

生物铁法-SMBR 性能的研究

邹海燕, 奚旦立*

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 200051; 2. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘要: 为提高膜生物反应器的处理效果和减轻膜污染, 将生物铁法与一体式膜生物反应器相结合, 提出了生物铁法-SMBR. 利用生物铁法-SMBR 处理模拟印染废水并与普通 SMBR 进行平行对比试验. 结果表明, 生物铁法-SMBR 在提高处理效果、减轻膜污染、改善污泥性能方面具有明显优势. 在容积负荷比普通 SMBR 平均高 25 % 的情况下, 生物铁法-SMBR 对 COD、染料和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效率分别高 1.0 %、9.5 % 和 5.2 %. 在膜通量均值比普通 SMBR 提高 25 % 的情况下, 压差只有后者的 36 %. 在不排泥的条件下, 生物铁法-SMBR 稳定运行天数是后者的 2.5 倍. 生物铁法-SMBR 污泥絮体疏松多孔、呈团粒状、颗粒大, 平均粒径是后者的 3.10 倍, 系统中存在大量原、后生动物, 污泥比耗氧速率 SOUR 是后者的 1.23 倍.

关键词: 生物铁法-SMBR; 处理效果; 膜污染; 污泥特性; 印染废水

中图分类号: X791 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0065-06

Studies on the Performance of Bioferrie-SMBR

ZOU Hai-yan, XI Dan-li

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. College of National Land Resource and Environment, Jiangxi Agriculture University, Nanchang 330045, China)

Abstract: To enhance removal efficiency and to mitigate membrane fouling, submerged membrane bioreactor and Bioferrie process are combined to Bioferrie-SMBR. Parallel compared experiment of Bioferrie-SMBR and common SMBR dealing with dyeing wastewater was carried out. Bioferrie-SMBR show great superiority and can enhance removal efficiency, reduce membrane fouling and improve sludge characteristic. When volume load rate is 25 % higher than that of common SMBR, the removal efficiency of Bioferrie-SMBR on COD, chroma and $\text{NH}_3\text{-N}$ is 1.0 %, 9.5 % and 5.2 % higher than that of the latter respectively. The trans-membrane pressure of Bioferrie-SMBR is just only 36 % of that in common SMBR while it's membrane flux is 25 % higher than that of common SMBR. It's stably running day is 2.5 folds of which in common SMBR when there is no surplus sludge discharged. The MLSS concentration of Bioferrie-SMBR is higher than that of the latter with more different kinds microorganism such as protozoan, metazoan, etc. It's mean particle diameter value and sludge oxygen use rate (SOUR) of the former are 3.10, 1.23 times of the latter respectively.

Key words: Bioferrie-SMBR; removal efficiency; membrane fouling; sludge characteristic; dyeing wastewater

一体式膜生物反应器(SMBR)有出水水质好、剩余污泥少、占地少、运行管理方便等优点,但膜易受污染使运行维护费用过高,限制了其进一步推广应用.目前膜污染控制对策主要有:反冲洗^[1];化学清洗;加入活性炭粉末、铝盐或沸石^[2]改善混合液过滤特性等.尽管如此,膜污染问题仍未得到很好地解决.

铁盐或氢氧化铁可作为絮凝剂改善污泥过滤性能,生物铁法(即铁盐或氢氧化铁用于传统活性污泥法废水处理)还可大大提高 COD 和氨氮的去除率,增强系统受冲击负荷能力^[3].为提高膜生物反应器的处理效果和减轻膜污染,笔者在一体式膜生物反应器中加入氢氧化铁絮体,将生物铁法与一体式膜生物反应器相结合,提出生物铁法-SMBR.本文研究该工艺处理模拟印染废水的处理效果、膜污染情况和污泥特性.

1 材料与方法

1.1 试验工艺流程及装置

试验系统如图 1 所示,采用 2 套完全相同的装置进行对比.1 号为普通 SMBR,2 号为生物铁法-SMBR.反应器有效容积为 5 L,膜组件为聚偏氟乙烯中空纤维膜,每个反应器中的膜面积为 0.05 m².2 个系统进水浓度相同.根据污泥浓度每周 2 次向 2 号反应器补充 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮体(铁含量为污泥重量 5 %).

1.2 试验运行条件

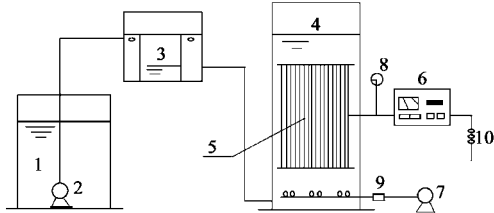
2 个反应器试验温度均为 22 ℃ ~ 10 ℃, DO 4 ~

收稿日期:2004-09-15;修订日期:2004-11-21

基金项目:上海市科委重点科技攻关项目(012312032)

作者简介:邹海燕(1976 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为膜生物反应器.

* 通讯联系人, E-mail: xdl@dhu.edu.cn



1. 配水箱;2. 进水泵;3. 液位平衡水箱;4. 生物反应器;
5. 膜组件;6. LD-4 型数显恒流泵;7. 空压机;8. 压力计;
9. 空气流量计;10. 流量计

图 1 试验工艺流程

Fig.1 Experimental configuration

5 mg·L⁻¹.试验运行前 56d 未排泥,最后几天由于阻力太大,每天排出 200 mL 污泥.HRT 约 13h.系统每天连续出水 23h,空曝 1h.由于膜通量比预期低,为达到设计的容积负荷,后期增加进水浓度,所以在 1~20d 和 21~65d 2 个阶段进水浓度不同,容积负荷也相应不同.试验用水采用人工配制模拟印染废水,第 1 阶段成分和浓度见表 1,第 2 阶段所有成分浓度为第 1 阶段的 2 倍.

表 1 模拟印染废水组成/ mg·L⁻¹

Table 1 The components of synthetic dyeing wastewater/ mg·L⁻¹

成分	浓度	成分	浓度
活性艳蓝染料	30	NH ₄ HCO ₃	150
葡萄糖	300	KH ₂ PO ₃	25
淀粉	300	MgSO ₄	20
醋酸 98 %	15	FeSO ₄ ·7 H ₂ O	0.3
元明粉	30	MnSO ₄ ·7 H ₂ O	6
均染剂 AN	10	CaCl ₂	6

1.3 污泥驯化

接种污泥取自上海天山污水处理厂.污泥驯化分 2 阶段.第 1 阶段:取回的污泥配以一定量的营养液加以培养,使其恢复活性,然后逐渐加大模拟印染废水量驯化 1 周.第 2 阶段:将氢氧化铁絮体加入污泥中,继续驯化 1 周,形成颗粒较大的团状生物铁污泥.氢氧化铁絮体由氯化铁溶解后加入氢氧化钠溶液制得.

1.4 分析项目与方法

COD、NH₃-N、污泥浓度等指标按《水和废水监测分析方法》第三版中标准方法进行测定;污泥生物相采用 XSP-12CA 型带摄像头的显微镜拍摄;污泥好氧呼吸速率采用德国 WTW 公司溶解氧仪测定;活性艳蓝 KN-R 染料在 610nm 处比色测定;混合液

的相对通量变化和阻力分布实验采用文献^[4]中的终端过滤试验方法;粒径分布采用光散射法,用 LAS 激光粒度分析仪(USA)测定.

2 结果与分析

2.1 处理效果

表 2 和图 2 显示了 2 个系统 COD、染料和 NH₃-N 的容积负荷、去除效率和进出水浓度.由于进水为人工配制,进水浓度稳定.从表 2 中可见,2 个系统对 COD、NH₃-N 的去除率都很高,1 号分别为 91.5 %、91.2 %,2 号分别为 92.5 %、96.4 %;而对染料的去除效率 1 号仅 72.8 %,2 号高一些,为 82.3 %.从图 2 可以看出,尽管系统运行 20d 后,进水浓度增加 1 倍,但 2 个系统出水 COD、NH₃-N 及 2 号染料浓度保持稳定,并未升高,说明 S-MBR 容积负荷高,抗冲击负荷能力强.2 个系统进水浓度相同,但由于膜通量不同(数据见 2.2.1)使处理水量不同,最终导致容积负荷不同.整个运行期间,2 号容积负荷比 1 号平均高 25 %.尽管如此,2 号出水 COD、染料和 NH₃-N 浓度一直比 1 号低,均值分别低 8.40 mg·L⁻¹、3.85 mg·L⁻¹和 1.80 mg·L⁻¹.进水浓度相同,2 号出水浓度低,所以去除率比 1 号高.整个运行期间 2 号对 COD、染料和 NH₃-N 的去除率分别比 1 号高 1.0 %、9.5 %和 5.2 %.可见生物铁法-S-MBR 对污染物质的降解和转化效果比普通 S-MBR 好,对染料尤为明显.

表 2 COD、染料和 NH₃-N 进出水浓度及去除率¹⁾

Table 2 The concentration in influent and effluent and removal efficiency of COD, chroma and NH₃-N

项目	编号	COD	染料	氨氮
进水/ mg·L ⁻¹		527.15	25.91	25.9
容积负荷	1	0.63	0.039	0.031
	2	0.74	0.046	0.036
第 1 阶段				
上清液/ mg·L ⁻¹	1	131.21	10.39	3.48
	2	100.42	6.58	1.86
出水/ mg·L ⁻¹	1	67.84	9.85	3.30
	2	59.47	6.01	1.50
去除率/ %	1	87.1	62.0	87.3
	2	88.9	76.9	94.2
第 2 阶段				
进水/ mg·L ⁻¹		1174.56	47.13	53.13
容积负荷	1	1.29	0.05	0.047
	2	1.66	0.65	0.061
上清液/ mg·L ⁻¹	1	94.2	79.1	93.8
	2	95.0	87.2	97.2
出水/ mg·L ⁻¹	1	91.5	72.8	91.2
	2	92.5	82.3	96.4
总去除率/ %	1	91.5	72.8	91.2
	2	92.5	82.3	96.4

1) 上清液和出水浓度为整个运行期间均值

试验运行时温度逐渐降低,从图 2(a)、图 2(c)中可看出,2 个系统出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度一直保持稳定,但图 2(b) 显示 2 号出水染料浓度逐渐升高,这说明生物铁法-SMBR 对染料的降解受低温影响大.不过即使最低温 10°C 时,2 号出水染料浓度也比 1 号稍低.

图 2(c) 显示 1 号出水在运行开始几天氨氮浓度较高,这是由于硝化细菌世代时间长.在此期间 2 号比 1 号低较多,这与 2 号污泥在系统运行之前就已经加氢氧化铁驯化 1 周有关,说明铁有助于硝化细菌生长.这与文献[5]中铁对硝化反应有促进作用的研究结论相似.

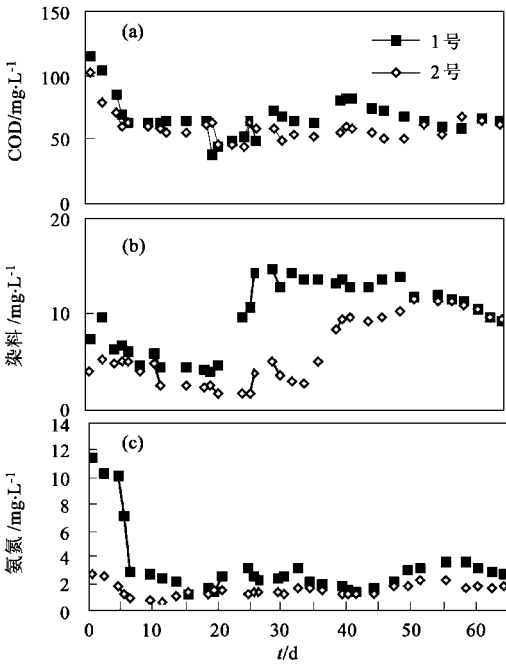


图 2 出水 COD、染料和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度

Fig. 2 COD, chroma and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in effluent

图 3 为运行期间上清液 COD 值变化.从图 3 可看出,在试验运行后的开始几天,2 个系统都逐渐下降,这是由于系统运行逐渐趋于稳定.之后 2 号一直稳定在约 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,直到第 50d 后,由于温度骤降以及未排泥,几天内急剧上升至 $220\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.而 1 号从第 20d 后就逐渐升高,到第 56d 达 $235\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.在第 57d 后每个系统每 d 排出 200 mL 污泥,几天内 2 号上清液 COD 值迅速下降,而 1 号下降缓慢.

2.2 膜污染情况及料液过滤特性

2.2.1 运行过程中压差和膜通量变化

试验前期试图用 $10\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的膜通量运行,结果压差急剧上升,通量急剧衰减,2 次失败后定为 $6\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.在实验运行的第 13d、21d、40d 对膜组件用空气反冲洗,第 25d、48d 进行化学清洗.图 4 为运行过程中膜通量和压差.从图 4 可见,生物铁法-SMBR 通量可基本稳定在 $6\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,阻力增长缓慢,当通量提高到 $10\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 时衰减很快,压差上升也快.普通 SMBR 2 种情况下通量衰减都很快,压差上升也快,特别是在 $10\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 时,表现更为明显.实验运行至第 57d 后,2 个系统每天排出 200 mL 污泥.从图 4 看出,排泥使普通 SMBR 压力不再急剧升高,通量不再急剧衰减;而生物铁法-SMBR 压力逐渐下降,通量保持较高水平.运行过程中,1 号膜通量均值为 $4.93\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,压力均值为 30.2 KPa ,2 号分别为 $6.17\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 10.85 KPa .2 号膜通量均值为 1 号的 1.25 倍,压差为 1 号的 36%.可见加入氢氧化铁对减轻膜污染、提高膜通量有显著作用.

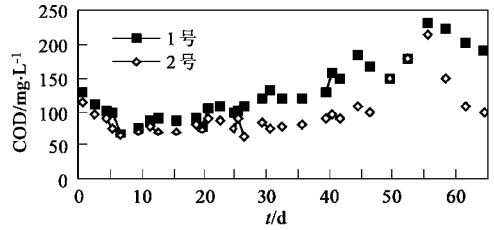


图 3 上清液 COD

Fig. 3 COD in supernatant

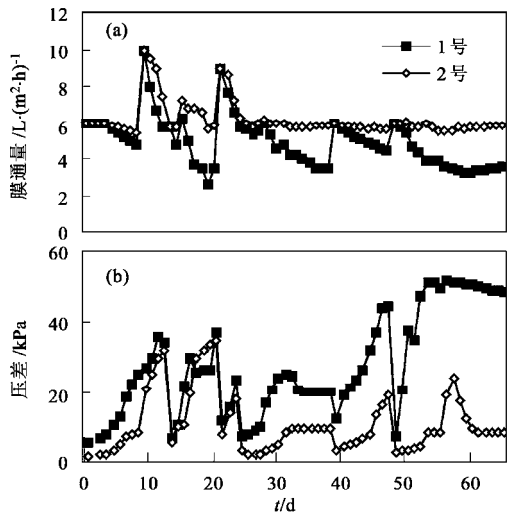


图 4 运行期间膜通量和压差

Fig. 4 Membrane flux and trans-membrane pressure during operation

2.2.2 混合液终端过滤阻力实验

膜污染可用膜过滤中的污染阻力来表征.根据达西方程: $J = \Delta p / \mu R$. 式中 J 为膜通量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Δp 为膜两侧压差 (Pa); μ 为透过液粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); R 为总阻力 (m^{-1}). 一般来说,膜过滤总阻力 (R) 包括固有阻力 (R_m)、内部污染阻力 (R_{if})、凝胶极化阻力 (R_p) 和外部污染阻力 (R_{ef}). 由于凝胶极化阻力与外部阻力在试验中难以准确区分,因此将其合并作为沉积层阻力 (R_c). 可用下式表示:

$$R = R_m + R_p + R_{ef} + R_{if} = R_m + R_c + R_{if}$$

试验稳定运行时测定了混合液过滤通量变化和阻力分布,结果如图 5、图 6 所示.从图 5 可看出,在最初几 min 内,1 号、2 号通量都急剧衰减,相应总阻力则不断增加,但 2 号通量显然比 1 号大得多,衰减慢,相应阻力值小得多.从图 6 可以看出,2 号混合液总阻力、沉积层阻力、内部阻力都比 1 号小,其值分别是 1 号的 44.5%、29.2%、69.6%.这说明加氢氧化铁絮体可大大减小内部阻力和沉积层阻力,对沉积层阻力的减小尤为显著.

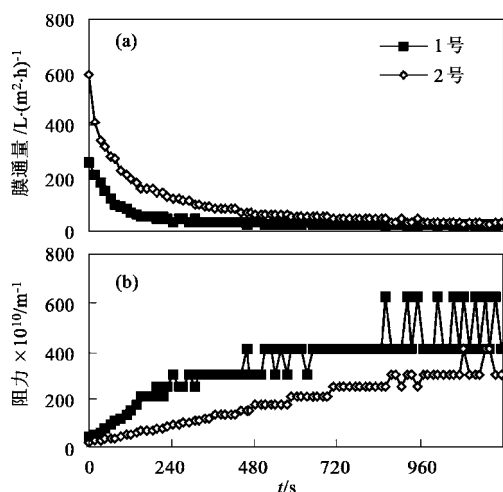


图 5 30kPa 下混合液过滤通量和阻力

Fig. 5 Membrane flux and total resistance under 30 kPa transfer membrane pressure

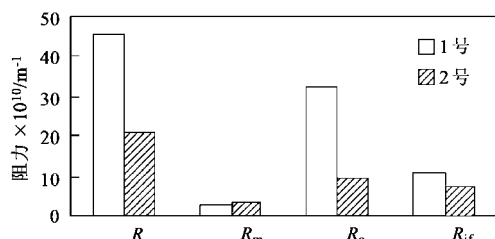


图 6 各项阻力值

Fig. 6 Each kind resistance value

2.3 污泥特性

2.3.1 污泥结构特征

通过镜检和试验稳定运行时拍摄污泥照片(图 7),发现生物铁法-SMBR 污泥絮体疏松多孔,呈团粒状,即微生物菌胶团与铁絮体附着在一起,连接成一个整体,各自组成分散的颗粒状结构,污泥粒径明显较大,见图 7(a).而普通 SMBR 污泥密实,污泥边缘形状不规则,絮体之间连接少,污泥粒径小,呈树枝状,见图 7(b).生物铁污泥的这一结构特点,使得污泥颗粒比表面积大,能吸附分解更多的有机物,且有利于氧的吸收.

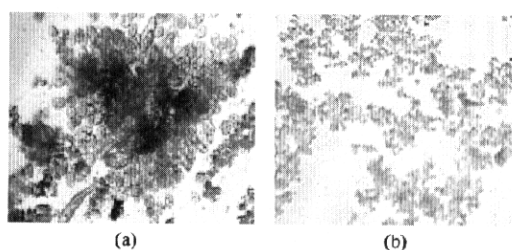


图 7 污泥照片

Fig. 7 Sludge photos

2.3.2 微生物相

镜检发现生物铁法-SMBR 中,在较大的生物铁污泥颗粒表面和周围生长着种类繁多、形态各异、数目巨大的原、后生动物,如钟虫、轮虫等,微生物活动活跃.而在普通 SMBR 系统中原、后生动物少得多.

2.3.3 污泥浓度

污泥浓度 MLSS 变化如图 8 所示.从图 8 可见,第 1 阶段,MLSS 增加缓慢;第 2 阶段由于系统运行更稳定且容积负荷增大,MLSS 快速上升,之后基本稳定,2 个系统表现相似.但 2 号 MLSS 一直比 1 号高,第 2 阶段稳定后表现更明显,2 号和 1 号的稳定值分别约为 $14.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.挥发性污泥浓度 MLVSS 也有相似规律(数据未给出).2 号 MLSS、MLVSS 比 1 号高是由于其容积负荷更高.

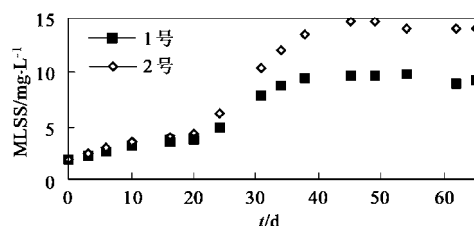


图 8 污泥浓度

Fig. 8 MLSS at different time

2.3.4 污泥活性

用污泥好氧速率表示的污泥活性如图 9. 从图 9 (a) 可看出, 随运行时间延长及污泥浓度增加, 体积比耗氧速率(OUR) 增大. 从图 9 (b) 可看出, 整个运行期间 2 号污泥比耗氧速率(SOUR) 一直比 1 号高, 均值 $4.99 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 是 1 号 $4.06 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 的 1.23 倍. 随运行时间延长, 2 个系统 SOUR 均下降, 这是受污泥老化和温度下降的影响^[4].

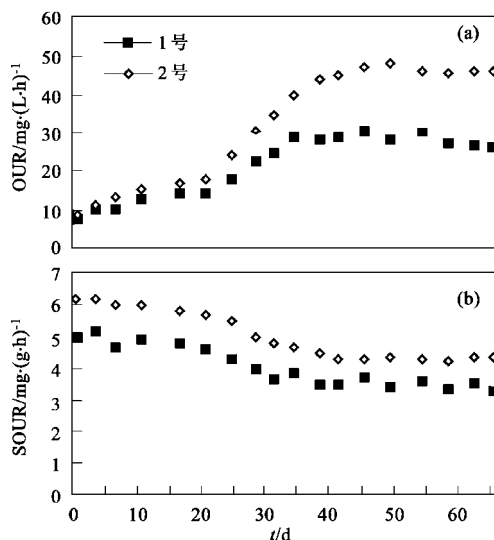


图 9 污泥耗氧速率

Fig. 9 Oxygen use rate

生物铁法-SMBR 污泥活性比普通 SMBR 高是由于: ①铁是微生物生长的必要元素^[6], 是生物氧化酶系中细胞色素的重要组成部分, 通过 $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$ 氧化还原反应进行电子传递作用. ②生物铁污泥的特殊结构使氧易于吸收^[3], 能提高好氧微生物的活性; ③丰富的微生物相, 也提高了污泥活性.

2.3.5 污泥粒径

在 SMBR 系统中加入氢氧化铁絮体可破坏混合液胶体的稳定性. 铁离子及铁的氢氧化物, 通过静电中和以及卷扫作用, 减小固体颗粒与水分子的亲和力, 增大颗粒之间的凝聚力, 增大粒径. 试验稳定运行时对污泥粒径进行了测定, 结果如图 10 所示.

投加了氢氧化铁形成的生物铁污泥粒径更大, 且波峰集中. 2 号污泥平均粒径 $338.7 \mu\text{m}$, 是 1 号 $108 \mu\text{m}$ 的 3.1 倍, 且细小颗粒明显比 1 号少, 分布频率为 10 % 的粒径值由 $16.4 \mu\text{m}$ 提高到 $55.1 \mu\text{m}$, 提高了 3.3 倍.

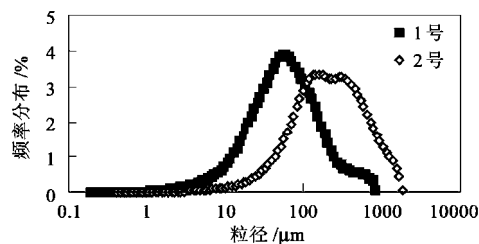


图 10 污泥粒径频率分布

Fig. 10 Sludge particle size distribution

3 讨论

3.1 处理效果的提高

生物铁法-SMBR 对 COD、染料和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的容积负荷和去除效率明显优于普通 SMBR 是由于污泥结构好, 微生物相丰富, 生物量更多, 污泥活性更高. 虽然 2 号污泥含铁量达到 5 %, 但由于不排泥, 运行期间一共才投加了 $750 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其对污染物质的直接絮凝作用对于整个运行期间的去处效率贡献很小.

3.2 膜污染的减轻

2 号加入氢氧化铁絮体后形成的生物铁污泥粒径大且疏松多孔. 由沉积层阻力表达式 Carman-Kozeny 公式^[4]可知, 这可大大减少沉积层阻力. 另外小颗粒物不仅对沉积层阻力和内部阻力影响很大, 并且由于在膜孔内沉积和粘附, 会直接导致通量衰减, 所以 2 号对通量衰减影响大的小颗粒物数量大大减少, 也显著减轻了膜内部污染并提高膜通量. 溶解性有机物减少也使膜污染得到改善. 上清液中 COD 可以间接代表反应器中的溶解性有机物的量, 根据运行结果可知, 2 号上清液 COD 平均值比 1 号低 $30.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Yasutoshi^[7]认为由于膜的截留作用, 混合液中溶解性有机物会在膜表面积形成凝胶层. 所以生物铁法-SMBR 溶解性有机物减少也是减轻膜污染的重要原因.

3.3 污泥排放

由于试验温度低, 污泥增长缓慢, 运行时间又短, 所以试验设计为不排泥. 虽然试验运行前 56d 不排泥条件下 2 个系统的出水水质稳定, 但是 1 号上清液 COD 从第 20d 开始就逐渐升高, 阻力上升较快, 而 2 号这一现象晚 30d 发生. 由于上清液 COD 值过高和膜污染加剧, 在第 57d 开始排泥, 之后几天内 2 号阻力和上清液 COD 值迅速下降, 而 1 号下降较慢. 这说明系统不排泥时, 2 号可比 1 号稳定运行更长时间, 而且是在容积负荷比前者平均高 25 % 的

情况下,也就是说,如果排泥,生物铁法-SMBR比普通SMBR可有更长的污泥龄,即可减少污泥排放,降低污泥处理费用。

生物铁法-SMBR微生物组成较普通SMBR复杂,原、后生动物多,具有更长的生物链。原、后生动物在这个系统生物链的最高端,它们捕食细菌,将污泥转化为能量、水、二氧化碳,从而使污泥量减少。

3.4 技术应用

生物铁法-SMBR可显著提高容积负荷和处理效果,减少污泥排放,同时可大幅度减轻膜污染和提高膜通量,工程应用上可减小曝气池容积,减少膜使用量及延长膜使用寿命,大大降低污水处理厂投资和运行维护费用。这些对工程推广具有很强的吸引力,将普通SMBR改造为生物铁法-SMBR十分简单,除了开始驯化时需一次投加一定量的氢氧化铁外,正常运转只需补充排放污泥所带走的铁,其他方面与原有工艺完全相同。

4 结论

(1)与普通SMBR相比,生物铁法-SMBR能提高印染废水的容积负荷和处理效率并改善出水水质。在容积负荷比前者平均高25%时,对COD、染料和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效率分别高1.0%、9.5%、5.2%,出水浓度分别低 $8.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)生物铁法-SMBR能显著减轻膜污染和提高膜通量,运行结果表明通量比普通SMBR平均高

25%时,压差均值只有后者的36%。阻力分布实验表明其过滤总阻力、沉积层阻力和内部阻力分别只有后者的44.5%、29.2%和69.6%。

(3)在不排泥且容积负荷平均高25%时,生物铁法-SMBR比普通SMBR能稳定运行更长时间。即如果排泥,可以有更长的污泥龄,可减少污泥排放,降低污泥处理费用。

(4)生物铁法-SMBR污泥疏松多孔,呈团粒状,粒径大,平均粒径 $338.7\mu\text{m}$ 是普通SMBR $108\mu\text{m}$ 的3.1倍。生物相复杂,原、后生动物多,污泥浓度高,活性好,其SOUR均值是普通SMBR的1.23倍。

参考文献:

- [1] 刘锐,黄霞,王诚文,等. 一体式膜生物反应器长期运行的膜污染控制[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 58~61.
- [2] Lee J. C. Potential and limitation of alum or zeolite addition to improve the performance of a submerged membrane bioreactor [J]. Wat. Sci. Tech., 2001, 43(11): 59~66.
- [3] 孙天华,林少宁,余智梅,等. 生物铁法处理高浓度难降解印染废水的研究[J]. 中国环境科学, 1991, 11(2): 138~142.
- [4] 顾国维,何义亮. 膜生物反应器[M]. 北京:化学工业出版社, 2002. 297~298, 217~228, 293~294.
- [5] 王秀衡,任南琪,王爱杰,等. 铁锰离子对硝化反应的影响效应研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 122~125.
- [6] 周群英,高廷耀. 环境工程微生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. 75~76.
- [7] Yasutoshi S. Filtration characteristics of hollow fiber micro filtration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. Wat. Res., 1996, 30(100): 2385~2392.