

硝化型曝气生物滤池的挂膜与启动

王建华 陈永志 彭永臻*

(北京工业大学环境与能源工程学院北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100124)

摘要 近年来, 曝气生物滤池广泛应用于污水硝化过程中, 硝化型曝气生物滤池应运而生。采用快速排泥挂膜法和自然挂膜法相结合的复合挂膜法, 考察了进水是否含有机物对硝化型曝气生物滤池挂膜的影响。在 19°C 、 $\text{HRT} = 55\text{ min}$ 、出水 $\text{DO} = 8\text{ mg/L}$ 、进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 约为 50 mg/L 的条件下, 两滤池挂膜启动时间差异较大, 进水不含有机物的 1^号滤池挂膜成功仅需 18 d 当其运行稳定时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率达到 100%; 而进水含有机物的 2^号滤池挂膜成功需 24 d 当其运行稳定时, COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为 84.6% 和 91.2%。此结果表明, 与含有机物的实际生活污水相比, 采用不含有机物的模拟生活污水启动硝化型曝气生物滤池挂膜启动时间可缩短 6 d 这主要是由于异氧菌产率系数比硝化菌大。

关键词 硝化型曝气生物滤池 挂膜方式 有机物 氨氮去除

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)10-2199-05

Biofilm formation and startup of nitrification biological aeration filter

Wang Jianhua Chen Yongzhi Peng Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering
College of Environmental and Energy Engineering Beijing University of Technology Beijing 100124 China)

Abstract In recent years biological aerated filters are widely applied in sewage nitrification process, nitrifying biological aerated filter emerges because of demand. The effect of organic pollutants on the startup of nitrifying BAF was investigated by using natural biofilm formation compound with quick exhaust sludge biofilm formation. Under the conditions of $T = 19^{\circ}\text{C}$, $\text{HRT} = 55\text{ min}$, effluent $\text{DO} = 8\text{ mg/L}$ and influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ about 50 mg/L , the startup time of both nitrifying BAF was different: the first nitrifying BAF needed only 18 days when it was steady running, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal efficiency reached 100%, the second nitrifying BAF, while, needed 24 days when it was steady running. The removal efficiencies of COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were 84.6% and 91.2%, respectively. The results showed that compared with real sewage containing organic pollutants, the startup time of the first nitrifying BAF fed with artificial wastewater without organic pollutants decreased by 6 days. This was mainly because the yield coefficient of heterotrophic organisms was greater than nitrifying bacteria.

Key words nitrification biological aerated filter; biofilm formation method; organic pollutants; ammonia nitrogen removal

曝气生物滤池 (biological aerated filter BAF) 具有占地面积小、出水质量好、工艺简单、抗冲击负荷强、易于管理等优点, 被广泛应用于污水处理工艺中。然而 BAF 在实际应用中也存在不足之处: 对进水有很高的要求, 即要求 SS 很低, 用于处理实际生活污水时往往需要进行预处理, 否则会堵塞滤池, 出现水头损失, 无法运行^[1]。硝化型曝气生物滤池 (nitrification biological aerated filter) 是在滤池中主要实现氨氮的硝化反应。硝化的进水是去除有机物后的含有氨氮的废水。然而要想发挥硝化型 BAF 的硝化作用, 必须在填料上形成稳定的生物膜, 挂膜方式是形成稳定生物膜的必要条件, 选择合适的挂

膜方式对生物膜工艺的启动是至关重要的。目前, 研究较多的挂膜方法主要有接种法、自然挂膜法、循环挂膜法、快速排泥挂膜法^[2-3]。但以上研究采用的进水大都含有机物, 而有研究表明有机物的存在影响氨氮的硝化^[4-5], 因此本实验采用的是快速排

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (2008ZX07314-008-01);

北京市教委科技创新平台项目 (PXM2008_014204_050843)

收稿日期: 2009-08-20 修订日期: 2009-09-16

作者简介: 王建华 (1985~), 女, 硕士研究生, 主要从事污水处理研究工作。Email wangjianhua@emails.bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail pyz@bjut.edu.cn

泥挂膜法与自然挂膜法相结合的复合挂膜法,考察了有机物对硝化型 BAF 挂膜的影响,从而寻求一种硝化型 BAF 快速挂膜方法。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验装置

本实验采用相同的 2 个生物滤池,滤池内径 100 mm,总高 2 500 mm,其中填料高度 2 000 mm 见图 1。硝化 BAF 出水 DO 约为 8 mg/L,温度约为在 19℃。空床停留时间 (empty bed residence time, EBRT) 约为 2.5 h,实际停留时间约为 55 min,设计流量为 100 mL/min。

采用上向流曝气生物滤池工艺,曝气头与反冲洗管均设置在池底,填料采用的是生物陶粒。

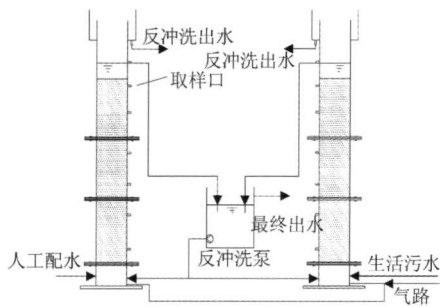


图 1 实验流程图

Fig. 1 Schematic of experimental process

1.2 实验方法

COD COD 快速测定仪测定; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$: 纳氏试剂光度法测定; $\text{NO}_2^- \text{-N}$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; $\text{NO}_3^- \text{-N}$: 麝香草酚分光光度法测定; T , pH 和 DO: WTW inolab level2 在线监测仪。

1.3 实验水质及接种污泥

1[#]水质: 实验中 1[#]滤池采用不含有机物的模拟生活污水,其组成如下: NH_4Cl 0.145 g/L, K_2HPO_4 0.10125 g/L, KH_2PO_4 0.05 g/L, CaCl_2 0.0111 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.00911 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g/L。

微量元素 1 mL, 微量元素的配方: $\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_3$ 1.5 g/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.38 g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g/L, H_3BO_3 0.01 g/L, Na_2MgO_4 0.01 g/L, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, NaCl 0.1 g/L^[6]。

采用上述配方合成污水的水质指标: $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为 50 mg/L, TP 为 10 mg/L, pH 为 7.5。

2[#]水质: 2[#]滤池采用的是实际的生活污水,其 COD 约 250 mg/L 左右, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 约为 50 mg/L。

接种污泥: 接种污泥取自某污水处理厂 SBR 中试工艺,污泥具有良好的硝化性能。

2 挂膜方法及过程

2.1 挂膜方法

本实验采用快速排泥挂膜法与自然挂膜法相结合的复合挂膜法,将接种污泥与原水以 2:1 比例混合经高压泵泵入反应器中,先曝气 2 h 使两柱中不同水质所培养的优势细菌生长到对数期即数量达到最大,停曝气后静置 8 h 此段时间污泥与滤料有足够的接触时间使其中的微生物能够附着在滤料表面,之后将泥水混合物排掉。每天如此循环 2 个周期,共进行 3 d。3 d 后以 1/2 的设计流量通入不含污泥的污水,待出水稳定后将流量加大到设计值。

2.2 挂膜过程

1[#]滤池: 1[#]滤池挂膜期间肉眼观察不到生物膜,只能从每天监测 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率的变化情况来判断其挂膜程度但从镜检照片图 2 可以看出陶粒上已经有了一定的生物量。分析原因: 由于硝化菌 (即氨氧化菌 (AOB) 与亚硝化菌 (NOB) 的统称) 是化能自养菌,不需要有机性营养物质,以二氧化碳为碳源,从无机物的氧化中获取能量,因此所配水中不含有机物也能满足硝化菌的生长要求^[7]。1[#]滤池进水不含有机物,异养菌无法成为优势菌种,而这种条件满足硝化菌的生长,没有异养菌的在空间上和 DO 等营养物质的竞争,硝化细菌将成为优势菌种,但硝化菌的产率系数要比异氧菌小的多,即硝化菌生长速度慢且包裹陶粒很紧密,形成的生物膜较薄,因此生挂膜不明显肉眼观察很难观察到。图中给出的是



图 2 微生物镜检图

Fig. 2 Diagram of microscopic inspection for microorganisms

陶粒的显微镜照片,从图中可以看出其上已经生长了大量的棒状的硝化菌。

2[#]滤池:在挂膜的第 2 d 就可以观察到 2[#]滤池的内壁上有生物膜的生长。由于陶粒的大小和滤料的分布不均匀,使得气体分布不均匀,在距离滤池底部可以明显的观察到亮白色、灰白色和深黑色 3 种颜色的粘性生物膜,其中亮白色是大量气体流过的区域即好氧区;灰白色是有少量气体经过的区域即兼性区;深黑色是无气体经过的厌氧区。而在滤池的上部挂膜初期没有观察到明显的变化,1 周后可以观察到上部的陶粒表面包围一些悬浮的污泥,但粘贴的不牢固。分析原因:上向流曝气生物滤池的底部营养物质充足,生长的多数是异养菌,而异养菌的世代时间短即生长的速度较快所以在挂膜初期滤池底部就有明显的生物膜。而底部的异氧菌对硝化细菌的竞争能力强,由于存在对空间以及 DO 的竞争,硝化菌的生长将受到限制,难以成为优势种群,硝化反应被抑制。BAF 上部随着有机物的耗尽,异氧菌的生长受到抑制此时没有了异氧菌的竞争硝化菌将成为优势菌种。

3 结果与分析

3.1 挂膜期间 2[#]滤池 COD 的去除分析

曝气生物滤池去除有机物主要依赖于滤料表面的生物膜的净化作用和滤料本身的截留作用^[8]。由图 3 可知,滤柱在进水的第 2 d 就有 30.8% 的 COD 去除率,第 7 d COD 去除率超过了 70%;由于第 8 d 进水流量的改变,COD 的去除率有所下降,但随后第 9 d 去除率又恢复到了 61.7%,第 16 d 后 COD 的去除率达到稳定,平均 84.6% 左右,出水 COD 平均为 50 mg/L,可以满足国家一级排放标准

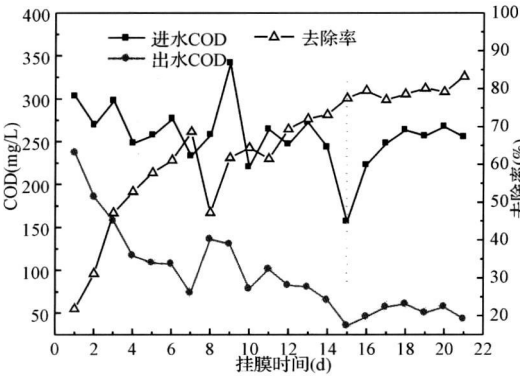


图 3 挂膜期间 2[#] COD 去除率的变化

(60 mg/L 以内)。

滤柱在第 2 d 就对 COD 有去除效果,这表明异养菌繁殖迅速;同时还说明填料的物理性能即滤料对每种物质都有的吸附作用。第 8 d 将滤速提高后滤池对 COD 的去除率下降,但是恢复的较快,说明 2[#]滤池抗冲击负荷较强,即生物膜工艺具有较好的稳定性。同时加大流速即增大了水流的剪切力,一方面将附着不牢固的生物膜淘洗掉,从而在有限的范围内增强了生物膜附着的牢固性;另一方面在生物量一定的情况下,负荷升高使得去除率下降。由于剩余的 COD 都是难降解的有机物,所以第 16 d 后 COD 的去除率达到稳定约为 84.6% 左右,无继续上升趋势,系统达到稳态。

3.2 有机物对硝化型 BAF 硝化性能的影响分析

BAF 在二级或三级废水处理中对 NH_4^+-N 具有良好的去除效率^[9~11]。如图 4 所示,1[#]滤池启动第 2 d NH_4^+-N 的去除率就达到了 26.3%,第 7 d 氨氮去除率为 100%。流速增大后,水流的剪切力以及 NH_4^+-N 负荷都有所增加,水流的剪切力的增大使得原来悬浮于陶粒表面的不牢固污泥被冲刷下来,而 NH_4^+-N 负荷增加其值超出了生物膜上的硝化细菌的处理量,想要再次达到二者的平衡,则需要更多的硝化细菌。因此第 8 d NH_4^+-N 的去除率下降到 47.2%,第 9 d NH_4^+-N 的去除率继续下降到 33.8%。随后第 10 d NH_4^+-N 的去除率又有所增加,直到第 14 d 去除率 NH_4^+-N 又重新达到了 100%。第 15 d NH_4^+-N 的去除率稳定达到 100%,说明 1[#]滤池挂膜成功。

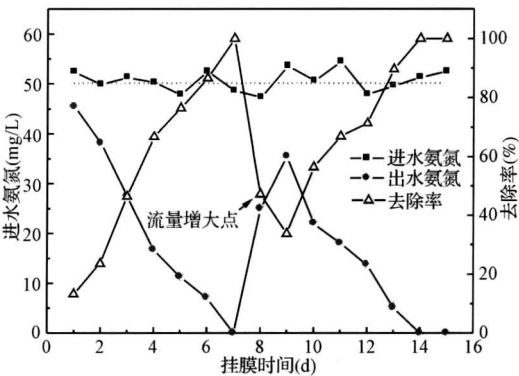


图 4 启动期间 1[#]滤池进出水 NH_4^+-N 浓度及去除率

Fig. 4 NH_4^+-N concentrations of influent and effluent and removal efficiency during start-up in No. 1 column nitrification BAF

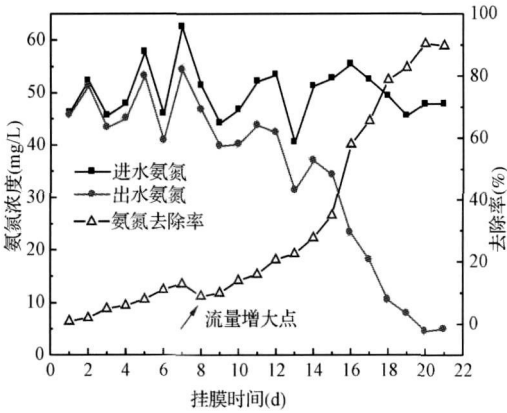


图 5 启动期间 2[#]进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及去除率
Fig. 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations of influent and effluent and removal efficiency during start-up in No. 2 column nitrification BAF

在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 50 mg/L 左右, 2[#]运行 1 周对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率没有明显变化。第 8 d 由于流量增大对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率相对有所下降。由图 5 可以观察到运行 2 周内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率增加的较缓慢, 大部分被去除的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可能都归因于异养菌同化作用所需, 对比图 3 可以看出, 在前 2 周 COD 的去除率增加的很快。第 16 d 随着 COD 的去除率达到稳定, 氨氮的去除率明显有提高, 这是因为当异养菌量由于 COD 的限制无法继续增殖时, 硝化细菌就会大量的生长, 主要表现在氨氮的去除率快速增加。第 21 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 的去除率都达到稳定, 挂膜成功。

由图 5 可知, 采用含有机物的实际生活污水挂膜期间, 硝化菌的增殖可分为 2 个阶段: 缓慢增殖期与快速增殖期。缓慢增殖期, 此阶段异养菌增殖较快, 表现为 COD 的去除率不断提高, 而因有机物的存在使得硝化菌增殖较慢, 表现为氨氮的去除率提高较慢; 快速增殖期, 此阶段异养菌基本稳定, 表现为 COD 去除率达到稳定, 硝化菌增殖较快, 表现为氨氮的去除率快速提高。

从图 4 可以看出, 1[#]滤池氨氮去除率一直上升得很快, 没有经历过缓慢增殖阶段; 相对而言, 图 5 可以看出, 2[#]滤池氨氮去除率经历了缓慢增殖阶段, 由此说明, 有机物的存在引起的异养菌的繁殖对硝化细菌的硝化作用产生负面影响。

3.3 两滤池内亚硝积累率的变化

启动期间各柱 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累率的变化情况如

图 6 所示。通过对挂膜期间各柱 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进行监测, 观察到在挂膜过程中 AOB 要比 NOB 增长得快, 具体的表现是随着各柱的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率的不断增加, 先是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大部分转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, 亚硝积累率很高, 此时出水中只监测到少量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 随着挂膜的继续, 亚硝积累率逐渐减少, 最终 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 亚硝积累率为零。分析原因: 实验接种污泥取自某污水处理厂的 SBR 工艺, 取回后放置了 6 周才开始进行实验, Morgenroth 等^[12]研究发现 SBR 工艺经过长时间的闲置, AOB 和 NOB 都有所衰减, 但 NOB 比 AOB 衰减的速率快, 即当 SBR 重新启动后, 会出现亚硝的积累现象。要想获得相同的能量, 硝化细菌所氧化的亚硝态氮必须相当于亚硝化细菌所氧化 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 量的 4 倍左右, 所以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除过程的限速步骤为亚硝化过程, 由以上 2 个原因挂膜前期出现了亚硝的高积累率。

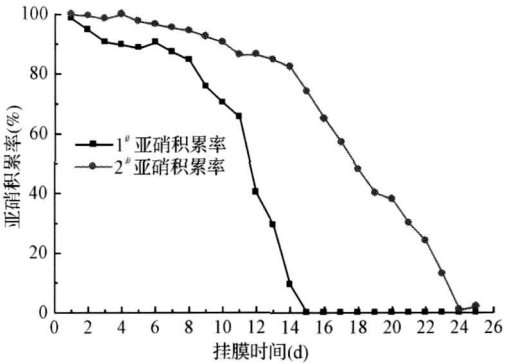


图 6 启动期间各柱 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累率
Fig. 6 Nitrite accumulation rates during start-up

3.4 挂膜期间各柱反冲洗情况

1[#]滤池: 在挂膜启动过程中, 由于 1[#]滤池的进水不含有机物, 因此异养菌相对较少, 而自养菌生长的很慢挂膜现象不明显。尽管 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理率达到 100%, 但自养菌紧紧的包裹在陶粒表面, 在挂膜启动过程没有出现过水头损失, 即整个过程中没有对其进行反冲洗。

2[#]滤池: 2[#]滤池的反冲洗频率较高, 因 2[#]滤池进水是实际的生活污水, 含有有机物, 异养细菌可大量繁殖, 挂膜第 2 d 就有很明显的水头损失, 反冲洗的频率是 2 d 而频繁的进行反冲洗会对挂膜起到负面的效应, 尤其是在挂膜的初期生物膜生长的不牢固。如果反冲洗时间过长, 还会将已经挂上的生物膜冲

出滤池。

4 结 论

(1)进水不含有机物的Ⅰ滤池启动需要 18 d 而进水含有机物的Ⅱ滤池成功启动则需要 24 d 这主要是由于进水含有机物时生物膜中菌群主要以异养菌为主,而进水不含有机物时生物膜主要以硝化菌为主,因此采用不含有机物废水启动硝化型曝气生物滤池较快。

(2)采用含有机物的生活污水挂膜时,硝化菌的增殖可分为两个阶段:缓慢增殖期和快速增殖期。缓慢增殖期,此阶段异养菌增殖较快,而硝化菌增殖较慢;快速增殖期,此阶段异养菌基本稳定,硝化菌增殖较快。

(3)挂膜期间,进水不含有机物的Ⅰ滤池无须进行反冲洗,而进水含有机物的Ⅱ滤池则需经常反冲洗,因此采用不含有机物废水启动硝化滤池,可以减少滤池的反冲洗次数,减少运行费用。

参 考 文 献

[1] 李 伟, 杨 云 龙, 高 富 丽. 曝 气 生 物 滤 池 在 生 活 污 水 处 理 中 的 应 用. 科 技 情 报 开 发 与 经 济, 2007, 17(9): 126~ 127

[2] 傅 金 祥, 陈 正 清, 赵 玉 华, 等. 挂 膜 方 式 对 曝 气 生 物 滤 池 的 影 响. 水 处 理 技 术, 2006, 32(8): 42~ 45

[3] 张 杰, 曹 相 生, 孟 雪 征, 等. 好 气 滤 池 3 种 挂 膜 方 法 的 实 验 研 究. 哈 尔 滨 工 业 大 学 学 报, 2003, 35(10): 1216~ 1219

[4] 高 景 峰, 彭 永 臻, 王 淑 莹. 以 pH 作 为 SBR 法 硝 化 过 程 模 糊 控 制 参 数 的 基 础 研 究. 应 用 与 环 境 生 物 学 报, 2003, 9(5): 549~ 553

[5] 高 景 峰, 彭 永 臻, 王 淑 莹. SBR 法 去 除 有 机 物、硝 化 和 反 硝 化 过 程 中 pH 变 化 规 律. 环 境 工 程, 2001, 19(5): 21~ 24

[6] 王 建 芳, 赵 庆 良, 林 佳 侃, 等. 低 溶 解 氧 和 磷 缺 乏 引 发 的 非 丝 状 菌 污 泥 膨 胀 及 控 制. 环 境 科 学, 2007, 28(7): 545 ~ 550

[7] 张 自 杰, 等. 排 水 工 程. 北 京: 中 国 建 筑 工 业 出 版 社, 1999. 308~ 312

[8] 傅 金 祥, 许 海 良, 赵 玉 华, 等. 曝 气 生 物 滤 池 在 污 水 回 用 中 的 挂 膜 启 动 试 验 研 究. 工 业 水 处 理, 2007, 27(3): 38~ 40

[9] Rogalla F., Badard M., Hansen E., *et al* Up-scaling a compact nitrogen removal process. Water Sci Technol, 1992, 26(5~ 6): 1067~ 1076

[10] Allan M., Leopoldo M. E., Tom S. A comparison of floating and sunken media biological aerated filters for nitrification. J. Chem. Technol Biotechnol, 1998, 72(3): 265~ 274

[11] Payraudeau M., Paffoni C., Gousailles M. Tertiary nitrification in an up flow biofilter on floating media. Influence of temperature and COD load. Water Sci Technol, 2000, 41(4~ 5): 21~ 27

[12] Morgenroth E., Obemayer A., Amold E., *et al* Effect of long-term idle periods on the performance of sequencing batch reactors. Water Science and Technology, 2000, 41(1): 105~ 113