生物过滤氧化反应器处理生活污水中试研究

齐兵强 王占生

提要 以生活污水为处理对象,研究了生物过滤氧化反应器(BIOFOR)在高滤速、高负荷、小的 气水比情况下,用非常短的水力停留时间(60~80min),取得了很好的出水水质的机理,主要水质指 标(COD、BOD、SS、氨氮)可达到国家《污水综合排放标准》或《生活杂用水水质标准》。同时探讨了滤 速及容积负荷对出水水质的影响,分析了主要污染物的去除规律。

关键词 生活污水 生物过滤氧化反应器(BIOFOR) 曝气生物滤池(BAF) 滤速 负荷

0 前言

生物过滤氧化反应器 (BIOFOR — Biological Filtration Oxygenated Reactor) 是曝气生物滤池 (BAF)的一种形式,国外在 20 世纪 80 年代即开始 进行研究,截至目前为止,世界范围内已有许多实际 工程应用,并成为一些国际化大型水务公司的重要 污水处理技术。据有关资料显示,该工艺具有占地 面积很少、池容小、不需二沉池、处理出水水质高(可 达到有关回用水水质要求)等一系列常规生物处理 无法比拟的优点。国内对 BIOFOR 的研究、报道还 很少。

对 BIOFOR 而言,滤料是一个关键。BIOFOR 滤料的国产化(国家专利)使得 BIOFOR 同时又具 有了基建投资少、运行费用低的优点。这为 BIO FOR 在我国的应用创造了极为有利的条件。本研 究首次采用此滤料——球形轻质陶粒,以生活污水 为处理对象,并以中试的规模,对 BIOFOR 进行了 考察、研究。

1 试验流程及选用参数

1.1 BIOFOR 的工艺特征

BIOFOR 工艺属于生物膜法类,与普通生物滤 池最大的不同在于采用一种粒径较小的滤料,并进 行人工曝气(反硝化时除外),并定期进行反冲洗。 一般说来,BIOFOR 具有以下特征:

(1) 具有氧化降解、生物絮凝吸附、截留悬浮物 的功能,集生物作用与固液分离作用于一身,不需后 设二沉池。与 BAF 的另一形式——BIOCARBONE 不同,BIOFOR 的曝气装置设于整个滤料下面。

(2)所用滤料密度大于 1g/ cm³,滤料在过滤时

呈压实状态。

(3)采用气水同向流(上向流),并以较高的滤速过滤。

(4)采用气水联合反冲洗,主要依赖气体的擦洗 作用,反冲洗时滤料基本不膨胀。反冲污泥最终回 流入初沉池。

1.2 试验工艺流程(见图 1)



图1 试验工艺流程

BIOFOR 分两级,第一级 BIOFOR C/N 和第二 级 BIOFOR N,在两级 BIOFOR 中,污水都采用上向 流流经滤料层。两级之间有一水位高差,污水经泵 进入 BIOFOR C/N 后,在这一水位高差下,自流入 BIOFOR N。BIOFOR N 的出水储满清水箱后,最 终排出。

曝气采用空压机鼓气,穿孔曝气管置于两柱滤 料下、垫层中。两柱运行一段时间后,水头损失达到 一定程度,利用清水箱储备的处理后水,在气水联合 作用下,反冲洗两个滤柱。在试验中,暂时没有考虑 污泥的回流(到初沉池,图1中以虚线示意),反冲出 水直接排放。

1.3 试验采用的主要工艺参数

BIOFOR C/N:处理水量 10~13.6m³/d,滤速 6 ~8m/h,床深 5.7m,滤料装填高度 4m,滤料粒径 3.5~5mm,均质滤料,水温 21.5~23.5 ,空床水力 停留时间(装填滤料段)30~40min,气水比(1~3) 1,

42 给水排水 Vol. 27 No. 3 2001

反冲周期 24~48h,设计最大水头损失 2.5m。BIO-FOR N:气水比(2~3) 1,反冲周期 24~168h,设计 最大水头损失 1.5m,其余同 BIOFOR C/N。

2 试验结果及讨论

试验按滤速(6m/h和8m/h)分为两个阶段,目的在于研究BIOFOR对COD、BOD、SS、氨氮的去除效果及其规律。取样时,在每个状态(相同滤速和气水比)稳定至少3d,取样点间隔时间一般为12~36h (一个状态内)。在反冲后6~24h内取样。

2.1 BIOFOR 对 COD 的去除

2.1.1 BIOFOR 对 COD 的去除效果

试验结果见图 2。图中曲线断开处之前是 6m/ h 的滤速下处理情况,之后为滤速 8m/ h 的情况。



图 2 BIOFOR 系统进出水 COD 变化

试验期间,污水浓度变化较大,初沉池 COD 去 除率约为 20%~30%。BIOFOR 进水(初沉池出 水)COD 浓度变化范围为 86.6~337.5mg/L 之间。 从图 2 可见,BIOFOR 对 COD 的去除主要集中在 BIOFOR C/N 柱内,之后的 BIOFOR N 只作小部分 的处理。结果表明,在滤速 6m/h 时,BIOFOR C/N 出水平均 COD 值为 50.5mg/L(23.6~60.9mg/L), BIOFOR N 出水平均 COD 为 34.2mg/L(14.6~ 50.0mg/L),达到《生活杂用水水质标准》(CI 25.1-89,COD 50mg/L)。在滤速 8m/h 下,BIOFOR C/N 出水 COD 平均为 69.3mg/L(40.0~99.0mg/L), BIOFOR N 出水 COD 平均为 42.4mg/L(32.0~ 54.0mg/L)。达到 国家《污水综合排放标准》 (CB8978 - 1996)一级标准 COD 60mg/L。

BIOFOR C/N 有很高的处理效率和承受负荷 能力,其机理目前正在研究,初步分析,可能有以下 几个原因: 生物量大,在 BIOFOR 中采用的滤料 粒径较小(*d* = 3.5 ~ 5mm),表面粗糙,因而具有很

大的比表面积,这些优点为细菌的大量繁殖提供了 适宜的条件: 定期反冲洗大大提高了生物膜的活 性,在普通生物滤池或接触氧化法工艺中,生物膜的 脱落是一个自然、被动的过程,形成的生物膜太厚, 膜内经常出现厌氧状态,膜活性不高,在 BIOFOR 中、通过定期反冲洗、清除多余的、活性不高的生物 膜,保持适度的生物量和生物膜的高活性; 生物絮 凝作用,BIOFOR C/N能在非常短的水力停留时间 内达到很高的处理负荷,并非完全依赖细菌的氧化 作用,有相当一部分有机物并没有被氧化降解,而是 以生物絮凝的形式被截留于 BIOFOR C/N内,最后 借助于反冲洗将其以污泥的形式排出。在 BIOFOR C/N 柱内,存在着一个作用类似于 AB 法中的 A 段, 是一个明显的生物絮凝吸附区域,大概位置在进水 端至沿水流方向 1m 处。经过测定,在这 1m 长的区 段内污泥量最大,而且发臭,溶解氧的平均浓度仅为 0.38mg/L(滤速 8m/h,气水比 1 1)。而其负荷在 整个 BIOFOR C/N 柱内最高。

2.1.2 滤速对 BIOFOR 处理效果的影响

由图2可看出:

(1) 在进水 COD < 200mg/L 时(最小 86.6mg/L),提高滤速(从 6m/h 到 8m/h)无论对一级曝气生物滤池(BIOFOR C/N),还是两级曝气生物滤池(BIOFOR C/N+BIOFOR N),其出水 COD 平均值基本不产生影响。

(2) 在进水 COD > 200mg/L 时(最大 337.5mg/ L),BIOFOR C/N、BIOFOR N 在 8m/h 滤速下出水 COD 平均值都高于 6m/h 滤速下的出水 COD 平均 值,其中 BIOFOR C/N 出水相差较大(36.8mg/L)。 这说明在较高有机物浓度下,提高滤速(从 6m/h 到 8m/h)对一级曝气生物滤池(BIOFOR C/N)的处理 效果有较大的负影响;而对于整个系统而言,出水值 已比较接近(仅相差 11.1mg/L),可见两级曝气生 物滤池(BIOFOR C/N + BIOFOR N)对滤速提高 (从 6m/h 到 8m/h)带来的负影响具有一定的缓冲 作用。

(3) 在滤速 6m/h 时, BIOFOR C/N或 BIOFOR N 的出水值并未随着进水 COD 的大幅增加而有大的变化。例如进水 COD 从 117.8mg/L 一直升到 264.5mg/L, BIOFOR C/N 出水的 COD 仅从

42.7mg/L 升到 54.0mg/L, BIOFOR N 的也仅从 31.8mg/L 升到 41.9mg/L。这说明,在此滤速下 BIOFOR 具有较强的耐冲击负荷能力;在 8m/h 下 情形就有所不同了,随着进水浓度的大幅涨落,BIO FOR C/N 和 BIOFOR N 的出水值也出现较大幅度 的涨落(BIOFOR N 涨落幅度小于 BIOFOR C/N)。 这说明,在 8m/h 滤速下,BIOFOR 工艺的抗冲击负 荷能力较滤速 6m/h 时差。

2.1.3 BIOFOR C/N COD 负荷与出水水质的关系

分别按在 6m/ h,8m/ h 两种滤速下进行分类统 计数据,结果见图 3,图 4。



图 4 8m/h 滤速下 BIOFOR C/N 出水水质与 COD 负荷的关系

由图 3,图 4 可见,在 8m/h 的滤速下, BIOFOR C/N 出水 COD 随着 BIOFOR C/N 处理负荷的增加 而增加,且有一定的相关性;而在 6m/h 的滤速下, 处理负荷从 0.97kgCOD/(m³·d) 到 8.13kgCOD/ (m³·d), BIOFOR C/N 出水 COD 并未随着 BIO FOR C/N 处理负荷的增加而有升高的趋势,其值在 37.3~60.9mg/L之间徘徊。这说明,一方面,水力 停留时间对 BIOFOR C/N 的出水水质有较大影响: 另一方面,在6m/h的滤速下,由于试验期间进水浓 度偏低,进水负荷不够高,未达到 BIOFOR 的处理 能力, BIOFOR C/N的处理能力远未发挥出来,以 至于在较低负荷下($0.97 \sim 8.13$ kgCOD/($m^3 \cdot d$)), 出水 COD 总徘徊在一个范围内,不再增加。这一事 实反过来也说明 BIOFOR C/N 具有很大的承受负 荷能力。另外有试验表明系统对 BOD 的去除率高 于对 COD 的去除率。

2.2 BIOFOR 工艺对氨氮的去除效果

试验结果见图 5。图中曲线断开处之前是滤速 6m/h 处理情况,之后为滤速 8m/h 的情况。



图 5 BIOFOR 对氨氮的去除效果

试验期间,进水氨氮 25.17~49.20mg/L,BIO FOR C/N 出水 18.42~37.76mg/L,BIOFOR N 出 水 0.07~0.74mg/L。

由图 5 可得出以下结果:

(1) 在进水氨氮 25.17 ~ 49.2mg/L 的情况下, 无论 6m/h 或 8m/h 的滤速, BIOFOR N 出水氨氮平 均值小于 0.5mg/L,系统对氨氮的总去除率大于 98%;在进水浓度发生大的变化时,BIOFOR N 的出 水氨氮值始终保持在 1mg/L 以下,6m/h 滤速 BIO-FOR N 承受氨氮负荷平均为 1.07kg/(m³ d),8m/h 时为 1.2kg/(m³ d)。这说明,BIOFOR N 不仅具有 去除氨氮彻底、承受负荷能力高的特点,而且具有很 高的稳定性。

(2) 在两种不同滤速下, BIOFOR N 出水氨氮值 相近,可见 BIOFOR N 处理氨氮可在很短的时间内 完成,缩短停留时间对氨氮的处理几乎没有影响(在 本试验范围内)。

(3)系统对氨氮的去除主要集中在 BIOFOR N 柱内,BIOFOR C/N 只对氨氮进行小部分去除。另 外,从图5可看出,在8m/h的滤速下,BIOFOR C/N 对氨氮的去除率大于6m/h时的。这进一步说明, 在一定范围内提高滤速不仅不会降低处理效果,反 而有助于氨氮的去除。

(4)试验结果显示,BIOFOR C/N和BIOFOR N 的去除对象划分比较明显,前者主要去除有机物、 SS,而后者则主要去除氨氮。造成这种结果的原因 初步分析可能有二:一是溶解氧的限制,二是异养菌 和自养菌(硝化菌、亚硝化菌)在生物膜空间上竞争 及二者对溶解氧竞争的结果。

试验测定结果显示,在 8m/h 滤速、BIOFOR C/N 气水比11,BIOFOR N 气水比31时,BIOFOR C/N 柱内溶解氧平均值(沿程等距离取样)1.52mg/L,这 显然对氨氮的降解不利;在BIOFORN柱中,溶解 氧平均值(沿程等距离取样)3.89mg/L,相对而言, 这样的溶解氧环境对氨氮的降解更加适合。

2.3 BIOFOR 对 SS 的去除

在本试验中,原水经初步沉淀后,进水 SS 较低, 在 56.0~105.5mg/L 之间。BIOFOR C/N 出水最 大 7.6mg/L,BIOFOR N 出水最大 4.6mg/L(以上 数据为反冲洗后 6~24h 时间范围内取样结果)。经 过沿程取样(滤速 6m/h 时)发现,BIOFOR 对 SS 的 去除主要集中在进水端沿程 1m 之内(见图 6)。



图 6 SS 沿程去除曲线

注:C1m 指在 BIOFOR C/N 柱内,沿水流方向距进水端 1m 处, 其余类推;N1m 指在 BIOFOR N 柱内,沿水流方向距进水端 1m 处,其余类推。

由图 6 可见,从进水端到 C1m 处,SS 由 81.9mg/L 降到 9.8mg/L,去除率达到 88.0%。 C1m 之后,特别是在 BIOFOR N 柱内,已不再对 SS 进行较大幅度的去除。初步分析认为,一方面,SS 的出水已接近底限,原污水中总有部分 SS 无法被完 全去除;另一方面,尽管 BIOFOR 中生物膜的更新 (脱落)主要依靠反冲洗实现,但在正常运行时,少部 分的生物膜还会在气、水的扰动下流到柱外,这也是 出水 SS 的一部分。只是这种流失量很少,不足以因 此造成出水 SS 的大幅增加。

SS的去除集中在进水端至 C1m 处对 BIOFOR 的运行不利。这样一方面会导致 BIOFOR C/N的 水头损失快速增加,另一方面,从整体角度上看,降 低了滤料的纳污率。在本试验中,厂家仅提供一种 规格的陶粒(*d*=3.5~5mm),为均质滤料。如能在 BIOFOR C/N 进水端至 C1m 处采用粒径稍大的滤 料,应该可以延长反冲洗的周期。

3 结论

(1)本研究采用球形轻质陶粒作为 BIOFOR 的

滤料,以生活污水为处理对象,处理出水水质指标 (COD、BOD、NH₃ - N、SS)可达到《生活杂用水水质 标准》或《污水综合排放标准》一级排放标准。

(2)BIOFOR 具有滤速高、容积负荷大的优点, 能在取得较好出水水质的前提下,以接近给水快滤 池的滤速运行,使得 BIOFOR 的占地面积是常规污 水处理工艺的 1/5~1/10。同时,BIOFOR 高负荷 的特点,使得 BIOFOR 的池容较小,再加上滤料的 国产化,BIOFOR 同时具有了基建投资省的优点。

(3)在 BIOFOR 去除污染物时,存在一些规律。 BIOFOR C/N 去除 COD 时,当 BIOFOR 进水 COD 大于 200mg/L 时,提高滤速(6m/h 到 8m/h)使得出 水水质变差;在 8m/h 滤速下运行时,BIOFOR 出水 COD 值与容积负荷存在一定的相关性;BIOFOR N 处理氨氮时,在试验范围内,出水氨氮值始终低于 1mg/L,滤速和容积负荷对其影响不大;在 BIOFOR 处理 SS 时,主要去除区域在进水端至沿水流方向 1m 处。

(4)初步研究、分析认为,在 BIOFOR C/N中, 存在一较为明显的生物絮凝吸附的区域,在此区域 内,溶解氧较低,微生物处于兼氧状态,有相当一部 分有机物并没有被氧化降解,而是以生物絮凝的形 式被截留于 BIOFOR C/N内,最后借助于反冲洗将 其以污泥的形式排出。

参考文献

- R Pujol, M Hamon, X Kandel and Lemmel. Biofilters: flexible, reliable biological reactors. Wat Sci Tech, 1994, 29 (10 ~ 11):33 ~ 38
- 2 P Chudoba and R Pujol. Athree stage biofiltration process:performances of a pilot plant. Wat Sci Tech, 1998, 38(8 ~ 9):257 ~ 265
- Frank Rogalla and Marie Marguerite Bourbigot. New developments in complete nitrogen removal with biological aerated filters.
 Wat Sci Tech ,1990 ,22(1 ~ 2) :273 ~ 280
- 4 R Pujol, H Lemmel and M Gousailles. A keypoint of nitrification in upflow biofiltration reactor. Wat Sci Tech, 1998, 38(3):43 ~ 49
- 5 J P Canler and J M Perret. Biological aerated filters:assessment of the process based on 12 sewage treatment plants. Wat Sci Tech, 1994,29(10~11):13~22

作者通讯处:100084 北京清华大学环境科学与工程系 电话:(010)627821966277511062774145 E-mail:qibg@263.net 收稿日期:2000-8-21

WATER & WASTEWATER ENGINEERING

Vol. 27 No. 3 March 2001

ABSTRACTS

New Approaches to Treat Polluted Raw Water with High Turbidity
The Physico Chemical Phosphorus Removing Processes Yang Shousheng(8) Abstract : The applications of physico-chemical processes to remove phosphorus in urban wastewater are presented. Three schemes of different mixing and flocculating reactors are compared and it is confirmed that baffle reaction tank is best for flocculation to remove phosphorus in wastewater treatment plant.
GAC Based Advanced Treatment of Drinking Water
Operation of Aeration Tank for Biological Denitrification Yang Ying et al (18) Abstract: The operation of Hattingen WTP in Germany is presented focusing on five-unit operation modes of aeration tanks for biological denitrification. The operating mode adaptations corresponding to the composition and flow rate of the raw wastewater and seasonal discrepancies of this WTP are discussed.
On Startability of EGSB Reactor
Pilot Plant Research on Composite Potassium Permanganate Enhanced Filtration
Study on Establishment and Application of Mathematical Simulation Model of Drinking Water Secondary Pollution in
Storage and Transportation
Abstract : A concept of potential maximum generative capacity (C_{max}) of pollutants in water was proposed in con-
struction of a dynamic mathematical model simulating the secondary pollution of drinking water in storage and trans- portation and COD_{Mn} was elected as indicator to estimate the secondary pollution of drinking water and to control the water quality. The parameters of the model have been approved by experimental research. The maximum retention time (T_{lim}) in water reservoir (or tank) decided by the model might be helpful to avoid the secondary pollution in water
reservoir design.
Pilot Study on BIOFOR for Domestic Wastewater Treatment

removal orders were analyzed.

7

good and the main pollutants (COD, BOD, SS, $NH_3 - N$) met the national wastewater discharge standards or water reuse standards. Meanwhile the effect of hydraulic and organic loading on effluent was studied and the main pollutants