第8卷 无锡轻工业学院学报 Vol.8
第1期 JOURNAL OF THE WUXI INSTITUTE OF LIGHT INDUSTRY 1989 No.1

厌氧折流板反应器中消化过程模型的研究

陈 坚 伦世仪 李 玮 王 超

（发酵工程系）

摘 要

本文对厌氧折流板反应器(ABR)中内部处理过程、相分离特性以及流体流动模型进行了较为详细的研究，对反应器处理酒糟废水的效能也进行了初步探讨。研究结果表明，ABR具有很高的去除水中SS的能力，其内部存在相分离现象，流体流动模型对单个液相间隔区为单级全混流，整个反应器为串联多釜。ABR对水质的改善表明，它将是第二代厌氧反应器用于处理高SS含量废水的一种有效预处理装置。

主题词 厌氧折流板反应器；流动模型；厌氧消化过程

前 言

厌氧折流板反应器(ABR)是在平流式厌氧滤池[1]和普通折流板反应器[2,3]的基础上发展起来的。开发和研究这种反应器的指导思想是：

能有效地使废水中的悬浮固体沉降并部分被去除；

在连续处理过程中不被堵塞；

改善原水质，从而可作为第二代以滞留生物量为特性的厌氧反应器(如UASB、AF、DSFF等)的预处理装置。

为此，本研究采用酒糟水作为处理对象以考察ABR所具有的性能。酒糟废水是一种高有机物浓度(COD高达40g/l～50g/l)、高悬浮固形物含量(SS高达20g/l～30g/l)的酸性(pH3.6～4.2)废水，由于其高SS含量的特性使其无法直接采用第二代厌氧反应器进行处理[4]。这也是目前一些传统厌氧消化工艺仍然使用的原因[5]。国内一些单位曾试图采用离心法、沉降和过滤法以去除废水中的固形物，但由于离心法存在投资大、运行费用高、离心机磨损严重等缺点，沉降法无法避免较大的占地面积和较长的处理时间且处理效率较低等局限，而过滤法则对这种粘度较大的废水更是难以进行，ABR的研究为解决酒糟废水的污染问题提供了一条途径。

本文1988年4月7日收到。

?1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文主要对 ABR 中内部处理过程、相分离特性和流体流动模型等问题进行较为详细的研究，对反应器处理酒糟废水的效能也进行了一定的探讨。这些研究将有助于阐明反应器的工作原理，为反应器的合理设计和操作提供依据。

1 实验材料和方法

图 1 为实验室所用的装置的示意图。反应器容积为 3.4 升，用有机玻璃制成，在各液相间隔区设有取样口，各沉降仓有排泥口，内部挡板采用PVA软性填料。

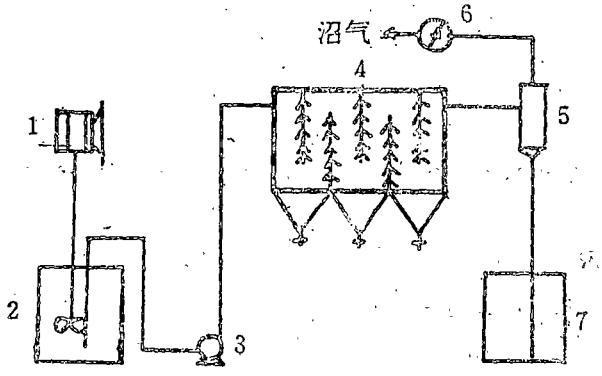


图 1 ABR实验装置示意图

1.电动搅拌器；2.原水贮槽；3.电子螺动泵；
4.ABR；5.气水分离器；6.气体计量表；7.出水贮罐

实验所用的酒糟废水直接取自无锡酶制剂厂酒精车间，其水质成分如表 1 所示。

表 1 酒精糟废水水质成分

分析项目	原酒糟	酒糟滤液
COD(mg/l)	20000～40000	15000～30000
有机酸(mg/l)	2800～3700	2800～3700
悬浮固体(g/l)	17.6～23.7	4.6～6.8
总 氮(mg/l)	400	380
总 磷(mg/l)	0.141	0.136
还原糖(mg/l)	1240	1114
pH	3.6～4.0	3.6～4.0

实验中各项目的测定包括：

化学需氧量(COD)采用半微量快速烘箱法[6]；

悬浮固体(SS)、挥发性悬浮固体(VSS)、挥发性有机酸(VFA)采用标准方法[7]；

总N和总P分别采用凯氏定氮法和硫酸—高氯酸消化法[7]；

还原糖 采用费林试剂滴定法；

F^-离子浓度 采用离子电极法[8]；

气体成分分析 采用气相色谱法；

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

辅酶F_{420}测定　取污泥10毫升，经离心、生理盐水洗涤、水浴加热后，用乙醇提取，再采用比色法测定[9]。

2 实验结果

2.1 ABR中内部处理过程和相分离特性的研究

从稳定运行的ABR反应器各液相间隔区取样(取样时反应器的工作条件为：停留时间0.6天，产气率7.21l/l·d，有机负荷85kgCOD/m^3·d)，测定样品的pH、SS、溶解性COD和有机酸，结果如图2所示。各区的产气情况见表2所示。

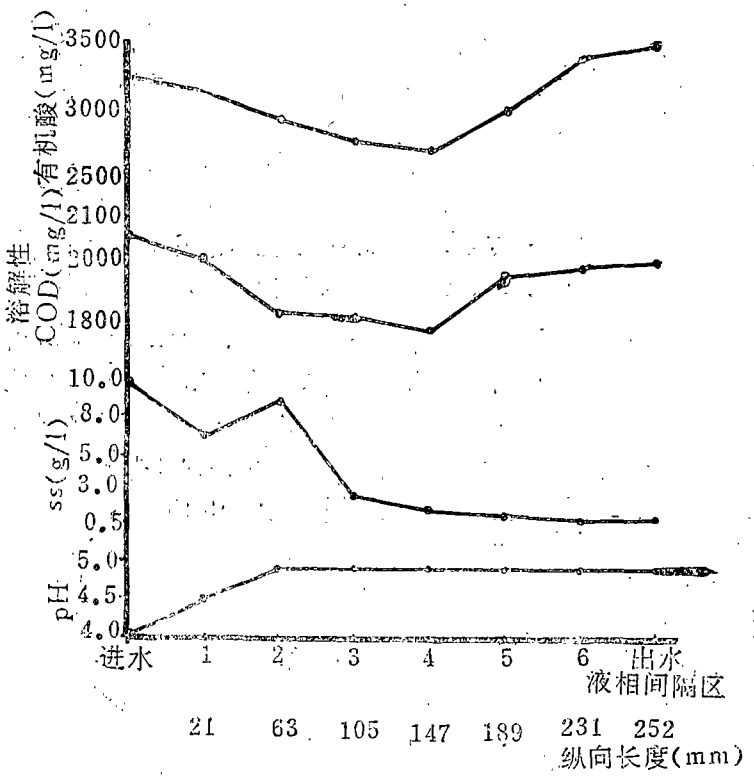


图2　反应器中pH、SS、溶解性COD和有机酸的变化情况

从图2可以看出：填料上的生物膜对废水进行了简单迅速的pH调整，只经一层填料pH值

表2　反应器中各区产气情况观察结果

液相间隔区		1	2	3	4	5	6
产气强度	气泡大小	中等	大	大	较小	较小	较小
	气泡量	中等	多	多	较少	较少	较少

即由4.0上升至5.0、以后各层不变，出水较进水pH提高了近一个单位；SS含量经两间隔即有大部分沉降，其后进一步受到沉降、截留，出水的SS较进水降低得很多，SS去除率达91.2%；溶解性COD在1～4液相间隔区逐步降低，到5～6间隔区又有升高趋势。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图2和表2还可发现，由于酒糟废水酸化极为迅速，进水中有机酸浓度较高，进入反应器后在反应器的前三段有机酸逐步降低，相应的产气强度较大，表现出产气为主的性状。而到后三段，有机酸浓度又逐步增高，产气能力减弱，表现出以产酸为主的性状。因此整个反应器内部存在着产气段与产酸段相分离的情况。

从反应器的前部和后部分别取样测定了单位体积污泥的辅酶F_{420}含量。结果发现反应器前部污泥中辅酶F_{420}含量明显高于后段，它们分别为5.84mmol/l和3.66mmol/l，由此进一步证明了ABR中存在着这种分离现象。

2.2 ABR中流体流动模型的研究

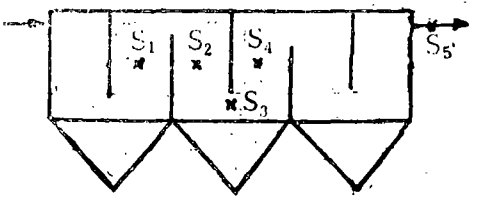


图3 流态实验中取样口位置示意图

S_1、S_2、S_3、S_4、S_5为各取样口

在反应器运行达稳态时，瞬时在进口注入一定量的示踪剂（本试验采用0.435g/lNaF，注入10毫升）然后每隔一定时间从如图3所示的取样口取样，测定废水中NaF浓度$\varphi(t)$随时间变化，即输入信号的展开情况，图4给出了从取样口S_1、S_3、S_5测得的$\varphi(t)$～t的结果。对$\varphi(t)$～t曲线用下列公式[10]即可求出反应器中各区域流动体系的多级全混流模型参数（反应器级数N）和表征各区域流体返混合程度的扩散模型参数Peclet准数

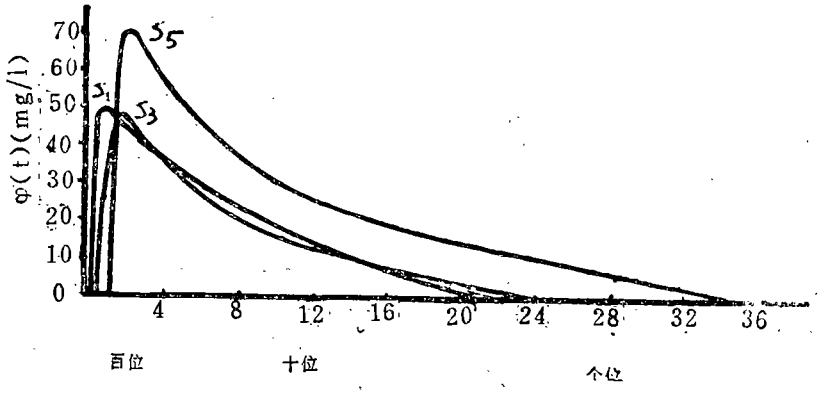


图4 示踪剂浓度随时间的变化曲线

平均停留时间

$$\tau = \sum_{n=1}^{n} ti \times f(ti) \Delta ti$$

Peclet准数$Pe = 2/\sigma^2$

反应器级数 $N = 1/\sigma^2$

计算结果如表3所示。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　流态试验计算结果

取 样 口	S_1	S_3	S_5
τ	6.6	7.1	10.1
N	1.7	1.9	2.2
Pe	3.4	3.8	4.4

从图 4 可以发现，S_1和S_5得到的示踪剂浓度随时间的展开曲线分别与典型的单级连续搅拌釜和串联多釜停留时间分布曲线极其相似[10]，再由表 3 各区域的N值和 Pe 值也可看出，从进水至出水，反应器内部各区域流体流态由趋近于单级连续搅拌釜逐渐向串联多釜过渡。

2.3　ABR处理酒糟废水的效能

经过两个多月的稳定运行，ABR达了预期的效果。其处理酒糟废水的结果如表 4所示。

表 4　ABR处理酒糟废水的结果

运 行 参 数	结　果	运 行 参 数	结　果
有机负荷(kgCOD/m^3·d)	119.2	进水SS (g/l)	15.3
停留时间(day)	0.26	出水SS (g/l)	0.73
过　水COD (mg/l)	31000	SS去除率(%)	94.5
产气率(l/l·day)	8.4	过水VFA(mg/l)	3100
沼气中CH_4含量%	60	出水VFA(mg/l)	3400
过水pH	3.8	出水COD(mg/l)	20987
出水pH	5.0	COD去除率(%)	32.3

显然，原水经ABR处理后，尽管COD下降不多，但水质还是得到了较大的改善，具体表现在pH的提高，有机酸浓度的增大和水中SS的大量去除。而且在达到这一效果的同时反应器运行的有机负荷、HRT、产气率等的结果也都是令人满意的。

3 讨论与分析

了解ABR内部处理过程将有助于完善反应器结构实行有目的地操作，从而达到最佳处理结果。ABR具有很高的SS沉降去除能力的原因在于流体存在的折流与横向流作用；薄层填料的吸附、截留作用；生物膜与底部活性污泥对体系物理化学性质的改善。这三种因素保证了废水中的SS处于较好的沉降和降解条件。此外，反应器出水pH保持在 5.0 左右，既升高了一定的pH值以利于后部厌氧消化处理，又保持了较低 pH下分解 SS 的优势，使溶解性COD的变化具有一定的规律性。

由于辅酶F_{420}是产甲烷细菌特有的辅酶，它在产甲烷细菌中普遍存在[11]，可作为产甲烷细菌数量的相对指标，因此反应器前段F_{420}的差异更证实了由产气情况和有机酸分布发现的相分离现象。导致相分离的重要原因可能是废水流态及其成分对微生物的定向作用。从示踪试验结果来看，ABR中流体流动模型为串联多釜，因而各釜之间物料浓度和反应速度可以不同[9]，这就为产甲烷段与产酸段的分离提供了条件。通过启动，在前几层填料

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上逐渐形成产甲烷菌占优势的菌群生物膜，而进水有机酸浓度较高又为产甲烷菌提供了丰富的营养，结果导致前部首先表现出以产气段为主的特证。此后，产甲烷菌基质谱很窄的特点使得有机酸类大部分降解后，基质的转化主要转到以非产甲烷菌为主的方面，这就使得料液的成分(VFA等)在反应器内存在空间差异。

各大类群厌氧消化微生物在反应器的各个区域利用合适的基质，不断地旺盛生长和繁殖，逐渐形成反应器内的两相分离。相分离的意义在于由于各类微生物生长代谢特性不同，其生化反应动力学也有差异，若将其置于同一环境下，势必相互制约，影响其效能的充分发挥，而如果使产酸与产甲烷作用分开在各自比较适宜的条件下进行，则将有利于强化各个过程，提高反应器的处理效能[12]。

物料在反应器中不同的流动情况直接与反应器内基质浓度、温度和反应时间等工艺条件密切相关，因此对反应器中流体流动模型的研究是反应器放大应用的一个重要环节。实验表明ABR中各液相间隔区流态接近全混流模型，整个反应器流态为串联多釜模型，这种流态形成的主要原因是：由于多段薄层填料形成了各液相间隔区；流体折流与横向流的共同存在、共同作用；有机物降解而产生的气体具有较强的搅拌作用，加强了各区内的混合。由于流态处于这种模型，反应器中各间隔区内菌体与基质接触良好，传质效果较佳且整个反应器对水质变化也有一定的缓冲能力[3]。

ABR对水质的改善主要表现在高效去除水中的悬浮固体，提高处理水的pH值和改变了废水中COD组成成分，经ABR的出水达到了UASB反应器的进水要求，因此，可以预计ABR是第二代厌氧反应器处理高SS废水的有效预处理装置。

参 考 文 献

[1] 王祖宣等.第四届国际厌氧消化(沼气)讨论会.1985；141～149

[2] Bachmann A et al.Water Res.1985；**19**(1)：99～106

[3] Mccarty P L. Anaerobic Digestion 1981；Elsevier Biomedical Press.

[4] Lettinga G et al. Biotech. Genetic Eng. Review. 1984；**21**：253

[5] 汪洋.轻工环保.1987；**2**：19～22

[6] 陶大均等.无锡环境保护.1982；2：41—48

[7] 中国科学院成都生物研究所. 沼气发酵常规分析.北京科学技术出版社.1984

[8] 城卿建设环境保护部环境保护局.环境监测分析方法.1983

[9] 吴唯民.蒋青.中国环境科学.1986；**6**(1)：19～25

[10] 北京大学化学工程系《化学工程基础》编写组.物料在反应器内的停留时间和停留时间分布.化学工程基础. 人民教育出版社，1979；205～220

[11] 钱泽澍. 砷航编. 沼气发酵微生物学.浙江科学技术出版社.1985

[12] 徐洁泉. 中国沼气. 1983；1：45～51

[13] 卢自金. 无锡轻工业学院发酵工程系硕士论文. 1988

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

A Study on the Model of Anaerobic Digestion in a Anaerobic Baffled Reactor

Chen Jian, Lun Shiyi, Li Wei, Wang Chao

Abstract

In this paper, anaerobic digestion process, the characteristics of biological phase separation and the fluid-flow model in the Anaerobic Baffled Reactor(ABR) are studied. The performance of the reactor to treat the alcoholic stillage is investigated. The results show that the ABR has a high removal rate of SS, and the biological phase separation is existed in it. The fluid-flow models are respectively single-stage CSTR and series CSTR for the single liguid unit and whole reactor. It is shown from the improvement of the ABR effluent that the wastewater with high SS may be treated by those so called Second Generation Anaerobic Reactors when the ABR is used as an effective pre-treatments reactor.

Subjectwords, Anaerobic baffled reactor; Flow model; Anaerobic digestion process

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net