

SBR 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化

胡林林¹, 王建龙², 文湘华¹, 杨宁¹, 钱易¹

(1. 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084, E-mail: hulinlin99@mails.tsinghua.edu.cn; 2. 清华大学核能技术设计研究院环境技术研究室, 北京 100084)

摘要: 在 SBR 反应器中以醋酸钠为碳源, UASB 厌氧颗粒污泥作为接种污泥, 在好氧曝气条件下运行. 通过观察污泥颗粒形态、结构等的变化, 发现在运行中污泥颗粒经历了形态保持、成分置换的过程. 污泥浓度先增加后降低, 在运行 35 d 后逐渐稳定在 5 g/L, SVI 值稳定在 30 ~ 40 mL/g 的水平. 在 40 ~ 60 d 内反应器中颗粒污泥一直占主体成分, 悬浮相浓度低于 0.5 g/L. 在好氧条件下最终颗粒污泥形态、大小稳定, 表明好氧颗粒污泥已经成功获得. 好氧颗粒污泥与接种污泥相比在粒径、沉降速度、含水率以及惰性成分的含量上都有一定的变化. 电镜观察还表明, 原厌氧颗粒污泥中的微生物以球菌为主, 而获得的好氧颗粒污泥中的微生物以丝状菌和杆菌为主.

关键词: 厌氧颗粒污泥; 好氧颗粒污泥; SBR

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)04-0074-04

Cultivation of Aerobic Granular Sludge in SBR by Seeding Anaerobic Granular Sludge

HU Lin-lin¹, WANG Jian-long², WEN Xiang-hua¹, YANG Ning¹, QIAN Yi¹

(1. State Joint Key Lab of Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: hulinlin99@mails.tsinghua.edu.cn; 2. Laboratory of Environmental Technology, Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Anaerobic granular sludge was inoculated to an aerobic SBR, where CH_3COONa was used as the carbon source. Observations on the change of granules' shape and structure revealed that the granules experienced a shape-keeping and component-replacing process. The sludge concentration increased at first 4 weeks and then decreased to reach a constant of 5 g/L at 35 d with its SVI of 30 ~ 40 mL/g. Granular sludge dominated in the reactor and suspended sludge concentration was less than 0.5 g/L during the end of the process. Anaerobic granular sludge, in which spherical bacteria was the main microorganism, was successfully developed to aerobic granular sludge in which filamentous and bacillus bacteria were the dominant microorganism.

Key words: anaerobic granule sludge; aerobic granule sludge; SBR

过去的 20 多年中, 研究者对厌氧颗粒污泥作了很多研究. 在 UASB(upflow anaerobic sludge blanket)反应器中, 由于颗粒污泥的形成, 反应器 COD 处理负荷可达到 $40 \text{ kg} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{[1]}$, 这样的负荷是好氧反应器无法达到的.

颗粒污泥的巨大作用引发了研究者对好氧条件下获得颗粒污泥的兴趣. 在好氧条件下, 颗粒污泥的获得至少也会带来 2 个明显的好处: 沉降性能的改善和污泥浓度的提高. 但到目前为止, 有关好氧颗粒污泥的研究报道还比较少, 现有的研究主要集中在荷兰 Delft 大学和新加坡南洋理工大学, 他们都是以某些好氧污泥作为接种污泥, 围绕颗粒形成的过程、机理以及获得的颗粒的特性等展开研究^[2~7]. 尽管研究取得了明显的进展, 但总体来说, 以好氧污泥作为接种污泥获得好氧颗粒的过程仍然带有一定的偶然性, 尚未能建立确定而有效的颗粒污泥培养途径.

实际上厌氧颗粒污泥的研究已经比较成熟, 厌氧颗粒污泥甚至可以规模生产作为商品出售^[8]. 厌氧颗粒中的惰性成分作为菌体附着的核, 对颗粒化起着关键作用, 而如何实现有效地聚集也正是好氧条件下需要解决的主要问题. 如果厌氧颗粒污泥在好氧条件下能够稳定而且较快地转化为好氧颗粒污泥, 那么好氧颗粒污泥培养的问题将迎刃而解. 对于这个过程, 研究者也有过报道^[9~11], 但这些报道没有很深入地研究整个转化培养过程以及这个过程的稳定性. 因而对于厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化的过程, 还有进一步探索研究的意义.

1 试验材料和方法

1.1 试验装置及流程

试验装置如图 1 所示.SBR 反应器为有机玻璃柱制成,有效体积 5 L.用气泵和曝气砂头供气,通过流量计控制曝气量在 60 L/h.反应器温度通过温控装置稳定在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$.SBR 反应器各阶段的操作变换都通过时间控制器进行控制.反应器运行周期为 6 h,其中进水 3 min,曝气运行 5.5 h,静置沉淀 10 min(第 35 天起改为 5 min),排水以及闲置共 17 min(后相应改为 22 min).每周期排水 4 L,即反应器每周期处理水量为 4 L.

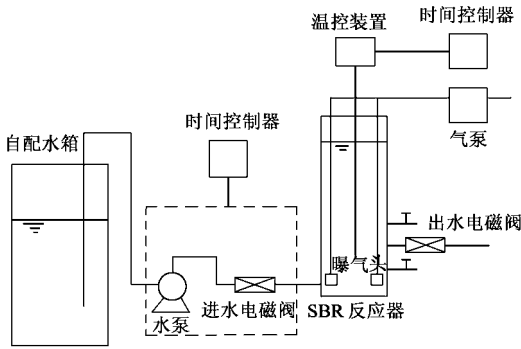


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment installation

1.2 试验废水与接种污泥

试验废水采用人工配水.以醋酸钠为碳源,氯化铵为氮源,还包括磷酸二氢钾、碳酸氢钠、硫酸镁、氯化钙以及其它微量元素.试验中 COD 和氨氮浓度分别约为 500 mg/L 和 50 mg/L.接种污泥为唐山啤酒厂 UASB 厌氧颗粒污泥 2 L,接种后反应器中污泥浓

度为 3.23 g/L.接种颗粒呈相对规则的球形或椭球形,黑色,平均直径为 1.1 mm.

1.3 分析监测项目与方法

MLSS、MLVSS、SVI:标准法;溶解氧:YSI MODEL 58 型溶解氧仪(探头型号:MODEL 5739, USA);污泥形态观察:光学显微镜(连接数码相机进行图片拍摄);颗粒微观结构观察:扫描电子显微镜(中国科学院微生物所);污泥平均粒径测定:随机取 50 个颗粒,每个颗粒在显微镜下利用刻度尺读出长度 a 和宽度 b ,单个污泥的粒径 $D = (ab)^{1/2}$,平均粒径由单个颗粒算术平均得到;污泥含水率:污泥干重/污泥湿重,湿重测定利用吸水纸在铝箔上吸干颗粒表面水分后称得恒重,干重测定同 SS;颗粒沉降速度:单个颗粒在 1 L 试管中自由沉降,用秒表读出沉降时间,通过沉降高度和时间求得沉降速度,算术平均后得到平均沉降速度.

2 结果与讨论

2.1 污泥颗粒外观形态变化

接种前颗粒污泥存放了一段时间,因而颗粒四周有一定的污泥碎片.污泥颗粒呈黑色(图 2a),绝大部分圆度都较高,少部分呈规则的椭球状.在好氧条件下运行 1 周后,颗粒呈现缩小的趋势(平均粒径降低),初始污泥碎片逐渐被排出了反应器,悬浊液污泥浓度较低(图 2b).2 周后,颗粒外围的黑色逐渐褪去,表明厌氧微生物逐渐被淘汰,新的好氧微生物群开始形成.绝大部分的颗粒在此时的颜色都是内部黑外部黄(图 2c),此时悬浮相污泥的浓度开始提高.悬浮好氧污泥生长很快.至 3 周后,随着进一步

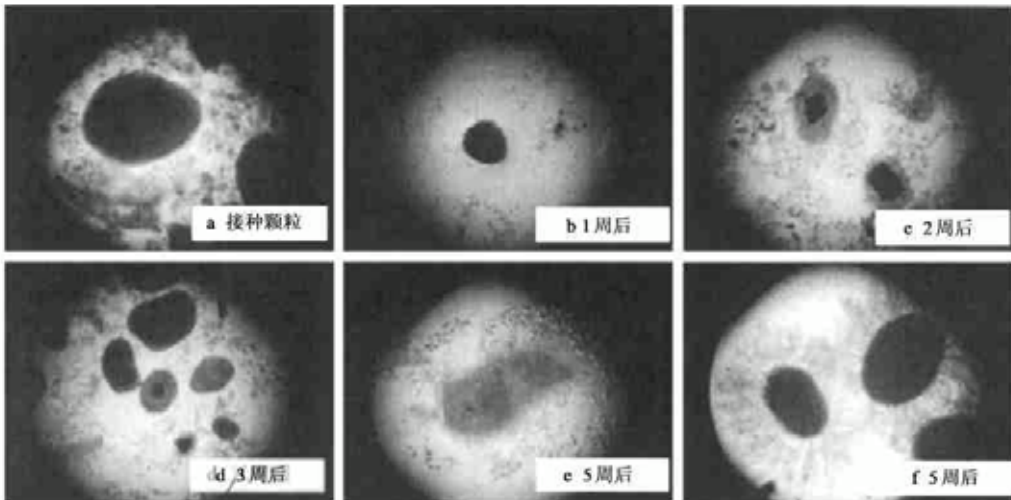


图 2 接种后污泥形态变化 ($\times 40$)

Fig.2 Photographs of the sludge in the reactor on different weeks after inoculation

的运行,颗粒中心的黑色部分也越来越小,最后在一部分的颗粒上已经看不到有黑色的中心(图 2d),反应器中悬浮污泥的数量明显提高,同时出水中的污泥量也在增加.悬浮微生物很快地生长,同时也很容易被反应器淘汰(沉降慢),结果在颗粒上附着的微生物越来越多.到第 5 周,在大部分颗粒的外围,附着了大量的原生动物和丝状菌(图 2e,图 2f).沉降时间导致的选择压力,使悬浮的丝状菌不可避免地被排除出系统,只有缠绕到颗粒表面的丝状菌才能得以稳定地停留在反应器中.因为水力剪切不是非常高(表面上流速 = 7.64 m/h),后期得到的污泥颗粒结构比较蓬松.40 d 以后的好氧颗粒污泥外观近似球状,但相对初始厌氧颗粒污泥来说显得不够规则,颜色已经从黑色转变为浅黄色,但平均粒径变化不很明显.

反应器中污泥浓度的变化如图 3 所示,初始阶段厌氧生物减少,好氧生物增长,但好氧微生物的增长速度很快,因而在污泥浓度的总量上有明显地提高,最高的时候 MLSS 达到了 8 g/L;4 周以后,由于悬浮的微生物不断被排出反应器,只有能够附着在颗粒污泥上的微生物能够稳定地在反应器中存在,因而 MLSS 逐渐下降,在 40 ~ 60 d 内逐渐稳定,平均值为 5 g/L,此时悬浮相的污泥浓度很低(< 0.5 g/L),反应器中占主导的微生物是缠绕在颗粒上的丝状菌以及丝状菌上附着的大量的杆菌.在 40 ~ 60 d 内,随着 SS 值的稳定,SVI 值也逐渐稳定在 30 ~ 40 mg/L.

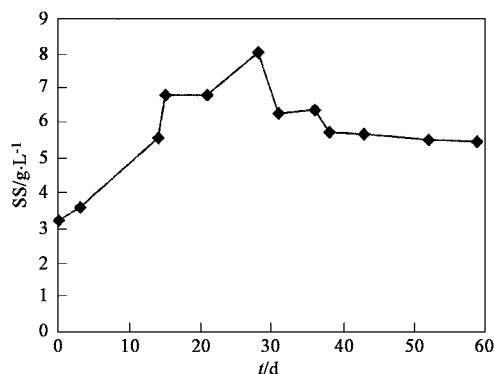


图 3 反应器中污泥浓度变化

Fig. 3 Change in sludge concentration in SBR reactor

可以看出,厌氧颗粒污泥在好氧条件下经历了形态保持,成分置换的过程.厌氧颗粒污泥起类似载体的作用,尽管原来的颗粒成分似乎已经不复存在,但它本身作为“载体”,使颗粒形态得以保持.很可能是由于原颗粒中的无机物质或者粘性物质得到了保持并发挥了作用,导致好氧微生物将厌氧微生物“置换”,而整体形态未发生明显变化.

2.2 污泥颗粒微观结构的变化

接种污泥表面平滑,但有一些洞眼,整体结构致密(图 4a).高倍放大下($\times 6000$),可以看到颗粒上的微生物以球菌(主要是八叠球菌)为主(图 4b),主导微生物应该是厌氧颗粒污泥中常见的产甲烷菌.好氧条件下运行后得到的颗粒外观结构也比较致密(图 4c),但明显可以看到,颗粒外部缠绕有大量的丝状菌.放大 8000 倍时,可以看到在每一个菌丝上

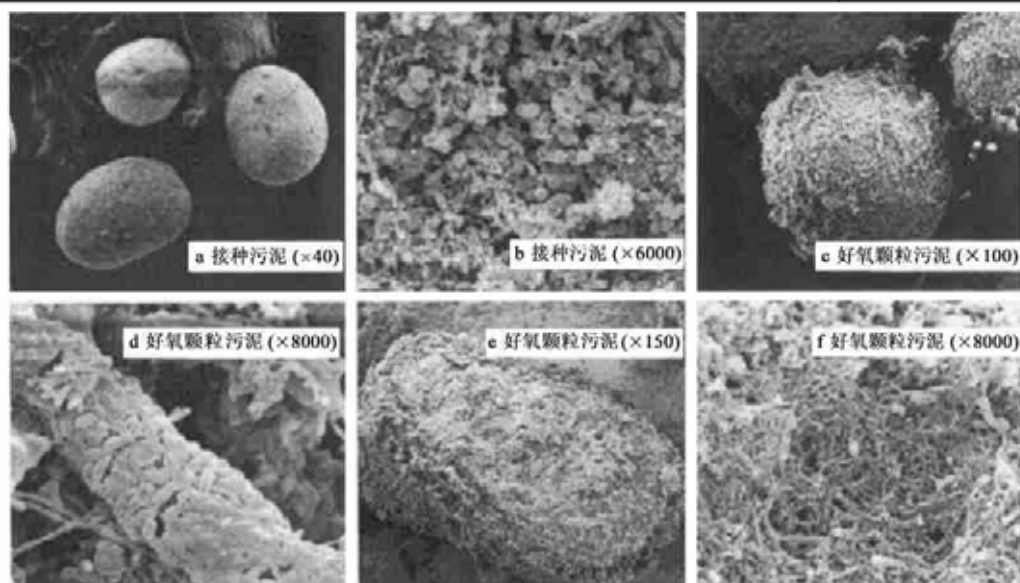


图 4 接种污泥与好氧颗粒污泥电镜照片

Fig. 4 Scanning electron microscopy photographs of the inoculated sludge and aerobic granular sludge

都附着有大量的杆菌,在菌丝上可以清晰地看到有大量的粘液状物质(图 4d),杆菌很可能是因为这些粘液物质的存在才能够紧密地附着在菌丝上.从切开的颗粒剖面来看,外部和内部有一圈明显的分界线(图 4e),表明污泥颗粒内外有着不同的结构特点.进一步的观察表明,丝状菌以及附着其上的杆菌主要集中在颗粒的外侧,而颗粒的内部比较散乱,空隙率较高,以丝网状物质为主,没有观察到大量微生物的存在(图 4f),可能由一些代谢物质和无机物质组成.

2.3 污泥颗粒物理性质的变化

(1) 粒径 接种厌氧颗粒污泥的平均粒径为 1.1 mm.好氧颗粒因为外部缠绕有较多的丝状菌,同时含水率也稍高,因而边界相对接种污泥比较模糊,给测定结果带来稍大的误差.最终好氧颗粒平均粒径为 1.2 mm,与初始值相差不大.好氧颗粒粒径相对比较均匀,多次测定结果中观察到的颗粒最小粒径为 0.5 mm,最大粒径接近 4 mm,其中 70 % 以上的颗粒在 0.6 ~ 1.4 mm 的范围.常规厌氧颗粒污泥的粒径范围为 0.14 ~ 5 mm^[1],获得的好氧颗粒污泥也在这个范围之内.

(2) 污泥含水率 接种污泥含水率为 92.7 %,获得的好氧颗粒污泥平均含水率为 94.3 %.假如其中的非水分含量变化不大的话(实际上会稍有变化),则单个污泥的重量大致提高了 28 % 左右.

(3) 沉降速度 初始颗粒的沉降速度平均值为 72 m/h,获得的好氧颗粒污泥平均沉降速度为 38.4 m/h,相对有了较大的降低,这个结果和其含水率的增加相符合.测量过程中好氧颗粒的沉降速度变化范围为 22 ~ 60 m/h,而厌氧颗粒污泥的正常沉降速度范围为 18 ~ 100 m/h^[12],获得的好氧颗粒污泥也在此范围之内.

(4) VSS/SS 接种污泥初始值为 0.57,表明接种污泥中生物含量相对较低.运行后 VSS/SS 值逐渐提高,最后 1 周的平均值为 0.71,但仍低于正常好氧污泥的平均值(同期实验采用同样进水获得的好氧絮体污泥 VSS/SS 值在 0.8 ~ 0.9 的范围).这表明好氧颗粒污泥中活性成分相比接种颗粒有了一定提高,但惰性成分的含量仍较普通好氧污泥要高.

3 结论

(1) 厌氧颗粒污泥在好氧条件下经历了形态保持,成分置换的过程.

(2) 由于好氧颗粒污泥的形成, SBR 反应器中的污泥浓度稳定在 5 g/L, S_{VI} 值稳定在 30 ~ 40 mL/g 的水平.

(3) 初始厌氧颗粒污泥中的微生物以球菌为主,形成的好氧颗粒污泥外部有大量的丝状菌,丝状菌上附着有大量的杆菌,几乎观察不到球菌的存在.

(4) 好氧颗粒污泥与接种污泥相比,粒径略有增大;含水率增大;沉降速度降低;活性成分的含量提高.

参考文献:

- [1] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京:中国轻工业出版社,1998. 126 ~ 127.
- [2] Morgenroth E, Sherden T, Van Loosdrecht MCM, *et al.* Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1997, 31(12): 3191 ~ 3194.
- [3] Beun JJ, Hendriks A, van Loosdrecht MCM, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1999, 33(10): 2283 ~ 2290.
- [4] Beun JJ, van Loosdrecht MCM, Heijnen JJ. Aerobic granulation[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(4): 41 ~ 48.
- [5] Tay JH, Liu QS, Liu Y. Aerobic granulation in sequential sludge blanket reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2002, 46(4-5): 13 ~ 18.
- [6] Beun JJ, van Loosdrecht MCM, Heijnen JJ. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor[J]. *Water Research*, 2002, 36: 702 ~ 712.
- [7] Tay JH, Yang SF, Liu Y. Hydraulic selection pressure-induced nitrifying granulation in sequencing batch reactors[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, 59: 332 ~ 337.
- [8] 王凯军, 左剑恶等. UASB 工艺的理论及工程实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000. 166 ~ 174.
- [9] 竺建荣, 刘纯新, 何建中, 等. 厌-好氧交替工艺的生物除磷特性研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(4): 394 ~ 398.
- [10] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究[J]. *环境科学*, 1999, 20(2): 39 ~ 42.
- [11] 卢然超, 张晓健, 张悦, 等. SBR 工艺运行条件对好氧污泥颗粒化和除磷效果的影响[J]. *环境科学*, 2001, 22(2): 87 ~ 90.
- [12] Schmit E, Ahring BR. Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 49(3): 229 ~ 246.