.12 m/s and in up-flow area was 0.24–0.3 m/s, the eddy area accounted for 10%. The data indicated that the hydraulic condition rather than the structures of biofilm carriers with same material was related to biofilm growth, and low flow velocity is favorable for biofilm growth. Besides, the aeration intensity and reactor's structure are important factors affecting the Diversion Moving Bed Biofilm Reactor's flow pattern. This study provided basic data about design and operation for such reactors, and it could be very practical to use the method of combination of experiment and simulation to study biofilm growth and flow pattern, and the data and the method could also be applied to a variety of fields.

Key words: biofilm carriers; biofilm thickness; flow simulation; moving bed biofilm reactor (MBBR)

Corresponding author: XU Hao. E-mail: xuhao@fmiri.ac.cn