

弹性填料强化 A/O 工艺处理炼化废水试验

晁 雷¹,艾晨亮¹,王焕舒¹,刘 晋^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁省环境科学研究院,辽宁 沈阳 110015)

摘 要 目的 改良 A/O 工艺的传统工艺,解决生物法处理炼化废水效能较差的问题。

方法 进行 A/O 工艺的小试驯化研究,在 A/O 工艺的好氧池内增加弹性填料,以期提高微生物活性,强化炼化废水的处理效果。**结果** 填料的增加对工艺的启动效率,微生物的活性以及污染物的去除效果都有显著的提高。弹性填料的弹性结构,可以较稳定且持久地吸附炼化废水中的少量油份及微生物,这不但提高了被吸附截留的微生物的污泥龄,有助于其种群富集与特异性优化,而且减少了油份对悬浮污泥的影响,提高了悬浮污泥的微生物活性。填料对曝气气泡的切割,增加了溶解氧质量浓度,减少了厌氧池带来的质量浓度梯度对好氧池的影响,也提高了硝化细菌等好氧细菌的活性。改良后的 A/O 工艺 COD 去除率提高 10%,氨氮去除率提高 10%,总氮去除率提高 15%。**结论** 弹性填料的增加,有效地提高了生物法处理炼化废水的综合效能。

关键词 弹性填料;生物法;A/O 工艺;炼化废水;吸附

中图分类号 X703.1

文献标志码 A

Study on Refining Wastewater by A/O Process Reinforced with Elastic Filler

CHAO Lei¹, AI Chenliang¹, WANG Huanshu¹, LIU Jin^{1,2}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang China, 110168; 2. Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang, China, 110015)

Abstract: In order to improve the performance of biological treatment for the refinery wastewater by traditional process of A/O process, a small-scale domestication study of the A/O process was performed. In the aerobic tank of the A/O process, an elastic filler is added to increase the microbial activity and enhance the treatment effect of the refinery wastewater. The filler has a significant increase in the starting efficiency of the process, the activity of microorganisms, and the removal effect of pollutants. The small amount of oil and microorganisms can be stably and lastingly absorbed because of the elastic structure of the elastic filler. As a result of it, not only the sludge age of the microorganisms that have been adsorbed and trapped has been increased, which contributes to their population enrichment and specificity optimization, but also reduced the impact of oil on

收稿日期:2017-09-20

基金项目:水体污染控制与治理国家科技重大专项(2012ZX07202-001);沈阳建筑大学学科涵育项目(XKHY-36)

作者简介:晁雷(1978—),男,教授,博士,主要从事污水处理技术与工程应用方面研究。

suspended sludge and improved the microbial activity of suspended sludge. The cutting of aeration bubbles by the filler increases the dissolved oxygen concentration, reduces the influence of the concentration gradient resulted from by the anaerobic tank on the aerobic tank, and increases the activity of aerobic bacteria such as nitrifying bacteria. The COD removal rate was increased 10%, ammonia nitrogen removal rate was increased by 10%, and total nitrogen removal rate was increased by 15% by modified A/O process. Above all, the comprehensive efficiency of refinery wastewater by biological treatment can be improved effectively by elastic filler added.

Key words: elastic filler; biological treatment; A/O process; refining wastewater; absorption

炼油废水的污染物除了有机物之外,主要有挥发酚类、氨氮等,其水质本身对微生物是具有一定的毒害作用.传统炼化厂的生化处理常采用的好氧曝气活性污泥法等,虽然对污染物的去除起到一定程度的作用,其对特异性的污染物脱除效果并不理想,且容易出现污泥膨胀或流失现象,导致外排水的水质不稳定^[1-3].目前,针对炼油废水处理存在的问题,国内外研究者从工艺与反应器方面展开了研究^[4-7].A/O工艺是改进的活性污泥法,由于其具有一定的脱氮除磷功能并且流程简单、投资省、运行费用低等原因,符合我国现阶段国情,从而在我国污水处理方面应用比较广泛^[8-10].但此工艺也有不足,其双回流系统较为复杂,运行不当容易污泥上浮,抗冲击负荷小,溶解氧质量浓度梯度不易于控制等.填料强化改进A/O工艺是近年来研究较为广泛的一种方法,在原A/O工艺的基础上,在好氧池中加入填料作为活性污泥载体,利用不同材料表面对污泥的吸附附着的特点,作为挂载活性污泥微生物的生物载体,此种方法增加了活性污泥的污泥龄,可富集较大生物量的活性污泥,增加微生物活性,提高其对反应器与污水处理阶段的可适应性,针对炼化水的特异性污染物具有专性降解的特质^[11-14].因此,增加填料过后的水处理工艺,从原理上讲,具有启动快,处理效率高的特点.填料是强化A/O工艺的重要组成部分,直接影响对污染物的去除效果,填料在植物和微生物提供生长介质的同时,还通过

沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物,而填料的种类会直接影响沉淀、过滤和吸附效果^[15-18].不同的填料材料,对处理的污水适应性不同,其强化效果各有不同.活性炭纤维由高聚有机物在高温下进行碳化与活化产生,纤维内部会留下较多且直径较大的分子级孔洞,这些孔洞正是适合于微米级纳米级的微生物与细菌栖息的场所^[19-21].笔者进行小试研究,对比有无填料时的A/O工艺及整体联动工艺的性能与效果,解决生物法处理炼化废水效能较差的问题.

1 试 验

1.1 试验水质

试验污水来自盘锦市某炼化企业炼化废水预处理车间出水,预处理过程中,污水经过隔油池,气浮池,水解酸化池等,已经基本去除其中大部分的油分,并将一些长链或成分复杂的有机物全部或部分地降解为短链适宜生化处理的有机物和有机氨氮化合物等,此外污水中含有的挥发酚等也得到一定的去除.相关水质特点及水质指标如表1所示.

表1 炼化废水水质

Table 1 Refining wastewater quality mg·L⁻¹			
取值	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_3-\text{N})$	$\rho(\text{TN})$
范围	574.5~919.2	33.8~140.6	55~115.9
均值	811.9	98.7	107.6

1.2 试验装置

试验为有弹性填料的强化工艺与无填料的传统工艺两套试验装置(见图1).

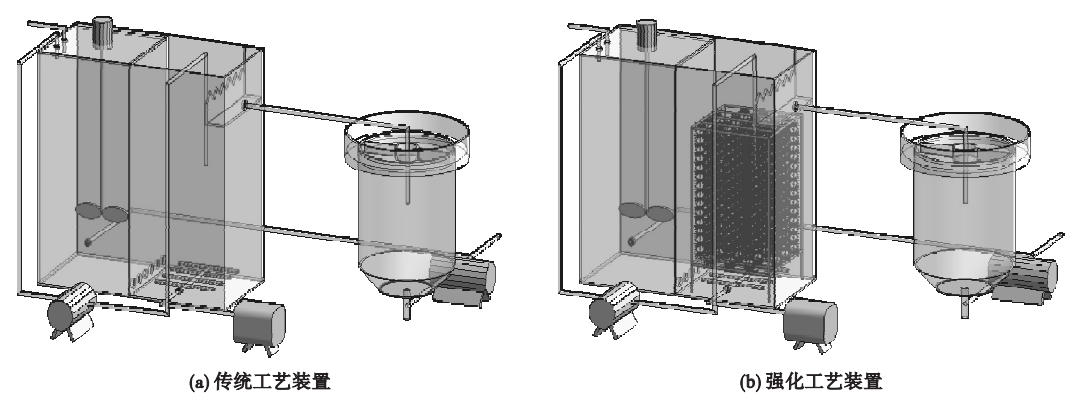


图1 不同工艺试验装置 BIM 展示图

Fig.1 BIM display of different process equipment

每套装置包括合建式 A/O 反应器与沉淀池,污泥回流与硝化液回流的双回流系统. 为了便于观察,反应器装置采用有机玻璃制成. A/O 反应器装置长宽高为 1 000 mm × 500 mm × 800 mm,有效容积约为 370 L,厌氧池与好氧池的容积比约为 1:1,硝化液回流系统由好氧池回流至厌氧池. 沉淀池采用中间进水周边出水模式,装置直径 400 mm,高 1 000 mm,有效容积约 120 L. 沉淀污泥一部分回流厌氧池一部分排出系统外. 池顶周边设有溢流堰,经溢流堰收集的沉淀池出水,为试验出水. 填料采用活性炭纤维弹性填料,由金属框架固定于好氧池内(见图 2).

厌氧污泥与好氧污泥池分别按厌氧池与好氧池容积的 10% 进行接种. 接种后首先注入 25% 生活污水 + 25% 炼化废水 + 50% 营养液,闷曝 3 d,每天曝气 22 h,沉淀 2 h,排除上清液后重新注入生活污水进行闷曝;然后开始通入预处理后的炼化废水,通入稀释 50% 的炼化废水,驯化微生物的适应性,当污泥质量浓度达到 2 000 mg·L⁻¹时,表明微生物在量的积累上已初步达到适合处理炼化废水的适应性,完成启动的第一阶段;而后增加进水质量浓度,通入未稀释炼化废水质量浓度,进行更进一步的驯化. 设计污泥回流 100%,硝化液回流 150%,每天检测进出水指标,直至系统内污泥质量浓度可达到 3 000 ~ 3 500 mg·L⁻¹.

1.4 取样和分析测试

每天定时取样, COD、NH₃ - N、TN、MLSS、等均按标准方法测定; DO 采用溶解氧分析仪测定; pH 采用便携式测定仪测定. 测定方法如表 2 所示.

表2 测试指标及方法

Table 2 Test indicators and methods	
测试指标	测试方法
COD	重铬酸钾法
NH ₃ - N	纳氏试剂分光光度法
TN	过硫酸钾氧化紫外分光光度法
MLSS	重量法
DO	溶解氧分析仪
pH	便携式 pH 仪

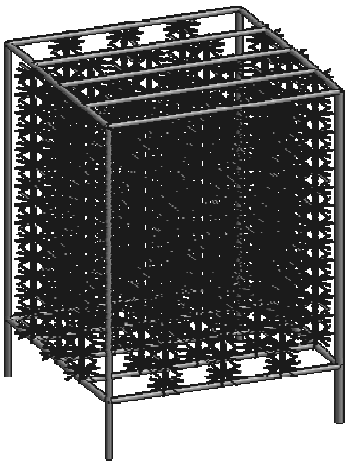


图2 弹性填料组件

Fig.2 Elastic packing assembly

1.3 试验步骤

A/O 与强化 A/O 反应池的启动过程主要包括污泥接种和污泥培养驯化两个过程.

2 结果与分析

2.1 启动进程与时间

A/O 反应器与强化 A/O 反应器启动过程中,总进程主要分为 3 个阶段,折合为启动时间:总启动驯化时间 = 第一段闷曝过程 + 第二段稀释 50% 的炼化废水进水过程 + 第三段实际炼化废水进水过程。

试验闷曝时间为 3 d,之后开始稀释 50% 的炼化废水进水过程,此过程主要实现活性污泥适合处理炼化废水的特异性种群的富集,当悬浮污泥质量浓度达到 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,即认为此阶段进行完全,而后开始实际污水的进水过程,此阶段主要是对污泥进行功能性驯化,使其完全适应对炼化废水的处理,当悬浮污泥质量浓度达到 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即认为启动完全。改良 A/O 工艺的设计污泥回流 100%,硝化液回流比为 150%,水力停留时间为 7.5 h,好氧池水力停留时间为 5 h,厌氧池水力停留时间为 2.5 h,进水流量为 $25\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。试验从闷曝之日起,每天对悬浮污泥 MLSS 质量浓度进行监测,进而观察 A/O 反应器的启动进展情况。经过每日取样分析后,驯化过程中 MLSS 变化如图 3 所示。

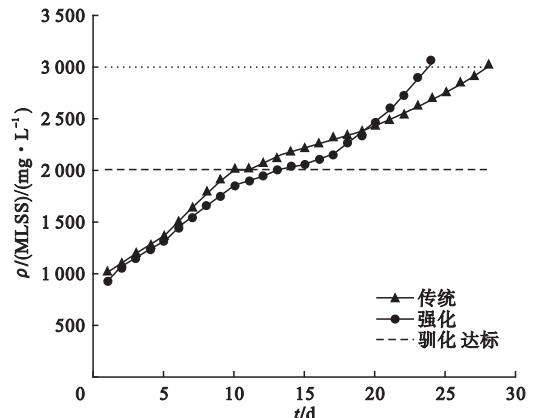


图3 驯化过程中 MLSS 变化曲线
Fig.3 MLSS change curve during domestication stage

A/O 反应器启动历时 28 d,第一阶段闷曝时间为 3 d,第二阶段第二段稀释 50% 的炼化废水进水 7 d,第三阶段实际炼化废水进

水时间为 18 d;强化 A/O 反应器启动历时 24 d,第一阶段闷曝时间为 3 d,第二阶段第二段稀释 50% 的炼化废水进水 10 d,第三阶段实际炼化废水进水时间为 11 d,强化 A/O 反应器与 A/O 反应器启动时间相比较缩短了 4 d,启动时间缩短 18%。

2.2 活性污泥培养效果分析

装置运行期间活性污泥的状态好坏直接决定了整个工艺运行状态,包括对污染指标的去除与抗环境变化负荷的能力等。而活性污泥的好坏的检测,主要靠对污泥中微生物的微生物量,微生物种群组分与微生物活性来衡量。衡量这 3 种微生物特性主要方法:镜检观察微生物种群、检测悬浮污泥质量浓度 (MLSS) 与污泥容积指数 (SVI) 等指标。(MLSS) 反映了活性污泥的微生物量,SVI 反映了在这些微生物量中的微生物活性组分的量,可以一定程度上反映污泥活性的强弱。监测运行期间 SVI 随运行进程的变化如图 4 所示。

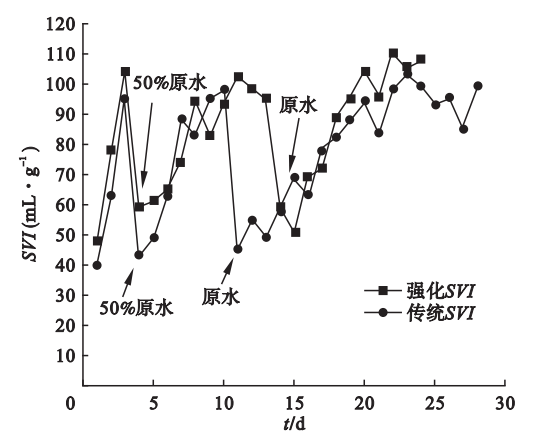


图4 驯化过程中 SVI 变化
Fig.4 SVI curve during domestication stage

由图 4 可知,闷曝期间强化 A/O 工艺中悬浮污泥质量浓度低于传统 A/O 工艺。主要原因在于强化 A/O 工艺中一部分的悬浮污泥被填料截留在表面,固定在有填料的好氧池内,使系统内悬浮污泥量略少,然而随着污泥量的不断增加,强化工艺中的悬浮污泥质量浓度逐渐接近与传统工艺一致的污泥量,

由 SVI 随时间变化的趋势可以看出,启动期间虽然强化工艺中的悬浮污泥质量浓度不高,但其污泥活性却略高于传统工艺.且填料上已开始挂膜,截留了更多的微生物量,所以并不是强化工艺的微生物量少,而是强化工艺的悬浮微生物量小,而且这种情况仅仅出现在前期.

2.3 COD 去除效果的分析

工艺对污染物的去除效果能够反映工艺运行效果的好坏,也能够反映出微生物代谢效率与活性. 试验监测进出水中 COD,传统与强化工艺的 COD 质量浓度及去除率的变化如图 5、图 6 所示.

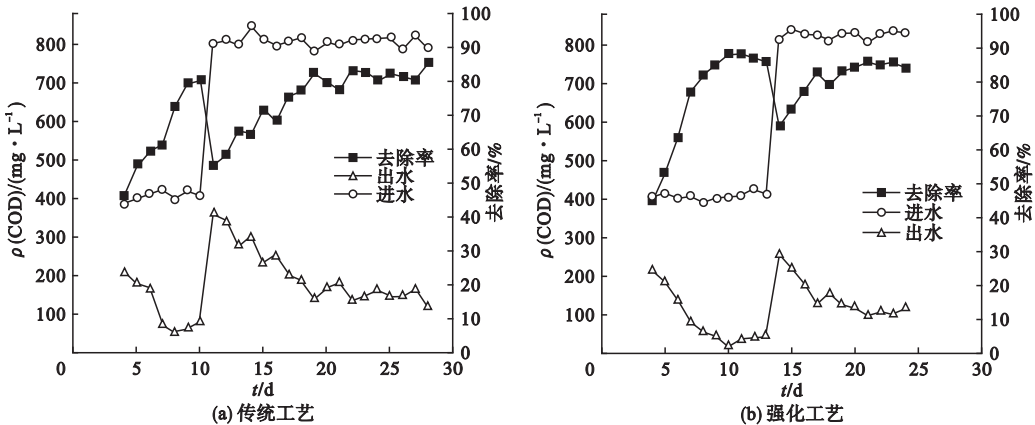


图 5 传统工艺与强化工艺 COD 质量浓度及去除率变化

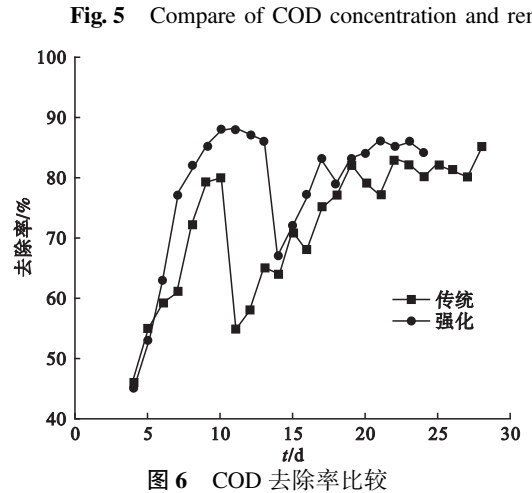


图 6 COD 去除率比较

Fig. 6 Compare of COD removal rate between traditional and modified processes

由图 5 及图 6 分析可知,启动成功的强化工艺与传统工艺,其对 COD 的去除作用都较好,可达到 80% 左右,但启动过程中期,强化工艺对 COD 的去除作用就已经较为明显,说明强化反应器对 COD 的去除效果更好,驯化作用更快,更明显. 主要原因可能是一部分微生物被固化在填料上,增加了系统内可容纳微生物的量,且增加了部分好氧细

菌的污泥龄,使其对好氧池的环境适应性更好,更容易高效率的代谢从而高效率地去除污水中的污染物.

2.4 氨氮与总氮去除效果的分析

A/O 工艺与普通活性污泥法的显著优点就是对氮的去除. A/O 工艺采用双回流系统将氨化 - 硝化 - 反硝化 3 步进程集中起来,利用活性污泥中的氨化菌、亚硝化菌、硝酸菌、反硝化菌等的代谢活动去除污水中的氮. 其次试验通过监测进出水中氨氮、总氮指标,监测传统与强化工艺的质量浓度及去除率的变化(见图 7、图 8).

由图 7 及图 8 可知,在好氧池增加填料后,强化工艺较传统工艺对氮的去除效果更好一些,且驯化中后期,这种强化效果更加明显,第二阶段增加进水后,强化工艺与传统工艺的污水处理能力刚开始都有一定程度的下降. 但是,强化工艺去除率下降较小,且污泥活性与污泥增长加速度恢复较传统工艺更快一些. 由此可见,增加填料确实对 A/O 工艺

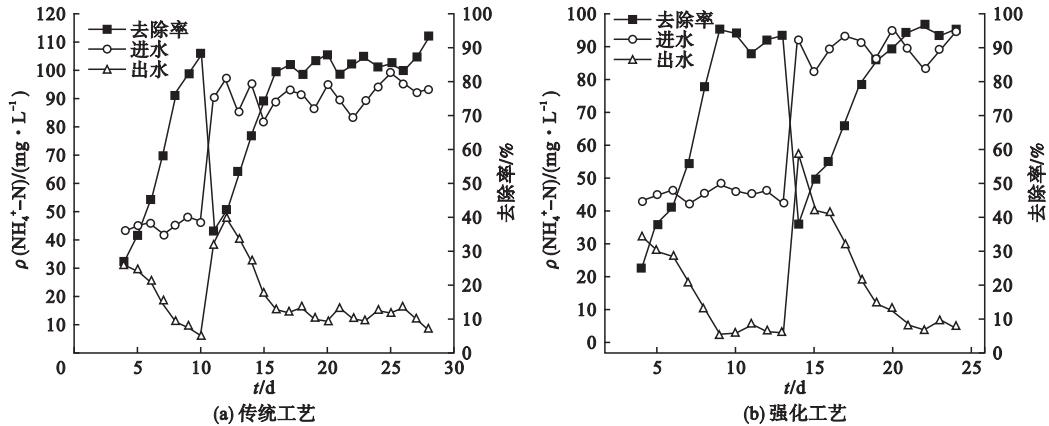


图7 传统工艺与强化工艺氨氮质量浓度及去除率变化

Fig. 7 Compare of concentration and removal rate for $\text{NH}_3\text{-N}$ between traditional and modified processes

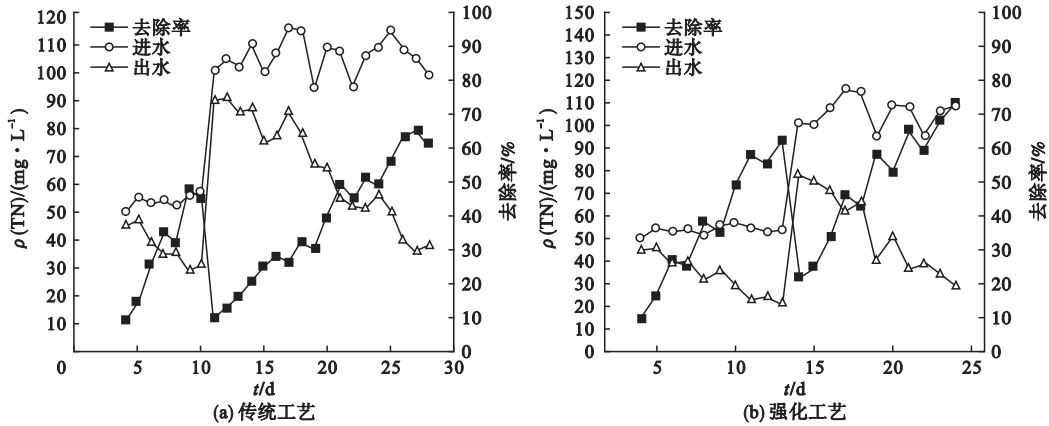


图8 传统工艺与强化工艺总氮质量浓度及去除率变化

Fig. 8 Compare of concentration and removal rate for TN between traditional and modified processes

起到了强化作用。

影响 A/O 工艺脱氮效果的因素有硝化液回流比,水力负荷,污泥龄等。好氧池中主要是硝化菌进行硝化反应,在好氧池中增加填料吸附各种脱氮的细菌的方法,一方面增加其在好氧池中的停留时间,延长其污泥龄;另一方面,由于填料吸附而长时间停留在池中的微生物,会更加适应进水水质,会对进入好氧池的特征污染物进行专性的去除,经过长期的驯化,逐渐适应好氧池中的生活环境,并达到较好的生物活性与污染物去除专性,实现微生物群体的富集与活性、专性强化等,从而更好地降解污水中的氮污染物。将各种形式的氮转化降解。

从微生物代谢角度讲,经过厌氧池处理

后的污水,污水中还有较多的氨氮可进行硝化反应转化为硝态氮,氨氮更容易被硝化菌硝酸菌所捕捉进而代谢,大量的氨氮也就更适合于硝酸菌与硝化菌代谢与繁殖,所以启动阶段,进水也是对好氧池内微生物种类的筛选。填料的增加,提高了反应器中的微生物量与污泥龄,提高了反应器的抗冲击负荷,更有利于驯化进程的快速发展,节省启动时间。

3 驯化后期污染物平均去除率

驯化完全后,正常运行 15 d,每间隔 3 d 测一次污染物质量浓度,弹性填料的作用主要体现在是否能提高污染物的去除率,对驯化后期的传统工艺与强化工艺的污染物平均去除率进行对比。强化工艺相比较传统工艺,

COD 氨氮、总氮去除率分别提高 10%、9.8%、13.4% (见图 9)。

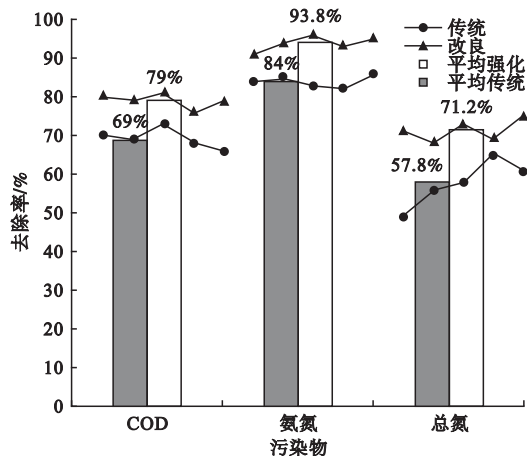


图 9 驯化后期污染物平均去除率

Fig. 9 The average removal rate of pollutants in late domestication stage

由图 9 可以看出,强化工艺在氮的去除率方面明显优于传统工艺,在 COD 的去除率方面有一定的优势. 主要由于形成了对氮有一定代谢功能的微生物优势菌群. 氮的去除需要氨化硝化反硝化三级反应才得以完全的去除,这三级反应的发生又需要不同的溶解氧,填料的增加强化了氧的质量浓度梯度,使得厌氧池与好氧池都保持了其最适宜厌氧菌与好氧菌代谢活动的溶解氧质量浓度。

4 结 论

(1)弹性填料吸附大量微生物附着后,为悬浮污泥空余出较大的容纳空间进行活动与繁殖。

(2)弹性填料因其结构特性,在好氧池气泡冲击下虽不易随水流产生较大流动性并具有弹性,对气泡有一定的剪切作用,保证了微生物挂膜更新脱落的前提下,又不至于被气泡冲刷掉填料表面大量原本吸附的微生物,因此弹性填料的加入有助于微生物更好地适应炼化废水这种水质组成复杂且对微生物具有微量毒害作用的废水,使微生物保持了较高的活性,一定程度上强化了 A/O 工艺

对污水的处理能力。

(3)弹性填料的加入增加了厌氧池与好氧池之间的水流阻力,增多了池内的水流流态等,为试验水的富氧提供了充足的时间,而且填料对曝气气泡的切割减小了水中气泡的直径,更易于水体富氧,增加了厌氧池进入的污水的溶解氧。

(4)加入填料的改良 A/O 工艺比较传统 A/O 工艺反应器启动时间缩短 4 d,当进水质量浓度增加 50% 后,抗冲击负荷好. COD 去除率提高 10%,氨氮去除率提高 10%,总氮去除率提高 15%. 改良后的 A/O 工艺对炼化废水具有较好的综合效能。

参考文献

- [1] 张翼,于婷,毕永慧,等. 含油废水处理方法研究进展[J]. 化工进展,2008(8):1155-1161. (ZHANG Yi, YU Ting, BI Yonghui, et al. Progress of oily wastewater treatment [J]. Chemical industry and engineering progress, 2008 (8):1155-1161.)
- [2] 陈平,王晨,刘明伟,等. 含油废水处理技术的研究进展[J]. 当代化工,2016(6):1286-1288. (CHEN Ping, WANG Chen, LIU Mingwei, et al. Research progress of oily wastewater treatment technology [J]. Contemporary chemical industry, 2016(6):1286-1288.)
- [3] 李思,赵红阳,张金辉,等. 生物法处理炼油废水的研究进展[J]. 当代化工,2013(11):1621-1623. (LI Si, ZHAO Hongyang, ZHANG Jinhui, et al. Research progress in oil refinery wastewater treatment by biological methods [J]. Contemporary chemical industry, 2013 (11):1621-1623.)
- [4] LIU Xianling, WEN Jianping, YUAN Qing, et al. The pilot study for oil refinery wastewater treatment using a gas-liquid-solid three-phase flow airlift loop bioreactor [J]. Biochemical engineering journal, 2005, 27(1): 40-44.
- [5] JETTE M, WAGNER K. A pilot study for oil refinery wastewater treatment using a fixed bioreactor[J]. Advances in environment research, 2007, 7(2): 463-469.
- [6] 雍文彬, 郭向东, 李力, 等. 膜生物反应器 (MBR) 处理炼油污水[J]. 水处理技术, 2005, 31(11): 79-81. (YONG Wenbin, GUO Xiangdong, LI Li, et al. Treatment of oil-refining wastewater by membrane biological reactor (MBR) [J]. Technology

- gy of water treatment, 2005, 31 (11): 79 - 81.)
- [7] 谭周亮, 杨俊仕, 李旭东. 微生物菌剂强化处理炼油废水的中试研究 [J]. 水处理技术, 2007 (2): 67 - 70.
(TAN Zhouliang, YANG Junshi, LI Xudong. Pilot-scale research on oil refinery wastewater treatment by microorganism agent [J]. Technology of water treatment, 2007 (2): 67 - 70.)
- [8] ZEEMAN B H, LUOSTARINEN S A. Treatment technologies for petroleum refinery effluents; A review [J]. Process safety and environmental protection, 2011, 89 (2): 95 - 105.
- [9] 曹艳晓, 龙腾锐, 黄祥荣, 等. 水解/AMBBR/好氧工艺和传统 A/O 工艺处理低碳源污水的对比研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4 (12): 2776 - 2780.
(CAO Yanxiao, LONG Tengrui, HUANG Xiangrong, et al. Comparative study of low carbon source wastewater treatment by hydrolysis acidification/anoxicmoving biological bio-film reactor/aerobic process and conventional anoxic/aerobic process [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2010, 4 (12): 2776 - 2780.)
- [10] 于玲红, 隋秀斌, 杨文焕, 等. AMBBR/SMBBR 与 A/O 工艺处理石油发酵工业废水的对比研究 [J]. 现代化工, 2017, 37 (3): 179 - 182.
(YU Linghong, SUI Xiubin, YANG Wenhuan, et al. A comparative study on treatment of petroleum fermentation industrial wastewater by AMBBR/SMBBR and A/O processes [J]. Modern chemical industry, 2013, 37 (3): 179 - 182.)
- [11] YANG Ruihong, ZHU Jianzhong, ZHANG Hui, et al. Study of pre-treatment of oil refinery wastewater by eef-enhanced micro-electrolysis [J]. Ozone: science & engineering, 2016, 38 (6): 472 - 481.
- [12] 李辰, 陈洪斌, 刘富强, 等. 两级 AO 工艺处理黑水研究 [J]. 水处理技术, 2013 (3): 94 - 98.
(LI Chen, CHEN Hongbin, LIU Fuqiang, et al. Study on treatment of blackwater using two-stage AO process [J]. Technology of water treatment, 2013 (3): 94 - 98.)
- [13] 邓纪鹏, 张轶凡, 马劲, 等. 悬浮填料 AO 工艺处理城市污水中试研究 [J]. 天津建设科技, 2009 (6): 53 - 55.
(DENG Jipeng, ZHANG Yifan, MA Jin, et al. Pilot study on municipal wastewater treatment by suspended filler AO process [J]. Tianjin construction science and technology, 2009 (6): 53 - 55.)
- [14] 周东凯. 新型纤维挂膜填料污水处理研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
(ZHOU Dongkai. Novel fibrous fillers in bio-film process for wastewater treatment [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.)
- [15] 赵玉华, 赵杰, 李艳凤, 等. 组合填料生物滤床处理污水脱碳氮磷性能试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27 (5): 957 - 961.
(ZHAO Yuhua, ZHAO Jie, LI Yanfeng, et al. Experimental Study on Characteristics of Biological Filter with Combination Packing for Removal C, N and P from Sewage [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2011, 27 (5): 957 - 961.)
- [16] LIM P E, MARK K Y, MOHAMED N, et al. Removal and speciation of heavy metals along the treatment path of wastewater in subsurface-flow constructed wetlands [J]. Water science and technology, 2003, 48 (5): 307 - 313.
- [17] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术, 新工艺、新概念、新理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
(WANG Baozhen, WANG Lin. New technology of water pollution control: new technology, new concept, new theory [M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [18] MURAT S, HANAUS J. The design and performance of a vertical flow reed bed for the treatment of high ammonia, low suspended solid organic effluents [J]. Water science technology, 1997, 35 (5): 197 - 204.
- [19] 丛轮刚, 南海娟, 王翠翠, 等. 煤化工综合废水处理技术及应用进展 [J]. 环境工程, 2015 (增刊 1): 20 - 24.
(CONG Lungang, NAN Haijuan, WANG Cuicui, et al. Application progress and treatment technology of wastewater from coal chemical industry [J]. Environmental engineering, 2015 (S1): 20 - 24.)
- [20] SCHAFFER M, BROCARD AURLIE, et al. Treatment of acidic wastewater arising from the refining of vegetable oil by crossflow microfiltration at very low transmembrane pressure [J]. Process biochemistry, 2007, 42 (4): 693 - 699.
- [21] BROWNING K, MUNCH M. Nutrient removal and plant biomass in a subsurface flow constructed wetland in Brisbane Australia [J]. Water science and technology, 2003, 48 (5): 183 - 189.