



UASB 工艺在啤酒废水处理中的应用

匡武^{1,2}, 殷福才¹, 孙世群², 王军¹

(1. 安徽省环境科学研究院 安徽省污水处理技术研究重点实验室, 安徽 合肥 230061;
2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 安徽某大型啤酒厂的工程实践证明,采用内循环 UASB 反应器+好氧工艺处理啤酒废水是可行的。因设计了出水内循环并加装了斜板分离器,在实际调试与运行中 UASB 系统适应 pH 值和温度的范围较宽,运行稳定、处理效率高、能耗低,在春季时系统重新启动可很快得以恢复。

关键词: 啤酒废水; 内循环; UASB 反应器; 斜板三相分离器

中图分类号: X703.1 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2006)16-0062-05

Application of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process to a Brewery Wastewater Treatment

KUANG Wu^{1,2}, YIN Fu-cai¹, SUN Shi-qun², WANG Jun¹

(1. Provincial Key Laboratory of Research on Wastewater Treatment Technology, Anhui Research Academy of Environmental Science, Hefei 230061, China; 2. School of Resources and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The practical engineering of a large-scale brewery in Anhui Province shows that an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with inner circulation followed by an aerobic technique is a feasible process for brewery wastewater treatment. Due to the inner circulation of effluent and the inclined plate separator, the UASB system shows flexibility in pH and temperature variation, stable operation, and high efficiency and low energy consumption in the debugging and operation. The restarting of the system in spring is rapid.

Key words: brewery wastewater; inner circulation; upflow anaerobic sludge blanket reactor; inclined plate gas-liquid-solid separator

随着我国经济建设的发展,经济、有效、节能地解决污水处理问题已是当今环境工程领域最迫切需要研究的课题之一。与其他厌氧生物处理技术相比,升流式厌氧污泥床(UASB)运转费用及构筑物造价均较低,对不同污水的适应性也强,因而越来越受到重视。安徽某大型啤酒厂于2000年建成规模为4500 m³/d的废水处理站,采用“UASB+好氧”联合处理工艺,几年来运行效果良好,环境效益及示范作用较为显著。

1 概述

啤酒生产过程需处理的排水主要为麦糟废水,

糖化、发酵、灌装等车间所排的废液,设备与管道洗涤水,地面冲洗水及来自生活办公区的生活污水等。废水的主要成分有淀粉、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,主要污染因子为COD、BOD₅和SS等,属于中高浓度有机废水。

啤酒生产过程中各工序通常为间歇排水,水量不等,且COD和pH值波动大,一般宜混合后处理。针对啤酒废水BOD₅/COD比值较高(一般为0.5~0.7)、毒性较小的特点,国内外一般采用生化处理工艺,而UASB因具有高效、节能、污泥产量小、占地少、停产后再启动容易等特点,其与好氧串联组合的

处理工艺已在啤酒废水处理中得到了广泛应用,工艺流程如图 1 所示。

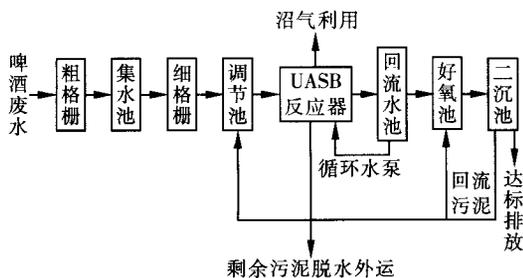


图 1 UASB + 好氧工艺处理啤酒废水流程

Fig.1 Flow chart of brewery wastewater treatment process

2 预处理

啤酒废水中含有大量悬浮物和泥沙等杂质,应先进行预处理。预处理系统一般包括粗格栅、细格栅(常用转鼓格栅)或水力筛、调节(预酸化)池、营养盐和 pH 调控系统。

设格栅的目的是去除粗大固体物和无机可沉固体,保护布水管免于堵塞。同时,不可生物降解的固体在 UASB 反应器内积累会占据大量的池容,池容的持续减少最终将导致厌氧系统完全失效。

调节(预酸化)池除具有调节水质、水量的功能外,还有去除或消解对厌氧过程有抑制作用的物质、改善生物反应条件和提高废水可生化性的作用。实际运行中调节池的液面高度要始终保持在 90% 以上,最低也不低于 80%,目的是提高生物发酵效果,降低 pH 值,增加挥发性脂肪酸(VFA)含量。如在调节池中 VFA 含量偏低,则大部分生物发酵过程就会发生在 UASB 反应器内,结果会导致 pH 值降低(低于 7.0 甚至低于 6.0),不利于厌氧系统的运行。

根据颗粒化和 pH 调节的要求,有时废水需要补充碱度和营养盐(N、P)等,一般设计在 UASB 反应器之前采用计量泵自动投加酸、碱和药剂。

3 改良 UASB 反应器

UASB 反应器的设计目前主要采用负荷设计法(还有经验公式法与动力学参数法),对某种特定废水,反应器的容积负荷应通过试验确定。一般 UASB 反应器的主体分为配水系统、反应区、气液固三相分离系统和沼气收集系统四部分。反应器的高度受水流上升流速与 CO_2 溶解度(可导致酸化)制约,同时考虑到经济与保温等方面的要求,一般将反应器建成半地下式,高度为 5 ~ 10 m。需设置取样

点监控水体 pH 值和温度以保证系统正常运行。

甲烷菌对 pH 值和温度的要求较高,其最佳 pH 值为 6.5 ~ 7.8,最佳温度为 35 ~ 40 °C,一般情况下啤酒废水难以满足这些条件。这就要求废水进入 UASB 反应器之前需进行酸度和温度的精确调节,而这在实际运行管理中是比较困难的。

本例工程设计中增加了一套内循环系统,包括回流水池及回流水泵。UASB 出水进入回流水池,在回流系统的作用下重新回到配水系统或直接回到调节池以调节水位。出水回流可大大提高 UASB 反应器对进水水温、pH 值和 COD 浓度的适应能力。这样,对 UASB 进水的 pH 值和温度的调控仅做粗调即可。

另外一处改进是在三相分离器上部再设一“横向流”斜板分离器,这可进一步防止菌种污泥因三相分离不完全而流失。这种双倍效应的分离器在实践中已证明对提高 UASB 反应器的负荷和缩短初始调试启动时间是非常有效的。因为加设斜板分离器,增加了沼气泡与悬浮污泥、斜板碰撞的几率,提高了污泥自身的沉降性能;同时由于增加了有效分离面积,使得沉淀区域的水力半径大大减少,雷诺数(Re)降低,弗雷德数(Fr)提高,改善了污泥沉淀的水力条件,提高了固液分离效率。

4 防腐要求

选择适当的建筑材料对于 UASB 反应器的持久性和处理能力是非常重要的。UASB 气水交界面的氧化还原电位为 100 mV,而厌氧环境下的氧化还原电位为 -300 mV,这就在气水交界面构成了微电池,形成电化学腐蚀。同时,池体内产生的 H_2S 等物质也会使局部 pH 下降而造成化学腐蚀。

厌氧反应器应该尽可能地避免采用金属材料,一般反应器池壁宜采用钢筋混凝土结构,并在气水交界面上下 1 m 甚至整个池体内壁采用环氧树脂防腐和防止漏气。对一些特殊部件可采用非腐蚀性材料,如进水和排泥管道采用 PVC 管,三相分离器及其上部的“横向流”斜板分离器采用玻璃钢或不锈钢。

5 升流式厌氧污泥床的启动

UASB 反应器启动的最大困难是很难得到足够量的厌氧颗粒污泥作为接种污泥一次投加,而最好的办法是对絮状厌氧污泥加以驯化。密度大的污泥更易于颗粒化,这样在启动调试初期一般不启用内

回流系统,以使较轻的污泥连续地从污泥床流出,而较重的污泥在床内积累并促使其增殖进行颗粒化。

5.1 菌种的选择

快速、高效启动 UASB 的方法是直接一次性地投入足够量的厌氧颗粒污泥,但种泥一般很难获得且价格昂贵。为了便于运输,本例工程调试时使用的是某城市污水厂的脱水消化污泥。在装车运输之前,将拟采用的脱水消化污泥就地过筛(筛网孔径为 5 mm)。如污泥太稠,则应先稀释而后再过筛。

由于所选菌种为脱水消化污泥,在计算污泥投量时,不仅要计算反应器内的污泥浓度,还要考虑脱水消化污泥遇水后的膨胀率,使反应器内的污泥达到一定的高度。

5.2 菌种的投加

在接种污泥之前,先向 UASB 反应器内注水至出水堰溢出处以下 1.5 m,以容纳拟投入的污泥。在加入前,最好先将脱水消化污泥用水稀释成泥浆状(此过程可在调节池内进行,利用水下搅拌机稀释搅拌),而后用泵将污泥注入 UASB 反应器的顶部,同时用细筛网(孔径为 3~4 mm)进行最后的筛滤。

检查已经泵入的污泥量,污泥应达到 3[#] 取样点(SP3),且样品的污泥沉降体积浓度(SV)不应少于 500 mL/L。在加入的污泥量满足要求后,再加水使 UASB 反应器的液位达到溢出口位置和回用水池的溢出口位置。这时,如在 UASB 顶部发现有悬浮物存在,应及时用细孔筛网捞掉。

5.3 负荷的增加

污泥注入 UASB 反应器后,一般情况下初始进水量在设计 COD 负荷 5% 的条件下进行[或调低至 0.10 kgCOD/(m³·d)]。启动运行时,应注意检查取自 SP1~SP6 取样点样品的 pH 值和温度,若 pH 值超过要求范围(6.5~7.8),则在前处理阶段自动调节 HCl 和 NaOH 的加入量,以使出水 pH 值保持在 7.0 左右。每天要检查 SP3 取样点水样和出水的 VFA,如果两处的 VFA 均小于 500 mg/L,则可增加 COD 负荷 0.5 kgCOD/(m³·d)。如 SP3 点水样和出水的 VFA 量稳定(不能太大,一般为 150~200 mg/L),则可增加 20% 的负荷。每次增加 UASB 的负荷后,厌氧池内和出水的 VFA 先上升而后下降,待出水的 VFA 稳定一天后,再次增加 UASB 的负荷。本例工程按此负荷增加程序,经过约 60 d 的启动运行,UASB 的处理能力已达到设计能力的 65%,

经镜检,池内约有 1/4 的污泥形成直径约 1 mm 的颗粒污泥,活性高且沉降性能良好。

5.4 内循环

UASB 内的水流上升速度是由进水量决定的。而在启动初期,为保证较小的负荷,进水量往往都较小。随着负荷的增加和 COD 浓度的不同,UASB 反应器内水流的上流速度在启动期是经常变化的。

一般在调试进水两周后,可启动回流水池的循环水泵(泵前设置过滤器),利用回流使 UASB 的升流速度恒定,而恒定的升流速度可以保持污泥床稳定的膨胀和搅动,避免产生配水不均匀和沟流等现象。

内循环还有以下优点:

① UASB 出水一般含有一定的碱度,而调节池出水由于预酸化作用一般又呈弱酸性,出水再循环可以中和进水中的酸;

② 出水循环可保证形成足够的水量“洗出”絮状污泥,加快颗粒污泥的形成;

③ 可以稀释突然增高的 COD 浓度,缓冲冲击负荷的不利影响;

④ 当 UASB 工作不正常或需要关闭时,可以通过内循环尽可能地降低厌氧池内的 VFA。

5.5 剩余污泥的外排

一般来说,UASB 反应器中存有 1 m 高的污泥时系统可很好地工作。要使 UASB 反应器存在过剩污泥,每个取样点在沉积 1 h 后的污泥体积浓度(SV)应如表 1 所示。

表 1 UASB 存在剩余污泥时各取样点的 SV 值

Tab. 1 SV value at each sample point in the presence of sludge in UASB

取样点	距池底高度/m	SV/(mL·L ⁻¹)
SP1	0.3	700~1 000
SP2	0.6	700~1 000
SP3	0.9	700~1 000
SP4	1.2	500~700
SP5	2.0	500~700
SP6	4.0	300~500

UASB 中的剩余污泥通过排泥管路排放至贮存槽中。需要注意的是,存放期间污泥应完全浸没在水中,如有需要马上可以取用。

6 内循环 UASB 反应器的运行

6.1 UASB 的控制负荷

在本例中 UASB 反应器采用中温发酵,设计容

积负荷为 $7.0 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,设计 HRT 为 6.0 h 。该啤酒公司排放废水为 $3\ 500 \sim 4\ 500 \text{ m}^3/\text{d}$,进水 COD 浓度为 $1\ 200 \sim 2\ 200 \text{ mg/L}$ 。在此条件下,系统调试完成后 UASB 运行良好,其 COD 去除率一般为 85% 以上,出水水质稳定。

但需要注意,更高的容积负荷或更短的停留时间可能会使 UASB 反应器的污泥系统发生故障。也就是说,在更高负荷条件下,可能只有少量的 VFA 转换成甲烷。

6.2 pH 值

pH 值是废水厌氧处理最主要的影响因素之一,甲烷菌适宜的生长环境 pH 值范围为 $6.5 \sim 7.8$ 。这一范围是指污泥所处的反应器内的 pH。进水 pH 最好也在这一范围,但实际操作时可以略微超出,在内回流条件下 UASB 在进水 pH 值为 $6.0 \sim 8.5$ 范围内也可稳定运行。但在此范围之外,细菌就可能中毒,从而失去活性。为防止颗粒污泥的钙化,加药调整 pH 值宜用 NaOH 或 NaHCO_3 ,而不宜用生石灰。

6.3 温度

保证甲烷菌活性较高的温度为 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$,而在 $37 \sim 38 \text{ }^\circ\text{C}$ 时为最佳。在调试过程中,初期室外温度及厌氧池内水温都较低($12 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$),这给厌氧菌种的增殖带来很不利的影响。但由于池体结构设计合理(均匀布水和“双倍效应”的分离器有效防止了厌氧菌种的流失),抗干扰能力强,所以顺利渡过了该不利阶段。随着温度的上升,UASB 反应器内的温度也逐渐升高到接近 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,在温度变化期间调试运行时相应加大了内循环的比例,实际运行结果表明,UASB 的实际处理能力和污泥性状未出现明显的异常。

6.4 营养物质

为使 UASB 反应器中的细菌能正常生长,应适量补充氮和磷,废水中 COD/N/P 的比例应为 $1\ 000/7.5/1.5$ 左右。除了氮和磷外,UASB 反应器厌氧消化还需要一些微量元素,主要包括 Fe、Mg、Ca、Mn、Ni、Zn、B、Mo、Se 等。由于啤酒废水中的营养物质丰富,故在调试和实际运行中一般不必投加营养物质。

6.5 毒性物质

许多元素/化合物可促进甲烷菌生长,但超过一定浓度又会抑制其生长。为了保证系统的正常运

行,要特别强调一些常见元素/化合物的最大允许量(见表 2)。

表 2 可能对甲烷菌产生毒性的物质浓度最大值
Tab.2 Maximum concentration of substance producing toxicity for methane bacteria

常见元素/化合物	化学表达式	最大值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
苯	C_6H_6	400
氯化物	Cl^-	8 000
钙离子	Ca^{2+}	4 500
六价铬	Cr^{6+}	1
阴离子洗涤剂	LAS(活性物)	100
铁离子	Fe^{2+} 、 Fe^{3+}	500
硫酸根	SO_4^{2-}	5 000

甲烷菌有时会因氨中毒而使其活性受到抑制,使得对 VFA 去除率下降。在这种情况下,加大内循环力度,对以冲击性负荷形式进入的富氮废水进行缓冲,或降低进水 pH 值,可减轻抑制效应。

另外,当废水中游离的 H_2S 浓度达到 80 mg/L 时,可能会发生硫化物中毒现象。可采取如下一些办法解决:

- ① 调节 pH 值,使得 UASB 工作在 pH 值偏高的范围($7.5 \sim 8.0$),这样可减少游离 H_2S 的浓度;
- ② 把铁盐加到 UASB 中,使硫化物从溶液中析出,这可大大增加污泥中灰分含量;
- ③ 使 UASB 工作在偏高的许可温度范围中,以便减少游离 H_2S 的浓度。

6.6 UASB 的重新启动

啤酒生产的季节性很强,一般冬季停产检修期长达 4 个月以上。若单纯用好氧工艺处理啤酒生产废水,重新启动时间过长。而 UASB 允许在停产期停止运行,春季系统重新启动较容易、恢复速度快,一般不到 1 个月就可获得很好的污泥活性和稳定的处理效果。UASB 在完全停止运转前应先通过内循环尽可能降低池内的 VFA,停运后要使厌氧污泥完全浸没在水中。由于啤酒厂每年 4 月开始生产并逐渐增加产量,所以废水处理负荷是逐渐增加的,这非常有利于厌氧池的恢复。

7 结语

① 采用 UASB + 好氧工艺处理啤酒生产废水,调试稳定后 UASB 对 COD 的去除率 $> 85\%$,整个系统每去除 1 kgCOD 电耗为 $0.30 \sim 0.35 \text{ kW} \cdot \text{h}$,吨水处理费用较低。

② 在实际调试启动与运行管理中,主要应控



制好 UASB 的容积负荷、进水 pH 值和温度,防止超标的有毒物质进入池内。

③ 设置回流水池将 UASB 出水部分回流,可极大地保证配水均匀性,缓冲进水 pH 值、温度及 COD 变化的不利影响,保证系统运行的稳定性。

④ 在三相分离器上面加装一“横向流”斜板分离器,可有效地以“双倍效应”来防止颗粒污泥的损失。

⑤ 厌氧污泥可在 UASB 反应器中保存数月而不失活性,系统重新启动较容易、恢复速度快,非常适合处理啤酒废水。

⑥ 好氧段剩余污泥返回 UASB 反应器进行消化处理,可进一步降低整个系统的污泥产量。

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.

[2] 张自杰. 环境工程手册[M]. 北京:高等教育出版社,1996.

[3] 国家环境保护局. 水污染防治及城市污水资源化技术[M]. 北京:科学出版社,1993.

[4] 韩洪军,刘立凡,衣春敏,等. UASB + AF 反应器快速启动[J]. 中国给水排水,2001,17(2):53-54.

[5] 张振家. 啤酒废水采用升流式厌氧污泥床处理的经济分析[J]. 中国给水排水,1998,14(1):48-49.

[6] 王凯军. UASB 工艺系统设计方法探讨[J]. 中国沼气,2002,20(2):18-23.

[7] 刘林. 斜板三相分离器 UASB - 生物接触氧化工艺处理果汁生产废水[J]. 环境工程,2003,21(1):15-17.

电话:(0551)2816288/2821249

E-mail:kuangwu1972@126.com

收稿日期:2006-03-30