

UASB 反应器处理低磷啤酒废水的二次启动 试验研究

马兴冠,铁玉瑞,袁雅姝,张丽伟

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究 UASB 反应器在低磷环境下二次启动的过程及其主要影响因素,并确定该条件下二次启动的时间。方法 重新启动已停运 5 个月的 UASB 反应器,利用初次启动时反应器内已形成的成熟颗粒污泥作为该二次启动的种泥,以模拟低磷啤酒废水为该反应器的进水。采用动态连续进水的方式将启动过程分为 3 个阶段进行,分析 UASB 反应器在不同碳磷质量比下对废水中 COD 的去除效果,并对反应器的容积负荷、水力停留时间、温度、pH 等运行参数进行分析。结果 整个启动过程历经 45 d。启动前期,反应器状态不稳定,有污泥流失现象发生,随着反应器运行逐渐稳定,低磷啤酒废水 COD 去除率最高可达 71%,整个过程中未出现污泥酸化现象。结论 UASB 反应器二次启动处理低磷啤酒废水稳定、高效,且完成二次启动比完成初次启动耗费的时间少近一半,节省了大量的人力、财力、物力,为 UASB 反应器的二次启动应用于实际工程提供了试验方法及理论依据。

关键词 UASB 反应器;低磷啤酒废水;二次启动;运行参数

中图分类号 X703;X797

文献标志码 A

The Secondary Start-up of UASB Reactor for Low Phosphorus Beer Wastewater Treatment

MA Xingguan, TIE Yurui, YUAN Yashu, ZHANG Liwei

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The secondary start-up of the UASB reactor in a low-phosphorus environment and its main influencing factors were studied to determine the time for the second start-up under this condition. The UASB reactor restarted has been out of service for 5 months. The mature particles formed in the reactor during the first startup are used as the mud for the second startup, and simulating low phosphorus beer wastewater as the reactor influent. The startup process included 3 stages. COD removal effect, volumetric loading rate, hydraulic retention time, temperature and pH

收稿日期:2020-02-09

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100503)

作者简介:马兴冠(1972—),男,教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术方面研究。

were analyzed under the condition of influent with different carbon and phosphorus mass ratios in the UASB reactor. As a result, the entire startup process took 45 days. In the early stage of start-up, the state of the reactor was unstable and sludge loss occurred. With the operation of the reactor becoming stable, the COD removal rate of low phosphorus brewery wastewater could reach 71%, and no sludge acidification occurred in the whole process. The time to complete the secondary start-up is less than half of that to complete the initial start-up, which saves a lot of manpower, energy and material resources. It provides the experimental method and theoretical basis for the second start-up of UASB reactor to be used in practical engineering.

Key words: Up-flow anaerobic sludge bed; Low Phosphorus beer wastewater; secondary startup; Operating parameters

我国是世界啤酒生产大国之一。每生产 1 L 啤酒就会造成 3 ~ 10 L 的啤酒废水,而大量啤酒废水的排放对环境造成了严重的污染^[1-4]。啤酒废水富含多种有机污染物,其 COD 含量较高,啤酒废水的过量排放会导致水体富营养化,因此采用高效又简便的方法处理啤酒废水显得尤为重要^[5-7]。而 UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Bed) 反应器作为一种有着紧凑结构的高效厌氧生物反应器,因其构造简单,操作简便、处理成本低,容积利用率高,*HRT* 短,抗冲击负荷力强,所形成的颗粒污泥沉降性能及活性较好,近年来在国内外实际工程中被广泛应用,尤其在处理啤酒废水等中高浓度有机废水时,该反应器适应性更强^[8-9]。

UASB 反应器的二次启动是指直接将成熟颗粒污泥作为种泥的启动。培养出活性高、沉降性好的适于待处理废水水质的厌氧污泥,这是大多数 UASB 反应器启动成功的标志^[10]。笔者重新启动已停运 5 个月的 UASB 反应器,二次启动比完成初次启动耗费的时间少近一半,节省了大量的人力、财力、物力,为 UASB 反应器的二次启动应用于实际工程提供了试验方法及理论依据。

1 试 验

1.1 试验装置

试验所用 UASB 反应器装置如图 1 所示。

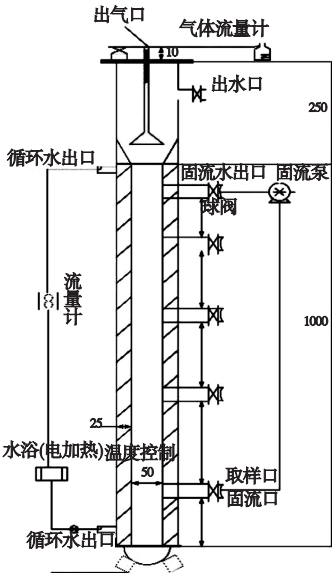


图 1 UASB 反应器装置图

Fig. 1 UASB device

该 UASB 系统由内径 90 mm 的透明有机玻璃组成,整体高 1.3 m,上部为沉淀区,下部为反应区,顶部设有三相分离器,有效容积为 1.96 m³。为方便取样,在该装置侧面每隔 20 cm 处设置 1 个附带球阀的取样口,共设 5 个取样口。

整个反应器装置置于阴凉且无阳光直射的位置,避免阳光直射对反应器造成影响。因厌氧微生物对环境的要求较高,故采用恒温温度控制开关控制其反应温度,同时为避免光照对反应器内厌氧微生物生长代谢的影响,反应器外部使用黑布将其紧紧包裹缠绕。试验采用动态连续进水的方式,使用计量泵将进水输送至 UASB 反应器底部并在底部均匀布水,

通过调节计量泵控制进水在 UASB 反应器内的上升流速,使水流自下而上地流经厌氧污泥床,最终从顶部流入出水桶。

1.2 试验用水

试验进水模拟低磷啤酒废水水质条件,将足量乙酸钠作为碳源, NH_4Cl 为氮源, KH_2PO_4 为磷源,打破原有的碳氮磷质量比为 200:5:1,通过投加 KH_2PO_4 的量来控制进水保持低磷状态,同时加入一定量的微量元素。水质情况如表 1 所示。

表 1 试验用水主要水质指标范围

Table 1 Main water quality indicators for test water

水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
30 ~ 37	6.8 ~ 7.2	900 ~ 1 500	2.8 ~ 3.2

根据进水 COD 质量浓度取一定量的母液进行稀释。每次配水水量为 50 L。按照人工模拟废水配方在原水桶中投加各营养物后加自来水稀释至 50 L,并搅拌均匀。

1.3 测定项目与方法

测定项目及分析方法如表 2 所示。

表 2 测定项目与方法

Table 2 Measurement items and method

水质指标	分析方法
温度	普通水银温度计法
pH	pH 计法
COD	标准重铬酸钾法
TP	钼锑抗分光光度法
VFA	气相色谱法

1.4 接种污泥

UASB 反应器在初次启动时所接种的厌氧污泥来自辽宁省本溪市某啤酒废水处理

厂,试验装置在使用模拟啤酒废水连续运行 8 个月后,终止运行。该反应器内的污泥在初次启动时已经完成颗粒化这一过程,其平均粒径为 1.0 ~ 2.5 mm。

1.5 试验过程

由于性质优良的颗粒污泥是 UASB 反应器运行成功必不可少的重要因素,因此在恢复进水前,从 UASB 反应器底部取样口中取出部分污泥,通过电镜观察发现这些污泥中仍存在平均粒径为 0.5 ~ 2.0 mm 的颗粒状污泥,其污泥质量浓度均在 22 ~ 24 g/L,可知该反应器内污泥仍保持有良好的活性,这也说明该试验可直接利用反应器内原有的成熟颗粒污泥,无需另外投加接种。

试验采用连续进水的方式,将试验过程分 3 个阶段进行,整个试验过程中碳氮质量比保持 200:5 不变。第 1 阶段(适应期:1 ~ 14 d),调节碳磷质量比为 200:0.4,每天进水 12.5 L,进水 COD 质量浓度控制在 900 mg/L 左右,这一阶段旨在恢复系统内颗粒污泥活性并把活性较差的污泥排出反应器。第 2 阶段(负荷提升期:15 ~ 29 d)该阶段碳磷质量比调至 200:0.5,并将 COD 进水质量浓度逐渐提升至 1 200 mg/L,保持 $HRT=48$ h 不变。第 3 阶段(稳定期:30 ~ 45 d)将 HRT 降至 24 h,碳磷质量比调节至 200:0.6,并将进水 COD 质量浓度提升至 1 500 mg/L,反应器每天进水 25 L。该试验以 COD 去除率连续 5d 保持在 65% 以上作为该二次启动成功的标志。试验过程中各项指标值如表 3 所示。

表 3 试验过程各项指标值

Table 3 Various index values during the experiment

步骤	时间/d	HRT/h	碳磷质量比	进水流量/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	进水 pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$	$\rho(\text{进水 COD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
第 1 阶段	1 ~ 14	48	200:0.4	15 ~ 25	6.8 ~ 7.2	30 ~ 37	900 ~ 1 000
第 2 阶段	15 ~ 29	48	200:0.5	15 ~ 25	6.8 ~ 7.2	30 ~ 37	1 000 ~ 1 200
第 3 阶段	30 ~ 45	24	200:0.6	15 ~ 25	6.8 ~ 7.2	-30 ~ 37	1 200 ~ 1 500

2 结果与分析

2.1 进出水 COD 变化及去除效果

进出水 COD 变化及去除效果如图 2 所示。

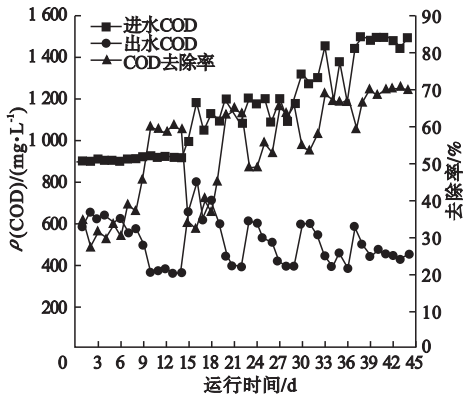


图2 进出水 COD 的去除率
Fig.2 Removal of COD

从图2中可以看出,在二次启动的第1阶段,进水 COD 质量浓度控制在 900 mg/L 左右,使反应器逐渐适应进水水质,同时调节碳磷质量比为 200:0.4,由图可知,启动初始阶段,出水 COD 去除效果并不理想,这是由于启动过程中大量的破碎污泥细粒随水流排出,污泥流失导致出水悬浮物量大,COD 值高,导致去除率仅在 30% 左右,去除效果较差,也说明磷浓度较低会抑制反应器内厌氧微生物的生长,而在该反应器运行的第 10 d, COD 去除率突跃至 60%,推测是该反应器内原有的厌氧微生物逐渐适应了新的环境,于是恢复了其部分活性。第 2 阶段,提高进水 COD 质量浓度至 1 200 mg/L,并将碳磷质量比调至 200:0.5, COD 去除率最初迅速降低,而后缓慢上升,5 d 后去除率再次回升至 60% 以上,说明 UASB 反应器内的厌氧微生物数量不断增加,活性不断增强,到第 2 阶段末, COD 去除率达到 65% 左右,去除效果较第 1 阶段更为明显,然而该 COD 去除率较正常啤酒废水低,这是由于低磷环境抑制了厌氧反应器内微生物的活性,从而影响其对有机污染物的去除。第 3 阶段,将 HRT 降至

24 h,进水 COD 质量浓度控制在 1 200 ~ 1 500 mg/L,污泥负荷增大,调节进水碳磷质量比为 200:0.6,起初, COD 去除率迅速下降,且出水中伴有大量失活污泥,后又缓慢上升。到启动后期,出水 COD 从 800 mg/L 降至 500 mg/L 以下, COD 连续 1 周稳定在 68% 以上,二次启动成功。可见,经 UASB 反应器处理可降解低磷啤酒废水中大部分 COD,并且当碳磷质量比为 200:0.6 时反应器内厌氧微生物能相对更好地发挥其活性从而去除废水中 COD。

2.2 出水挥发性脂肪酸(VFA)的变化

挥发性脂肪酸含量过高会抑制甲烷菌的生长,导致厌氧反应器恶化,故 VFA 作为二次启动试验的主要控制参数之一^[11-14]。 VFA 随时间变化曲线如图 3 所示。

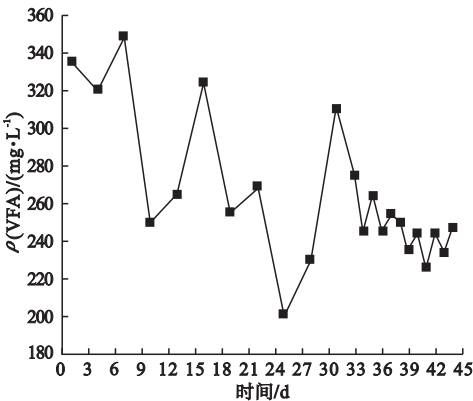


图3 VFA 随运行时间变化曲线图
Fig.3 The change curve of VFA over time

由图3可知,出水 VFA 在二次启动在第 1、2 阶段波动较大,这是由于反应器在启动前期,,反应器耐冲击负荷力不稳定,甲烷菌生长代谢速率较慢,而到启动后期,由于 UASB 反应器内 pH 稳定在 (7.0 ± 1) ,为甲烷菌提供了适宜的酸碱环境,使其活性提高,出水挥发性脂肪酸稳定在 250 mg/L 以下,说明该 UASB 反应器运行达到稳定,且第 3 阶段 HRT 降至 24 h 并未对出水 VFA 产生影响,可说明 VFA 不受水力停留时间变化的影响。

2.3 COD 去除率影响因素分析

2.3.1 容积负荷对 COD 去除率的影响

容积负荷是厌氧反应器运行过程中的重要参数。提高反应器容积负荷能缩短二次启动的时间,但负荷过高会导致在反应器内本应匀速上升的废水其流速突增,导致反应器内污泥流失、反应器酸化、挥发酸产量增多,影响甲烷菌的生长环境,导致污泥量的增加受到抑制等一系列不利影响^[15]。因此试验过程中应注意控制负荷提高的速率。试验通过缩短 HRT 并控制进水 COD 质量浓度的方式逐步提升反应器的负荷。容积负荷与 COD 去除率变化曲线如图 4 所示。

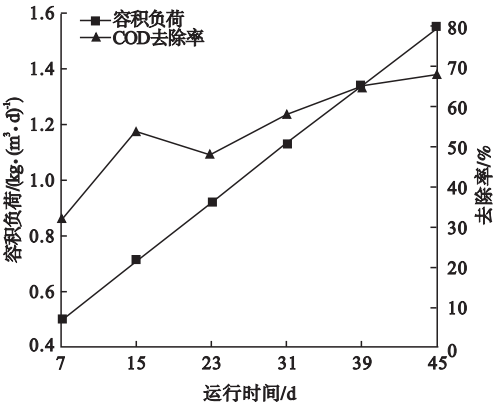


图 4 容积负荷与 COD 去除率变化

Fig. 4 Curve of volume loading rate and COD removal rate

前 7 天,由于反应器的启动刚刚进行,因此进水 COD 质量浓度不宜过高,控制在 900 mg/L,此时反应器容积负荷较低,COD 去除效果不佳,往后逐渐增加反应器进水浓度,缩短水力停留时间至 24 h,COD 容积负荷逐渐增高,最终达到 1.55 kg/(m³·d),COD 去除效果较好。

2.3.2 HRT 及水力负荷的变化对 COD 去除率的影响

HRT 指废水在反应器内部平均停留的时间,其本质上是待处理废水与反应器内厌氧微生物反应时间的平均值,其在一定程度上能够反映废水的处理程度^[16],因此试验可将 HRT 作为二次启动的有效控制参数。

在启动的第 1 阶段、第 2 阶段,反应器 HRT=48 h,该 UASB 反应器在启动前期出水相对浑浊,且出水水流中常伴有细小颗粒污泥和少量白色絮凝物,这说明前期出现了部分污泥流失的现象,导致 COD 的去除效果不理想。在二次启动的第 3 阶段,将反应器 HRT 降至 24 h,COD 经历了先迅速下降而后又缓慢回升的过程,在该阶段,原先反应器内本已失活的污泥,其活性又逐渐得以恢复,COD 去除率也随之逐渐提高,出水效果得到显著改善。

水力负荷在 UASB 反应器启动过程中起水力筛选作用^[17]。通过调节水力负荷,观察出水污泥流失情况,确定该反应器水利负荷最佳值为 0.6 m³/(m²·h),在该水力负荷下,反应器可以将具有活性的厌氧微生物及厌氧污泥保留在反应器内,而失去活性的污泥及死亡微生物残骸则随出水流出。

2.3.3 温度及进出水 pH 对 COD 去除率的影响

图 5 为温度及进出水 pH 随启动时间的变化曲线。

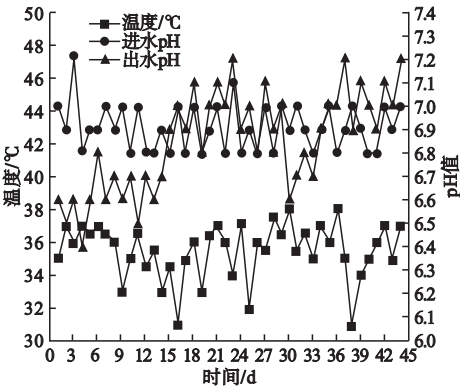


图 5 温度、进出水 pH 随启动时间的变化曲线

Fig. 5 Change curve of temperature and pH of inlet and outlet water with startup time

由于厌氧微生物对温度的波动表现较敏感,当温度大于 37 °C 或小于 30 °C 时,反应器内微生物的活性会遭到抑制^[18]。故在启动过程中使用恒温温度控制开关将温度控制在 30 ~ 37 °C。排除温度变化对厌氧微生物的

不利影响。 pH 是厌氧产氢过程中最重要的环境因素,可直接影响产氢菌的活性和代谢途径等, pH 值小于 6.5 或大于 8.2 都会抑制厌氧微生物的生长及代谢^[19-24],因此 pH 值的控制显得尤为重要。二次启动期间,进水的 pH 值被严格控制在 6.8~7.2。由图 5 可知,启动初始阶段,由于反应器内有机物被厌氧微生物不断的降解造成了反应器内挥发酸累计,使得出水 pH 值始终低于进水 pH 值,COD 的去除率效果不佳。随着该 UASB 反应器启动时间的增加,底部污泥不断得以驯化,厌氧微生物不断稳定,使得产甲烷菌不断繁殖,COD 的去除率显著提高,最终稳定在 70% 左右。此时,出水 pH 基本稳定在 7.0,且几乎不受进水 pH 影响,并一直比进水 pH 值高,满足污水排放标准。

3 结 论

(1)UASB 反应器二次启动试验当运行稳定时,COD 的去除率最高可达 71%,证明该反应器处理低磷啤酒废水是稳定且高效的,且 UASB 反应器仅作为预处理单元就可将啤酒废水中大部分有机污染物处理掉,有利于促进后续工艺的处理。

(2)相比进水水质符合最佳碳氮磷质量比为 200:5:1 的 UASB 反应器,该二次启动反应器对 COD 去除效果相对较差,这是由于低磷环境抑制了厌氧微生物正常的生理代谢活动,从而使得反应器内颗粒污泥活性未激发完全,导致有机物的去除相对不够彻底。说明厌氧反应器的启动中,应尤其注重厌氧微生物的生存环境,供给足够的营养元素才能使其充分发挥活性,并能有效去除废水中有机污染物。

(3)UASB 反应器的二次启动,可直接利用反应器内原始的成熟颗粒污泥,无需另外接种。缩短了二次启动的时间,也将促进 UASB 反应器在未来得以广泛应用。且相比初次启动耗时 80 d,二次启动仅历时 45 d,启

动速率快、效率高。验证了 UASB 反应器二次启动的可行性,为该反应器的二次启动提供了科学依据和试验方法。

参考文献

- [1] 宗刚,赵晓东. 市场经济条件下的中国啤酒业发展历程与实证分析[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版),2013,11(2):110-115.
(ZONG Gang,ZHAO Xiaodong. The development and empirical analysis of China's beer industry under the conditions of market economy [J]. Journal of Beijing union university (humanities and social sciences), 2013, 11 (2): 110-115.)
- [2] FILLAUDEAU L, DAUFIN G. Water, wastewater and waster management in brewing industries [J]. Journal of cleaner production, 2006,14(5):463-471.
- [3] BRAEKEN L, VANDER B, VANDE C. Egeneration of brewery waste water using nanofiltration [J]. Water research, 2004, 38 (13):3075-3082.
- [4] 汤金如,陈国栋,李璐,等. 低温下 UASB 反应器处理高浓度有机废水可行性研究[J]. 净水技术,2007,26(3):45-47.
(TANG Jinru,CHEN Guodong ,LI Lu,et al. High concentration organic waste water's feasibility research using up-flow anaerobic sludge bed reactor at low temperature [J]. Water purification technology, 2007, 26 (3): 45-47.)
- [5] 朱月海. 啤酒废水处理工艺及浅析[J]. 给排水,1999,25(1):32-36.
(ZHU Yuehai. Process and analysis of beer wastewater treatment [J]. Water & wastewater,1999,25(1):32-36.)
- [6] PARAWIRA W, KUDITA I, NYANDOROH M G. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge [J]. Process biochemistry,2005,40(2):593-599.
- [7] FILLAUDEAU L, BOSSUSSUER B, MOREAU A, et al. Investigation of rotating and vibrating filtration for clarification of rough beer [J]. Journal of food engineering,2007,80 (1):206-217.
- [8] 傅金祥,于兴,孙文章. UASB 污泥颗粒化试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(1):133-136.
(FU Jinxiang, YU Xing, SUN Wenzhang. The experimental study of the granulation of the sludge of UASB [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006, 22 (1):133-136.)
- [9] 段雪梅,李道荣,潘慧云. UASB 反应器处理啤酒废水的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2005,26(3):81-83.
(DUAN Xuemei, LI Daorong, PAN Huiyun.

- Research on the beer waste water treating with upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. Journal of Henan university of technology (natural science edition), 2005, 26 (3): 81-83.)
- [10] 易赛莉, 雒文生. UASB 反应器常温下处理生活污水的二次启动研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 79-81.
(YI Sali, LUO Wensheng. Secondary start-up of UASB reactor for dealing with low strength wastewater at normal temperature [J]. Environmental science & technology, 2006, 29 (6): 79-81.)
- [11] 邓志毅. 新型厌氧反应器 UASB 处理生活污水试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
(DENG Zhiyi. A new anaerobic reactor; UASB treatment of domestic sewage [D]. Nanning: Guangxi University, 2004.)
- [12] 陈西伟. 柠檬酸有机废水生物处理过程中的试验探讨[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2010, 10(6): 66-68.
(CHEN Xiwei. Exploring the experiment of citric acid organic waste water treating process [J]. Journal of Langfang normal university (natural science edition), 2010, 10 (6): 66-68.)
- [13] 韩洪军, 刘淑彦, 张宝杰. 水解酸化处理啤酒废水的试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(6): 97-99.
(HAN Hongjun, LIU Shuyan, ZHANG Baojie. Approach on treatment brewery wastewater by using hydrolytic acidification without surplus sludge [J]. Journal of Harbin university of civil engineering and architecture, 1999 (6): 97-99.)
- [14] 刘志杰, 陆正禹, 梁永明, 等. UASB 工艺处理啤酒厂废水的生产性试验研究[J]. 中国沼气, 1993, 11(4): 1-5.
(LIU Zhijie, LU Zhengyu, LIANG Yongming, et al. Experimental study with a full-scale UASB process for treatment of brewery wastewater at ambient tempeoatnre [J]. China biogas, 1993, 11(4): 1-5.)
- [15] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社 1999.
(SHEN Yaoliang, WANG Baozhen. New technology of waste water biological treatment [M]. Beijing: China Environ mental Science Press, 1999.)
- [16] 李胜男. 常温条件下 UASB 反应器处理餐厨垃圾的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
(LI Shengnan. Experimental study on the treatment of kitchen waste by UASB reactor at room temperature [D] Changsha: Hunan University, 2012.)
- [17] 安爽. HRT 对内循环厌氧反应器处理啤酒废水的影响[J]. 辽宁化工, 2018, 47(10): 992-995.
(AN Shuang. Effect of HRT on the treatment of brewery wastewater in internal circulation anaerobic reactor [J]. Liaoning chemical industry, 2018, 47(10): 992-995.)
- [18] 张传兵, 李东艳, 王慧芳. UASB 反应器处理啤酒废水启动运行研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(7): 43-45.
(ZHANG Chuanbing, LI Dongyan, WANG Huifang. Study on the start-up operation of UASB reactor for treating brewery wastewater [J]. Technology of water treatment, 2010, 36 (7): 43-45.)
- [19] 程婷, 龚淑芬, 徐建飞, 等. 某啤酒厂污水处理工艺运行实例[J]. 山东化工, 2019, 48(12): 204-207.
(CHENG Ting, GONG Shufen, XU Jianfei, et al. Abrewery sewage treatment process operation example [J]. Shandong chemical industry, 2019, 48(12): 204-207.)
- [20] 刘川, 戴友芝, 王海阳, 等. UASB 反应器的二次启动及高温冲击试验[J]. 水处理技术, 2011, 37(9): 116-119.
(LIU Chuan, DAI Youzhi, WANG Haiyang, et al. Secondary start-up of UASB reactor and effect of thermal shock on activity of anaerobic sludgr [J]. Technology of water treatment, 2011, 37(9): 116-119.)
- [21] 李洋. UASB 反应器快速启动实验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
(LI Yang, Experimental study on rapid start-up of UASB reactor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.)
- [22] 赵静, 张洋. UASB 反应器的优化研究进展[J]. 化工管理, 2019(31): 8-9.
(ZHAO JING, Zhang Yang. Research progress on optimization of UASB reactor [J]. Chemical engineering management, 2019(31): 8-9.)
- [23] 邹义龙, 冯斐, 邓冕, 等. UASB + CASS 组工艺处理啤酒生产废水[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(3): 224-227.
(ZOU Yilong, FENG Fei, DENG Mi, et al. UASB + CASS group process to treat beer production wastewater [J]. Journal of Nanchang university (engineering science edition), 2020, 42(3): 224-227.)
- [24] 张薇薇. UASB + A/O 工艺在啤酒废水处理的工程应用[J]. 环境与发展, 2019, 31(6): 35-36.
(ZHANG Weiwei. Engineering application of UASB + A/O process in beer wastewater treatment [J]. Environment and development, 2019, 31(6): 35-36.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)