# 厌氧 – 好氧周期循环条件下厌氧 快速吸收有机物的研究

# 王 暄,季 民,王景峰,杨造燕,刘 壮

(天津大学环境科学与工程学院,天津 300072)

**摘** 要:采用单级 SBR 反应器,分别对葡萄糖、乙酸钠配水及实际城市污水进行厌氧快速吸收试验,研究了以非稳态理论为基础的厌氧快速吸收新工艺在厌氧 – 好氧周期循环条件下有机物的厌氧快速吸收效果。结果表明,3种水质均可获得良好的厌氧吸收效果:好氧5h,厌氧1h,3种水质的厌氧 COD 去除率分别为 80% ~90%、80% ~85% 及 60% 左右。通过对磷酸盐、细胞内糖的变化及有机物厌氧吸收效果的分析,确定内糖(糖原)为该工艺厌氧吸收有机物的主要能量来源。同时,对该工艺中厌氧 – 好氧周期循环条件下形成的好氧颗粒污泥及其基本特性进行了探讨。

关键词:非稳态; 厌氧快速吸收; 胞内储存物质; 好氧颗粒污泥

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2005)02-0322-06

#### Anaerobic Fast – Absorption of Organics Under Alternatively Anaerobic / Aerobic Conditions

WANG Xuan, JI Min, WANG Jing-feng, YANG Zao-yan, LIU Zhuang

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** New anaerobic fast – absorption process under alternative anaerobic/aerobic conditions based on non – steady state theory is described in this paper. Three sequencing batch reactors (SBR), fed with glucose, acetate synthetic wastewater and municipal wastewater, respectively, were used to investigate the anaerobic fast – absorption performance of organic materials under alternating anaerobic/aerobic condition. The results showed satisfactory anaerobic absorption effects were achieved under all the three substrate: anaerobic COD removal rate of glucose was up to over 80% under the condition of 3 h aerobic and 0.5 h anaerobic; and anaerobic COD removal rate of acetate and municipal wastewater was about 80% ~ 85% and 60%, respectively, under the condition of 5 h aerobic and 1 h anaerobic. On the basis of measuring and analyzing the variation of COD, phosphate and intracellular carbo-hydrate, it was verified that in both carbohydrate and non – carbohydrate substrate conditions, intracellular carbohydrate (glycogen) was used as the main energy source of organics anaerobic absorption and intracellular polymers storage. Moreover, aerobic granular sludge under alternation anaerobic/aerobic condition and its properties was described. The appearance of granular sludge under all the three substrate showed that the new process could be useful in improving the granulation of activated sludge. **Keywords**: non – steady state; anaerobic fast – absorption; intracellular storage polymers; aerobic granular sludge

污水生物处理的效率主要依赖于微生物聚体的 新陈代谢功能和形态结构。前者属于生物处理的本质 问题,只有依靠强大的代谢能力才能将污染物质转化 为新生物体或无害的最终产物;后者则是处理系统有 效运行的保证,即要求微生物群体以适当的形态结构 存在,以获得良好的泥水分离效果。非稳态生物处理 技术简言之即根据污水处理的要求,人为地创造一系 列变化的环境条件,提供一种有规律的周期反复的刺 激,以充分发挥微生物的的代谢调节功能,提高微生 物的适应性及活性,改善污泥沉降性能,从而改善处 理效果。本文研究的厌氧快速吸收工艺就是以非稳态 理论为基础创建的污水处理新工艺<sup>[11]</sup>。

近年来,研究者在对生物除磷系统的研究中,发现一个值得注意的现象:厌氧阶段无论释磷与否,在 厌氧-好氧周期循环系统中,微生物都能在很短的厌

收稿日期: 2004-07-30

基金项目:国家自然科学基金(59778920);教育部天南大合作项目"废 水与微污染水处理创新技术研究"

**作者简介:**王 暄(1975一),女,天津大学环境学院环境工程专业博士 研究生,主要研究方向为污水生物处理。

E - mail: wrqy@ eyou. com

氧时间内吸收、储存大量的有机物,使液相中有机物 浓度下降到接近甚至达到排放标准。这就意味着,厌 氧吸收有机物不一定与聚磷有关(且系统中的微生物 也可与聚磷菌完全无关),在厌氧 – 好氧周期变化的 这种非稳态条件反复刺激下,微生物就有可能在较短 的厌氧时间内吸收大量有机物。

经初步研究表明,在厌氧快速吸收工艺中有机物 的厌氧吸收是与微生物胞内储存物质(糖原、PHAs 等)密切相关的<sup>[2,3]</sup>。本文的主要目的是考察以 SBR 反应器为基础的厌氧 - 好氧循环条件下葡萄糖、乙酸 钠(非糖类物质)基质配水及实际城市污水的厌氧快 速吸收效果以及在厌氧吸收过程中微生物胞内糖原 的变化规律,并对本工艺条件下污泥的颗粒化现象进 行初步探讨。

1 试验装置与方法

## 1.1 试验装置及运行方式

采用有效容积为 5.0 L 的单级 SBR 反应器进行 小试研究。好氧时采用微孔曝气器进行曝气, 厌氧时 采用电动搅拌器进行搅拌。反应装置由可编程控制器 (PLC)控制进水、厌氧吸收、沉降、排水、污泥曝气及 闲置等全过程, 根据需要选定运行周期以及各操作阶 段的启闭时间。具体运行方式如图 1 所示。运行参数 根据水质及运行进程有所调整, 见表 1。



#### 图 1 厌氧快速吸收工艺运行程序示意图

Figure 1 Diagram of anaerobic fast – adsorption process in the investigation

#### 表1 葡萄糖配水、乙酸钠配水及城市污水不同阶段主要运行参数

Table 1 Main operating parameters in various process stages fed with artificial glucose, acetate solutions and municipal wastewater

_	葡萄糖配水			乙酸钠配水		城市污水	
运行参数	G – I	G – II	G – III	A – I	A – II	M – I	М – Ш
	(1~18 d)	(19~91 d)	(92 ~ 120 d)	$(1 \sim 71 \text{ d})$	(72 ~ 133 d)	$(1 \sim 9 d)$	$(10 \sim 57 \text{ d})$
进水/min	5	5	5	5	5	5	5
厌氧快速吸收/min	60	60	30	60	60	60	60
沉降/min	30	30	30	30	30	30	30
排水/min	10	10	10	10	10	10	10
污泥曝气/min	420	300	180	420	300	600	300
闲置/min	15	15	15	15	15	15	15
周期总长/min	540	420	270	540	420	720	420
体积交换率/%	70	75	75	60	70	70	75
HRT/min	86	80	40	100	86	86	80
水温/℃	17 ~ 21	21 ~ 27	27 ~ 22	16 ~ 26	26 ~ 20	20 ~ 17	17 ~ 12

注:体积交换率=每周期排水量/反应器总有效体积;HRT=周期内污水在反应器中实际停留时间/体积交换率。

#### 1.2 试验用水

试验分别采用葡萄糖、乙酸钠人工配水及实际城市污水进行厌氧快速吸收试验,人工配水主要成分参见表 2,城市污水取自某城市污水处理厂初沉池出水,COD为 300 mg·L<sup>-1</sup>左右。

# 1.3 分析项目及方法

污泥胞内及胞外糖类物质的分离、测定采用蒸煮 法分离,而后用苯酚 - 浓硫酸法定量测定<sup>[3]</sup>,污泥内 糖用 IC(Intracellular Carbohydrate, IC)表示。其它测定 项目均采用国家环保局颁发的《水和废水监测分析方 法》(第三版)中的标准方法。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 葡萄糖配水厌氧快速吸收试验

接种污泥先经过1周的葡萄糖配水好氧培养再 接种至反应器中。葡萄糖配水反应器共运行120d,根 据运行参数的不同,将该反应器的运行分为G-I、 G-Ⅱ、G-Ⅲ3个阶段,具体运行参数见表1。本文中 运行参数的调整基于在保证一定的有机物厌氧吸收 效果的前提下,尽量缩短好氧时间及水力停留时间 (HRT),以节省外部能耗的原则。

如图 2 所示,采用运行参数 G - I,葡萄糖配水系 统在经过 15 d 左右即完成了驯化阶段,在厌氧 - 好

表注	2 人工配水主要成分	(mg • L <sup>-1</sup> )					
Table 2 Main components of artificial waste water (mg $\cdot$ L <sup>-1</sup> )							
项目	葡萄糖配水	乙酸钠配水					
主要有机成分	葡萄糖 500	乙酸钠 700					
$\rm NH_4Cl-N$	18.5	18.5					
$\mathrm{KH}_2\mathrm{PO}_4-\mathrm{P}$	3.5	3.5					
其他成分	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 90, $CaCl_2$ 30, $KCl$ 20, $MnCl_2$ 0.1,						
FeSO <sub>4</sub> • 7H <sub>2</sub> O 0. 1, CuSO <sub>4</sub> • 5H <sub>2</sub> O 0. 1, ZnSO <sub>4</sub>							



Figure 2 Efficacy for the anaerobic fast – adsorption in the glucose reactor

氧交替运行方式下厌氧 COD 去除率达 60% 以上。第 18 d 缩短好氧时间改为运行参数 G - II后,经过一段 时间的稳定运行,厌氧吸收效果稳步提高,进入稳定 运行阶段;第 23 d 后 COD 去除率稳定在 80% ~90% 之间,实际上,在此运行阶段后期,反应器在好氧 5 h 的前提下,厌氧 20 min COD 去除率即可达 80% 以上; 第 92 d 采用运行参数 G - III (进一步缩短厌氧、好氧 时间),厌氧 COD 去除率起初略有下降,但由于经过 90 d 以上的运行,污泥的厌氧吸收特性已得到较强巩 固,因此几天后去除率就开始回升,并在之后的运行 中一直稳定在 80% 左右;运行第 82 d 进行了水质冲 击负荷试验,进水 COD 浓度提高 1 倍,但厌氧 COD 去除率只略有下降,很快即恢复正常,表明系统中的 污泥具有较强的抗冲击负荷能力。

# 2.2 乙酸钠配水厌氧快速吸收试验

污泥的接种与培养方法同葡萄糖配水,但该培养 过程中污泥产生了非丝状菌膨胀,SVI(污泥指数)由 135 增至 371。乙酸钠配水反应器共运行 133 d,同样 地将运行划分为 A – Ⅰ、A – Ⅱ2个阶段,各阶段的运 行参数详见表 1。

乙酸钠配水反应器运行至第58 d 仍然几乎没有 任何厌氧吸收效果,但污泥的沉降性能有所好转,SVI 由371.9 降至第58 d 的 166.7。有研究表明,厌氧 – 好氧交替刺激的这种非稳态运行方式可以抑制污泥 的丝状菌膨胀<sup>[4]</sup>,从本试验中可以看出这种运行方式 对抑制污泥的非丝状菌膨胀也有着良好的效果;第 59 d, 污泥沉降性能突然变差, 污泥随出水流失严重, 为提高泥量将运行方式改为好氧 SBR。第 65 d 泥量 增长、沉降性能好转后又改回原运行方式。第 68 d 时 测试厌氧吸收效果, 意外的发现厌氧 COD 去除率高 达 53.5%;继续运行至第 71 d, COD 去除率增至 65.1%。如图 3 所示, 第 72 d 调整运行参数,采用 A – II参数运行, COD 厌氧去除率持续增长并一直稳定在 80% ~ 85% 之间。



Figure 3 Efficacy for the anaerobic fast – adsorption in the acetate reactor

### 2.3 实际城市污水厌氧快速吸收试验

接种污泥先经数天好氧间歇培养提高活性后接 种至反应器。城市污水试验共进行 57 d,根据运行参 数地变化将运行划分为 M – I、M – II 2 个阶段,运行 参数见表 1。鉴于实际城市污水水质复杂,获得厌氧 快速吸收效果较易生物降解的葡萄糖配水难度大,因 此启动阶段选用了较长的好氧时间 10 h。随着驯化进 程的继续,污泥性状逐渐稳定,至第 9 d 厌氧 COD 去 除率达 31.1%;第 10 d 调整运行参数,缩短好氧时间 (5 h),厌氧去除率略有下降,随后缓慢升高;第 21 d 厌氧 COD 去除率达 51.0%,经过 21 d 的驯化,污泥 具有了一定的厌氧吸收效果,达到了初步稳定阶段, 此后城市污水的厌氧 COD 去除率稳定在 60% 左右。

# 2.4 厌氧吸收有机物能量来源探讨

厌氧 - 好氧周期循环条件下厌氧快速吸收污水



Figure 4 Efficacy for the anaerobic fast – adsorption in the municipal sewage reactor

325

处理工艺旨在利用厌氧-好氧循环刺激作用,创造一 个无外部碳源、能源的好氧饥饿条件,通过环境刺激 使微生物具有在较短厌氧时间内快速吸收水中有机 物的能力。这种厌氧饱食-好氧饥饿的特殊运行方 式,使系统内微生物具有了特殊的代谢功能,其显著 特征是:微生物细胞体内产生强大的储存能力,可将 营养物质以多聚物的的形式储存在胞内。Loosdrecht 等(1997)指出将营养物质以多聚物的形式储存于细 胞内是微生物固有的一种代谢能力,然而在完全稳态 的环境中却通常没有内部多聚物形成,只有当稳态被 破坏,改为间歇投加基质后,这种储存才表现得尤为 突出<sup>[4]</sup>,可以说是环境刺激激发了微生物的这种潜在 能力。Majone 等(1998)提出储存反应是细胞对环境 (基质浓度)变化最为快捷的适应性调节<sup>[5]</sup>。在饱食 -饥饿周期变化的条件下,如果不能储存基质,微生物 就不得不在较短饱食时间里(进水初期)动用大量能 量来快速生长,而在饥饿期由于没有可利用基质,只 能耗损自身物质来维持基础代谢,终至于不能将正常 的细胞结构保持到下一个周期的饱食阶段。在此环境 下,某些可以通过代谢调节对变化的环境产生适应性 的细菌便逐渐显示出竞争优势,它们以较快的速率在 饱食状态下吸收有机物,由于生长速率,即基质消耗 速率并不直接与吸收速率同步增长,细胞便将吸收的 多余基质转化为某些多聚物(PHAs 或糖原)储存于体 内,当外部基质耗尽、进入饥饿期时,将储存物质作为 碳源和能源进行进一步转化或用于合成代谢。由此维 持一个相对较低、接近稳定的生长速率,摆脱外界基 质浓度变化的干扰,平衡自身生长[4]。

显然,在上述储存胞内多聚物的过程需要消耗能 量,其中除了细菌维持基本生命活动的消耗以外,主 要是基质进入细胞的运输耗能和在细胞内的转化、合 成多聚物耗能。

目前,国内外关于由生物除磷引发的厌氧-好氧 生物处理中厌氧吸收有机物的研究认为,厌氧快速吸 收主要有2种可能的能量来源:聚磷和糖原。前者属 于生物除磷机理范畴;后者来自于对最初生物除磷生 化代谢模式(Comeau,1986)的修正(Arun & Mino等, 1988)以及"G细菌"的发现。研究者们认为:聚磷菌以 聚磷为能量来源的同时,也利用糖原分解为有机物厌 氧吸收和 PHB 合成提供所需的还原力和部分能量; "G细菌"则不具备积累聚磷的能力,完全以胞内糖原 为厌氧吸收的能量来源<sup>[3]</sup>。

如图 5、6、7 所示,稳定运行期葡萄糖配水、乙酸



Figure 5 Profile of phosphate in typical cycle in the glucose reactor



图 6 乙酸钠配水典型磷酸盐周期变化曲线





钠配水及城市污水典型周期内磷量均呈规律性变化: 厌氧时磷量上升,好氧时磷量下降。需要指出,虽然厌 氧阶段出现释磷现象,但浓度的绝对变化差值很小, 均小于 3 mg·L<sup>-1</sup>,厌氧阶段释磷量与吸收 COD 之比 远低于生物除磷系统中正常的比例 0.3~1.5<sup>[2]</sup>,这样 微小的磷释放远远不足以为厌氧吸收有机物提供能 量。因此,可以认为本工艺中聚磷不是厌氧吸收有机 物的主要能量来源。

葡萄糖配水稳定运行期典型周期内糖变化曲线 如图 8 所示。一般细胞结构含糖为 0.1~0.3 左右,主 要作为核酸成分、细胞壁和粘液层存在。G 配水的细 胞内糖水平 IC/MLSS 为 0.3~0.5,细胞内糖水平总 体较高。而且内糖变化特征明显:在厌氧开始 20~30 min 内糖水平上升达峰值,而后又在 10 min 内快速下 降;在好氧阶段,细胞内糖量增长较快,一般在曝气 2~3h 左右内糖上升到最高值,然后开始下降。 乙酸钠配水稳定运行期典型周期内糖变化曲线 如图9所示。可以看出,乙酸钠配水细胞内糖水平一 般低于葡萄糖配水,而且乙酸钠配水厌氧阶段细胞内 糖变化也与葡萄糖配水有较大差异。厌氧初期 COD 以较大速率去除的同时,IC/MLSS 也以较大速率下 降,而后随着 COD 降解曲线趋于平缓,内糖含量降低 速率也呈递减趋势;在好氧段一定曝气时期内,内糖 水平缓慢上升,其上升速率随时间递减,曝气4h后 IC/MLSS 趋于定值,并开始下降。通过相关性检验, 乙酸钠配水厌氧 COD 去除与厌氧段内糖含量减少之 间有良好的相关关系。

城市污水稳定运行期典型周期内糖变化曲线如 图 10 所示。可以看出,该曲线厌氧变化趋势过程较接 近葡萄糖配水的,只是细菌整体含糖水平较葡萄糖配



图 8 葡萄糖配水典型内糖周期变化曲线

Figure 8 Profile of intracellular carbohydrate in typical cycle



图 9 乙酸钠配水典型内糖周期变化曲线

Figure 9 Profile of intracellular carbohydrate in typical cycle





in the municipal sewage reactor

水低。而在好氧条件下,糖原的合成过程持续时间较 长,一般在4h以上,这一点较葡萄糖配水的过程 慢。

鉴于现有的糖类物质测定方法不能有效地区分 多糖(如糖原)和单糖(如葡萄糖),因此认为葡萄糖配 水及城市污水厌氧初期内糖水平的升高是易被细胞 吸收的单糖(如葡萄糖等)进入胞内的结果。乙酸钠配 水中不包含糖类基质,其内糖曲线更能反映胞内糖原 的变化趋势。综上所述,在排除了多聚磷酸盐作为主 要能量来源的情况下,3种水质系统中细胞内糖在整 个周期运行中变化显著,且与有机物的厌氧吸收密切 相关,3种水质下变化的整体趋势都是厌氧时糖原分 解,好氧时合成,因此认为糖原为本工艺中有机物厌 氧吸收的主要能量来源。

此外,本文根据不同水质的厌氧快速吸收启动难 易程度、典型周期内糖曲线的异同、典型周期 pH 变 化趋势的差异(数据未附)等,推测不同有机物进入细 胞的途径以及在胞内进行的转化代谢过程等可能有 所不同,这些问题尚需进一步深入研究。

## 2.5 污泥性状

随着试验的进行,污泥有机物厌氧吸收效果的提高,葡萄糖配水、乙酸钠配水及城市污水污泥的沉降 性能也有着不同程度的改善,如图 11 所示。同时,3



图 11 不同进水水质系统 SVI 的变化



the three reactors tested

个反应器中先后形成了颗粒状的污泥。

(1)外观:葡萄糖配水污泥几乎全部为成熟的颗 粒污泥,浅褐色,粒径0.5~0.8 mm,最大达1.0 mm 左右,镜检污泥呈球形或拟球形,密实且边界清晰;乙 酸钠配水污泥浅黄褐色,大部分呈细小的沙粒状,粒 径约为0.2~0.4 mm;城市污水污泥为灰黑色,因运 行时间较短,刚开始有细小的颗粒出现,镜检分散的 絮状污泥中夹杂着一些较为密实的初期颗粒。

(2)沉降性能:葡萄糖、乙酸钠配水及城市污水反 应器中颗粒污泥均具有良好的沉降性能:葡萄糖配 水颗粒污泥 SVI 维持在 25~30 之间;乙酸钠配水污 泥运行末期 SVI为 40 左右;城市污水污泥 SVI为 60 左右。

(3)生物相:通过光镜观察,除了菌胶团外,葡萄 糖配水及城市污水污泥中存在着大量钟虫、等枝虫、 盖纤虫和轮虫等原生、后生动物,而乙酸钠配水污泥 中无其他指示生物。在扫描电镜下,葡萄糖配水及乙 酸钠配水污泥表面均覆盖有一层粘质覆盖层。此外清 晰可辨乙酸钠配水污泥中优势菌种为四叠或多叠状 的球菌,单个细胞直径为2~3μm。而葡萄糖配水污 泥表面的粘质覆盖层较厚,使得扫描电镜不能清楚地 拍摄到细胞表面结构,但仍可分辨出污泥中占优势的 为球菌与两端钝圆的短杆菌。

目前,国内外关于在厌氧-好氧循环条件下污泥 颗粒化现象的报道尚不多见。此处仅描述了本研究中 颗粒污泥的基本性状,关于颗粒污泥的形成原因及影 响因素将另文探讨。

## 3 结论

(1)采用厌氧快速吸收工艺,对葡萄糖、乙酸钠配水及实际城市污水进行试验,结果表明3种水质均可获得良好的厌氧吸收效果:好氧5h,厌氧1h,葡萄糖配水、乙酸钠配水及城市污水厌氧COD去除率分别

为 80% ~90%、80% ~85% 及 60% 左右;进一步缩短 厌/好氧时间,葡萄糖配水好氧 3 h,厌氧吸收 0.5 h, 厌氧 COD 去除率可达 80% 以上。

(2)通过对试验中厌氧阶段磷酸盐、内糖变化及 COD 去除之间关系的分析,可以认为在糖类或非糖 类基质中,胞内糖元均为有机物厌氧吸收及胞内多聚 物储存的主要能量来源。

(3)在葡萄糖、乙酸钠配水及实际城市污水反应 器中均形成了不同程度的好氧颗粒污泥,可见本工艺的厌氧-好氧循环的运行方式有助于颗粒污泥的形成。此外,本文对颗粒污泥的基本性状进行了描述。

#### 参考文献:

- [1] 杨造燕. 污水处理工艺及其系统[P]. 中国专利: 01136756, 2001.3.
- [2] 杨造燕, 刘 飒, 陈思源. 厌氧快速吸收有机物的两种能量来源研究[J]. 中国给水排水, 1998, 14(5):1-3.
- [3] 刘 壮,杨造燕,王 暄. 厌氧快速吸收有机物的启动能源研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(5):1-4.
- [4] M C M van Loosdrecht, et al. Importance of Bacterial Storage Polymers in Bioprocesses [J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(1): 41 – 47.
- [5] Majone M, et al. Comparison of Carbon Storage under Aerobic and Anoxic Conditions[J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(8-9): 77 - 84.