



处理啤酒废水的 AFB 反应器启动研究

方春玉, 周 健, 张会展
(四川理工学院生物工程系, 四川 自贡 643000)

摘 要:啤酒废水是高浓度的无毒有机废水, 适宜采用厌氧生物法进行处理。本试验成功用AFB反应器对啤酒废水进行处理的污泥完成驯化培养。废水中COD的去除率可稳定在85%左右, 去除效果良好。

关键词:厌氧流化床 (AFB); 啤酒废水; 活性污泥; 启动

中图分类号: X797 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-5377 (2006) 12-0021-04

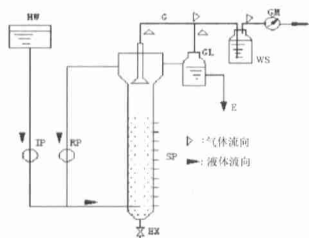
Starting Research on AFB Reactor in Treatment of Brewage Wastewater

FANG Chun-yu, ZHOU Jian, ZHANG Hui-zhan

厌氧流化床 (Anaerobic Fluid Blanket, AFB) 反应器是借鉴化工流态化技术的一种生物反应器。它以固定微生物的小颗粒载体为流化粒料, 以有机废水作为流动介质, 由外界施以动力, 使生物粒子克服重力与流体阻力, 作自由运动, 形成流态化, 在厌氧条件下加速废水中有机物的降解速率。

反应器能否高效地处理废水, 是否能成功快速地启动是关键。一般认为启动是以反应器接种污泥开始, 以反应器中得到一定量的适应待处理废水并且能存留在反应器中的生物活性污泥为结束。严格说来, 启动可分为两个阶段, 第一个阶段是接种污泥在适应废水的过程中经过一定选择而获得一个合理分布的微生物菌群; 第二个阶段是这些菌群能大量地生长、繁殖, 且污泥的活性高。污泥成熟的标志是在设计负荷下出水COD保持恒定, 同时反应器内污泥数量和质量也保持稳定, 这可以被认为是启动期完成。

反应器反应区 (下部筒体) 内径 $\Phi 50\text{mm}$, 沉淀区 (上部筒体) 内径 $\Phi 100\text{mm}$, 反应器总高度1570mm, 总有效容积为3280mL, 反应区的容积为2570mL。采用DDB—600型电子蠕动泵进料, RDB—12型蠕动泵计量回流, LML—2型湿式气体流量计计量产气, 整套试验装置置于温度为 $37\text{℃} \pm 2\text{℃}$ 的恒温室中。



HW: 高位水槽; IP: 进水泵; RP: 回流泵; GM: 气体流量计; GL: 气-液分离器; WS: 水封瓶; EX: 放空阀; SP: 取样口; G: 沼气; I: 进水; E: 出水

图1 厌氧流化床反应试验装置与流程

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为自制的厌氧流化床反应器 (如图1所示)。试验主体设备由透明有机玻璃材料制成, 便于观

1.2 分析方法

COD: 采用COD测定仪测定; BOD: 采用标准BOD测定仪测定; pH: 采用pH仪测定; TN: 碱性过

硫酸钾消解紫外分光光度法；NH₃-N：蒸馏滴定法，NO₂-N：酚二磺酸分光光度法；NO₃-N：分光光度法；污泥的微生物相观察：光学显微镜、数码照相机。

1.3 试验方法

污泥培养采用一次培养法。将30%体积（按反应器容积比计）的污泥和100mL活性炭从反应器顶部投入，进废水至水位达反应器顶部，静置2d后，排掉反应器上部的澄清水，再进废水至水位达反应器顶部后停止进水，用反应器自身的回流水连续循环48h。流速控制在能使反应器AFB颗粒活性炭（GAC）处于流化状态的范围。

2 结果与讨论

2.1 废水来源与水质

啤酒废水主要来源于麦芽生产的洗麦水、浸麦水、麦糟水；糖化过程的糖化过滤洗涤水、发酵过程的洗涤和过滤水，罐装过程的洗瓶水以及成品车间的洗涤水和生活废水等。废水中含有大量的淀粉、蛋白质、酵母菌残体、酒花残渣、残余啤酒、少量酒精及洗涤用碱等，废水有机污染严重。啤酒废水的特点之一就是BOD/COD值高，可生化性强，因此适合采用厌氧生物处理方法。本试验水样取自自贡市某啤酒厂排污口废水，其水质见下表。

啤酒废水水质情况							
指标	pH	水温 (℃)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
范围	6.5 ~11.0	20 ~25	850 ~2300	600 ~1400	300 ~600	30 ~70	5 ~17

2.2 载体

选用密度小、比表面积大、强度适中的GAC为载体，型号为PJ09，18×20mesh，平均直径为0.8mm，表观密度为0.5g/cm³，真密度为1.40g/cm³，共100mL。载体吸附力强，在膜形成初期，能吸住菌体、基质、营养物质，使其不易被冲刷掉从而起到保护作用。在采用表面粗糙程度不同的活性炭时，其成膜的难易程度不同，膜的损失量也不同。表面无光泽的比有光泽的活性炭优先被膜所覆盖。活性炭密度小，降低了床层膨胀的循环速率，减少了生物膜受到的水力冲击，从而保证了已成膜的稳定性。另外，载体浓度对反应器内生物膜的挂膜也很重要，过高或过低的载体浓度都不利于废水的处理。载体浓度与膜厚、COD去除率的关系如图2所示。

从图2可见，在载体质量浓度很低的情况下，即使生物

膜厚度为295um，还是不能达到稳定的COD去除率，但在载体浓度为20~32g/L时，即使只有20%的载体上有77um厚的生物膜，反应器依然能达到稳定的COD去除率（85%）。

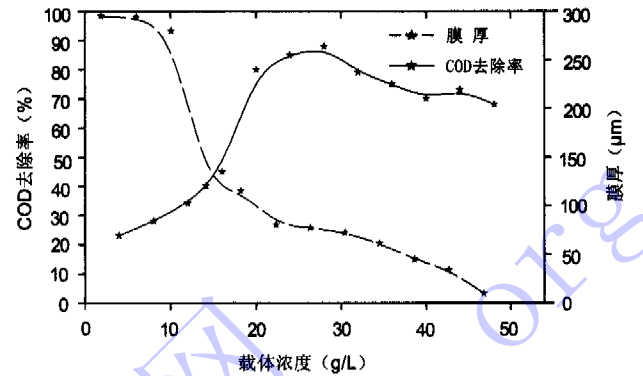


图2 载体浓度与膜厚、COD去除率的关系

2.3 接种污泥

接种污泥的优良特性是厌氧反应器正确而又迅速启动的先决条件。所谓接种污泥的特性是指：污泥的种类（来源）、接种量（SS浓度、占罐体积的百分数）、沉降性能和活性（VSS/SS、比产甲烷活性、辅酶F420）等。

(1) 菌种来源及性质

接种污泥为自贡市某啤酒污水处理厂的厌氧池的剩余活性污泥。污泥为深黑色、味臭、呈胶状结构的亲水性物质。1m³脱水污泥加水后体积膨胀为1.5m³左右，VSS为3.1g/L。

(2) 接种污泥量

清华大学分别对不同接种量的污泥进行实验，发现污泥接种量在11kgSS/m³（反应器体积）时，对于在生产性UASB反应器中迅速培养出颗粒污泥是合适的，这与Lwttinga等人推荐的10~20kgSS/m³相一致。接种污泥量过大，污泥的生长量和流失量基本持平，但出水时泥水难以分离，污泥易被带出流失，且容易形成沟流；接种污泥量过小，启动时运行过高的污泥负荷会导致厌氧消化菌种比例的不平衡，也会对污泥挂膜产生不利影响。因此，我们参考该数据选用平均浓度为30gSS/L的接种污泥，使其有足够的数量来满足培养驯化的需求。培养驯化4天后可清晰地看到污泥沉降在活性炭层上面，多以2~3mm的球形或近球形颗粒存在，颗粒污泥和颗粒活性炭之间存在着附有污泥的生物载体，此处优先生长生物膜。

2.4 容积负荷

容积负荷对COD去除率的影响如图3所示。结果表明，厌氧流化床对容积负荷的变化具有较好的



稳定性。容积负荷在较低的一定范围内变化时,去除率基本不变;当提高到一定程度时,去除率才明显下降。

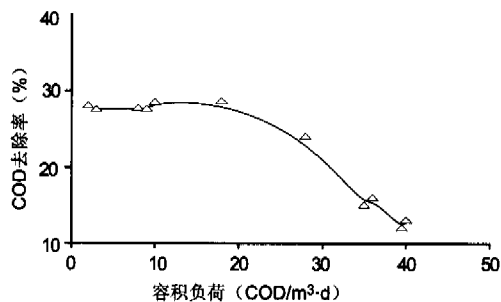


图3 容积负荷对COD去除率的影响

2.5 pH

最适宜产甲烷菌生长的pH值为6.5~7.5,考虑到厌氧消化后分解产生的有机酸有酸化作用,应将进水的pH控制在7.3~8.0,经过自行调节达到适合于甲烷生成的条件。到最后驯化成熟时,出水的pH可在7.3左右。

2.6 温度

温度可以影响酶反应速率,从而影响微生物的生长。厌氧微生物有三类:低温厌氧微生物、中温厌氧微生物和高温厌氧微生物。将试验条件控制在中温微生物范围,结果发现温度为35℃~39℃时试验效果最佳(如图4所示)。本试验温度控制在37℃±2℃范围内。

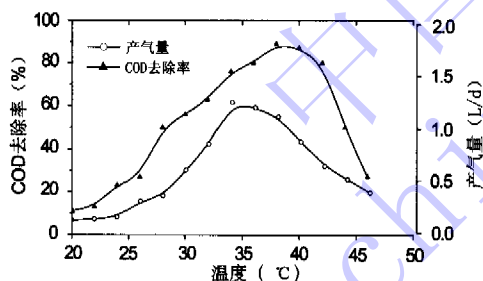


图4 温度与有机物去除负荷、产气量的关系

2.7 营养物质

厌氧消化的微生物主要以产甲烷菌为主,产甲烷菌含有的主要营养物质有氮、磷、钾、硫,生长所必需的微量元素有钙、镁、铁,重金属元素有镍、钴、钼、锌、锰、铜等。

在利用厌氧生物处理工艺处理废水时,所需营养物质的浓度可根据废水中可生物降解的COD浓度和它的酸化程度来估算。估算厌氧过程所需最小营养物质浓度的公式为: $\rho = \text{COD}_{\text{BD}} \times Y_{\rho \text{ cell}} \times 1.14$

式中, ρ 为所需最低的营养元素的浓度 (mg/L); COD_{BD} 为进水中可生物降解的COD浓度 (g/L); Y 为

污泥产率系数; ρ_{cell} 为元素在细胞中的含量 (g/kg干细胞)。

Y 的数值取决于废水是否已经酸化,对于未酸化的废水, Y 可取0.15;对于已经完全酸化的废水,则可取0.03,计算结果在实际应用时还应扩大2倍,以保证在厌氧系统中有足够的营养物质。一般来说 $\text{COD}:\text{N}:\text{P}=200:5:1$,对于基本上未酸化的废水,即当 $Y \approx 0.15$ 时, $\text{COD}_{\text{BD}}:\text{N}:\text{P}$ 可取大约 $350:5:1$ 或 $\text{C}:\text{N}:\text{P}=130:5:1$ 。对于基本上完全酸化的废水,即当 $Y \leq 0.05$ 时, $\text{COD}_{\text{BD}}:\text{N}:\text{P}=1000:5:1$ 或 $\text{C}:\text{N}:\text{P}=330:5:1$ 。对于部分酸化的废水,可依此法进行推算。磷是产甲烷菌合成细胞质膜的重要成分,在启动期投加尿素和磷酸二铵,可使废水中的营养物质充足以促进产甲烷菌的生长。而在正常运行期间,为尽量减少产生剩余污泥,可以少投或不投磷。

由于啤酒废水的成分较为复杂,供微生物生长的营养物质含量丰富,因此一般情况下可不用额外添加营养物质。

2.8 生物膜的形成、性质及镜相观测

(1) 生物膜的形成及性质

生物膜的形成是决定流化床处理效率高低的关键因素之一。微生物附着在载体表面上并形成生物膜,当污水流经载体表面时,污水中的有机物向生物膜内部扩散,膜内的微生物对有机物进行分解代谢和机体合成代谢,从而使废水中的有机物得以降解。

生物膜的形成过程是微生物吸附、生长、脱落等综合作用的动态过程。首先是营养基质和微生物吸附在载体上,然后微生物逐渐增殖,并依靠胞外聚合物等粘性物形成微生物聚合体。胞外聚合物对生物膜起稳定和保护作用。其次,附着在载体上的微生物对有机物进行降解,发生代谢、生长、繁殖等过程,并逐渐在载体的局部区域形成薄的生物膜,其具有生化活性,又可进一步吸附分解废水中有机污染物,直至最后形成一层将载体完全包裹的成熟的生物膜。培养初期,微生物生长缓慢,多数以悬浮污泥的形式存在,且微生物生长需要一段适应时间,前10d,活性炭上几乎看不到生物膜,12d后,部分活性污泥开始出现颗粒化,且颜色由深黑色逐渐变成灰褐色,挂膜开始后,随着时间的增加,微生物不断生长,膜厚也不断的加大,到20d左右,膜厚达到最大,约55μm左右,最后膜的生长与脱落处于一个动态平衡,膜厚不再增加。

影响膜形成的主要因素有载体表面性质、悬浮微生物浓度及悬浮微生物的活性等。



(2) 生物膜中微生物镜相的观测

反应器启动过程中,通过镜检发现,随着菌胶团的形成并逐渐长大,指示生物的种类也有很大的变化。在培养初期,出现滴虫、草履虫等小鞭毛虫;到中期,微生物以累枝虫等原生动物为主;后期,随着菌胶团逐渐长大,指示生物主要以钟虫、线虫等固着型纤毛虫和后生动物为主,并且数量明显增多。

本试验将附膜载体置于载玻片上,移去活性炭,制成薄片样品,在光学显微镜下观察,可见生物膜表面有大量的丝状菌、杆状菌等缠绕组成的菌胶团,其带有一定的电荷,菌胶团中以革兰氏阴性细菌为主。显微镜观察表明,构成生物膜的细菌有多种形态,主要是杆菌、球菌,亦有螺旋菌和丝状菌。除单个存在的细菌外,大部分杆菌与球菌规则排列。当把刮下的生物膜不经涂片直接干燥染色后在光学显微镜下观察,可见各类细菌的分布具有一定的区域性。将生物膜制片后革兰氏染色,发现厌氧流化床中任何部位的细菌都以革兰氏阴性菌为主,其数量可达细菌总数的75%以上。

2.9 处理效果

(1) 氮的去除

废水中的氮一般以有机氮、氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐4种状态存在。废水生物脱氮的基本原理是在有机氮转化为氨氮的基础上,通过硝化作用将氨氮转化为亚硝态氮、硝态氮,再通过反硝化作用将硝态氮转化为氮气从水中溢出,实现废水脱氮的目的。经测定,啤酒废水中的总氮质量浓度为35mg/L,以有机氮为主。其中氨氮质量分数为11.01%,亚硝酸盐和硝酸盐的质量分数为0.57%,其余为有机氮,占88.42%。本试验采用厌氧流化床反应器除氮,对氨氮的去除效果较好,约33%左右,而对总氮的去除率较低,其原因在于AFB对氮的去除主要是通过厌氧微生物的同化作用得以实现的,而厌氧微生物世代时间长,增殖缓慢,对总氮的去除率仅为4%左右。污泥培养驯化过程中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率随时间的变化如图5所示。AFB对整个系统的脱氮贡献主要在于完成对有机氮的氨化作用,使得污水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量分数由10.01%上升到72.76%;而有机氮质量分数由88.42%下降为26.85%。因此AFB作为好氧处理的前处理还是具有一定的实际意义。

(2) COD去除率

污泥培养驯化过程中, COD的去除率随时间的变化如图5所示。

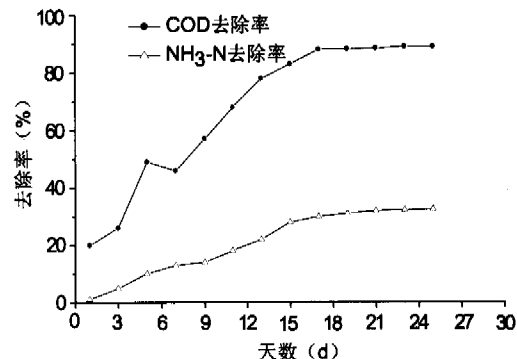


图5 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率随时间变化情况

在培养驯化初期, COD主要来源于啤酒废水中的有机物,但由于微生物还不适应生长,加之数量较少,故COD去除率偏低。随着微生物不断适应生长环境及微生物数量的加大, COD去除率慢慢增加。在第5天呈下降趋势,这是由于污泥中微生物不断增长,菌体细胞变成COD的一部分,故COD去除率略微下降,但随着时间的增加,活性污泥对废水的适应性增强, COD去除率缓慢增长,最后达到相对稳定。在活性污泥培养驯化完成后,其COD去除率一般维持在85%左右。

3 结论

(1) 啤酒废水是高浓度的无毒有机废水, 适宜用厌氧生物法处理。其营养物质丰富, 不需额外添加营养物质就可以进行培养驯化活性污泥。且污泥驯化培养时间较短 (仅25~30d)。

(2) 依据对COD的去除率及微生物生长情况的观察分析, 本试验用AFB反应器对啤酒废水进行处理的污泥驯化培养是成功的, 条件为温度 $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, pH7.3~8.0, 接种量为30%体积 (按反应器容积比计) 的污泥和100mL活性炭。在此控制条件下培养出的活性污泥, 对废水COD的去除率可达85%左右, 去除效果良好, 对减轻生物反应器后续处理单元的负荷具有重要意义。

(3) 采用厌氧流化床反应器除氮, 对氨氮的去除效果较好, 约33%, 而对总氮的去除率较低, 约4%。

参考文献:

- [1] 陈欢林. 环境生物技术与工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 1.
- [2] 国家环境保护局. 环境监测标准分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [3] 刘志杰, 陆正禹, 李静等. 处理啤酒废水的生产性UASB反应器常温下培养颗粒污泥的过程及工艺条件[J]. 中国沼气, 1994, 4 (12): 3-7.
- [4] 马溪平. 厌氧微生物学与污水处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005, 1.
- [5] 朱祖恒, 陈新权. 厌氧流化床生物膜形成及稳定性的研究[J]. 江苏化工, 1997, (5): 20-23.
- [6] 王家玲. 环境微生物学[M]. 北京: 高教出版社, 1988, 124-132.