曝气生物滤池应用和研究中的几个关键问题

李 军[1], 刘伟岩[1,2], 杨晓冬[1], 马文瑾[1,2], 王春荣[1]
(1. 北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 2. 北京城市排水集团 高碑店污水处理厂, 北京 100022)

摘 要: 曝气生物滤池 (BAF)由于处理能力强、抗冲击负荷和生物降解过程独特而受到青睐。分析了 BAF应用中的几个关键问题,诸如技术原理、运行原则、适用填料、反冲洗工艺等,还特别综述了有关 BAF生物相特征及其动力学模型方面的研究现状。

关键词: 曝气生物滤池; 填料; 反冲洗; 膜生物相; 动力学模型
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1000-4602(2008)14-0010-05

Key Problems in Application and Research of BAF

LI Jun[1], LIU Wei-yan[1,2], YANG Xiao-dong[1], MA Wen-jin[1,2], WANG Chun-rong[1]
(1. *Key Lab of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100022, *China*; 2. *Gaobeidian WWTP, Beijing Urban Drainage Group, Beijing* 100022, *China*)

Abstract: Biological aerated filter (BAF) is favoured for its high treatment ability, strong resistance to shock loading and unique biodegradation process. Some key problems such as technical principle, operation rules, carriers, backwashing and so on in the application of BAF are analyzed. The present research status on biofacies characteristic of BAF and its dynamic model are summarized.

Key words: biological aerated filter (BAF); carrier; backwashing; film biofacies; dynamic model

曝气生物滤池 (BAF)是 20世纪 80年代在欧美发展起来的一种污水固定床生物膜处理技术。由污水、空气和微生物构成的三相在反应器中进行传质反应,微生物生长在颗粒状填料上,空气经压缩曝气供给。BAF省去了通常活性污泥法中的二沉池,节省了基建费用和占地面积。总的来说,BAF最突出的特点就是在一级强化处理后,将生物氧化和悬浮物截留结合在一起,通过反冲洗再生实现周期运行[1]。BAF便于实现微机自控,不仅可以实现设备运行的自动控制,还可以在线显示运行数据,可靠性高,可以采用模块化运行管理[2]。自第一套建在巴黎 Soissons污水处理厂的 BAF设备[1]运行以来,法国得利满、德国飞利浦穆勒和法国 OTV等环保设备公司已有多种定型产品,比如 BIOFOR、BIOSTY、COLOX、DeepBed™和 BIOFUR等[2]。截至 1999年,美国已有 5座生产性曝气生物滤池,规模为 750～7 570 m^3/d;法国已有 15座曝气生物滤池,服务人口为 20 000～200 000人[3]。大连市利用世界银行贷款兴建的马栏河城市污水处理厂 (处理规模为 12×10^4 m^3/d)采用了 BAF工艺,在北京等城市有 5个 BAF工程已经完成或正在实施。曝气生物滤池工艺在我国呈现着良好的应用前景。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678008); 北京市自然科学基金资助项目 (8052005); 北京市教委项目 (KM200510005006); 北京市属市管高校人才强教计划资助项目 (PHR IHLB)

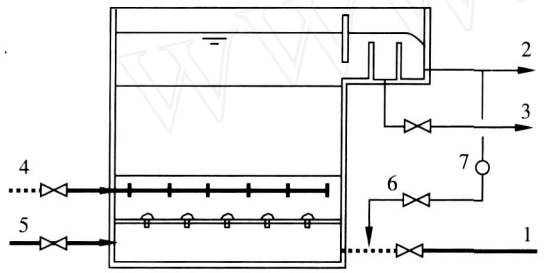
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　BAF应用中的几个关键问题

1.1　技术原理

BAF内填充大量粒径较小、表面粗糙的填料,通过培养和驯化使填料挂膜,生物膜和填料间的悬浮微生物发挥生物降解和絮凝作用处理污水,之后利用填料的过滤作用截留悬浮物,保证较高的 MLSS和较低的出水 SS。运行一段时间后,过滤阻力增大,在一定进水压力下处理效率降低,此时反应器进入反冲洗周期,一般利用出水冲刷掉大部分截留的悬浮物,部分更新生物膜。

沿滤池高度方向,微生物利用基质生长,污水中的有机和无机污染物不断被降解。若滤池高度足够,可以将整个滤池设置成好氧、缺氧和 (或)厌氧区,进行硝化和反硝化。若在相应阶段投加适量除磷剂 (一般为铁剂),则还能达到良好的除磷效果[1,4]。图 1为上向流 BAF - BIOFOR结构示意。



1.进水 2.出水 3.反冲出水 4.供气 5.反冲气 6.反冲水 7.冲洗泵

图 1　BAF - BIOFOR结构示意

Fig 1　Sketch map of BAF - BIOFOR configuration

污水与压缩空气同向往上流过滤层,持续在整个滤池高度上提供正压条件,可更好地避免沟流或短流,并使空间过滤被更好地运用,保持滤池均衡稳定的运行。空气管设置于承托层中,承托层一般由碎石料或者鹅卵石砌筑。

1.2　运行原则

根据污水流向的不同,BAF可有上向流和下向流两种型式。下向流 BAF由于纳污效率低、运行周期短[1]和反冲洗动力消耗高已被上向流 BAF取代。

BAF为周期运行,从过滤开始至反冲洗完毕、下一阶段过滤开始为一完整周期。污水在进入滤池前一般需经过预处理去除 SS,以降低负荷,避免频繁反冲洗,提高滤池的运行效率。

根据不同的滤池安排,BAF可以划分为:同时去除 COD和 NH_4^+ - N的单级系统,分别去除 COD和 NH_4^+ - N的两级系统,分别去除 COD、NH_4^+ - N和反硝化的两级系统,去除 COD、硝化反硝化和除磷的组合工艺系统。

表 1是法国 OTV公司采用单级 BAF系统处理污水的运行数据[5]。

表 1　法国 OTV公司单级 BAF系统的运行数据

Tab 1　Operation data of single stage BAF system of OTV Company

项　目	BAF进水 / (mg·L^{-1})	BAF出水 / (mg·L^{-1})	去除率 /%
COD	266	48	82
BOD_5	127	13	90
TSS	68	10	85
TKN	37	3.2	91

由于在单级处理系统中存在自养菌和异养菌对氧气和空间的竞争,而硝化细菌生长缓慢、世代时间长、对环境要求高,当进水有机物负荷高时,需要分两级处理。两级处理系统为自养菌和异养菌营造各自最适环境,以充分发挥各自的作用。当需要进行反硝化时,考虑到经济性,通常采用前置反硝化和硝化工艺。工艺流程见图 2。

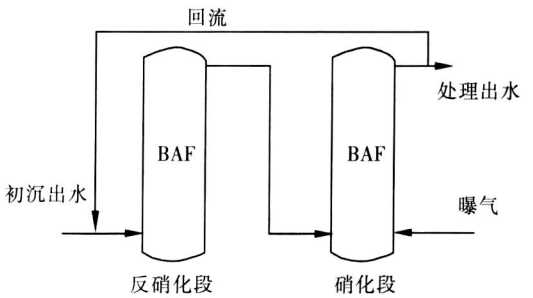


图 2　BAF的反硝化 —硝化工艺流程

Fig 2　Flow chart of BAF denitrification-nitrification process

国外某水处理公司的半生产规模 BAF的反硝化段运行数据[6]见表 2。

表 2　半生产规模 BAF反硝化段的运行数据

Tab 2　Operation data of denitrification stage in semi full-scale BAF test

项目	回流率 /%	处理出水流量 / (m^3·h^{-1})	水力负荷 / (m^3 m^{-2}·h^{-1})	NO_3^- - N进水负荷 / (kg·m^{-3}·d^{-1})	NO_3^- - N去除率 / %
数值	150	0.75	9.4	0.82	90
	200	0.54～0.75	9.1	1.07	77
	250	0.75	13.1	1.31	75
	300	0.52～0.75	13.2	1.23	67
	350	0.75	16.9	1.64	70

有研究表明,提高水力负荷 (滤速)对提高 BAF处理 COD的能力帮助不大,但可以明显促进硝化作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用。这可能是因为进入 BAF的有机污染物首先被生物膜吸附,然后再被生物降解,所以提高滤速虽然对处理 COD影响不大,却能提高 BAF内的紊流程度,从而促进含氮物质、有机底物的扩散以及气、液、固三相的传质效率。综合来看,提高水力负荷对 BAF处理能力的提高是有限的,最优水力负荷因特定滤池填料、池型、运行方式和污水性质而不同。

通过投加化学除磷剂(石灰、铝盐和铁盐),BAF还能实现除磷,但这方面的实例还不多。综合其环境影响和化学性质,目前多采用三价铁盐。若以二价铁作为絮凝剂,根据环境条件的不同,当二价铁被氧化成三价铁时,与磷结合形成大颗粒聚合体;当二价铁没有被氧化时,能形成颗粒较小的 $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$聚合体。在高通气量的条件下,二价铁很容易被氧化成三价铁。现已发现新生成的三价铁比用贮备液投加的三价铁除磷效果好[4]。因此具有高效硝化反硝化作用的 BAF和用二价铁进行化学除磷应是去除污水中营养物的经济有效的选择。

1.3 适用填料

填料或滤料作为 BAF的核心部分直接影响着处理效果和处理效率。目前有多种填料可供选择,如石英砂砾、轻质陶粒、聚苯乙烯填料、膨胀页岩和沸石等。

Kent[7]参照 BEWA的标准对 BAF常用的 7种填料进行了对比研究,认为膨胀球形粘土和膨胀页岩最适合用作 BAF的填料。但由于 BEWA是针对给水处理中快滤池的标准,Kent的结果对于污水处理只能是一个参照[8]。经过多年的发展,轻质陶粒已成为污水处理 BAF最广泛采用的填料。Moore R等人[9]研究了粒径为 1.5～3.5 mm和 2.5～4.5 mm的填料对 BAF处理效果的影响,认为小颗粒填料虽然有利于脱氮,但不适应高的水力负荷,工作周期短,反冲洗频率高,动力消耗高;而大颗粒填料虽然改善了滤池操作条件,减少了反冲洗频率,但不利于脱氮和去除 SS。Chang W. S.等人[10]用天然沸石作 BAF填料对纺织废水进行处理,处理效果明显好于砂砾填料,他们将原因归结于天然沸石具有更强的阳离子交换能力和更大的比表面积。田文华开发了沸石滤料曝气生物滤池(ZBAF)工艺,在直径为 0.2 m、滤料高度为 3 m的 ZBAF装置中处理低浓度生活污水。结果表明,在温度为 12～17 ℃、停留时间为 1.4 h、气水比为 4∶1的条件下,当进水浊度、BOD_5、COD和 NH_4^+-N分别为 59 NTU、30 mg/L、81 mg/L和 16 mg/L时,相应的出水指标分别为 3.2 NTU、3.2 mg/L、14.5 mg/L和 0.5 mg/L[11]。

一般来说,作为 BAF填料,最好选择那些机械强度好、比表面积大、生物化学稳定性强、表面呈正电性和亲水性、空隙率及表面粗糙度较高的球形填料。国内普遍采用轻质陶粒作为 BAF的填料。陶粒填料采用无机材料烧结而成,表面粗糙多孔,粒径一般为 3～6 mm,比表面积约为 4 m^2/cm^3。这样粗糙多孔的填料容易挂膜,为微生物提供良好的生长环境,一般 MLVSS可达 10～15 g/L。同时粒状填料可使充氧效率大大增加,一般氧气的利用率可增加 10%～15%,而且使 BAF具有良好的生物吸附和过滤作用。

由 BAF工作原理可知,填料层高度对于污水处理效果有重要影响。李汝琪等研究提出污染物去除率与填料高度呈正相关[12]。但是填料层超过一定高度后,单位容积滤池空间对污水处理的贡献将明显降低,同时给工艺运行带来难度。Francisco等人对以陶粒作为填料的下向流 BAF进行研究,认为滤床的适宜高度为 1.2～1.5 m[13]。BAF的工作性能和填料层高度的关系与其特定的工艺运行型式有关,这有待于进一步研究。

1.4 反冲洗工艺

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,滤池出水水质好。随着 BAF的运行,生物膜渐渐增厚,老化脱落的生物膜和其他悬浮固体明显增多,过滤阻力明显增大,气、液、固传质效率明显降低,滤池内气水分布严重不均,BAF需要进入反冲洗阶段。

反冲洗频率与有机物污染物负荷、水力负荷、运行方式和填料材质有关,也受反冲洗强度和反冲洗时间的影响。通常水头损失可以作为反冲洗开始的“信号”,反冲洗出水悬浮物浓度可以作为反冲洗结束的“信号”。

目前大多数 BAF已采用气、水联合反冲洗技术[1],该技术不仅改善了填料及生物膜的表面性质,而且节约了反冲洗用水。通入空气冲刷扰动填料,填料相互碰撞摩擦,使生物膜吸附的悬浮物分离,与此同时或者之后用处理出水反冲洗滤池,冲刷扰动填料,漂洗掉悬浮废物,使 BAF的处理能力再生。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

邹伟国等[14]开发了一种名为 BIOSMEDI的 BAF,该上向流工艺采用了空气脉冲的反冲洗方式,具有耗水、耗气量小和运行管理方便等优点。

反冲洗过程对生物膜也有更新再生作用,使得反应器内的微生物处于一种周期性变化的环境中。在这种反复冲洗的振荡生态条件下,氨氧化细菌比硝化细菌更容易建立和形成稳定的生态群落。马军和邱立平[15]研究认为,除了氨氧化细菌在氧饱和常数、基质供应等方面的优势外,反冲洗是 BAF中出现亚硝酸盐积累现象最主要的影响因素。

2　研究现状

2.1　生物相特征

BAF采用颗粒状填料作为生物处理和过滤截留的介质和载体,利用先进的显微技术对生物膜进行镜检,可知滤池中的微生物从细菌、真菌、原生动物到后生动物中的线虫、轮虫,形成一个完整的生态食物链体系。污染物沿填料高度不断得到降解,污水在填料空隙间为局部紊流,而在整体上类似“推流”过程。因此可以认为整个填料层高度和填料颗粒表面的生物膜上都存在着基质和溶解氧的浓度梯度分布,为各种不同类型微生物在整个填料层的不同高度和填料颗粒表面生物膜内的不同部位占据优势生态位提供了条件,存在着不同的微生物代谢优势区。固定膜生物反应器中生物膜的微生物生态环境如图 3所示。

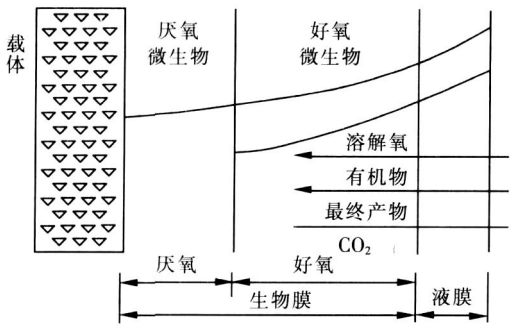


图 3　生物膜的微生境示意

Fig 3　Sketch map of microbial ecological environment of biofilm

异养菌的增殖速度较快,而氨氧化细菌和硝化细菌的生长增殖速度慢、世代周期长,在对生存空间和溶解氧的竞争中,氨氧化细菌和硝化细菌均处于劣势。作为氨氧化细菌代谢产物之一的亚硝酸盐是硝化细菌的生长基质之一,因此两者具有互利共生的关系,在活性污泥工艺中由于供氧充足,两者可以形成混合优势区域,而在生物膜工艺中异养细菌和氨氧化细菌对氧的争夺能力都强于硝化细菌,故硝化细菌的代谢优势区域只能存在于亚硝酸盐和溶解氧浓度较高而有机物和氨氮浓度较低的区域。

在一定高度的上向流 BAF中,靠近进水区域的有机基质丰富,溶解氧充足,而在靠近出水的区域则相反。田文华、文湘华等[11]等研究发现,BAF内靠近进水处为碳氧化硝化区 (C/N区),生物相丰富,固着型纤毛虫很多;而硝化区 (N区)在远离进水处,生物相比较单一,主要为硝化菌。其中,固着型纤毛虫数量明显减少处即为这两个区的分界。

在填料表面附着的生物膜中,异养菌总会占据生物膜的表面位置,而硝化细菌代谢优势区将位于生物膜内部稍浅的区域。当主体液相溶解氧浓度较低、生物膜扩散和渗透的阻碍较大,而氨氮和有机物浓度较高时,受供氧限制,硝化细菌的代谢活性将受到抑制。由于 BAF在运行过程中需要经常进行反冲洗以恢复过水通量,所以世代时间较长的硝化细菌等很难在主体液相中形成优势。马军和邱立平[15]研究发现,BAF在曝气供氧量较低和定期反冲洗时,因氨氧化形成的亚硝态氮出现累积或直接被反硝化细菌利用,即实现了同时硝化反硝化。

除 BAF填料表面附着生长微生物膜外,在填料间还存在着一定量的生物絮体,在运行过程中也发挥着重要的生物吸附、生物降解和过滤截留作用。当然随着生物膜老化脱落,生物絮体总量增加而活性降低明显,需要由反冲洗漂洗掉。肖文胜等[16]研究认为,BIOFOR与其他固定生物膜法的不同之处在于其填料间的生物絮体可以充分发展。他们还认为沿污水水流方向,生物膜活性逐渐增加,而生物絮体的活性逐渐降低。

2.2　动力学模型

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。另一方面,固定生物膜模型的发展显得相对滞后,目前的主要模型局限于单一限制营养物、单一微生物的模拟阶段,与实际应用有较大的差距,因此建立生物膜多基质模型是当前固定生物膜工艺应用研究中亟待解决的重要问题。

张代钧等[17]将简化的活性污泥模型 ASM3与传质反应方程相耦合,建立了生物膜多种群多基质

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模型(BMSM),同时运用均相生物膜反应单元的概念,导出了 BAF反应器一维模型。他们基于 Matlab 平台开发了 BAF反应器一维模型的模拟与仿真程序,较好地模拟了 BAF的稳态运行,特别是较好地反映了 BAF中的同时硝化反硝化作用。

3 结语

曝气生物滤池因为具有诸多优点而从固定生物膜法工艺中脱颖而出,特别适合造纸工业和食品加工工业废水的处理以及微污染源水的处理。随着国内外研究的深入,在中小水量的生活污水脱氮除磷处理中,曝气生物滤池工艺也受到重视,该工艺的巨大潜力越来越得到关注。但是,有关反应器和 BAF同步硝化反硝化工艺的研究还不成熟,BAF中生物膜的微生物作用机制及其动力学模型还有待进一步研究,尤其对曝气生物滤池的生物除磷研究还不多,相信随着现代生物技术和材料技术的发展,必将为研究曝气生物滤池提供更好的研究工具和手段。

参考文献:

[1] 万平,陈建军,钟理. 新型污水处理工艺 ——曝气生物滤池[J]. 工业水处理, 2004, 24(5): 1 - 5.

[2] 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]. Water Sci Technol, 2000, 41(4 - 5): 1 - 4.

[3] 徐丽花,李亚新. 一种好氧生物处理有机废水的新工艺设备 ——生物曝气滤池[J]. 给水排水, 1999, 25(11): 1 - 4.

[4] 谢曙光,张晓健,王占生. 曝气生物滤池最新发展和运用[J]. 水处理技术, 2004, 30(1): 4 - 7.

[5] 朱乐辉. 污水处理新工艺 ——曝气生物滤池[J]. 世纪环境, 2000, (1): 34 - 37.

[6] Pujol R, Tarallo S. Total nitrogen in two-step bio-filtration[J]. Water Sci Technol, 2000, 41(4 - 5): 65 - 68.

[7] Kent T D, Fitzpatrick C S B, William S C. Testing of biological aerated filter (BAF) media[J]. Water Sci Technol, 1996, 34(3 - 4): 363 - 370.

[8] 张杰,曹相生,孟雪征. 曝气生物滤池的研究进展[J]. 中国给水排水, 2002, 18(8): 26 - 29.

[9] Moore R, Quarmby J, Stephenson T. The effects of media size on the performance of biological aerated filters[J]. Water Res, 2001, 35(10): 2514 - 2522.

[10] Chang W S, Hong S W, Park J. Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter[J]. Process Biochem, 2002, 37: 693 - 698.

[11] 田文华,文湘华,杨爱华,等. 沸石生物滤池处理低浓度生活污水的工艺性能及影响因素[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 97 - 101.

[12] 李汝琪. 污水处理新技术 ——BAFsR曝气生物滤池[J]. 中国环保产业, 1999, (12): 38 - 39.

[13] Francisco Osorio, Ernesto Hontoria. Optimization of bed material height in a submerged biological aerated filter[J]. J Environ Eng, 2001, 61(4): 974 - 978.

[14] 孙群,邹伟国,王国华,等. 高效生物滤池在污水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2): 77 - 79.

[15] 马军,邱立平. 曝气生物滤池中的亚硝酸盐积累及其影响因子[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 84 - 90.

[16] 肖文胜,徐文国,杨桔才. 曝气生物滤池中生物膜的活性研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(5): 655 - 657.

[17] 张代钧,曹琳,严晨敏,等. 生物膜多基质模型及其对BAF处理合成污水的模拟[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 231 - 235.

电话: (010) 67391726

E - mail: jglijun@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007 - 11 - 10

·工程信息·

湖北省宜城市污水处理厂 BOT一期工程

该工程处理规模为 $2\times10^4\ m^3/d$(总规模为 $5\times10^4\ m^3/d$),占地为 1.47 hm^2(总占地为 2.7 hm^2),采用 C - Orbal氧化沟工艺,投资为 2 524.39万元。联系单位:新加坡三达膜集团,联系人:李玉安 彭进。联系电话:0730 - 3761838/3761938。建设周期:2008年 —2009年。

(沈阳市规划设计研究院 武云甫 任晓艳)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net