

模拟给水管网中管壁生物膜生成特性

周玲玲^{1,2}, 刘文君^{1*}, 张永吉³ (1.清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2.哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3.同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 使用 2 台不同设计参数的生物膜培养反应器(RAB)模拟不同管径的实际管网, 研究了生物膜生成特性及规律. 结果表明, 2 个反应器具具有相似的生物膜生成特性. 在反应器运行初期, 挂片水平分区的 4 部分(M₁、M₂、M₃、M₄)生物量的平均值没有明显的差别, 但运行 4d 后, 挂片上部(M₁、M₂)和下部(M₃、M₄)生物量变化明显, 下部较上部高出 1~2 个数量级; 对挂片垂直分区的 2 个部分(X、Y)运行 5d 后, X 区生物量是迎水区 Y 区的 2~3 倍. 在相同的进水条件下, 不同反应器生物膜达到最大生物量的时间基本一致, 不同设计参数的 RAB 具有相似的模拟实际管网的性能.

关键词: 生物膜; 生物膜培养反应器(RAB); 生物量; 给水管网

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2008)01-0083-04

Characteristics of biofilms formation in simulate drinking water system. ZHOU Ling-ling^{1,2}, LIU Wen-jun^{1*}, ZHANG Yong-ji³ (1.Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.School of Municipal Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3.State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China). *China Environmental Science*, 2008,28(1): 83~86

Abstract: Two rotating annular bioreactors (RAB) with different design parameters were used for simulating different pipe diameter and the biofilms development characteristics in drinking water distribution system. The reactors were similar in terms of biofilms development pattern and bacterial biomass. There was insignificant biomass difference in four parts(M₁、M₂、M₃、M₄) at the beginning period. Significant biomass differences were found in terms of M₁、M₂ and M₃、M₄ after four days operation, M₃、M₄ biomass was one to two orders of magnitude higher than M₁、M₂. X biomass was two to three times higher than Y after 5 days operation. Different design parameters RAB reached maximum biomass at the same time and water quality. The availability of different RAB had the same properties of simulating real distribution system.

Key words: biofilms; rotating annular bioreactor (RAB); biomass; drinking water distribution system

饮用水中营养物质含量低, 自来水厂出厂水中未被消毒剂灭活的细菌, 在给水管网系统中容易附着到营养相对丰富的给水管壁表面, 这些活细菌、死细菌及其细胞碎片和胞外聚合物(EPS)形成三维异质结构的管壁生物膜^[1]. 存在于固液界面的生物膜由于水流剪切力和老化脱落等原因导致水质恶化, 细菌总数、浊度、色度随之增加, 生物膜中可能藏匿致病菌并对致病菌有保护作用^[2-3]. 实际给水管网中生物膜的采样研究比较困难, 而且在一个运行正常的给水管网中生物膜往往是一个小型的稳定生态系统, 很难对实际生物膜的发生、发展和变化情况进行完整有效的监测.

生物膜培养反应器(RAB)是一种用于模拟饮用水管网中各种水质参数和水力条件对管壁生物膜影响的实验室物理模型. RAB 在近乎稳定流体状态下形成生物膜^[4], 可用于研究生物膜的结构和空间异质性^[5-6]、吸附动力学^[7]、污染物的降解^[8]、生物膜新陈代谢机制^[9], 消毒剂的衰减^[10]等.

本研究通过分析不同尺寸和设计参数的 RAB 对生物膜生长特性的影响, 考察了不同 RAB

收稿日期: 2007-04-24

基金项目: 国家“863”项目(2002AA601120); 北京市科委资助项目(D0605004040521)

* 责任作者, 教授, wjliu@mail.tsinghua.edu.cn

生物膜生长特性及不同水力条件对生物膜形成的影响.

1 材料与方法

1.1 原水水质

采用清华大学自来水作为试验用水,其原水是地下水.水中 TOC、COD_{Mn}、生物可同化有机碳(AOC)均较低,分别为 0.34mg/L、0.8mg/L、乙酸碳 40μg/L,无机物指标氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)分别为 0.44mg/L、17μg/L.水中细菌总数为 35cfu/mL,因原水营养物质含量较低且细菌总数低于国家生活饮用水标准细菌总数规定的 100cfu/mL^[11],所以自来水没有投加消毒剂.

1.2 试验装置与方法

RAB 由固定的外筒和旋转的转子组成,由配套的电机驱动转子转动,转子上挂有 20 个挂片.由于不锈钢化学性质稳定,不易腐蚀,可以减少材质的腐蚀对生物膜生长的影响,并且不锈钢是实际管道使用的一种材质,本研究中采用不锈钢挂片.2 台 RAB 反应器及配套调速电机,通过 LEAD-2 型蠕动泵(保定兰格恒流泵有限公司)控制进入 RAB 反应器的流量.其中 1 号 RAB 为美国原装进口产品(Biosurface Technologies Corp, 1320LJ 型),2 号 RAB 为自制.2 个 RAB 反应器设计参数如表 1 所示.

表 1 RAB 反应器设计参数

Table 1 Physical characteristics of the rotating annular bioreactor

参数	进口 RAB	自制 RAB
材质	玻璃及聚碳酸酯	有机玻璃
有效容积(mL)	1000	692
挂片数(片)	20	12
挂片表面积(cm ²)	17.4	13.3
外筒高度(cm)	20	15
内部转子的直径(cm)	14	8
内部转子的高度(cm)	17	4
内筒直径(cm)	16.2	-
外筒直径(cm)	20.4	12
水力停留时间(min)	20~50	35
转子转速(r/min)	可调	170
最大进水流量(mL/min)	50	50

注:-为无内筒

在 RAB 运行之前,先投加 200mg/L 的 H₂O₂ 对反应器进行灭菌,H₂O₂ 以 30mL/min 的速度通过反应器 2h,内部转子的转速为 170r/min.灭菌后,对反应器出水的异养菌进行 R₂A 培养基平板计数^[12-13]以确定灭菌后反应器内异养菌全部被灭活.所有试验过程均在无菌的操作条件下运行,保证 RAB 运行过程中不引入外来细菌.

1.3 生物膜的取样及生物量的测定

采用 KQ-500B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司,超声功率 500W,工作频率 40kHz,洗槽容积 22.5L)分离挂片上附着的生物膜.反应器运行一段时间后,在无菌条件下从反应器中取出挂片,使用 2~4 根灭菌棉签先后从上至下擦拭挂片 5 次,将棉签一起放入盛有 10mL 磷酸盐缓冲液(pH7.2)的试管中,然后置于超声波清洗器清洗棉签上的生物膜 20min,对清洗后的悬浮液进行 R₂A 培养基平板计数.

挂片按水平和垂直方向分区,如图 1 所示.按水平方向自挂片正面从上到下平均分为 M₁、M₂、M₃、M₄ 4 部分,考察不同水深对生物膜中生物量的影响.按照垂直方向将挂片平均分为 X 和 Y 2 部分,其中 Y 区为迎水方向,考察迎水区对生物膜中生物量生成的影响,实际管道的前端可以认为是迎水区.按上述分区方法分析不同部位生物膜中细菌的数量.

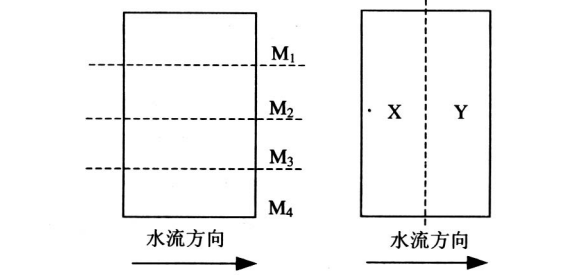


图 1 挂片分区示意

Fig.1 Schematic diagram of slides partition

2 结果与讨论

2.1 生物膜的变化

由图 2 可见,在生物膜的发展初期,1 号、2 号 RAB 内的不锈钢挂片运行不到 48h,表面就附着了

细菌.随着时间的延长,挂片上细菌的数量不断增多,1号反应器上的生物量明显高于2号反应器.

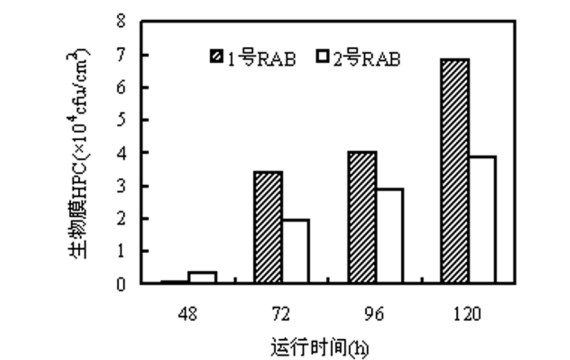


图2 两台 RABs 挂片附着生物膜 5d 的生长情况
Fig.2 Biofilm HPC on slide of two RABs during 120h

2.2 挂片不同部位生物膜的形成

由表 2 可见,在反应器刚开始运行 48h 时,挂

片上的水平分区 4 个部分生物量的平均值没有明显的差别.而运行 96h 后,挂片下部生物量明显高于挂片上部.

由表 3 可见,挂片垂直分区 X、Y 附着生物膜的生物量与水流方向有很明显的关系.运行 120h 后,X 区附着的生物膜厚度较 Y 区附着的生物膜明显厚,且生物量也高.1 号 RAB 运行 24h 后,X 区细菌浓度较 Y 区低,而 120h 后,X 区细菌浓度是 Y 区的 2 倍.2 号 RAB 在运行 24h 后,挂片 X 区细菌数量较 Y 区高,120h 后,X 区细菌数量是 Y 区的 3 倍多.2 台 RAB 的生物量遵循相同的规律.X 区与 Y 区上生物量的差异可能与水流对生物膜的冲刷作用有关,迎水面由于受到水流的剪切作用较大,生物膜不容易附着,而部分附着的生物膜在剪切力的作用下也容易脱落,造成 Y 区的生物量低于 X 区^[2].

表 2 两台 RAB 挂片水平分区生物量(cfu/cm²)
Table 2 Biomass of horizontal position on stainless slides of two RAB(cfu/cm²)

取样 时间 (h)	1 号 RAB				2 号 RAB			
	挂片上部细菌数		挂片下部细菌数		挂片上部细菌数		挂片下部细菌数	
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
48	(3.5±1.62)×10 ²	(2.9±0.78)×10 ²	(3.5±1.63)×10 ³	(2.9±0.81)×10 ³	(4.5±2.13)×10 ²	(3.8±1.06)×10 ²	(4.5±2.12)×10 ²	(9.1±4.62)×10 ³
72	(3.6±2.99)×10 ³	(2.8±1.3)×10 ³	(1.5±0.69)×10 ³	(1.5±0.97)×10 ³	(5.9±0.21)×10 ²	(3.6±1.36)×10 ³	(6.4±2.53)×10 ³	(2.5±0.98)×10 ³
96	(3.4±1.62)×10 ⁴	(6.1±1.27)×10 ⁴	(8.8±2.77)×10 ⁴	(8.0±1.62)×10 ⁴	(3.2±1.49)×10 ⁴	(2.2±1.21)×10 ³	(5.4±5.14)×10 ³	(1.4±0.62)×10 ⁴
120	(6.1±0.93)×10 ⁴	(9.7±3.9)×10 ⁴	(3.2±1.74)×10 ⁵	(1.6±1.08)×10 ⁵	(3.6±3.40)×10 ⁴	(5.6±1.06)×10 ³	(6.0±0)×10 ⁴	(1.9±1.91)×10 ⁵

表 3 RAB 挂片垂直分区生物量(cfu/cm²)
Table 3 Distribution of bacteria on stainless steel slides in the direction of the flow in the two RABs(cfu/cm²)

取样时间 (h)	1 号 RAB		2 号 RAB	
	X	Y	X	Y
24	2.49×10 ²	5.17×10 ²	3.76×10 ³	0
120	4.52×10 ⁴	2.29×10 ⁴	2.96×10 ⁴	9.02×10 ³

2.3 不同反应器生物膜的形成

RAB 反应器中转子与水流的剪切力可采用下面的经验公式进行估算^[12]:

$$\tau = \frac{1}{4} \cdot f_a \cdot \rho \cdot (2\pi\omega)^2 \cdot r \cdot (1/60)^2 \tag{1}$$

式中: τ 为剪切力, N/m²; r 为转子半径, cm; ω 为转速, r/min; ρ 为液体密度, 10³ kg/m³; f_a 为摩擦系数.

可用下面的经验公式进行估算:
$$f_a = 0.01 \ (L_f \leq 0.003 \text{cm}) \tag{2}$$
$$f_a = 0.01 + 4.33 \times (L_f - 0.003) \ (L_f > 0.003 \text{cm}) \tag{3}$$
式中: L_f 为生物膜的平均厚度, cm.

通过荧光显微镜检测挂片 $L_f = 0.0033 \text{cm}$, 可由 (3) 式计算 f_a , 因此进行剪切力计算时取 $f_a = 0.017$. 计算得 1 号、2 号 RAB 中转子与水流间的剪切力分别是 0.1 N/m² (相当于实际管道管径 400 mm, 水流速度 0.5 m/s) 和 0.6 N/m² (相当于实际管道管径 300 mm, 水流速度 0.3 m/s).

由图 3 可见, 相同进水条件 (AOC, 乙酸碳 40 μg/L, 流量 25 mL/min), 1 号、2 号反应器生物膜都经历了一个生长和脱落的过程, 生长周期分别为 20 和 10 d 左右, 且均在运行第 5 d 生物膜附着

细菌量达到最大,生长曲线相似.但其生物量不同,1 号和 2 号反应器的最大生物量分别为 7.0×10^4 , $4.0 \times 10^4 \text{cfu/cm}^2$.说明剪切力不同对生物膜的形成具有一定的影响,在较高的剪切力下,生物膜中的生物量相应较少,但对生物膜中生物量达到最大的时间没有影响.Ollos^[14]认为在生物可利用有机碳含量较低、无消毒剂存在的条件下,剪切力是影响生物膜中生物量积累的主要因素,这一结论与本研究相似.

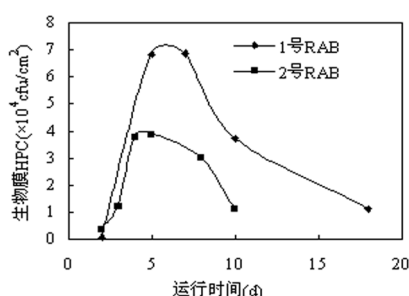


图3 两台 RAB 挂片单位面积细菌数的变化

Fig.3 Growth kinetics of biofilm bacteria on stainless slides in the two RABs

3 结论

3.1 在生物膜的发育初期,1 号、2 号 RAB 内的不锈钢挂片在运行不到 48h,表面就附着了细菌和菌落,挂片生物量分别达到 7.7×10^2 , $3.6 \times 10^3 \text{cfu/cm}^2$.

3.2 生物膜发育初期,挂片水平分区不同部位生物量没有明显的差别,运行 96h 后上部和下部生物量差别明显,挂片下部(M_3 、 M_4)的生物量高于上部(M_1 、 M_2)1~2 个数量级.

3.3 在挂片垂直分区的 X、Y,附着生物膜的密度与水流的方向有很明显的关系.在运行 120h 后,X 区附着的生物膜密度较 Y 区明显厚,且生物量也高.

3.4 相同进水条件(AOC 为乙酸碳 $40 \mu\text{g/L}$,流量 25mL/min)下,不同剪切力不会影响生物膜中生

物量达到最大的时间,但会影响生物膜的最大生物量.

参考文献:

- [1] Chrysi S Laspidou, Bruce E Rittmann. Evaluating trends in biofilm density using the UMCCA model [J]. Water Research, 2004,38(14):3362-3372.
- [2] Volk C J, LeChevallier M W. Impacts of the reduction of nutrient levels on bacterial water quality in distribution systems [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1999,65(11):4957-4966.
- [3] Piriou P, Dukan S, Kiene L. Modelling bacteriological water quality in drinking water distribution systems [J]. Water Sci. Technol., 1998,38 (8):299-307.
- [4] Characklis W G. Laboratory biofilm reactors [A]. Characklis W G, Marshall K C. Biofilms [C]. New York: John Wiley and Sons, 1990:55-89.
- [5] Gjaltema A, Arts P A M, Loosdrecht M C M, et al. Heterogeneity of biofilms in rotating annular reactors: Occurrence, structure, and consequences [J]. Biotechnol. Bioeng., 1994,44(2):194-204.
- [6] Zhang T C, Bishop P L. Density, porosity, and pore structure of biofilms [J]. Water Research, 1994,28(11):2267-2277.
- [7] Kuballa J, Griebel T. Sorption kinetics of tributyltin on Elbe river biofilms [J]. Fresenius J. Analyt. Chem., 1995,353(1):105-106.
- [8] Alleman B C, Logan B E, Gilbertson R L. Degradation of pentachlorophenol by fixed films of white rot fungi in rotating tube reactors [J]. Water Research, 1995,29(1):61-67.
- [9] Larsen T A, Harremoes P. Combined reactor and microelectrode measurements in laboratory grown biofilms [J]. Water Research, 1994,28(6):1435-1441.
- [10] Wen Lu, Laurent Ki  n  , Yves L  vi. Chlorine Demand of biofilms in water distribution systems [J]. Water Research, 1999,33(3): 827-835.
- [11] GB5749-2006, 生活饮用水卫生标准 [S].
- [12] 鲁 巍.给水管网细菌生长特性及其控制的研究 [D]. 北京:清华大学环境工程系, 2005.
- [13] 俞毓馨,吴国庆,孟宪庭.环境工程微生物检验手册 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.136-144.
- [14] Ollos Peter John. Effects of drinking water biodegradability and disinfectant residual on bacterial regrowth [D]. Ontario Candan: University of Waterloo, 1998.

作者简介: 周玲玲(1976-),女,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学市政环境工程学院博士研究生,主要从事饮用水深度处理及管网水质保障技术研究工作.发表论文 10 余篇.