

曝气生物滤池技术研究与应用进展

崔福义 张 兵 唐 利

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要 曝气生物滤池是一种将生物氧化机理与深床过滤机理有机结合的新型污水生物处理技术。本文对曝气生物滤池的工艺原理、工艺特点、工艺形式进行了综合评述, 对其在城市生活污水处理中去污效能、启动方式、反冲洗形式及理想填料的应用与最新研究进展进行了详细介绍, 尤其对目前曝气生物滤池存在的优点与不足进行了针对性的分析。对曝气生物滤池的运行机理进行深入探讨, 并进一步加强对曝气生物滤池与其他工艺组合的优化研究, 将完善曝气生物滤池的工艺体系, 拓宽其使用范围。因此, 曝气生物滤池将在我国污水处理中具有广阔的应用前景。

关键词 污水处理 曝气生物滤池 脱氮除磷 应用进展

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2005)10-0001-07

Research and application progress of biological aerated filter technology

Cui Fuyi Zhang Bing Tang Li

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090)

Abstract As an attractive newly technology, biological aerated filter is distinguished from other biological wastewater treatments by the fact that there is an integration mechanism between biological oxidation of microorganism and filtration of the filter media. According to the references, this review essay summarizes its mechanism, characteristics and typical forms. The research and application progress on treatment efficiency, startup, backwash and media of biological aerated filter are discussed, its advantages and disadvantages are also analyzed. Based on further studies on mechanism analysis and optimization technology, the biological aerated filter system is improved, its application is also developed. Finally, the application foreground of biological aerated filter to wastewater treatment is pointed out.

Key words wastewater treatment; biological aerated filter(BAF); nitrogen and phosphorus removal; application progress

水资源是人类赖以生存的基本物质之一, 已成为人类社会可持续发展的重要限制因素。近年来随着城市建设和工业的发展, 城市用水量急剧增加, 大量不达标污水的排放不仅污染了环境和水源, 更加重了水资源的日益短缺和水质的日益恶化, 从而导致生态环境的恶性循环。因此, 寻求经济高效的污水处理技术, 对促进污水回用的发展和水环境的恢复有着现实和深远的意义。

生物法是污水处理的基本方法, 然而传统污水生物处理工艺不可避免的具有占地面积比较大、处理系统复杂、运行管理难度大、处理效能低下等缺点, 而且随着城市发展步伐的加快及城市区域的拓展, 污水处理设施离城区越来越近, 有的甚至建在城区, 污水厂土地的使用也受到严格的限制^[1]。在这种背景下, 生物过滤的思想被引入到污水处理中来, 于是体积小、出水水质好、具有模块化结构并可自动化操作的曝气生物滤池 (biological aerated filter,

BAF) 就应运而生了。作为一种新型污水处理技术, 曝气生物滤池工艺尚处于发展完善过程中。深入了解其性能、机理并对其在实际工程中的应用回顾与评述, 将有助于提高人们对该项新技术的认知水平, 对曝气生物滤池在我国污水处理中的应用起到积极的促进作用。

1 曝气生物滤池的工艺原理及特点

曝气生物滤池是 20 世纪 80 年代末在欧美发展起来的一种新型的污水处理技术, 它是由滴滤池发展而来并借鉴了快滤池形式, 在一个单元反应器内

资助项目: 国家高技术研究发展计划“863 项目 (2003AA601060-02-03)

收稿日期: 2004 - 07 - 01; 修订日期: 2005 - 03 - 31

作者简介: 崔福义 (1958 ~), 男, 黑龙江哈尔滨人。教授、博士生导师, 主要研究方向: 水处理与回用技术等。

E-mail: cuifuyi@public.hr.hl.cn

同时完成了生物氧化和固液分离的功能。世界上首座曝气生物滤池于 1981 年诞生在法国,随着环境对出水水质要求的提高,该技术在全世界城市污水处理中获得了广泛的推广应用^[2]。目前,在全球已有数百座大小各异的污水处理厂采用了 BAF 技术,并取得了良好的处理效果。

1.1 工艺原理

曝气生物滤池是充分借鉴污水处理接触氧化法和给水快滤池的设计思路,将生物降解与吸附过滤两种处理过程合并在同一单元反应器中。以滤池中填装的粒状填料(如陶粒、焦炭、石英砂、活性炭等)为载体,在滤池内部进行曝气,使滤料表面生长着大量生物膜,当污水流经时,利用滤料上所附生物膜中高浓度的活性微生物强氧化分解作用以及滤料粒径较小的特点,充分发挥微生物的生物代谢、生物絮凝、生物膜和填料的物理吸附和截留以及反应器内沿水流方向食物链的分级捕食作用,实现污染物的高效清除,同时利用反应器内好氧、缺氧区域的存在,实现脱氮除磷的功能。

1.2 工艺特点

曝气生物滤池虽是生物膜处理方法的一种,但与传统生物滤池相比,仍具有明显特点:

(1)BAF 采用的粗糙多孔的小颗粒填料作为生物载体,可在填料表面保持较高的生物量(可达 10~15 g/L),易于挂膜且运行稳定;(2)生物相复杂,菌群结构合理,反应器内具有明显的空间梯度特征,

能耐受较高的有机和水力冲击负荷,不同的污染物可以在同一反应器被渐次去除,同步发挥生物氧化作用、生物吸附絮凝和物理截留作用,出水水质好,可满足回用要求;(3)区别于一般生物滤池及生物滤塔,在去除 BOD、氨氮时需进行曝气,但粒状填料层具有较高的氧转移效率,曝气量低,运行能耗较低,硝化和反硝化效率高;(4)BAF 滤池为半封闭或全封闭构筑物,其生化反应受外界温度影响较小,适合于寒冷地区进行污水处理;(5)高浓度的微生物量增大了 BAF 的容积负荷,进而降低了池容积和占地面积,使基建费用大大降低;(6)滤池运行过程中通过反冲洗去除滤层中截留的污染物和脱落的生物膜,无需二沉池,简化了工艺流程,采用模块化结构设计,使运行管理更加方便;(7)减少了污水厂异味,无污泥膨胀问题,无需污泥回流。

1.3 工艺形式

近年来曝气生物滤池发展迅速,工艺形式不断推陈出新,曾先后出现过 BDCARBON、BDFOR、BDSTYR、BDSMED I、BDPUR、COLOX、DeepBed 等形式,其中 BDCARBON、BDFOR、BDSTYR、BDSMED I、BDPUR 是现代曝气生物滤池几种典型的运行工艺,在世界范围内都有应用,其构造特点见表 1。BDCARBON(图 1)为早期开发的工艺形式,现在曝气生物滤池则多采用 BDFOR(图 2)和 BDSTYR(图 3)形式。

表 1 不同类型曝气生物滤池构造特点

Table 1 Structure characters of different BAFs

工艺形式	进出水方式	填料	曝气管位置	反冲洗方式
BDCARBONE	上部进水,下部出水	石英砂	滤池中下部	气水联合反冲,底部设反冲洗气、水装置
BDFOR	下部进水,上部出水	陶粒	滤池底部	气水联合反冲,气、水同时进入气水混合室
BDSTYR	下部进水,上部出水	聚苯乙烯	滤池中下部	气水联合反冲,反冲水采用向下流
BDSMED IA	下部进水,上部出水	合成轻质滤料	滤池底部	脉动反冲洗,反冲洗时下部形成空气室
BDPUR	上部进水,下部出水	规整波纹板	滤池底部	气水联合反冲,底部设反冲洗气、水装置

1.4 工艺参数

随着人们对曝气生物滤池研究的深入,BAF 反应器的关键工艺参数也有了较大的调整,其工艺参数大致如下:

容积负荷与要求出水水质相关,一般情况下有有机物负荷为 2~10 kg BOD₅/m³·d;硝化 0.5~3 kg NH₃-N/m³·d;反硝化 0.8~7 kg NO₃-N/m³·d;水力负荷 6~16 m³/m²·h;气水比 (1~3) 1,最大不超过 10 1;填料粒径为 2~8 mm;填料高度为 2~4

m;单级反冲周期 24~48 h;多级反冲周期 24~48 h,硝化反硝化滤池运行时间较长;单池反冲水量约占产水量的 8%左右,或为单池填料体积的 3 倍左右;反冲时间 20~30 min,反冲洗水强度 15~35 L/m²·s,气强度 15~45 L/m²·s

2 曝气生物滤池的效能

作为新型污水处理工艺,国内外学者对曝气生物滤池的应用进行了大量研究。虽然很多学者在曝

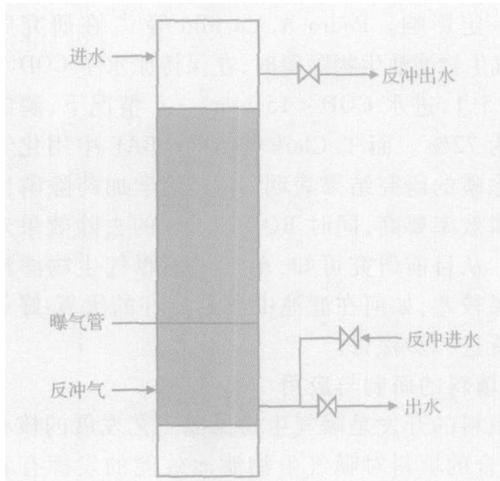


图 1 BDCARBONE 结构示意图
Fig. 1 Schematic of BDCARBONE

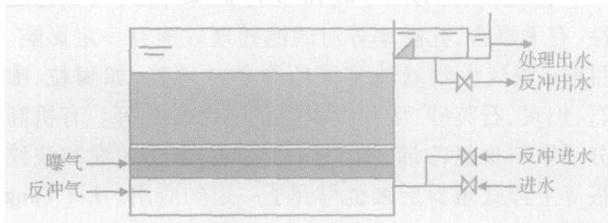


图 2 BDFOR 结构示意图
Fig. 2 Schematic of BDFOR

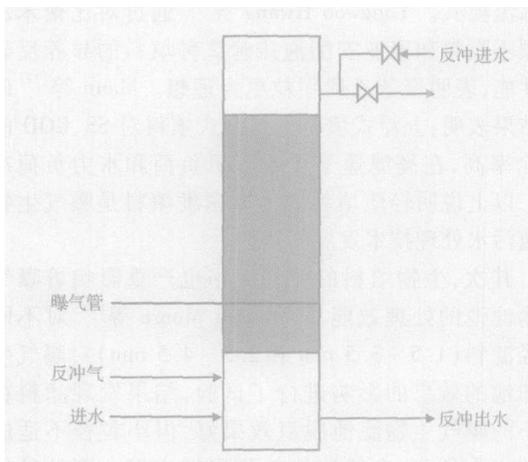


图 3 BDSTYR 结构示意图
Fig. 3 Schematic of BDSTYR

气生物滤池对有机物和悬浮物的去除,对硝化和反硝化等污染物的去除效能方面已取得了一定的进展和共识。但有关曝气生物滤池的生物挂膜,磷的去除、填料的选择、反冲洗方式等方面的研究与应用还有待进一步完善。

2.1 污染物的去除

曝气生物滤池工艺上的独特性及明显的空间梯度特征决定了其对污染物去除的高效性。

2.1.1 有机物和悬浮物的去除

曝气生物滤池内填料的物理吸附和过滤截留作用以及生物膜的生物氧化作用决定了池内 SS 和有机物的高效去除,国内外该领域的研究及应用也充分证明了上述观点。Pastorelli G 等^[3]对中试规模的淹没式生物滤池连续进行 18 个月的试验研究表明 BOD₅ 和 SS 去除率均大于 95%。Gilbert Desbos 等^[4]在研究 SS 和 COD 的去除率同滤速之间的关系时发现,当负荷的增大并不是因为进水中更多的 SS,而是由于更高的流量和低停留时间时,去除效率是相当稳定的,总的 SS 去除率在 80%~90% 之间,而 COD 去除率在 70%~80% 之间波动。国内,齐兵强等^[5]采用 BDFOR 工艺,以生活污水为处理对象,COD、BOD₅、SS 出水水质指标均达到了生活杂用水水质标准。大连市马栏河污水处理厂采用 BDFOR 型 BAF,在处理量为 12 万 m³/d, COD 负荷最大 6 kg COD/m³·d 的情况下,出水 COD 小于 75 mg/L。以上国内外研究与应用结果表明,曝气生物滤池对有机物和悬浮物的处理机能成熟,处理量大,去除效果显著,在污水碳有机物去除应用中潜力巨大。

2.1.2 氨氮的去除

氨氮是污水处理中最主要的目标去除物之一。曝气生物滤池将较短的水力停留时间与长的污泥龄有机统一起来,有利于硝化细菌这类世代期较长的细菌生长,对氨氮具有较高的去除效率,因此,被广泛应用于污水中氨氮的去除。

硝化作用,有关 BAF 硝化性能的研究已得到越来越多研究者的重视,通过优化运行参数 BAF 的硝化效率已得到了明显的提高。J. Cromphout^[6]利用上向流曝气生物滤池处理含氨的富营养化水时,在气水比 1:1,滤速 5.18 m/h,温度 10℃ 以上条件下,硝化效率可达 100%。英国水研究中心 Dillon 等^[7]对 BAF 的硝化能力研究结果表明当氮容积负荷为 0.63 kg/m³·d 时,NH₄⁺-N 去除率可达 90%。R. Pujol 等^[8]通过对法国巴黎 Achresh 处理厂的上向流曝气生物滤池两年的研究认为,在滤速 4~6 m/h,6~8 m/h,8~10 m/h 运行条件下,当 NH₃-N 的容积负荷为 1.5 kg NH₃-N/m³·d 时,曝气生物滤池氨氮去除率始终保持在 80%~100%,滤速的提高不仅不是影响反应器硝化速度的限制因素,反而会对硝化有积极的促进作用。F. Fdz-Polanco^[9]等对淹没式曝气生物滤池硝化过程中异养菌和硝化菌的空间分布情况进行研究时发现:当 COD/NH₄⁺-N 为 4:1,进水 COD 低于 200 mg/L 时不影响硝化效能;当进水 COD 高于 200 mg/L 时,硝化效能将无法达

到 100%; 尽管 BAF 的氨氮去除效能 在实践中得到了检验, 但有关进水负荷、有机物浓度以及硝化细菌分布特征还需进一步探讨。目前的研究表明, 曝气生物滤池的硝化性能与有机物浓度、温度、停留时间等因素有密切的关系, 因此硝化性能的研究有待进一步的深入。

反硝化作用, 由于曝气生物滤池中存在厌氧和兼性微生物, 使得反硝化得以进行。Puji^[8] 研究认为, 反硝化最好采用外加碳源的办法, 在最佳滤速为 10 ~ 15 m/h 时, 脱氮能力可达到 100%。Puji 等^[10] 还比较了前置反硝化和后置反硝化的优劣, 认为反硝化过程应采用上向流的进水方式进行。Chen 等^[11] 研究生物过滤反应器与活性污泥反应器以及流化床的反硝化特性时, 发现在不同水力条件下, 反应器内微生物种群会发生一定的变化, 但优势种群——杆菌属基本稳定。

另外, 曝气生物滤池独特的空间梯度分布特征及运行特点使其具备了一定的短程硝化反硝化能力, 曝气生物滤池采用粒状颗粒作为过滤和生物氧化的介质和载体, 在整体上和每一单元填料表面所附着生物膜中都存在着基质和溶解氧的浓度梯度分布, 这为各种不同生态类型的微生物在生物膜内不同部位占据优势生态位提供了条件。Puzava 等^[12] 在曝气生物滤池一体化硝化反硝化方面取得了一定进展, 他们通过调整曝气量将反应器内的溶解氧浓度控制在 0.5 ~ 3 mg/L, 从而控制溶解氧不扩散到生物膜内部, 实现同步硝化反硝化。中试结果表明, 通过实时曝气, 即使将曝气量降低 50%, 也可达到同样的处理效果。显然, 曝气生物滤池的硝化、反硝化能力已经得到了很好的实践验证, 对去除污水中氨氮的技术发展具有一定的推动作用。

2.1.3 磷的去除

单独利用 BAF 的生物作用除磷是很难达到排放标准的, 通常情况下需采取化学方法除磷。Goncalves 等^[13] 进行曝气生物滤池同步脱氮除磷的研究时发现, 进水方式对磷去除效果影响不大。德国科隆污水处理厂采用曝气生物滤池进行的同步硝化除磷实验表明, 曝气生物滤池除磷率可达 70%, 总磷可降至 0.5 mg/L。AesOy 等^[14] 发现, 利用曝气生物滤池反硝化脱氮时, 如利用水解污泥或水解固体废物做外加碳源, 可同时去除比微生物生长需要量高 3 倍的磷。Pak 等^[15] 研究了利用 2 级生物滤池在交替好氧、厌氧条件下运行对污水中氮磷的去除情况, 发现影响除磷的因素为 COD/TP 值和水力停留时间, 好氧过程中产生的硝酸盐和亚硝酸盐对磷的释

放有一定影响。Pedro A. Castillo 等^[16] 在研究序批式曝气生物滤池生物除磷时, 在保持原水中 COD N P 为 20 5 1, 进水 COD < 15 g/m² · d 情况下, 磷的去除率为 72%。而 T. Clark 等^[17] 在 BAF 中用化学沉淀法除磷的研究结果表明, BAF 化学加药除磷比生物除磷效率要高, 同时 BOD₅、COD 的去除效果未受影响。从目前研究可知, 单纯采用曝气生物滤池除磷效果较差, 如何在滤池中创造良好的厌氧好氧环境有待进一步探讨。

2.2 填料的研制与应用

填料的开发是曝气生物滤池工艺发展的核心问题, 适合的填料对曝气生物滤池效能的发挥有着直接的影响, 同时也将影响到曝气生物滤池的结构形式、运行成本和正常操作。

首先, 填料材质本身的物理吸附特性、化学稳定性、有无毒害、孔隙率等对滤池处理效能有一定影响。目前, 曝气生物滤池多采用颗粒状填料, 如陶粒、沸石、焦炭、石英砂、活性炭和膨胀硅铝酸盐等。有机高分子填料聚氯乙烯、聚苯乙烯小球、合成纤维和波纹板等上浮式填料近来也得到了一定的应用。Lei Yang 等^[19] 对曝气生物滤池中水流模式与滤料特性进行对比研究时认为, 滤料特性对滤池性能的决定作用远大于水流模式。Yongwoo Hwang 等^[20] 通过对比聚苯乙烯漂浮颗粒和聚亚安酯泡沫管 2 种填料的异养反硝化性能, 表明聚苯乙烯颗粒更为理想。Mann 等^[21] 研究结果表明: 上浮式填料比浸没式填料对 SS、COD 的去除率高, 在高滤速下更耐有机负荷和水力负荷冲击。以上说明轻质填料取代高密度填料是曝气生物滤池污水处理技术发展的趋势。

其次, 生物填料的粒径大小也严重影响着曝气生物滤池的处理效能。Rebecca Moore 等^[22] 对不同粒径滤料 (1.5 ~ 3.5 mm 和 2.5 ~ 4.5 mm) 对曝气生物滤池的效果的影响进行了试验, 结果发现滤料粒径小的曝气生物滤池脱氮效果好, 但小粒径不适应高的水力负荷, 会使滤池工作周期变短。而粒径较大的填料虽然改善了滤池操作条件, 减少了反冲洗的次数, 但不利于脱氮和磷的去除。Rebecca Moore 等^[22] 研究滤料粒径对滤池性能影响时还发现压降和 SS 的去除曲线表明小粒径滤床性能差。因此, 在滤料粒径的选择上应综合考虑各种因素。目前, 曝气生物滤池普遍采用的滤料粒径为 3 ~ 8 mm, 滤层厚度为 2 ~ 4 m。鉴于我国目前还没有像欧美国家一样对曝气生物滤池用填料制定较为严格的标准, 因此, 制定适于我国曝气生物滤池的填料标准是十分重要的。

2.3 启动方式

合适的启动方式对曝气生物滤池效能发挥作用明显,也是保证滤池快速启动的决定性因素。同其他的生物膜反应器启动方式一样,曝气生物滤池的启动也需同步进行微生物在反应器内的富集和在填料表面的附着增殖过程,即填料表面稳态生长的生物膜形成过程,也称“挂膜”^[23]。国外采用的“挂膜”方式有 3 种: 间歇培养并逐步增加滤速; 在设计滤速下或逐渐增加滤速进行连续流培养; 投加活性污泥接种,进行间歇或稳态运行。3 种启动方式中生物膜的生长速率、分布以及污染物的去除率虽各不相同,但达到稳态所需的时间却大致相同。通常情况下也可将生物滤池挂膜方式分为自然挂膜和接种挂膜 2 种基本类型。A. T. Mann 等^[24]根据自己的试验结果建议采用设计滤速下运行连续培养以期得到更加稳定的生物量。国内很多生物膜装置也采用了自然挂膜法,取得了很好的挂膜效果,而且运行稳定。接种挂膜法则是采用活性污泥接种,通气闷曝一段时间后排出上清液,再加入待处理污水继续闷曝一段时间,然后连续进水、进气直至稳态运行为止,这种方法具有挂膜迅速的特点。

2.4 反冲洗

滤池反冲洗也是保证滤池效能的关键步骤。反冲洗的质量不但决定处理出水水质,同时还对运行费用有很大的影响。在运行过程中,生物滤池随着处理的进行,滤层中的空隙将逐渐被新生长的生物膜和悬浮物堵塞,滤床的空隙率逐渐下降,滤层水头损失增加,当悬浮物达到一定程度时会穿透滤床,导致出水水质下降,这时滤层需要通过反冲洗来去除多余的悬浮物并更新生物膜,从而恢复其纳污能力,保证滤池的正常运行。合理的配水、配气系统将保证有效冲洗并保证反冲洗强度不会影响生物膜正常生物活性的关键。

由于曝气生物滤池运行方式多种多样,滤料种类各有不同,因此反冲洗技术的研究受到广泛重视。传统生物滤池的反冲洗方式有高速水流反冲洗,单独水冲加表面助冲,气水反冲洗等,而气洗和水洗相结合可以减小反冲洗用水量,还可以取得比单纯水洗更好的反冲洗效果^[23],因此,气水联合反冲洗以其高效节能的特点被普遍应用于曝气生物滤池工艺中。刘荣光等^[25]通过对单水、单气和气水同时反冲洗效果的对比,指出单水反冲过程仅利用了水流剪切力、滤料颗粒间的碰撞摩擦力,而在单气反冲过程中,在滤层内部主要是气流剪切力,滤床表层剪切力和碰撞摩擦力,只有在气水同时反冲时,污泥脱落才

是水流剪切、摩擦,空气剪切、摩擦和滤料颗粒间碰撞摩擦综合作用的结果,因而效率最高。David Hall 等^[26]通过频谱分析气/水反冲时的压力变化,发现气/水反冲是效果最好的反冲机制。

综上所述,气水联合反冲洗是降低能耗,加强反冲洗效果,延长运行周期的最佳选择。

3 应用进展实例

通常情况下,单个曝气生物滤池即可完成碳化、硝化、反硝化、除磷等功能,为了强化曝气生物滤池的处理效果,拓宽处理领域,研究人员通过对其滤料的选用、布水通水方式、滤速、负荷及滤料反冲洗等方面的改进,按照污水处理要求不同,通过多级串联或与其他工艺组合的形式将 BAF 单元应用在除 C/硝化工艺、除 C 硝化/反硝化工艺以及其他废水处理领域中,并取得了一定的效果。

3.1 Davyhume 污水处理厂采用 BAF 工艺应用实例^[27]

英国曼彻斯特 Davyhume 污水处理厂 (WWTW) 是英国西北地区最大的污水处理厂。服务居民人口 70 万,再加上工业人口,其当量人口可达 135 万,进水量达 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。自 19 世纪 90 年代以来,污水一直就地处理,1911 年当地设计了活性污泥工艺,包括格栅、沉砂池、沉淀池和两套并联运行的活性污泥系统,而无硝化功能。为满足更严格的出水标准,1998 年该厂设计了 36 座上流式 Biostr 生物滤池设备,处理活性污泥系统的出水,使其排入曼彻斯特运河前进行脱氮处理。Davyhume 污水处理厂运行期间 95% 以上采样点 TSS < 30 mg/L, BOD₅ < 20 mg/L, NH₄⁺-N < 5 mg/L,硝化率可达 90% 以上。

3.2 Colmbes 污水处理厂采用 BAF 工艺应用实例^[28, 29]

赛纳中心 (Seine Center) 哥伦布污水处理厂 (Colmbes) 位于巴黎密集的建筑群边缘,紧靠居民区,且该场地面积仅为 4 hm²,为了达标排放,尽可能减少恶臭以及充分利用有限的土地,设计者将 BAF 单元应用在生物处理阶段来完成除 C 硝化/反硝化。

该污水处理厂进水经预处理和物化处理后,第一步进入由 1 组 24 座 Biofor 生物滤池组成的除碳单元,这些生物滤池分布在中心廊道的两侧。每座滤池面积为 10⁴ m²,上向流运行,池内敷设了 2.9 m 厚的粒状膨胀黏土。日常的反冲洗可以去除截留固体和脱落的剩余污泥。脱碳后出水进入由 29 座 Biostr 生物滤池组成的硝化单元,这些生物滤池单

池有效容积 330 m³, 填充悬浮载体 聚苯乙烯圆珠, 以上向流方式运行, 填料由过滤器顶板安装有滤帽的支撑板截留在滤池内。每日进行正常的反冲洗, 以冲掉污泥和恢复滤池的正常过滤性能。出水最后进入由以甲醇为反硝化的碳源的 12 座 Biofor 滤池组成进行反硝化作用。

由于污水处理厂接受 2 条不同水质下水道的污水, 因此它可根据季节和水量的不同, 灵活地将各构筑物予以优化组合, 以满足旱季和雨季不同时期水力负荷的变化。

旱季运行情况: 在处理流量为 2.8 m³/s, 除碳单元应用负荷为 1.9 kg COD/m³·d 和 9.3 kg SS/m³·d, 硝化单元应用负荷为 1.25 kg BOD/m³·d 和 1.05 kg TKN/m³·d 的运行条件下, 废水经除 C/硝化/反硝化工艺处理后, 各种污染物的去除率分别为: SS 98%, BOD₅ 97%, TKN 92%, TP 76%。

雨季运行情况: 处理流量由 2.8 m³/s 过渡为 8.5 m³/s, 过度时间仅为 0.5 h, 连续运行 8 h。除碳单元流量升高 50%, 硝化单元流量升高 100%。试验期间流量恒定为 255 000 m³/h, 即流量大约为设计流量的 3 倍。对于整个系统而言, 8 h 内碳有机污染物去除量与 24 h 内去除量几乎相等, 出水水质无明显变化。由此可见 BAF 可承受雨季时高负荷的冲击。

3.3 美国莫内森焦化废水处理厂应用 BAF 处理工业废水实例^[30]

1996 年投入运行的美国宾西法尼亚州的莫内森焦化废水处理厂, 采用 6 座宽 2.9 m, 长 6.5 m 的曝气生物滤池处理含硫氰化物、氨及酚类化合物的废水, 平均流量为 654 m³/d。该厂曾采用活性炭做滤料, 但费用昂贵, 且出水水质不能达到排放要求, 后采用 Cobx BAF 在滤速为 1.5 m/h 的运行条件下, 硫氰化物、氨及酚类化合物去除率分别达到了 99%、78% 和 99.9%。

此外, 台湾高雄处理塑料工业废水时^[31], 采用臭氧氧化和曝气生物滤池组合的方式, 可将二级出水的 COD 值由 150~180 mg/L 降至 100 mg/L 以下, 达到当地排放标准。韩国采用两极 BAF 处理电子工业废水, 在处理量为 16 000 m³/d, 好氧和厌氧滤池的水力停留时间分别为 1.36 h 和 0.84 h 条件下, BAF 硝化效率达 95%, TN 去除率大于 90%。

以上应用实例充分说明 BAF 工艺日趋成熟, 不仅适宜于城市废水的处理, 也适合于各类工业废水的处理。

4 存在的问题及应用研究前景

作为一种高效、低成本的污水处理新技术, 曝气

生物滤池在我国的应用还刚刚起步, 随着社会的发展和自然资源的紧缺, 对污水处理后的水质要求必将日益提高, 更高的污水排放水质标准和污水回用水源标准也将会逐步出台, 这为曝气生物滤池技术在已有的污水处理厂作深度处理, 或在新建的污水处理厂中应用创造了条件。如何通过对曝气生物滤池运行特征、处理效能等方面的深入研究以及对曝气生物滤池与其他工艺组合的优化研究, 将拓宽曝气生物滤池的应用范围, 对曝气生物滤池在我国污水处理中的进一步推广应用有积极的促进作用。

(1) 曝气生物滤池工艺的系统性研究还不是很深入, 尽管曝气生物滤池的工艺不断进步, 但其处理效能也只是各有所长, 有关曝气生物滤池运行方式对处理效能影响的认识还不统一, 究竟是上向流曝气生物滤池对氨氮和悬浮物的去除好于下向流, 还是下向流好于上向流还存在争论, 如何将各种工艺形式相互融合, 从而发挥其最大去污效能有待进一步研究。

(2) 通常情况下, 为了延长滤池的运行周期, 减少反冲洗频率以降低能耗, 曝气生物滤池处理污水时需对进水进行预处理。因此, 高性能、低价位、截污能力强的填料将在其推广应用起到重要作用, 研究填料对污染物去除的影响, 寻求改善填料性能的工艺和方法, 制定适于我国国情曝气生物滤池的填料标准将是下一步研究重点。此问题解决不好, 会制约曝气生物滤池除污性能的发挥。

(3) 曝气生物滤池生物法除磷效果较差, 从目前的 BAF 运行工艺看, 完全用生物除磷是很难达到排放标准的, 同时脱氮除磷会使系统变得更为复杂。这是因为^[32]脱氮和除磷本身是一对矛盾, 如 DO 太低除磷率会下降, 硝化反应受到抑制; 如 DO 太高, 则由于回流厌氧区 DO 增加, 反硝化受到抑制。如何深入研究其除磷机理, 从而创造良好的厌氧好氧环境将有待进一步探索。

(4) 目前, 曝气生物滤池生物空间梯度特征以及底物去除动力学规律还很不完善, 尤其是有关曝气生物滤池生物膜的生长, 生物膜的组成, 生物膜的活性, 微生物生态学特征等方面需进行针对性研究。

(5) 由于曝气生物滤池工艺本身固有的结构特点, 在直接处理污废水时需采用物化法或化学氧化法进行预处理, 操作复杂、成本高。能否在同一复合床式曝气生物滤池内完成多种污染物的高效去除将是下一步研究应用的重点。另外, 如何将曝气生物滤池与合适的预处理技术有机结合或者采用多级曝

气生物滤池联合的形式,从而进一步发挥曝气生物滤池本身高效去污能力,将在城市废水的深度处理回用方面发挥作用。

参考文献

- [1] W. McCoy. Biological aerated filters: A new alternative. *Wat Environ Tech*, **1997**, 9(2): 39 ~ 42
- [2] P. Pujol, M. Hamon, X. Kandel. Biofilters: Flexible, reliable biological reactors. *Wat Sci Tech*, **1994**, 29(10/11): 33 ~ 38
- [3] Pastorelli G., Andreottola G., Canziani R., et al. Organic carbon and nitrogen removal in moving-bed biofilm reactor. *Wat Sci Technol*, **1997**, 35(6): 91 ~ 99
- [4] Gilbert Desbos, Frank Rogalla. Bio-filtration as a compact technique for small wastewater treatment plant. *Sci Tech*, **1990**, 22(3): 145 ~ 146
- [5] 齐兵强,王占生. 曝气生物滤池在污水处理中的应用. *给水排水*, **2000**, 26(10): 4 ~ 8
- [6] J. Cromphout. Design of an upflow biofilm reactor for the elimination of high ammonia concentration in eutrophic surface water. *Water Supply*, **1992**, 10(3): 145 ~ 150
- [7] Dillon G R, et al. A pilot-scale evaluation of the bio-carbon process for the treatment of settled sewage and for tertiary nitrification of secondary effluent. *Wat Sci Tech*, **1990**, 22(1/2): 305 ~ 316
- [8] R. Pujol. Process improvements for upflow submerged biofilters. *Water*, **2000**, 32(1): 25 ~ 29
- [9] F. Fdz-Polanco, E. Mendez, M. A. Uruena, et al. Spatial distribution of heterotrophs and nitrifiers in a submerged biofilter for nitrification. *Wat Res*, **2000**, 34(10): 4081 ~ 4089
- [10] R. Pujol, S. Tarallo. Total nitrogen removal in two-step bio-filtration. *Wat Sci Tech*, **2000**, 41(4 ~ 5): 65 ~ 68
- [11] S. D. Chen, C. Y. Chen, Y. F. Wang. Treating high-strength nitrate wastewater by biological process. *Wat Sci Tech*, **1999**, 39(10 ~ 11): 311 ~ 314
- [12] N. Puzava, M. Payraudeau, D. Thomberg. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real time aeration control. *Wat Sci Tech*, **2001**, 43(1): 269 ~ 276
- [13] F. Goncalves, L. Le Grand, F. Rogalla. Biological phosphorus uptake in submerged biofilters with nitrogen removal. *Wat Sci Tech*, **1993**, 29(10 ~ 11): 135 ~ 143
- [14] A. AesØy, H. Ødegaard, K. Bach, et al. Denitrification in a packed biofilm reactor (biofor) -experiments with different carbon sources. *Water Research*, **1998**, 32(5): 1463 ~ 1470
- [15] D. Pak, W. Chang. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in a two-biofilter system. *Water Science & Technology*, **2000**, 41(12): 101 ~ 106
- [16] Pedro A. Castillo, Simón González-Martínez, Iñaki Tejerina. Biological phosphorus removal using a biofilm membrane reactor: Operation at high organic loading rates. *Wat Sci Tech*, **1999**, 40(4 ~ 5): 321 ~ 329
- [17] T. Clark, T. Stephenson, P. A. Pearce. Phosphorus removal by chemical precipitation with biological aerated filter. *Water Research*, **1997**, 31(10): 2557 ~ 2563
- [18] K. H. Sorenson, D. Thomberg, K. F. Janning. Using advanced control, post-denitrification and equalisation to improve the performance of submerged filter. *Wat Sci Tech*, **2000**, 41(4 ~ 5): 177 ~ 184
- [19] Lei Yang, Lin-Sen Chou, Wen K. Shieh. Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. *Wat Sci Tech*, **2001**, 35(13): 3097 ~ 3108
- [20] Yongwoo Hwang, Yutaka Yoneyama, Hiroshi Noguchi. Denitrification characteristics of reject water in upflow bio-filtration. *Process Biochemistry*, **2000**, 35: 1241 ~ 1245
- [21] A. Mann. Performance of floating and sunken media biological aerated filters under unsteady state condition. *Water Research*, **1999**, 33(4): 1108 ~ 1113
- [22] Rebecca Moore, Joanne Quamby, Tom Stephenson. The effects of media size on the performance of biological aerated filters. *Wat Sci Tech*, **2001**, 35(10): 2514 ~ 2522
- [23] 邱立平. 曝气生物滤池处理生活污水的运行特性及生态学研究 [博士学位论文]. 哈尔滨工业大学, **2003**
- [24] A. T. Mann, T. Stephenson. Modeling biological aerated filters for wastewater treatment. *Water Research*, **1997**, 31(10): 2443 ~ 2448
- [25] 刘荣光, 罗辉荣, 汪义强, 等. 滤池气水反冲洗机理综述与初探. *重庆建筑大学学报*, **1998**, 20(6): 7 ~ 11
- [26] David Hall, Caroline S. B. Fitzpatrick. Research note—spectral analysis of pressure variations during combined air and water backwash of rapid gravity filters. *Wat Sci Tech*, **1999**, 33(17): 3666 ~ 3672
- [27] Payraudeau M., Pearce A. R., et al. Experiment on biological aerated upflow filters for tertiary treatment from pilot to full scale test. *Wat Sci. Tech*, **2001**, 44(2 ~ 3): 63 ~ 68
- [28] Paffonç, Seine Centre. The novel and flexible colombes wastewater treatment plant from theory to practice. *Wat Sci. Tech.*, **2001**, 44(2 ~ 3): 49 ~ 56
- [29] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术. 北京: 科学出版社, **2004**. 47 ~ 51
- [30] J. J. Chen, D. Slack, et al. Full scale studies of a simplified aerated filter (BAF) for organic and a nitrogen removal. *Wat Sci. Tech.*, **2000**, 41(4 ~ 5): 1 ~ 4
- [31] 张忠祥, 钱易. 废水处理新技术. 北京: 清华大学出版社, **2004**. 351 ~ 352
- [32] 徐亚明, 蒋彬. 曝气生物滤池的原理及工艺. *工业水处理*, **2002**, 22(6): 1 ~ 5