



颗粒污泥技术在污水处理中的应用研究进展

仲海涛¹, 胡勇有², 张宪宁¹, 崔理华¹

(1.华南农业大学资源与环境学院, 广东 广州 510642; 2.华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 颗粒污泥是微生物自凝聚形成的小球。一般将其分为厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥分别进行研究。文章将颗粒污泥作为一种特殊的处理工艺,对其在好氧和厌氧条件下在污水处理中的应用研究进展加以综述。并详细介绍了颗粒污泥的特点,特种颗粒污泥的培养及其在 COD 去除、脱氮、降解毒性物质和重金属吸附等方面的应用,并对其应用前景进行了展望。

关键词: 颗粒污泥; 好氧颗粒污泥; 厌氧颗粒污泥; SBR; 脱氮; 毒性物质

中图分类号: X3

文献标识码: A

文章编号: 1004-8642(2006)04-0035-04

Research of Applying Granule in Wastewater Treatment Processes

ZHONG Hai-tao, HU Yong-you, ZHANG Xian-ning, CUI Li-hua

Abstract: Granular sludge is one kind of self flocculation of microbes discovered in wastewater treatment. According to the optimum growing environment of microbes, granules can be grouped as anaerobic granule and aerobic granule. For a long time, researchers have studied the effect of wastewater treatment by microbes under anaerobic or aerobic conditions respectively. The author regarded wastewater treatment by microbial granule as a kind of treatment process, and summarized its application in wastewater. The character of granule, cultivation of special granule and its application to COD removal, de-nitrogen, toxic chemicals degradation, heavy metal adsorption in wastewater treatment were reviewed.

Key words: Granule; Serobic granule; Snaerobic granule; SBR; Nitrogen removal; Toxin

颗粒污泥是一种在污水处理中发现的微生物自凝聚现象的特殊生物膜。按照微生物生长需氧与否,可将其分为厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥。厌氧颗粒污泥的发现和较早,在上世纪 80 年代初就有报道;而好氧颗粒在 1991 年才有报道。尽管两种颗粒污泥的培养方式存在差异,厌氧颗粒污泥仍可以成功的转化为好氧颗粒污泥^[1],而从理论上讲,好氧颗粒污泥也可转变为厌氧颗粒污泥。文章将介绍颗粒污泥的特点、其最新的研究发展方向和其在各种污水处理中的应用。

1 颗粒污泥的分类和特点

颗粒污泥一般分为好氧和厌氧 2 大类。而按照其在污水处理中的功能和作用又可分为去除有机物颗粒污泥、同步去除 COD 和脱氮颗粒污泥、厌氧氨氧化颗粒污泥、重金属吸附颗粒污泥、降解毒性物质颗粒污泥等。

颗粒污泥具有以下特点:

(1)一般情况下,普通活性污泥法中絮体污泥质量浓度约为 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,而微生物颗粒污泥的质量浓度可达 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,后者是前者的 10 倍。这就大大提高了反应器的容积负荷和微生物浓度,有利于小型一体化生物反应器的开发与利用。

(2)颗粒污泥具有很好的沉降性能,其沉速为 $50 \sim 90 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,而絮状污泥则在 $10 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。污泥沉降性能的提高,将大大减小沉淀池体积。

(3)颗粒污泥内部存在很大的基质浓度梯度,也就给微生物提供了更多样的微环境,可以更好的发挥种群协同代谢作用,强化对难降解物质的降解能力。而对于好氧颗粒污泥来说,由于溶氧浓度梯度的存在,在颗粒内部为兼氧或厌氧区,而外部为好氧区(如图 1),形成厌氧和好氧紧密连接的微反应区,能够以最高的效率完成需要好氧和厌氧条件下协作完成的降解,如同步硝化反硝化(SND)。

2 颗粒污泥对 COD 的去除

一般好氧处理工艺中,COD 有机容积负荷(OLR)只有 $2 \sim 3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。而在形成好氧颗粒污泥的 SBR 反应器中, $\rho(\text{MLVSS})$ 可以达到 $6 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,

收稿日期:2006-01-08

基金项目:广东省科技攻关项目(C31502);广州市科技攻关项目(010448100)。

作者简介:仲海涛(1978-),男,工学硕士,助教,主要研究方向水污染控制和厌氧处理技术。

OLR可达4~7.5 kg·(m³·d)⁻¹。部分好氧颗粒污泥去除COD的研究结果见表1。

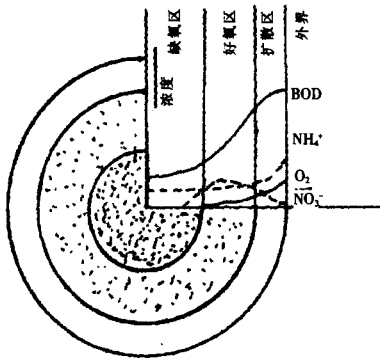


图1 好氧颗粒污泥示意

表1 好氧颗粒污泥去除COD的研究结果

反应器	种泥	负荷 (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	去除率/%	进液	参考文献
SBR	厌氧颗粒污泥	4.8	>85	自配葡萄糖废水	[2]
SBR	絮状污泥	5.9	90	牛奶废水	[3]
SBR	SBR絮状污泥	7.0	85~95	工业废水	[4]
SBR	絮状污泥	7.5	-	自配乙醇废水	[5]
SBR	二次澄清池污泥	4.8	>88	自配葡萄糖废水	[6]
SBAR	絮状污泥	2.5	-	自配乙酸盐废水	[7]
IC-SBAR	厌氧颗粒污泥	14.12	90	模拟废水	[8]

好氧颗粒污泥的最高OLR是在以葡萄糖为基质的实验中获得,在处理水温为25℃,进水COD为5 000 mg·L⁻¹时,COD负荷高达15 kg·(m³·d)⁻¹,而且COD去除率达92%^[9]。而厌氧颗粒污泥反应器可以达到更高负荷,早在1993年,UASB反应器中就报道过40 kg·(m³·d)⁻¹的COD负荷^[10]。而最近的研究也表明,在EGSB反应器中,进水COD质量浓度为8 200~9 000 mg·L⁻¹,OLR可达42 kg·(m³·d)⁻¹^[11]。因此对高浓度工业废水的处理,厌氧与好氧颗粒污泥的串联组合将是最佳选择。

3 颗粒污泥脱氮

3.1 厌氧氨氧化(ANAMMOX)颗粒污泥

ANAMMOX是目前已知最简捷和最经济的生物脱氮工艺,特别适用于低碳高氨氮废水,如垃圾渗滤液,污泥上清液等。但ANAMMOX菌生长缓慢,富集较困难,在有机碳源存在时与反硝化菌存在竞争关系。若能形成颗粒污泥,则可以在反应器内大量滞留ANAMMOX菌,提高反应器的总氮负荷和抗冲击能力。而且可以形成反硝化菌与ANAMMOX菌的共生体系,在颗粒外围以COD降解和反硝化作用为主,内部则以ANAMMOX反应为主,从而减少反硝化菌对ANAMMOX菌的抑制作用。相关研究结果见

表2。当没有外加有机碳源时,TN去除负荷最高可达6.4 kg·(m³·d)⁻¹,已经远远超出传统的脱氮工艺,也比以絮状污泥和生物膜ANAMMOX脱氮工艺要高(国内报道脱TN最高为1.96 kg·(m³·d)⁻¹^[12]。

表2 ANAMMOX颗粒污泥的部份研究结果

反应器	接种污泥	TN负荷	去除率	有无碳源	参考文献
厌氧颗粒污泥床反应器	厌氧颗粒污泥	0.77 g·g ⁻¹ ·d ⁻¹	-	有	[13]
上流式反应器	厌氧颗粒污泥	6.4 kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	-	无	[14]
气提反应器	含ANAMMOX菌的颗粒污泥	2.0 kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	88%	无	[15]
UASB	厌氧颗粒污泥	1.25 kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	95%(氨氮)	无	[16]
推流式反应器	好氧絮状污泥	2.56 kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	86%	无	[17]

3.2 好氧颗粒污泥同步去除COD和脱氮

国内对好氧颗粒污泥的研究几乎都集中于其SND脱氮能力。好氧颗粒污泥内部存在氧扩散梯度,具有微氧、缺氧和厌氧区域,从而形成了多种多样的微环境。异养菌、硝化菌和反硝化菌可以在各自适宜的微环境里生长,并协同代谢,实现SND。Jang等^[18]发现,氨氧化菌主要分布在颗粒中外层,硝化反应主要发生在从颗粒表面向内延伸至300 μm的区域。由于有异养菌的存在,好氧颗粒污泥还可以实现有机物与氮的同步去除。部分研究结果见表3。表3中实验都是在SBR中进行,虽然操作条件各有差异,但对COD去除率都在90%左右,大多数实验对氨氮的去除率也高于80%,且出水中几乎无NO_x-N。

表3 好氧颗粒污泥同步去除COD和脱氮的研究结果

有无缺氧阶段	ρ(COD) (mg·L ⁻¹)	COD 去除率/%	ρ(氨氮) (mg·L ⁻¹)	氨氮 去除率/%	出水ρ(NO _x -N) (mg·L ⁻¹)	参考文献
无	416	>90	201	100	2	[19]
无	-	95~98	150	75~90	0.5~1.5	[20]
无	-	90.6	-	82.5	-	[21]
有	-	83.6~92.8	-	82.3~98.5	<1	[22]
有	500	>95	25~150	100	0	[23]

好氧颗粒污泥对氮的去除效率和很多因素有关,目前已对其中一些进行了研究,如N与COD的比例会影响硝化菌、反硝化菌和异氧菌在污泥颗粒内的分布,进而可能影响脱氮效果。而DO则存在一个最佳区域,过高或过低都会对氮的去除产生影响;另有反应器运行条件、pH值、温度、初始COD浓度、氨氮浓度等。另外,除了同步硝化反硝化外,好氧颗粒污泥中还可能发生短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、好氧反硝化和好氧反氨化等脱氮反应(见表4)。

表4 好氧颗粒污泥内可能发生的与脱氮相关的反应

过程发生的部位	ρ(DO)/(mg·L ⁻¹)	过程
颗粒污泥表层	>2	自养硝化
颗粒污泥中间层	1	异养硝化,好氧反硝化,好氧反氨化
颗粒污泥内部	<0.5	厌氧反硝化,厌氧氨氧化



4 颗粒污泥对毒性废水的降解

4.1 好氧颗粒污泥降解苯酚

当进水中苯酚含量较低时,不会对处理工艺产生太大影响,但高浓度的苯酚对微生物有抑制作用,甚至杀死那些本来具有苯酚降解能力的微生物。而颗粒污泥却可以为那些微生物提供有效保护。SBR中分别接种好氧颗粒污泥和絮状污泥降解苯酚的实验表明,好氧颗粒污泥的降解能力要远远强于絮状污泥。甚至当进水中苯酚质量浓度达到 $1\,900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,仍可以保持较高的去除率^[24]。在每天每 m^3 含 2.5 kg 苯酚的负荷下,苯酚被完全降解,而好氧颗粒的外观结构没有明显改变。因此可以利用好氧颗粒污泥对苯酚的强耐受能力来开发高效的处理系统,对含有高浓度苯酚的污水进行处理(如石化废水、制药废水以及农药废水)。

4.2 厌氧颗粒污泥降解五氯苯酚

五氯苯酚(PCP)是一种重要的有机化工原料,常作为防腐剂、杀虫剂和消毒剂,因为剧毒,被美国环保局列为优先控制污染物。其在厌氧和好氧条件下都可以生物降解,但目前研究以厌氧条件下居多。厌氧颗粒污泥由于具有良好的沉降性能,可以为不同的微生物提供良好的生存环境,特别是可以减小有毒物质在颗粒内部的浓度,而被众多研究者看好。现有的相关研究或者用颗粒污泥对含 PCP 废水进行处理,或者在外加碳源的情况下接种絮状污泥培养出具有 PCP 降解能力的特种颗粒污泥,其部分研究结果见表 5。

表 5 厌氧颗粒污泥降解五氯酚的部份研究结果

进水 p ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	容积负荷 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	去除率 /%	碳源	种泥	参考文献
4.5	1.5 ~ 2.25	99%	葡萄糖	制糖废水培养的颗粒污泥	[25]
40~60	88 ~ 97	99%	VFA混合物	VFA和PCP混合培养的颗粒污泥	[26]
8.0	8.3	>94%	葡萄糖	处理啤酒废水的颗粒污泥	[27]
180	220	>99.5%	葡萄糖或VFA	经PCP驯化的厌氧污泥	[28]
100	97.3 ~ 105.6	100%	柠檬酸或啤酒废水	处理柠檬酸废水的厌氧污泥	[29]

表 5 中大多数实验都是在 UASB 反应器中进行,这些实验显示了颗粒污泥的良好性能,在高效降解 PCP 的同时,也可以有效去除 COD。由表 5 可知,目前厌氧颗粒污泥对 PCP 的最大容积负荷为 $220\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$,而进水中的 $p(\text{PCP})$ 高达 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而对厌氧颗粒污泥微生物的毒性作用研究表明,EGSB 反应器中的厌氧颗粒污泥比 UASB 中的对 PCP 有更强的耐受能力。因此,若以经过驯化的活性污泥接种到 EGSB 反应器中应该可以培养出具有更强 PCP 降解能力的特种颗粒污泥。

5 颗粒污泥的其他应用

5.1 颗粒污泥对重金属的吸附

颗粒污泥比表面积大,孔隙度高,其内的微生物可以分泌具螯合作用的胞外高聚物。而且易于固液分离,吸附饱和后,可以很方便的从废水中去除。因此,可用来做生物吸附剂。研究表明,好氧颗粒污泥对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 的最大吸附容量分别达 $270\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $566\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $246\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。也有用好氧颗粒污泥吸附稀土金属铈的研究,其吸附容量可达 $357\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而用厌氧颗粒污泥处理含 Pb 废水的报道显示,在温度 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH 为 6.0,沉降 50 min 后,Pb 的去除率达到 99.3%。

5.2 好氧颗粒污泥实现反硝化除磷

传统的生物除磷是由聚磷菌在厌氧条件下释磷和好氧条件下超量吸磷来实现的,而反硝化除磷是指由反硝化聚磷菌(DPB)在厌氧、缺氧交替环境中的代谢作用来同时完成过量吸磷和反硝化过程而达到除磷脱氮双重目的。实现反硝化除磷能分别节省 50%COD 和 30%氧的消耗量,相应减少 50%的剩余污泥量。因此,具有好氧反硝化除磷作用的好氧颗粒污泥的培养非常有意义。

有研究报道,在厌氧/好氧单级 SBR 系统中,利用好氧颗粒污泥实现了同步除磷脱氮。当进水氨氮、磷和乙酸碳质量浓度分别为 $25\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $8\sim 15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100\sim 180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对氨氮、总无机氮、磷、乙酸碳的去除率分别达到 97.8%、89.7%、96.8%、98.8%。

5.3 低 pH 值下厌氧颗粒污泥的培养

某些废水 pH 值较低,若能使产甲烷过程在酸性条件下稳定运行,则可以节省大量费用,国内开展了耐酸厌氧颗粒污泥的培养研究。用中性厌氧颗粒污泥接种,通过逐步降低 pH 值,可以获得耐酸的产甲烷颗粒污泥。在 pH 值为 6.0,进水 $p(\text{COD})$ 为 $4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD 容积负荷为 $7.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时,COD 平均去除率为 90.9%。

6 应用前景和展望

厌氧颗粒污泥工艺已较为成熟,在全世界都有广泛应用。但厌氧微生物生长缓慢,污泥颗粒化需要较长时间。对此,可以采取接种颗粒污泥直接启动的策略来加速反应器的启动。事实上,颗粒污泥已经作为商品在市场上销售,但目前价格较贵,大概 1 t 几千元。随着 UASB、EGSB 等高效厌氧反应器越来越多的应用,颗粒污泥将会越来越容易得到,其价格也会趋向合理。



目前好氧颗粒污泥工艺仍处于实验室研究阶段,未见实际应用的报道。但其启动快、高负荷、高效脱氮、去除 COD 的特性一定会吸引更多的研究者,从而加速其应用进程。阻碍其工业化的主要问题是好氧颗粒污泥的培养条件和其长期运行的稳定性还需进一步摸索,工艺运行参数尚需优化。相信在解决了这些问题后,好氧颗粒污泥工艺一定会广泛应用于实际处理。

总的说,从未来的发展趋势看,好氧颗粒污泥工艺将是应用于城市污水和低浓度工业废水处理的最佳选择。而对于中高浓度有机废水的处理,仍需 A/O (厌氧好氧)工艺的组合。而厌氧颗粒污泥工艺+好氧颗粒污泥工艺,如 EGSB+SBR,则会成为其中最高效,最经济的选择。

[参考文献]

- [1]Hu Lin-lin,Wang Jian-long. The formation and characteristics of aerobic granules in sequencing batch reactor (SBR) by seeding anaerobic granules[J]. Process Biochemistry, 2005 (40): 5-11.
- [2]阮文权,卞庆荣. COD 与 DO 对好氧颗粒污泥同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. 应用与环境生物学报,2004,10 (3):366 - 369.
- [3]Schwarzenbeck N, Borges J M. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005 (66): 711 - 718.
- [4]Belen Arrojo, Anuska Mosquera-Corral. Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors [J]. Water Research, 2004(38):3 389 - 3 399.
- [5]BEUN J J, HENDRIKS A. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 1999, 33(10): 2 283 - 2 290.
- [6]Wang Qiang ,Du Guo-cheng. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force [J]. Process Biochemistry, 2004(39): 557 - 563.
- [7]Beun J J, van Loosdrecht M C M. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor[J]. Water Research , 2002 (36): 702 - 712.
- [8]王芳,杨凤林.不同有机负荷下好氧颗粒污泥的特性[J]. 中国给水排水,2004,20(11):46 - 48.
- [9]Moy B Y P, Tay J H. High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules[J]. Letters in Applied Microbiology, 2002, 34 (6) : 407 - 412.
- [10]Lettinga G, Hulshoff Pol L W. Biological wastewater treatment, Anaerobic treatment,Department of Environmental Technology [M]. Wageningen Agricultural University: The Netherlands, 1993.
- [11]左剑鐸,王妍春. 膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器处理高浓度自配水的试验研究, [J]. 中国沼气,2001,19(2): 8 - 11.
- [12]胡宝兰,陈旭良.两种 ANAMMOX 反应器性能的对比研究 [J]. 环境科学学报,2005,25(4): 545 - 551.
- [13]Ahn Y H, Kim H C. Nutrient removal and microbial granulation in an anaerobic process treating inorganic and organic nitrogenous wastewater[J]. Water Science and Technology, 2004, 50(6): 207 - 215.
- [14]Imajo U Tokutomi, Takaaki. Granulation of Anammox microorganisms in up-flow reactors[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(5/6): 155 - 163.
- [15]Dapena-Mora A Campos J L. Stability of the ANAMMOX process in a gas-lift reactor and a SBR [J], Journal of Biotechnology, 2004(110): 159 - 170.
- [16]左剑鐸,杨洋.厌氧氨氧化工艺在 UASB 反应器中的启动运行研究[J].上海环境科学,2003,22(10): 665 - 669.
- [17]刘寅,杜兵.厌氧氨氧化菌的培养与推流式反应器厌氧工艺[J].环境科学,2005,26(2): 137 - 141.
- [18]Jang A, Yoon Young-Han. Characterization and evaluation of aerobic granules in sequencing batch reactor[J]. Journal of Biotechnology, 2003(105): 71 - 82.
- [19]阮文权,陈坚.同步脱氮好氧颗粒污泥的特性及其反应过程[J].中国环境科学,2003,23(4): 380 - 384.
- [20]黄玉峰,张丽丽. SBR 中好氧颗粒污泥的培养与除污效能 [J]. 中国给水排水,2005,21(2),53-55.
- [21]Li Xiao-Ming, Xie Shan. Cultivation of aerobic granular sludge and its application in simultaneous nitrification and denitrification[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2004(14): 104 - 108.
- [22]杨麒,李小明. SBR 系统中同步硝化反硝化好氧颗粒污泥的培养[J].环境科学,2003,24(4): 94 - 98.
- [23]Yang S F, Liu Y. A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater [J]. Journal of Biotechnology, 2003(106): 77 - 86.
- [24]Jiang H L, Tay J H. Aggregation of immobilized activated sludge cells into aerobically grown microbial granules for the aerobic biodegradation of phenol [J]. Letter of Applied Microbiology, 2002(35): 439 - 445.
- [25]Hendriksen H V, Larsen, S. Influence of a supplemental carbon source on anaerobic dechlorination of pentachlorophenol in granular sludge[J]. Applied Environmental Microbiology, 1992(58): 365 - 370.
- [26]Wu W M. Performances of anaerobic granules for degradation of PCP[J]. Applied Environmental Microbiology, 1993, 59 (3): 389 - 397.
- [27]周岳溪,张寒霜.升流式厌氧污泥床处理含五氯酚废水工艺的研究[J].1998,19(4): 33 - 35.
- [28]徐向阳,屠明.厌氧颗粒污泥降解五氯酚活性的研究[J].应用与环境生物学报,1996,2 (4): 398 - 404.
- [29]徐向阳,杜宇峰.降解五氯酚(PCP)厌氧生物反应器启动过程的特性研究[J].太阳能学报,1999,20(4): 408 - 416.

(责任编辑 朱鼎一)