

曝气生物滤池技术的研究与应用

贾国正¹,张林生²,张显球¹

(1. 南京师范大学动力工程学院,江苏 南京 210042; 2. 东南大学环境工程系,江苏 南京 210096)

摘要 介绍曝气生物滤池(BAF)的结构与工艺,讨论影响 BAF 运行的主要因素,总结 BAF 在工业废水、城市污水和微污染源水处理中的作用和效果,综述联用技术的研究进展。结论表明,BAF 的 BOD 容积负荷可达 $6\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷高达 $1.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$; 汽水比要求在 7:1 左右。最后对 BAF 的发展与应用前景进行展望。

关键词 水处理 曝气生物滤池 生物膜

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** :1004-6933(2006)04-0071-04

Research progress in technique of biological aerated filter and its application to water treatment

JIA Guo-zheng¹, ZHANG Lin-sheng², ZHANG Xian-qiu¹

(1. School of Dynamical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China; 2. Department of Environmental Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Based on the structure and techniques of biological aerated filter (BAF), the main factors that affect the functions of BAF were discussed, and the effect of BAF on the treatment of industrial wastewater, municipal wastewater, and micro-polluted source water were reviewed. The current situation of the study on BAF combined technology was summarized. The results revealed that the volumetric loading of BOD and $\text{NH}_3\text{-N}$ were $6\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and $1.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ respectively, and the ratio of gas to liquid should be about 7:1. The future development and application of BAF was discussed finally.

Key words water treatment; BAF; biofilm

我国是水资源紧缺国家,水的处理达标排放及回用技术正受到广泛关注和快速发展,曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)以其独有的特点得到广泛的应用。BAF 具有占地面积小,投资少,氧传输效率高,抗冲击负荷能力强,出水水质好等优点^[1,2]。在城市污水、工业废水的有机物及 SS 去除,氨的硝化去除,反硝化脱氮,脱磷以及微污染源水的预处理中,都有很好的应用前景。

1 结构与工艺

曝气生物滤池的结构与普通快滤池基本相同,不同之处在于曝气生物滤池下部或底部增加了曝气

系统,根据水流方向,曝气生物滤池可分为上向流和下向流两种,早期曝气生物滤池多采用下向流,如 BIOCARBON^[3] 现在多采用上向流方式(即采用气水同向流),使布水、布气更加均匀。同时,在水气上升过程中可把底部截留的 SS 带入滤池中上部,增加了滤池的纳污能力,延长了工作周期。目前,上向流曝气生物滤池有 BIOFOR、BIOSTYR、COLOX、DeepBed、BIOPUR 等多种形式^[4],其中 BIOFOR 与 BIOSTYR 应用较为广泛。为了适应不同水质和拓宽应用范围,很多科研、工程技术人员对曝气生物滤池结构进行了研究改造,邹伟国等^[5]开发了一种名为 BIOSMEDI 的曝气生物滤池,它采用了脉冲反冲洗、

气水同向流的形式,可用于微污染源水预处理或污水深度处理。

1.1 BIOFOR 生物滤池

BIOFOR 滤池由法国 Degremont 公司设计开发,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体,不需后设二沉池。其底部为气水混合室,之上为常柄滤头、曝气管、垫层、滤料。滤池中主要采用相对密度大于 1 的单层生物滤料 (biolite),滤料在过滤时呈压实状态。正常运行时布水采用滤头,布气采用专用布气头,气水同向流(上向流),并以较高的滤速过滤。采用气水联合反冲洗,主要利用气体的擦洗作用。它不仅具有生物膜工艺技术的优势,同时也起着有效的空间滤池作用。BIOFOR 滤池适用于处理可生化性较好的废水,其进水 COD 质量浓度允许达到 $1\,000 \sim 1\,200\text{ mg/L}$,COD 有机负荷可达到 $8\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。该滤池应用于不同水质的工业废水的预处理时,需要解决滤层堵塞问题。

1.2 BIOSTYR 生物滤池

BIOSTYR 滤池为法国 OTV 公司推出的新型专利产品,其底部设有进水和排泥管,中上部是填料层,厚度一般为 $2.5 \sim 3.0\text{ m}$,填料顶部装有挡板,防止悬浮填料的流失。挡板上均匀安装有出水滤头。挡板上部空间用作反冲洗水的储水区,其高度根据反冲洗水头而定,该区内设有回流泵用以将滤池出水泵至配水廊道,继而回流到滤池底部实现反硝化。填料层底部与滤池底部的空间留作反冲洗再生时填料膨胀之用。滤池供气系统分两套管路,置于填料层内的工艺空气管用于工艺曝气,并将填料层分为上下两个区:上部为好氧区,下部为缺氧区。根据不同的原水水质、处理目的和要求,填料层的高度可以变化,好氧区、厌氧区所占比例也可有所不同。滤池底部的空气管路是反冲洗空气管。BIOSTYR 生物滤池采用悬浮型轻质滤料,气水同向流,滤料比表面积大,可防止原水中杂质堵塞,但需有效地解决滤池反冲洗问题。BIOSTYR 滤池适用于处理城市生活污水,其进水 COD 质量浓度允许达到 $800 \sim 1\,000\text{ mg/L}$,COD 有机负荷可达到 $5\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

1.3 BIOSMEDI 曝气生物滤池

BIOSMEDI 滤池是由上海市工程设计研究院推出的专利产品,其结构形式是:上部为出水槽,中部为滤层区,下部为空气室。滤层区与出水槽之间用滤网、孔板或安装滤头的混凝土墙隔开,空气室和滤层区之间以孔板相隔。采用 EPS 发泡塑料粒子作滤料,滤料的体积质量较小(15 g/L 左右),粒径为 $3 \sim 8\text{ mm}$,比表面积大($650\text{ m}^2/\text{m}^3$),具有适宜微生物

生长、耐用、化学稳定性好等一系列优点。进水经中心导流筒进入滤层下部,由下向上穿过滤层(在滤料阻力的作用下使滤池进水均匀)。空气布气管安装在滤层区下部,滤料表面生长着含有大量微生物的生物膜,微生物利用水中的溶解氧降解一部分有机物及氨氮,同时出水中的悬浮物质经滤料过滤被截留。水流以上向流形式通过滤层区顶部滤网溢流入出水槽,由出水管排出。BIOSMEDI 滤池可用于微污染源水预处理或污水深度处理。滤料的浮力大,过滤效果好但易结块。

2 运行影响因素

2.1 滤料

滤料是曝气生物滤池的核心,直接影响着曝气生物滤池的运行效能。滤料应有较好的生物膜附着能力,同时具有较大的比表面积,孔隙率大,截污能力强,为了提高滤料的水力学特性,一般要求生物滤料具有较规则的形状,以球形为佳,不规则滤料的水流阻力大,易堵塞,布气布水不易均匀,装填高度也受到限制。

滤料密度过大,会造成反冲洗时滤料悬浮困难或使反冲洗时能耗增加,从而使装填高度较低,运行周期短;密度过小,又不易于滤料在反应器中的运行工况,且容易引起跑料。对于陶粒滤料^[6],其视密度通常在 1.7 g/cm^3 左右,以陶粒作为滤料的曝气生物滤池的适宜滤料层高度为 $2.0 \sim 2.5\text{ m}$ 。

田文华等^[7]以沸石滤料为例,研究了滤料粒径对曝气生物滤池硝化性能的影响。研究表明,滤料粒径为 $2 \sim 3\text{ mm}$ 的比 $4 \sim 5\text{ mm}$ 的对氨氮的去除率高。 20°C 时前者的硝化速率常数比后者高 63.1% ,同一条件下的硝化强度也高 39.7% 。

2.2 气水比

李善评等^[8]认为:当停留时间一定时,随着气水比减小,曝气生物滤池对 COD_{Cr} 和氨氮的去除率也减小;当气水比一定时,随着停留时间的缩短,反应器对 COD_{Cr} 的去除率越低,而氨氮的去除率却越高。

2.3 布水与布气

曝气生物滤池的布水系统主要采用滤板和配水滤头的配水方式,此外国内也有小型的曝气生物滤池采用栅型承托板和穿孔布水管(管式大阻力配水方式)的配水形式。要使曝气生物滤池发挥其最佳的处理能力,必须使进入滤池的污水能够均匀流过滤料层,尽量使滤料层的每一部分都能最大限度地参与生物反应。如果布水系统设计不合理或安装达不到要求,使反冲洗时配水不均匀,将使 BAF 处理能力下降,同时使水溶液主体的溶解氧和生物易降

解的有机物与生物膜上微生物之间的传质效率下降,影响生物滤池对有机物的去除效率。

曝气生物滤池一般采用鼓风曝气形式,最简单的曝气装置可采用穿孔管。现在国内外曝气生物滤池常用生物滤池专用曝气器作为滤池的空气扩散装置。曝气系统的设计必须根据工艺计算所需供气量来进行。保持曝气生物滤池中足够的溶解氧是维持BAF内生物膜高活性、对有机物和氨氮的高去除率的必备条件。

2.4 水力负荷

Pujol等^[1]研究了水力负荷对曝气生物滤池硝化或反硝化的影响。结果表明,水力负荷的提高有利于增强曝气生物滤池的传质能力,只要在曝气量、温度、反冲洗等因素不受限制的条件下,尽可能大的水力负荷对曝气生物滤池的硝化或反硝化是一个积极的因素。

2.5 有机负荷

江萍等^[9]的研究表明,BAF具有较高的有机负荷和耐冲击负荷能力,当进水COD质量浓度小于500 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为10~20 mg/L,水力负荷 $0.6\sim 2.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,气水比为5:1~10:1时,BOD容积负荷达 $6\sim 10\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 容积负荷 $0.4\sim 1.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

3 水处理效能研究进展

3.1 工业废水

钟华文等^[10]采用上向流曝气生物滤池处理含酚废水,由于酚类物质易为微生物降解,而耐酚噬酚菌是一种好氧微生物,配有曝气装置的曝气生物滤池能够提供足够的空气来满足耐酚噬酚菌的繁殖和活性。结果表明,含酚废水在进水酚的质量浓度不大于160 mg/L,COD的质量浓度不大于800 mg/L,气水比为5:1~8:1的条件下,水力停留时间仅需2.0 h,出水中酚和COD的平均质量浓度分别不大于8.5 mg/L和140 mg/L,酚的平均去除率达到93%,COD的平均去除率达到73%。刘建广等^[11]在某卷烟厂的污水处理工程中采用了曝气生物滤池工艺。两年的生产运行结果表明,BAF内水流呈推流式,沿水流方向在滤层不同高度上生长有各自占优的微生物,在进水端填料生物膜中异氧菌占绝对优势,而在出水端生物膜中硝化菌占优势。气泡上升过程中由于受到层层阻力,在水中停留时间加长,气泡与生物膜有相对较长的接触时间,大大提高了氧的利用率与微生物的活性。该工艺具有运行稳定、处理效率高的特点,在进水 $\rho(\text{COD})_{\text{Cr}}=200\sim 900\text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})=15\sim 35\text{ mg/L}$,水温 $=15\sim 25^\circ\text{C}$ 、 COD_{Cr} 容

积负荷小于 $6.4\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的运行条件下,BAF出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 小于76 mg/L;在 COD_{Cr} 容积负荷小于 $4.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的运行条件下,BAF出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 小于50 mg/L, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 小于4 mg/L。

3.2 城市生活污水处理

李亚新等^[12]采用上进水、下出水,底部曝气的曝气生物滤池处理生活污水。小试结果表明,BAF对生活污水进行碳氧化/硝化合并处理是可行的。填充床上部含碳有机物浓度高,异氧菌竞争氧、营养物质和生存空间的能力比硝化菌强而占优势;污水向下流动的过程中,含碳有机物浓度因生物降解逐渐降低,异氧菌因营养缺乏减少,硝化菌才有可能进行正常代谢活动,因此硝化菌的活跃层较低。同时,BAF的生物膜更新快且很薄,并且高活性微生物分泌胞外多聚物的能量强,形成的生物膜附着性好,受水力剪切和机械剪切的影响较小。此外,填料的较大空隙内生长着一定量的硝化菌,不易被冲出去。在最佳工艺条件($\text{HRT}=1.59\text{ h}$,气水比 $=7:1$)下,进水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})\leq 32\text{ mg/L}$,平均为29.8 mg/L,出水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})\leq 15\text{ mg/L}$,平均为7.7 mg/L,去除率为74.2%。同时出水COD,BOD和SS均达标。BAF抗 $\text{NH}_3\text{-N}$ 冲击负荷的能力强, $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷在 $0.271\sim 0.728\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 之间变化时,出水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 保持在15 mg/L以下。

Rother等^[13]在城市污水的除氮过程中,对BAF的优化设计、运行和能量消耗进行了研究。研究表明,pre-DN,N和post-DN过滤系统的混合对大部分城市污水的处理最可取,因为能降低循环率,节省外加碳源。

3.3 微污染源水生物预处理

桑军强等^[14]认为,BAF对有机物的去除受源水水质的影响较大,其对 COD_{Mn} 的去除率为5%~45%,对COD的去除率为20%~60%;曝气生物滤池中微生物固定生长的特点使微生物在反应器内能够获得较长的停留时间,因此亚硝化细菌和硝化细菌有足够的时间进行积累,从而使BAF对水中氨氮的去除有良好的效果,且受源水水质影响较小,其去除率普遍达80%以上。另外,BAF工艺对浊度、色度、铁、锰等也有较好的去除效果。

BAF预处理工艺除可以直接去除源水中的污染物外,对后继的常规给水处理工艺也产生非常有利的影响。BAF预处理工艺消耗了源水中大部分可生物降解的有机物,必然减少给水管网中细菌滋生的可能性,提高了饮用水的生物稳定性。BAF预处理工艺降低了源水中的有机物和氨氮的含量,可以减少消毒过程中氯气的投量,降低了消毒过程中消毒副产物的产生量,提高饮用水的安全性。研究还表

明,BAF 对源水的浊度有较高的去除率,BAF 预处理可以降低水中胶体物质的 Zeta 电位,使水中的胶体颗粒更加容易脱稳凝聚,降低混凝过程中混凝剂的投量,从而降低水处理的成本。

3.4 组合处理工艺

肖文胜等^[15]采取缺氧/好氧(A/O)与 BAF 联用处理炼油废水,取得了较好的效果。A/O 池可去除大量 COD、BOD₅ 及 NH₃-N,BAF 池容积负荷高,挂膜快,抗冲击负荷强,对悬浮物截留效果好,可谓集生物氧化与生物过滤为一体。A/O 与 BAF 联用工艺对氨氮、悬浮物、COD、油类、挥发酚、硫化物等各种污染物的去除率均高于 90%。出水水质达到或优于 GB8978—1996《第二类污染物的一级排放标准》,为污水的进一步回用奠定了基础。

武江津等^[16]采用 BAF-BAC 工艺对炼油厂二级出水深度处理进行了研究,拟探索炼油厂废水深度处理用于循环冷却水补水新工艺。结果表明,当进水 COD 质量浓度小于 130 mg/L,BAF 和 BAC 滤速分别低于 4.24 m/h 和 1.41 m/h 时,出水 COD 质量浓度平均值为 50 mg/L,总平均去除率达 70%,NH₃-N 的去除率大于 65%,浊度去除率平均为 48.98%,平均出水浊度为 4.46 NTU。

4 工程应用实例

上海周家渡水厂的生产性试验数据表明^[17],采用 BAF 预处理工艺对原水浊度、铁、锰、氨氮、亚硝酸盐、COD_{Mn}和可同化有机碳(AOC)的去除率分别为 40.9%、53.1%、36.6%、39.9%、40.1%、15.4% 和 54%,提高了出水水质和生物稳定性。通过生产性试验发现,BAF 预处理工艺更适用于原水氨氮较高的情况。采用该工艺时要考虑在预处理后加消毒剂来解决沉淀池和砂滤池中的藻类和其他浮游生物过量生长的问题,否则会影响系统的运行和出水水质。

马栏河污水处理厂二级处理采用了 BIOFOR 工艺^[18],全年处理效果良好,出水水质达到了《城市污水再生利用——城市杂用水水质》标准,目前已回用作城市绿化、住宅小区冲厕、建筑施工用水以及厂区内绿化、消防、冲厕、清扫、车辆冲洗用水。

5 结论与展望

BAF 的 BOD 容积负荷可达 6 kg/(m³·d),COD_{Cr} 容积负荷达 8 kg/(m³·d),NH₃-N 容积负荷高达 1.0 kg/(m³·d);汽水比要求在 7:1 左右。该技术特别适合于改变我国目前水处理行业所面临的技术水平低、污水量大、资金少、水质变化大的现状,应加大

力度进行深入研究,推动该技术在工业废水、城市污水和微污染源水处理中的广泛应用。BAF 联用技术在水体的深度处理与回用上应用前景也十分广阔。

参考文献:

[1] PUJOL R, LEMMEL H, GOUSAILLES M. A Keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor [J]. Wat Sci Tech,1998,38(3) 43-49.

[2] WIJEYEKOON S, MINO T, SATOH H. Fixed bed biological aerated filtration for secondary effluent polishing-effect of filtration rate on nitrifying biological activity distribution [J]. Wat Sci Tech,2000,41(1) 187-195.

[3] TSCHUI M, BOLLER M, GUJER W, et al. Tertiary nitrification in aerated pilot biofilters [J]. Wat Sci Tech,1994,29(10-11) : 53-60.

[4] CHEN J J, MCCARTY D, SLACK D, et al. Full scale case studies of a simplified aerated filter (BAF) for organics and nitrogen removal [J]. Wat Sci Tech,2000,41(4-5) 1-4.

[5] 邹伟国,孙群,王国华,等.新型 BIOSMEDI 滤池的开发研究 [J]. 中国给水排水,2001,17(1) 1-4.

[6] 郑俊,吴浩汀.曝气生物滤池工艺的理论工程应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2005 63-73.

[7] 田文华,文湘华,崔燕平,等.滤料粒径对曝气生物滤池硝化性能的影响 [J]. 中国给水排水,2003,19(5) 48-50.

[8] 李善评,张鉴达,负军锋,等.曝气生物滤池处理啤酒废水 [J]. 山东大学学报:工学版,2004,34(3) 105-108.

[9] 江萍.曝气生物滤池处理城市污水的研究 [J]. 水处理技术,2003,29(3) 172-174.

[10] 钟华文,李晓明,何东升.曝气生物滤池处理炼油生产废水 [J]. 工业用水与废水,2003,34(5) 42-44.

[11] 刘建广,张春阳.生物曝气滤池在卷烟厂污水处理工程中的应用研究 [J]. 环境工程,2003,21(3) 28-30.

[12] 李亚新,华玉妹.生物曝气滤池处理生活污水工艺特性研究 [J]. 给水排水,2001,27(9) 31-33.

[13] ROTHER E, COMEL P. Optimising design, operation and energy consumption of biological aerated filter (BAF) for nitrogen removal of municipal wastewater [J]. Wat Sci Tech, 2004,50(6) 131-139.

[14] 桑军强,王占生. BAF 在微污染源水生物预处理中的应用 [J]. 中国给水排水,2003,19(2) 21-23.

[15] 肖文胜,徐文国,杨桔才. A/O 与 BAF 联用处理炼油废水 [J]. 中国给水排水,2004,20(9) 78-80.

[16] 武江津,孙长虹,马健驹,等. BAF-BAC 工艺在炼油厂二级出水深度处理中的应用 [J]. 环境科学,2003,24(6) : 135-138.

[17] 周云,戴婕,王占生,等.曝气生物滤池在上海周家渡水厂的应用 [J]. 中国给水排水,2002,18(10) 6-8.

[18] 乔晓时,许云阁,全燮. BIOFOR 曝气生物滤池用于城市污水处理 [J]. 中国给水排水,2004,20(7) 83-85.

(收稿日期 2005-03-30 编辑 傅伟群)