

Research Progress of the Biological Aerated Filter in Wastewater Treatment

Nasha Dou, Lin Wang

College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao
Email: nass-nasa@163.com

Received: Apr. 1st, 2013; revised: Apr. 30th, 2013; accepted: May 10th, 2013

Copyright © 2013 Nasha Dou, Lin Wang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Biological aerated filters (BAF) is a new wastewater treatment process developed at the end of the 1980s, and after 20 years of research and development, BAF system has been attached extensive importance to Europe, the US, Japan and other developed countries. At present, there are hundreds of engineering examples in the world. Through researching domestic and international literatures on BAF, this work endeavored to give an overview of the hot research topics and advances of BAF. Furthermore, the problems and difficulties presented were indicated. Finally, the key points needed to be deliberately studied were discovered.

Keywords: Biological Aerated Filter; Wastewater Treatment; Research Progress

曝气生物滤池在污水处理中的研究进展

窦娜莎, 王琳

中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛
Email: nass-nasa@163.com

收稿日期: 2013年4月1日; 修回日期: 2013年4月30日; 录用日期: 2013年5月10日

摘要: 曝气生物滤池(BAF)是20世纪80年代末发展起来的污水处理新工艺, 经过二十余年的研究发展, BAF技术已受到欧、美和日本等发达国家的广泛重视。目前, 世界上已有几百个工程实例。本文以近年来发表在国内外期刊上的关于BAF研究与应用的多篇文献为基础, 综述BAF的研究热点与进展, 指出曝气生物滤池现存的一些问题, 最后对BAF今后需要重点研究的方向进行展望。

关键词: 曝气生物滤池; 污水处理; 研究进展

1. 引言

近年来, 随着污水处理产业的迅速发展, 研究开发流程简洁, 控制灵活, 节约用地的一体化工艺流程已成为当前污水处理领域的发展趋势。曝气生物滤池(Biological Aerated Filter)以下简称BAF, 是在生物接触氧化工艺的基础上引入饮用水处理中过滤思想而产生的一种好氧废水处理工艺, 真正意义上的BAF可以看作是在整个体积空间内, 粒状填料处于淹没状

态并提供微生物生长的场所, 具有同时去除SS及其它污染物的反应器^[1]。因而, 与传统工艺相比, 曝气生物滤池集生物氧化、过滤、缺氧微环境等功能于一体, 具有处理负荷高、出水水质好, 工艺流程简单, 占地面积省和菌群结构合理等优点。

70年代末80年代初BAF工艺在欧洲开始试验和应用, 进入21世纪以来得到了许多研究人员的重视, 笔者以近年来发表在国内外期刊上的关于BAF研究

与应用的多篇文献为基础,从工程应用、滤料研发、反冲洗特性和群落结构等角度综述 BAF 的研究进展,指出曝气生物滤池现存的一些问题,并对分子生物学技术应用于曝气生物滤池运行控制的可行性进行了探讨,最后对曝气生物滤池今后的研究方向进行了展望。

2. BAF 概述

2.1. 工艺原理

BAF 工艺净化污水的原理是^[2-4]:通过反应器内填料上生长的生物膜中微生物氧化分解作用、填料及生物膜的吸附截留作用和沿水流方向形成的食物链分级捕食作用,实现去除水中污染物的目的,同时利用生物膜内部微环境和厌氧段的反硝化作用,实现脱氮除磷的功能。BAF 工艺运行一段时间后通过周期性地对滤料进行反冲洗,清除滤料上的截留物和老化的生物膜,可使滤池在短期内恢复工作能力,实现滤池的周期运行。

2.2. 工艺类型

根据水流方向不同,BAF 工艺可分为上向流和下向流两种形式。上向流 BAF 其水流从 BAF 的底部由下而上流过滤料层,与自下而上的空气通向接触,代表工艺为 Biostyr BAF 和 Biofor BAF,该种运行方式的 BAF 运行水力负荷高,气水分布更均匀,同时,升流式工艺在水流和气流的通向上过程的冲刷力作用下及经反冲洗后滤料自然形成的滤料粒径分布,可把废水中的 SS 带至滤层中部,有效延长滤池的工作周期。早期的 BAF 多采用下向流,水流从 BAF 的顶部由上至下流过滤料层,与自下而上的空气逆向接触,以法国 OTV 公司的 Biocarbon BAF 为代表,该种运行方式的 BAF 水力负荷较低,虽然对进水中的 SS 具有良好的截留作用,但是纳污效率较低、易堵塞、运行周期短,因此,目前多采用升流式。

3. BAF 发展现状

3.1. BAF 在污水处理中的应用

BAF 作为一种新型生物处理技术,从诞生至今经历了一段快速发展的过程,从最初的仅用于污水的三

级处理,后发展成为直接用于二级处理,现在更是已经应用到包括工业废水、垃圾渗滤液处理、难降解有机物以及饮用水净化等各个领域。Su 等人^[5]采用 BAF 处理油田污水,当水力负荷率在 0.6 m/h 至 1.4 m/h 之间变化时,BAF 对油、COD、BOD 和 SS 的去除率分别是 76.3%~80.3%、31.6%~57.9%、86.3%~96.3%和 76.4%~82.7%;Wang 等人^[6]采用 BAF 对垃圾渗滤液进行深度处理,在水力停留时间为 4.5 小时的条件下,出水 COD 可降至 75 mg/L,色度小于 10 度;Farabegoli 等人^[7]采用 BAF 处理生活污水,三年的中试研究数据表明该工艺具有碳和氨氧化的高效率和稳定性,出水水质为:TCOD 68 mg/L, TSS 37 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 3.3 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 21.1 mg/L;Cheng 等人^[8]将 BAF 是作为从多层陶瓷电容器(MLCC)中去除 VOCs 的固定化生物膜工艺平台(VOC 的成分被鉴定为甲苯、1, 2, 4 三甲基苯、1, 3, 5 三甲基苯、一溴二氯甲烷和异丙醇),试验结果表明,当流入 (1188 ± 605) mg/L 的 COD 时, COD 的去除率为 90%,同时 (0.97 ± 0.29) ppmv 的 VOC 从 BAF 系统中去除;Shen 等人^[9]采用 BAF 处理含有三硝基苯的工业废水,研究发现在三硝基苯降解期间,亚硝酸盐的氧化能够自发发生;Liu 等人^[10]采用两级 BAF 处理电镀废水,在水力负荷为 $1.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,气水比为 4:1 条件下, COD、氨氮和总氮的去除率分别为 90.13%、92.51%和 55.46%,出水达到回收用水标准;Hasan 等人^[11]将 BAF 作为附加工艺用于饮用水净化,研究表明,该工艺能够有效的将 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Mn^{2+} 同步去除,最佳运行参数为: COD 负荷 0.90 kg/m^3 ,曝气量 0.30 L/min,水力停留时间 7.47 h,此条件下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Mn^{2+} 的同步去除率为 95.5%、93.9%和 94.8%。

3.2. BAF 研究进展

至 20 世纪 90 年代末,曝气生物滤池在世界各国的应用已经非常广泛,同时,各国学者对曝气生物滤池的研究也更为系统化,BAF 因其处理效果好、运行费用低、占地面积小、易于维护,具有同时除碳、脱氮、除磷功能,并且适用于各种出水标准要求,进入 21 世纪以来成为研究热点工艺之一。近五年 BAF 的研究的重点主要集中在开发新型填料、探索与其他工艺相结合处理难降解生产废水、探究反冲洗方式及污

泥特性、优化经验模型等。

3.2.1. 滤料研究进展

BAF 是一种生物膜法处理工艺,其生物降解性能的优劣很大程度上取决于滤料的特性,因而,滤料的研究与开发一直是 BAF 工艺的研究重点和热点。BAF 所用的滤料,根据其采用原料的不同,可分为无机滤料和有机高分子滤料,常见的无机滤料有陶粒、焦炭、石英砂、活性炭、膨胀硅铝酸盐等,有机高分子滤料有聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯等。有机高分子滤料与微生物间的相容性较差,所以挂膜时生物量较少,易脱落,处理效果并不总是很理想,且价格昂贵,因而,应用并不广泛,而在无机滤料中,陶粒滤料因其比表面积及孔隙率大、生物量大,使得滤池负荷较大、水头损失较小,并且取材方便、价格低廉,是应用较为广泛的滤料之一。

开发可以取代陶粒颗粒的新型天然无机滤料是 BAF 滤料研究的热点:Li 等人^[12]比较了高炉灰陶瓷颗粒(BCSCP)和粘土陶瓷颗粒(CCP)作为 BAF 滤料处理酿造污水的处理效能,研究表明,在实验条件下,BCSCP-BAF 对 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率较 CCP-BAF 略高,扫描电镜分析结果显示,BCSCP 的孔隙率和比表面积均比 CCP 要大,同时 BCSCP 上的生物多样性亦必 CCP 上丰富;Zhao 等人^[13]采用升流式 BAF 处理人工合成市政污水,比较污泥灰陶瓷颗粒(SFCP)和粘土陶瓷颗粒(CCP)两种生物膜载体的有效性,研究表明,在 HRT 为 0.75 h,气液比为 7.5,反冲洗时间为 48 h 的条件下,SFCP 反应器比 CCP 反应器的性能好,尤其对于氮的去除;Han 等人^[14]采用污泥灰陶粒(SFCP)做填料的新型上向流 A/O-BAF 处理人工配制污水,得到最佳运行条件:水力停留时间为 2.0 小时,汽水比为 15:1,回流比为 200%,在最佳工况下,COD、氨氮的总氮的去除率分别为 90%、98%和 70%;Bao 等人^[15]以泡沫碳作为 BAF 的填料处理污水,与陶粒 BAF 相比,由于泡沫碳孔隙度高、比表面积大、表面粗糙,并且具有较强的吸附能力,因此,该系统对 COD、BOD 和氨氮的去除率更高并且稳定,分别为 81%、81%和 75%;Yu 等人^[16]分别采用陶粒和谷渣作为 BAF 的填料,6 个月的小试研究数据表明,当氨氮负荷在 $0.49\sim 1.21 \text{ kg}(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 之间变化时,以谷渣和陶粒做滤料的 BAF 对氨氮的平均去除率分别为 84.30%

和 80.87%,在去除有机物、浊度和色度方面,谷渣 BAF 的去除率比陶粒 BAF 要低,但仍分别有高于 78%、79%和 80%的有机物、浊度和色度的去除率;Chang 等人^[17]以沸石为填料的曝气生物滤池处理纺织废水,研究表明,在 BAF 处理纺织废水中天然沸石作为载体是可行的,通过离子交换,硝化作用和生物合成去除的氨氮分别是 35.1%,40.2%和 22.3%;He 等人^[18]分别用天然沸石和膨胀土做为曝气生物滤池的滤料处理市政污水,实验结果显示,沸石 BAF 比膨胀土 BAF 有更强的抗冲击负荷和低温能力。此外,对异养菌和硝化细菌数量的观察结果也表明,沸石 BAF 更适合硝化细菌的附着生长,这有助于改善沸石 BAF 的硝化效能;Liu 等人^[19]分别采用牡蛎壳和塑料小球作为滤料的实验室规模的上向流曝气生物滤池被用来处理城市污水,实验结果表明,当水力停留时间大于 4 小时时,牡蛎壳 BAF 和塑料小球 BAF 的 COD 去除率分别为 85.1%和 80.0%,对氨氮的去除率分别为 98.1%和 93.7%。因此,高炉灰陶瓷颗粒(BCSCP)、污泥灰陶瓷颗粒(SFCP)、泡沫碳、谷渣、沸石、膨胀土和牡蛎壳等都是 BAF 的可选填料。

此外,还有学者对多层(多种)填料的 BAF 进行了研究:Liu 等人^[20]采用两层填料的升流式曝气生物滤池对纺织废水的二级出水进行深度处理,在稳态条件下,反应器运行良好,出水的 COD,氨氮和总氮分别为 31 mg/L,2 mg/L 和 8 mg/L;Ji 等人^[21]采用多填料曝气生物滤池(MBAF)处理人工合成废水,将煤灰生物陶粒和金属铁被添加到斜发沸石填料中,研究表明,添加量越高,系统的水力负荷和有机负荷就越高,氮磷的容量就越大。

3.2.2. 组合工艺研究进展

为了进一步拓宽曝气生物滤池的应用范围,研究其在污水深度处理、工业废水处理、难降解有机物处理、低温污水的硝化、低温微污染水处理问题中如何与其他工艺相结合,越来越受到研究者的关注。

碳源是影响污水处理效能一个非常重要的因素,无论是脱氮还是除磷都需要有易降解的有机物,碳源不充足,脱氮除磷就难以达到预期的效果^[22,23],研究发现 A^2O -BAF 联合工艺是处理低 C/N 比污水的有效方式:Ding 等人^[24]对 A^2O -BAF 联合工艺处理低 C/N 比、低 C/P 比污水进行了实验室小试,BAF 出水部分

回流至 A^2O 的缺氧区为反硝化和缺氧吸磷提供电子受体, 这种工艺为反硝化聚磷菌的繁殖提供了适宜环境, 实验数据表明, BAF 出水回流量应控制缺氧区的硝酸盐氮含量在 1~4 mg/L, 这样才能达到氮磷的最佳去除效果; Chen 等人^[25]针对聚磷菌和硝化细菌对污泥停留时间的要求的矛盾, 设计了 A^2O -BAF 联合工艺处理低 C/N 比的城市污水, 当回流比为 100%~400% 时, TN 的去除率分别为 64.9%, 77.0%, 82.0% 和 87.0%, 试验期间, 工艺出水的 COD、氨氮、TP 均低于 50.0 mg/L、0.5 mg/L 和 0.5 mg/L。与此同时, Ryu 等人尝试了采用多段式 BAF 处理低 C/N 比市政污水: 三段式 BAF 工艺(包括吸附、硝化和反硝化段)对市政污水的氨氮的平均去除率稳定在 99%, 研究还发现在动态流动中氨氮的去除率同时受到回流比和 C/N 比的影响^[26]; 四段式曝气生物滤池(包括吸附、硝化、反硝化和净化阶段)实验结果表明: 四段式 BAF 具有良好的除氮效果, 平均去除率为 95%~96%, 并且基本不受水力停留时间的影响^[27,28]。

印染废水是以有机污染为主的成分复杂的有机废水, 其主要特点是污染物浓度高、种类多、含有毒有害成分及色度高。化学氧化法是目前印染废水脱色较为成熟的方法, 其中, 臭氧氧化法不产生污泥和二次污染, 而且臭氧发生器简单紧凑、占地少, 容易实现自动化控制, 是理想的脱色方法, 然而, 臭氧氧化法处理成本高, 不适合大流量废水的处理, 且 COD_{Cr} 去除率低。因此, 采用单一的臭氧法处理印染废水不可行。近年来, 有学者将 BAF 与臭氧氧化工艺结合, 充分利用二者的优势, 取得了良好的处理效果: Lu 等人^[29]采用序批式臭氧氧化与上向流 BAF 组合工艺处理含有偶氮染料活性艳红 X-3B 的污水, 实验结果表明: 当气水比为 3:1、水力负荷为 4.8 m³/m³·d、温度在 20℃~25℃、臭氧与染色剂质量比为 4.5、pH 值为 11 时, 出水 COD 含量低于 40 mg/L、色度小于 20 度。脱色率与 COD 平均去除率分别达到 97% 和 90%; Wang 等人^[30]采用臭氧 - BAF 工艺处理酸性印染废水, 利用臭氧工艺具有的良好脱色效能, 该系统具有良好的处理能力, 特别是对于 COD 和 SS 含量较低的污水, 经过上述工艺处理后, 出水 COD 低于 40 mg/L, SS 约为 50 mg/L, 色度小于 20 度, 出水可以达到工业冷却水标准; Fu 等人^[31]研究了厌氧过滤床 - 生物蠕动床 - 臭氧 - 曝气生物滤池(AFB-BWB-O₃-BAF)工艺处

理纺织印染废水的处理效能, 当水力停留时间分别为 8.1 - 7.7 h, 9.2 h 和 5.45 h 时, AFB, BWB, O₃-BAF 工艺出水的 COD 含量分别为 704.8 mg/L, 294.6 mg/L 和 128.8 mg/L。

垃圾渗滤液是垃圾填埋过程中经雨水淋溶和垃圾自身厌氧分解而产生的高浓度污水, 水质水量波动大、有机物浓度高、营养元素失衡、氨氮浓度高, 具有较强的生物毒性和一定的腐蚀性^[32], 是典型的不可生物降解的污水, 其处理处置一直是一个世界性难题。Wu 等人^[33]采用 SBR、絮凝、Fenton 氧化和曝气生物滤池组合工艺处理垃圾渗滤液, COD (98.4%), BOD₅ (99.1%), NH₄-N (99.3%), TP (99.3%), SS (91.8%), 浊度(99.2%)和色度(99.6%)的总去除率表明了该组合工艺的效力; Wang 等人^[34]采用絮凝、Fenton 氧化和 BAF 联合工艺处理垃圾渗滤液, 絮凝和 Fenton 氧化对 COD 的去除率分别为 66.67% 和 56%。经过絮凝和 Fenton 氧化的预处理后, 垃圾渗滤液采用曝气生物滤池进行深度处理, 结果 COD 降至 75 mg/L, 色度小于 10 度。

BAF 与厌氧工艺相结合处理难降解工业废水近年来也取得了诸多研究成果: Zhang 等人^[35]采用升流式厌氧污泥床反应器 - 微生物燃料电池 - 曝气生物滤池(UASB-MFC-BAF)组合工艺同时进行生物电的产生和糖浆废水的处理, 系统对 COD、硫酸盐和色度的去除率分别为 53.2%, 52.7% 和 41.1%; Cheng 等人^[36]采用 MTPAD(改良的两步厌氧消化) - BAF 联合工艺处理发电废水, 中试结果表明, 工艺达到了 99.3% 的 COD 和 93.7% 的氨氮去除率, 且出水达到废水排放标准; Zhao 等人^[37]采用包含溶解、沉淀、两相厌氧消和曝气生物滤池等工艺的混合工艺处理具有高 COD 和硫酸盐含量的黄姜废水, 实验表明曝气生物滤池内存在同步硝化反硝化作用, 出水的 COD、NH₄⁺-N 和 TN 浓度分别低于 100 mg/L、10 mg/L 和 15 mg/L; Lim 等人^[38]采用厌氧池/曝气生物滤池(AF/BAF)工艺处理乳品废水, 对总氮的去除率为 50.5%~80.8%。此外, Melian 等人^[39]采用曝气生物滤池和人工湿地组合工艺处理含有高浓度甲醛和 TOC 的福尔马林废水, 结果表明该工艺可以去除几乎全部的甲醛, 且毒性抑制测试结果为负增长(-45%~-52%); Li 等人^[40]采用微电解(ME) - 曝气生物滤池(BAF)工艺处理溴氨酸生产废水, 当 OLR 为 0.56 kg·m⁻³·d⁻¹, 总 HRT 为 43.4 小

时,对 COD_{Cr} 去除率为 81.2%,对色度的去除率可达 96.6%。

3.2.3. 反冲洗特性研究进展

曝气生物滤池集生物氧化和过滤截留功能于一体,BAF 的微生物膜厚度一般控制在 300~400 μm ,可以保证微生物膜处于良好的代谢状态,在运行一段时间后,生物膜逐渐增厚,导致氧的传输速率降低,传质速率减慢,生物膜活性降低,降解有机物的能力减弱,生物膜厚度和滤床内截留物质的增加使得滤床的空隙率逐渐下降,水头损失增大,同时,部分脱落的生物膜会随着水流流出,使出水水质恶化。此时曝气生物滤池必须进行反冲洗,以去除容易引起阻塞的过量固体,降低水头损失,使生物膜得以有效更新,保持生物膜的活性,恢复曝气生物滤池的处理能力。反冲洗是保证曝气生物滤池处理性能的关键步骤,其基本要求是:在较短的反冲洗时间内,使填料得到清洗,恢复其除污能力,即清洗出滤料颗粒间所截留的悬浮物及滤料表面脱落的老化生物膜,但与此同时必须保留适量生物膜,以维持后续氧化能力。目前,大多数 BAF 采用气水联合反冲洗技术,该技术能够改善填料及生物膜的表面性质,而并且用水量较小,Yang 等人^[41]开发了一种新型气水虹吸反冲洗法(AWSB),此法可以提高上向流 BAF 的反冲洗效率,与传统的反冲洗法(AWB)相比,反冲洗间隔时间延长了 35%,反冲洗水量仅为 AWS 的 66.7%,在滤池处理能力的恢复方面,AWS 和 AWSB 曝气生物滤池对 COD 的去除率分别为 89.34%和 90.91%。

污泥作为污水处理过程的伴生物一直是困扰污水处理厂难题,也是各个城市在解决水污染的情况下,又面临固体污染源困城,对于如何处置和利用 BAF 反冲洗污泥:Qiu 等人^[42]对 BAF 反冲洗污泥特性及其生物絮凝效能进行了小试,结果表明反冲洗污泥具有较好的生物絮凝性能、生物活性和较为复杂的生物群落结构,研究认为,在生活污水的强化预处理过程中加入回流污泥或同时投加化学混凝剂和生物污泥,都会大大提高污水的处理效率;Liu 等人^[43]的研究也证实了从反冲洗污泥中提取生物絮凝剂来降低生产成本的可行性,研究表明,在温度为 10 $^{\circ}\text{C}$,絮凝剂用量为 6.0 mg/l, pH 值 5.0 条件下提取的微生物絮凝剂,具有良好的絮凝活性。

3.2.4. 经验模型研究进展

国际水协会(IWA)发布的活性污泥模型 ASM1、ASM2、ASM2d、ASM3 已成为模拟活性污泥法的通用平台,极大地促进了活性污泥法的设计、开发和应用研究。而与之相对应的固定生物膜模型的发展却相对滞后,主要模型局限于单一限制因素,与实际应用有较大的差距。Wang 等人^[44]考虑进水的 sCOD 和滤床高度两个参数,优化了 BAF 处理污水的经验模型,以简单规模的工艺设计和实验验证了该模型的适应性,并通过反应器的运行数据确定了模型参数 n (滤料常数)和 K (工艺常数)的实验值;Shen 等人^[45]将出水的 COD 和进水 COD 以及沿滤床高度的水力负荷率联系起来,优化了 BAF 处理 2, 4, 6-苦味酸的经验模型,运用滤池不同高度的 COD 去除率的实验数据计算确定了模型参数。

4. 分子生物学技术应用进展

多年以来,关于曝气生物滤池的研究主要集中于宏观研究,微观研究往往受到传统微生物培养方法耗时、工作量大和绝大多数微生物不可培养等限制,自 1985 年 Pace 等^[46]以核酸测序技术研究生物的生态和进化问题以来,研究人员对污水处理工艺的微观研究进入了一个新阶段,分子生物学技术的应用克服了培养技术的限制,能够更客观、更准确的揭示微生物种类和遗传的多样性。

污水中大量氨氮排入受纳水体中是引起水体的富营养化的主要原因之一,因而,对 BAF 生物脱氮性能的研究一直是 BAF 工艺的研究热点之一。硝化是生物除氮的关键步骤,硝化作用是指由氨氮转化成亚硝态氮,再转化成硝态氮的过程,该过程的转化主要依靠亚硝化细菌和硝化细菌这两类革兰氏阴性无芽孢杆菌来完成,由于硝化菌易受外界环境影响,而在 BAF 运行过程中,受传统培养技术的限制,无法确定硝化细菌的生长率及其影响因子,很难实现硝化细菌的富集,致使 BAF 的脱氮效能难以控制。Peter 等人^[47]运用分子生物学技术提取了生长中的细菌的 DNA,并加以标记,用标记出的 DNA(用于区别细菌 DNA)来确定硝化细菌的生长率,能够在复杂的生态过程中量化硝化细菌群的生长率,此方法在实验和自然水环境条件下,都有助于确定加快或限定硝化过程

的影响因子, 该技术也使得硝化过程的优化控制得以实现。

将特定功能的固定化微生物接种到 BAF 中, 使其实现对难降解微生物的去除功能, 是工业废水处理中的新方法, 分子生物学技术有助于跟踪监测接种微生物的演变情况。Xin Zhao 等人^[48]将 B350M 和 B350 两种固定化微生物分别加入曝气生物滤池中, 对油田污水进行脱盐前的预处理, 研究显示, B350M 和 B350 反应器对 PAHs 的降解效率分别为 90% 和 84%, 同时, 分子生物学分析表明, B350M 反应器内的生物多样性比 B350 反应器丰富(多 7 株细菌存活), 两个反应器中均有大量丝状菌, 但并没有引起泡沫和膨胀。Fu 等人^[49]采用两个曝气生物滤池对水产循环水进行除氨处理。其中一个 BAF 生物强化接种异养硝化菌 *Lutimonas* sp. H10, 但实验数据显示氨氮去除率未改善, 16S rRNA 基因库的结果表明, 两个反应器内细菌群落的演变不同, 在生物强化曝气生物滤池发现了原生动物的增生, 分析认为, 原生动物的捕食可能是生物强化曝气生物滤池出现硝化失效的原因。

此外, 还有学者运用紫外光诱导技术优化生物膜载体的附着性能, Shen 等人^[50]使用紫外光诱导聚合移植, 将亲水性的丙烯酰胺链移植到聚乙烯中空纤维膜上的, 用以改善生物膜载体的表面湿润性, 实验数据显示, 改良载体反应器出水的 COD、氨氮和浊度分别为 25.25 mg/L, 2 mg/L 和 8NTU, 生物量试验结果表明, 改良的膜状物可以提供更好的附着力(3310 - 5653 mg TSS/L), 比未改良的多 1000 mg TSS/L。

5. 结语

国内外的专家学者对 BAF 的滤料、运行方式、运行控制和反冲洗特性等方面进行了大量探索研究, 积累了许多 BAF 用于污水处理的宝贵经验, 为 BAF 的发展和推广应用奠定了坚实的基础, 同时也证实了 BAF 技术的一些优势, 如投资省、占地小、流程简单、臭气产生少、模块化布置、微机自动化控制等。然而, 任何一种处理系统, 总会存在一些局限性, BAF 也不例外, 如对进水 SS 要求高、反冲洗用水量较大、滤池表面容易出现泡沫、生物除磷效果差等, 进一步的研究是必要的, 特别是对微生物对物质的代谢机理、微生物的群落结构和功能、曝气生物滤池运行方式的

创新改进及滤料的选择应用, 这些都将直接影响 BAF 对污水的处理能力。笔者认为, BAF 今后应重点研究以下相关问题:

- 1) BAF 中沿水流方向生物群落结构及其生态演替;
- 2) 反冲洗过程中生物膜的脱落规律, 优化反冲洗方式及冲洗强度;
- 3) 分子生物学技术在 BAF 运行控制中的应用, 采用微生物指标与化学指标共同控制生产运行。

参考文献 (References)

- [1] T. Stephenson. High rate aerobic wastewater treatment processes what next proceedings of the third international symposium on environmental biotechnology. Ostend Belgium, 1997, 1(4): 57-66.
- [2] R. Moore, J. Quarmby and T. Stephenson. The effects of media size on the performance of biological aerated filters. *Water Research*, 2001, 35(10): 2514-2522.
- [3] F. Osorio, E. Hontoria. Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm support. *Journal of Environmental Management*, 2002, 65(1): 79-84.
- [4] X. Zhao. Oil field wastewater treatment in biological aerated filter by immobilized microorganisms. *Process Biochemistry*, 2006, 41(7): 1475-1483.
- [5] D. L. Su, J. L. Wang, K. W. Liu, et al. Kinetic performance of oil-field produced water treatment by biological aerated filter. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, 15(4): 591-594.
- [6] X. J. Wang, S. L. Chen, X. Y. Gu, et al. Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using a combined coagulation, Fenton oxidation and biological aerated filter process. *Waste Management*, 2009, 29(4): 1354-1358.
- [7] G. Farabegoli, A. Chiavola and E. Rolle. The biological aerated filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage: Optimization of plant performance. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1-3): 1126-1132.
- [8] W. Cheng. Using a biological aerated filter to treat mixed water-borne volatile organic compounds and assessing its emissions. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(11): 1497-1502.
- [9] J. Shen, R. He, H. Yu, et al. Biodegradation of 2,4,6-trinitrophenol (picric acid) in a biological aerated filter (BAF). *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 1922-1930.
- [10] B. Liu, D. D. Yan, Q. Wang, et al. Feasibility of a two-stage biological aerated filter for depth processing of electroplating-wastewater. *Bioresource Technology*, 2009, 100(17): 3891-3896.
- [11] H. Hasan, S. Abdullah, S. Kamarudin, et al. Response surface methodology for optimization of simultaneous COD, NH_4^+ -N and Mn^{2+} removal from drinking water by biological aerated filter. *Desalination*, 2011, 275(1-3): 50-61.
- [12] S. P. Li, J. J. Cui and Q. L. Zhang. Performance of blast furnace dust clay sodium silicate ceramic particles (BCSCP) for brewery wastewater treatment in a biological aerated filter. *Desalination*, 2010, 258(1): 12-18.
- [13] Y. Q. Zhao, Q. Y. Yue, R. B. Li, et al. Research on sludge-fly ash ceramic particles (SFPC) for synthetic and municipal wastewater treatment in biological aerated filter (BAF). *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 4955-4962.
- [14] S. X. Han, Q. Y. Yue, M. Yue, et al. Effect of sludge-fly ash ceramic particles (SFPC) on synthetic wastewater treatment in an A/O combined biological aerated filter. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 1149-1155.

- [15] Y. Bao, L. Zhan and C. Wang. Carbon foams used as packing media in a biological aerated filter system. *Materials Letters*, 2011, 65(19-20): 3154-3156.
- [16] Y. Yu, Y. Feng, L. Qiu, et al. Effect of grain-slag media for the treatment of wastewater in a biological aerated filter. *Biore-source Technology*, 2008, 99(10): 4120-4123.
- [17] W.-S. Chang, H.-T. Tran, D.-H. Park, et al. Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a biological aerated filter (BAF) for the treatment of textile wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, 15(4): 524-528.
- [18] S. He, G. Xue and H. Kong. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(102): 291-295.
- [19] Y. Liu, T. Yang, D. Yuan, et al. Study of municipal wastewater treatment with oyster shell as biological aerated filter medium. *Desalination*, 2010, 254(1-3): 149-153.
- [20] F. Liu, C.-C. Zhao, D.-F. Zhao, et al. Tertiary treatment of textile wastewater with combined media biological aerated filter (CMBAF) at different hydraulic loadings and dissolved oxygen concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 160(1): 161-167.
- [21] G. Ji, J. Tong and Y. Tan. Wastewater treatment efficiency of a multi-media biological aerated filter (MBAF) containing clinoptilolite and bioceramsite in a brick-wall embedded design. *Biore-source Technology*, 2011, 102(2): 550-557.
- [22] H. Lee, J. Han and Z. Yun. Biological nitrogen and phosphorus removal in UCT-type MBR process. *Water Science and Technology*, 2009, 59(11): 2093-2099.
- [23] M. Kim, G. Nakhla. The beneficial role of intermediate clarification in a novel MBR based process for biological nitrogen and phosphorus removal. *Journal of Chemical Technology and Bio-technology*, 2009, 84(5): 637-642.
- [24] Y.-W. Ding, L. Wang, B.-Z. Wang, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in a combined A²/O-BAF system with a short aerobic SRT. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1082-1087.
- [25] Y. Z. Chen, C. Y. Peng and J. H. Wang. Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A²/O)-biological aerated filter (BAF) system. *Biore-source Technology*, 2011, 102(10): 5722-5727.
- [26] H. Ryu, J. Kang and S. Lee. Evaluation of a three-stage biological aerated filter system combined recirculation/dynamic flow in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(8): 1349-1357.
- [27] H. Ryu, S. Lee. Comparison of 4-stage biological aerated filter (BAF) with MLE process in nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(1): 163-170.
- [28] H. Ryu, D. Kim, H. Lim, et al. Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system. *Process Biochemistry*, 2008, 43(7): 729-735.
- [29] X. Lu, B. Yang, J. Chen, et al. Treatment of wastewater containing azo dye reactive brilliant red X-3B using sequential ozonation and upflow biological aerated filter process. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(1): 241-245.
- [30] X. J. Wang, X. Y. Gu, D. X. Lin, et al. Treatment of acid rose dye containing wastewater by ozonizing e biological aerated filter. *Dyes and Pigments*, 2007, 74(3): 736-740.
- [31] Z. M. Fu, Y. G. Zhang and X. J. Wang. Textiles wastewater treatment using anoxic filter bed and biological wriggle bed-ozone biological aerated filter. *Biore-source Technology*, 2011, 102(4): 3748-3753.
- [32] W. Hong, Y. Qing, Z. Yong, et al. Advanced landfill leachate treatment using a two-stage UASB-SBR system at low tempera-
ture. *Journal of Environment Science*, 2010, 22(4): 481-485.
- [33] Y. Y. Wu, S. Q. Zhou, X. Y. Ye, et al. Transformation of pollutants in landfill leachate treated by a combined sequence batch reactor, coagulation, Fenton oxidation and biological aerated filter technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 2011, 89(2): 112-120.
- [34] X. J. Wang, S. L. Chen, X. Y. Gu, et al. Pilot study on the advanced treatment of landfill leachate using a combined coagulation, Fenton oxidation and biological aerated filter process. *Waste Management*, 2009, 29(4): 1354-1358.
- [35] B. G. Zhang, H. Z. Zhao, S. G. Zhou, et al. A novel UASB-MFC-BAF integrated system for high strength molasses wastewater treatment and bioelectricity generation. *Biore-source Technology*, 2009, 100(23): 5687-5693.
- [36] P. Cheng, H. Z. Zhao, B. Zhao, et al. Pilot treatment of wastewater from *Dioscorea zingiberensis* C.H. Wright production by anaerobic digestion combined with a biological aerated filter. *Biore-source Technology*, 2009, 100(12): 2918-2925.
- [37] H. Zhao, P. Cheng, B. Zhao, et al. Yellow ginger processing wastewater treatment by a hybrid biological process. *Process Biochemistry*, 2008, 43(12): 1427-1431.
- [38] S. Lim, P. Fox. A kinetic analysis and experimental validation of an integrated system of anaerobic filter and biological aerated filter. *Biore-source Technology*, 2011, 22(102): 10371-10376.
- [39] J. Melian, A. Mendez, J. Arana, et al. Degradation and detoxification of formalin wastewater with aerated biological filters and wetland reactors. *Process biochemistry*, 2008, 43(12): 1432-1435.
- [40] L. Fan, J. Ni, Y. Wu, et al. Treatment of bromoamine acid wastewater using combined process of micro-electrolysis and biological aerobic filter. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2-3): 1204-1210.
- [41] J. Yang, W. Liu and B. Li. Application of a novel backwashing process in upflow biological aerated filter. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 362-366.
- [42] L. Qiu, J. Ma and L. Zhang. Characteristics and utilization of biologically aerated filter backwashed sludge. *Desalination*, 2007, 208: 73-80.
- [43] W. Liu, H. Yuan, J. Yang, et al. Characterization of bioflocu-lants from biologically aerated filter backwashed sludge and its application in dyeing wastewater treatment. *Biore-source Technology*, 2009, 100(9): 2629-2632.
- [44] C. Wang, J. Li, B. Wang, et al. Development of an empirical model for domestic wastewater treatment by biological aerated filter. *Process Biochemistry*, 2006, 41(4): 778-782.
- [45] J. Shen, R. He, L. Wang, et al. Kinetics of COD removal in a biological aerated filter in the presence of 2,4,6-trinitrophenol (picric acid). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2009, 17(6): 1021-1026.
- [46] N. Pace, D. Stahl, D. Lane, et al. The analysis of natural microbial populations by ribosomal RNA sequence. *Advanced in Microbial Ecology*, 1986, 9: 51-55.
- [47] C. Pollard. A quantitative measure of nitrifying bacterial growth. *Water Research*, 2006, 40(8): 1569-1576.
- [48] X. Zhao, Y. Wang, Z. Ye, et al. Oil field wastewater treatment in biological aerated filter by immobilized microorganisms. *Process Biochemistry*, 2006, 41(7): 1475-1483.
- [49] S. Fu, H. Fan, S. Liu, et al. A bioaugmentation failure caused by phage infection and weak biofilm formation ability. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1153-1161.
- [50] Y.-J. Shen, G.-X. Wu, Y.-B. Fan, et al. Performances of biological aerated filter employing hollow fiber membrane segments of surface-improved poly (sulfone) as biofilm carriers. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(7): 811-817.