

常温处理生活污水微氧 EGSB 反应器启动运行特性

董春娟¹, 刘 晓², 吕炳南²

(1. 太原大学 环境工程系, 山西 太原 030009; 2. 哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 为了研究微氧膨胀颗粒污泥床(EGSB)去除生活污水中的有机物和氮、磷(N,P)营养物的快速启动和稳态运行特性,在15~26℃常温下运行EGSB反应器9个多月,对微氧EGSB反应器内颗粒污泥的培养过程以及稳定运行阶段化学需氧量(COD)、N、P的去除规律进行了研究。通过给EGSB反应器内适量曝气,为EGSB反应器内的颗粒污泥提供溶解氧以产生微氧环境,以曝气柱内的曝气速率来控制回流水中的溶解氧量。研究结果表明,在15~26℃时微氧颗粒污泥的成功培养需要近4个月。当水力停留时间(HRT)为3.9~4.8 h,进水流量为2.5~3.1 L/h,进水COD、NH₃-N、总氮(TN)和总磷(TP)的质量浓度分别在213~867, 26.5~72.1, 31.7~81.7和3.8~17.3 mg/L范围内波动,稳定运行微氧EGSB反应器时,COD、NH₃-N、TN和TP的平均去除率分别达到了93.4%, 83.8%, 74.7%和44.0%;出水平均浓度分别为29, 10.0, 14.0和4.7 mg/L,水质分别达到IA、IB、IA和Ⅲ级标准;出水浊度在6 NTU左右。微氧EGSB反应器进口处氧化还原电位宜控制在+15 mV左右。微氧使得颗粒污泥沉速降低,最小颗粒污泥沉速低至11 m/h,没有出现污泥流失。稳定运行阶段污泥中混合液悬浮固体浓度达到28 g/L左右,混合液中可挥发性悬浮固体与悬浮固体的质量比为0.74~0.77,说明微氧EGSB反应器已成功启动并稳定运行。

关键词: 膨胀颗粒污泥床; 反应器; 微氧; 常温; 生活污水; 氮和磷去除

中图分类号: X703 **文章编号:** 1005-9830(2011)02-0284-05

Startup and Performance of Micro-aerobic EGSB Reactor Treating Actual Domestic Wastewater at Ambient Temperature

DONG Chun-juan¹, LIU Xiao², LV Bing-nan²

(1. Department of Environment Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030009, China;

2. School of Municipal and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To obtain the rapid startup and stable operation of the micro-aerobic expanded granular sludge bed(EGSB) reactor for simultaneous removal of carbon and nutrients (N and P) treating actual domestic sewage under ambient temperature, the EGSB reactor is operated for approximately 9 months consisting of startup stage and stable operation stage for the research on the formation of micro-aerobic granules and the simultaneous removal of the COD, N, and P at ambient temperature (15

收稿日期: 2009-04-09 修回日期: 2009-06-03

基金项目: 山西省科技攻关计划项目(2007031104-1); 太原市科技发展计划项目(091008)

作者简介: 董春娟(1970-), 女, 教授, 博士后, 主要研究方向: 水污染控制和污水资源化, E-mail: chunjuand@

126.com。

~26℃)。By controlling the oxygenation rate in the aeration column, different concentrations of dissolved O_2 are generated in the circulating fluid which supplies dissolved O_2 to the granule sludge bed in the EGSB reactor and to generate micro-aerobic environments. The results show that it takes only about four months for the successful startup of the micro-aerobic EGSB for the treatment of actual domestic sewage under ambient temperature. About 5 months' stable operation, the micro-aerobic EGSB reactor treating actual domestic sewage at ambient temperature (15 ~ 26℃) runs well. With 213 ~ 867, 26.5 ~ 72.1, 1.7 ~ 81.7 and 3.8 ~ 17.3 mg/L influent COD, NH_3-N , TN, and TP concentrations, gradually increasing influent flow from 2.5 to 3.1 L/h and shortening HRT from 3.9 to 4.8 h, the average removal of COD, NH_3-N , TN and TP can attain 93.4%, 83.8%, 74.7%, and 44.0%. And the effluent COD, NH_3-N , TN and TP concentration are 29, 10.0, 14.0 and 4.7 mg/L, respectively, which accords with the IA, IB, IA and III distinction of the GB 18918 - 2002. The effluent turbidity is about 6 NTU. At the stable operation stage, the redox potential in the inlet of the micro-aerobic EGSB reactor should be kept at about +15 mV. At the stable operation stage the settled velocity of the granules decreases to 11 m/h. But the granules are still held in the EGSB reactor without any washout. Moreover, the micro-aerobic EGSB reactor can keep the sludge concentration about 28 g/L and the mass ratio of mixed liquor volatile suspended solids to mixed liquor suspended solids as 0.74 ~ 0.77, which means the successful startup and stable operation for the micro-aerobic EGSB reactor.

Key words: expanded granular sludge bed; reactors; micro-oxygenation; ambient temperature; domestic wastewater; removal of nitrogen and phosphorus

膨胀颗粒污泥床(Expanded granular sludge bed, EGSB)反应器作为上升流厌氧污泥体(Up-flow anaerobic suspended bed, UASB)反应器的改进设备,由于采用了较大的液体上升流速,能保证有机负荷率较低时的泥水较好混合和高效传质。颗粒污泥的形成和大量兼性菌的存在使其在常温甚至低温条件下对低浓度生活污水的处理更具有明显优势。但由于 EGSB 反应器对氮、磷(N、P)营养物的去除很有限,必须考虑通过其他途径来解决 N、P 的去除问题^[1-3]。

目前普遍采用的方法是将厌氧处理技术与好氧处理技术结合来满足化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)和氮、磷的去除要求,如, A/O 法、A²/O 法、序列间歇式活性污泥法(Sequencing batch reactor activated sludge process, SBR)法、氧化沟法、EGSB-MBR(膜生物反应器)组合工艺、EGSB-SBR 组合工艺等。但这些组合工艺一方面工艺流程复杂,另一方面很难同时实现氮磷的高效去除。而且,后续的好氧工艺仍然会有大量曝气需求和大量剩余污泥的产生,不能真正做到节能减排。

通过给厌氧反应器内适量曝气,在同一个反应器能够形成无数相邻存在的厌氧与好氧微环

境,使厌氧菌、好氧菌、兼性菌等能共存于同一反应器,这些菌种协同代谢污染物质;又由于氧参与生化反应,因此,系统中氧化与还原作用能同时发生。近年来以形成颗粒污泥为特点的生物处理技术的出现,使得人们更加关注这种同步厌氧好氧生物处理新技术(也称为微氧产甲烷新技术)的研究与开发^[4-6]。

微氧产甲烷新技术不仅在难降解毒性污染物质的完全降解方面显示出独特的优势,在处理低浓度的生活污水时也很有吸引力,因为该技术能够在同一反应器内实现生活污水中有机污染物和 N、P 营养物的同时去除。随着人们对新型高效颗粒污泥反应器—EGSB 反应器的深入研究,结合微氧产甲烷技术的新概念,通过微量曝气,在高效 EGSB 反应器内实现有机污染物和 N、P 营养物的同时去除将会是生活污水处理更有吸引力的选择,尤其是在常温下的高效处理^[7]。

微氧产甲烷处理系统的运行和设计还处于起步阶段。对微氧生物处理系统概念的进一步理解,对微氧颗粒污泥的成功培养,对系统理想的运行条件选择,比如氧的投加量、溶解氧的浓度、反应器的运行控制参数、运行控制模式等,都是优化系统运行、改进反应器设计和应用的研究方向。

本文重点考察 15 ~ 26℃ 常温下微氧 EGSB 反应器处理实际生活污水时微氧颗粒污泥的快速培养和运行特性, 以期微氧 EGSB 反应器的进一步推广应用提供理论基础。

1 实验材料与方法

1.1 反应器

常温处理生活污水的微氧 EGSB 反应器实验装置如图 1 所示。

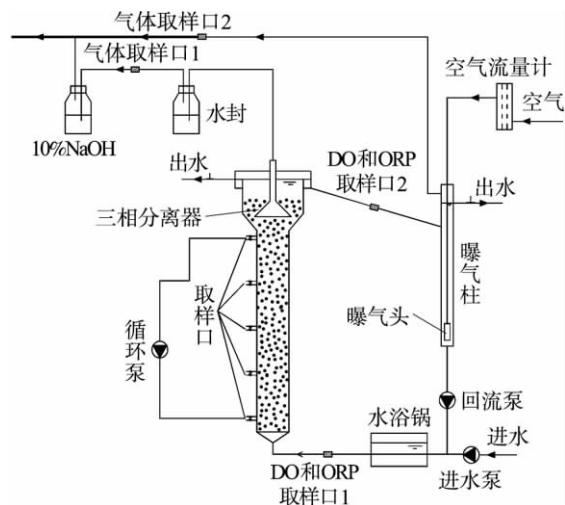


图 1 实验用微氧 EGSB 反应器示意图

EGSB 反应器高 2.3 m, 有效容积 18 L; 其中反应区高 1.8 m, 内径 10 cm, 有效容积 12 L。进水和回流水分别采用蠕动泵加压, 二者合流进入 EGSB 反应器。气体收集装置中的水封用于稳压, 气体经水封瓶后, 可经 CO_2 吸收瓶, 通过 Mariotte 瓶和量筒计量甲烷产量; 也可不经 CO_2 吸收瓶, 直接通过 Mariotte 瓶和量筒计量总产气量。回流水收集到曝气柱内, 通过给曝气柱曝气的方式给颗粒污泥床供氧, 调节曝气量来控制反应器内溶解氧的多少。EGSB 反应器中设有 2 套循环系统, 以满足运行过程中不同液体上升流速的要求, 一套是外部污水循环系统, EGSB 反应器三相分离器上部的出水经曝气后, 部分排放与进水混合, 回流到 EGSB 反应器内; 另一套是内部泥水循环系统, 它从 EGSB 反应器三相分离器的下部取泥水混合液回流至 EGSB 反应器底部。对进水和反应器内的氧化还原电位(ORP)进行监测以调节曝气量, 控制反应器内氧化还原状态。

1.2 接种污泥

接种污泥取自实验室环境温度下稳定运行

2 年的处理实际生活污水的 EGSB 反应器, 污泥中混合液悬浮固体(MLSS)浓度为 36.0 g/L, 可挥发性固体悬浮物(VSS)与总悬浮物(TSS)质量比为 0.74, 比产甲烷活性为 1.41 $\text{gCOD}_{\text{CH}_4}/\text{gCOD} \cdot \text{d}$ 。

1.3 实验用水

实验用生活污水取自太原大学家属区, 进水 COD 在 263 ~ 1 145 mg/L 之间, pH 值在 7.4 ~ 8.1 之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 分别在 26.5 ~ 72.1、31.7 ~ 89.1 和 3.8 ~ 17.7 mg/L 之间。

1.4 分析方法

COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总氮量(TN)、总磷量(TP)、MLSS 和混合液中可挥发性悬浮固体(Mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS)的测定均采用标准法^[8]。ORP 和 pH 采用 PHS-3C 酸度计测定。颗粒污泥沉速的测定见文献[9]。

1.5 EGSB 反应器的运行

微氧 EGSB 反应器的运行分为启动运行(微氧颗粒污泥的培养阶段)和稳定运行 2 个阶段。在启动运行阶段, EGSB 反应器在 17 ~ 26℃ 的温度范围内运行, 通过 2.5 ~ 3.2 m/h 的液体上升流速来提供一个适当的水力条件, 进水流量和 HRT 分别保持在 1.8 ~ 1.2 L/h 和 6.7 ~ 10 h 的范围内。在稳定运行阶段, 随着气温的变化, 运行温度从 26℃ 左右逐渐降低到 15℃ 左右, 此阶段的运行条件为: 液体上升流速 2.2 ~ 2.9 m/h, 进水流量 2.5 ~ 3.1 L/h, HRT 为 3.9 ~ 4.8 h。

2 结果与讨论

2.1 COD 的去除

进出水 COD 质量浓度和 COD 去除率的变化如图 2 所示。

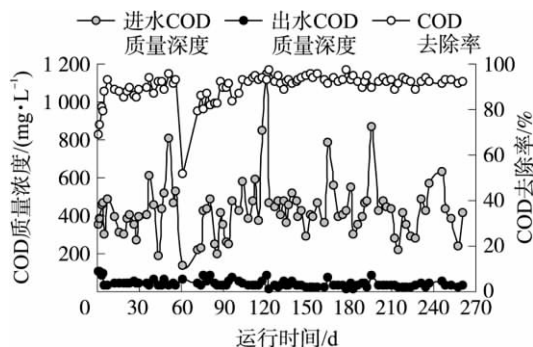


图 2 进出水 COD 质量浓度和 COD 去除率的变化

从图 2 可以看出, 厌氧时 EGSB 反应器的平均 COD 去除率仅为 76% (质量百分数, 下同), 适

量的溶解氧加入后,COD 去除率开始明显提高,随后的半个月始终在 85% 以上。1 个月后,达到 87 ~ 96%,平均去除率达到了 92.5% (与厌氧时相比提高了 16.5%)。说明微量氧的存在能够提高 EGSB 反应器内颗粒污泥的产甲烷活性和 COD 去除率。在微氧条件下,与甲烷菌共存的兼性厌氧菌能够消耗足够的氧,使得氧化还原电位足够低,从而保持产甲烷菌的高活性(此时 EGSB 反应器进口处的氧化还原电位大约为 -129 mV);兼性菌还有一个重要作用就是供给产甲烷菌代谢基质。另外,在微氧条件下,一些中间代谢产物,比如丙酸、乙酸和氢气等能够被氧化,因为这些中间代谢产物浓度的提高会潜在地抑制甲烷的产生。

后续的运行过程中增加曝气量,将反应器进口处氧化还原电位控制在 +15 mV 左右,微氧 EGSB 反应器能够获得平均 93.4% 的稳定 COD 去除率,进水 COD 浓度在 213 ~ 867 mg/L 之间波动,出水 COD 浓度保持在 12 ~ 87 mg/L 范围内,平均出水 COD 浓度为 29 mg/L,出水水质达到 GB 18918 - 2002 的 IA 标准。出水浊度稳定在 6 NTU 左右。

2.2 N 的去除

进出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 及其去除率的变化情况如图 3 和 4 所示。

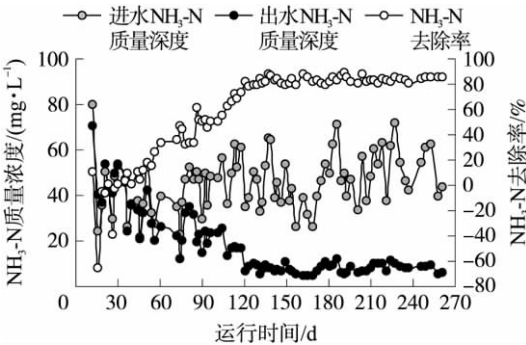


图 3 进出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率的变化

从图 3 可以看出,微氧曝气后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率在很长时间内出现了零去除甚至负去除,最高负去除率达到了 -66%。30 天后获得了 1% ~ 9% 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率。此后,虽然进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 21.6 ~ 65.3 mg/L 范围内波动,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率仍能在 60 天后达到 52%,在 120 天后达到 79%。随后稳步增加曝气量(控制反应器进口处氧化还原电位 +15 mV 左右), $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率能够保持在 80% 以上,近 5 个月的稳定运行,进水

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 26.5 ~ 72.1 mg/L 之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率保持在 84% 左右,最高达到 89%,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 4.4 ~ 12.1 mg/L 之间,平均值为 10.0 mg/L,基本达到 GB 18918 - 2002 的 IB 标准。

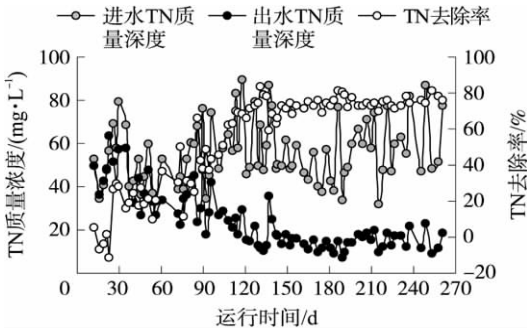


图 4 进出水 TN 质量浓度和 TN 去除率的变化

从图 4 可以看出,微氧曝气后,TN 去除率也出现了零去除甚至负去除,最高负去除率为 -12%。但与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相比,TN 去除率的提升要快些。22 天后,TN 平均去除率 29%,90 天时 46%,120 天时 70%。随后稳步增加曝气量(控制反应器进口处氧化还原电位 +15 mV 左右),TN 去除率又有所提高,平均去除率 74.7%,最高达 83%,进水 TN 浓度在 31.7 ~ 81.7 mg/L 之间,出水 TN 浓度在 6.7 ~ 22.6 mg/L 之间,平均值为 14.0 mg/L,达到 GB 18918 - 2002 的 IA 标准。

通过添加微量氧,利用 EGSB 反应器内存在大量颗粒污泥的优势,在 EGSB 反应器内形成了许多好氧 - 缺氧 - 厌氧的微环境,为有机污染物和 N、P 营养物的同时去除提供了可能。而且,微氧 EGSB 反应器内高污泥浓度和低 COD 浓度的条件能够促进形成硝化细菌、反硝化细菌和除磷菌的生态学优势^[1]。更为重要的是,虽然 EGSB 反应器内 COD 浓度很低,有机碳源相对不足,但好氧氨氧化菌能够利用甲烷作为唯一的有机碳源,氧作为电子受体,将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- (短程硝化过程)^[1]。接下来,厌氧氨氧化菌能够利用 NO_2^- 作为电子受体氧化 NH_4^+ (厌氧氨氧化),从而保证了微氧 EGSB 反应器的高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率。

2.3 P 的去除

微氧 EGSB 反应器进出水 TP 质量浓度和 TP 去除率的变化情况如图 5 所示。从图 5 可以看出,与 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 相比,TP 的去除出现了一个非常长的滞后期。而且 TP 去除率波动很大(最高负去除率为 -53%,而最高正去除率也高

达 72%)。90 天后微氧 EGSB 反应器才开始出现连续但起伏很大的正 TP 去除率,波动范围为 3%~79%。130 天后微氧 EGSB 反应器开始获得稳定的 TP 去除率,TP 平均去除率达到 36%。随后稳步增加曝气量(控制 EGSB 反应器进口处氧化还原电位在 +15 mV 左右),TP 去除率又有所提高,最高达到了 61%,平均值为 44%。此时,进水 TP 浓度在 3.8~17.3 mg/L 之间波动,出水 TP 浓度在 2.2~9.3 mg/L 之间,平均值为 4.7 mg/L,出水水质 TP 仅能达到 GB 18918-2002 的Ⅲ级标准。后续的实验中考虑通过化学除磷来进一步强化 TP 的去除。

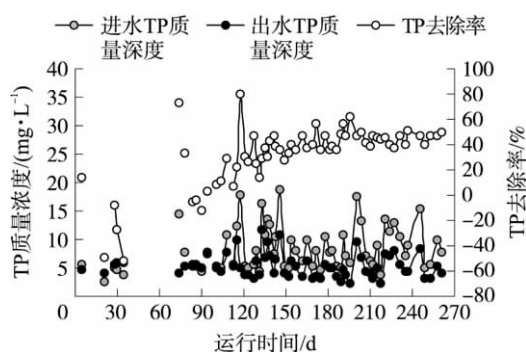


图 5 进出水 TP 质量浓度和 TP 去除率的变化

在整个启动和稳定运行阶段,颗粒污泥沉速稍有降低,最小颗粒污泥沉速甚至已经低至 11 m/h,但并没有出现污泥的流失。稳定运行阶段污泥中 MLSS 浓度达到 28 g/L 左右,MLVSS 与 MLSS 质量比为 0.74~0.77,这意味着微氧 EGSB 反应器已成功启动并稳定运行。

3 结论

(1) 给 EGSB 反应器内适量曝气,在 15~26℃ 时微氧颗粒污泥的成功培养需要近 4 个月。

(2) 微氧 EGSB 反应器在 15~26℃ 范围内运行效果良好: HRT 3.9~4.8 h 时,进水 COD、NH₃-N、TN 和 TP 浓度分别为 213~867, 26.5~72.1, 31.7~81.7 和 3.8~17.3 mg/L(说明: 给定了 HRT 和进水浓度,即给定了负荷率),出水 COD、NH₃-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 29, 10.0, 14.0 和 4.7 mg/L,达到了 GB 18918-2002 的ⅠA、ⅠB、ⅠA 和Ⅲ级标准。微氧 EGSB 反应器进口处氧化还原电位宜控制在 +15 mV 左右。

(3) 微氧 EGSB 反应器稳定运行阶段颗粒污

泥沉速低至 11 m/h,但并没有出现污泥的流失,污泥中 MLSS 浓度能够稳定在 28 g/L 左右,MLVSS 与 MLSS 质量比为 0.74~0.77。

参考文献:

- [1] Li X M, Guo L, Yang Q, et al. Removal of carbon and nutrients from low strength domestic wastewater by expanded granular sludge bed-zeolite bed filtration (EGSB-ZBF) integrated treatment concept [J]. Process Chem, 2007, 42: 1173-1179.
- [2] Chu L B, Yang F L, Zhang X W. Anaerobic treatment of domestic wastewater in a membrane-coupled expanded granular sludge bed (EGSB) reactor under moderate to low temperature [J]. Process Chem, 2005, 40: 1063-1070.
- [3] 张勇, 龚敏, 赵九旭, 等. EGSB-SBR 组合工艺对城市污水脱氮除磷实验研究 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5): 68-71.
- [4] Chu L B, Zhang X W, Yang F L, et al. Treatment of domestic wastewater by using a microaerobic membrane bioreactor [J]. Desalination, 2006(189): 181-189.
- [5] Ahn Young-Ho, Choi Hoon-Chang. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration [J]. Process Biochemistry, 2006, 41: 1945-1950.
- [6] Pynaert K, Wyffels S, Sprengers R, et al. Oxygen-limited nitrogen removal in a lab-scale rotating biological contactor treating an ammonium-rich wastewater [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(10): 357-363.
- [7] Chu L B, Zhang X W, Li X H, et al. Simultaneous removal of organic substances and nitrogen using a membrane bioreactor seeded with anaerobic granular sludge under oxygen-limited conditions [J]. Desalination, 2005(172): 271-280.
- [8] 国家环保总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [9] 董春娟, 吕炳南. EGSB 反应器内颗粒污泥的快速培养及特性研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(15): 62-66.
- [10] 张雁秋, 李昂, 李燕, 等. 分点进水脱氮除磷新工艺的理论基础和实验 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(24): 13-15.
- [11] Oskar M, Kensuke F, Kazuo Y. Denitrification with methane as external carbon source [J]. Wat Res, 2007, 41: 2726-2738.