

# 活性炭为载体的好氧颗粒污泥培养及性能研究

高阳, 徐晓晨, 徐光景, 杨凤林, 靳文尧

(大连理工大学 环境学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 好氧颗粒污泥是一种应用于废水生化处理中的新型活性污泥技术, 具有结构致密, 沉降性能优越, 生物处理能力等特点。通过在气升式内循环间歇反应器启动阶段, 接种活性污泥的同时添加活性炭颗粒(AC)的方法, 缩短好氧颗粒污泥颗粒化时间, 成功培养出了沉降速率大, 结构稳定, 除氮效果好的活性炭好氧颗粒污泥。并考察了活性污泥絮体-出现颗粒污泥-成熟颗粒污泥-储存-解体-修复的过程, 验证了载体强化型好氧颗粒污泥处理低碳氮比废水的可行性。实验结果证明: 活性炭好氧颗粒污泥反应器稳定运行时, COD、氨氮、总氮去除率分别可以达到80%~90%、99%、80%。将成熟活性炭好氧颗粒污泥储存12个月, 经过恢复培养, 物理特性及脱氮性能能够完全恢复到储存前的水平。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 活性炭; 废水处理

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0025-04

## Research on cultivation and performance of aerobic granular sludge using activated carbon as carrier

GAO Yang, XU Xiaochen, XU Guangjing, YANG Fenglin, JIN Wenyao

(School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The technology of aerobic granules sludge is a kind of new biochemical technology to treat waste water. It has compact structure, good settling ability and a excellent ability of biological treatment. Aerobic granules with carrier were successfully cultivated through adding activated carbon(AC) grain together with inoculated sludge. They have stable structure, good settling ability and excellent removal effect of N. This study investigated the process of floc sludge - small particles - ripe aerobic granules, storage, disintegration, recovery and the feasibility in low C/N wastewater treatment. The removal efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+$ -N and TN reached 80%~90%, 99%, 80% respectively. After storing the AC aerobic granular sludge for 12 months and fourteen days recovery, the morphology and properties of the granules recover completely.

**Key words:** aerobic granular sludge; activated carbon; waste water treatment

好氧颗粒污泥具有优良的沉降性能, 丰富的微生物相, 高生物量, 污泥产率低, 活性高, 抗冲击负荷强等优点<sup>[1-2]</sup>, 并且无需二沉池和污泥回流系统, 这些特性使好氧颗粒污泥工艺操作简便, 成本低廉。有研究表明, 在人工模拟废水试验条件中培养出的成熟颗粒污泥, 结构密实、沉降性能好, 当进水 COD 浓度为 500 mg/L、 $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为 200 mg/L 时, COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 的去除率分别可以达到 82%、98% 和 50%<sup>[3]</sup>。因为好氧颗粒污泥这些优良的性质, 受到越来越多的研究者的关注<sup>[4-5]</sup>, 但是目前对

好氧颗粒污泥的研究大多停留在实验室阶段, 仍然存在许多关键技术难题, 比如成熟颗粒不够稳定, 容易解体, 并且虽然对氨氮有很高的去除率, 氮仍会以硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的形式存在, 使总氮去除率仅在 50% 左右。

本文考虑上述问题, 在气升式内循环间歇反应器中添加活性炭颗粒, 使好氧活性污泥在载体上附着生长形成颗粒, 考察强化好氧颗粒污泥的颗粒化速度, 脱氮除碳能力及稳定性, 并与传统好氧颗粒污泥性能进行对比分析。

收稿日期: 2012-06-04; 修回日期: 2012-09-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-003-002)

作者简介: 高阳(1986-), 女, 黑龙江五常人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制研究。

通讯作者: 杨凤林(1944-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制与防治等研究。

# 1 材料与方法

## 1.1 实验设计

1.1.1 活性炭好氧颗粒污泥的培养 使用气升式内循环间歇反应器(Sequencing Batch Airlift Reactors, SBAR)进行试验研究。反应器高 900 mm, 外管直径 80 mm, 内管直径 40 mm, 有效容积 1.7 L。

试验参数设计如下: 进水体积交换率 50%, 曝气强度:  $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ , 污泥驯化阶段沉降时间从 50 min 逐渐缩短, 最后稳定在 5 min, 实验在室温下进行。反应器中添加颗粒活性炭(AC)为载体, 粒径范围均在  $830 \sim 1\,700 \mu\text{m}$  之间, 投加后反应器中碳粒浓度为  $2\,000 \text{ mg/L}$ 。颗粒成熟后, 一个循环周期为 358 min, 其中: 进水 3 min, 曝气: 348 min, 沉降: 5 min, 出水: 2 min。

1.1.2 活性炭好氧颗粒污泥的长期储存及性能恢复 将反应器运行稳定后的成熟活性炭好氧颗粒污泥取出, 用清水将里面的悬浮物洗净, 然后装入 500 mL 的玻璃瓶内, 注满营养液, 营养液组分及浓度为: COD  $400 \text{ mg/L}$ , 氨氮  $100 \text{ mg/L}$ , 其余营养物质如表 1, 放于  $4^\circ\text{C}$  的冰箱内储存 12 个月。

恢复阶段仍使用颗粒污泥培养阶段的 SBAR 反应器, 操作参数与底物浓度等参数均与培养阶段相同。

表 1 模拟废水营养物组成 mg/L

组分	浓度	组分	浓度
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	22	$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.15
$\text{CaCl}_2$	60	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25	KI	0.03
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20	$\text{ZnCl}_2$	0.12
EDTA	20	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.058
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.5	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.15

## 1.2 接种污泥

活性炭好氧颗粒污泥培养阶段的接种污泥为大连凌水污水处理厂的回流污泥, 污泥呈灰黑色, 取回后不经驯化直接加入反应器, 接种后反应器内污泥 SV 为 23%, MLSS 为  $4.055 \text{ g/L}$ , SVI 为  $56.72 \text{ mL/g}$ 。

性能恢复实验阶段接种污泥为在 1.1.2 节所述条件下储存 12 个月后的活性炭好氧颗粒污泥。

实验进水: 活性炭好氧颗粒污泥的培养及性能恢复实验均采用人工合成废水, 以无水乙酸钠为单一有机碳源, COD 浓度  $500 \text{ mg/L}$ , 以  $\text{NH}_4\text{Cl}$  为氮源,

进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度由  $50 \text{ mg/L}$  逐步提升至  $100 \text{ mg/L}$ 。其它营养元素如表 1 所示。以  $\text{NaHCO}_3$  调节进水 pH, 保持在  $7.5 \sim 8.5$  范围内。

## 1.3 分析方法

水样中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  等指标采用国家标准分析方法测定分析<sup>[6]</sup>, 总氮采用 TN(TOC - VCPH, Shimadzu) 分析仪测定;  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  采用快速密闭催化消解法; MLSS、采用干重法测定, 利用扫描电镜(SEM) 观察活性炭好氧颗粒污泥的微观结构。

# 2 结果与讨论

## 2.1 活性炭好氧颗粒污泥的形成

实验初期沉降时间为 50 min, 进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度  $50 \text{ mg/L}$ , 第 15 d 时, 沉降时间降为 15 min, 其他操作参数未变。第 31 d, 将沉降时间调整为 5 min, 其他参数未变, 第 65 d 时, 将进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度提高到  $100 \text{ mg/L}$ , 其他参数未变。

运行过程中, 沉降性能差的活性污泥在水利选择压的作用下被洗出, 反应器内污泥浓度明显降低, 由接种时的  $4\,055 \text{ mg/L}$  降至  $736 \text{ mg/L}$ 。当反应器内形成污泥颗粒后, MLSS 开始上升。运行到第 15 d 时, 污泥沉降性能改善, 反应器中 MLSS 值达到  $2\,265 \text{ mg/L}$ 。

图 1 中 A 为反应器运行到第 15 d 时, AC 颗粒表面的状态, 可以观察到已经有活性污泥附着在 AC 颗粒上生长。图 1 - B 是第 30 d 时反应器内颗粒污泥的形态, 颗粒表面的活性污泥较为松散, 结构不够密实, AC 颗粒内核清晰可见, 此时 MLSS 为  $3\,365 \text{ mg/L}$ 。第 60 d 时, 反应器中的好氧颗粒污泥形态如图 1 - C, 此时污泥颗粒轮廓清晰, 为球型或椭球形, 结构密实。第 60 d 以后活性炭好氧颗粒污泥粒径保持在  $3 \sim 5 \text{ mm}$  之间, 未再明显增长, MLSS 值稳定在  $9\,000 \text{ mg/L}$  左右, 表明以 AC 颗粒为载体内核的好氧颗粒污泥已经培养成熟, 实验到第 173 d 结束, 反应器内的颗粒污泥未出现解体现象。

## 2.2 活性炭好氧颗粒污泥的脱氮性能

整个运行过程里反应器中 COD 的去除率稳定, 保持在  $80\% \sim 90\%$  之间, 出水 COD 值均在  $80 \text{ mg/L}$  以下。反应器采用逐步提高底物  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度的培养方式, 所以在好氧污泥颗粒形成的过程中硝化菌得到富集, 硝化反硝化效果好。图 2 为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的降解情况, 图 3 为 TN 的去除情况。

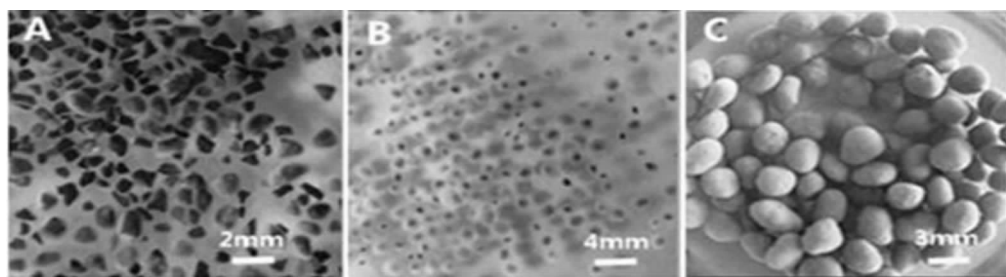
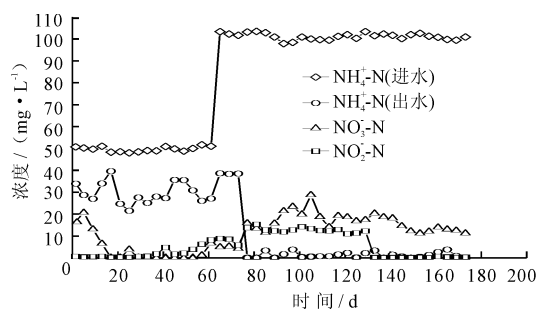


图 1 不同时期好氧颗粒污泥形状

图 2  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

由图 2 可以看出,反应器启动初期,在选择压的作用下,沉降性差的污泥絮体被排出反应器,导致 MLSS 值下降,又由于活性污泥处于适应水质环境阶段,所以氨氮的处理效果不佳,出水氨氮浓度不稳定。随着活性污泥对环境的适应,开始形成颗粒后,MLSS 值逐渐升高,氨氮处理能力有所提升。进水氨氮浓度提高到 100 mg/L 以后,由于负荷的提高,使脱氮效果短暂下降后又很快恢复,并且处理能力显著提高,出水氨氮浓度稳定保持在 5 mg/L 以下,去除率在 99% 左右。

由图 2 还可以看出出水中硝酸盐氮浓度比亚硝酸盐氮浓度高,处理效果稳定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度在 10 mg/L 左右,基本检测不出  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。证明成熟的好氧颗粒污泥中,硝化菌活性高于亚硝化细菌。

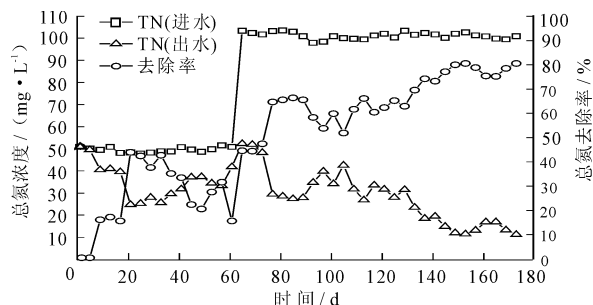


图 3 TN 的去除效果

由图 3 可以看出 TN 去除率整体呈上升趋势,最后稳定在 80% 左右,王新华<sup>[3]</sup>利用逐步提高氨氮负荷的方法培养出的好氧硝化颗粒污泥总 TN 的去除率为 45% - 55%,说明活性炭强化好氧颗粒污泥

具有更优异的同时硝化反硝化能力。

在反应器内,由于活性炭对活性污泥絮体的吸附作用,加快了微生物的聚集速率,从而减少颗粒化时间,形成了结构紧凑,强度大,硝化性能好,好氧颗粒污泥。

### 2.3 储存前后活性炭好氧颗粒污泥的物理性质变化

在 4℃ 下储存 12 个月后,打开容器有臭鸡蛋味产生,容器内液体变为灰黑色,这可能是由于储存期间发生的厌氧发酵作用产生了硫化氢等物质<sup>[7-8]</sup>。

活性炭好氧颗粒污泥储存 12 个月后,原本棕黄色的颗粒变成了灰黑色,大部分颗粒仍然保持着完整的结构,但颗粒表面污泥层松散,外部轮廓不清晰,部分颗粒有解体现象,溶液中有少量碎片出现。

表 2 为活性炭好氧颗粒污泥储存前后的物理性能变化。由于长期储存过程中的内源呼吸及水解作用,使颗粒污泥的 MLSS 值有所下降,由储存前的 9 000 mg/L 降至 5 014 mg/L,说明好氧颗粒污泥的生物量有损失。粒径略微变小,沉降速度为 112.32 m/h,较储存前降低约 36%,

好氧颗粒污泥沉降速度正常值范围在 25 ~ 70 m/h 之间,说明以 AC 为载体的强化型好氧颗粒污泥经过长期储存后仍然能维持较高的沉降速度,与传统好氧颗粒污泥长期储存后相比,具有明显优势。

表 2 储存前后活性炭好氧颗粒污泥特性

活性炭好氧颗粒污泥特性	mg/L, mm, m/h	
	储存前	储存 12 个月后
MLSS	9000	5014
平均粒径	3	2.5
平均沉降速率	112.32	72

由于 AC 作为好氧颗粒污泥的内部核心,底物营养物质不足造成的内源呼吸作用不会发生在活性炭好氧颗粒污泥的内部,使其始终具有一个稳固的核心,进而避免了好氧颗粒污泥由内部开始彻底解体;并且同体积的好氧颗粒污泥,增加 AC 内核的颗粒的生物量较传统颗粒小,因此底物消耗速率低,这

也可以在一定程度上减慢储存过程中底物不足对好氧颗粒污泥结构及活性的不良影响。

#### 2.4 活性炭好氧颗粒污泥的脱氮性能恢复

接种储存 12 个月的活性炭好氧颗粒污泥于 SBAR 反应器内重新启动实验,运行 2 d 后,颗粒颜色基本恢复至原本的棕黄色,外层有新的活性污泥膜生成,结构变得紧凑,轮廓也较恢复运行前清晰,随着原来解体污泥碎片的排出,反应器内悬浮态污泥量降低。

储存前的活性炭好氧颗粒污泥具有良好的同时脱氮除碳能力,COD 去除率在 80% ~ 90% 之间,氨氮去除率可以达到 99%,TN 去除率在 80% 左右。储存 12 个月后的活性炭好氧颗粒污泥经过恢复启动 7 d 后,异氧菌活性得到恢复,COD 去处效果达到稳定状态,出水中 COD 浓度为 40 mg/L 左右,去除率 90%,恢复到储存前的水平。

经过 11 d 的恢复培养,氨氮去除效果稳定,出水氨氮值在 1 mg/L 以下,去除率达到 99%,恢复到储存前水平。

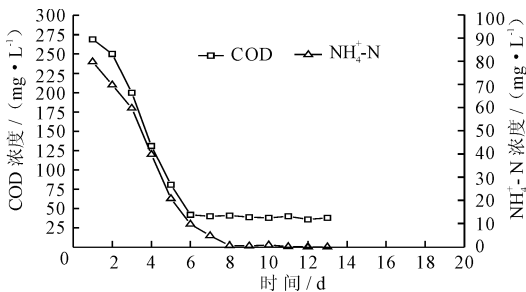


图4 恢复阶段出水中 COD 及 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化

经过 14 d 的恢复培养,在 4℃ 的环境下储存 12 个月的活性炭好氧颗粒污泥完全恢复到储存前的水平,TN 去除率可以达到 75% 以上。

活性炭好氧颗粒污泥长期储存及自修复的实验结果表明,在有底物无溶解氧的情况下将活性炭好氧颗粒污泥于 4℃ 的环境下储存 12 个月,颗粒颜色变为灰黑色、表面泥层致密程度下降,微生物活性降低,MLSS 及沉降速度等物理性能均有不同程度的降低,但整体形态及结构的稳定性并未受到显著影响。而将储存后的颗粒污泥作为接种污泥重新启动反应器后,活性炭好氧颗粒污泥表现出了优秀的自我修复能力。在曝气强度为 1.0 m<sup>3</sup>/h,循环时间 6 h,进水氨氮浓度 100 mg/L,COD 浓度 400 mg/L 的运行条件下(即储存前颗粒成熟,反应器稳定运行时的操作条件),经过 14 d 的培养,活性炭好氧颗粒污泥的物理性能及生物活性得到完全恢复;第 7 ~ 8

d 时,COD 及氨氮的去除率已经达到储存前的水平,分别为 90%,99%,较传统的纯活性污泥颗粒恢复时间短且性能恢复更彻底,说明添加的 AC 内核有助于增加好氧颗粒污泥的稳定性及强度,在恢复过程中,对微生物活性提高有促进作用。

### 3 结 语

活性炭好氧颗粒污泥的培养及性能研究实验可以得出以下结论:

(1) 在 SBAR 反应器中,接种活性污泥的同时加入粒径在 830 ~ 1 700 μm 之间的颗粒活性炭可以加速好氧颗粒污泥的颗粒化进程,缩短颗粒化时间。

(2) 活性炭好氧颗粒污泥具有比传统好氧颗粒污泥更优秀的 TN 去处能力,颗粒成熟,反应器稳定运行后,TN 去除率可以达到 80%。

(3) 活性炭好氧颗粒污泥在 4℃ 的环境下储存 12 个月,经过 14 天的恢复运行后,形态及微生物活性得到全面恢复。较传统的纯活性污泥颗粒恢复时间短且性能恢复更彻底,说明添加的 AC 内核有助于增加好氧颗粒污泥的稳定性及强度,在恢复过程中,对微生物活性提高有促进作用。

#### 参考文献:

- [1] Beun J J, Hendriks A, van Loosdrecht M C M, et al. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 1999, 33(10): 2283 - 2290.
- [2] 王强,陈坚,堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 99 - 104.
- [3] 王新华. 好氧硝化颗粒污泥的性能及储存与解体后的自修复行为研究[D]. 大连理工大学, 2008.
- [4] Mosquera - Corral A, de Kreuk M K, Heijnen J J, et al. Effects of oxygen concentration on N - removal in an aerobic granular sludge reactor[J]. Water Research, 2005, 39(12): 2676 - 2686.
- [5] Wang Q, Du G, Chen J. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(5): 557 - 563.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 张丽丽,陈效,陈建孟,等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 795 - 799.
- [8] Meswain B S, Irvine R L, Hausner M, et al. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge[J]. Appl Environ Microbiol Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(2): 1051 - 1057.