

接触氧化过滤一体化生物反应器处理城市污水

杨开¹, 杨小俊², 李振华¹, 王弘宇¹, 李璐³, 吕斌²

(1. 武汉大学市政工程系, 武汉 430072; 2. 武汉科技学院环境科学研究所, 武汉 430073; 3. 中国市政工程中南市政研究院, 武汉 430010)

摘要: 针对一种采用组合填料的接触氧化过滤一体化生物反应器, 进行了以间歇方式处理城市污水的试验研究. 结果表明, 在曝气时间为 60 min, DO 为 2~3 mg/L, 反应器上部填料层容积负荷率(以 COD 计)为 2.4 kg/(m³·d), 生物滤床初始滤速为 5 m/h 时, 反应器出水 COD、NH₄⁺-N、浊度的平均去除率分别为 90.6%、81.4% 和 96.7%, 但 TP 去除效果欠佳, 平均去除率为 60.1%.

关键词: 生物反应器; 组合填料; 接触氧化; 过滤; 城市污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3596-06

Municipal Wastewater Treatment by Integrated Bioreactor of Contact Oxidation and Filtration Separation

YANG Kai¹, YANG Xiao-jun², LI Zhen-hua¹, WANG Hong-yu¹, LI Lu³, LÜ Bin²

(1. Department of Municipal Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Environmental Science Research Institute, Wuhan University of Science & Engineering, Wuhan 430073, China; 3. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: An intermittently integrated bioreactor of contact oxidation and filtration separation was applied to treat municipal wastewater, which was packed with combination medium. Experimental results show that at the condition of aeration time 60 min, DO 2-3 mg/L, organic volume load of upper packing 2.4 kg/(m³·d) and initial filtration velocity 5m/h, the average removal rates of COD, ammonia nitrogen and turbidity reach 90.6%, 81.4% and 96.7% respectively, but this treatment process seems to be not available in phosphorus removal. The average removal rate of TP is 60.1%.

Key words: bioreactor; combination medium; contact oxidation; filtration; municipal wastewater

污水处理系统中通常设有多个具有不同功能的单元构筑物, 以达到期望的处理效果^[1-3]. 因此, 现有的污水处理装置一般比较繁复, 配套设备多, 操作也比较繁琐^[4,5], 不利于我国普及城市污水二级处理和已建污水厂的正常运转. 为克服现有技术的不足, 本研究旨在开发一种较常规污水处理工艺更为简单、高效、低耗的接触氧化过滤一体化的新工艺组合^[1]. 处理装置以曝气生物滤池(BAF)为原型^[6,7], 采用组合填料, 借鉴慢滤池和泥饼过滤原理^[8-10], 同时具有序批式生物膜法(SBBR)^[11-13]操作灵活的优势, 使其成为出水水质好、占地面积小、抗冲击负荷能力强、能耗低、运行方式灵活的污水处理装置^[14].

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图 1, 反应器是内径为 235 mm, 总高 5.5 m 的有机玻璃柱, 柱由下而上分别布置有配水配气区, 长柄滤头, 滤板, 0.1 m 厚砾石承托层, 高 1.0 m、粒径为 1~2 mm 的无烟煤滤料层, 高 3.0 m、直径 50 mm 的多面空心球填料层. 反应器上配套安

装有进水管、出水管、进气管、反冲洗管、溢流管、测压管等. 多面空心球填料材质为聚丙烯, 比表面积为 237 m²/m³, 孔隙率为 90%, 并将其固定在反应器中, 其在柱内填充率为 50.2%. 高低水位变幅差为 1.0 m, 反应器的有效容积为 144 L.

反应器运行方式为间歇进水, 间歇出水. 试验污水由离心泵提升到反应器中, 水位到达低水位 H_2 时, 进气电磁阀开启, 开始曝气; 当水位达高水位 H_1 时停泵, 继续曝气反应一段时间后(时间通过时间继电器来控制), 停止曝气, 排水电磁阀开启出水, 反应液经过无烟煤过滤排出, 到达低水位 H_2 后, 停止出水, 进水泵和进气电磁阀开启, 进入下一个循环. 通过高低液位电极和时间继电器来实现反应器自动周期运行. 当出水水质不达标或连续运行超过一定时间后即进行反洗, 同时也实现了剩余污泥的排放.

1.2 试验水质及条件

收稿日期: 2008-12-29; 修订日期: 2009-03-31

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA601010-01)

作者简介: 杨开(1959~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水工艺与工程理论与技术, E-mail: yangkai@126.com

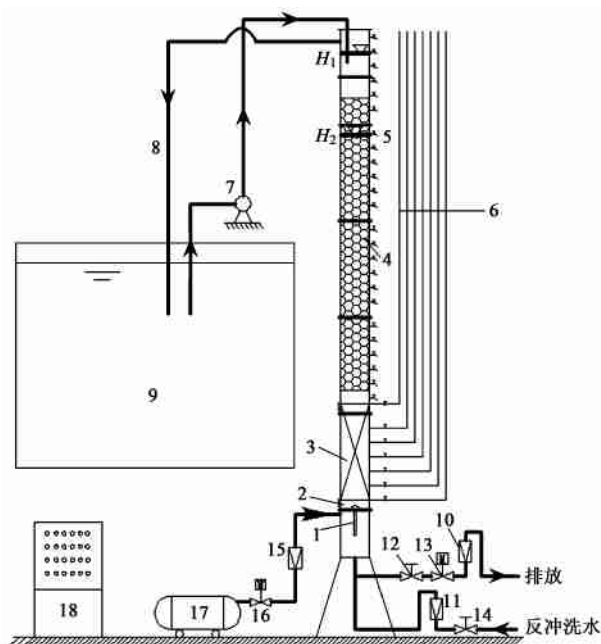


图 1 试验装置与流程

Fig. 1 Experimental devices and process flow chart

表 1 试验水样水质

Table 1 Quality of raw wastewater

项目	COI/mg•L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg•L ⁻¹	TN/mg•L ⁻¹	TP/mg•L ⁻¹	浊度 NTU
范围	67~ 284	15.34~ 35.35	20.78~ 38.54	1.91~ 3.45	67~ 340
均值	175	25.35	29.56	2.68	151

停泵,再曝气 0.5 h,静置 8 h 后,排空反应器内污水,再次泵入新鲜水样,在连续进水、出水的同时进行持续曝气,DO 控制在 2 mg/L,连续运行 1 周后,填料上出现了附着生物膜特征,再连续运行 20 d 后,整个反应器 COD 去除率达 55% 以上, NH_4^+-N 去除率 > 60%,镜检显示生物相稳定且良好,至此挂膜成功^[19,20],再进行后续试验研究。

2 结果与讨论

试验中反应器按进水,曝气反应,出水 3 个工序依次循环运行,当假设反应器为瞬时进水,则一个工作周期时间由曝气反应时间和过滤出水时间组成,若反应器容积负荷按 COD 进水平均浓度 200 mg/L 计算,具体工况参数如表 2 所示,试验中每天取样 1 次。

2.1 反应器对 COD 的去除效果

试验以城市生活污水作为研究对象, 试验水样取自武汉市二郎庙污水处理厂曝气沉砂池出水, 该污水厂目前处于一级处理水平, 今后将扩建为改良型 A²/O 二级处理. 试验水样水质见表 1, 水质波动较大. 试验水温在 25℃ 左右, DO 控制在 2~3 mg/L, 下部生物滤床(BF) 初始滤速为 5 m/h, 每隔 7 d 进行 1 次气水反冲洗, 具体方式为先用气冲, 强度为 16 L/(m²·s), 时间 2 min; 再用气-水同时反冲, 气冲强度 16 L/(m²·s), 水冲强度 3 L/(m²·s), 时间 2 min; 最后单独水冲, 强度 6 L/(m²·s), 时间 15 min^[15].

1.3 分析项目及方法

分析测试方法为: COD 重铬酸钾法, GB 11914-89; NH_4^+ -N 纳氏试剂分光光度法, GB 7479-87; TN 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, GB 11894-89; TP 钼酸铵分光光度法, GB 11893-89; 浊度 HACH2100P 浊度仪; pH 值奥立龙 828pH 计; DO YSI model 52 溶解氧仪。

1.4 试验启动及挂膜

试验采用“快速排泥挂膜法”^[16~18]挂膜,其接种污泥取自武汉市沙湖污水厂曝气池回流污泥,浓度为3 000 mg/L。具体工序为:将20 L接种污泥倒入反应器,然后泵入试验水样,淹没至多面空心球填料后

表2 试验工况及条件

Table 2 Experimental conditions

工况	曝气时间 /min	出水过滤 时间 min	上部填料层容积 负荷率 /kg ⁺ (m ³ ·d) ⁻¹	运行时段 /d
1	32	12	4.0	1~ 10
2	40	12	3.4	11~ 20
3	52	12	2.6	21~ 30
4	60	12	2.4	31~ 40
5	70	12	2.0	41~ 50

反应器对有机物的去除是其主要功能之一, COD 是用来表征污水中有机物含量的常用及测量方便的指标. 在 5 个不同曝气时间下, 上部填料和下部生物滤床对 COD 的去除效果见图 2. 试验中反应器进水 COD 浓度范围为 67~284 mg/L, 均值为 175 mg/L, 曝气结束上部 COD 值为 12~50 mg/L, 大部分已在 30 mg/L 以下, 生物滤床出水 COD 值范围

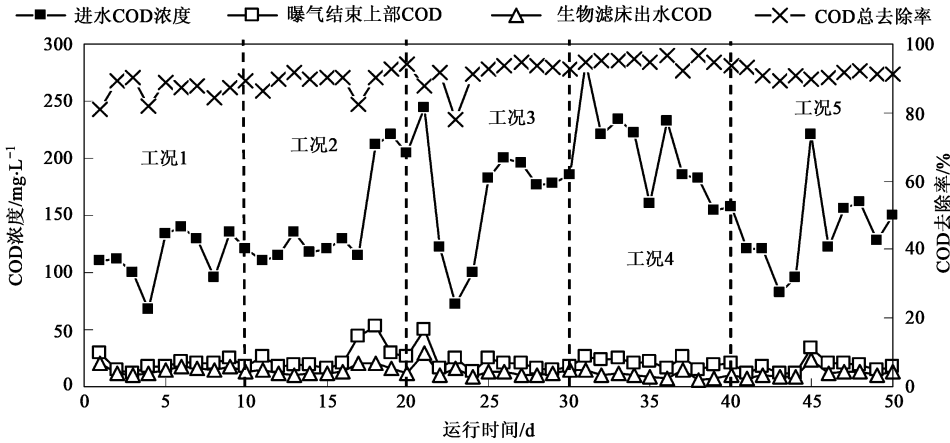


图 2 COD 去除效果

Fig. 2 COD removal efficiency

为 6~30 mg/L, COD 总去除率(上部填料和下部生物滤床共同去除效果) 平均值是 90.6%. 这说明反应器具有相当强的抗冲击负荷能力, 出水 COD 值稳定, 并达到《污水综合排放标准》(GB 18918-2002) 中一级 A 标准的要求.

由图 2 可知, 不同工况条件下, COD 总去除率发生上下波动, 说明曝气时间对 COD 的总去除率有着显著的影响, 随着曝气时间的延长, COD 的总去除率有所增加, 但当其增加到 60 min 后, 整个工况 4 运行期间 COD 总去除率平均值达到 94.8%, 再增加曝气时间, 在工况 5 时 COD 总去除率并未明显增加, 反而有小幅下降; 且在不同工况条件下, 上部填料的 COD 去除率平均值为 85.1%, 而下部生物滤床的 COD 去除率仅为 36.8%, 上部填料对 COD 的去除率为下部生物滤床的 2 倍多. 这说明当曝气时间在 60 min 时, 反应器对 COD 去除已基本已稳定在一个较高水平, 而当曝气时间由 60 min 再增加到 70 min 时, 反应器总去除率下降的原因可能是由于进水 COD 浓度波动影响了反应器对 COD 的去除效能, 也有可能是随着曝气时间的增长, 而进水 COD 浓度值不高, 导致反应器内有机基质供给不足, 部分异养菌进入内源呼吸期, 生物膜去除有机污染物的能力受到削弱导致. 试验结果还表明, 有机物污染物的去除主要发生在反应器上部的多面空心球填料段, 反应器下部的无烟煤滤料层主要是起到使曝气气泡更均匀, 且过滤分离以保障出水 COD 值稳定的作用, 产生这种现象的原因是上部多面球空心球填料比表面积大、孔隙率高易于生物膜附着, 且反应器从有机玻璃柱上部进水, 水流方向为自上而下, 新鲜污水先与上部多面球填料进行混合曝气反应, 而后才流经生

物滤床, 这样上部填料截留了大量的悬浮物, 这些悬浮物被吸附到生物膜表面, 其中可降解部分作为底物被微生物利用, 剩余的不可降解和难降解部分则逐渐成为生物膜的一部分, 因此, 上部填料附着生物膜干质量和挥发性质量均较高, 去除有机物能力较强, 故大部分 COD 在曝气阶段被上部填料去除.

2.2 反应器对氨氮的去除效果

氮是水体富营养化的主要污染物质之一, 未经处理的原态污水中, 氨态氮和有机氮是氮的主要存在形式, 因此污水处理反应器对氨氮的去除也是其重要功能之一. 在 5 个不同曝气时间下, 上部填料和下部生物滤床对氨氮的去除效果见图 3. 试验期间反应器进水氨氮浓度为 19.31~30.28 mg/L, 均值为 23.03 mg/L, 曝气结束后上部氨氮值为 4.95~12.61 mg/L, 均值为 8.09 mg/L, 反应器处理出水氨氮的浓度为 1.65~7.31 mg/L, 均值为 4.30 mg/L, 氨氮总去除率(上部填料和下部生物滤床共同去除效果) 平均值是 81.4%, 反应器出水氨氮浓度比较稳定, 基本上维持在 4 mg/L 左右, 基本达到 GB 18918-2002 一级 A 标准的要求.

由图 3 可知, 在不同工况下, 曝气时间的变化对氨氮总去除率的影响并不是很明显, 曝气时间的延长, 氨氮的总去除率仅略有增加, 其后又有所降低, 这可能是由于硝化菌属于中温性自养型细菌, 最适宜温度范围为 30℃, 低于 5℃或高于 40℃时活性很低, 而试验后期季节变化水温降低, 从而导致氨氮总去除效率减小. 从图 3 中分析发现, 在不同工况下, 上部填料的氨氮去除率平均值为 64.8%, 下部生物滤床对氨氮的去除率平均值也达到 46.7%, 这说明在上部多面空心球填料和下部无烟煤滤层中均有硝

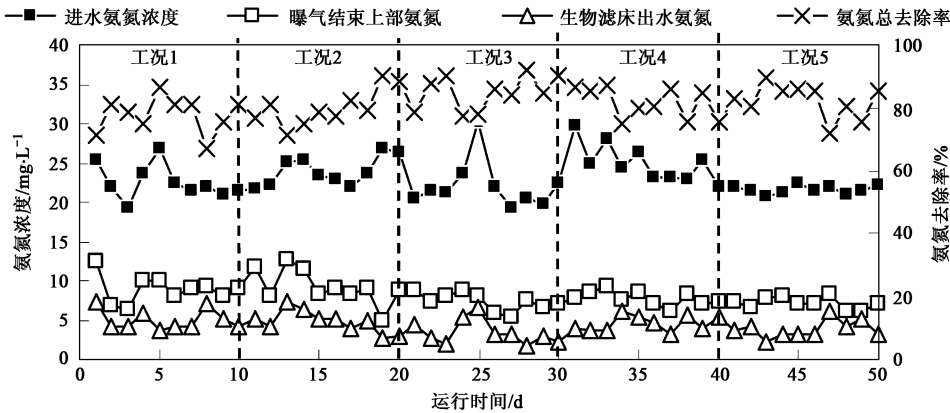


图3 氨氮去除效果
Fig. 3 Ammonia nitrogen removal efficiency

化作用过程,二者填料表面附着生物膜中均含有活性较强的硝化菌,且随着生物膜致密增厚,增大了氧向生物膜内部渗透阻力,这样氧很快被表层生物膜所消耗,故即使在曝气时生物膜上也存在反硝化的微环境,同时由于曝气阀门的开启与关闭,在反应器中会交替出现缺氧、好氧状态,而且试验中反洗周期长,系统生物量丰富,生物膜宽厚,有益于生物膜的吸附、贮存碳源功能的发挥,同时系统排放剩余污泥少,导致污泥龄长,组合填料表面附着生物膜能够大量生长世代时间较长、栖息增殖速率慢的硝化菌,这些都是同步硝化反硝化的必备条件,故反应器有较好的脱氮效果.此外,与常规污水处理工艺相比,在脱氮过程中无需进行大量的污泥回流,这也就大大地降低了电耗.

2.3 反应器对总磷的去除效果

磷也是导致水体富营养化的影响因子之一,未经处理的城市污水中,磷酸盐是磷的主要存在形式,因此污水处理反应器对磷的去除也具有重要意义.上部填料和下部生物滤床对总磷的去除效果见表3,在5个不同工况条件下,总磷去除率(上部填料和下部生物滤床共同去除效果)平均值是60.1%,反

应器出水总磷浓度在1 mg/L上下小幅波动.这说明整个反应器对总磷的去除效果欠佳,总磷的去除随曝气时间的变化也没有很强的规律性,这是由于磷不同于氮,不能形成氧化或还原气体,向大气排放,仅能通过固体形态和溶解形态互相循环转化,以排除剩余污泥的方式去除,而本试验采用的是生膜法处理城市污水,相对来说剩余污泥的排放量(脱落的生物膜)少,这是因为反应器中的生物膜上存在比活性污泥中更高级的微生物,有着复杂的生态系统和空间结构,食物链更长,污泥的产量也就少些,且没有严格意义上的厌氧环境,只是在出水阶段停止曝气时,水中的溶解氧会有所下降,故不利于磷的去除.提高反应器内溶解氧浓度和进水碳磷比,根据现有文献资料^[21],DO和进水C/P影响磷的去除速率,并不影响磷的去除总量,这是因为膜法除磷主要依靠生物膜的脱落,然后排放到系统外来除磷,本研究采用反冲洗来排泥,而由于气体经过无烟煤滤料层时对滤料层有松动作用而延长了其过滤周期,减少了反冲排泥次数,若硬性提高反冲频率,不仅会耗能,而且当排除的污泥量大于系统新生的污泥量时,生物膜会变薄、变小,反过来会影响除磷能力,也会

表3 反应器对总磷去除效果¹⁾
Table 3 TP removal efficiency

工况	进水 TP 浓度 /mg·L ⁻¹	曝气结束上部 TP/mg·L ⁻¹	生物滤床出水 TP/mg·L ⁻¹	上部填料去除率 平均值/%	生物滤床去除率 平均值/%	总去除率 平均值/%	测定次数
1	1.92~2.86 (2.45)	1.30~1.93 (1.58)	0.91~1.43 (1.25)	35.45	32.92	56.79	10
2	2.12~3.34 (2.52)	1.26~1.92 (1.61)	0.79~1.57 (1.32)	36.64	38.40	60.94	10
3	2.23~3.45 (2.68)	1.34~1.97 (1.66)	0.72~1.31 (1.13)	38.13	40.20	63.02	10
4	2.13~3.21 (2.69)	1.29~2.10 (1.55)	0.64~1.32 (1.15)	40.79	36.22	62.10	10
5	2.13~2.75 (2.58)	1.41~1.80 (1.62)	0.78~1.28 (1.27)	36.48	33.29	57.50	10

1) 括号内为平均值,下同

影响脱氮效果. 因此, 以上分析可得反应器对总磷的去除不会达到一个较高水平, 试验中总磷的去除主要可能是由于微生物的同化作用吸收了部分的磷, 及生物絮凝作用形成沉淀物而被滤料层截留. 若要提高总磷去除率, 可在反应器中部增设泥斗和排泥阀, 进行定期适量排泥, 或增加后续生物或化学强化除磷工艺.

2.4 反应器对浊度的去除效果

浊度是度量水中悬浮物对光线透过时发生散射的程度, 悬浮物浓度(SS) 是水中的悬浮污染物浓度大小, 二者既有区别, 又有联系, 在常规污水处理工艺中污水悬浮物含量较高, 用 SS 指标就能直接简明地表示水体浑浊程度. 本试验中出水 SS 值极低, 从

而导致在现场试验条件下按国标难以准确测定, 有时甚至出现负值, 故采用浊度指标更能有效地进行悬浮物去除效果表征. 在 5 个工况条件下, 上部填料和下部生物滤床对浊度的去除效果见图 4. 试验期间反应器进水浊度为 67~ 340 NTU, 均值为 151 NTU, 曝气结束上部浊度为 13~ 73 NTU, 均值为 29 NTU, 反应器处理出水浊度为 1~ 10 NTU, 均值为 4 NTU, 浊度总去除率(上部填料和下部生物滤床共同去除效果) 平均值是 96. 7%, 出水感官效果相当好, 完全达到回用水标准. 从图 4 中还可看出, 进水浊度波动较大, 但曝气结束时反应器上部浊度值和生物滤床出水浊度值均较稳定, 波动不大, 这点与反应器对 COD 去除效果一致, 均说明反应器有较强

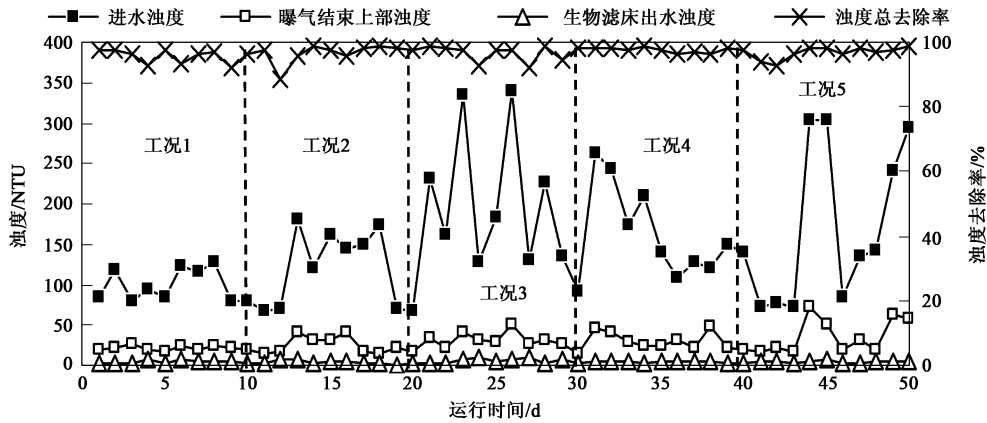


图 4 浊度去除效果
Fig. 4 Turbidity removal efficiency

的耐冲洗负荷的能力.

由图 4 可知, 随着曝气时间的延长, 反应器浊度总去除率有增大的趋势, 且在工况 4 即曝气时间为 60 min 时, 总去除率均值达到最大值 97. 5%. 不同工况条件下, 曝气阶段上部填料对浊度的去除率平均值为 79. 5%, 曝气结束后混合液经生物滤床过滤, 其对浊度的去除率平均值为 83. 8%, 且反应器出水浊度均在 10 NTU 以下, 起到了过滤分离的作用, 反应器出水浊度得到了有效控制, 这一结果优于沉淀、气浮等其他固液分离手段, 究其原因可能是由于生物滤床不仅仅是进行简单的机械过滤, 其表面附着有活性较好的生物膜, 这些膜上的微生物通过生物絮凝、生物降解及颗粒粘附作用对悬浮颗粒物和溶解性胶体进行去除^[22], 这也再次论证了游离的活性污泥和部分脱落的生物膜及无烟煤滤料组成的生物滤床, 进行过滤出水来提高出水水质, 从而解决生物膜法出水 SS 偏高是可行且高效的^[8~ 10]

3 结论

(1) 提出一种简单、高效、低耗的接触氧化过滤一体化生物反应器. 其采用上部装填多面空心球填料和下部装填无烟煤滤料组成的组合填料, 能在一个反应装置中同时实现 COD、氨氮、浊度的有效去除, 也能去除大部分总磷.

(2) 通过试验确定反应器处理城市污水的最佳工艺参数为: 曝气时间为 60 min, 溶解氧浓度 2~ 3 mg/L, 生物滤床初始滤速为 5 m/h, 反应器上部填料层的单位体积填料容积负荷率(以 COD 计) 为 2. 4 kg/(m³·d).

(3) 在最佳工艺参数条件下, 反应器对 COD、氨氮及浊度平均去除率分别为 90. 6%、81. 4% 及 96. 7%, 反应器出水中 COD、氨氮及浊度分别为 6~ 30 mg/L、1. 65~ 7. 31 mg/L 及 1~ 10 NTU. 总磷去除效果欠佳, 最高平均去除率为 63. 0%, 出水总磷浓度

范围在 1 mg/L 上下小幅波动,可通过在反应器内增设泥斗定期排泥,或是增加后续生物或化学强化除磷工艺来提高总磷去除率。

参考文献:

- [1] 杨开. 接触氧化过滤分离一体化生物反应器[P]. 中国专利: CN 1837087, 2008-04-16.
- [2] Chung J, Bae W, Lee Y W, *et al.* Shortcut biological nitrogen removal in hybrid biofilm/suspended growth reactors[J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(3): 320-328.
- [3] Zhan X M, Rodgers M, Edmond O R. Biofilm growth and characteristics in an alternating pumped sequencing batch biofilm reactor (APSBBR)[J]. *Wat Res*, 2006, **40**(4): 817-825.
- [4] Paula M A, Rodrigues J A D, Ratusznei M, *et al.* Treatment of easily degradable wastewater in a stirred anaerobic sequencing batch biofilm reactor[J]. *Wat Res*, 2005, **39**(11): 2376-2384.
- [5] Hu Z Q, Ferraina R A, Ericson J F, *et al.* Biomass characteristics in three sequencing batch reactors treating a wastewater containing synthetic organic chemicals[J]. *Wat Res*, 2005, **39**(4): 710-720.
- [6] Brinke S S, Behrendt J, Sekoulov I. The biofilm filter sequencing batch reactor (BFSBR)[J]. *Water Science Technology*, 1999, **39**(8): 77-83.
- [7] Osorio F, Hontoria E. Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm support[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, **65**(1): 79-84.
- [8] Sorensen P B, Agerback M L, Sorensen B L. Predicting cake filtration using specific flow rate[J]. *Water Environ Res*, 1995, **67**(5): 764-773.
- [9] Sorensen B L, Keiding K, Launitzen S L. A theoretical model for blinding in cake filtration[J]. *Water Environ Res*, 1996, **69**(2): 168-173.
- [10] 祝贵兵, 彭永臻, 李探微, 等. 污泥过滤过程中滤速影响因素的试验研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 581-586.
- [11] 姜文谦. SBBR 法处理城市污水的试验研究[J]. *环境科学与管理*, 2007, **32**(12): 124-126.
- [12] Zhan X M, Rodgers M, Edmond O. Biofilm growth and characteristics in an alternating pumped sequencing batch biofilm reactor (APSBBR)[J]. *Wat Res*, 2006, **40**: 817-825.
- [13] Oliveira R P, Ghilardi J A, Ratusznei S M, *et al.* Anaerobic sequencing batch biofilm reactor applied to automobile industry wastewater treatment: volumetric loading rate and feed strategy effects[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, **47**: 1374-1383.
- [14] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 17-21.
- [15] 严熙世, 范谨初, 许保玖. 给水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 329-335.
- [16] 顾国维. 水污染治理技术研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. 185-191.
- [17] 张金生, 袁兴中, 曾光明, 等. 外循环三相流化床载体挂膜特性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2794-2797.
- [18] 施悦, 任南琪, 章育铭. 两相厌氧工艺好氧预挂膜快速启动试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, **38**(11): 1831-1834.
- [19] 滕济林, 李星伟, 殷杰, 等. 废水处理新型填料的挂膜试验研究[J]. *电力建设*, 2002, **23**(2): 54-57.
- [20] Cristiano N, Renzo D F, Mauro R. Biomass concentration in fluidized bed biological reactors[J]. *Wat Res*, 1997, **31**(4): 936-940.
- [21] 张可方, 张朝升, 方茜. 序批式生物膜法处理城市污水除磷规律研究[J]. *广州大学学报*, 2007, **6**(1): 60-64.
- [22] 周涛. 生物活性炭-砂滤池深度处理微污染原水的试验研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 2000. 36-42.