一体式与复合式MBR运行特性对比研究

张立秋　封　莉　邹联沛　王宝贞

提要　对一体式 MBR 与复合式 MBR 处理生活污水的净水效能、膜组件的工作周期进行了对比研究，得出两种型式的 MBR 对 COD 和 NH_3-N 都有着较高的去除效果，平均去除率分别在 94% 和 97% 以上，复合式 MBR 在 TN 的去除效率、膜组件的稳定运行方面要优于一体式 MBR。

关键词　一体式 MBR　复合式 MBR　运行特性　生活污水

一体式 MBR 具有占地面积少、运行能耗低等优点而成为研究的热点。在一体式 MBR 中，生物反应器内安装一定形式的填料，就构成了复合式 MBR。生物反应器内安装填料的目的有两个：一是提高系统的抗冲击负荷能力，保证系统具有稳定的处理效果；二是可减少膜污染，延长膜组件的清洗周期。本文在实验室对两种型式 MBR 的运行特性进行了对比研究。

1　试验材料和方法

1.1　试验装置及流程(见图 1)

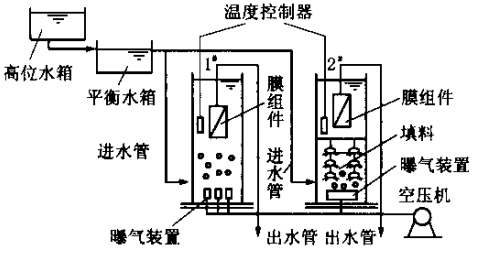

图 1　试验装置示意

在实验室共组装了 2 套装置，分别编号为 1# 和 2# 反应器，1# 为一体式 MBR，2# 为复合式 MBR，两个反应器共用一个高位水箱和平衡水箱。1# 反应器采用内径为 14 cm 的有机玻璃柱，柱体有效高度 100 cm，总有效容积为 15.4 L。2# 反应器为聚氯乙烯材料制成，尺寸为 $L \times B = 28\ cm \times 28\ cm$，有效高度 70 cm，总有效容积为 55 L，反应器下部为填料区，填料高度 35 cm。1# 反应器下部采用砂头曝气器，2# 反应器下部为穿孔管曝气，空气来自空压机。

1.2　试验所用填料

2# 反应器内的填料为具有海绵蜂窝状结构的高分子聚合物，将其剪成细长条，在中心加以固定，构成直径为 8 cm 的圆盘形状，用塑料将填料连接成串。反应器内共安装填料 7 串，每串填料平均干重为 13 g。有关该填料的物理性质见表 1。

表 1　填料的物理性质

孔径 /mm	孔隙率 /%	比表面积 $/m^2/m^3$	密度 $/kg/m^3$	湿密度 $/kg/m^3$
0.5 ~ 1.5	90	1 000 ~ 5 000	25	940 ~ 970

1.3　试验原水水质

试验主要考察两种型式的 MBR 处理生活污水的运行特性。原水采用直链淀粉、蔗糖、牛肉膏、蛋白胨、NH_4Cl、NaH_2PO_4、Na_2HPO_4 等配制而成。原水水质情况见表 2。

表 2　试验原水水质

序号	指标	浓度/mg/L
1	COD	266.38 ~ 346.05
2	NH_3-N	13.03 ~ 24.59
3	TN	15.22 ~ 28.34
4	TP	2.60 ~ 9.28

1.4　测定项目和方法

试验中主要的分析项目包括：COD，NH_3-N，TN，TP 等。水质分析方法见表 3。

1.5　试验方法

表 3　水质分析项目和方法

分析项目	分析方法	分析设备
COD	重铬酸钾法	四联可调电炉
NH_3-N	钠试剂法	721 分光光度计
TN	消解氧化法	752 紫外分光光度计
TP	氯化亚锡还原法	721 分光光度计

在 1# 和 2# 反应器内活性污泥培养驯化完成，系统运行稳定之后，控制反应器内温度为 24 ℃，DO

为4 mg/L左右，pH 在 6.5 ~ 7.5 之间，HRT 为6 h，连续 1 个月对两套系统进、出水的各项指标进行了检测，并记录了膜两侧操作压力的变化情况。

试验开始时，1# 反应器内的活性污泥浓度(MLVSS)为2 650 mg/L，2# 反应器内的悬浮性 MLVSS 为2 228 mg/L；试验结束时，1# 反应器内的 MLVSS 为 6 355 mg/L，2# 反应器内的悬浮性 MLVSS 为4 000 mg/L，将填料从反应器中取出，烘干后称重，每根填料平均重量为 32 g，经计算填料上粘附的污泥浓度为2 418 mg/L，则 2# 反应器内总的 MLVSS 为6 418 mg/L。

2 试验结果与讨论

2.1 COD 的去除效果对比

一体式 MBR 和复合式 MBR 对 COD 的去除效果见图 2。

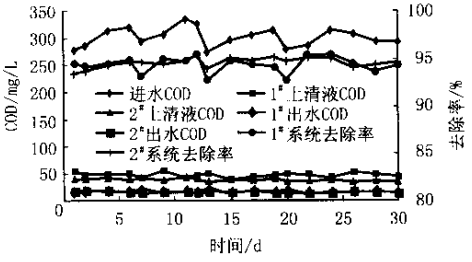

图 2 COD 去除效果

图 2 表明，当进水 COD 平均浓度在 300 mg/L 左右时，一体式 MBR 和复合式 MBR 的出水 COD 浓度均在 20 mg/L 以下，COD 的平均去除率在 94% 以上，说明两套系统对有机物均有着较好的去除效果。从图 2 中还可以看出，1# 和 2# 反应器内上清液的 COD 浓度有所不同，加装填料的 2# 反应器内上清液 COD 浓度小于 1# 反应器内上清液 COD 浓度，说明加装填料后对有机物的去除效果更加稳定，而膜组件对系统的最后出水水质起到了关键性的作用。

2.2 NH_3-N 的去除效果对比

一体式 MBR 和复合式 MBR 对 NH_3-N 的去除效果见图 3。

图 3 表明，一体式 MBR 和复合式 MBR 对 NH_3-N 均有较高的去除率，平均去除率在 97% 以上，在进水 NH_3-N 平均浓度为 16 mg/L 左右的情况下，出水中 NH_3-N 平均浓度低于 1 mg/L，有时出水 NH_3

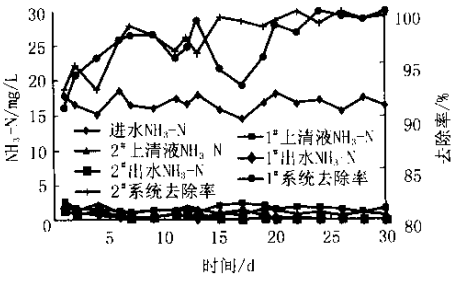

图 3 NH_3-N 去除效果

-N 浓度为零。从图 3 中还可看出，随着时间的增加，NH_3-N 的去除率呈上升趋势，这主要是由于膜组件的截留作用，使得反应器内世代时间较长的硝化细菌的数量逐渐增加，硝化效果提高的结果。同时发现，上清液中的 NH_3-N 浓度高于出水，说明反应器内混合液在经过膜组件出水的过程中，NH_3-N 得到了进一步去除，主要是因为膜表面粘附的滤饼层起到了生物膜的作用，吸附了出水中的 NH_3-N，使其浓度降低。

2.3 TN 的去除效果对比

一体式 MBR 和复合式 MBR 对 TN 的去除效果见图 4。

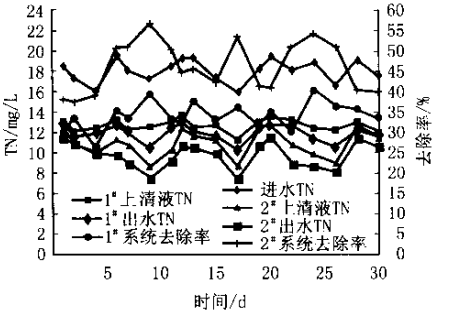

图 4 TN 去除效果

从图 4 中可以看出，在本试验条件下，一体式 MBR 和复合式 MBR 对 TN 的去除效果均不理想，主要原因是反应器内 DO 值较高，未形成良好的反硝化条件，TN 的去除主要依靠生物同化作用。有研究表明，控制反应器内 DO 浓度在一定的范围，可在 MBR 中实现同步硝化-反硝化，当 DO 为 1 mg/L 时，TN 的去除率可达 90% 以上。还可看出，1# 反应器中 TN 的平均去除率 33%，2# 反应器中 TN 的平均去除率为 45%，反应器内安装填料后，TN 的去除率提

高了 12%。分析其原因为：填料上附着生长的生物膜，其表面和污水不断接触，从中获得足够的溶解氧，处于好氧状态，膜表面生长的硝化细菌，可将水中的 NH_3-N 转化为 $NO_x^- - N$。而生物膜内部则因为氧供应不足而形成缺氧或厌氧区，创造了适合反硝化细菌生长的环境，反硝化细菌利用膜表面硝化细菌的产物 $NO_x^- - N$，将其还原为 N_2，从而提高了 TN 的去除效果。

试验过程中，取小片填料做成切片，在电镜下观察，可以清楚地看到填料表面生物膜生长状况良好，附着生长着大量的球菌和短杆菌。从放大相同倍数的填料断面电镜照片中发现，在生物膜内部存在数量较多的具有反硝化作用的球菌，这就解释了为什么在反应器内加装填料会提高 TN 的去除效果。

2.4 TP 的去除效果对比

一体式 MBR 和复合式 MBR 对 TP 的去除效果见图 5。

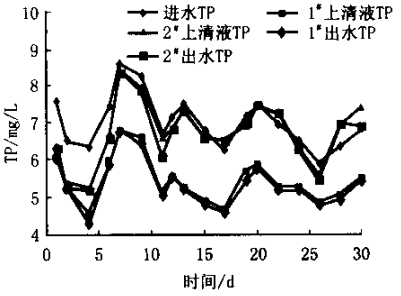

图 5 TP 去除效果

从图 5 中看出，1# 反应器对 TP 的平均去除效率在 22% 左右；2# 反应器的去除效率更低，不足 10%，在试验后期，有时还会出现出水和上清液中的 TP 浓度高于进水 TP 浓度的现象。TP 去除效果差，主要是因为试验中没有进行排泥造成的。

2.5 膜操作压力变化对比

随着运行时间的延长，膜组件所受到的污染将会加重，为了维持恒定的膜通量以保证水力停留时间为 6 h，需要不断改变膜两侧的操作压力。本试验中，以反应器内的液面高度与出水管的位置高差 ΔH 来表示膜两侧的操作压力。试验期间，1# 反应器和 2# 反应器的 ΔH 值变化见图 6。

从图 6 中可以看出，随时间延长，ΔH 值逐渐升高，说明膜污染程度加重，为了维持膜通量需要不断

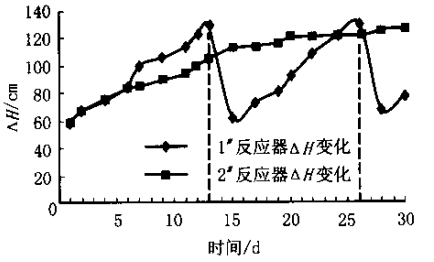

图 6 ΔH 变化曲线

增加过膜压力。从图中还可以清楚地看到，1# 反应器中 ΔH 值增加明显要快于 2# 反应器，当试验进行至 13 d 和 26 d 时，1# 反应器的 ΔH 值已经达到了本试验所能达到的最大值 130 cm（由于试验装置安装高度的限制），此时需要对膜组件进行清洗。试验中采用水力清洗，清洗过程为：首先将膜组件从反应器中取出，用自来水冲洗膜表面粘附的滤饼；然后从出水管间歇进水、进气，冲洗 5 min。清洗下来的污泥，经沉淀后，去除上清液，重新倒回反应器中。2# 反应器中的膜组件在整个试验过程中未进行清洗，说明复合式 MBR 的耐污染能力要强于一体式 MBR。反应器内填料的存在，降低了悬浮污泥浓度，减轻了膜污染，延长了膜组件的工作周期。

3 结论

(1) 两种型式的 MBR 在处理生活污水过程中，对 COD 和 NH_3-N 均有着较高的去除效果，平均去除率分别在 94% 和 97% 以上。

(2) 复合式 MBR 对 TN 的去除效果要好于一体式 MBR。

(3) 在不排泥的情况下，两种型式的 MBR 对 TP 的去除效果均不理想，1# 反应器对 TP 的平均去除率仅有 22%，2# 反应器的去除率不到 10%。

(4) 复合式 MBR 的耐污染能力优于一体式 MBR，反应器内安装填料后，可以减少膜组件的清洗次数，延长膜组件的工作周期。

⊙作者通讯处：150009 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院
电话：(0531)6419671
邹联沛 200072 上海大学环境与化学工程学院
收稿日期：2002-1-23